

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů



Bakalářská práce

Ultrazvuk – nedestruktivní defektoskopie

Rostislav Mařan

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Rostislav Mařan

Zemědělské inženýrství
Inženýrství údržby

Název práce

Ultrazvuk – nedestruktivní defektoskopie

Název anglicky

Ultrasound – non-destructive defectoscopy

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je zpracovat popis nedestruktivních metod zkoušení materiálů se zaměřením na metody ultrazvukové. Práce bude doplněna praktickou ukázkou provedení ultrazvukové zkoušky na zvoleném objektu.

Metodika

Základní část práce bude zpracována jako literární rešerše, na jejímž základě budou vybrány vhodné metody a vzorky pro praktické ukázky. Praktické ukázky budou realizovány na vybraných objektech, pravděpodobně z oblasti letectví.

1. Úvod
2. Cíl a metodika práce
3. Nedestruktivní defektoskopie (definice, předpisy, rozdělení)
4. Ultrazvuková metoda (postup, sondy, měniče)
5. Praktické ukázky na vybraných objektech
6. Závěr

Doporučený rozsah práce

30-40

Klíčová slova

defektoskopie, ultrazvuk, sonda

Doporučené zdroje informací

KOPEC, B. – ČESKÁ SPOLEČNOST PRO NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí : (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.

KRAUTKRÄMER, Josef a Herbert KRAUTKRÄMER, 1983. *Ultrasonic testing of materials*. 3. ed. Berlin: Springer. ISBN 978-3-540-11733-9.

LANGENBERG, Karl-Jorg, Rene MARKLEIN a Klaus MAYER, 2012. *Ultrasonic nondestructive testing of materials: theoretical foundations*. Boca Raton: Taylor & Francis. ISBN 978-1-4398-5588-1.

Předpisy, periodika a firemní literatura

REGAZZO, Richard a Marcela REGAZZOVÁ, 2013. *Ultrazvuk: základy ultrazvukové defektoskopie*. Praha: BEN – technická literatura. ISBN 978-80-7300-466-8.

Předběžný termín obhajoby

2020/2021 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů

Elektronicky schváleno dne 3. 1. 2020

doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 2. 2020

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Ultrazvuk – nedestruktivní defektoskopie jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 17. 4. 2021

Poděkování

Děkuji za cenné rady a odborný dohled při tvorbě této bakalářské práce panu doc. Ing. Martinu Pexovi, Ph.D., současně děkuji i za praktické poznatky a získanou praxi u defektoskopických týmů Armády České republiky 21. základny taktického letectva v Čáslavi a 24. základny dopravního letectva ve Kbelích.

Ultrazvuk – nedestruktivní defektoskopie

Abstrakt:

Na začátku této bakalářské práce byla definována fyzikálně chemická podstata nedestruktivní defektoskopie. Vybrané metody nedestruktivní defektoskopie byly obecně popsány z provozu 21. základny taktického letectva v Čáslavi a 24. základny dopravního letectva ve Kbelích. Dále byla nedestruktivní defektoskopie rozčleněna do jednotlivých metod, a to v návaznosti na účinnost detekčního média odhalit deformitu testovaného materiálu. Ultrazvuková metoda byla důkladně popsána se zaměřením na samotnou kalibraci ultrazvukového defektoskopu. Praktická část práce se zabývala domácí výrobou kontrolních etalonů, které sloužily pro kalibraci. Kontrolní etalony byly použity také k měřicímu výzkumu uskutečněnému v zázemí 21. základny taktického letectva v Čáslavi a 24. základny dopravního letectva ve Kbelích. Cílem měřicího výzkumu bylo prokázat předpoklad jakostních vlastností ultrazvukové měřicí techniky na vybraných objektech v praxi.

Klíčová slova: Defektoskopie, ultrazvuk, sonda

Ultrasound – non destructive defectoscopy

Abstract:

In the beginning of this bachelor thesis the physical - chemical nature of non destructive defectoscopy was defined. Selected methods of non-destructive defectoscopy were generally described from operation of the 21st Tactical Air Force Base in Čáslav and the 24th Air Force Base in Kbely. Furthermore, non-destructive defectoscopy was divided into individual methods, in connection with the effectiveness of the detection medium to detect the deformity of the tested material. The ultrasonic method was thoroughly described with a focus on the calibration of the ultrasonic flaw detector itself. The practical part of the bachelor thesis is aimed at the homemade measuring models, which were used for calibration. The homemade measuring models were also used as objects for measuring research carried out in the background of the 21st Tactical Air Force Base in Čáslav and the 24th Air Force Base in Kbely. The aim of measuring research was to prove the assumption of quality properties of ultrasonic measuring technology on selected objects in practice.

Keywords: Defectoscopy, ultrasound, probe



Obsah

Úvod	14
1 Cíl a metodika	15
1.1 Cíle práce.....	15
1.2 Metodika práce.....	15
2 Nedestruktivní defektoskopie.....	16
2.1 Definice.....	16
2.2 Předpisy	19
2.3 Rozdělení metod nedestruktivní defektoskopie	20
2.3.1 NDT Metoda vizuální kontroly.....	21
2.3.2 NDT Metoda kapilární kontroly	22
2.3.3 NDT Metoda magnetické kontroly.....	23
2.3.4 NDT Metoda vířivých proudů.....	23
2.3.5 NDT Metoda zkoušky těsnosti	24
2.3.6 NDT Metoda ultrazvukové kontroly.....	25
2.3.7 NDT Metoda termografické kontroly.....	26
2.3.8 NDT Metoda radiografické kontroly	26
3 Ultrazvuková metoda.....	28
3.1 Postup ultrazvukové metody.....	29
3.1.1 Výběr akustické vazby	29
3.1.2 Rozsah časové základny.....	30
3.1.3 Útlum vln	31
3.1.4 Rychlost vln.....	32
3.1.5 Měření tloušťky zkoušeného materiálu	34
3.1.6 Stanovení náhradní velikosti vady.....	34
3.2 Sondy ultrazvukového defektoskopu	35
3.2.1 Druhy ultrazvukových sond podle použitého elektroakustického měniče.....	35
3.2.2 Druhy ultrazvukových sond podle typu vysílaného vlnění	36
3.2.3 Druhy ultrazvukových sond podle technického provedení.....	36
3.2.4 Druhy ultrazvukových sond podle počtu elektroakustických měničů.....	37
3.2.5 Druhy ultrazvukových sond podle kontaktu s testovaným materiálem	37
3.3 Měníče ultrazvukové sondy.....	38
3.3.1 Piezoelektrické měniče.....	38
3.3.2 Magnetostrikční měniče.....	40
3.3.3 Elektrodynamické měniče.....	40
3.3.4 Elektrostatické měniče	40
3.3.5 Termomechanické měniče.....	41
3.3.6 Optické měniče	41



4 Praktické ukázky na vybraných objektech	42
4.1 Výroba kontrolního etalonu.....	42
4.2 Ověření přesnosti měření.....	46
Závěr	54
Seznam literatury	55
Přílohy	57
Příloha 1 – Model odlitku.....	57
Příloha 2 – Formovací směs.....	58
Příloha 3 – Formování	61
Příloha 4 – Tavení a odlévání.....	63
Příloha 5 – Čištění hrubého odlitku	64
Příloha 6 – Příprava k měření.....	66
Příloha 7 – Měření třmenovým mikrometrem	67
Příloha 8 – Měření ultrazvukovým tloušťkoměrem.....	69
Příloha 9 – Nulování sondy	70
Příloha 10 – Kalibrace ultrazvukového tloušťkoměru	72
Příloha 11 – Měření s akustickou vazbou.....	74
Příloha 12 – Výsledky měření ultrazvukem	77
Příloha 13 – Pasametr.....	78
Příloha 14 – Měření pasametrem.....	78
Příloha 15 – Výsledky měření pasametrem	79



Seznam obrázků

Obrázek 1 – Orientační tabulka využití NDT metod.....	17
Obrázek 2 – Videoskop.....	21
Obrázek 3 – NDT Metoda kapilární kontroly.....	22
Obrázek 4 – NDT Metoda magnetické kontroly	23
Obrázek 5 – NDT Metoda vířivých proudů	24
Obrázek 6 – NDT Metoda zkoušky těsnosti.....	25
Obrázek 7 – NDT Metoda ultrazvukové zkoušky.....	25
Obrázek 8 – NDT Metoda termografické kontroly.....	26
Obrázek 9 – NDT Metoda radiografické kontroly.....	27
Obrázek 10 – Průběh kmitavého pohybu částic v jednotlivých skupenstvích	28
Obrázek 11 – Závislost útlumu ultrazvukových vln na frekvenci v uhlíkové oceli o dané velikosti zrn. 31	
Obrázek 12 – Komprese a dekomprese hmoty v závislosti na charakteru vlny.....	32
Obrázek 13 – Měření tloušťky zkoušeného materiálu	34
Obrázek 14 – Stanovení náhradní velikosti vady	35
Obrázek 15 – Kmity krystalů.....	39
Obrázek 16 – Model odlitku [mm]	42
Obrázek 17 – Formovací směs.....	43
Obrázek 18 – Dutina formy	43
Obrázek 19 – Odlévání etalonu.....	44
Obrázek 20 – Hodnocení odlitku	44
Obrázek 21 – Etalony	45
Obrázek 22 – Pyrometr	46
Obrázek 23 – Třmenový mikrometr	47
Obrázek 24 – Výsledek kalibrace sondy.....	48
Obrázek 25 – Situace vyskytující se při měření.....	49
Obrázek 26 – Měření pomocí pasametru.....	52
Obrázek 27 – Model odlitku	57
Obrázek 28 – Příprava formovací směsi	59
Obrázek 29 – Vytvoření kontrolního vzorku	60
Obrázek 30 – Výsledek kontrolního testu	60
Obrázek 31 – Pěchování formy.....	61
Obrázek 32 – Zarovnání povrchu formy	62
Obrázek 33 – Výroba dutiny formy	62
Obrázek 34 – Tavení	63
Obrázek 35 – Struska.....	64
Obrázek 36 – Krusta odlitku	64
Obrázek 37 – Skrytá vada odlitku (8× zvětšeno fotoaparátem).....	65
Obrázek 38 – Měřený rozměr etalonu 2.....	67



Obrázek 39 – Ultrazvukový tloušťkoměr	69
Obrázek 40 – Ultrazvuková sonda tloušťkoměru.....	70
Obrázek 41 – Kalibrace sondy ultrazvukového tloušťkoměru	71
Obrázek 42 – Ultrazvukový defektoskop.....	72
Obrázek 43 – Kalibrace statistickou hodnotou.....	74
Obrázek 44 – Měřicí vada.....	76

Seznam rovnic

Rovnice 1 – Výpočet tloušťky akustické vazby	29
Rovnice 2 – Výpočet poklesu akustického tlaku	32
Rovnice 3 – Rychlost podélné ultrazvukové vlny	33

Seznam grafů

Graf 1 – Přesnost měření.....	51
Graf 2 – Závislost rozměru na teplotě	53

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Orientační rozměry etalonů	45
Tabulka 2 – Statistické znaky výsledků měření třmenovým mikrometrem	47
Tabulka 3 – Statistické znaky výsledků měření ultrazvukovým tloušťkoměrem.....	50
Tabulka 4 – Přesnost měření.....	50
Tabulka 5 – Statistické znaky výsledků měření pasametrem.....	52
Tabulka 6 – Závislost na teplotě.....	52
Tabulka 7 – Hodnoty pyrometru	66
Tabulka 8 – Naměřené hodnoty třmenovým mikrometrem.....	68
Tabulka 9 – Naměřené hodnoty ultrazvukovým tloušťkoměrem.....	77
Tabulka 10 – Naměřené hodnoty pasametrem	79



Seznam použitých zkratek a znaků

λ_v – vlnová délka [m]

d_v – tloušťka akustické vazby [m]

n – počet kmitů nebo impulsů

–
 D – střední velikost zrna [mm]

α – hodnota útlumu [dB/m]

f – frekvence (kmitočet) [Hz]

P_1 – pokles akustického tlaku [Pa]

P_0 – počáteční akustický tlak [Pa]

l – dráha [m]

α – hodnota útlumu [dB/m]

c_l – rychlost podélné ultrazvukové vlny [m/s]

E – dynamický modul pružnosti v tahu [Pa]

ρ – hustota [kg/m³]

μ – Poissonovo číslo



Úvod

Práce bude věnována metodám nedestruktivní defektoskopie se zaměřením na ultrazvukovou metodu, která se využívá v hutnickém a strojírenském průmyslu. Dále se tato metoda uplatňuje v kontrolních diagnózách a prognózách kvůli opotřebením funkčních ploch.

Vychází-li se z poznatků léty prověřených defektoskopických pracovníků a ze zjištěného poznání, tak vše nasvědčuje tomu, že nastává úpadek využívání ultrazvukové defektoskopie. V průběhu minulého století byla metoda ultrazvukové defektoskopie v České republice hojně využívána, ale s postupem času nastalo její vytlačování do pozadí, a to například vířivými proudy nebo radiografickou a termografickou metodou.

Důvodem úpadku ultrazvukové defektoskopie nebyla její nedostatečná účinnost jako defektoskopické či měřicí soustavy, nýbrž náročné školení nového defektoskopického pracovníka. Proto bylo rychlejší a levnější školit nové defektoskopické pracovníky na jiné metody defektoskopie, které nejsou tak uživatelsky složité a jejich vypovídací schopnost je obdobná jako u ultrazvukové metody.

Žádná metoda defektoskopické kontroly nemá punc jistoty, že v daném testovaném materiálu není žádný defekt. Proto není v praxi využita pouze jedna metoda defektoskopické kontroly, ale minimálně dvě, a s největší pravděpodobností jsou použity dokonce tři metody defektoskopické kontroly.



1 Cíl a metodika

1.1 Cíle práce

Obecným cílem bakalářské práce je přispět k poznání v oblasti nedestruktivní defektoskopie. Tohoto obecného cíle bude dosaženo prostřednictvím dílčích cílů:

- teoretický rozbor a rešerše dosavadních poznatků o metodách nedestruktivní defektoskopie na fyzikální a uživatelské úrovni,
- výroba kontrolního etalonu jakožto objektu určeného ke kontrolnímu měření,
- ověření přesnosti měření v provozu pomocí třmenového mikrometru a ultrazvukového tloušťkoměru na vybraném etalonu. Doplnkově bude realizována kontrola teplotní závislosti pasametrem a pyrometrem.

1.2 Metodika práce

Teoretická část bude naplněna rozbohem doporučené literatury, vědeckých článků a publikací defektoskopických vojenských pracovníků.

Výroba kontrolního etalonu bude naplněna gravitačním odléváním a následným obráběním.

Poté bude na etalonech provedeno **ověření přesnosti měření** pomocí padesáti opakování na každém z vybraných zařízení, kterými jsou třmenový mikrometr, ultrazvukový tloušťkoměr a pasometr. Měření bude doprovázeno kontinuálním snímáním teploty povrchu testovaného etalonu pomocí pyrometru. Ke zpracování a vyhodnocení dat bude použito statistických metod.



2 Nedestruktivní defektoskopie

2.1 Definice

Nedestruktivní defektoskopie neboli z anglického Non Destructive Testing (NDT) je nedestruktivní zkoušení materiálu bez jeho porušení celistvosti. Jedná se o skupinu metod, které jsou schopné na základě měřitelných či sledovatelných fyzikálních jevů odhalit vady testovaného materiálu. Při zkoušení materiálu pomocí NDT kontrol nedochází takřka k žádné deformitě, a to jak z vizuálního, tak i z funkčního hlediska. K drobným nuancím dochází na molekulární úrovni, kde nastávají malé, ale pružné interakce v krystalografii kontrolovaného materiálu. Z tohoto hlediska nastává změna uspořádanosti, případně neuspořádanosti krystalografie atomů daného materiálu (Macek a Steidl Josef, 2019; Krejča a kol. ATG s.r.o., 2015; Brožek, 2008; Kopec a Česká společnost pro nedestruktivní testování, 2008).

Jednou z molekulárních nuancí vlivem prostupu detekčního média materiálem jsou například vibrace neboli kmitavý pohyb atomů a molekul. Molekuly kmitají kolem své klidové polohy, kdy se jejich pohyb projevuje jako natahování a smršťování molekulárních vazeb nebo změnou velikosti vazebných úhlů. Molekulární vazba je silové vzájemné působení sloučených a stabilizovaných atomů. Přes molekulární vazbu je kmitavý pohyb převáděn na sousední částici a výsledkem je komplexní vibrace, která je složena z jednotlivých vibrací vazeb molekul. Tento jev je podstatou ultrazvukové metody (Jílek a Jandourek, 1988; Macek a Steidl Josef, 2019).

NDT kontroly jsou využívány k lokalizaci nežádoucích defektů zájmového materiálu, který je nebo bude vysoce namáhán. Metody NDT se používají v hutnickém, strojírenském a stavebním průmyslu. Dále se NDT metody využívají ke kontrolním diagnózám a prognózám opotřebení funkčních ploch strojních prvků a celků, a to jak ve fázi jejich výroby, tak i za reálného provozu. (Valouchová, 2010).

Neexistuje a možná existovat ani nebude ideální fyzikální princip, potažmo NDT metoda, která by dokázala nalézt všechny druhy vad a defektů. Vady a defekty jsou odchylky rozměrů, tvaru, struktury, barvy apod. od předepsaných požadavků na výrobek. Metody NDT se zabývají vadami a defekty, které jsou především odchylkami od chemického složení a struktury či necelistvostí materiálu. Proto se obvykle využívá více metod NDT, aby byla zaručená a potvrzená správná



detekce vad. Různé metody NDT jsou aplikovatelné na různé druhy vad, které jsou rozděleny podle jejich umístění a charakteru z hlediska použitelnosti NDT metod (viz obrázek 1) (Zeman, 2001; Vítámvás, 2009; Macek a Steidl Josef, 2019).

Obrázek 1 - Orientační tabulka využití NDT metod

Symbol	Název metody	Schopnost detekovat vady				Vhodnost pro danou technologii					
		Povrchové	Vnitřní	Objemové	Plošné	Svary	Odlitky	Výkovky	Obrobky	Vývalky	Koroze
VT	Vizuální metoda (Visual Testing)	●	***	●	●	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PT	Kapilární metoda ¹⁾ (Penetrant Testing)	●	***	●	●	✓	✓	✓	✓	--	--
MT	Magnetická metoda prášková ²⁾ (Magnetic Particle Testing)	●	○	●	●	✓	✓	✓	✓	--	--
RT	Radiografická metoda (Radiographic Testing)	●	●	●	●	✓	✓	--	--	--	✓
UT	Ultrazvuková metoda (Ultrasonic Testing)	●	●	●	●	✓	✓	✓	--	✓	--
ET	Metoda vířivých proudů ³⁾ (Eddy Current Testing)	●	○	●	●	✓	--	✓	✓	✓	--
LT	Zkoušení netěsností (Leakage Testing)	Metoda je vhodná pro detekci vad, procházejících skrze celou tloušťku stěny (plošné i objemové). Detekován je únik médií z daného prostoru.									

Vhodnost pro detekci: ● = vysoká ● = střední ○ = nízká *** = nulová

¹⁾ Základním požadavkem pro realizaci kontroly je suchý a čistý povrch
²⁾ Metoda je vhodná jen pro feromagnetické materiály
³⁾ Metoda je vhodná jen pro vodivé materiály

Zdroj: (Mařánek a kol. ATG s.r.o., 2014, s. 13)

Defektoskopický pracovník by měl mít znalosti fyzikálně-chemických reakcí prostředí a provozních vlivů, které ovlivňují jakost zkoušeného objektu. S těmito znalostmi a také se znalostmi o metodách NDT je defektoskopický pracovník schopný prokázat a potvrdit přítomnost vad a defektů v kontrolovaném materiálu. Při detekci vad defektoskopem je kladen vysoký nárok na vyhodnocení odborně vyškoleným pracovníkem. Přípustnost či nepřípustnost vady je stanovena empiricky. Vady jsou vyhodnocovány na základě zkušeností generací výrobců, provozovatelů a kontrolorů. Pomocným způsobem pro vyhodnocování vad jsou výpočty a modelace v softwarech. Všechny tyto postupy a výsledky plynou z výrobových, potažmo provozovacích norem a standardů, které defektoskopický pracovník musí znát (Lenfeld, 2005; Mařánek a kol. ATG s.r.o., 2014; 2014; Krejča a kol. ATG s.r.o., 2015).



