



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Fakulta pedagogická

Katedra aplikované fyziky a techniky

Bakalářská práce

Měření tloušťky vrstev pomocí
ultrazvuku s důrazem na měření tenkých
vrstev z nekovových materiálů za pomoci
měřicího přístroje TT-100

Vypracoval: Petr Javůrek

Vedoucí práce: PaedDr. Bedřich Veselý, Ph.D.

České Budějovice 2015

Prohlašuji, že svojí bakalářskou práci na téma Měření tloušťky vrstev pomocí ultrazvuku s důrazem na měření tenkých vrstev z nekovových materiálů za pomoci měřicího přístroje TT-100 jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, to v nezkrácené podobě, elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

Datum:

Podpis.....

ANOTACE

V úvodu práce je popsána problematika měření tloušťky vrstev pomocí ultrazvuku s důrazem na měření tenkých vrstev z nekovových materiálů za pomoci měřicího přístroje TT-100. V další části je uveden vývoj měření pomocí ultrazvuku. V praktické části je provedeno porovnání s ostatními metodami a vypracování metodické části pro měření s přístrojem TT-100.

Klíčová slova:

ultrazvuk, měření tloušťky, TT-100

ABSTRACT

The introduction is focused on the measurement of layer thickness with ultrasound. The main emphasis is on the measurement of thin layers made of non-metal materials with the use of the TT-100 instrument. The next part describes the development of ultrasound technics. The practical part of this thesis contains the methodology how to measure with the TT-100 instrument as well as a comparison with other methods commonly used.

Keywords:

Thickness measurement, TT-100, ultrasound.

PODĚKOVÁNÍ

Na úvod bych velice rád poděkoval panu PeadDr. Bedřichu Veselému, Ph.D. za pomoc a odborné vedení při psaní mé bakalářské práce. Dále za jeho trpělivost a cenné rady, které mi dopomohly dovést tuto práci k úspěšnému konci.

Obsah

ÚVOD.....	7
1.1 Cíle práce	8
2. VYUŽITÍ ULTRAZVUKU	9
3. ULTRAZVUK.....	12
4. METODY POUŽÍVANÉ PŘI MĚŘENÍ TLOUŠTĚK ULTRAZVUKEM	12
4.1 Impulsová odrazová metoda	13
4.2 Metoda vícenásobných ech	14
4.3 Srovnávací metoda.....	14
4.4 Metoda měrného impulsu.....	14
4.5 Rezonanční metoda.....	15
5. TLOUŠŤKOMĚRY.....	16
6. OMEZENÍ PŘI ZKOUŠENÍ ULTRAZVUKEM	18
6.1 Doporučení pro měření tloušťky stěny.....	18
7. SROVNÁNÍ NEJPOUŽÍVANĚJŠÍCH TLOUŠŤKOMĚŘŮ.....	22
7.1 Ultrazvukový tloušťkoměr Schut SA 40	22
7.2 Ultrazvukový tloušťkoměr Digi Check 2000	23
7.3 Ultrazvukové tloušťkoměry řady DM 4	24
7.3.1 Standardní sondy pro tloušťkoměry řady DM4.....	25
8. SROVNÁNÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ S 3D PŘÍSTROJEM	26

9. NEJVHODNĚJŠÍ DRUHY MĚŘENÍ V LABORATORNÍM PROSTŘEDNÍ PEDAGOGICKÉ FAKULTY JU	28
10. PODROBNÝ NÁVOD NA MĚŘENÍ S ULTRAZVUKOVÝM TLOUŠŤKOMĚREM TT-100	30
10.1 Příslušenství ultrazvukového tloušťkoměru	30
10.2 Příprava na testování	30
10.3 Popis TT-100	31
10.4 Postup měření s ultrazvukovým tloušťkoměrem	32
10.5 Kalibrace přístroje TT-100.....	32
10.6 Kalibrace na měření tloušťky při znalosti rychlosti	33
10.7 Kalibrace pro měření rychlosti při znalosti tloušťky.....	33
11. POSTUP MĚŘENÍ TLOUŠŤKY NEKOVOVÝCH MATERIÁLŮ ULTRAZVUKOVÝM TLOUŠŤKOMĚREM TT-100	34
11.1 Postup měření A	34
11.2 Postup měření B.....	36
12. TABULKA RYCHLOSTÍ ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKU V MATERIÁLECH.....	38
ZÁVĚR.....	39
Seznam informačních zdrojů	40
Seznam užitých literatury	40
Internetové zdroje	40
Seznam obrázků	41
Seznam tabulek	42

Úvod

Práci zaměřenou na ultrazvuk jsem si vybral, protože se zajímám o technické principy měření. Ultrazvuk je vlnění, jehož fyzikální podstata je stejná jako u zvuku, ale frekvence je vyšší než 20kHz. Tato frekvence leží nad hranicí slyšitelnosti lidského ucha, proto je ultrazvuk pro člověka neslyšitelný. Část ultrazvukového spektra je však slyšitelná pro řadu živočichů jako jsou psy, delfini nebo netopýři.

Způsoby využití ultrazvukového měření jsou velice obsáhlé a zasahují hned do několika oborů. Ve zdravotnictví je ultrazvuk využíván jako diagnostický nebo léčebný prostředek. Využívají se zde dva druhy ultrazvuku a to pasivní a aktivní. Pasivní ultrazvuk je využíván jako diagnostická metoda. Aktivní ultrazvuk umožňuje v těle provádět změny a zákroky neinvazivním způsobem. Podstatné využití ultrazvuku je také v zemědělství, kde se jeho pomocí nastavuje výška postřiku, aby kopírovala terén a zajistila kontinuitu postřiku. Další využití se nabízí ve svařování ultrazvukem, jako způsob spojování technických termoplastických hmot. V neposlední řadě se také ultrazvuk používá k defektoskopii, neboli nedestruktivnímu testování svárů po svařování nebo k posouzení stavu materiálů vystavených korozi. K měření tloušťky materiálu se používají ultrazvukové tloušťkoměry.

V práci jsem se zaměřil na měření s Ultrazvukovým tloušťkoměrem TT-100, jeho použití a porovnání naměřených výsledků s výsledky jiných přístrojů.

1.1 Cíle práce

Práce je zaměřena na měření tloušťky pomocí ultrazvuku. Ze zadání vyplývají tyto dílčí cíle práce:

Didakticky zaměřené teoretické cíle:

- Popis principů ultrazvukového měření z dostupné literatury, dále pak tyto informace analyzovat, utřídit, vybrat vhodná témata pro výuku a pojmout je tak, aby byla dobře pochopitelná, názorná a dobře použitelná ve výuce
- Vypracování přehledného a srozumitelného textu, který bude použitelný jako praktický metodický návod pro postup měření tloušťky materiálu přístrojem TT-100
- Výběr a sestavení charakteristických typů úloh pro měření tloušťky přístrojem TT-100 na pedagogické fakultě a vytvoření vzorového postupu a způsobu zpracování podle tohoto zadání

Odborně praktické cíle:

- Dopracování některých chybějících hodnot nutných pro měření přístrojem TT-100
- Zpřesnění některých pojmů a údajů vycházejících z návodu k užití přístroje TT-100
- Stanovení vhodnosti použití přístroje TT-100 v technické praxi i v praxi vyučovací
- Výběr nejfrekventovanějších a nejvhodnějších druhů měření v laboratorních podmínkách pedagogické fakulty se zaměřením na měření tloušťky tenkých vrstev nekovových materiálů pomocí přístroje TT-100
- Odborný popis měření tloušťky tenkých nekovových vrstev tloušťkoměrem TT-100
- Podrobný popis principu přístroje a jeho funkcí pro měření přístrojem TT-100

