

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ**

DISERTAČNÍ PRÁCE

2021

Ing. Lukáš Muzika

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2031 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303V015 Inženýrství speciálních technologií a materiálů

DISERTAČNÍ PRÁCE

Infračervené nedestruktivní testování povlaků

Autor: **Ing. Lukáš Muzika**

Školitel: **prof. Ing. Milan Honner, Ph.D.**

Konzultant specialista: **Ing. Michal Švantner, Ph.D.**

Akademický rok 2020/2021

PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ

Předkládám tímto k posouzení disertační práci zpracovanou na téma:

Infračervené nedestruktivní testování povlaků

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, dle Studijního a zkušebního řádu Západočeské univerzity v Plzni, pod odborným dohledem školitele a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce. Disertační práce byla řešena v rámci projektu ERDF „LABIR-PAV/Pre-application research of infrared technologies“ Reg. No. CZ.02.1.01./0.0/0.0/18_069/0010018 a projektu SGS-2019-008.

V Plzni dne:.....

.....

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval prof. Ing. M. Honnerovi, Ph.D., za vedení práce, rady a zkušenosti, které mi pomohly při přípravě disertační práce. Děkuji rovněž svému konzultantovi specialistovi Ing. M. Švantnerovi, Ph.D., za cenné diskuze a podporu při tvorbě této práce.

Dále bych chtěl poděkovat ostatním kolegům, kteří mi byli nápomocni při řešení některých problémů a přispěli k tomu, že tato práce vznikla.

ANOTACE

AUTOR	Příjmení (včetně titulů) Ing. Muzika	Jméno Lukáš
STUDIJNÍ OBOR	Inženýrství speciálních technologií a materiálů	
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) prof. Ing. Honner, Ph.D.	Jméno Milan
PRACOVISŤE VEDOUcíHO	NTC	
DRUH PRÁCE	disertační	
NÁZEV PRÁCE	Infračervené nedestruktivní testování povlaků	

Fakulta: Strojní

Katedra: Inženýrství speciálních technologií a materiálů

Rok odevzdání: 2021

Počet stránek (A4 a ekvivalentů A4)

Celkem	124	Textová část	104	Grafická část	20
---------------	-----	---------------------	-----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL, POZNATKY A PŘÍNOSY	Práce se zabývala infračerveným nedestruktivním testováním (IRNDT) tloušťky povlaků. Cílem práce bylo ověření použitelnosti standardních IRNDT technik pro testování povlaků a vytvoření nového algoritmu vyhodnocení a nového způsobu buzení. Nový způsob buzení i vyhodnocení měl přinést lepší výsledky z pohledu rychlosti a přesnosti měření oproti standardně používaným technikám a vyhodnocením. Problematika byla řešena pomocí simulací i reálných experimentů. Výsledky ukázaly, že standardní techniky lze pro testování povlaků použít, ale platí pro ně velké množství omezení. Nově navržený způsob buzení a vyhodnocení tato omezení potlačuje. Výsledky ukázaly, že IRNDT lze použít pro testování tloušťky povlaků.
KLÍČOVÁ SLOVA	IRNDT, aktivní termografie, nedestruktivní testování, tloušťka povlaků

SUMMARY

AUTHOR	Surname (including of Degrees) Ing. Muzika	Name Lukáš
FIELD OF STUDY	Engineering of Special Technologies and Materials	
SUPERVISOR	Surname (including of Degrees) prof. Ing. Honner, Ph.D.	Name Milan
INSTITUTION	NTC	
TYPE OF WORK	dissertation	
TITLE OF THE WORK	Infrared non-destructive testing of coatings	

Faculty: Mechanical Engineering

Department: Engineering of Special Technologies and Materials

Submitted in: 2021

Number of pages (A4 a eq. A4)

Totally	124		Text part	104		Graphical part	20
----------------	-----	--	------------------	-----	--	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis dealt with infrared nondestructive testing (IRNDT) of coating thickness. Thesis goals were a verification of IRNDT applicability for a coating thickness testing, a new evaluation algorithm design and a new excitation design. The evaluation algorithm and the excitation should improve measurement time and accuracy. The topic was being solved via simulation and experimental work. Results showed that standard IRNDT techniques could be used only with major limitations. Those limitations can be suppressed with the new evaluation algorithm and the new excitation procedure. In general, the results proved applicability of IRNDT for a coating thickness testing.
KEY WORDS	IRNDT, active thermography, nondestructive testing, coating thickness

Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	11
Seznam zkratk	12
Seznam veličin	14
1 Úvod.....	15
2 Současný stav poznání zkoumané problematiky.....	17
2.1 Technologie nanášení stříkaných povlaků	17
2.2 Nedestruktivní testování povlaků	20
2.2.1 Metody nedestruktivního měření tloušťky povlaků	20
2.2.2 Metody nedestruktivního detekování vad	25
2.3 Infračervené nedestruktivní testování.....	30
2.3.1 Uspořádání.....	30
2.3.2 Zdroje a způsoby buzení	32
2.3.3 Detekční systémy	34
2.3.4 Algoritmy vyhodnocení.....	35
2.4 Infračervené nedestruktivní testování povlaků	41
2.4.1 Flash pulse termografie povlaků.....	41
2.4.2 Halogen lock-in termografie povlaků.....	44
2.4.3 Laserová termografie povlaků	45
2.5 Shrnutí současného stavu	47
3 Cíle disertační práce	52
4 Metody zpracování.....	53
4.1 Sledované funkční vlastnosti.....	54
4.2 Vzorky.....	59
4.3 Metody termografického testování	61
4.3.1 Uspořádání.....	62
4.3.2 Zdroje a způsob buzení	63
4.3.3 Detekční systém.....	68
4.3.4 Algoritmy vyhodnocení.....	69
4.4 Popis experimentů	73
4.4.1 Ověření vhodnosti nového typu vyhodnocení.....	73
4.4.2 Návrh nového systému na bázi laserové termografie	80
4.4.3 Ověření funkčních vlastností laserového systému	83

5	Výsledky.....	85
5.1	Vlastnosti nové P-function metody.....	85
5.2	Nový testovací systém na bázi laserové termografie	99
5.3	Funkční vlastnosti vytvořeného laserového systému	110
6	Závěr	115
7	Citovaná literatura.....	117

Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma IRNDT měření.....	30
Obr. 2: Prostorová uspořádání IRNDT měření	31
Obr. 3: Odstranění rostoucího trendu při lock-in měření	37
Obr. 4: Four Bucket Method	38
Obr. 5: Rozmístění bodů (referenční měření) pro určení přesnosti stanovení tloušťky.....	55
Obr. 6: Ukázka výběru oblastí s rozdílnou tloušťkou	56
Obr. 7: Ukázka určení SPT (SPT=1,08)	58
Obr. 8: Schematicky znázorněný vzorek: a) vzorek se stupňovitě se zvyšující tloušťkou b) vzorek ve středu s nejmenší tloušťkou	60
Obr. 9: Metalografické výbrusy: a) TWAS-CrFe, b) HVOF-WCCoCr, c) FS-SnSbCu; měřítko 50 μm	61
Obr. 10: Obecné prostorové uspořádání měření.....	62
Obr. 11: Schematické znázornění uspořádání vzorek-budící zdroj.....	63
Obr. 12: Fotografie uspořádání a) FPT, b) HLIT, c) LPT.....	64
Obr. 13: Porovnání pořadí bodů při různých způsobech optimalizace: a) standardní skenování, b) Point Base Optimization, c) Laser Shifting	66
Obr. 14: Rozdíl mezi a) plným a b) volným rastrem	67
Obr. 15: Distribuce bodů a) pomocí Poissonových disků a b) pomocí volného rastru	68
Obr. 16: Nákres vzorku použitého pro simulaci (řez).....	74
Obr. 17: Rozdělení vzorku LPS-S1-P1 na 10 oblastí (vyhodnocení FFT-phase)	79
Obr. 18: Průběhy teplotních odezev a) standardní zobrazení, b) logaritmické zobrazení	85
Obr. 19: Porovnání zpracovaných teplotních odezev z ploch tlouštěk 5 a 35 μm při a) FFT-phase a b) P-function	86
Obr. 20: Porovnání výsledků a) FFT-phase (snímek 125) a b) P-function (parametr 0,4) při simulaci na vzorku 1-50 μm	87
Obr. 21: P-function simulace vzorku s povlakem 1-1000 μm	87
Obr. 22: Závislost změny sledovaného parametru na tloušťce: a) závislost hodnoty fáze na tloušťce a b) závislost charakteristického času na tloušťce	88
Obr. 23: Vliv a) difuzivity (při konstantní vodivosti) a b) vodivosti (při konstantní difuzivitě) na P-function	88
Obr. 24: Výkonové rozložení pod flash lampou měřené wattmetrem	89
Obr. 25: Změna fáze v závislosti na umístění pod flash lampou v ose y	90
Obr. 26: Změna fáze v závislosti na položení vzorku (otočení o 180°).....	90
Obr. 27: Změna charakteristického času v závislosti na umístění pod flash lampou v ose y ..	91
Obr. 28: Změna charakteristického času v závislosti na položení vzorku (otočení o 180°)	91
Obr. 29: Závislost změny sledovaného parametru na tloušťce při FPT vzorku CrFe-S1-P1: a) závislost fáze-tloušťka (FFT-phase), b) závislost fáze-charakteristický čas (P-function).....	93
Obr. 30: Grafické vyjádření rozdílů v určení tloušťce pro vzorek LPS-S1-P1 odečtené různými způsoby.....	96
Obr. 31: Grafické vyjádření rozdílů v určení tloušťce pro vzorek LPS-S2-P2 odečtené různými způsoby.....	97
Obr. 32: Průběhy teplotních odezev při lock-in buzení vzorku s plochami tlouštěk 5 a 35 μm	98
Obr. 33: 2HSC vyhodnocení vzorku CrFe-S1-P1	98

Obr. 34: Fotografie laserového systému: a) umístění v prostoru, b) záběr na skenovací hlavu, c) záběr na chlazení	101
Obr. 35: Grafické rozhraní softwaru pro vytvoření skenovacích bodů	102
Obr. 36: Srovnání teoretických rychlostí měření u laserové termografie	103
Obr. 37: Porovnání skenování pomocí řídkého rastru a Poissonových disků: a) rozmístění defektů (ploch s rozdílnou tloušťkou povlaku), b) detekce pomocí Poissonových disků, c) detekce pomocí řídkého rastru	104
Obr. 38: Výsledky laserové termografie při použití rozdílných technik skenování.....	106
Obr. 39: Porovnání interpolovaného a standardního zobrazení výsledků laserové termografie	108
Obr. 40: Vznik přechodových oblastí	109

Seznam tabulek

Tab. 1: Používané zdroje buzení [17]	32
Tab. 2: Rozdělení IR pásem	35
Tab. 3: Přehled IRNDT metod použitých ke zjištění defektů v povlacích (přehled současného stavu)	48
Tab. 4: Přehled IRNDT metod použitých k určení tloušťky (přehled současného stavu).....	49
Tab. 5: Vstupní data pro provedení ANOVy a její výsledky – opakovaná měření vzorky CrFe-S1-P1	57
Tab. 6: Přehledová tabulka vzorků	61
Tab. 7: Popis parametrů použitých laserových systémů.....	65
Tab. 8: Znázornění umístění wattmetru pod flash lampou, pozice v cm.....	76
Tab. 9: Ukázka hodnocení závislosti vyhodnocení na pozici vzorku pod zdrojem buzení.....	76
Tab. 10: Technické parametry laserů použitých pro nalezení vhodného výkonu laseru.....	81
Tab. 11: Výsledky měření vzorku CrFe-S1-P1 technikou FPT	93
Tab. 12: FPT měření vzorků WCCoCr, SnSbCu, CrFe a LPS	94
Tab. 13: Výsledky citlivostí pro různé povlaky	94
Tab. 14: Rozdíly v odhadu tloušťek pro vzorek 1	95
Tab. 15: Rozdíly v odhadu tloušťek pro vzorek 2	96
Tab. 16: Přehledová srovnávací tabulka jednotlivých metod vyhodnocení	96
Tab. 17: Ohřev materiálu při působení různých laserů	100
Tab. 18: Závislost změny polohy vzorku pod laserem.....	105
Tab. 19: Počet bodů na ploše při použití rozdílných technik skenování, měření vzorku FeCr-S1-P1	105
Tab. 20: Porovnání rozdílného typu skenování.....	107
Tab. 21: Výsledky P-function a FFT-phase při použití UV laseru	110
Tab. 22: Výsledky P-function a FFT při použití zeleného laseru	111
Tab. 23: Citlivosti měření při laserové termografii	112
Tab. 24: Souhrn výsledků LPT a FPT	113

Seznam zkratk

DFT	diskrétní Fourierova transformace (discrete Fourier transform)
ET	metoda vířivých proudů (eddy current testing)
FBH	neprůchozí díra (flat bottom hole)
FFT	rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier transform)
FIR	vzdálené IR záření (far infrared)
FPT	flash pulzní termografie (flash pulse thermography)
HLIT	halogen lock-in termografie (halogen lock-in thermography)
HOS	higher-order statistics
IR	infračervené (infrared)
IRNDT	infračervené nedestruktivní testování (infrared nondestructive testing)
LIT	lock-in termografie (lock-in thermography)
LPT	laserová pulzní termografie (laser pulse thermography)
LWIR	IR záření dlouhých vlnových délek (long wave infrared)
MT	magnetická metoda prášková (magnetic testing)
MWIR	IR záření středních vlnových délek (mid wave infrared)
NIR	blízké infračervené záření (near infrared)
NETD	teplotní citlivost (noise equivalent temperature difference)
NDT	nedestruktivní testování (nondestructive testing)
TBC	tepelná bariéra (thermal barrier coating)
TSR	metoda TSR (thermographic signal reconstruction)
TT	termografické testování (thermal testing)
PCA	principal component analysis
PCT	principal component thermography
PT	kapilární metoda (penetration testing)
PPT	metoda PPT (pulse phase thermography)
RT	radiografická metoda (radiographic testing)
RTC	karta pro zpracování příkazů v reálném čase
RWT	zbývající tloušťka stěny (remaining wall thickness)
SLIM	standardní lock-in metoda (standard lock-in method)
SVD	singulární rozklad (singular value decomposition)
SWIR	IR záření krátkých vlnových délek (short wave infrared)
TBC	povlak typu teplené bariéry (thermal barrier coating)

- UT ultrazvuková metoda (ultrasound testing)
- VT vizuální metoda (visual testing)

Seznam veličin

A	amplituda
CD	doba chladnutí – Cooling Duration (ms)
c_p	tepelná kapacita (J/(kg·K))
E	rozpoznatelnost (-)
ED	doba buzení – Excitation Duration (ms)
f	frekvence (Hz)
HAZ	teplem ovlivněná oblast – Heat Affected Zone (mm)
MR	maximální rozlišení (μm)
PB	počet bodů (-)
PP	počet pixelů (px)
PR	prostorové rozlišení (cm^{-2})
Q	energie (J)
R	rychlost měření (cm^2/s)
RWT	zbytková tloušťka stěny – Remaining Wall Thickness (mm)
S	plocha (m^2)
SPT	směrnice parametr tloušťka (-)
t	čas (s)
t_m	doba měření (s)
t_t	nejrychlejší teoretická doba měření (s)
T	teplota ($^{\circ}\text{C}$)
z	tloušťka (mm)
α	tepelná difuzivita (mm^2/s)
δ	přesnost stanovení tloušťky (%)
λ	tepelná vodivost ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)
Λ	vlnová délka (nm)
ρ	hustota (kg/m^3)
Φ	fáze (rad)

1 Úvod

Infračervené nedestruktivní testování (IRNDT) je moderní inspekční metoda založená na externím tepelném vybuzení testovaného objektu a sledování vzniklého tepelného procesu pomocí infračervené kamery. Tento tepelný proces je ovlivněn materiálovými diskontinuitami, mezi které patří například vměstky, delaminace, trhliny, variace tloušťky a další. Změna v tepelném přenosu může být detekována infračervenou kamerou a po následném počítačovém zpracování je možné indikovat diskontinuitu (vadu).

Hlavní výhodou infračerveného nedestruktivního testování je, že se jedná o bezkontaktní, nedestruktivní, plošnou a rychlou defektoskopickou metodu. Tyto výhody dělají z infračerveného nedestruktivního testování velmi zajímavou metodou pro testování materiálů. IRNDT se začíná využívat jako standardní inspekční metoda v mnoha průmyslových odvětvích. Běžně se například používá pro testování kompozitních materiálů a testování solárních článků. Využití infračerveného nedestruktivního testování se jeví jako zajímavé i pro účely zjišťování tloušťky povlaků.

Tloušťka naneseného povlaku a výskyt vad (trhliny, delaminace, apod.) totiž ovlivňuje výsledné vlastnosti povlaku. Při nedodržení kvality mohou povlaky přestávat plnit svoji funkci (např. zvýšení odolnosti základního materiálu proti korozi, vysokým teplotám apod.) a může docházet k selhání povlakovaných dílů, což v konečném důsledku může vést k ekonomickým ztrátám, případně i ztrátám na životech.

Kvalita povlaků se proto intenzivně testuje. Většinu technik nedestruktivního testování lze použít pouze na určitý typ materiálů povlaku a substrátu. Například elektromagnetický měřicí přístroj pro měření tloušťky lze použít pouze pro materiály, které mají substrát z magneticky vodivého materiálu. Zpravidla dnes používané techniky nedestruktivního testování jsou kontaktní, umožňují detekovat tloušťku pouze z jednoho bodu a nejsou schopné detekovat další vady v materiálu.

Infračervené nedestruktivní testování by mohlo být univerzální metodou testování povlaků. Hlavní výhoda spočívá v principu metody založené na šíření tepla, které probíhá ve všech materiálech. Současně je během jednoho měření možné plošně bezkontaktně detekovat tloušťku i vady povlaku.

Tato disertační práce se zaměřuje především na infračervené nedestruktivní testování tloušťky povlaků nanášených technologiemi nástřiků v typických tloušťkách desítek až stovek μm .

Hlavním cílem práce je ověření možnosti použití standardních technik infračerveného testování pro zjišťování tloušťky povlaků a vytvoření nového způsobu měření a vyhodnocení, který má ambice překonat v současnosti nejlepší techniky infračerveného nedestruktivního testování používané na světových výzkumných pracovištích k analýzám tloušťky povlaků.

Práce je členěna do několika kapitol, kde první kapitolou je přehled současného stavu s krátkým popisem využití povlaků, technologií jejich výroby a s rozбором použití různých metod nedestruktivního testování povlaků v současnosti. Na část popisující současný stav infračervených metod nedestruktivního testování přímo navazují stanovené cíle práce. Další kapitoly pak popisují zvolené metody zpracování a dosažené výsledky. Závěrečná kapitola shrnuje nejdůležitější získané poznatky a popisuje vytvořené měřicí systémy.

2 Současný stav poznání zkoumané problematiky

V současné době se v praxi využívá mnoho velmi odlišných povlaků. Liší se jak složením, tak technologií nanášení. Pro každou technologii je typická jiná tloušťka povlaku. Materiálové složení a tloušťka (povlaku a substrátu) ovlivňují tepelné procesy v dané kombinaci povlak-substrát, a tím použitelnost různých metod infračerveného nedestruktivního testování. Z tohoto pohledu lze očekávat například velké rozdíly v testování povlaků sloužící jako tepelné bariéry od ostatních typů povlaků.

2.1 Technologie nanášení stříkaných povlaků

Do této skupiny technologií nanášení patří především žárové nástřiky, které je podle technické realizace možné rozdělit na žárový nástřik plamenem, nástřik detonační vlnou, vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF, HVAF), studený kinetický nástřik, nástřik elektrickým obloukem a plasmatický nástřik [1].

Nástřik plamenem

Nástřik plamenem je nejstarší technika z rodiny žárových nástřiků. Byla vyvinuta v roce 1917 [2]. Původně byl tento proces používán pro kovy s nízkou teplotou tavení (cín, olovo). Princip je takový, že smísením palivového plynu a kyslíku je vytvořen plamen a v procesní hlavě se přidává prášek (materiál povlaku). Tento prášek se roztaví a urychlí pomocí procesního plynu směrem k substrátu. Kromě prášku se může materiál povlaku nanášet ve formě tyčí nebo drátů. V tomto případě vypadá procesní hlava jinak, ale princip zůstává stejný. Poměr kyslíku k palivu je 1:1 až 1,1:1 [2]. Teplota plamene je mezi 3000 a 3500 K [2]. Částičky prášku jsou v rozmezí 5–100 μm s tím, že za minutu se spotřebuje 50–100 g prášku [2]. Používané tyče/dráty mají průměr 3–6 mm [2]. Vzdálenost hlavy od substrátu je 120–250 mm [2]. Porozita povlaku je 10–20 % a běžně se pohybuje tloušťka vytvořeného povlaku mezi 1000–2500 μm [2]. Adheze povlaku se typicky pohybuje mezi 15 až 30 MPa. Touto technologií se stříkají keramiky Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 ale i kovy Al, Mo, Zn a různé další slitiny. Mezi výhody patří vysoká soudržnost se základním materiálem, jednoduchost zhotovení vrstvy, možnost využití širokého množství rozličných prášků (materiálu na povlak). Mezi nevýhody patří nutnost využití vysokých teplot, a proto dochází k prohřátí substrátu, které může vést ke vzniku napětí a případně deformací. Další nevýhodou je, že pro použití na velkých součástech je nutné použití polohovadla k zajištění rovnoměrnosti vrstvy.

Plasmatický nástřik

Při plasmatickém nástřiku se používá hořák složený z wolframové katody a měděné anody, mezi nimiž hoří elektrický oblouk. Zde dochází k ionizování plynu (argon, dusík, vodík) za vzniku plasmatického prostředí, do kterého je podáván materiál ve formě prášku. Tento prášek se v plazmatu roztaví a následně je urychlen směrem k povrchu základního materiálu v proudu plynů [1]. Dosažená teplota v procesní hlavě je okolo 14000 K [2]. Velikost prášku je 20–90 μm a nejčastěji se jedná o keramiku [2]. Vzdálenost hlavy od substrátu je 60–130 mm. Porozita povlaku se pohybuje mezi 1–7 % a tloušťka v rozmezí 300–1500 μm [2]. Adheze je 15–70 MPa v závislosti na materiálu. Výhodou je možnost aplikování různých materiálů a to i keramik, nízké náklady a nízká pórovitost. Povlaky mohou vykazovat nižší soudržnost se substrátem a křehké chování.

Nástřik elektrickým obloukem

Způsob nástřiku elektrickým obloukem je založen na procesu, kdy mezi dvěma dráty hoří elektrický oblouk, který je roztavuje. Roztavený drát je následně pomocí plynu (stlačeného vzduchu) urychlen k substrátu. Přídavným materiálem mohou být pouze elektricky vodivé materiály. Jedná se o dráty či plněné tyčinky, mezi nimiž je možné vytvořit elektrický oblouk. Teplota oblouku se typicky pohybuje okolo 4000 K [1] může však dosáhnout až 6100 K [2]. Průměr drátu je 1,6–5 mm [2]. Adheze se pohybuje v hodnotách 10–30 MPa pro Zn a Al, po NiAl může dosáhnout až 70 MPa [2]. Porozita se pohybuje okolo 10 % a tloušťka povlaku 100–2000 μm [2]. Výhodou nástřiku elektrickým obloukem je nízká cena přídavných materiálů, jednoduchý nástřik velkých ploch a možnost použití i materiálů pro svařování. Hlavní nevýhodou je, že stříkaný materiál musí být elektricky vodivý.

Nástřik detonační vlnou

Materiál ve formě prášku je společně se směsí ethynu (acetylen) a kyslíku přiveden do pracovní komory. Tento produkt je poté zapalován svíčkou v určených časových intervalech (1–15 krát za sekundu) [2]. Jedná se o jednu z rychlejších technik nástřiku. Dosahuje se rychlostí vyšších než 750 m/s. Teplota plamene se pohybuje v rozmezí 3000–3400 K [2]. Adheze povlaku může být vyšší než 70 MPa. Tloušťka povlaku bývá desetiny mm. Porozita se pohybuje okolo 1 %. Mezi výhody patří vysoká adheze, nízká porozita. Hlavní nevýhodou je, že pro stříkání je nutná speciální místnost, není tedy možné stříkat v provozu.

Vysokorychlostní nástřik plamenem

Princip HVOF vychází z principu nástřiku detonační vlnou, pouze se liší způsob hoření kyslíku. Při HVOF je hoření kontinuální kdežto u detonační vlny pulzní. Palivo je v plynné nebo kapalné formě přivedeno do komory [2]. Dojde k zapálení, poté se přidá prášek a následuje vlastní nanášení. Dosahuje se teplot okolo 3000 K a rychlosti 2000 m/s [2]. Porozita je menší než 1 % a tloušťka povlaku se pohybuje od 100 do 300 μm . Kromě HVOF se využívá i varianta HVOF, kde se místo kyslíku využívá pro hoření stlačený vzduch. Při HVOF se dosahuje nižších teplot hoření 2100 K, což je výhodné pro nanášení kovů, kde nedochází v takové míře k oxidaci [3]. Výhodou je vysoká soudržnost, vysoká hustota a nízká pórovitost. Nevýhodou je, že nelze nanášet keramiky.

Studený nástřik

Plyn (N_2 , He) je stlačen na 3,5 MPa a zahřán na 873 K pomocí ohřívací cívky [2]. Poté se tento plyn přivede na trysku (Lavalův typ), kde dojde k expanzi plynu a tím k urychlení [2]. Prášek je přiveden do trysky a jeho částí jsou expanzí zrychleny na substrát. Díky relativně nízkým teplotám nelze nanášet všechny typy materiálů. Lze využívat pouze prášky, které se mohou plasticky deformovat [2]. Používanými materiály jsou tedy kovy a jejich slitiny. Adheze se pohybuje v rozmezí 26–62 MPa. Tloušťka vrstev se pohybuje ve stovkách μm [2]. Výhodou je vysoká adheze k substrátu a nízká porozita. Nevýhodou je možnost nanášet pouze materiály, které lze plasticky deformovat.

Souhrn

V současné době se využívá mnoho různých technologií stříkání a aplikace povlaků se vyskytuje téměř v každém odvětví průmyslu. Mezi často užívané povlaky se řadí povlaky odolné vůči působení vysokých teplot (motory, lopatky, spalovací komory), povlaky odolné vůči opotřebení (ložiska, hřídele), odolné proti korozi (potrubí, nástroje), povlaky odolné vůči průrazu elektrického proud (různé izolátory), odolné proti chemikáliím (nádoby v chemickém průmyslu) a mnoho dalších. Různé využití povlaků klade nároky na jejich kvalitu. Problémem je zejména tloušťka vrstvy. V případě nedostatečné tloušťky totiž povlak nemusí správně plnit funkci, pro kterou byl vyroben.

2.2 Nedestruktivní testování povlaků

Analýza současného stavu problematiky se dále zaměřila na metody nedestruktivního testování (NDT) povlaků.

Mezi často používané techniky NDT patří vizuální metoda (VT), kapilární metoda (PT), magnetická metoda prášková (MT), radiografická metoda (RT), ultrazvuková metoda (UT), metoda vířivých proudů (ET), infračervená termografie (TT). Norma ČSN EN ISO 9712 (Nedestruktivní zkoušení - Kvalifikace a certifikace pracovníků NDT) uvádí ve výčtu technik kromě výše jmenovaných ještě navíc zkoušení akustickou emisí, zkoušení těsnosti a zkoušení tenzometrické. Kromě standardních NDT technik jsou vyvíjeny a používány i jiné okrajové NDT techniky [4].

V této práci je každá ze standardních metod krátce představena a jsou popsány výhody a nevýhody jednotlivých technik.

Vadou mohou být v případě povlaku inkluze, trhliny, apod. Jako vadu můžeme brát i nevhodnou tloušťku povlaku (především menší tloušťku povlaku než má být). Na specifickou činnost, jako je měření tloušťky, jsou vytvořeny speciální techniky, které mohou využívat i některý z uvedených standardních principů (např. měření pomocí ultrazvuku). V následujícím přehledu jsou konkrétní techniky měření tloušťky povlaku uvedeny jako první a poté následují techniky použitelné pro zachycení dalších vad.

2.2.1 Metody nedestruktivního měření tloušťky povlaků

Pro měření tloušťky povlaků lze využít následující metody: metodu zpětného rozptylu záření beta, metodu vířivých proudů, magneticko-indukční metodu, magnetickou metodu, metodu na principech měření elektrického odporu, metodu X-ray fluorescence, metodu ultrazvukovou. Metodám tepelného testování k měření tloušťky povlaků byla věnována zvláštní pozornost a je jim věnována celá kapitola 2.4.

Metoda zpětného rozptylu záření beta (Beta-backscatter measuring method)

Tato technika funguje na principu vysílání beta záření, které proniká na povrch substrátu. Beta záření interaguje s atomy povlaku a substrátu. Měří se odražené elektrony pomocí Geiger-Mullerova detektoru. Metoda je definována v DIN EN ISO 3543, ASTM B567a [5]. Aby bylo možné metodu použít, je nutné, aby se atomové číslo substrátu a povlaku lišilo alespoň o 20 % [6]. Velmi častou aplikací je měření tloušťky povlaku (Cu) na tištěných deskách [6]. Jedná se o kontaktní metodu.

Výhody:

- Měření tloušťky povlaku různých materiálů
- Čistá metoda (není potřeba žádná speciální úprava pro měření)
- Snadno přenositelné

Nevýhody:

- Kontaktní technika
- Atomové číslo substrátu a povlaku se musí lišit alespoň o 20 %. Problém je měřit například cín na mědi.

Metoda vířivých proudů - amplituda (Eddy Current Method, amplitude sensitive)

Vířivé proudy se naindukují do substrátu. Magnetické pole vzniklé vířivými proudy působí proti proudům na cívce. Tím se změní napětí. Toto napětí je úměrné tloušťce povlaku. Musí být definována korelační funkce. Nevýhodou je, že povlak musí být elektricky a magneticky nevodivý a substrát musí být elektricky vodivý kov. Metoda je definovaná v ISO 2360 a ASTM 7091 [5].

Výhody:

- Rychlé, levné
- Čistá metoda (není potřeba žádná speciální úprava pro měření)
- Jednoduché na obsluhu
- Ruční přístroj

Nevýhody:

- Omezené použití z pohledu materiálů, lze měřit elektricky nevodivé povlaky na neželezných vodivých substrátech
- Kontaktní technika

Metoda vířivých proudů – fáze (Eddy Current Method, phase sensitive)

Vířivé proudy se naindukují do substrátu. Magnetické pole vzniklé vířivými proudy (frekvence okolo 3 MHz [7]) jde proti proudům na cívce, na kterém je kromě budicího vinutí i měřicí vinutí. Vyhodnocuje se změna fáze mezi proudy. Je potřebné realizovat korelaci mezi rozdílem fází a tloušťkou povlaku. Metoda je definovaná v ISO 21968 [5].

Výhody:

- Rychlé, levné
- Čistá metoda (není potřeba žádná speciální úprava pro měření)
- Jednoduché na obsluhu
- Ruční přístroj

Nevýhody:

- Omezené použití z pohledu materiálů, lze měřit elektricky vodivé povlaky na jakémkoliv substrátu (ale rozdíl v el. vodivosti musí být alespoň 20 %)
- Kontaktní technika

Magneticky indukční metoda (Magnetic induction method)

Excitační proud generuje nízkofrekvenční magnetické pole se silou, která odpovídá vzdálenosti mezi sondou a základním materiálem. Měřicí cívka měří magnetické pole. V nástroji se získaný měřicí signál převádí na hodnoty tloušťky povlaku přes charakteristickou výstupní funkci sondy, tj. korelaci mezi signálem sondy a tloušťkou povlaku. Povlak musí být nemagnetizovatelný na magnetizovatelném substrátu [5].

Výhody:

- Rychlé, levné
- Čistá metoda (není potřeba žádná speciální úprava pro měření)
- Jednoduché na obsluhu
- Ruční přístroj

Nevýhody:

- Omezené použití z pohledu materiálů lze měřit nemagnetické materiály na železných kovech nebo magnetické materiály na nemagnetických
- Některé materiály nelze od sebe rozeznat (například zinek na oceli, v tomto případě je změřena jak tloušťka oceli, tak zinku)
- Kontaktní technika

Magnetická metoda (Magnetic method)

Trvalý magnet vytváří konstantní magnetické pole se silou, která odpovídá tloušťce měřeného povlaku (vzdálenosti mezi měřicí sondou a základním materiálem). Síla magnetického pole se měří vhodným snímačem (typicky Halloovou sondou) [7]. Měřený signál

se poté přemění na hodnotu tloušťky povlaku pomocí funkční korelace. Metoda je definovaná v ISO 2178 [5].

Výhody:

- Rychlé, levné
- Čistá metoda (není potřeba žádná speciální úprava pro měření)
- Jednoduché na obsluhu
- Ruční přístroj

Nevýhody:

- Omezené použití z pohledu materiálů, lze měřit nemagnetické materiály na ocelích nebo železe a niklové povlaky na neželezných kovech
- Kontaktní technika

Měření elektrického odporu (Micro resistance method)

Pro měření se využívá čtyřvodičová metoda (4 elektrody). Elektrody jsou umístěny v linii. Vnější elektrody dodávají do povlaku proud. Na vnitřních elektrodách se měří napětí. Napětí je nepřímo úměrné tloušťce povlaku. Materiál povlaku musí být elektricky vodivý a substrát elektricky nevodivý. Tento typ měření lze použít například pro měření tloušťky mědi na deskách plošných spojů. Metoda je definovaná v DIN EN 1457 [5].

Výhody:

- Jednoduché na obsluhu
- Čistá metoda (není potřeba žádná speciální úprava pro měření)

Nevýhody:

- Kontaktní
- Měření pouze elektricky vodivých materiálů na elektricky nevodivých (typické využití je pro testování tloušťky mědi na deskách plošných spojů a to i oboustranných desek)

X-Ray fluorescence

Rentgenová fluorescenční analýza je založena na základě, že když jsou atomy ve vzorku materiálu excitovány zářením X (primárním), uvolní se elektrony z nejnvnitřnější vrstvy a výsledné volné pozice se potom naplní elektrony z vnějších nábojů [5]. Během těchto přechodů se vytváří fluorescenční záření, které je charakteristické pro každý prvek. Toto záření je zachyceno detektorem a poskytuje informace o složení vzorku (a tloušťce) [5].

Výhody:

- Možnost měření jak tloušťky, tak chemického složení.
- Čistá metoda (není potřeba žádná speciální úprava pro měření)
- Bezkontaktní

Nevýhody:

- Měřicí zařízení je standardně v boxu, nelze tedy vzít na inspekci v provozu
- Složitost na obsluhu
- Velmi nákladné

Ultrazvukové měření (Ultrasound measurement)

Sonda přístroje obsahuje ultrazvukový převodník, který vysílá impuls přes vrstvu. Puls se odráží zpět od substrátu ke snímači a přeměňuje se na elektrický signál. Z echa lze určit tloušťky povlaku. V některých případech lze měřit jednotlivé vrstvy ve vícevrstevném systému. Tloušťka je typicky změřena s přesností $\pm 3\%$ [8]. Standardní metody pro aplikaci a provedení tohoto testu jsou k dispozici v normě ASTM D 6132. Nevýhodou je nutnost použití vodivého gelu (couplant) pro zajištění přenosu mezi sondou a povrchem povlaku. Tento gel musí být poté odstraněn.

Výhody:

- Možné měřit vícevrstvé materiály
- Ruční přístroj
- Lze měřit vrstvy na plastových substrátech

Nevýhody:

- Nutnost použití vodivého gelu (je potřeba po měření otřít sondy i testovaný materiál)
- Složitější vyhodnocení
- Kontaktní technika

Standardně využívané metody pro měření tloušťky povlaků jsou v drtivé většině případů kontaktní a pro jejich správnou funkci je potřeba provést určitý druh korelace mezi měřeným parametrem a tloušťkou povlaku. Tato kalibrace není většinou prováděna operátorem, ale je provedena výrobcem měřicího přístroje. Techniky jsou vždy vhodné pouze pro určitý typ materiálu. Zjišťování tloušťky rozličných materiálů jedním přístrojem je prakticky nemožné. V průmyslu se nejčastěji využívá kombinace magnetické indukční metody s eddy current metodou s tím, že přístroj sám přepne do vhodné měřicí konfigurace. Takový přístroj je schopný

měřit velké množství materiálů, je jednoduchý na obsluhu a navíc je jeho cena poměrně nízká (desítky tisíc Kč).

2.2.2 Metody nedestruktivního detekování vad

Pro nedestruktivní zjišťování vad v povlacích lze využít metody: vizuálního testování, ultrazvukového testování, radiografického testování, metodu vířivých proudů, magneticky práškovou metodu a kapilární metodu.

Vizuální testování

Vizuální metoda je nejčastěji využívanou technikou NDT [9]. Jedná se o optickou kontrolu vzorku. Vyhodnocení je prováděno operátorem. V některých případech se začíná využívat optického vyhodnocení pomocí počítačové techniky. S menšími či většími úspěchy se využívají i neuronové sítě pro vyhodnocení vizuálního testování například v [10] pro detekci trhlin ve stavebnictví.

Vizuální testování může být prováděno v nejjednodušší formě pouze operátorem bez jakéhokoliv vybavení. Nevýhodou tohoto typu testování je nízká opakovatelnost testování. Je to dáno především vlivem okolních podmínek inspekce (například světelné podmínky, hluk, teplota – ty, ovlivňují schopnosti operátora se soustředit). Vliv má také zkušenost a únava operátora.

Vizuální inspekce bývá prováděna velmi často s různým vybavením, mezi které patří různé lupy, mikroskopy, boroskopy, endoskopy apod. Toto vybavení umožňuje provádět preciznější inspekci. Mezi vybavení mohou spadat i různé návody, referenční vzorky apod. Ty poskytují pomoc v rozlišování jednotlivých vad.

Výhody:

- Jednoduché, efektivní, většinou levné (když není potřeba speciální vybavení).
- Lze nalézt mnoho povrchových diskontinuit a rozlišovat mezi nimi.
- Může být testován jakýkoliv typ materiálu kdekoliv na povrchu.

Nevýhody:

- Výsledky velmi závisí na operátorovi (v případě, že se nevyužívá počítačové zpracování).
- Nelze zachytit vady pod povrchem.