Dále bude v práci popsáno obecné využití NDT metod defektoskopickými pracovníky AČR na vojenských letištích na území ČR. Z obecného hlediska kontrolovaných strojních objektů a vykonávané kontroly defektoskopickými pracovníky AČR zde nebudou uváděny žádné utajované informace o takticko-technických datech strojů a citlivých datech s ohledem na zákon o ochraně osobních údajů dle znění GDPR a ústavního zákona č. 110/1998 Sb., o bezpečnosti České republiky.

Obecné nároky na proškolený defektoskopický personál a použité metody NDT jsou totožné s nároky, které jsou uplatňovány na civilních letištích. S ohledem na pevnostní koncepci leteckých konstrukcí, pohonné jednotky a vysoký nárok na provozní bezpečnost stroje se využívají dvě základní prohlídky mimo rámec plánových intervalů údržeb a kontrol. Preflight inspection (předletová kontrola) a Afterlight inspection (poletová kontrola). Koncepce předletové a poletové kontroly je kromě malých odlišností takřka totožná (Technická podpora Vojenského letiště Čáslav, 2020; Technická podpora Vojenského letiště Kbely, 2020).

Preflight inspection je v daném čase důležitější a v některých krocích se liší mezi dvěma stroji, přesto ale obsahuje univerzální kroky, které jsou obecně platné pro jakýkoliv letoun. Předletová kontrola obecně začíná v kokpitu, kde se kontrolují veškeré řídicí a ovládací mechanismy, systémy a softwary (od zasunutí okruhových jističů až po aktuálnost databázových údajů GPS přístrojů). Poté následuje logická Walkaround (obchůzka) kolem celého letounu. Při obchůzce se sledují jakékoliv abnormality ploch stroje, zkontrolují se a doplní veškeré provozní náplně, prohlédnou se a očistí se veškeré snímače (například Pitotova trubice určující rychlost, snímač statického tlaku určující výšku a její změnu). Během těchto kontrol se využívá přímé i nepřímé vizuální kontroly za využití videoskopu a endoskopu (Technická podpora Vojenského letiště Kbely, 2020; Technická podpora Vojenského letiště Čáslav, 2020).

Dále se na strojích uplatňují prohlídky, které jsou závislé na letových hodinách a teplotně akumulovaných cyklech pohonných jednotek tzv. TAC. Jedná se o předepsané práce a generální prohlídky strojního celku. Při těchto prohlídkách všech předepsaných částí letounu se využívá široká škála NDT metod, jako je vizuální kontrola, kapilární kontrola, kontrola vířivými proudy, kontrola magnetickou



metodou, kontrola ultrazvukovou metodou a zkouška těsnosti (Technická podpora Vojenského letiště Kbely, 2020; Technická podpora Vojenského letiště Čáslav, 2020).

Defektoskopičtí pracovníci AČR jsou školeni pro daný typ NDT metod jednou z mnoha norem, a to například EN 4179, která je schválena Národní radou pro letectví a kosmonautiku. Kvalifikace defektoskopických pracovníků je standardní dle kvalifikačních stupňů, a to od nejnižšího stupně, po vedoucího pracovníka (Technická podpora Vojenského letiště Kbely, 2020; Technická podpora Vojenského letiště Čáslav, 2020).

2.2 Předpisy

Obor defektoskopického testování vychází ze zkušeností a znalostí mnoha generací výrobců a provozovatelů zařízení, kteří kladou důraz na spolehlivost a bezpečnost výrobků a materiálů používaných ve výrobě a provozu. Na základě těchto nároků a požadavků byly zpracovány postupy a náležitosti na školení defektoskopického personálu a na systematické postupy defektoskopie. Proto je kladen vysoký nárok na defektoskopického pracovníka, aby znal normy a standardy, ze kterých podstata defektoskopie vychází. Kvalifikace a certifikace odborného pracovníka zaručuje vysokou pravděpodobnost, že je schopen plnit požadované úkoly v daných metodách NDT podle norem a standardů (Brožek, 2008; Barták, 2012; Mařánek a kol. ATG s.r.o., 2014; Škeřík a kol. ATG s.r.o., 2014; Krejča a kol. ATG s.r.o., 2015).

Normy a standardy lze definovat jako znalosti členů průmyslových standardizačních výborů, kteří jsou odborníky ve svém oboru. Tito odborníci jsou obeznámeni s nároky a potřebami jednotlivých průmyslových organizací, které reprezentují. Všeobecně se tedy jedná o dohodnutý způsob jak něco vyrobit a zkontrolovat. Tyto nároky se týkají výroby, procesního řízení, poskytování široké škály služeb a činností, které společnosti poskytují svým zákazníkům (Barták, 2012).

Cílem norem a standardů je zajistit všeobecně platná pravidla, která budou odrazem kvality, spolehlivosti a bezpečnosti napříč celou společností. Komplexnost těchto jednotlivých pravidel je prostoupena skrze jednotlivé obory, a to od stavebního inženýrství, energetický management přes bezpečnost a ochranu zdraví při práci až po nezávadnost dětských hraček pro děti (Lenfeld, 2005).



Obecný přehled používaných norem, které se týkají metod nedestruktivního testování a podmínek školení defektoskopických pracovníků (Jandura, 2018):

- EN/ISO 9712:2012 – Obecné požadavky na certifikaci NDT pracovníků, techniku NDT zkoušení a metody
- SNT-TC-1A + ANSI/ASNT CP-189 – Americké obecné požadavky na certifikaci NDT pracovníků, techniku NDT zkoušení a metody
- EN/ISO 17637 – Požadavky vizuální metody NDT pro svářeče, dozorový svářečský personál, mistry a kontrolory metod NDT
- ČSN EN 1371-1:2012 – Norma pro kapilární metody – PT. zaměřená na oblast slévárenství
- ČSN EN 15317 – Norma pro zkoušení ultrazvukem – Charakterizace a ověřování zařízení na měření tloušťky
- ČSN EN ISO 17636-1 – Norma k radiografickému zkoušení. Metody rentgenového a gama záření využívající film

2.3 Rozdělení metod nedestruktivní defektoskopie

Metody NDT se rozdělují s ohledem na účinnost nalezení dané vady. Z hlediska fyzikálních principů jednotlivých metod nelze plně využít jednu metodu na testování všech druhů vad a defektů. Metody NDT se rozdělují podle detekce povrchových nebo vnitřních vad (Mařánek a kol. ATG s.r.o., 2014; Škeřík a kol. ATG s.r.o., 2014; Krejča a kol. ATG s.r.o., 2015); (Zeman, 2001; Vítámvás, 2009).

Metody NDT podle detekce povrchových vad (Mařánek a kol. ATG s.r.o., 2014; Škeřík a kol. ATG s.r.o., 2014; Krejča a kol. ATG s.r.o., 2015; Zeman, 2001):

- Metoda vizuální kontroly (Visual Testing)
- Metoda kapilární – penetrační kontroly (Penetrant Testing)
- Metoda magnetické kontroly (Magnetizing Particle Testing)
- Metoda vířivých proudů (Eddy Current Testing)
- Metoda zkoušení těsnosti (Leakage Testing)



Metody NDT podle detekce vnitřních vad (Mařánek a kol. ATG s.r.o., 2014; Škeřík a kol. ATG s.r.o., 2014; Krejča a kol. ATG s.r.o., 2015; Zeman, 2001):

- Metoda ultrazvukové kontroly (Ultrasonic Testing)
- Metoda termografické kontroly (Infrared Testing)
- Metoda prozařovací – radiografické kontroly (X-ray, RTG Testing)

2.3.1 NDT Metoda vizuální kontroly

Metoda vizuální kontroly se využívá pro zjišťování a kontrolu povrchových vad. Kontrola přímé vizuální metody se provádí přímo zrakem za využití zrcátka, 3 - 6× zvětšovací lupy a svítilny na předem očištěném a odmaštěném testovaném výrobku. Pro obtížně zrakem kontrolované prostory či dutiny se aplikuje nepřímá vizuální metoda, která využívá optické přístroje (viz obrázek 2). Touto na provoz nenáročnou a levnou metodou NDT se zjišťují povrchové vady, opotřebení, stav a rozsah koroze, odchylny rozměrů a tvarů (Hallböck, 2017; kol. ATG s.r.o., 2014g).

Obrázek 2 – Videoskop



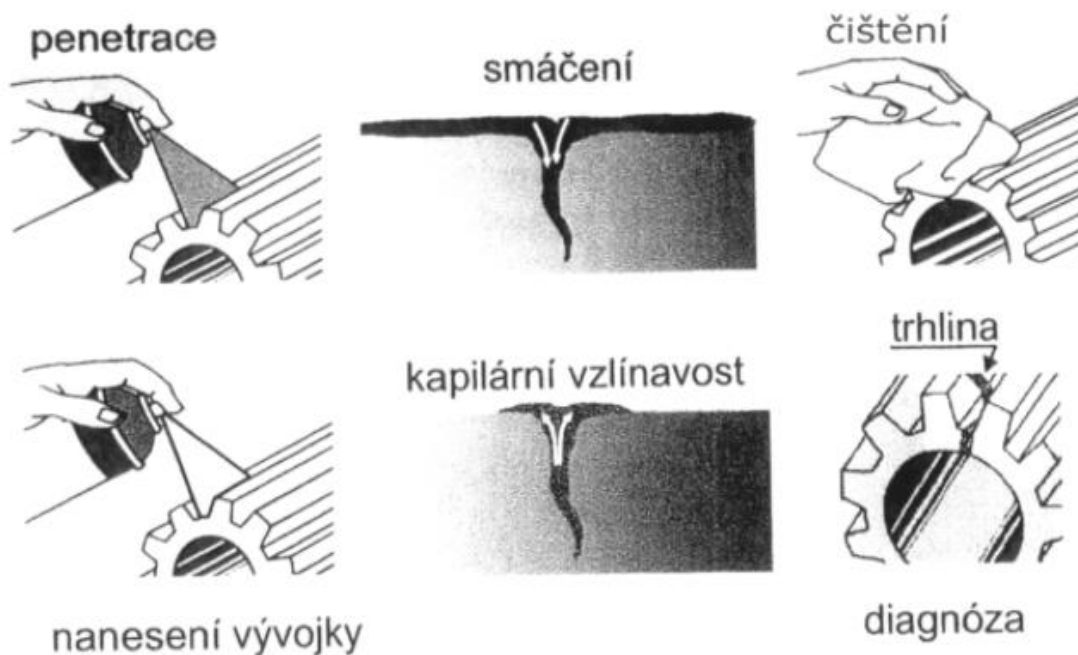
Zdroj: Vlastní zpracování



2.3.2 NDT Metoda kapilární kontroly

Tato defektoskopická zkouška slouží k detekci povrchových vad běžně používaných materiálů. Kapilární metoda (viz obrázek 3) se využívá pro kontrolu a inspekci polotovarů a strojních částí, které jsou očištěné, odmaštěné a vysušené. Tato metoda využívá fyzikálních vlastností kapalin, které slouží jako kontrolní médium. Důležitými fyzikálními vlastnostmi penetrantu je smáčivost, vzlínavost a adheze. Na testovaný materiál se rozprašováním či nanášením aplikuje barevný nebo fluorescenční penetrant a povrch se nechá smáčet po dobu penetračního času 5–10 min. Poté se přebytek penetrantu setře tak, aby nedošlo k nežádoucímu vysušení kontrolovaného povrchu. Po vysušení kontrolovaného materiálu se aplikuje vývojka. Vývojka jako absorbent nasaje penetrant, čímž se vytvoří barevný kontrastní obraz vady, a to vlivem vzlínání penetrantu. To umožní vystoupit detekované vadě v ploše kontrolovaného materiálu. Výsledek zkoušky se posuzuje využitím zraku, lupy a svítilny. Při fluorescenční metodě se využívají UV-lampy, pro zjištění barevného a jasového kontrastu testovaného povrchu (Mařánek a kol. ATG s.r.o., 2014).

Obrázek 3 – NDT Metoda kapilární kontroly



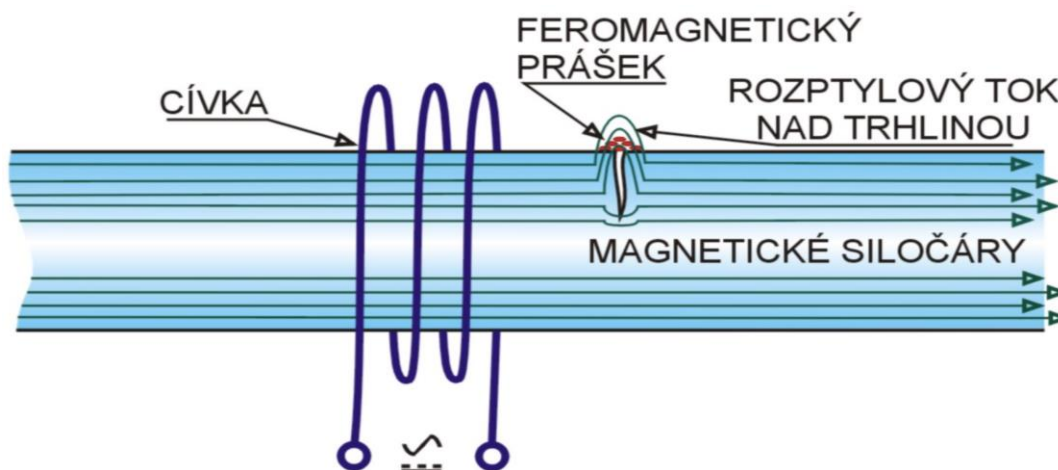
Zdroj: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=6385&typ=html



2.3.3 NDT Metoda magnetické kontroly

Metoda magnetické zkoušky (viz obrázek 4) využívá magnetický zdroj stejnosměrných nebo střídavých magnetických siločar, jako detekční médium je použit jemný feromagnetický prášek. Tato metoda se využívá pro zjištění povrchových a lehce podpovrchových vad. Magnetickou metodu NDT zkoušení lze využít pouze u feromagnetických nebo případně paramagnetických materiálů, kdy dochází ke zmagnetování zkoušeného materiálu. Na povrch zkoušeného materiálu se aplikuje detekční prášek, který vlivem průchodu magnetických siločar vytvoří v místě vady rozptylové pole. Detekce vady rozptylovým polem vznikne vlivem rozhraní dvou materiálů. Vada zkoušeného materiálu je naplněná plynem, který má jinou magnetickou vlastnost než feromagnetický materiál, čímž zapříčiní vznik rozptylového pole magnetických siločar (kol. ATG s.r.o., 2014b; Krejča a kol. ATG s.r.o., 2015).

Obrázek 4 – NDT Metoda magnetické kontroly



Zdroj: <https://www.atg.cz/ndt-131&display=MT>

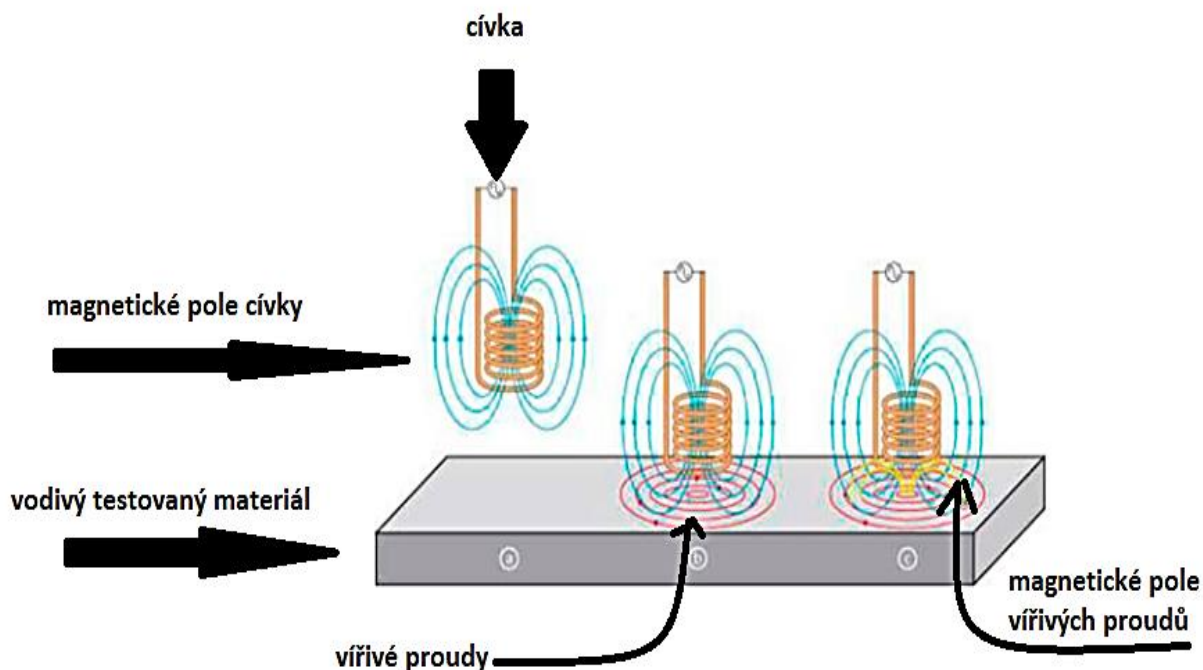
2.3.4 NDT Metoda vířivých proudů

Metoda vířivých proudů (viz obrázek 5) slouží k detekci povrchových a lehce podpovrchových vad v elektricky vodivých materiálech. K detekci se využívá cívkového systému. Primární (budicí) cívkou prochází střídavý proud o vysoké frekvenci. V této cívce se indukují střídavé magnetické pole, které vyvolá při kontaktu se zkoušeným výrobkem tok vířivých proudů, které indukují sekundární magnetické pole zkoušeného materiálu. Silové působení magnetického pole primární a sekundární cívkou působí na měřicí cívkový systém určitou hodnotou. Změna této hodnoty



se indikuje jak oddálením primární cívky od zkoušeného materiálu, tak i změnou homogenity a souvislosti testovaného materiálu, kterým prochází vířivé proudy (kol. ATG s.r.o., 2014f).

Obrázek 5 – NDT Metoda vířivých proudů



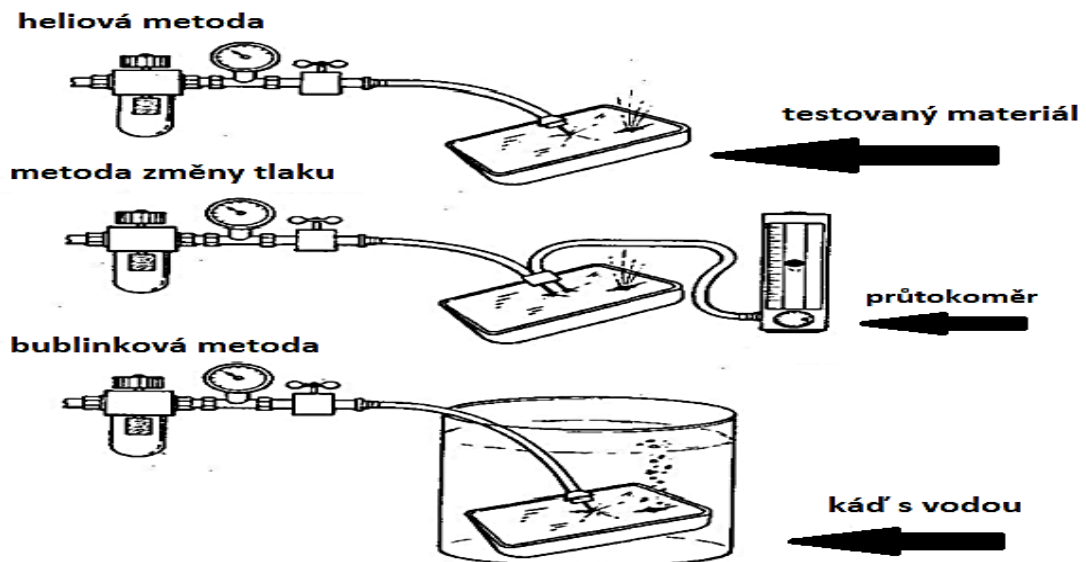
Zdroj: <http://www.techmagazin.cz/46493> + vlastní zpracování

2.3.5 NDT Metoda zkoušky těsnosti

Zkouška těsnosti (viz obrázek 6) se využívá ke zjišťování nedokonalosti a netěsnosti mechanických či nerozebíratelných spojů. Tato metoda využívá jako detekční médium kapalinu nebo plyn. Princip zkoušky je uskutečňován na základě zákona o zachování hmoty, kdy se testuje průnik detekčního média vlivem tlakového spádu skrze nedokonalosti pevného rozhraní. Výsledek zkoušky je definován jako objem proniklého detekčního média přes nedokonalost pevného rozhraní za jednotku času (kol. ATG s.r.o., 2014c).



