

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Strojírenská technologie - technologie obrábění

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Termografické testování dílů vytvořených 3D tiskem

Autor: **Michal MATĚJKA**

Vedoucí práce: **Ing. Šárka HOUDKOVÁ Šimůnková, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Michal MATĚJKA</b>
Osobní číslo:	<b>S17B0169P</b>
Studijní program:	<b>B2301 Strojní inženýrství</b>
Studijní obor:	<b>Strojírenská technologie-technologie obrábění</b>
Téma práce:	<b>Termografické testování dílů vytvořených 3D tiskem</b>
Zadávací katedra:	<b>Katedra technologie obrábění</b>

### Zásady pro vypracování

1. Rešerše metod termografického testování a technologií 3D tisku
2. Zvolení metody termografického testování a provedení experimentu
3. Provedení porovnání parametrů a zhodnocení použitelnosti termografické metody testování

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

#### Seznam doporučené literatury:

- HOLST, Gerald C. Common sense approach to thermal imaging. Bellingham, Wash.: co-published by SPIE Optical Engineering Press, 2000. ISBN 0819437220.
- VOLLMER, Michael a Klaus-Peter MOELLMANN. Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications. Weinheim: Wiley-VCH, 2010. ISBN 3527407170.
- MEOLA, Carosena, ed. Infrared Thermography Recent Advances and Future Trends [online]. BENTHAM SCIENCE PUBLISHERS, 2012 [cit. 2019-10-17]. DOI: 10.2174/97816080514341120101. ISBN 9781608051434.
- USAMENTIAGA, Rubén, Pablo VENEGAS, Jon GUEREDIAGA, Laura VEGA, Julio MOLLEDA a Francisco ULNES. Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing. Sensors [online]. 2014, 14(7), 12305-12348 [cit. 2019-10-17]. DOI: 10.3390/s140712305. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/7/12305>.
- YANG, Li et al. Additive manufacturing of metals: the technology, materials, design and production. Cham: Springer, [2017], 2017. vii, 168 stran. Springer series in advanced manufacturing. ISBN 978-3-319-55127-2.
- GIBSON, Ian, ROSEN, David a STUCKER, Brent. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. Second edition. New York: Springer, 2015. xxi, 498 stran. ISBN 978-1-4939-2112-6.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Šárka Houdková Šimůnková, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Michal Švantner, Ph.D.**  
Nové technologie – výzkumné centrum

Datum zadání bakalářské práce: **16. října 2019**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. května 2020**



**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan



**Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**  
vedoucí katedry

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou/diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské/diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Matějka	Jméno Michal	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	Strojírenská technologie – technologie obrábění		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Houdková Šimůnková, Ph.D.	Jméno Šárka	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se škrtněte
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Termografické testování dílů vytvořených 3D tiskem		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	48	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	40	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	8
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Bakalářská práce se zaměřuje na využití termografických nedestruktivních testovacích metod na zjištění vad u výrobků vytvořených pomocí 3D tisku. Práce obsahuje rešerši metod termografického testování a technologií 3D tisku. V praktické části je popsán provedený experiment, včetně použitých zařízení a testovacích vzorků s uměle vytvořenými defekty, dále postup vyhodnocení naměřených dat a aplikované vyhodnocovací metody. Na základě výsledků se posoudila použitelnost vybrané termografické metody testování.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p style="text-align: center;">aditivní technologie, DMLS, aktivní termografie, NDT, póry, optická excitace, pulzní termografie, infračervená kamera, záblesková lampa, LabIR, CNR</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Matějka	Name Michal	
<b>FIELD OF STUDY</b>	Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Houdková Šimůnková, Ph.D.	Name Šárka	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Thermographic testing of parts created by 3D printing		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KTO	<b>SUBMITTED IN</b>	2020
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	48	<b>TEXT PART</b>	40	<b>GRAPHICAL PART</b>	8
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>The bachelor's thesis focuses on the use of thermographic non-destructive testing methods to detect defects in products created by 3D printing. The thesis contains a research in the field of thermographic testing methods and 3D printing technologies. The practical part describes the performed experiment, used equipment and test specimens with artificially created defects, as well as the procedure for evaluating the measured data and the applied evaluation method. Based on the results, the applicability of the selected thermographic testing method was assessed.</p>
<b>KEY WORDS</b>	<p>additive technology, DMLS, active thermography, NDT, pores, optical excitation, pulse thermography, infrared camera, flash lamp, LabIR, CNR</p>

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval Ing. Šárce Houdkové Šimůnkové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a věcné připomínky k bakalářské práci. Dále děkuji konzultantovi Ing. Michalu Švantnerovi, Ph.D. za vstřícnost při konzultacích a trpělivost, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval. Také děkuji Regionálnímu technologickému institutu za vytisknutí testovacích vzorků a výzkumnému centru Nové Technologie za možnost vypůjčení vybavení pro provedení experimentu. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině za podporu a poskytnutí ideálních podmínek nejen při psaní bakalářské práce, ale také během celého studia.

## Obsah

Seznam obrázků .....	2
Seznam tabulek .....	2
Seznam použitých zkratk.....	3
1. Úvod.....	4
2. Rozbor současného stavu.....	5
2.1. 3D tisk.....	5
2.1.1. Technologie vytvrzování tekutého materiálu .....	5
2.1.2. Technologie spékání práškového materiálu .....	6
2.1.3. Další technologie.....	6
2.2. Defekty .....	7
2.2.1. Běžné defekty 3D tisku .....	7
2.2.2. Metody zjišťování defektů .....	9
2.3. Termografie .....	11
2.3.1. Metody excitace zkoumaného vzorku.....	12
2.3.2. Techniky aktivní termografie .....	12
3. Popis experimentu.....	15
3.1. 3D tisk.....	15
3.2. Testované vzorky.....	15
3.3. Popis měření .....	18
3.3.1. Hardwarové vybavení .....	18
3.3.2. Použitý software .....	18
3.3.3. Kvantifikace vyhodnocení.....	20
3.3.4. Postup měření.....	20
3.3.5. Postup vyhodnocení .....	22
4. Výsledky a diskuze .....	25
4.1. Vztah mezi CNR a relativním rozdílem teploty $dT$ .....	26
4.2. Porovnání metod vyhodnocení .....	27
4.3. Závislost CNR na velikosti defektu.....	29
4.4. Závislost CNR na hloubce defektu .....	31
4.5. Závislost CNR na materiálu vzorku a typu defektu .....	32
4.6. 2D lineární regrese.....	32
5. Závěr .....	34
Seznam použitých zdrojů .....	35
Seznam příloh.....	38



## Seznam obrázků

Obr. 1 Tiskárna EOS M 290 [30].....	15
Obr. 2 Schéma umístění defektů typu jednotlivé kulové póry.....	16
Obr. 3 Schéma umístění defektů typu shluk pórů.....	16
Obr. 4 Detail shluku pórů.....	17
Obr. 5 Vytisknuté vzorky.....	17
Obr. 6 Použitá zařízení- zleva Hensel EH Pro 6000, Hensel TRIA 6000 S, Flir SC7650.....	18
Obr. 7 Ukázka softwaru LabIR.....	18
Obr. 8 Umístění přístrojů a schéma odrazové konfigurace.....	21
Obr. 9 Umístění přístrojů a schéma průchodové konfigurace.....	21
Obr. 10 Graf pro určení počátečního snímku.....	22
Obr. 11 Porovnání polynomu a inverzního polynomu- vlevo polynom, vpravo inverzní polynom.....	22
Obr. 12 Porovnání 5. (vpravo) a 10.(vlevo) stupně inverzního polynomu.....	23
Obr. 13 Nastavené parametry vyhodnocovacích metod.....	23
Obr. 14 Ukázka čtvercové a elipsovité analýzy.....	24
Obr. 15 Ukázka referenční oblasti.....	24
Obr. 16 Ukázky defektogramů.....	25
Obr. 17 Závislosti CNR na dT.....	26
Obr. 18 Porovnání vyhodnocovacích metod.....	27
Obr. 19 Porovnání průměrů vyhodnocovacích metod.....	28
Obr. 20 Závislost CNR na průměru defektu pro INC_5mm – TDTS.....	29
Obr. 21 Závislost CNR na průměru defektu pro INC_3mm – TDTS.....	30
Obr. 22 Závislost CNR na hloubce defektu u INC_5mm - TDTS.....	31
Obr. 23 Závislost CNR na hloubce defektu u INC_5mm - TDTS.....	31
Obr. 24 Porovnání průměrů všech metod u jednotlivých vzorků.....	32
Obr. 25 Porovnání naměřených a pomocí prediktivních funkcí vypočtených hodnot.....	33

## Seznam tabulek

Tab. 1 Legenda hloubek defektů.....	15
Tab. 2 Porovnání vyhodnocovacích metod na 3 intervalech.....	28

## Seznam použitých zkratk

AM	Additive manufacturing - aditivní výroba
BJ	Binder Jetting - nástřik pojiva
CNR	Contrast to noise ratio – odstup kontrastu od šumu
DIN	Deutsches Institut für Normung - Německý ústav pro průmyslovou normalizaci
DLP	Digital Light Processing - digitální zpracování světla
DMLS	Direct Metal Selective Laser Melting - přímé kovové laserové spékání
FDM	Fused deposition modeling - výroba metodou natavování nití
FFT	Fast Fourier transform - Rychlá Fourierova transformace
INC	Inconel
LT	Lock- in termografie
MS1	Maraging steel - maraging ocel
MJ	Material Jetting - nástřik materiálu
NDT	Non-destructive testing - nedestruktivní testování
P-function	Time-power transformation method – metoda mocniné transformace v čase
PT	Pulzní termografie
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Melting - selektivní spékání laserem
SLM	Selective Laser Sintering - selektivní spékání laserem
TDTS	Time derivation of thermographic signal - časová derivace termografického signálu
VT	Vibrotermografie

## 1. Úvod

Aditivní výroba (AM) je relativně nová technologie, kde jsou součásti postupně vytvořeny na základě návrhu počítačového modelu. Ve většině případů se AM používá k výstavbě malých a složitých objektů jako jeden kus. Dnes se již běžně tisknou materiály, jako jsou plasty, keramika a kovy. Kvalita však ne vždy splňuje požadavky. Vysoce namáhané komponenty jsou považovány za bezpečné pouze tehdy, pokud nemají žádné vady nebo pokud existující vady nepřekračují určitý rozměr. Bez optimalizace technologických parametrů procesu se mohou v součástech vyrobených aditivní výrobou objevit defekty. Tyto defekty mají přímý vliv na fyzikální i mechanické vlastnosti materiálu a mohou potencionálně vést k poruše vytvořených dílů. Ke kontrole vad a nepravidelností na součástech před jejich uvedením do provozu se běžně používá nedestruktivní testování (NDT). Mezi vhodné metody NDT patří termografie díky její všestrannosti, nákladům a času potřebnému k testování a analýze.

Cílem této práce je zjistit možnosti využití termografických nedestruktivních testovacích metod na zjištění vad u výrobků vytvořených aditivními technologiemi. Teoretická část práce obsahuje rešerši metod termografického testování a technologií 3D tisku. Úkolem praktické části je pomocí vybrané termografické nedestruktivní metody otestovat aditivní technologií zhotovené testovací vzorky s uměle vytvořenými vadami a zhodnotit použitelnost aplikované termografické metody testování.

## 2. Rozbor současného stavu

### 2.1. 3D tisk

3D tisk, známý také jako aditivní výroba, je proces vytváření součástí vrstvy po vrstvě. Existuje řada technologií 3D tisku, přičemž každá má svoje výhody, omezení a možnost tisknout díly z různých materiálů.

Při dodržení technologických podmínek mohou být vyrobeny díly téměř libovolných tvarů, což je jedna z hlavních výhod 3D tisku. Aditivní výroba dále není závislá na drahém nářadí, čímž má nízké počáteční náklady. Další velkou výhodou je velmi rychlý vývoj a testování prototypů a produkce výrobků s nízkým objemem výroby.

Mezi největší omezení 3D tisku se řadí to, že je obtížné vyrobit součásti s materiálovými vlastnostmi odpovídajícími dílům vytvořených subtraktivními a formativními metodami. Většina technologií 3D tisku vytváří díly, které jsou neodmyslitelně anizotropické nebo částečně duté. Aditivní výroba má také omezení na opakovatelnost, stejné součásti vyrobené touto technologií se budou od sebe mírně lišit z důvodu rozdílného chlazení a deformace při vytvrzování [1].

#### 2.1.1. Technologie vytvrzování tekutého materiálu

##### Stereolitografie

Stereolitografie (SLA) je jedna z prvních a zároveň nejvíce používaných technologií 3D tisku. Základním principem tohoto procesu je vytvrzování kapalné fotopolymerní pryskyřice pomocí UV projektoru nebo laseru a vytvoření celého objektu za použití metody nanášení materiálu vrstvy po vrstvě [2].

Systémy SLA používají nízkoenergetický vysoce zaostřený UV laserový paprsek ke skenování jednotlivých průřezů trojrozměrného objektu v nádrži kapalného polymeru. Laserový paprsek se pohybuje po dráze vytvořené počítačovým modelem, čímž vznikne vrstva vytvrzené pryskyřice. Následně se tisková plošina sníží o vzdálenost rovnající se tloušťce vrstvy (25 až 50  $\mu\text{m}$ ) a další vrstva je vytvořena na dřívě dokončené vrstvě. Po snížení plošiny je povrch vyhlazen hladicí čepelí. Tyto procesy se opakují, dokud součást není dokončena. Po dokončení části je přebytečný polymer z povrchu ořten nebo odplaven a vysušení dílu probíhá přímo nad nádrží s polymerem. Po závěrečném vytvrzení, které se v mnoha případech provádí umístěním součásti do UV trouby, jsou odříznuty podpory a povrch je vyleštěn, broušen, případně dokončen dalšími způsoby [2].

##### Digital Light Processing

Digital Light Processing (DLP) funguje na stejném principu jako SLA, liší se pouze v použitém světelném zdroji. Světlo je promítáno pomocí LED lampy ve spojení se zobrazovacím panelem z tekutých krystalů a ozařuje celou vrstvu fotopolymerní pryskyřice najednou. Světlo je směřované na tiskovou plochu prostřednictvím řady zrcadel, které kontrolují, kam je světlo promítáno, a generují světelný vzor na tiskovou plochu. Typická tiskárna založená na této metodě ozařuje fotopolymer zespodu průhledným oknem, což umožňuje tisk zdola nahoru a v průběhu tisku dochází k vytahování vyrobeného dílu z kádě.

Tato metoda má tu výhodu, že není třeba pořizovat drahé lasery a navíc nevyžaduje velkou nádrž fotopolymerní pryskyřice. Stačí mít mělkou nádrž, do které může být materiál dodán v okamžiku, kdy je použit. Velká nádrž fotopolymerní pryskyřice, jako je používána v SLA, může být velmi nákladná a nepoužitý materiál je snadněji vystaven kontaminaci a degradaci. Tato metoda také nabízí

velmi dobré rozlišení a rychlý provoz, díky tomu, že je celá vrstva vystavena záření najednou [2].

### Material Jetting

Material Jetting (MJ) pracuje na podobném principu jako standardní inkoustová tiskárna, avšak místo tisknutí jedné vrstvy inkoustu se tiskne několik vrstev materiálu na sebe pro získání třírozměrného dílu. Tisková hlava tryská na povrch stovky malých kapek fotopolymery a následně je vytvrzuje pomocí UV světla. Poté, co vrstva ztuhla, se platforma sníží o výšku vrstvy, tento proces se opět opakuje, dokud celá součást není hotová.

Na rozdíl od většiny technologií 3D tisku, které tisknou materiál po jednotlivých bodech, MJ nanáší materiál rychle a najednou v jedné linii. Díky tomu jsou MJ tiskárny schopny tisknout několik součástí najednou, aniž by byla ovlivněna rychlost tisku. Pokud jsou díly správně umístěny a mezery mezi nimi optimalizovány, MJ technologie je schopná produkovat díly rychleji než jakákoliv jiná technologie 3D tisku.

MJ procesy vyžadují podpory, ty jsou stavěny v průběhu tisku z rozpustných materiálů, které jsou odstraněny ve fázi následného zpracování. Je to také jediná z technologií, která umožňuje tisknout z mnoha materiálů a v plné barvě [1].

## **2.1.2. Technologie spékání práškového materiálu**

### Selective Laser Sintering

Selective Laser Sintering (SLS) proces začíná zahřáním nádoby s polymerovým práškem na teplotu těsně pod bod tání polymeru. Hladící válec připraví velmi tenkou vrstvu práškového materiálu na tiskovou platformu a poté je povrch naskenován CO<sub>2</sub> laserem. Laser selektivně spéká prášek a vytvrzuje průřez součástí. Poté, co je celý průřez naskenován, se celá platforma posune níže o výšku jedné vrstvy.

Na čerstvě spečenou vrstvu přijde nový prášek, který je následně laserem opět spékán. Tento proces se opakuje, dokud součást není plně dokončena. Nespečený prášek na součásti zůstává jako podpora při tisku, tímto se eliminuje potřeba dodatečných podpor, což je jedna z hlavních výhod SLS [1].

### Direct Metal Laser Sintering / Selective Laser Melting

Technologie Direct Metal Laser Sintering (DMLS) i Selective Laser Melting (SLM) produkuje díly pomocí podobné metody jako SLS s tím rozdílem, že se tyto technologie využívají pro výrobu kovových dílů. DMLS netaví materiál, ale místo toho jej ohřívá do bodu, kdy se částice sloučí na molekulární úrovni. SLM využívá laser k plnému roztavení kovového prášku, čímž vznikne homogenní součást. Obě zmíněné metody vyžadují strukturální podpěry za účelem limitovat pravděpodobnost jakékoliv deformace i přesto, že okolní materiál poskytuje mechanickou podporu. Součásti vyrobené touto technologií mají velké riziko deformace z důvodu výskytu zbytkového napětí po zpracování při vysokých teplotách. Výrobky jsou proto obvykle žihány na snížení vnitřního napětí [1].

## **2.1.3. Další technologie**

### Fused Deposition Modeling

V technologii Fused Deposition Modeling (FDM) jsou nejčastěji používanými materiály termoplastické polymery (např. PLA, ABS), které se dodávají ve formě tiskové struny. Při tisku se do stroje nejprve vloží cívka s navinutou strunou z termoplastu. Tisková struna se uloží do tiskárny a je přivedena do tiskové hlavy. Když se tryska zahřeje na požadovanou teplotu, mo-

tor vede strunu skrz rozehrátou trysku, kde se materiál roztaví. Tiskárna poté pohybuje tiskovou hlavou po počítačem předem vygenerované dráze a nanáší roztavený materiál na dané pozice, kde se materiál ochladí a opět ztvrdne. V některých případech je chlazení materiálu na platformě urychleno použitím chladicích ventilátorů připevněných k tiskové hlavě. Po dokončení celé vrstvy se platforma posune níže a celý proces se opakuje pro další vrstvy, dokud není celá část dokončena [1,3].

### Binder Jetting

Metoda Binder Jetting (BJ) používá obvykle dva materiály- kovový nebo keramický prášek, ze kterého má být část vyrobena a tekuté pojivo, které spojuje prášek dohromady. Tiskárna pohybuje tiskovou hlavou nad povrchem a vypouští kapky pojiva, které vážou částice prášku dohromady, čímž dojde k vytvoření vrstvy. Po jejím vytvoření se práškové lože posune níže a na povrch se roznese nová vrstva prášku. Celý proces se opakuje, dokud součást není hotová. Vytvořený díl se poté nechá v prášku vytvrdit. Po odebrání součásti z lože se nepoužitý materiál odstraní prostřednictvím stlačeného vzduchu [1].

BJ zahrnuje několik postprocesů, které následují po tisku částí, jako je například vytvrzování, odmašťování, slinování nebo žihání. Tyto postprocesy někdy trvají déle než skutečný tisk (zejména slinování části) a mohou značně navýšit náklady. Jednou z významných výhod BJG je, že díly lze vyrobit bez podpůrných struktur. Protože BJ používá jako adheziva pojiva, nejsou materiálové vlastnosti vždy vhodné pro konstrukční aplikace jako jsou letecké a automobilové díly, protože mohou vést k porozitě [4].

## **2.2. Defekty**

Defekty vedou ke snížení mechanických vlastností, které jsou kritické v některých striktních odvětvích průmyslu jako např. biomedicínský nebo letecký průmysl. Vady vznikají především při samotné výrobě nebo při následném zpracování. Přítomnost defektů limituje opakovatelnost a přesnost procesu a je překážkou k širšímu uplatnění technologií v průmyslové praxi [5].

### **2.2.1. Běžné defekty 3D tisku**

#### Póry

Póry jsou dutiny uvnitř materiálu. Jedná se o jednu z nejčastějších vad u 3D tisku. Tyto dutiny lze nalézt v rámci jedné vrstvy, mezi sousedními vrstvami a také na vnějším povrchu součásti. Nejběžněji se póry nachází uvnitř jednotlivých vrstev a mohou mít různé velikosti, tvary a prostorové rozložení. Pórovitost součásti bývá poměrně nízká, avšak i přesto může být příčinou závažné poruchy. Póry se běžně rozdělují podle tvaru na sférické a nesférické [6].

Vznik sférických pórů je obecně připisován zachycení plynu v materiálu, nicméně, zdroj tohoto plynu je připisován řadě charakteristik souvisejících s procesem. Jednou z možností, jak dojde k zachycení plynu v materiálu je ze samotného kovového prášku při vlastním procesu tisku. Bylo prokázáno, že ohřívání prášku před použitím má pozitivní účinek na pórovitost výtisku. Dalším zdrojem odkud může dojít k zachycení plynu je z okolního prostředí, kterým je buď vzduch, nebo inertní plyn. Inertní plyn, jako je například argon, se používá v případech, kdy je potřeba zamezit oxidaci kovového materiálu.

