



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Destruktivní a nedestruktivní metody měření
tloušťky povlaků a vrstev v rámci technologií
povrchových úprav

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Ondřej Tyle

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

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

STUDIJNÍ OBOR: 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika
strojírenství

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tyle** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **501275**
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:

Destruktivní a nedestruktivní metody měření tloušťky povlaků a vrstev v rámci technologií povrchových úprav

Název bakalářské práce anglicky:

Destructive and non-destructive methods of measuring the thickness of coatings and layers within surface treatment technologies

Pokyny pro vypracování:

1. Vybrané typy povrchových úprav – anodická oxidace, galvanické pokovování, práškový plast, smalt, duplexní povlaky
2. Rozbor metod měření povlaků a vrstev – destruktivní a nedestruktivní metody
3. Porovnání přístrojové techniky na vybraných vzorcích povrchových úprav
4. Diskuze výsledků

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: **26.04.2023** Termín odevzdání bakalářské práce: **11.08.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2023**

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

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen 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 studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jiřího Kuchaře, Ph.D., IWE a Ing. Milana Petříka, 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 chtěl poděkovat oběma vedoucím bakalářské práce, Ing. Jiřímu Kuchařovi, Ph.D., IWE a Ing. Milanu Petříkovi, za pomoc a rady při praktické i teoretické části práce. Dále bych rád poděkoval svým blízkým za psychickou podporu v průběhu studia.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá destruktivními a nedestruktivními technologiemi pro měření tloušťky povlaků. Jsou zde shrnuty vybrané povrchové úpravy a technologie pro měření jejich tloušťky. Teoretická část je zaměřena na principy technologií a jejich použitelnosti.

Experimentální část se zaměřuje na vytvoření vzorků a jejich následné měření vybranými destruktivními a nedestruktivními technologiemi. V závěru práce jsou výsledky porovnávány a ke každému vzorku jsou vyvozeny vhodné technologie pro měření tloušťky.

Název bakalářské práce: Destruktivní a nedestruktivní metody měření tloušťky povlaků a vrstev v rámci technologií povrchových úprav

Autor práce: Ondřej Tyle

Vedoucí práce: Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE

Konzultant: Ing. Milan Petřík

Akademický rok: 2022/2023

Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav: 12133 – Ústav strojírenské technologie

Vedoucí ústavu: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Rozsah práce: 70 stránek, 15 tabulek, 51 obrázků

Klíčová slova: povrchové úpravy, tloušťka, povlak, měření tloušťky povlaku

Annotation

This bachelor thesis deals with destructive and non-destructive technologies for coating thickness measurement. Selected coatings and technologies for thickness measurement are summarised. The theoretical part focuses on the principles of the technologies and their applicability.

The experimental part focuses on the creation of samples and their subsequent measurement by selected destructive and non-destructive technologies. At the end of the work, the results are compared and appropriate thickness measurement technologies are derived for each sample.

Title of the final thesis: Destructive and non-destructive methods of measuring the thickness of coatings and layers within surface treatment technologies

Author: Ondřej Tyle

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

Consultant: Ing. Milan Petřík

Academic year: 2022/2023

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: 70 pages, 15 tables, 51 pictures

Keywords: surface treatment, thickness, coating, coating thickness measurement

Obsah

Obsah.....	7
ÚVOD A CÍL PRÁCE.....	11
1 Vybrané typy povrchových úprav	12
1.1 Anodická oxidace	12
1.2 Smalty	13
1.3 Galvanické pokovování	14
1.4 Práškové plasty	15
1.5 Duplexní povlaky.....	16
2 Destruktivní metody měření tloušťky povlaku.....	17
2.1 Profilometrická metoda	17
2.1.1 Princip měření	18
2.2 Mikroskopická metoda	18
2.2.1 Princip měření	19
2.3 Coulometrická metoda	20
2.3.1 Princip měření	20
3 Defektoskopie	22
Hlavní důvody použití NDT	22
3.1 Ultrazvuková kontrola.....	23
3.1.1 Princip měření	23
3.1.2 Zařízení užívané pro UT	24
3.2 Měření magneticko-indukční metodou a metodou vířivými proudy	25
3.2.1 Magneticko-indukční metoda	25
3.2.2 Metoda vířivými proudy	26
3.2.3 Vlastnosti elektromagnetických metod měření	28
3.2.4 Měření nerovných povrchů	28

3.2.5	Měření drsných povrchů	29
3.2.6	Vliv operátora na měření.....	30
3.3	Fázová vířivoproudá metoda	30
3.4	Měření bezkontaktní tepelnou optikou.....	31
3.4.1	Princip měření	32
3.5	Rentgenospektrometrická metoda.....	34
3.5.1	Princip měření	34
3.6	Magnetická metoda.....	37
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	39
4.1	Podstata experimentu	39
4.2	Měřené vzorky	39
4.3	Nedestruktivní měření.....	43
4.3.1	Metoda vířivých proudů	43
4.3.1.1	Naměřené hodnoty Metodou vířivých proudů [μm]	44
4.3.2	Magneticko-indukční metoda	45
4.3.2.1	Naměřené hodnoty Magneticko-indukční metodou [μm]	46
4.3.3	Kombinace vířivoproudé a magnetické metody	47
4.3.3.1	Naměřené hodnoty kombinací VPMT [μm]	48
4.3.4	Ultrazvuková metoda	49
4.3.4.1	Naměřené hodnoty Ultrazvukovou metodou [μm].....	50
4.4	Destruktivní metody měření na mikroskopech	51
4.4.1	Mikroskop SZ61	51
4.4.1.1	Naměřené hodnoty mikroskopem SZ61	52
4.4.1.2	Snímky z mikroskopu.....	52
4.4.2	Mikroskop VHX – 6000	55
4.4.2.1	Naměřené hodnoty mikroskopem VHX - 6000	56

4.4.2.2	Snímky z mikroskopu.....	56
5	ZÁVĚR	59
5.1	Smaltovaný vzorek.....	59
5.2	Galvanicky pozinkovaná ocel	60
5.3	Žárově pozinkovaná ocel	60
5.4	Bílý práškový plast na oceli s chemickou předúpravou povrchu.....	61
5.5	Anodická oxidace na slitině hliníku.....	61
5.6	Žlutý práškový plast na slitině hliníku	62
5.7	Duplexní povlak na oceli	62
5.8	Navařená vrstva na vzorku Inconel 625.....	63
6	Bibliografie	64
7	Seznam tabulek.....	68
8	Seznam obrázků	69

Seznam zkratek a použité symboliky

A	Ampér
V	Volt
NDT	Non-destructive testing
UT	Ultrasonic testing
Hz	Hertz
ATO	Advanced Thermal Optics
DT	Destructive testing
VPMT	Kombinace vířivoproudé a magnetické technologie
Fe	Feromagnetické
NFe	Neferomagnetické
FM	Feromagnetická sonda
FNF	Kombinovaná feromagnetická a neferomagnetická sonda

ÚVOD A CÍL PRÁCE

Cílem bakalářské práce bylo provedení rešerše ohledně destruktivních metod (DT) a nedestruktivních metod (NDT) měření tloušťky povlaků a vytvořených vrstev. Následně byly použity vzorky různých tloušťek povlaků, na vybraných typech materiálů a bylo provedeno měření v praktické části práce, za pomoci vybraných metod pro měření tloušťek. Výsledkem práce bude porovnání NDT metod s DT metodami a jejich následné zhodnocení dle vhodnosti pro použité vzorky, s ohledem na typ podkladového i povlakového materiálu.

1 Vybrané typy povrchových úprav

První kapitola se zabývá teoretickým rozbohem povrchových úprav, které jsou dále použity na měřených vzorcích v experimentální části práce. Kapitola obsahuje rešerši následujících témat: anodická oxidace, galvanické pokovování, práškové plasty, smalty a duplexní povlaky.

1.1 Anodická oxidace

Využití této povrchové úpravy je z hlediska protikorozní ochrany a dosažení určitého vizuálu synteticky oxidovaného povrchu. Oxidace může být vytvořena na různých materiálech, zde půjde konkrétně o eloxování hliníkových slitin. Synteticky vytvořený oxid hlinitý je velmi důležitou ochrannou proti korozi u součástí z hliníkových slitin. Pro anodickou oxidaci se využívají vodné roztoky kyselin, které mohou být sírové, chromové či šťavelové. V kyselině se předmět pro eloxování zapojuje jako anoda a naproti je zapojena katoda z hliníku nebo olova. Před chemickou úpravou se postup skládá z několikabodové mechanické a chemické předúpravy povrchu. Konečný vzhled povrchu lze ovlivňovat typem leštění, kdy jde získat matný i lesklý povrch. Zároveň je zde i možnost barevně napouštět eloxovanou vrstvu a získat povrch požadovaných odstínů. [1]

Postup eloxování:

- prvním krokem je mechanická úprava, která se provádí broušením, leštěním, kartáčováním či otryskáváním,
- po mechanické úpravě následuje odmaštění, může se provádět perchloretylenem nebo v alkalických lázních,
- po odmaštění je nutný oplach v demineralizované vodě,
- následuje alkalické moření pro celkové odstranění oxidu, aby se vytvořila rovnoměrná anodická vrstva, moření probíhá při 50 – 80°C v 3 – 5 % roztoku hydroxidu sodného,
- opět oplach demineralizovanou vodou,
- po moření se díl nechá zesvětlit ponorem v roztoku kyseliny dusičné, namíchané 1:1 s vodou při pokojové teplotě,
- oplach demineralizovanou vodou,

- následuje leštění, může být chemické nebo elektrolytické,
- oplach demineralizovanou vodou,
- eloxování se provádí v 25 % kyselině sírové při teplotě 20°C, pod proudem $1,5 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ se stejnosměrným napětí 16 V,
- poslední oplach demineralizovanou vodou,
- posledním krokem je vypírání proudící vodou pro odstranění zbytku elektrolytu. [1]

1.2 Smalty

Smalt je ochranná anorganická vrstva, natavená na základní materiál, který chrání před velmi agresivními vlivy prostředí. Pokud se dodrží dostatečná přídržnost a celistvost povlaku na oceli, tak je smaltovaná ocel ideální kombinací mechanických, chemických, optických a termických vlastností obou materiálů. Smalty se dělí na základní, krycí a jednovrstvé. Základní smalt je nejspodnější vrstvou, která je natavena přímo na kov a tvoří pevné spojení obou složek. Krycí smalt se nanáší na vytvrzený základní a má již požadované vlastnosti vůči vnějším vlivům, chemické, fyzikální, mechanické, ale i co se týká barevnosti nebo průhlednosti. Jednovrstvé smalty jsou kombinací základních a krycích smaltů, jsou cenově výhodné a využívají se hlavně u konstrukčně složitých konstrukcí. Jednovrstvé smalty jsou však náchylnější na pnutí a porušení celistvosti. Smalty se mohou dělit podle použití základního materiálu, a to na ocel, litinu, hliník a speciální smalty. [1]

Základní složkou je při výrobě smaltů sklovitá frit, která se taví z velmi důkladně spojených surovin v pecích za teplot 1100°C – 1400°C. Po vytavení se sklovina rychle ochlazuje, rozpraská a nechá se vysušit. Následně se frity ve smaltovnách namelou s vodou a přísadami na břečku. Přísady se volí podle požadovaných vlastností a patří mezi ně jíly, křemen, elektrolyty, barvítka a kaliva. Technologický postup smaltování se skládá z předúpravy kovu, která je chemická, mechanická nebo tepelně-mechanická. Následně se připraví frit a smalt, který se nanese na kov suchým nebo mokřím procesem a tepelně se zpracuje sušením nebo vypalováním. Suchý způsob je tzv. pudrování a jde o sypání prášku na rozžhavený kov se základním povlakem. Mokřím způsob spočívá ve stříkání, máčení nebo polévání kovu. [1]

1.3 Galvanické pokovování

Tato úprava se týká převážně kovových základních materiálů, na které se vylučují kovové povlaky za účelem vylepšení vzhledových, korozních a funkčních vlastností povrchu dílu. Lze však v podstatě pokovit všechny konstrukčně používané materiály, včetně některých druhů plastů za dekorativními účely, nebo například u plošných spojů na laminátech se pokovují vrtané otvory pro pájené spoje. Rozšířeným využitím je zinkování, dekorativní a ochranné povlaky typu nikl-chrom či měď-nikl-chrom a nebo také různé speciální procesy, jako je například příprava zlatých a stříbrných kontaktů, nebo pozlacování šperků. [1]

Při galvanickém pokovování dochází k elektrolyze vodných roztoků kovových solí za působení stejnosměrného elektrického napětí skrze dvě elektrody. Elektrody jsou záporná katoda a kladná anoda. Záporně zapojená katoda je součástí, která má být pokovená a dochází na ní k redukci kationtů, které se zachytí na kovovém povrchu. Kladně zapojená anoda se při procesu rozpouští, čímž doplní ubývající kov z roztoku a atomy na ní oxidují na kationty. Při galvanickém pokovování je velmi důležitá předúprava povrchu, aby se dosáhlo dokonalému styku fází. [1]

Postup pokovování:

- odmaštění organickými rozpouštědly pro velmi mastné součásti,
- odmaštění alkalickými přípravky,
- moření, které je vhodné u zrezivělých součástí nebo pro odstranění okují,
- elektrolytické odmaštění,
- dekapování se používá jako mezioperační krok u niklování a chromování, nebo po odmaštění pro odstranění pasivních vrstev,
- pokovení,
- pasivace například po cínování, stříbření, mosazení apod.,
- redukční oplach po chromování,
- sušení. [1]

Mezi operacemi se zahrnují jedno nebo podle potřeby vícestupňové oplachy. [1]

Povlaky se dají dělit do několika skupin. Ochranné povlaky slouží hlavně jako korozivzdorná ochrana a dělí se na anodické, kde je povlak méně ušlechtilý než základní materiál a katodické, kde je povlak více ušlechtilý než základní materiál. Dekorativní povlaky dávají jak korozivzdornou ochranu, tak i požadovaný vzhled. Speciální povlaky vytvářejí funkční vlastnosti povrchu dané součásti, jako například otěruvzdornost. Typy povlaků jsou například niklové, měděné, chromové, zinkové, mosazné nebo cínové. [1]