Ultrazvukové testování

Jedná se o rozšířenou a velmi univerzální metodu NDT testování. Využívá se průchod ultrazvukových vln (většinou 0,5 – 25 MHz) materiálem. Používají se různé typy sond. Ultrazvuková sonda většinou slouží jak k vysílání ultrazvukových vln, tak i k jejich detekci. Zpravidla se jedná tedy o režim měření v principu odrazu (na stejné straně je příjem i vysílání vln). Pomocí ultrazvukového testování je možné určit hloubku a šířku diskontinuity.

Existují různé možnosti zobrazení UT [9] – A-scan, B-scan a C-scan. Při A-scan jsou zobrazeny amplitudy na ose y a čas nebo vzdálenost na ose x. Při B-scanu se pohybuje sondou a na ose y je doba zachyceného pulzu a na ose x pozice sondy (vzdálenost). Tímto způsobem se zachytí pozice i hloubka diskontinuity a při rozměrově větších diskontinuitách i tvar. C-scan zobrazuje plochu vzorku.

Výhody:

- Je možné detekovat vady v řádech milimetrů až metrů.
- Lze zjistit hloubku, polohu i tvar imperfekce.
- Ultrazvukové systémy bývají snadno přenositelné a je tedy možné dělat inspekci přímo na místě.
- V režimu odrazu je potřeba přístup pouze k jedné straně vzorku.

Nevýhody:

- Často složitá interpretace dat. Může docházet k odrazům od stěn a tím může být signál deformován.
- Komplikovanější zaškolení personálu.
- Části s nepravidelnými tvary a s drsnými povrchy je obtížné testovat.
- Výběr vhodné sondy může být obtížný.
- Pouze obtížně lze detekovat imperfekce velmi blízko povrchu (ovlivněno ultrazvukovým buzením).
- Pro správný přenos ultrazvukových vln je třeba mezi sondu a testovanou část nanést vodivý gel (couplant).
- Jedná se o kontaktní testování.

Radiografické testování

Je jedna z nejstarších metod. Je snaha tuto metodu nahradit jinými NDT technikami a to zejména z důvodů bezpečnostních a zdravotních rizik způsobených zářením.

Radiografické testování využívá pro svoji funkci rentgenové nebo gamma záření. Principem je rozdílná absorpce záření v materiálu. Neabsorbovaná radiace je zachycena pomocí detektoru, který je umístěn pod měřeným objektem. Jedná se tedy o metodu na průchod (záření je vysíláno z jedné strany a z druhé je detekováno).

Rozdíl mezi gamma a rentgenovým zářením je především v jeho tvorbě [9]. U gamma záření se využívá pro generaci záření radioaktivní izotop, u rentgenového záření rentgenka. Rentgenové záření se generuje v rentgence pomocí elektrického proudu. Elektrickým proudem spolu s dobou ozáření se reguluje množství radiace (to neovlivňuje hloubku penetrace). Pomocí napětí se reguluje vlnová délka záření a tím hloubka penetrace. Zvýšení napětí snižuje vlnovou délku a tím zvyšuje penetraci [9]. Výhodou rentgenového záření je, že ho lze vypnout. Naopak gamma záření je neustále přítomné, a proto je třeba zvýšených bezpečnostních nároků. U gamma záření nelze měnit vlnovou délku. Ta je dána vlastnostmi izotopu.

Výsledkem rentgenové techniky je 2D obraz, kde lze detekovat části s rozdílnou hustotou. Pro některé aplikace se využívá CT (computed tomography), které také využívá rentgenové či gamma záření, ale výsledkem je 3D obraz.

Výhody:

- Lze používat pro většinu pevných materiálů.
- Lze detekovat vnitřní vady.
- Je možné detekovat objemové vady.

Nevýhody:

- Lze detekovat pouze vady s určitou orientací vůči rentgenu.
- Je obtížné detekovat velmi malé vady.
- Vyžaduje oboustranný přístup.
- Vznikají bezpečnostní rizika spojená s radiací.
- Jedná se o nákladnou techniku.

Metoda vířivých proudů

Jedná se o techniku, která pro svoji funkci využívá vířivé proudy. Je schopná zachytit povrchové a blízké podpovrchové vady. Pro vlastní testování se používá cívka, která je napájena střídavým elektrickým proudem. Když se tato cívka přiloží k elektricky vodivému materiálu, tak se v něm začnou generovat vířivé proudy, které vytvoří druhé magnetické pole a tím se ovlivní odpor a impedance cívky. V případě výskytu vady v materiálu se vygenerují

slabší/silnější vířivé proudy než na nepoškozeném místě. V místě vady tedy bude odečtena menší/větší hodnota impedance než ve zbytku materiálu [9].

Možností využití vířivých proudů je celá řada. Patří sem například měření tloušťky materiálu, rozpoznávání slitin, detekce trhlin, koroze a děr. Pro většinu těchto měření je potřeba mít referenční vzorky, které se porovnávají s měřeným kusem.

Výhody:

- Lze měřit různé vlastnosti.
- Dobrá reprodukovatelnost.
- Lze detekovat velmi malé defekty.

Nevýhody:

- Lze použít pouze na elektricky vodivé materiály.
- Výsledky může ovlivnit permeabilita.
- Lze detekovat pouze vady blízko povrchu.
- Citlivé na orientaci cívky vůči defektu.

Magnetická prášková metoda

Jedná se o metodu použitelnou pouze pro magnetické materiály. Princip je takový, že se testovaný materiál vloží do magnetického pole a nanasou se na něj feromagnetické částičky (ve formě prášku nebo tekutiny). V materiálu se vytvoří magnetické siločáry. V případě výskytu vady jsou siločáry v této oblasti narušeny a vytváří se rozptylový tok. Částičky se přichytí v tomto místě [9].

Principů samotného zmagnetizování materiálu je několik. Mohou se využít jak permanentní magnety, tak elektromagnety či přímá magnetizace testovaného kusu.

Výhody:

- Citlivá technika detekce vad na povrchu a těsně pod povrchem feromagnetických materiálů.
- Jednoduchá technika, jednoduchá obsluha.
- Indikace mají většinou rozměry vady.
- Snadná přenositelnost (záleží především na způsobu magnetizace).
- Výsledky jsou okamžitě.

Nevýhody:

- Lze testovat pouze feromagnetické materiály.
- Může být potřeba materiál odmagnetizovat.

- Většinou je třeba materiál po testu očistit.
- Po aplikování prášku či tekutiny může docházet ke zvýšení rizika výskytu koroze.
- Při hrubším povrchu testovaného vzorku může docházet ke špatnému rozložení/rozvodu prášku či tekutiny po vzorku. Čištění je v tomto případě také velmi obtížné.
- Pro otestování je potřeba provádět inspekci nejdřív v jednom směru a poté ve směru posunutém o 90°.

Kapilární metoda

Tato technika je založená na kapilárním jevu. Je určena pro povrchové otevřené diskontinuity. Funguje tak, že do vady vnikne aplikovaný penetrační roztok, který lze poté zachytit okem. Pro správné aplikování penetrantu je však nejdříve potřeba testovaný vzorek očistit (fyzicky a chemicky). Při špatném očištění se penetrační roztok nemusí dostat do všech diskontinuit. Po očištění se nanese penetrační roztok. Nanesení může být provedeno různými způsoby například stříkáním, ponořením. Penetrant musí zůstat v kontaktu s materiálem po vhodné dobu (délka záleží na penetrantu) [9]. Kapilárním jevem vnikne penetrant do imperfekcí. Poté se odstraní penetrant ze vzorku tak, aby zůstal pouze v imperfekcích. Metoda odstranění záleží na tom, jaký penetrant byl použit. Nakonec se použije ještě vývojka, která vytáhne penetrant z diskontinuit. Díky tomu lze detekovat indikace. Posledním krokem je samotná inspekce, kde se ještě využívá osvětlení pomocí bílého světla v případě penetrantu s barevným kontrastem, případně UV světla pro penetrant fluorescenční. Tím se dosáhne toho, že je indikace jasně viditelná. Po skončení penetračního testu je potřeba provést očištění, aby nevznikaly nežádoucí jevy v materiálu, například koroze.

Výhody:

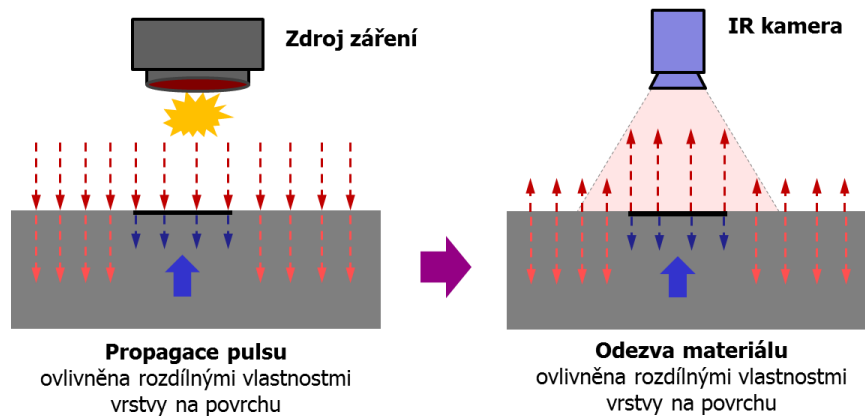
- Jednoduché na naučení.
- Univerzální technika pro různé materiály.
- Lze detekovat malé vady.

Nevýhody:

- Vzorek je třeba důkladně očistit před provedením inspekce.
- Nelze detekovat vady pod povrchem.
- Nevhodné pro drsné povrchy.

2.3 Infračervené nedestruktivní testování

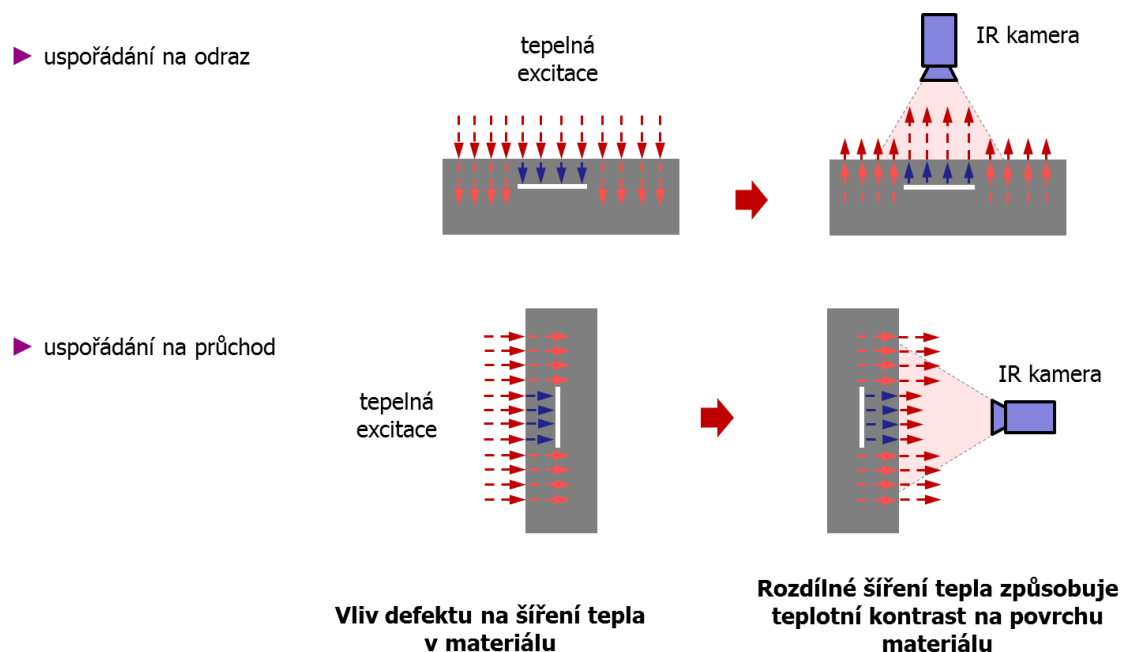
Infračervené nedestruktivní testování (IRNDT) je moderní inspekční metoda založená na principech aktivní termografie. Pomocí zdroje buzení se tepelně vybudí testovaný materiál a IR kamerou se sleduje tepelná odezva. Výskyt defektů v materiálu způsobuje změny tepelné odezvy v místech, kde se tyto defekty nacházejí. Princip IRNDT znázorňuje schéma na Obr. 1.



Obr. 1: Schéma IRNDT měření

2.3.1 Uspořádání

Pro IRNDT se využívají dva typy uspořádání; na průchod a na odraz, viz Obr. 2. Uspořádání určuje, zda je kamera na straně budícího zdroje (odraz), či zda je vzorek mezi budícím zdrojem a kamerou (průchod). Standardně se využívá uspořádání na odraz. Hlavním důvodem je, že v praxi většinou není možné umístit zdroj buzení na jinou stranu než IR kameru. Uspořádání na průchod ovšem může být v některých případech výhodnější, například při měření geometricky složitých objektů, případně defektů blízkých zadní straně.



Obr. 2: Prostorová uspořádání IRNDT měření

Standardně jsou budicí zdroj i IR kamera umístěny staticky. Oblast inspekce je v takovém případě limitována dosahem buzení a zorným polem kamery. Pro otestování rozměrnějších vzorků by v této statické konfiguraci bylo nutné vzorkem hýbat a provést několik měření.

Proto se využívají i měřicí konfigurace, při kterých dochází k pohybu buď zdroje buzení nebo kamery nebo obou.

- Pohyb zdroje buzení, kamera statická – příkladem tohoto způsobu buzení může laserová termografie a technika zvaná flying spot thermography [11], [12]. Laserem se vytvoří jeden laserový spot, který se pohybuje po testovaném vzorku a kamera snímá tento proces. Kromě použití laseru se tato konfigurace (pohybující se zdroj, statická kamera) využívá i s jinými zdroji. Např. v [13] využili pohybuji se indukční ohřev, v [14] pohybovali s quartz lampou.
- Pohyb zdroje buzení, pohyb kamery – tento způsob inspekce je vhodný zejména pro rozměrné díly. Díky pohybu kamery i zdroje lze otestovat teoreticky neomezeně velkou plochu. Pro buzení se může využít quartz lampa jako v [15], kde proběhlo testování kompozitních materiálů. Popis zpracování dat při této technice je uveden v [16]. Je třeba upozornit, že toto zpracování je chráněno patentem podaným NASA.

- Statický zdroj, pohyb kamery – tato konfigurace není běžně využívána. Jde o techniku, při které zdroj buzení je schopen vybudit mnohem větší plochu než je zorné pole kamery.

2.3.2 Zdroje a způsoby buzení

Zdrojem buzení pro IRNDT může být například flash lampa, halogenová lampa, elektrický proud, ultrazvukové buzení, mikrovlnné buzení. Různé možnosti buzení ukazuje Tab. 1 [17].

Tab. 1: Používané zdroje buzení [17]

Typ zdroje	Příklady zdroje	Používaný název	Princip ohřevu
Optické zdroje	Konvenční optické zdroje - lampy	Conventional (optical) thermography	Opticko-tepelný
	Laser	Laser thermography	Opticko-tepelný
Elektromagnetické zdroje	Vířivé proudy	Eddy current thermography	Joulovy ztráty
	Elektrický proud	Conduction thermography	Joulovy ztráty
	Magnetické pole	Magnetic induction thermography	Hysterezní ztráty
	Mikrovlny	Microwave thermography	Dielektrické ztráty
Mechanické zdroje	Vibrace	Vibrothermography	Tření, termoelastický jev
	Ultrazvuk	Ultrasound thermography	Tření, termoelastický jev, hysterezní ztráty
Namáhání (stress/strain)	Namáhání	Thermoelastic stress analysis	Termoelastický jev

Ne všechny typy buzení jdou použít pro všechny materiály a pro detekci všech druhů vad. Například není možné využít elektrický proud pro buzení elektricky nevodivých materiálů. Nejčastěji využívaným zdrojem buzení jsou optické zdroje. V poslední době se začíná více využívat laserová termografie. Velký příslib do budoucna představuje také buzení pomocí mikrovln (terahertzové technologie) [18]. Prakticky jako zdroj buzení lze využít cokoliv, co vytvoří zachytitelnou změnu teploty v testovaném materiálu.

Kromě konfigurace (odraz/průchod) a zdroje buzení se IRNDT metody rozlišují také dle charakteru buzení na [17], [18]:

- **Pulse Thermography** – budicí zdroj ozařuje měřený objekt velmi krátkou dobu. Buzení probíhá formou jednoho pulzu. Analyzuje se reakce na budicí puls, tzn. oblast chladnutí.

V některých publikacích rozlišují pulse thermography a pulse phase thermography např. v [17], [19]. Mezi těmito metodami však není rozdíl v buzení, ale pouze v použitém vyhodnocení. Z tohoto důvodu je v této práci používán název pulse thermography pro oba způsoby a explicitně je uveden způsob vyhodnocení.

- **Lock-in Thermography** – energie je do vzorku dodána formou modulovaného periodického signálu (např. sinus, trojúhelník, obdélník). Analyzuje se amplitudová a fázová odezva.
- **Transient (Step) Thermography** – energie je dodána ve formě buzení obdobnému při pulzní termografii s rozdílem, že se většinou jedná o delší pulz a vyhodnocuje se celé zatěžování.
- **Kontinuální buzení** – lze využít v nejjednodušších případech. Může se jednat například o ohřev pomocí horkého vzduchu. Výsledkem je zpravidla termografická sekvence. Pokročilé algoritmy vyhodnocení se většinou nepoužívají.
- **Frekvenčně modulovaná termografie** – používá se frekvenčně modulovaný signál jako budicí zdroj. Hodnotí se amplitudová a fázová odezva. Někdy se tato technika nazývá Chirp thermography [20].

Nejčastěji využívanými technikami buzení [18] jsou, pulse thermography a lock-in thermography.

Další typ rozdělení může být na zdroje:

- **Plošné** – budí se celý vzorek najednou, případně část vzorku. Výhodou takové konfigurace je především rychlost a pokrytí velké plochy. Do této kategorie spadají například flash lampy, halogenové lampy, LED lampy.
- **Bodové** – budí se pouze část vzorku bodově. Ve většině případů se budí vzorek opakovaně, či se s bodem pohybuje pro pokrytí celé plochy vzorku. Výhodou je možnost vybudit pouze malou oblast zkoumaného vzorku a zkoumat šíření tepla po ploše vzorku. Toho se využívá především pro detekci trhlin, kde trhlina působí jako tepelná bariéra. Hlavní nevýhodou tohoto typu buzení jsou delší měřicí časy než v případě plošného buzení. Mezi bodové zdroje patří například laser.

Mezi dnes standardně a nejčastěji využívané zdroje pro IRNDT se využívají plošné optické zdroje buzení. Nejpoužívanějšími zdroji z této kategorie jsou flash lampy a halogenové lampy. Standardní kombinace je, že flash lampy jsou využívány pro pulzní termografii (tj. Flash Pulse

Thermography - FPT) a halogenové lampy pro lock-in (Halogen Lock-in Thermography – HLIT) případně transient termografii. Hlavní výhodou FPT je rychlost. Buzení trvá několik ms a celková doba záznamu se pohybuje v řádech sekund. Při HLIT je celý proces měření pomalejší, pohybujeme se v řádech desítek sekund. V některých případech je možné zachytit hlubší defekty než v případě FPT.

Dalším velmi často používaným zdrojem buzení jsou bodové optické zdroje. Většinou se jedná o laserový zdroj. Ten se používá jak při pulzní termografii, tak lock-in termografii.

Jiné než optické zdroje jsou velmi zřídka využívány. Většinou se jedná o nějakou speciální aplikaci. Například se hojně využívá elektrický proud jako zdroj buzení pro testování solárních článků.

2.3.3 Detekční systémy

Pro IRNDT měření se téměř vždy využívají IR kamery, ale je možné používat i jiný typ detektoru např. různé IR diody. Využití IR diody má smysl v případě, že je třeba zachytit velmi rychlé děje (vzorkování desítky kHz), další výhodou je větší ekonomická dostupnost IR diod. Na druhou stranu je třeba myslet na nevýhodu v podobě snímání pouze z jednoho bodu. Kamera umožňuje snímání a zobrazování celého pole bodů a jejich rychlosti jsou pro většinu aplikací dostatečné.

Zachycený statický obraz z kamery se nazývá termogram. V případě snímání v čase se velmi často využívá název termografická sekvence. Jedná se tedy o časový záznam termogramů. Termogramy v ideálním případě nesou pouze informaci o teplotě měřeného objektu. Ve skutečnosti infračervené kamery detekují IR záření, které je složeno z energie, kterou vyzařuje měřený povrch, z energie odražené od měřeného povrchu a energie vyzařované prostředím mezi měřeným povrchem a kamerou.

Vlastností IR detektorů je, že zachycují pouze určitou část IR spektra. To může způsobit, že některé materiály jsou transparentní, či semitransparentní pro daný IR detektor.

Infradetektory můžeme rozdělit dle spektrálního rozsahu IR záření, které jsou schopné zachytit. IR záření se vyskytuje mezi zářením viditelným (cca 400 nm – 750 nm) a zářením mikrovlnným (1 mm – 1 m). IR pásmo se tedy pohybuje ve vlnových délkách od 750 nm do 1 mm a lze dělit dle [21] CIE a DIN 5013-7 na NIR (blízké infračervené záření), SWIR (IR záření krátkých vlnových délek), MWIR (IR záření středních vlnových délek), LWIR (IR záření dlouhých vlnových délek), FIR (vzdálené infračervené záření). Tab. 2 uvádí přehled vlnových délek pro jednotlivá pásma.

Tab. 2: Rozdělení IR pásem

Název	Zkratka	Zkratka dle CIE/DIN	Vlnové délky (nm)
Blízké infračervené záření	NIR	IR-A	780-1400
IR záření krátkých vlnových délek	SWIR	IR-B	1400-3000
IR záření středních vlnových délek	MWIR	IR-C	3000-8000
IR záření dlouhých vlnových délek	LWIR	IR-C	8000-15000
Vzdálené infračervené záření	FIR	IR-C	15000-1000000

IR kamery zpravidla měří v pásmu MWIR či LWIR. Měřené spektrum může zásadním způsobem ovlivnit výsledek měření.

2.3.4 Algoritmy vyhodnocení

Na nezpracované (neupravené) termografické sekvenci většinou vady nejsou zachytitelné. Z tohoto důvodu se využívají pokročilé (advanced) algoritmy vyhodnocení. Jejich hlavní funkcí je tedy zlepšení detekce defektů. Existují algoritmy, které jsou navrženy přesně pro konkrétní způsob buzení (například algoritmus TSR použitelný pouze pro pulzní termografii [22]), případně algoritmy univerzálnější, které jsou využitelné pro různé způsoby buzení (FFT, prostorové či časové derivace). Kromě algoritmů pro zlepšení detekce defektů se lze často setkat s algoritmy pro odhad hloubky defektu [23], [24], [25], případně pro odhad materiálové vlastnosti testovaného dílu (velmi často difuzivity [26], [27]).

Algoritmy pro pulzní termografii

Nejčastěji se pro vyhodnocení pulzní termografie využívá, tzv. pulse phase algoritmus (proto se často celá technika také nazývá pulsed phase thermography). Prakticky se jedná o aplikování Fourierovy transformace na termografickou sekvenci. Pro výpočet Fourierovy transformace se používá algoritmus Fast Fourier Transform (FFT). Z názvu by se mohlo zdát, že výpočet bude velmi rychlý, je třeba si ovšem uvědomit, že termografická sekvence obsahuje velké množství dat, a proto celkové vyhodnocení může být časově náročné. Závisí na množství zpracovávaných dat (což ovlivňuje rozlišení kamery a počet snímků) a výkonu PC. FFT transformuje signál z časové oblasti do frekvenční oblasti. Výsledky jsou zobrazeny buď ve formě amplitud, nebo fází. Zpravidla oba dva typy zobrazení zlepšují detekci defektů. Fázové zobrazení má ovšem tu výhodu, že není do takové míry ovlivněno nerovnoměrným ohřevem

vzorku způsobeným zdrojem buzení jako amplitudové zobrazení [19]. Obecně lze Fourierovu transformaci zapsat [19], [28]

$$F_n = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} T(k \Delta t) e^{-j 2 \pi n k / N} = Re_n + Im_n. \quad (1)$$

Po výpočtu F_n se vypočte amplitudový (ampligram) nebo fázový obraz (phasegram).

$$A_n = \sqrt{Re_n^2 + Im_n^2}, \quad (2)$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \frac{Im_n}{Re_n}. \quad (3)$$

Kromě FFT se využívá pro vyhodnocení pulzní termografie i TSR (Thermographic Signal Reconstruction), PCT (Principal Component Thermography), HOS (High Order Statistic) a další.

TSR je technika, kdy je termografický signál v každém prostorovém bodě proložen funkcí založenou na logaritmech. Tato funkce se poté derivuje. Jedná se tedy o algoritmus založený na derivacích. Derivace zvýrazňují rozdíly mezi jednotlivými snímky sekvence, což usnadňuje detekci defektů. Popis TSR je v [22].

Rovnice funkce pro proložení [22] je

$$f(t) = a_0 + a_1 \cdot \log t + a_2 \cdot (\log t)^2 + a_n \cdot (\log t)^n. \quad (4)$$

Typicky je výsledkem zderivovaná sekvence, nicméně i zobrazení jednotlivých koeficientů $a_0 - a_n$ usnadňuje detekci defektů.

PCT je založené na SVD (Singular Value Decomposition) [29], [30]. Výsledky jsou ve formě EOF (Empirical Orthogonal Function) a PC (Principal Components). EOF v sobě uchovávají prostorovou informaci o termografickém signálu a PC časovou informaci [31]. Zpravidla bývají výsledky uváděny ve formě EOF, kde především prvních několik EOF obsahuje relevantní data [30]. Výhodou PCT je, že je třeba projít pouze několik prvních nově vytvořených snímků pro nalezení defektu. Nevýhodou je, že kvůli výpočtu SVD je PCT náročná na výpočetní výkon [32].

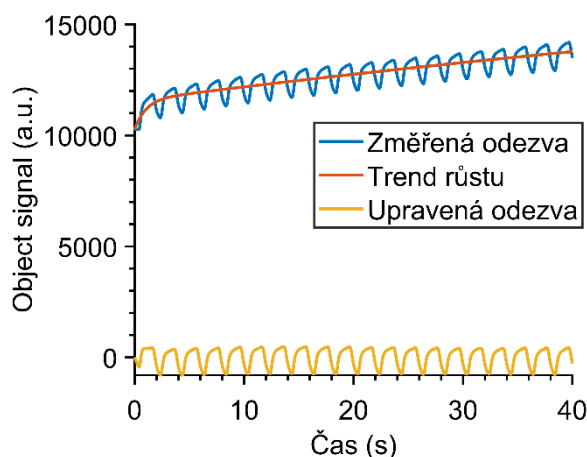
HOS je založen na statistických funkcích. Využívá průměr, standardní odchylku, šikmost a špičatost. Z jednotlivých bodů se vytvoří HOS mapy. Například šikmost se zvyšuje s rostoucí hloubkou defektu a je nejvyšší pro oblasti bez defektů [30]. Díky této mapě je tedy možné pomocí jednoho snímku určit oblasti s defekty a bez defektů.

Algoritmy pro lock-in termografii

Při lock-in termografii je testovaný objekt buzen periodickým signálem s frekvencí, která se nazývá lock-in frekvence. V nejjednodušší formě může být buzení realizováno např. střídavým vypínáním a zapínáním světelného zdroje, případně využitím mechanického chopperu, který přerušuje konstantní světelný tok. Typicky je buzení realizováno tím, že je budicí signál ovládán elektronicky. Lock-in princip a jeho vyhodnocovací algoritmy umožňují zvýšit CNR (contrast to noise ratio) a umožňují detekovat defekty, které by bez aplikování těchto algoritmů nebyly detekovány.

Lock-in termografie je založena na principech lock-in zesilovačů, které umožňují měřit velmi nízké hodnoty signálu při výskytu značného šumu. Princip lock-in zesilovačů a obecné principy jsou popsány v [33]. První výskyt lock-in termografie se datuje do 80. let minulého století [34]. V té době byly pro realizaci LIT využity právě lock-in zesilovače a skenování bod po bodu pomocí tehdejších detektorů. Rozvojem výpočetní techniky bylo umožněno vytvoření digitální verze lock-in zpracování dat. Pro dnešní LIT se výhradně využívají softwarová řešení.

Existuje více možností, jak realizovat lock-in algoritmus. Někteří autoři [35] navrhuji před aplikací vyhodnocovacích algoritmů provést upravení vstupního signálu. Na obrázku (Obr. 3) níže je ukázána typická tepelná odezva na lock-in buzení (modře). Je zřejmé, že odezva se kromě opakujícího se periodického signálu, který má tvar sinusu, skládá i z rostoucího trendu.



Obr. 3: Odstranění rostoucího trendu při lock-in měření

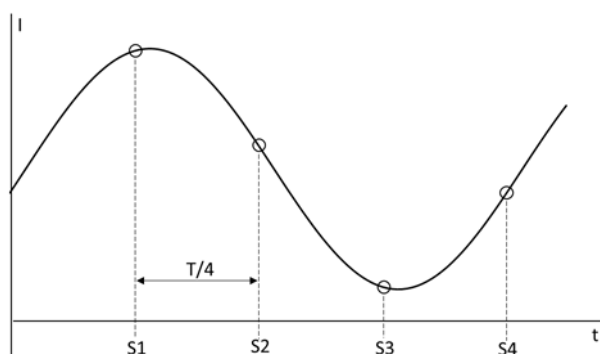
Autoři z [35] navrhuji odstranit tento trend. Toho lze docílit tím, že je původní tepelná odezva proložena funkcí např. polynomem. Tento polynom se odečte od původní tepelné odezvy, a tím se získá signál nezátížený rostoucím trendem. Pro tyto účely může být například použita funkce

$$A + B \cdot t + C \cdot t^2 + D \cdot (1 - e^{-t}), \quad (5)$$

kde A , B , C a D jsou koeficienty, t je čas. Toto odstranění ukazuje Obr. 3. Někteří autoři navrhují také proložit tepelnou odezvu funkcí, a tím snížit šum [35].

Pro zlepšení detekce defektů u lock-in termografie lze použít FFT. Při Fourierově transformaci lze analyzovat vstupní signál v celém frekvenčním spektru. Lze určit např. stejnosměrnou složku signálu a lock-in frekvenci. Pro LIT nebývá tento algoritmus často využíván. Fázový signál získaný pomocí Fourierovy transformace není fázový posuv mezi referenčním signálem (buzení, případně umělá reference) a měřeným signálem (tepelnou odezvou), což je v některých případech žádané. Realizace FFT na velké množství dat, což termografické sekvence bývají, je časově náročnější. Tento algoritmus také nelze aplikovat online. Pro správnou funkci je třeba zpracovat celou sekvenci najednou. Obrazovým výsledkem FFT je 2D zobrazení amplitudového či fázového signálu při různých frekvencích. Je možné zobrazit i obrazy X (inphase) a Y (outofphase). X je reálná složka Fourierovy transformace a Y imaginární složka [34].

Dalším používaným algoritmem pro zlepšení detekce defektů pro lock-in termografii je Four Point Correlation Method. Někdy také nazývaná Four Bucket Method [34] a Harmonic Approximation [29]. Je to jedna z prvních metod, která byla použita pro realizaci LIT [34]. Metoda spočívá v tom, že je signál vzorkován na 4krát větší frekvenci než je referenční frekvence. Takto se získají 4 body na periodu, označované $S1-S4$, viz Obr. 4. Ty se vypočítají pro každou periodu a zprůměrují se. Z rovnic [29], [36] se získá amplitudový a fázový signál



Obr. 4: Four Bucket Method

$$\varphi = \arctg\left(\frac{S3-S1}{S4-S2}\right), \quad (6)$$

$$A = \sqrt{(S3 - S1)^2 + (S4 - S2)^2}. \quad (7)$$

Tato technika je velmi rychlá a jednoduchá. Problém nastává u nesinusových periodických signálů, kde tento algoritmus selhává [34]. Zároveň je citlivý na šum a lze ho použít pouze na část signálu [34], kde se mění teplota pouze sinusovým charakterem (tj. nelze použít na počáteční fázi buzení, kdy dochází k přechodovému jevu).

Další technikou je technika SLIM (standard lock-in method), která je založena na principech diskrétní Fourierovy transformace. V některých případech bývá také označena jako Single DFT (DFT provedená na jedné frekvenci). V případě SLIM se násobí signál (jeden bod termografické sekvence v čase) in-phase signálem (p_f) a in-quadrature signálem (q_f). Tyto signály jsou uměle vygenerované sinusové/kosinusové signály. Poté se vypočte amplitudový a fázový signál. Ty se zobrazí ve 2D defektogramu ve formě amplitudového či fázového signálu, případně ve formě X (in-phase) a Y (in-quadrature). Výsledek ovlivňuje především frekvence uměle vygenerovaných signálů p_f a q_f . Změny v defektogramu ovlivňuje i fáze vygenerovaných signálů. Vzorce vycházejí z [36]

$$p_f(t) = \sin(2\pi f t + \varphi_r), \quad (8)$$

$$q_f(t) = \cos(2\pi f t + \varphi_r), \quad (9)$$

$$SP_f = \sum_{i=1}^N s(t)p_f(t), \quad (10)$$

$$SQ_f = \sum_{i=1}^N s(t)q_f(t), \quad (11)$$

$$tg(\varphi - \varphi_r) = \frac{SQ_f}{SP_f}, \quad (12)$$

$$A = \frac{2}{N} \sqrt{SQ_f^2 + SP_f^2}. \quad (13)$$

Velmi podobnou technikou k SLIM je Two Channel Correlation. Rozdíl je pouze v jiném tvaru signálu in-phase a out-of-phase (in-quadrature). Algoritmus Two Channel Correlation je velmi obsáhle popsán v [33]. Algoritmus je založen na výpočtech:

$$S = \frac{1}{n \cdot N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n K_j \cdot F_{i,j}, \quad (14)$$

$$K_j^0 = 2 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (j-1)}{n}\right), \quad (15)$$

$$K_j^{-90} = -2 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (j-1)}{n}\right). \quad (16)$$

K jsou váhící koeficienty. Tyto koeficienty jsou dva. Koeficient K^0 je pro výpočet signálu ve fázi a K^{-90} je pro výpočet signálu mimo fázi (posunutý o -90°). Parametr n je počet vzorků na jednu periodu. N je kolik period, je celkově snímáno. Z vypočtených signálů (ve fázi a mimo fázi) se vypočte amplitudový a fázový signál dle rovnic

$$A = \sqrt{(S^0)^2 + (S^{-90})^2}, \quad (17)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{S^{-90}}{S^0}\right). \quad (18)$$

Amplitudový a fázový signál se vypočte pro každý pixel termografického záznamu. Tyto signály popisují teplotní odezvu na použité buzení. Ze vzorců se může zdát, že frekvence umělých signálů není ve vzorcích obsažena, ale platí

$$\frac{f_s}{f_{lockin}} = n. \quad (19)$$

Znamená to, že změnou počtu vzorků na periodu n je ovlivněna frekvence umělého signálu f_s a tím výsledný defektogram.

2.4 Infračervené nedestruktivní testování povlaků

Další část analýzy současného stavu se týká využití IRNDT metod k testování povlaků. Analýza ukázala, že vědecké publikace se zabývaly technikami FPT, HLIT a laserovou termografií. Následující rozbor jednotlivých metod popisuje jak možnost hledání vad, tak určení tloušťky povlaků.

2.4.1 Flash pulse termografie povlaků

FPT je nejpobulárnější technika INRDT. To se ukázalo i při testování povlaků, kde bylo možné dohledat nejvíce publikací.

V [37] provedli komparativní studii FPT pro detekci defektů v oceli, hliníku a mědi v devíti různých laboratořích. Vyhodnocení bylo provedeno pomocí PPT (FFT) v režimu fáze. Ukázalo se, že detekce defektů je ovlivněna kromě hloubky defektu také jeho velikostí a samotným materiálem. 8 z 9 laboratoří bylo schopno detekovat vytvořenou neprůchozí díru (Flat Bottom Holes) o průměru 8 mm se zbývající tloušťkou stěny (RWT – remaining wall thickness) 2 mm ve vzorku z oceli. Stejně výsledky byly získány i pro vzorek hliníku, ale pouze 7 z 9 laboratoří bylo schopno detekovat tuto díru v mědi. Studie ukázala, že stejné defekty (průměr, RWT) byly nejsnadněji zjistitelné v oceli, následoval hliník a nakonec měď. V současné době se používá mnoho různých materiálů pro povlakování. Mnohé z nich jsou kovy. Z této studie lze konstatovat, že detekce hlubokého defektu (hlubší než 2 mm) v silném povlaku je velmi obtížný úkol.

Detekcí podpovrchových defektů v povlacích za použití FPT se zabývá několik publikací. Práce [38] byla zaměřena na podpovrchové defekty v TBC (thermal barrier coating) povlaku (ZrO_2 - 8 wt.% Y_2O_3). Vzorky byly tepelně zatěžovány v peci. Tímto způsobem se simulovalo skutečné využití TBC. Maximální teplota v peci byla 1177 °C, zatěžovací cyklus trval 45 minut při maximální teplotě. K tomu 9 minut trvalo dosažení maximální teploty a 10 minut chladnutí do výchozího stavu. Měření byla prováděna pomocí dvou flash lamp. Selhání TBC se objevila ve všech případech mezi 155 a 175 cykly zatěžování. Selhání TBC bylo definováno autory jako dekoheze vrstvy. Tento jev je výsledkem vznikání mikrotrhlin. Studie ukázala, že s rostoucím počtem zatěžovacích cyklů se také zvětšovala hodnota amplitudy (object signalu) na IR snímcích. Autoři navrhuji využít hodnotu amplitudy pro indikaci konce životního cyklu TBC.