Nesférické póry vznikají z důvodu nestability taveniny nebo nízké hustoty energie, která má za následek nedostatečné splynutí materiálu. K nepravidelnosti tavné lázně může dojít při nízké síle paprsku, která způsobuje tvorbu kuliček z roztaveného kovu, které mají povrchové napětí vyšší než gravitační síla potřebná k vyplnění mezery nebo při vysokém výkonu paprsku, který vyvolá odpařování kovu v ohnisku a odebrání materiálu z podkladových vrstev.

Další průchody paprsku, které roztaví oblast nad dnem díry vzniklé odpařením kovu, mohou způsobit, že se přetavené vrstvy zhroutnou a uzavřou dutinu, čímž dojde k vytvoření póru.

Kromě výše uvedených parametrů mají na tisk dílů s dostatečnou hustotou vliv také parametry související s vlastnostmi práškového materiálu: vhodná distribuce velikosti částic prášku, rychlost jeho podávání a tloušťka jednotlivých vrstev. Různorodá distribuce částic může být prospěšná při získávání dobře vyplněné vrstvy prášku. Pokud je však distribuce částic nesprávně zvolena a/nebo částice nejsou sférické, je vyplnění vrstvy omezené a může dojít k tvorbě pórů. Stejně tak, pokud není správně synchronizována rychlost podávání prášku s výslednou tloušťkou vrstvy, může dojít ke vzniku pórů.

Bez ohledu na typ pórovitosti se očekává, že její přítomnost bude mít vliv na výkonnost vyrobené součásti. Výskyt pórů negativně ovlivňuje hustotu součásti, lomovou houževnatost, iniciaci únavových trhlin a také standardní mechanické vlastnosti, jako je tvrdost a mez pevnosti v tahu. Konečnou součást lze nechat izostaticky lisovat za tepla, čímž dojde ke snížení pórovitosti a tím i ke zlepšení jejích vlastností [7].

#### Deformace způsobené zbytkovým napětím

Zbytkové napětí je vyrovnávací vnitřní napětí existující ve volném tělese, na které nepůsobí žádné vnější síly. Je to napětí, které by existovalo, kdyby byly z tělesa odstraněny všechny externí zátěže [8].

Zbytkové napětí může být vysoce destruktivní, což má za následek řadu strukturálních problémů, přičemž mezi nejčastější patří praskliny a deformace. K těmto problémům obvykle dochází, když se roztavený kov po tisku ochladí. Chlazení vyvolá kontrakci, která způsobuje, že se okraje součásti deformují. V extrémních případech může napětí překročit pevnost dílu, což vede k prasknutí části. Praskliny se mohou objevit také v případě, že práškový materiál nebyl správně roztaven [9].

Zbytková napětí vznikají v tepelných procesech prostřednictvím nerovnoměrné plastické deformace způsobené teplotní roztažností materiálu. Výsledná deformace v procesech aditivní výroby může být poměrně významná z důvodu velkých teplotních gradientů [10]. Tepelné deformace vznikají z objemových změn způsobených jak teplotními rozdíly, tak fázovými transformacemi, včetně tuhnutí a fázových změn v pevném stavu mezi krystalickými strukturami. Rozdíly teplot v ozařované oblasti způsobují přechodné tepelné napětí v různé hloubce a místech povrchu. Když je zdroj tepla odstraněn, materiál se ochlazuje a smršťuje více než oblast kolem něj a následně vytváří zbytkové napětí [8].

Zmírnění zbytkového napětí a jeho účinků je významné pro zlepšení kvality součástí. Následné tepelné zpracování SLM dílů může snížit zbytkové napětí, ale může vést k dalším procesním krokům a změně stávající mikrostruktury, což nemusí být žádoucí. Následné tepelné zpracování avšak neřeší zkroucení části během sestavování a jakákoli deformace je třeba vyřešit po procesu žíhání. Výhodné je omezovat vznik zbytkového napětí již během tisku. Aktuální přístupy zahrnují změnu strategie skenování nebo zahřívání sestavovací desky. První metoda může do jisté míry upravit zbytkové napětí, ale existují rozporné zprávy o nejlepší strategii skenování. Druhá metoda má nízkou účinnost u vysokých částí kvůli rostoucímu poklesu teploty, když se zvětšuje vzdálenost od povrchu výtisku k vyhřívané desce [10].

Zkroucení je tendence materiálu k nerovnoměrné změně tvaru, jakmile je vystaven teplu nebo vlhkosti. Odříznutí podpurných struktur umožní uvolnění nahromaděného napětí způsobeného tepelnými účinky, a pokud nedojde k náležitému ošetření, tisk se může náhle zdeformovat. Toto znemožní tisk rozměrově přesné kovové části [11].

K tvorbě prasklin dochází, když napětí překročí schopnost materiálu deformovat se. V sypkém materiálu, kde není aplikováno žádné vnější zatížení, může být tepelně indukované napětí lokálně mnohem vyšší než průměrné globální napětí, a proto se malé praskliny mohou vyskytovat samostatně, aniž by způsobily lom. Když je přítomna kapalná fáze, materiál má nulovou tažnost kolem kapalně vrstvy, což zvyšuje riziko tvorby trhlin. Precipitačně vytvrzené materiály, často klasifikované jako nesvařitelné, mohou během tepelného zpracování prasknout, protože při dosažení určitého objemového procenta precipitátů dochází ke značnému poklesu tažnosti a ke zvýšení tvrdosti [12].

Může také dojít k delaminaci, tj. k prasklinám mezi vrstvami. Delaminace nastává v důsledku nedostatečně roztaveného prášku a nebo po opětovném přetavení vrstvy pod aktuálně tavenou vrstvou. Některé typy trhlin mohou být opraveny následným zpracováním, ale delaminace není jednou z nich. Snížení pravděpodobnosti vzniku delaminací lze dosáhnout předeřevem prášku [13].

Existují dva hlavní způsoby, jak zabránit praskání a zkroucení kovové části. Jednou z možností je předeřívání tiskového lože, zatímco další je zlepšení přilnavosti části k tiskovému loži a umístění potřebného množství podpurných struktur. Dodatečné tepelné zpracování může také pomoci při opravě drobných trhlin, zatímco stanovení správného počtu podpurných struktur je zásadní pro zabránění deformací [9].

#### Kuličkový jev (kuličkování)

SLM představuje aditivní metodu využívající kovového prášku k tisku vrstvy po vrstvě. U prášku může docházet oxidaci, která vytváří významnou překážku spojení mezi vrstvami a způsobuje různé vady, například kuličkování. Kuličkování je pozorováno v případě, že vrstva kovového prášku roztavená laserem nesmočí materiál pod ní kvůli vrstvě kontaminované oxidy na materiálu a povrchu taveniny [14]. Výsledkem je drsný a kuličkový povrch, který způsobuje nepravidelné nanášení vrstev, což má nepříznivé účinky na hustotu a kvalitu dílu [15].

Kuličkování lze klasifikovat jako rozdělení nebo vypuzování tavné lázně. K rozdělení dochází, když se prostřednictvím účinků povrchového napětí vytvoří aglomeráty. Hlavní příčinou tohoto jevu je neúplné roztavení a fúze částic, ke které dochází, když jsou parametry procesu nesprávné, tj. hustota energie je příliš nízká. Nesprávné parametry procesu mohou také způsobit, že se roztavený materiál vyloučí z nestabilní tavné lázně. Toto obvykle nastává, když je rychlost spékání příliš vysoká. Stabilita tavné lázně může být vizualizována v reálném čase implementací infračervených kamer [7].

Částice prášku v konkrétních oblastech jsou místně spékány v závislosti množství energie na jednotku plochy, která je ozařována laserem. V případě, že laser speče prášek pouze částečně, vzniknou mezery mezi částicemi kvůli kuličkovému jevu a dojde k ovlivnění pevnosti samotného kovu. Proto výše uvedený jev zhoršuje do značné míry materiálové vlastnosti a geometrii součásti [14]. Pokud se tavná lázeň rozdělí na menší části, mohou ztuhnout na okraji tavné lázně a zvýšit drsnost povrchu na stranách součásti [7]. Mezi nespojitými kovovými kuličkami může být vytvořeno velké množství pórů a v případě velmi závažného kuličkování, mohou koule vyčnívající z práškové vrstvy narušovat pohyb systému nanášení prášku, což patří mezi další negativní projevy kuličkování [15].

### **2.2.2. Metody zjišťování defektů**

#### Vizuální metody

Vizuální testování pro nedestruktivní hodnocení zahrnuje širokou škálu metodik, které systematizují pozorování kontrolorů, aby bylo možné zajistit kvantitativní a důkladné posouzení



v co nejkratším čase a s minimálním vybavením. Typicky mohou lidé dotekem a zrakem identifikovat vlastnosti řádově 1  $\mu\text{m}$ . Pro zlepšení detekovatelnosti jsou užitečné jednoduché manipulace s objekty nebo okolím, jako je například posvícení na povrch, aby došlo k jeho odrazu. Přestože zkušený kontrolor dokáže rozlišit mnoho drobných povrchových poškození, jako jsou trhliny, škrábance nebo póry, použití softwaru pro následné zpracování může usnadnit vyhodnocení dat z více zdrojů nebo časově závislých dat. Nástroje pro vizuální kontrolu zahrnují nástroje pro měření rozměrů (posuvná měřítka, svarové měrky, kontrolní měrky atd.), osvětlení (svítilny, měřiče světla, směrová zrcátka atd.), zvětšení (zvětšovací sklo, zvětšovací zrcadla, optické mikroskopy atd.) a kamery. Techniky, které používají světelné zdroje mimo viditelné spektrum, jsou také považovány za součást vizuálního testování.

V současné době se vizuální testování aktivně používá ve všech fázích výroby a po celou dobu životnosti dílů. Pro každou aplikaci jsou vyvinuty specifické metodiky, protože potenciální vady a možné důsledky se mění s materiálem a použitím součástí. Detekce defektů je limitována kontrastem mezi defekty a okolním materiálem. Toto omezení je kvantifikováno poměrem signálu a šumu v obrazu. Například malé praskliny na kovovém povrchu lze snadněji pozorovat na hladkém, leštěném vzorku než na vzorku s viditelnými hranicemi zrn nebo vysokou drsností povrchu. Nevýhodou vizuálního testování je schopnost kontrolovat pouze přístupné povrchy, avšak v případě aditivní výroby ji lze použít v kterékoli fázi výroby, čímž lze překonat i omezení při identifikaci vnitřních charakteristik. Primární výhodou této metody je její rychlost a snadná proveditelnost [7].

#### Akustické metody

Testování pomocí akustických metod je založeno na zvukových vlnách, které vstupují do vzorku. Vlny jsou buď odrazeny a detekovány stejným transduktorem nebo zachyceny jiným detektorem. Jakákoli odchylka v homogenitě materiálu, např. trhlina nebo pór, ovlivní frekvenci a rychlost vlny, případně může způsobit útlum. Změna ve struktuře materiálu také mění šíření ultrazvukových vln.

Začátek používání ultrazvukových metod sahá do počátku 20. století, kdy došlo k vývoji sonaru pro vojenské námořní účely. Ultrazvuková lékařská diagnostická zařízení představovala další velký posun v rozvoji této technologie pro testování materiálů. Díky celé řadě konfigurací a možností testování je ultrazvukové testování jednou z nejčastěji používaných technik pro automatickou kontrolu kvality a detekci vad. Akustická emise se vztahuje na techniky, které detekují zvukové vlny generované v kontrolované části. Různé charakteristiky jsou identifikovány na základě typu zvukové vlny a jejím směru. Podélné vlny mají amplitudu kmitů rovnoběžnou se směrem šíření vlny, zatímco příčné nebo smykové vlny mají amplitudu kolmou ke směru šíření vlny. Objemové vlny mohou být buď podélné, nebo příčné, ale povrchové vlny jsou omezeny na kombinaci obou směrů v eliptickém pohybu.

Existuje celá řada kontaktních a bezkontaktních metod doprovázených řadou snímacích transduktorů. V závislosti na specifické technice může detekce vad vyžadovat přístup k povrchu, např. v případě kontaktního ultrazvukového testování. Přítomnost komplexní vnitřní struktury, různých materiálů nebo složitého tvaru může omezit použitelnost akustických metod. Aby bylo možné kvantitativně posoudit přítomnost vad, jsou pro kalibraci systému požadovány referenční standardy. I přes tato omezení nabízejí akustické metody širokou škálu detekovatelnosti, která se neomezuje pouze na povrch, ale je schopna poskytnout informace o umístění i tvaru defektu [7].

#### Tepelné metody

Teplota je přirozený jev, který se měří v aditivních výrobních procesech, přičemž tepelný tok má přímý dopad na vlastnosti výtisku. Oblasti zájmu pro sledování teploty jsou budovací ko-

mora, substrát, práškové lože, tisknutá část a tavná lázeň. Tepelné snímací technologie typicky zahrnují termočlánky, infračervené kamery a pyrometry. Protože charakteristiky tuhnutí jakéhokoli výrobního procesu aditiv mají mimořádný vliv na kvalitu výtisku, je tepelné profilování nezbytným monitorovacím nástrojem. Pozorování mohou vést k identifikaci a charakterizaci defektů, vývoji taveniny a dalších faktorů prostředí systému.

Nejstarší verze teploměrů se datují do počátku 16. století. Ty se spoléhaly na chování hustoty a teploty kapaliny a byly předchůdci rtuťového teploměru. V 19. století došlo k objevu infračervené energie a vytvoření prvního termočlánku. Dva kovy spojené v jednom místě mají na protilehlých koncích teplotně závislý rozdíl napětí. Tato tepelná odezva byla rychle aplikována na vynález termočlánku, který se stal jedním z nejušestrannějších a nejpoužívanějších dostupných nástrojů pro měření tepla. Nejvýznamnějšími pokroky v měření teploty v předešlých letech jsou nekontaktní pyrometry a IR kamery, které se staly běžným nedestruktivním testovacím nástrojem.

Infračervené testování je standardizovaná metoda pro průmyslovou detekci vad (ISO 10880). Pro detekci vad používá analýzu termických obrazů, běžně nazývanou termografie. Vady, které jsou detekovány termografií, jsou rozptyly, mezery, inkluze, ztráty materiálu a další geometrické chyby. Jde o preferovanou metodu, protože se jedná o bezkontaktní metodu s vysokou úrovní a spolehlivostí v rámci svých možností detekce. Nevýhodou je větší limitace využití než u některých jiných běžně používaných testovacích metody. Vylepšení termovizních kamer výrazně ovlivnila minimální velikost detekovatelných vad a schopnost identifikovat další vlastnosti hloubkových defektů [7].

### 2.3. Termografie

Infračervená termografie, běžně nazývaná jen termografie, je věda zaměřená na získávání a zpracování tepelných informací z bezkontaktních měřicích zařízení. Je založena na infračerveném záření, což je forma elektromagnetického záření s delšími vlnovými délkami než u viditelného světla. Jakýkoli objekt při teplotě nad absolutní nulou (tj.  $T > 0\text{K}$ ) emituje infračervené záření. Lidské oko tento typ záření nevidí. K získání a zpracování těchto informací jsou tedy zapotřebí infračervená měřicí zařízení. Infračervená měřicí zařízení získávají infračervené záření vyzařované objektem a transformují jej na elektronický signál. Nejzákladnějším infračerveným zařízením je pyrometr, který produkuje jediný výstup pomocí jednoho senzoru. Nejpokročilejší zařízení obsahují řadu senzorů pro vytvoření podrobného infračerveného snímku scény. Rozdíl mezi viditelným a infračerveným snímkem spočívá v tom, že viditelný snímek představuje reprezentaci odraženého světla na scéně, zatímco v infračerveném snímku je scéna zdrojem a může být pozorována infračervenou kamerou bez světla. Snímky pořízené pomocí infračervených kamer jsou převedeny na viditelné obrazy přiřazením barvy ke každé úrovni infračervené energie. Výsledkem je obraz zvaný termogram, kde jednotlivé barvy reprezentují různé teploty [16].

Všechny termografické techniky lze rozdělit do dvou hlavních skupin: na pasivní a aktivní termografii. Pasivní termografie měří tepelné změny v materiálu bez externích tepelných zdrojů. V pasivní termografii mají měřené součásti přirozeně vyšší nebo nižší teplotu než okolí. Díky této technice je možné sledovat stav struktur částí, aniž by se zastavila jejich činnost. Periodická zatížení, která se vyskytují v procesu pohybu dílů, způsobují jejich ohřívání a vadné oblasti lze charakterizovat specifickou dynamikou tepelných toků. Na druhé straně aktivní termografie vyžaduje, aby do testované struktury byla dodána vnější energie. Detekce vad je založena na vyhodnocení tepelného toku uvnitř objektu. Anomálie ve vzorci tepelného toku mohou naznačovat skryté defekty v testovaných strukturách [17]. U aktivní termografie infračervená kamera zaznamenává prostorové a časové rozložení povrchové teploty po zahřátí

komponenty. Toto zahrnutí je způsobeno pomocí externího nebo interního zdroje, což umožňuje měření hloubky, tloušťky a velikosti vnitřních vad [18]. Různé metody excitace jsou popsány níže.

### 2.3.1. Metody excitace zkoumaného vzorku

#### Optická excitace

Při optické excitaci zkoumaného vzorku dochází k jeho externí stimulaci pomocí zdroje optického záření. Energie se od zdroje dostává na povrch vzorku, kde se světelné záření přeměňuje na teplo a dochází tak k ohřevu vzorku. Tepelné vlny se šíří vedením z povrchu vzorku do jeho objemu do doby, dokud nedosáhnou vnitřní diskontinuity, která buď zpomalí, nebo zrychlí jejich šíření (v závislosti na vlastnostech vzorku i samotného defektu). Zdroje pro optickou excitaci mohou mít různé vlastnosti a také různé účinky. Pro impulsní tepelnou stimulaci se využívá zařízení, které je schopno vyprodukovat fotografické záblesky. Ohřev prostřednictvím infračervených lamp se využívá za účelem pulzního ohřevu zkoumaného vzorku a halogenových lamp se často využívá pro periodické ohřívání [19].

#### Mechanická excitace

V případě mechanického buzení se energie do vzorku předává pomocí mechanických kmitů, například prostřednictvím sonického nebo ultrazvukového převodníku, který je v přímém kontaktu se vzorkem. V tomto případě dochází k interní stimulaci defektů; mechanické oscilace přenášené do vzorku se v něm šíří ve všech směrech. Mechanická energie se rozptýlí na nespojitostech ve formě tepelných vln, které jsou na povrch vedeny klasickým účinkem vedení tepla [19].

#### Indukční excitace

Indukční excitace lze použít na elektricky vodivé materiály, které vytvářejí vířivé proudy ve specifické hloubce (tu lze do značné míry určit frekvencí buzení). Vířivé proudy následně ohřívají vzorek a s ním i jeho případné vady. Defekty na povrchu i pod ním způsobují změny vířivých proudů a mění tak výsledné rozložení povrchové teploty [19].

### 2.3.2. Techniky aktivní termografie

#### Pulzní termografie

V pulzní termografii (PT) je povrch vzorku podroben tepelnému pulzu s použitím zdroje vysokého výkonu, jako je záblesková lampa nebo pulzní laser. Měřený objekt se excituje velmi krátkou dobu, délka tepelného impulsu je asi 1 ms. Tepelný puls může být kombinací několika periodických vln při různých frekvencích a amplitudách. Poté, co tepelná vlna přijde do kontaktu s povrchem vzorku, putuje z povrchu dovnitř vzorku. Po určitém čase se povrchová teplota u vzorku bez vnitřních vad rovnoměrně sníží. Podpovrchové diskontinuity (např. porozita, delaminace, poškození vláken, inkluze atd.) mohou naopak fungovat jako překážka tepelnému toku a způsobit tak abnormální teplotní vzorce na povrchu, které lze detekovat pomocí IR kamery [20, 21].

Hlavními výhodami této techniky jsou krátké inspekční časy a schopnost určit hloubku defektů. Nevýhodou je detekovatelnost závislá na geometrické orientaci defektů a omezené oblasti kontroly v důsledku použití zdroje excitace. Mezi její aplikace patří kontrola tenkostěnných součástí nebo povrchových vrstev [21, 22].

Pulzní termografie je rychlá (od několika sekund u materiálů s vysokou vodivostí po několik minut pro materiály s nízkou vodivostí) a snadno se aplikuje. K dispozici je řada technik zpracování, i když mnoho z nich je ve srovnání se lock-in termografií složitá. Termografické

techniky jsou ovlivněny nestejným zahříváním, změnami emisivity, odrazy prostředí a geometrií povrchu. Tyto problémy jsou však dramaticky sníženy pomocí pokročilých algoritmů zpracování. Například Pulsed Phase algoritmus umožňuje získávání amplitudy a fáze jako u LT s touto výhodou, že lze extrahovat několik datových bodů (amplituda nebo fáze) z jediného experimentu, poněvadž je tepelný puls vidět jako soubor několika periodických tepelných vln vypuštěných najednou [20].

### Lock-in termografie

Lock-in termografie (LT), známá také jako modulovaná termografie, je technika odvozená od fototermální radiometrie, při které je malý povrchový bod periodicky osvětlen intenzitou modulovaným laserovým paprskem pro vypouštění termálních vln do vzorku. Je použitelná pro velké plochy a tepelné zatížení kontrolovaného vzorku je nízké. Nevýhodou je delší doba měření a detekovatelnost závislá na geometrické orientaci defektů. Tato metoda je vhodná pro části s nízkou difuzivitou. Tepelná odezva se zaznamenává pomocí infračerveného detektoru a rozkládá se lock-in zesilovačem, aby se extrahovala amplituda a fáze modulace. Fototermální radiometrie byla rastrová technika bod po bodu, která vyžadovala dlouhé časy pro zaznamenání signálu (zejména v případě hlubokých defektů zahrnujících velmi nízké modulační frekvence) [20,21].