1.4 Práškové plasty

Jde o levnou, ekologickou, kvalitní, technologicky a energeticky nenáročnou povlakovou technologii. Práškové plasty mají jako povlaky širokou škálu vlastností, výhodných při jejich využití. Mezi jejich vlastnosti patří korozivzdornost, otěruvzdornost, odolnost vůči vysokým teplotám, stálost barev, antibakteriálnost, nesmáčivost povrchu, elektrický odpor nebo vodivost, kvalita povrchu a neměnnost vlastností bez ohledu na podmínky. [2]

Práškové plasty se nanášejí především stříkáním, kdy jsou částice prášku nabitě a přichytávají se na uzemněnou součást. Používají se dva druhy nabíjení. Prvním je elektrostatické, kde prášek prochází v trysce ionizovaným vzduchem, čímž se na prášek přichytávají volné ionty a prášek dostává záporný náboj. Druhým způsobem je tribostatické nabíjení, kde se částičky prášku vysokou rychlostí otírají o izolant uvnitř stříkací pistole a tím se nabíjejí. Pro stříkání se využívá čistý a suchý vzduch. Po nanesení práškové barvy na součást je nutno nechat barvu vytvrdit v peci, kde se určí čas a teplota vzhledem k tloušťce, materiálu a tvaru povlakované součásti. [2]

1.5 Duplexní povlaky

Skládají se z více vrstev různých povlaků a kombinují anorganické vrstvy s organickými vrstvami. Jsou velmi účinnou a oblíbenou protikorozní ochranou pro ochranu ocelových konstrukcí. Základem povlaků jsou zinkové, hliníkové a zinkovo-hliníkové povlaky nanášené žárovým nástřikem nebo ponorem. Na nich jsou poté nanášeny organické nátěrové hmoty. Při návrhu povrchové úpravy je nutná její budoucí funkce, korozní prostředí, mechanické namáhání a požadovaná životnost. [3]

Při nanášení duplexního povlaku je důležitá předúprava povrchu, kdy by měl být povrch čistý s vysokou drsností. Na připravený povrch se poté nanese žárovým nástřikem povlak (anorganický povlak zinku, hliníku nebo jejich slitiny). Tloušťka a materiál nástřiku závisí na použití, tloušťky se pohybují u 100 μm pro zinek a u 200 μm pro hliník. Na anorganickou vrstvu se pak již nanášejí vrstvy organické. První nulová vrstva slouží jako penetrační těsnění na póry nástřiku. Další bariérová vrstva bývá epoxydového typu a poslední je krycí vrstva, která má za úkol ochranu proti UV záření a zároveň má estetický vzhled. Celková tloušťka nátěru se pohybuje okolo 260 – 500 μm . [3]

2 Destruktivní metody měření tloušťky povlaku

Tato teoretická kapitola se zabývá některými destruktivními metodami měření tloušťky. Těmi jsou metoda profilometrická, metoda mikroskopická a metoda coulometrická.

2.1 Profilometrická metoda

Měření se provádí k zjišťování tlouštěk kovových povlaků, ideálně v rozsahu tlouštěk 0,01 μm – 1000 μm . Lze ji využít na rovinném povrchu, nebo při speciálních případech také na válcovém profilu. U rozměrů tloušťky na spodní hranici rozsahu se nedoporučuje metodu využívat, kvůli vlivu odchylky od dokonale hladkého povrchu. Využití metody je vhodné u měření tlouštěk povlaků při přípravě etalonů. [4]

Používají se dva typy přístrojů, elektronické dotykové přístroje, neboli analyzátoři drsnosti, které jsou více univerzální díky využití pro měření tloušťky a elektronické indukční komparátory, mající jednodušší konstrukci. [4]

a) Elektronické dotykové přístroje

Skládá se ze snímače s jehlou, který má tvar kužele nebo jehlanu s úhlem vrcholu 90°. Poloměry hrotu jsou 2 μm , 5 μm , 10 μm nebo 50 μm , kde má každý rozměr danou přitlačnou sílu. Snímač je unášen pohybovou jednotkou. Pomocí zesilovací jednotky se získávají vertikální zvětšení profilu a zapisovač pomocí pohybové jednotky zaznamenává zvětšený profil, za použití horizontálního zvětšení. Umožňuje měření na délkách úseků 1 – 100 mm, u tlouštěk 0,005 μm – 250 μm a má rozlišovací schopnost 0,0005 – 1 μm . [4]

b) Elektronické indukční komparátory

Konstrukce se podobá elektronickým dotykovým přístrojům, s rozdílem ve velikosti poloměru hrotu, který nekopíruje mikroprofil povrchu. Umožňuje měření na délce úseku 100 mm, v rozsahu tlouštěk 1 μm – 1000 μm , s rozlišovací schopností 0,02 μm – 20 μm . [4]

2.1.1 Princip měření

Z povlakovaného vzorku se odstraní část povlaku, bez jakéhokoliv zásahu do podkladu, tím se vytvoří stupeň pro měření. Vrchní plocha stupně musí být nepoškozená a ze spodní plochy se musí kompletně odstranit všechny povlak. Používají se tři vhodné metody pro vytvoření stupně. První metoda spočívá v zamaskování plochy mimo místa, kde má vzniknout stupeň, na měřená místa se nanese činidlo, které povlak rozpustí, nenaruší však podkladový materiál. Druhou metodou se odleptá oblast pro měření z a pomocí elektrolytické komůrky, oblasti se odleptávají kruhové, čtyři uvnitř čtvercové plochy. Poslední metodou se stupeň vytváří při nanášení povlaku, a to zakrytím plochy pro stupeň, zakrytí se po zaschnutí odstraní. Tloušťka se měří proložením přímkových středních čar horním a dolním ohraničením měřeného stupně, poté se prodlouží, až vznikne k jejich překrytí a ze vzdálenosti čar v inflexním bodě se určí tloušťka. [5]

2.2 Mikroskopická metoda

Tato technologie se rozděluje na tři druhy měření, metoda příčného řezu, metoda klínového řezu a měření světelným mikroskopem. Využití měření příčným řezem je u kovových povlaků, oxidických vrstev a smaltových povlaků. Spočívá ve zkoumání příčných řezů přes optický mikroskop a za vhodných podmínek lze dosáhnout vysoké přesnosti 0,8 μm , čímž je metoda vhodná pro tenké povlaky. Klínový řez není vhodný pro křehké a drobné povlaky, nebo povlaky s tloušťkou nižší než 2 μm a vytváří se řez v předepsaném úhlu od povrchu povlaku až k podkladu. Kde se poté měří půdorysná šířka řezu, ze které se vypočítá tloušťka. Světelným mikroskopem se vrhá rovný paprsek světla pod úhlem 45° na měřený povrch a z odraženého světla se v mikroskopu zobrazí obraz profilu povrchu. Je zde možnost měřit transparentní povlaky, u kterých je metoda nedestruktivní, jinak se povlak musí destruktivně narušit. [5]

2.2.1 Princip měření

V první řadě je důležité předejít zaoblení hran výbrusu, toho lze dosáhnout vhodnou ochranou povrchu povlaku. Na povrch povlaku se nanese vrstva ochranného kovu, který musí mít podobnou tvrdost, jako měřený povlak a tloušťku nejméně 10 μm . Tvrdé a měkké povlaky se obalí hliníkovou fólií. Povlak nesmí být chráněn měkčím kovem kvůli obtížnějšímu následnému leštění. Zároveň je také nutné vhodně volit materiál ochrany vzhledem k povlaku, kde například pokovení zinku mědí by při leptání mělo za následek vylučování rozpuštěné mědi na povlaku. [6]

Při broušení je nutné zajistit, aby byl vzniklý výbrus kolmý k povrchu povlaku. Měřený povrch se brousí vhodným brusným papírem za použití maziva, vody nebo lakového benzínu. Pro zamezení zešikmení výbrusu se používá minimální tlak. Nejdříve se použije brusivo se zrnitostí 100 či 180, aby se odkryl profil vzorku a odstranil deformovaný kov. Dále se postupně využívají zrnitosti 240, 320, 500 a 600, které se střídají po 30 – 40 s a po výměně se směr broušení otočí o 90°. Nakonec se výbrus vyleští brusnými kotouči s diamantovou pastou a lakovým benzínem po 2 – 3 min. U měkkých materiálů mohou v povrchu zůstat částičky brusiva, čemuž lze předejít například ponořením do maziva během broušení, nebo pokud k problému dojde, tak lze částičky odstranit lehce ručním přešetřením. Lze využít také leptání, díky kterému se zvýrazní kontrasty vrstev kovu, odstraní stopy přemazání a vyvolá se jemná čára na hranici povlaku. [6]

Pro měření vrstvy povlaku jsou využívány vláknové mikrometry a mikrometrické okuláry. Okulár je méně přesný, ale využívá se u tenkých povlaků na drsném povrchu. Promítaný obraz na matnici je však málo ostrý a naopak u viditelného obrazu je nečitelné měřítko. Obecně nejvýhodnější měření umožňuje vláknový mikrometr. Mikroskopy se kalibrují certifikovaným nebo kalibrovaným objektivovým měřítkem a zařízení je nutné kalibrovat vždy před i po měření. Objektivové měřítko má být ve prostřed zorného pole společně s povlakem a v každém bodě se měří minimálně dvakrát. Při správně zvoleném postupu a zařízení lze dosáhnout opakovatelnosti 2 % nebo 0,5 μm . Některé mikroskopy způsobují chybu v podobě samovolného pohybu podložky vzhledem k objektivu, způsobeného například nerovnoměrným působením zdroje světla. Této chybě lze předejít rychlým dokončením měření a vícenásobným měřením, jednou zprava a jednou zleva. [6]

2.3 Coulometrická metoda

Tato metoda je využívána pro měření tloušťky kovových povlaků, jelikož vyžaduje elektrickou vodivost povlaku, z důvodu využívání anodického rozpouštění vrstvy povlaku. Metoda je také využitelná pro vícevrstvé povlaky, povlaky na válcových podkladech a drátech. [7]

2.3.1 Princip měření

Celý postup spočívá v tom, že se vymezí měřená plocha a po určení vhodného elektrolytu se anodicky rozpustí povlak a jeho úplné rozpuštění zjistíme podle změny napětí na snímači. Tloušťka se poté zjistí z množství elektrického náboje v coulombech, které lze zjistit buďto z času od začátku po konec zkoušky, kdy je konstantní proudová hustota, nebo z potřebného množství elektrického náboje k rozpuštění povlaku.

Přístroje se kontrolují podle etalonů s povlakem o známých tloušťkách, které se musí skládat ze stejného typu povlaku a podkladu, jako měřený vzorek a rozdíl naměřených hodnot by s etalonem měl být maximálně 5 %.

Měřených povrch se musí před měřením vždy očistit od všech nečistot a některé povrchy může být také nutné mechanicky nebo chemicky aktivovat. Musí se však dát pozor, aby se tím neodstranil žádný kov.

Na povrch povlaku se přitiskne elektrolytický snímač s těsněním. Snímač může sloužit jako katoda, pokud je z kovového materiálu, pokud není, tak se katoda vkládá samostatně, případně může být součástí mechanismu pro míchání elektrolytu. V místě rozpouštění povlaku je nutné průběžně doplňovat elektrolyt mícháním, které musí začít již před zkouškou. Úplné rozpuštění povlaku se indikuje buď změnou anodového potenciálu, nebo napětí snímače, případně může být poté proces automaticky vypnut. [7]

Pro použité elektrolyty je nutné znát vždy dané informace a musí splňovat určité podmínky vzhledem k materiálu podkladu a povlaku. Nesmí chemicky reagovat s kovovým povlakem, pokud není pod elektrickým proudem. Povlak musí po zapojení rozpouštět s účinností blížící se 100 %. Po odstranění povlaku a proniknutí k podkladu musí vyvolat změnu potenciálu elektrody. Musí smáčet celou plochu pod snímačem. Elektrolyt je tedy volen vůči druhu materiálu povlaku i podkladu, ale také s ohledem na proudovou hustotu a proudění elektrolytu na koncovce snímače. [7]

Měření je založeno na dvou principech. Prvním principem se měří doba anodického rozpouštění od jeho začátku po ukončení, za konstantního proudu, který prochází koncovkou. Druhým principem měříme integrátorem elektrický náboj, spotřebovaný v průběhu zkoušky, čímž získáme hodnoty v podobě času, součinu proudu a času, nebo přímo jako tloušťku povlaku. [7]

3 Defektoskopie

Defektoskopií, neboli také nedestruktivním testováním, se identifikují a charakterizují defekty i vady jak na povrchu daného výrobku nebo materiálu, tak i uvnitř pod povrchem. Tyto zkoušky se dělají, jak už název napovídá, bez jakéhokoliv poškození či narušení zkoumaného objektu. To umožňuje zkoumané objekty i po otestování nadále použít, pokud se metodami žádné defekty nenajdou. NDT zkoušky jsou nákladově efektivní jak pro individuální zkoušení a testování jednotlivých vzorků, tak i pro materiál jako takový, v systému kontroly kvality výroby. [8]

Hlavní důvody použití NDT

1. úspory – oproti DT zkouškám se zbytečně neplýtvá testovanými objekty, které se po NDT mohou dále využít,
2. bezpečnost – až na výjimky jsou NDT metody člověku nezávadné,
3. účinnost – poskytují možnost důkladného a rychlého vyhodnocení,
4. přesnost – NDT metody jsou přesné a předvídatelné, což je využitelné pro zajišťování bezpečnosti a dlouhé životnosti. [9]

Ve většině případů je však za potřebí využití více testovacích metod, pro zjištění a nalezení určité vady. Výhodou pro úspěšné vykonání kontroly je také znalost každé NDT metody, její výhody, přednosti a čím je při testování limitovaná. Dále je práce soustředěna pouze na nedestruktivní metody, které se dají použít pro měření povlaků. [9]

3.1 Ultrazvuková kontrola

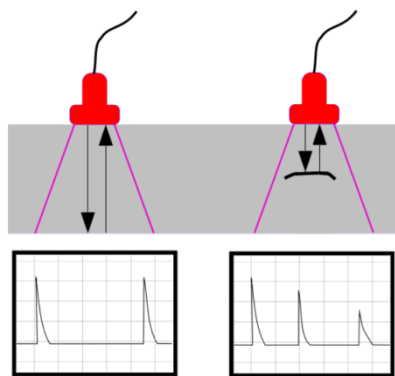
Ultrazvukové NDT, neboli UT, je metoda charakterizace tloušťky nebo vnitřních struktur, trhlin apod., u testovaného kusu, za pomoci vysokofrekvenčních zvukových vln. Používaná výška tónu a frekvence jsou o mnoho vyšší, než dokáže člověk zachytit sluchem, většinou se pohybují v rozmezí 500 kHz do 20MHz.