2. Využití ultrazvuku

Ultrazukové vyšetření je běžně užívanou metodou ve zdravotnictví. Používá se k vyšetřování měkkých tkání, protože ultrazvuk nepronikne kostmi. Naopak dobře zobrazuje měkké tkáně a v současnosti nejsou známa žádná rizika nebo vedlejší účinky ultrazukových vyšetření ani pro dospělého pacienta, ani pro nenarozený plod. Nové technologie v oblasti hardware a software ultrazukových přístrojů nám vedle klasického UZ zobrazení umožňují vytvářet prostorové rekonstrukce. Ve zdravotnictví je ultrazvuk využíván jako diagnostický nebo léčebný prostředek. Využitím ultrazvuku byla nahrazena některá mnohdy bolestivá invazivní vyšetření, neinvasivními vyšetřeními. Využívají se zde dva druhy ultrazvuku a to pasivní a aktivní. Pasivní ultrazvuk je využíván jako diagnostická metoda, jedná se o ultrazukové vlnění s vysokou frekvencí, které nezpůsobuje žádné změny v těle. Tento druh ultrazvuku se využívá například po proběhlé mozkové mrtvici nebo i preventivně při vysokém krevním tlaku a vysoké hladině cholesterolu. Vyšetření umožňuje odhalit přítomnost aterosklerotického či jiného postižení tepny a stanovit stupeň jejího zúžení. Naopak díky aktivnímu ultrazvuku a jeho působení se dají v těle provádět změny a zákroky neinvasivním způsobem. Je využíván například v případě liposukce ultrazukem.[8]



Obrázek 1 Ultrazvuk – Nemocnice Jihlava [8]

Podstatné využití ultrazvuku je také v zemědělství. Při jízdě stroje po zemědělské půdě ultrazvukové senzory nepřetržitě detekují vzdálenost od zemědělské plodiny a přenášejí tyto záznamy ve formě analogových hodnot do řídicí jednotky vozidla. Výška postřiku se podle těchto hodnot automaticky zvýší nebo sníží, aby kopírovala terén a zajistila konzistentní rozstřík hnojiva nebo pesticidů.



Obrázek 2 Ultrazvukové senzory [1]



Obrázek 3 Svařování ultrazvukem [2]

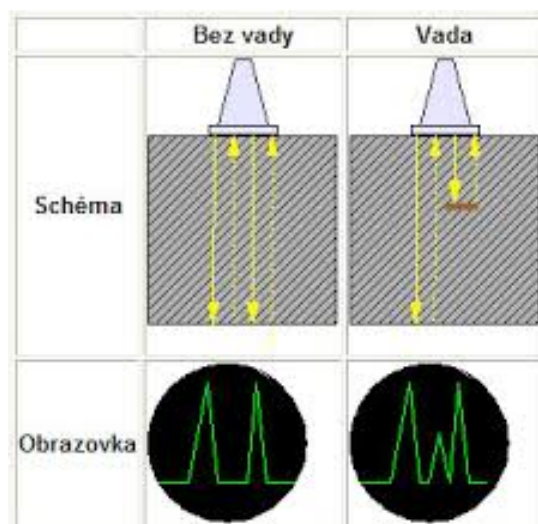
Další využití se nabízí ve svařování ultrazvukem. Jako způsob spojování technických termoplastických hmot se ultrazvukové svařování plně osvědčilo v nejrozmanitějších odvětvích průmyslu. Vlivem vysoké rychlosti procesu a reprodukovatelnosti svařovacích výsledků se tato technika prosadila ve velkosériové výrobě automobilů, elektrotechniky, lékařské techniky a v řadě dalších. Dobré výsledky svařování s ohledem na pevnost, těsnost a optický vzhled se dají docílit jen tehdy, jestliže jsou spojované díly správně

konstrukčně řešené s ohledem na proces a materiál.

Nedestruktivní testování, nebo také defektoskopie označuje metody, které jsou schopny zjistit, bez porušení nebo poškození, vady ve výrobku. Měření tloušťky materiálu pomocí ultrazvuku je aktuálně velice rozšířenou metodou, k dosažení vysoké kvality svařování – defektoskopie svarů (zavařená struska, neprovařenost) a pro kontrolu dosažení kvality odlitků (vměstky, písek).[1]

Dále tato metoda získává údaje pro posouzení stavu zařízení vystavených např. korozi (potrubí, tlakové nádoby, zásobníky) nebo při monitorování technologických procesů jako např. měření tloušťky stěn výlisků (nádrží apod.).

Je možné dosáhnout přesnosti až 0,002 mm. Ultrazvukové tloušťkoměry jsou malé, lehké, spolehlivé, přesné a jednoduše ovladatelné. Sondy s piezoelektrickými měřiči v nich používané pracují na frekvencích 0,5 MHz až 20 MHz. Nižší frekvence se používají při měření silnostěnných materiálů k dosažení potřebného rozsahu prozvučitelnosti nebo při měření materiálů vyznačujících se velkým útlumem. Vyšší frekvence se používají při měření na tenkostěnných materiálech s malým útlumem.



Obrázek 4 Defektoskopie [3]

Nejlépe se ultrazvuk šíří v tuhých látkách a to rychlostí kolem 4000m/s, hůře v kapalinách, rychlostí přibližně 1500m/s, nejhůře se ultrazvuk šíří ve vzduchu, rychlostí asi 350m/s. Ve vakuu se ultrazvuk nešíří vůbec.[6]

Při čištění ultrazvukem je zdrojem měnič napájený z ultrazvukového generátoru, který transformuje vysokofrekvenční energii na akustické vlnění. Tyto měniče jsou přilepeny na stěnu čistící vany, nebo na samostatné bloky, které se umístí do čistící nádoby. Ultrazvuková energie se tak přenáší do čistící kapaliny, kde se mění na mechanické kmitání. V důsledku tohoto kmitání dochází k vytváření obrovského množství vakuových bublinek (tzv. kavitace), v jejichž středu je vysoká mechanická energie, která poruší vazbu mezi znečištěním na čistěný předmět. Uvolněním mechanické energie dochází rovněž k zahřívání kapaliny.

Frekvence používaná při čištění ultrazvukem se pohybuje od 20 kHz (hrubé čištění) po 70 kHz (jemné čištění). Rovněž se používá i vyšší frekvence 70-200 kHz, která je určena pro velmi jemné čištění, např. optických přístrojů.