Proces pro NDT je možné výrazně zjednodušit a urychlit nahrazením: laserového paprsku jedním nebo několika modulovanými zdroji tepla, např. halogenové žárovky, které pokrývají celý povrch vzorku místo pouhého bodu; infračervený detektor s infračervenou kamerou schopný monitorovat celou nebo velkou část povrchu; lock-in hardware se softwarem, který je schopen matematicky získat amplitudu a fázi odezvy.

V LT se obvykle používají sinusové vlny, i když jsou možné i jiné periodické vlnové průběhy. Použití sinusoidů jako vstupu má tu výhodu, že je zachována frekvence a tvar odpovědi, může se měnit pouze amplituda a fázové zpoždění vlny. Periodická vlna se šíří zářením vzduchem, dokud se nedotkne povrchu vzorku, kde se začne produkovat teplo a šířit se skrz materiál. Vnitřní defekty fungují jako bariéra pro šíření tepla, která způsobuje změny v amplitudě a fázi signálu odezvy na povrchu [20].

Vzhledem k tomu, že LT vyžaduje provedení experimentu pro každou kontrolovanou hloubku a existuje doba stabilizace před dosažením trvalého režimu, je kontrola termografií typu lock-in obecně pomalejší než u jiných přístupů, jako je pulzní termografie. U kompletního LT testu je prováděna inspekce vzorku na několika frekvencích, pokrývající široký rozsah frekvencí, od nízkých po vysoké, a následně je použita fitovací funkce pro dokončení profilů amplitudy nebo fáze pro každý bod (tj. každý pixel). Přesto však existuje přímý vztah mezi hloubkou a inspekční frekvencí, který umožňuje provádět odhady hloubky z amplitudy nebo fáze bez dalšího zpracování. Kromě toho je energie potřebná k provedení LT experimentu obecně menší než v jiných aktivních technikách, což může být praktické, pokud má být použit nízkenergetický zdroj nebo pokud je třeba kontrolované části věnovat zvláštní péči. Mezi typické aplikace patří stanovení tloušťky povlaků, detekce delaminací, stanovení lokální orientace vláken nebo detekce koroze [20].

### Long pulse termografie

Buzení je v zásadě podobné pulzní termografii, doba excitace je však delší. Objekt je stimulován tepelným pulsem a jeho časově-tepelná odezva je analyzována. Technika může být použita pro velké plochy a časy měření jsou kratší než pro Lock-In termografii. Také lze použít cenově dostupný zdroj tepla (například halogenové žárovky) a odhadnout hloubku defektů. Nevýhodou je detekovatelnost závislá na geometrické orientaci vad. Tato metoda je vhodnější pro části s nízkou difuzivitou [21].

### Vibro-termografie

Vibrotermografie (VT), také známá jako ultrazvuková termografie nebo termosonika, využívá mechanické vlny k přímé stimulaci vnitřních defektů a bez zahřívání povrchu jako v optických metodách (např. LT a PT). Zatěžování objektu ultrazvukem způsobí výskyt lokálních zdrojů tepla v místech defektů, který je detekovatelný měřením průběhu doby tepelné odezvy objektu. Je to metoda tmavého pole, tudíž se zobrazují pouze vady. Výhodami jsou možnost použití do velké hloubky a detekovatelnost nezávislá na geometrické orientaci. Nevýhodou je vysoké zatížení objektu v místě, kde je aplikován ultrazvuk. Metoda je vhodná pro detekci trhlin [20,21].

Pokud bychom za nástupce optické lock-in termografie s považovali fototermální radiometrii, lze vibrotermografii považovat za nástupce optoakustiky nebo fotoakustiky, ve kterých jsou mikrofony nebo piezokeramika v kontaktu se vzorkem a lock-in zesilovačem a jsou použity k detekci stopy tepelné vlny z vady.

Při klasickém ultrazvukovém C-skenování NDT je převodník uveden do kontaktu se vzorkem pomocí spojovacího média. Ultrazvukové vlny procházejí vzorkem a jsou odraženy zpět na povrch, kde snímač snímá odražený signál, nebo jsou shromažďovány na opačné straně. V každém případě je princip detekce vad založen na rozdílech ve specifických akustických impedancích mezi materiály. Ve VT ultrazvukové vlny volně prochází homogenním materiálem, zatímco vnitřní defekt produkuje komplexní kombinaci absorpce, rozptylu, šíření paprsku a rozptylu vln, jejichž hlavní projev je ve formě tepla. Teplo se následně bude pohybovat díky vodivosti ve všech směrech. Infračervená kamera může být nasměrována na jeden z povrchů vzorku pro zachycení znaků vad. Ultrazvukové vlny jsou ideální pro NDT, protože nejsou slyšitelné pro člověka (ačkoli jsou přítomny harmonické nízkofrekvenční kmitočty), detekce defektů je nezávislá na jejich orientaci uvnitř vzorku a lze detekovat vnitřní i povrchové vady. VT je proto velmi užitečná pro detekci trhlin a delaminací.

Zvukové vlny, slyšitelné pro člověka, vibrují mezi 20 Hz a 20 kHz. Rozsah aktivních infračervených termografických NDT technik pro ultrazvukové vlny, které nejsou pro člověka slyšitelné, je mezi 20 kHz a 1 MHz, i když většina transduktorů pracuje mezi 15 a 50 kHz. Na rozdíl od elektromagnetických vln se mechanické elastické vlny, jako jsou zvukové a ultrazvukové vlny, nešíří ve vakuu; naopak, vyžadují médium ke svému pohybu. Pohybují se rychleji v pevných látkách a kapalinách než ve vzduchu. Ačkoli je v mnoha oblastech v současné době intenzivně zkoumáno bezkontaktní ultrazvukové vyšetření, běžným přístupem ve VT je použití vazebních médií, jako je například kus látky, gely na vodní bázi nebo hliník, mezi transduktorem a vzorkem pro snížení ztrát [20].

V dávkové nebo lock-in konfiguraci je VT extrémně rychlá, ačkoli je nutné přemístit transduktor (a znovu znehybnit vzorek), aby zakryl velkou plochu pro kontrolu. Proto je VT vhodnější pro relativně malé objekty. Je nejvhodnější technikou na inspekci některých typů defektů, např. mikrotrhlin. Naopak v některých případech, kdy lze přímo použít optické techniky, nefunguje příliš dobře, např. detekce vody. Nejvíce nepraktickým aspektem VT je však pravděpodobně potřeba vazebního média mezi vzorkem a transduktorem a potřeba držet vzorek. Na druhé straně dochází pouze k minimálnímu zahřívání kontrolovaného vzorku, protože energie je obvykle rozptylována v oblastech s defekty, ačkoli ve vazbách a v upínání se objeví také určité lokální zahřívání [20].

### 3. Popis experimentu

#### 3.1. 3D tisk

Tisk testovacích vzorků proběhl na průmyslové 3D tiskárně kovů EOS M 290 (obr. 1) od výrobce EOS v Regionálním technickém institutu Západočeské univerzity v Plzni. Stroj je schopen rychle vyrobit plně funkční kovové díly, jakkoliv tvarově složité a zároveň nabízí širokou škálu vlastností vyráběných dílů, včetně plně homogenní struktury, která může dosáhnout vyšší pevnosti než konvenční technologie. Pracovní prostor zařízení, umožňující výrobu malých až středně velkých dílů, činní 250 x 250 x 325 mm. Dostatečné roztavení materiálu ve formě prášku zajišťuje vláknový laser o výkonu až 400 W. Pracovní komoru zařízení lze vyplnit dusíkem nebo argonem, což umožňuje zpracovávat široké spektrum materiálů [23]. Tiskárna pracuje na principu DMLS, který je popsán výše v kapitole 2.1.2.

Pro tisk vzorků se v softwaru pro tisk nastavily následující parametry. Skenovací rychlost laserového paprsku 960 mm/s, výkon laseru 285 W, šířka pruhu 10 mm, přesah pruhů 0,08 mm.



Obr. 1 Tiskárna EOS M 290 [30]

#### 3.2. Testované vzorky

Pro experiment byly navrženy a vytisknuty celkem čtyři vzorky ze dvou materiálů a s dvěma typy defektů. První z defektů simuluje jednotlivé póry o průměru 1 – 3 mm s krokem 0,2 mm. Vady se nachází na vzorcích v hloubkách 0,2 – 1 mm s krokem 0,2 mm. Schéma označení a umístění jednotlivých vad se nachází na obr. 2. Rozměry vzorku pro první typ defektu byly navrženy na 88 x 48 x 5 mm, avšak při kontrole vytisknutého vzorku se naměřilo 88 x 50 x 5 mm. Rozdíl mezi navrženým a skutečným rozměrem byl způsoben při odříznutí od tiskové platformy. Na vzorku bylo ponecháno více materiálu, což pro účely tohoto experimentu nemělo vliv.

Defekty byly u všech vzorků označeny kombinací písmena a čísla, kde písmeno reprezentuje hloubku defektu a číslo udává jeho průměr v milimetrech. Přehled písmen s odpovídajícími hloubkami se nachází v tab. 1.

Tab. 1 Legenda hloubek defektů

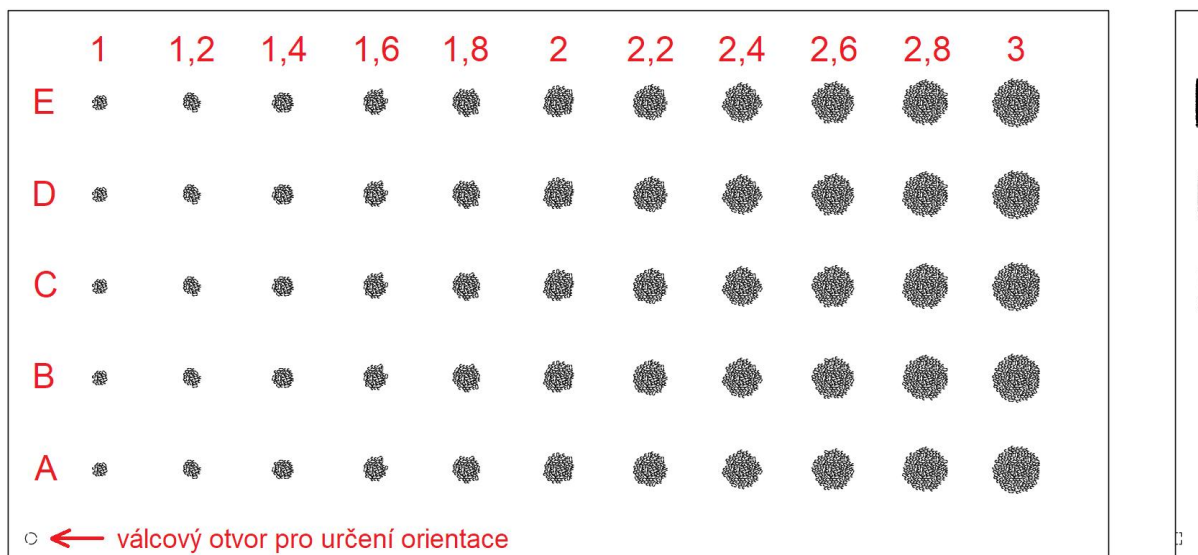
Označení defektu	A	B	C	D	E
Hloubka defektu [mm]	0,2	0,4	0,6	0,8	1



Obr. 2 Schéma umístění defektů typu jednotlivé kulové póry

U vzorků byl vytvořen také válcový otvor pro snazší určení orientace vzorku po vytisknutí. Otvor se nachází u nejmenšího z defektů v nejmenší hloubce, avšak z druhé strany vzorku, aby nezasahoval do měření. Z důvodu principu tisku DMLS metodou zůstal tisknutý materiál ve formě prášku uvnitř uměle vytvořených defektů.

Druhý typ defektu simuluje shluk malých pórů se součtem průřezů ploch pórů odpovídajícím průřezu kruhu o průměru 1 – 3 mm s krokem 0,2 mm. Pórovitost v oblasti defektu činila přibližně 50 %. Schéma umístění těchto defektů na vzorku lze najít na obr. 3 a detail shluku pórů v řezu na obr. 4. Vady se opět nachází na vzorcích v hloubkách 0,2 – 1 mm po kroku 0,2 mm. Rozměry tohoto vzorku byly navrženy na 96 x 48 x 3 mm, avšak při přeměření vytisknutého vzorku se rozměry opět lišily a činily 96 x 50 x 3 mm.



Obr. 3 Schéma umístění defektů typu shluk pórů



Obr. 4 Detail shluku pórů

Vzorky s oběma typy defektů byly vytištěny ze dvou materiálů. Jedním z materiálů je maraging ocel MS1 odpovídající konvenčně vyráběné oceli s označením W.Nr 1.2709 (DIN X3NiCoMoTi 18-9-5). Tento druh oceli se vyznačuje velmi dobrými mechanickými vlastnostmi a je snadno kalitelný za účelem dosažení vysoké tvrdosti a pevnosti. Její tepelná vodivost činí 15 W/mK [24].

Druhým materiálem je slitina niklu Inconel 718 jež odpovídá konvenčně vyráběné slitině W.Nr 2.4668 (DIN NiCr19Fe19NbMo3). Tento druh precipitačně vytvrzené nikl-chrom slitiny se vyznačuje dobrou pevností v tahu a odolností vůči tečení, únavě a prasknutí materiálu při teplotách do 700 °C. Tento materiál je ideální pro mnoho vysokoteplotních aplikací, jako jsou součásti plynových turbín, části přístrojů, části energetického a procesního průmyslu atd. Má také vynikající potenciál pro kryogenní aplikace. Tepelná vodivost Inconelu je 11,4 W/mK [25].

Po vytištění následovalo tepelné zpracování vzorků, konkrétně žihání na odstranění vnitřního pnutí. U materiálu MS1 byly vzorky ohřáty na teplotu 820 °C s výdrží po dobu jedné hodiny, poté se nechaly ochladit v peci. Vzorky z Inconelu se ohřály na teplotu 980 °C s výdrží také jednu hodinu a poté byly ochlazeny na vzduchu.



Obr. 5 Vytisknuté vzorky

Pro všechny vzorky, jež lze vidět na obr. 5, byly vytvořeny zkratky: MS1\_3mm, MS1\_5mm, INC\_3mm, INC\_5mm. První část zkratky určuje na materiál a druhá část tloušťku vzorku, která zároveň reprezentuje i typ uměle vytvořených defektů, které obsahuje. Konkrétně 3 mm odkazuje na defekt typu shluku pórů a 5 mm na jednotlivé póry. Těmito zkratkami jsou vzorky označeny ve zbytku práce.



### 3.3. Popis měření

#### 3.3.1. Hardwarové vybavení

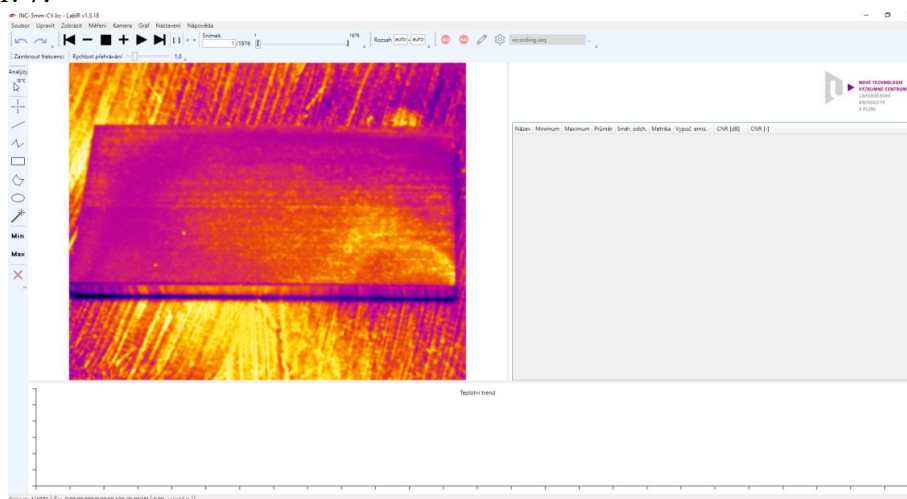
Použitý experimentální systém pro pulzní termografii se skládá z generátoru pulzů, zábleskové lampy, infračervené kamery a také počítače pro zaznamenávání dat a řízení experimentu. Jako zdroj excitace byla použita záblesková lampa Hensel EH Pro 6000 s délkou pulzu okolo 6 ms a maximálním excitačním výkonem 6000 J. Napájení lampy zajišťoval generátor pulzů Hensel TRIA 6000 S, který je schopný dodat v krátkém čase velké množství energie a to až 6000 J. K záznamu změn teploty a termodynamického chování byla použita infračervená kamera Flir SC7650 s citlivostí okolo 20 mK a maximálním rozlišením  $640 \times 512$  pixelů. Kamera obsahuje InSb detektor, který využívá moderní Stirlingovo chlazení. Použité vybavení si lze prohlédnout na obr. 6.



Obr. 6 Použitá zařízení- zleva Hensel EH Pro 6000, Hensel TRIA 6000 S, Flir SC7650 [26,27,28]

#### 3.3.2. Použitý software

K měření a vyhodnocení byl použit program LabIR vyvinutý výzkumným centrem Nové Technologie Západočeské univerzity v Plzni. LabIR je software pro získávání a vyhodnocování termografických snímků a sekvencí. Lze jej využít jak pro offline, tak i pro online vyhodnocení, které probíhá v reálném čase během záznamu kamery. Mezi online využití patří například kontrola svarů při laserovém svařování plastů, kde je snímána teplota svaru a při poruše svaru je díl vyhodnocen jako defektní. U offline vyhodnocení se vyhodnocuje již dokončený záznam. Software je přehledný a lze v něm snadno najít nástroje pro tvorbu analýz, oblast pro zobrazení termografických snímků či menu s různými funkcemi. Jeho náhled lze vidět na obr. 7.



Obr. 7 Ukázka softwaru LabIR

LabIR umožňuje připojení termovizních kamer od různých výrobců a po zapojení kamery s ním lze vytvořit snímek, nahrát sekvenci nebo zahájit online kontrolu. Po vytvoření termografických snímků nebo sekvencí je lze do programu nahrát a následně do nich zakreslit vyhodnocovací analýzy či změnit parametry záznamu, např. emisivitu. Na sekvence je možné aplikovat vyhodnocovací metody a pomocí nich zjistit, zda měřená součást obsahuje defekty. V programu se nachází metody jak pro lock-in termografii, tak i pro pulzní termografii. Pro vyhodnocení testovaných vzorů bylo použito následujících metod: Časová derivace termografického signálu (TDTS), P-function, Rychlá Fourierova transformace (FFT).

### TDTS

Princip TDTS spočívá v tom, že vstupní data (termografický signál) jsou aproximována funkcí, jejíž analytickou derivaci lze spočítat. Výsledkem této techniky jsou derivace, které umožňují zvýraznění časových změn v termografické sekvenci a zlepšují tak CNR (Contrast to Noise Ratio) pro indikaci defektu. TDTS je vhodná pro pulzní termografii, avšak není použitelná pro lock-in termografii.

Pro provedení TDTS lze zvolit několik výstupů: signál, 1. derivace, 2. derivace, 3. derivace. Možnost signál zobrazí aproximaci termografické sekvence a při zvolení derivace se zobrazí derivace zvoleného řádu aproximované termografické sekvence.

### P-function

Tato technika používá speciální transformaci, která vytvoří jeden defektogram. Nejprve musí být provedena aproximace vstupních dat. Pro aproximaci jsou k dispozici v programu LabIR opět dvě funkce - polynom a inverzní polynom. P-function byla vytvořena pro vyhodnocení pulzní termografie, a proto ji lze používat pouze s pulzní termografií.

Dalším parametrem P-function je transformační parametr, který ovlivňuje viditelnou hloubku. Parametr je číslo mezi 0 a 1. Software může vypočítat výsledek P-function pro více než jeden p-parametr najednou. Doporučený postup je v softwaru přednastaven. Ve vzácných případech je hodnota 0,01 příliš vysoká, než by měla být snížena.

### FFT

Touto technikou se vstupní data (termografický signál) transformují z časové domény na frekvenční doménu. FFT umožňuje zobrazení amplitudového signálu a fázové odezvy. Výhodná je zejména fázová reprezentace signálu, protože je téměř neovlivněna nerovnoměrným zahrátím testovaného vzorku, nicméně reprezentace amplitudy může být také prospěšná.

FFT je univerzální technika, a proto ji lze použít pro všechny typy dat. V případě použití pro pulzní termografii je vhodné data aproximovat funkcí, což odstraňuje šum a může poskytnout lepší detekovatelnost defektů a CNR. Pro jiné účely, než je použití pro pulzní termografii není aproximace u této techniky vhodná.

Před aplikací jedné z vyhodnocovacích metod na sekvenci je nutné zvolit interval snímků, na kterém se provede aproximace teplot. Začátek by měl být nastaven na jeden snímek poté, co je na termografické sekvenci viditelný puls. Koncovým snímkem může být libovolný snímek po ustálení teploty v pozorované součásti. Pokud interval není náležitě nastaven, aproximace může selhat a výsledky mohou být neplatné. Po výběru intervalu musí být vybrána funkce aproximace a její stupeň. Lze vybrat dva typy funkcí- polynom a inverzní polynom. Stupeň polynomu určuje, jak přesná je aproximace. Vyšší stupeň znamená lepší (přesnější) přiblížení, ale je časově náročnější. Při kontrole aproximace by se neměla její křivka výrazně lišit od skutečné teplotní odezvy. Všechny výše zmíněné metody mají stejnou přípravu na jejich aplikaci a nastavení aproximace, liší se v použitém algoritmu.