Metoda se využívá pro širokou škálu materiálů, zahrnující kovy, plasty, kompozity a keramiku. Avšak existují i strojírenské materiály, které jsou nevhodné pro použití ultrazvukového testování, jsou jimi výrobky ze dřeva a papíru. Vysoké využití nachází také v oblasti biomedicíny pro diagnostické zobrazování a lékařský výzkum. [10] [11]

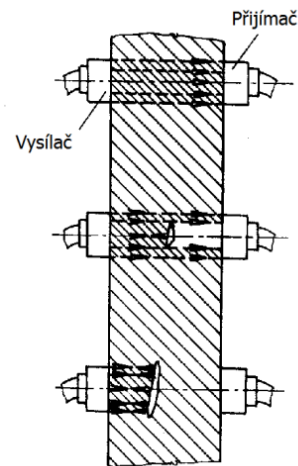
3.1.1 Princip měření

Při testování se používají sondy nebo jiné snímače, které vysílají zvukové vlny skrz testovaný materiál. Za nepřítomnosti vad vlny materiálem projdou, v opačném případě však narazí na hranice cizích médií, jako je vzduch v prasklinách apod. Z těchto nárazů je poté možné analyzovat tloušťku, praskliny či jiné vnitřní vady. Snímač je od povrchu oddělován spojovacím prvkem, čímž je například voda, nebo olej.

V základu existují dva druhy přijímání vln, a to odrazem a průchodem. Při odrazu je snímač v režimu vysílače i přijímače. Vysílané vlny se odrážejí od zadní stěny materiálu, nebo od nedokonalostí uvnitř materiálu. Výsledky zobrazuje diagnostický přístroj ve formě signálu s amplitudou, zobrazující intenzitu odrazu a vzdáleností, zobrazující dobu příchodu odrazu. Při průchodu je na jednom povrchu vysílač a na druhém přijímač, který detekuje, množství vln, které zvládlo projít materiálem v poměru s vyslaným množstvím. Nedokonalosti uvnitř snižují množství průchozích vln a upozorňují tak na sebe. [7] [8]



Obrázek 1 UT odrazem [11]



Obrázek 2 UT průchodem [24]

3.1.2 Zařízení užívané pro UT

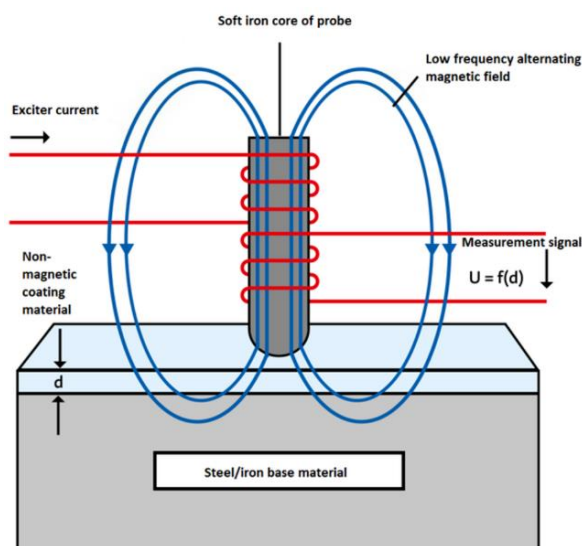
- ultrazvukové snímače a sondy: užívané v několika typech měření tloušťky a testování svarů, typově jsou snímače fázové, ponorné a kontaktní,
- defektoskopy: přenosné zařízení pro přesné a výkonné kontroly vnitřní integrity materiálu, hledání defektů, prasklin atd.,
- tloušťkoměry: měření tloušťek různých kovů, včetně mosazi, niklu a olova, mohou být nápomocné k identifikaci koroze,
- automatizované systémy UT: možnost sběru dat bez přítomnosti inspektora, vhodné pro dlouhodobou životnost zkoumaného materiálu, běžně využívané v ropném a plynárenském průmyslu,
- UT dronem: úsporné a bezpečné shromažďování dat, díky možnosti dosáhnout člověku nebezpečných míst a rychlejšímu odečtu, než by to zvládl člověk. [10]

3.2 Měření magneticko-indukční metodou a metodou vířivými proudy

Zde jsou dvě technologie pod jednou kapitolou, kvůli jejich podobnému principu technologie měření.

3.2.1 Magneticko-indukční metoda

Metoda využívaná pro měření tloušťky nemagnetických povlaků, například galvanické povlaky chromu, zinku, mědi nebo hliníku na magnetickém povrchu základního materiálu. Metoda může být využita také pro povlaky barev a laků. Měření využívá cívku budiče, která je navinuta na železné jádro, tím je poté veden nízkofrekvenční střídavý proud, v rozsahu Hz. Ve vzduchu se v okolí pólů železného jádra vytváří střídavé magnetické pole. Princip je v přiblížování pólu jádra k povlaku a tím pádem i k železné části pod ním, čímž se zesiluje magnetické pole. Vzápětí se začne generovat napětí v měřicí cívce, které je závislé na vzdálenosti jádra od železného povrchu. Jádro nebo senzor se tedy přiloží k povrchu povlaku a ze vzdálenosti od základního materiálu vzniká dané napětí cívky, které se poté vyhodnocuje elektronicky a zobrazuje na digitálním ukazateli už jako tloušťka měřené vrstvy. [12]

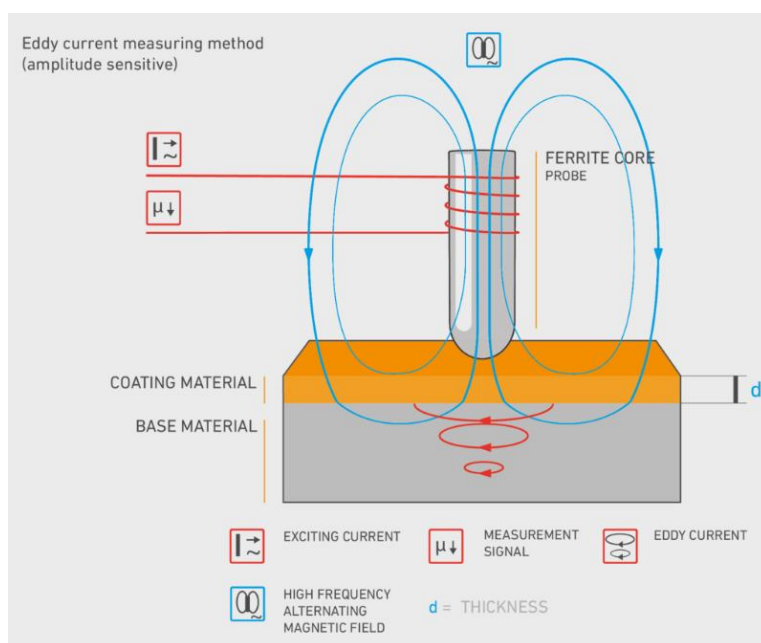


Obrázek 3 Schéma průběhu měření [12]

3.2.2 Metoda vířivými proudy

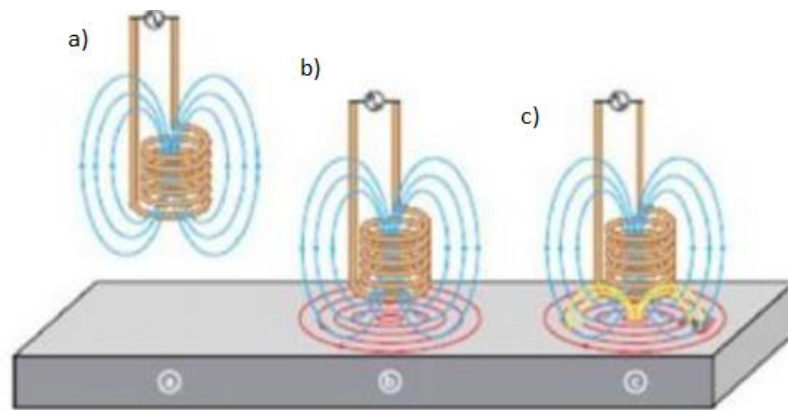
Metoda principem velmi blízká měření magnetickou indukcí, používaná k různorodým účelům, například k detekci vad, měření tloušťky materiálu i na něj naneseného povlaku. Může za jejího použití být daný materiál také identifikován, nebo být stanoveny jeho podmínky pro tepelné zpracování.

Vířivými proudy jsou pole střídavého magnetického proudu, vytvářejícího se při procházení střídavého proudu jednou nebo více cívkami, namotanými na měřicí sondě. Při přiblížení sondy k dílu, sonda indukuje pomocí střídavého magnetického pole vířivé proudy v měřené součásti. V té se poté mění tok vířivého proudu, příčinou různých nespojitostí a změn vlastností, což detekuje kontrolní sonda a umožňuje to měření tlouštěk a detekci defektů, jako jsou praskliny a koroze. [5] [13]



Obrázek 4 Schéma působení vířivých proudů [13]

Předpokladem pro použití této metody je elektrická vodivost základního materiálu, ne však magnetizovatelnost. Ideální jsou například kovy jako měď a hliník. Nátěr by měl izolovat elektřinu, aby šla použít tato metoda. Využívá se elektromagnetické indukce. Střídavé magnetické pole kolem cívky se rozšiřuje a smršťuje, podle stoupání a klesání střídavého proudu. Při přiblížení cívky k jinému vodiči, pronikne magnetické pole materiálem a vyvolá v něm proudění vířivého proudu. Proud vyvolá vlastní magnetické pole, působící a ovlivňující proud a napětí v cívce pomocí vzájemné indukčnosti. Amplituda a fáze vířivých proudů, vzniklých po přiložení sondy k povlaku, jsou jako funkce tloušťky mezi sondou a materiálem podkladu. [14]



- střídavý proud protékající cívkou při zvolené frekvenci vytváří kolem cívky magnetické pole
- když je cívka umístěna blízko elektricky vodivého materiálu, indukuje se v materiálu vířivý proud
- pokud vada ve vodivém materiálu naruší cirkulaci vířivých proudů, změní se magnetická vazba se sondou a signál defektu lze odečíst měřením změny impedance cívky

Obrázek 5 Schéma postupu měření vířivými proudy [14]

Defekty a rozdíly v tloušťce, působí jako změny ve vodivosti a ovlivňují velikost vířivého proudu. Takové změny jsou detekovány pomocí primární nebo sekundární cívky detektoru, to je základem kontrolní techniky testování vířivými proudy. Průnik je řízen propustností materiálu, která čím je větší, tím je menší průnik u materiálu. Hloubka průniku může být také měněna změnou frekvence střídavého proudu, s nižší frekvencí je větší hloubka průniku a naopak. K detekci defektů a měření blíže u povrchu se používají vysoké frekvence. Hustota a citlivost je větší na povrchu a klesá s hloubkou, běžná hloubka průniku se definuje jako hloubka, kde je hustota vířivých proudů 37 % hodnoty z povrchu. [14] [15]

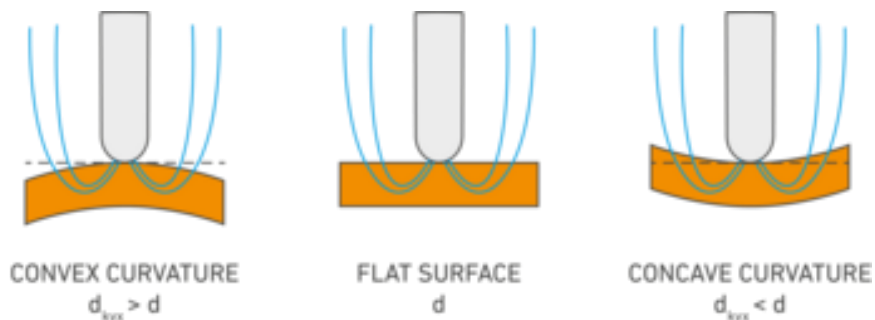
3.2.3 Vlastnosti elektromagnetických metod měření

Elektromagnetické metody měření jsou srovnávací, měřená hodnota se uvnitř přístroje srovnává s charakteristickou křivkou, pro správnost měření je nutnost kalibrace. Mezi ovlivňující faktory měření u této metody patří magnetická permeabilita měřeného materiálu, tvar měřené součásti a drsnost jejího povrchu. V neposlední řadě může také problém způsobit operátor.

