



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

**Nedestruktivní zkoušení kvality povrchu a
povrchových úprav**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Klára Harazimová

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

STUDIJNÍ OBOR: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Praha: 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Harazimová** Jméno: **Klára** Osobní číslo: **452706**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Nedestruktivní zkoušení kvality povrchu a povrchových úprav

Název bakalářské práce anglicky:

Non-destructive testing of surface quality and surface treatments

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rozbor problematiky nedestruktivního zkoušení
- 2) Analýza a porovnání vybraných NDT zkoušek
- 3) Zhodnocení a diskuze k vybraným NDT zkouškám

Seznam doporučené literatury:

1. KOPEC, B. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí (Nauka o materiálu IV). Akademické nakladatelství CERM. Brno. 2008. ISBN 978-80-7204-591-4
2. VOLUME, A. H. Nondestructive evaluation and quality control. ASM International. 795 s. 1989.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. Milan Petřík, ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání bakalářské práce: **15.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **06.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2021**

Ing. Jiří Kuchař, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat panu Ing. Jiřímu Kuchařovi, Ph.D., IWE za cenné rady a připomínky při tvorbě této bakalářské práce.

Anotace

Název bakalářské práce:	Nedestruktivní zkoušení kvality povrchu a povrchových úprav
Autor práce:	Klára Harazimová
Vedoucí práce:	Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE
Konzultant:	Ing. Milan Petřík
Akademický rok:	2020/2021
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Rozsah práce:	66 stránek, 12 tabulek, 40 obrázků
Klíčová slova:	nedestruktivní zkoušení, vady, metody zkoušení, drsnost, tloušťka základního materiálu, tloušťka povlaku

Annotation

Title of the bachelor thesis: Non-destructive testing of surface quality and surface treatments

Author: Klára Harazimová

Supervisor: Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE

Consultant: Ing. Milan Petřík

Academic year: 2020/2021

University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

Department: 12133 – Department of Manufacturing Technology

Head of department: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Extent: 66 pages, 12 tables, 40 pictures

Keywords: non-destructive testing, defects, test methods, roughness, thickness of base material, coating thickness

Obsah

Úvod.....	9
1 Nedestruktivní testování	10
2 Vady materiálů.....	11
3 Metody zkoušení.....	12
3.1 Vizuální metoda.....	12
3.2 Kapilární zkouška	14
3.3 Magnetická metoda prášková	17
3.4 MMM metoda	19
3.5 Metoda vířivými proudy	20
3.6 Ultrazvuková metoda.....	21
3.6.1 Metoda phased array	23
3.6.2 Technika TOFD	23
3.6.3 Metoda EMAT	24
3.7 Prozařování	24
3.8 Zkouška těsnosti	27
3.9 Metoda akustické emise.....	28
3.10 Měření tloušťky	29
3.11 Měření drsnosti	30
3.12 Měření lesku	31
3.13 Mikroskopie	31
4 Experimentální část.....	34
4.1 Měření drsnosti	35
4.2 Posuvné měřítko	37
4.3 Elcometer 456.....	38
4.4 Ultrazvukový tloušťkoměr 38 DL PLUS.....	39
4.5 Digitální mikroskop VHX-6000	44
5 Porovnání a zhodnocení naměřených výsledků.....	52
5.1 Drsnost.....	52
5.2 Tloušťka základního materiálu	52
5.3 Tloušťka povlaku práškového plastu	53
Závěr	54
Bibliografie	60
Seznam tabulek	65
Seznam obrázků.....	66

Seznam zkratk

AC	střídavý proud
AE	metoda akustické emise
DFT	tloušťka suchého filmu
ET	metoda vířivými proudy
Hz	jednotky frekvence
IR	infračervené záření
MT	magnetická prášková metoda
MMM	magnetická paměť materiálu
NDT	nedestruktivní zkoušky
PV	kapilární zkouška
Ra	střední aritmetická odchylka profilu
Rz	výška nerovnosti profilu z deseti bodů
SCZ	zóny koncentrace napětí
UT	ultrazvuková metoda
VT	vizuální zkouška

Úvod

Tato práce se zabývá nedestructivním testováním materiálu a povrchových úprav. Nestructivní testování je velmi rozšířené z hlediska rychlé kontroly a poskytuje přesné výsledky kvality základního materiálu a následné povrchové úpravy. Těmito metodami lze kontrolovat jak jednovrstvé povlaky, tak vícevrstvé povlaky. V práci jsou zmíněny a popsány vybrané druhy nedestructivního testování, které jsou vhodné ke kontrole drsnosti, tloušťky základního materiálu i povrchových úprav. Vybrané nedestructivní testování bylo provedeno pomocí dvou komparátorů drsností od různého výrobce a digitálního drsnoměru. Tloušťka základního materiálu byla porovnána třemi metodami, dvěma nedestructivními a jednou destruktivní, a těmi byly měření posuvným měřítkem, měření ultrazvukem a mikroskopická kontrola tloušťky základního materiálu. Tloušťka práškového povlaku, který byl nanesen v elektrostatickém poli, byla kontrolována opět třemi metodami (dvěma nedestructivními a jednou destruktivní). Nestructivní kontrola tloušťky povlaku byla prováděna digitálním tloušťkoměrem a ultrazvukem. Destruktivní kontrola byla prováděna mikroskopickým měřením. Závěr této práce je věnován porovnání a zhodnocení využitých kontrol základního materiálu a jeho povlaku, kde v diskuzi výsledků je zmíněno, jaká metoda testování je pro danou aplikaci vhodnější a jaká ne.

1 Nedestruktivní testování

Nedestruktivní testování (NDT), nebo také defektoskopie, se zabývá testováním materiálů nebo produktů bez jejich poškození a narušení jejich budoucí použitelnosti. To znamená, že i po zkoušce může produkt plnit svůj účel. Díky této vlastnosti se NDT zkoušky řadí mezi nejlevnější metody, a proto se používají celosvětově. Hlavním cílem NDT metod je odhalit co nejvíce vad, ať už na povrchu vzorku nebo uvnitř materiálu. Stále se musí mít na paměti, že žádná z metod neumí odhalit veškeré vady, a proto je důležité, aby pracovníci NDT věděli o všech technologických metodách a správně je aplikovali. Každá metoda má svůj specifický postup, využití a parametry. Aby se vyloučily veškeré vady, je zapotřebí využít více metod. [1-3]

Nedestruktivním zkoušením se zjistí, zda nějaká vada existuje, ale neví se její přesná poloha ani rozměr. Ani zkouškami se nezamezí tvorbě dalších vad při výrobě. Neříkají, jak k vadě došlo, ale pouze to, že se v produktu vyskytuje. Pokud se ukáže, že vzorek je v normě, tak se ví, že je celistvý, bez vnitřních i povrchových vad a bude naplno plnit účel, pro který byl vyroben. [1]

2 Vady materiálů

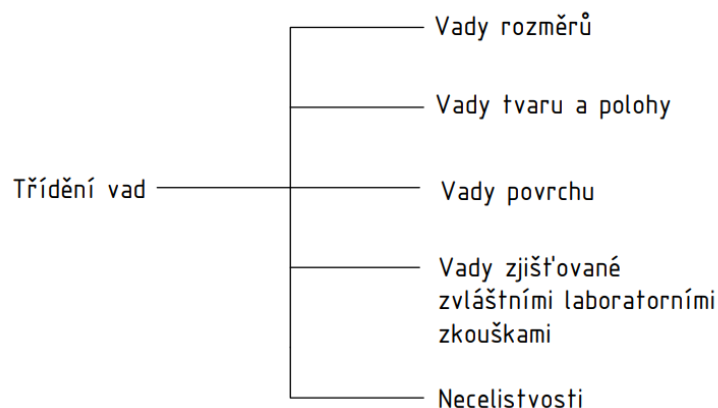
Pokud budeme mluvit o vadách v oboru NDT, tak lze říci, že vada neboli diskontinuita nebo nehomogenita je odchylka od předepsaného vzoru v technických normách nebo jiných technických dokumentech, podle kterých se daný výrobek vyrábí, testuje a prodává. [1]

Typy vad v NDT lze rozdělit do tří hlavních skupin:

- Vady výrobní – vzniklé během počáteční výroby ze základního nebo surového materiálu.
- Vady zpracování – vzniklé během zpracování materiálu nebo jeho částí.
- Vady provozní – vzniklé během pracovního cyklu materiálu nebo jeho částí. [4]

Dále se vady dělí na dvě velké skupiny, a to na opravitelné a neopravitelné. Opravitelné vady jsou takové, které lze opravit nebo odstranit vhodně zvolenou metodou. Ta musí odpovídat také technickým normám a nesmí nijak narušovat další výrobní procesy. Mezi vady neopravitelné se řadí všechny vady, které nelze odstranit. Jsou trvalé a o výrobku již nelze říci, že je způsobilý k prodeji. [1,4]

Poslední rozdělení vad, které bude zmíněno, je vyobrazeno na obr. 1. Jedná se o rozdělení vad podle jejich druhu. [1]



Obr. 1: Základní třídění vad, obrázek vytvořen autorem dle literatury [1]

3 Metody zkoušení

Jak už bylo zmíněno, neexistuje žádná univerzální NDT metoda, pomocí které by se zjistily všechny vady. Každá metoda má své parametry, postupy a omezení. V tab. 1 jsou jednotlivé metody a jejich schopnosti detekovat vady.

Tab. 1: Metody používané v defektoskopii [5]

Zkratka	Název metody	Schopnost detekovat vady				Vhodnost pro danou technologii					
		Povrchové	Vnitřní	Objemové	Plošné	Svary	Odlitky	Výkovky	Obrobky	Vývalky	Koroze
VT	Vizuální metoda	●	...	●	●	X	X	X	X	X	X
PT	Kapilární metoda	●	...	●	●	X	X	X	X	--	--
MT	Magnetická metoda prášková	●	○	●	●	X	X	X	X	--	--
RT	Radiografická metoda	⦿	●	●	⦿	X	X	--	--	--	X
UT	Ultrazvuková metoda	⦿	●	●	●	X	X	X	--	X	--
ET	Metoda vířivých proudů	●	○	●	●	X	--	X	X	X	--
LT	Zkoušení těsnosti	Používá se ke zjišťování vad, které procházejí celou tloušťkou stěny materiálu (plošné i objemové). Detekuje se únik médií z daného prostoru.									
Vhodnost pro detekci: ● – vysoká ⦿ – střední ○ – nízká ... – nulová											

3.1 Vizuální metoda

Vizuální kontrola je zaměřená na hodnocení a zjišťování vlastností povrchu zkoumaného materiálu. Může se provádět buď pouze zrakem, nebo zrakem s pomůckami, kterými může být například lupa, zrcadlo, endoskop atd., anebo za pomoci technických přístrojů, to mluvíme o videoskopech, foto nebo video kamerách aj. U všech typů zkoumání musí být vzorek dobře osvětlen, ať už světlem denním nebo umělým. Vizuální kontrola by měla být použita vždy před dalšími defektoskopickými kontrolami, je totiž velmi levná a také rychlá. [6,7]

Vizuální kontrola lze rozdělit do dvou skupin, a to na přímou a nepřímou. [8]

Přímá kontrola je taková, při níž nedochází k přerušení optické dráhy mezi okem pozorovatele a kontrolovaným výrobkem. K zjišťování vad se používá pouze zrak samotný nebo se můžou použít jednoduché pomůcky. [9]

Většinou se používá ke kontrole detailů. Kontrolor musí mít dostatečný přístup ke vzorku a jeho oči se musí nacházet maximálně 600 mm od zkoumaného povrchu a pod úhlem větším než 30°. [8]

U nepřímé kontroly je průběh paprsků přerušen mezi pozorovatelem a zkoumaným povrchem. Provádí se tehdy, pokud je vzorek špatně přístupný, a tudíž nejde udělat kontrola přímá. Při této kontrole nelze vyhodnotit kvalitu povrchu pouhým zrakem, kontrolor si musí vypomoci s technickými přístroji. [8,9]

Vizuální zkouška se provádí na upraveném povrchu (očištěn, odmaštěn), to zajišťuje kvalitní a přesné vyhodnocení povrchu. O kvalitě zkoušky rozhodují i tyto tři atributy:

- Odborná způsobilost – kontrolor by měl znát jak teoreticky, tak umět provést prakticky vizuální zkoušku. [10]
- Zraková způsobilost – každý kontrolor musí mít potvrzené zrakové schopnosti od lékaře. Ten zkouší zrak na blízko (vzdálenost menší než 300 mm), vidění na dálku a barvocit, který je důležitý na rozlišení kontrastu mezi barvami na zkoumaném vzorku. Kvůli velkým nárokům na soustředění může kontrolor zkoumat vzorky maximálně dvě hodiny v kuse, poté ztrácí soustředěnost a je možné, že neodhalí veškeré vady. [1,4]
- Dostatečná kvalita osvětlení. [10]

Hodnocení vad

Každý člověk má jiné zrakové vnímání, a tudíž každý kontrolor vyhodnocuje vady jinak. Jedná se tedy o subjektivní vyhodnocování. Jak už bylo zmíněno, VT vyžaduje dobré osvětlení a zkušenost pracovníků. [10]

U hodnocení vad se nejčastěji provádí tyto metody:

- Posouzení vad podle znaků – při kvalifikaci se kontroloři učí pojmenovat vady podle jejich typického vzhledu. Pokud objeví na vzorku třeba trhlinu, tak ví, že vzorek už není dále použitelný a rovnou ho vyřadí. [11]

- Porovnání nalezené vady s obrazovým vzorem – nejčastěji s katalogem, kde jsou snímky reálných vad, které se běžně vyskytují na daném materiálu. Katalogy mohou být zaměřené i na drsnost povrchu, korodované povrchy aj.. [1]
- Hodnocení měřením – touto metodou se porovnávají rozměry vyhotoveného vzorku s předepsanou hodnotou, a to hlavně kvůli požadavku na vyměnitelnost. To znamená, že se mohou vzít jakékoli dva protikusy, které se vyrábějí odděleně a budou nám na sebe pasovat bez další úpravy. Měření se může provádět dvěma způsoby, a to měřením skutečných hodnot, kdy se získávají číselné hodnoty ze vzorku (na obr. 2 je posuvné měřidlo, kterým se měří vzdálenost, na obr. 3 je vyobrazen úchylkoměr, který měří odchylku od předepsaného rozměru), nebo porovnávacím měřením, kde výstupem je pouze to, zda výrobek splňuje předepsané hodnoty nebo ne. [11]



Obr. 2: Posuvné měřidlo [12]



Obr. 3: Číselníkový úchylkoměr [12]

3.2 Kapilární zkouška

Kapilární metoda využívá kapilárních vlastností penetrantů. Touto metodou lze detekovat vady, které bezprostředně souvisí s povrchem a jsou na povrchu otevřené. Mezi ně patří např. povrchové trhliny, studené spoje, porezita. Uzavřené nečelistvosti nacházející se uvnitř výrobku touto metodou nejdou odhalit. [13,14]

Výhodou PV je její univerzálnost. Můžeme zkoumat vzorky neohledně na jejich chemické složení, tvarovou rozmanitost i velikost. Je možné metodu aplikovat na kovové materiály (austenitické oceli, lehké kovy, slitiny), feromagnetické materiály i nekovové materiály (keramika, sklo, plastové hmoty). Další výhodou je cenová dostupnost, jednoduchost a rychlost provedení zkoušky. U této metody nastávají problémy jen zřídka. [1]

Princip metody

Podstatou PV je použití kapilárně aktivní kapaliny. Penetrant se nanese na povrch a pomalu bude pronikat tam, kde je necelistvost, poté se odstraní přebytečný penetrant z povrchu vzorku. Tam, kde je vada, zbylý penetrant vzlíná vlivem působení kapilárních sil a vadu zviditelní. Vhodné detekční kapaliny jsou takové, které mají malé povrchové napětí, a tudíž dobře smáčejí povrch. [13]

Postup zkoušky

Postup provedení PV lze rozdělit do následujících kroků, které jsou ilustrativně vyobrazeny na obr. 4:

- Očištění povrchu
- Nanesení detekční kapaliny na povrch
- Odstranění přebytečné kapaliny z povrchu
- Vyvolání indikace
- Vyhodnocení výsledků [6]