Obrázek 6 – NDT Metoda zkoušky těsnosti

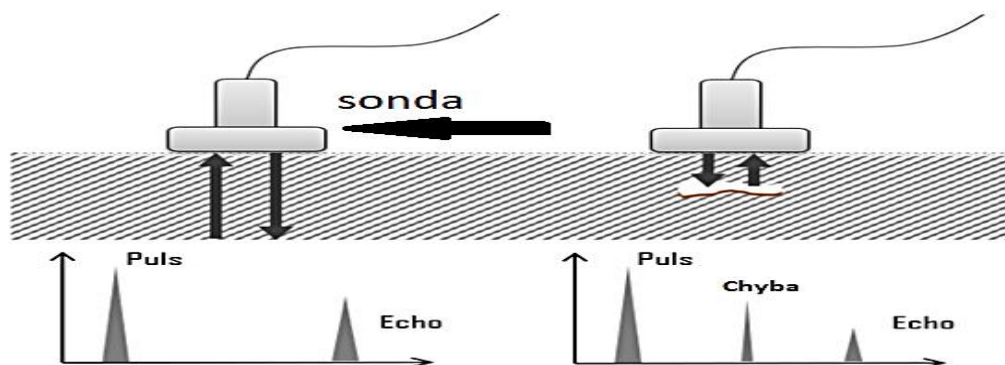


Zdroj: <http://www.matousekhk.cz/lt.html> + vlastní zpracování

2.3.6 NDT Metoda ultrazvukové kontroly

Metoda ultrazvukové zkoušky slouží pro detekci podpovrchových a velmi hlubokých vad (viz obrázek 7). Tuto metodu lze využít pro kontrolu kovových i nekovových materiálů. Kontrolované materiály musí být dobrým vodičem zvukových vln a mít menší strukturální pórovitost. Ultrazvuková metoda využívá jako detekční médium generované vysokofrekvenční vlny. Tyto vlny se šíří pevnou látkou, na rozhraní dvou materiálů se toto vlnění odrazí. Odražené vlnění pak slouží jako indikátor vad (kol. ATG s.r.o., 2014e).

Obrázek 7 – NDT Metoda ultrazvukové zkoušky



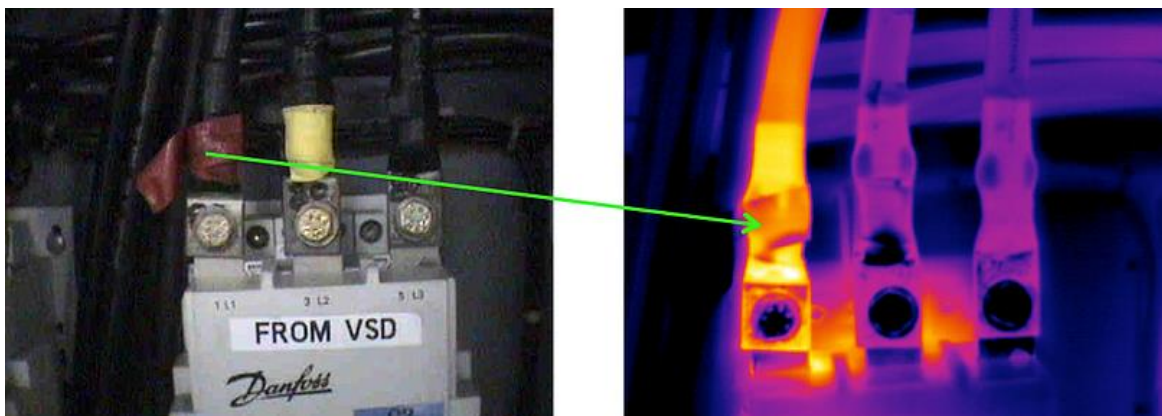
Zdroj: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/materials-science/non-destructive-testing-ndt/subsurface-ndt-methods/> + vlastní zpracování



2.3.7 NDT Metoda termografické kontroly

Termografická metoda (viz obrázek 8) slouží ke zjišťování všech druhů vad, které se projeví navenek předmětu jako povrchové rozložení teploty. Principem této metody je snímání infračerveného záření, které je vyzařované povrchem kontrolovaného materiálu. Jakýkoliv předmět v různých provozních režimech a při různých teplotních podmínkách vyzařuje danou hodnotu infračerveného záření. Hodnota infračerveného záření je zaznamenávána optickými přístroji geometrické optiky se speciálními senzory. Naměřené hodnoty sledovaného infračerveného záření se liší v závislosti na zatížení kontrolovaného materiálu a provozních podmínkách. Hodnoty povrchového rozložení teplot u testovaného výrobku se indikují jako celkové plošné zvýšení teploty nebo jako lokální nerovnoměrná akumulace tepla. Plošné zvýšení tepla se indikuje jako průchod elektrického proudu vlivem odporového Joulovo-Lenzova tepla, popřípadě v důsledku mechanického namáhání, kdy vlivem třecích dvojic vzniká třecí teplo. Nerovnoměrná akumulace tepla na testovaném materiálu indikuje přítomnost vnitřních vad. Vnitřní vady jsou odhaleny pomocí změny měrné tepelné kapacity, nebo naopak nerovnoměrným vedením tepla (kol. ATG s.r.o., 2014a).

Obrázek 8 – NDT Metoda termografické kontroly



Zdroj: <https://www.tcr-arabia.com/infrared-thermography>

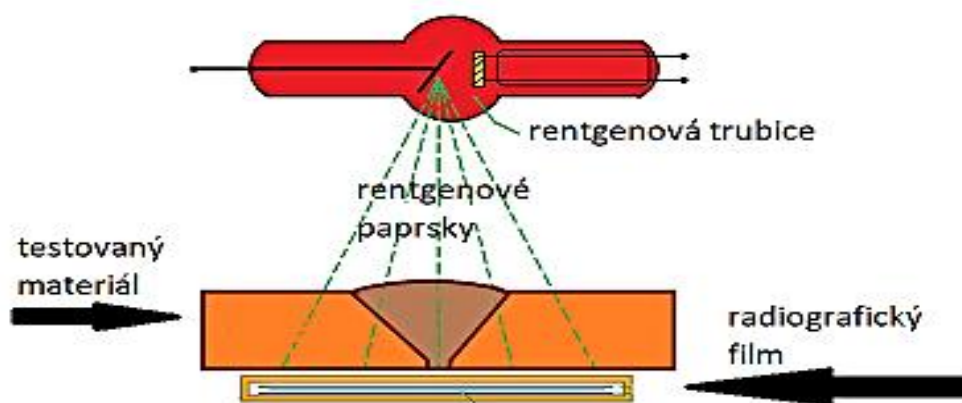
2.3.8 NDT Metoda radiografické kontroly

Radiografická kontrola (viz obrázek 9) slouží převážně k detekci vnitřních objemových vad. Lze detekovat i vnitřní vady plošné, ale za předpokladu splnění podmínek jejich zjistitelnosti. Plošné vnitřní vady jsou radiograficky zjistitelné,



jestliže jsou orientovány vůči směru indukovaného kontrolního záření. Kontrolním médiem je generované ionizující záření, které prostupuje materiálem. Prostupující ionizační záření ztrácí na své intenzitě vlivem tloušťky kontrolovaného materiálu a strukturální homogenitě. Prošlé ionizační záření vykresluje za kontrolovaným materiálem neviditelný reliéf primárního záření. Tento obraz neviditelného prozáření je detekován pomocí radiografického filmu na viditelný obrazový kontrast. Výsledek zkoušky se stanoví z vyhodnocení hustoty obrazového kontrastu zčernání radiografického filmu (kol. ATG s.r.o., 2014d).

Obrázek 9 - NDT Metoda radiografické kontroly



Zdroj: <https://www.weldingandndt.com/radiography-testing/> + vlastní zpracování

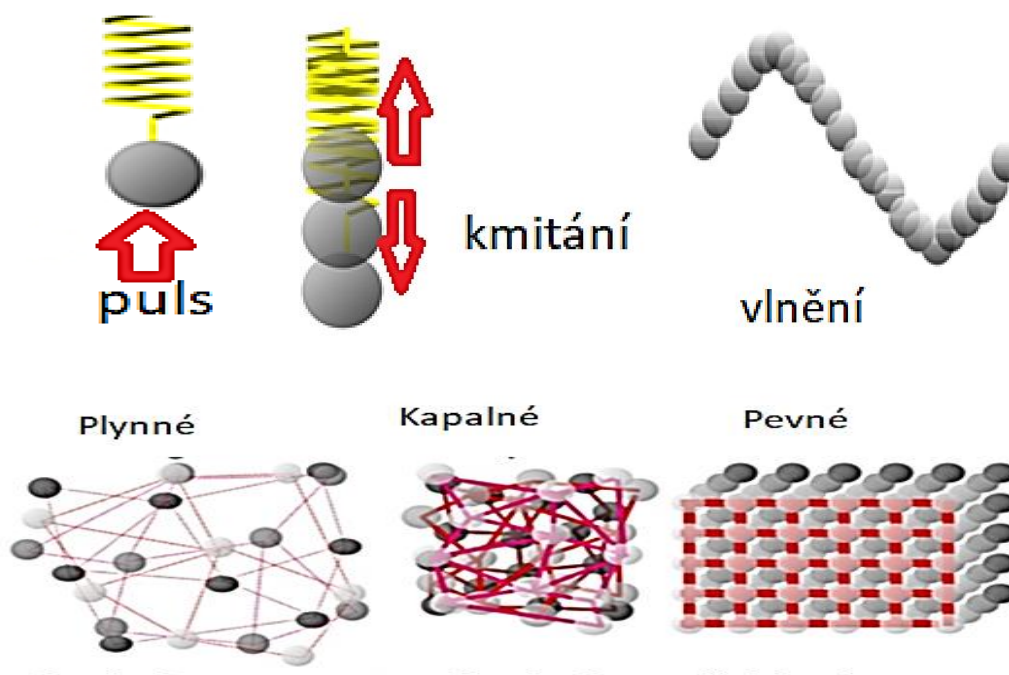


3 Ultrazvuková metoda

Ultrazvuková metoda je jednou z mnoha nedestruktivních defektoskopických metod zkoušení materiálu. Mezi ostatními nedestruktivními defektoskopickými metodami má ale tato metoda své nezastupitelné místo. Výjimečnosti ultrazvuková defektoskopie vděčí svojí fyzikální podstatě pro detekci vad. Touto podstatou dokáže odhalit vady podpovrchové, ale také vady, které jsou velmi hluboko v kontrolovaném materiálu. Ultrazvuková metoda dokáže lokalizovat tyto velmi hluboké vady s největším dosahem detekčního média ve zkoušeném materiálu v porovnání s ostatními metodami nedestruktivního defektoskopického zkoušení. Tímto detekčním médiem jsou ultrazvukové vlny (kol. ATG s.r.o., 2014e).

Principem ultrazvukové metody je šíření vysokofrekvenčních vln strukturou zkoušeného materiálu. Tyto buzené vysokofrekvenční vlny jsou mechanickým kmitem pohybujících se částic hmoty kolem své rovnovážné klidové polohy (viz obrázek 10) (Krautkrämer a Krautkrämer, 1983).

Obrázek 10 – Průběh kmitavého pohybu částic v jednotlivých skupenstvích



Zdroj: <https://www.slideshare.net/waleedyehia/basic-principles-uspresentation>



3.1 Postup ultrazvukové metody

Základním postupem ultrazvukového zkoušení je správné a vědomé nastavení technických a fyzikálních parametrů ultrazvukového defektoskopu a jeho komponentů v závislosti na kontrolovaném objektu. Před samotným měřením je potřeba zvážit výběr akustické vazby, nastavit rozsah časové základny, naměřit útlum a rychlost vln, změřit tloušťku zkoušeného materiálu a stanovit náhradní velikost vady. Tím je efektivně nastaven a nakalibrován ultrazvukový defektoskop. Další podmínkou je výběr vhodné ultrazvukové sondy s daným ultrazvukovým měničem. Tento postup platí především pro analogové ultrazvukové defektoskopy. U moderních digitálních ultrazvukových defektoskopů se podmínky nastavení provádí automaticky přístrojem (Regazzo a Regazzová, 2013).

3.1.1 Výběr akustické vazby

Vazební prostředek je médium, které vyplňuje mikroskopický prostor mezi ultrazvukovým měničem a zkoušeným materiálem. Tato akustická vazba by měla mít ideální hustotu a chemické složení, aby nedocházelo k útlumu a odklonu procházejících vln. Úkolem ultrazvukového vazebního prostředku jakožto přechodovému můstku mezi dvěma rozhraními je umožnit maximální průchodnost buzených vln. Při výběru akustické vazby je důležité dbát kromě typu akustického prostředku i na jeho aplikovanou tloušťku. Poměr relativní tloušťky akustické vazby a vlnové délky značně ovlivňuje přenosovou schopnost daného vazebního prostředku. Ideální tloušťkou vazebního prostředku by byla nejlépe nulová tloušťka. Tohoto principu však nelze dosáhnout, proto je optimální tloušťka vazebního prostředku definována jako půlnásobek vlnové délky, který umožňuje maximální průchodnost ultrazvukových vln. Potřebná tloušťka vazebního prostředku se stanoví rovnicí (viz rovnice 1) (Regazzo a Regazzová, 2013; Obraz, 1984).

Rovnice 1 – Výpočet tloušťky akustické vazby

$$dv = n * \left(\frac{\lambda v}{2} \right)$$

Zdroj: (Obraz, 1984, s. 248)



λ_v – vlnová délka [m]

d_v – tloušťka akustické vazby [m]

n – počet kmitů, nebo impulsů

Akustické vazby se rozlišují na kontaktní, mezerové a imerzní vazební prostředky. Nejčastěji používanou a nejvíce rozšířenou je akustická vazba kontaktní, která skýtá širokou škálu využití a používá se u ruční ultrazvukové kontroly. U kontaktní vazby je médium převážně na bázi škrobu nebo glycerinu, které se vhodnou aditivací přizpůsobí pro kontrolu daného materiálu (Regazzo a Regazzová, 2013; Obraz, 1984; Jílek a Jandourek, 1988).

Nejdůležitější vlastností aditiv je jejich účelová funkce v poměru s nízkou pěnivostí. Nahodilá změna tloušťky vazebního prostředku ve vzájemném poměrovém vztahu s vlnovou délkou negativně ovlivňuje výšku a hodnotu přijímaných impulsů, čímž nastává zhoršení rozlišovacích a detekčních schopností daného ultrazvukového defektoskopu (Obraz, 1984).

3.1.2 Rozsah časové základny

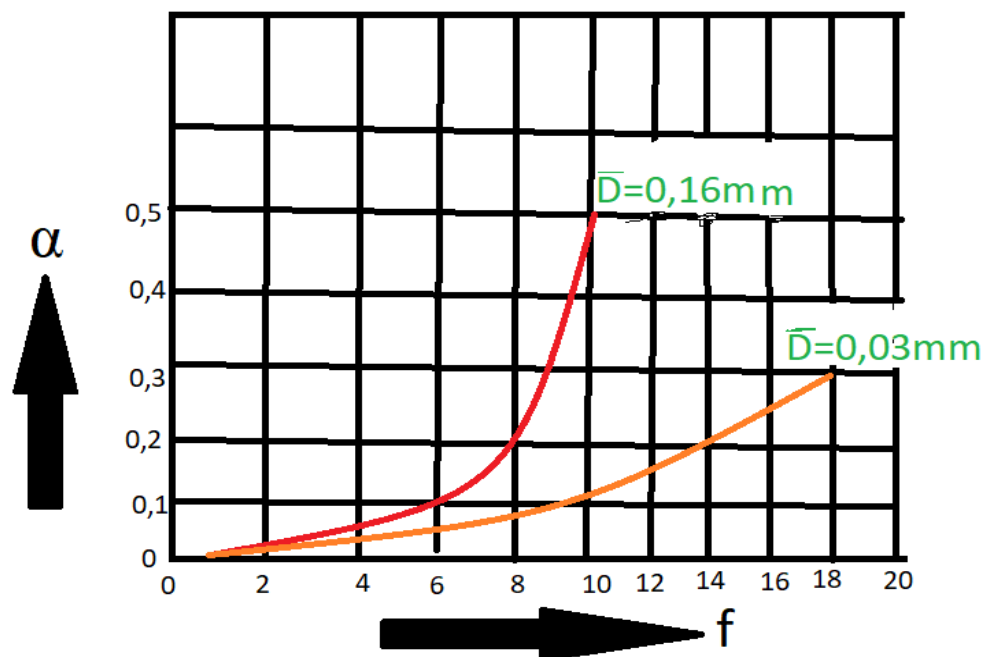
Hodnota časové základny je důležitý parametr pro konfiguraci ultrazvukového defektoskopu. Jedná se o dráhu koncového echa v závislosti na tloušťce testovaného materiálu. Pro zobecnění podstaty časové základny se vychází z principu: jeden měnič = jedna tloušťka, dva měniče = dvě tloušťky. To znamená, že pro úhlovou nebo přímou jednoměničovou sondu stačí jedna hodnota tloušťky a pro dvojitou neboli dvouměničovou sondu musí být dvě hodnoty tloušťky. Hodnota tloušťky se kalibruje pomocí kontrolní měrky s označením K1 se stanovenou tloušťkou podle normy ČSN EN ISO 2400 a pomocí měrky K2 se stanovenou tloušťkou podle normy ČSN EN ISO 7963. Umožňují-li to podmínky měření, je nejlepší hodnotu časové základny nastavit přímo na měřené součásti. Podmínkou tohoto měření je, aby byly měřené povrchy z obou stran protilehlé, rovinné a rovnoběžné. Tato vzdálenost mezi povrchy je odpovídající hodnotě požadované tloušťky, která se naměří pomocí mechanického měřidla (Regazzo a Regazzová, 2013).



3.1.3 Útlum vln

Pro správné nastavení ultrazvukového impulsu je důležitý charakter a vlastnosti prostředí, ve kterém se bude ultrazvuková vlna šířit (viz obrázek 11). Energie ultrazvukové vlny je rozdílná prochází-li třemi základními skupenstvími hmoty. Šíří-li se ultrazvuková vlna pevným, kapalným nebo plyným prostředím, ztrácí energii a akustický tlak. Ztráty nastávají v závislosti na molekulárním uspořádání detekovaného prostředí, kdy dochází k rozdílné míře absorpce, odrazu, ohybu, lomu a rozptylu ultrazvukových vln (Obraz, 1984).

Obrázek 11 – Závislost útlumu ultrazvukových vln na frekvenci v uhlíkové oceli o dané velikosti zrn.



Zdroj: (Obraz, 1984, s. 44) + vlastní zpracování

\bar{D} – střední velikost zrna [mm]

α – hodnota útlumu [dB/m]

f – frekvence (kmitočet) [Hz]

Útlum vln definuje pokles akustického tlaku na dráze daného prostředí, který je vyjádřen rovnicí (viz rovnice 2) (Obraz, 1984, s. 42).