Magnetická permeabilita je pro každý druh materiálu jiná a závisí na materiálové propustnosti. Například železo a nikl mají propustnost vysokou, zmagnetizují se sami a zároveň zesilují pole magnetizace. Přístroj se tedy musí kalibrovat pro každý materiál zvlášť. [13] [16]

3.2.4 Měření nerovných povrchů

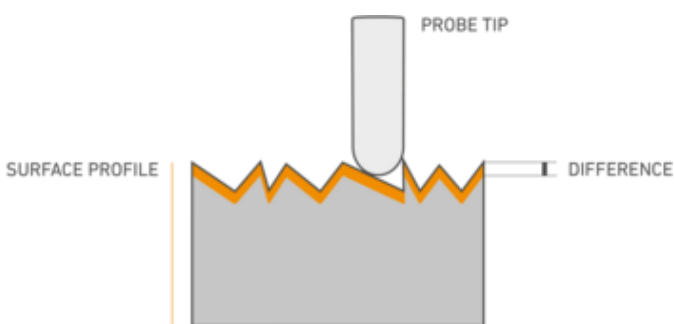
Nerovné tvary ploch měřených součástí se v praxi stávají nejčastěji důvodem chybných měření. Je tomu tak z důvodu rozdílného podílu magnetického pole ve vzduchu. Prakticky tento problém může vzniknout, pokud by byl měřicí přístroj kalibrován na rovném povrchu, ale poté by se při měření dostal na konkávní povrch, naměřil by se nižší výsledek tloušťky povlaku, naopak u měření konvexního povrchu, by se výsledek několikanásobně zvýšil. Podobné problémy mohou nastat také u malých a velmi tenkých součástí. V tomto případě magnetické pole přesahuje vzorek a tím se zkreslují naměřené výsledky. [16]



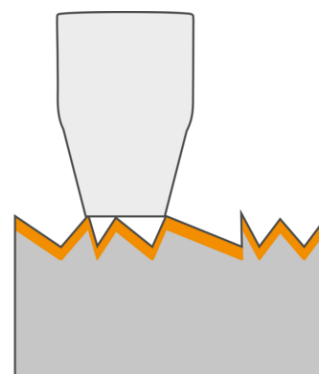
Obrázek 6 Zkreslení výsledku podle tvaru povrchu [16]

3.2.5 Měření drsných povrchů

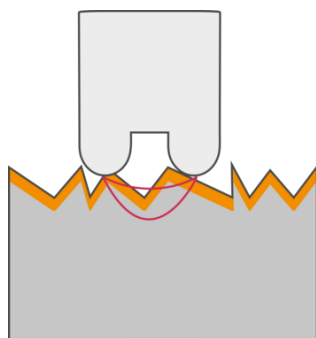
Při výrazně drsném a nerovném povrchu je měření ovlivněno velikostí sondy (jádra), a jestli je při dotyku na vyšším bodě profilu drsnosti, nebo zapadá v nižším bodě. U takových povrchů je vhodné několikrát opakovat měření a výsledek brát z průměru hodnot. Tato metoda se u hrubého povrchu vyplatí použít pouze tehdy, když je povlak minimálně dvakrát silnější než vrcholy dané drsnosti. Možností je také použití sond s širokou tyčí jádra, která se dotkne několika vrcholů a snižuje tak rozptyl hodnot, stejně tak se dají využít dvoupólové sondy.[16]



Obrázek 7 Rozdílnost měření podle usazení sondy [16]



Obrázek 8 Široká tyč pro nižší rozptyl [16]



Obrázek 9 Dvoupólová tyč pro nižší rozptyl [16]

3.2.6 Vliv operátora na měření

Vliv na měření může mít také ovládání měřícího přístroje. Sonda musí být vždy kolmo k povrchu a nesmí na ní být vyvíjen příliš velký tlak. Pro zamezení těchto vlivů lze použít stojan pro automatické spouštění sondy na měřený povrch. [13] [16]

3.3 Fázová vířivoproudá metoda

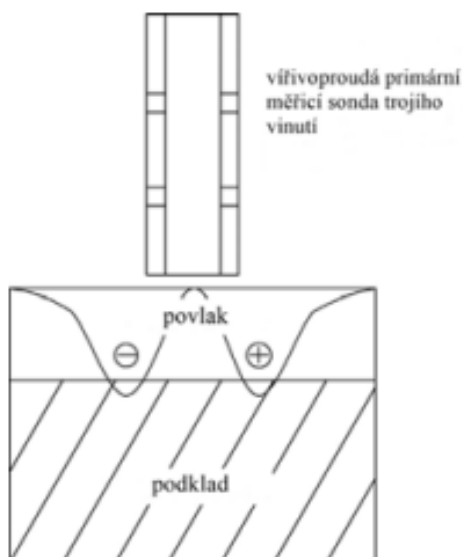
Bezkontaktní měření tloušťky vodivých feromagnetických i neferomagnetických povlaků na vodivých feromagnetických i neferomagnetických podkladech. Při této metodě se prakticky měří objemná hmota povlaku s jeho vodivostí v místě kontroly. Technologie je zaměřena na analyzování vzájemné interakce vířivoproudé sondy a jejího elektromagnetického pole s elektromagnetickým polem vířivých proudů měřeného objektu a povlaku. Vířivé proudy jsou závislé na elektrofyzikálních vlastnostech a geometrických parametrech podkladu i povlaku. Povlaková tloušťka, vodivost a pórovitost jsou ovlivněny stavem elektrolytu při nanášení povlaku. [17]

Výhody

- nízký vliv drsného povrchu měřeného vzorku na výsledek měření,
- možnost měření tloušťky povlaků na dílech malých rozměrů, například na šroubech,
- potlačení vlivu mezery, například při dielektrických povlacích,
- je možné provádět měření povlaků na výrobcích, které mají proměnnou nebo vysokou intenzitu magnetizace,
- můžeme měřit spoustu vodivých neferomagnetických povlaků na vodivých neferomagnetických podkladech. [17]

Nevýhody

- údaje jsou závislé na interferenčních parametrech, jako například vodivost a permeabilita povlaků i podkladů,
- omezení v kombinacích povlaků a podkladů. [17]



Obrázek 10 Schéma měření fázovou vířivoproudou metodou [17]

3.4 Měření bezkontaktní tepelnou optikou

Měření tloušťky povlaku se stalo také důležitou součástí průběhu některých výrobních procesů. Důvodem takové kontroly je schopnost tloušťky ovlivňovat jak fyzikální, tak chemické vlastnosti. Při měření v průběhu nanášení povlaku se tedy může zajistit například korozní ochrana, odolnost proti otěru, nebo schopnost povlaku izolovat elektřinu. Dalšími podmínkami takového měření tloušťky musí být jeho spolehlivost, reprodukovatelnost, jednoduchost, rychlost a hlavně provádět kontrolu nedestruktivně. Dříve se v procesu používala technologie magnetické indukce, která má ale pro takové použití značné nevýhody, jako je nutnost vytvrzeného nebo zaschlého povlaku, nebo potřeba hladkého povrchu, aby nevznikaly velké odchylky měření. Pro takovéto účely byla v průmyslu vyvinuta metoda na principu ATO, neboli „Advanced Thermal Optics“, která měří povlaky klidně již v nezaschlém stavu, bezkontaktně, je velmi přesná a reprodukovatelná. [18] [19]

3.4.1 Princip měření

Měření přístrojem je založené na pokročilé tepelné optice, což znamená, že přístroj obsahuje světelný zdroj, který je řízen počítačově a impulsně zahřívá měřený povrch, kde následně stanovuje dynamiku ochlazování pomocí vysokorychlostních infračervených senzorů, které povrch skenují bezkontaktně a za pomoci speciálních algoritmů jsou výsledná data převáděna na tloušťku povlaku. Převod funguje za pomoci cloudu, čímž se tento přístroj stal prvním svého druhu. Přístroj zaznamenává teplotní křivky, které poté přes WiFi nebo datový router přenáší na server cloudu, kde dojde k výpočtu algoritmů a výsledná tloušťka je poté zpět poslána do měřícího zařízení, kde se hodnoty zobrazují graficky na monitoru. [19]



1. Záblesková lampa
2. Pulzní zahřívání
3. Povlak
4. Substrát
5. Infračervené záření
6. Infračervený senzor

Obrázek 11 Schéma principu měření [19]

Možnosti měření

- oproti jiným technologiím nemá problém s téměř žádným podkladovým materiálem, na kterém je povrchová úprava, vhodné jsou tedy kovy, papír, guma, keramika, sklo, plast i dřevo,
- není zde problém ani s konzistencí povlaku, lze měřit mokré i vysušené vrstvy nátěru, nebo nevypálené i vypálené práškové povlaky,
- přístroj nemá potíže s drsností povrchu díky optickému průměrování, dokáže tedy změřit tloušťku i u nepravidelných parametrů povrchu,
- lze měřit tloušťku povrchu jakékoliv barvy, včetně bílé,
- je možné využít pro automatické měření na výrobní lince, je možné měřit pohybující se předměty,
- tloušťky povlaků: suchý povlak 1 – 1000 μm , mokrá a nevypálený práškový povlak 1 – 400 μm ,
- umožňuje rychlost měření již od 20 ms,
- vzdálenost od měřeného povrchu se pohybuje mezi 2-15 cm a velikost měřicího bodu je 2 mm² u vzdálenosti 50 mm od povrchu,
- náklon přístroje při měření může být $\pm 70^\circ$. [19] [20]



Obrázek 12 Reálný příklad měření tloušťky povlaku [18]

3.5 Rentgenospektrometrická metoda

Technika založená na použití různých druhů záření, v první řadě fotonové, včetně rentgenového, neutronové a elektronové. Používá se k měření tloušťek kovových povlaků, většinou tenkých, na základě stanovení plošné hmotnosti povlaku a při znalosti jeho hustoty vyjádření výsledku jako jeho tloušťka. Může být využita také k měření vícevrstvých povlaků, nebo k měření složení a tloušťky slitinových povlaků.

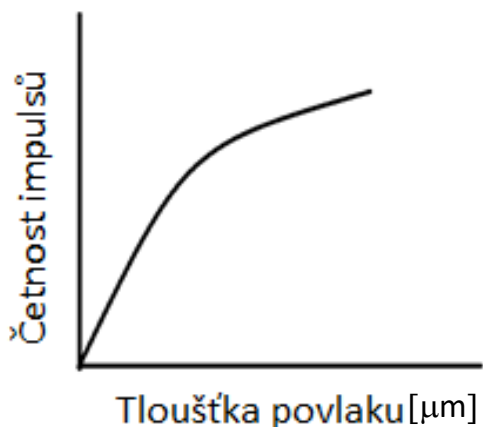
Existuje vztah mezi plošnou hmotností a intenzitou odraženého záření. Tento vztah se určí pomocí kalibrace přes etalony, které mají známou plošnou hmotnost povlaku a při znalosti povlakové hustoty ve stavu po jeho nanesení, mohou být parametry etalonů převedeny na tloušťku. Využívá se intenzity fluorescenčního záření, což je charakteristická funkce atomového čísla prvků. Je předpokladem, že měřená vrstva povlaku, případně mezipovlaku a základního materiálu se skládají každý z jiného prvku, takže generují rozdílné záření. Detektorový systém se poté může nastavit tak, aby měřil pouze danou vrstvu podle intenzity záření. [21]

3.5.1 Princip měření

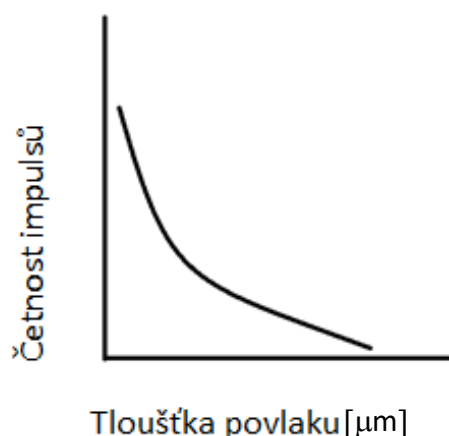
Pro měření tloušťky je základem kombinovaná interakce podkladu a povlaku s intenzivním a úzkým paprskem rentgenového záření, čímž vzniká sekundární odražené záření. Rentgenové záření vychází z rentgenky, nebo při použití radionuklidů. Rentgenka dodává záření při připojení na zdroj vysokého napětí, pro většinu tloušťek je napětí od 25 kV po 50 kV, pro materiály s nízkým atomovým číslem může být sníženo až na 10 kV. Výhodou tohoto buzení je možnost vytvoření intenzivního svazku, se zaměřením na velmi malou plochu, se snadným ovládním bezpečnosti a stabilitou záření. Při použití radionuklidů, vyzařujících záření gama, musíme vybrat ty, ve vhodném rozsahu energií pro měření tloušťky. Oproti záření z rentgenky je toto monochromatické s nízkou četností pozadí. Je zde možnost kompaktnější konstrukce přístroje díky nepotřebě chlazení. Intenzita je však nižší a nelze měřit malé plochy, zároveň je zde problém s bezpečností. V odraženém záření se kromě potřebných složek pro měření tloušťky nachází také složky jiné, ty lze oddělit pomocí disperze, a to buď disperzí vlnových délek, nebo disperzí energií. [22]

Pro měření se využívají dvě metody, metoda emisní a metoda absorpční. Při emisní metodě se měří intenzita záření povlaku, která se zvyšuje při rostoucí tloušťce povlaku (viz. obr. 13). Zařízení je nastaveno na příjem energií podle materiálu povlaku. U absorpční metody se měří intenzita záření podkladu, která se snižuje se zvyšující se tloušťkou povlaku (viz. obr. 14). Zde je zařízení nastaveno na příjem energií podle materiálu podkladu, pro funkčnost nesmí vzorek obsahovat mezivrstvy. Metody lze také kombinovat v případě, kdy je tloušťka definována jako poměr intenzit podkladového a povlakového materiálu. [22]