### 3.3.3. Kvantifikace vyhodnocení

Výstupem funkcí pro infračervené nedestruktivní testování je termografický snímek nebo sekvence, které byly zpracovány, aby se zvýšil kontrast a zvýraznily možné indikace defektů. Někdy je užitečné výsledky kvantifikovat s cílem vyhodnotit intenzitu indikace nebo detekovatelnosti defektů, což může být při použití údajů z defektogramu komplikované. Jednou z možných metod navržených pro kvantifikaci výsledků kontroly defektů je Contrast to Noise Ratio (CNR). Jde o kvantifikaci vizuálního kontrastu indikací na základě grafické reprezentace výsledků [29]. Výsledky jsou v decibelech. Hranice detekovatelnosti byla zvolena 6 dB a všechny defekty vykazující hodnotu CNR větší než tuto hranici lze tedy považovat za zjištěitelné. Hodnota hranice byla zvolena na základě autora, který ve své práci [30] určil hranici detekovatelnosti jako bezrozměrných 2, což odpovídá použitým 6 dB.

Pro výpočet CNR byl použit následující vzorec:

$$CNR (db) = 20 \cdot \log \left( \frac{|\bar{S} - \bar{N}|}{\sigma_N} \right),$$

kde  $\bar{S}$  reprezentuje průměrnou hodnotu signálu,  $\bar{N}$  reprezentuje průměrnou hodnotu šumu a  $\sigma_N$  je směrodatná odchylka šumu.

Směrodatnou odchylku lze definovat pomocí vzorce:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

V této práci byla použita i další metoda kvantifikace intenzity indikace, kterou je relativní rozdíl teplot. Obě metody kvantifikace jsou srovnány v kapitole 4.1. Relativní rozdíl teplot se počítal z průměru teplot v oblasti defektu a zvolené referenční oblasti. Tvar a umístění zvolené referenční oblasti na vzorku lze nalézt v kapitole 3.3.5. Vzorec použitý pro výpočet relativního rozdílu teplot je uveden níže:

$$dT = \frac{T_{def} - T_{ref}}{T_{ref}},$$

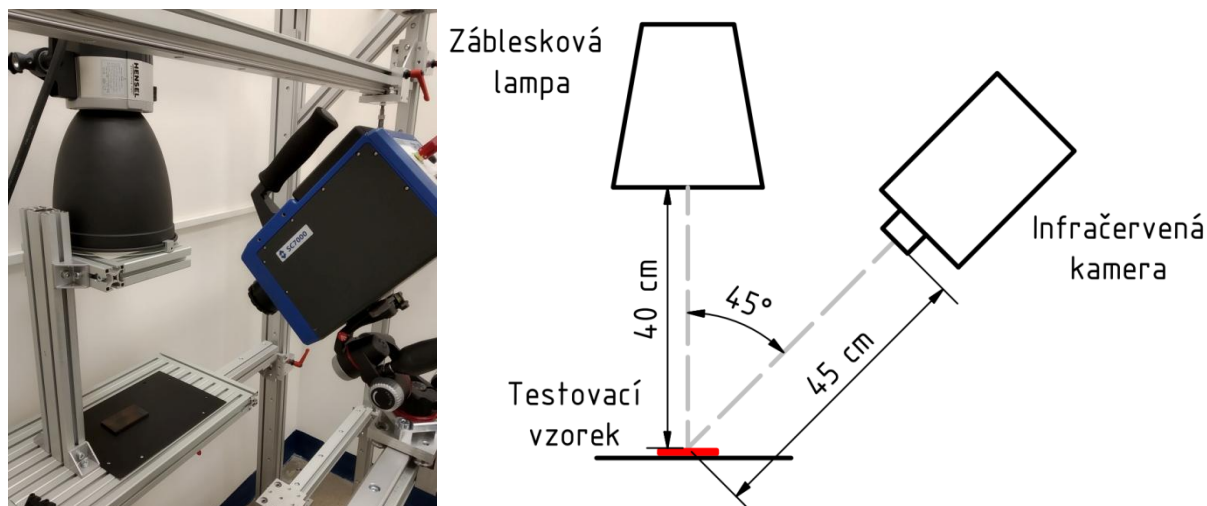
kde  $T_{def}$  představuje průměr teploty v oblasti defektu a  $T_{ref}$  průměr teploty v referenční oblasti.

### 3.3.4. Postup měření

Termografické měření bylo provedeno ve dvou experimentálních uspořádáních, v odrazové a průchodové konfiguraci. V obou případech se vzorky excitovaly pomocí zábleskové lampy. Pro natáčení se použila infračervená kamera Flir SC7650. V odrazové konfiguraci se umístila záblesková lampa Hensel EH Pro 6000 ve vzdálenosti 40 cm od vzorku tak, že její paprsky dopadaly kolmo na vzorek. Délka pulzu záblesku činila přibližně 6 ms a dodaná energie zábleskovou lampou byla 6 kJ. Záznam infračervené kamery se vždy zahájil před začátkem buzení. Kamera má maximální rozlišení  $640 \times 512$  pixelů, ale její senzor umožňuje snížit rozlišení za účelem zvýšení vzorkovací frekvence. Pro tento experiment bylo použito rozlišení  $320 \times 256$  pixelů a vzorkovací frekvence 250 Hz.

Kamera se nastavila tak, aby celý vzorek, který se položil na podložku, byl na kameře viditelný. U vzorku s jednotlivými póry se kamera umístila 45 cm od vzorku a natočila pod úhel  $45^\circ$ . Vzorek se shlukem porů bylo delší tudíž bylo nutné kameru vzdálit, konkrétně na 50 cm,

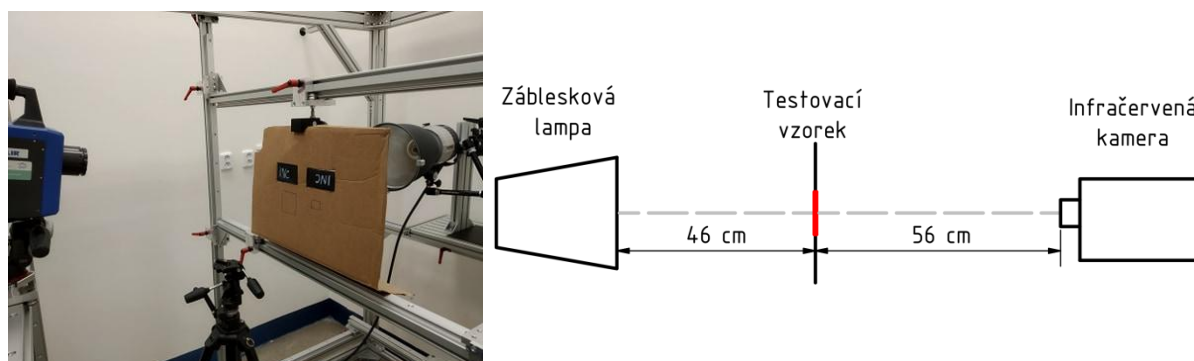
úhel činil stále  $45^\circ$ . Pro zlepšení rozlišovací schopnosti se pro každý vzorek s defektem typu shluku pórů provedly další dvě měření, při nichž se zabrala pouze polovina vzorku. U těchto měření se kamera nacházela pod úhlem  $30^\circ$  a ve vzdálenosti 33 cm od vzorků, čímž se dosáhlo menší skutečné velikosti každého pixelu. Umístění přístrojů a schéma rozmístění s jednotlivými vzdálenostmi u odrazové konfigurace lze vidět na obr. 8.



Obr. 8 Umístění přístrojů a schéma odrazové konfigurace

Po zapojení všech přístrojů do sítě a jejich umístění na daná místa se muselo vyčkat, než se nachladí infračervená kamera. Před začátkem každého měření bylo nutné nabít kondenzátory generátoru pulzů Hensel TRIA 6000 S. Měření se zahájilo prostřednictvím počítače se zapnutým programem LabIR, kterým se spustilo nahrávání sekvence a automatické vypuštění záblesku z lampy. Počítač se nacházel ve vedlejší místnosti, než probíhal experiment, z důvodu, aby nedošlo k oslnění očí zábleskovou lampou. Kamera zaznamenávala vždy 2000 snímků a získané sekvence tepelných snímků se ukládaly do počítače.

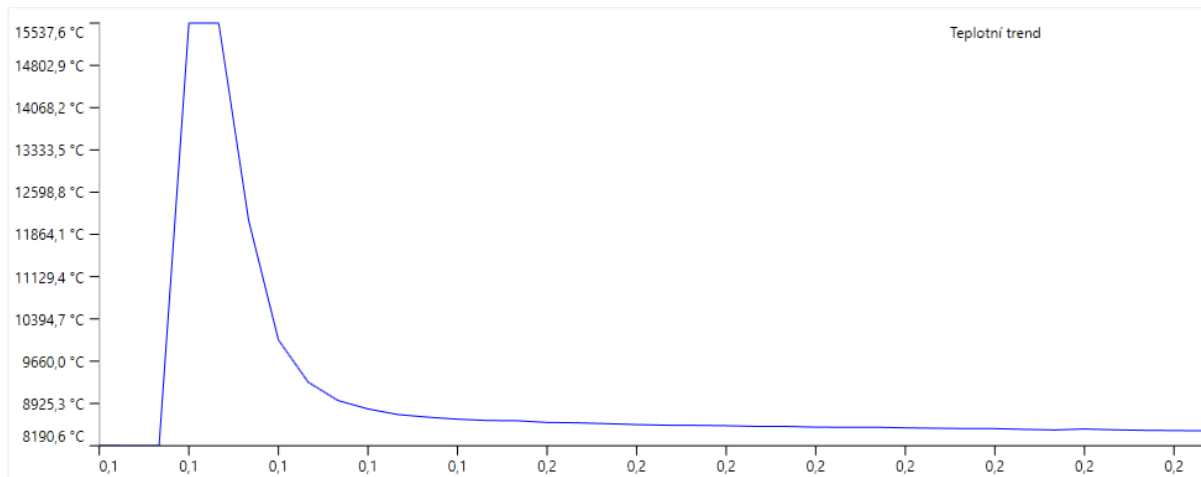
U průchodové konfigurace se použilo stejné vybavení se stejnými parametry jako u odrazové konfigurace, rozdíl je pouze v rozmístění. Měřený vzorek byl zasunut do připraveného otvoru v kartonu, který zcela zaplnil. Z jedné strany se umístila záblesková lampa ve vzdálenosti 40 cm od kartonu a kolmo ke vzorku. Z druhé strany se umístila kamera ve vzdálenosti 56 cm a také kolmo ke vzorku. Umístění přístrojů a schéma rozmístění s jednotlivými vzdálenostmi u průchodové konfigurace lze vidět na obr. 9.



Obr. 9 Umístění přístrojů a schéma průchodové konfigurace

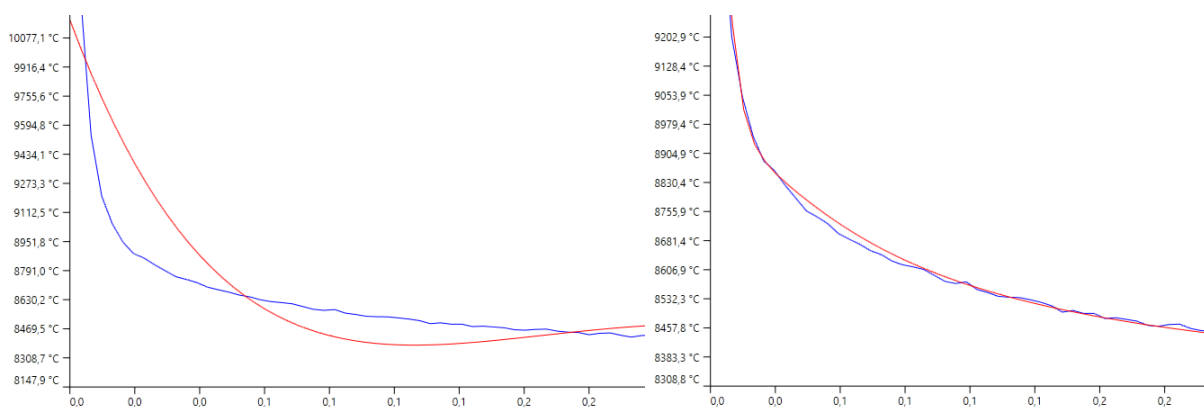
### 3.3.5. Postup vyhodnocení

Pro vyhodnocení se nejdříve vytvořené sekvence měření nahrály do programu LabIR. Následně byl vybrán interval snímků, který měl být zpracován funkcí pro infračervené termografické nedestruktivní testování. Počáteční snímek intervalu se zvolil s použitím bodové analýzy, která ukazuje teploty na vzorku v průběhu času. Pomocí analýzy byl nalezen snímek s nejvyšší teplotou a za ním následující snímek se označil jako počáteční. Ukázka grafu pro určení počátečního snímku je na obr. 10. Jako koncový snímek byl ponechán poslední snímek v sekvenci (2000. snímek).

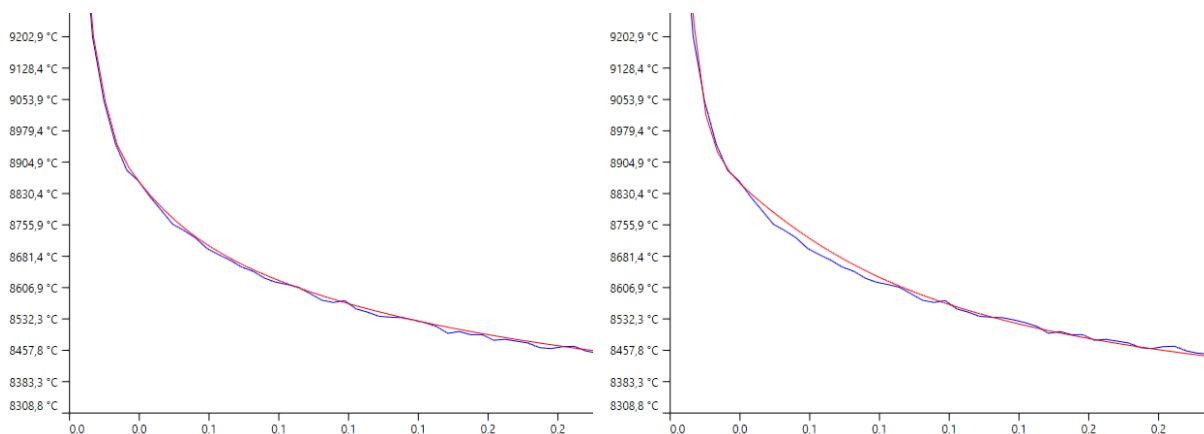


Obr. 10 Graf pro určení počátečního snímku

Po zvolení intervalu bylo nutné vybrat vstupní parametry pro aplikaci vyhodnocovacích metod. U všech funkcí se zvolil inverzní polynom 10. stupně. Inverzní polynom byl vybrán, protože jeho tvar lépe odpovídá požadované křivce. Porovnání polynomu a inverzního polynomu je zobrazeno na obr. 11. Stupeň polynomu byl určen jeho postupným zvyšováním, dokud křivka aproximace nesplynula s křivkou signálu. Na obr. 12 se nachází porovnání 5. a 10. stupně inverzního polynomu. Modré křivky u obou obrázků znázorňují signál a červené křivky jeho aproximaci.

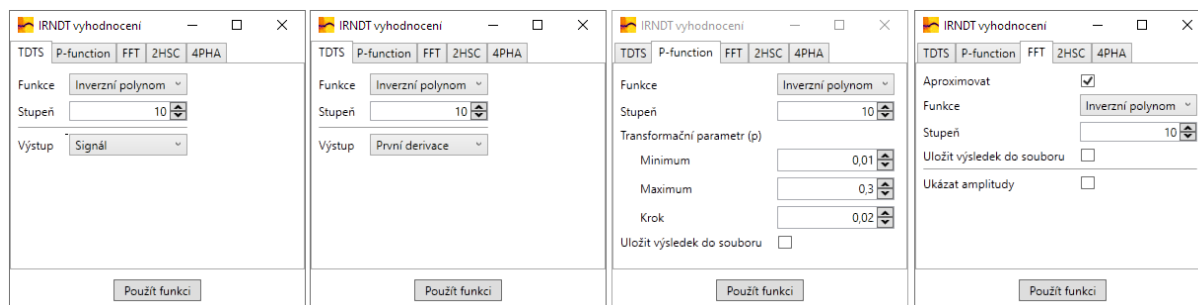


Obr. 11 Porovnání aproximace polynomem a inverzním polynomem- vlevo polynom, vpravo inverzní polynom



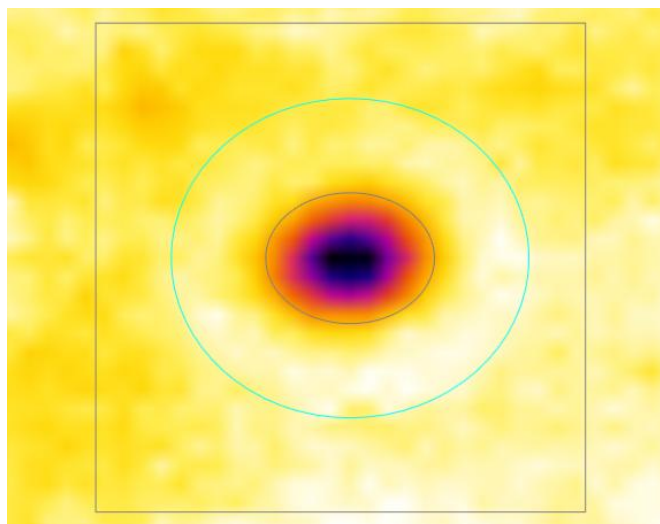
Obr. 12 Porovnání 5. (vpravo) a 10.(vlevo) stupně inverzního polynomu

V případě TDTS vyhodnocení byl zvolen výstup „1. derivace“. Metoda vyhodnocení pomocí aproximovaného signálu se v softwaru nachází také pod TDTS vyhodnocením, kde je třeba zvolit výstup „Signál“. U FFT vyhodnocení se zaškrtnulo pole „Aproximovat“. U P-function bylo třeba najít transformační parametr k identifikaci vhodného snímku, ze kterého by bylo možné zjistit hodnotu CNR. Začalo se na větším rozsahu s větším krokem a podle nalezených snímků se rozsah a krok snižovaly. Po nastavení parametrů se metoda aplikovala. Použité parametry pro jednotlivé metody jsou znázorněny na obr. 13.



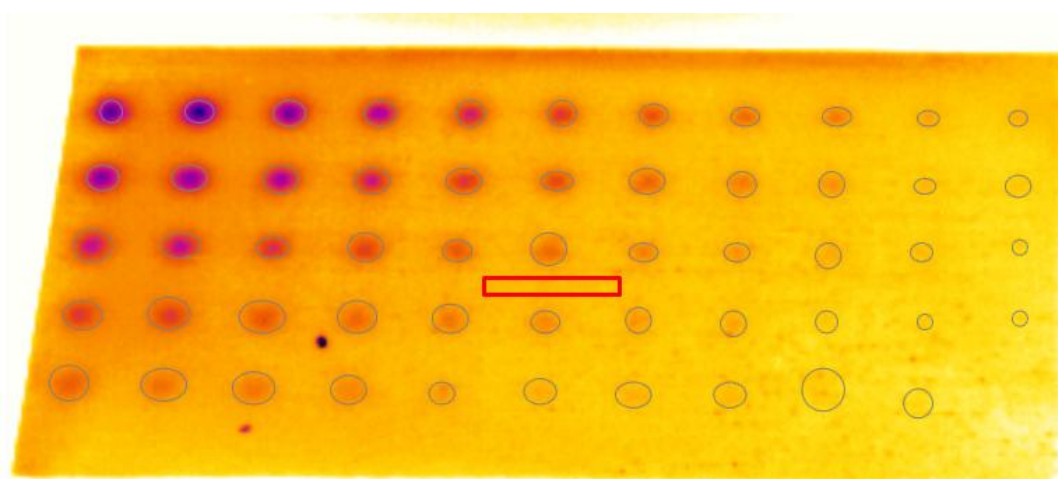
Obr. 13 Nastavené parametry vyhodnocovacích metod

Po použití jedné z vyhodnocovacích metod byla vytvořena čtvercová analýza, která sloužila k normalizaci oblastí. Umístila se vždy do místa, kde se očekával výskyt hledaného defektu a následně se přešla sekvence. Pokud byl defekt vizuálně viditelný, byla vytvořena elipsovité analýza kolem místa defektu a byl pro ni nastaven výpočet CNR. Jako zdroj šumu se nastavila „Zvětšená oblast“ a hodnota „Vzdálenost“ se nastavila na hodnotu 5, aby oblast zdroje šumu zabírala dostatečně velkou plochu kolem defektu a zároveň nezasahovala do sousedního defektu. Ukázka použité čtvercové analýzy k normalizaci a elipsovité analýzy defektu s oblastí pro výpočet CNR je uvedena na obr. 14. Analýzy mají na obrázku šedou barvu, zvětšená oblast pro výpočet CNR má světle modrou barvu. V tabulce v pravé horní části programu LabIR se začalo zobrazovat vypočtené CNR pro hledaný defekt. Po opětovném přehrání celé sekvence byl nalezen snímek, na kterém se nacházela nejvyšší hodnota CNR pro hledaný defekt a tato hodnota se zaznamenala. Čtvercová analýza se posunula do místa dalšího hledaného defektu a postup se opakoval, dokud nebyly určeny hodnoty CNR všech viditelných defektů.



Obr. 14 Ukázka čtvercové a elipsovité analýzy

Pro výpočet relativního rozdílu teplot  $dT$  je třeba zvolit oblast defektu a referenční oblast. Pro oblast defektu byly použity stejné analýzy defektů jako u výše zmíněného postupu pro zjištění CNR. Jako referenční oblast se vytvořila obdélníková analýza a umístila se doprostřed vzorku. Ukázka referenční oblasti je červeně zvýrazněna na obr. 15. Na snímku s nejvyšší nalezenou hodnotou CNR pro zkoumaný defekt se zaznamenal průměr hodnot z obou oblastí. Průměry byly následně dosazeny do vzorce v kapitole 3.3.3 pro výpočet relativního rozdílu teplot, z něhož byly získány hodnoty  $dT$ .