Praskliny v povlaku byly také detekovány v [39] při použití FPT. Autoři byli schopni detekovat trhliny větší než 0,4 mm. Měření proběhla na porcelánových izolátorech pro velmi vysoké napětí (110 kV). Tyto porcelánové izolátory byly potaženy vulkanizovaným

silikonovým kaučukem o tloušťce 1 mm. Tento povlak se používá jako ochranný prvek zabraňující mechanickému poškození. Testy byly provedeny se dvěma flash lampami (každá 9,6 kJ). Vzorovací frekvence kamery byla 32 a 56 Hz pro nepotažené, respektive potažené izolátory. Jako algoritmus zpracování bylo použito PPT. Nejprve byl proveden experiment s izolátory bez povlaku. Poté byly izolátory potaženy a stejný postup měření byl použit pro detekci defektů pod povlakem. Defekty bylo možné detekovat jak u nepotaženého, tak potaženého izolátoru. Indikace byla silnější v případě potažených izolátorů. Podle autorů je to způsobeno zvýšenou emisivitou ve srovnání s glazovaným povrchem nepotaženého izolátoru.

Kontrola nesoudržnosti (disbond) v TBC byla ověřena v [40]. Testovaný vzorek byl 6 mm substrát ze slitiny zirkonu s tloušťkou TBC 1 mm. Pro simulaci nesoudržnosti byly vytvořeny defekty FBH o průměru 4 mm. FBH byly vyvrtány do substrátu, aniž by došlo k poškození povlaku. Pro experimenty byly použity 2 flash lampy (každá 6 kJ) a dlouhovlnná IR kamera. Sklo bylo umístěno před lampami, aby se předešlo afterglow jevu. Byly indikovány všechny defekty.

Jedním z nejdůležitějších parametrů, který ovlivňuje správnou funkci povlaku, je jeho tloušťka. Výzkum v [41] se zabývá zjišťováním tloušťky povlaku při použití FPT. Testovaný povlak byl ZrO_2 na substrátu ze slitiny na bázi niklu s pojivovým povlakem MCrAlY. Tloušťka povlaku se pohybovala od 0,1 mm do 0,6 mm. Celá studie byla provedena v simulačním softwaru Ansys. Ověření postupu je dále zkoumáno v [42], [43] stejným hlavním autorem. Pro stanovení tloušťky povlaku autoři použili PPT (fázový obraz) a vytvořili kalibrační křivku, založenou na vztahu tloušťka-fáze. Frekvence, při kterých byly odečteny fáze použité pro získání kalibrační křivky, nejsou specifikovány a díky tomu není možné postup zopakovat. Poté bylo provedeno měření pomocí flash lampy o výkonu 6400 W a IR kamery FLIR SC645. Frekvence snímků byla 50 Hz. Při porovnávání výsledků modelování a reálných experimentálních dat můžeme vidět jasný rozdíl v hodnotách fází (např. pro tloušťku 0,6 mm je fáze z modelování 0,39 rad a z experimentu 2,25 rad). V experimentu se fáze zvyšuje s rostoucí tloušťkou. V simulaci je to naopak. Podle autorů je to způsobeno počtem obrázků v sekvencích. Maximální chyba mezi skutečnou a předpokládanou tloušťkou byla 5,35% pro měření a 2,35% pro simulaci.

V [44] používali logarithmic peak second derivative method (TSR) pro zjišťování tloušťky. Povlak byl systém ZrO_2 a Y_2O_3 o tloušťce 150–300 μm . Na vzorky TBC se nastříkala černá barva. To může být z průmyslového hlediska velkým problémem, protože test je pomalejší a méně ekonomický vzhledem k nákladům na nanesení barvy, její odstranění a ekologickou

likvidaci. Měření byla provedena IR kamerou se spektrem 8–9 μm . Vzorkovací frekvence kamery byla 60 Hz, doba akvizice 8 s a měření bylo provedeno dvěma flash lampami. Tloušťka se vyhodnocovala pomocí analytického vztahu mezi výskytem maxima v druhé derivaci, tloušťkou a difuzivitou. Nicméně difuzivita nebyla známa a byla získána stejným principem jako tloušťka (jiné vzorky). Pro určení difuzivity byly použity hodnoty tloušťky a čas maxima. Maximální chyba stanovení tloušťky byla 59 %.

Studie [45] potvrzuje, že rovnoměrnost povlaku může být kontrolována pomocí FPT. TBC povlak ze SiC s různou tloušťkou vrstvy od 40 do 125 μm byl měřen dvěma flash lampami (9,5 kJ) a IR kamerou se spektrálním rozsahem 2,5–5 μm . Použitá vzorkovací frekvence byla 40, 80 a 100 Hz. Jako techniky následného zpracování byly použity algoritmy PCA a PPT. Obě tyto techniky byly schopny detekovat nerovnoměrnost povlaku. Tloušťka byla získána pomocí analytické rovnice vypočtené z kvadrupólové (thermal quadropoles) metody, ale pro výpočet bylo potřeba znát mnoho materiálových vlastností a autoři podrobně neuvedli stanovení tloušťky.

V [46] byl použit stejný vzorek jako v [45]. Experimenty byly zaměřeny pouze na PPT. Nejprve byl vytvořen 3D model pro simulaci FEM, aby se určilo, které parametry měření budou nejlepší. Pozorované parametry byly energie (1320–2280 kJ), vzorkovací frekvence (50–100 Hz) a doba záznamu (0,5–2 s). Zvýšení pulzní energie vedlo k vyššímu kontrastu pro detekci nehomogenity tlouštěk. S 2280 kJ byl dosažen nejvyšší kontrast. Vyšší vzorkovací frekvence také přinesla lepší kontrast. Od 70 Hz a více kontrast zůstal téměř stejný. Experiment ukázal, že tato frekvence (70 Hz) je dostatečná pro stanovení tloušťky na daném vzorku. Vhodná doba záznamu byla 1 s.

Korelace mezi tloušťkou a teplotní odezvou lze pozorovat i bez zpracování dat pomocí speciálního algoritmu vyhodnocení, jak je ukázáno v [47], kde testovali více vzorků s nerovnoměrným rozložením barvy. Tloušťka barvy byla měřena mikrometrem a toto měření bylo použito jako reference. Maximální tloušťka byla pod 250 μm . Termografické měření bylo provedeno dlouhovlnnou (8–14 μm) infračervenou kamerou a zdrojem excitace byla 893 J flash lampa. Trvání pulsu bylo 52 ms (což je u flash lamp neobvyklé, obvykle trvá méně než 10 ms) a rychlost snímání byla nastavena na 60 Hz. Pro vyhodnocení byl použit termogram z doby 0,05 s po maximální teplotě. Byla vybrána čára na vzorku a odečteny hodnoty teploty. Následně byly porovnány výsledky měření teploty a měření tloušťky (ze stejné linie). Výsledky ukázaly silnou shodu ve tvaru křivky tloušťky a teplotní křivky. Autoři tvrdí, že tato technika je schopna rozlišit plochy lišící se nejméně o 20 μm . Ve skutečnosti neukázali, jak získat vztah mezi

teplotou a tloušťkou Nicméně bylo by možné použít stejný kalibrační přístup jako v předchozích studiích (například jako v [43]).

Použití analytických přístupů ke zjišťování tloušťky povlaku je problematické, protože pro výpočet jsou potřebné všechny tepelné vlastnosti. V některých případech může být povlak poloprůhledný a tím se celý výpočet ještě více komplikuje. Tento problém byl řešen v [48], kde se zabývali stanovením tloušťky poloprůhledných povlaků na betonu. Povlaky byly vyrobeny z různých polymerních materiálů o tloušťce od 100 do 2000 μm . Celkem byly měřeny 4 poloprůhledné polymerní povlaky a jeden referenční neprůhledný černý PVC povlak. Analytický model pro režim odrazu i průchodu, který počítá s poloprůhledností (na základě [49]) a tepelnými ztrátami, byl porovnán s modelem, který nezohledňuje poloprůhlednost a ztráty tepla. Oba modely poté byly porovnány na experimentálních datech získaných pomocí flash lamp (6 kJ) a pulzního buzení. Princip určování tloušťky je v parametrizaci modelů tak, aby odpovídaly experimentálním údajům. Výsledky ukazují, že model s poloprůhledností a tepelnými ztrátami je přesnější. Průměrný absolutní relativní rozdíl mezi skutečnou tloušťkou a odhadem byl 2,9 % pro režim na průchod a 4,1 % pro režim na odraz pro model s poloprůhledností. Zjednodušený model měl průměrný absolutní relativní rozdíl v obou režimech přibližně dvakrát vyšší.

Další zajímavý výsledek byl ukázán v [50], kde se pro stanovení tloušťky používá kombinace měření s řešením inverzního problému vedení tepla. Vzorek byl potažen SiC s nerovnoměrnou tloušťkou povlaku (od 45–130 μm). Vztah mezi měřením a modelem je vytvořen pomocí algoritmu simulated annealing (SA). V podstatě se jedná o podobný přístup jako v [48]. V obou případech se pro určení tloušťky používá modelování. Pro kontrolu byly použity různé parametry měření. Vhodná vzorkovací frekvence pro tento experiment byla 70 Hz, doba záznamu 1 s. Tato technika dosáhla maximální relativní chyby menší než 10%.

2.4.2 Halogen lock-in termografie povlaků

U HLIT bylo možné nalézt výrazně menší množství publikací zabývajících se IRNDT povlaků než u FPT.

Posouzení stupně poškození povlaku bylo provedeno pomocí LIT v [51]. Nejprve byla testována možnost detekce nerovnoměrné tloušťky povlaku. Povlak byl železný prášek přilepený na substrát epoxidovou pryskyřicí. Tento povlak se používá jako povlak absorbující radarové vlny. Jeho tloušťka se pohybovala mezi 0,5–1,5 mm. Experimenty ukázaly, že je možné detekovat nerovnoměrnou tloušťku povlaku. Zároveň je demonstrováno, jak lze detekovat opotřebení povlaku, což je vlastně také nerovnoměrná tloušťka. Vzorek byl

opotřebován krokově. V každém kroku docházelo k většímu opotřebování a zároveň byla v každém kroku provedena LIT inspekce. Bylo ukázáno, že je možné zachytit rozdíly v tloušťce povlaku v jednotlivých krocích.

Stejný hlavní autor (jako v [51]) se zaměřil na odhad tloušťky povlaku v [52]. Tloušťka byla měřena na povlaku ZrO_2 na ocelovém substrátu. Tloušťka povlaku byla 0,2–1,1 mm. Pro test byly použity dva vzorky. Nejprve byl měřen kalibrační vzorek se čtyřmi různými tloušťkami a druhý vzorek, na kterém byla ověřena kalibrace a stanovena tloušťka. Měření bylo provedeno se dvěma lampami a infračervenou kamerou s rozsahem vlnových délek 7,5–14 μm . Vzorkovací frekvence byla 50 Hz. Kalibrační křivka tvořila závislost fáze na tloušťce. Maximální chyba byla 6,48 %.

Podobný přístup byl použit v [42], [43]. Tyto studie jsou vzájemně propojeny a první se zabývá simulací a druhá experimentálními daty. Testovaný povlak byl ZrO_2 na substrátu ze slitiny na bázi niklu s pojivovým povlakem MCrAlY. Tloušťka povlaku byla 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5 a 0,6 mm. Nejprve byl vytvořen model v Ansysu. Pro simulaci byl použit zdroj tepla 2 kW. Simulace byla prováděna v rozsahu lock-in frekvencí od 0,01–1 Hz a počet period byl nastaven na 15. Kalibrační křivka fáze/ tloušťky povlaku byla získána pro všechny modulační frekvence. Z křivky byla vytvořena kvadratická rovnice, která definuje vztah mezi tloušťkou a fází. To znamená, že pro každou frekvenci existovala jiná rovnice. Nejvhodnější kalibrační křivka a tedy zároveň lock-in frekvence byla zvolena na základě nejmenší procentuální chyby a regrese rovnice ve srovnání se simulovanými daty. Nejvhodnější rovnice a tedy kalibrační křivka byla získána pro modulační frekvenci 0,2 Hz, kde chyba byla 6,73 %. Mělo by být poznamenáno, že stejná data, ze kterých byla získána kalibrační křivka, byla použita pro stanovení chyby a tím ověření spolehlivosti metody. Vhodnější je použití dvou vzorků (jeden pro kalibraci a alespoň jeden pro ověření). Pro experiment byly použity 2 halogenové žárovky s výkonem 1 kW. Frekvence IR kamery byla 50 Hz a spektrální rozsah 7,5–13 μm . Vhodná frekvence byla získána stejným způsobem jako v případě simulace. Nejvhodnější lock-in frekvence byla 0,02 Hz. Ta se liší od dat z Ansysu 10krát. Maximální chyba byla 15,14 % (platí pro experiment).

2.4.3 Laserová termografie povlaků

Vědeckou komunitou byly provedeny inspekce povlaků laserovou termografií jak z pohledu hledání vad, tak i pohledu tlouštěk povlaků.

Výzkum zaměřený na detekci trhlin laserovou termografií na TBC povlaku je uveden v [53]. Test byl proveden na keramickém povlaku a ověřen simulací v softwaru Abacus.

Navrhovaná laserová technika je rozdělena do dvou fází. Vzorek byl skenován liniově v první fázi a bodově ve druhé fázi. Jako excitační zdroj byl použit laser pro značení s průměrem laserového bodu od 0,1 do 0,3 mm. Pro vytvoření čáry autoři rychle posunovali spot ve směru čáry (500 mm/s). Tato čára případně bod (druhá fáze) se posunovala rychlostí 1-10 mm/s. Pro zlepšení viditelnosti trhlin byla vytvořena speciální metoda vyhodnocení. Metoda byla schopna detekovat trhliny se šířkou 20 μm v liniovém režimu a 9,5 μm v bodovém režimu.

Laser jako excitační zdroj byl také použit pro detekci disbond defektů v TBC povlacích [54]. Použitý povlak byl ZrO_2 s tloušťkou 100, 400 a 2000 μm . Hledané defekty byly defekty typu FBH (Flat Bottom Hole), které měly simulovat defekty typu disbond. FBH byly vyvrtány ze spodní strany (tj. ze strany substrátu) a jejich zbývající tloušťka stěny byla 0,1 mm (substrátu). Povlak nebyl poškozen. Laserový spot měl průměr 50 μm a bylo s ním pohybováno pro vytvoření čáry s rychlostí 1000 mm/s, což je podle autorů dostatečná rychlost, aby bylo možné laser považovat za liniový zdroj. Rychlost skenování byla 1,25 mm/s. Polovodičový laser měl vlnovou délku 1064 nm a výkon 10 kW. IR kamera měla vlnovou délku 7,5-14 μm . Frekvence snímků byla nastavena na 50 Hz. Byla vyvinuta nová technika zpracování dat a měření bylo zároveň nasimulováno pomocí softwaru Abaqus. Byly detekovány defekty větší než 2 mm v průměru.

Stanovení tloušťky povlaku lze provést i laserovou termografií [55]. Studie v [55] byla zaměřena na stanovení tloušťky barvy. Jako excitační zdroj byl použit kontinuální laser o vlnové délce 532 nm. Intenzita laserového paprsku byla nastavena na 92,31 mW/mm². Laserový spot byl transformován na linii optickým prvkem. Rychlost skenování byla 20 mm/s. IR kamera měla spektrální rozsah vlnových délek 7,5–13 μm a vzorkovací frekvenci 50 Hz. Tloušťka byla získána kalibrací. Empirické mapování bylo použito pro nalezení vztahu mezi tloušťkou získanou testem vířivých proudů a fázovými odezvami. Poté, co byly získány funkce (odlišné pro každý vzorek) z empirického mapování, bylo možné, aby každá hodnota fáze byla převedena na tloušťky. Ukázalo se, že tato technika byla použitelná v různých teplotních podmínkách (-15–50 °C). Technika byla schopná rozlišit tloušťky rozdílné alespoň o 40 μm .

Pro stanovení tloušťky barvy v [56] byla také použita laserová termografie. Substrát byla ocel, na kterou byla nanášena černá barva s tloušťkou od 5 do 110 μm . Laserová excitace byla provedena v pulzním režimu. Experimenty byly provedeny laserem s výkonem 3,6 W/puls a vlnovou délkou 808 nm. Spektrální rozsah kamery byl 7,5–13 μm a rychlost snímání byla nastavena na 50 Hz. Nicméně byla použita interpolace pro umělé zvýšení frekvence na 750 Hz. Pro hledání tlouštěk byly použity dva parametry: maximum získané teploty ze středu vybuze

zóny a časový rozdíl definovaný jako časová mezera od výskytu maxima k 25 % snížení teploty z maximální teploty ve fázi chladnutí. Testovalo se několik různých délek pulsů (4, 10, 20, 60 ms). Podle numerické simulace byla nejvhodnější délka 20 ms. Delší excitace vedla k lepšímu rozpoznání tloušťky, ale s rostoucí dobou docházelo k poškození vzorku. Podle simulace má tloušťka substrátu (0,5–5 mm) zanedbatelný vliv na oba parametry (maximální teplota a časová mezera). Experimentální měření prokázalo dobrou shodu s testováním vířivými proudy tak, že křivky obou pozorovaných parametrů korelují s křivkou tloušťky při zkouškách vířivými proudy. Příspěvek nepopisuje, jak lze získat tloušťku z pozorovaných parametrů. Kalibrační křivka by však mohla být získána podobným způsobem jako v [55]. Velmi podobné výsledky byly také prezentovány v jiném článku stejných hlavních autorů v [57].

Další způsob, jak zjistit tloušťku, byl ukázán v [58], kde porovnávají ANN (neuronové sítě) a SVM (metoda podpůrných vektorů) k určení tloušťky povlaku. Vzorky tvořil substrát z oceli nastříkaný černým KRYLONem. Tloušťka byla v rozmezí 63,5–571,5 μm . Délka pulsu laseru byla nastavena na 60 s a výkon laseru byl 50 mW. Vzorkovací frekvence IR kamery byla 1 Hz (160x120 pixelů). Celkem bylo použito 61 vzorků pro trénování ANN a SVM. Dalších 28 vzorků bylo použito pro testování těchto technik. Bylo testováno několik různých způsobů tvorby ANN, ale výsledky nakonec ukázaly, že SVM bylo přesnější pro odhad tloušťky povlaku. SVM bylo schopné určit tloušťku povlaku, když byla tloušťka povlaku v trénovaném rozsahu. ANN s tímto omezeným počtem tréninkových dat (61 vzorků) selhala. Maximální relativní chyba byla 5% pro SVM a 14% pro ANN.

V [59] byla také použita neuronová síť pro určování tloušťky pomocí laseru. Pro předzpracování používali algoritmus PCA (PCT). Celý článek je založen na modelování. Výsledky jsou slibné, chyba byla menší než 5%. Nicméně žádný experiment nebyl proveden a například v [42], [43] dosáhli maximální chyby 2,35 % s mnohem jednodušší technikou PPT s flash lampou pro data ze simulace a v případě reálného experimentu 5,35 %.

2.5 Shrnutí současného stavu

Technika infračerveného nedestruktivního testování je založená na bezkontaktním snímání a zobrazování teplotního pole. Pro měření se používají infračervené kamery. IRNDT je založeno na aktivní termografii. Ta využívá různých druhů buzení pro vytvoření změny teploty (ohřátí/ochlazení) testovaného objektu. Po vybuzení (někdy i během něho) se provádí snímání teplotního pole. Díky tomu se dají odhalit defekty spojené s tepelnou vodivostí a výměnou tepla

(např. trhliny, delaminace, vměstky). Principem je tedy dodání energie do testovaného materiálu a zachycení tepelné odezvy na toto buzení.

Do skupiny infračerveného testování spadá velké množství technik. Některé se od sebe velmi výrazně liší. Termografickými technikami je možné zachytit vady, které ovlivní tepelné procesy v materiálu.

Možnost detekce defektů v povlacích pomocí IRNDT byla ověřena několika experimentálními studii. Infračervenou termografií byly úspěšně detekovány defekty, jako jsou trhliny [38], [39], [53], delaminace [38], disbondy [40], [54] a poškození opotřebením [51]. Tab. 3 shrnuje defekty, které již byly úspěšně detekovány pomocí IRNDT. Z dostupných informací není zřejmé, zda je možné určit velikost defektů případně v jakém intervalu rozměrů (šířka, délka, hloubka) je možné příslušnou metodou defekt detekovat.

Tab. 3: Přehled IRNDT metod použitých ke zjištění defektů v povlacích

Metoda	Vlnová délka kamery	Vzorkovací frekvence (Hz)	Povlak	Tloušťka (mm)	Typ defektu	Zdroj
FPT	Neuvedeno	Neuvedeno	TBC (ZrO ₂)	0,127	Trhliny, delaminace	[38]
FPT	LWIR	56	Silikon	1	Trhliny (0,4 mm)	[39]
FPT	LWIR	Neuvedeno	TBC (ZrO ₂)	1	Disbondy (FBH)	[40]
HLIT	Neuvedeno	25	Fe	0,5–1,5	Opotřebením	[51]
Laser	Neuvedeno	Neuvedeno	TBC	0,1–2	Trhliny (0,02 mm)	[53]
Laser	LWIR	50	TBC	0,1–2	Disbondy a FBH	[54]

Tab. 4: Přehled IRNDT metod použitých k určení tloušťky

Metoda	Vlnová délka kamery	Vzorkovací frekvence (Hz)	Povlak	Tloušťka (mm)	Chyba v určení tloušťky (%)	Zdroj
FPT	Neuvedeno	Neuvedeno	TBC (ZrO ₂)	0,25–1,5	15,69	[41]
FPT	LWIR (7,5–13 μm)	50	TBC (ZrO ₂)	0,1–0,6	5,35	[42]
FPT simulace	Neuvedeno	Neuvedeno	TBC (ZrO ₂)	0,1–0,6	2,35	[43]
FPT	LWIR (8–9 μm)	60	TBC (ZrO ₂)	0,15–0,3	59	[44]
FPT	MWIR (2,5–5 μm)	100	TBC (SiC)	0,04–0,125	8,2*	[45]
FPT	LWIR (8–14 μm)	60	Barva	0,01–0,25	Neuvedeno	[47]
FPT	LWIR	1000	Polymer	0,1–2	4,1	[48]
FPT	LWIR	70	TBC (SiC)	0,045–0,13	10	[50]
HLIT	LWIR (7,5–13 μm)	50	TBC (ZrO ₂)	0,2–1,1	6,48	[52]
HLIT	LWIR (7,5–13 μm)	50	TBC (ZrO ₂)	0,1–0,6	15,14	[42]
HLIT simulace	Neuvedeno	Neuvedeno	TBC (ZrO ₂)	0,1–0,6	6,37	[43]
Laser (532 nm)	LWIR (7,5–13 μm)	50	Barva	0,06–0,18	Neuvedeno. (40 μm rozlišení)	[60]
Laser (808 nm)	LWIR (7,5–13 μm)	50 (750 s interpolací)	Barva	0,005–0,11	Neuvedeno	[56]
Laser (750 nm)	Neuvedeno	1	Barva	0,06–0,57	5	[58]
Laser simulace	Neuvedeno	Neuvedeno	TBC	0,4–3	5	[59]
Eddy Current	MWIR (1,5–5,1 μm)	Neuvedeno	Barva	0,08–0,24	Neuvedeno.	[61]

* dopočteno z dat

Shrnutí údajů z publikací, které se zabývaly zjišťováním tloušťky povlaků pomocí aktivní termografie, je uvedeno v Tab. 4. V zásadě jsou používány dva různé způsoby pro stanovení tloušťky. První je přes určitý typ kalibrace. Tloušťka se získá ze vztahu mezi tloušťkou a sledovaným parametrem (kalibrační křivka), kterým může být fáze, teplotní rozdíl a mnoho dalších. Druhou možností, jak lze zjistit tloušťku, je porovnání fyzikálního modelu s naměřenou teplotní odezvou. Když porovnáme, jak tyto dva přístupy (kalibrace vs. model) pracují v reálném měření (FPT), můžeme vidět, že chyba v určení tloušťky v obou případech je kolem 5 %. Experimenty a výsledky jsou ovšem neporovnatelné z důvodu, že každá skupina autorů

použila jiné testovací vzorky. Obě metody ukazují velký potenciál. Nelze však jednoznačně určit, který přístup je lepší.

Z rešerše je také zřejmé, že HLIT neposkytuje tak dobré výsledky jako FPT. Ve srovnávací studii mezi FPT a HLIT [42] byla chyba pro HLIT 15,14% a pro FPT 5,35% pro stejný vzorek. Prakticky to znamená, že HLIT se jeví jako nevhodné pro testování povlaků i s ohledem na délku trvání měření (desítky sekund, tj. řádově delší než při FPT). Jedinou výhodou HLIT oproti FPT lze spatřovat v nižší pořizovací ceně HLIT vybavení.

Laserová termografie pro určení tloušťky nebyla zatím příliš prozkoumána. Ukazuje ovšem velký potenciál pro přesné určení tloušťky povlaku. Chyba určení tloušťky u laserové termografie z přehledu (Tab. 4) byla 5 %. Při FPT bylo dosaženo obdobných výsledků. Lze ovšem vidět velký rozptyl hodnot chyb určení tloušťky (4,1 – 59 %). Srovnání FPT a laserové termografie nebylo dosud provedeno na stejných vzorcích, není tedy možné určit, jaká technika je přesnější.

Můžeme vidět, že u většiny experimentů byla upřednostňována dlouhovlnná infračervená kamera. Důvodem je, že keramické povlaky jsou polopropustné pro středněvlnné IR záření [40] a teplota je tedy při jejich použití snímána z oblasti pod povrchem. Dlouhovlnné kamery snímají záření pouze z povrchu. To má nepochybně vliv pro určení tloušťky pomocí modelu ovšem pro určování tloušťky pomocí kalibrace by IR pásmo kamery nemělo mít vliv na výslednou tloušťku. Rozdíl v určování tlouštěk povlaků při použití různých IR kamer zatím nebyl publikován.

Používané vzorkovací frekvence se velmi lišily. Pro inspekci povlaků (uvedených v přehledu současného stavu) byla při pulzní termografii použita atypická vzorkovací frekvence (do 50 Hz). Pro pulzní termografii jsou standardně využívány frekvence začínající na 100 Hz. Frekvence kolem 50 Hz byly pravděpodobně použity, protože se jedná o maximální frekvenci nejběžnějších bolometrických IR kamer, které představují nejlevnější řešení pro použití v průmyslu.

Jednotlivé studie se zabývaly vždy jedním materiálem (povlak-substrát). Z výsledků tedy nelze určit, zda jsou jednotlivé techniky použitelné pro různé materiály a zda lze deklarovanou přesnost měření očekávat u více materiálů a v různých intervalech tlouštěk. Dosavadní výzkum na tyto otázky důležité pro průmyslové nasazení IRNDT zatím uspokojivě neodpověděl.

Výhodou a nevýhodou IRNDT oproti ostatním NDT technikám jsou uvedené v následujícím přehledu.

Výhody:

- Má široké pole možných aplikací.
- Jedná se univerzální techniku pro různé materiály.
- Výsledky jsou plošné, ne bodové (může urychlit inspekci).
- Jedná se o bezkontaktní techniku.
- Lze určovat materiálové vlastnosti.

Nevýhody:

- Náročné na obsluhu.
- Složité na vyhodnocení.
- Lze detekovat pouze defekty blízko povrchu (řádově několik mm pod povrchem).

3 Cíle disertační práce

Disertační práce se zaměřuje na výzkum testování tloušťky povlaků pomocí IRNDT metod. Cíle vycházejí z analýzy současného stavu, která na jedné straně ukazuje výrazné výhody těchto bezkontaktních tepelných metod v porovnání s metodami založenými na jiných fyzikálních principech a na druhé straně ukazuje v současnosti nedořešené oblasti výzkumu důležité pro praktickou aplikaci IRNDT metod pro měření tloušťky povlaků. Důraz je kladen na laserovou termografii, která slibuje velký potenciál s ohledem na přesnost určení tloušťky, nicméně se potýká s dlouhými měřicími časy.

Hlavním záměrem disertační práce je vytvořit nový algoritmus pro určení tloušťky povlaků, dále zjistit, jakou kombinaci materiálu substrát-povlak je možné testovat, a jaká existují omezení v nasazení IRNDT technik pro zjišťování tloušťky povlaků.

Konkrétní cíle práce:

- **Cíl 1 – Návrh a ověření vhodnosti nového typu vyhodnocení**

Navrhnout nový algoritmus vyhodnocení vhodný pro zjišťování tloušťky povlaků, který by přinesl lepší výsledky z pohledu přesnosti a rychlosti měření. Ověřit jeho funkčnost a porovnat jeho vlastnosti s výsledky jiných v současnosti standardně používaných metod.

- **Cíl 2 – Návrh a realizace nového systému na bázi laserové termografie**

Navrhnout a realizovat nový měřicí systém na bázi laserové termografie pro testování povlaků s využitím nového typu buzení umožňující využívat nově navržený algoritmus vyhodnocení (cíl 1) a zároveň používat pokročilé algoritmy vyhodnocení známé z pulzní termografie.

- **Cíl 3 – Ověření funkčních vlastností laserového systému**

Ověřit funkční vlastnosti metody laserové termografie a sestaveného zařízení, na typických vzorcích stříkaných povlaků. Provést porovnání s nejlepší současnou metodou pro testování povlaků.

4 Metody zpracování

Plány experimentů vycházely z cílů práce. Pro zjištění každého z cílů bylo provedeno vždy více experimentů.

Cíl 1 – Návrh a ověření vhodnosti nového typu vyhodnocení

Možnost určení tloušťky povlaků pomocí IRNDT byla potvrzena několika experimentálními studii. Hlavní technikou buzení použitou v těchto studiích byla flash pulzní termografie. Bylo to dáno jejími dvěma hlavními výhodami - plošným buzením a rychlými měřicími časy. Pro určení tloušťky povlaku byl v těchto studiích většinou použit kalibrační přístup při vyhodnocení fáze pomocí techniky vyhodnocení FFT-phase.

V rámci práce byla navržena nová technika vyhodnocení pulzní termografie (P-function), která by měla poskytnout lepší výsledky z pohledu přesnosti a rychlosti stanovení tloušťky než standardně využívaný algoritmus.

Prvním krokem bylo vytvoření hardwarového prvku zajišťující synchronizaci mezi flash lampou a IR kamerou a softwarové upravení měřicího softwaru, aby sekvence byly snímány vždy stejným způsobem pro dosažení opakovatelnosti buzení. Následovalo vlastní změření testovaných vzorků. Vyhodnocení měření pomocí nové techniky (P-function) a srovnání výsledků se standardně využívanou technikou vyhodnocení (FFT-phase).

Hlavním výstupem bylo porovnání technik z pohledu rychlosti a přesnosti měření. Očekávalo se, že novou technikou se dosáhne lepších měřicích časů a přesnějšího měření.

Cíl 2 – Návrh a realizace nového systému na bázi laserové termografie

Laserový systém může přinést lepší výsledky z pohledu přesnosti díky velmi dobré opakovatelnosti buzení. Problémem systému využívající skenování plochy pomocí laseru jsou pomalé měřicí časy, což je jeden z důvodů, proč se tyto systémy nevyužívají. Problémem není jenom samotná doba měření, ale především délka a velikost záznamu nahraná IR kamerou (sekvence by měly desítky GB dat a byly by tedy obtížně zpracovatelné na PC).

Prvním krokem bylo vytvoření koncepce systému. Následovala specifikace a nákup komponent a instalace. Dále proběhlo technické ověření systému, především zda laser dosahuje potřebné stability a výkonu. Posledním krokem bylo provedení testů (ověření koncepce).

Výstupem je zprovozněné nové zařízení pro laserovou termografii.

Cíl 3 – Ověření funkčních vlastností laserového systému

Použitelnost nově navrženého laserového systému byla ověřována v rámci cíle 3. Pomocí laserového systému byla provedena měření vzorků stříkaných povlaků. Byla zhodnocena vhodnost algoritmů vyhodnocení (P-function a FFT-phase). Hodnotícími kritérii byly především rychlost měření, prostorové rozlišení a citlivost měření.

Nejlepší výsledky získané pomocí laserové termografie byly porovnány s výsledky flash pulsní termografie. Byly diskutovány výhody, nevýhody a rozdíly mezi oběma způsoby buzení.

4.1 Sledované funkční vlastnosti

Sledovanými funkčními vlastnostmi jsou:

- rychlost měření R (cm^2/s)
- přesnost stanovení tloušťky δ (%)
- citlivost SPT (-)
- rozpoznatelnost E (-)
- prostorové rozlišení PR (cm^{-2})

Rychlost měření - R (cm^2/s)

Jedním z nejdůležitějších parametrů při NDT měření je rychlost. Rychlost měření byla definována jako změřená plocha za jednotku času podle vztahu

$$R = S_B/t_m, \quad (20)$$

kde S_B (cm^2) je změřená plocha a t_m (s) je doba měření.

Přesnost stanovení tloušťky – δ (%)

Kromě rychlosti měření se při hodnocení NDT technik hodnotí také přesnost měření. Přesnost stanovení tloušťky byla definována jako relativní chyba vůči standardu (v podobě tloušťkoměru Positector 6000, případně vůči metalografickému výbrusu) podle vztahu

$$\delta = \frac{|N - \bar{S}|}{\bar{S}} \cdot 100, \quad (21)$$

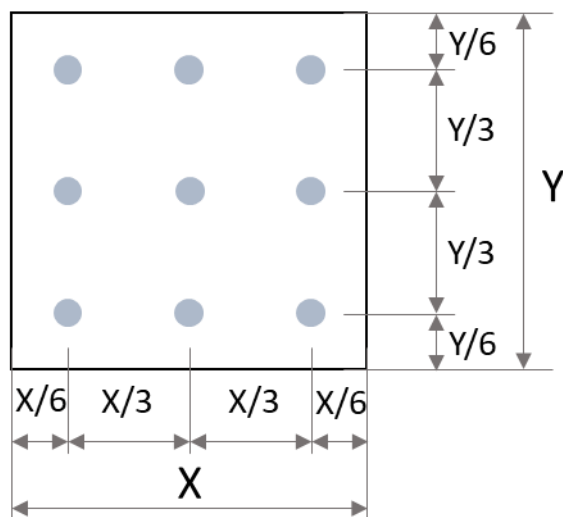
kde N je naměřená hodnota pomocí IRNDT, \bar{S} je skutečná průměrná hodnota (naměřená pomocí referenčního měření).

Jelikož měření pomocí standardní techniky bylo bodové a bylo možné, že v okolí snímaného bodu tloušťka není stejná, byla tloušťka snímána z více bodů a jako skutečná tloušťka byla označena průměrná tloušťka z dané oblasti. Minimální počet bodů (a tedy i měření) z jedné oblasti byl 9 (statisticky dostatečný počet bodů měření, v případě výpočtu nejistoty násobeno koeficientem 1,2). Výpočet \bar{S} je podle vztahu

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n}, \quad n = 9, \quad (22)$$

kde S_i je změřená hodnota pomocí referenčního měření z jednoho bodu.

Obr. 5 ukazuje, rozmístění bodů S_i , ze kterých je \bar{S} vypočítáno.



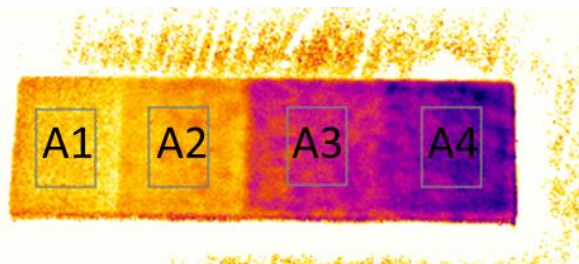
Obr. 5: Rozmístění bodů (referenční měření) pro určení přesnosti stanovení tloušťky, body jsou rozmístěny v závislosti na rozměrech oblasti, X je šířka oblasti a Y je výška oblasti

Rozpoznatelnost – E (-)

Rozpoznatelnost slouží k určení toho, zda je možné od sebe rozeznat plochy s odlišnou tloušťkou povlaku, či nikoliv. Výsledek může nabývat dvou stavů - rozpoznatelné nebo nerozpoznatelné. Určení, zda plochy mají odlišnou tloušťku, probíhalo přes ANOVu (analýza rozptylu) na 5% hladině významnosti. Nulová hypotéza je, že mezi plochami není rozdíl. V případě, že $F > F_{krit}$ nulová hypotéza se zamítá (tj. plochy se statisticky významně liší na 5 % hladině významnosti). V případě že $F < F_{krit}$ nulová hypotéza platí (tj. plochy se statisticky významně neliší na 5 % hladině významnosti). Platí tedy, že tloušťky je možné rozlišit, když

$F > F_{krit}$ a tloušťky se neliší, když $F < F_{krit}$. Zároveň bylo ověřováno, že jednotlivá měření se statisticky významně nelišila (každé měření bylo provedené 4 krát).

Vstupní data byla fáze v případě FFT a SLIM a časy v případě P-function. Nejdříve se určily plochy s rozdílnou tloušťkou (buď známé z výroby, nebo změřené tloušťkoměrem). Poté se provedlo měření a vyhodnocení. Z ploch rozdílných tlouštěk se určil průměr fáze nebo času z výsledných obrazů, viz Obr. 6. Jednotlivé oblasti byly zvoleny tak, aby se nacházely v prostředku jednotlivých ploch rozdílných tlouštěk. Průměry z oblastí jsou pak porovnávány pomocí ANOVy. Samotný výpočet byl řešený v softwaru Excel pomocí modulu v analytických nástrojích. Tab. 5. ukazuje příklad zpracování dat pomocí ANOVy (ve stejném uspořádání/formátování jako v Excelu). Je zde vidět změna průměrů v jednotlivých oblastech v závislosti na opakovaných měřeních. Demonstrační příklad (Obr. 6) ukazuje, že plochy A1-A4 se statisticky významně liší $F > F_{krit}$ (zeleně označené údaje v Tab. 5). Díky tomu se uvažuje, že plochy jsou rozpoznatelné. Kromě toho lze z tabulky (Tab. 5) vyčíst, že opakování měření nemá na výsledky staticky významný vliv $F < F_{krit}$ (modré údaje v Tab. 5). Tj. bylo dosaženo dobré opakovatelnosti měření.