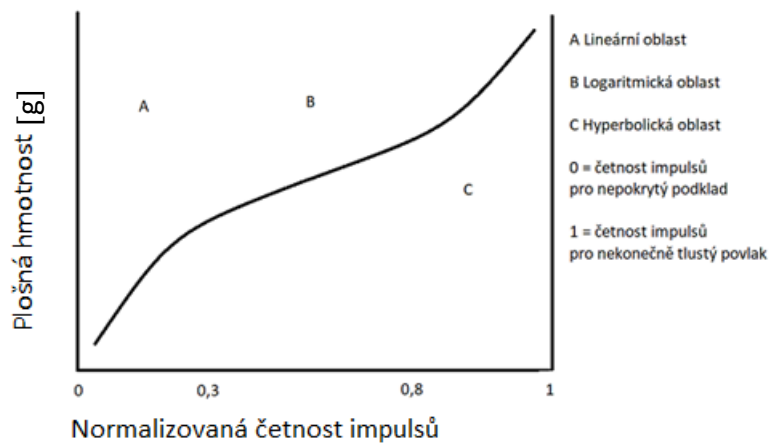
Intenzita odraženého záření se měří v četnosti impulsů, komerčně dostupné přístroje měří normalizované počty impulsů, s nulovou četností u podkladu bez povlaku a jednotkovou u nekonečně tlustého povlaku. Všechny tloušťky se pohybují v intervalu četností impulsů od 0 do 1. Nejcitlivější oblast na normalizační stupnici leží mezi četnostmi 0,3 až 0,8, je tedy vhodné volit etalony v tomto rozsahu. Při měření, kde má nepokrytý s povlakovaným materiálem rozdílné energie, je vysoký poměr četností, obvykle 1:10 a není nutné, aby etalony měly stejné nebo podobné materiály podkladu. Při poměru 3:1 u nepokrytého materiálu a nekonečně tlustého povlaku, což nastává u materiálů s podobnými hodnotami energií, je nutné použít absorpční filtr, pro absorbování jednoho ze záření, obvykle podkladového materiálu. [22]



Obrázek 13 Rentgenová emisní metoda [21]



Obrázek 14 Rentgenová absorpční metoda [21]

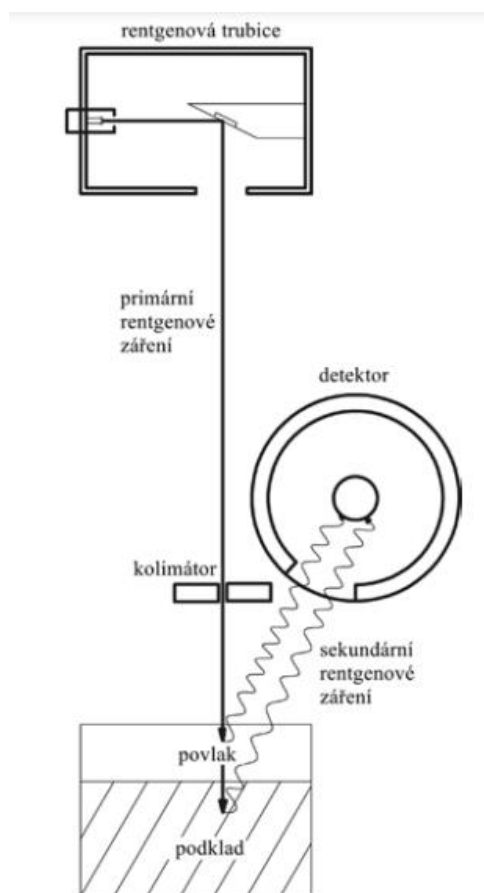


Obrázek 15 Vztah mezi plošnou hmotností a normalizovanou četností impulsů [21]

Faktory ovlivňující měření

Nejistota měření a její růst je ovlivněna mnoha aspekty, které musí být před měřením kontrolovány, aby se možná chyba měření snížila na minimum. Vliv na nejistotu může mít:

- použití etalonů s nízkou tloušťkou,
- hodnota z obr. 15 mimo rozsah 0,3 – 0,8,
- špatné zvolení měřené plochy vůči velikosti měřeného prvku,
- složení povlaku,
- rozdílná hustota povlaku od etalonu,
- složení a tloušťka podkladového materiálu,
- čistota a zakřivení povrchu,
- mezivrstvy. [21]



Obrázek 16 Strukturní schéma měření tloušťky rentgenovou metodou [17]

3.6 Magnetická metoda

Tato technika měření může být využita při potřebě zjištění tloušťky nemagnetických povlaků, včetně smaltových povlaků, které jsou nanесeny na magnetických kovech. Tloušťkoměry pro magnetickou metodu měří buďto sílu přitahování mezi magnetem a podkladovým materiálem, nebo magnetický odpor povlaku a podkladu, při průchodu magnetického indukčního toku.

Přístroje jsou před měřením kalibrovány buď přes vhodné etalony tloušťky, nebo je možné je kalibrovat přes porovnání měření tlouštěk vzorků, provedené metodami stanovenými pro dané typy povlaku. U nekalibrovatelných přístrojů je nutné zjistit odchylku od etalonu a tu poté uvažovat ve všech měření. [23]

Faktory ovlivňující měření

Při magnetickém měření tloušťky je důležité kontrolovat následující faktory, které by mohly zvýšit nejistotu měření:

- povlaková tloušťka – tenké povlaky mají konstantní přesnost, tlusté nikoli,
- magnetické vlastnosti podkladu – pro předcházení náhodných teplotních ovlivnění je nutná kalibrace s etalony o stejných vlastnostech jako podklad, nebo s podkladem bez naneseného povlaku,
- tloušťka podkladu – nutné stanovit kritickou hodnotu tloušťky, nad kterou již nedochází k ovlivnění měření,
- hrany – není dobré měřit na ploše, která je blízko hranám nebo koutům,
- zakřivení – pokud není přístroj speciálně kalibrován, tak nelze měřit nerovné plochy,
- drsnost – na příliš drsném povrchu s velmi rozdílnými výsledky je nutné zvýšit počet měření,
- směr mechanického opracování – závisí na druhu opracování a výsledky se mění podle orientace snímače na povrchu,
- remanentní magnetismus – ovlivňuje měření přístroji, využívající stacionární magnetické pole,
- magnetické pole – silná magnetická pole, která mohou být vyvolána např. elektrickými zařízeními, mohou silně narušit činnost přístrojů měření,
- cizí částice – kvůli fyzickému kontaktu s povrchem je nutné, aby byl povrch i snímač čistý,
- vodivost povlaku – v rozmezí 200 Hz až 2000 Hz může být měření ovlivněno vířivými proudy v tlustých povlacích,
- tlak na snímač – je nutné stanovit ideální tlak, aby nedošlo k deformaci měřeného vzorku,
- orientace snímače – při využití magnetické přitažlivé síly bude mít orientace snímače vliv na výsledek. [23]

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Následující kapitola obsahuje experimentální měření vybranými technologiemi na vytvořených vzorcích.

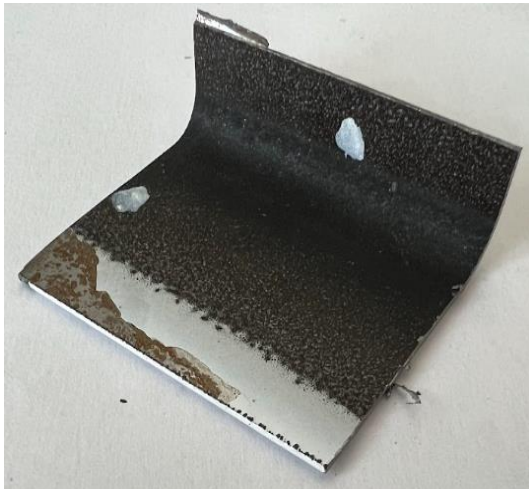
4.1 Podstata experimentu

Úkolem byla příprava a výroba několika podkladových a povlakových vzorků. Následně byly vzorky nedestruktivně měřeny třemi různými technologiemi za pomoci dostupných měřidel. Použité technologie byly: metoda magneticko–indukční, VPMT, ultrazvuková metoda a metoda vířivých proudů. U vzorků bylo naměřeno vždy 12 výsledků, ze kterých byla odstraněna vždy nejvyšší a nejnižší hodnota a zbytek byl zprůměrován ve výslednou hodnotu průměrné tloušťky povlaku. Vzorky byly následně děleny a zabroušeny, pro získání mikroskopicky měřitelné řezné plochy. Nařezané vzorky byly kontrolovány na dvou různých mikroskopech a hodnoty byly opět získávány stejným způsobem, jako u nedestruktivních metod, a to průměrováním bez maximálních a minimálních hodnot. Naměřené výsledky z NDT a DT metod byly porovnány a každému vzorku byly přiřazeny vhodné NDT metody, podle podobnosti s výsledky z mikroskopického měření.

4.2 Měřené vzorky

K měření v praktické části byly použity vzorky z uhlíkové oceli a slitiny hliníku. Na vzorcích byly nanесeny tyto typy povlaků: základní a krycí smalt na ocelovém vzorku, galvanicky pozinkovaný ocelový vzorek, žárově pozinkovaný ocelový vzorek, povlak z práškového plastu na ocelovém vzorku s chemickou předúpravou, duplexní povlak na ocelovém vzorku (žárový zinek s dvojitým povlakem z práškového plastu), niklový návar s příměsí bóru na vzorku Inconel 625, anodická oxidace hliníkového vzorku a povlak z práškového plastu na hliníkovém vzorku.

a) smaltovaný vzorek - konstrukční ocel S235JRG1,



Obrázek 17 Smaltovaný vzorek, černá strana je základní smalt



Obrázek 18 Smaltovaný vzorek bílá strana je krycí smalt

b) galvanicky pozinkovaná ocel – Q panel nízkouhlíková ocel válcovaná za studena
příprava dle standardu ASTM D 609,



Obrázek 19 Galvanicky pozinkovaná ocel

c) žárově pozinkovaná ocel – konstrukční ocel S235JRG1,



Obrázek 20 Žárově pozinkovaná ocel

d) bílý práškový plast na oceli - konstrukční ocel S235JRG1 s chemickou předúpravou železitým fosfátováním před práškovým lakováním,



Obrázek 21 Bílý práškový plast na oceli s chemickou předúpravou povrchu

e) Anodická oxidace na hliníku – slitina 3003 H14



Obrázek 22 Anodická oxidace na slitině hliníku

f) Žlutý práškový plast na hliníku – slitina 3003 H14



Obrázek 23 Žlutý práškový plast na slitině hliníku

g) Duplexní povlak na oceli – konstrukční ocel S235JRG1



Obrázek 24 Duplexní povlak (žárový zinek a dvojitý povlak z práškového plastu) na oceli

h) Navařená vrstva na vzorku Inconel 625



Obrázek 25 Inconel 625 – niklový návar s příměsí bóru

4.3 Nedestruktivní měření

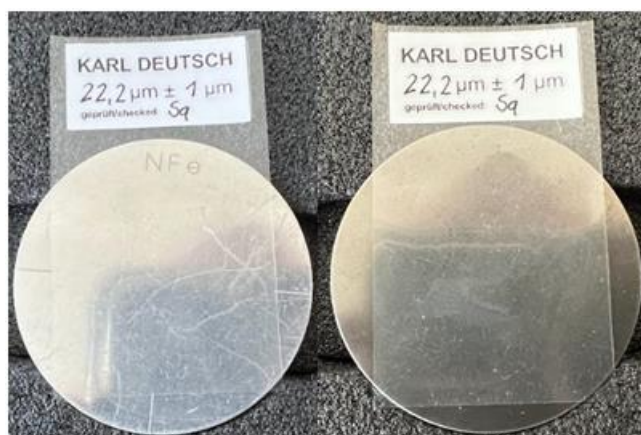
V této části experimentu jsou vzorky měřeny nedestruktivními metodami, kterými jsou: metoda vířivých proudů, magneticko-indukční metoda, VPMT a ultrazvuková metoda.

4.3.1 Metoda vířivých proudů

Hodnoty byly získány pomocí přístroje Karl Deutsch Leptoskop a dvou sond, kde jedna byla pro feromagnetické (Fe) podklady (KD Fe 0-3000 μm 2442.100 10153) a druhá pro neferomagnetické (NFe) podklady (KD NFe 0-1000 μm 2442.130 10081). Kalibrace sond proběhla přes Fe a NFe vzorky bez povlaků a pomocí fólie s tloušťkou $22,2 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$.



Obrázek 26 Měřící zařízení Karl Deutsch Leptoskop



Obrázek 27 NFe a Fe kalibrační vzorky

4.3.1.1 Naměřené hodnoty Metodou vířivých proudů [μm]

Tab. 1 Výsledky měření Vířivými proudy

	Smalt		Galv. zinek	Žár. Zinek	Prášek bílá
MAX	KD Fe 0-3000 μm 2442.100 10153		KD Fe 0-3000 μm 2442.100 10153	KD Fe 0-3000 μm 2442.100 10153	KD Fe 0-3000 μm 2442.100 10153
MIN	Bílý smalt	Černý smalt			
1)	149	26,7	4,6	76,3	220
2)	149	26,5	4,7	101	206
3)	154	26,8	4,9	70,4	222
4)	154	19,9	4,9	72	228
5)	151	28,1	5,1	77	236
6)	158	20,3	5,7	77,2	224
7)	154	23,3	5,2	81,1	207
8)	155	26,5	4,7	69,4	234
9)	153	27,3	5,5	72,4	224
10)	153	27,1	5,8	74,7	236
11)	154	24	5,7	78,4	228
12)	153	27,6	5,1	77,9	214
\emptyset	153	25,6	5,2	75,7	223,7
	Duplex		Prášek žlutá	Elox	Návar
MAX	KD Fe 0-3000 μm 2442.100 10153		KD NFe 0-1000 μm 2442.130 10081	KD NFe 0-1000 μm 2442.130 10081	KD Fe 0-3000 μm 2442.100 10153
MIN	Žlutý prášek	Šedý prášek			
1)	110	201	25,8	4,2	/
2)	117	234	74,3	5,2	/
3)	120	265	31	4,9	/
4)	122	259	56,7	4,9	/
5)	126	235	81,5	5	/
6)	130	267	100	4,6	/
7)	101	205	37,4	4,5	/
8)	110	271	81,6	4,2	/
9)	119	245	69,3	4,4	/
10)	118	232	37,2	4,9	/
11)	116	256	64,4	4,7	/
12)	121	200	39,7	4,1	/
\emptyset	117,9	239,3	57,3	4,6	/

Měření probíhalo postupným přikládáním sond na celou plochu povlaku měřených vzorků. Obě sondy měly problém pouze s navařenou vrstvou, kvůli její tloušťce přes 3000 μm a rozsahu sond maximálně 3000 μm . Porovnání výsledků proběhne v závěru experimentu.