Obr. 15 Ukázka referenční oblasti

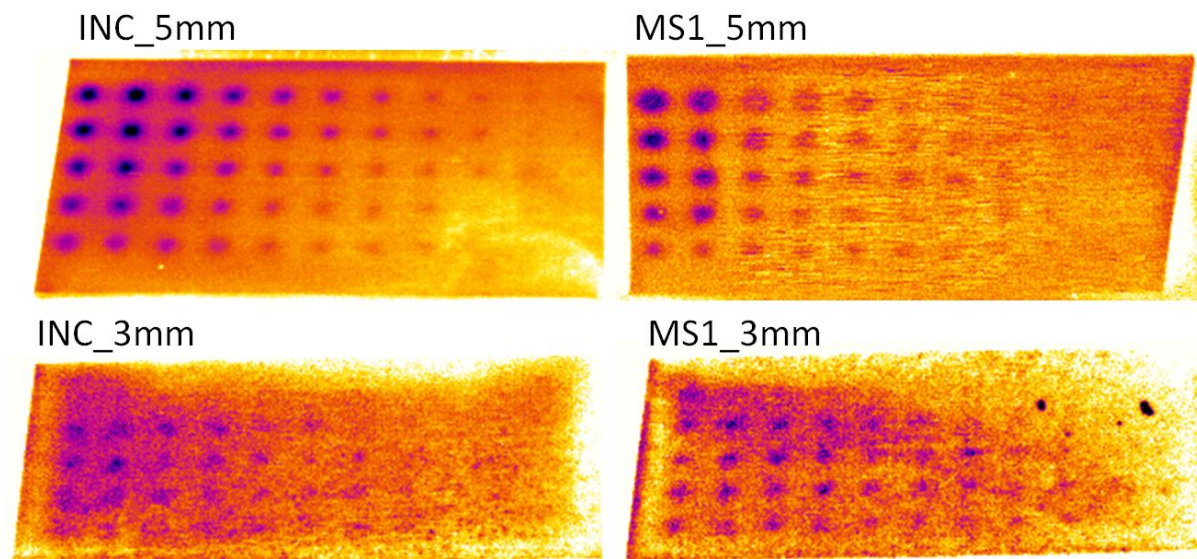
## 4. Výsledky a diskuze

Na 3D tiskárně kovů byly úspěšně vytisknuty 4 testovací vzorky- ze dvou materiálů, každý s dvěma typy defektů. Pro ně proběhlo měření v průchodové a odrazové konfiguraci. Obě měření byla následně vyhodnocena pomocí 4 metod - TDTS 1. derivací, FFT, P-function a aproximací signálu. U odrazové konfigurace byla zpracována pouze data sekvencí, kde byly viditelné celé vzorky. Při použití P-function nebylo možné nalézt žádné výsledky, z čehož lze usoudit, že pro toto měření nebyla vhodná a dále s ní nebylo pracováno. Také u průchodové konfigurace nebyly nalezeny žádné indikace z důvodu příliš velké tloušťky vzorku.

Pro zjištění závislosti CNR na dT a ověření, zda je contrast-to-noise ratio vhodná metoda pro určení intenzity indikací, byly vypočteny hodnoty dT. Výsledky jsou popsány v kapitole 4.1. Následně byly mezi sebou porovnány jednotlivé metody vyhodnocení (kapitola 4.2.). Poté byly analyzovány závislosti CNR na vybraných parametrech: velikosti, hloubce, typu defektu a materiálu vzorku. Tyto závislosti jsou popsány v kapitolách 4.3. až 4.5. Nakonec se provedla 2D lineární regrese pro zjištění rovnic funkcí, pomocí kterých je možné vypočítat odhad hodnoty CNR defektu pro libovolné vstupní parametry.

Níže na obr. 16 se nachází ukázky defektogramů z vyhodnocení pomocí metody TDTS. Slouží pro lepší představu, jak se jeví defekty a vzorky na termografických snímcích po aplikaci metod vyhodnocení. Snímky mají pouze ilustrační charakter, protože každý defekt může být nejlépe viditelný na jiném snímku, tudíž není možné na jednom snímku zachytit všechny defekty při nejlepší viditelnosti. Tyto snímky byly vybrány vizuálně ze sekvencí, kde se zdály být nejlepší indikace pro co nejvíce defektů.

Po vizuálním zhodnocení těchto snímků lze říct, že defekty u vzorků s jednotlivými póry jsou lépe viditelné než u shluku pórů. Při porovnání materiálů stejného defektu se jeví jasněji indikace u Inconelu v případě jednotlivých pórů, avšak u shluku pórů se zdá lépe viditelná indikace u maraging oceli. Počet pixelů na defekt se u jednotlivých pórů pohyboval od 5 do 14 pixelů a u druhého typu defektů od 5 do 18 pixelů.



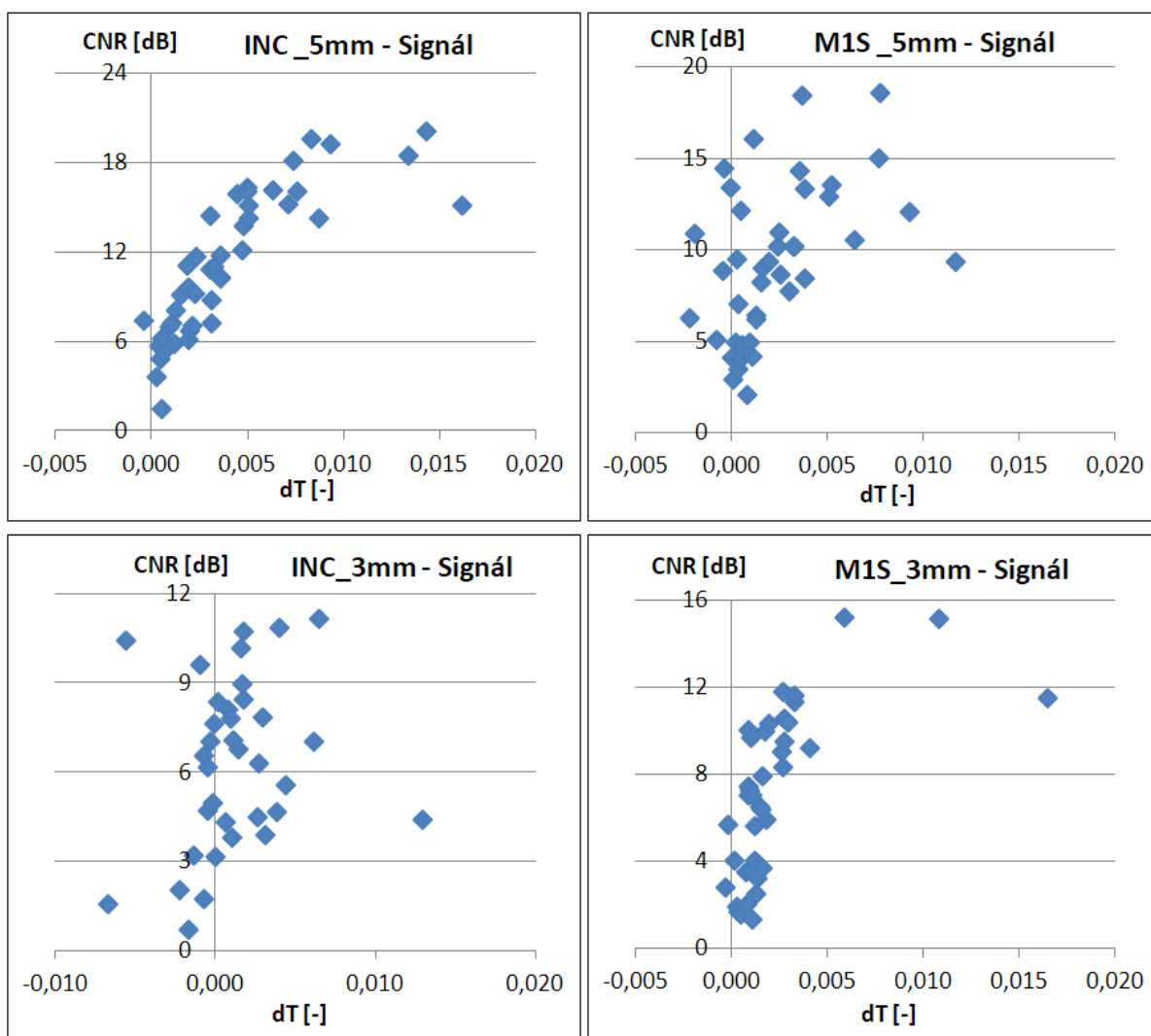
Obr. 16 Ukázky defektogramů



#### 4.1. Vztah mezi CNR a relativním rozdílem teploty $dT$

Při termografii získáváme termogramy. V případě, že je potřeba vyhodnotit intenzitu detekovatelnosti defektů, musí být výsledky kvantifikovány. Pro kvantifikaci je možné použít relativní rozdíl teplot defektů vůči referenční oblasti. Tím se dostane hodnota  $dT$ , která umožní říct, nakolik je vada detekovatelná. Tato metoda nelze použít u vyhodnocení pomocí metod TDTS či FFT, protože u nich dochází vlivem použití matematických algoritmů k transformaci teploty a porovnávaly by se odlišné jednotky. Další metodou kvantifikace intenzity indikací je CNR, kterou lze aplikovat i u pokročilých vyhodnocovacích metod, protože porovnává kontrast defektu vůči pozadí. Cílem této kapitoly je porovnáním výsledků  $dT$  a CNR ověřit vhodnost použití metody CNR pro tuto práci.

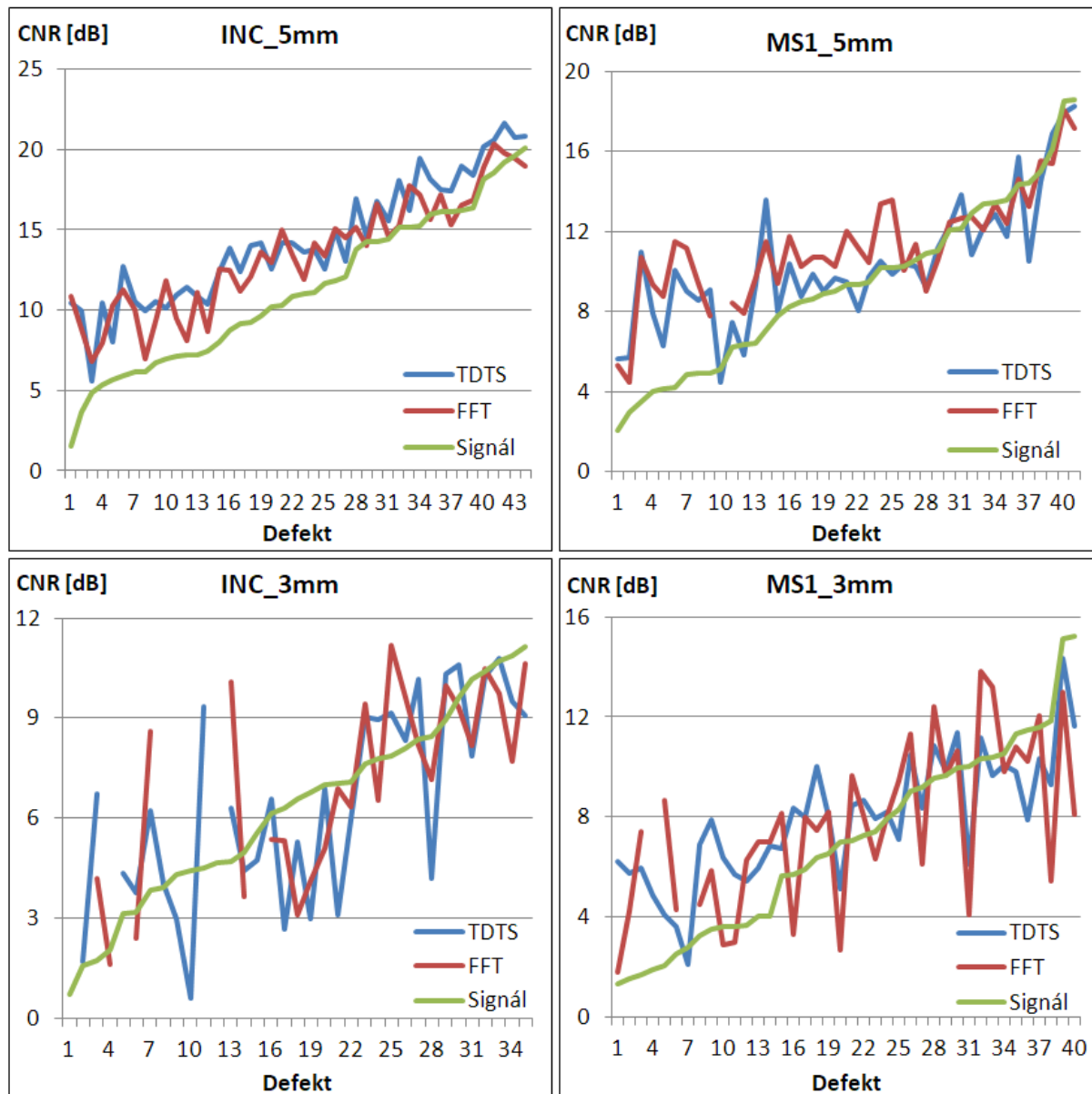
Na obr. 17 se nachází bodové grafy pro všechny vzorky s hodnotami  $dT$  na ose x a CNR Signálu na ose y. Vzhledem k velkému rozptylu hodnot není možné z grafů určit jednoznačnou závislost mezi veličinami. Ve většině případů lze však vyzorovat, že čím je hodnota  $dT$  větší, tím se zvětšuje i hodnota CNR. Z tohoto důvodu bylo usouzeno, že metoda CNR má podobnou schopnost detekce vad jako relativní rozdíl teplot a byla použita pro vyhodnocení. Mezi další důvody pro použití metody kvantifikace CNR se řadí již zmíněná univerzálnost aplikace pro různé metody vyhodnocení a také její jednotka decibel (dB), která dává lepší představu o viditelnosti defektů v porovnání s bezrozměrným relativním rozdílem teplot.



Obr. 17 Závislosti CNR na  $dT$

## 4.2. Porovnání metod vyhodnocení

Na následujícím obr. 18 jsou vidět grafy, které srovnávají hodnoty CNR mezi jednotlivými metodami na různých vzorcích. Na ose x jsou defekty seřazené podle velikosti CNR z použité metody Signál (1 znamená defekt, u kterého vyšla nejnižší hodnota CNR). Na ose y se nachází vlastní hodnoty CNR. Barevné křivky reprezentují použité metody.



Obr. 18 Porovnání vyhodnocovacích metod

Z grafů je vidět, že při nižších hodnotách CNR signálu došlo u metod TDTs a FFT ke zvýraznění defektů, avšak s rostoucí hodnotou signálu přestává být tento rozdíl patrný až do okamžiku, kdy aproximovaný signál vykazuje v některých případech lepší výsledky než pokročilé metody. Z toho vyplývá, že pokročilé metody vyhodnocení je výhodné používat zejména pro hůře detekovatelné vady, kdežto u lépe detekovatelných defektů již na metodě výrazně nezáleží.

Na obdobné výsledky poukazuje tab. 2, jejíž řádky tvoří tři intervaly. Intervaly byly určeny rozdělením řady defektů seřazených podle hodnoty CNR signálu u jednotlivých vzorků na třetiny. V případě, kdy nešlo rozdělit počet defektů na tři stejně velké části, obsahoval první,

případně i druhý interval o jeden defekt více. V každém intervalu se následně vypočítal průměr hodnot CNR pro jednotlivé metody. Hodnoty průměrů byly zaokrouhleny na jedno desetinné místo a jsou v tabulce uvedeny v decibelech.

Tab. 2 Porovnání vyhodnocovacích metod na 3 intervalech

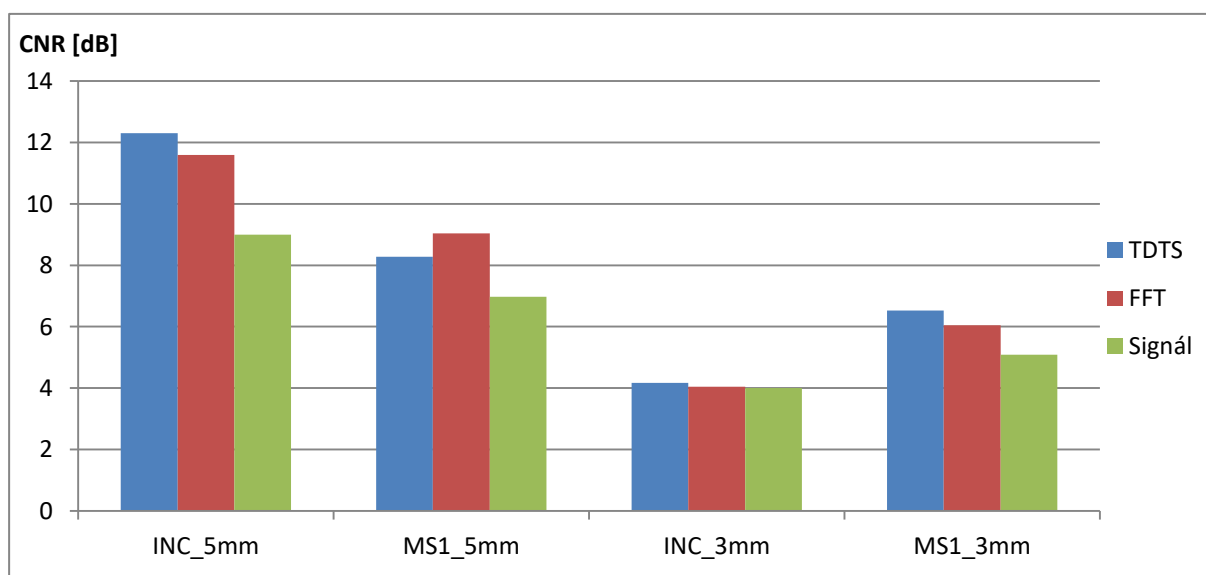
	INC_5mm			MS1_5mm			INC_3mm			MS1_3mm		
	TDTS	FFT	Signál	TDTS	FFT	Signál	TDTS	FFT	Signál	TDTS	FFT	Signál
1. interval	10,3	9,6	6,0	8,1	8,9	4,8	4,3	4,6	3,2	5,6	5,2	2,8
2. interval	14,1	13,7	11,2	9,5	11,0	9,4	5,6	6,0	6,5	8,3	7,8	7,4
3. interval	18,8	17,4	16,9	13,7	13,9	14,3	9,1	9,3	9,5	10,2	10,3	11,3

Porovnáním vypočtených průměrů na prvním intervalu se zjistilo, že u všech vzorků vyšla hodnota průměru signálu výrazně nižší než u ostatních metod. Největšího procentuálního rozdílu se dosáhlo u vzorku MS1\_3mm, kde průměr signálu činí 2,8 dB a průměr TDTS odpovídá 5,6 dB, což je o 100 % více než hodnota signálu. Naopak nejmenší procentuální rozdíl vznikl u průměru FFT, který je u vzorku INC\_3mm o 34,4 % větší než průměr signálu.

Na druhém intervalu zůstává signál metodou s nejnižšími hodnotami CNR. Výjimku tvoří vzorek INC\_3mm, u kterého dosáhl průměr signálu o 16,1 % lepších výsledků než TDTS. Na tomto intervalu se již mezi průměry nevyskytují tak výrazné rozdíly jako u předchozího intervalu, což potvrzuje i snížení největšího procentuálního rozdílu průměrů ze 100 % na 25,9 %, který se u druhého intervalu vyskytl na vzorku INC\_5mm u hodnoty TDTS vůči hodnotě signálu.

U třetího intervalu dosáhl signál mírně lepších výsledků na všech vzorcích kromě INC\_5mm, kde stále vychází nejlépe TDTS o 11,2 % vůči signálu. Největší procentuální rozdíl průměrů vyšel na vzorku MS1\_3mm, kde hodnota signálu přesahuje TDTS o 10,8 %. Z procentuálních rozdílů je zřejmé, že se hodnoty průměrů metod liší nejméně ve třetím intervalu.

Obr. 19 obsahuje sloupcový graf, který porovnává vyhodnocovací metody vzorků. Barevně jsou odlišeny průměry metod, které byly vypočteny ze všech defektů, včetně nenalezených defektů, jejichž hodnota se počítala jako nula. Metoda TDTS dosahuje nejlepších výsledků u 3 vzorků a u zbylého vzorku metoda FFT. Metoda signálu vykazuje nižší celkové výsledky, což je způsobeno tím, že na prvním intervalu má nižší hodnoty než ostatní metody.