Popis postupu

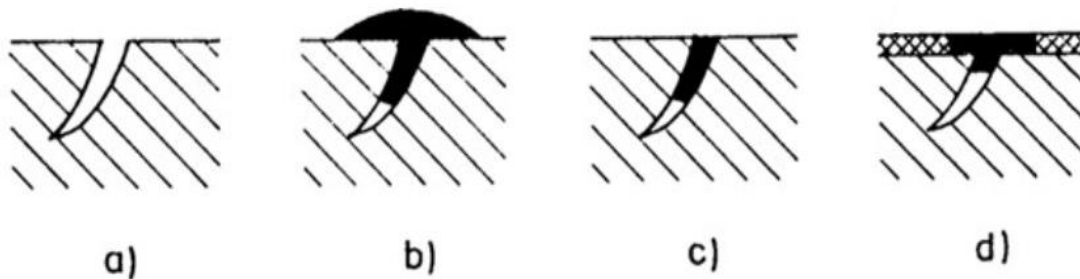
Způsob očištění závisí na materiálu, druhu nečistot, a na předchozím mechanickém obrábění. Nejčastěji se povrch očistí mechanicky, kartáčem. Musí se dát pozor na to, aby při čištění nedošlo k ucpání necelistvosti a poté následuje odmaštění povrchu ve vhodném rozpouštědle. [6,13]

Na čistý povrch se nanáší detekční kapalina štětcem, nástřikem nebo ponořením do penetrační kapaliny. Kapalina se nejčastěji nanáší při pokojové teplotě. Aby se zajistil průnik kapaliny do necelistvosti, je důležité ji nechat minimálně 5 minut působit. [13]

Odstranění přebytečné indikace je potřeba dělat důkladně. Pokud by se tak nestalo, na povrchu by bylo vidět více vad, než by tam bylo skutečně. Přebytečná kapalina se může setřít hadrem nebo opláchnout rozpouštědlem. Musí se dávat pozor, aby se nevymyla i indikace z necelistvosti. [13]

Indikace se vyvolává nanesením vývojky bezprostředně po odstranění přebytečné detekční kapaliny. Ta se nanáší pomocí štětce nebo nástřiku, pokud se jedná o mokrou vývojku (suspendovaný bílý prášek v acetonu). Druhou metodou nanášení je naprašování, kde vývojka je ve formě prášku. Vrstva nanesené vývojky musí být rovnoměrná, pokud by tomu tak nebylo, citlivost zkoušky se snižuje. [6,13]

Vyhodnocení se provádí po uschnutí vývojky, to bývá 5 – 20 minut po nanesení. U zkoušek, kde se indikace projevuje barevnou změnou, jako třeba u zkoušky barevnou kapalinou, se povrch prohlíží při denním světle. Při fluorescenční metodě se povrch pozoruje ve tmavém prostředí a na povrch svítí ultrafialové světlo. [6]



Obr. 4: Postup kapilární zkoušky [15]

a) Povrch očištěn a odmaštěn b) nanesena detekční kapalina c) Odstranění přebytečné kapaliny d) Povrch po nanesení vývojky

Kapilární prostředky

Pod slovem prostředky si lze představit činidla, která jsou potřebná pro kapilární zkoušky. Rozdělují se na:

- Odmašťovače – odmašťovač je činidlo, které napomáhá k odstranění tuku a oleje z povrchu před nanesením penetrantu. Jako odmašťovač je možné použít benzín, aceton, louhy - sodný, draselný atd.. [1]
- Penetranty – penetrantem se nazývá kapalina, která se nanáší na povrch zkoumaného vzorku a vniká do necelistvostí. Po odstranění přebytečné kapaliny z povrchu vztlíná zbylá kapalina z necelistvostí a tím se zviditelní vada. Penetranty jsou z velké části rozpouštědla, do kterých je přimíchána buď červená barva nebo luminosfór. [1,13]
- Emulgátory – napomáhají k odstranění přebytečného penetrantu z povrchu zkoumaného vzorku. [1]
- Vývojky – po odstranění přebytečného penetrantu se nanáší vývojka, která napomáhá vztlínání zbytku penetrantu z necelistvostí. Hlavním úkolem vývojky je zviditelnit indikaci necelistvostí. Kapilární vývojky obsahují práškovitou složku, která nesmí být hydroskopická a nosné prostředí, kterým může být vzduch, aceton, voda aj.. [1,6]

3.3 Magnetická metoda prášková

Magnetická prášková metoda je také nazývána jako metoda rozptylových toků. Jedná se o jednu z nejstarších a nejdřívejších metod v NDT. Při výrobě a zpracování materiálu mohou vzniknout vady, které se vyskytují nejenom na povrchu materiálu, ale také pod povrchem bez otevření. Tyto vady se detekují pomocí magnetické metody. Materiál, který bude testován, musí být feromagnetický, mezi takové patří například konstrukční a nástrojové oceli. [16, 17]

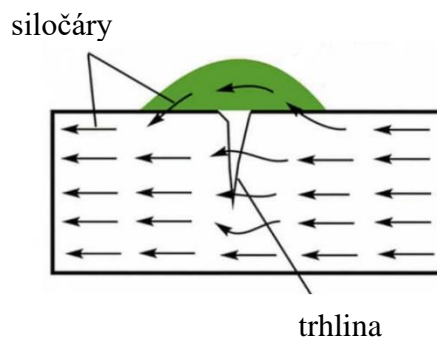
Metoda je založená na zmagnetizování zkoumaného vzorku a toho lze dosáhnout dvěma způsoby:

- Zkoumaný předmět se nasadí na póly silného elektromagnetu.
- V okolí zkoušeného místa bude procházet silný elektrický proud vhodného směru, který způsobí vznik magnetického pole. [13]

Směr magnetizace bude zvolen tak, aby magnetické pole bylo kolmé na plochu vady. [16]

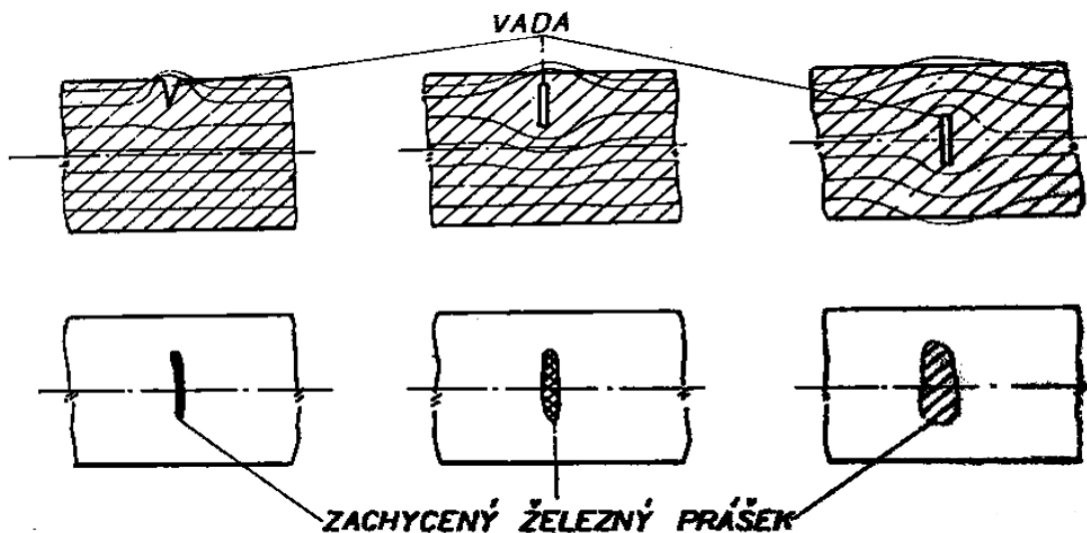
Princip metody:

Po zmagnetizování vzorku vzniká magnetické pole, které je vyobrazeno na obr. 5 pomocí siločar.



Obr. 5: Využití rozptylového magnetického pole k indikaci vad [15]

V homogenním materiálu jsou magnetické křivky rovnoběžné s povrchem (indukční čáry procházejí nejkratší cestou mezi magnety). Rozptyl magnetického pole vzniká v místě vady (vada je chápána jako vzduchová mezera) v důsledku zvětšení magnetického odporu a deformace magnetického pole. Na hranách necelistvosti vzniknou fiktivní magnetické póly, nad kterými se vyklenou magnetické siločáry a je možné indikovat vadu pomocí tělísek, nejčastěji železného prášku, který přímo ohraničuje polohu vady. Čím je vada blíže povrchu, tím je detekování vady přesnější, neboť magnetický tok je maximální. Pokud je vada hluboko pod povrchem, prášek je více rozmělněný a necelistvosti nelze přesně detekovat, viz obr. 6. [13-15]



Obr. 6: Vliv vzdálenosti vady od povrchu [14]

Citlivost této metody se odvíjí od:

- Velikosti indikačního prášku – velikost indikačních tělísek má velký vliv na pohyblivost a shromadňování. Na zjištění nejmenších vad se používají prášky o velikosti mikronu. [14]
- Indikační prášek – pokud se bude prášek smíchávat s tekutinou, v našem případě oleji nebo petroleji, tak musí tekutina obsahovat dostatečné množství indikačního prášku, jinak je indikace nedostatečná. Prášek může být i bez tekutiny. Poté je ale nutno prášek pravidelně sfoukávat a sklepávat, aby se usazoval pouze na místech s magnetickou přitažlivostí. [14,16]
- Kontrast magnetických indikací – je-li vzorek světlý, je zapotřebí při zkoušení použít černou detekční tekutinu. A naopak, při tmavém vzorku je nutno použít bílou detekční tekutinu. [14]
- Řídící síly – síly, kterými působí magnetické rozptylové pole na částice v prášku.
- Sklon zmagnetizovaného předmětu – sklon musí být takový, aby gravitační síly působící na prášek nezměnily místa usazování železného prášku.
- Magnetizace – jedná se především o správnou velikost. Pokud by byla magnetizace příliš malá, rozptylový tok bude nevýrazný a prášek se nepřichytí. Naopak při velké magnetizaci se prášek přichytí na celém povrchu materiálu a kontroloři nejsou schopni detekovat vadu. [14]

3.4 MMM metoda

MMM, jinak řečeno magnetická paměť materiálu, je jedna z NDT metod, založena na měření a analýze rozložení zbytkových magnetických polí, vyskytujících se v kovových materiálech, které zachycují technologickou historii zkoumaného vzorku. Pomocí MMM metody se určují SCZ (Stress Concentration Zones), nečelivosti a nehomogenity v mikrostruktuře materiálu. [18]

MMM metoda je jev, který se objevuje v materiálu ve formě zbytkové magnetizace, která vzniká kvůli vlivu procesu magnetizace, provozního zatížení, tepelného zpracování, tváření, ochlazování, sváření aj. Vyskytuje se v prostředí zemského magnetického pole. [18]

Princip metody

Metoda je založena na skenování intenzity magnetického pole nacházejícího se těsně nad povrchem materiálu. Skenování se provádí speciálním zařízením, to jest vozíčkem s upevněnými snímacími sondami s elektronikou, která napomáhá zesilování a digitalizaci signálů ze sond. [19]

Samotné měření se provádí tak, že snímač přejíždí přes vybrané místo. Podle počtu sond je možno přes zkoumaný vzorek přejet jednou i vícekrát. Na displeji měřiče je možné si vybrat ze dvou výstupů. A to hodnoty intenzity, nebo gradientu magnetického pole. Hodnoty mohou být jak v číselné, tak v grafické podobě. [18]

Mezi výhody patří:

- Není potřeba před zkoumáním vzorku upravovat povrch materiálu.
- Možnost detekovat vady je i během provozu.
- Jedná se o rychlou nedestruktivní metodu.
- Akustické emise a vibrace nemají vliv na měření. [19]

Omezení této metody:

- Na uměle zmagnetizované kovy a nemagnetické materiály nelze použít metodu MMM.
- Během testování se nesmí v blízkosti vyskytovat cizí magnetický materiál. [18]

3.5 Metoda vířivými proudy

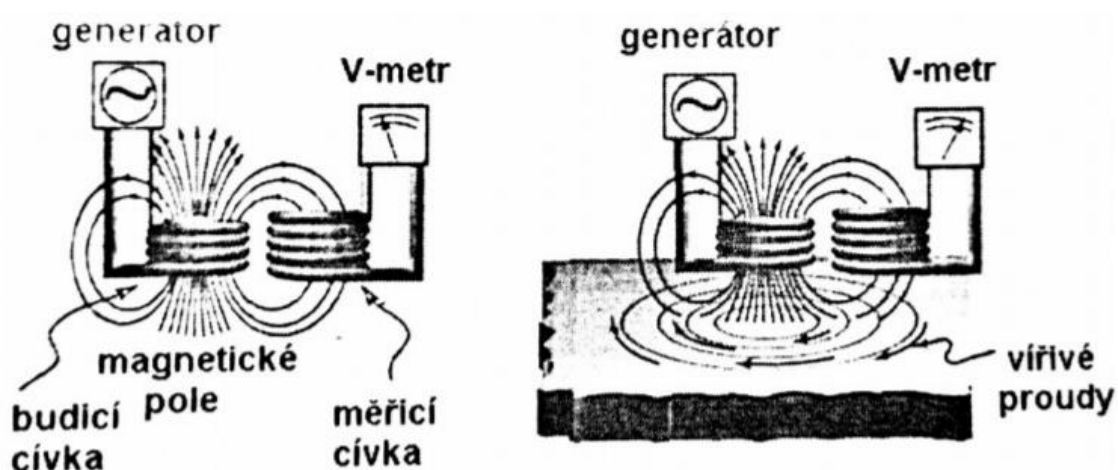
Touto metodou lze kontrolovat všechny elektricky vodivé materiály, výrobky, ať už feromagnetické či neferomagnetické. Účelem metody je zjišťovat heterogenitu struktury a odchylku od předepsaného chemického složení. Používá se především u kontroly geometricky jednoduchých tvarů. [13]

Metoda ET umožňuje sledovat vlastnosti materiálu, které svojí změnou ovlivňují elektrickou vodivost a permeabilitu. [6]

Postup metody

Celá součástka nebo jen její část se vkládá do vnějšího elektromagnetického pole (průchozí cívka). Pokud potřebuji zhodnotit pouze část povrchu, použiji pouze příložnou cívku. Z toho plyne, že metoda je bezdotyková, plynulá a velmi rychlá. Díky tomu je možná automatizace. [6]

Na výrobek působí střídavé magnetické pole, vytvořené budící (primární) cívkou, která je napájena střídavým proudem. Ve vzorku se indikují vířivé proudy, též zvané Foucaultovy, působící svým magnetickým účinkem zpětně na magnetické pole původní budící cívky. Tento jednoduchý postup je možné vidět na obr. 7. Zkoumaný vzorek si lze představit jako uzavřený proudovodič. Pole magnetické z budící cívky a magnetické pole z vířivých proudů se skládají a vzniká pole výsledné. To závisí především na elektrické vodivosti a magnetické permeabilitě materiálu. [1,6]



Obr. 7: Princip metody ET [1]

Výhody:

- Relativně levná a rychlá kontrola.
- Možnost sestavení lehkého přenosného přístroje.
- Kontrola velkého množství vlastností materiálu.
- Možnost automatizace. [1,6]

Nevýhody:

- Citlivost na rozměry součásti – čím větší, tím je menší přesnost.
- Nelze indikovat vady hluboko pod povrchem. [1]

3.6 Ultrazvuková metoda

Ultrazvukové zkoušení vzniklo kvůli potřebě detekovat skryté vady uvnitř materiálu v rozměrných výkovech a vývalcích, protože tyto výrobky nebylo možné dobře prozářit. Některé necelistvosti by se detekovaly až na konci výroby, jiné by se vůbec neodhalily a mohly by způsobit havárii. Tímto se ultrazvuk stal jednou z nejrozšířenějších a nejvšestrannějších nedestruktivních metod, a to díky možnosti detekovat vady v materiálu, měřit geometrické charakteristiky, změny v mechanické struktuře i fyzikální vlastnosti (modul pružnosti, pevnosti atd.). [1,20,21]

Ultrazvuková metoda používá speciální zařízení k odesílání vysokofrekvenčních vln o kmitočtu 20 kHz. Lidské ucho je schopno vnímat vlnění mezi 16 kHz a 20 kHz. Vlnění pod 16 kHz se nazývá infrazvuk, nad 20 kHz ultrazvuk, pro lidské ucho nezaznamatelné zvuky. [13]

Fyzikální princip

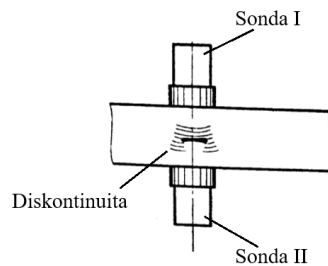
Ultrazvuková zkouška používá speciální zařízení k odesílání vysokofrekvenčních zvukových vln skrz celý materiál a poté používá další speciální zařízení k přijímání těchto zvukových vln. Podle toho, jak se vysokofrekvenční zvukové vlny vracejí do záznamového zařízení, lze provést stanovení materiálového stavu a zaznamenat vady. [17]

Metody zkoušení

Jsou dvě metody, jak lze detekovat vady pomocí ultrazvuku:

- Přechodová metoda – nejstarší a nejjednodušší metoda. Měří procházející akustický tlak nebo zjišťuje dobu průchodu ultrazvukových vln vyšetřovaným

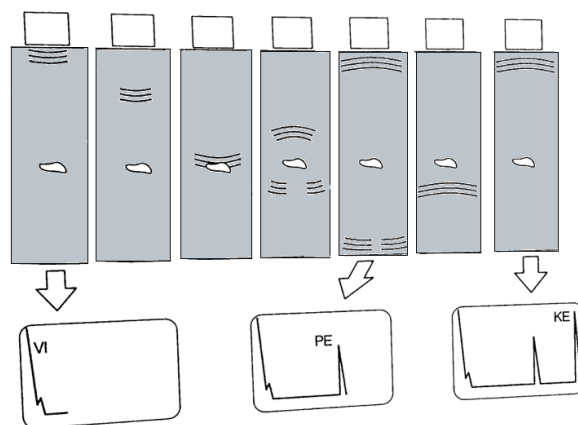
materiálem. Používají se dvě sondy, které jsou umístěny souose na protilehlých stranách zkoumaného vzorku. Jedna pouze vysílá a druhá přijímá část ultrazvukové vlny, která prošla skrz materiál viz obr. 8. [1,22]



Obr. 8: Uspořádání sond při přechodové metodě [1]

První sonda vysílá kmity nepřetržitě nebo v krátkých impulsech. Akustický tlak přijímaný druhou sondou se transformuje na elektrický signál, a ten je dále zesílen zesilovačem a jeho amplituda se indikuje pomocí indikátoru. Tato metoda se používá k zjištění změny útlumu ultrazvuku v prostředí, a to se využívá k zjišťování homogenity. Přechodová metoda se používá pouze tehdy, když jsou oba povrchy umístěny proti sobě a vhodně upraveny. [22]

- Odrazová metoda – metoda je založena na zjištění odrazu – echa způsobeného chybami materiálu. Používá se pouze jedna sonda, která vysílá i přijímá ultrazvuk, to znamená, že na aplikaci této metody nám stačí pouze jeden volný povrch, schéma je zakresleno na obr. 9. Zkoumá se čas, za který echo vyjde ze sondy a zase se vrátí zpět. Díky tomu je možné určit dráhu k chybě a velikost echa nám určuje velikost samotné chyby. [1,4,22]



Obr. 9: Odrazová metoda - princip zaznamenávání echa [1]

Mezi nevýhody odrazové metody patří to, že ultrazvuk překoná dvojnásobnou vzdálenost oproti metodě přechodové. Pokud by byly dvě chyby za sebou, není je možné detekovat, protože signál se vrací zpět. [1]

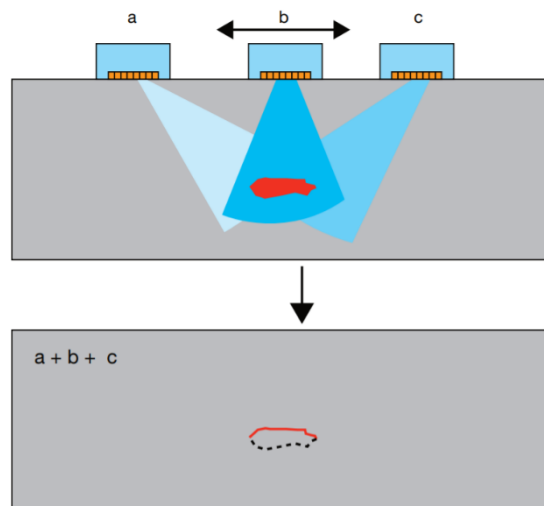
S rostoucí úrovní elektroniky, výpočetní a softwarové technologie, se do značné míry používají digitální ultrazvukové testovací přístroje. Vysoce přesné a efektivní možnosti kontroly snižují lidské chyby a zvyšují spolehlivost a stabilitu detekce. Je možné metodu i vyhodnocení zautomatizovat. [17]

3.6.1 Metoda phased array

Tato metoda vznikla kvůli tomu, že v klasické ultrazvukové metodě nebylo možné zjistit náhodně orientované trhliny v různých hloubkách materiálu pomocí jedné sondy umístěné na pevném bodu. Také nebylo možné klasickou UT zkoumat vzorky složitého tvaru např. lopatky turbín. [1,18]

Metoda phased array má jednu sondu, ve které je umístěna soustava měničů. Každý měnič má svůj budicí generátor a zesilovač. Šířka měniče je velmi malá a vysílá do zkoumaného vzorku vlastní elementární vlnu. Z Huygensova principu vyplývá, že z těchto vln vytvoří čelo výsledné vlny. Podle toho, jak se budicí impulzy za sebou zpožďují, je možné nasměrovat výslednou vlnu pod výsledným úhlem. Ke generování impulzů a k zaznamenávání necelistvostí v reálném čase je zapotřebí výkonný počítač. [1,23]

Na obr. 10 je vidět detekce vady pomocí jedné sondy, která se pohybuje mezi body a, b, c.



Obr. 10: Detekce vady pomocí metody Phased array [24]

3.6.2 Technika TOFD

Technika TOFD je založena na difrakci ultrazvukových vln na špičkách necelistvostí v materiálu. Z rozdílné doby příchodu difrakční vlny, vyzařovaným horním okrajem a difrakční vlny vyzařovaným spodním okrajem trhliny, je možné vypočítat její rozměr.

Metoda oproti klasické ultrazvukové metodě není závislá na amplitudě, takže není závislá na změně kvality akustické vazby. [1,25]

K detenci vad se používají dvě sondy, jedna jako vysílač, druhá jako přijímač. Každá má v sobě malý měnič, aby se dosáhlo širokého otevřeného svazku, který bude procházet co největší částí zkoumaného materiálu. Během zkoušení se sondy pohybují podél svaru, každá na jiné straně. Obvykle se kontrola provádí ze tří pozic pro každý svar: vycentrovaný na svaru, odsazený vlevo a vpravo. Skenování z těchto konkrétních pozic pomáhá dosáhnout nejlepších výsledků. Určuje, ze které strany vznikly indikace eroze nebo koroze a eliminuje jakékoli maskování způsobené signálem zadní stěny. Z obou sond se skeny nepřetržitě přenášejí do počítače, kde se vytváří poloha vady. [1,25,26]

TOFD se používá již několik let na obecné kontroly svarů. Ukázalo se, že jde o rychlou a snadno aplikovatelnou metodu, kterou lze dobře používat ve větším měřítku. U této metody lze detekovat všechny vady neohledně na jejich orientaci, a to díky používání především difrakce oproti odrazu energie. [26]

3.6.3 Metoda EMAT

Jedná se o bezkontaktní ultrazvukovou metodu. Metodu lze použít pouze ve vodivých a feromagnetických materiálech. Princip sond se zakládá na Lorentzově síle. Ta vzniká působením magnetického pole, popřípadě elektrického, působícího na pohybující se částici s nábojem. [1]

Metodu EMAT využíváme při: zkoušení trubek a ocelových tyčí, tlakových nádob, dále na měření modulu pružnosti a tloušťky materiálu při vysokých teplotách. [1]

3.7 Prozařování

Prozařování je jedna z metod NDT založena na prozařování materiálu vhodným zdrojem a následném vyhodnocení ionizujícího záření po průchodu zkoumaným vzorkem. Z toho plyne, že lze zkoumat jak vady povrchové, tak i vady uvnitř materiálu. [17]

Pod pojmem záření je možné si představit šíření energie v prostoru. Pokud jsou nositeli energie hmotné částice jako jsou elektrony, neutrony, jedná se o korpuskulární záření. Je-li nositelem energie vlnění, jedná se o elektromagnetické vlnění, mezi které se řadí záření rentgenové a záření gama. [1]

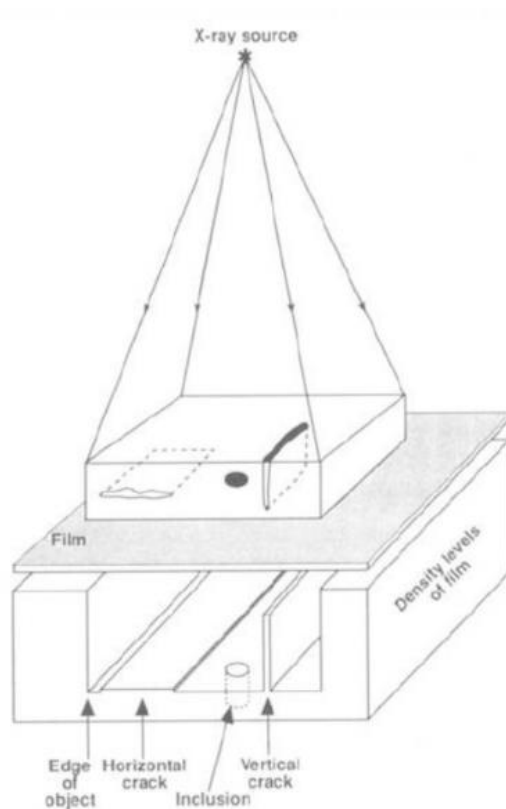
Rentgenové záření, o vlnové délce 0,01 – 10 nm, je založeno na principu diferenciálu absorpce. Různé materiály absorbují pronikající záření odlišně. Materiál s větší hustotou jako je například olovo by absorbovalo prakticky všechna záření. Zatímco vzduch propouští veškeré záření bez sebemenší absorpce. Tyto hodnoty absorpce se promítají na film. Vady lze detekovat na základě rozdílné tmavosti filmu po ošetření v temné místnosti. Po správné aplikaci této metody je možné vidět obrys vady a určit její přesnou polohu. Kvůli vlastní radiaktivitě jsou však požadavky na personál a na detekční prostředí velmi přísné. [16,17,27]

Postup metody

Vysokoenergetické fotony jsou vysílány rentgenovou trubicí a jsou usměřňovány do bodového zdroje. Tento proud fotonů proniká skrz zkoumaný materiál a je shromažďován na druhé straně na rentgenovém detektoru podobném fotocitlivému senzoru, princip je vyobrazen na obr. 11. Frekvenci a odpovídající vlnovou délku lze upravit změnou napětí. Při průchodu fotony interagují s materiálem. Relevantní účinky jsou absorpce (foton ztrácí svou úplnou energii), rozptyl (označovaný jako Comptonův rozptyl: foton ztrácí část své energie a je odkloněn jiným směrem) a produkce párů (foton mizí a generuje pár elektron-pozitron). Průchod materiálem závisí na hustotě a atomovém čísle materiálu. Rentgenový detektor sbírá všechny neovlivněné fotony v rovinném rozlišení a rozkládá objemové informace o vzorku na dvourozměrný obraz. Tento rentgenový stínový obraz je věrným odrazem nehomogenity v objektu. [27,28]

Na rozdíl od ostatních metod, u prozařování nejsou stanoveny žádné požadavky na materiál (lze zkoumat magnetický, feromagnetický materiál, plasty, keramiku a mnoho dalších). Také není předepsaný žádný tvar ani tloušťka materiálu, pouze musí být vzorek přístupný z obou stran. Jedná se o velmi přesnou metodu, u které nemusí být vzorek složitě předpřipravován. [29]

Na druhou stranu, mezi nevýhody patří vysoká investice do vybavení. Dále je nákladná na školení obsluhy i vzhledem k radiačnímu riziku. [29]



Obr. 11: Schéma prozařovací metody [27]

x-ray sources = zdroj, film = film, density levels of film = úrovně hustoty filmu, edge of object = kraj zkoumaného vzorku, horizontal crack = vodorovná trhлина, inclusion = dutina, vertical crack = vertikální trhлина

Infračervené záření

Jedná se o záření s vlnovou délkou od 0,75 do $10^4 \mu\text{m}$, což je kratší, než mají rádiové vlny a delší, než má světlo. Jejich výhodou je možnost zkoumat vyztužené plastické hmoty, kompozitní materiály aj. [6]

Při infračerveném zkoušení materiálu se měří změny intenzity IR. Pokud se v materiálu vyskytuje vada, odhalí se pomocí rozdílného vyzařování IR oproti okolí. Velikost intenzity záření se odvíjí od teploty a dalších nežádoucích jevů, které je potřeba eliminovat. Mezi ně patří například prostředí, povrch a odražené záření od okolních předmětů. Lidské oko není schopno zaznamenat záření o takové velikosti. K měření parametrů a vykreslování obrazů teplotních polí je nezbytné použít speciální zařízení. Mezi ně patří radiometry a termokamery. [6]

Existují dva postupy zkoušky:

- Aktivní – teplo vzniká přímo v místě vady v důsledku samotné funkce zkušební vzorku. [6]
- Pasivní – vnější zdroj vyvolá tepelný tok, který protéká skrz zkoumaný materiál. [6]

3.8 Zkouška těsnosti

Některé vady mohou prostoupit skrz celou tloušťku materiálu a způsobit netěsnost. Tyto vady neboli netěsnosti, se definují jako hodnoty průniku zkušební látky (kapalin, plynů, par) přes kontrolovaný vzorek, které je v ideálním případě celistvý. Zkouška se provádí především u zařízení, které mají rozdílný tlak plynu, respektive kapaliny, na vnějším a vnitřním povrchu. Mezi tyto zařízení patří tlakové a podtlakové nádoby, dálkovody pro plynná a kapalná média, skladovací nádrže, potrubní rozvody a mnoho dalších. [1,6]

Jedna z nejdůležitějších podmínek této metody je dostatečná čistota zkoumaného vzorku. Ten musí být zbaven nečistot, prachu a mastnoty. [6]

Při měření netěsnosti se primárně zjišťuje její velikost (průtočné množství tekutiny), poloha vady je zanedbatelná. Při detekci necelistvostí hledáme polohu výtoku tekutiny z vady anebo místo vtoku dovnitř. Není vždy možné necelistvosti lokalizovat, pouze se zjistí, že existuje únik kapaliny. Například netěsnost na trubce vyskytující se ve svazku trubkového aparátu. Lze zjistit, jaká trubka netěsní, ale není možné přesně určit místo vady. [1]

Podle velikosti netěsnosti se volí metoda na hledání těchto vad. Základní rozdělení používaných metod:

- Akustická metoda – vytékající plyn, který dosáhne výtokové rychlosti, vytváří ultrazvukové vlnění. Toto vlnění lze zachytit selektivním mikrofonom a dohledat místo zdroje pomocí zvukového nástavce. [1]
- Penetrační metoda – z jedné strany zdroje je nanesen penetrant, na druhé straně vývojka. Tím se vytvoří podmínky pro vzlínání penetrantu z necelistvostí. Vady jsou indikovány barevnými skvrnami na vývojce. [6]
- Bublinová zkouška – jedna z nejstarších metod. Zkoumaný předmět se natlakuje zkušebním plynem a vloží se do kapaliny (nejčastěji voda nebo pěnový roztok). V případě netěsností se místo ukáže proudem bublinek. [6]

- Metody s aplikací zkušebního plynu – jedná se o nejrozsáhlejší metodu. Ukazuje místo vtoku a výtoku zkušebního plynu (jako zkušební plyn se používá jakýkoli plyn, pro který existuje detektor) zesílením signálu detektoru příslušné látky. [1]

3.9 Metoda akustické emise

AE je efektivní metoda analýzy nedokonalostí. Je velmi často využívána díky včasné detekci a diagnostiky poruchy oproti jiným NDT metodám. Jedná se o velmi citlivou metodu, která je založena na hledání stresových vln vytvořených vadou (plastická deformace, praskliny aj.), které se šíří pevným materiálem při namáhání. Tato metoda detekuje vady pouze během jejich vznikání. [30]

Stresové vlny, které jsou výsledkem těchto typů defektů, se šíří soustředně od jejich původu a jsou detekovány řadou vysoce citlivých piezoelementů. Technika akustické emise se liší od většiny ostatních NDT technik ve dvou aspektech. První rozdíl je původ signálu. Místo dodávání energie do objektu tato metoda naslouchá „zvuku“ generovanému energií uvolněnou v objektu. Druhá výhoda je, že metoda AE dokáže rozeznat stagnující vady a vady, co se rozšiřují nebo nějak mění. [31]

Princip metody

AE je fyzikální jev, při kterém v důsledku vznikání dynamických procesů (způsobeny zatěžováním vnějšími nebo vnitřními silami) dochází k uvolnění nahromaděné energie z materiálu ve formě tranzitních napěťových vln. Průchodem napěťové vlny se část uvolněné energie vynese na povrch, druhá část energie se přemění na teplo a zbytek energie se vrací zpět do materiálu. Vzniklé vlnění na povrchu je snímáno pomocí různých typů snímačů, ve kterých se přemění na elektrický signál. Běžné AE zařízení používají piezoelektrické snímače pracující od 100 kHz do cca 2 MHz. Tyto měniče, snímající elektrické vlny, se zesilovači a filtry vytvářejí elektrický signál. Ten je nositelem informací o tom, co se děje v zatěžovaném materiálu. Vytvořený signál se zpracovává prahovým amplitudovým analyzátozem nebo pomocí speciálních karet vyhodnocovaných v PC. [1,16,32]

Omezení metody AE:

- Zkoušku akustické emise je možné provést pouze jednou. Není opakovatelná.
- Lze detekovat pouze ty vady, které se vyskytují v reálnou dobu. Nelze detekovat statické a neaktivní nečistoty.