4.3.2 Magneticko-indukční metoda

Pro tuto technologii byl použit tloušťkoměr Elcometer 456, s využitím dvou různých FM sond a jedné FNF sondy. Tloušťkoměr byl přes sondy kalibrován pomocí fólie o tloušťce 54 μm .



Obrázek 28 Měřící zařízení Elcometer

4.3.2.1 Naměřené hodnoty Magneticko-indukční metodou [μm]

Tab. 2 Výsledky měření Magneticko-indukční metodou

	Smalt		Galv. Zinek	Žár. Zinek	Prášek bílá
MAX	Elcometer FM3		Elcometer FM	Elcometer FM3	Elcometer FM3
MIN	Bílý smalt	Černý smalt			
1)	128	13,1	3,3	70,6	192
2)	125	11,8	5,1	65,5	189
3)	130	28	3,3	67,5	192
4)	123	17,2	7	72,9	196
5)	128	19,6	3,5	64,3	198
6)	126	22,8	3,9	64,8	184
7)	127	15	4,3	78,8	198
8)	135	23,5	2,9	68,3	210
9)	126	21,7	4,8	66	197
10)	125	35	4,3	60,3	202
11)	133	27,1	2,4	65	180
12)	129	28,5	3,8	70,7	183
\emptyset	127,7	21,7	3,9	67,6	193,1
	Duplex		Prášek žlutá	Elox	Návar
MAX	Elcometer FM3		Elcometer FM3	Elcometer FM3	Elcometer FM3
MIN	Žlutý prášek	Šedý prášek			
1)	105	206	/	/	/
2)	108	176	/	/	/
3)	113	196	/	/	/
4)	101	208	/	/	/
5)	94	220	/	/	/
6)	105	201	/	/	/
7)	107	209	/	/	/
8)	108	170	/	/	/
9)	120	167	/	/	/
10)	103	188	/	/	/
11)	111	199	/	/	/
12)	102	205	/	/	/
\emptyset	106,3	195,8	/	/	/

Měření probíhalo stejným způsobem, přikládáním sond na celou plochu povlaku měřených vzorků. Tloušťkoměrem Elcometer s FM sondami nebylo možné změřit povlaky na hliníkovém podkladu a tloušťku návaru, kvůli charakteru měřidla. Při měření s FNF sondou přestal tloušťkoměr fungovat a nebylo možné získávat hodnoty, výsledky jsou tedy pouze z FM sond. Porovnání výsledků proběhne v závěru experimentu.

4.3.3 Kombinace vířivoproudé a magnetické metody

Pro kombinaci těchto dvou metod byl použitý tloušťkoměr PosiTector 6000. Kalibrace proběhla před měřením stejným způsobem, pomocí kalibrační fólie o tloušťce 54 μm .



Obrázek 29 Měřící zařízení PosiTector 6000

4.3.3.1 Naměřené hodnoty kombinací VPMT [μm]

Tab. 3 Výsledky měření kombinací vířivoproudé a magnetické metody

	Smalt		Galv. Zinek	Žár. Zinek	Prášek bílá
MAX	Positector		Positector	Positector	Positector
MIN	Bílý smalt	Černý smalt			
1)	140	40	4	70	225
2)	141	51	7	79	225
3)	141	38	5	75	226
4)	148	32	6	73	210
5)	156	32	5	75	233
6)	141	22	5	72	226
7)	155	39	5	68	233
8)	142	24	6	76	216
9)	142	22	4	78	199
10)	151	32	5	74	233
11)	155	32	7	75	240
12)	152	25	5	75	225
Ø	146,5	31,6	5,3	74,3	225,2
	Duplex		Prášek žlutá	Elox	Návar
MAX	Positector		Positector	Positector	Positector
MIN	Žlutý prášek	Šedý prášek			
1)	116	250	41	/	/
2)	113	261	36	/	/
3)	135	272	54	/	/
4)	110	206	31	/	/
5)	115	217	51	/	/
6)	113	213	30	/	/
7)	119	272	53	/	/
8)	113	247	27	/	/
9)	105	256	40	/	/
10)	106	219	35	/	/
11)	100	243	31	/	/
12)	123	242	33	/	/
Ø	113,3	242	38,1	/	/

Měření probíhalo stejným způsobem, přikládáním sondy na celou plochu povlaku měřených vzorků. Tloušťkoměr nezvládl kvůli svému charakteru naměřit anodickou oxidaci na hliníku a navařenou vrstvu. Porovnání výsledků proběhne v závěru experimentu.

4.3.4 Ultrazvuková metoda

Pro měření ultrazvukem byly využity dva přístroje s různými sondami. Prvním přístrojem byl ultrazvuk Olympus 72 DL Plus se sondou 75 MHz M2102. Druhý byl ultrazvuk Olympus 38 DL Plus se sondou 5 MHz D7906-RM. Kalibrovány byly přes vzorek bez povlaku na nulovou hodnotu. Pro měření byla na povrch v místě dotyku sond použita voda a gel.



Obrázek 30 Měřící zařízení Olympus 72 DL Plus



Obrázek 31 Měřící zařízení Olympus 38 DL Plus

4.3.4.1 Naměřené hodnoty Ultrazvukovou metodou [μm]

Tab. 4 Výsledky měření Ultrazvukovou metodou

	Smalt		Galv. zinek	Žár. Zinek	Prášek bílá	
MAX	75 MHz M2102		75 MHz M2102	76 MHz M2102	77 MHz M2102	
MIN	Bílý smalt	Černý smalt				
1)	57	/	36	55		220
2)	72	/	35	52		236
3)	58	/	51	54		224
4)	57	/	32	54		226
5)	56	/	37	58		224
6)	57	/	35	55		213
7)	56	/	36	56		226
8)	56	/	52	54		223
9)	59	/	36	70		238
10)	60	/	35	55		226
11)	57	/	36	44		223
12)	58	/	34	50		224
∅	57,5	/	36,9	54,3		225,2
	Duplex		Prášek žlutá	Elox	Návar	
MAX	75 MHz M2102		75 MHz M2102	76 MHz M2102	5 MHz D7906-RM	
MIN	Žlutý prášek	Šedý prášek			Vrchní strana	Spodní strana
1)	30	/	32	22	14 150	10 130
2)	23	/	25	21	13 960	10 150
3)	23	/	22	22	14 380	10 120
4)	48	/	30	32	13 600	10 160
5)	29	/	25	22	14 060	10 160
6)	20	/	26	21	13 780	10 280
7)	42	/	48	22	13 710	10 220
8)	33	/	50	23	13 830	10 110
9)	45	/	67	21	14 110	10 090
10)	52	/	31	22	14 130	10 140
11)	31	/	22	32	13 770	10 140
12)	32	/	28	22	13 800	10 160
∅	33,3	/	31,7	22,9	13 900	10 150
						3 750

Před měřením byla na povrchy vzorků nanesena voda, nebo v případě vzorku s návarem gel. Následně byly postupným přikládáním sondy po celé ploše vzorku získávány výsledky měření. V případě vzorku s navařenou vrstvou sonda změřila z vrchní strany celkovou tloušťku i s navařeným materiálem (Obr. 32 a) a ze spodní strany tloušťku pouze základního materiálu (Obr. 32 b), kvůli detekci místy špatně provařeného svaru. Výsledek je tedy získán odečtením průměrných hodnot z vrchní a spodní strany vzorku. Hodnoty budou porovnány v závěru experimentu.



Obrázek 32 Měření návaru z vrchní strany a) a ze spodní strany b)

4.4 Destruktivní metody měření na mikroskopech

Vzorky byly po NDT měření metalograficky nařezány a zabroušeny k získání vhodné plochy řezu pro pozorování a měření tloušťky pod mikroskopem. Byly využity dva různé mikroskopy s různým rozlišením a zvětšením pro možnost kontroly výsledků.

4.4.1 Mikroskop SZ61

Na mikroskopu bylo možné rozpoznat povlaky. Anodická oxidace hliníku s galvanicky a zároveň naneseným zinkem nebyli rozpoznatelné. Mohlo to být zapříčiněno nízkou rozlišovací schopností mikroskopu.



Obrázek 33 Mikroskop SZ61

4.4.1.1 Naměřené hodnoty mikroskopem SZ61

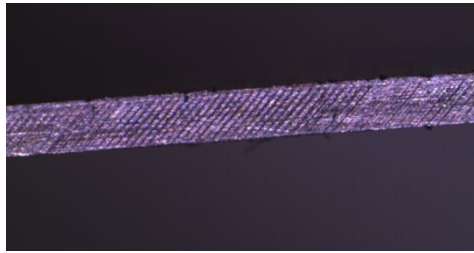
Tab. 5 Výsledky měření mikroskopem SZ61

MAX	Smalt (zoom 1,5)		Galv. Zinek (zoom 1,5)	Žár. Zinek (zoom 1,5)	Prášek bílá (zoom 1)	
MIN	Bílý smalt	Černý smalt			Bílý prášek	Č. mezivrstva
1)	111	24	/	/	126	120
2)	111	28	/	/	158	120
3)	103	21	/	/	116	126
4)	115	32	/	/	120	101
5)	113	31	/	/	125	108
6)	121	23	/	/	128	116
7)	115	27	/	/	127	96
8)	102	19	/	/	132	112
9)	88	19	/	/	126	95
10)	102	23	/	/	121	94
11)	113	28	/	/	120	94
12)	102	19	/	/	139	83
∅	108,7	24,3	/	/	126,4	105,6
MAX	Duplex (zoom 0,8)		Prášek žlutá (zoom 1)	Elox (zoom 1,5)	Návar (zoom 0,8)	
MIN	Žlutý prášek	Šedý prášek				
1)	77	102	70	/	3 648	
2)	101	147	76	/	3 671	
3)	93	116	70	/	3 671	
4)	85	139	70	/	3 671	
5)	77	124	57	/	3 750	
6)	101	115	76	/	3 705	
7)	79	132	72	/	3 671	
8)	85	117	82	/	3 648	
9)	87	85	70	/	3 562	
10)	81	148	70	/	3 594	
11)	78	116	63	/	3 539	
12)	77	103	63	/	3 439	
∅	84,3	121,1	70	/	3 638	

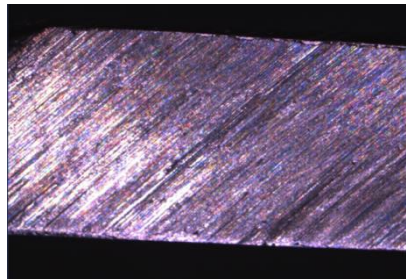
4.4.1.2 Snímky z mikroskopu



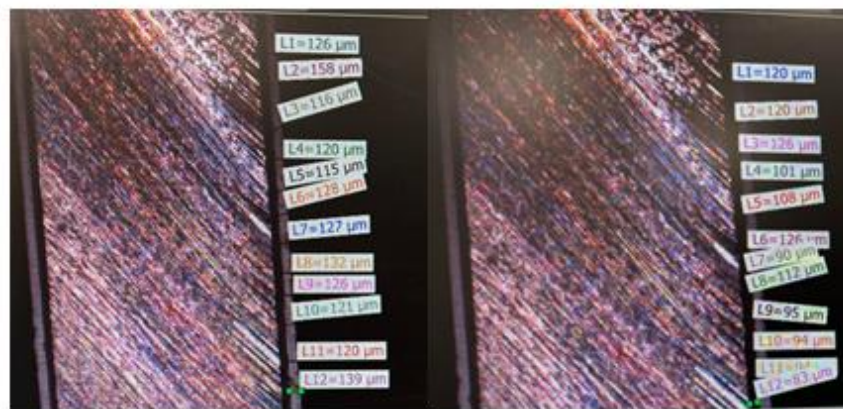
Obrázek 34 Rozměry bílého smaltu a) a rozměry černého smaltu b)



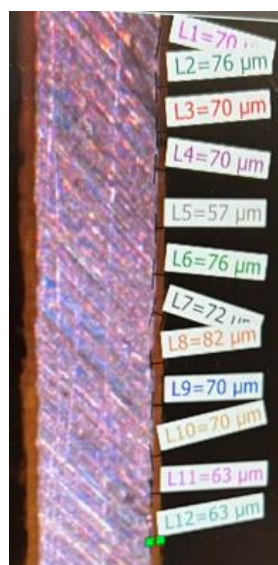
Obrázek 35 Zvětšený galvanicky pozinkovaný vzorek



Obrázek 36 Zvětšený žárově pozinkovaný vzorek



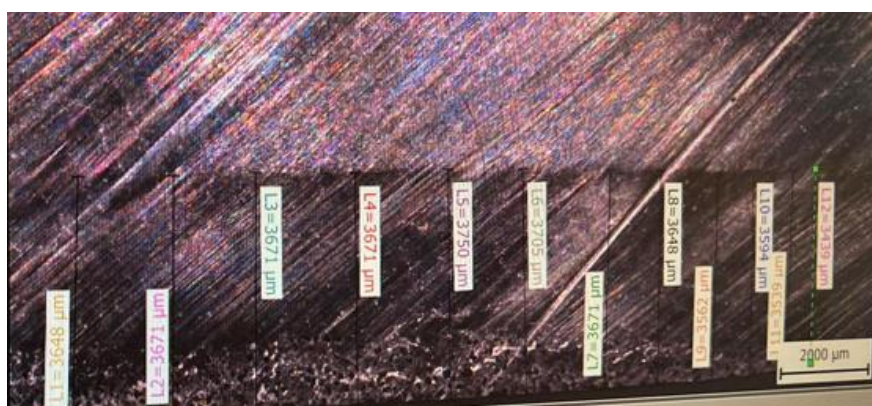
Obrázek 37 Rozměry bílého prášku a) a rozměry fosfátové mezivrstvy b)



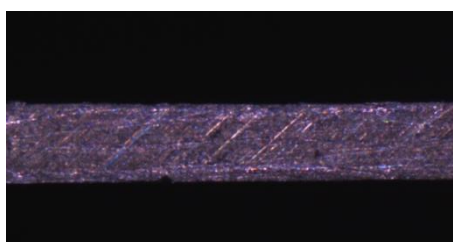
Obrázek 38 Rozměry žlutého práškového plátu



Obrázek 39 Rozměry šedého práškového plastu a) a Rozměry žlutého práškového plastu b)



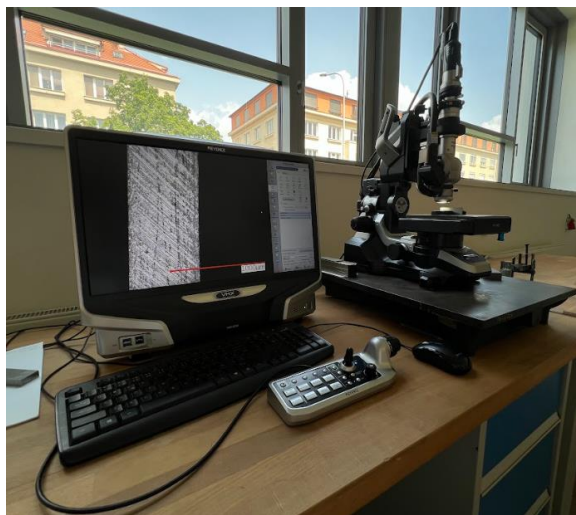
Obrázek 40 Rozměry navařené vrstvy



Obrázek 41 Zvětšený vzorek s anodickou oxidací

4.4.2 Mikroskop VHX – 6000

Toto měření bylo realizováno na pracovišti Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie, kde byly využity dva různé zvětšovací objektivy pro lepší viditelnosti slabších vrstev. Vzorky s anodickou oxidací a galvanickým zinkem byly opět těžko měřitelné.



