

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie - technologie obrábění

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Termografická diagnostika technologie 3D tisku kovů

Autor: **Bc. Václav Skála**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Milan HONNER, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav SKÁLA**  
Osobní číslo: **S18N0072P**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie – technologie obrábění**  
Téma práce: **Termografická diagnostika technologie 3D tisku kovů**  
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

### Zásady pro vypracování

1. Úvod – motivace
2. Současný stav – zpracování rešerše současného stavu měření pomocí IR termografických kamer a technologií 3D tisku kovů
3. Cíle práce
4. Metody zpracování – provedení experimentů s IR měřením při 3D tisku kovů
5. Výsledky a diskuse – vyhodnocení experimentů a zhodnocení možnosti využití termografie pro diagnostiku technologie 3D tisku kovů

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

#### Seznam doporučené literatury:

- Lukas Fuchs, Christopher Eischer: In-process monitoring systems for metal additive manufacturing, EOS GmbH, Germany, White paper
- Sarah K. Everton, Matthias Hirsch, Petros Stravroulakis, Richard K. Leach, Adam T. Clare: Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing, Materials & Design, Volume 95, 2016, Pages 431-445, ISSN 0264-1275
- HOLST, Gerald C. Common sense approach to thermal imaging. Florida: JCD Publishing, 2000. 377 s. ISBN 0-9640000-7-5
- Honner M., Infračervená kvantitativní termografie ve výzkumu fyzikálních technologií, habilitační práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2004
- Rogalski, A.: Infrared detectors: status and trends, Progress in Quantum Electronics, Vol. 27, pp. 59 ?210, 2003
- Arnold Daniels, Field Guide to Infrared systems, SPIE, 2007, ISBN 0-8194-6361-2
- G. Gaussorgues, S. Chomet, Infrared Thermography, Springer Science & Business Media, 31. 12. 1993 – Počet stran: 508, ISBN 978-94-010-4306-9, ISBN 978-94-011-0711-2 (eBook), DOI 10.1007/978-94-011-0711-2

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Milan Honner, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Ing. Jiří Tesař, Ph.D.**  
Nové technologie – výzkumné centrum

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2019**  
Termín odevzdání diplomové 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>	<b>Příjmení</b> Bc. Skála	<b>Jméno</b> Václav	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	N2301 „Strojírenská technologie - technologie obrábění“		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Doc. Ing. Honner, Ph.D.	<b>Jméno</b> Milan	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Termografická diagnostika technologie 3D tisku kovů		

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

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	92	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	67	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	25
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b> <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Tato diplomová práce pojednává o problematice kombinace technologie termografie a technologie 3D tisku kovů. Na základě této problematiky jsou provedeny experimenty a rešerše pro zjištění schopnosti kontroly 3D tisku na základě termografických systémů. V této práci jsou poté jednotlivé experimenty vyhodnoceny a jsou shrnuty zásadní poznatky pro budoucí aplikování termografické technologie v kombinaci s technologií 3D tisku kovů s ohledem na její kontrolu.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Termografie, vady 3D tisku, 3D tisk, schopnost kontroly vad, emisivita, teplotní pole, termogram

## SUMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Bc. Skála	<b>Name</b> Václav	
<b>FIELD OF STUDY</b>	N2301 „Mechanical Engineering - machining technology“		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Doc. Ing. Honner, Ph.D.	<b>Name</b> Milan	
<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 diagnostics of 3D metal printing technology		

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

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

<b>TOTALLY</b>	92	<b>TEXT PART</b>	67	<b>GRAPHICAL PART</b>	25
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This diploma thesis deals with the issues of combining thermography technology and 3D metal printing technology. Experiments and research were made to determine the ability to control 3D printing proces by termographic systems. The individual experiments were evaluated and summarized for the future application of control, based on thermographic technology in combination with 3D metal printing technology.
<b>KEY WORDS</b>	Thermography, 3D printing, 3D printing, defect control ability, emissivity, temperature pole, thermogram

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat panu Doc. Ing. Milanovi Honnerovi, Ph.D. a panu Ing. Jířímu Tesařovi, Ph.D. za neocenitelné rady a vedení při zpracovávání této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům RTI a NTC za umožnění experimentů s využitím jejich zařízení.