- Není univerzální – efektivnost a přínos této metody se odvíjí od typu konstrukce, materiálu, historii provozu a zatížení atd. [1]

3.10 Měření tloušťky

DFT je jedním ze základních kritérií pro hodnocení očekávané protikorozní účinnosti povlaku a životnosti součástky. Podmínkou je pouze to, že povlak nanesený na výrobek je vyšší, než je jeho předepsaná hodnota. [33]

Tloušťka naneseného povlaku je vzdálenost mezi povrchem podkladu a povrchem povlaku. Používané metody ke zjištění DFT jsou vázané na typ podkladového materiálu, typ nanášeného povlaku a předpokládanou tloušťkou povlaku. [33]

Mezi DFT metody patří:

- Magnetická metoda – tloušťka naneseného povlaku se měří na principu vzájemného působení magnetického pole a kovového podkladu. Ze změny magnetického pole se určí tloušťka povlaku. [33]
 Faktory ovlivňující magnetické pole: rozměr a tloušťka podkladu, drsnost podkladu a jeho vlastnosti, jako jsou permeabilita a vodivost. [33]
 U magnetické metody se měří síla, která je potřebná k odtržení magnetu od povlaku. U velké tloušťky povlaku je magnet dál od materiálu. Čím je povlak vyšší, tím je magnet dál od zkoumaného vzorku a přitažlivá síla je menší. Nevýhodou této metody je velká odchylka, až 15 %. [34]
- Magneticko-indukční metoda – vyhodnocuje intenzitu vybuzeného elektromagnetického pole, které je funkcí tloušťky. Při měření se používají dvě sondy. Jedna sonda vytváří nízkofrekvenční střídavé elektromagnetické pole ve svojí blízkosti. Obsahuje feromagnetické jádro a budící vinutí, které je napájeno AC o nízké frekvenci. Jsou-li v blízkosti sondy feromagnetické materiály, pole sondy se zesiluje. Zesílené pole je možné změřit druhou snímací cívkou. Ta odpovídá vzdálenosti mezi sondou a feromagnetickým podkladem. Pomocí magneticko-indukční metody se měří nemagnetické vrstvy (zinek, chrom, nátěrové systémy) na magnetickém podkladu (ocel). [33]
 Tato metoda se řadí mezi nejpoužívanější a nejjednodušší provozní kontrolu. Je také velmi jednoduchá a relativně přesná (odchylka je do 2 %). [33,34]
- Metoda vířivými proudy – podstatou metody je vyhodnocování zpětného působení vířivých proudů vybuzených v nemagnetickém kovovém podkladu.

Je založena na principu rozdílné vodivosti nemagnetického kovového podkladu a elektricky nevodivého povlaku a naopak. [33]

Pracuje se s jednou sondou, která je bez jádra. Je napájena AC o vysoké frekvenci. Pokud se v blízkosti sondy vyskytuje elektricky vodivý materiál, vznikají uvnitř něho vířivé proudy. Ty vytvářejí vysokofrekvenční střídavé elektromagnetické pole opačného směru. Změna pole odpovídá vzdálenosti mezi sondou a elektricky vodivým materiálem. [33]

- Ultrazvuková metoda – principem metody je šíření ultrazvukových vln povlakem do doby, než narazí na odlišný materiál. Část vlny se odrazí zpět a její signál je zaznamenán snímačem. Proto je důležité, aby rychlost zvuku v jednotlivých povlacích byla rovnoměrná. Aby bylo možné metodu aplikovat musí být tloušťka jednotlivých vrstev minimálně 25 μm . [33]
- Rentgenospektrometrická metoda – principem je rentgenové záření dopadající na povrch, kde je nanesen povlak. Na povrchu se měří intenzita sekundárního záření vysílaného buď povlakem nebo podkladem a tlumeným povlakem. Touto metodou lze stanovit plošnou hmotnost povlaku. Pokud je známá hustota povlakového materiálu je možné výsledky vyjádřit jako tloušťku povlaku, nebo je možné určit vztah mezi intenzitou záření a tloušťkou povlaku pomocí etalonů. [33]

3.11 Měření drsnosti

Po každé technologické operaci vzniká na povrchu nerovnost. Kvůli této nerovnosti mohou některé funkční plochy neplnit svůj účel. Proto se používá metoda měření drsnosti po mechanické předúpravě. [35]

Měření drsnosti je možné provádět těmito způsoby:

- Porovnáním s etalony drsnosti – jedná se o metodu, kdy se porovnává zkoumaný povrch s etalonem pomocí oka nebo mikroskopu. Jedná se o nepřesnou metodu. Kontrolori mohou porovnávat jiné parametry na etalonu a na zkoumaném vzorku a také jejich schopnosti mohou být rozdílné. Při měření musí být splněny podmínky, mezi které patří např.: stejný materiál vzorku a etalonu, použité stejné světlo během vyhodnocování, stejný tvar povrchu vzorku a etalonu. [35]
- Pomocí dotykových profilometrů – výhodou této metody je přímé odečítání číselných hodnot parametrů drsnosti. [35]

- Metodou světelného řezu – k určování drsnosti se používá dvojitý mikroskop. Na měřený povrch dopadá tenký paprsek pod úhlem 45° . Odrazem paprsku z nerovnosti vzniká obraz profilu v poli mikroskopu. [35]
- S využitím interference světla – během této zkoušky paprsek světla postupuje přes polopropustné zrcadlo. Část paprsku pokračuje dále na zkoumaný povrch a vrací se zpátky do okuláru. Druhá část paprsku se odrazí od polopropustného zrcadla a vrací se zpět do okuláru, kde paprsky interferují a vytvoří obraz povrchu. [35]

3.12 Měření lesku

Lesk je optická vlastnost povrchu. Stupeň lesku se definuje jako poměr mezi intenzitou odraženého a dopadajícího světelného záření jistého spektra od zkoumaného povrchu. Lesk je měřen v jednotkách GU nebo se pomocí reflektometrů zjišťuje množství vyzářeného světla (vyjadřuje se v %). Měřicí systémy se kalibrují podle standardu z černého skla, který má jasně daný index lomu. [36]

Za běžných podmínek se lesk měří reflektometrem pod úhlem 60° . Pokud je zkoumaný materiál tak lesklý, že výsledná hodnota je příliš vysoká, doporučuje se měřit pod úhlem 20° . A naopak, při matném lesku se doporučuje měřit pod větším úhlem jako například 85° . [36]

Optický dojem lesklého povrchu závisí nejen na jeho skutečném lesku, ale také na typu povrchu zkoumaného materiálu. Stejná barva na dvou vzorcích může vykazovat dva různé stupně lesku. To má za vinu nerovnost povrchu, kde se paprsky odrážejí rozdílně. Stejně tak i povrchové kazy mají vliv na odraz paprsků, mezi ně se řadí otisky prstů, špína, prach aj. [36]

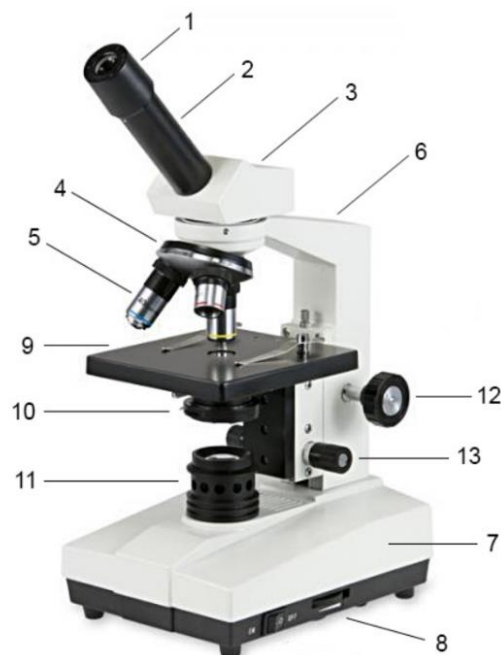
3.13 Mikroskopie

Mikroskopie není jednou z klasických NDT metod. Je to souhrn aplikací optiky, které se využívají k vyobrazení struktur, které nejsou možné vidět pouhým okem. Pomocí mikroskopu dokážeme zvětšit zorný úhel a díky tomu můžeme pozorovat velmi malé objekty. Hlavním úkolem mikroskopu je věrně a kvalitně zobrazit zkoumaný předmět, a tím poskytnout pozorovateli co nejvíce informací o struktuře materiálu. [9,37]

Optická mikroskopie

Také známá pod jménem světelná mikroskopie. Ke zkoumání vzorků se používá elektromagnetické záření, jehož vlnová délka je od 400 nm do 750 nm. Během zkoumání vzorku dochází ke změně charakteristik používaného záření, mezi které patří amplituda, fáze, frekvence a polarizace. Optický mikroskop, který je vyobrazen na obr. 12, se skládá z osvětlovací, mechanické a optické části. Do osvětlovací části spadá zdroj světla, kondenzor a clona. Mechanická část zahrnuje podstavec, stojan a stolek, na který se umísťuje předmět. Optická část se skládá z objektivu, okuláru a tubusu. [37,38,39]

- Objektiv – čočka, nebo soustava čoček, které jsou umístěny nejbližší ke zkoumanému předmětu. Vytváří skutečný, převrácený a zvětšený obraz předmětu. [9]
- Okulár – pomocí okuláru je možné vidět objektivem vytvořený obraz pouhým okem. Okulár funguje jako lupa, obraz objektivu mění na zvětšený, převrácený a zdánlivý. [9]
- Tubus – spojnice mezi objektivem a okulárem. Nastavuje jejich vzájemné polohy. [9]



Obr. 12: Optický mikroskop [38]

1. okulár, 2. tubus, 3. hlavice mikroskopu, 4. revolverová hlavice – slouží k uchycení objektivů, 5. objektiv, 6. rameno mikroskopu, 7. noha mikroskopu, 8. ovladač regulace osvětlení, 9. pracovní stůl, 10. kondenzor – umožňuje zkontrastnění obrazu, 11. kolektor – soustřeďuje paprsky světelného zdroje, 12. ovladač makroposuvu – pro hrubé zaostření objektu, 13. ovladač mikroposuvu – pro jemné doostření

Mikroskop je jedno z nejrozšířenějších optických zařízení. Kvůli velké rozmanitosti předmětů, které je potřeba zkoumat, se vyvinula řada pozorovacích metod. [38]

- Metoda světlého pole – tato metoda se používá u nepropustných nebo barevných objektů. V kondenzoru se soustředí paprsky na zkoumaný vzorek a poté vstupují do objektivu. Světlo, které prochází skrz vzorky, má zeslabenou intenzitu oproti světlu, které jde přímo z kondenzoru do objektivu. [40]
- Metoda tmavého pole – metoda spočívá v osvětlení vzorku pomocí kondenzoru se clonou. Kvůli cloně paprsky dopadají na objekt pouze šikmo a dále se na něm odráží, lámou a ohýbají. Do objektivu se dostane jen světlo, které je rozptýleno zkoumaným vzorkem. Okem vidíme vzorek jako zářící objekt na tmavém pozadí. [38,40]
- Metoda vícebarevného osvětlení – je obdobou metody tmavého pole s tím rozdílem, že clona obsahuje filtr propouštějící pouze světlo určité barvy. [38]
- Metoda šikmého osvětlení – do ohniskové roviny kondenzoru je umístěna clona s kruhovým otvorem. Střed této clony leží mimo optickou osu kondenzoru a je možné s ním libovolně otáčet. Na vzorek dopadají paprsky šikmo a díky tomu se pozorovateli jeví předmět plasticky. [40]
- Polarizační mikroskopie – jedná se o pozorovací metodu, která kombinuje světelný mikroskop a polarimetr. Vzorek vložíme mezi dva polarizátory. Tyto polarizátory jsou vloženy do toku světelných paprsků. Jeden je umístěn před kondenzátorem, druhý se nachází za objektivem. Pokud jsou roviny polarizace obou filtrů rovnoběžné, tak světlo projde a zorné pole mikroskopu je světlé. Pokud jsou roviny polarizace na sebe kolmé, světlo neprojde a zorné pole je tmavé. Natáčením polarizátorů vzniká efekt polarizace světla, to znamená, že vzorek má různé barvy na různých místech. [38,40]
- Interferenční mikroskopie – využívá polarizované světlo. Každý paprsek světla se dělí na dva koherentní paprsky. První paprsek prochází předmětem, kde se mu změní fáze, druhý paprsek předmět obchází, tudíž je beze změny. Poté se oba paprsky opět spojí a mezi svazky vzniká rozdílná fáze. Následkem toho nastane ve svazku interference světelných vln, které způsobí změny v amplitudě vlnění. Díky tomu vzniknou kontrasty optické hustoty, to se projeví zviditelněním fázového objektu. [40]

4 Experimentální část

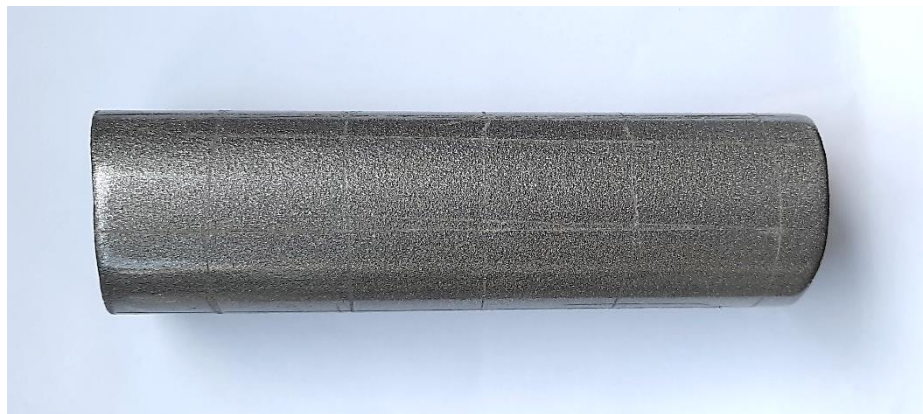
Vzorkem na experimentální část byla ocelová trubka o průměru 32 mm, délce 130 mm a tloušťce stěny 1,5 mm. Jednalo se o trubku švovou (svařovanou). Trubka se nejprve mechanicky předupravila, byla zbavena rzi, nečistot, mastnoty a byl zhotoven kotvící profil, aby byla zaručena přilnavost následné povrchové úpravy. Toho se dosáhlo ve tryskacím zařízení s metací jednotkou, které je vyobrazeno na obr. 13.



Obr. 13: Tryskací zařízení s metací jednotkou

Abrázivem byly ocelové kuličky. Tento proces trval dvakrát pět minut. Po otryskání byla prováděna první zkouška, a to měření drsnosti. Po jejím naměření byl vzorek odmaštěn isopropanolem a na vzorek se nanasla v elektrostatickém poli prášková barva CPC 20-1 SILBER D1 od výrobce Helios TBLUS d.o.o. (pod značkou Color Powder Coatings). Barva byla nanášena pouze na vnější část trubky. Poté, co se barva rovnoměrně nanasla, se dal vzorek vytvrdit do horkovzdušné pece. Vytvrzení probíhalo v peci při 180° po dobu deseti minut. Po vytvrzení se trubka z pece vyjmula a nechala zchladnout na vzduchu při pokojové teplotě. Nakonec se na trubku vyryla mřížka o velikosti 4x5. Tím se nám trubka rozdělila na 20 dílků, díky kterým bylo možné

jednotlivá měření lépe porovnávat, ukázka rozdělení trubky na sekce je vidět na obr. 14. Po obvodu trubky se vytvořily sekce A, B, C, D a po délce trubky se dílky pojmenovaly 1 až 5. Tímto vznikla pomyslná šachovnice. Následovalo měření naneseného povlaku pomocí Elcometeru a proměření povlaku se základním materiálem pomocí ultrazvukového tloušťkoměru. Na poslední měření byla trubka rozřezána na prstýnky a byla prováděna mikroskopická zkouška. Posledním úkolem experimentální části bylo srovnat všechny aplikované metody a vyhodnotit, jestli jsou vhodné na měření na zvoleném vzorku.