Rovnice 2 - Výpočet poklesu akustického tlaku

$$P_l = P_0 * e^{-\alpha * l}$$

Zdroj: (Obraz, 1984, s. 42)

P_l – pokles akustického tlaku [Pa]

P_0 – počáteční akustický tlak [Pa]

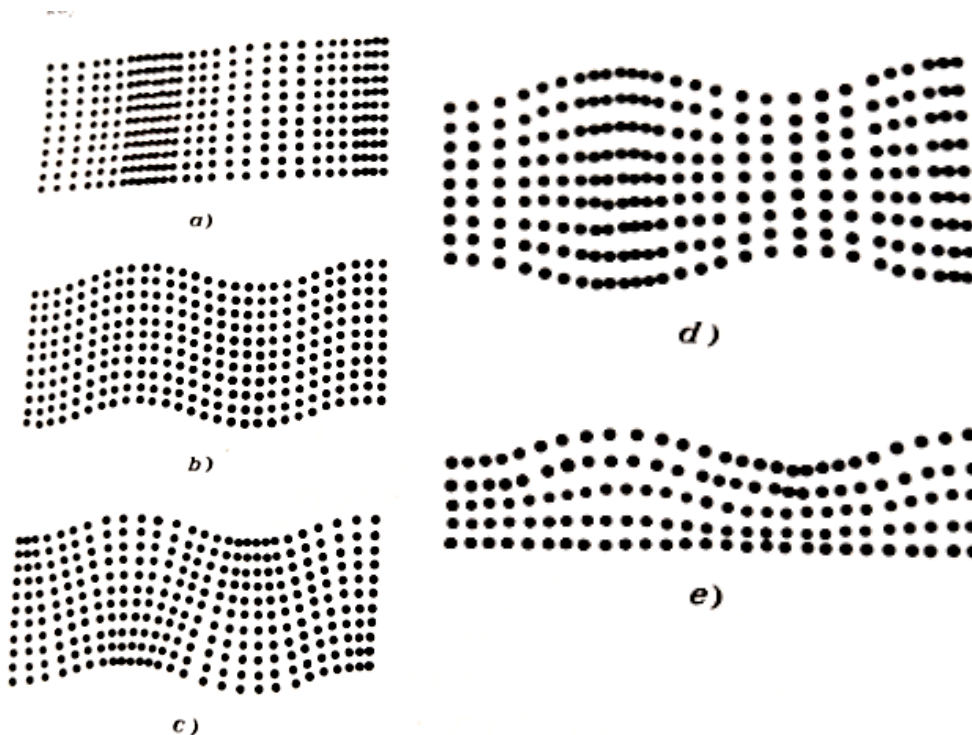
l – dráha [m]

α – hodnota útlumu [dB/m]

3.1.4 Rychlost vln

Rychlost šíření ultrazvukové vlny je závislá na charakteru kmitajících částic a na vlastnostech ovlivňovaného prostředí. Smysl kmitu částic a tím předávaná energie ovlivňují směr postupu vlny, čímž se projevu komprese a dekomprese částic v daném prostředí. Vlivem střídavého zahušťování a zředování částic v ovlivňované hmotě nastává nerovnoměrná změna objemu hmoty. Tato variabilita objemu definuje podélné, příčné, deskové ohybové, deskové dilatační a povrchové kmity částic ve vlně (viz obrázek 12) (Regazzo a Regazzová, 2013; Krautkrämer a Krautkrämer, 1983).

Obrázek 12 – Komprese a dekomprese hmoty v závislosti na charakteru vlny



Zdroj: (Obraz, 1984, s. 29)



- a) Podélné kmity částic ve vlně
- b) Příčné kmity částic ve vlně
- c) Deskové ohybové kmity částic ve vlně
- d) Deskové dilatační kmity částic ve vlně
- e) Povrchové kmity částic ve vlně

V důsledku heterogenity daného prostředí, struktury a meziatomárních sil ovlivňované hmoty se energie šířené ultrazvukové vlny degeneruje. Jediná skupenská hmota, hmota tuhá, umožňuje přenos všech druhů ultrazvukových vln. Tuhé látky jsou tvořeny anizotropickými nebo izotropickými krystaly. Poloha těchto krystalů v prostoru krystalické mřížky ovlivňuje rychlost šíření ultrazvukových vln v dané hmotě. Nejběžnější šířící se ultrazvukovou vlnou v hmotě je vlna podélná. Ve vlně podélné kmitají částice souhlasně se směrem šíření vlny (Langenberg et al., 2012).

Rychlost šíření podélných vln v tuhých látkách se liší podle poměrů vlnové délky a rozměrů prostředí (Obraz, 1984, s. 31).

Hodnota obecné rychlosti podélné ultrazvukové vlny v neohrazeném prostředí vychází z rovnice (viz rovnice 3) (Obraz, 1984; Regazzo a Regazzová, 2013).

Rovnice 3 – Rychlost podélné ultrazvukové vlny

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \mu}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}}$$

Zdroj: (Obraz, 1984, s. 31)

c_L – rychlost podélné ultrazvukové vlny [m/s]

E – dynamický modul pružnosti v tahu [Pa]

ρ – hustota [kg/m³]

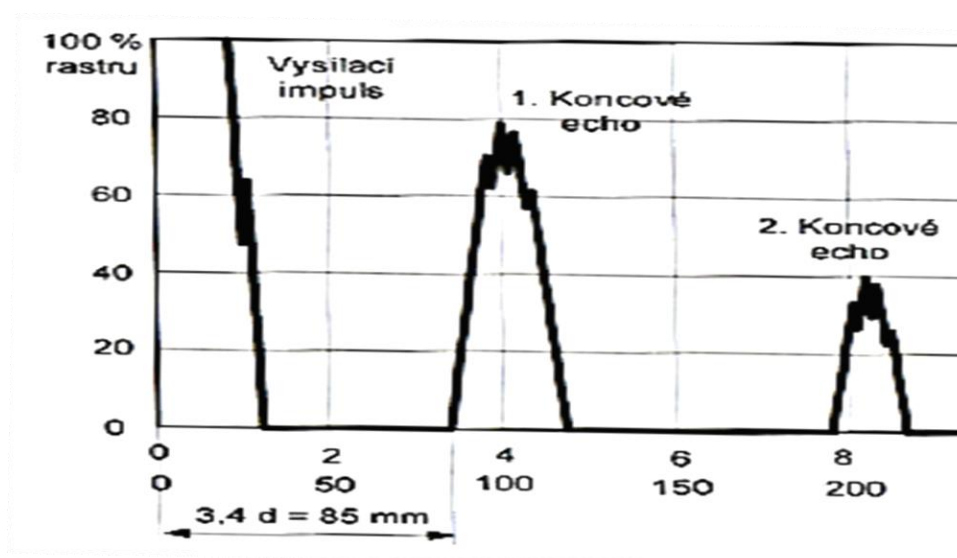
μ – Poissonovo číslo



3.1.5 Měření tloušťky zkoušeného materiálu

Možnost změření tloušťky v daném měřeném úseku kontrolovaného materiálu je důležitou hodnotou pro zdárnou kalibraci ultrazvukového defektoskopu. V ideálním případě se kontrolovaný materiál změří mechanicky pomocí posuvného měřítka. Po naměření tloušťky se ultrazvukový defektoskop kalibruje vhodným nastavením rozsahu časové základny. Do naměřeného úseku materiálu se vysílají ultrazvukové vlny. Dosáhne-li na displeji ultrazvukového defektoskopu některé koncové echo hodnoty alespoň 80 % vysílacího impulsu, tak se jedná o kvalitní vypovídací hodnotu prozvučení a síly vysílaného signálu. Hodnota mechanicky naměřené tloušťky se odečte od levé náběžné hrany toho koncového echa, které dosáhlo alespoň 80 % vysílacího impulsu zobrazeného na displeji ultrazvukového defektoskopu. Tímto rozdílem se získá optimální hodnota pro změnu zesílení vysílacího impulsu. Po této změně se opět provede kalibrace (viz obrázek 13) (Regazzo a Regazzová, 2013).

Obrázek 13 - Měření tloušťky zkoušeného materiálu



Zdroj: (Regazzo a Regazzová, 2013, s. 61)

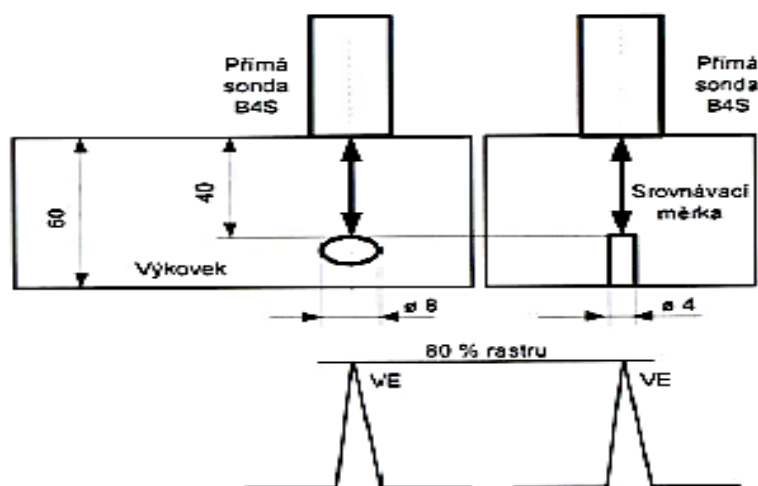
3.1.6 Stanovení náhradní velikosti vady

Pro bezchybnou a takřka neomylnou defektoskopii je zapotřebí stanovit náhradní velikost vady. Ta se stanoví za pomoci srovnávacích měrek (Regazzo a Regazzová, 2013).



Stanovení náhradní velikosti vady znamená, že vadě přiřadíme náhradní velikost. Náhradní velikost vady je průměr terčíku kolmého k ose ultrazvukového svazku v dráze rovné dráhy ultrazvuku k vadě, které má vadové echo stejné výšky jako přirozená vada (viz obrázek 14) (Regazzo a Regazzová, 2013, s. 67).

Obrázek 14 - Stanovení náhradní velikosti vady



Zdroj: (Regazzo a Regazzová, 2013, s. 68)

3.2 Sondy ultrazvukového defektoskopu

Sondy ultrazvukového defektoskopu slouží k vysílání a přijímání zpětné ultrazvukové vlny. Ultrazvukové sondy se především rozdělují podle použitých elektroakustických měničů. Další možné rozdělení je podle typu vysílaného ultrazvukového vlnění, podle technického provedení ultrazvukové sondy, podle počtu elektroakustických měničů, podle kontaktu s testovaným materiálem a podle mnoha dalších aspektů (Regazzo a Regazzová, 2013; Obraz, 1984; Krautkrämer a Krautkrämer, 1983; Jílek a Jandourek, 1988).

3.2.1 Druhy ultrazvukových sond podle použitého elektroakustického měniče

K vygenerování ultrazvukových vln slouží elektroakustické měniče, které transformují elektrický proud ultrazvukového defektoskopu na mechanické vlnění ultrazvukové vlny. Ultrazvukové sondy se rozdělují podle fyzikálních vlastností použitého elektroakustického měniče na ultrazvukové sondy piezoelektrické, magnetostrikční, kondenzátorové a induktivní. Nejčastěji používané jsou sondy piezoelektrické, které dokážou obsáhnout frekvenční pásmo od 100 kHz a výše. Tato



schopnost je velmi žádaná z hlediska přesného měření v náročných pracovních podmínkách. Méně používané jsou sondy magnetostrikční, které pokrývají frekvenční pásmo od 20 kHz až do 100 kHz. Sondy kondenzátorové a induktivní jsou oceňovány a využívají se ke speciálním defektoskopickým měřením. Tyto speciální sondy jsou úředně ověřeny, označeny nálepkou a zaplombovány ve shodě se zákonem č. 505/1990 Sb., zákon o metrologii. Cejchování se provádí pomocí tuhých nebo kapalných měrek a pomocí cejchovacího zařízení. Cejchování sond se provádí pro přesnou lékařskou a laboratorní diagnostiku (Obraz, 1984; Jílek a Jandourek, 1988; Janský, 2004; Obraz, 1989).

3.2.2 Druhy ultrazvukových sond podle typu vysílaného vlnění

V závislosti na podélném, příčném či povrchovém ultrazvukovém vlnění se ultrazvukové sondy dělí na přímé, úhlové příčné, úhlové podélné a povrchové. Nejpoužívanější sondou je sonda přímá, která je nejvýkonnější a vysílá podélné ultrazvukové vlny. Úhlová sonda pro příčné vlny vysílá podélné ultrazvukové vlny v maximálním úhlu dopadu $57,1^\circ$, kdy se při průchodu rozhraním dvou hmot podélné ultrazvukové vlny transformují na příčné ultrazvukové vlny. Úhlová sonda pro podélné vlny vysílá jak ultrazvukové vlny podélné, tak i příčné, a to v maximálním úhlu dopadu $27,1^\circ$, čímž je tato sonda unikátní pro obtížně prozvučitelné materiály, jako je například šedá litina, kompozity a plasty. Sondy povrchových vln se běžně nevyužívají, protože nejsou sériově vyráběny, i když jsou schopny vysílat po povrchu podélné, příčné a povrchové ultrazvukové vlny (Regazzo a Regazzová, 2013).

3.2.3 Druhy ultrazvukových sond podle technického provedení

Ultrazvukové sondy se v závislosti na útlumu ultrazvukových vln rozdělují podle technického provedení na sondy pro spojitě a impulsové vysílání, které se dále dělí na alpha, delta a gama sondy. Alpha sonda pro spojitě vysílání má jednoduchou konstrukci, protože není potřeba elektroakustický měnič tlumit. Elektroakustický měnič vysílá ve velmi úzkém frekvenčním pásmu krátké vlny a využívá různých tvarových nástavců, které fungují jako sběrníky ultrazvukových vln. Alpha sonda se využívá v případě ultrazvukové defektoskopie tam, kde je zapotřebí vzájemného porovnávání vadových ech. Při využití spojitých sond je potřeba akusticky utlumit a přizpůsobit dané prostředí, ve kterém probíhá defektoskopie. Gama sonda pro impulsové vysílání musí být konstrukčně řešena tak, aby mohla přenášet



elektrické a akustické impulsy, a to s co možná nejmenším zkreslením. Elektroakustický měnič impulsové gama sondy vysílá v širokém frekvenčním pásmu dlouhé vlny, které elektroakustický měnič rozkmitají a je potřeba ho konstrukčně tlumit. Delta sonda je sonda se středně tlumeným elektroakustickým měničem a je kompromisem alpha a gama sondy. Nejčastěji se využívají delta sondy pro jejich minimální zkreslení vadového echa (Obraz, 1989; Regazzo a Regazzová, 2013).

3.2.4 Druhy ultrazvukových sond podle počtu elektroakustických měničů

S ohledem na citlivost a přesnost ultrazvukové defektoskopie se sondy rozlišují podle počtu obsažených elektroakustických měničů na sondy jednoměničové, dvouměničové a víceměničové. Sonda jednoměničová obsahuje jeden elektroakustický měnič, který zabezpečuje vysílání ultrazvukových vln do testovaného materiálu a příjem těchto zpětných, odražených ultrazvukových vln. Dvouměničové sondy obsahují jeden elektroakustický měnič, který vysílá do testovaného materiálu ultrazvukové vlny a druhý elektroakustický měnič, který přijímá a zpracovává odražené vlny. Víceměničové sondy obsahují 8, 16, 32, 64 a více elektroakustických měničů, které všechny slouží k vysílání ultrazvukových vln a k přijímání a zpracování odražených ultrazvukových vln. Víceměničové sondy se velmi využívají především v lékařství a laboratorní defektoskopii (Regazzo a Regazzová, 2013).

3.2.5 Druhy ultrazvukových sond podle kontaktu s testovaným materiálem

S ohledem na defektoskopické měření během pracovních podmínek nelze vždy zajistit maximální kontakt ultrazvukové sondy s povrchem testovaného materiálu, proto vzniká mezi tímto spojením ještě vzduchová mezera. Vlivem této vzduchové mezery dochází k degeneraci vyslané ultrazvukové vlny a ke zkreslení odražené zpracovávané ultrazvukové vlny. Proto se ultrazvukové sondy dělí z hlediska vzdálenosti měření od povrchu testovaného materiálu na ultrazvukové sondy kontaktní a imerzní. Kontaktní ultrazvukové sondy se přikládají skrze vazební prostředek přímo na povrch kontrolovaného materiálu. Vazební prostředek zabezpečuje bezproblémový a nezkreslený přenos ultrazvukových vln, které by byly jinak vzduchovou mezerou utlumené. Dále zajišťuje vazební prostředek i snížení tření mezi povrchem testovaného materiálu a krycí destičkou či fólií chránící elektroakustický měnič kontaktní sondy. Imerzní sondy se využívají k bezkontaktní defektoskopii prostřednictvím vazebního prostředku, který tvoří sloupec vody či



velmi řídký olej. Imerzní sondy nemají elektroakustické měniče chráněné proti tření, ale proti vniknutí vazebního prostředí (Regazzo a Regazzová, 2013).

3.3 Měníče ultrazvukové sondy

Elektroakustické měniče jsou součástí ultrazvukové sondy a slouží v ultrazvukové defektoskopii jako transformátor energií. Elektroakustické měniče transformují elektrickou energii o určité hodnotě na energii mechanickou, kterou vysílají do prostředí. V opačném případě elektroakustické měniče tuto odraženou mechanickou energii přijímají z prostředí a transformují ji na elektrickou energii. Tato elektrická energie se již dále pomocí ultrazvukového defektoskopu zpracovává a vyhodnocuje na displeji ultrazvukového defektoskopu. Elektroakustické měniče se rozdělují podle fyzikálních vlastností, díky kterým transformují elektrickou energii na energii mechanickou. Proto se dělí na piezoelektrické, magnetostrikční, elektrodynamické, elektrostatické, termomechanické a optické měniče (Obraz, 1984; Obraz, 1989).

3.3.1 Piezoelektrické měniče

Piezoelektrické měniče jsou nejčastěji používané elektroakustické měniče, a to z důvodu piezomateriálu, který tvoří základ tohoto měniče. Takovýto měnič je schopný vygenerovat mechanické vlnění o frekvenci vyšší, než je 100 kHz a je cenově dostupný. Piezomateriály se dělí podle struktury na krystalické, polykrystalické a polymerní piezoelektrické materiály se schopností piezoelektrického jevu. Samotný piezoelektrický jev byl objeven na krystalickém piezomateriálu, kterým je např.: křemen-oxid křemičitý. Nejdůležitějším piezomateriálem z hlediska nedestruktivní defektoskopie jsou polykrystalické materiály. Konkrétně se jedná o feroelektrické polykrystaly, které mají proměnnou elektrickou polarizaci, jež lze uměle ovlivňovat. Feroelektrickým polykrystalem je niobátová, zirkonátová a báriumtitanátová keramika (VŠCHT, 2020; Langenberg et al., 2012; Obraz, 1989; Obraz, 1984).

Piezoelektrický přímý jev je uskutečnitelný, je-li krystalická hmota schopna generovat elektrický náboj vlivem elastické deformace ve všech třech osách souřadného systému. Působí-li na hmotu mechanické ovlivňování tlakem, tahem, ohybem, krutem a stříhem, tak nastává nerovnoměrné vysunutí a posunutí kladných

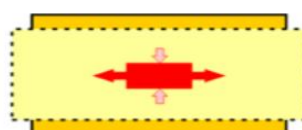


a negativních iontů tvořících krystalickou mřížku hmoty. Tímto nerovnoměrným posunem iontů dojde k vytvoření elektrických dipólových momentů a k vytvoření elektrického pole. Velikost působícího namáhání krystalické hmoty je přímo úměrná vygenerovanému elektrickému náboji. (Obraz, 1989; Obraz 1984).

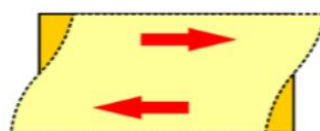
Slouží-li krystalická hmota jako kondenzátor a přijímač elektrického náboje a je ovlivňována působením elektrického pole, tak dochází k její mechanické deformaci, což je nepřímý piezoelektrický jev. Piezoelektrický jev je možný pouze u takových krystalických hmot, které mají krystalovou strukturu tvořenou kladnými a zápornými ionty bez jejich středu symetrie. Naopak krystalové hmoty, které mají střed symetrie, nelze mechanicky deformovat a přemísťovat za účelem generování elektrického náboje. Z toho důvodu nelze u těchto krystalických látek docílit volného pohybu iontů, jež by vytvořily elektrické dipóly vlivem mechanického namáhání (Obraz, 1989; Obraz 1984).