3. Ultrazvuk

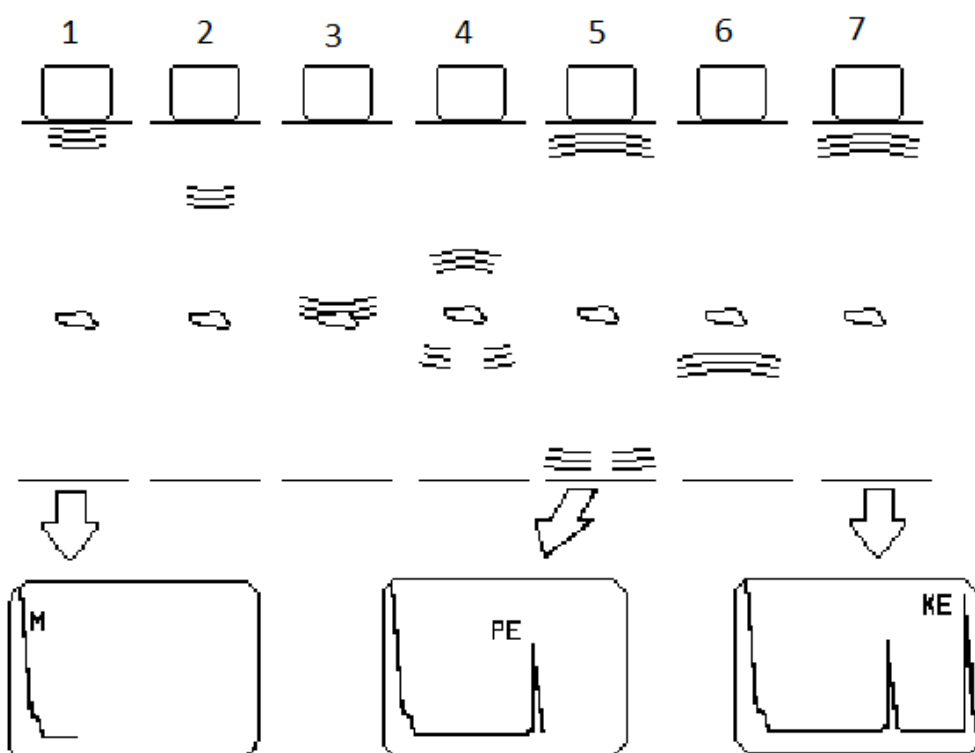
Ultrazvuk má velmi vysokou frekvenci, proto se vyznačuje i velmi krátkou vlnovou délkou. Vlnová délka ultrazvuku je podstatně menší než vlnová délka zvuku, díky tomu není šíření ultrazvuku tolik ovlivněno ohybem. Nejdůležitější pro použití ultrazvuku v měření tloušťky materiálu, ke kontrole kvality materiálu a kontrole mechanických vlastností materiálu je ale jeho odraz od překážek a skutečnost, že je méně pohlcován v kapalinách a v pevných látkách. Ultrazvuk dopadá na přechod dvou materiálů a odráží se zpět. Na základě časového intervalu, který uplyne mezi vysláním signálu v čase t_1 , jeho přijetím v čase t_2 a velikosti rychlosti v šíření ultrazvuku v konkrétním materiálu, z něhož je vzorek vyroben, lze určit vzdálenost l , kterou ultrazvuk urazil, tedy tloušťku měřeného vzorku. V případě kontroly vad materiálu se ultrazvuk odráží od vady výrobku jako je dutina nebo příměs. Tímto způsobem lze zjistit polohu vady.[6]

4. Metody používané při měření tlouštěk ultrazvukem

- Impulsová odrazová metoda
- Metoda vícenásobných ech
- Srovnávací metoda
- Metoda měrného impulsu
- Rezonanční metoda
- Speciální metody

4.1 Impulsová odrazová metoda

Nejdůležitější využití impulsové odrazové metody při měření tloušťek je v tom, že pokud známe rychlost šíření ultrazvuku v měřeném prostředí, je doba průchodu ultrazvuku materiálem úměrná měřené tloušťce. Což znamená, že pokud je ultrazukový přístroj správně seřízen, odpovídá úsek na časové základně mezi počátkem a prvním odrazem ultrazukového svazku od protilehlé stěny měřené strany její tloušťce (Obr. 1).



Obrázek 5 Odrazová metoda - princip zobrazování ech [4]

1. Sonda vysílá echo
3. Echo naráží do vady materiálu
4. Část echa se odráží od vady materiálu zpět
5. Odražená část se vrací zpět do sondy a druhá část se odráží od konce materiálu
7. Druhá část echa se vrací zpět do sondy

4.2 Metoda vícenásobných ech

Jelikož prochází ultrazvukový impuls materiálem tam i zpět, až dokud není úplně utlumen a každý jeho zpětný odraz je zachycen přístrojem jako samostatné echo, je možné těchto násobných ech, odpovídajících násobkům tloušťky stěny, využít k jejímu ještě přesnějšimu změření. Odečteme-li na správně nastaveném přístroji s větším měřicím rozsahem vzdálenost některého násobného echa a tuto hodnotu poté vydělíme počtem ech obsažených v této hodnotě, dostaneme měřenou tloušťku s mnohem větší přesností než při přímém odečtení hodnoty prvního echa. V případě této metody je možné výpočtem zjistit i rozdíly menší než 0,1 mm.

4.3 Srovnávací metoda

Při porovnání dvou stejných nebo násobných tlouštěk (např. etalonu s měřenou tloušťkou), je výhodné užít srovnávací metody. Podmínkou jsou stejné akustické vlastnosti obou materiálů (rychlost šíření ultrazvuku v materiálech).

Při použití této metody je pozorováno ultrazvukové echo od měřeného materiálu, jehož rozměr je roven měřené tloušťce nebo jejímu celistvému násobku, případně podílu, s echem od měřené tloušťky, přičemž nezáleží na počátečním echu. Pokud jsou oba rozměry stejné nebo v uvedeném poměru, obě echa se kryjí.

Přesnost je určena tím, které násobné echo je porovnáváno. U této metody se zpravidla neodečítá rozdíl hodnot přímo v mm, ale jen se zjišťuje, jestli je měřený rozměr menší nebo větší než rozměr materiálu. Z čehož vyplývá i užití této metody, která slouží především ke kontrole rozměrů většího počtu výrobků, obzvláště při zařazení monitoru, díky kterému se přesnost této metody ještě zvýší.

4.4 Metoda měrného impulsu

Měření tlouštěk s využitím měrného impulsu je založeno na tom, že je měrný impuls od ultrazvukové sondy, spojené s měrnou tloušťkou, nahrazen elektrickým impulsem. Pro vytvoření takového měrného impulsu jsou některé ultrazvukové přístroje vybaveny zvláštními pomocnými obvody nebo doplňkovými zařízeními. Užití této metody je obdobné jako u srovnávací metody, s tím rozdílem, že u metody s měrným impulsem je možné přímo odečítat zjištěné rozdíly v mm.

4.5 Rezonanční metoda

Principem další metody je rezonance, ke které dochází, pokud se tloušťka měřeného prostředí rovná celistvému násobku poloviční délky ultrazvukové vlny. Rezonance může vzniknout na základní nebo kterékoli vyšší harmonické frekvenci. Při měření tloušťek rezonanční metodou se měrná porovnávací frekvence ladí na opakovací frekvenci vícenásobných ech. Stav rezonance se indikuje na obrazovce ultrazvukového přístroje. Některé ultrazvukové přístroje jsou doplněny o zvláštní doplňková přídavná zařízení, ze kterých se získává měrná porovnávací frekvence a při dosažení stavu rezonance odečítá naměřená tloušťka přímo v mm. Metoda je vhodná pro měření malých tloušťek, které je možné měřit s přesností až 1 %.[1]

5. Tloušťkoměry

Pro měření tlouštěk se v technické praxi stále více používá ultrazvuk, proto se vyrábí řada ultrazvukových přístrojů určených pouze pro tento účel. Naměřené hodnoty se odečítají přímo na číslicové jednotce přístroje. Nejčastěji se jedná o malé, lehké, přenosné tloušťkoměry, napájené baterií, které pracují na principu dvou bistabilních klopných obvodů ovládaných impulsy většinou z dvojité sondy. Obvody vytvářejí obdélníkový impuls, který ovládá hradlo, na jehož vstupy se přivádějí impulsy hodinové frekvence. Na výstupu hradla odpovídá počet impulsů hodinové frekvence měřené tloušťce a jejich součet je indikován čítačem zobrazovací jednotky. Tloušťkoměry vyráběné pro běžná měření se vyrábí s měřicí přesností 0,1 mm o rozsahu do 300 mm s třímístnou číslicovou indikací. Tloušťkoměry pro speciální měření jsou vyráběny s přesností až 0,003 mm.