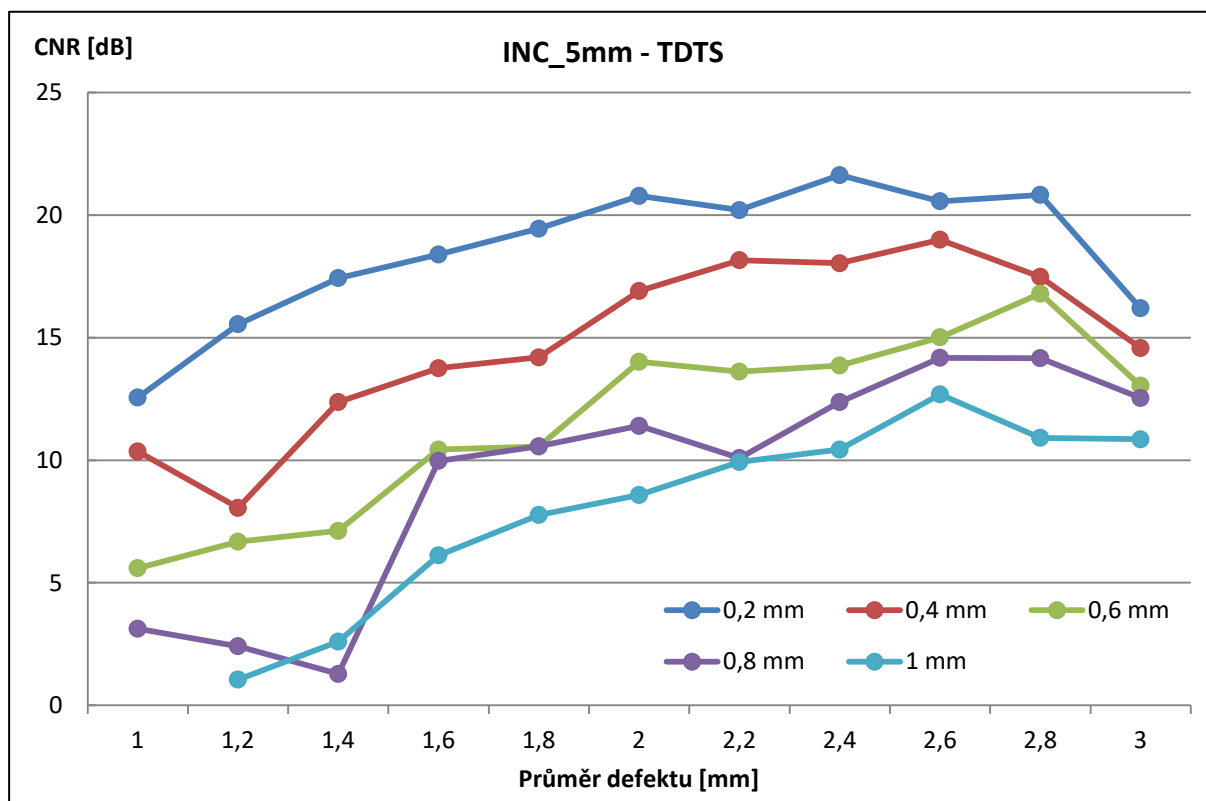
Obr. 19 Porovnání průměrů vyhodnocovacích metod

### 4.3. Závislost CNR na velikosti defektu

Obr. 20 a 21 obsahují grafy závislostí hodnot CNR na průměru defektů. Na ose x se nachází průměry defektů v milimetrech, na ose y jejich naměřená hodnota CNR vyjádřená v decibelech. Barevně jsou odlišeny jednotlivé hloubky. Pro popis výsledků byl vybrán vzorek s nejlepšími (INC\_5mm) a nejhoršími (INC\_3mm) výsledky. Veškeré grafy závislostí CNR na průměru defektu všech metod vyhodnocení pro každý vzorek, včetně grafů znázorněných v této kapitole, lze nalézt v příloze 1.

Pro vzorek INC\_5mm se aplikací různých metod vyhodnocení získaly 3 podobné grafy závislostí CNR na průměru defektu. Tvar křivek je přibližně stejný, liší se posunem po ose y. Nejvíce je posun zřetelný u metody signálu. Nejlepších indikací dosahuje metoda TDTS, což potvrzuje průměr CNR všech jejích defektů, který vychází nejvíce ze všech metod. Průměr metody TDTS ze všech defektů činí 11 dB, což je o 0,7 dB více než u průměru metody FFT a o 3,3 dB více než u průměru signálu. Graf pro metodu TDTS na vzorku INC\_5mm se nachází na obr. 20. U hodnot v grafu dochází k rozptylu a nelze jednoznačně určit závislost mezi průměrem a CNR. Trend připomíná lineární a lze vyzorovat, že s rostoucí velikostí defektu má CNR rostoucí tendenci. V extrémních může docházet k poklesu, což může být ovlivněno umístěním defektu na kraji vzorku.

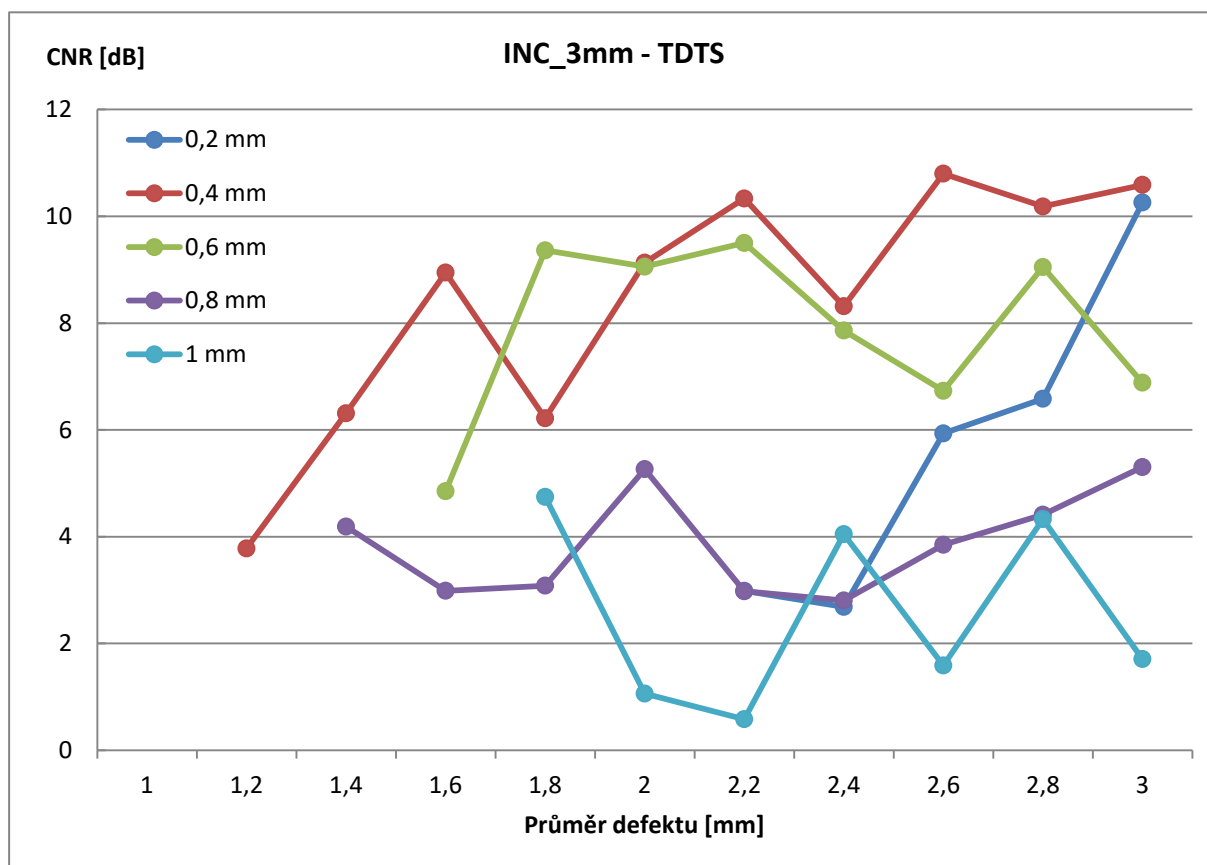
Z grafu je vidět, že na intervalu průměru defektů 1 – 1,4 mm se pohybovaly hodnoty CNR v rozmezí od 1 dB do 17,4 dB. Na intervalu 1,6 – 2,2 mm se naměřila nejnižší hodnota 6,1 dB a nejvyšší 20,8 dB. Na zbylém intervalu od 2,4 mm do 3 mm dosahovaly naměřené hodnoty rozmezí 10,4 – 21,6 dB. Z předpokladu, že defekty jsou detekovatelné při intenzitě indikace nad 6 dB lze určit, že bylo možné ve všech hloubkách nalézt všechny defekty s průměrem větším než 1,6 mm. Defekt o průměru 1,4 mm je možné odhalit do hloubky 0,6 mm stejně jako defekt o průměru 1,2 mm. Defekt s průměrem 1 mm je zjištěnitelný do hloubky 0,4 mm.



Obr. 20 Závislost CNR na průměru defektu pro INC\_5mm – TDTS

U stejného typu defektu se v materiálu MS1 došlo k podobným výsledkům. Liší se větším rozptylem hodnot a také méně lineárním trendem. Rostoucí tendence CNR se zvětšujícím se průměrem je zachována. Tvary křivek jsou mezi metodami opět velmi podobné, pouze u signálu jsou hodnoty pro větší hloubky značně nižší. Hodnoty CNR pro vzorek M1S se pohybovaly v rozmezí 1,2 - 12,8 pro menší defekty o průměrech 1 až 2 mm a 4,9 - 18,2 dB pro větší defekty s průměry 2 - 3 mm.

Testovací vzorky s typem defektu shluk pórů vyšly s menším CNR, protože hůře zabraňují prostupu tepla. Zmíněný typ defektu je reprezentován vzorkem INC\_3mm a jeho graf závislosti CNR na průměru se nachází na obr. 21. Z grafu je zřetelný velký rozptyl hodnot a ve většině případů je setrvalá nebo opět rostoucí tendence CNR vůči rostoucímu průměru. Výsledky použití různých metod vyhodnocení byly téměř totožné, nejlepší byly výsledky dosažené aplikací metody TDTS. CNR se pohybovalo pro celý vzorek v rozmezích 0,5 - 10,8 dB. Defekty o průměrech 1 a 1,2 mm nebylo možné odhalit. Vady s průměrem 1,4 a 1,6 mm byly zjistitelné pouze v hloubce 0,4 mm. Defekty od průměru 1,8 mm byly detekovatelné v hloubkách 0,4 a 0,6 mm a od průměru 2,6 mm i v hloubce 0,2 mm.

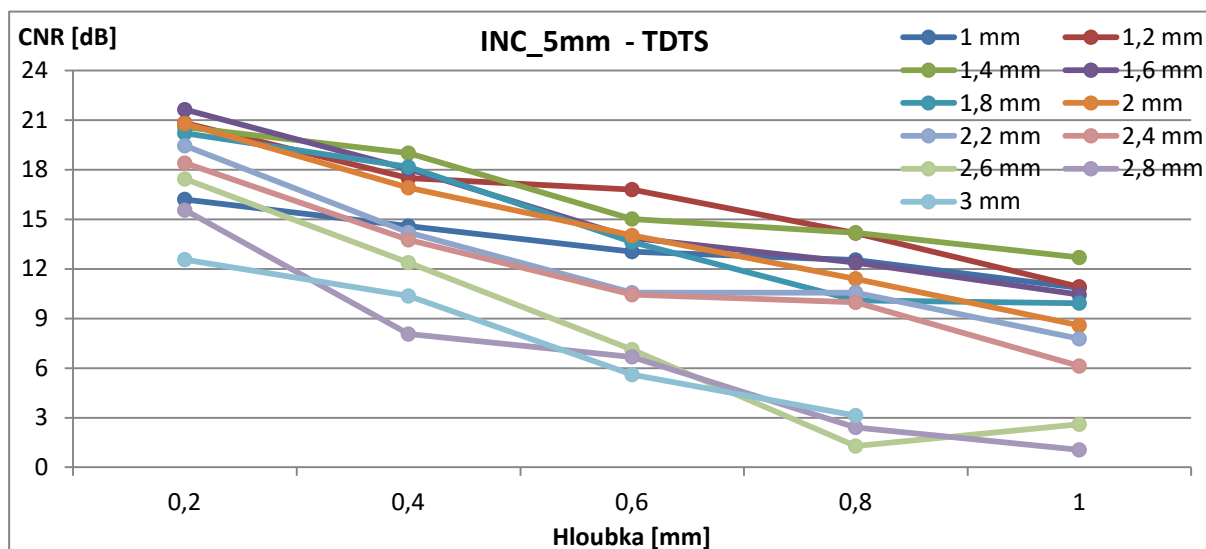


Obr. 21 Závislost CNR na průměru defektu pro INC\_3mm – TDTS

Grafy závislostí u materiálu M1S s typem defektu shluk pórů se od Inconelu příliš nelišily, rozdíl byl především ve velikosti hodnot CNR, které jsou pro maraging ocel vyšší. CNR vyšlo u maraging oceli v rozmezí 1,8 – 14,3 dB.

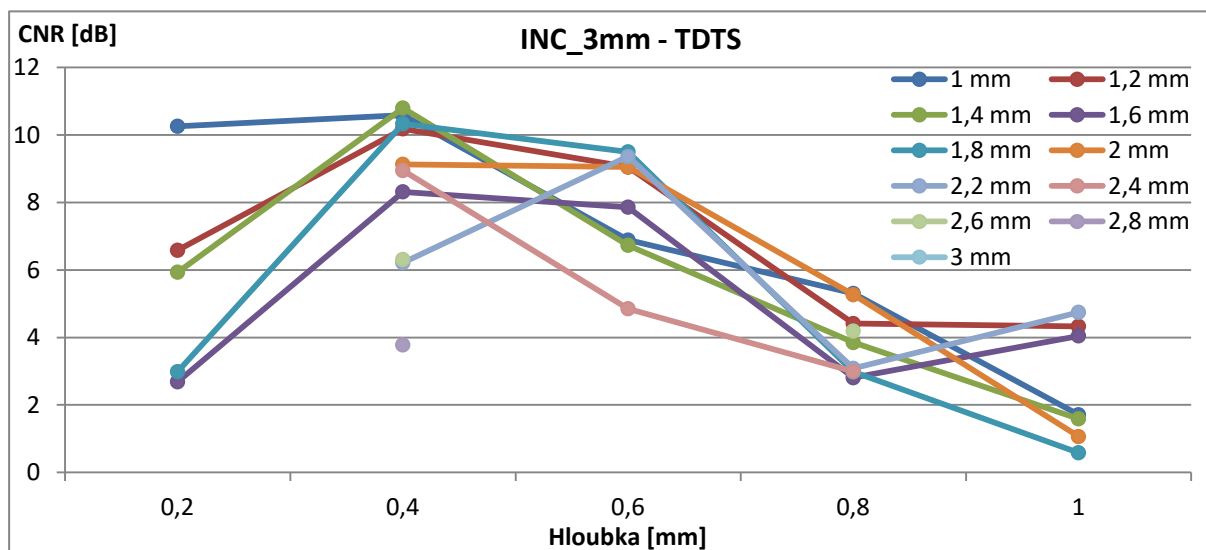
#### 4.4. Závislost CNR na hloubce defektu

Pro vzorky byla zjišťována také závislost CNR na hloubce defektů. Níže jsou popsány grafy vzorků INC\_5mm a INC\_3mm jakožto vzorky s nejlepší a nejhorší indikací. Zbylé grafy včetně těchto dvou lze nalézt v příloze 2. Na obr. 22 je uveden graf závislosti CNR na hloubce pro vzorek INC\_5mm vyhodnocený metodou TDTS. Závislost lze vizuálně určit jako lineární i přes drobné odchylky způsobené rozptylem hodnot. Je zřejmé, že čím větší hloubka, tím menší hodnota CNR, což znamená horší indikace. V hloubkách 0,2 a 0,4 mm byly odhaleny všechny defekty. V hloubce 0,6 mm již nedošlo k odhalení nejmenšího defektu o průměru 1 mm a v hloubkách 0,8 a 1 mm bylo možné nalézt defekty pouze do průměru 1,6 mm.



Obr. 22 Závislost CNR na hloubce defektu u INC\_5mm - TDTS

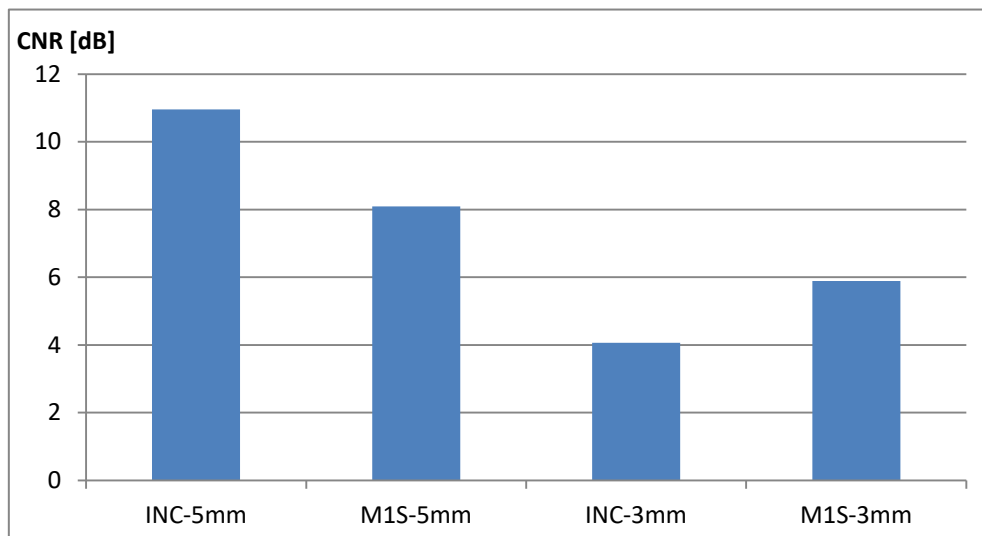
U grafu pro vzorek INC\_3mm na obr. 23 se již závislosti nejeví lineárně jako u předchozího vzorku. Indikace v hloubce 0,2 mm vykazují znatelně nižších výsledků než ve větší hloubce. Malé hloubky jsou totiž více ovlivněny povrchovými vlastnostmi jako je například emisivita nebo odrazivost, což mohlo způsobit tento pokles. V hloubce 0,2 jsou tedy vady viditelné až od průměru 2,8 mm. Pro hloubku 0,4 mm lze zjistit defekty s průměrem již od 1,4 mm. V hloubce 0,6 mm lze odhalit defekty s průměrem větším než 2 mm. Od hloubky 0,8 mm již nejsou detekovatelné žádné vady.



Obr. 23 Závislost CNR na hloubce defektu u INC\_3mm - TDTS

#### 4.5. Závislost CNR na materiálu vzorku a typu defektu

Na obr. 24 je znázorněn graf, který porovnává průměry hodnot CNR všech metod pro jednotlivé vzorky. V těchto průměrech jsou započítány i nenalezené defekty, jejichž hodnota CNR se počítala jako nula.



Obr. 24 Porovnání průměrů všech metod u jednotlivých vzorků

Při porovnání materiálů u defektu s jednotlivými póry je z grafu zřejmé, že o něco lepších výsledků se dosáhlo u materiálu Inconel. To může být způsobeno menší tepelnou vodivostí Inconelu oproti maraging oceli, jelikož s menší tepelnou vodivostí probíhají procesy výměny tepla pomaleji a infračervené kamery je snáze zachytí. Chladnutí materiálu s vysokou tepelnou vodivostí zaznamenávají kamery naopak hůře z důvodu jejich omezené rychlosti snímkování. Při porovnání materiálů u druhého typu defektu však se dostane opačných výsledků. Mezi možné důvody změny materiálů s lepšími indikacemi patří drsnost povrchu, která je u INC\_3mm znatelně vyšší než u MS1\_3. Vyšší drsnost mohla způsobit zvýšení hladiny šumu a tím zhoršit detekci vad, která je u shluku pórů již sama o sobě nízká. Dalšími faktory ovlivňující indikace by mohly být například rozdílná emisivita nebo odrazivost.

V případě srovnání typů defektů pro stejný materiál se u Inconelu i maraging oceli zjistilo, že u obou materiálů vychází lepší detekovatelnost jednotlivých pórů oproti shluku pórů. Čím je větší podíl vzduchu v defektu, tím se vytváří větší bariéra proti prostupu tepla a vada je lépe zjištělná. Shluk pórů má plošně oproti kavitě méně vzduchu, jelikož vzduch v tomto typu defektu nezaujímá souvislou plochu, ale je narušován materiálem. Materiál v defektu se excitacím zdrojem ohřeje a tím dojde ke snížení kontrastu defektu vůči okolnímu materiálu. Z tohoto důvodu se předpokládalo dosažení horších výsledků pro tento typ defektu a tento předpoklad byl potvrzen.

Vlastnosti materiálů, ze kterých byly vzorky vyrobeny a popisy defektů pro ně navržených, lze nalézt v kapitole 3.2. Testované vzorky.

#### 4.6. 2D lineární regrese

Naměřená data je výhodné využít k vytvoření prediktivních funkcí, které na základě hloubky a velikosti defektu dokážou pro daný vzorek vypočítat očekávanou intenzitu indikace vady. Na data byla aplikována dvojrozměrná lineární regrese, která umožnila nalezení koeficientů hledaných funkcí. Zvolila se lineární regrese, jelikož se vycházelo ze závislosti CNR na velikosti a hloubce z kapitol 4.3. a 4.4.