## Obsah

Seznam obrázků .....	3
Seznam tabulek .....	5
Seznam příloh.....	5
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	5
Úvod .....	6
1. Současný stav termografie v 3D tisku .....	7
1.1. Technologie 3D tisku.....	7
1.1.1. Historie .....	9
1.1.2. Metody 3D tisku .....	10
1.1.3. Materiály .....	14
1.2. Termografická diagnostika .....	19
1.2.1. Historie termografie .....	19
1.2.2. Princip bezkontaktního měření teploty.....	22
1.2.3. Konstrukce termokamer .....	26
1.3. Termografická technologie v technologiích 3D tisku kovů .....	29
1.3.1. Vady v 3D tisku kovů.....	30
1.3.2. Současné systémy monitoringu v 3D tisku kovů .....	33
2. Cíle práce.....	40
2.1. Zpracování rešerše současného stavu využití termografického měření ve výzkumu a výrobě pomocí aditivních technologií (3D tisku). .....	40
2.2. Návrh a provedení experimentů analýzy vad pomocí krátkovlnného termografického systému .....	40
2.3. Návrh a provedení experimentů s využitím dlouhovlnného termografického systému s globálním pohledem na vyráběný díl .....	40
2.4. Návrh a provedení experimentů zjištění emisivity kovového prášku a přetaveného materiálu v závislosti na teplotě.....	40
3. Provedené experimenty .....	41
3.1. Měření termografickou kamerou pro nalezení vad procesu 3D tisku .....	41
3.1.1. Použité zařízení .....	41
3.1.2. Postup záznamu dat experimentu .....	47

3.2.	Experiment zobrazení globálního teplotního pole.....	50
3.2.1.	Použité zařízení .....	50
3.2.2.	Postup měření.....	52
3.3.	Experiment pro zjištění emisivity.....	53
3.3.1.	Použité zařízení .....	53
3.3.2.	Postup měření.....	56
4.	Analýza naměřených dat .....	58
4.1.	Měření termografickou kamerou pro nalezení vad procesu 3D tisku .....	58
4.1.1.	Příklad úplné analýzy pro vrstvu č. 2.....	59
4.1.2.	Analýza integrační doby.....	62
4.2.	Experiment zobrazení globálního teplotního pole.....	64
4.3.	Experiment pro zjištění emisivity.....	67
	Závěr.....	70
	Citovaná literatura .....	71