Měří-li se čas mezi vysláním impulsu, je ještě nutné odečíst tzv. chybu počátku, která je dána dobou od elektrického vybuzení impulsu až po jeho vstup do materiálu, včetně tloušťky ochranné vrstvy měniče sondy, tloušťky vrstvy vazebního media a čas zpoždění při vedení impulsu kabelem mezi přístrojem a sondou. Tloušťkoměry také bývají vybaveny interní dlouhodobou pamětí (datalogger), prostřednictvím rozhraní RS 232 se realizuje přenos do počítače.[2]

Rychlost šíření ultrazvukové vlny v neznámém materiálu se stanovuje na základě údaje správně seřízeného tloušťkoměru na známé tloušťce měřeného materiálu, např. na stupňové měrce, ve které je rychlost šíření 5 930 m.s-1.

Rychlost šíření ultrazvukové vlny v neznámém materiálu se vypočte ze vztahu:

$$v_x = \frac{v \cdot d}{d_x},$$

kde v_x je rychlost v neznámém materiálu (m.s-1), v je rychlost na stupňové měrce (m.s-1), d_x je hodnota na tloušťkoměru (mm), d je tloušťka měřeného materiálu (mm).

V případě, že bychom chtěli vyjádřit z výše uvedeného vztahu neznámou tloušťku (např. stěna přístupná jen z jedné strany) pak:

$$d = \frac{v_x}{v} \cdot d_x = v_r \cdot d_x$$

Obr. 3, kde

$$v_r = \frac{v_x}{v},$$

kde v_r je relativní rychlost (mm).

Tloušťkoměr se dá použít také ke kontrole mechanických vlastností např. u litin (Echometr měří do tloušťky 100 mm, K- metr do tloušťky 40 mm). Vzorky je možné měřit jak v obrobeném stavu, tak i ve stavu neobrobeném. Přesnějšího měření ovšem dosáhneme na obrobených vzorcích, proto je jejich použití vhodnější. Pokud je tloušťka přechodové vrstvy větší, může při měření menších tlouštěk dojít k chybě měření.[1]

6. Omezení při zkoušení ultrazvukem

Ultrazvuková zkouška dává informace o prostoru, který je ohraničen ultrazvukovým svazkem. Obsluha proto musí postupovat pozorně při vyslovení závěrů o provedené zkoušce materiálu, který se nachází mimo hranici ultrazvukového svazku. Při kontrole velkých výrobků je nevhodné a v některých případech i nemožné provést zkoušku celého výrobku.

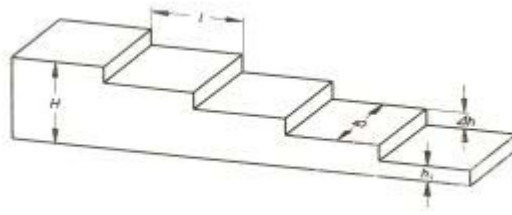
Závěry o stavu nekontrolovaných oblastí může na základě výsledků získaných při částečné kontrole vyslovit jen pracovník, který má znalosti z oboru statistiky a pravděpodobnosti. Zkoušení materiálu poškozeného korozi nebo erozí může provádět jen zkušený pracovník, protože se poškození materiálu může místo od místa zásadně měnit. [3]

6.1 Doporučení pro měření tloušťky stěny

Povrch měřeného materiálu: před měřením tloušťky musí být z povrchu materiálu v místech určených k měření odstraněny mechanické nečistoty, volné okuje a vrstvy nepřilnutých nátěrů;

Nastavení rychlosti šíření ultrazvukových vln: funkce ultrazvukových tloušťkoměrů je založena na měření doby průchodu ultrazvukového svazku materiálem. Jestliže nastavená hodnota rychlosti šíření ultrazvukových vln přístroje, odpovídá rychlosti šíření ultrazvukových vln zkoušeného materiálu, budou případné chyby měření sníženy na minimum.

Kalibrace nulového bodu ultrazvukové sondy: kalibrace nulového bodu ultrazvukové sondy se musí provádět na kalibrační měrce, která je obvykle součástí tloušťkoměru a podle postupu, uvedeného v návodu k obsluze přístroje. Nesprávná nebo nepřesná kalibrace nulového bodu ultrazvukové sondy je důvodem nepřesných výsledků při měření tloušťky stěny. Pro ověření správnosti nastavení rychlosti a měřených výsledků se použijí referenční (stupňové) měrky, vyrobené z měřeného materiálu.



Obrázek 6 Příklad referenční stupňové měrky [4]

Tato referenční (stupňová) měrka by měla pokrývat tloušťky, které jsou při měření očekávány.

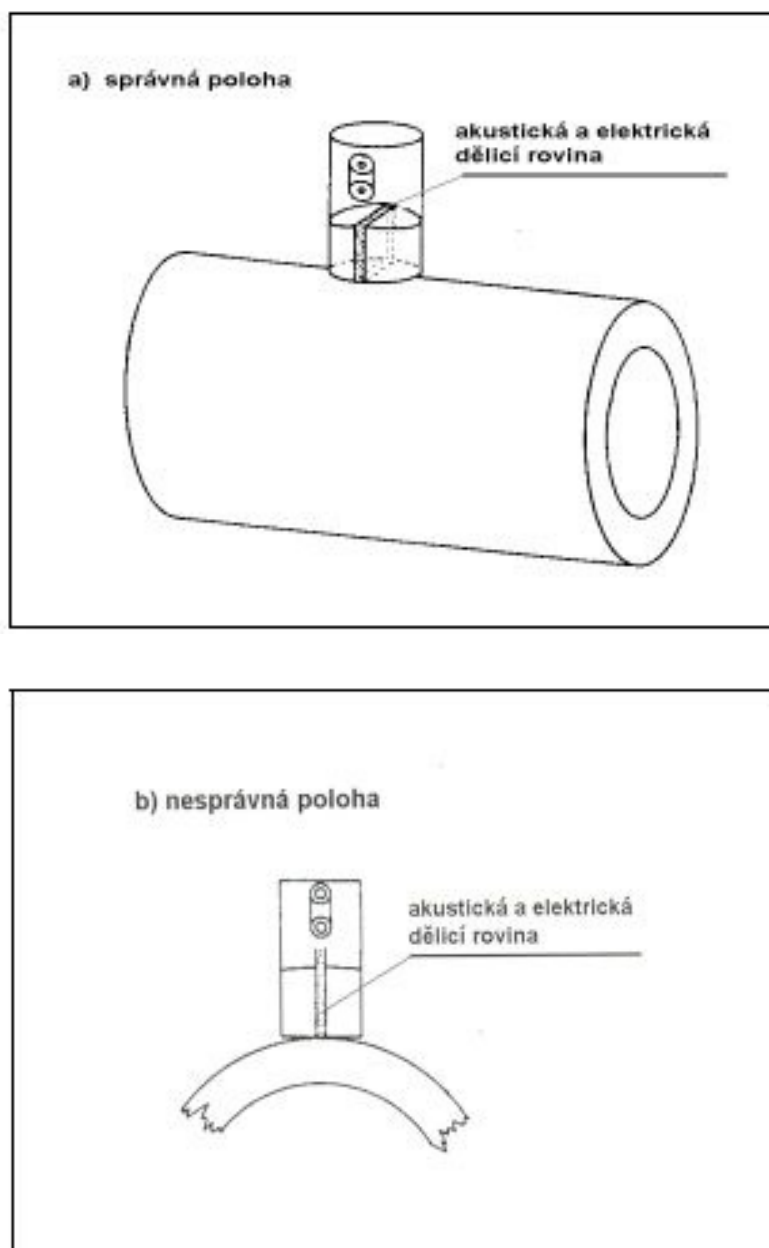
Vliv teploty na kalibraci: kolísání teploty ovlivňuje hodnotu rychlosti ultrazvukových vln v materiálu, dráhu ultrazvukového svazku v předsádce sondy a rovněž kalibraci nulového bodu ultrazvukové sondy. Proto se má jakákoliv kalibrace provádět přímo na místě měření a pomocí měrek, které mají stejnou teplotu jako zkoušený materiál.