Obrázek 42 Mikroskop VHX - 6000



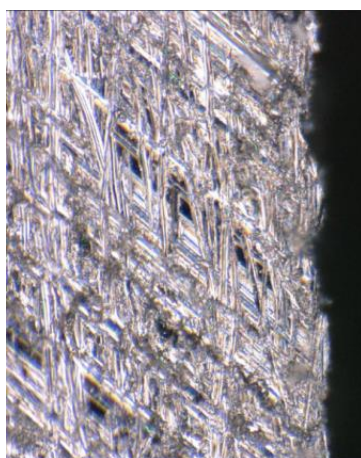
Obrázek 43 Využité zvětšovací objektivy

4.4.2.1 Naměřené hodnoty mikroskopem VHX - 6000

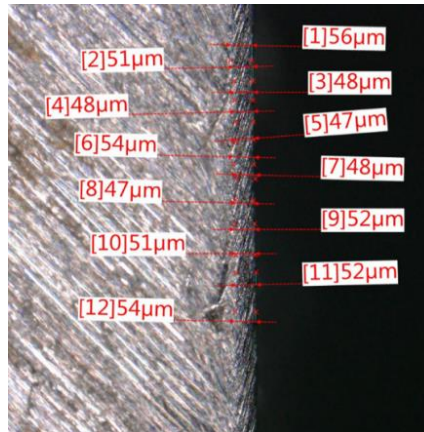
Tab. 6 Výsledky měření mikroskopem VHX - 6000

MAX	Smalt (zoom 20)		Galv. Zinek (zoom 1000)	Žár. Zinek (zoom 200)	Prášek bílá (zoom 50)	
MIN	Bílý smalt	Černý smalt			Bílý prášek	Č. mezivrstva
1)	101	29	/	56	128	104
2)	95	26	/	51	123	114
3)	100	29	/	48	109	104
4)	104	29	/	48	119	114
5)	109	24	/	47	123	104
6)	114	25	/	54	114	109
7)	104	28	/	48	137	100
8)	105	28	/	47	119	105
9)	114	26	/	52	123	109
10)	114	33	/	51	114	100
11)	95	36	/	52	123	114
12)	114	26	/	54	119	100
ø	106	27,9	/	50,5	120,5	106,3
MAX	Duplex (zoom 200)		Prášek žlutá (zoom 100)	Elox (zoom 200)	Návar (zoom 50)	
MIN	Žlutý prášek	Šedý prášek				
1)	52	115	60	/	3 474	
2)	56	111	52	/	3 576	
3)	56	91	52	/	3 566	
4)	52	77	52	/	3 588	
5)	55	63	52	/	3 578	
6)	51	58	55	/	3 616	
7)	51	51	56	/	3 594	
8)	56	52	54	/	3 604	
9)	51	61	50	/	3 592	
10)	57	62	55	/	3 607	
11)	51	71	47	/	3 550	
12)	52	82	51	/	3 548	
ø	53,2	72,8	52,9	/	3 580	

4.4.2.2 Snímky z mikroskopu



Obrázek 44 Zvětšený galvanicky pozinkovaný vzorek



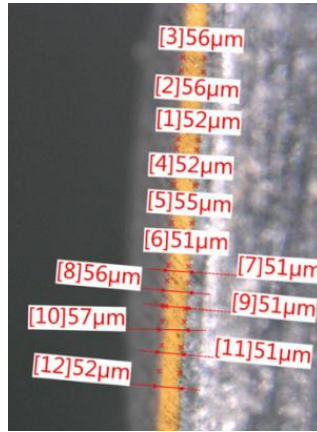
Obrázek 45 Rozměry žárově pozinkovaného vzorku



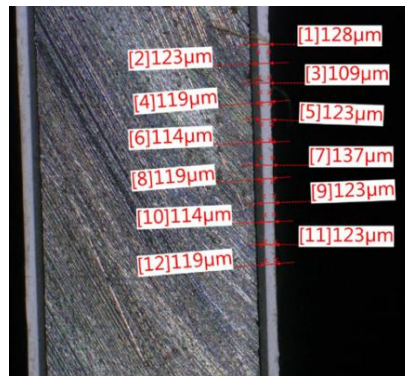
Obrázek 46 Rozměry smaltovaného vzorku



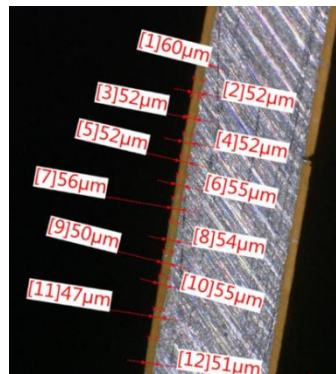
Obrázek 47 Rozměry vzorku s návarem



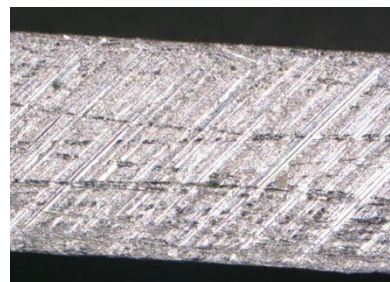
Obrázek 48 Rozměry vzorku s duplexním povlakem



Obrázek 49 Rozměry vzorku s bílým práškovým plastem



Obrázek 50 Rozměry vzorku se žlutým práškovým plastem



Obrázek 51 Zvětšený vzorek s anodickou oxidací

5 ZÁVĚR

V této kapitole budou shrnuty výsledky měření tloušťky konkrétního povlaku, měřeného jednotlivými technologiemi.

5.1 Smaltovaný vzorek

Tab. 7 Porovnání všech výsledků měření smaltovaného vzorku

Smalt					
Positector		Elcometer		Víř. Proudý	
Bílý smalt	Černý smalt	Bílý smalt	Černý smalt	Bílý smalt	Černý smalt
146,5	31,6	127,7	21,7	153	25,6
Ultrazvuk		SZ61		VHX - 6000	
Bílý smalt	Černý smalt	Bílý smalt	Černý smalt	Bílý smalt	Černý smalt
57,5	/	108,7	24,3	106	27,9

Při porovnání hodnot NDT a DT měření je zřejmé, že při měření bílé strany vzorku, kde byl se základním smaltem i krycí smalt, naměřily přístroje pro magneticko-indukční technologii, pro kombinaci VPMT a pro vířivé proudy hodnotu tloušťky přes obě nanesené vrstvy smaltu. Pokud se tedy hodnoty odečtou, získají se bližší hodnoty z mikroskopu. Získané hodnoty bílého krycího smaltu po odečtení:

Tab. 8 Odečtené hodnoty

Smalt		
Bílý smalt	Bílý smalt	Bílý smalt
114,9	106	127,4

Nejblíže mikroskopickým hodnotám jsou hodnoty naměřené magneticko-indukční technologií, VPMT a technologií vířivých proudů, odchylky jsou způsobeny druhem povlaku a jeho nestejnou tloušťkou. Pro tyto typy povlaků a podkladu jsou dané technologie využitelné a naopak ultrazvuk použitelný není, díky své nepřesnosti.

5.2 Galvanicky pozinkovaná ocel

Tab. 9 Porovnání všech výsledků měření galvanicky pozinkované oceli

Galv. Zinek					
Positector	Elcometer	Víř. Proudý	Ultrazvuk	Stereoscope	VHX - 6000
5,3	3,9	5,2	36,9	/	/

U tohoto typu povlaku byl problém s pozorováním a změřením povlaku na mikroskopech, povlak byl příliš slabá a nevýrazná k jejímu rozpoznání i při zvětšení. Vhodné je tedy podobné typy povlaků měřit právě nedestruktivně. Měřené hodnoty magneticko-indukční technologií, VPMT a vířivými proudy byly nejpřesnější. Technologie by tedy mohly být vhodné pro tento typ povlaku a podkladu. Elcometer povlak změřil slabší, to mohly zapříčinit vnější vlivy, jako například jiná místa měření tloušťky povlaku na ploše vzorku. Tudiž by i tloušťkoměr Elcometer mohl být použitelný. Ultrazvuk byl opět hodnotami mimo rozsah ostatních měření.

5.3 Žárově pozinkovaná ocel

Tab. 10 Porovnání všech výsledků měření žárově pozinkované oceli

Žár. Zinek					
Positector	Elcometer	Víř. Proudý	Ultrazvuk	SZ61	VHX - 6000
74,3	67,6	75,7	54,3	/	50,5

Zde se sice opět vůči sobě nejvíce shodují hodnoty VPMT s metodou vířivých proudů, ale při srovnání s mikroskopem je blíží hodnota z ultrazvuku. Což může být zapříčiněno vhodnou technologií pokovení, difuzně spojeného zinku s ocelí, proto by tato metoda mohla být vhodnou variantou NDT měření pro tento typ povlaku a podkladu. Je možné, že ostatní metody měření tloušťky naměřily větší hodnoty i díky místům měření a lokálně difundovanému zinku v oceli. Proto jsou i tyto metody vhodné pro měření žárově zinkovaných povlaků.

5.4 Bílý práškový plast na oceli s chemickou předúpravou povrchu

Tab. 11 Porovnání všech výsledků měření bílého práškového plastu s chemickou předúpravou povrchu

Prášek bílá							
Positector	Elcometer	Víř. Proud	Ultrazvuk	SZ61		VHX - 6000	
225,2	193,1	223,7	225,2	Bílý prášek	černá mezivrstva	Bílý prášek	černá mezivrstva
				126,4	105,6	120,6	106,4
				232		226,8	

U měření tohoto typu povlaku (nátěrového systému), se projevila chemická předúprava železitým fosfátováním, jako použitá mezivrstva před práškovým lakováním, která nejen zvyšuje korozní odolnost celého systému, ale také zajišťuje přilnavost práškového povlaku. Některé tloušťkoměry měřily povlak jako celek a nerozlišovaly vytvořenou chemickou vrstvu železitým fosfátováním. Pod mikroskopy byla mezivrstva dobře vidět a byla dobře měřitelná. Po sečtení tlouštěk z mikroskopu vyšly hodnoty podobné všem hodnotám z NDT metod, kromě hodnoty z Elcometru, která vyšla lehce menší. Celkově jsou ale všechny použité metody vhodné pro tento typ povlaku a podkladu, pokud je povlak jednovrstvý, nebo pokud se měří celková tloušťka vícevrstvého povlaku. Není jimi však možné měřit každou vrstvu zvlášť, v případě několika vrstev povlaku.

5.5 Anodická oxidace na slitině hliníku

Tab. 12 Porovnání všech výsledků měření vrstvy anodické oxidace

Elox					
Positector	Elcometer	Víř. Proud	Ultrazvuk	SZ61	VHX - 6000
/	/	4,6	22,9	/	/

U tohoto vzorku bylo měření nejproblematictější. Na mikroskopech nebyla vrstva viditelná a jediné dvě hodnoty získané z NDT metod se rapidně liší. Hodnota tloušťky získaná měření pomocí vířivých proudů je přesnější.

5.6 Žlutý práškový plast na slitině hliníku

Tab. 13 Porovnání všech výsledků měření žlutého práškového plastu

Prášek žlutá					
Positector	Elcometer	Víř. Proudý	Ultrazvuk	SZ61	VHX - 6000
38,1	/	57,3	31,7	70	52,9

Na tomto vzorku byla nanosená vrstva velmi nepravidelná, což se podepsalo na výsledcích měření. Kvůli nepravidelnosti vrstvy je náročné určit přesnost technologií, v rozpětí hodnot z mikroskopů však leží pouze hodnota z měření vířivými proudy, i díky základnímu materiálu.