Vzniklou frekvenci mechanických vln vytvořených z kmitu krystalu (viz obrázek 15) je potřeba rozkmitat, aby nedošlo k jejich transformaci na stojaté vlny, čehož se dosáhne ideální hodnotou elektrického napětí. To má za následek i mechanický kmit měniče, čímž se maximalizuje akustický tlak vln (VŠCHT, 2020; Obraz, 1989; Obraz 1984).

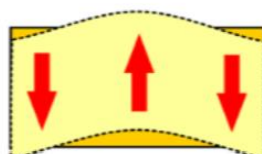
Obrázek 15 – Kmity krystalů



podélné kmity



střižné kmity



ohybové kmity

Zdroj: (VŠCHT, 2020)



3.3.2 Magnetostrikční měniče

Magnetostrikční měniče jsou měniče, které jsou již v dnešní běžné ultrazvukové defektoskopii na ústupu. Především z důvodu nedostatečných technologických a výkonnostních parametrů, které tyto měniče poskytují. Magnetostrikční měniče jsou nedostatečné pro uplatnění v medicíně, v defektoskopických laboratořích či ve výkonnostní ultrazvukové defektoskopii, jako je tomu u piezoelektrických měničů. Uplatnění magnetostrikčních měničů lze najít v nízkofrekvenční defektoskopii, kde se provádí defektoskopie materiálů s velkým útlumem, jako je například beton a těžká keramika (Obraz, 1989; Obraz 1984).

Pro ultrazvukovou defektoskopii s využitím magnetostrikčních měničů je důležitá magnetostrikční vlastnost jader. Magnetostrikční vlastnost materiálu je schopnost generovat mechanické kmity vlivem elastické deformace působením magnetického pole. K deformaci, poměrnému prodloužení, dochází buď v předmagnetizovaném či nezmagnetizovaném stavu jádra, kdy se vlivem budícího proudu v cívice indukuje elektromagnetické pole kolem jádra, které jej ovlivňuje. Působením elektromagnetického pole dochází ke změně hustoty magnetického toku, který je způsobený indukovaným magnetickým polem, čímž při změně hodnoty magnetického pole dochází ke vzniku mechanických kmitů (Obraz, 1989).

3.3.3 Elektrodynamické měniče

Elektrodynamické měniče mohou generovat podélné a příčné vlny, a to díky magneto-induktivnímu jevu. V průběhu magneto-induktivního jevu měniče dochází ke vzniku Lorentzovy síly, která umožňuje vznik ultrazvukových vln za konstantního působení magnetického pole. Tím se indukuje v cívice střídavý proud a v testovaném materiálu vířivé proudy. Elektrodynamické měniče mají v porovnání s piezoelektrickými měniči výrazně nižší citlivost. Na rozdíl od piezoelektrických měničů nepotřebují kontaktní akustickou vazbu. Díky tomu jsou elektrodynamické měniče spíše vhodné pro krátké impulsy, které lze využít při defektoskopii za vysokých teplot, a to při 1 100 °C (Obraz, 1989).

3.3.4 Elektrostatické měniče

Elektrostatické měniče lze využít pro vysílání a přijímání ultrazvukových vln jen v laboratorních podmínkách. Důvodem je velmi nízká citlivost,



kvůli které se elektrostatický měnič nehodí pro jakékoliv běžné defektoskopické testování. Přesto mají elektrostatické měniče svou výjimečnost, kterou je rovnoměrná frekvenční charakteristika s malými ztrátami do vysokých frekvencí až 100 MHz (Obraz, 1989).

3.3.5 Termomechanické měniče

Termomechanický měnič je dalším měničem, který je využitelný především v laboratorních podmínkách. Termomechanický měnič je schopný generovat ultrazvukové vlny o frekvenci až 200 MHz. Standardní hodnotou frekvenčního pásma je frekvence od 1 MHz až do 30 MHz s velmi krátkými impulsy a krátkou náběžnou hranou. Nejvýznamnější vlastností termomechanického měniče je ale jeho schopnost bezkontaktního zkoušení až do vzdálenosti několika metrů od povrchu testovaného materiálu, a to i s vyšší citlivostí defektoskopie, než je tomu u piezoelektrického měniče. Důvodem, proč se termomechanický měnič využívá pouze v laboratorních podmínkách i přes své výrazné pozitivní vlastnosti, je cena a křehká konstrukce kompletního optického přístroje využívajícího termomechanický měnič (Obraz, 1989).

3.3.6 Optické měniče

Optický měnič je speciálním měničem, který jako světelný zdroj slouží k zobrazení ultrazvukového pole tuhého testovaného materiálu. Jádrem optického měniče je tvořeno laserem, který je schopný intenzivně generovat fokusovaný svazek monochromatického světla dopadajícího na povrch tuhého testovaného materiálu. Dopadající paprsky umožní zobrazení především povrchových ultrazvukových vln na testovaném materiálu, a to díky šlíře. Šlíra je projevem změny indexu lomu dopadajícího světla při kontaktu na povrchu tuhého materiálu ovlivňovaného ultrazvukovým polem (Obraz, 1989).



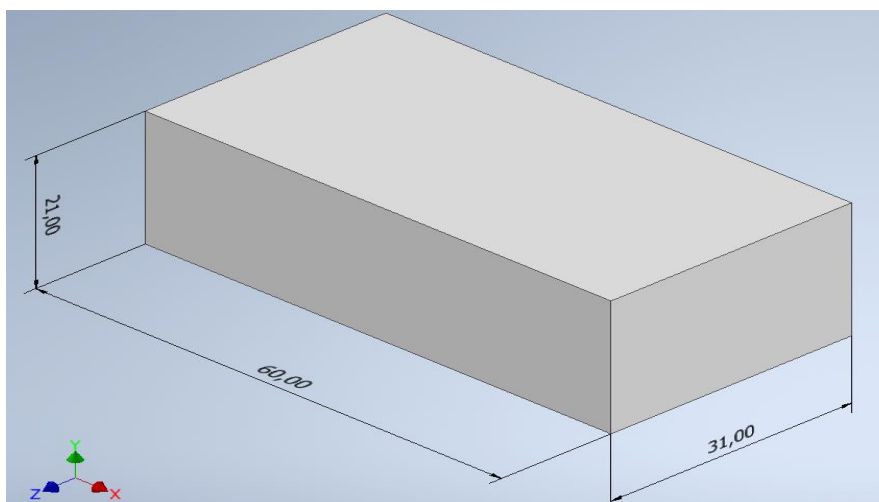
4 Praktické ukázky na vybraných objektech

Technologické postupy formování, tavení, odlévání a obrábění byly uskutečňovány a upravovány s ohledem na uživatelskou realizaci v domácích podmínkách. Detailnější postupy technologických procesů jsou pečlivě rozepsány v části Přílohy.

4.1 Výroba kontrolního etalonu

Prvotní podmínkou realizace výroby etalonu bylo zvolit vhodný model odlitku, který by splňoval potřebné tvarové, rozměrové a strukturální parametry. Jako model bylo vybráno víko od parfému, které má geometrický tvar kvádra a jeho struktura je z polymerového materiálu (viz obrázek 16).

Obrázek 16 – Model odlitku [mm]



Zdroj: Vlastní zpracování v Inventoru

Povrch polymerového modelu měl nízkou hodnotu drsnosti s malým počtem pórů, což bylo ideálním předpokladem pro nízkou lepivost formovací směsi (viz Příloha 1 – Model odlitku).

Jako formovací směs pro gravitační odlévání na syrovo do jednoduché nerozebíratelné formy bylo zvoleno ostřívo kyselého charakteru, jež bylo tvořeno křemičitým pískem, jako pojivo byla využita β – sádra. Ostřívo a pojivo bylo odměřeno v poměru 18:2 pomocí 25g plastové odměrky. Odměřená směs ostříva a pojiva byla v poměru 450:50 g pečlivě promíchána a sjednocena pomocí lopatky v kovové míse (viz Příloha 2 – Formovací směs).



Voda jako aktivátor byla přidávána stochasticky tak, aby se za stálého míchání směsi dosáhlo požadované aktivace vlastností formovací směsi a především její vaznosti. Ideální hodnota vaznosti byla ověřena na vytvořeném vzorku formovací směsi. Testovací vzorek byl tlakem dlaně tvářen do oválu. Poté byl v rukách rozlomen, přičemž byla bedlivě sledována drobitivost v místech dělicí roviny (*viz obrázek 17*).

Obrázek 17 – Formovací směs



Zdroj: Vlastní zpracování

Vyhloubením jámy do země a jejím začištěním byl vytvořen formovací rám formy (*viz Příloha 3 – Formování*). Do tohoto formovacího rámu byla vsypána formovací směs, která byla od rámu formy k jejímu středu udusána dusadlem. Formovací rám byl plněn formovací směsí až nad úroveň rámu, poté byla přebytečná směs seříznuta broušenou kamennou deskou. Dutina formy byla vytvořena rovnoměrným suvným pohybem vtlačené plochy modelu (*viz obrázek 18*).

Obrázek 18 – Dutina formy



Zdroj: Vlastní zpracování

Jako vsázka pro tvorbu taveniny byl zvolen takový materiál, který bude vhodný z hlediska dostupnosti, slévatelnosti a zpracovatelnosti. Proto byla použita rybářská



olůvka. Vsázka nebyla tavena v tavné peci, ale v litinovém kastrolu na otevřeném ohni. Tento litinový kastrol byl dále využit i jako licí pánve ke gravitačnímu odlévání na syrovo. Na vyplnění dutiny formy, která má geometrický tvar kvádrů o objemu 39,06 cm³, by bylo teoreticky potřeba 429,66 g taveniny bez započtení koeficientu smrštění. Hmotnost samotné vsázky proto byla 800 g z důvodů možných ztrát při tavení a odlévání (viz Příloha 4 – Tavení a odlévání).

Po zjištění ideální zabíhavosti taveniny, která byla ověřena změnou úhlu náklonu licí pánve nad ohništěm, bylo provedeno odlévání do formy. Odlévání taveniny do formy bylo provedeno rovnoměrně konstantním krouživým pohybem licí pánve nad formou, aby došlo k dokonalému zaběhnutí taveniny do všech rohů formy (viz obrázek 19).

Obrázek 19 – Odlévání etalonu



Zdroj: Vlastní zpracování

Po dokonalém vychladnutí taveniny byla netrvalá forma rozbita a odlitek byl vyjmut pomocí sikových kleští. Následně byl odlitek okartáčován jemným ocelovým kartáčem od formovací směsi a vizuálně vyhodnocen (viz obrázek 20).

Obrázek 20 – Hodnocení odlitku



Zdroj: Vlastní zpracování



Strany hrubého odlitku byly sjednoceny osekáním pomocí sekáče a kladiva. Dále byl primární odlitek upnut do čelistí stolního svěráku. Dělicím procesem pomocí ruční pily s plátem na železo byl odlitek rozdělen na tři stochastické sekundární části. Podmínkou pro rozdělení primárního odlitku na tři části bylo vytvořit sadu kalibračních měrek pro ultrazvukový tloušťkoměr a zachovat při tom požadovaný geometrický tvar kvádrů jednotlivých částí. Následně byly sekundární odlitky nahrubo obráběny pilníkem v domácích podmínkách. Dokončovací operace byla provedena na CNC frézce firmou SIP v Kladně (viz Příloha 5 – Čištění hrubého odlitku).

Určující podmínkou pro obrábění odlitků nebyl přídavek na obrábění, ale podmínka rovinnosti ploch a kolmosti jejich stran. Vytvořené etalony s hodnotou střední aritmetické úchylnosti drsnosti povrchu 1,6 μm byly stochasticky očíslovány (viz obrázek 21).

Obrázek 21 – Etalony



Následně byla provedena jedna měřicí operace etalonů pomocí třmenového mikrometru z důvodu zaevidování jejich základních rozměrů (viz tabulka 1).

Tabulka 1 – Orientační rozměry etalonů

Orientační rozměry stran etalonů [mm]			
Strana:	a	b	c
Etalon 1	31,9	16,55	16,1
Etalon 2	29,2	23,94	13,34
Etalon 3	29,6	19,27	13,47

Zdroj: Vlastní zpracování



4.2 Ověření přesnosti měření

U vytvořených etalonů byla definována vhodná měřicí plocha, která sloužila k měřicím pokusům. Na této ploše bylo kontrastně vyznačené měřicí pole jako přesně dané místo pro měření. Toto pole bylo kontrastně definováno začerněním pomocí lihového fixu ze dvou na sobě závislých důvodů, jejichž podstata plyne ze zásad Poka - Yoke.

První podstatou zvýraznění měřicího pole byla minimalizace variability naměřených hodnot při měřicích pokusech, která by ovlivnila vypovídací hodnotu pokusů při statistické analýze. Účelem tedy bylo zajistit co nejmenší toleranci naměřených výsledků.

Druhou podstatou zvýraznění měřicího pole bylo co nejvíce snížit degradaci měřicího média pyrometru. Infračervený laser pyrometru by se od kovově lesklého povrchu etalonů odrážel a lámal. Začerněním plochy se snížila pravděpodobnost degradace měřicího média pyrometru.

Měřicí výzkum byl kontinuálně doprovázen snímáním teploty povrchu testovaného etalonu pomocí ručního pyrometru (*Příloha 6 – Příprava k měření*). Důvodem teplotního měření pyrometrem bylo zjistit variabilitu a závislost výsledků jednotlivých měřicích pokusů v závislosti na teplotě měřených etalonů (*viz obrázek 22*).

Obrázek 22 – Pyrometr



Zdroj: Vlastní zpracování

Veškerý měřicí výzkum byl uskutečněn v průběhu osmi hodin jednoho dne. Výzkum byl proveden v provozních podmínkách zázemí letiště Kbely. Venkovní teplota dne 15.února byla v ranních hodinách v 7:00 okolo 16 °C. Z důvodu přípravy leteckých strojů a časté výměny vzduchu docházelo ke kolísavé změně vnitřní teploty z 24 °C na 16 °C.



Pro samotný měřicí výzkum byl určen jako objekt měření etalon 2. Tento etalon byl měřen třmenovým mikrometrem, korozním ultrazvukovým tloušťkoměrem a pasametrem. Etalon 1 a 3 byly určeny jako pomocné kalibrační měrky pro kalibraci ultrazvukového tloušťkoměru na základě známé tloušťky testovaného objektu.

Kontrolní měření etalonu 2 bylo uskutečněno pomocí třmenového mikrometru (viz obrázek 23) s měřicím rozsahem 0–25 mm, který měl platnou certifikaci. Kontrolní měření etalonu bylo prováděno v předem definovaném měřicím bodě za ustálených a minimálních vibračních podmínek. Třmenový mikrometr byl upnut do svěráku za izolační desku. Etalon byl vkládán mezi měřicí dotyky třmenového mikrometru vždy určenou plochou k měření. Při měření etalonu třmenovým mikrometrem bylo dbáno na prevenci možného poškození měřeného vzorku, proto byl etalon uchycen a doměřen pouze přes vymezovač měřicí síly tzv. řehťáčku.

Obrázek 23 – Třmenový mikrometr



Zdroj: Vlastní zpracování

Hodnoty kontrolního měření třmenovým mikrometrem a pyrometrem byly vkládány do vytvořené tabulky (viz tabulka 8, Příloha 7 – Měření třmenovým mikrometrem) tabulkového kalkulaátoru Excel od společnosti MS Office. Tyto naměřené hodnoty byly podrobeny statistickým analýzám a jejich výsledky byly implementovány do tabulky statistických znaků (viz tabulka 2).

Tabulka 2 – Statistické znaky výsledků měření třmenovým mikrometrem

Statistický ukazatel:	Hodnota:
Aritmetický průměr [mm]	12,770
Směrodatná odchylka [mm]	0,045
MIN. [mm]	12,580
MAX. [mm]	12,850
Pearsonův korelační koeficient	0,098

Zdroj: Vlastní zpracování v MS Excel



Dále byl ke kontrolnímu měření využit korozní ultrazvukový tloušťkoměr T – Mike ES (*Příloha 8 – Měření ultrazvukovým tloušťkoměrem*). Před zahájením samotného kontrolního měření byla provedena komplexní kalibrace ultrazvukové měřicí techniky.

Tato kalibrace byla uskutečněna podle provozních pokynů vytvořených výrobcem. Nejdříve byla provedena vizuální kontrola jakosti měřicí plochy sondy a neporušenost přenosového kabelu sondy. Povrch sondy byl kontrolován z důvodu možného vzniku vad zdvojením, čímž by došlo ke špatnému odečtení hodnot délky dráhy procházejícího ultrazvukového vlnění. To by mělo za následek násobné zobrazení naměřené hodnoty.

Po vizuální kontrole dvojité sondy, která je v půlce příčně dělená na vysílací a přijímací část, byla provedena její kalibrace tzv. nulování (*viz Příloha 9 – Nulování sondy*). Nulování bylo provedeno kvůli předchozímu měření defektoskopických pracovníků, kteří prováděli měřicí operace na leteckých kompozitech. Vynulováním sondy bylo umožněno ultrazvukovému tloušťkoměru vypočítat si novou hodnotu pevného zpoždění vlnění v ultrazvukové sondě. Proces vynulování sondy byl proveden po zprovoznění ultrazvukového tloušťkoměru tím, že byl na kontaktní kalibrační disk ultrazvukového tloušťkoměru nanesen vazební prostředek, ke kterému byla přiložena sonda. Po zobrazení „Prb0“ byla kalibrace ukončena (*viz obrázek 24*).

Obrázek 24 – Výsledek kalibrace sondy



Zdroj: Vlastní zpracování



Jako vazební prostředek pro ultrazvukovou defektoskopii bylo použito mazivo AeroShell Grease 22, které se používá pro tribologické účely letadel. Tento vazební prostředek byl zvolen na základě znalostí a zkušeností vojenských defektoskopických pracovníků. Na povrch etalonu byla akustická vazba nanášena aplikačním štětečkem ve velmi tenkém filmu.

Samotná kalibrace ultrazvukového tloušťkoměru byla provedena na základě známé tloušťky testovaného etalonu 2. Poté byla ověřena úroveň správnosti vynulování měřicí sondy a kalibrace ultrazvukového tloušťkoměru na etalonu 1 a 3 (viz Příloha 10 – Kalibrace ultrazvukového tloušťkoměru). Následně bylo provedeno orientační měření etalonu 2 na základě ideální tloušťky vazebního prostředku (viz Příloha 11 – Měření s akustickou vazbou), která byla stanovena empiricky (viz obrázek 25). Ultrazvukový tloušťkoměr měl platnou certifikaci.

Obrázek 25 – Situace vyskytující se při měření



Zdroj: Vlastní zpracování



Po padesáti měřicích pokusech etalonu 2 pomocí ultrazvukového tloušťkoměru a pyrometru byly výsledné hodnoty evidovány do tabulky hodnot (viz tabulka 9, Příloha 12 – Výsledky měření ultrazvuku). Tyto naměřené hodnoty byly podstoupeny statistické analýze, jejíž výsledky byly vloženy do tabulky statistických znaků (viz tabulka 3).

Tabulka 3 – Statistické znaky výsledků měření ultrazvukovým tloušťkoměrem

Statistický ukazatel:	Hodnota:
Aritmetický průměr [mm]	12,500
Směrodatná odchylka [mm]	0,039
MIN. [mm]	12,450
MAX. [mm]	12,630
Pearsonův korelační koeficient	-0,028

Zdroj: Vlastní zpracování v MS Excel

Na základě provedených měřicích operací pomocí třmenového mikrometru a ultrazvukového korozního tloušťkoměru byla zdrojová data z měření podrobena statistické analýze. Z výsledků analýzy byla vytvořena tabulka (viz tabulka 4), z hodnot směrodatné odchylky vyplývá, že kontrolní měření etalonu 2 bylo přesnější pomocí ultrazvukového tloušťkoměru než třmenovým mikrometrem.