Obr. 6: Ukázka výběru oblastí s rozdílnou tloušťkou, z oblastí A1-A4 byl vypočítán průměr

Tab. 5: Vstupní data pro provedení ANOVy a její výsledky – opakovaná měření vzorky CrFe-S1-P1

Vstupní data

		CrFe-S1-P1				
		Oblast	A1	A2	A3	A4
P-fun (s)	Měření 1	0,085	0,241	0,443	0,591	
	Měření 2	0,086	0,245	0,444	0,586	
	Měření 3	0,085	0,241	0,441	0,589	
	Měření 4	0,087	0,241	0,443	0,588	

Anova: dva faktory bez opakování

Faktor	Počet	Součet	Průměr	Rozptyl
Měření 1	4	1,359508	0,339877	0,049445
Měření 2	4	1,361	0,34025	0,048291
Měření 3	4	1,3563	0,339075	0,048957
Měření 4	4	1,359	0,33975	0,048641
A1	4	0,3433	0,085825	7,89E-07
A2	4	0,968	0,242	4E-06
A3	4	1,770508	0,442627	1,56E-06
A4	4	2,354	0,5885	4,33E-06

ANOVA

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	F krit
Řádky	2,88459E-06	3	9,62E-07	0,296681	3,862548
Sloupce	0,585972737	3	0,195324	60267,56	3,862548
Chyba	2,91686E-05	9	3,24E-06		
Celkem	0,58600479	15			

Citlivost – SPT (-)

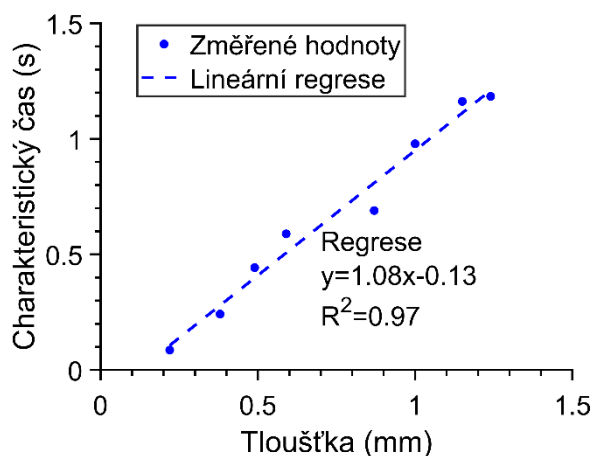
Parametr *SPT* říká, jak strmá je závislost mezi sledovaným parametrem (charakteristický čas, fáze) a tloušťkou. Větší *SPT* znamená větší rozdíl mezi hodnotami sledovaného parametru pro stejné rozdíly hodnot tlouštěk. Tzn. při rozdílu tlouštěk např. 20 μm při *SPT*=2 budou větší rozdíly sledovaného parametru než při *SPT*=1. Při větším *SPT* je také možné detekovat menší rozdíly v tloušťce. V práci slouží tento parametr k posouzení vhodnosti IRNDT technik pro

testování různých povlaků. Tj. větší *SPT* znamená snadnější možnost testování povlaku. Malá strmost (okolo 0) znamená, že technika je nevhodná pro testování.

SPT byla definována jako směrnice přímky z lineární spojnice trendu, kde na ose x jsou tloušťky a na ose y sledovaný parametr (fáze nebo charakteristický čas). Absolutní hodnota směrnice (parametr *SPT*) ukazuje citlivost (čím větší citlivost, tím menší rozdíly v tloušťce lze rozlišit). Pomocný parametr R^2 ukazuje, jak moc se závislost liší od lineární závislosti, čím menší R^2 tím méně je závislost podobná přímce. Obr. 7 ukazuje, jak lze hodnotu *SPT* získat (*SPT* je 1,08).

Vstupní data byla stejná jako v případě určení rozpoznatelnosti, tj. průměry získané z IRNDT měření.

Je třeba upozornit na to, že *SPT* lze použít pouze pro hodnocení povlaků v rámci jedné techniky vyhodnocení, např. pro P-function. Nelze porovnávat směrnice u P-function vůči směrnicím FFT-phase. To je dáno jinými vstupními jednotkami. Číselně stejně velká hodnota změny u P-function nemá stejný vliv jako stejná číselná změna u FFT-phase. Např. u P-function rozdíl 0,04 je velká snadno detekovatelná změna, kdežto u FFT-phase je tato změna zanedbatelná.



Obr. 7: Ukázka určení *SPT* ($SPT=1,08$)

Díky tomu, že se charakteristické časy mohou nejméně lišit o čas jednoho snímku, lze dopočítat maximální rozlišení (*MR*) vyhodnocení P-function pro daný povlak

$$MR = 3 \cdot \frac{1}{\frac{f_s}{SPT}}, \quad (23)$$

kde SPT je směrnice parametr tloušťka, f_s je vzorkovací frekvence. Násobení 3 je přítomno, aby byl pokryt větší konfidenční interval (3σ , interval spolehlivosti 99,7 %). Tj. v případě, že $SPT=1,08$ a $f_s=250$ Hz, $MR=11,1$ μm . Je potřeba si uvědomit, že parametr MR je pouze ilustrační. Je to dáno tím, že závislost nemá tvar přímky. Nicméně jsme díky němu schopni odhadnout, jaký přibližný rozdíl tloušťky jsme schopni rozlišit.

Prostorové rozlišení – PR (cm^2)

Prostorové rozlišení je hlavním parametrem při porovnávání plošných a bodových měření. Říká kolik měřicích bodů je na cm^2 . Při plošném měření je prostorové rozlišení omezené rozlišením IR kamery

$$PR_P = \frac{PP}{S}, \quad (24)$$

kde PP je počet pixelů na ploše a S je plocha.

U plošného buzení platí $PR=PR_P$.

Při bodovém měření je prostorové rozlišení omezené především počtem skenovacích bodů

$$PR_B = \frac{PB}{S}, \quad (25)$$

kde PB je počet skenovaných bodů na ploše a S je plocha.

V případě, že je velmi malé rozlišení IR kamery na plochu, omezujícím faktorem je PR_P . Obecně tedy platí, když $PR_P > PR_B$, tak $PR=PR_B$. Když $PR_P < PR_B$, tak $PR=PR_P$.

4.2 Vzorky

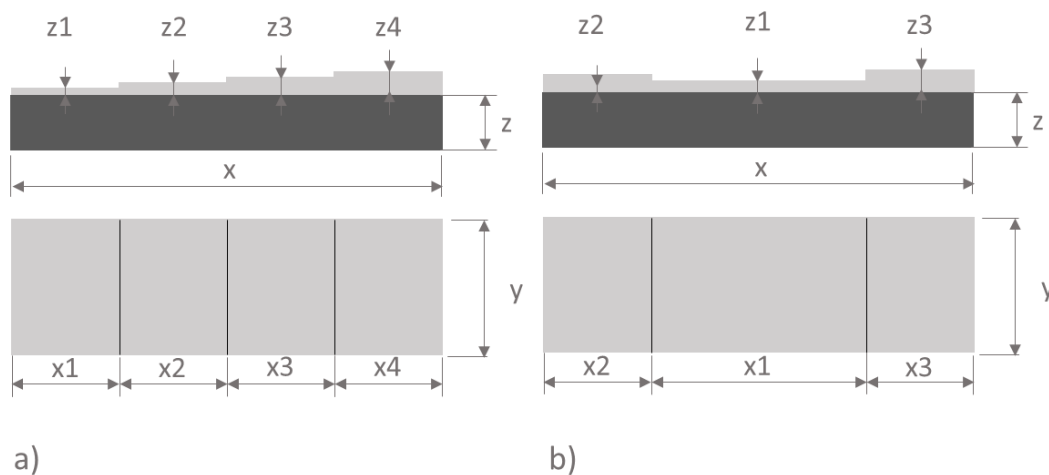
Pro demonstrování univerzálního využití IRNDT pro zjištění tloušťky povlaků byly vytvořeny různé typy vzorků (odlišné materiály povlaku a substrátu, vytvořené různými technologiemi)

Jako hlavní materiál substrátu byla zvolena ocel. Ověření funkčnosti IRNDT pro různé technologie nanášení bylo zajištěno vyrobením vzorků pomocí 4 odlišných technologií. Technologie byly zvoleny na základě provedené rešerše. Byly vyrobeny vzorky jednou z nejčastěji používaných technik stříkání – nástřik plamenem (FS), dále vzorky jednou z nejmodernějších technologií nanášení – HVOF, vzorky zajímavé z pohledu automotive – nástřik barvou a vzorky vyrobené jednou z nejrychlejších technologií nanášení - TWAS.

Materiály byly zvoleny tak, aby bylo možné tloušťku snadno určit pomocí standardního měřicího přístroje tloušťky povlaků (vířivé proudy a magneticko-indukční princip) – SnSbCu (FS), WCCoCr (HVOF). Další materiál byl zvolen tak, aby nebylo možné standardním přístrojem tloušťku určit – CrFe (TWAS). Tento vzorek sloužil především pro demonstrování výhod IRNDT oproti standardním měřením. A poslední materiál byl zvolen kvůli známým opticko-tepelným vlastnostem – barva LabIR paint.

Každý typ povlaku se pohybuje v nějakém rozmezí tlouštěk, které je dané použitou technologií nanášení. Proto nebylo možné vyrobit vzorky se stejnými tloušťkami. Vzorky se pohybovaly v tloušťkách pod $100\ \mu\text{m}$ (LabIR paint HERP-LT-MWIR-BK-11), dále mezi tloušťkami $100 - 500\ \mu\text{m}$ (WCCoCr, SnSbCu, CrFe), $500 - 1000\ \mu\text{m}$ (SnSbCu, CrFe), a nad $1000\ \mu\text{m}$ (CrFe).

Značení vzorku bylo zvoleno xxx-Sy-Pz, kde xxx je označení materiálu, S značilo sérii a y značilo číslo série, P značilo vzorek a z číslo vzorku daného materiálu. Byly vytvořeny tři typy vzorků – se stupňovitě se zvyšující tloušťkou (typ A), viz Obr. 8 a), ve středu s nejmenší tloušťkou (typ B), viz Obr. 8 b) a vzorky s rozdílnou tloušťkou v celé ploše (typ C).



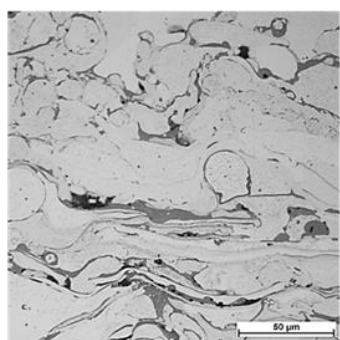
Obr. 8: Schematicky znázorněný vzorek: a) vzorek se stupňovitě se zvyšující tloušťkou b) vzorek ve středu s nejmenší tloušťkou

Skutečné rozměry vzorků, jejich technologie výroby a použité označení jsou uvedené v Tab. 6. Metalografické výbrusy jsou na Obr. 9.

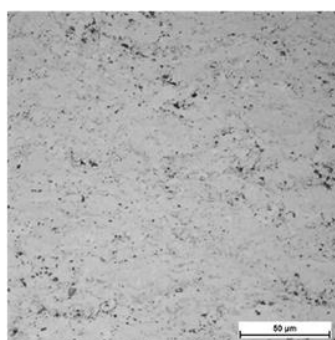
Tab. 6: Přehledová tabulka vzorků

Označení vzorku	Typ vzorku	Technologie výroby	Tloušťka substrátu (mm)	Tloušťka povlaku (mm)				Rozměry vzorku (mm)				
			z	z1	z2	z3	z4	x1	x2	x3	x4	y
CrFe-S1-P1	A	TWAS	4,91	0,22	0,38	0,49	0,59	15	19	19	18	25
CrFe-S1-P2	A	TWAS	4,91	0,87	1	1,15	1,24	18	17	17	19	25
SnSbCu-S1-P1	A	FS	4,91	0,16	0,26	0,42	0,52	19	17	20	17	25
SnSbCu-S1-P2	A	FS	5,07	0,61	0,71	0,79	0,88	19	19	18	18	25
WCCoCr-S1-P1	B	HVOF	5	0,07	0,15	0,24	-	40	20	20	-	25
WCCoCr-S1-P2	B	HVOF	5	0,3	0,37	0,41	-	40	20	20	-	25

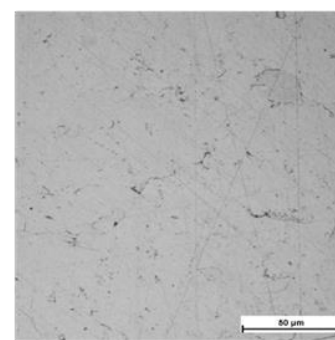
Označení vzorku	Typ vzorku	Technologie výroby	Tloušťka substrátu (mm)	Tloušťka povlaku (mm)	Rozměry vzorku (mm)	
					x	y
LPS-S1-P1	C	stříkání sprejem	2	< 0,05	100	50
LPS-S2-P2	C	stříkání sprejem	2	< 0,05	100	50



a)



b)



c)

Obr. 9: Metalografické výbrusy: a) TWAS-CrFe, b) HVOF-WCCoCr, c) FS-SnSbCu; měřítko 50 μm

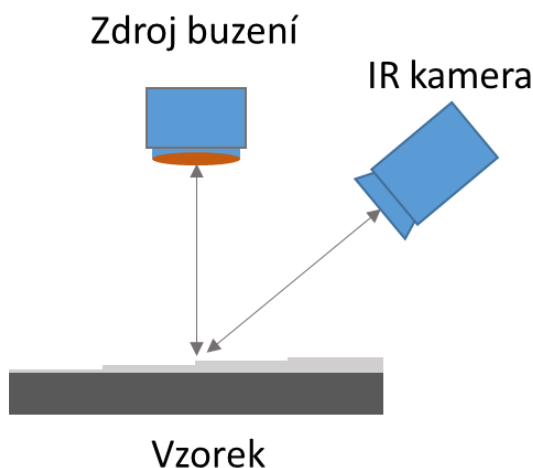
4.3 Metody termografického testování

Experimenty byly provedeny pomocí dostupného vybavení: IR kamery (MWIR) a třemi různými zdroji buzení – flash lampou, halogenovou lampou a CW laserem. Každá technika (FPT, HLIT a LPT) je popsána zvlášť a je dělena do bloků uspořádání, zdroj a způsob buzení, detekční systém a algoritmy vyhodnocení.

4.3.1 Uspořádání

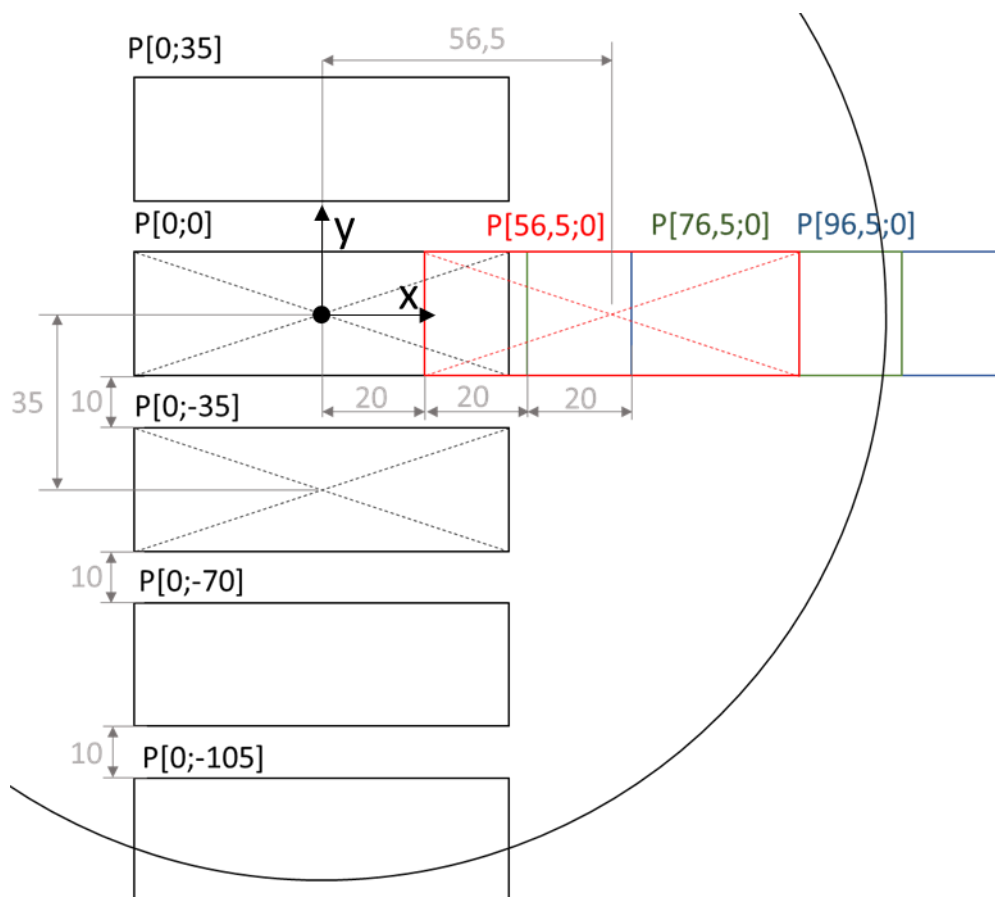
Blok uspořádání popisuje obecné uspořádání všech provedených měření. Měřicí systém se skládal z budicího zdroje, IR kamery, synchronizačního zařízení (zajišťovalo synchronizaci mezi zdrojem buzení a kamerou) a PC s měřicím softwarem.

Všechna měření byla provedena v režimu na odraz, viz Obr. 10.



Obr. 10: Obecné prostorové uspořádání měření

Pro určení závislosti pozice vzorku pod zdrojem buzení byly testovány různé pozice pod zdrojem buzení. Pozice byla označena dvěma souřadnicemi, které popisovaly vzdálenost od středu zdroje buzení (viz Obr. 11). Pozice byla zapisována ve formátu $P[x; y]$, kde P je zkratka pro pozici a x představuje vzdálenost v ose x a y v ose y od středu budicího zdroje v mm. Například základní pozice, kde byl střed vzorku umístěn pod středem budicího zdroje, byla označena $P[0;0]$. Zdroj buzení byl ve všech případech umístěn kolmo na střed vzorku.



Obr. 11: Schematické znázornění uspořádání vzorek-budící zdroj

4.3.2 Zdroje a způsob buzení

Měření byla provedena třemi různými zdroji buzení – flash lampou, halogenovou lampou a laserem. Buzení pomocí flash lampy bylo v pulzním režimu (FPT), pomocí halogenové lampy v lock-in režimu (HLIT) a pomocí laseru v pulzním režimu (LPT).

Flash pulzní termografie

Flash pulzní termografie je standardní technikou IRNDT. V rámci práce nebyl způsob FPT buzení jakkoliv vylepšován.

Při FPT byla jako zdroj buzení použita flash lampa Hensel 6000 J. Buzení bylo provedeno jedním pulzem s plným výkonem lampy. Doba pulzu použité flash lampy byla 6 ms. Flash lampa byla umístěna 38,5 cm nad vzorkem. Na Obr. 12 a) je fotografie uspořádání pro FPT.

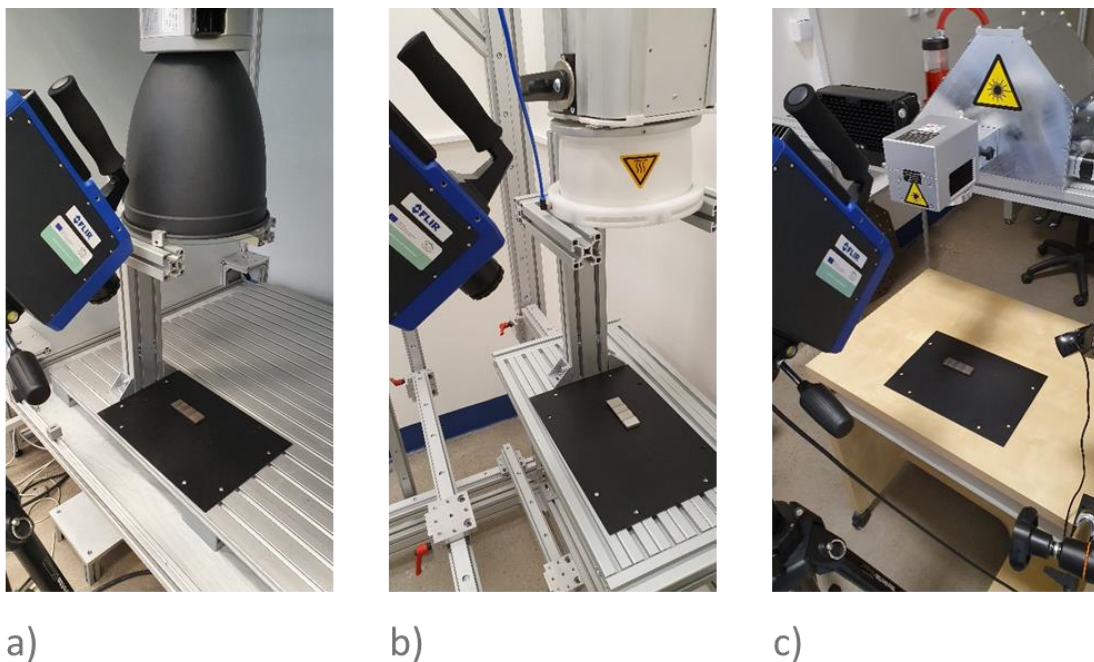
Každé měření bylo provedeno 4 krát, aby bylo možné ověřit opakovatelnost měření.

Halogenová lock-in termografie

Halogenová lock-in termografie je jednou z nejpoužívanějších technik IRNDT. U HLIT je možné měnit celou řadu parametrů (tvar buzení, amplituda, offset, frekvence buzení), a proto existují různé varianty lock-in buzení.

V rámci práce byl použit sinusový tvar buzení s tím, že byla zvolena maximální možná amplituda bez offsetu (v dolní půl vlně se lampa vypne). Frekvence buzení (lock-in frekvence) byla vybrána tak, aby se na výsledném obrazu dosáhlo největšího kontrastu mezi plochami s rozdílnou tloušťkou (dle CNR). Testovány byly frekvence 0,1, 0,2, 0,5, 1 Hz. Všechna měření byla provedena jednou halogenovou lampou Hedler o příkonu 2 kW. Každé měření bylo provedeno 4 krát, aby bylo možné ověřit opakovatelnost měření.

Halogenová lampa byla umístěna 38,5 cm nad vzorkem. Na Obr. 12 b) je fotografie uspořádání pro HLIT.



Obr. 12: Fotografie uspořádání a) FPT, b) HLIT, c) LPT

Laserová pulzní termografie

Představené způsoby buzení laserové termografie jsou nové. Měření byla provedena pomocí CW laseru (JenLas D2.mini 5W S) o vlnové délce 532 nm a nastaveném výkonu 1245 mW a CW laseru (Oxxius LBX-375 HPE) o vlnové délce 375 nm a nastaveném výkonu 225 mW. Parametry laserů jsou uvedené v Tab. 7

Tab. 7: Popis parametrů použitých laserových systémů

Laserový systém	Oxxius LBX-375 HPE	JenLas D2.mini 5W S
Vlnová délka	375 ± 5 nm	532 ± 1 nm
Max. výkon	0,4 W	5 W
Stabilita	± 0,24 %	± 3 %
Divergence	1,4 x 2,2 mrad	4 mrad
Provozní režim	CW	CW
Chlazení	Vzduchem	Vzduchem

Buzení bylo provedeno v pulzním režimu (z pohledu buzení vzorku). Tj. jeden bod na vzorku, byl vybuzen jednou jedním krátkým pulzem (délka pulzu byla 50 ms). Skenování vzorku umožnila skenovací hlava Scancube 14. Skenovací hlava není zakončena f-theta objektivem, a tudíž paprsky jsou paralelní. Výhoda takového systému je v možnosti skenování velkých ploch. Střed skenovací hlavy byl umístěn ve vzdálenosti 44 cm od středu vzorku. Každé měření bylo provedeno 4 krát, aby bylo možné ověřit opakovatelnost měření.

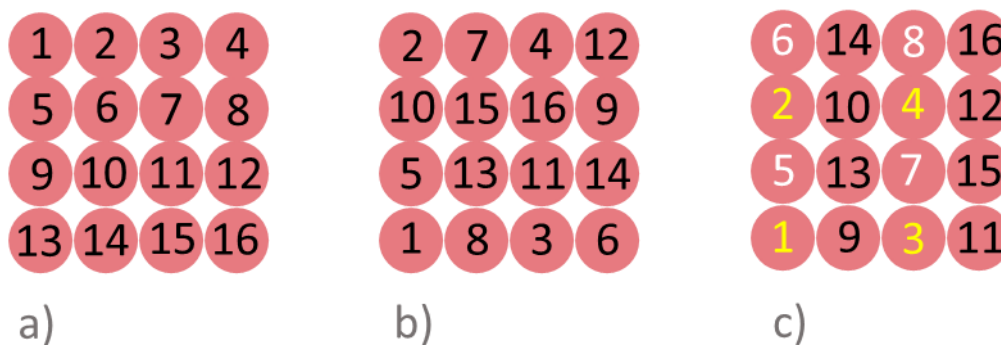
Na Obr. 12 c) je fotografie uspořádání pro LPT.

Vzorek byl skenován třemi různými způsoby:

- Plné rastrové skenování
- Řídké rastrové skenování
- Poisson disk skenování

Plné rastrové skenování

Základní podmínkou navrhovaných měření bylo, aby se tepelné odezvy spotů (míst, kam dopadá laserový paprsek) neovlivňovaly. Díky tomu je při využití rastrového skenování, kde se budí body vedle sebe, nutné čekat, než dojde k vychladnutí vzorku, předtím než se provede další buzení. Tento typ buzení výrazně prodlužuje dobu měření. Proto bylo provedeno urychlení pomocí časové optimalizace. Navrhované algoritmy časové optimalizace jsou Point Base Optimization a Laser Shifting.



Obr. 13: Porovnání pořadí bodů při různých způsobech optimalizace: a) standardní skenování, b) Point Base Optimization, c) Laser Shifting; kruhy představují jednotlivé spoty a číslo spotu udává pořadí, v jakém bude spot buzen

Rozdíly v pořadí vybuzení znázorňuje Obr. 13. Při standardním skenování dochází k postupnému skenování. To je časově nevýhodné, protože je vždy nutné čekat, než vychladne předchozí spot.

V případě Point Base Optimization jsou body buzení rozmístěny tak, aby se co nejméně ovlivňovaly. Byl navržen a vytvořen algoritmus v Matlabu, který body rozmisťuje na základě Heat Affected Zone (HAZ), Cooling Duration (doba chladnutí) a Excitation Duration (doba buzení). HAZ je definována, jako oblast (definována poloměrem), kde ještě dochází k tepelnému ovlivnění materiálu. Tato oblast je, vždy větší než velikost spotu a její velikost závisí na materiálových vlastnostech, na použitém výkonu laseru a době buzení. Doba chladnutí je doba, za jakou vybuzené místo vychladne. Doba buzení je doba, po kterou laser budí jeden bod.

Algoritmus funguje následujícím principem: Umístí se první bod. Ten je vždy v levém spodním rohu skenované oblasti. Vypočítají se vzdálenosti všech bodů k bodu 1. Nejbližší bod, který splňuje podmínku, že se nenachází v HAZ bodu 1 a je ve vzdálenosti větší než je průměr vzdáleností všech bodů vůči bodu 1, je bod 2. Je zjišťována časová kolize mezi bodem 1 a 2 (tzn. během chladnutí v HAZ bodu 1 nesmí být v této oblasti umístěn jiný bod). Jestliže body kolidují, tak je jako bod 2 testován bod, který je další v pořadí vzdáleností. Toto se opakuje, dokud není nalezen vhodný bod. V případě, že není vhodný bod nalezen, přidá se čekací čas 10 ms a celá procedura se opakuje. Bod 3 a všechny další jsou určeny stejným způsobem. Výstupem algoritmu je rozmístění bodů (souřadnice x a y) a čekací časy mezi jednotlivými body.

Problémem je vložení časové informace o bodech do softwaru, který ovládá laser. Při použití 300 bodů to může znamenat ruční vložení až 299 čekacích příkazů. Předání bodů a i

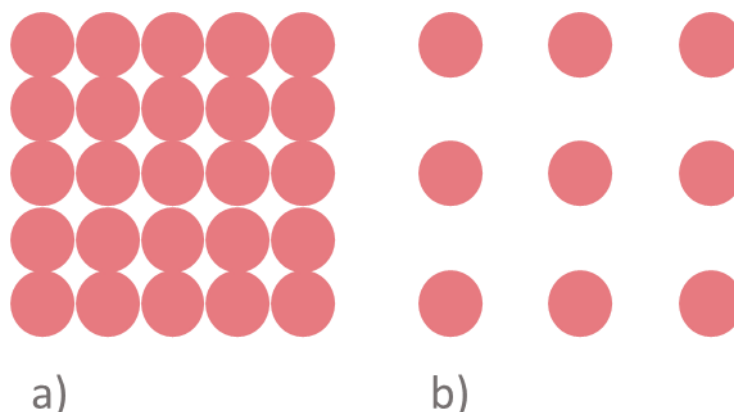
čekacích signálů bylo řešeno programováním ASCII příkazů pomocí Matlabu a následné vložení do softwaru ovládajícího laser (Scaps).

Z důvodu poměrně velké složitosti byla vytvořena technika Laser Shifting, kterou lze velmi snadno realizovat v jakémkoliv softwaru (vhodné především pro využití s jiným laserovým softwarem pro rychlé odzkoušení). Princip techniky je vytvoření matic bodů, které jsou buzeny jeden za druhým. Mezi body je vždy mezera, do které se později vloží body z jiné matice bodů (případně i z více matic bodů). Mezi jednotlivé matice se pak vkládají čekací časy, aby nedocházelo k ovlivnění bodů mezi sebou. Laser Shifting byl v této práci použit pouze pro ověření konceptu.

Všechna měření byla provedena pomocí Point Base Optimization.

Řídké rastrové skenování

Dalším typem skenování, které bylo použité v disertační práci je řídké (sparse) skenování. V tomto případě je skenována plocha formou rastru obdobně jako v případě plného rastru. Nicméně ne celá skenovaná plocha je vybuzena (tj. mezi jednotlivými spoty je nevybuzené místo). Takovéto skenování urychluje celé měření a přitom při vhodně zvoleném kroku (rozpětí mezi body) zůstane prakticky stejná vypovídací hodnota. Tento typ skenování byl použit v kombinaci s Point Base Optimization pro dosažení ještě rychlejších měření. Obr. 14 ukazuje rozdíl mezi plným a řídkým rastrem.

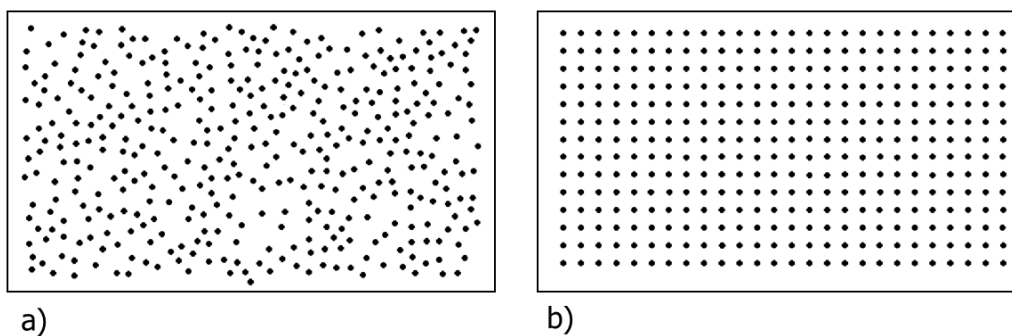


Obr. 14: Rozdíl mezi a) plným a b) volným rastrem

Poisson disk skenování

Skenování pomocí Poissonových disků patří také mezi řídké skenování. Rozložení bodů pomocí Poissonovo disků vytvoří pole bodů, které jsou uniformně rozmístěny po celé oblasti zájmu. Jedná se o náhodné rozložení bez viditelných vzorů v rozložení, které má vlastnosti

modrého šumu [62]. Vlastnosti takového rozložení se využívá pro vzorkování v mnoha odvětvích obrazového zpracování [63]. Rozmístění je generováno pomocí Poissonových disků, kde poloměr disku je polovina vzdálenosti mezi nejbližšími dvěma body. Tento typ skenování nebyl v kombinaci s aktivní termografií nikdy použit. Tento typ volného skenování by měl být efektivnější než volný rastr o stejném počtu bodů. Skenování pomocí Poissonových disků bylo navíc zrychleno pomocí Point Base Optimization. Obr. 15 ukazuje rozdíly mezi skenováním pomocí volného rastru a Poissonových disků při zachování stejného množství skenovacích bodů.



Obr. 15: Distribuce bodů a) pomocí Poissonových disků a b) pomocí volného rastru

Porovnání různých typů optimalizace

Použití různých typů optimalizace skenovacího procesu má za cíl především zrychlit samotné měření. Z těchto důvodů je tedy nutné definovat nejrychlejší možný měřicí čas a všechny rychlosti měření k němu porovnávat. Teoreticky nejrychlejší měřicí čas je definován jako počet všech použitých skenovacích bodů vynásobený dobou buzení a k tomuto součinu přičtená jedna doba chladnutí.

$$t_t = n_b \cdot t_b + t_c, \quad (26)$$

kde t_t je teoreticky nejrychlejší čas, n_b je počet bodů, t_b je doba buzení a t_c je doba chladnutí. Rychleji proces měření nemůže proběhnout.

4.3.3 Detekční systém

Popis detekčního systému se týká použité kamery a také synchronizace mezi kamerou a budícím zdrojem.

Pro všechna měření byla použita IR kamera Flir SC7650 s objektivem 50 mm (11°). Jednalo se o InSb kameru. Rozsah vlnových délek použité kamery byl s daným objektivem 3–5 μm . NETD (noise equivalent temperature difference) bylo menší než 25 mK.

Vzorkovací frekvence byla 250 Hz pro FPT a LPT a 50 Hz pro HLIT. Rozlišení kamery bylo nastaveno na 320 x 256 pixelů (maximální možné při vzorkovací frekvenci 250 Hz). Měření bylo provedeno tak, aby bylo možné vyhodnotit 1000 snímků. Pro některé typy vyhodnocení je vhodné odečíst referenční snímek (místo teplot, zobrazujeme rozdíly teplot). Z tohoto důvodu bylo zaznamenáno i několik snímků před buzením.

Pro všechna měření byla provedena synchronizace mezi kamerou a zdrojem buzení. Pro FPT a HLIT byl vyroben synchronizační box, který na základě vzorkování kamery spouštěl buzení. V případě laserů byla synchronizace řešena přes RTC kartu (řídící karta laserového systému). Buzení bylo také spouštěno v závislosti na vzorkování kamery. Na rozdíl od FPT a HLIT bylo spouštění prováděno několikrát (pro každý laserový bod).

4.3.4 Algoritmy vyhodnocení

Algoritmy vyhodnocení se vybírají v závislosti na použitém buzení. V práci byly použity standardní algoritmy vyhodnocení (FFT-phase, porovnání analytického modelu se změřenou odezvou, SLIM), ale také navržen nový algoritmus vyhodnocení (P-function).

FFT-phase

Před vyhodnocením pomocí FFT-phase byla sekvence upravena odečtením referenčního snímku (10. snímek před zábleskem) od zbylé sekvence. Tato úprava má na výsledky minimální vliv (pouze se mírně liší fáze). Úprava je provedena z toho důvodu, aby byly porovnávány algoritmy vyhodnocení na stejných vstupních datech (pro všechny ostatní techniky je odečtení nutné udělat). Při FFT je nutné vybrat vhodný snímek z FFT sekvence. Vhodný snímek byl vybrán tak, aby byly co nejvíce rozpoznatelné rozdíly mezi jednotlivými plochami s rozdílnou tloušťkou povlaku. Tím se získá snímek, který zobrazuje rozdíly tloušťek v podobě fází. Pro převedení fází na tloušťky je nutné získat mezi těmito parametry vztah (kalibrační křivka, kalibrační rovnice). FFT-phase je univerzální algoritmus a byl použit pro vyhodnocení měření pomocí FPT a LPT.

Analytický model

Vyhodnocení je založené na porovnávání změřené tepelné odezvy s analytickým modelem. Model je navržen pro vyhodnocení flash pulsní termografie. Analytický model byl vypočítán pomocí princip thermal quadrupoles [64]. Tento princip funguje na spojování dvojbranů, obdobným způsobem jako je prováděn v elektrotechnice. Prakticky to znamená, že jsou známy předpřipravené matice jednotlivých dvojbranů, které je poté možné vhodnou matematickou

operací spojit. Matice jsou spojovány přes rovnice ve formě po Laplaceově transformaci. Po spojení matic a vyjádření hledaného parametru (v tomto případě teploty na přední straně) se provede inverzní Laplaceova transformace.

Rovnice pro výpočet jsou:

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{p}{a_1}}, \quad (27)$$

$$\alpha_2 = \sqrt{\frac{p}{a_2}}, \quad (28)$$

$$V_f = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \phi_1 \end{bmatrix}, \quad (29)$$

$$V_r = \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \phi_2 \end{bmatrix}, \quad (30)$$

$$A_1 = \cosh(\alpha_1 \cdot e_1), \quad (31)$$

$$B_1 = \frac{\sinh(\alpha_1 \cdot e_1)}{\lambda_1 \cdot S \cdot \alpha_1}, \quad (32)$$

$$C_1 = \lambda_1 \cdot S \cdot \alpha_1 \cdot \sinh(\alpha_1 \cdot e_1), \quad (33)$$

$$D_1 = A_1, \quad (34)$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix}, \quad (35)$$

$$A_2 = \cosh(\alpha_2 \cdot e_2), \quad (36)$$

$$B_2 = \frac{\sinh(\alpha_2 \cdot e_2)}{\lambda_2 \cdot S \cdot \alpha_2}, \quad (37)$$

$$C_2 = \lambda_2 \cdot S \cdot \alpha_2 \cdot \sinh(\alpha_2 \cdot e_2), \quad (38)$$

$$D_2 = A_2, \quad (39)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix}, \quad (40)$$

$$V_f = M_1 \cdot M_2 \cdot V_r, \quad (41)$$

kde a_1 je difuzivita první vrstvy, a_2 difuzivita druhé vrstvy, p je Laplaceův operátor, V_f je vektor přední strany, Θ_1 je Laplaceova teplota na přední straně, Φ_1 je Laplaceův tok na přední straně, e_1 je tloušťka první vrstvy, λ_1 je vodivost první vrstvy, S je plocha, analogicky k tomu je V_r je vektor zadní strany, Θ_2 je Laplaceova teplota na zadní straně, Φ_2 je Laplaceův tok na zadní straně, e_2 je tloušťka druhé vrstvy, λ_2 je vodivost druhé vrstvy.