Obr. 14: Zkoumaný vzorek

4.1 Měření drsnosti

Některé povrchy materiálů jsou funkční plochy, které musí plnit svůj účel. Tyto plochy jsou během každé technologické operace namáhány a vznikají na nich nerovnosti. Aby funkční plochy plnily svůj účel, musí být jejich drsnost v přípustné toleranci. Měření drsnosti se provádělo po mechanické předúpravě povrchu vzorku. Provádělo se dvěma způsoby, a to vizuálně a pomocí drsnoměru. [35]

Vizuální zkouška

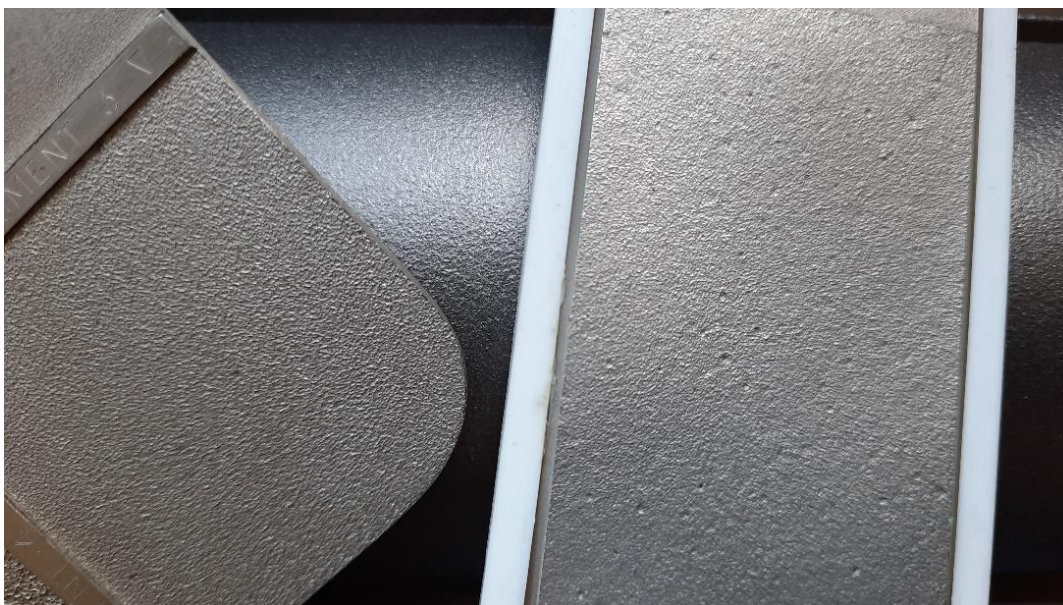
Provádí se porovnáním zkoumaného vzorku s etalonem pomocí oka či mikroskopu. Jedná se o rychlou a nepřesnou metodu, a to hlavně kvůli tomu, že každý kontrolor má jiné schopnosti i zkušenosti s měřením a vyhodnocováním povrchu.

První měření bylo prováděno pomocí vzorkovnice drsnosti povrchu. K vzorku se přikládaly vzorkovnice drsnosti tryskaných odlitků. Tato sada obsahuje skutečné povrchy tryskaných odlitků s přesně změřenou drsností. Sada obsahuje 6 vzorků drsnosti, které vychází ze základní řady podle ISO R468. Zkouška byla prováděna na předem určených místech povrchu. Osvětlení plochy vzorku bylo pod úhlem 15° proti směru pozorování. Po přiložení jednotlivých etalonů byl pomocí vizuální metody vybrán

povrch, který nejvíce odpovídal našemu vzorku. Nejbližší drsnost byla na etalonu číslo 2. Ten představuje $R_a = 6,3 \mu\text{m}$ a $R_z = 25 \mu\text{m}$. [41]

Druhé vizuální měření bylo prováděno pomocí komparátoru LD2050. Jedná se o stejný princip vyhodnocování jako u první metody jen s tím rozdílem, že v této sadě byly pouze čtyři vzorky. Tyto etalony jsou popsány v normě ISO 8503, kde jsou i uvedené hodnoty jednotlivých povrchů. Výběr etalonu je závislý i na použitém abrazivu při procesu tryskání. V našem případě nejvíce odpovídal zkoumanému vzorku etalon číslo 3. Kde $R_a = 12,5 \mu\text{m}$ a $R_z = 70 \mu\text{m}$. [42]

Přiložené etalony z obou měření jsou vyobrazeny na obr. 15. Na levé straně je etalon komparátoru LD2050 a na pravé straně obrázku je vzorkovnice drsnosti.



Obr. 15: Porovnání drsnosti měřeného zkušební povrchu vzorku s etalony – vlevo povrch etalonu č. 2 dle ISO R468, uprostřed otryskaný povrch zkušební vzorku a vpravo povrch etalonu č. 3 dle ISO 8503

Drsnoměr Mitutoyo SJ-301

Měření drsnosti povrchu pomocí drsnoměru je velmi přesné, rychlé a jednoduché. Jeho velkou výhodou je odečítání číselných hodnot drsnosti z přístroje. Drsnoměr Mitutoyo SJ-301 je přenosný, a tudíž je možné ho používat kdekoliv. Zaznamenává výšku měřícího hrotu, který je buď v klidu nebo v rovnoměrném pohybu na povrchu zkoumaného vzorku. Pomocí drsnoměru je možné měřit drsnost, a to nejvyšší a průměrnou výšku nerovnosti profilu, rozteč nerovnosti profilu a mnoho dalších. [43, 44]

Tabulka naměřených hodnot drsností na zkoumaném vzorku je vyobrazena v tab. 2.

Tab. 2: Naměřené hodnoty drsnosti povrchu pomocí drsnoměru

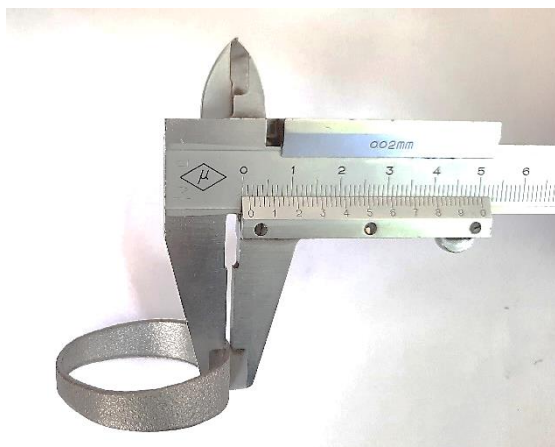
měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ra [μm]	3,33	3,94	4,14	3,24	3,82	3,70	3,72	3,46	3,70	4,19
Rz [μm]	14,11	19,29	19,47	16,52	18,43	16,70	18,75	18,05	17,36	20,65

Průměrná hodnota Ra = 3,724 μm a Rz = 17,933 μm .

4.2 Posuvné měřítko

První měření tloušťky základního materiálu se provádělo pomocí posuvného měřítka, viz obr. 16. Jedná je o velmi rychlou a levnou metodu. Toto měření bylo bráno jako orientační, protože jeho přesnost je 0,1 mm.

Bylo provedeno deset měření a průměrná hodnota všech naměřených hodnot vyšla 1,5 mm.



Obr. 16: Měření vzorku pomocí posuvného měřítka

4.3 Elcometer 456

První měření povlaku se provádělo pomocí tloušťkoměru Elcometer 456 s oddělenou sondou, viz obr. 17. Jeho velkou výhodou je rychlost, snadná obsluha a okamžité zobrazení výsledku.



Obr. 17: Tloušťkoměr Elcometer 456

Tloušťka naneseného povlaku je jednou z významných znaků jakosti povrchových úprav. V některých případech může být tloušťka povrchové vrstvy rozhodujícím měřítkem kvality. Hlavní funkcí povlaku je zvyšovat mechanickou, chemickou a korozní odolnost základního materiálu. Tím se docílí vyšší životnosti součástky. Podmínkou nanášení povrchové vrstvy je, aby tloušťka povlaku byla minimálně stejná nebo vyšší, než je předepsaná hodnota od výrobce dle technického listu. [33,45]

Elcometer se řadí mezi nedestruktivní tloušťkoměry, které měří suché vrstvy nátěrů. Tloušťka naneseného povlaku je vzdálenost mezi povrchem podkladu a povrchem povlaku. Používané metody ke zjištění DFT jsou vázané na typ podkladového materiálu, typ nanášeného povlaku a předpokládanou tloušťkou povlaku. [33]

Elcometer používá k vyhodnocení povrchu magneticko-indukční metodu. Podstatou metody je vyhodnocování intenzity vybuzeného elektromagnetického pole, které je funkcí tloušťky. Měřicí sonda obsahuje feromagnetické jádro a budící vinutí, které je napájené střídavým proudem o nízké frekvenci. Sonda vytváří ve své blízkosti nízkofrekvenční střídavé elektromagnetické pole. Jsou-li v blízkosti sondy feromagnetické materiály, pole sondy se zesiluje. Zesílené pole je možné změřit druhou

snímací cívkou. Ta odpovídá vzdálenosti feromagnetického podkladu od sondy. Pomocí magneticko-indukční metody je možné měřit nemagnetické vrstvy, v našem případě práškovou barvu, na magnetickém podkladu (ocel). [33,34]

Standardní přesnost Elcometeru je po jeho zkalibrování $\pm 1 \mu\text{m}$. Kalibrace byla provedena pomocí kalibrační fólie, kdy se provedlo několik prvotních měření na fólii o známé tloušťce. Tloušťkoměr byl zkalibrován nejprve na fólii 126,3 μm a následně na fólii 50,7 μm . [45]

Vzorek, který je rozdělen na 20 sekcí, byl změřen vždy třikrát v jedné sekci a poté byly tyto tři hodnoty zprůměrovány. V tab. 3 jsou již zaznamenané pouze tyto zprůměrované hodnoty.

Tab. 3: Naměřené hodnoty Elcometerem 456

	A [μm]	B [μm]	C [μm]	D [μm]
1	130	99	71	94
2	147	90	73	77
3	139	91	71	79
4	131	102	82	81
5	139	114	95	109

Naměřené hodnoty se pohybují od 71 μm do 147 μm . To je způsobeno nerovnoměrným ručním nástřikem práškové barvy na zkoumaný vzorek.

4.4 Ultrazvukový tloušťkoměr 38 DL PLUS

Druhé měření bylo prováděno pomocí ultrazvukového tloušťkoměru 38 DL PLUS. Jak už samotný název zařízení napovídá, jedná se o tloušťkoměr, který měří pomocí ultrazvukové metody, přesněji pomocí metody phased array. Jedná se o nekonvenční metodu, která se vyvinula z klasické konvenční ultrazvukové metody, protože se kladly čím dál větší požadavky na zkoušky, které klasická UT metoda nesplňovala. Například metodou phased array je možné detekovat náhodně orientované vady jednou sondou z jedné pozice, detekovat malé trhliny v geometrii složitých součástí a možnost určit přesněji velikosti vad. Tato metoda se vyznačuje používáním pouze jedné sondy, která je zároveň vysílačem i přijímačem. Díky tomu je možné zkoumat složité součásti, které nemají dvě plochy naproti sobě a trubky o malém průměru.

Ultrazvukový tloušťkoměr se vyznačuje schopností měřit samotnou tloušťku základního materiálu a tloušťku základního materiálu, na kterém je nanesen povlak. Ultrazvukový tloušťkoměr neumí měřit přímo tloušťku materiálu, tu si sám vypočítá podle níže napsaného vzorečku.

$$d = \frac{v \cdot t}{n}$$

d = měřená tloušťka

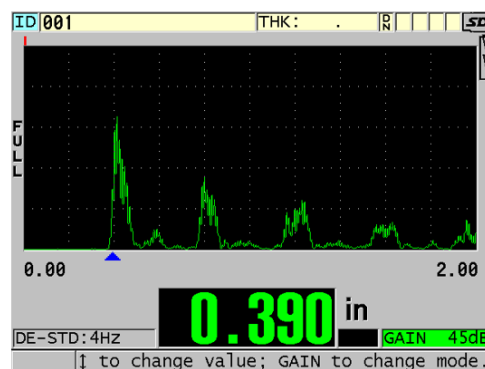
v = rychlost ultrazvuku, pro přístroj kalibrovaný pro ocel v = 5920 m·s⁻¹

t = změřený čas

n = počet průchodů impulsů zkoumaným vzorkem [46]

Princip metody spočívá ve vyslání ultrazvukového impulsu ze sondy, ve které je umístěna soustava měničů a každý měnič má svůj budicí generátor a zesilovač. Měření tloušťky ultrazvukem spočívá v měření průchodu impulsu skrz zkoumaný vzorek, jeho odraz od spodní hrany materiálu a cestu zpět do sondy, kde se signál zpracuje a vyhodnotí. To znamená, že impuls musí projít kontaktním povrchem mezi vzorkem a sondou nejméně dvakrát. Dobu mezi dvěma průchody si tloušťkoměr sám změří a dosadí do vzorečku výše. Je důležité, aby kontaktní plocha byla čistá a hladká. Nedostatečný kontakt by vedl ke ztrátě energie a deformaci signálu. [46]

Po průchodu signálu skrz materiál se na displeji objeví dva druhy zobrazení výstupních dat, viz obr. 18.



Obr. 18: Display ultrazvukového tloušťkoměru 38 DL PLUS [46]

Na horní části obrázku je vidět zobrazení A, kde je vykreslen vlnový průběh signálu. Každá amplituda vyznačuje místo, kdy se signál buď vytvořil, prošel rozhraním nebo

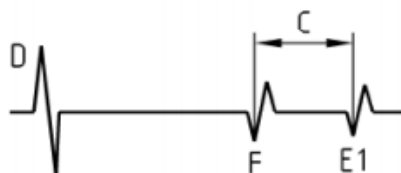
se odrazil od konce materiálu. Ve spodní části obrázku je zobrazení B, které ukazuje číselnou hodnotu tloušťky materiálu.

Jak už bylo řečeno, ultrazvukový tloušťkoměr je určen na měření tloušťky samotného materiálu, anebo tloušťky materiálu s povlakem. Samotný povlak měřit touto metodou nelze. Cílem bylo proměřit a určit tloušťku základního materiálu a tloušťku tohoto materiálu s povlakem práškové barvy. Dalším cílem bylo určit, jak je tento přístroj vhodný k měření tloušťky samotného povlaku a zda by nebylo možné dopočítat tloušťku povlaku odečtením tloušťky materiálu od tloušťky materiálu s povlakem.

Před samotným měřením bylo důležité zkalibrovat zařízení. Kalibrace je proces nastavení zařízení za účelem přesného měření konkrétního materiálu při použití známé sondy. Byly prováděny dvě kalibrace. První byla kalibrace rychlosti šíření zvuku v měřeném materiálu, kdy se na povrch schodovité měrky o největší tloušťce nanese vazební prostředek a přiloží se sonda. Tloušťka jednotlivých schodů měrky je známá a je vyrobena ze stejného materiálu, který se bude následně zkoumat. Po přiložení sondy se na přístroji dopravila hodnota, aby odpovídala tloušťce měrky. Poté byl kalibrován nulový bod, kdy se měřila nejmenší tloušťka měrky. Po kalibraci bylo zahájeno samotné měření. [46]

Aby bylo možné měřit tloušťku materiálu, musí povrch vykazovat dobré adhezivní spojení. Před každým měřením musel být nanesen vazební prostředek na měřenou část vzorku. Použitým vazebním prostředkem byl gel.

Nejprve bylo prováděno měření tloušťky materiálu s povlakem. Tato metoda se značí M2, viz obr. 19. Tloušťkoměru se předdefinovalo, aby měřil vzdálenost mezi echem rozhraní a koncovým echem.



Obr. 19: Technika M2 [46]

C = doba průchodu ultrazvuku

D = vysílací impuls

E1 = koncové echo

F = echo od rozhraní

Dalším měřením bylo měření tloušťky materiálu, značení M3, viz obr. 20. V tomto případě přístroj měřil vzdálenost mezi dvěma konci ech.



Obr. 20: Technika M3 [46]

C = doba průchodu ultrazvuku

D = vysílací impulz

E1, E2 = koncové echo

F = echo od rozhraní

Oba typy měření byly prováděny pomocí dvou sond. Sondou M202, která se vyznačuje frekvencí 20 MHz a sondou M208 mající 10 MHz. Měření tloušťky se provádělo vždy jedenkrát v každé vytvořené sekci, na které byl vzorek rozdělen. Naměřené hodnoty jsou zaznamenané v tab. 4 - 7 níže.