Volba ultrazvukové sondy: ultrazvukové sonda musí být v dobrém stavu a bez zjevného opotřebení kontaktní plochy. Značně opotřebovaná sonda má zmenšený efektivní rozsah měření. Rozsah měření příslušné sondy, který je uveden ve specifikaci sondy, musí zahrnovat celý rozsah měřených tlouštěk. Teplota zkoušeného výrobku musí odpovídat rozsahu teplot, pro které je příslušná sonda určena.

Akustická vazba: vrstva akustické vazby má být při měření vždy o stejné a rovnoměrné tloušťce. Kalibrace a vlastní měření se musí provádět za stejných podmínek akustické vazby a na ultrazvukovou sondu působit vždy stejným přitlakem.

Vady materiálu: jestliže už tloušťkoměr během série měření náhle zobrazí hodnotu tloušťky výrazně menší než se předpokládá, mohou být příčinou výrazné změny tloušťky vnitřní vady materiálu. V takovém případě je nutné u výrobku provést kontrolu universálním ultrazvukovým přístrojem, případně jinou nedestruktivní metodou, aby se zjistila příčina náhlé a nepředpokládané změny tloušťky.

Měření na zakřiveném povrchu: při měření na zakřiveném (konvexním) povrchu, např. u trubek malých průměrů, musí být sonda na povrchu měřeného objektu přiložena tak, aby akustická dělicí rovina sondy byla orientována, pokud možno, kolmo k podélné ose zkoušeného výrobku.



Obrázek 7 Přiložení dvojité sondy při měření na zakřiveném povrchu

[4]

Drsnost zkoušeného povrchu: chybné výsledky měření může způsobit také hrubé poškození povrchu zkoušeného materiálu (např. hluboké prohlubně, rýhy apod.). Chyby měření je možné v těchto případech obvykle vyloučit pootočením ultrazvukové sondy tak, aby její akustická dělicí rovina byla kolmo na směr tohoto poškození.

Měření tloušťky při vysokých teplotách povrchu: některé ultrazvukové tloušťkoměry jsou vybaveny sondami, které umožňují měřit tloušťku stěny při teplotách povrchu až do 600° C. Pro docílení dobré akustické vazby se používá speciální pasta a vlastní měření probíhá poměrně krátkou dobu. Při měření tloušťky za vysokých teplot je nutné se řídit pokyny výrobce tloušťkoměru a sond. [5]

7. Srovnání nejpoužívanějších tloušťkoměrů

7.1 Ultrazvukový tloušťkoměr Schut SA 40

Ultrazvukový digitální tloušťkoměr firmy SADT je kompaktní přístroj řízený mikroprocesorem, určený k měření stěn z kovových i nekovových materiálů jako je např. hliník, titan, plasty, sklo a jiné dobré vodiče ultrazvuku. Lze jednoduše měřit tloušťky stěn potrubí, tlakových nádob, nádrží, výměníku trubek, plechů, konstrukcí.

Obsluha přístroje je velmi jednoduchá, po kalibraci na známou tloušťku nebo rychlost ultrazvuku poskytuje přístroj přesná měření.



Obrázek 8

Ultrazvukový tloušťkoměr

Schut SA 40 [5]

Technické parametry přístroje:

Displej:	4 - místný LCD s odsvitem
Rozsah měření:	0,8 - 225,0 mm
Rozlišení:	0,01 mm v oblasti 0,8 - 99,99 mm 0,1 mm v oblasti 100,0 - 225,0
Přesnost:	pro rozsah 1 - 100 mm: + (0,1+0,005 L) mm pro rozsah 100 - 225 mm: + (1+0,01 L) mm (L je měřená hodnota v mm)
Rozsah rychlosti zvuku:	500 - 9999 m/sec
Paměť:	40 hodnot měření
Automatické vypínání:	po 3 minutách
Napájení:	2 alkalické 1,5 V baterie
Provozní teplota:	0 - 40 °C
Provozní vlhkost:	20 - 90%RH
Rozměry:	124x67x30 mm
Hmotnost:	240 g

7.2 Ultrazvukový tloušťkoměr Digi Check 2000

Je profesionální přenosný přístroj s jednoduchým ovládáním a vysokým výkonem. Je vhodný pro měření tloušťek stěn materiálů všude tam, kde je nedostupná protilehlá strana pro měření standardními měřidly. Výhodou je menu v češtině. Přístroj podporuje více sond. Model Digi Check 2020 je navíc vybaven vysokokapacitní pamětí a možností výstupu dat.



Obrázek 9

*Ultrazvukový tloušťkoměr
Digi Check 2000 [6]*

Technické parametry přístroje:

Měřicí rozsah:	0,7 – 250mm
Jednotky:	mm nebo inch
Rozlišení - volitelné:	0,1mm (v celém rozsahu) a 0,01mm (do 100mm)
Rozsah rychlosti zvuku:	1000-9999 m/s
Zobrazení údajů:	podsvícený grafický LCD displej 128x32mm
Komunikace:	CZ / EN
Automatické vypnutí:	po 5 minutách
Indikátor stavu baterií:	ano
Pracovní teplota:	-20 až +50°C
Rozměry:	108x61x25mm
Hmotnost:	230g

Další příslušenství:

Sonda PT08: 5,0MHz, rozsah 1,0-200,0mm, teplotní rozsah do 60°C, kabel 1,2m

Sonda PT06: 7,5MHz, rozsah 0,7-50,0mm, teplotní rozsah do 60°C, kabel 1,2m

Sonda ZT12: 2,0MHz, rozsah 2,5-250,0mm, teplotní rozsah do 60°C, kabel 1,2m

Sonda GT13: 2,0MHz, rozsah 3,0-100,0mm, teplotní rozsah do 350°C, kabel 1,2m

7.3 Ultrazvukové tloušťkoměry řady DM 4

DM 4 jsou ultrazvukové tloušťkoměry na měření tloušťky nových dílů nebo zbytkové tloušťky zkorodovaných dílů. Tloušťkoměry lze použít pro měření na trubkách malých průměrů, pro měření důlkové koroze, měření litiny a měření při vyšších teplotách. Vynikají především velmi vysokou spolehlivostí měření, vysokou přesností, opakovatelností měření a jednoduchou obsluhou. Robustní pouzdro je odolné proti hrubému zacházení a proto může být tloušťkoměr použit ve velmi tvrdých provozních podmínkách. Řada DM4 má velký sortiment sond.