Celý tento proces byl zpracován v Matlabu. Řešení rovnic a vyjádření teploty (Θ_1) bylo provedeno přes Symbolic Toolbox a funkci solve. Výpočet inverzní Laplaceovy transformace byl proveden přes Gaver-Stehfest algoritmus. Materiálové parametry pro model jsou pro každou vrstvu difuzivita, vodivost a tloušťka. Okrajové podmínky jsou Laplaceův tok na přední straně (dopadající energie na vzorek) a Laplaceův tok na zadní straně, který je 0. V modelu nejsou započítány tepelné ztráty (ty by neměly mít zásadní vliv pro měření zamýšlených vzorků). Je potřeba upozornit, že popsaný model počítá se zdrojem buzení ve formě Diracovo impulsu. Při měření flash pulz nemá Diracův tvar. Z toho důvodu především počátek měření (přibližně prvních 20 – 30 ms) se příliš neshoduje s analytickým výsledkem.

Fitování bylo řešeno vytvořením křivek s rozdílnou tloušťkou povlaku. Tyto křivky byly pak porovnány s naměřenou křivkou (od 10. snímku dále). Toto porovnání bylo provedeno přes parametr R squared (Coefficient of Determination):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_1 - y_2)^2}{\sum(y_1 - \bar{y}_1)^2}, \quad (42)$$

kde y_1 je naměřená křivka a y_2 je křivka pro jednu tloušťku pomocí analytického modelu. Pro každou křivku byl vypočítán parametr R^2 . Křivka a tedy tloušťka, kdy byl tento parametr největší, byla křivka, která nejvíc koresponduje s měřením. Tím byla tedy získána tloušťka pomocí analytického modelu.

SLIM

Všechna HLIT měření byla vyhodnocena algoritmem SLIM. Před jeho aplikováním bylo provedeno odečtení referenčního snímku (10. snímek před vybuzením). Poté bylo aplikováno SLIM (fáze). Tímto způsobem se získal obraz, kde nerovnoměrnosti tloušťky byly zobrazeny jako nerovnoměrnosti ve fázích.

P-function

P-function je nově navržený algoritmus pro vyhodnocení pulzní termografie, představený v [65], [66], [67]. Jeho hlavní výhodou je transformování změřené sekvence do jednoho výsledného defektogramu. U standardně používaných technik je změřená sekvence transformována do nové sekvence defektogramů, ze které je potřeba ještě vybrat vhodný výsledek. To celý proces vyhodnocení zpomaluje. P-function je založen na časové transformaci termografické sekvence

$$F(t) = T(t) \cdot t^n, \quad (43)$$

kde $T(t)$ je teplota v čase, t představuje čas a n transformační parametr.

V nově vytvořené funkci $F(t)$ se pak hledá minimum a jeho časový výskyt. Tento čas souvisí s charakteristickým bodem, který se při ostatních neměnných parametrech (materiál, zdroj buzení, apod.) mění v závislosti na hloubce defektu.

Před vyhodnocením pomocí P-function byla sekvence upravena odečtením referenčního snímku (10. snímek před zábleskem) od zbylé sekvence. Tím se získala sekvence, která zobrazuje rozdíly teploty. Hlavní výhodou takové sekvence je, že eliminuje vliv drobných variací v začátku měření. Tyto variace mohou být způsobeny například jinou okolní teplotou. Poté následovalo vlastní aplikování algoritmu P-function.

Volba transformačního parametru n velkou měrou ovlivňuje výsledky. Tento parametr byl zjišťován experimentálně. Jeho volba závisí v případě testování povlaků na tloušťce povlaku a substrátu a na materiálových vlastnostech. Nalezení tohoto parametru je jednodušší na sekvencích v teplotách. Z tohoto důvodu je k upravené sekvenci přičtena teplota 20 °C (přibližně teplota vzorku v nevybuzeném stavu). Možnost provádět P-function na neupravených datech (tj. bez odečtení referenčního snímku) byla zamítnuta z důvodů toho, že by nebyly eliminovány drobné variace v počátcích měření.

Výsledkem P-function je jeden snímek. Ten poté může být upraven na snímek map tlouštěk pomocí kalibrační rovnice.

4.4 Popis experimentů

Experimenty jsou členěny dle cílů, které mají splnit.

4.4.1 Ověření vhodnosti nového typu vyhodnocení

Všechny experimenty v kapitole 4.4.1 slouží ke splnění cíle 1: navržení nového algoritmu vyhodnocení pro zjišťování tloušťky povlaků a ověření jeho funkčnosti. Algoritmus byl porovnáván s výsledky standardních algoritmů vyhodnocení jak experimentálně, tak pomocí simulací. Činnosti ke splnění cíle 1 se skládaly z následujících 9 úkolů:

Úkol 1-1: Ověření detekce rozdílu v teplotních průbězích ploch s rozdílnou tloušťkou

Úkol 1-2: Porovnání rozdílů mezi plochami s rozdílnou tloušťkou pomocí jednotlivých pokročilých algoritmů vyhodnocení

Úkol 1-3: Porovnání závislostí tloušťka sledovaný parametr

Úkol 1-4: Vliv materiálových vlastností na výsledky P-function

Úkol 1-5: Ověření vlivu pozice vzorku pod flash lampou na výsledky

Úkol 1-6: Ověření vlivu podkladového materiálu na šíření tepla

Úkol 1-7: Ověření výsledků simulací pomocí experimentů

Úkol 1-8: Ověření kalibračního přístupu

Úkol 1-9: Porovnání výsledků s HLIT

Podrobnosti k jednotlivým úkolům jsou uvedeny níže.

Úkol 1-1: Ověření detekce rozdílu v teplotních průbězích ploch s rozdílnou tloušťkou

Jako první proběhlo ověření pomocí simulace, zda je vůbec možné detekovat rozdíl v tepelném přenosu při různé tloušťce povlaku při FPT. Tato simulace má za cíl dát představu, jak velké rozdíly v tepelných odezvách lze očekávat při rozdílech v tloušťce povlaku.

Ověření bylo provedeno počítačovou simulací pomocí softwaru COMSOL. V COMSOLu byl vytvořen virtuální vzorek s dvěma různými tloušťkami povlaku 5 a 35 μm (pro velké množství aplikací je dostatečné zachytit rozdíl 30 μm) a substrátem tlustým 2 mm. Byly definovány tepelné vlastnosti materiálu povlaku – tepelná vodivost 0,75 W/(m·K), hustota 1300 kg/m³, kapacita 2500 J/(kg·K) a substrátu – tepelná vodivost 16,2 W/(m·K), hustota 7800 kg/m³, kapacita 502 J/(kg·K). Tato simulace odpovídala nanosené barvě na oceli. Doba pulzu u FPT byla nastavena na 1 ms. Proběhla simulace FPT buzení. A nakonec byly odečteny grafy časového průběhu teploty z povrchu vzorku v místě s tloušťkou 5 a 35 μm . Odezvy byly poté

porovnány. V případě, že se odezvy liší alespoň v desetinách stupně, mělo by být možné je zachytit IR kamerou (NETD je u většiny běžných kamer pod 80 mK).

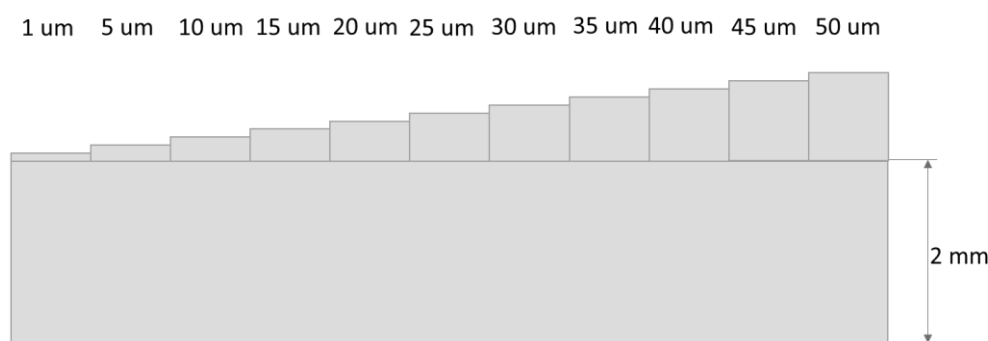
Úkol 1-2: Porovnání zvýraznění rozdílů mezi plochami s rozdílnou tloušťkou pomocí jednotlivých pokročilých algoritmů vyhodnocení

Dalším krokem bylo potvrdit pomocí simulace, zda aplikování pokročilých algoritmů vyhodnocení zvýrazní rozdíly mezi plochami s rozdílnou tloušťkou. To bylo realizováno zpracováním nasimulovaných dat z ploch s tloušťkami 5 a 35 μm . Očekávalo se, že budou zvýrazněny rozdíly v odezvách mezi plochami s odlišnou tloušťkou povlaku.

Úkol 1-3: Porovnání závislosti tloušťka sledovaný parametr

Pro hodnocení tloušťky povlaku na základě kalibrace je důležité, aby bylo možné závislost jednoduše popsat pomocí kalibrační rovnice. Ideální je vztah, který má jednotný trend, tj. rostoucí nebo klesající. V opačném případě by jedna hodnota sledovaného parametru (fáze, charakteristický čas) mohla znamenat několik rozdílných tlouštěk.

Simulace proběhla na virtuálních vzorcích se stupňovitě se zvyšujícími tloušťkami od 1 μm do 50 μm a od 1 do 1000 μm (pro nalezení závislosti v možném rozsahu tlouštěk povlaků. Většinou je tloušťka < 1000 μm). Materiálové vlastnosti substrátu byly tepelná vodivost 16,2 W/(m·K), hustota 7800 kg/m³, kapacita 502 J/(kg·K) a povlaku tepelná vodivost 0,75 W/(m·K), hustota 1300 kg/m³, kapacita 2500 J/(kg·K). Na Obr. 16 je schematicky zobrazen první popsany vzorek.



Obr. 16: Návrh vzorku použitého pro simulaci (řez)

Pro jednotlivé tloušťky byly nasimulovány teplotní odezvy a ty byly poté zpracovány pomocí FFT-phase a P-function.

Úkol 1-4: Vliv materiálových vlastností na výsledky P-function

Z principu šíření tepla je jasné, že tepelnou odezvu a tedy sledovaný parametr neovlivňuje pouze samotná tloušťka povlaku, ale i materiálové vlastnosti - tepelná vodivost a difuzivita.

Dalším krokem bylo tedy určení, jakou strmost (parametr *SPT*), je možné dosáhnout pro různé materiály při použití pokročilého vyhodnocení, tj. jaký vliv má tepelná vodivost a difuzivita na výslednou závislost.

Simulace byla provedena se stejnými geometrickými rozměry a materiálem substrátu. Tloušťka povlaku byla nasimulována od 200 do 600 μm . Při hledání vlivu difuzivity byla nastavena vodivost $0,75 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ a testovány byly difuzivity $1,1\text{E-}7 \text{ m}^2/\text{s}$, $1,1\text{E-}6 \text{ m}^2/\text{s}$ a $5,5\text{E-}6 \text{ m}^2/\text{s}$. Při zjišťování vlivu vodivosti byla nastavena difuzivita na $1,1\text{E-}7 \text{ m}^2/\text{s}$ a testovány byly vodivosti $0,75 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $7,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ a $75 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Očekávalo se, že pro materiály povlaku, ve kterých se teplo bude šířit pomaleji (malá difuzivita a vodivost), bude možné snáze detekovat rozdíly mezi jednotlivými plochami. Tato domněnka vychází z toho, že děje chladnutí budou pomalejší a díky tomu je bude možné snáze detekovat pomocí IR kamery.

Úkol 1-5: Ověření vlivu pozice vzorku pod flash lampou na výsledky

Problémem flash lamp je, že do určité míry poskytují nehomogenní osvit (buzení). Ověření, zda je vůbec možné plošný zdroj buzení ve formě flash lampy použít pro buzení celé plochy vzorku, bylo provedeno v rámci tohoto kroku.

Nejdříve bylo měřeno rozložení výkonu (wattmetrem Ophir L30A-V1) pod flash lampou v různých pozicích. Wattmetr byl ve vzdálenosti 38 cm od lampy (stejná vzdálenost jako při ostatních FPT měření). Měření začalo od středu lampy (pozice [0;0]) a pohybovalo se o 2 cm na všechny strany. V každé pozici se provedly 3 měření a výsledkem byl průměr hodnot. Tab. 8 ukazuje umístění wattmetru pod flash lampou. Očekávalo se, že výkon se bude lišit v řádech jednotek procent, což by mělo poskytnout dostatečnou homogenitu.

Tab. 8: Znárodnění umístění wattmetru pod flash lampou, pozice v cm

			[0;6]			
			[0;4]			
		[-2;2]	[0;2]	[2;2]		
[-6;0]	[-4;0]	[-2;0]	[0;0]	[2;0]	[4;0]	[6;0]
		[-2;-2]	[0;-2]	[2;-2]		
			[0;-4]			
			[0;-6]			

Další experiment spočíval v měření vzorku CrFe-S1-P1 v různých pozicích pod lampou (změna umístění v ose x, y a z) a následné vyhodnoceno pomocí FFT-phase a P-function.

Byly měřeny tyto pozice: Pozice [0;0] (střed vzorku pod středem lampy), [0;-35], [0;-70], [0;-105], [56,5;0], [76,5;0], [96,5;0] a [0;35]. (Např. pozice [0;-8] znamená, že byl vzorek posunut o 8 mm směrem dolů v ose y. Analogicky to platí pro všechny pozice).

Měření proběhlo pomocí FPT. Po změřením bylo provedeno vyhodnocení (FFT-phase a P-function). Na plochy s rozdílnou tloušťkou byly umístěny analýzy (stejně jako v případě hodnocení rozpoznatelnosti) pro každou změřenou sekvenci. V každé pozici se ze 4 měření jedné plochy provedl průměr. Tím vznikla vstupní tabulka, kde pro každou analýzu v jednotlivých pozicích byla uvedena průměrná hodnota analýzy. Ukázka takové tabulky je Tab. 9. Výsledky z demonstračního příkladu ukázaly, že odlišné pozice se statisticky výrazně liší $F > F_{krit}$ (ANOVA řádky). To znamená, že záleželo na pozici vzorku pod zdrojem buzení. Výsledek měl dát představu o tom, jak velký vzorek je flash lampa schopna homogenně vybudit.

Tab. 9: Ukázka hodnocení závislosti vyhodnocení na pozici vzorku pod zdrojem buzení

	Oblast			
	A1	A2	A3	A4
Pozice [0;0]	0,052	0,139	0,237	0,342
Pozice [0;-8]	0,051	0,131	0,231	0,325
Pozice [0;-15]	0,051	0,132	0,235	0,334
Pozice [0;-35]	0,049	0,131	0,221	0,320
Pozice [0;-70]	0,046	0,117	0,187	0,267
Pozice [0;-105]	0,041	0,099	0,150	0,183

ANOVA: dva faktory bez opakování

<i>Faktor</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
Pozice [0;0]	4	0,771	0,192921	0,015639
Pozice [0;-8]	4	0,738	0,184571	0,014235
Pozice [0;-15]	4	0,754	0,188614	0,015135
Pozice [0;-35]	4	0,722	0,180602	0,013553
A1	4	0,204	0,051	1,12E-06
A2	4	0,535	0,133	1,55E-05
A3	4	0,924	0,231	5,91E-05
A4	4	1,322	0,330	9,33E-05

ANOVA

<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota</i>	
					<i>P</i>	<i>F krit</i>
Řádky	0,000336	3	0,000112	5,909	0,016416	3,862
Sloupce	0,175516	3	0,058505	3083,730	7,19E-14	3,868
Chyba	0,000171	9	1,9E-05			
Celkem	0,176023	15				

V rámci ověření vlivu pozice vzorku pod flash lampou na výsledky bylo také otestováno otočení vzorku o 180°. Směr 1 reprezentoval standardní umístění vzorku v pozici [0;0] s tím, že nalevo je povlak s nejmenší tloušťkou. Při směru 2 byl vzorek také umístěn v pozici [0;0], ale nejtlustší povlak byl umístěn nalevo. Vyhodnocení proběhlo pomocí FFT-phase a P-function. Očekávaným výsledkem bylo, že na směru položení vzorku nezáleží, a tedy, že je možné flash lampou budít celý vzorek najednou.

Úkol 1-6: Ověření vlivu podkladového materiálu na šíření tepla

Při běžném plošném IRNDT měření dochází k tomu, že testované objekty jsou na něco položeny. U dostatečně tlustých substrátů nemá podložka vliv na tepelné odezvy v materiálu (nedochází například k rychlejšímu odvodu tepla ze vzorku). Nicméně dochází k vybuzení velké plochy i mimo vzorek. Díky tomu může docházet k různým odrazům, které mohou ovlivnit výsledek měření. Byl tedy proveden experiment, který měl určit, zda nedochází

k ovlivnění výsledků FFT-phase a P-function vlivem různých podložek. Měření byla provedena na vzorku FeCr-S1-P1 v pozici [0;0]. Testované podložky byly ocel nastříkaná černou termografickou barvou, karton, gumotextílie, umístění na hliníkové podložce a umístění ve vzduchu. Vyhodnocení proběhlo pomocí ANOVy obdobným způsobem jako v případě hodnocení změny pozice vzorku pod lampou. Namísto faktoru pozice byl hodnocen faktor podložka. Cílem bylo určení, zda má podkladový materiál vliv na výsledky.

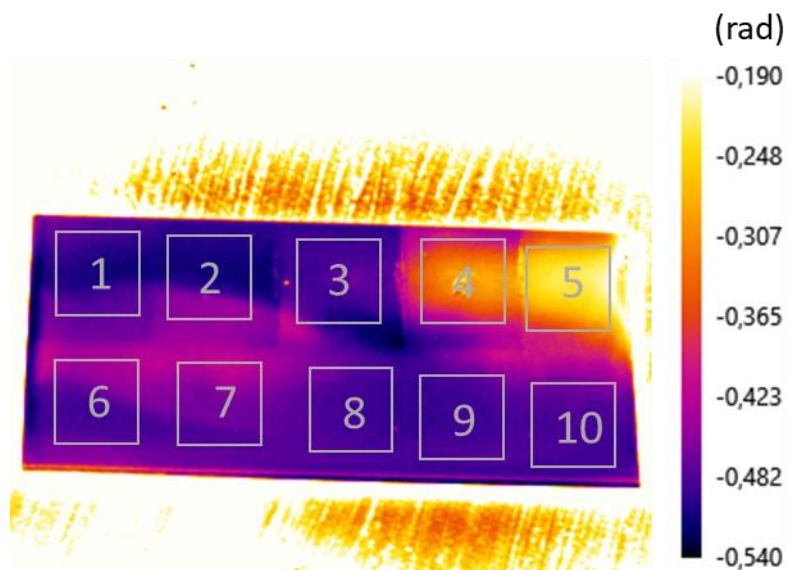
Úkol 1-7: Ověření výsledků simulací pomocí experimentů

Dalším krokem bylo ověření, zda P-function a FFT-phase ukazovaly stejnou závislost mezi sledovaným parametrem a tloušťkou povlaku jako výsledky simulací. A zda závěry vyvozené ze simulací platí i pro experimentální výsledky. Proběhla tedy vyhodnocení měření všech vzorků v pozici [0;0] pomocí FFT-phase a P-function. Očekávalo se, že se výsledky budou shodovat.

Očekávalo se, že nejnázne lze testovat povlaky s malou difuzivitou a vodivostí. Toto bylo experimentálně ověřováno na vzorcích FeCr-S1-P1 a P2, WCCoCr-S1-P1 a P2, SnSbCu-S1-P1 a P2 a LPS-S1-P1. Výsledným ukazatelem bylo SPT.

Úkol 1-8: Ověření kalibračního přístupu

Posledním krokem je samotné určení tloušťky povlaku. To probíhá přes kalibrační rovnici, která udává vztah mezi tloušťkou a sledovaným parametrem. Určení tloušťky pomocí kalibračního vztahu proběhlo na vzorku LPS-S1-P1 a LPS-S2-P2. Pro vytvoření kalibrační rovnice byly použity vždy výsledky jednoho vzorku (LPS-S1-P1). Druhý sloužil pro ověření. Vzorek byl rozdělen na 10 oblastí, ve kterých tloušťka byla přibližně stejná (to se zjišťovalo tloušťkoměrem), viz Obr. 17. Kalibrační křivka byla vytvořena tak, že v každé oblasti se našla maximální tloušťka (pomocí tloušťkoměru) a maximální hodnota sledovaného parametru (fáze nebo charakteristického času). Využitím Curve Fitting Toolboxu se našla funkce, která odpovídá této kalibrační křivce. Hodnoty sledovaného parametru (fáze nebo charakteristického času) pak byly přepočteny na tloušťku pomocí této funkce.



Obr. 17: Rozdělení vzorku LPS-S1-P1 na 10 oblastí (vyhodnocení FFT-phase)

Kromě kalibračního přístupu byl také testován přístup s porovnáním změřených odezev s analytickým modelem. Pro vytvoření srovnávacích odezev pomocí simulace byly použity tyto materiálové parametry pro ocel (AISI304) difuzivita $4E-06 \text{ m}^2/\text{s}$, vodivost $16,2 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ a pro barvu difuzivita $2,85E-07 \text{ m}^2/\text{s}$ a vodivost $0,75 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$. Je potřeba upozornit, že difuzivita barvy nebyla známá. Byla zjištěna tak, že se vzala oblast 5 z Obr. 17, a provedlo se měření této oblasti. Odečetla se tloušťka a hledala se vodivost. Prakticky to znamená, že byla provedena kalibrace pro zjištění vodivosti.

Posledním krokem bylo porovnání výsledků (tloušťkových map) jednotlivých metod. Porovnání proběhlo srovnáním průměru oblastí (viz Obr. 17) z tloušťkových map s hodnotami odečtenými tloušťkoměrem. Procedura se řídila pravidly uvedenými u parametru přesnost stanovení tloušťky.

Úkol 1-9: Porovnání s HLIT

Pomocí simulace bylo teoreticky ověřováno, zda je možné vůbec detekovat změny v tepelném přenosu na povrchu vzorku při využití lock-in buzení pro rozdílné tloušťky povlaku na stejně tlustém substrátu. Jednalo se o obdobnou simulaci jako v případě FPT. V COMSOLu byl vytvořen virtuální vzorek s dvěma různými tloušťkami povlaku 5 a $35 \mu\text{m}$ a substrátem tlustým 2 mm . Byly nadefinovány tepelné vlastnosti materiálu povlaku - vodivost $0,75 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, hustota $1300 \text{ kg}/\text{m}^3$, kapacita $2500 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ a substrátu - vodivost $16,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, hustota $7800 \text{ kg}/\text{m}^3$, kapacita $502 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Tato simulace odpovídala nanosené barvě na oceli. Lock-in frekvence u HLIT byla nastavena na $0,2 \text{ Hz}$. Proběhla simulace HLIT buzení. A

nakonec byly odečteny grafy časového průběhu teploty z povrchu vzorku v místě s tloušťkou 5 a 35 μm .

V experimentální části tohoto bodu byly změřeny všechny vzorky v základní pozici (střed vzorku pod středem budícího zdroje) s tím, že všechna měření byla provedena 4 krát. Byly testovány lock-in frekvence 0,1; 0,2; 0,5; 1 Hz. Byl zjišťován parametr STP. Očekávaly se horší výsledky v porovnání s FPT z důvodu větší nehomogenity osvitu.

4.4.2 Návrh nového systému na bázi laserové termografie

Všechny kroky v kapitole 4.4.2 sloužily ke splnění cíle 2: návrh nového měřicího systému na bázi laserové termografie. Nejdříve byla vytvořena koncepce (ta je v kapitole 4.3.2, způsob buzení u laserového systému, souvisí se způsobem buzení). Následovala specifikace a nákup komponent. Poté proběhla instalace a technické ověření systému. Tyto jednotlivé kroky jsou označeny jako zprovoznění systému. Poté proběhlo ověřování koncepce nového systému simulacemi i experimenty. Nejdříve byly ověřeny principy časové a prostorové optimalizace. Poté byly provedeny experimenty ověřující vhodnost použití laserového systému.

Činnosti sloužící k ověření nového typu měření a vyhodnocení byly rozděleny do následujících pěti úkolů:

Úkol 2-1: Zprovoznění systému

Úkol 2-2: Ověření vlastností navržené časové optimalizace

Úkol 2-3: Ověření vlastností prostorové optimalizace

Úkol 2-4: Ověření vlivu pozice vzorku pod laserovou skenovací hlavou na výsledky

Úkol 2-5: Experimentální ověření nového laserového měřicího systému

Úkol 2-1: Zprovoznění systému

V rámci tohoto úkolu proběhl technický návrh laserového systému, nákup a ověření technických parametrů.

Systém pro testování povlaků byl navržen s ohledem na koncepci systému tj. skenování bod po bodu pomocí laseru. Hlavním požadavkem na laser byla vysoká stabilita laseru (jinak by vznikal stejný problém jako u flash lampy, tj. nehomogenní ohřev) a možnost ohřevu materiálu během 50 ms alespoň o 5 $^{\circ}\text{C}$ (aby bylo možné zachytit změny v tepelném přenosu pomocí IR kamery). Tyto požadavky byly shledány jako klíčové pro použitelnost celého systému. Kromě těchto požadavků byly definovány i požadavky na budoucí využití. Systém

musí být schopen pojmout průmyslové vzorky (50–100 cm) a musí být využitelný i pro budoucí výzkum.

Vhodný výkon laseru byl hledán experimentálně. Testy proběhly na dvou laserech: 532 nm a 1070 nm (technické parametry v Tab. 10). Test probíhal ohřátím vzorků z různých materiálů po dobu 50 ms na různých výkonových úrovních laserů. Nastavené parametry laserů byly u 532 nm laseru: výkon 5 W, frekvence 50 kHz, doba buzení 50 ms a u 1070 nm laseru: výkon 10 W, CW režim a doba buzení 50 ms.

Tab. 10: Parametry laserů použitých pro nalezení vhodného výkonu laseru

Laserový systém	GreenLase 10 W	IPG YLR 300/3000 QCW-MM-AC
Vlnová délka	532 ± 1 nm	1070 ± 5 nm
Max. výkon	10 W	300 W (CW)
Stabilita	± 5 %	± 1 %
Divergence	neměřeno (40 μm spot)	3,4 mrad
Provozní režim	Pulzní 20-100 kHz	CW (i pulzní)
Chlazení	Vzduchem	Vzduchem

Nákup proběhl pomocí sepsání parametrů a vypsání výběrového řízení.

Ověření technických parametrů (výkon, stabilita) proběhlo pomocí měření wattmetrem (Ophir L30A-V1).

Dále byl navržen a realizován způsob synchronizace buzení s kamerou a vkládání skenovacích bodů do řídicího softwaru Scaps pomocí softwaru Matlab. Ruční zadávání bodů do softwaru je totiž příliš zdlouhavé. Je potřeba zadat pozice bodů, dále příkaz na čekání na synchronizační sekvenci a případně čekací časy, aby nedocházelo k vybuzení bodů v HAZ. To by v případě běžného měření znamenalo zadat 200 krát údaje o pozici, 200 krát čekání na synchronizační sekvenci a několik čekacích časů (zaleží na zvoleném způsobu skenování).

Synchronizace byla otestována pomocí osciloskopu a propojení mezi softwary Scaps a Matlab pomocí zkušebního měření IR kamerou (pozice budících bodů, časové prodlevy mezi body).

Úkol 2-2: Ověření vlastností navržené časové optimalizace

V tomto bodě byla ověřována efektivita navržené časové optimalizace (Point Base Optimization) pomocí simulace v Matlabu. Cílem bylo zjistit, o kolik byl celý měřicí proces zrychlen časovou optimalizací a zda je případně nutné ji dále vylepšovat. Tato simulace počítala s rozmístěním bodů buzení 1 mm od sebe, dobu buzení 100 ms, dobu chladnutí 1 s. Výpočet

byl proveden pro dvě HAZ (Heat Affected Zone) – 2 a 3 mm a pro různý počet bodů. Počet bodů ovlivňoval velikost skenované plochy (čím více bodů, tím větší plocha). Parametry pro výpočet byly vybrány tak, aby odpovídaly zamýšlenému použití laserového systému. Kromě toho byl vypočten čas měření bez optimalizace. Ten se rovnal vynásobením počtu bodů součtem doby chladnutí a doby buzení.

Úkol 2-3: Ověření vlastností prostorové optimalizace

V této části byla pomocí simulace prokazována výhoda Poissonova skenování oproti volnému rastrovému skenování

Pro ověření vhodnosti využití skenování pomocí Poissonových disků byla provedena simulace detekce defektů (nedostatečná tloušťka povlaku) pomocí řídkého rastru a Poissonových disků. Simulovaný vzorek byl obdélník s 8 stejně velkými kruhovými oblastmi s nedostatečnou tloušťkou povlaku.

Principem simulace bylo vytvoření budících bodů pomocí řídkého rastru a pomocí Poissonových disků. V ideálním případě by při použití těchto typů skenování byly indikovány body, kde se protnulily distribuce bodů s defekty. Výzkumná hypotéza je taková, že při použití stejného množství bodů bude indikováno více bodů při distribuci pomocí Poissonových disků než při distribuci pomocí volného rastru.

Úkol 2-4: Ověření vlivu pozice vzorku pod laserovou skenovací hlavou na výsledky

Experiment byl proveden pro ověření nezávislosti polohy vzorku pod laserem. Očekávalo se, že změna polohy vzorku pod laserem nebude mít žádný vliv. Testování bylo provedeno s plným rastrem a buzení bylo realizováno zeleným laserem. Parametry měření byly 270 budících bodů, vybuzená oblast 80 x 30 mm, HAZ 5 mm, doba chladnutí 500 ms, doba buzení 50 ms. Byl měřen vzorek CrFe-S1-P1 ve dvou polohách – pozice 0,0 (střed vzorku pod středem skenovací hlavy) se standardním uložením (nejtlustším povlakem vpravo) a pozice 0,0 s nejtlustším povlakem vlevo (tj. otočeno o 180°).

Úkol 2-5: Experimentální ověření nového laserového měřicího systému

Testování nového laserového měřicího systému sloužilo k potvrzení výsledků ze simulací (ověření vlastností navržené časové optimalizace a ověření vlastností prostorové optimalizace). Zároveň bylo zjišťováno, zda je možné detekovat rozdíly v plochách s rozdílnou tloušťkou při

použití FFT-phase a P-function. Cílem bylo ukázat, zda principy uvedené v teoretické části prakticky fungují.

Experimenty byly provedeny na vzorku CrFe-S1-P1. Měření proběhlo plným rastrem, řídkým rastrem a Poissonovy disky. Při použití plného rastru bylo použito 270 bodů, při řídkém rastru 100 bodů a při využití Poissonových disků 101 bodů. Všemi technikami byla pokrytá plocha 80 x 30 mm. HAZ byl 5 mm, doba chladnutí 500 ms a doba buzení 50 ms. Měření plným rastrem trvalo 18,94 s, řídkým rastrem 7,31 s a pomocí Poissonových disků 8,14 s. Bylo porovnáváno, kolik bodů dopadlo do jednotlivých ploch s rozdílnou tloušťkou a zda se lišily výsledky v rámci spotu (na stejném místě) při různém typu skenování. Očekávalo se, že teplotní odezvy a tedy výsledky se lišit nebudou.

4.4.3 Ověření funkčních vlastností laserového systému

Všechny experimenty v kapitole 4.4.3 slouží ke splnění cíle 3: ověření funkčních vlastností laserové termografie na vzorcích stříkaných povlaků. Hlavním záměrem bylo otestovat vlastnosti laserového systému a porovnat ho se standardně používanou technikou IRNDT.

Činnosti sloužící k ověření nového měřicího systému byly rozděleny do dvou úkolů:

Úkol 3-1: Experimentální měření stříkaných vzorků

Úkol 3-2: Srovnání s výsledky FPT

Úkol 3-1: Experimentální měření stříkaných vzorků

Experimenty byly provedeny na vzorcích CrFe-S1-P1 a P2, WCCoCr-S1-P1 a P2, SnSbCu-S1-P1 a P2 pomocí UV a zeleného laseru. Výkon UV laseru byl 225 mW a zeleného laseru 1245 mW. Oběma lasery byla pokryta plocha 80 x 30 mm plným rastrem. HAZ byl 5 mm, doba chladnutí 500 ms a doba buzení 50 ms. Měření trvalo 18,94 s. Hlavním porovnávacím parametrem bylo SPT.

Úkol 3-2: Srovnání s výsledky FPT

Všechny experimenty v rámci tohoto kroku byly již provedeny pro splnění dřívějších bodů. Porovnávaly se tedy pouze výsledky předchozích experimentů. Porovnávaly se vždy výsledky jednotlivých vyhodnocení vůči sobě (např. výsledky P-function u laseru a FPT). Porovnání proběhlo pro všechny testované vzorky. Z výsledků má vyplynout, jaké výhody a nevýhody přinášejí jednotlivé algoritmy vyhodnocení pro měření pomocí flash pulzní termografie, respektive laserové pulzní termografie. Cílem je definování výhod a nevýhod

laserové termografie oproti flash pulzní termografii pro testování povlaků. Sledovanými parametry k porovnání jsou prostorové rozlišení, rychlost měření, citlivost (SPT).

5 Výsledky

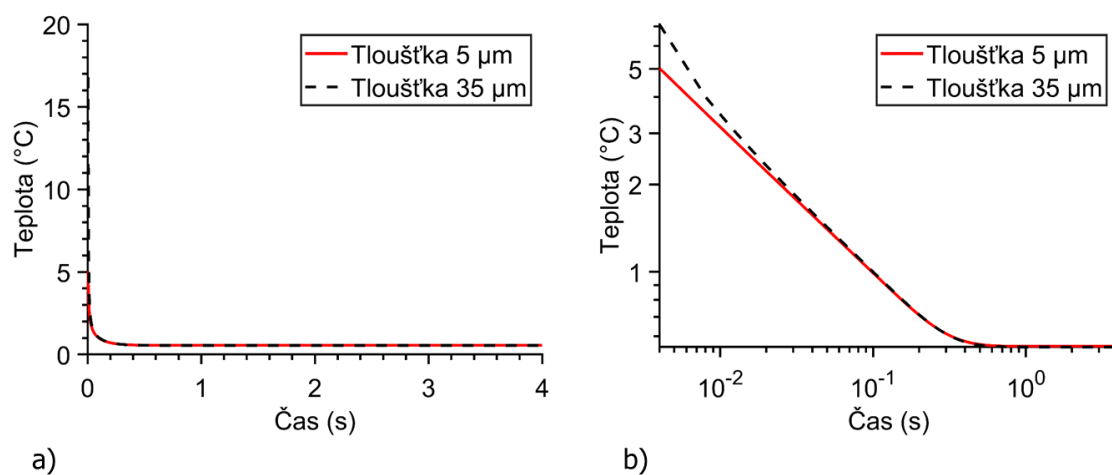
Výsledky disertační práce jsou rozděleny na tři části odpovídající stanoveným cílům a úkolům. Týkají se: ověření vhodnosti nového typu vyhodnocení, návrhu nového systému na bázi laserové termografie, ověření funkčních vlastností laserového systému.

5.1 Vlastnosti nové P-function metody

Výsledky se týkají nově navrženého P-function algoritmu pro zjišťování tloušťky povlaků. Jsou zde řazeny dle jednotlivých kroků sloužících k ověření vhodnosti tohoto nového typu vyhodnocení (viz 4.1.1).

Rozdíly v teplotních průbězích ploch s rozdílnou tloušťkou

Velikost změny povrchové teploty v reakci na budící tepelný pulz rozhoduje o použitelnosti IRNDT metod k měření tloušťky popř. o nutnosti použití pokročilých algoritmů vyhodnocení. Příklad teplotní změny je ukázán na Obr. 18 pro povlaky o tloušťce 5 a 35 μm .



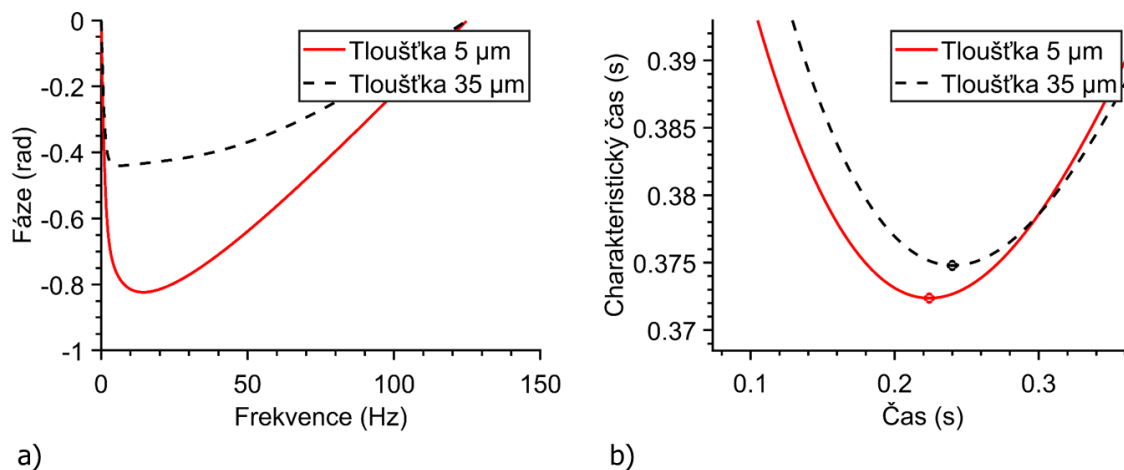
Obr. 18: Průběhy teplotních odezev a) standardní zobrazení, b) logaritmičké zobrazení

Výsledky ukazují, že bylo možné detekovat rozdíly v teplotních odezvách. Lze vidět, že při použití standardního zobrazení v grafu nejsou patrné velké rozdíly v teplotních odezvách. Při zobrazení log-log grafů lze detekovat, že největší rozdíly v průběhu teplot mezi oblastí s 5 μm a 35 μm nepřesáhly 0,1 $^{\circ}\text{C}$. Takto malý teplotní rozdíl se blíží NETD běžných IR kamer. Z toho vyplývá, že je nutné použít pokročilé metody vyhodnocení (FFT, P-function, derivace, apod.) pro zvýraznění rozdílů v teplotních odezvách různých tlouštěk povlaků.