Tabulka 4 – Přesnost měření

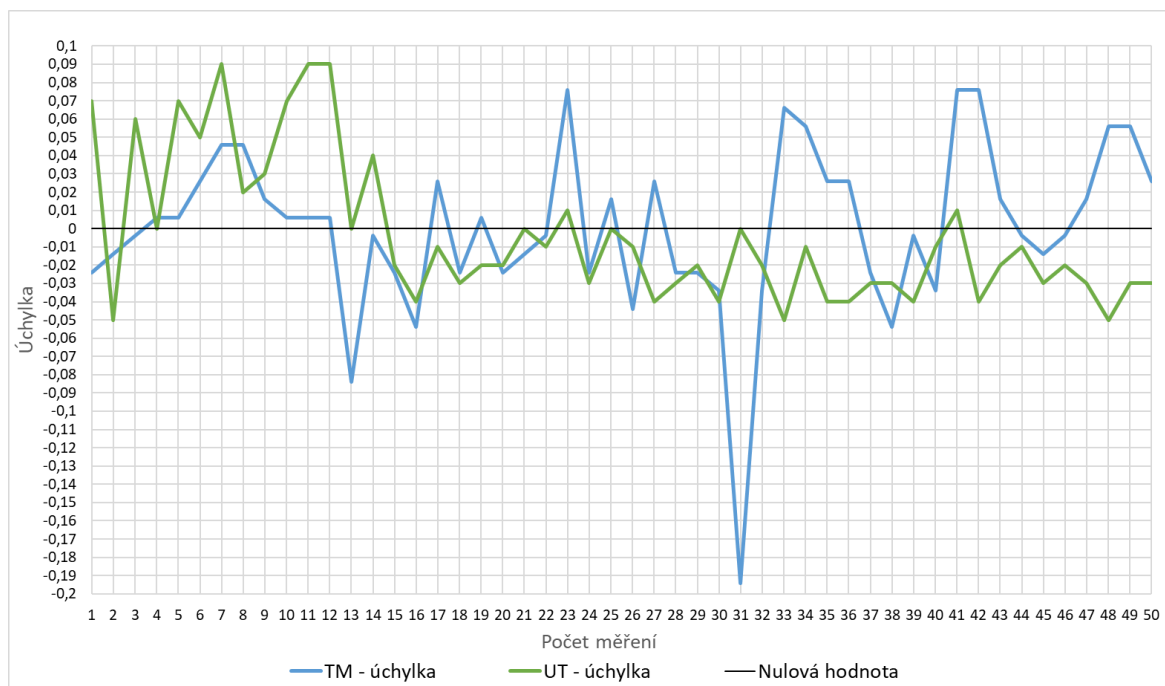
Jednotky [mm]	Směrodatná odchylka	Maximální úchylka	Minimální úchylka
Třmenový mikrometr	0,045	0,076	-0,194
Ultrazvukový tloušťkoměr	0,039	0,090	-0,050

Zdroj: Vlastní zpracování v MS Excel

Přesnost měření ultrazvukovým tloušťkoměrem byla kromě číselné hodnoty směrodatné odchylky i graficky znázorněna. Graf 1 znázorňuje odchýlení jednotlivých měřicích pokusů od průměrné hodnoty tloušťky etalonu 2.



Graf 1 – Přesnost měření



Zdroj: Vlastní zpracování v MS Excel

Doplňkové měření bylo provedeno pasametrem s měřicím rozsahem 0 mm – 25 mm a s přesností měření na 2 μm , kterému odpovídá jeden dílek stupnice (viz Příloha 13 – Pasametr). Měřicí proces byl uskutečněn vynulováním pasametru na základní hodnotu měřené tloušťky etalonu 2. V průběhu měření bylo kontinuálně prováděno i měření pyrometrem. Doplňkové měření pasametrem bylo uskutečněno za ustálených měřicích podmínek, kdy byl pasametr položen na tvarové podložce (viz Příloha 14 – Měření pasametrem). Etalon byl vkládán mezi měřicí dotyky tak hluboko, až byl vymezen namontovaným vyměnitelným dorazem pasametru (viz obrázek 26). Tento doraz zabraňoval při měřicích pokusech posunout etalon hlouběji za měřicí dotyky pasametru a tím ovlivnit výsledky měření.



Obrázek 26 – Měření pomocí pasametru



Zdroj: Vlastní zpracování

Kontrolní doplňkové měření pomocí pasametru jakožto měřidla porovnávacího, bylo provedeno kvůli zjištění vlivu teploty prostředí na rozměr etalonu 2. Měření tedy bylo uskutečněno pro zjištění odchylky od předem nastaveného rozměru. Zdrojová data měření byla uložena do tabulky (viz tabulka 10, Příloha 15 – Výsledky měření pasametrem) a dále byla analyzována pomocí statistických metod. Výsledná data byla implementována do tabulky statistických znaků (viz tabulka 5).

Tabulka 5 – Statistické znaky výsledků měření pasametrem

Statistický ukazatel:	Hodnota:
Směrodatná odchylka [mm]	0,002
Pearsonův korelační koeficient	0,965

Zdroj: Vlastní zpracování v MS Excel

Zdrojová data získaná z měření třmenovým mikrometrem, ultrazvukovým tloušťkoměrem, pasametrem a pyrometrem byla společně analyzována pomocí korelačního koeficientu. Číselná hodnota korelačního koeficientu byla implementována do tabulky (viz tabulka 6) a graficky znázorněna (viz graf 2).

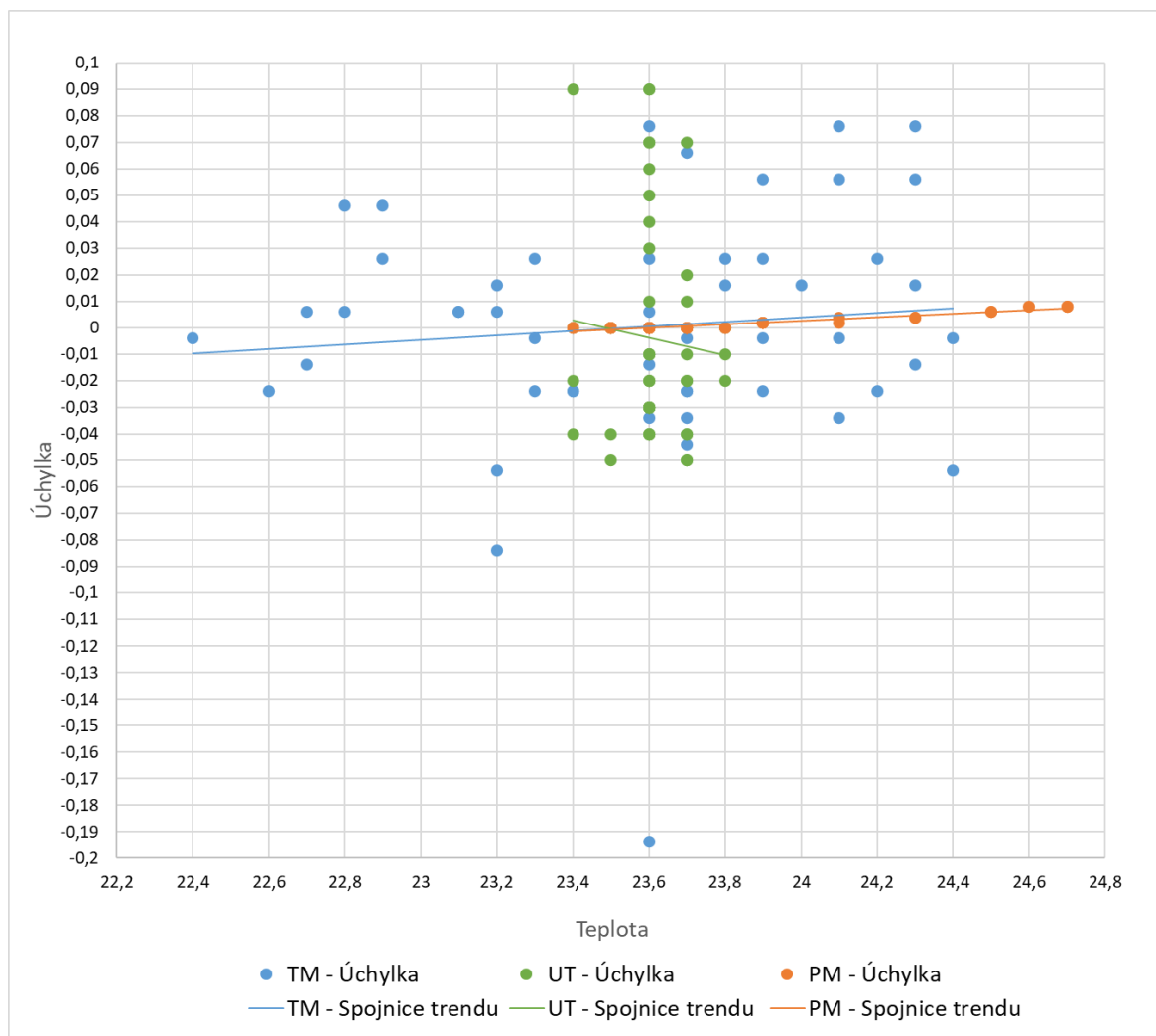
Tabulka 6 – Závislost na teplotě

Pearsonův korelační koeficient	Hodnota
Třmenový mikrometr	0,098
Ultrazvukový tloušťkoměr	-0,028
Pasametr	0,965

Zdroj: Vlastní zpracování v MS Excel



Graf 2 – Závislost rozměru na teplotě



Zdroj: Vlastní zpracování v MS Excel

Z číselné hodnoty korelace a jejího grafického zobrazení vyplynula závislost měřeného rozměru etalonu na jeho teplotě. To bylo prokázáno díky hodnotám získaných pasametrem, který má vysokou citlivost měření. Výzkumným měřením byla zjištěna silná pozitivní korelace měřeného rozměru etalonu 2 na jeho teplotě při měřicí operaci za využití pasametru. Hodnoty naměřené třmenovým mikrometrem a ultrazvukovým tloušťkoměrem nevykazovaly takřka žádnou korelaci.



Závěr

Autor této práce poukazuje na významný charakter ultrazvukové defektoskopie. Ze srovnání podstaty detekčního média ultrazvukové měřicí techniky s jinými metodami měření, je prokázána jeho vyšší detekční účinnost. Tyto poznatky predikují význam a důležitost ultrazvukové defektoskopie i jako měřicí techniky takové.

Výsledek hlavního výzkumného měření, který byl zjištěn pomocí statistické metody směrodatné odchylky, poukazuje na přesnost měření ultrazvukové měřicí techniky. Tento závěr byl učiněn i přes výsledky doplňkového výzkumu. Podstatou doplňkového výzkumu bylo zjistit závislost variability měřených rozměrů na teplotě etalonu. Pro zjištění této závislosti byla použita statistická metoda korelace. Výsledky korelačního koeficientu vykazují závislost měřeného rozměru na teplotě, to ale pouze u pasametru. Korelační koeficienty třmenového mikrometru a ultrazvukového tloušťkoměru vykazují téměř nulovou hodnotu korelace, proto nebyl výsledek hlavního měřicího výzkumu teplotně ovlivněn.

Pasametr jakožto měřidlo porovnávací, které neslouží k měření délkových rozměrů, umožnilo zjistit díky korelačnímu koeficientu závislost rozměru na teplotě. Kladná hodnota korelace pasametru definuje přímou lineární závislost mezi zkoumanými znaky.

Tento měřicí výzkum potvrdil unikátní vlastnosti ultrazvukové nedestruktivní defektoskopie, jejíž kompatibilitnost z ní činí mnohoúčelovou měřicí techniku.

Poznámka autora: I v navazujícím studiu na ČZU – IUB bych se rád zabýval problematikou nedestruktivní defektoskopie pod vedením doc. Ing. Martina Pexy, Ph.D. a v zázemí 21. základny taktického letectva v Čáslavi a 24. základny dopravního letectva ve Kbelích.



Seznam literatury

BARTÁK, Jiří, 2012. CWS ANB: Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení. *Česká svářecí společnost ANB* [vid 19. září 2020]. Získáno z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>

BROŽEK, Milan, 2008. *Strojírenská technologie I: (návody ke cvičením)*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, katedra materiálu a strojírenské technologie. ISBN 978-80-213-1780-2.

HALLBÄCK, Jonas, 2017. Nedestruktivní zkoušky v SKF. *Evolution*. [vid 25. září 2020]. Získáno z: <https://evolution.skf.com/cs/nedestruktivni-zkousky-v-skf/>

JANDURA, Václav, 2018. Nové metody NDT dle EN ISO 9712 – technicka-zarizeni.cz. www.technicka-zarizeni.cz. [vid. 19. září 2020]. Získáno z: <https://www.technicka-zarizeni.cz/nove-metody-ndt-dle-en-iso-9712/>

JANSKÝ, Jan, 2004. Ultrazvuková defektoskopie. s. 18.

JÍLEK, Jaroslav a Pavel JANDOUREK, 1988. *Popular NDT videos 03 – UT skúšanie ultrazvukom*. 1988. JÍLEK, Jaroslav a Pavel JANDOUREK. Brno: VUT v Brně.

KOL. ATG S.R.O., 2014a. *Infra-ATG - NDT defektoskopie a personální kvalifikace* [vid. 29. listopad 2020]. Získáno z: <https://www.atg.cz/ndt-191&display=IRT>

KOL. ATG S.R.O., 2014b. *magnet -ATG - NDT defektoskopie a personální kvalifikace* [vid. 28. listopad 2020]. Získáno z: <https://www.atg.cz/ndt-131&display=MT>

KOL. ATG S.R.O., 2014c. *netěsnost-ATG - NDT defektoskopie a personální kvalifikace* [vid. 28. listopad 2020]. Získáno z: <https://www.atg.cz/ndt-171&display=LT>

KOL. ATG S.R.O., 2014d. *radio-ATG - NDT defektoskopie a personální kvalifikace* [vid. 29. listopad 2020]. Získáno z: <https://www.atg.cz/ndt-111&display=RT>

KOL. ATG S.R.O., 2014e. *UT-ATG - NDT defektoskopie a personální kvalifikace* [vid. 28. listopad 2020]. Získáno z: <https://www.atg.cz/ndt-121&display=UT>

KOL. ATG S.R.O., 2014f. *vířivka-ATG - NDT defektoskopie a personální kvalifikace* [vid. 28. listopad 2020]. Získáno z: <https://www.atg.cz/ndt-151&display=ET>

KOL. ATG S.R.O., 2014g. *Visuální ATG - NDT defektoskopie a personální kvalifikace* [vid. 28. listopad 2020]. Získáno z: <https://www.atg.cz/ndt-161&display=VT>

KOPEC, Bernard a ČESKÁ SPOLEČNOST PRO NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ, 2008. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 978-80-7204-591-4.

KRAUTKRÄMER, Josef a Herbert KRAUTKRÄMER, 1983. *Ultrasonic testing of materials*. 3. ed. Berlin: Springer. ISBN 978-3-540-11733-9.



KREJČA, Josef a KOL. ATG S.R.O., 2015. *MT Magnetická metoda přášková stupeň I,II.* Praha 9 - Letňany: ATG s.r.o.

LANGENBERG, Karl-Jorg, Rene MARKLEIN a Klaus MAYER, 2012. *Ultrasonic nondestructive testing of materials: theoretical foundations.* Boca Raton: Taylor & Francis. ISBN 978-1-4398-5588-1.

LENFELD, Petr, 2005. Technologie II. *Technická univerzita Liberec, Katedra strojírenské technologie, Oddělení tváření kovů a plastů* [vid. 19. září 2020]. Získáno z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm

MACEK, Karel a STEIDL JOSEF, 2019. Skripta Strojírenské materiály: Kapitoly 2,3.1 a 3.6. *UMI FS ČVUT* [vid. 17. listopad 2020]. Získáno z: <http://umi.fs.cvut.cz/studium/nauka-o-materialu-2/>

MAŘÁNEK, Pavel a KOL. ATG S.R.O., 2014. *kapilární PT Metoda kapilární stupeň 1+2.* Praha 9 - Letňany: ATG s.r.o.

OBRAZ, Jaroslav, 1984. *Ultrazvuk v měřicí technice.*

OBRAZ, Jaroslav, 1989. *Zkoušení materiálu ultrazvukem: celost. vysokošk. příručka pro strojírenskou fakultu vys. škol.* Praha: SNTL. ISBN 978-80-03-00097-5.

REGAZZO, Richard a Marcela REGAZZOVÁ, 2013. *Ultrazvuk: základy ultrazvukové defektoskopie.* Praha: BEN - technická literatura. ISBN 978-80-7300-466-8.

ŠKERŤÍK, Michal a KOL. ATG S.R.O., 2014. *VT Vizuální metoda stupeň I,II.* Praha 9 - Letňany: ATG s.r.o.

TECHNICKÁ PODPORA VOJENSKÉHO LETIŠTĚ ČÁSLAV, 2020. NDT metody Vojenského letiště Čáslav.

TECHNICKÁ PODPORA VOJENSKÉHO LETIŠTĚ KBELY, 2020. NDT metody Vojenského letiště Kbely.

VALOUCHOVÁ, Klára, 2010. *Studijní text pro tříletý učební obory zámečnick.* Získáno z: <http://www.unicprum.cz/index.php/dks/file/53-strojni-mechanik-%09ucebnice?tmpl=component>

VÍTÁMVÁS, Zdeněk, 2009. *Moderní diagnostické metody používané v defektoskopii.* Získáno z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15173

VŠCHT, Fakulta chemicko-inženýrská, 2020. Piezoelektrické senzory. In: . B.m. Získáno z: https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/14_senzory_QCM.pdf?redirected

ZEMAN, Rostislav, 2001. *Popular NDT videos 01 - skúšky zvarových spojov.* 2001. ZEMAN, Rostislav. Ostrava: Středisko didaktických služeb VŠB - TU Ostrava.



Přílohy

Příloha 1 – Model odlitku

Jako tvar budoucího odlitku byl z geometrického hlediska zvolen kvádr, a to z důvodu jeho snadno měřitelné obdélníkové plochy pro sondu ultrazvukového tloušťkoměru. S ohledem na úsporu činností procesu tavení a lití byl vybrán rozměrově velký model odlitku, který umožňuje jeho vícečetné dělení na tři sekundární části odlitku, které by měly tvar kvádrů i po rozdělení a jejich tloušťka stěn by mohla být ještě obráběna. Důvodem dělení odlitku na tři části je kromě úspory technologických postupů především výroba sady kalibračních měrek pro ultrazvukový tloušťkoměr.

Podle technologického postupu formování je potřeba model odlitku chránit nátěrem a ošetřit dělicím prostředkem před vlastním formováním. Ochranné nátěry modelu (např. pryskyřice) slouží ke zvýšení životnosti modelu a k jeho snazšímu vyjmutí z formy. Dělicí prostředky a separátory (např. uhelný prach a grafit) snižují adhezni síly mezi povrchem modelu a formovací směsí formy, čímž se snižuje lepení formovací směsi na model.

Z důvodů minimalizace a úspory technologických postupů bylo jako model odlitku vybráno víko od parfému (viz obrázek 27), které je vyrobené z polymeru. S ohledem na vlastnosti modelu byly splněny podmínky na minimalizaci procesů. Díky téměř dokonale hladkému povrchu s minimem povrchových pórů a nízkou drsností povrchu polymerového modelu nebylo potřeba použít ochranné nátěry a dělicí prostředky. Polymerový kvádr byl vybrán vhodně i z hlediska vícečetného dělení kvůli jeho rozměrovým parametrům.

Obrázek 27 – Model odlitku



Zdroj: Vlastní zpracování



Příloha 2 – Formovací směs

Na základě technologie výroby forem a dostupných materiálů byla vytvořena netrvalá forma, jejíž formovací směs byla vytvořena z ostřiva a pojiva bez přidání pomocných látek. Jako ostřivo, které tvořilo 75–98 % formovací směsi, bylo využito ostřivo kyselého charakteru o velikosti zrn od 0,3 do 1 mm. Ostřiva kyselého charakteru jsou ekonomicky a uživatelsky dostupná v běžných hobby marketech ve formě písků. Nevýhodou kyselých ostřiv je riziko jejich spékání při kontaktu s taveninou. Důvod je, že zrna kyselých ostřiv obsahují na svém povrchu oxidy, které způsobují snižování žáruvzdornosti ostřiv. Vyšší žáruvzdornost ostřiv lze zajistit výběrem čistších písků, které prošly technologickými procesy praní a čištění.