Tab. 4: Měření tloušťky základního materiálu s povlakem pomocí sondy 202

	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]
1	1,46	1,45	1,48	1,43
2	1,47	1,46	1,47	1,46
3	1,46	1,44	1,47	1,43
4	1,46	1,46	1,50	1,46
5	1,47	1,46	1,51	1,46

Tab. 5: Měření tloušťky základního materiálu pomocí sondy 202

	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]
1	1,39	1,4	1,45	1,39
2	1,39	1,4	1,44	1,42
3	1,39	1,39	1,44	1,39
4	1,39	1,4	1,45	1,41
5	1,39	1,4	1,46	1,40

Tab. 6: Měření tloušťky základního materiálu s povlakem pomocí sondy 208

	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]
1	1,44	1,43	1,46	1,43
2	1,46	1,44	1,45	1,41
3	1,45	1,44	1,46	1,41
4	1,46	1,44	1,47	1,41
5	1,46	1,45	1,46	1,43

Tab. 7: Měření tloušťky základního materiálu pomocí sondy 208

	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]
1	1,38	1,39	1,43	1,39
2	1,39	1,39	1,42	1,38
3	1,39	1,39	1,43	1,38
4	1,39	1,39	1,43	1,37
5	1,39	1,4	1,42	1,39

Naměřené hodnoty pomocí sondy 202 a sondy 208 se liší, a to je způsobeno rozdílnou frekvencí těchto sond. Tím, že sonda 202 má vyšší frekvenci, je měření přesnější. Je to způsobeno tím, že vysílaný signál přeskočí nanesený povlak.

Z výše uvedených tabulek se vypočítala tloušťka naneseného povlaku odečtením tloušťky samotného základního materiálu od tloušťky materiálu s povlakem. Vypočítané hodnoty jsou vyobrazeny v tab. 8 a v tab. 9.

Tab. 8: Vypočítaná tloušťka povlaku z hodnot od sondy 202

	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]
1	0,07	0,05	0,03	0,04
2	0,08	0,06	0,03	0,04
3	0,07	0,05	0,03	0,04
4	0,07	0,06	0,05	0,05
5	0,08	0,06	0,05	0,06

Tab. 9: Vypočítaná tloušťka povlaku z hodnot od sondy 208

	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]
1	0,06	0,04	0,03	0,04
2	0,07	0,05	0,03	0,03
3	0,06	0,05	0,03	0,03
4	0,07	0,05	0,04	0,04
5	0,07	0,05	0,04	0,04

Vypočítané hodnoty obou sond jsou přibližně stejné a pohybují v desítkách mikrometrů. Nevýhodou ultrazvukového tloušťkoměru je, že měří v jednotkách milimetru, a proto jsou hodnoty velmi podobné a málo přesné.

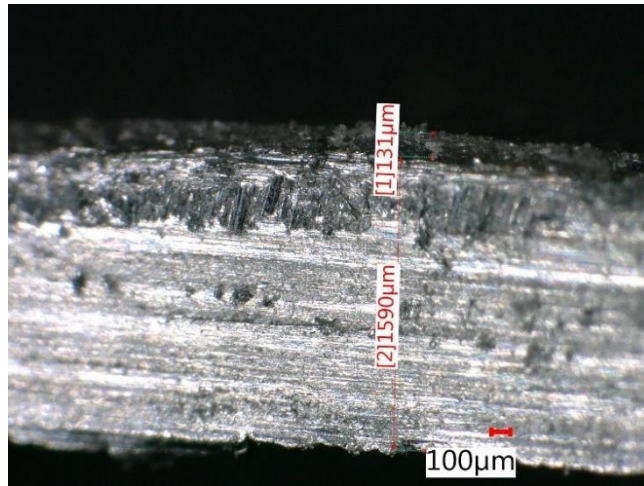
4.5 Digitální mikroskop VHX-6000

Poslední měření tloušťky základního materiálu a naneseného povlaku bylo prováděno pomocí digitálního mikroskopu VHX-6000. Jedná se o destruktivní metodu z důvodu rozřezání zkušební trubky na jednotlivé prstýnky, které se dále měřily.

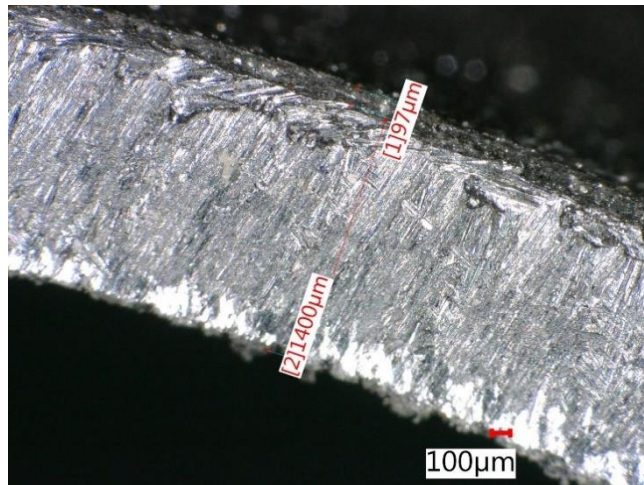
Rozdíl mezi digitálním mikroskopem a mikroskopem je takový, že digitální mikroskop nepoužívá okulár, ale digitální kameru. Digitální mikroskop využívá optický systém a digitální kameru k přenosu zachyceného obrazu do počítačového monitoru. Na monitoru se zobrazují výsledky v reálném čase. Tyto mikroskopy využívají softwarové funkce, díky kterým je možné zaznamenat a stříhat videa, upravovat snímky nebo provádět měření. [47]

Digitální mikroskop VHX-6000 se pyšní velkou hloubkou ostrosti a možností výběru druhu a sklonu osvětlení na zkoumaný vzorek. Další výhodou, která urychluje proces měření je automatická ostrost, díky které se vyobrazí obraz v nejlepší kvalitě. K mikroskopu není potřeba mít další zařízení, sám si vzorek změří, zpracuje hodnoty a uloží.

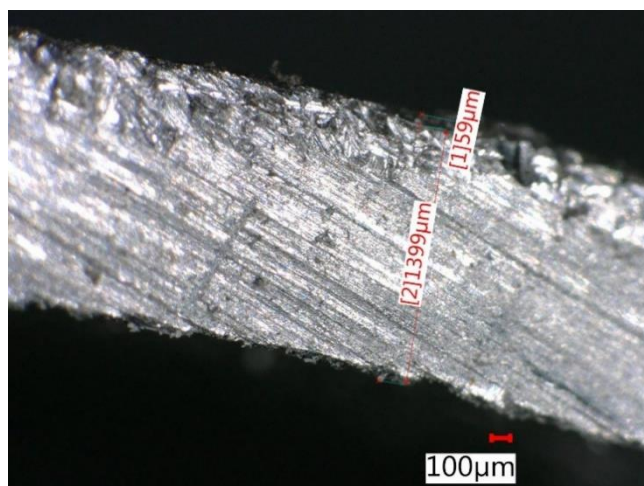
V této práci se mikroskop používal k změření tlouštěk základního materiálu a k měření zhotoveného práškového povlaku. Každá sekce trubky, celkově 20 sekcí, se změřila samostatně. Snímky obrázků jsou vyobrazeny níže. Hodnota u čísla [1] označuje tloušťku povlaku a hodnota u čísla [2] označuje tloušťku základního materiálu.



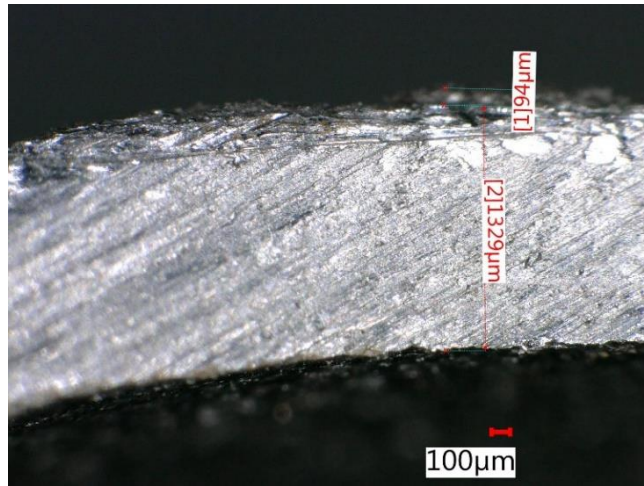
Obr. 21: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 1A



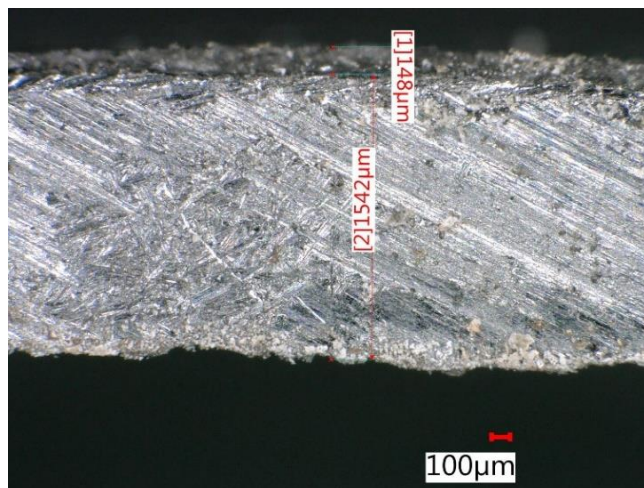
Obr. 22: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 1B



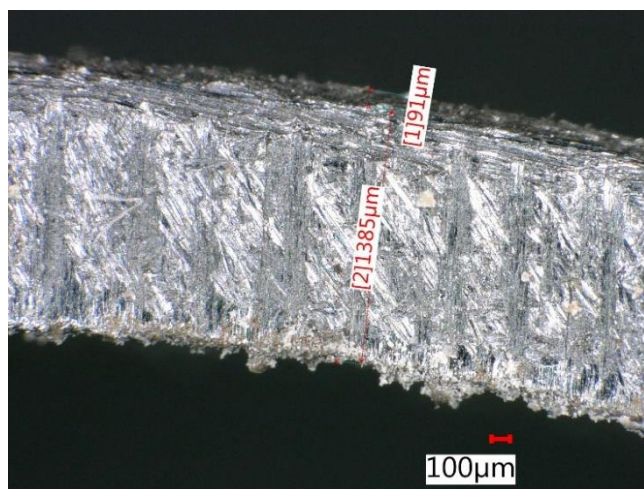
Obr. 23: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 1C



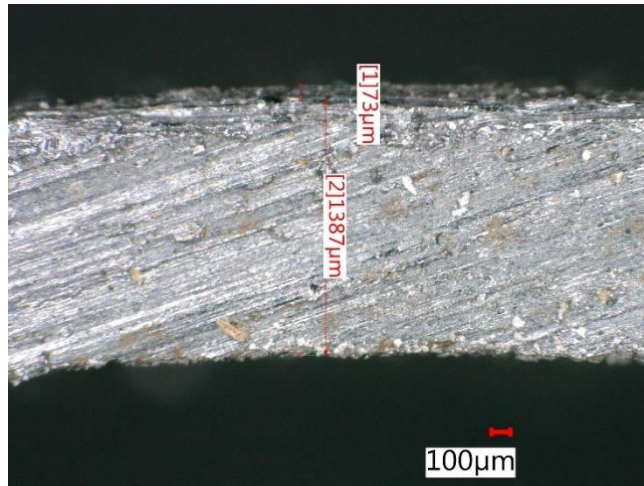
Obr. 24: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 1D



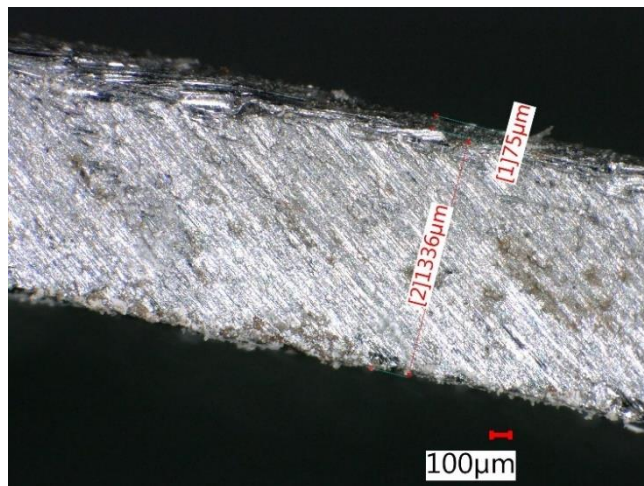
Obr. 25: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 2A



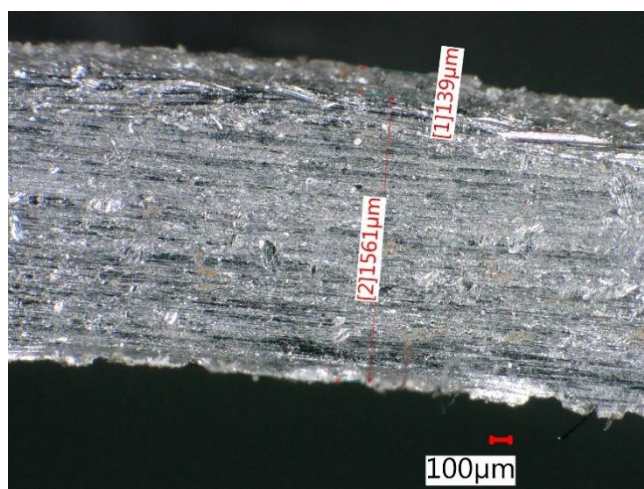
Obr. 26: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 2B



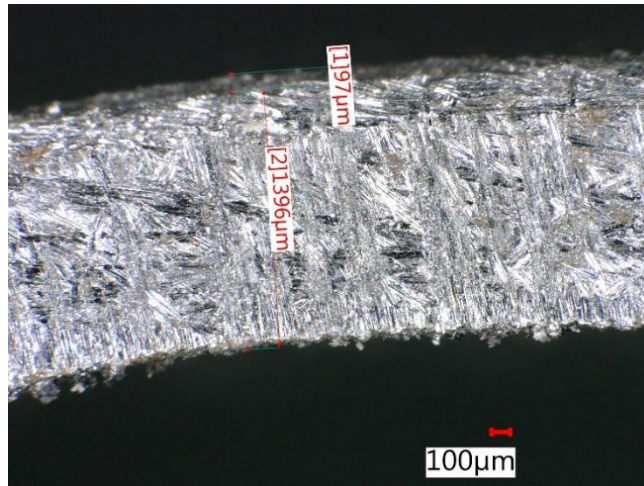
Obr. 27: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 2C



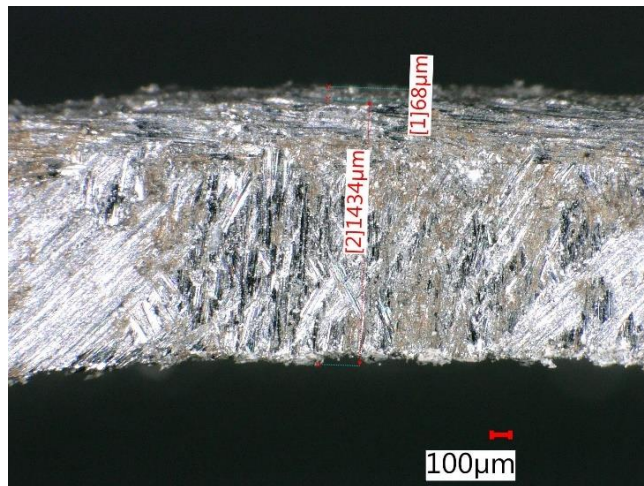
Obr. 28: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 2D



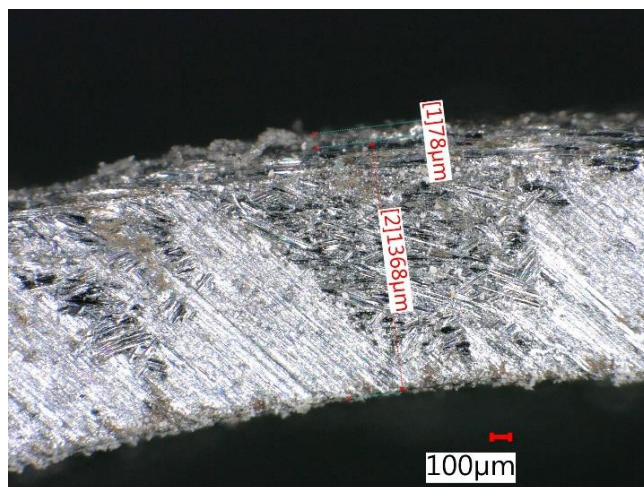
Obr. 29: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 3A