Regrese byla provedena v programu Microsoft Excel. Data činila hodnoty CNR z nejlepší metody vyhodnocení pro daný vzorek a následně byla vložena do prvního sloupce listu a seřazena vzestupně podle velikosti. Do následujících dvou sloupců se uvedly parametry defektu - hloubka a velikost. Do dalšího sloupce se vložil výpočet funkce, jejíž koeficienty je třeba nalézt. V tomto případě se hledaly koeficienty pro funkci  $z = ax + by + cxy + d$ , kde  $z$  je CNR v decibelech,  $x$  představuje průměr defektu v milimetrech a  $y$  hloubku defektu v milimetrech. Do následujícího sloupce se vložil rozdíl naměřené a pomocí funkce vypočítané hodnoty. Pod tento sloupec se vložila funkce pro výpočet sumy čtverců celého sloupce, která se následně zadala do excelovské funkce řešitel spolu s buňkami, ve kterých se po aplikaci funkce řešitel objevily hodnoty koeficientů. Výsledné funkce jsou i s vypočtenými koeficienty pro vzorky uvedeny níže:

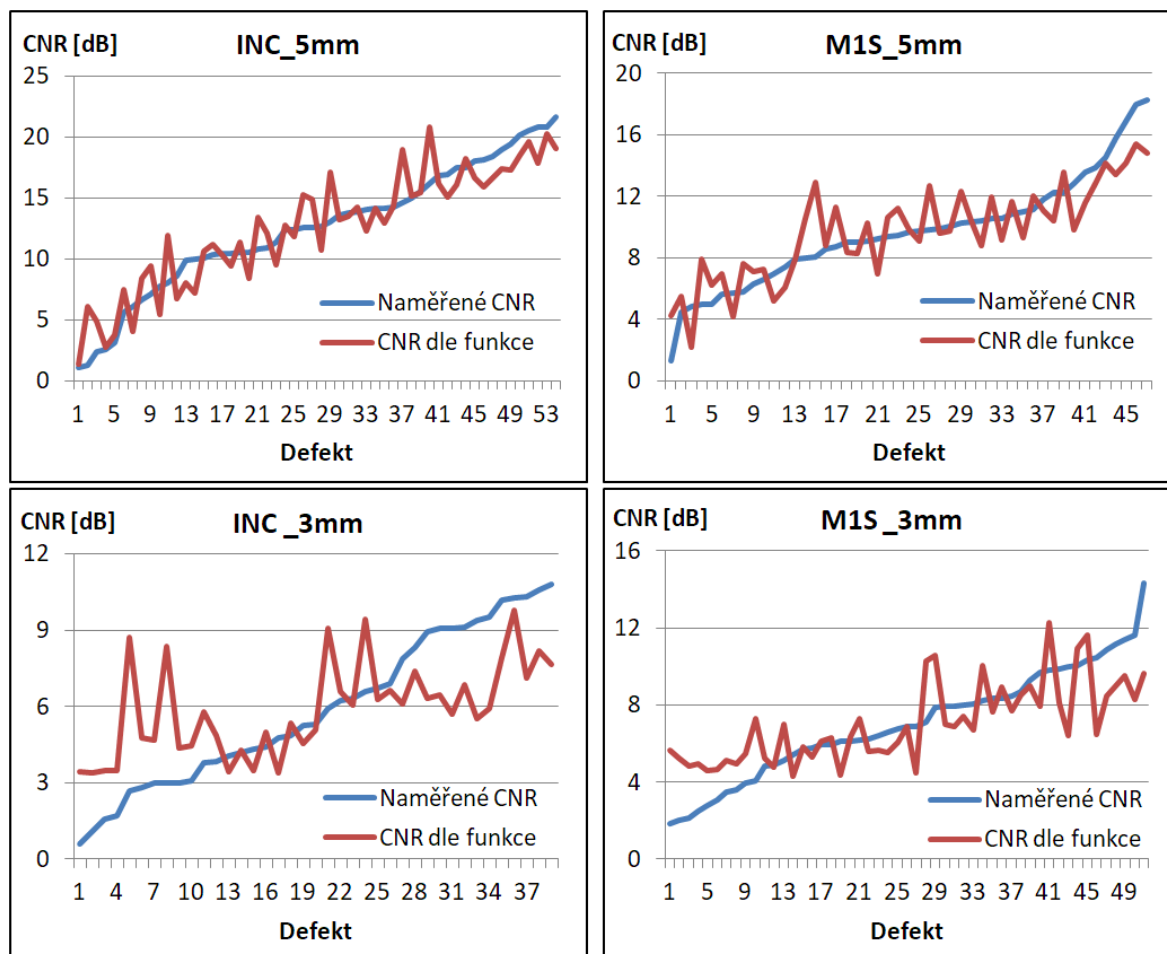
**INC\_5mm:**  $z = 2,05x - 23,12y + 4,61xy + 16,54$

**MS1\_5mm:**  $z = 2,62x - 13,80y + 2,46xy + 8,83$

**INC\_3mm:**  $z = 2,17x - 1,60y - 2,08xy + 4,83$

**MS1\_3mm:**  $z = 3,91x - 0,91y - 3,07xy + 2,20$

Níže na obr. 25 lze nalézt grafy naměřených hodnot v porovnání vypočtenými hodnotami prediktivní funkce pro všechny vzorky. Vypočtené hodnoty mají velký rozptyl, zejména u defektu typu shluk pórů, který vznikl v důsledku velkého rozptylu již vstupních dat. Z tohoto důvodu slouží vypočtené hodnoty pouze k odhadu a je třeba počítat s určitou chybou výsledků. Například u vzorku INC\_5mm činí maximální odchylka 4,8 dB.



Obr. 25 Porovnání naměřených a pomocí prediktivních funkcí vypočtených hodnot



## 5. Závěr

Cílem této práce bylo analyzovat možnosti využití termografických nedestruktivních testovacích metod na zjištění vad u výrobků vytvořených aditivními technologiemi. Za tímto účelem byl navržen experiment pro čtyři testovací vzorky ze dvou materiálů a s dvěma typy uměle vytvořených defektů - jednotlivé kulové póry a shluky malých pórů. Vzorky byly vytištěny pomocí 3D tiskárny kovů. Měření bylo provedeno pulzní metodou termografického nedestruktivního testování ve dvou konfiguracích - odrazové a průchodové. Pro zhodnocení použitelnosti aplikované termografické metody testování byla naměřená data zpracována a vyhodnocena pomocí 4 metod infračerveného nedestruktivního testování. Mezi použité metody byly zahrnuty TDTS - 1. derivace, FFT, P-function a aproximace signálu. Intenzita indikací byla kvantifikována pomocí metody CNR, jež byla pro tuto práci posouzena jako použitelná.

Vyhodnocením bylo zjištěno, že P-function není vhodná metoda vyhodnocení a u průchodové konfigurace nebyly nalezeny žádné indikace z důvodu příliš velké tloušťky vzorku. Jako nejvhodnější metodou vyhodnocení se ukázala být metoda TDTS – 1. derivace.

Dalším cílem bylo zmapovat vliv vybraných parametrů defektů na sledované charakteristiky pro dva různé typy materiálů. Bylo zjištěno, že shluk pórů je hůře detekovatelným defektem než jednotlivé větší póry. Lepších indikací dosahuje materiál s nižší tepelnou vodivostí a malou drsností povrchu. S rostoucí velikostí defektu se zlepšuje i jeho indikace. U vzorku INC\_5 bylo možné ve všech hloubkách nalézt všechny defekty s průměrem větším než 1,6 mm. Defekty o průměru 1,4 mm a 1,6 mm bylo možné odhalit do hloubky 0,6 mm a defekt s průměrem 1 mm byl zjistitelný pouze do hloubky 0,4 mm. Naopak se zvětšující se hloubkou se indikace zhoršuje. V hloubkách 0,2 a 0,4 mm byly odhaleny všechny defekty. V hloubce 0,6 mm již nedošlo k odhalení nejmenšího defektu o průměru 1 mm a v hloubkách 0,8 a 1 mm bylo možné nalézt defekty pouze do průměru 1,6 mm. Naměřená data se podařilo využít k vytvoření prediktivních funkcí, které na základě hloubky a velikosti defektu dokážou pro daný vzorek vypočítat intenzitu indikace vady.

Závěrem lze konstatovat, že metoda aktivní pulzní termografie je k detekci vad u výrobků vytvořených aditivními technologiemi použitelná, což bylo potvrzeno odhalením navržených defektů ve vzorcích vyrobenými 3D tiskem ze dvou typů materiálů. Míra detekovatelnosti vad je však závislá především na parametrech defektu a materiálu, ve kterém se nachází.

Naměřená i vyhodnocená data jsou v digitální podobě uložena a umožňují další analýzu. Na výsledky práce je možné navázat například porovnáním s dalšími testovacími metodami nebo jinými typy defektů.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER a Brian GARRET. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D Hubs, 2017.
- [2] ZHANG, Jing a Yeon-Gil JUNG. *Additive manufacturing: materials, processes, quantifications and applications*. Cambridge, MA: Butterworth-Heinemann, 2018.
- [3] TANZI, Maria-Cristina, Silvia FARÈ a Gabriele CANDIANI. *Foundations in Biomaterials Engineering*. Amsterdam: Elsevier Science, 2019.
- [4] GOKULDOSS, Prashanth Konda, Sri KOLLA a Jürgen ECKERT. *Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines*. Materials [online]. 2017 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/10/6/672>
- [5] MALEKIPOUR, Ehsan a Hazim EL-MOUNAYRI. *Common defects and contributing parameters in powder bed fusion AM process and their classification for online monitoring and control: a review*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 2018, 527-550 [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-017-1172-6>
- [6] GRASSO, Marco a Bianca Maria COLOSIMO. *Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion: a review*. Measurement Science and Technology [online]. 2017 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/aa5c4f>
- [7] SHARRATT, Bree M. *A Review of Non-Destructive Techniques and Technologies for Qualification of Additive Manufactured Parts and Processes* [online]. 2015 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: [https://cradpdf.drdc-rddc.gc.ca/PDFS/unc200/p801800\\_A1b.pdf](https://cradpdf.drdc-rddc.gc.ca/PDFS/unc200/p801800_A1b.pdf)
- [8] ] ROBERTS, Ibiye Aseibichin. *Investigation of residual stresses in the laser melting of metal powders in additive layer manufacturing* [online]. Wolverhampton, 2012 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/2436/254913>. Disertační práce. University of Wolverhampton
- [9] *5 Common Problems Faced with Metal 3D printing – And How You Can Fix Them*. Amfg [online]. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2018/05/01/5-problems-faced-when-3d-printing-metals-and-how-to-fix-them/>
- [10] ROEHLING, John D., William L. SMITH, Tien T. ROEHLING, Bey VRANCKEN, Gabriel M. GUSS, Joseph T. MCKEOWN, Michael R. HILL a Manyalibo J. MATTHEWS. *Reducing residual stress by selective large-area diode surface heating during laser powder bed fusion additive manufacturing*. Additive Manufacturing [online]. 2019, 228-235 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860419300867>
- [11] STEVENSON, Kerry. *Discovered: How To Eliminate Metal 3D Print Warping*. Fabbaloo [online]. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://www.fabbaloo.com/blog/2019/7/5/discovered-how-to-eliminate-metal-3d-print-warping>
- [12] HALLBERG, Emil. *Investigation of hot cracking in additive manufactured nickel-base superalloys* [online]. Gothenburg, 2018 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/255646/255646.pdf>. Diplomová práce. Chalmers University of Technology.

- [13] MOLITCH-HOU, Michael. *7 Issues to Look Out for in Metal 3D Printing*. Engineering.com [online]. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/15202/7-Issues-to-Look-Out-for-in-Metal-3D-Printing.aspx>
- [14] OYAR, Perihan. *Laser Sintering Technology and Balling Phenomenon*. Photomedicine and Laser Surgery [online]. 2018, 72-77 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/pho.2017.4311>
- [15] GRASSO, Marco a Bianca Maria COLOSIMO. *Process Defects and In-situ Monitoring Methods in Metal Powder Bed Fusion* [online]. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/9be7/31c8d5f07b6d91e2104937b246771b96a264.pdf>
- [16] USAMENTIAGA, Rubén, Pablo VENEGAS, Jon GUEREDIAGA, Laura VEGA, Julio MOLLEDA a Francisco BULNES. *Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing*. Sensors [online]. 2014, 12305-12348 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/7/12305>
- [17] ROEMER, Jakub, Łukasz PIECZONKA a Tadeusz UHL. *Laser spot thermography for crack detection in aluminium structures* [online]. 2015 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/320272693\\_LASER\\_SPOT\\_THERMOGRAPHY\\_FOR\\_CRACK\\_DETECTION\\_IN\\_ALUMINUM\\_STRUCTURES](https://www.researchgate.net/publication/320272693_LASER_SPOT_THERMOGRAPHY_FOR_CRACK_DETECTION_IN_ALUMINUM_STRUCTURES)
- [18] JOLLY, MR, A. PRABHAKAR, B. STURZU, K. HOLLSTEIN, R. SINGH, S. THOMAS, P. FOOTE a A. SHAW. *Review of Non-destructive Testing (NDT) Techniques and their Applicability to Thick Walled Composites*. Procedia CIRP [online]. 2015, 129-136 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827115008021>
- [19] *Aktivní termografie jako metoda NDT (nedestruktivního testování)*. Flir [online]. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://www.termokamery-flir.cz/aktivni-termografie-jako-metoda-ndt-nedestruktivniho-testovani/>
- [20] IBARRA-CASTANEDO, Clemente, Marc GENEST, Jean-Marc PIAU, Stéphane GUIBERT, Abdelhakim BENDADA a Xavier P. V. MALDAGUE. *Active infrared thermography techniques for the nondestructive testing of materials*. [online]. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/4a1f/76593efeea2ffb892f7b2774b7b2c9a5fab3.pdf>
- [21] ŠVANTNER, Michal a Zdeněk VESELÝ. *Active thermography for materials non-destructive testing*. In: METAL 2014 - 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. [online]. Brno, Česká Republika, 2014 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <http://metal2013.tanger.cz/files/proceedings/17/reports/2664.pdf>
- [22] *Active Thermography for Nondestructive Composites Testing*. Quality Magazine [online]. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://www.qualitymag.com/articles/91207-active-thermography-for-nondestructive-composites-testing>
- [23] *EOS M 290*. EOS [online]. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/eos-metal-systems/eos-m-290>
- [24] *Material data sheet - EOS MaragingSteel MS1*. EOS [online]. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: [https://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/1af123af9a636e61/042696652ecc69142c8518dc772dc113/EO\\_S\\_MaragingSteel\\_MS1\\_en.pdf](https://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/1af123af9a636e61/042696652ecc69142c8518dc772dc113/EO_S_MaragingSteel_MS1_en.pdf)

[25] *Material data sheet - EOS NickelAlloy IN718*. EOS [online]. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: [https://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/4528b4a1bf688496/ff974161c2057e6df56db5b67f0f5595/EOS\\_NickelAlloy\\_IN718\\_en.pdf](https://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/4528b4a1bf688496/ff974161c2057e6df56db5b67f0f5595/EOS_NickelAlloy_IN718_en.pdf)

[26] *EH PRO 6000*. Hensel [online]. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://katalog.hensel.eu/en/blitzkopf-eh-pro-6000.html>

[27] *TRIA 6000 S*. Visit [online]. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://visit.hensel.eu/en/products/tria-6000-s/>

[28] *FLIR SC7650*. FLIR [online]. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://www.flir.com/support/products/sc7650#Overview>

[29] ŠVANTNER, M., L. MUZIKA, T. CHMELÍK a J. SKÁLA. *Quantitative evaluation of active thermography using contrast-to-noise ratio*. Applied Optics [online]. 2018, [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ao-57-18-D49>

[30] MAIERHOFER, Christiane, Philipp MYRACH, Rainer KRANKENHAGEN, Mathias RÖLLIG a Henrik STEINFURTH. *Detection and Characterization of Defects in Isotropic and Anisotropic Structures Using Lockin Thermography*. Journal of Imaging [online]. 2015, 220-248 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2313-433X/1/1/220>

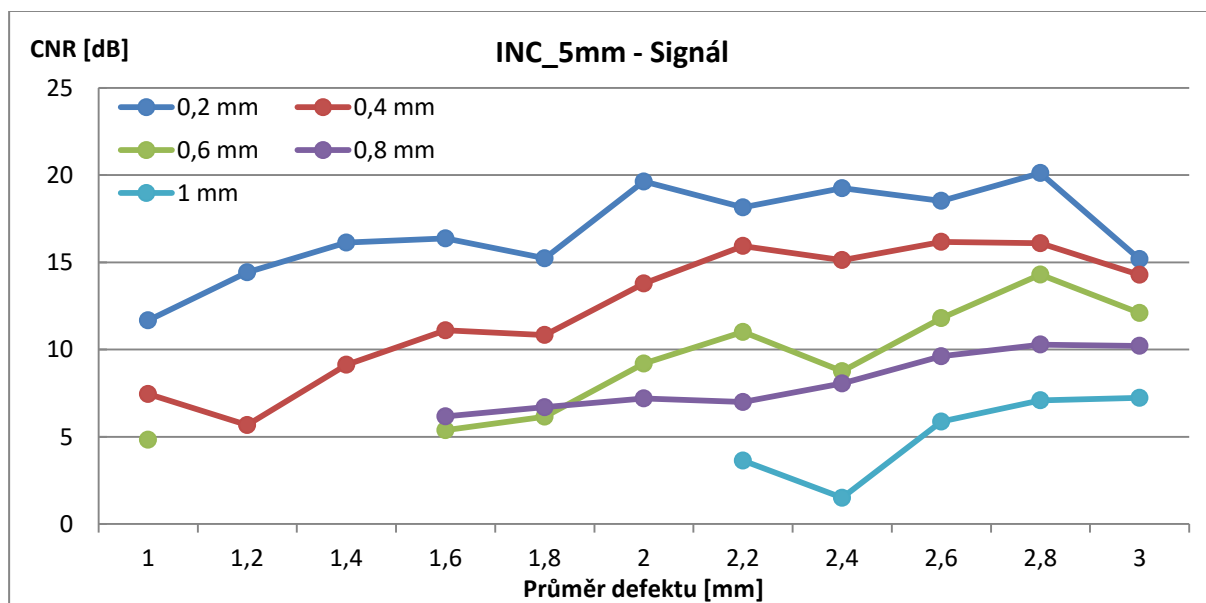
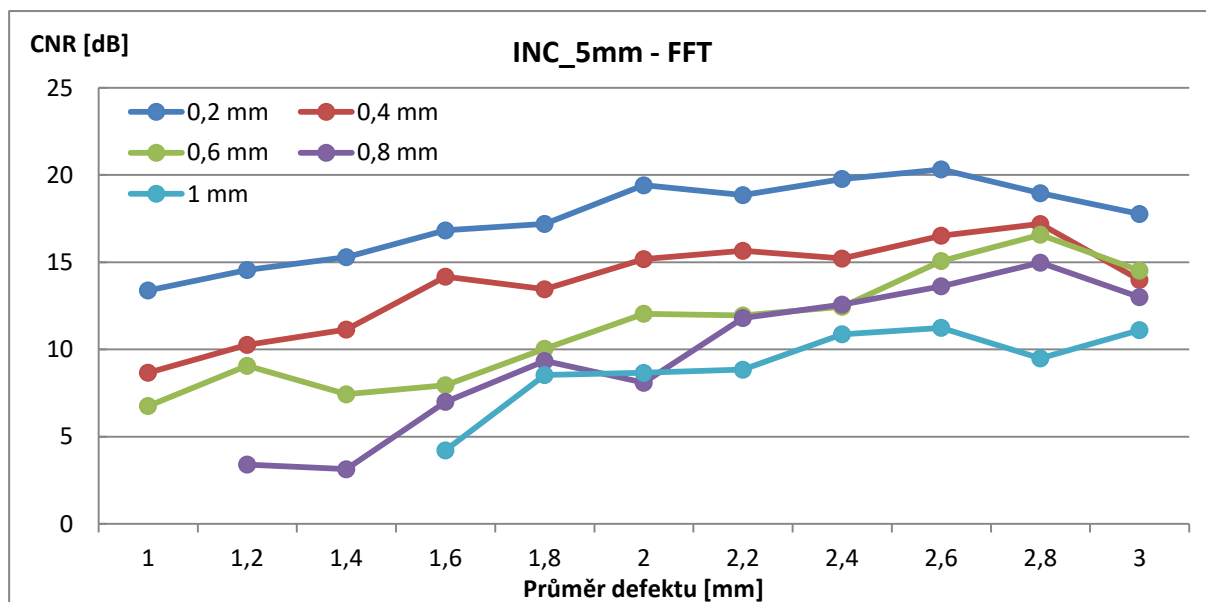
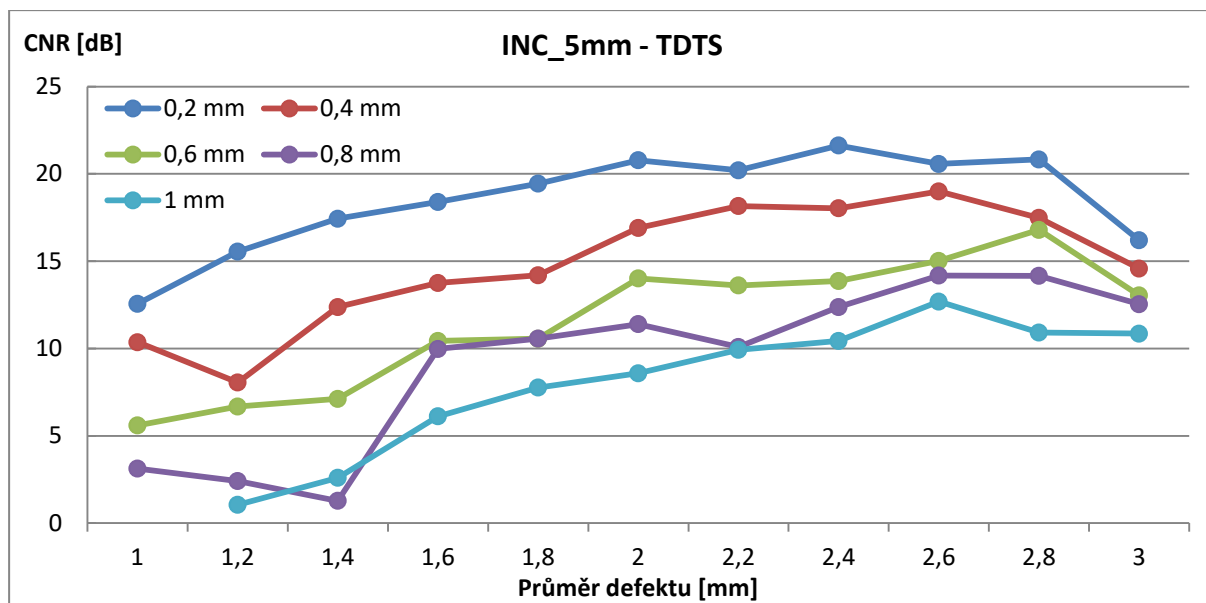
## Seznam příloh