Rozdíly mezi plochami s rozdílnou tloušťkou vyhodnocené jednotlivými pokročilými algoritmy

Pokročilé algoritmy zvýrazňují teplotní rozdíly a používají se v případech, kdy je potřeba detekovat malé změny v tepelném přenosu (tepelných odezvách).

Výsledky (Obr. 19) ukazují, že skutečně dochází ke zvýraznění rozdílů při použití pokročilých algoritmů vyhodnocení (FFT-phase a P-function) oproti zobrazení pouze rozdílů teploty (Obr. 18).



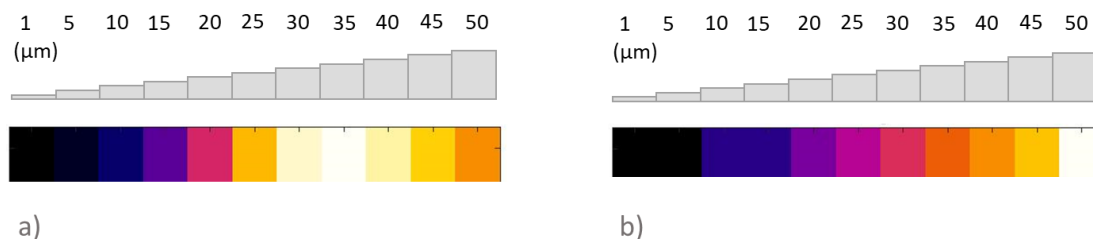
Obr. 19: Porovnání zpracovaných teplotních odezví z ploch tlouštěk 5 a 35 μm při a) FFT-phase a b) P-function

Obr. 19 ukázal, že obě metody zvýraznily rozdíly v odezvách pro rozdílné tloušťky. Z obrázků si lze také povšimnout většího optického rozdílu ve fázích pro odlišné tloušťky než rozdílů v charakteristických časech. Je potřeba upozornit, že každý z výsledků je v jiných jednotkách a tudíž porovnání optických rozdílů je zavádějící. Rozdíl u fáze v řádech desetin radiánu a rozdíl u P-function v řádech setin je v běžných měření považovaný za výrazný.

Závislost tloušťka sledovaný parametr

Křivka závislosti sledovaného parametru na tloušťce povlaku ukazuje možnosti rozlišení povlaků různých tlouštěk. Pro ilustraci jsou uvedeny výsledky metod FFT-phase a P-function získané simulací s uvažováním tloušťky od 1 do 50 μm.

Pro jednotlivé tloušťky byly nasimulovány teplotní odezvy a ty byly poté zpracovány pomocí FFT-phase a P-function. Výsledky jsou zobrazeny ve stejném pohledu, jako by byly zobrazeny z pohledu IR kamery, viz Obr. 20.

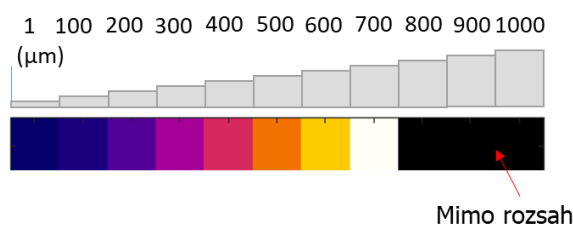


Obr. 20: Porovnání výsledků a) FFT-phase (snímek 125) a b) P-function (parametr 0,4) při simulaci na vzorku 1-50 μm

Při vyhodnocení FFT pomocí fáze byl detekován rostoucí trend fází do 35 μm (od nejtmaší barvy do nejsvětější). Od 40 μm byl detekován opačný trend (od nejsvětější barvy po nejtmaší). Pro praktické využití to znamená, že vyhodnocení přes fáze bude správně fungovat v omezeném rozsahu tlouštěk. V případě, že bude tento rozsah překročen, může dojít k chybnému určení tloušťky (stejná hodnota fáze může znamenat dvě rozdílné tloušťky).

U P-function bylo dosaženo rostoucí závislosti (od nejtmaší barvy po nejsvětější). Některé plochy však nebylo možné od sebe rozlišit (1 a 5, 10 a 15). Je to dáno tím, že tepelné odezvy v těchto oblastech byly velmi podobné a po provedení P-function s parametrem 0,4 vyšly stejné hodnoty charakteristických časů. Řešením by bylo změnit parametr. Nicméně to může ovlivnit detekci na druhé straně zkoumaného intervalu (u 50 μm).

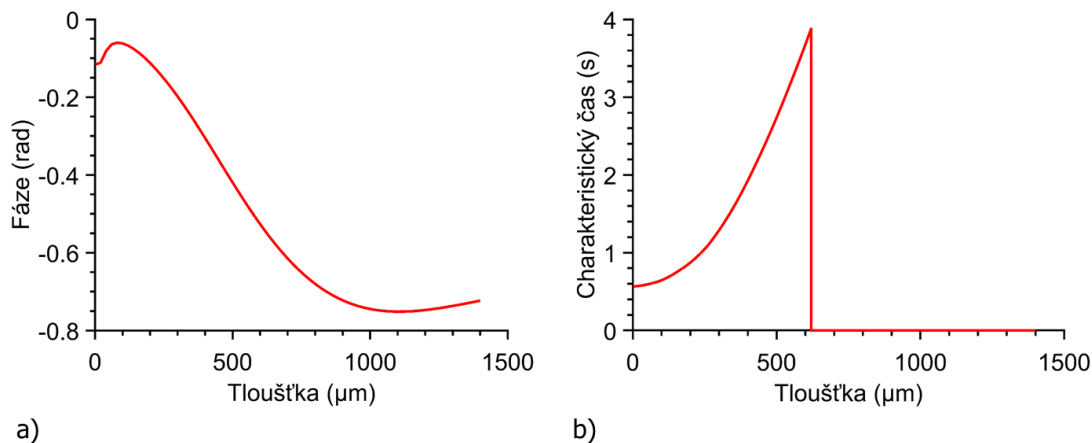
Další výsledky ukázaly, zda se efekt změny trendu závislosti tloušťky na charakteristickém čase, neukáže u P-function při vzorku s většími rozdíly v tloušťce (1-1000 μm), viz Obr. 21.



Obr. 21: P-function simulace vzorku s povlakem 1-1000 μm

Výsledek ukázal, že k otočení trendu u P-function nedocházelo. V případě překročení rozsahu zůstala hodnota charakteristického času stejná.

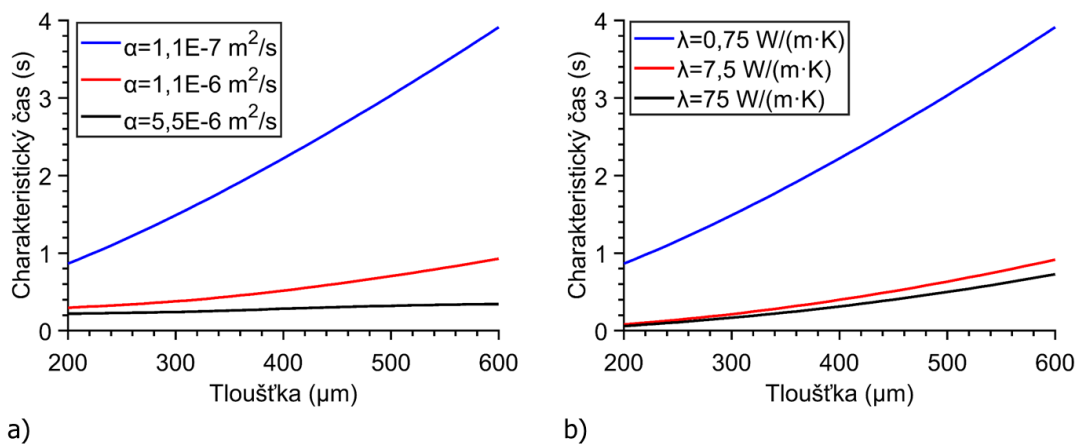
Z provedené teoretické analýzy vyšlo, že P-function je vhodnější technika pro zjišťování tloušťky povlaku pomocí kalibračního principu především z důvodu, že nedocházelo k otočení trendu závislosti tloušťka-sledovaný parametr. Nicméně je třeba uvést, že obě techniky jsou použitelné pro určení tloušťky povlaků. Trend změny závislosti fáze respektive tloušťky ukazuje Obr. 22.



Obr. 22: Závislost změny sledovaného parametru na tloušťce: a) závislost hodnoty fáze na tloušťce a b) závislost charakteristického času na tloušťce

Vliv materiálových vlastností na výsledky P-function

Povlaky se kromě tloušťky mohou lišit i tepelnou vodivostí nebo difuzivitou. Jejich vliv je ukázán na Obr. 23, kde jsou zobrazeny závislosti charakteristických časů povlaku tloušťky od 200 do 600 μm pro P-function.



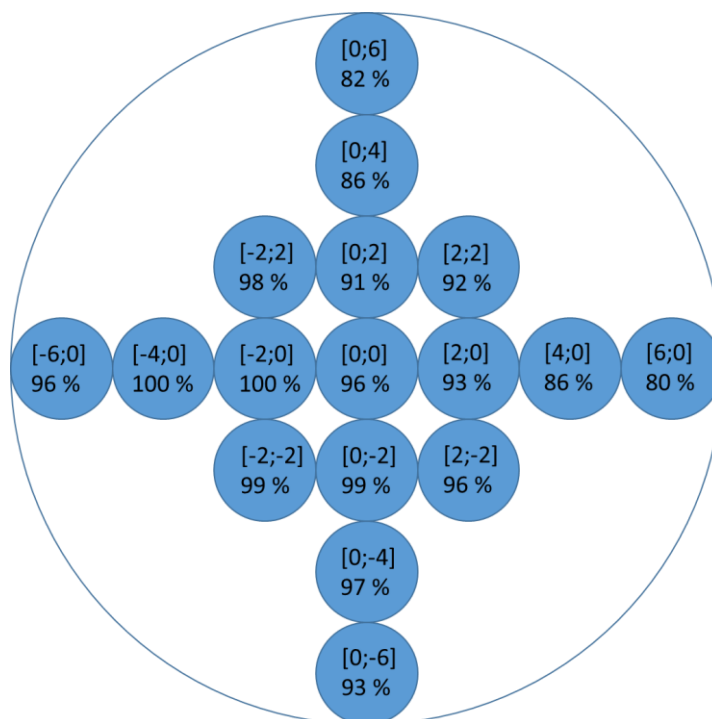
Obr. 23: Vliv a) difuzivity (při konstantní vodivosti) a b) vodivosti (při konstantní difuzivitě) na P-function

Výsledky ukazují závislost charakteristického času na změně difuzivity při konstantní vodivosti, viz Obr. 23 a), a na změně vodivosti při konstantní difuzivitě, viz Obr. 23 b).

Je ukázáno, že s rostoucí vodivostí se zmenšovala strmost (*SPT*) a tím i citlivost. Při rostoucí difuzivitě citlivost také klesala. Z toho vyplývá, že povlaky typu nastříkané barvy, které mají malou vodivost i difuzivitu, půjdou měřit lépe pomocí pulzní termografie za použití P-function než kovové povlaky, které mají řádově vyšší hodnoty difuzivity i vodivosti.

Vliv pozice vzorku pod flash lampou na výsledky

Buzení flash lampou způsobuje nerovnoměrný ohřev a má nepříznivý vliv na vyhodnocení rozložení tloušťky. Naměřené výkony v závislosti na vzdálenosti od středu lampy jsou zachyceny na Obr. 24. Výsledky jsou ukázány ve formě procent. Tj. 100 % odpovídá nejvyššímu naměřenému výkonu.



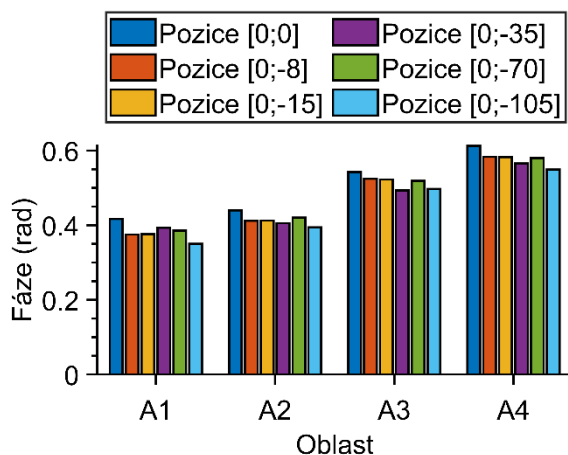
Obr. 24: Výkonové rozložení pod flash lampou měřené wattmetrem, v hranatých závorkách je vzdálenost v cm od středu lampy a procenta představují procentuální hodnoty výkonu v daných pozicích

Výsledky ukázaly, že lampa poskytuje nerovnoměrný ohřev. V rámci rozdílu 6 cm došlo i k poklesu energie téměř o 20 %. Takovýto pokles může zamaskovat drobné rozdíly v tepelných odezvách pro různě tlusté povlaky. Tento jev může značným způsobem limitovat možnost vybuzení velkých ploch jedním zábleskem.

Vliv zjištěné výkonové nehomogenity při buzení flash lampou na vyhodnocení tloušťky povlaku pomocí FFT-phase a P-function je ukázán na příkladu CrFe-S1-P1 povlaku, který byl umístěn v různých pozicích pod lampou (změna umístění v ose x, y a z).

Při vyhodnocení pomocí FFT-phase v případě posunu ve všech osách (x, y i z) se ukázalo, že výsledky byly ovlivněny umístěním vzorku pod flash lampou. Když se blíže podíváme na data, tak v každém případě bylo možné rozeznat jednotlivé vrstvy. Například v pozici [0;0] plocha A1-A4 (graficky Obr. 25) nabývala hodnot 0,4167; 0,4396; 0,5420; 0,6125 rad.

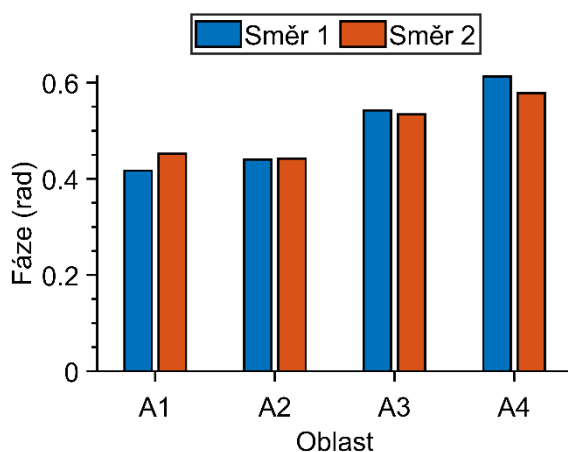
Při pohybu v ose y si lze všimnout, že především pozice [0;0] se lišila od zbytku pozic (viz Obr. 25). Pozice [0;-8], [0;-15], [0;-35] a [0;-75] se statisticky významně nelišily ($F=1,12 < F_{krit}=3,86$). Pozice [0;-105] se od zbytku statisticky lišila. To bylo pravděpodobně dáno nejvyšším výkonem flash lampy v blízkosti jejího středu. Ve zbytku plochy pod lampou byla energie víceméně rovnoměrně rozložena a na okraji (pozice [0;-75]) byl vzorek vybuzen méně.



Obr. 25: Změna fáze v závislosti na umístění pod flash lampou v ose y

Obdobné výsledky byly získány pro pohyb v ose x , kde pozice [56,5;0] a [76,5;0] se statisticky významně nelišily.

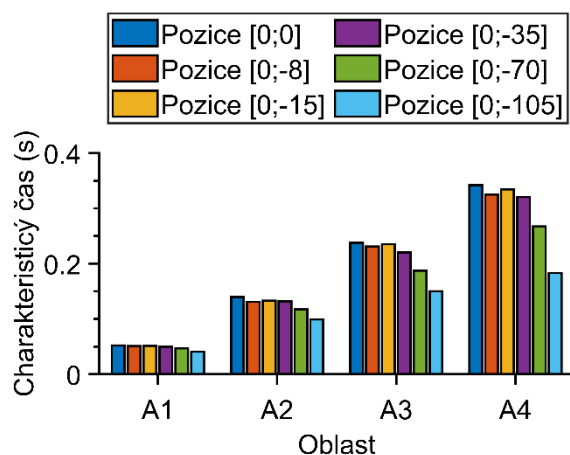
Při změně směru položení vzorku bylo možné detekovat rozdíly ve fázi v krajních polohách vzorku (viz Obr. 26).



Obr. 26: Změna fáze v závislosti na položení vzorku (otočení o 180°)

Při bližším zkoumání je patrné, že oblast A1 a A2 při směru 2 nemají správný trend (A1 by mělo být menší než A2) a tudíž dochází ke špatnému určení tloušťky. Tento efekt je způsobený nehomogenním ozařováním. Experimenty tedy ukázaly, že dochází k ovlivnění výsledků FFT-phase nehomogenním ohřevem flash lampy.

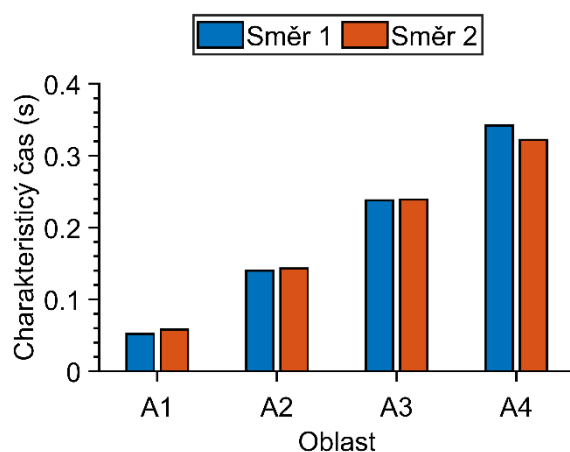
V případě P-function a změny pozice ve směru y záleželo na pozici vzorku pod flash lampou. Nicméně rozdíly v absolutních číslech v závislosti na pozici nejsou tak velké jako v případě vyhodnocení přes fáze. Především do vzdálenosti -35 mm od středu lampy v ose y byly jednotlivé hodnoty P-function prakticky totožné (viz Obr. 27).



Obr. 27: Změna charakteristického času v závislosti na umístění pod flash lampou v ose y

Ve směru x se ukázalo, že dokonce na pozici pod lampou nezáleželo ($F=3,75 < F_{krit}=3,86$).

Při změně směru položení vzorku bylo možné detekovat pouze drobné rozdíly v charakteristických časech u P-function (viz. Obr. 28). P-function tedy nebyla ovlivněna změnou uložení vzorku.



Obr. 28: Změna charakteristického času v závislosti na položení vzorku (otočení o 180°)

Experimentální výsledky ukázaly, že z pohledu plošného buzení, je vhodnější použít navržený algoritmus P-function, jelikož toto vyhodnocení lépe potlačilo vliv nehomogenity osvětlení.

Vlivu podkladového materiálu na šíření tepla

Na výsledky měření tloušťky povlaku mohou mít vliv nejen vlastnosti samotného povlaku a budicího zdroje, ale také vlastnosti podkladového materiálu (to na čem vzorek leží). Podkladem není myšlen substrát. Výsledky ukazují, zda dochází k ovlivnění tepelných odezev podkladovým materiálem.

Velmi překvapivý výsledek byl získán při změně podložek u FFT-phase. Ukázalo se, že podložka měla vliv na výsledek. Při použití podložky z hliníku, papíru (karton) a umístěného do vzduchu se výsledky vůči sobě prakticky nelišily. Bylo možné však zachytit rozdíly v případě použití podložek z oceli a z gumotextílie. To bylo způsobeno rozdílnou odrazivostí. Ocel byla nastříkána černou barvou a gumotextílie byla také černá. Při zkorigování fázi, tj. odečtení konstant 0,075 rad pro ocel a 0,04 rad pro gumotextílii se výsledky od sebe statisticky výrazně nelišily. Lze tedy předpokládat, že jev závislosti na podložce je způsoben vyhodnocením (vlastnost fáze). Pravděpodobně tedy dochází k alespoň dvojitému odrazu, kdy lampa vybudí podložku, ta malou část energie odrazí a tato energie se poté odrazí od stropu, případně od lampy a vytvoří posun ve fázi.

U P-function se ukázalo, že změna podkladu nemá na výsledky vliv ($F=2,39 < F_{krit}=3,25$).

P-function je tedy vhodnější technika vyhodnocení než FFT-phase pro inspekci povlaků z hlediska vlivu podložky, a to díky tomu, že výsledky P-function nejsou ovlivněny podkladovým materiálem.

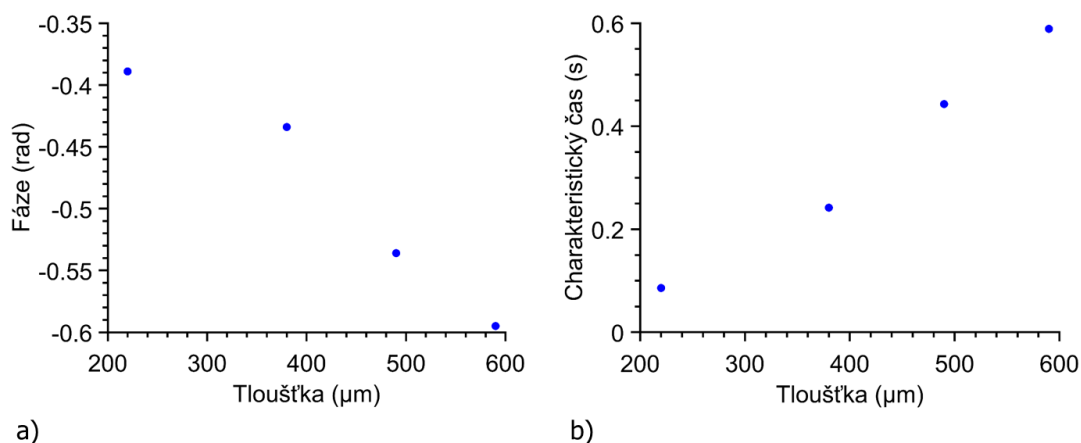
Ověření výsledků simulací pomocí experimentů

Výsledky simulací ukázaly, že P-function je vhodnější technikou pro určení tloušťky než FFT-phase z důvodu otáčení trendu parametr tloušťka u FFT-phase. Mimo to simulace ukázaly, že lze dosáhnout vyšší citlivosti u povlaků s menší difuzivitou a vodivostí. Výsledky v této části disertační práce ukazují, zda závislosti nalezené pomocí simulací platí i pro experimenty.

Vlastnosti trendu parametr-tloušťka byly zjišťovány na výsledcích měření vzorku CrFe-S1-P1 (při FPT měření). Tab. 11 obsahuje výsledky měření. U FFT-phase bylo možné zachytit klesající trend závislosti. Je ovšem možné si povšimnout zploštění křivky okolo tloušťky 0,22 mm, která je pravděpodobně jevem popsáným pomocí simulace. Tj. že jedna hodnota fáze může znamenat několik hodnot tloušťky. U P-function se ukázal rostoucí trend závislosti charakteristického času na tloušťce, viz Obr. 29 b).

Tab. 11: Výsledky měření vzorku CrFe-S1-P1 technikou FPT

		CrFe-S1-P1				
		Tloušťka (mm)	0,22	0,38	0,49	0,59
FPT	Fáze (rad)		-0,389	-0,434	-0,536	-0,595
	P-fun (s)		0,086	0,242	0,443	0,589



Obr. 29: Závislost změny sledovaného parametru na tloušťce při FPT vzorku CrFe-S1-P1: a) závislost fáze-tloušťka (FFT-phase), b) závislost fáze-charakteristický čas (P-function)

Experimentálně bylo tedy potvrzeno, že P-function je vhodnější technikou pro detekci rozdílné tloušťky povlaku díky stejnému trendu závislosti sledovaného parametru vůči tloušťce než FFT-phase.

Simulace ukázaly, že nejnáze lze testovat povlaky s malou difuzivitou a vodivostí. Toto bylo experimentálně ověřeno na vzorcích (seřazeno dle zhoršujících se vlastností pro testování) LPS-S1-P1, CrFe-S1-P1 a P2, WCCoCr-S1-P1 a P2, SnSbCu-S1-P1 a P2.

Výsledky jsou v Tab. 12

Tab. 12: FPT měření vzorků WCCoCr, SnSbCu, CrFe a LPS

	WCCoCr-S1-P1			WCCoCr-S1-P2		
Tloušťka (mm)	0,074	0,152	0,241	0,302	0,373	0,416
Fáze (rad)	-0,358	-0,334	-0,298	-0,408	-0,345	-0,324
Fáze kor. (rad)	-0,358	-0,334	-0,298	-0,208	-0,145	-0,124
P-fun (s)	0,063	0,068	0,080	0,086	0,093	0,105

	SnSbCu-S1-P1				SnSbCu-S1-P2			
Tloušťka (mm)	0,16	0,26	0,42	0,52	0,61	0,71	0,79	0,88
Fáze (rad)	-0,293	-0,363	-0,387	-0,417	-0,178	-0,203	-0,218	-0,236
Fáze kor. (rad)	-0,293	-0,363	-0,387	-0,417	-0,428	-0,453	-0,468	-0,486
P-fun (s)	0,115	0,122	0,131	0,136	0,122	0,132	0,140	0,150

	CrFe-S1-P1				CrFe-S1-P2			
Tloušťka (mm)	0,22	0,38	0,49	0,59	0,87	1	1,15	1,24
Fáze (rad)	-0,389	-0,434	-0,536	-0,595	-0,602	-0,618	-0,624	-0,593
Fáze kor. (rad)	-0,389	-0,434	-0,536	-0,595	-0,802	-0,818	-0,824	-0,793
P-fun (s)	0,086	0,242	0,443	0,589	0,690	0,979	1,162	1,184

	LPS-S1-P1						
Tloušťka (mm)	0,005	0,011	0,016	0,020	0,024	0,030	0,037
Fáze (rad)	-0,51	-0,493	-0,486	-0,459	-0,431	-0,359	-0,272
P-fun (s)	0,165	0,202	0,245	0,28	0,302	0,317	0,33

Při vyhodnocení pomocí fáze se ukázalo, že vždy došlo ke skoku ve fázi pro vzorky ze stejné série (např. CrFe-S1-P1 a CrFe-S1-P2) a bylo možné detekovat závislost mezi fází a tloušťkou pouze v rámci vzorku. Byla proto provedena korekce fází (tj. vzala se hodnota podkladu u vzorků P1 a odečetla se od hodnoty podkladu u vzorků P2. Tento rozdíl byl poté odečten od phasegramu vzorků P2. Tyto hodnoty jsou v tabulce uvedeny jako fáze korekce. V tomto případě lze pozorovat závislost mezi fázemi a tloušťkami pro všechny vzorky).

Tab. 13: Výsledky citlivostí pro různé povlaky

	P-fun		Fáze s korekcí	
	Směrnice	R ²	Směrnice	R ²
LPS-S1-P1	5,4	0,92	7,42	0,9
CrFe-S1-P1 a P2	1,08	0,98	1,08	0,98
WCCoCr-S1-P1 a P2	0,12	0,97	0,74	0,95
SnSbCu-S1-P1 a P2	0,03	0,7	0,243	0,95

Tab. 13 ukazuje, že největší citlivosti (SPT) bylo dosaženo u barvy na oceli (LPS-S1-P1), poté na povlaku CrFe (CrFe-S1-P1 a P2), následované povlakem WCCoCr (WCCoCr-S1-P1 a P2) a nejhůře bylo možné detekovat rozdíly v tloušťce na povlaku SnSbCu (SnSbCu-S1-P1 a P2). Tato závislost platila jak pro hodnocení pomocí fáze, tak P-function. Ukázalo se, že výsledky simulací se shodují s experimenty. Největší citlivosti SPT je dosaženo na materiálech s nejmenší vodivostí a difuzivitou.

U P-function lze z SPT dopočítat MR (maximální rozlišení). MR vyšlo 11 μm pro povlaky CrFe, 100 μm pro povlaky WCCoCr, 400 μm pro SnSbCu a 2,2 μm pro LPS-S1-P1.

Zároveň je velmi důležité si povšimnout maximálních charakteristických časů u jednotlivých povlaků (tj. charakteristických časů u nejtlustějších vrstev jednotlivých povlaků). Ty totiž souvisí s tím, jak dlouhá musí být měřená sekvence. Znamená to tedy, že například pro vyhodnocení a tudíž změření vzorku CrFe-S1-P2 dostačuje čas 1,184 s (nejtlustější vrstva CrFe-S1-P2 je 1,24 mm, pro její změření je potřeba minimálně čas 1,184 s, viz Tab. 12), kdežto pro změření vzorku WCCoCr-S1-P2 stačí 0,105 s (minimální čas pro změření nejtlustější vrstvy WCCoCr-S1-P2, která je 0,416 mm tlustá, viz Tab. 12).

Ověření kalibračního přístupu

Výsledky popisují možnost použití kalibračního přístupu pro určení tloušťky povlaků. Výsledky měření jsou uvedeny v Tab. 14, 15 a 16 a graficky vyjádřeny na Obr. 30 a 31

Tab. 14: Rozdíly v odhadu tlouštěk pro vzorek 1

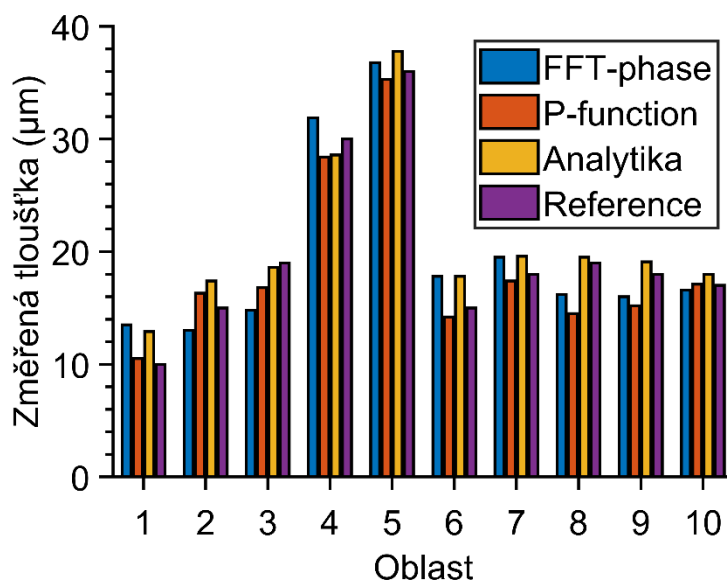
Vzorek		LPS-S1-P1										
		Oblast	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Průměrná tloušťka z oblasti (μm)	Tloušťkoměr	10	15	19	30	36	15	18	19	18	17	
	FFT phase	13,5	13,0	14,8	31,9	36,8	17,8	19,5	16,2	16,0	16,6	
	P-fun	10,5	16,3	16,8	28,4	35,3	14,2	17,4	14,5	15,2	17,1	
	Analytika	12,9	17,4	18,6	28,6	37,8	17,8	19,6	19,5	19,1	18,0	
Relativní chyba (%)	FFT phase	35,4	13,1	22,4	6,2	2,1	18,5	8,4	14,6	11,3	2,5	
	P-fun	5,0	8,7	11,6	5,3	1,9	5,3	3,3	23,7	15,6	0,8	
	Analytika	29,0	16,0	2,1	4,7	5,0	18,7	8,9	2,6	6,1	5,9	

Tab. 15: Rozdíly v odhadu tloušťek pro vzorek 2

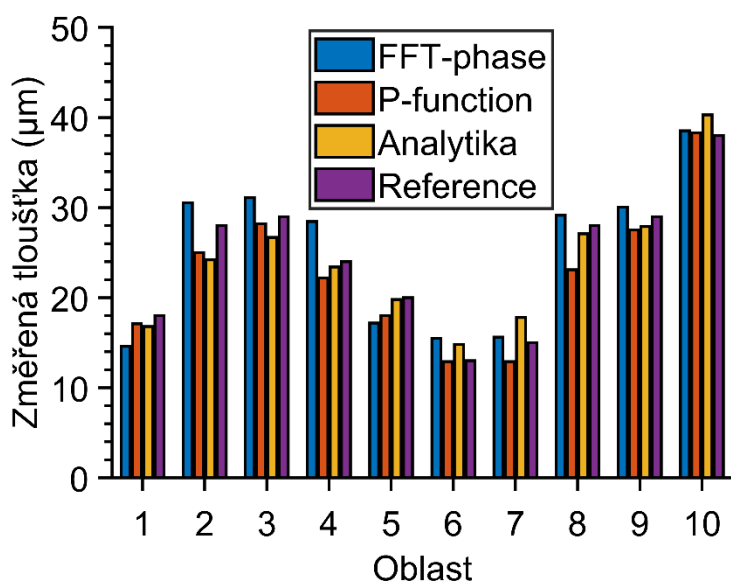
Vzorek	LPS-S2-P2										
	Oblast	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Průměrná tloušťka z oblasti (μm)	Tloušťkoměr	18	28	29	24	20	13	15	28	29	38
	FFT phase	14,6	30,5	31,1	28,4	17,2	15,5	15,6	29,2	30,1	38,5
	P-fun	17,1	24,9	28,2	22,2	18	12,9	12,9	23,1	27,5	38,3
	Analytika	16,8	24,2	26,7	23,4	19,8	14,8	17,8	27,1	27,9	40,3
Relativní chyba (%)	FFT phase	18,9	9,1	7,3	18,5	14,1	19,2	4,1	4,1	3,7	1,4
	P-fun	5,0	10,8	2,8	7,5	10,0	0,8	14,0	17,5	5,2	0,8
	Analytika	6,7	13,6	7,9	2,5	1,0	13,8	18,7	3,2	3,8	6,1

Tab. 16: Přehledová srovnávací tabulka jednotlivých metod vyhodnocení (vycházelo se z měření všech oblastí vzorků LPS-S1-P1 a LPS-S2-P2, Tab. 14 a Tab.15)

		Průměrná odchylka (%)	Maximální odchylka (%)	Průměrná ABS chyba (μm)	Max ABS chyba (μm)
LPS-S1-P1	FFT phase	13,5	35,4	2,2	4,3
	P-fun	8,1	23,7	1,5	4,5
	Analytika	9,9	29,0	1,6	2,9
LPS-S2-P2	FFT phase	10,0	19,2	2,1	4,5
	P-fun	7,4	17,5	1,7	4,9
	Analytika	7,7	18,7	1,7	3,8
Celkem	FFT phase	18,5	35,4	3,2	4,5
	P-fun	11,8	23,7	2,4	4,9
	Analytika	13,8	29,0	2,4	3,8



Obr. 30: Grafické vyjádření rozdílů v určení tloušťce pro vzorek LPS-S1-P1 odečtené různými způsoby



Obr. 31: Grafické vyjádření rozdílů v určení tloušťky pro vzorek LPS-S2-P2 odečtené různými způsoby

Průměrná odchylka pro všechna provedená vyhodnocení se pohybovala pod 20 %, což byl velmi dobrý výsledek. Jednalo se o chyby v řádech jednotek μm , viz Tab. 16. Je vidět, že maximální chyba v určení tloušťky byla pod $5 \mu\text{m}$.

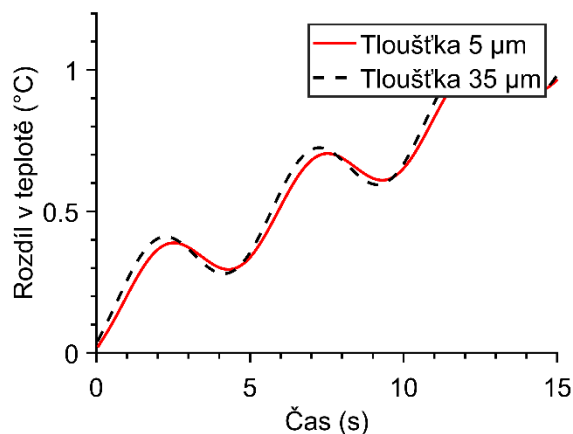
Nejlépe vycházel výpočet tloušťky pomocí analytického modelu, kde byla průměrná absolutní chyba $2,4 \mu\text{m}$. Je však třeba brát v potaz, že je nutné znát materiálové vlastnosti, což je v běžné praxi téměř nemožné.

Druhý nejlepší výsledek dosahovala P-function. Zde také byla průměrná chyba v určení tloušťky $2,4 \mu\text{m}$. Nicméně největší absolutní chyba byla větší než v případě použití analytického vztahu. Výhodou byla jednoduchá kalibrace. Nejhorší výsledek byl dosažen u FFT-phase, kde průměrná absolutní chyba byla největší.

Když srovnáme průměrnou chybu měření u P-function s maximálním rozlišením (MR) získaným z SPT, zjistíme, že vyšla prakticky stejná čísla ($2,4 \mu\text{m}$ průměrná absolutní chyba vs. $2,2 \mu\text{m}$ MR). Z toho lze usuzovat, že parametr MR nám dává dobrou představu o možnostech využití IRNDT při použití P-function.

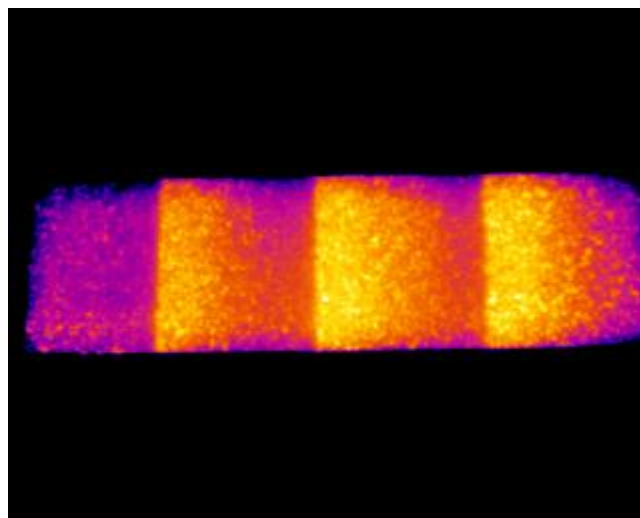
Použitelnost HLIT metody

Výsledky simulace ukázaly, že je možné detekovat změny v tepelném přenosu na povrchu vzorku při využití lock-in buzení pro rozdílné tloušťky povlaku (5 a 35 μm) na stejně tlustém substrátu. Grafy teplotních průběhů pro HLIT jsou na Obr. 32.