Pojivo je část formovací směsi, které má za úkol díky své vaznosti tvořit kompaktní hmotu s ostřivem. Proto byla β – sádra použita jako pojivo, které má kromě vlastnosti pojiva i jiné přednosti. V technologicky správném postupu by měla formovací směs obsahovat i pomocné látky. Mezi pomocné látky se řadí grafit, jemně mletý vápenec, silikonový olej a mnoho dalších pomocných látek. Úkolem pomocných látek je zlepšovat vlastnosti formovací směs, tím i ovlivňovat budoucí vlastnosti povrchu odlitku. Primárním úkolem pomocných látek je žáruvzdorná ochrana formy, čímž se sníží pravděpodobnost zborcení dutiny formy vlivem působícího tepla taveniny. Tato vlastnost pomocných látek snižuje pravděpodobnost vzniku vady odlitku.

S ohledem na technologický postup nebyla použita žádná pomocná látka, ale místo toho byl plně využit potenciál daného pojiva. β – sádra má výbornou vaznost, rychle tuhne, má výbornou tepelnou vodivost a žáruvzdornost. β – sádra se dělí podle obsahu jílu na bílou a šedou sádru. Jako pojivo byla využita šedá β – sádra pod obchodním názvem elektrikářská sádra. Elektrikářská sádra je ověřená a certifikovaná z hlediska požární ochrany jako protipožární látka.

Ostřivo a pojivo bylo odměřeno v poměru 18:2 pomocí 25g plastové odměrky. Odměřená směs ostřiva a pojiva byla v poměru 450:50 g pečlivě promíchána a sjednocena pomocí lopatky v kovové míse (viz obrázek 28).



Obrázek 28 – Příprava formovací směsi

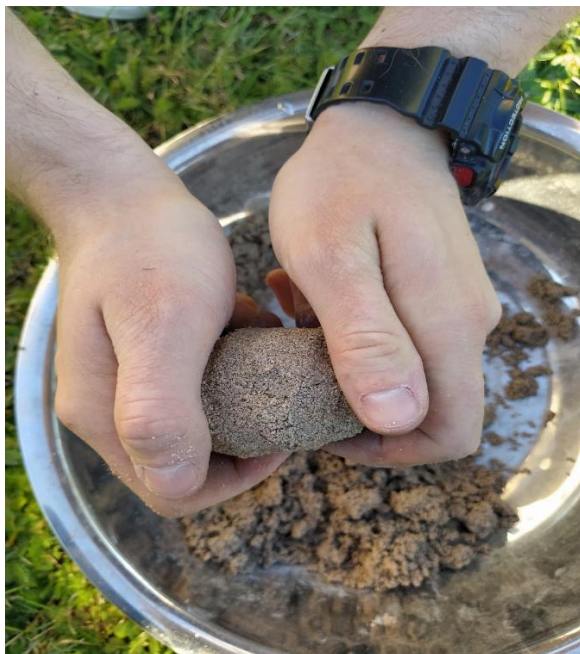


Zdroj: Vlastní zpracování

Dokonalým promícháním jednotlivých složek formovací směsi bylo dosaženo rovnoměrného rozložení vlastností formovací směsi. Přidáním vody do směsi bylo dosaženo i žádoucí vaznosti a kompaktnosti formovací směsi. Do formovací směsi byla přidávána voda stochasticky tak, aby se aktivovaly vlastnosti formovací směsi ve správném poměru. Připravenost formovací směsi k formování byla ověřena testem vaznosti. Po ideálním poměru jednotlivých složek formovací směsi a aktivátoru vody byla vytvořena a umáčknuta hrouda této formovací směsi do tvaru šišky (viz obrázek 29).



Obrázek 29 – Vytvoření kontrolního vzorku



Zdroj: Vlastní zpracování

Tento test byl proveden z důvodu připravenosti formovací směsi k upěchování a formování. Principem tohoto testu bylo rozlomit vytvořenou udušenou hroudu formovací směsi a kontrolovat drobitivost, soudržnost a vaznost směsi v dělicí rovině. Vzorek hmoty vykazoval výborné vlastnosti pro další technologický postup formování (viz obrázek 30).

Obrázek 30 – Výsledek kontrolního testu



Zdroj: Vlastní zpracování



Příloha 3 – Formování

Při formování byl využit technologický postup pro odlévání do země. V dnešní době není tento postup již zcela běžný. Dříve se odlévalo do země z důvodu nadstandardních rozměrů odlévaného odlitku. Postup odlévání do země byl využit z důvodu minimalizace procesu výroby. Při formování nebyla použita žádná vnější chladítka a množství formovací směsi nebylo určeno výpočtem míry spotřeby formovací směsi ani míry pěchování formovací směsi. Základním ukazatelem pro množství formovací směsi byla potřeba vytvořit dostatečně velkou plochu formy, která by chránila dutinu formy před kontaminací okolním prostředím.

Zem byla využita jako jednodílná forma pro odlévání na syrovo. Rýčem byla vyhloubena jáma, jež rozměrově nekolinásobně převyšovala rozměry použitého modelu. Okolí jámy bylo očištěno a stěny jámy udusány. Do připravené jámy byla nasypána formovací směs (viz obrázek 31) a od stěn formy ke středu udusávána. Při odlévání na syrovo byla tavenina odlévána do formy o běžné vlhkosti formovací směsi. Forma nebyla vypalována a ani přehřívána.

Obrázek 31 – Pěchování formy



Zdroj: Vlastní zpracování



Jako dusadlo byla využita plochá strana rýče. Po udusání a upěchování formy byla použita broušená rovná hrana dlouhé dlaždice jako zarovnávací pravítko (viz obrázek 32). Tímto pravítkem byla seříznuta přesahující a přebytečná vrstva formovací směsi, která převyšovala rám této formy.

Obrázek 32 – Zarovnání povrchu formy



Zdroj: Vlastní zpracování

Po zarovnání povrchu formy byl vytvořen obrys odlitku tak, že se rovnoměrným suvným pohybem vtlačel model do připravené netrvalé formy. Model byl vtlačěn do formy do takové hloubky, aby mohl být po vytvoření obrysu odlitku vytáhnut z formy za jeho účelovou stranu víka pomocí kleští (viz obrázek 33).

Obrázek 33 – Výroba dutiny formy



Zdroj: Vlastní zpracování



Příloha 4 – Tavení a odlévání

Jako vsázková surovina pro tvorbu taveniny byla použita olověná rybářská olůvka z olověné slitiny. Tato vsázka nebyla tavena v peci, nýbrž v litinovém kastrolu na otevřeném ohni. Tento litinový kastrol byl dále využit i jako licí pánve ke gravitačnímu odlévání. Na vyplnění dutiny formy byla spotřebována vsázka o hmotnosti 800 g. Účelně bylo navýšené množství vsázky, než bylo teoretické množství. Teoretické množství vsázky bylo vypočítané z objemu dutiny formy a hustoty olova bez použití koeficientu smrštění. Pro olověný kvádr o objemu $39,06 \text{ cm}^3$ by byla potřeba teoretické množství olova o hmotnosti 429,66 g. S ohledem na jisté ztráty a vyvarování se vzniku vad odlitku byla hmotnost vsázky zvolena téměř dvojnásobná (viz obrázek 34).

Obrázek 34 – Tavení



Zdroj: Vlastní zpracování

Ztráty a vady, které byly kompenzovány větším množstvím vsázky, byly například ztráty vzniklé vytvořením strusky při tavení (viz obrázek 35), ztráty vzniklé přilepením taveniny na stěny licí pánve, ztráty vytvořené neobornou manipulací licí pánve a vylitím taveniny mimo dutinu formy, vady nezaběhnutím a smrštěním. K nezaběhnutí taveniny by mohlo dojít vlivem malé roztékavosti taveniny a nedokonalé odvzdušněnou formou. Tento technologický problém zabíhavosti a smrštění taveniny byl kompenzován průběžným doléváním zásob taveniny.



Obrázek 35 – Struska



Zdroj: Vlastní zpracování

Dolévání taveniny bylo ukončeno po vizuální kontrole, že odlitek rovnoměrně tuhne ve velké ploše formy a že další přilévaná tavenina tvoří pouze další vrstvy odlitku nad úroveň stěny formy. Usměrněné tuhnutí odlitku bylo zajištěno dostatečně velkou plochou formy. Po úplném zchladnutí odlitku byl odlitek vyjmut rozbitím formy a následně očištěn jemným kartáčem od formovací směsi.

Příloha 5 – Čištění hrubého odlitku

Hrubý odlitek byl upnut do stolního svěráku a obráběn technologickými postupy. Hrubý povrch odlitku byl osekán plochým sekáčem a kladivem. Natavená písková struktura byla kartáčována hrubým ocelovým kartáčem (*viz obrázek 36*).

Obrázek 36 – Krusta odlitku



Zdroj: Vlastní zpracování



Po hrubém obrábění byl odlitek rozdělen příčnými vodicími čarami za pomoci svinovacího metru a křídý na tři části. Rozměrově rozdělený odlitek byl řezáním rozdělen na tři sekundární části. Odlitek byl rozdělen nepravidelně kvůli podmínce na vytvoření neidentických kalibračních měrek pro ultrazvukový tloušťkoměr.

Tři sekundární hrubé části odlitku byly obráběny pilníky na železo a smirkovým plátnem. V domácích podmínkách nebylo možné dosáhnout požadované rovinnosti a kolmosti stran budoucích etalonů. Etalony byly obráběny bez ohledu na úbytek materiálu. Příklad na obrábění nebyl směrodatnou hodnotou, ale rozhodující byl geometrický tvar etalonů.

Proto bylo využito obráběcích služeb firmy SIP v Kladně, kde bylo provedeno finální obrábění etalonů na CNC frézce se střední aritmetickou úchytkou drsnosti povrchu 1,6 μm . Hotové etalony byly stochasticky očíslovány a bylo provedeno jejich orientační měření pomocí třmenového mikrometru.

Při obrábění etalonů na CNC frézce se projevila vnitřní vada odlitku. Konkrétně na etalonu číslo 3 se obráběním povrchu materiálu objevila bublina, která vznikla plynatostí taveniny při jejím odlévání (*viz obrázek 37*).

Obrázek 37 – Skrytá vada odlitku (8× zvětšeno fotoaparát)



Zdroj: Vlastní zpracování



Příloha 6 – Příprava k měření

Očíslované etalony byly pomocí jednoho měřicího pokusu změřeny třmenovým mikrometrem s měřicím rozsahem 0 mm – 25 mm a 25 mm – 50 mm. Jako měřicí objekt pro výzkum byl zvolen etalon 2. Tento etalon byl podstoupen sériím měření za stanovených měřicích metod s předem definovanými měřicími přístroji.

V samotném začátku měření byla stanovena vhodná plocha, která sloužila k měřicím pokusům. Na této ploše bylo vyznačeno měřicí pole, které sloužilo jako přesně definované místo pro měření. Toto pole bylo jasně definované začerněním pomocí lihového fixu kvůli dvěma na sobě závislým důvodům.

Prvním důvodem bylo stanovit místo, kde by docházelo měřicími pokusy k nejmenší toleranci naměřených výsledků. Tímto bylo zajištěno minimální zkreslení naměřených hodnot a jejich výsledků, které byly dále statisticky zpracovávány.

Druhým důvodem bylo zjistit případné odchylky v měřicích pokusech, které by mohly nastat případnou změnou teploty vzduchu a změnou teploty měřeného etalonu. Tato změna teploty etalonu by mohla způsobit změnu tepelné roztažnosti etalonu a tím by se mohly získat při měření i rozdílné výsledky. Toto případné zkreslení naměřených hodnot bylo kontinuálně sledováno měřením emisivity povrchu měřeného etalonu. K tomuto měření byl využit ruční pyrometr (*viz tabulka 7*), kterým byla měřena začernalá měřicí plocha, a to po každém naměření rozměru. Tato začernalá plocha snižoval ztráty způsobené odrazem infračerveného laseru od lesklého povrchu etalonu.

Tabulka 7 – Hodnoty pyrometru

Pyrometr Raytek Raynger ST XB
Přesnost měření= $\pm 1\%$ nebo $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ podle toho, která hodnota je větší při $\sim 23^{\circ}\text{C}$.
Opakovatelnost měření= $\pm 0,5\%$ měření nebo $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ podle toho, která je větší.
Reakční čas= 500 mSec.
Rozsah měřicí teploty= $0\text{ }^{\circ}\text{C} - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

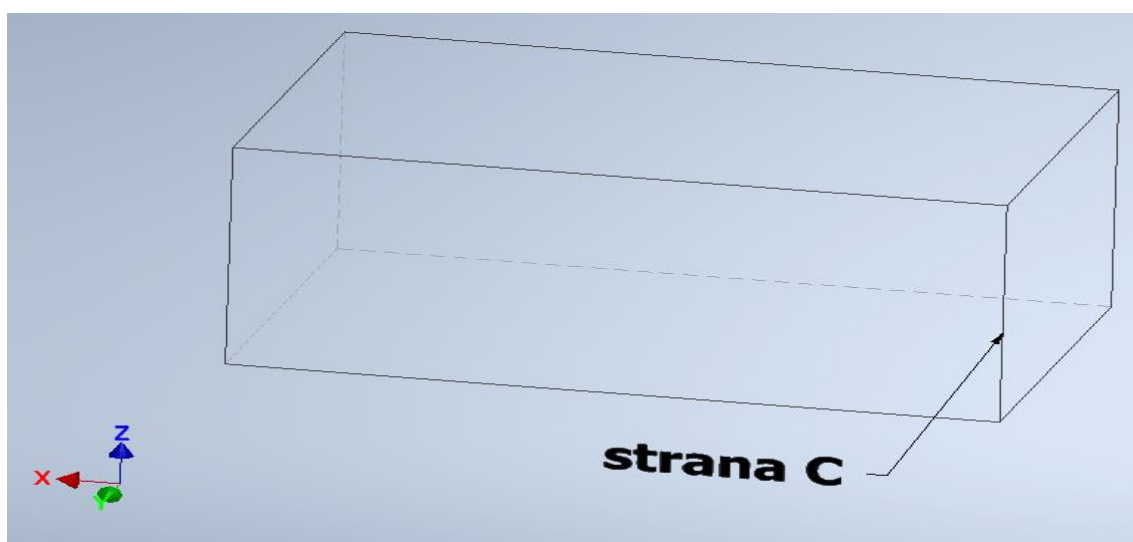
Zdroj: Vlastní zpracování



Příloha 7 – Měření třmenovým mikrometrem

K prvotní měřicí operaci, která sloužila ke stanovení tloušťky protilehlých rovnoběžných ploch etalonu 2 byl použit třmenový mikrometr s měřicím rozsahem od 0–25 mm. Jako základní rozměr dvou obrobekých ploch byla měřena strana kvádrů C (viz obrázek 38). Měřicí výzkum byl proveden při kolísavé teplotě vzduchu mezi 24 °C s dočasným poklesem vzduchu při provozních podmínkách na 16 °C.

Obrázek 38 – Měřený rozměr etalonu 2



Zdroj: Vlastní zpracování Inventor

Bylo provedeno padesát měřicích pokusů pomocí třmenového mikrometru. Vždy po každém opakování měření třmenovým mikrometrem bylo provedeno i měření pyrometrem, a to po uvolnění etalonu z měřicích dotyků třmenového mikrometru. Naměřené hodnoty byly zaznamenávány do tabulkového kalkulátoru Excel od firmy MS Office (viz tabulka 8).



Tabulka 8 – Naměřené hodnoty třmenovým mikrometrem

pokus č.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
rozměr [mm]	12,75	12,76	12,77	12,78	12,78	12,8	12,82	12,82	12,79	12,78
úchylka [mm]	-0,02	-0,01	0,00	0,01	0,01	0,03	0,05	0,05	0,02	0,01
teplota [°C]	22,6	22,7	22,4	22,8	22,7	22,9	22,8	22,9	23,2	23,1

pokus č.	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.	20.
rozměr [mm]	12,78	12,78	12,69	12,77	12,75	12,72	12,8	12,75	12,78	12,75
úchylka [mm]	0,01	0,01	-0,08	0,00	-0,02	-0,05	0,03	-0,02	0,01	-0,02
teplota [°C]	23,1	23,2	23,2	23,3	23,4	23,2	23,3	23,4	23,6	23,3

pokus č.	21.	22.	23.	24.	25.	26.	27.	28.	29.	30.
rozměr [mm]	12,76	12,77	12,85	12,75	12,79	12,73	12,8	12,75	12,75	12,74
úchylka [mm]	-0,01	0,00	0,08	-0,02	0,02	-0,04	0,03	-0,02	-0,02	-0,03
teplota [°C]	23,6	23,7	23,6	23,7	23,8	23,7	23,8	23,7	23,9	23,6

pokus č.	31.	32.	33.	34.	35.	36.	37.	38.	39.	40.
rozměr [mm]	12,58	12,74	12,84	12,83	12,8	12,8	12,75	12,72	12,77	12,74
úchylka [mm]	-0,19	-0,03	0,07	0,06	0,03	0,03	-0,02	-0,05	0,00	-0,03
teplota [°C]	23,6	23,7	23,7	24,1	23,9	23,6	24,2	24,4	24,4	24,1

pokus č.	41.	42.	43.	44.	45.	46.	47.	48.	49.	50.
rozměr [mm]	12,85	12,85	12,79	12,77	12,76	12,77	12,79	12,83	12,83	12,8
úchylka [mm]	0,08	0,08	0,02	0,00	-0,01	0,00	0,02	0,06	0,06	0,03
teplota [°C]	24,1	24,3	24	23,9	24,3	24,1	24,3	23,9	24,3	24,2

Zdroj: Vlastní zpracování v MS Excel

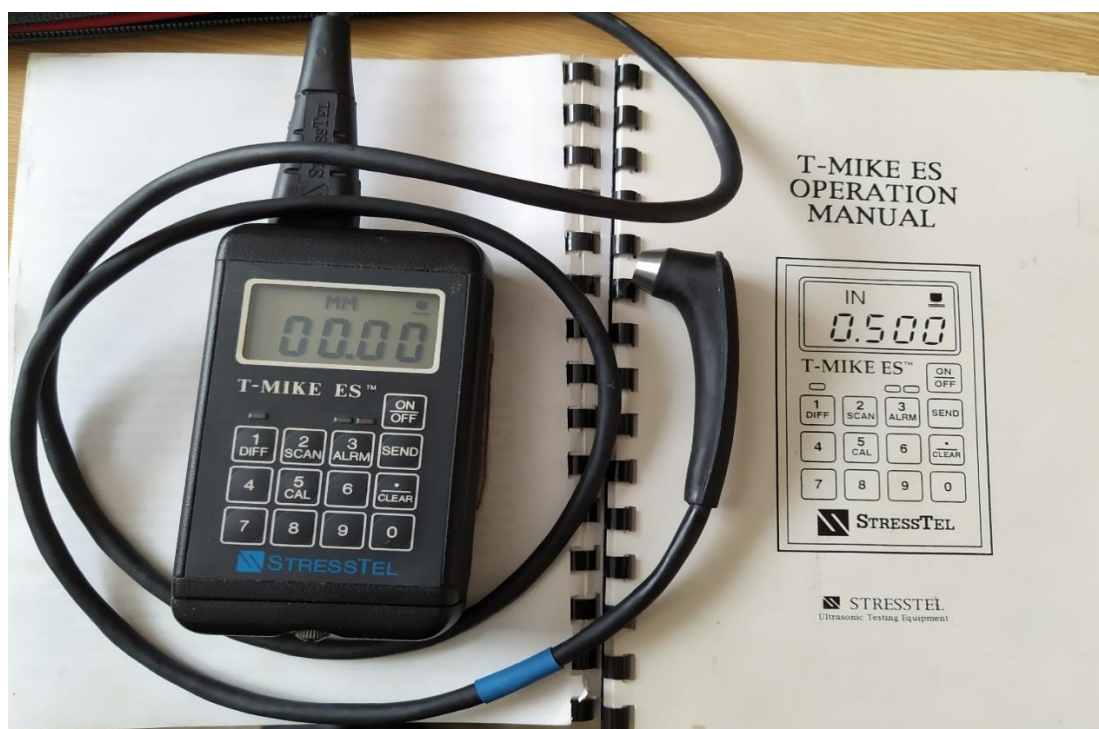
Úchylka demonstruje odchylku od naměřené hodnoty, která byla vypočítána z rozdílu měřeného pokusu a aritmetického průměru všech naměřených pokusů.