## Seznam obrázků

Obrázek 1.1 Podíl aplikací a využití 3D tiskáren [11] .....	7
Obrázek 1.2 Original Prusa i3 MK3S [13].....	8
Obrázek 1.3 Stereolitografický aparát SLA-1 [2] .....	9
Obrázek 1.4 RepRap tiskárna Creality Ender 5 [15].....	10
Obrázek 1.5 Schéma SLA 3D tiskárny [14].....	11
Obrázek 1.6 Schéma SLS 3D tiskárny [7] .....	12
Obrázek 1.7 Schéma DLMS 3D tiskárny [10] .....	12
Obrázek 1.8 Schéma FDM 3D tiskárny [8].....	13
Obrázek 1.9 Schéma LM 3D tiskárny [5] .....	14
Obrázek 1.10 Grafické znázornění zastoupení materiálů v 3D tisku [36].....	14
Obrázek 1.11 Jednotlivé plastové materiály pro 3D tisk [13].....	16
Obrázek 1.12 AGA 750 - První termografický systém [28].....	20
Obrázek 1.13 Termokamera FLIR ThermaCAM PM595 [29].....	21
Obrázek 1.14 Záření využívané pro bezdotykové měření teploty [24] .....	22
Obrázek 1.15 Schéma parametrů ovlivňující měření .....	23
Obrázek 1.16 Planckův vyzařovací zákon [27].....	24
Obrázek 1.17 Propustnost optických materiálů v závislosti na vlnové délce [1] .....	25
Obrázek 1.18 Propustnost optických materiálů v závislosti na vlnové délce [1] .....	25
Obrázek 1.19 Propustnost atmosféry v závislosti na vlnové délce [25] .....	26
Obrázek 1.20 Schéma konstrukce termokamery [31] .....	26
Obrázek 1.21 Sférické a Asférické čočky [32].....	27
Obrázek 1.22 Princip bolometrického detektoru [33] .....	28
Obrázek 1.23 Blokové schéma mikrobolometrického detektoru [33].....	28
Obrázek 1.24 Porozita dle jednotlivých vlivů [16] .....	30
Obrázek 1.25 Druhy vaporizace materiálu práškového lože [17] .....	31
Obrázek 1.26 Roztržení titanové části během procesu 3D tisku důsledkem zbytkového napětí [16] .....	31
Obrázek 1.27 "Klíčová dírka" tvořená během fúze laseru s práškovým ložem [18] .....	33
Obrázek 1.28 Software EOSTATE MeltPool Monitoring [19].....	34
Obrázek 1.29 Software EOSTATE Exposure OT [19] .....	35
Obrázek 1.30 Porovnání MPM a OT a mikroskopického snímku [19].....	36
Obrázek 1.31 Schéma QM Meltpool 3D systému [6] .....	37
Obrázek 1.32 Schéma QM Coating systému [6].....	38
Obrázek 1.33 Schéma MPM, LCS, LPM systémů od společnosti SLM SOLUTIONS GROUP AG [26] .....	39
Obrázek 3.1 Termografická kamera MCS640 [47].....	41
Obrázek 3.2 Schéma konfigurace propojení kamery se softwarem [46].....	43
Obrázek 3.3 EOS M 290 [43] .....	44
Obrázek 3.4 Vytisknutý model z MS1 [42].....	46
Obrázek 3.5 Termografická kamera umístěná nad průřezem do pracovního prostoru.....	47
Obrázek 3.6 Tisknutý model pro měření vad při 3D tisku .....	48
Obrázek 3.7 Schéma vad (dutin) v modelu .....	48
Obrázek 3.8 Zaznamenaný termogram pro jednu z vrstev s vadami.....	49
Obrázek 3.9 Termografická kamera FLIR A615 [40].....	50
Obrázek 3.10 Software LabIR [45].....	51
Obrázek 3.11 Vytisknutý model frézovací hlavy "Kraken" [44].....	52
Obrázek 3.12 Plošný zdroj tepla a regulátor .....	53



Obrázek 3.13 Schéma modelu pro měření emisivity.....	54
Obrázek 3.14 Závislost pásmové emisivity na úhlu pro vybrané teploty pro pásmo 7,5 - 13 $\mu\text{m}$ [45].....	55
Obrázek 3.15 Spektrální závislost propustnosti [45].....	55
Obrázek 3.16 Spektrální závislost emisivity pro vybrané teploty [45].....	56
Obrázek 3.17 Model s nanesenou barvou a práškem .....	56
Obrázek 3.18 Model umístěný na topné desce.....	57
Obrázek 3.19 Model se zoxidovaným práškem .....	57
Obrázek 4.1 Ukázka složeného snímku a vyhodnocení záznamu exportovaného v Excelu .....	58
Obrázek 4.2 Příklad porovnání modelu se zaznamenanými daty.....	59
Obrázek 4.3 Termogramy pro 2 vrstvu – testovací rychlost .....	59
Obrázek 4.4 Termogramy pro 2 vrstvu – standardní rychlost.....	60
Obrázek 4.5 Exportovaná a sloučená data pro standardní rychlost (obdobně jako na obrázku č. 4.1).....	60
Obrázek 4.6 Exportovaná a sloučená data pro testovací rychlost (obdobně jako na obrázku č. 4.1).....	61
Obrázek 4.7 Porovnání modelů (bíle skutečně vytištěná část, mezery vyznačují hledané vady, červeně jsou odchylky od modelu) .....	61
Obrázek 4.8 Grafické porovnání dráhy laseru během integrační doby .....	63
Obrázek 4.9 Průběh integrační doby během snímku termokamery.....	63
Obrázek 4.10 Termogram – pohled základna+díl-R1 (snímek 1747).....	64
Obrázek 4.11 Termogram – pohled základna+díl-R1 (snímek 1747) – Použití funkce Hold Max.....	65
Obrázek 4.12 Termogram – pohled základna+díl-R2 – (snímek 1747).....	65
Obrázek 4.13 Termogram – pohled základna+díl-R2 – (snímek 1747) – použití funkce Hold Max .....	66
Obrázek 4.14 Rozdělené oblasti dle modelu, připravené k analýze .....	67
Obrázek 4.15 Graf závislosti emisivity na teplotě (prášek byl zoxidovaný).....	68
Obrázek 4.16 Graf závislosti emisivity a teploty (prášek započal oxidaci přibližně při ohřevu na 301°C).....	68