5.7 Duplexní povlak na oceli

Tab. 14 Porovnání všech výsledků měření duplexního povlaku

Duplex					
Positector		Elcometer		Víř. Proudý	
Žlutý prášek	Šedý prášek	Žlutý prášek	Šedý prášek	Žlutý prášek	Šedý prášek
113,3	242	106,3	195,8	117,9	239,3
Ultrazvuk		SZ61		VHX - 6000	
Žlutý prášek	Šedý prášek	Žlutý prášek	Šedý prášek	Žlutý prášek	Šedý prášek
33,3	/	84,3	121,1	53,2	72,8
			205,4	126	

Zde byl opět problém s tím, že první tři NDT metody měřily tloušťky obou povlaků najednou. Zároveň byly obě vrstvy nanoseny celkem nerovnoměrně a šedá vrstva měla velmi hrubý povrch, což bylo kvůli struktuře zvolené barvy a mohlo to ovlivnit odchylky a rozdíly v naměřených hodnotách. Na druhém mikroskopu se podařilo získat hodnoty velmi nízké, oproti ostatním měření, byl tam ale problém se zaostřením vrstev, což zkreslovalo pokládání kót pro měření tloušťky a hodnoty proto tedy vyšly takto. Nejlépe vychází pro tento typ povlaku a podkladu metoda magneticko-indukční, popř. také VPMT a metoda vířivých proudů. Není jimi ale možné měřit každou vrstvu zvlášť, v případě několikavrstvého povlaku.

5.8 Navařená vrstva na vzorku Inconel 625

Tab. 15 Porovnání všech výsledků měření návaru na vzorku Inconel 625

Návar						
Positector	Elcometer	Víř. Proudý	Ultrazvuk		SZ61	VHX - 6001
/	/	/	Vrchní strana	Spodní strana	3 638	3580
			13 901	10 151		
			3 750			

Z NDT metod toto měření bylo možné pouze přes ultrazvuk a muselo se provést z vrchní i spodní strany, tloušťka návaru se poté získala odečtením těchto hodnot. Výsledky z mikroskopů jsou v podobném rozsahu jako z ultrazvuku, rozdíly jsou dané sklonem stran svaru, tzn. nestejnou tloušťkou. Ultrazvuk je však pro měření svarů vhodný.

6 Bibliografie

[1] KREIBICH, V. HOCH, K. *Koroze a technologie povrchových úprav*. Druhé. ČVUT v Praze: Ediční středisko ČVUT, Praha 6, Zikova 4, 1991.

[2] KREIBICH, V. *MM Průmyslové spektrum: Povrchové úpravy* [online]. 10. ročník. 2010 [cit. 2023-08-11]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/povlaky-z-praskovych-plastu-bezchybne>

[3] SEDLÁČEK, A. *Povrcháři: Technologie vícevrstvých antikoročních povlaků na bázi zinku vytvářených metodou žárového nástřiku* [online]. 11. ročník. 5. číslo. 2017 [cit. 2023-08-11]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/201705_povrchari.pdf

[4] ČSN ISO 4518 *Kovové povlaky: měření tloušťky povlaku. Profilometrická metoda = Metallic coatings. Measurement of coating thickness. Profilometric method: měření tloušťky povlaku. Profilometrická metoda = Metallic coatings. Measurement of coating thickness. Profilometric method*. Praha: Český normalizační institut, 1980. Dostupné také z: https://techlib.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwY2AwNtlz0EUrE1JTEIOS00CTXqmJFmZJaYbGJqIpFsnJScD0k5yYAhop8PU1Cgg1dQm29IOemgPaGgM5D1UPdJ4peMIOfiGBAtTSwtLZgZmYzNQR8vdCbQRB6oSqY5wE2RgAe0bEGJgSi4WYZA90hPsp-AZ7K9gYmpoocdX5ZfdnilQkF-WU5idqUog4Kba4izhy7UnHjolEo83D4jMQYWYMc8VYJBwSI1xdwQdDF2srG5SZJFUqKJkUmghUkyMMkbmyQZGUgySOIORgqPnAwDaxow7aXKwr0jB_YeAICfXmU

[5] ČSN EN ISO 2808 *Nátěrové hmoty: stanovení tloušťky nátěru = Paints and varnishes - Determination of film thickness: stanovení tloušťky nátěru = Paints and varnishes - Determination of film thickness*. Praha: Český normalizační institut, 1999. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/wLTcGSGy>

[6] ČSN ISO 1463 *Kovové a oxidové povlaky: měření tloušťky povlaku. Mikroskopická metoda = Metallic and oxide coatings. Measurement of coating thickness. Microscopical method: měření tloušťky povlaku. Mikroskopická metoda = Metallic and oxide coatings. Measurement of coating thickness. Microscopical method.* Praha: Český normalizační institut, 1982. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/M86VHn4k>

[7] ČSN EN ISO 2177 *Kovové povlaky: měření tloušťky povlaku. Coulometrická metoda anodickým rozpouštěním = Metallic coatings - Measurement of coating thickness - Coulometric method by anodic dissolution: měření tloušťky povlaku. Coulometrická metoda anodickým rozpouštěním = Metallic coatings - Measurement of coating thickness - Coulometric method by anodic dissolution.* Praha: Český normalizační institut, 1994. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/cfgnHfrJ>

[8] DWIVEDI, Sandeep Kumar a Akhilesh VISHWAKARMA. *Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review: Materials Today: Proceedings* [online]. 3690-3698 [cit. 2023-06-28]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317328936>

[9] *WHAT IS NDT (NON-DESTRUCTIVE TESTING)?* [online]. Switzerland: Flyability, 2022 [cit. 2023-06-26]. Dostupné z: <https://www.flyability.com/ndt>

[10] *Ultrasonic testing: a guide.* Flyability [online]. Switzerland, 2022 [cit. 2023-06-26]. Dostupné z: <https://www.flyability.com/ultrasonic-testing>

[11] *Ultrasonic testing. EWP* [online]. [cit. 2023-06-26]. Dostupné z: https://www.wermac.org/others/ndt_ut.html

[12] *Magnetic induction measurement.* Dorken [online]. [cit. 2023-06-26]. Dostupné z: <https://www.doerken.com/global/en/services/coatings/glossary/magnetic-induction-measurement>

- [13] Amplitude sensitive eddy current. *Fischer* [online]. [cit. 2023-06-26]. Dostupné z: <https://www.helmut-fischer.com/measurement-technologies-in-use/amplitude-sensitive-eddy-current>
- [14] Eddy Current Array Tutorial: Introduction to Eddy Current Testing. *Olympus* [online]. [cit. 2023-06-26]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/eca-tutorial/intro/>
- [15] Eddy current testing. *TWI* [online]. [cit. 2023-06-26]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/eddy-current-testing-123#WhatIsEddyCurrentTesting>
- [16] Magnetic induction. *Fischer* [online]. [cit. 2023-06-26]. Dostupné z: <https://www.helmut-fischer.com/techniques/magnetic-induction>
- [17] *Defektoskopie 2018: 48. mezinárodní konference : sborník příspěvků = 48th international conference : proceedings*. V Brně: Vysoké učení technické v Brně, [2018]. ISBN 978-80-214-5684-6.
- [18] BOGNER, M. REINKE, N. A. *Process Optimization with Contactless Measurement* [online]. 22-23 [cit. 2023-06-26]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s35784-021-0352-9>
- [19] POSPÍŠILOVÁ, M. Bezkontaktní měření tloušťky povlaku. *Gamin* [online]. [cit. 2023-06-26]. Dostupné z: <https://www.gamin.cz/profil-spolecnosti/publikace/bezkontaktni-mereni-tloustky-povlaku/>
- [20] Bezkontaktní tloušťkoměr Coatmaster FLEX. *Proinex instruments* [online]. [cit. 2023-06-26]. Dostupné z: <https://www.proinex.cz/p/bezkontaktni-tloustkometer-coatmaster-flex>

[21] ČSN ISO 3497 *Kovové povlaky: měření tloušťky povlaku. Rentgenospektrometrické metody = Metallic coatings. Measurement of coating thickness. X-ray spectrometric methods: měření tloušťky povlaku. Rentgenospektrometrické metody = Metallic coatings. Measurement of coating thickness. X-ray spectrometric methods.* Praha: Český normalizační institut, 2002. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/rBFKDwc3>

[22] GIURLANI, W. G. BERRETTI, E. INNOCENTI, M. LAVACCHI, A. *Coating Thickness Determination Using X-ray Fluorescence Spectroscopy: Monte Carlo Simulations as an Alternative to the Use of Standards.* [online]. 2019 [cit. 2023-06-26]. ISSN 2079-6412. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/2/79>

[23] ČSN ISO 2178 *Nemagnetické povlaky na magnetických podkladech: měření tloušťky povlaku. Magnetická metoda = Non-magnetic coatings on magnetic substrates. Measurement of coating thickness. Magnetic method: měření tloušťky povlaku. Magnetická metoda = Non-magnetic coatings on magnetic substrates. Measurement of coating thickness. Magnetic method.* Praha: Český normalizační institut, 1994.

Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/x9Zn2JK3>

[24] Zkoušení materiálu: Defektoskopie a technologické zkoušky. *Informační systém Masarykovy univerzity* [online]. [cit. 2023-06-26]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/ped/podzim2021/TI1008/um/15_16_defektoskopie_tech_zk.pdf

[f](#)

7 Seznam tabulek

Tab. 1 Výsledky měření Vířivými proudy	44
Tab. 2 Výsledky měření Magneticko-indukční metodou	46
Tab. 3 Výsledky měření kombinací vířivoproudé a magnetické metody	48
Tab. 4 Výsledky měření Ultrazvukovou metodou	50
Tab. 5 Výsledky měření mikroskopem SZ61	52
Tab. 6 Výsledky měření mikroskopem VHX - 6000.....	56
Tab. 7 Porovnání všech výsledků měření smaltovaného vzorku.....	59
Tab. 8 Odečtené hodnoty	59
Tab. 9 Porovnání všech výsledků měření galvanicky pozinkované oceli.....	60
Tab. 10 Porovnání všech výsledků měření žárově pozinkované oceli.....	60
Tab. 11 Porovnání všech výsledků měření bílého práškového plastu s chemickou předúpravou povrchu	61
Tab. 12 Porovnání všech výsledků měření vrstvy anodické oxidace.....	61
Tab. 13 Porovnání všech výsledků měření žlutého práškového plastu.....	62
Tab. 14 Porovnání všech výsledků měření duplexního povlaku	62
Tab. 15 Porovnání všech výsledků měření návaru na vzorku Inconel 625.....	63

8 Seznam obrázků

Obrázek 1 UT odrazem [8].....	24
Obrázek 2 UT průchodem [21]	24
Obrázek 3 Schéma průběhu měření [9]	25
Obrázek 4 Schéma působení vířivých proudů [10].....	26
Obrázek 5 Schéma postupu měření vířivými proudy [11].....	27
Obrázek 6 Zkreslení výsledku podle tvaru povrchu [13]	29
Obrázek 7 Rozdílnost měření podle usazení sondy [13]	29
Obrázek 8 Široká tyč pro nižší rozptyl [13]	29
Obrázek 9 Dvoupólová tyč pro nižší rozptyl [13].....	29
Obrázek 10 Schéma měření Fázovou vířivoproudou metodou [14]	31
Obrázek 11 Schéma principu měření [16]	32
Obrázek 12 Reálný příklad měření tloušťky povlaku [15]	33
Obrázek 13 Rentgenová emisní metoda [18]	35
Obrázek 14 Rentgenová absorpční metoda [18].....	35
Obrázek 15 Vztah mezi plošnou hmotností a normalizovanou četností impulsů [18]	36
Obrázek 16 Strukturní schéma měření tloušťky rentgenovou metodou [14].....	37
Obrázek 17 Smaltovaný vzorek, černá strana je základní smalt	40
Obrázek 18 Smaltovaný vzorek bílá strana je krycí smalt	40
Obrázek 19 Galvanicky pozinkovaná ocel	40
Obrázek 20 Žárově pozinkovaná ocel.....	41
Obrázek 21 Bílý práškový plast na oceli s chemickou předúpravou povrchu	41
Obrázek 22 Anodická oxidace na slitině hliníku	41
Obrázek 23 Žlutý práškový plast na slitině hliníku	42
Obrázek 24 Duplexní povlak (žárový zinek a dvojitý povlak z práškového plastu) na oceli.....	42
Obrázek 25 Inconel 625 – niklový návar s příměsí bóru.....	42
Obrázek 26 Měřicí zařízení Karl Deutsch Leptoskop	43
Obrázek 27 NFe a Fe kalibrační vzorky	43
Obrázek 28 Měřicí zařízení Elcometer	45
Obrázek 29 Měřicí zařízení PosiTector 6000	47
Obrázek 30 Měřicí zařízení Olympus 72 DL Plus	49
Obrázek 31 Měřicí zařízení Olympus 38 DL Plus	49

Obrázek 32 Měření návaru z vrchní strany a) a ze spodní strany b)	50
Obrázek 33 Mikroskop SZ61	51
Obrázek 34 Rozměry bílého smaltu a) a rozměry černého smaltu b)	52
Obrázek 35 Zvětšený galvanicky pozinkovaný vzorek	53
Obrázek 36 Zvětšený žárově pozinkovaný vzorek	53
Obrázek 37 Rozměry bílého prášku a) a rozměry fosfátové mezivrstvy b)	53
Obrázek 38 Rozměry žlutého práškového plastu	53
Obrázek 39 Rozměry šedého práškového plastu a) a Rozměry žlutého práškového plastu b)	54
Obrázek 40 Rozměry navařené vrstvy	54
Obrázek 41 Zvětšený vzorek s anodickou oxidací	54
Obrázek 42 Mikroskop VHX - 6000	55
Obrázek 43 Využité zvětšovací objektivy	55
Obrázek 44 Zvětšený galvanicky pozinkovaný vzorek	56
Obrázek 45 Rozměry žárově pozinkovaného vzorku	57
Obrázek 46 Rozměry smaltovaného vzorku	57
Obrázek 47 Rozměry vzorku s návarem	57
Obrázek 48 Rozměry vzorku s duplexním povlakem	58
Obrázek 49 Rozměry vzorku s bílým práškovým plastem	58
Obrázek 50 Rozměry vzorku se žlutým práškovým plastem	58
Obrázek 51 Zvětšený vzorek s anodickou oxidací	58