Obr. 32: Průběhy teplotních odezev při lock-in buzení vzorku s plochami tlouštěk 5 a 35 μm

Experimentální výsledky ukázaly, že vrstvy s rozdílnou tloušťkou bylo možné pouze obtížně rozpoznat. Všechny provedené experimenty ukázaly, že rozdíly ve fázi mezi oblastmi s rozdílnou tloušťkou byly velmi malé ($< 0,1$ rad) a to pro všechny testované lock-in frekvence 0,1; 0,2; 0,5; 1 Hz. Ukázalo se, že lock-in frekvence neměla praktický vliv na výsledky. Typický výsledek vyhodnocení HLIT pomocí algoritmu 2HSC (fáze) ukazuje Obr. 33. Výsledek ukázala, že bylo možné rozlišit pouze oblast povlaku s nejmenší tloušťkou (tloušťka 0,22 mm, fáze -2,04 rad) od ostatních oblastí (všechny oblasti mají průměrnou hodnotu fáze -2,01 rad). Fáze ve zbylých oblastech byla však stejná pro tloušťky 0,38; 0,49 a 0,59 mm.



Obr. 33: 2HSC vyhodnocení vzorku CrFe-S1-P1

Všechny provedené experimenty ukázaly podobný trend a výsledkem tedy bylo, že využití HLIT v dané konfiguraci bylo pro určení tloušťky povlaků nevhodné.

Problémem byl především zdroj buzení (halogenová lampa), který generoval nehomogenní osvit a tím i nehomogenní ohřev. Tento jev zamaskoval velmi malé rozdíly v šíření tepla v oblastech s rozdílnou tloušťkou povlaku. Pro úspěšnou inspekci by bylo nutné se zaměřit na úpravu budicího zdroje z pohledu homogenity.

Souhrn

Výsledky ukazují, že HLIT je v dané konfiguraci nevhodnou technikou pro detekci rozdílů v tloušťce povlaků. U FPT je naopak prokázán potenciál k praktickému využití pro určování tloušťky povlaků.

Všechny výsledky u FPT ukazují, že nově navržená metoda postavená na algoritmu P-function je vhodnější pro zjišťování tloušťky povlaků než nejlepší současná metoda FFT-phase. Hlavní výhoda je v menší závislosti na pozici vzorku pod lampou oproti FFT-phase, žádné závislosti na materiálu a emisivitě podložky, jednotném trendu závislosti sledovaný parametr tloušťka. U FFT-phase se ukazuje, že výsledky jsou silně závislé na pozici vzorku pod lampou, závislé na materiálu podložky, a že závislost mezi sledovaným parametrem nemá jednotný trend. Experimentálně i simulačně se ukazuje, že FFT-phase má výrazně horší předpoklady pro hodnocení tloušťky pomocí kalibračního vztahu než P-function. To je potvrzeno určením přesnosti stanovení tloušťky, kde také vychází lépe P-function než FFT-phase. Z hlediska rychlosti vyhodnocení má P-function další výhodu v tom, že lze snadno určit, jak dlouhé musí být měření (dáno maximálním charakteristickým časem) a tudíž lze měření dle očekávaného maximálního charakteristického času zkrátit (zrychlit). U FFT-phase takovéto zkrácení není možné. U P-function lze tedy dosáhnout rychlejších měřicích časů.

5.2 Nový testovací systém na bázi laserové termografie

Výsledky jsou členěny dle jednotlivých úkolů sloužících k otestování nového systému na bázi laserové termografie.

Specifikace a zprovoznění systému

Prvotním krokem bylo určit, jaký laser je vhodný jako budicí zdroj pro navržený měřicí koncept. Důležitým parametrem laseru je výkon a vlnové délka. Proto proběhl experiment ohřevu materiálu různými lasery.

Ukázalo se, že dostatečného ohřevu je možné dosáhnout s výkonem menším než 5 W. Při použití výkonu 5 W se různé materiály ohřály od 0 do 67 °C (průměrně 32 °C, viz Tab. 17).

Tab. 17: Ohřev materiálu při působení různých laserů

číslo vzorku	materiál	1070nm, 10W	532nm, 5W
		Ohřev (°C)	Ohřev (°C)
1	Dural	0	0
2	Nerez	3	2,5
4	Polypropylen	20,2	30,7
5	PBT-GF30-White	4,2	3,7
6	PBT-GF30-Black	67,1	67
7	PVC-U	4,6	66,9
8	PE-HD	0	0
9	PP-H	16,1	26,6
10	PP-C-white	1	0,5
11	PP-C-blue	1,2	15
12	POM-C-black	67,3	67,4
13	PA-66-GF30-black	3,4	66,1
14	PA-6-GF50-black	67,2	66,4
15	Al2O3	0	0,3
16	Macor	23,3	27
17	Si	0	0,4
18	Tio2	66,5	66,2
19	Cr2O3	66,7	66,9
20	Al2O3+Tio2	66,3	49,6
21	m3high	14,4	17,9
22	hastelloy	42,6	34,7

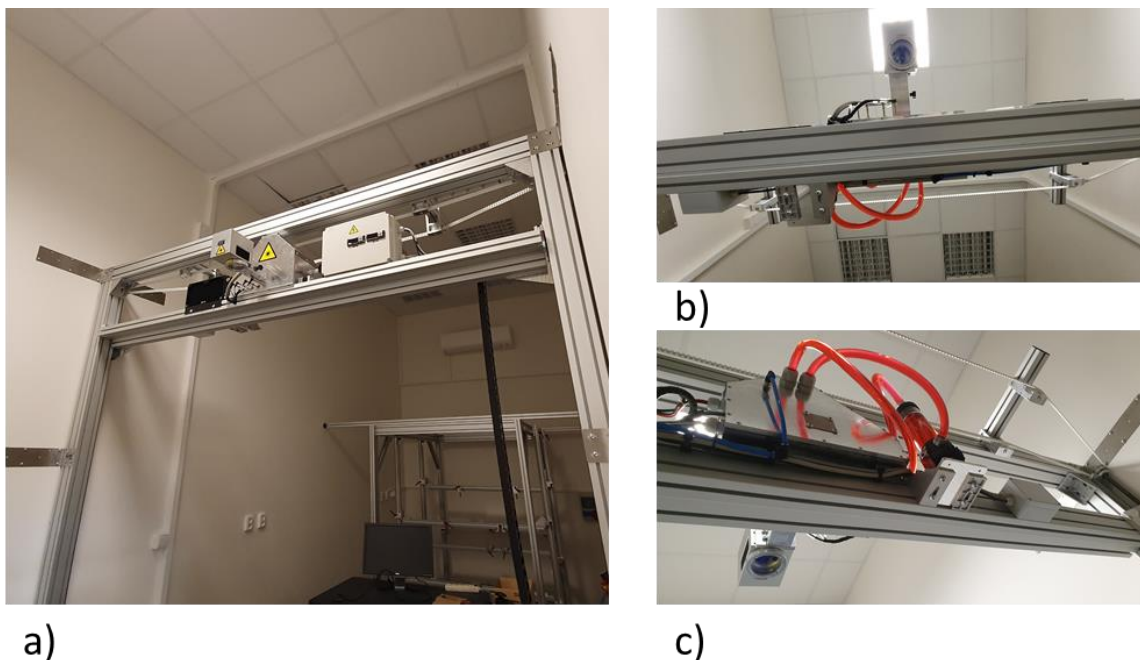
Na základě provedených měření bylo rozhodnuto, že vhodným laserem je kterýkoliv 5W CW laser o vlnové délce 532 nm a stabilitě do 3 %. Kromě toho bylo rozhodnuto, že součástí nového laserového systému bude také CW laser o vlnové délce 375 nm, výkonu alespoň 0,4 W a stabilitě do 3 % (vhodnost vybraného řešení byla ověřena simulací v ANSYSu). Tento laser byl vybrán především s ohledem na budoucí výzkum (testování vlivu rozdílné vlnové délky na ohřev materiálu při IR nedestruktivním testování).

Tato unikátní kombinace laserů může sloužit kromě zamýšleného buzení při testování povlaků i jako základní nástroj ke zkoumání vlivu vlnové délky na ohřev materiálu. Kromě vytipovaných laserů bylo navrženo, aby laserový systém obsahoval i přípravu na přidání dalšího laseru (více možností pro budoucí využití).

Dále dle koncepce muselo být zajištěno skenování vzorku bod po bodu. Bylo tedy navrženo, aby pohyb laserového spotu po vzorku byl řešen skenovací hlavou, do které jsou svedeny výstupy z laserů. Běžné skenovací hlavy vychylují paprsek v oblasti 15 x 15 cm. Pro možnost skenování větší plochy bylo navrženo, aby byl vynechán f-theta objektiv (díky tomu jsou paprsky z laseru paralelní) a bylo možné pohybovat osou Z laseru (pohyb o 1,4 m, tím se zvětší možná skenovaná plocha).

Dle navržených specifikací se připravilo výběrové řízení. Byl dodán systém se dvěma lasery: 5W CW laser JenLas D2.mini 5W S o vlnové délce 532 nm a stabilitě 3 % a 0,4 W CW laser Oxxius LBX-375 HPE o vlnové délce 375 nm. Oba lasery splňují zadané požadavky.

Celý laserový systém se ovládá pomocí softwaru SAM light (Scaps) a řídicí karty RTC5. Uspořádání systému je na Obr. 34, kde část a) ukazuje umístění systému v prostoru, část b) ukazuje záběr na skenovací hlavu a část c) ukazuje záběr na chlazení laseru.

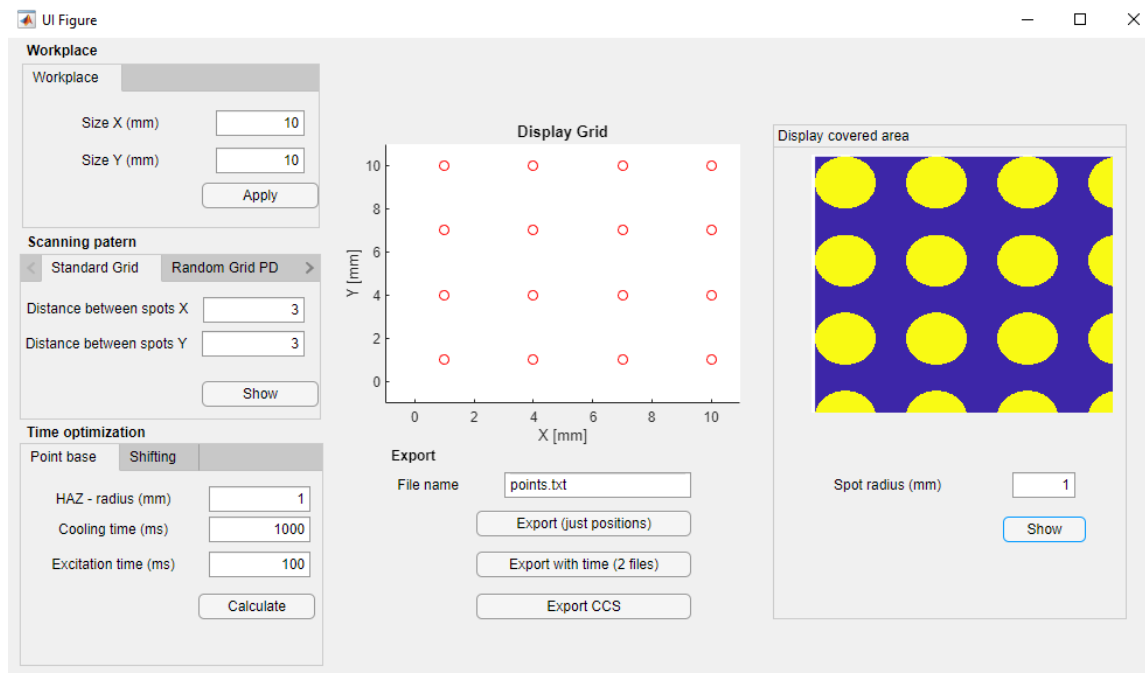


Obr. 34: Fotografie laserového systému: a) umístění v prostoru, b) záběr na skenovací hlavu, c) záběr na chlazení

Po instalaci systému proběhla různá dodatečná nastavení jako je například nastavení skenované plochy z hlediska přesnosti zadávaných údajů (tj. aby jeden mm v softwaru znamenal jeden mm ve skutečnosti). Změřila se výkonová křivka laserů v závislosti na nastaveném výkonu v % (závislost není lineární). Provedla se ověřovací měření z hlediska výkonu, stability i pozicování.

Synchronizace mezi kamerou a začátkem buzení je řešena přivedením vzorkovací frekvence kamery (kdy kamera snímkuje) na digitální vstup RTC karty. V ovládacím softwaru je vždy před zapnutím laseru nastaveno čekání na sekvenci 1-0-1 na vstupu RTC karty. Tímto krokem se zajistí, že laser spíná vždy v závislosti na snímkování kamery a tudíž je zajištěna opakovatelnost měření.

Informace o skenovaných bodech (pozice, čekání na synchronizační sekvenci a čekací časy) jsou předány do řídicího softwaru SAM light pomocí vytvořeného programu v Matlabu. Tento program má intuitivní GUI (viz Obr. 35), ve kterém se nastaví vše ohledně způsobu skenování – typ skenování, velikost pole, HAZ, doba chladnutí, doba buzení. Software poté vypočítá vše potřebné a graficky znázorní rozložení bodů i pokrytou oblast skenováním (na základě skutečné velikosti spotu). Výsledek je poté exportován pomocí ASCII příkazů (ve formátu CCS) do softwaru SAM light, který řídí i skenovací hlavu.



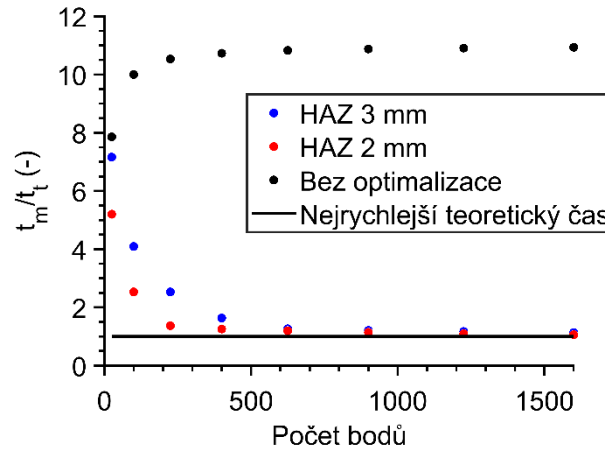
Obr. 35: Grafické rozhraní softwaru pro vytvoření skenovacích bodů

Kompletní systém byl odzkoušen na ocelovém vzorku s FBH. Ukázalo se, že synchronizace mezi kamerou a laserem, pozicování spotu, vkládání čekacích časů je plně funkční a připravené na používání.

Vliv časové optimalizace

Časová optimalizace má za cíl zásadním způsobem zrychlit měření pomocí laserové termografie. Výsledky ukazují, jak velkou časovou úsporou optimalizace přinesla. Pro

přehlednost byly výsledky vztaheny k nejrychlejšímu možnému času (t_m/t_t , kde t_m je čas měření a t_t je teoreticky nejrychlejší čas měření, který je definován v kapitole 4.3.2 u laserové termografie). Poměr mezi časem měření a nerychlejším časem mohl tedy být nejlépe 1.

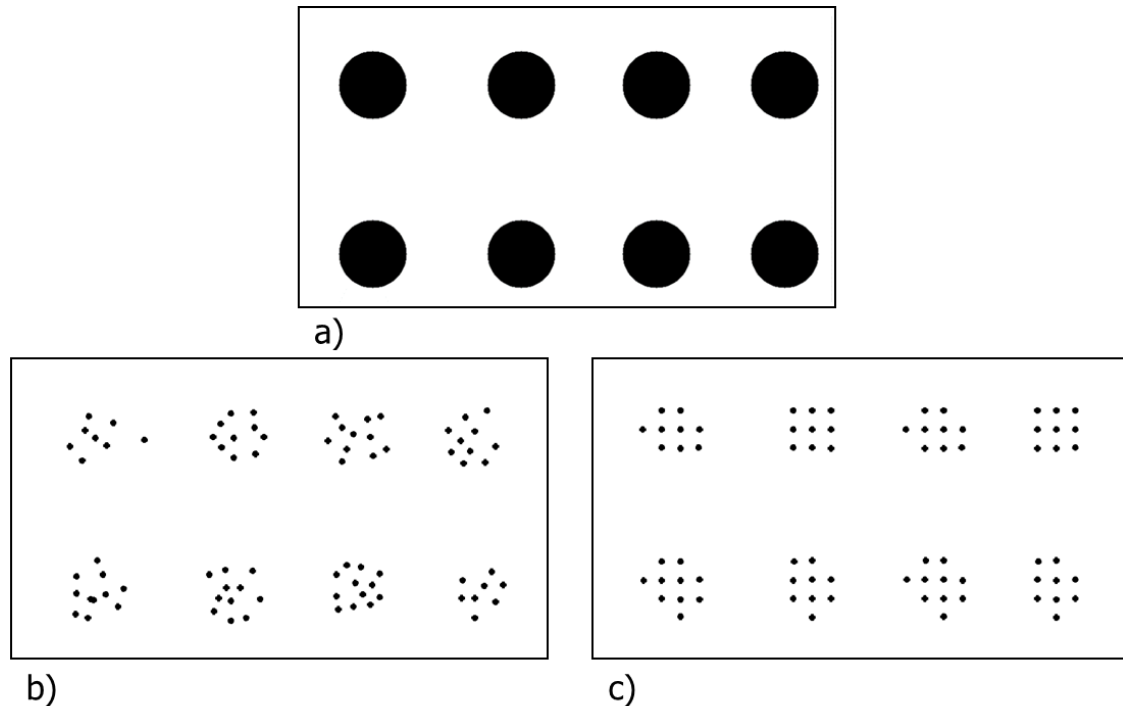


Obr. 36: Srovnání teoretických rychlostí měření u laserové termografie, rychlosti jsou poměrově vztahované k nejrychlejšímu možnému času měření

Z výsledků (Obr. 36) lze vidět, že časová optimalizace (jak při nastavení HAZ 3 mm, tak i HAZ 2 mm) zrychlila měření již od malého počtu bodů. S rostoucím počtem bodů se čas měření začínal blížit nejrychlejšímu možnému času měření (poměr se blížil 1, v grafu vyznačeno jako teoreticky nejrychlejší čas). Více bodů totiž znamená pokrytí větší plochy a tím lze efektivněji rozmisťovat body. Ukázalo se, že při použití navrhovaného algoritmu časové optimalizace HAZ nemělo prakticky vliv od 400 bodů. Jinak platí, že větší HAZ znamená delší měřicí čas. Simulace ukázala velmi dobrou použitelnost algoritmu pro časovou optimalizaci. Je nutné zmínit, že pro očekávaný počet bodů (větší než 200) se jeví jako zbytečné optimalizaci vylepšovat, avšak pro jiné aplikace to může být zajímavé. Časová optimalizace přinesla zhruba 10x rychlejší měřicí časy než v případě měření bez optimalizace.

Vliv prostorové optimalizace

Vhodné rozložení skenovacích bodů velkou měrou ovlivňuje výsledky. Tento fakt je ukázán na Obr. 37.



Obr. 37: Porovnání skenování pomocí řídkého rastru a Poissonových disků: a) rozmístění defektů (ploch s rozdílnou tloušťkou povlaku), b) detekce pomocí Poissonových disků, c) detekce pomocí řídkého rastru

Obr. 37 část a) ukazuje rozmístění defektů, kterými jsou plochy s rozdílnou tloušťkou povlaku použité v simulaci. Obr. 37 b) a c) ukazují, kolik bodů dopadlo do oblasti defektů v případě využití skenování pomocí Poissonových disků a pomocí řídkého rastru. V obou případech bylo detekováno všech 8 defektů. Při využití Poisson Disc Samplingu bylo v oblasti defektů 78 bodů, kdežto při standardním rastru pouze 70. Zároveň při Poisson Disc Samplingu lze snadněji odhadnout tvar oblastí s rozdílnou tloušťkou povlaku. Z bodů ze standardního řídkého rastru se mnoho ploch jeví jako čtvercové plochy, přitom jsou kruhové. Z této simulace vyplývá, že pro otestování neznámého vzorku přineslo skenování pomocí Poissonových disků výhody v podobě lepšího zachycení ploch (tvar, počet bodů) s rozdílnou tloušťkou.

Vliv pozice vzorku pod laserovou skenovací hlavou na výsledky

U FPT se ukázalo, že na výsledky inspekce může mít vliv pozice vzorku pod zdrojem buzení. Výsledky v tomto bodě měly ukázat, zda umístění vzorku pod skenovací hlavou má vliv na výsledky. Tab. 18 ukazuje výsledky měření. Je vidět, že směr uložení vzorku neměl žádný vliv. To bylo potvrzeno i ANOVou, kde se ukázalo, že na hladině významnosti 5 % změna směru neměla vliv, ani při použití P-function, ani při použití FFT-phase.

Tab. 18: Závislost změny polohy vzorku pod laserem

		CrFe-S1-P1				
		Tloušťka (mm)	0,22	0,38	0,49	0,59
P-fun (s)	Směr 1		0,072	0,166	0,266	0,317
	Směr 2		0,071	0,167	0,276	0,314
Fáze (rad)	Směr 1		-0,667	-0,756	-0,913	-0,988
	Směr 2		-0,662	-0,758	-0,916	-0,992

V dané konfiguraci (skenovací hlava 44 cm od vzorku) byla záměrně omezena plocha skenování na 30 x 30 cm, aby nedocházelo k deformaci spotu. V této oblasti byl tedy laser schopný budit každý spot se stejným výkonem a díky tomu bylo možné v jakékoliv pozici dosáhnout stejných výsledků. Pro skenování větších ploch by bylo možné zvětšit vzdálenost skenovací hlavy vzorek a tím dosáhnout pokrytí větší plochy (díky skenovací hlavě bez f-theta objektivu – paralelní svazek).

Vliv různého druhu skenování

V rámci práce byly navrženy různé způsoby skenování (plný rastr, řídký rastr a Poissonovy disky). Výsledky měření vzorku CrFe-S1-P1 ukazují rozdíly mezi jednotlivými způsoby řídkého skenování. Tab. 19 ukazuje, kolik bodů dopadlo na jaké plochy rozdílných tlouštěk povlaku.

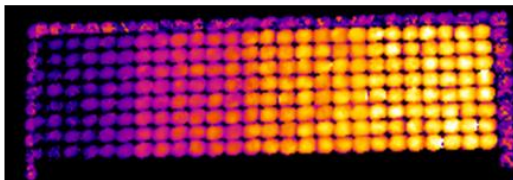
Tab. 19: Počet bodů na ploše při použití rozdílných technik skenování, měření vzorku FeCr-S1-P1

		Tloušťky (mm)	0,22	0,38	0,49	0,59
Počet bodů na ploše	Řídký rastr		15	20	25	20
	Poisson disk		19	20	20	18

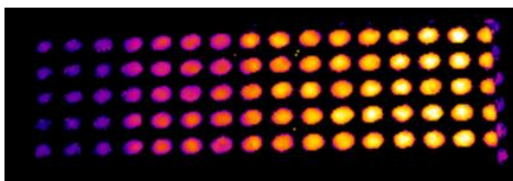
Při řídkém rastru dopadlo na vzorek 80 bodů (z celkového počtu 100) a při použití Poissonových disků 77 bodů (z celkového počtu 101). To odpovídalo přibližně 80 % ze všech použitých bodů (buzená plocha byla větší než vzorek). Hlavní výhoda Poissonových disků byla v rovnoměrnějším rozložení bodů po vzorku oproti použití řídkého rastru. První oblast (tloušťka 0,22 mm) byla při řídkém rastru pokryta nejméně body. Bylo to dáno tím, že nebyla zachycena hrana vzorku. Plocha vzorku byla tedy rovnoměrněji zachycena při skenování Poissonovými disky než v případě řídkého rastrového skenování. Pro pokrytí velkých ploch se tedy jednalo o vhodnější techniku než řídké rastrové skenování.

P-function

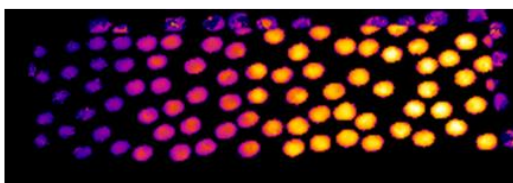
Plný rastr



Řídký rastr

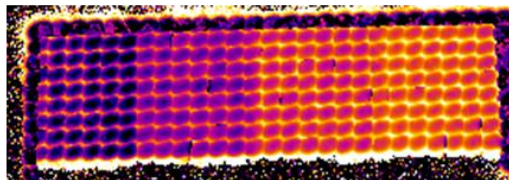


Poisson disk

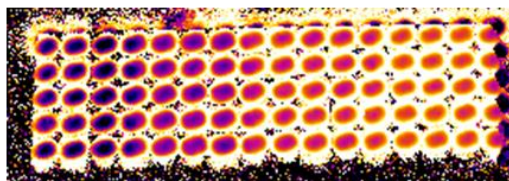


FFT - phase

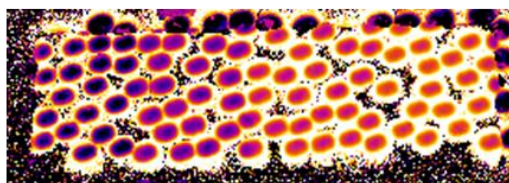
Plný rastr



Řídký rastr



Poisson disk



Obr. 38: Výsledky laserové termografie při použití rozdílných technik skenování

Rozdíly ve výsledcích při použití rozdílného skenování ukazuje Obr. 38. Při použití všech typů skenování bylo možné rozpoznat od sebe všechny 4 oblasti s rozdílnou tloušťkou. Jako výhodnější se jeví využití P-function, jelikož nevytváří na okraji spotů kruh s rozdílnou intenzitou.

Tab. 20: Porovnání rozdílného typu skenování

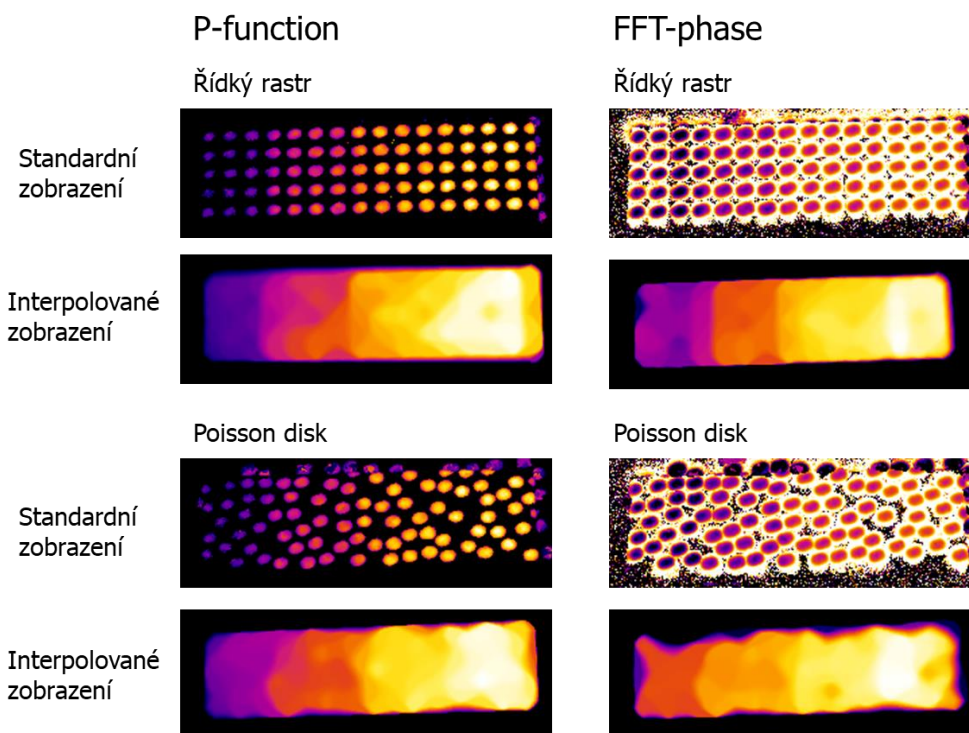
		CrFe-S1-P1			
	Tloušťka (mm)	0,22	0,38	0,49	0,59
P-fun (s)	Plný rastr	0,064	0,144	0,244	0,314
	Řídký rastr	0,076	0,156	0,281	0,344
	Poisson disk	0,076	0,128	0,265	0,304

		CrFe-S1-P1			
	Tloušťka (mm)	0,22	0,38	0,49	0,59
Fáze (rad)	Plný rastr	-0,537	-0,639	-0,842	-0,916
	Řídký rastr	-0,526	-0,647	-0,866	-0,927
	Poisson disk	-0,536	-0,659	-0,844	-0,906

Průměrnou hodnotu jednoho spotu v oblastech s rozdílnou tloušťkou ukazuje Tab. 20. Spoty byly vybrány tak, aby byly přibližně na stejném místě. Z toho důvodu jsou také vidět drobné odchylky výsledků při jednotlivých skenování. Z praktického hlediska byly hodnoty stejné. To potvrzuje stejná směrnice (*SPT*). *SPT* pro P-function bylo 0,69 pro plný sken, 0,71 pro řídký rastrový sken a 0,68 pro skenování Poissonovy disky. *SPT* pro fázi byla 1,08 pro plný sken, 1,15 pro řídký rastrový sken a 1,05 pro skenování Poissonovy disky.

Prostorové rozlišení (*PR*) bylo 11,25 bodů/cm² pro plný sken, 4,17 bodů/cm² pro řídký rastrový sken a 4,21 bodů/cm² pro skenování pomocí Poissonových disků. Doba měření byla 18,94 s pro plný sken, 7,31 s pro volný rastr a 8,14 s pro Poissonovy disky.

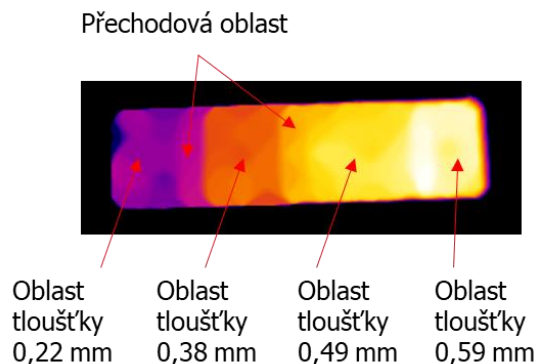
U řídkého skenování lze uměle navýšit prostorové rozlišení. To umožní zobrazit odhad rozložení tloušťky i v oblastech, které nebyly skenovány. Princip je v prostorové interpolaci jednotlivých skenovaných bodů (viz Obr. 39, u zobrazených obrázků pomocí inward interpolation-regionfill v Matlabu).



Obr. 39: Porovnání interpolovaného a standardního zobrazení výsledků laserové termografie

Výsledky po provedení interpolace ukázaly dopočítané rozdíly v tloušťkách povlaku na celém vzorku. Lze vidět, že bylo možné detekovat oblasti s rozdílnou tloušťkou.

Při použití řídkého rastru byly patrnější hranice mezi oblastmi rozdílných tlouštěk. Tento efekt byl dán především tím, že plochy rozdílných tlouštěk byly ortogonální. Díky tomu, že byly skenovací body v obdobné pozici jako samotná hranice mezi vrstvami rozdílných tlouštěk, vznikla mezi skenovacími body rovnoměrná interpolace (ta umožňovala dobrou detekci hranice mezi rozdílnými plochami). Oblasti u hranic rozdílných ploch ovšem vytvářely na výsledcích přechodové oblasti (viz Obr. 40) s rozdílným kontrastem od skutečných ploch s rozdílnou tloušťkou. To bylo způsobeno pozicí skenovacího bodu v těsné blízkosti hranice rozdílných ploch (mnoho bodů bylo částečně na plochách se sousedními tloušťkami a navíc tyto body byly umístěny v jedné linii).



Obr. 40: Vznik přechodových oblastí

U skenování pomocí Poissonových disků byly hranice mezi plochami méně zřetelné. Bylo to dáno rozložením bodů na vzorku. Interpolace mezi body byla ovlivněna samotnou pozicí skenovaných bodů. Nevznikaly přechodové oblasti. Menší počet bodů se nacházel v okolí přechodu z jedné oblasti do další.

Při použití zobrazení výsledku v interpolovaném zobrazení se jeví jako výhodnější použití Poissonova skenování z důvodu větší univerzálnosti. Není potřeba zabývat se falešnými indikacemi v podobě přechodových oblastí.

Souhrn

Byl postaven nový laserový systém pro aktivní termografii. Navržený systém z pohledu hardwaru je jako celek unikátní díky možnosti volby vlnové délky laseru (v současnosti dvě vlnové délky), skenování velkých ploch (umístění laseru na portálu s možností pohybu v ose z o 1,4 m) a velké stabilitě výkonu. Systém umožňuje přesnou synchronizaci laserového buzení s kamerou přes digitální vstup RTC karty.

Z pohledu softwaru je systém řízený programem SAM light (Scaps) v kombinaci s programem vytvořeným v Matlabu. V Matlabu je tvořeno rozložení skenovacích bodů v prostoru i v čase.

Experimenty ukázaly, že zamýšlený způsob buzení, tj. skenování bod po bodu a následné vyhodnocení pomocí algoritmů pro pulsní termografii je plně funkční. Bylo ukázáno, že se podařilo dosáhnout homogenního osvětlení napříč celým vzorkem.

Z pohledu reálné aplikace se ukazuje časová optimalizace buzení jako naprosto klíčová. Bylo ukázáno, že zrychluje měřicí čas 10 krát. Tím je dosaženo pro mnohé aplikace akceptovatelného měřicího času.

Pro časově náročné aplikace, kde je potřeba dosahovat rychlejších měřicích časů, je možné využít navíc prostorové optimalizace. Experimenty ukázaly výhody použití skenování pomocí

Poissonových disků, kdy je možné při znatelném zrychlení měření dosáhnout dobrého prostorového rozlišení.

5.3 Funkční vlastnosti vytvořeného laserového systému

Výsledky této kapitoly byly rozděleny na dvě části. První část výsledků ukazuje použitelnost laserové termografie pro analýzy tlouštěk povlaků nanesených různými technologiemi. Druhá část se věnuje porovnání výsledků měření tloušťky povlaků pomocí nového laserového systému a pomocí flash-pulzní termografie, která představuje nejlepší současnou IRNDT metodu pro analýzu tlouštěk povlaků.

Použití laserové termografie pro analýzy povlaků

Experimentálně byly pomocí laserové termografie měřeny různé povlaky. Testy proběhly se dvěma odlišnými lasery, které se lišily především ve vlnové délce (ovlivňuje kolik energie a kde se absorbuje), ale i v použitém výkonu a stabilitě. Výsledky jsou uvedeny pro měření s UV laserem (vlnová délka 375 nm, výkon 225 mW, stabilita $\pm 0,24$ %), se zeleným laserem (vlnová délka 532 nm, výkon 1245 mW, stabilita ± 3 %) a následně je ukázáno jejich porovnání.

Tab. 21: Výsledky P-function a FFT-phase při použití UV laseru

	CrFe-S1-P1				CrFe-S1-P2			
Tloušťka (mm)	0,22	0,38	0,49	0,59	0,87	1	1,15	1,24
Fáze (rad)	-0,265	-0,209	-0,253	-0,344	-0,522	-0,539	-0,567	-0,613
P-fun (s)	0,072	0,166	0,266	0,317	0,475	0,599	0,571	0,539

	WCCoCr-S1-P1				WCCoCr-S1-P2	
Tloušťka (mm)	0,074	0,152	0,241	0,302	0,373	0,416
Fáze (rad)	-0,751	-0,724	-0,733	-0,756	-0,801	-0,819
P-fun (s)	0,056	0,0646	0,089	0,104	0,124	0,138

	SnSbCu-S1-P1				SnSbCu-S1-P2			
Tloušťka (mm)	0,16	0,26	0,42	0,52	0,61	0,71	0,79	0,88
Fáze (rad)	-0,644	-0,643	-0,652	-0,669	-0,674	-0,678	-0,709	-0,715
P-fun (s)	0,0301	0,0357	0,0295	0,044	0,042	0,041	0,036	0,043

Výsledky měření UV laserem (Tab. 21) ukázaly, že při měření pomocí P-function na vzorku CrFe-S1-P1, WCCoCr-S1-P1 a P2 bylo možné zaregistrovat trend růstu charakteristického času se zvyšující se tloušťkou povlaku. Tento výsledek souhlasí s teoretickou analýzou. U vzorku CrFe-S1-P2 došlo ke změně trendu charakteristického času

pro tloušťky 1,15 a 1,24 mm. To bylo pravděpodobně způsobeno malými rozdíly v tepelných odezvách a jejich následným nevhodným proložením. U povlaku SnSbCu nebylo možné žádný trend zaregistrovat.

Při vyhodnocení FFT pomocí fáze byl patrný trend mezi fází a tloušťkou pro všechny vzorky (kromě nejmenší hodnoty tloušťky). U všech vzorků docházelo ke snižování fáze s rostoucí tloušťkou. Ve všech případech se u nejmenší tloušťky vyskytla hodnota vybočující z trendu. To je dáno jevem popsánem v kapitole 5.1. - otočení trendu fáze.

Tab. 22: Výsledky P-function a FFT při použití zeleného laseru

	CrFe-S1-P1				CrFe-S1-P2			
Tloušťka (mm)	0,22	0,38	0,49	0,59	0,87	1	1,15	1,24
Fáze (rad)	-0,238	-0,219	-0,251	-0,329	-0,456	-0,535	-0,573	-0,592
P-fun (s)	0,039	0,126	0,211	0,255	0,377	0,437	0,419	0,377

	WCCoCr-S1-P1				WCCoCr-S1-P2		
Tloušťka (mm)	0,074	0,152	0,241	0,302	0,373	0,416	
Fáze (rad)	-0,757	-0,728	-0,732	-0,752	-0,797	-0,819	
P-fun (s)	0,021	0,027	0,047	0,062	0,0734	0,0824	

	SnSbCu-S1-P1				SnSbCu-S1-P2			
Tloušťka (mm)	0,16	0,26	0,42	0,52	0,61	0,71	0,79	0,88
Fáze (rad)	-0,692	-0,662	-0,649	-0,661	-0,666	-0,663	-0,678	-0,692
P-fun (s)	0,115	0,124	0,1068	0,134	0,133	0,127	0,135	0,148

Výsledky měření zeleným laserem (Tab. 22) ukázaly, že při použití P-function na vzorku CrFe-S1-P1, WCCoCr-S1-P1 a P2 bylo také možné zaregistrovat trend růstu charakteristického času se zvyšující se tloušťkou povlaku. U vzorku CrFe-S1-P2 opět došlo ke změně trendu charakteristického času pro tloušťky 1,15 a 1,24 mm. U povlaku SnSbCu nebylo možné žádný trend zaregistrovat.