Obrázek 10

Ultrazvukový tloušťkoměr DM4 DL [6]

Technické parametry přístroje:

Metoda:	Ultrazvuková odrazová
Jednotky:	mm nebo inch
Měřicí rozsah:	0,6 – 500 mm (ocel) v závislosti na sondě materiálu, povrchu a teplotě
Displej:	čtyřmístný LCD se zpětným osvětlením
Rozlišení nastavitelné:	0,1 mm nebo 0,01 mm
Opakovací frekvence:	4 Hz, resp 25 Hz v režimu MIN
Kalibrace nulového bodu:	automatická s dialogovými sondami nebo dvoubodová kalibrace
Korekce V-svazku:	automatická přes mikroprocesor
Pracovní teplota:	-10°C až + 50°C
Napájení:	2 tužkové baterie 1,5V
Rozměry:	150x77x33 mm
Hmotnost:	255 g včetně baterií

7.3.1 Standardní sondy pro tloušťkoměry řady DM4

Sonda	Frekvence (MHz)	Měř. rozsah (mm)	Kont. plocha (Ø mm)	Teplotní rozsah (°C)	Použití
DA 301	5	1,2-200	12,5	-10...+60	standardní
DA 303	2	5-240	17	-10...+60	litina
DA 305	5	4-60	16	+25...+500	horké povrchy
DA 311	5	1,2-200	12,5	-10...+60	konektor seshora
DA 312	10	0,6-25	7,5	-10...+60	malé trubky, tenké plechy
DA 312B16	10	0,7-12	3	-10...+60	velmi malé trubky, pevný kabel
DA 315	2	5-150	16	+25...+200	teplé povrchy
DA 317	5	2-80	12,5	+25...+200	teplé povrchy
DA 319	10	1-15	7,5	+25...+200	teplé povrchy
DA 0,8G	0,8	7-60	29	-10...+60	materiál s velkým útlumem
HT 400	5	0,75-250	13	0...+540	horké povrchy

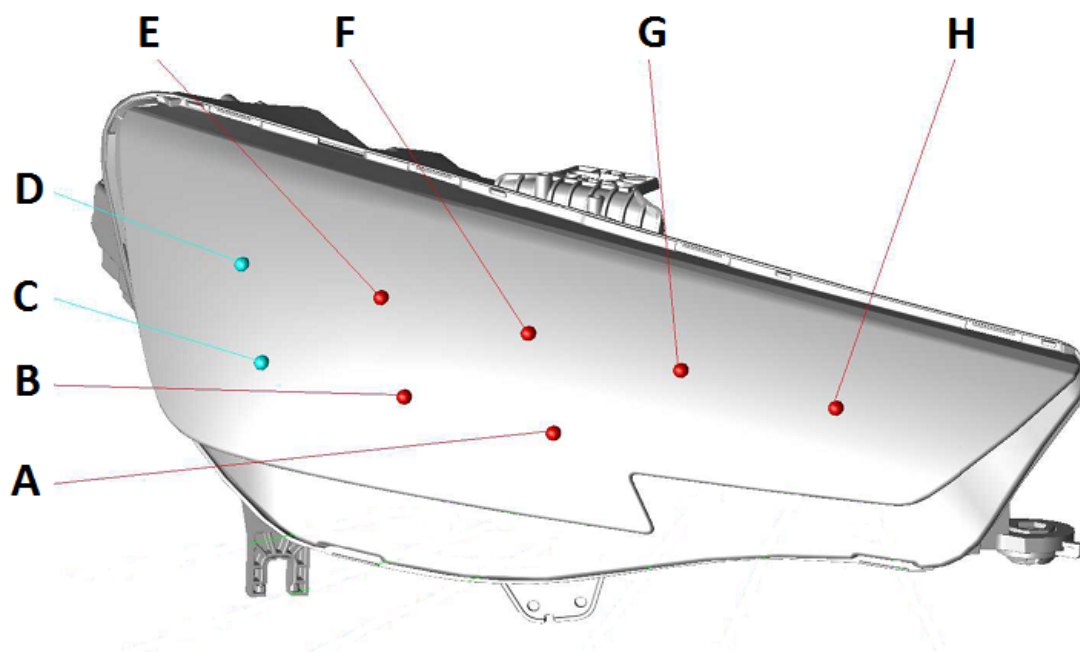
[2]

8. Srovnání přesnosti měření s 3D přístrojem

Nejdříve jsem měl v plánu výsledky měřicího přístroje TT-100 porovnat s výsledky, naměřenými srovnatelným ultrazvukovým tloušťkoměrem, který mi byl zapůjčen pro měření na mnou zvolených třech vzorcích. Výsledky měření ale neukázaly žádné větší odchylky, ze kterých by se dal vyvodit nějaký závěr.

Z toho důvodu jsem se rozhodl využít 3D měřicí přístroj Mitutoyo, kterým je vybavena rozměrová laboratoř ve firmě, kde momentálně pracuji. 3D přístroj je vybaven kombinovanou opticko-dotykovou hlavou, která umožňuje při jednom upnutí využít jak optického, tak dotykového principu snímání ve všech třech souřadnicích. Díky tomu přístroj dokáže určit tloušťku měřeného dílce v přesně daném bodě, určeném souřadnicemi x, y a z, s přesností až 0,001mm. Tato hodnota je tudíž stonásobně přesnější, než hodnota naměřená ultrazvukovým tloušťkoměrem TT-100, jehož udávaná přesnost je 0,1mm.

Jako měřený vzorek jsem použil přední, čirý, krycí plast světlometu, který je v dnešní době běžně používán pro většinu nově vyrobených automobilů. Vzhledem k tvaru a prohnutí měřeného vzorku jsem zvolil na jeho povrchu 8 měřících bodů.



Obrázek 11 Tvar měřeného světlometu s měřícími body [7]

V těchto bodech jsem provedl měření pomocí 3D měřicího přístroje, které určilo tloušťku materiálu v daných bodech s přesností na 0,01mm. Následně jsem přiložil sondu ultrazvukového měřidla TT-100 do jednoho z bodů, kde bylo možné sondu přiložit kolmo a provést kalibraci přístroje na tímto zjištěnou rychlost šíření ultrazvuku v krycím plastu světlometu.

Měření ultrazvukovým tloušťkoměrem ve zvolených bodech ukázalo jak důležité je zvolit pro měření správnou měřicí sondu. V bodech, kde je vzorek rovný, je možné provést měření, v rámci dané tolerance, uváděné výrobcem, přesně. V případě prohnutí dosedací plochy vzorku je nutné zvolit sondu s menší dosedací plochou pro zachování přesnosti měření.

Výsledky měření tloušťky materiálu v osmi zvolených bodech v mm:

	A	B	C	D	E	F	G	H
3D	2,78	2,90	2,99	3,25	3,05	2,81	2,92	2,64
TT-100	2,9	3	3,3	3,5	3,2	2,9	2,9	2,6

Závěr mnou provedeného srovnání je, že v případě, měříme-li vzorek, který je rovný a lze k němu kolmo přiložit sondu ultrazvukového tloušťkoměru TT-100, je odchylka výsledků měření obou přístrojů minimální. V případě, měříme-li materiál, který je prohnutý a není možné k němu sondu přiložit tak, aby byla ve stabilní, kolmé poloze vůči měřenému vzorku, odchylka se v závislosti na míře prohnutí vzorku zvětšuje.

9. Nejvhodnější druhy měření v laboratorním prostředí pedagogické fakulty JU

V naší školní laboratoři se zaměříme na spíše jednodušší druhy měření, protože bychom se zde měli naučit především správnému zacházení s přístrojem a samotnému měření obecně. Složitější měření, při kterém je pro správný výsledek požadováno kompenzování a eliminování extrémů, necháme odborným pracovníkům, kteří jsou vybaveni profesionálními laboratořemi. V našem případě tedy není možno používat nehomogenní materiály jako vzorky.

Nejvhodnější a nejfrekventovanější měření v laboratořích pedagogické fakulty by mělo být:

- Měření tloušťky materiálu při znalosti rychlosti šíření ultrazvuku v materiálu.
- Měření rychlosti šíření ultrazvuku v materiálu při znalosti tloušťky materiálu.

Porovnání výsledků na třech vzorcích:

- Sklo
- Plexisklo
- Plast



Obrázek 13

Ultrazvukový tloušťkoměr TT-100

Ultrazvukový tloušťkoměr TT-100:

1. Sklo, rychlost šíření 5900m/s
2. Plexisklo, rychlost šíření 2705m/s
3. Plast rychlost šíření 2184m/s

Přístroj TT-100 měří s tolerancí $\pm 0,1\text{mm}$ a není zapotřebí i u relativně levného přístroje počítat s nějakými odchylkami.