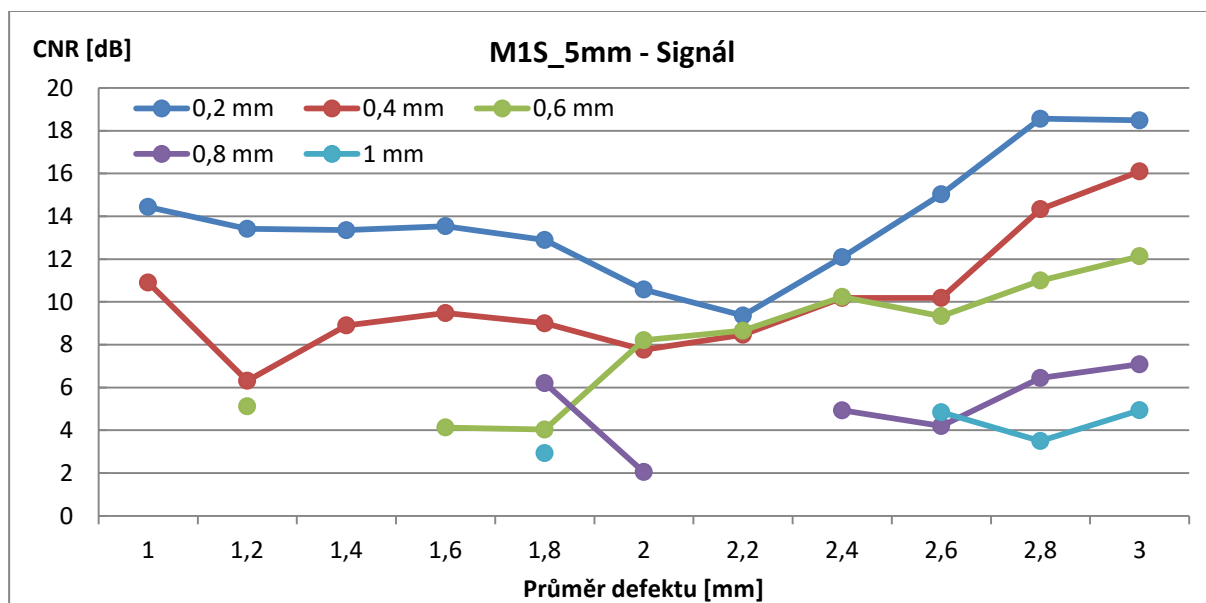
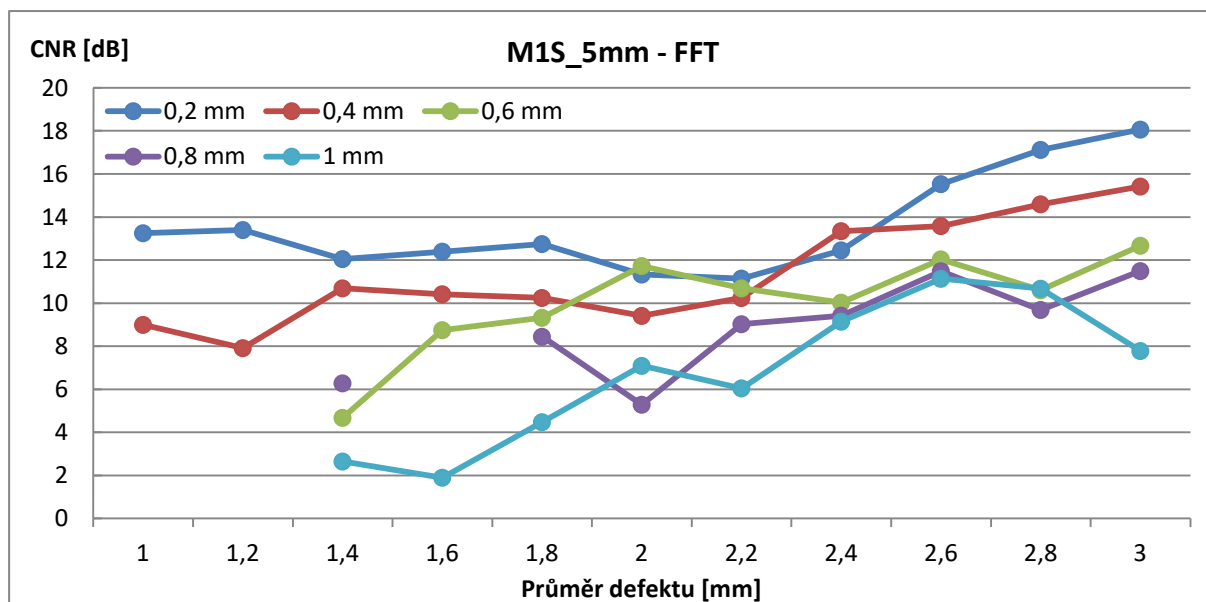
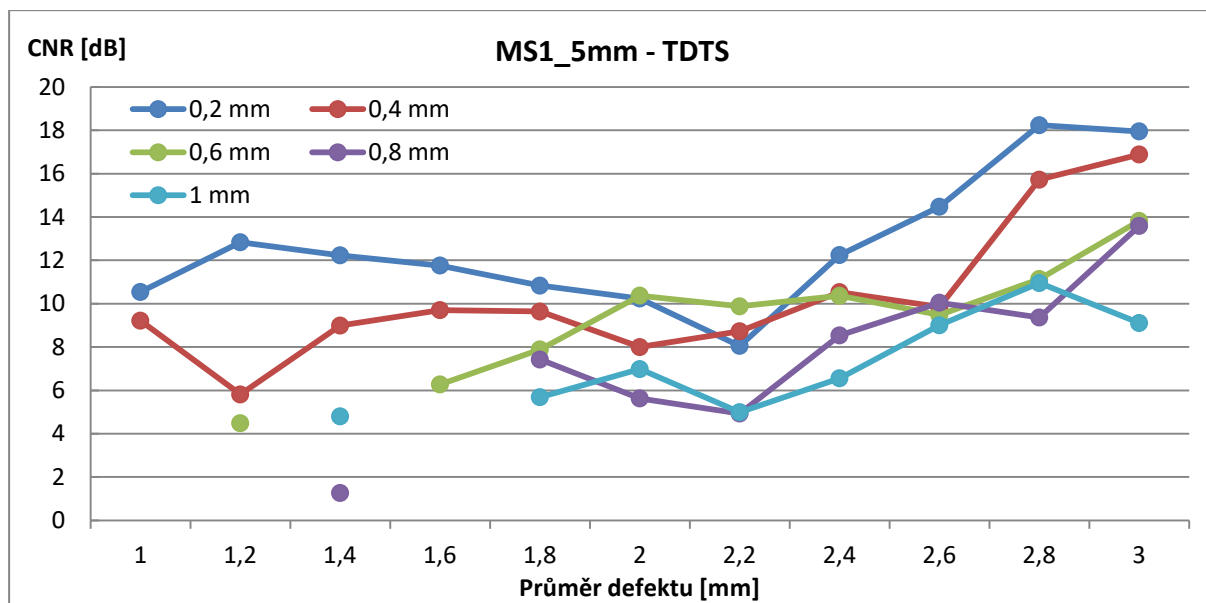
### Obsah příloh

PŘÍLOHA č. 1 .....	I
Grafy závislostí CNR na průměrech defektů pro všechny vzorky a metody.....	I
PŘÍLOHA č. 2.....	V
Grafy závislostí CNR na hloubkách defektů pro všechny vzorky a metody.....	V

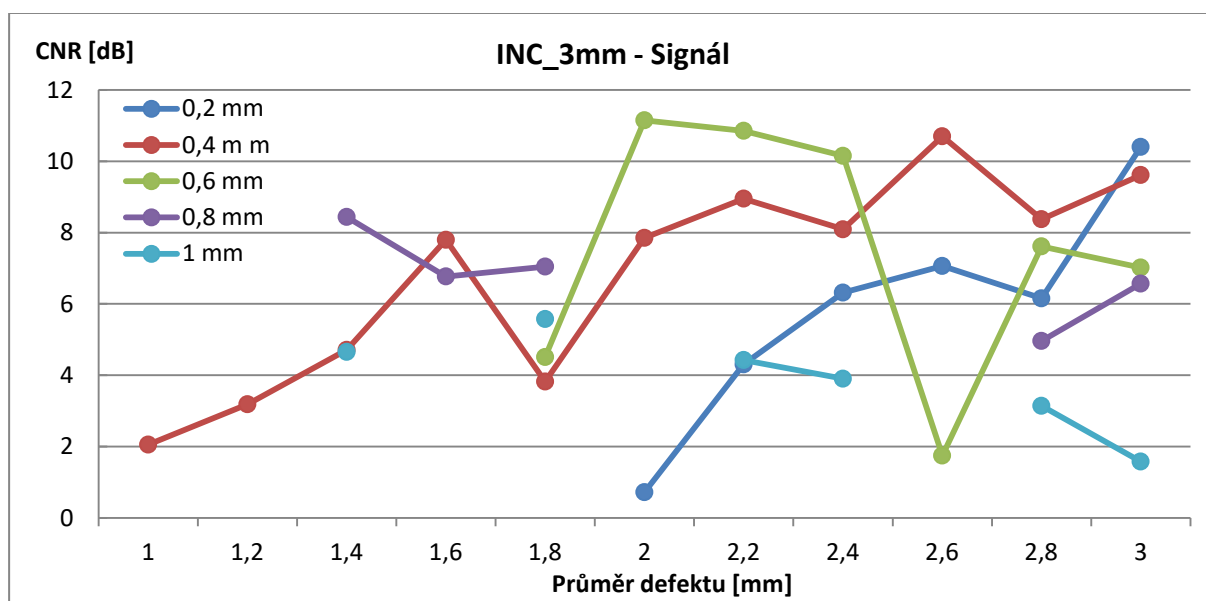
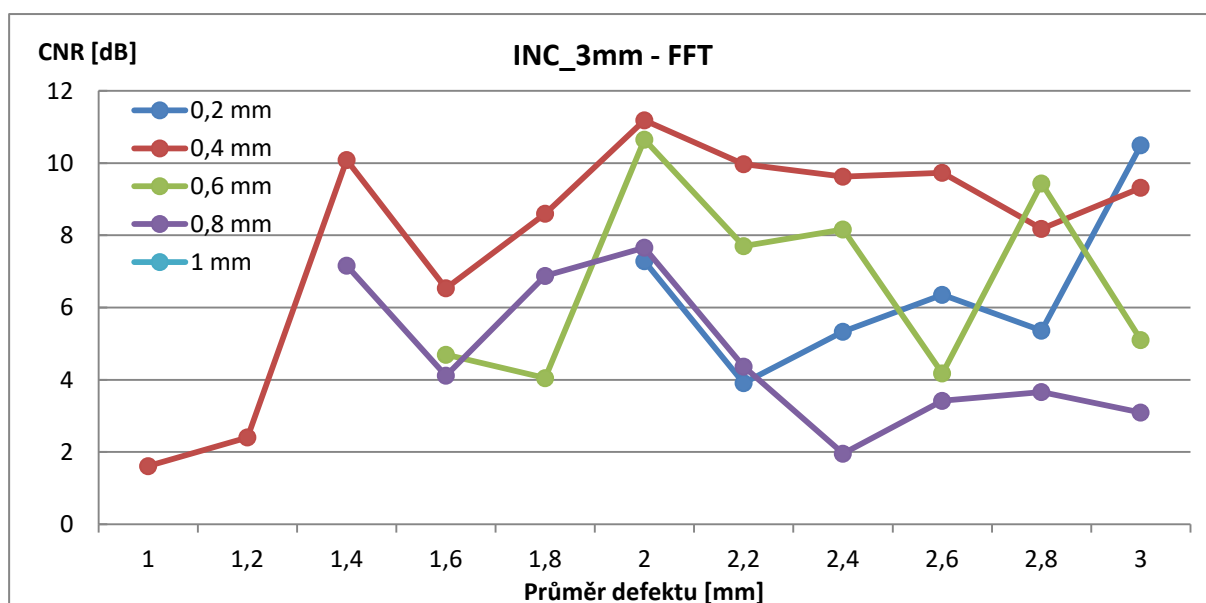
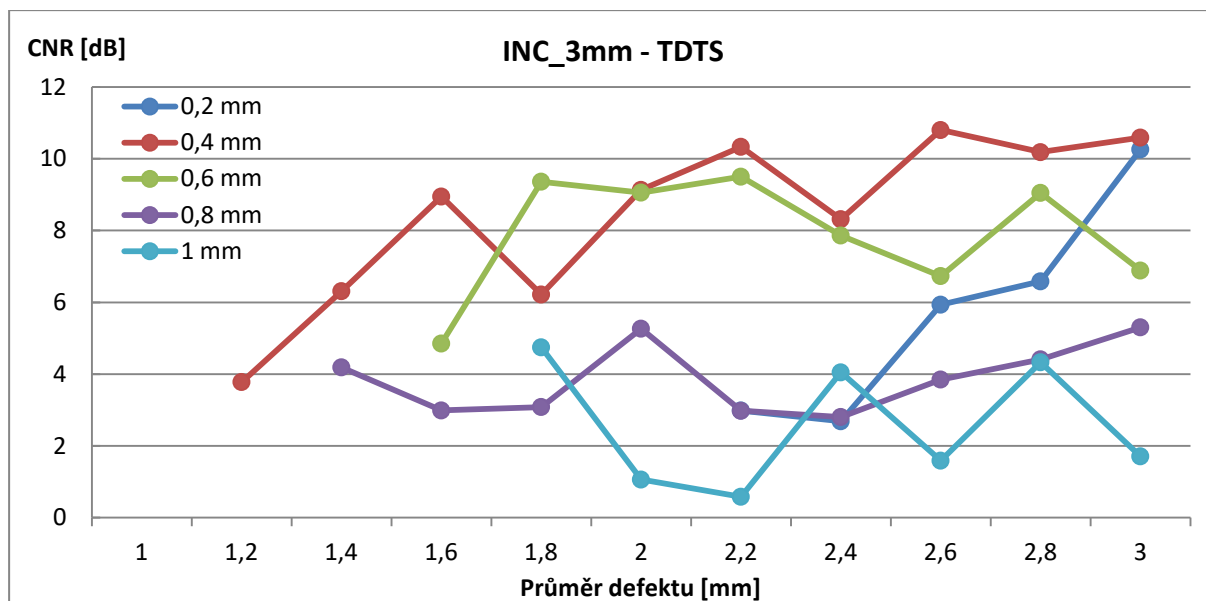
## **PŘÍLOHA č. 1**

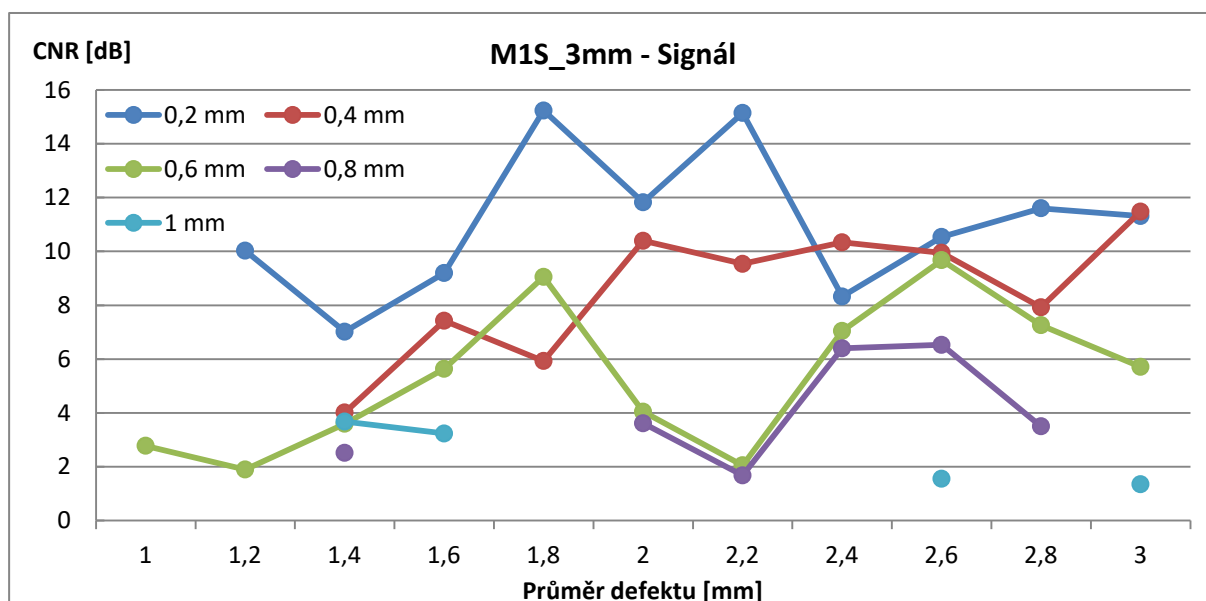
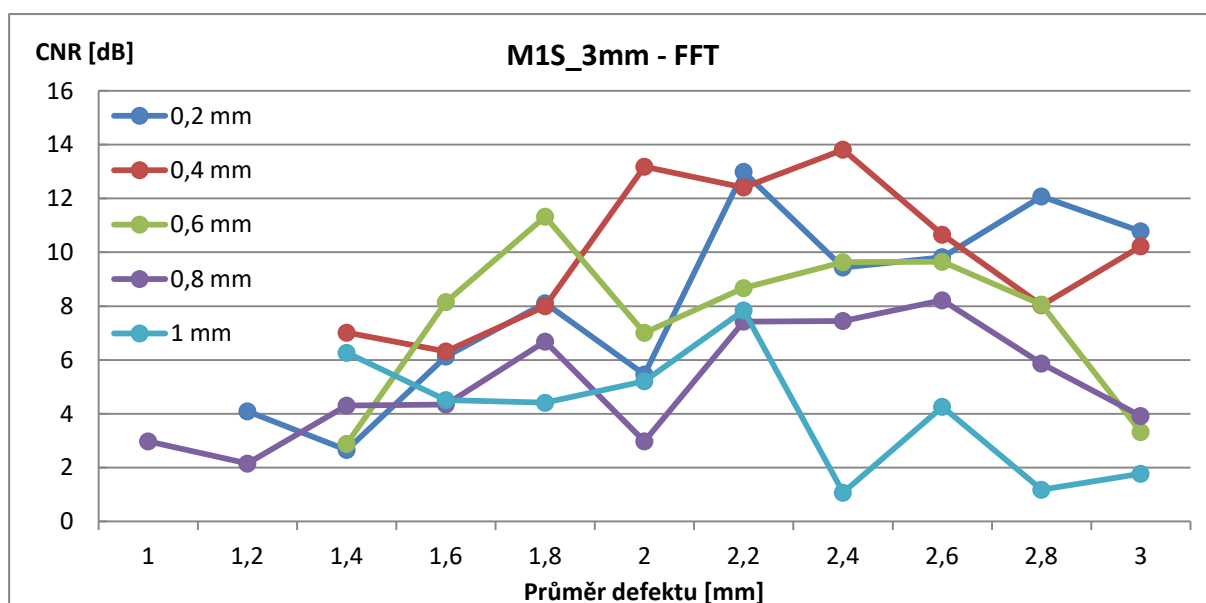
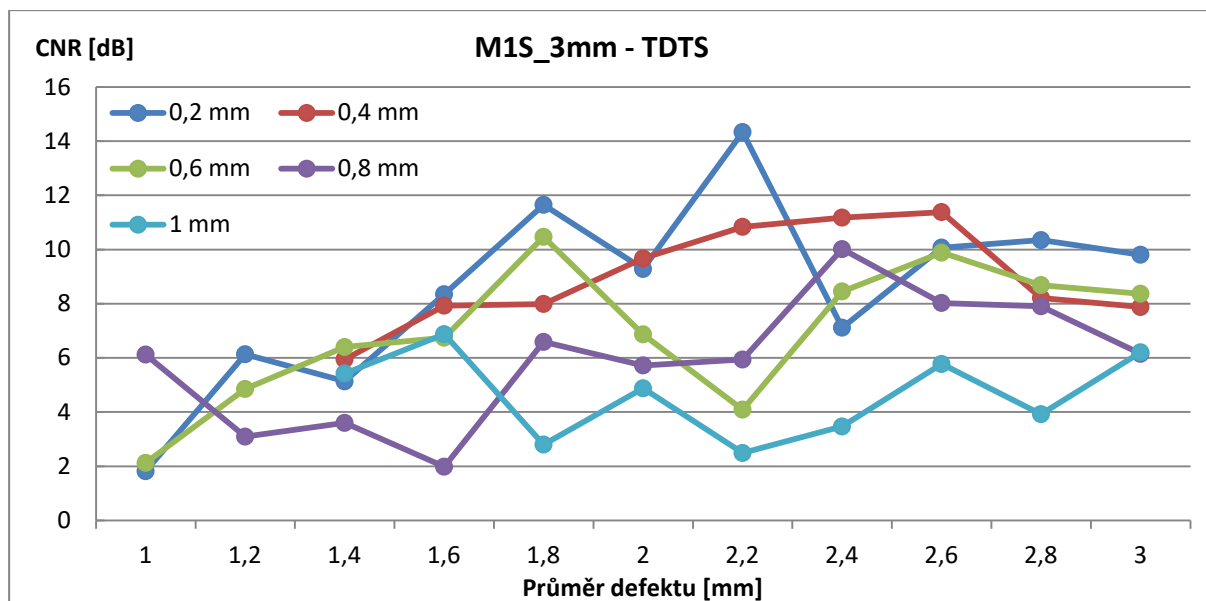
**Grafy závislostí CNR na průměru defektů pro všechny vzorky a metody**











## **PŘÍLOHA č. 2**

**Grafy závislostí CNR na hloubce defektů pro všechny vzorky a metody**