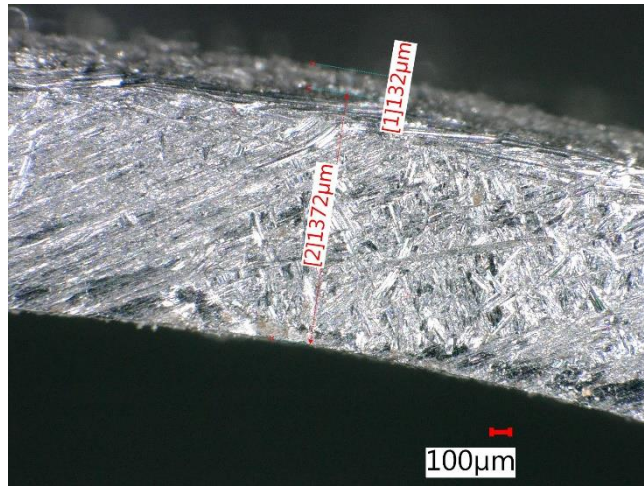
Obr. 30: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 3B



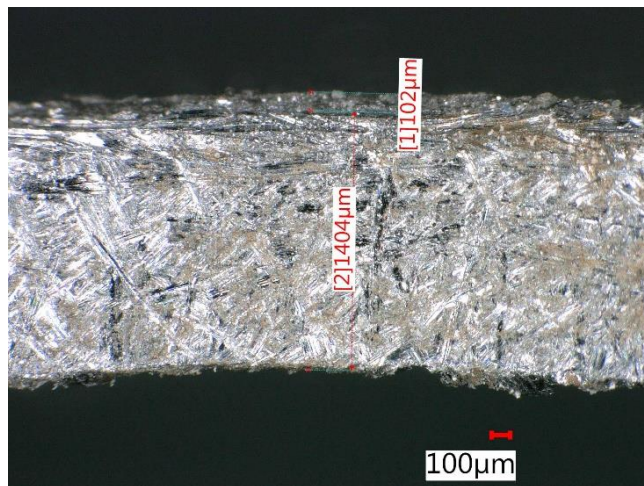
Obr. 31: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 3C



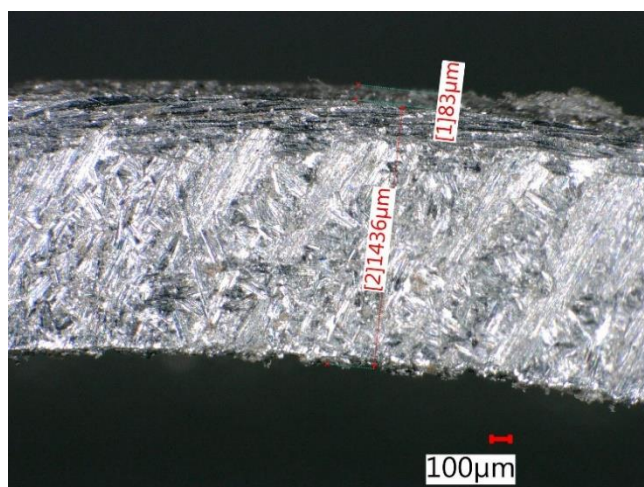
Obr. 32: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 3D



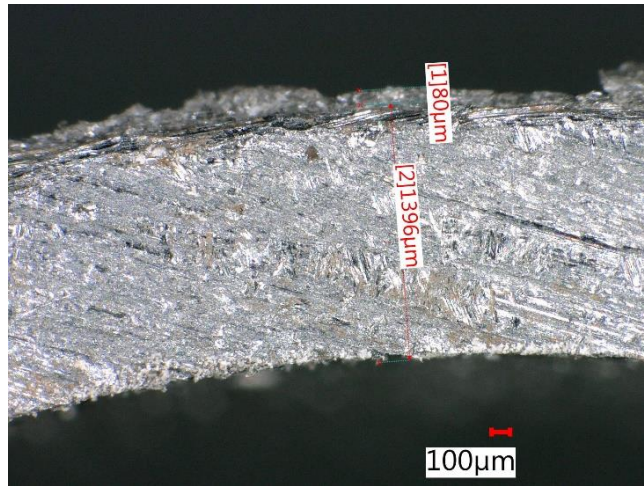
Obr. 33: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 4A



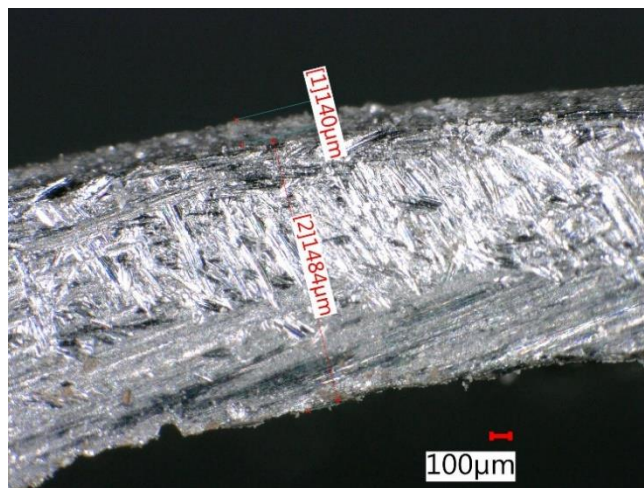
Obr. 34: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 4B



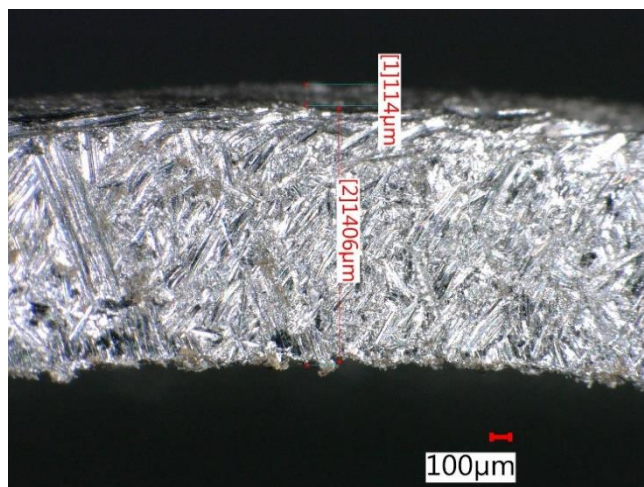
Obr. 35: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 4C



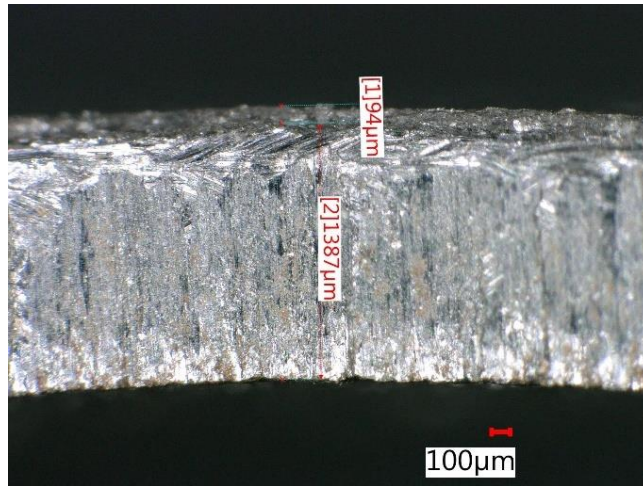
Obr. 36: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 4D



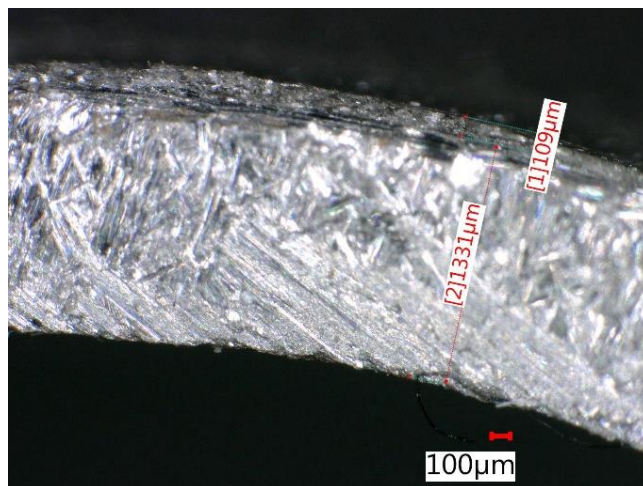
Obr. 37: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 5A



Obr. 38: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 5B



Obr. 3939: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 5C



Obr. 40: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 5D

Nevýhodou mikroskopické metody je, že na obrazovce se zobrazí pouze malá část zkoumané části vzorku, na které se musí vybrat minimálně dva body. Pokud je třeba změřit tloušťku povlaku, označí se vnější část trubky a rozhraní mezi základním materiálem a povlakem. Na měření tloušťky základního materiálu se označuje jeden bod na vnitřní straně trubky a druhý na rozhraní základního materiálu a povlaku. Vybrané body se spojí a okótují.

Vybrané body nemusí být vždy vhodně zvolené. Je možné okótovat buď výstupek nebo prohlubeň, poté ovšem naměřené hodnoty nejsou přesné. Tato problematika je dobře vidět na obr. č. 26.

5 Porovnání a zhodnocení naměřených výsledků

Tato kapitola je věnována naměřeným výsledkům, které vzešly z měření drsnosti základního materiálu, měření tloušťky základního materiálu a měření tloušťky povlaku z práškového plastu.

5.1 Drsnost

Jak už bylo zmíněno, drsnost se posuzovala vizuálně pomocí dvou komparátorů (vzorkovnice drsnosti povrchu tryskaných odlitků SVÚM a vzorkovnice drsnosti povrchů LD2050) a pomocí digitálního měřidla neboli drsnoměru Mitutoyo SJ-301. Komparátory dávají přibližné výsledky drsností povrchu. Hodí se v terénu a na pracovištích jako jsou: stavby, montáže a jiné, kde nezáleží na přesně stanovené hodnotě, ale na přibližné hodnotě otryskaného, respektive očištěného povrchu materiálu pro jeho rychlou kontrolu. Naopak digitální drsnoměr je lepší využít pro měření drsnosti materiálu, kdy záleží na přesně naměřených hodnotách, například při galvanickém pokovení (kde záleží na předúpravě), nebo při tribologických aplikacích (kde záleží na drsnosti zkoumaných funkčních dvojic).

5.2 Tloušťka základního materiálu

Tloušťka byla měřena vizuálně posuvným měřítkem, ultrazvukem a pro porovnání destruktivní mikroskopickou metodou. Při měření posuvným měřítkem jsou hodnoty zkresleny vlivem použitého abraziva (ocelové kuličky), protože posuvné měřítko měří reliéf povrchu, což jsou nejvyšší výstupky základního materiálu. Toto měřidlo je vhodné využít v terénu na stavbách, montážích a jiných obdobných pracovištích. Pro měření tloušťky ultrazvukovým tloušťkoměrem bylo využito dvou sond s předsádkou o různých frekvencích (sonda M202 s frekvencí 20 MHz a sonda M208 s frekvencí 10 MHz). Použitá sonda s označením M202 měla díky vyšší frekvenci vyšší rozlišovací schopnost měření, i když výsledky měření těchto sond jsou obdobného charakteru. I tuto metodu měření je ke stanovení tloušťky materiálu vhodné použít ve venkovním prostředí. Poslední použité měření bylo destruktivní měření pomocí mikroskopu, kde byl vzorek rozřezán a mikroskopicky měřen. Mikroskopická metoda dává přesné hodnoty tloušťky povrchu v daném měřeném místě a z mikroskopických obrázků uvedených v této práci je vidět reliéf otryskaného povrchu a aktuální hodnota tloušťky v měřeném místě. Metoda je vhodná pro použití v laboratorních podmínkách při potřebě přesného stanovení tloušťky materiálu.

5.3 Tloušťka povlaku práškového plastu

Měření pomocí ultrazvukového tloušťkoměru dává přibližné hodnoty povlaku, neboť touto metodou nelze změřit povlak přímo a je nutno jej dopočítat na základě znalosti tloušťky základního materiálu a celkové tloušťky. Metoda je vhodná pro použití v terénu. Při metodě nedestruktivního testování tloušťky povlaku se vyplatí využít speciálních měřících přístrojů – tloušťkoměrů. Tloušťkoměry pracují na mnoha fyzikálních principech (metoda vířivých proudů, magnetická metoda, magneticko-indukční metoda...), kdy každá z těchto metod je vhodná pro určitý typ zhotoveného povlaku a základního materiálu (kovový či nekovový povlak a kovový či nekovový základní materiál). Měření tloušťky pomocí těchto přístrojů je jednoduché, rychlé a udává přesné výsledky. Lze jej využít jak v terénu, tak v laboratorních podmínkách. Mikroskopická metoda měření tloušťky povlaku je také velmi přesná, ale udává hodnoty v lokálně měřených místech. Jak už bylo zmíněno, u měření tloušťky základního materiálu je vhodná pro přesné stanovení tloušťky povlaku v laboratorních podmínkách.

Závěr

Komparátory drsnosti jsou vhodné pro rychlé určení stupně čistoty otryskaného povrchu například pro organické povlaky a žárové nástřiky, kdy chceme vytvořit vhodný kotevní profil pro následnou povrchovou úpravu.

Digitalní drsnoměr – pro přesné stanovení drsnosti je vhodné využít drsnoměrů povrchu, které udávají přesnou hodnotu povrchu na zvolené měřené délce. Přesná hodnota drsnosti povrchu je důležitá pro aplikace povrchových úprav jako je galvanické pokovování, kdy tato technologie povrchové úpravy závisí právě na předúpravě a parametrech drsnosti povrchu, neboť jakoukoliv nedokonalost tato technologie zkopíruje (vryp, výstupek).

Posuvné měřítko – práce s měřidlem je jednoduchá a udává rychlé výsledky, které lze k porovnání tloušťek měřeného materiálu využít kdekoliv.

Ultrazvuk – přesnost měření závisí na znalostech proškolených pracovníků, kteří na základě svých zkušeností a doporučení výrobce zvolí vhodnou sondu k měření, popřípadě sondu s předsádkou k měření tloušťky zhotovenému povlaku. Ultrazvukové metody mohou využívat kontaktní měření tloušťky (500 – 500 000 μm) s odchylkou méně než 0,5 %, či bezkontaktní měření tloušťky (30 – 110 μm) s odchylkou ± 3 %.

Tloušťkoměr – využití těchto měřících přístrojů je velmi rozšířené a jejich použití je všestranné při vhodné volbě měřícího přístroje a jeho principu měření. Měření tloušťky může být destruktivním způsobem (coulometrická, mikroskopická, gravimetrická), nebo nedestruktivní (magnetická, magneticko-indukční, vířivými proudy, ultrazvuková, rentgenová).

Mikroskop – vzhledem k náročnosti na vybavení a ekonomickým aspektům, je mikroskopické destruktivní měření povlaku vhodné pro tenké povlaky a vrstvy například vakuové technologie, PVD, CVD.

V uvedených tabulkách níže jsou shrnuty a porovnány naměřené hodnoty. V tab. 10 je porovnání naměřené drsnosti. Tab. 11 vyobrazuje srovnání hodnot tloušťek základního materiálu a v tab. 12 jsou porovnány hodnoty tloušťky povlaku.

Nedestruktivní metody testování povlaků a povrchů jsou jednodušší a dávají okamžitý výsledek.

Tab. 10: Porovnání naměřených hodnot drsnosti

	Ra [μm]	Rz [μm]
Vzorkovnice drsnosti SVÚM	6,3	25
Vzorkovnice drsnosti LD2050	12,5	70
Digitální měřidlo Mitutoyo SJ-301	3,7	17,9

Z naměřených výsledků vyplývá, že vizuální zkouška pomocí vzorkovnice drsnosti povrchu je mnohem přesnější než metoda pomocí komparátoru LD2050. To je způsobeno menším počtem vzorových etalonů, a proto bylo těžší určit, jaký etalon je zkoumanému vzorku nejpodobnější. Samotné vyhodnocování drsnosti pomocí vzorkovnice drsnosti je přesné a vhodné na namátkové a rychlé kontrolování během výroby.

Tab. 11: Porovnání naměřených hodnot tloušťky materiálu

	1A	1B	1C	1D	2A	2B	2C	2D	3A	3B	3C	3D	4A	4B	4C	4D	5A	5B	5C	5D
Posuvné měřítko	1,5																			
Ultrazvuk sonda M202	1,39	1,40	1,45	1,39	1,39	1,40	1,44	1,42	1,39	1,39	1,44	1,39	1,39	1,40	1,45	1,41	1,39	1,40	1,46	1,40
Ultrazvuk sonda M208	1,38	1,39	1,43	1,39	1,39	1,39	1,42	1,38	1,39	1,39	1,43	1,38	1,39	1,39	1,43	1,37	1,39	1,40	1,42	1,39
Mikroskop	1,59	1,40	1,40	1,33	1,54	1,39	1,39	1,34	1,56	1,40	1,43	1,37	1,37	1,40	1,44	1,40	1,48	1,41	1,39	1,33

Jednotky: [mm]

Kvůli malému průměru zkušební trubky se naměřené hodnoty pomocí ultrazvuku vždy neshodují s naměřenými hodnotami pomocí mikroskopu. To mohlo být zapříčiněno tím, že dosedací plocha sond, nebyla vždy plně dosedlá na zkoumaném vzorku. Pokud by se stejnou metodou měřil rovný plech, výsledky by mohly být přesnější. Dle předpokladů měly hodnoty ze sondy M202 být přesnější než hodnoty ze sondy M208. Při srovnání naměřených hodnot obou sond a hodnot mikroskopu vyšlo, že sonda M208 má shodnější výsledky s mikroskopem než sonda M202. Výkyvy hodnot u mikroskopu jsou zaviněny lokálním měřením a možným nepřesným zakótováním rozměrů.