[8]

10. Podrobný návod na měření s ultrazvukovým tloušťkoměrem TT-100

Princip měření spočívá v přenesení ultrazvukového impulsu přes sondu do měřeného vzorku, který se po dosažení jeho zadní stěny odrazí zpět. Tím zjišťuje tloušťku kovových i nekovových materiálů, jako je hliník, titan, plast, keramika, sklo a další vhodné vodiče ultrazvukových vln, které mají shodnou horní i spodní část.

10.1 Příslušenství ultrazvukového tloušťkoměru

Přístroj TT-100 je přenosný ultrazvukový tloušťkoměr, jehož komponenty jsou následující:

1. Přístroj TT-100
2. Sonda
3. Kontaktní pasta
4. 2x Baterie AA

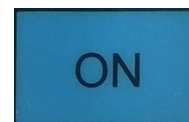
10.2 Příprava na testování

Povrch sondy je vyroben z propylenové hmoty, tudíž je velmi citlivý k poškrábání a znehodnocení na drsných materiálech, použijte proto sondu velmi opatrně.

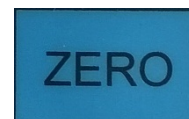
Provozní teplota povrchu by neměla přesáhnout 60°C, jinak je sonda nefunkční.

10.3 Popis ovladačů přístroje TT-100

Zapnutí přístroje



Vynulování sondy



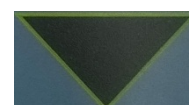
Hodnota rychlosti zvuku/ Výběr z 5ti uložených rychlostí/



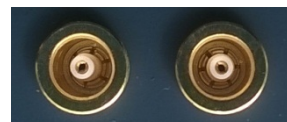
Nastavení hodnoty rychlosti zvuku nahoru



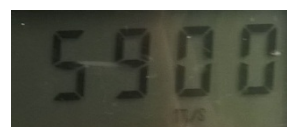
Nastavení hodnoty rychlosti zvuku dolů








Konektory pro připojení sondy



Displej zobrazující rychlost zvuku v m/s





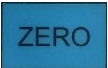
10.4 Postup měření s ultrazvukovým tloušťkoměrem

1. Připojíme sondu do konektorů na vrchní části přístroje.
2. Zapneme přístroj TT-100 tlačítkem , na displeji se zobrazí poslední nastavené hodnoty rychlosti zvuku. 
3. Tlačítkem  nastavíme rychlost zvuku sondy pro měřený materiál výběrem z pěti naposledy použitých hodnot.
4. Tlačítka  a  případně nastavíme novou hodnotu, poté je hodnota automaticky uložena mezi 5 posledních použitých hodnot.
5. Vazba sondy s měřeným materiálem je indikovaná na displeji na levé straně. Pokud dojde k nějakému problému, zobrazí se, že vazba nebyla provedena správně, odstaňte sondu, očistěte ji od vazební pasty a případných nečistot a měření opakujte.



10.5 Kalibrace přístroje TT-100

Kalibrace se provádí po každé výměně baterií, či výměně sond. Je třeba toto dodržet pro zajištění přesnosti měření. Je důležité kalibraci i několikrát opakovaně provést podle následujících pokynů:

1. Použijte malou část vazební pasty na ocelový měřený vzorek, který má tloušťku 4mm. 
2. Nastavte rychlost sondy tlačítkem  na 5900m/s (ocel)
3. Stiskněte tlačítko  pro vykonání kalibrace.
4. Při spojení vazby se sondou a měřeným vzorkem se na displeji zobrazí linie a poté 4.0mm, což znamená, že kalibrace proběhla úspěšně.

10.6 Kalibrace na měření tloušťky při znalosti rychlosti

Kalibrace tímto způsobem je možná, víme-li o jaký materiál se jedná a jakou rychlosti se v něm šíří zvuk.



1. Použijte vazební pastu na měřenou část vzorku.
2. Nastavte rychlost zvuku sondy závisující na druhu materiálu (viz. tabulka).
3. Vazba sondy s měřeným materiálem.


Měření může začít, na displeji se zobrazí tloušťka měřeného vzorku např. 2,86mm

10.7 Kalibrace pro měření rychlosti při znalosti tloušťky

Kalibrace pro tento druh měření se používá v případě, že známe tloušťku měřeného vzorku, ale nemáme informace o materiálu, z něhož je měřený vzorek vyroben.

1. Použijte posuvné měřítko nebo mikrometr ke zjištění tloušťky materiálu
2. Po spojení sondy s vazební pastou a testovaným vzorkem, u kterého známe tloušťku, je tloušťka vzorku zobrazena chybně např. 2.86mm
3. Odejměte sondu

4. Tlačítka  a  změňte aktuální tloušťku zobrazenou na displeji na známou naměřenou tloušťku např. 4.13mm

5. Stiskněte tlačítko . Správná rychlost šíření ultrazvuku pro tento materiál se zobrazí a ve stejném čase se i uloží do paměti mezi 5 posledních měřených rychlostí
6. Začněte měřit tloušťku stejného materiálu s touto rychlostí

11. Postup měření tloušťky nekovových materiálů ultrazvukovým tloušťkoměrem TT-100

11.1 Postup měření A

Měření tloušťky materiálu při znalosti rychlosti šíření ultrazvuku v materiálu.

Před započítím měření je nutné přečíst si návod. Tento text slouží pouze pro správný a bezchybný postup při měření vzorku. Nejedná se o komplexní návod.

1. Z ochranného kufříku vyjmeme přístroj TT-100, vložíme do něj dvě baterie AA (po skončení měření baterie opět vyndáme). K přístroji připojíme sondu, konektory sondy se připojují do zdířek na horní straně přístroje.
2. Přístroj zapneme tlačítkem ON a počkáme, až zobrazí poslední měřenou rychlost šíření ultrazvuku v materiálu.
3. Tlačítkem VEL vybereme jednu z pěti posledních použitých hodnot tu, se kterou chceme pracovat, případně šipkami nahoru nebo dolů nastavíme novou hodnotu rychlosti šíření ultrazvuku ve vzorku.
4. Měřený vzorek umístíme na laboratorní stůl.
5. Naneseme vazební pastu na testovaný vzorek a na sondu.
6. Sondu přiložíme na rovnou část vzorku a počkáme, až přístroj vyhodnotí výsledek a zobrazí tloušťku vzorku na displeji.
7. Naměřenou hodnotu zapíšeme do tabulky.

8. Vzor tabulky pro zápis měření A:

Vzorek	Materiál	Rychlost šíření ultrazvuku [m/s]	Tloušťka [mm]

Úlohy:

1. U daného materiálu určit jeho tloušťku pomocí metody A.
2. Metodou B určit tloušťku daného materiálu a porovnat výsledné hodnoty z obou měření.

11.2 Postup měření B

Měření rychlosti šíření ultrazvuku v materiálu při znalosti tloušťky materiálu.

Před započítím měření je nutné přečíst si návod. Tento text slouží pouze pro správný a bezchybný postup při měření vzorku. Nejedná se o komplexní návod.