Při vyhodnocení FFT pomocí fáze byl patrný trend snižující se fáze s rostoucí tloušťkou pro vzorky CrFe a WCCoCr (kromě nejmenší hodnoty tloušťky). U nejmenších tlouštěk se ovšem vyskytla hodnota vybočující z trendu. To je dáno jevem popsánem v kapitole 5.1. - otočení trendu fáze. U vzorku SnSbCu nebylo možné žádný trend registrovat.

Tab. 23 ukazuje rozdíly v citlivosti detekce rozdílu v tloušťce povlaku při použití obou laserů.

Tab. 23: Citlivosti měření při laserové termografii

	375 nm laser				532 nm laser			
	P-fun		Fáze		P-fun		Fáze	
	SPT	R ²	SPT	R ²	SPT	R ²	SPT	R ²
CrFe-S1-P1 a P2	0,66	0,99	0,42	0,92	0,50	0,99	0,41	0,96
WCCoCr-S1-P1 a P2	0,25	0,98	0,23	0,63	0,19	0,99	0,20	0,55
SnSbCu-S1-P1 a P2	0,02	0,44	0,10	0,90	0,04	0,56	0,01	0,03

Je patrné, že při použití UV laseru bylo dosaženo mírně vyššího SPT, jak pro P-function, tak pro FFT-phase a to přesto, že byl použit menší výkon. Ohřev vzorků UV laserem byl několikanásobně menší (2 °C u UV a 7 °C u zeleného laseru pro CrFe). Důvodem pro větší SPT byla vyšší stabilita UV laseru (menší než 1 %) oproti zelenému (3 %). Pro určení tloušťek povlaků vzorků SnSbCu se ukázala laserová termografie jako nevhodná. Maximální rozlišení (MR) bylo v případě použití UV laseru a P-function 18 μm pro CrFe, 48 μm pro WCCoCr a 600 μm pro SnSbCu.

Porovnání použití laserové a flash-pulzní termografie

Flash lampa poskytuje nehomogenní ohřev vzorku a tudíž, její hlavní výhoda v plošném vybuzení byla velmi omezena. Toto omezení je možné výrazně potlačit v případě použití vyhodnocení pomocí P-function. Vyhodnocení pomocí FFT-phase je negativně ovlivněno nehomogenním buzením do té míry, že pouhé otočení vzorku o 180° ovlivnilo výsledky. Plošné buzení kromě toho způsobovalo posun ve fázi. Prakticky se ukázalo, že pro to, aby bylo možné hodnotit dva vzorky se stejným substrátem a stejným materiálem povlaku bylo nutné korigovat fázi.

V případě použití laseru jako zdroje buzení nebylo nutné fázi korigovat a nevznikal problém s nehomogenním osvitem. Je potřeba zdůraznit, že oba použité lasery měly velkou stabilitu (UV < 1 %, zelený < 3 %) a tudíž velmi dobrou opakovatelnost buzení.

Z pohledu algoritmů vyhodnocení se ve všech případech ukázalo, že bylo výhodnější použít nový algoritmus vyhodnocení P-function oproti FFT-phase.

Navržený laserový systém dosahoval lepších výsledků než měření s využitím flash lampy. Jediná výjimka nastala při testování CrFe, kde bylo vhodnější použít FPT kvůli většímu parametru SPT (LPT SPT 0,66 oproti FPT SPT 1,08 pro P-function). Maximální rozlišení se však lišilo pouze o 7 μm. U povlaku WCCoCr bylo vhodnější použít laserový systém (LPT SPT

0,25 oproti FPT SPT 0,12 pro P-function). Rozdíl v maximálním rozlišení byl již 52 μm . Při testování SnSbCu nebyla ani při jedné technice (FPT a LPT) nalezena závislost mezi charakteristickým časem a tloušťkou povlaku.

Souhrn výsledků LPT (UV laser) a FPT při použití P-function je uveden v Tab. 24.

Tab. 24: Souhrn výsledků LPT a FPT

		FeCr	WCCoCr	SnSbCu
MR (μm)	FPT	11	100	400
	LPT	18	48	600
SPT (-)	FPT	1,08	0,12	0,03
	LPT	0,66	0,25	0,02

Hlavní výhodou FPT oproti LPT je naopak prostorové rozlišení. To je dáno tím, že flash lampa je plošný zdroj buzení. Pro použité měřicí konfigurace bylo dosaženo prostorového rozlišení (PR) 790 bodů na cm^2 při FPT (uvažovalo se, že plocha 10 x 10 cm pod lampou byla dostatečně homogenní) a 11,25 bodů na cm^2 při LPT.

Doba měření vzorku byla při FPT 4 s a při LPT 18,94 s. Rychlost měření byla 25 cm^2/s pro FPT a 1,26 cm^2/s pro LPT. V obou případech se jedná o výrazné zrychlení oproti komerčně využívaným tloušťkoměřům (typicky 2 mm^2/s). Ukázalo se, že FPT měření bylo 20x rychlejší než LPT měření. Měřicí časy LPT lze ovšem zrychlit snížením prostorového rozlišení (řídkým skenováním).

Souhrn

Oba použité zdroje buzení flash lampa a laser se zásadním způsobem liší. Flash lampa je za velmi krátkou dobu schopná vybudit relativně velkou plochu (několik desítek cm^2). Její hlavní výhoda je tudíž v rychlosti měření. Hlavní nevýhoda je, že flash lampy neposkytují zcela homogenní ohřev. To se ukazuje jako zásadní problém při plošné inspekci tloušťky povlaků, kde jsou rozdíly v tepelných odezvách povlaků s rozdílnou tloušťkou velmi malé a tudíž změna homogenity ohřevu může zamaskovat rozdíl v tloušťce.

Provedené experimenty ukázaly několik zásadních problémů v případě použití FFT-phase při vyhodnocení FPT. Jednalo se především o změnu trendu závislosti fáze na tloušťce povlaku, velký vliv nehomogenity osvětlení na výsledky, ale také nutnost provádění korekce fáze v závislosti na prostředí (při změně podložky se hodnoty fáze měnily). Použití nového algoritmu vyhodnocení P-function je proto velmi přínosné, jelikož tyto efekty potlačuje.

Experimenty prokázaly, že využití nově navrženého algoritmu je ve všech ohledech lepší než používání v současné době nejlepšího vyhodnocovacího algoritmu FFT-phase a FPT inspekce pro odhad tloušťky povlaku je většinou možná pouze s použitím P-function.

Laserem (v dané konfiguraci) je možné naopak vybudit pouze malou plochu jedním pulzem. Hlavní výhodou je vynikající opakovatelnost buzení. Skenování plochy bod po bodu vede k dosažení homogenního ohřevu celého vzorku. Rozdíl mezi vyhodnoceními (P-function a FFT-phase) je zde velmi malý. Při FFT-phase totiž nedochází k problémům způsobeným nehomogenním ohřevem, jelikož laser zahřívá vzorek homogenně a vlivem prostředí dochází pouze k minimu odrazů, veškerá energie dopadá na vzorek. U LPT lze tedy prakticky použít obě vyhodnocení. Použití P-function je mírně vhodnější kvůli stálému rostoucímu trendu mezi charakteristickým časem a tloušťkou.

Provedené experimenty potvrdily, že LPT odstraňuje nedostatky FPT (nehomogenní ohřev), jak bylo zamýšleno. Z výsledků dále vyplývá, že FPT (při P-function) a LPT (obě metody vyhodnocení) dosahují podobných výsledků. To, kterou techniku je vhodnější použít, záleží především na testovaném materiálu (optické vlastnosti). V případě, že pro daný materiál, vycházejí výsledky obdobně, je vhodnější využití FPT díky rychlejším měřicím časům.

6 Závěr

Práce se zabývala nedestruktivním testováním tloušťky povlaků. Pomocí simulací i měření byla prokázána funkčnost konceptu testování tloušťky pomocí infračerveného nedestruktivního testování.

Experimentální část práce ukázala, že současné metody popsané v odborné literatuře založené na flash pulzní termografii a vyhodnocení pomocí FFT a zobrazení fází jsou použitelné, ale platí pro ně velké množství omezení. Hlavním problémem se ukazuje nehomogenita osvitů větší plochy vzorku pomocí flash lampy. Rozdíly v osvitů způsobily rozdíly v tepelných přenosech v různých místech vzorku, a tím maskovaly samotný projev prostupu tepla rozdílně tlustými vrstvami. Byly objeveny další nevýhody vyhodnocení pomocí FFT-phase, jako je nejednoznačný vztah mezi tloušťkou a fází, kdy pro některé intervaly tlouštěk fáze rostla, pro jiné naopak klesala. Dále bylo zjištěno, že i při drobné změně v měřicí konfiguraci bylo nutné fázi korigovat (přičtením/odečtením konstanty).

Jiná v současné literatuře používaná metoda založená na halogen lock-in termografii se ukázala prakticky nepoužitelná pro určování tloušťky povlaků, a to přesto, že výsledky simulací naznačovaly funkčnost tohoto konceptu. Bylo možné rozpoznat pouze velmi velké rozdíly v tloušťce povlaku. Problémem byl nerovnoměrný ohřev vzorků pomocí halogenové lampy. V odborné literatuře se uvádí, že halogen lock-in termografie je možné použít. Závěry této práce to nevyklučují, ale je potřeba zajistit potlačení plošně nehomogenního ohřevu vzorku (buď hardwarově, nebo softwarově).

Velmi pozitivně se ukázal navržený nový způsob vyhodnocení, tzv. P-function, určený pro pulzní termografii. Princip byl založen na zpracování tepelných odezev pomocí P-function a následné kalibraci mezi tloušťkou povlaku a charakteristickým časem (tj. výsledkem P-function). Výsledky provedených prací ukázaly, že při jeho použití s buzením flash lampou byl značně potlačen vliv nehomogenního ohřevu. Byla nalezena jednoznačná (rostoucí) závislost mezi tloušťkou a charakteristickým časem. Princip a funkce nového vyhodnocení byla ověřena teoreticky (simulacemi) i experimentálně. Ve všech případech byla nová technika lepší než využití dnes často využívané metody FFT při zobrazení fází.

Výsledkem disertační práce je také nový měřicí systém laserové termografie, který využívá dva odlišné laserové zdroje a skenování testované plochy bod po bodu. Byl navržen speciální algoritmus, který zrychluje skenování časovým rozmístěním bodů a dále algoritmus sloužící k efektivnímu pokrytí testované plochy za použití co nejmenšího počtu bodů (skenování pomocí Poissonových disků). Vyhodnocení je prováděno synchronizací buzení do jednoho času

a tím vznikají sekvence obdobné sekvencím změřených při flash pulzní termografii. Následně lze aplikovat stejné algoritmy vyhodnocení jako v případě flash-pulzní termografie (tj. nový způsob vyhodnocení – P-function, i FFT-phase).

Provedené experimenty ukázaly, že pomocí laserového buzení se lze zbavit problému nehomogenního ohřevu. Prokázaly se výhody časové optimalizace, neboť bez ní je prakticky nemožné měření počítačově zpracovat, kvůli nesmírnému množství dat. Bylo také potvrzeno, že pomocí skenování Poissonovými disky lze efektivně pokrýt testovanou plochu. Vyhodnocení pomocí FFT při laserovém buzení netrpělo problémy způsobené nehomogenitou ohřevu. Zůstala ovšem nevýhoda v podobě nejednotného trendu závislosti mezi tloušťkou a fází. U laserové termografie se tedy prokázalo, že je také vhodnější využít vyhodnocení pomocí P-function.

Laserová termografie přinesla oproti flash termografii větší citlivost detekce rozdílné tloušťky povlaku, ale naopak delší měřicí časy.

U obou metod bylo prokázáno, že schopnost detekce rozdílů v tloušťce povlaku závisela na tepelných vlastnostech materiálu. Snáze je možné detekovat rozdíly v tloušťkách na materiálech s menší difuzivitou a vodivostí.

S budoucím rozvojem termografického vybavení (vyšší rozlišení, vyšší vzorkovací frekvence, vyšší citlivost, nižší cena) lze očekávat, že se termografie stane nedílnou součástí testování povlaků. V současné době se jeví pravděpodobnější využití bodových měřicích systémů na bázi bodového buzení (laser) a bodového snímání teploty (IR detektor) než využití IR kamer z důvodu vysokých pořizovacích cen IR kamer a jejich malého rozlišení při vyšších vzorkovacích frekvencích (> 200 Hz). Další výzkum navazující na výsledky disertační práce je proto navržen v tomto směru.

7 Citovaná literatura

- [1] KONSTRUKCE.CZ. *Technologie žárových nástřiků* [online]. [vid. 2018-11-10]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/technologie-zarovych-nastriku-aplikace-kvalita-povlaku-a-rizika-pri-jejich-vyrobe/>
- [2] PAWLOWSKI, Lech. *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: Second Edition* [online]. 2008. ISBN 9780471490494. Dostupné z: [doi:10.1002/9780470754085](https://doi.org/10.1002/9780470754085)
- [3] HVAF.COM. *HVAF* [online]. [vid. 2018-11-10]. Dostupné z: <http://www.hvaf.com/>
- [4] VAN HEMELRIJCK, Danny, Steve VANLANDUIT, Athanasios A. ANASTASOPOULOS a Theodore P. PHILIPPIDIS. *Emerging Technologies in Non-Destructive Testing VI*. 2015. ISBN 9780415464765
- [5] FISCHER-TECHNOLOGY. *Coatings* [online]. [vid. 2018-11-10]. Dostupné z: <http://www.fischer-technology.com/en/united-states/knowledge/methods/coating-thickness-measurement/>
- [6] MATERIALSTODAY. *Beta Backscatter for Coating Thickness Measurement: Still Viable After All These Years* [online]. [vid. 2018-11-10]. Dostupné z: <https://www.materialstoday.com/metal-finishing/features/beta-backscatter-for-coating-thickness/>
- [7] KOLESKE, Joseph V. *Paint and Coating Testing Manual, Fourteenth Edition of the Gardner-Sward Handbook* [online]. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 2012. ISBN 978-0-8031-7017-9. Dostupné z: <http://www.astm.org/doiLink.cgi?MNL17-EB>
- [8] CORROSIONPEDIA. *Methods of Coating Thickness Measurement* [online]. [vid. 2018-11-10]. Dostupné z: <https://www.corrosionpedia.com/7-methods-of-coating-thickness-measurement/2/6545>
- [9] THE BRITISH INSTITUTE OF NON-DESTRUCTIVE TESTING (BINDT). *Non-Destructive Testing (NDT) – Guidance Document: An Introduction to NDT Common Methods*. *Bindt* [online]. 2015, 59. Dostupné z: <http://www.bindt.org/admin/Downloads/Apprenticeship-Guidance-Document.pdf>
- [10] KILIC, Gokhan a Mehmet S. UNLUTURK. Corroboration of NDT and deconvolution neural networks for pedestrian bridge health assessment. *Nondestructive Testing and Evaluation* [online]. 2015, 30(1), 89–103. ISSN 14772671. Dostupné z: [doi:10.1080/10589759.2014.1002839](https://doi.org/10.1080/10589759.2014.1002839)
- [11] MONTINARO, N., D. CERNIGLIA a G. PITARRESI. Detection and characterisation of disbonds on Fibre Metal Laminate hybrid composites by flying laser spot thermography. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2017, 108, 164–173. ISSN 13598368. Dostupné z: [doi:10.1016/j.compositesb.2016.09.084](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.084)
- [12] SCHLICHTING, Joachim, Mathias ZIEGLER, Christiane MAIERHOFER a Marc KREUTZBRUCK. Flying Laser Spot Thermography for the Fast Detection of Surface Breaking Cracks. *18th World Conference on Nondestructive Testing*. 2012, (April), 7.
- [13] OSWALD-TRANTA, Beate a Mario SORGER. Scanning pulse phase thermography with line heating. *Quantitative InfraRed Thermography Journal* [online]. 2012, 9(2),

- 103–122. ISSN 21167176. Dostupné z: doi:10.1080/17686733.2012.714967
- [14] WOOLARD, Deonna F. a K. Elliott CRAMER. The thermal photocopier: a new concept for thermal NDT [online]. 2004, 5405, 366. ISSN 0277786X. Dostupné z: doi:10.1117/12.541881
- [15] LEY, Obdulia a Valery GODINEZ-AZCUAGA. Line Scanning Thermography and its Application Inspecting Aerospace Composites. *5th International Symposium on NDT in Aerospace* [online]. 2013, (November), 13–15. Dostupné z: http://www.ndt.net/article/aero2013/content/papers/48_Godinez-Azcuaga.pdf
- [16] LEY, Obdulia, Manny BUTERA, Valery GODINEZ a Simon CHUNG. Assessing Impact Damage on Composites Using Line Scanning Thermography. *Advanced Materials & Processes* [online]. 2012, (June), 20–25. Dostupné z: <http://www.asminternational.org/portal/site/www/AsmStore/ProductDetails/?vgnnextoid=391724fc57997310VgnVCM100000621e010aRCRD%5Cnhttp://www.vision-systems.com/articles/2012/10/thermography-system-inspects-composites-during-production.html>
- [17] YANG, Ruizhen a Yunze HE. Optically and non-optically excited thermography for composites: A review. *Infrared Physics and Technology* [online]. 2016, 75, 26–50. ISSN 13504495. Dostupné z: doi:10.1016/j.infrared.2015.12.026
- [18] KHODAYAR, Fariba, Saeed SOJASI a Xavier MALDAGUE. Infrared thermography and NDT: 2050 horizon. *Quantitative InfraRed Thermography Journal* [online]. 2016, 13(2), 210–231. ISSN 21167176. Dostupné z: doi:10.1080/17686733.2016.1200265
- [19] IBARRA-CASTANEDO, Clemente a Xavier MALDAGUE. Pulsed phase thermography reviewed. *Quantitative InfraRed Thermography Journal* [online]. 2004, 1(1), 47–70. ISSN 1768-6733. Dostupné z: doi:10.3166/qirt.1.47-70
- [20] SILIPIGNI, G, S LAURETI, L SENNI, R TOMASELLO, P BURRASCANO a M RICCI. Optimal Design of Chirp Excitations for Pulse Compression Thermography. 2017, 27–30.
- [21] INFRA TECH. *Infratech-glossary* [online]. [vid. 2018-12-01]. Dostupné z: <https://www.infratec.eu/sensor-division/service-support/glossary/infrared-radiation/>
- [22] BALAGEAS, Daniel L., Jean-Michel ROCHE, François-Henri LEROY, Wei-Min LIU a Alexander M. GORBACH. The thermographic signal reconstruction method: A powerful tool for the enhancement of transient thermographic images. *Biocybernetics and Biomedical Engineering* [online]. 2015, 35(1), 1–9. ISSN 02085216. Dostupné z: doi:10.1016/j.bbe.2014.07.002
- [23] QIU, Jinxing, Cuixiang PEI, Haochen LIU a Zhenmao CHEN. Quantitative evaluation of surface crack depth with laser spot thermography. *International Journal of Fatigue* [online]. 2017, 101, 80–85. ISSN 01421123. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijfatigue.2017.02.027
- [24] SCHLICHTING, J., Ch MAIERHOFER a M. KREUTZBRUCK. Crack sizing by laser excited thermography. *NDT and E International* [online]. 2012, 45(1), 133–140. ISSN 09638695. Dostupné z: doi:10.1016/j.ndteint.2011.09.014
- [25] PEETERS, J., C. IBARRA-CASTANEDO, S. SFARRA, X. MALDAGUE, J. J.J. DIRCKX a G. STEENACKERS. Robust quantitative depth estimation on CFRP samples using active thermography inspection and numerical simulation updating. *NDT and E*

- International* [online]. 2017, 87(September 2016), 119–123. ISSN 09638695. Dostupné z: doi:10.1016/j.ndteint.2017.02.003
- [26] BASHEER, C. M., C. V. KRISHNAMURTHY a Krishnan BALASUBRAMANIAM. Hot-rod thermography for in-plane thermal diffusivity measurement. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* [online]. 2017, 103, 235–240. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2017.02.022
- [27] CIFUENTES, Ángel, Arantza MENDIOROZ a Agustín SALAZAR. Simultaneous measurements of the thermal diffusivity and conductivity of thermal insulators using lock-in infrared thermography. *International Journal of Thermal Sciences* [online]. 2017, 121, 305–312. ISSN 12900729. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijthermalsci.2017.07.023
- [28] IBARRA-CASTANEDO, C., D. GONZÁLEZ, F. GALMICHE, X. P. MALDAGUE a A. BENDADA. Discrete signal transforms as a tool for processing and analyzing pulsed thermographic data. In: Jonathan J. MILES, G. Raymond PEACOCK a Kathryn M. KNETTEL, ed. *Proceedings of SPIE* [online]. 2006, s. 620514. ISBN 0819462616. Dostupné z: doi:10.1117/12.660226
- [29] HILDAGO-GATO, R, J R ANDRÉS, J. M. LOPEZ-HIGUERA a F J MADRUGA. Quantification by Signal to Noise Ratio of Active Infrared Thermography Data Processing Techniques. *Optics and Photonics Journal*. 2013, 2013(August), 20–26.
- [30] IBARRA-CASTANEDO, C., N. P. AVDELIDIS, M. GRENIER, X. MALDAGUE a A. BENDADA. Active thermography signal processing techniques for defect detection and characterization on composite materials [online]. 2010, 7661, 766100. ISSN 0277786X. Dostupné z: doi:10.1117/12.850733
- [31] DUAN, Yuxia, Stefanie HUEBNER, Ulf HASSLER, Ahmad OSMAN, Clemente IBARRA-CASTANEDO a Xavier P V MALDAGUE. Quantitative evaluation of optical lock-in and pulsed thermography for aluminum foam material. *Infrared Physics and Technology* [online]. 2013, 60, 275–280. ISSN 13504495. Dostupné z: doi:10.1016/j.infrared.2013.05.009
- [32] CIAMPA, Francesco, Pooya MAHMOODI, Fulvio PINTO a Michele MEO. Recent advances in active infrared thermography for non-destructive testing of aerospace components. *Sensors (Switzerland)* [online]. 2018, 18(2). ISSN 14248220. Dostupné z: doi:10.3390/s18020609
- [33] BREITENSTEIN, Otwin, Wilhelm WARTA a Martin LANGENKAMP. *Lock-in Thermography* [online]. Second. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. Springer Series in Advanced Microelectronics. ISBN 978-3-642-02416-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-02417-7
- [34] PITARRESI, G. Lock-In Signal Post-Processing Techniques in Infra-Red Thermography for Materials Structural Evaluation. *Experimental Mechanics* [online]. 2015, 55(4), 667–680. ISSN 17412765. Dostupné z: doi:10.1007/s11340-013-9827-1
- [35] PLUM, Robin Marc. *Fatigue crack detection on structural steel members by using ultrasound excited thermography* [online]. 2015. ISBN 3731504170. Dostupné z: [https://books.google.co.uk/books?id=Uc2TCgAAQBAJ&pg=PA39&dq=all+refracted+waves+obey+snell%27s+law+sound&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwj71bu4hObVAhWmDMAKHwyCb4Q6AEIKDAA#v=onepage&q=all refracted waves obey snell's law sound&f=false](https://books.google.co.uk/books?id=Uc2TCgAAQBAJ&pg=PA39&dq=all+refracted+waves+obey+snell%27s+law+sound&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwj71bu4hObVAhWmDMAKHwyCb4Q6AEIKDAA#v=onepage&q=all%20refracted%20waves%20obey%20snell%27s%20law%20sound&f=false)

- [36] KRAPEZ, J C. Compared Performace Algorithms Used for Modulation Thermography. *Quantitative Infrared Thermography*. 1998, vol 4(1), 148–153.
- [37] ROTHBART, Nick, Christiane MAIERHOFER, Matthias GOLDAMMER, Felix HOHLSTEIN, Joachim KOCH, Igor KRYUKOV, Guido MAHLER, Bernhard STOTTER, Günter WALLE, Beate OSWALD-TRANTA a Martin SENGEBUSCH. Probability of detection analysis of round robin test results performed by flash thermography. *Quantitative InfraRed Thermography Journal* [online]. 2016, 6733(November), 1–23. ISSN 1768-6733. Dostupné z: doi:10.1080/17686733.2016.1229246
- [38] NEWAZ, Golam a Xiaoqun CHEN. Progressive damage assessment in thermal barrier coatings using thermal wave imaging technique. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2005, 190(1), 7–14. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2004.07.088
- [39] LIU, Lishuai, Liming WANG, Chenjun GUO, Hongwei MEI a Chenlong ZHAO. Detecting Defects in Porcelain Postinsulator Coated with Room Temperature Vulcanized Silicone Rubber by Pulsed Thermography. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [online]. 2019, 68(1), 225–233. ISSN 00189456. Dostupné z: doi:10.1109/TIM.2018.2834157
- [40] PTASZEK, Grzegorz, Peter CAWLEY, Darryl ALMOND a Simon PICKERING. Transient thermography testing of unpainted thermal barrier coating (TBC) systems. *NDT and E International* [online]. 2013, 59, 48–56. ISSN 09638695. Dostupné z: doi:10.1016/j.ndteint.2013.05.001
- [41] SHRESTHA, Ranjit, Yoonjae CHUNG a Wontae KIM. Thermal Behavior Variations in Coating Thickness Using Pulse Phase Thermography. *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing* [online]. 2017, 36(4), 259–265. ISSN 1225-7842. Dostupné z: doi:10.7779/jksnt.2016.36.4.259
- [42] SHRESTHA, Ranjit a Wontae KIM. Evaluation of coating thickness by thermal wave imaging: A comparative study of pulsed and lock-in infrared thermography – Part II: Experimental investigation. *Infrared Physics and Technology* [online]. 2018, 92(May), 24–29. ISSN 13504495. Dostupné z: doi:10.1016/j.infrared.2018.05.001
- [43] SHRESTHA, Ranjit a Wontae KIM. Evaluation of coating thickness by thermal wave imaging: A comparative study of pulsed and lock-in infrared thermography – Part I: Simulation. *Infrared Physics and Technology* [online]. 2018, 92, 24–29. ISSN 13504495. Dostupné z: doi:10.1016/j.infrared.2018.05.001
- [44] ZHAO, Shi-bin, Cun-lin ZHANG, Nai-ming WU a Hua-ming WANG. Quality evaluation for air plasma spray thermal barrier coatings with pulsed thermography. *Progress in Natural Science: Materials International* [online]. 2011, 21, 301–306. ISSN 1002-0071. Dostupné z: doi:http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0071(12)60061-6
- [45] LIU, J. Y., Q. J. TANG, Y. WANG, J. L. GONG a L. QIN. Investigation on Coating Uniformity of High-Temperature Alloy with SiC Thermal Barrier Coating Using Pulsed Infrared Thermographic Technique. *International Journal of Thermophysics* [online]. 2015, 36(5–6), 1252–1258. ISSN 0195928X. Dostupné z: doi:10.1007/s10765-015-1834-2
- [46] TANG, Qingju, Junyan LIU, Jingmin DAI a Zongyan YU. Theoretical and experimental study on thermal barrier coating (TBC) uneven thickness detection using pulsed infrared

- thermography technology. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2017, 114, 770–775. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.12.032
- [47] AOYAGI, Minoru, Takefumi HIRAGURI a Takahiro UENO. Nondestructive analysis of uneven paint coatings by dynamic heat conduction following flash heating. *Journal of Coatings Technology and Research* [online]. 2014, 11(3), 311–318. ISSN 15470091. Dostupné z: doi:10.1007/s11998-013-9537-8
- [48] ALTENBURG, S J, H WEBER a R KRANKENHAGEN. Thickness determination of semitransparent isolated solids using the flash method and an analytical model. 2016, 71–78.
- [49] SALAZAR, Agustín, Arantza MENDIOROZ, Estibaliz APIÑANIZ, Christophe PRADERE, Frédéric NOËL a Jean Christophe BATSALE. Extending the flash method to measure the thermal diffusivity of semitransparent solids. *Measurement Science and Technology* [online]. 2014, 25(3). ISSN 13616501. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/25/3/035604
- [50] BU, Chiwu, Qingju TANG, Yuanlin LIU, Fengyun YU, Chen MEI a Yawei ZHAO. Quantitative detection of thermal barrier coating thickness based on simulated annealing algorithm using pulsed infrared thermography technology. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2016, 99, 751–755. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.01.143
- [51] ZHANG, Jin-Yu a Lan-Jie WU. Research on measurement of thickness and damage degree of coatings based on lock-in thermography. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* [online]. 2017, 100, 012043. ISSN 1755-1307. Dostupné z: doi:10.1088/1755-1315/100/1/012043
- [52] ZHANG, Jin Yu, Xiang Bin MENG a Yong Chao MA. A new measurement method of coatings thickness based on lock-in thermography. *Infrared Physics and Technology* [online]. 2016, 76, 655–660. ISSN 13504495. Dostupné z: doi:10.1016/j.infrared.2016.04.028
- [53] JIAO, Dacheng, Wenxiong SHI, Zhanwei LIU a Huimin XIE. Laser Multi-mode Scanning Thermography Method for Fast Inspection of Micro-cracks in TBCs Surface. *Journal of Nondestructive Evaluation* [online]. 2018, 37(2), 1–10. ISSN 15734862. Dostupné z: doi:10.1007/s10921-018-0485-1
- [54] LIU, Zhanwei, Dacheng JIAO, Wenxiong SHI a Huimin XIE. Linear laser fast scanning thermography NDT for artificial disbond defects in thermal barrier coatings. *Optics Express* [online]. 2017, 25(25), 31789. Dostupné z: doi:10.1364/oe.25.031789
- [55] HWANG, S., J. PARK, Z. JIN a H. SOHN. Reference-free Coating Thickness Quantification using Laser Thermography under Various Exterior Temperature Conditions [online]. 2018, 1–7. Dostupné z: doi:10.21611/qirt.2018.023
- [56] MEZGHANI, S., E. PERRIN, V. VRABIE, J. L. BODNAR, J. MARTHE a B. CAUWE. Evaluation of paint coating thickness variations based on pulsed Infrared thermography laser technique. *Infrared Physics and Technology* [online]. 2016, 76, 393–401. ISSN 13504495. Dostupné z: doi:10.1016/j.infrared.2016.03.018
- [57] MEZGHANI, S, E PERRIN, J L BODNAR, J MARTHE, B CAUWE, V VRABIE a A SAMPLES. Evaluation of Heterogeneity of Paint Coating on Metal Substrate Using Laser Infrared Thermography and Eddy Current [online]. 2015, 9(5), 837–842. ISSN 1359-6640. Dostupné z: doi:10.1039/B919800H

- [58] WANG, Hongjin, Sheng Jen HSIEH, Bo PENG a Xunfei ZHOU. Non-metallic coating thickness prediction using artificial neural network and support vector machine with time resolved thermography. *Infrared Physics and Technology* [online]. 2016, **77**, 316–324. ISSN 13504495. Dostupné z: doi:10.1016/j.infrared.2016.06.015
- [59] HALLOUA, H., A. ELHASSNAOUI, A. SAIFI, A. ELAMIRI, A. OBBADI, Y. ERRAMI a S. SAHNOUN. Neural networks and genetic algorithms for the evaluation of coatings thicknesses in thermal barriers by infrared thermography data. *Procedia Structural Integrity* [online]. 2017, **5**, 997–1004. ISSN 24523216. Dostupné z: doi:10.1016/j.prostr.2017.07.153
- [60] HWANG, S., J. PARK, Z. JIN a H. SOHN. Reference-free Coating Thickness Quantification using Laser Thermography under Various Exterior Temperature Conditions [online]. 2018, 369–375. Dostupné z: doi:10.21611/qirt.2018.023
- [61] ŚWIDERSKI, W. a P. HLOSTA. Evaluation of Paint Coating on Metal Elements Using Scanning Pulsed Eddy Current Thermography [online]. 2018, 556–562. Dostupné z: doi:10.21611/qirt.2018.058
- [62] DUNBAR, Daniel a Greg HUMPHREYS. A spatial data structure for fast Poisson-disk sample generation. *ACM SIGGRAPH 2006 Papers on - SIGGRAPH '06* [online]. 2006, 503. Dostupné z: doi:10.1145/1179352.1141915
- [63] EBEIDA, Mohamed S., Scott A. MITCHELL, Anjul PATNEY, Andrew A. DAVIDSON a John D. OWENS. A simple algorithm for maximal poisson-disk sampling in high dimensions. *Computer Graphics Forum* [online]. 2012, **31**(2), 785–794. ISSN 14678659. Dostupné z: doi:10.1111/j.1467-8659.2012.03059.x
- [64] MAILLET, D, Stéphane ANDRÉ a Jean Christophe BATSALE. *Thermal Quadrupoles: Solving the Heat Equation through Integral Transforms* [online]. 2000. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123846549000207>
- [65] MUZIKA, Lukáš a Michal ŠVANTNER. Thermal tomography based on time transformation. *FST 2019 - Soutěžní přehledka studentských a doktorských prací FST 2019* [online]. 2019, 184–190. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/34388>
- [66] MUZIKA, L., M. ŠVANTNER a D. MOSKAL. Experimental investigation of a time-power transformation method for flash-pulse thermographic testing. *Applied Optics* [online]. 2020, **59**(17), E89–E96. ISSN 1559-128X. Dostupné z: doi:10.1364/AO.388437
- [67] MUZIKA, Lukáš a Michal ŠVANTNER. Flash pulse phase thermography for a paint thickness determination. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2020, s. 012021. ISSN 1757-899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/723/1/012021

Vlastní publikace

Impaktované články související s disertační prací (celkem 5)

ŠVANTNER, M., L. MUZIKA a Š. HOUDKOVÁ. Quantitative inspection of coating thickness by flash-pulse thermography and time-power transformation evaluation. *Applied Optics* [online]. 2020, 59(17), E29. ISSN 1559-128X. Dostupné z: doi:10.1364/ao.388440

MUZIKA, L., M. ŠVANTNER a D. MOSKAL. Experimental investigation of a time-power transformation method for flash-pulse thermographic testing. *Applied Optics* [online]. 2020, 59(17), E89–E96. ISSN 1559-128X. Dostupné z: doi:10.1364/AO.388437

MUZIKA, L. a M. ŠVANTNER. Flash pulse phase thermography for a paint thickness determination. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2020, s. 012021. ISSN 1757-899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/723/1/012021

MOSKOVCHENKO, A., V. VAVILOV, M. ŠVANTNER, L. MUZIKA a Š. HOUDKOVÁ. Active IR thermography evaluation of coating thickness by determining apparent thermal effusivity. *Materials* [online]. 2020, 13(18). ISSN 19961944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13184057

MUZIKA, L., M. ŠVANTNER, Š. HOUDKOVÁ a P. ŠULCOVÁ. Application of flash-pulse thermography methods for quantitative thickness inspection of coatings made by different thermal spraying technologies. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2021, 406(September 2020). ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2020.126748

Impaktované články nesouvisející s disertační prací (celkem 2)

MUZIKA, L., M. ŠVANTNER a M. KUČERA. Lock-in and pulsed thermography for solar cell testing. *Applied Optics* [online]. 2018, 57(18), 90–97. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1364/AO.57.000D90

ŠVANTNER, M., L. MUZIKA, T. CHMELÍK a J. SKÁLA. Quantitative evaluation of active thermography using contrast-to-noise ratio. *Applied Optics* [online]. 2018, 57(18). ISSN 21553165. Dostupné z: doi:10.1364/AO.57.000D49

Vybrané příspěvky na konferencích související s disertační prací (celkem 5)

MUZIKA, L.. Thermal tomography based on time transformation. *FST 2019 - Soutěžní přehlídka studentských a doktorských prací FST 2019* [online]. 2019, 184–190. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/34388>

MUZIKA, L., M. ŠVANTNER a D. MOSKAL. Time transformation method for pulse thermography. *METAL 2019* [online]. 2019, 2016, 892–896. Dostupné z: doi:10.37904/metal.2019.731

MUZIKA, L., M. HONNER. A paint thickness estimation with flash pulse thermography. *Pigments and binders 2019*, 11. – 12. 11 2019, Seč. ISBN 978-80-906269-4-2.

MUZIKA, L. a M. ŠVANTNER. Flash pulse phase thermography for a paint thickness determination. *PING 2019*, 10. – 13. 9. 2019, Plzeň. ISBN: 978-80-261-0879-5

MUZIKA, L., M. ŠVANTNER. Odhad tloušťky barvy pomocí pulzní termografie. Defektoskopie 2019. 5. – 7. 11. 2019, České Budějovice

Vybrané příspěvky na konferencích nesouvisející s disertační prací (celkem 5)

ŠVANTNER, M., J. SKÁLA, L. MUZIKA a P. ČÍŽEK. Thermographic detection of damage initiation of cyclically loaded parts. METAL 2018 - 27th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. 2018. ISBN 9788087294840.

MUZIKA, L., M. ŠVANTNER, J. SKÁLA, J. TESAŘ a P. ČÍŽEK. Use of irndt evaluation for crack detection induced by cyclic loading. METAL 2018 - 27th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. 2018. ISBN 9788087294840.

MUZIKA, L., M. ŠVANTNER. Non-contact testing of photovoltaic cells using active thermography. Defektoskopia 2018. 20. – 22. 3. 2018, Nový Smokovec, Slovakia

MUZIKA, L. a M. ŠVANTNER. Thermographic nondestructive testing of solar cells. Defektoskopie 2017 - proc. of 47th conf. NDE for Safety. 2017, 7. - 9. 11. 2017, Chomutov

ŠVANTNER, M., L. MUZIKA a M. KUČERA. Active thermography methods for near-surface layers inspection. SURFINT 2017 - Progress in Applied Surface, Interface and Thin Film Science 2017. 2017, (November), 150–151.

Oceněné práce

1. místo mezi příspěvky v rámci disertačních prací na SVOČ FST 2019

MUZIKA, L. Thermal tomography based on time transformation. FST 2019 - Soutěžní přehlídka studentských a doktorských prací FST 2019 [online]. 2019, 184–190. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/34388>