Tab. 12: Porovnání naměřených hodnot tloušťky povlaku

	1A	1B	1C	1D	2A	2B	2C	2D	3A	3B	3C	3D	4A	4B	4C	4D	5A	5B	5C	5D
Elcometer	130	99	71	94	147	90	73	77	139	91	71	79	131	102	82	81	139	114	95	109
Ultrazvuk sonda M202	70	50	30	40	80	60	30	40	70	50	30	40	70	60	50	50	80	60	50	60
Ultrazvuk sonda M208	60	40	30	40	70	50	30	30	60	50	30	30	70	50	40	40	70	50	40	40
Mikroskop	131	97	59	94	148	91	73	75	139	97	68	78	132	102	83	80	140	114	94	109

Jednotky [μm]

Z naměřených hodnot vyplývá, že ultrazvukovým tloušťkoměrem nelze měřit tloušťku povlaku. Měření se liší v řádu desítek. To je zapříčiněné i tím, že ultrazvukový tloušťkoměr měří v milimetrech, zato všechny ostatní přístroje měří v mikrometrech. Hodnoty naměřené sondou M202 jsou ve srovnání s naměřenými hodnotami pomocí mikroskopu i tloušťkoměru přesnější, než naměřené hodnoty pomocí sondy M208. To je dáno vyšší frekvencí, a tedy vyšší rozlišovací schopností měření. Hodnoty mikroskopu a tloušťkoměru jsou velmi podobné. Tím, že mikroskop je finančně náročný a lze používat jenom v laboratorních podmínkách, hodnotím tloušťkoměr jako nejlepší variantu na měření tloušťky povlaku z výše popsaných metod.

Bibliografie

1. KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
2. PROCHÁZKA, Karel. *Defektoskopie I* [online]. Opava: Střední škola průmyslová a umělecká Opava, 2011 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/KOM_III/VY_52_INOVACE_J-05-31.pdf
3. Nondestructive testing overview: Nondestructive testing overview: A Comprehensive Guide to NDT. *ZETEC* [online]. Washington [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.zetec.com/resources/nondestructive-testing-overview/#section1>
4. CHANDRA RAO, Dr. B Purna. *Non-Destructive Testing (NDT)* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <http://www.geocities.ws/raobpc/NDT.html>
5. PTÁČEK, L. a kol., *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, s.r.o. 2001. 505 s. ISBN 80-7204-193-2
6. DUBENSKÝ, Rudolf, Václav MINAŘÍK a Jan ČERMÁK. *Defektoskopie - nedestruktivní zkoušení*. Praha: České vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-01-00844-4
7. NDT zkoušení. *Zebezpečení kvality, NDT zkoušky, svařování* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.pavrquality.eu/sluzby/>
8. Vizualní kontrola. *Tlakinfo.com* [online]. Praha [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.tlakinfo.com/t.py?t=2&i=1359&h=133>
9. LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 3., přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2002. ISBN 978-80-7196-237-3.
10. Visual Testing (VT). *Advanced Technology Group* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.atg.cz/new/?page=161&display=VT>
11. KUDĚLKA, Vladimír, Pavla NEJTKOVÁ a Jan OPLETAL. Instrukce pro provádění vizuální i rozměrové kontroly svarových spojů dle požadavků čsn en

- iso 17637. *Jak na potrubí* [online]. 2019 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.technicka-zarizeni.cz/instrukce-pro-provadeni-vizualni-i-rozmerove-kontroly-svarovych-spoju-dle-pozadavku-csn-en-iso-17637/>
12. *INSIZE* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.insz.eu/>
13. MÍŠEK, Bohumil a Luděk PTÁČEK. *Zkoušení materiálu a výrobků bez porušení*. SNTL - Státní nakladatelství technické literatury. Praha, 1968.
14. PÍŠEK, František, Jiří ŠKAREK a Aleš VETIŠKA. *Nauka o materiálu II*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1959. Československá akademie věd.
15. MACHEK, Václav. *Zpracování a zkoušení kovových materiálů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04683-8.
16. PRAKASH, Ravi. *Non-Destructive Testing Techniques* [online]. New Academic Science Limited, 2012 [cit. 2021-01-24]. ISBN 978 1 906574 42 0. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/reader.action?docID=3382459>
17. DU, Weixiang, ZHAO, Yifan, ROY, Rajkumar, ADDEPALLI, Sri and TINSLEY, Lawrence. A review of miniaturised Non-Destructive Testing technologies for in-situ inspections. *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 16, p. 16–23. DOI 10.1016/j.promfg.2018.10.152.
18. Metody nedestruktivního zkoušení: Inspekce metodou MMM. *TECHMAGAZÍN* [online]. Praha: PREDITEST, 2011, [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: http://www.techmagazin.cz/ke_stazeni/ndt/ndt1.pdf
19. SVOBODA, Václav a Zdislav PLMR. *Metoda magnetické paměti materiálu* [online]. Ostrava, 2011, 255-260 [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: https://www.ndt.net/article/defektoskopie2011/papers/255_p.pdf
20. MCGONNAGLE, Warren. *Nondestructive testing* [online]. 6. New York: Gordon and Breach, 1979 [cit. 2021-01-26]. ISSN 0140-072X. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=RgfZSj2YmJ0C&oi=fnd&pg=PA1&ots=ClqtrFB9k1&sig=Gr93oIrUfh1reEjh2gD2cwRvs-E&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
21. BLITZ, Jack a Geoff SIMPSON. *Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing* [online]. Great Britain: Chapman a hall, 1996 [cit. 2021-01-26]. ISBN 0412604701. Dostupné z: https://books.google.cz/books/about/Ultrasonic_Methods_of_Non_destructive_Te.html?hl=cs&id=d3WWect9zQEC&redir_esc=y

22. OBRAZ, Jaroslav. *Zkoušení materiálu ultrazvukem: celostátní vysokoškolská příručka pro skupinu studijních oborů Strojnictví a ostatní kovodělná výroba*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1977.
23. DELOS, Peter, Bob BROUGHTON a Jon KRAFT. *Phased Array Antenna Patterns—Part 1: Linear Array Beam Characteristics and Array Factor* [online]. AnalogDialogue, 2020, 54(2) [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-54/number-2/phased-array-antenna-patterns-part-1-linear-array-beam-characteristics-and-array-factor.pdf>
24. *Introduction to phased array ultrasonic technology application* [online]. Waltham, USA: OLYMPUS, 2017 [cit. 2021-03-08]. ISBN 0-9735933-0-X. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/en/books/pa/pa-intro/>
25. KOVÁČIK, Miloš a Pavol KUČÍK. *Ultrazvuková technika TOFD pri určení hĺbkových rozmerov chýb: Princíp metodiky TOFD* [online]. Bratislava: Slovcert [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: https://slovcert.sk/attachments/1507743537UltrazvukovatechnikaTOFDpriurceniIhIbkovychrozmerovchyb_pdf
26. TOFD for Weld Root Corrosion and Erosion. *OLYMPUS* [online]. [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/cs/resources/slideshare/introduction-to-tofd-and-application-tips/>
27. LOUIS, Cartz. *Nondestructive Testing* [online]. Third. USA: ASM international, 1999 [cit. 2021-01-28]. ISBN 0-87170-517-6. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/reader.action?docID=3002405>
28. SCHMID, Maximilian, BHOGARAJU, Sri Krishna, LIU, E and ELGER, Gordon. Comparison of Nondestructive Testing Methods for Solder, Sinter, and Adhesive Interconnects in Power and Opto-Electronics. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, no. 23p. 8516. DOI 10.3390/app10238516
29. AJAYKUMAR, Chinthalapudi a Hassan HUSAN. *Investigation of Methods to Detect Defects in Thin Layered Materials* [online]. Sweden, 2005 [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:833185/FULLTEXT01.pdf>. Blekinge Institute of Technology. Vedoucí práce Claes Hedberg, Docent, Ph.D. Mech. Eng.

30. PULIN, R., A CLARKE a M. J. EATON. *Detection of Cracking in Gear Teeth Using Acoustic Emission* [online]. Wales: Cardiff School of Engineering, 2010, , 45-46 [cit. 2021-02-04]. ISSN 1662-7482. Dostupné z: doi:10.4028
31. 1. GHOLIZADEH, S.. A review of non-destructive testing methods of composite materials. *Procedia Structural Integrity* [online]. 2016. Vol. 1, p. 50–57. DOI 10.1016/j.prostr.2016.02.008. Dostupné z: <https://dx.doi.org/10.1016/j.prostr.2016.02.008>
32. Diagnostika metodou akustické emise. *Odborně-vzdělávací a zpracovadelský portál z oblasti strojírenství a navazujících oborů* [online]. 2002, (6.), 28 [cit. 2021-02-04]. rubrika Trendy-Měření, kód článku: 020640. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/diagnostika-metodou-akusticke-emise.html>
33. KREISLOVÁ, Kateřina. *Přehled metod měření tloušťky povlaků*. Praha: Český normalizační institut, 2008, 42 s. ISBN 978-80-7283-251-4.
34. KUCHAR, Jiří a Viktor KREIBICH. *Systémy kontroly PÚ a ekologické aspekty povrchových úprav – odpadní vody*. Fakulta strojní ČVUT v Praze: ústav strojírenské technologie, povrchové úpravy, prezentace ve formátu PDF [cit. 2021-6-28].
35. BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Jana NOVÁKOVÁ a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Technologie II - 1. díl*. Ostrava : VŠB - TU Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1641-8
36. MAZUREK, Pavel. Hodnocení lesku povrchové úpravy. *Odborně-vzdělávací a zpracovadelský portál z oblasti strojírenství a navazujících oborů* [online]. 2007, (4), 76 [cit. 2021-02-11]. 070444. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/hodnoceni-lesku-povrchove-upravy.html>
37. DRŽÍK, Milan, Andrej PLECENIK, Miroslav ZAHORAN, et al. *Moderná mikroskopia a digitálne spracovanie obrazu* [online]. Bratislava: Universita Komenského v Bratislavě, 2008 [cit. 2021-6-17]. ISBN 978-80-89186-37-2. Dostupné z: https://www.mikroskopia.sk/materials/skripta_mikroskopia.pdf
38. MIKŠ, Antonín. Mikroskopické metody: Zobrazovací metody v optické mikroskopii. *Intraco micro* [online]. Praha: Katedra fyziky, FSv ČVUT, Praha [cit. 2021-6-17]. Dostupné z: <https://www.mikroskop-mikroskopy.cz/mikroskopicke-metody/>

39. NOTHNAGLE, Paul, William CHAMBERS a Michael DAVIDSON. Introduction to Stereomicroscopy. *Nikon MICROSCOPYU* [online]. [cit. 2021-6-17]. Dostupné z: <https://www.microscopyu.com/techniques/stereomicroscopy/introduction-to-stereomicroscopy>
40. *Světelná a elektronová mikroskopie* [online]. Olomouc, 2018 [cit. 2021-6-17]. Dostupné z: https://www.prf.upol.cz/fileadmin/userdata/PrF/katedry/kbb/Dokumenty/Materialy_k_vyuuce/MIK/Text_k_prednaskam_MIK_2018.doc. Text k přednáškám. UNIVERZITA PALACKÉHO PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA, Katedra buněčné biologie a genetiky. Vedoucí práce Pavla Válová.
41. *Vzorkovnice drsnosti povrchu tryskaných odlitků*. Praha 1, Opletalova 25: SVÚM.
42. ISO komparátor - etalon drsnosti. *Pro inext instruments* [online]. [cit. 2021-6-30]. Dostupné z: <https://www.proinex.cz/cs/76-iso-komparator-etalon-drsnosti.html>
43. *Měření drsnosti a nový drsnoměr: Technický týdeník* [online]. Praha, Na Celné 5: UZIMEX, 2003 [cit. 2021-6-30]. Dostupné z: https://www.uzimex.cz/soubory/20030705_tt_2003-26.pdf
44. *Drsnoměry měření jakosti povrchu* [online]. Teplice: Mitutoyo [cit. 2021-6-30]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/14488146-Drsnomery-mereni-jakosti-povrchu.html>
45. BRÁBNÍKOVÁ, Radana. Kalibrace tloušťkoměrů Elcometer 456 v aplikační praxi. *Gamin* [online]. Ostrava: Gamin [cit. 2021-7-1]. Dostupné z: <https://www.gamin.cz/profil-spolecnosti/publikace/kalibrace-tloustkomeru-elcometer456/>
46. ČSN EN 14127. *Nedestruktivní zkoušení - Měření tloušťky ultrazvukem*. Praha: CEN, 2011.
47. *Co je digitální mikroskop?* [online]. OLYMPUS, Robert Bellinger, 2019 [cit. 2021-7-20]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/cs/insight/what-is-a-digital-microscope/>

Seznam tabulek

Tab. 1: Metody používané v defektoskopii [5].....	12
Tab. 2: Naměřené hodnoty drsnosti povrchu pomocí drsnoměru.....	37
Tab. 3: Naměřené hodnoty Elcometerem 456	39
Tab. 4: Měření tloušťky základního materiálu s povlakem pomocí sondy 202.....	42
Tab. 5: Měření tloušťky základního materiálu pomocí sondy 202.....	42
Tab. 6: Měření tloušťky základního materiálu s povlakem pomocí sondy 208.....	43
Tab. 7: Měření tloušťky základního materiálu pomocí sondy 208.....	43
Tab. 8: Vypočítaná tloušťka povlaku z hodnot od sondy 202	43
Tab. 9: Vypočítaná tloušťka povlaku z hodnot od sondy 208	44
Tab. 10: Porovnání naměřených hodnot drsnosti	55
Tab. 11: Porovnání naměřených hodnot tloušťky materiálu	56
Tab. 12: Porovnání naměřených hodnot tloušťky povlaku.....	58

Seznam obrázků

Obrázek 1: Základní třídění vad	11
Obr. 2: Posuvné měřidlo [12]	14
Obr. 3: Číselníkový úchylkoměr [12]	14
Obr. 4: Postup kapilární zkoušky [15]	16
Obr. 5: Využití rozptylového magnetického pole k indikaci vad [15]	17
Obr. 6: Vliv vzdálenosti vady od povrchu [14]	18
Obr. 7: Princip metody ET [1]	20
Obr. 8: Uspořádání sond při přechodové metodě [1].....	22
Obr. 9: Odrazová metoda - princip zaznamenávání echa [1]	22
Obr. 10: Detekce vady pomocí metody Phased array [24]	23
Obr. 11: Schéma prozařovací metody [27]	26
Obr. 12: Optický mikroskop [38]	32
Obr. 13: Tryskací zařízení s metací jednotkou	34
Obr. 14: Zkoumaný vzorek.....	35
Obr. 15: Porovnání drsnosti měřeného zkušební povrchu vzorku s etalonu – vlevo povrch etalonu č. 2 dle ISO R468, uprostřed otryskaný povrch zkušební vzorku a vpravo povrch etalonu č. 3 dle ISO 8503	36
Obr. 16: Měření vzorku pomocí posuvného měřítka.....	37
Obr. 17: Tloušťkoměr Elcometer 456.....	38
Obr. 18: Display ultrazvukového tloušťkoměru 38 DL PLUS [46]	40
Obr. 19: Technika M2 [46]	41
Obr. 20: Technika M3 [46]	42
Obr. 21: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 1A	45
Obr. 22: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 1B.....	45
Obr. 23: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 1C.....	45
Obr. 24: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 1D	46
Obr. 25: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 2A	46
Obr. 26: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 2B.....	46
Obr. 27: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 2C.....	47
Obr. 28: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 2D	47
Obr. 29: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 3A	47
Obr. 30: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 3B.....	48
Obr. 31: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 3C.....	48
Obr. 32: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 3D	48
Obr. 33: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 4A	49
Obr. 34: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 4B.....	49
Obr. 35: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 4C.....	49
Obr. 36: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 4D	50
Obr. 37: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 5A	50
Obr. 38: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 5B.....	50
Obr. 39: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 5C.....	51
Obr. 40: Naměřené hodnoty pomocí mikroskopu v sekci 5D	51