1. Z ochranného kufříku vyjmeme přístroj TT-100, vložíme do něj dvě baterie AA (po skončení měření baterie opět vyndáme). K přístroji připojíme sondu, konektory sondy se připojují do zdířek na horní straně přístroje.
2. Přístroj zapneme tlačítkem ON a počkáme, až zobrazí poslední měřenou rychlost šíření ultrazvuku v materiálu.
3. Posuvným měřítkem nebo mikrometrem zjistíme tloušťku testovaného vzorku.
4. Měřený vzorek umístíme na laboratorní stůl.
5. Naneseme vazební pastu na testovaný vzorek a na sondu.
6. Sondu přiložíme na rovnou část vzorku, kde známe jeho tloušťku, přístroj vyhodnotí výsledek a zobrazí chybnou tloušťku vzorku na displeji.
7. Odejměte sondu.
8. Tlačítka nahoru a dolů změňte aktuální tloušťku zobrazenou na displeji na známou naměřenou tloušťku.
9. Stiskněte tlačítko VEL. Správná rychlost šíření ultrazvuku pro tento materiál se zobrazí a ve stejném čase se i uloží do paměti mezi 5 posledních měřených rychlostí.
10. Začněte měřit tloušťku stejného materiálu s touto rychlostí.
11. Vzor tabulky pro zápis měření B:

Vzorek	Materiál	Tloušťka [mm]	Rychlost šíření ultrazvuku [m/s]

Příklad tabulky pro zápis měření A:

Vzorek	Materiál	Rychlost šíření ultrazvuku [m/s]	Tloušťka [mm]
1	Sklo	5900	3,6
2	Plexisklo	2705	4,1
3	Plast	2184	4

Příklad tabulky pro zápis měření B:

Vzorek	Materiál	Tloušťka [mm]	Rychlost šíření ultrazvuku [m/s]
1	Sklo	3,6	5900
2	Plexisklo	4,1	2705
3	Plast	4	2184

12. Tabulka rychlostí šíření ultrazvuku v materiálech

materiál	m.s ⁻¹
ocel feritická	5920
ocel austenit	5500
litina	3500-5500
hliník	6320
měď	4700
mosaz	3830
plexisklo	2705
polystyrén	2350
sklo	5900

[1]

Závěr

V bakalářské práci jsem se zaměřil především na vypracování metodiky a teorie pro laboratorní měření tloušťky nekovových materiálů ultrazvukovým tloušťkoměrem se zaměřením na přístroj TT-100. V následující části porovnávám tímto přístrojem získané hodnoty s hodnotami naměřenými pomocí jiného přístroje, který je v dnešní době považován za standard. Toto porovnání bylo však velmi náročné, neboť firmy využívající obdobné přístroje si své zázemí chrání. Hlavní problém byla jejich neochota spolupracovat při porovnávání výsledků. Nakonec jsem měl možnost porovnat výsledky z ultrazvukového tloušťkoměru TT-100 s 3D měřicím přístrojem značky Mitutoyo ve firmě zabývající se výrobou světlometů do automobilů. Přístroj se musel před měřením kalibrovat, aby byl výsledek co nejpřesnější. Samotné měření už probíhalo bez problémů a výsledky byly srovnatelné s výsledky přístroje TT-100. Výsledky ale ovlivnila především povaha měřeného materiálu. Např. není-li měřený vzorek dostatečně homogenní, byly by rozdíly ve výsledcích podstatně výraznější.

Podařilo se analyzovat a utřídit obecně platné zásady pro měření tloušťky materiálu ultrazvukem a do jisté míry provést komparaci (porovnání) hodnot rychlosti šíření ultrazvuku v jednotlivých nekovových materiálech.

V rámci práce bylo vybráno nejvhodnější měření pro laboratoř PF JU za použití přístroje TT-100.

V práci je na vybraných úlohách srozumitelně a názorně popsáno měření tloušťky nekovových materiálů tak, aby texty a návody byly dobře použitelné ve vyučovací praxi na pedagogické fakultě, případně i na jiných typech škol.

Seznam informačních zdrojů

Seznam užitých literatury

[1] ČECH Jaroslav, PERNIKÁŘ Jiří a PODANÝ Kamil. Strojírenská metrologie. Skriptum FSI VUT v Brně, 4. přeprac. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. 176 s. ISBN 80-214-3070-2

[2] KOPEC, B. a kol. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. Brno : CERM, 2008. 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4

Internetové zdroje

[1] Ultrazvuk [online]. 2007 [cit. 2012-3-28]. Dostupné z: <http://www.ultrazvuk.cz/>

[2] Měření tloušťky [online]. 2011 [cit. 2013-10-13]. Dostupné z: <http://www.testima.eu/>

[3] Princip ultrazvuku [online]. 2006 [cit. 2013-11-30]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/203-ultrazvuk>

[4] Digitální ultrazvukový tloušťkoměr Schut [online]. 2013 [cit. 2014-4-23]. Dostupné z: <http://www.kovonastroje.cz/Meridla/Tloustkomery/Digitalni-ultrazvukovy-tloustkomer-1-225mmSchut.html>

[5] Ultrazvukové vlnění [online]. 2012 [cit. 2014-5-15]. Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/index.php/ultrazvukove_vlneni

[6] Měření tloušťky materiálu [online]. 2013 [cit. 2013-11-2]. Dostupné z: if.vsb.cz/Studium/FS/Ultrazvukove%20vlny.doc

[7] Využití ultrazvuku [online]. 2014 [cit. 2014-6-4]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=33552

[8] Využití ultrazvuku [online]. 2013 [cit. 2014-5-26]. Dostupné z: <http://www.cmp-brno.cz/Ultrazvukove-vysetreni.html>

[9] Měření tvrdosti materiálů [online]. 2013 [cit. 2014-3-22]. Dostupné z: http://theses.cz/id/x950xz/Koch_DHT-100.pdf

Seznam obrázků

[1] Obrázek 2 Ultrazvukové senzory

Detekce výšky výložníku u zemědělských strojů [online]. Dostupné z: http://www.pepperl-fuchs.cz/czech_republic/cs/22494.htm

[2] Obrázek 3 Svařování ultrazvukem

Zařízení pro ultrazvukové svařování [online]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12.htm

[3] Obrázek 4 Defektoskopie

Nedestruktivní zkoušky [online]. Dostupné z: http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/zkouska_ultrazvukem.pdf

[4] ČECH Jaroslav, PERNIKÁŘ Jiří a PODANÝ Kamil. Strojírenská metrologie. Skriptum FSI VUT v Brně, 4. přeprac. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. 176 s. ISBN 80-214-3070-2

- Obrázek 5 Odrazová metoda - princip zobrazování ech
- Obrázek 6 Příklad referenční stupňové měřky
- Obrázek 7 Přiložení dvojité sondy při měření na zakřiveném povrchu

[5] Obrázek 8 Ultrazvukový tloušťkoměr Schut SA 40

Digitální ultrazvukový tloušťkoměr 1-225mm, Schut [online]. Dostupné z: <http://www.kovonastroje.cz/Meridla/Tloustkomery/Digitalni-ultrazvukovy-tloustkomer-1-225mm-Schut.html>

[6] Obrázek 9 Ultrazvukový tloušťkoměr Digi Check 2000

Digi Check 2000 [online]. Dostupné z: http://www.unimetra.cz/soubory_materialy/98_1.pdf

[6] Obrázek 10 Ultrazvukový tloušťkoměr DM4 DL

DM 4DL [online]. Dostupné z:

http://www.unimetra.cz/soubory_materialy/98_1.pdf

[7] Vlastní tvorba obrázků

- Obrázek 11 Tvar měřeného světloometu s měřicími body

[8] Vlastní obrázky - fotografie

- Obrázek 1 Ultrazvuk – Nemocnice Jihlava
- Obrázek 12 Měřicí přístroj 3D
- Obrázek 13 Ultrazvukový tloušťkoměr TT-100

Seznam tabulek

[1] Tabulka rychlostí šíření ultrazvuku v materiálech

[2] Standardní sondy pro tloušťkoměry řady DM4