Příloha 8 – Měření ultrazvukovým tloušťkoměrem

K této měřicí operaci byl použit korozní ultrazvukový tloušťkoměr s obchodním označením T-Mike ES (viz obrázek 39) od světově známé firmy StressTel, která se zabývá výrobou ultrazvukové měřicí techniky s širokou škálou oborové působnosti. S ohledem na označení korozní tloušťkoměr má tento tloušťkoměr koncipované funkce především ke zjišťování úbytku hmoty, nikoliv k hlášení chybového echa či dalších diagnostických vlastností.

Obrázek 39 – Ultrazvukový tloušťkoměr



Zdroj: Vlastní zpracování

Technické údaje ultrazvukového tloušťkoměru:

- Měřicí rozsah ~ 1 mm – 500 mm
- Rozlišení = 0,01 mm
- Povolená teplota měřeného povrchu = - 15 °C až + 100 °C
- Použitelná sonda = 5 MHz
- Délka kabelu sondy = 1,2 m
- Nepřetržitý provoz defektoskopu = 80 h



Příloha 9 – Nulování sondy

Před samotným měřením ultrazvukovým tloušťkoměrem byla nejdříve provedena kalibrace samotné sondy ultrazvukového tloušťkoměru. U korozního ultrazvukového tloušťkoměru byla použita výrobcem doporučená sonda (viz obrázek 40). Tato sonda byla tzv. dvojitá a v půlce dělená. Jedna její půlka vysílala a druhá půlka sondy přijímala ultrazvukové vlnění. Sonda byla složena ze dvou piezoelektrických měničů.

Obrázek 40 – Ultrazvuková sonda tloušťkoměru



Zdroj: Vlastní zpracování

Jakost měřicí plochy sondy byla zkontrolována vizuálně. Neporušenost přenosového kabelu sondy byla provedena pohmatem. Povrch sondy byl zkontrolován z důvodu možného vzniku vad zdvojením. Při zdvojení dochází ke špatnému odečtení hodnot délky dráhy procházejícího ultrazvukového vlnění. Tímto zdvojením či dokonce ztrojením by došlo k násobnému zobrazení naměřené hodnoty, které nastává degenerací měřicí plochy sondy.



Kalibrace (vynulování sondy) musela být provedena kvůli předchozímu měření defektoskopických pracovníků, kteří prováděli měřicí operace na leteckých kompozitech. Vynulováním sondy bylo umožněno ultrazvukovému tloušťkoměru vypočítat si novou hodnotu pevného zpoždění vlnění v ultrazvukové sondě. Proces vynulování sondy byl proveden po zprovoznění ultrazvukového tloušťkoměru tím, že byl na kontaktní kalibrační disk ultrazvukového tloušťkoměru nanesen vazební prostředek (viz obrázek 41).

Obrázek 41 – Kalibrace sondy ultrazvukového tloušťkoměru



Zdroj: Vlastní zpracování

K tomuto kalibračnímu disku byla trvale přiložena měřicí plocha sondy. Za pár sekund rozpoznal ultrazvukový tloušťkoměr přiloženou sondou ke kalibračnímu disku a automaticky začal s kalibrací sondy. Následně došlo na displeji k zobrazení hodnoty „Prb 0“, která značila, že si ultrazvukový tloušťkoměr spočítal koeficient zpoždění ultrazvukové sondy a tuto hodnotu si pro toto měření uložil do své paměti.

Po kalibraci sondy bylo provedeno ověření nastavené měřicí jednotky. Pro měření byla použita jednotka metrická. Měřené hodnoty byly nastaveny v milimetrech.



Příloha 10 – Kalibrace ultrazvukového tloušťkoměru

Pro kalibraci samotného ultrazvukového tloušťkoměru byly použity poznatky o fyzikálních principech ultrazvukové defektoskopie pro nastavení časové základny. Ultrazvukový tloušťkoměr snímá tloušťku na principu výpočtu času, který je potřeba k průchodu vyslaného a přijatého ultrazvukového vlnění, jež je dále vynásobené rychlostí průchodu hmotou. V případě ultrazvukového tloušťkoměru T – Mike ES si celkovou hodnotu vypočítá přístroj rovnou sám. Tudíž není potřeba dodatečné dopočítávání této hodnoty, jako je tomu u ultrazvukových defektoskopů (viz obrázek 42), u kterých je potřeba danou hodnotu odečíst z rastru náběžné hrany echa.

Obrázek 42 – Ultrazvukový defektoskop



Zdroj: <https://www.fh-ooe.at/en/wels-campus/werkstofftechnik/department-of-materials-engineering/equipment/non-destructive-testing-of-materials/krautkramer-usn52/>

Časová základna korozního ultrazvukového tloušťkoměru by mohla být vypočítána dvěma způsoby. Pro první variantu kalibrace ultrazvukového tloušťkoměru by se musela znát rychlost šíření ultrazvukových vln v olovu, která by se vyčetla v defektoskopickém manuálu. Druhá varianta kalibrace ultrazvukového tloušťkoměru je na základě známé tloušťky kontrolovaného materiálu. Pro nastavení ultrazvukového



tloušťkoměru T – Mike ES byla zvolena kalibrace na základě známého rozměru, pro kterou byla využita sada vyrobených etalonů.

Kalibrace ultrazvukového tloušťkoměru na základě známe tloušťky je pro praxi běžným postupem.

Jako vazební prostředek bylo využito praxí osvědčené mazivo AeroShell Grease 22. Toto plastické mazivo ze syntetického hydrokarbonu se využívá na vojenských letištích k tribologickým operacím na leteckých strojích a k ultrazvukové defektoskopii.

AeroShell Grease 22 má výborné nosné vlastnosti, které jsou umožněné díky vytvoření kvalitní mazné vrstvičky. Své uplatnění v letecké ultrazvukové defektoskopii má díky své pasivitě k povrchům a nízkému nároku na čistý a odmaštěný povrch po ultrazvukové defektoskopii. Při vysokém nároku na čistý a odmaštěný povrch po ultrazvukové defektoskopii lze využít řadu vazebních výrobků, které jsou na bázi vody.

S ohledem na minimalizaci chybového měření ultrazvukovým tloušťkoměrem byla provedena orientační kalibrace ultrazvukového tloušťkoměru pro všechny tři vytvořené etalony samostatně. Účelem bylo odhalit případné nedostatečné schopnosti k obsluze korozního ultrazvukového tloušťkoměru. Úkolem bylo provést defektoskopii vytvořených etalonů a vyhodnotit naměřené údaje, které by neměly překročit rozdíl v celých číslech při porovnání s hodnotami naměřenými třmenovým mikrometrem. Výsledky orientační kalibrace byly velmi uspokojivé i při změnách rozměrů etalonů.

Po orientační kalibraci byla vyresetována známá tloušťka a do paměti ultrazvukového tloušťkoměru se zadala hodnota aritmetického průměru naměřené tloušťky etalonu 2 (*viz obrázek 43*). Tato hodnota se získala po sérii měřicích pokusů za využití třmenového mikrometru.



Obrázek 43 – Kalibrace statistickou hodnotou



Zdroj: Vlastní zpracování

Po kalibraci korozního ultrazvukového tloušťkoměru na základě známé tloušťky, bylo provedeno padesát měřících pokusů tloušťky za využití ultrazvukového tloušťkoměru a padesát měřících pokusů teploty za využití pyrometru.

Důvodem konstantního měření teploty etalonu bylo zjistit závislost naměřených hodnot tloušťky na působící teplotě z hlediska sekundární objemové roztažnosti etalonu. Dalším důvodem sledované teploty byla variabilita rychlosti šíření ultrazvukových vln testovaného etalonu v závislosti na teplotě. Ultrazvuková sonda a ultrazvukový tloušťkoměr byly zkalibrovány při určité teplotě, která se neustále na pracovišti měnila.

Příloha 11 – Měření s akustickou vazbou

Při procesu měření bylo dbáno na ideální tloušťku vazebního prostředku a na maximální možný kontakt měřicího povrchu ultrazvukové sondy, který byl rovnoběžně udržován s povrchem testovaného etalonu. Vazební prostředek byl aplikován jemným štětečkem na měřicí plochu měřeného povrchu etalonu. Podmínka ideální tloušťky vazebního prostředku byla splněna nanesením tenkého filmu vazebního prostředku, který byl i bez použití zvětšovacích přístrojů vidět, ale při suvném pohybu ultrazvukové sondy nedocházelo k valivému hromadění tohoto vazebního prostředku. Vlivem nadměrného množství vazebního prostředku



mezi ultrazvukovou sondou a povrchem testovaného etalonu by docházelo k naměření nepřesné hodnoty tloušťky, vlivem odrazu a útlumu ultrazvukového vlnění.

Kdyby byl naopak povrch měřeného etalonu a měřicí povrch ultrazvukové sondy příliš suchý, tak by žádné hodnoty nebyly zaznamenány. Důvodem by byla příliš velká vzduchová mezera mezi měřicí plochou ultrazvukové sondy a měřenou plochou testovaného etalonu.

Situace variability tloušťky vazebního prostředku (viz obrázek 25):

První situace ilustruje problém, který je velmi častý při ultrazvukové defektoskopii. Jedná se o nadměrné množství vazebního prostředku mezi měřeným povrchem etalonu a měřicím povrchem ultrazvukové sondy. Vazební prostředek netvoří rovnou plochu filmu na povrchu testovaného etalonu.

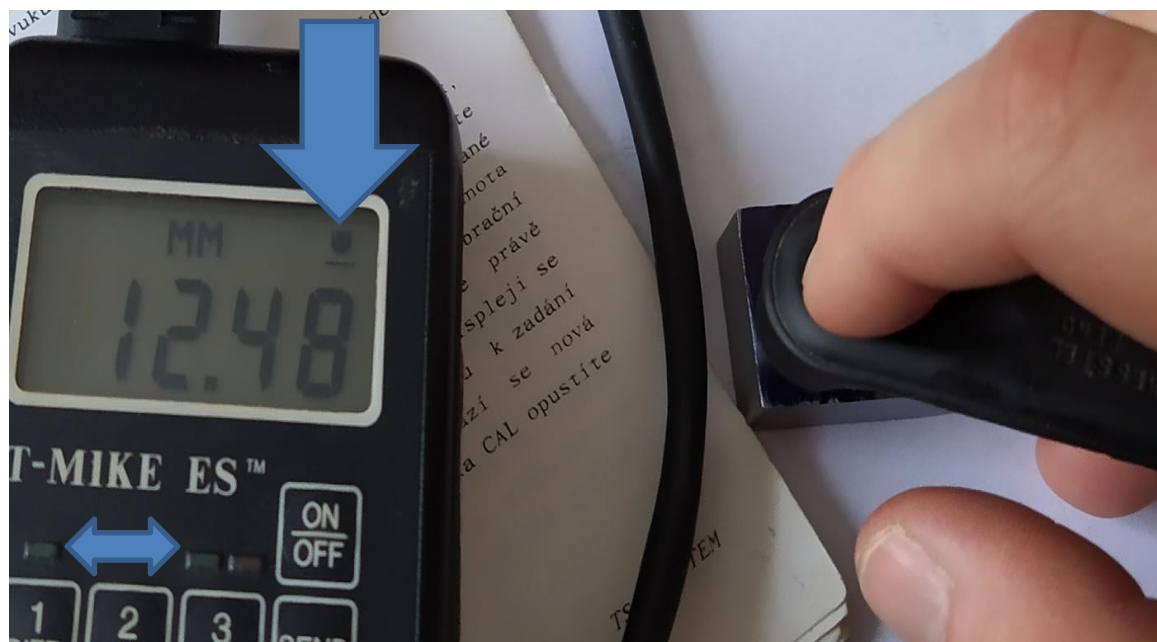
Testovaná plocha etalonu musí být již před samotným kontaktem s ultrazvukovou sondou připravená a rovnoměrně pokrytá vazebním prostředkem. Vazební prostředek tvoří nejenom přechodový můstek mezi sondou a výrobkem, ale chrání i měřicí povrch sondy před abrazí. Z tohoto důvodu by se neměl vazební prostředek roztírat po povrchu testovaného výrobku sondou, ale štětečkem.

Druhá situace ilustruje ideální stav tloušťky vazebního prostředku. Povrch testovaného etalonu a měřicí povrch sondy byl pokryt velmi jemným filmem. Tato tloušťka vazebního prostředku je ideální tloušťkou. Touto hodnotou se snižuje abraze měřicího povrchu sondy a vytváří se přechodový můstek ultrazvukovým vlnám s naměřenou hodnotou, která je velmi blízká hodnotě aritmetického průměru.

Třetí situace ilustruje velmi nevhodný stav procesu měření. Na povrchu testovaného etalonu a na měřicím povrchu není žádný nebo minimální vazební prostředek. Touto situací dochází k přímému kovovému styku a může nastat poškození jak sondy, tak i měřeného povrchu výrobku. Důvodem této ilustrace je nedostatečná tloušťka vazebního prostředku, která neumožňuje vytvořit přechodový můstek ultrazvukovým vlnám. Odraz a absorpce ultrazvukových vln je tak velká, že sonda ultrazvukového tloušťkoměru ani nezaznamená zpětné vlny. Na displeji korozního ultrazvukového tloušťkoměru zůstala předchozí hodnota měření a ikonka kontaktu sondy (viz obrázek 44) s měřeným povrchem, ale již nedojde k příjmu a vyhodnocení dat měření, které by rozsvítily kontrolní led diody.



Obrázek 44 – Měřicí vada



Zdroj: Vlastní zpracování



Příloha 12 – Výsledky měření ultrazvukem

Hodnoty naměřené tloušťky získané měřením pomocí ultrazvukového tloušťkoměru a hodnoty teploty získané pomocí pyrometru byly zaznamenány a vloženy do tabulky tabulkového kalkulátoru MS Excel (*viz tabulka 9*).

Tabulka 9 – Naměřené hodnoty ultrazvukovým tloušťkoměrem

pokus č.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
rozměr [mm]	12,57	12,45	12,56	12,5	12,57	12,55	12,59	12,52	12,53	12,57
úchylka [mm]	0,070	-0,050	0,060	0,000	0,070	0,050	0,090	0,020	0,030	0,070
teplota [°C]	23,6	23,5	23,6	23,5	23,6	23,6	23,4	23,7	23,6	23,7

pokus č.	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.	20.
rozměr [mm]	12,59	12,59	12,5	12,54	12,48	12,46	12,49	12,47	12,48	12,48
úchylka [mm]	0,090	0,090	0,000	0,040	-0,020	-0,040	-0,010	-0,030	-0,020	-0,020
teplota [°C]	23,6	23,6	23,4	23,6	23,7	23,6	23,8	23,6	23,6	23,8

pokus č.	21.	22.	23.	24.	25.	26.	27.	28.	29.	30.
rozměr [mm]	12,5	12,49	12,51	12,47	12,5	12,49	12,46	12,47	12,48	12,46
úchylka [mm]	0,000	-0,010	0,010	-0,030	0,000	-0,010	-0,040	-0,030	-0,020	-0,040
teplota [°C]	23,8	23,6	23,6	23,6	23,5	23,6	23,7	23,6	23,7	23,7

pokus č.	31.	32.	33.	34.	35.	36.	37.	38.	39.	40.
rozměr [mm]	12,5	12,48	12,45	12,49	12,46	12,46	12,47	12,47	12,46	12,49
úchylka [mm]	0,000	-0,020	-0,050	-0,010	-0,040	-0,040	-0,030	-0,030	-0,040	-0,010
teplota [°C]	23,7	23,6	23,7	23,6	23,5	23,6	23,6	23,6	23,4	23,6

pokus č.	41.	42.	43.	44.	45.	46.	47.	48.	49.	50.
rozměr [mm]	12,51	12,46	12,48	12,49	12,47	12,48	12,47	12,45	12,47	12,47
úchylka [mm]	0,010	-0,040	-0,020	-0,010	-0,030	-0,020	-0,030	-0,050	-0,030	-0,030
teplota [°C]	23,7	23,6	23,6	23,7	23,6	23,4	23,6	23,7	23,6	23,6

Zdroj: Vlastní zpracování v MS Excel



Příloha 13 – Pasametr

Měření pomocí pasametru nebylo uskutečňováno kvůli zjištění či ověření skutečného rozměru tloušťky etalonu 2. Pasametr jakožto porovnávací měřidlo slouží především za velké přesnosti k určení úchytky. Cílem měření pasametru bylo získat data, která budou sloužit ke zjištění závislosti měřeného rozměru na teplotě za pomoci korelačního koeficientu.

Používaný mechanický třmenový pasametr je jediné měřidlo, které nemá platnou kalibraci. Tento pasametr byl zakoupen jako historická rarita údajně z roku 1952. Pasametr byl tehdy zkalibrován na základních tzv. Johansonových měrkách s třídou přesnosti K.

Příloha 14 – Měření pasametrem

Měření pasametrem bylo provedeno na pevné tvarové podložce stolu ve volné poloze určené konstrukcí pasametru od povrchu podložky. Základní nulová hodnota pasametru byla nastavena vložení etalonu mezi měřicí dotyky pasametru. Vzhledem ke konstrukčnímu nedostatku pasametru, který neobsahuje vymezovač měřicí síly, bylo vynulování pasametru prováděno velmi pečlivě.

Přesnost měření byla zvýšena vymezením kontaktní plochy měřeného pole etalonu 2 a měřicích dotyků pasametru. Tohoto konstantního bodu bylo dosaženo ustálenou polohou pasametru, který svými konstrukčními rozměry zajišťoval stabilní měřicí bod vůči podložce. Tento měřicí bod byl izolován i instalací vyměnitelného dorazu pasametru, který zabraňoval při měřicích pokusech posunout etalon hlouběji za měřicí dotyky pasametru.

Vzhledem k cíli měření nebylo potřeba využít mezních značek, které stanovují toleranční pole. Z tohoto důvodu byly mezní značky roztažené do stran pomocí klíče, který je součástí balení.



Příloha 15 – Výsledky měření pasametrem

Na základě provedení padesáti měřicích pokusů pomocí pasametru a pyrometru byla vytvořena tabulka naměřených hodnot (*viz tabulka 10*). Tato tabulka hodnot se liší strukturou od předešlých tabulek hodnot v závislosti na měřicích preferencích mechanického pasametru.

Tabulka 10 – Naměřené hodnoty pasametrem

pokus č.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
naměřená úchylka [mm]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
teplota [°C]	23,6	23,5	23,6	23,5	23,6	23,6	23,4	23,7	23,6	23,7

pokus č.	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.	20.
naměřená úchylka [mm]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
teplota [°C]	23,6	23,6	23,4	23,6	23,7	23,6	23,5	23,6	23,6	23,8

pokus č.	21.	22.	23.	24.	25.	26.	27.	28.	29.	30.
naměřená úchylka [mm]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
teplota [°C]	23,8	23,6	23,6	23,6	23,5	23,6	23,7	23,6	23,7	23,7

pokus č.	31.	32.	33.	34.	35.	36.	37.	38.	39.	40.
naměřená úchylka [mm]	0	0	0	0	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
teplota [°C]	23,7	23,6	23,7	23,6	23,9	23,9	23,9	24,1	23,9	23,9

pokus č.	41.	42.	43.	44.	45.	46.	47.	48.	49.	50.
naměřená úchylka [mm]	0,002	0,002	0,004	0,004	0,004	0,006	0,006	0,008	0,008	0,008
teplota [°C]	23,9	23,9	24,1	24,3	24,3	24,5	24,5	24,7	24,6	24,7

Zdroj: Vlastní zpracování v MS Excel