## Seznam tabulek

Tabulka 1.1 Rozdělení metod 3D tisku dle materiálu .....	8
Tabulka 1.2 Přehled kovových materiálů pro 3D tisk [38] .....	17
Tabulka 3.1 Specifikace termokamery MIKRON MCS640 .....	42
Tabulka 3.2 Specifikace objektivu .....	42
Tabulka 3.3 Parametry EOS M290 .....	45
Tabulka 3.4 Přehled vlastností MS1 .....	46
Tabulka 3.5 Výpis funkcí softwaru LumaSpec RT .....	43
Tabulka 1.16 Jednotlivé záznamy měření vad .....	49
Tabulka 1.1 Parametry IR kamery FLIR A615.....	50
Tabulka 4.1 Známé údaje pro analýzu integrační doby.....	63
Tabulka 4.2 Dopočítaná dráha laseru během integrační doby.....	63
Tabulka 4.3 Přehled emisivit.....	69

## Seznam příloh

Příloha č. 1 Výsledky 1. experimentu pro měření vad při 3D tisku kovů termografickou kamerou

Příloha č. 2 Propustnost filtrů 780 -1080nm

Příloha č. 3 Výsledné grafy 3. experimentu pro získání emisivity materiálu MS1

Příloha č. 4 Termogramy pro porovnání z 2. experimentu pro zobrazení globálního teplotního pole

## Přehled použitých zkratk a symbolů

Zkratka / Symbol	Celý název / Význam
sCMOS	<i>scientific Complementary metal-oxide-semiconductor</i>
3D	Trojdimenzionální
IR	Infrared (Infračervený)
ROIC	rychlé integrované vyčítací obvody
QWIP	Quantum Well Infrared photodetector
CAD	Computer-aided design
NIR	(Blízké infračervené záření)
SPRITE	Signal Processing In The Element
FPA	Focal plane array
ROI	Region of interests (oblasti zájmu)
2D	Dvojdímenzionální

## Úvod

V současné době je technologie 3D tisku jako celek na velkém vzestupu a každým rokem se tato oblast posouvá více kupředu, a to nejen ve strojírenství, ale i ve zdravotnictví, stavebnictví a dalších oborech. Podstatou 3D tisku je vytvářet trojrozměrné objekty tak, že se postupně vrstvu po vrstvě nanáší materiál, čímž vznikají různé rozličné tvary podle CAD předlohy. Existuje mnoho metod aditivních technologií, které jsou popsány v první kapitole této diplomové práce. Možnosti použitelných materiálů se neustále zvětšují, stejně jako přesnost a kvalita tisku, která souvisí se zdokonalováním kontroly procesu 3D tisku. Se zvyšujícími se technologickými možnostmi a kvalitou se dnes používá převážně pro tvorbu složitých konečných součástí, které je obtížné nebo i nemožné vyrobít jinou technologií. K dosažení požadované kvality při výrobě těchto součástí je kladen velký důraz na kvalitu samotného procesu 3D tisku.

Kvalita 3D tisku dnes bývá zajištěna různými systémy pro analýzu tisknutého celku. Tyto systémy nám umožňují vyvarovat se přílišné zmetkovitosti a ztráty spotřebovaného času na řešení problémů s tím spojených. Dnes již existuje několik druhů těchto systémů, které využívají termografické technologie. Tyto technologie umožňují komplexní analýzu procesu 3D tisku, a tak zajišťují účinná nápravná opatření k dosažení požadované kvality. Princip této technologie je dále vysvětlen v první kapitole. S ohledem na využívání takovéto technologie je praktická část zaměřena na provedení a vyhodnocení experimentů, které umožňují posouzení vhodnosti kontroly 3D tisku kovů termografickými technologiemi.

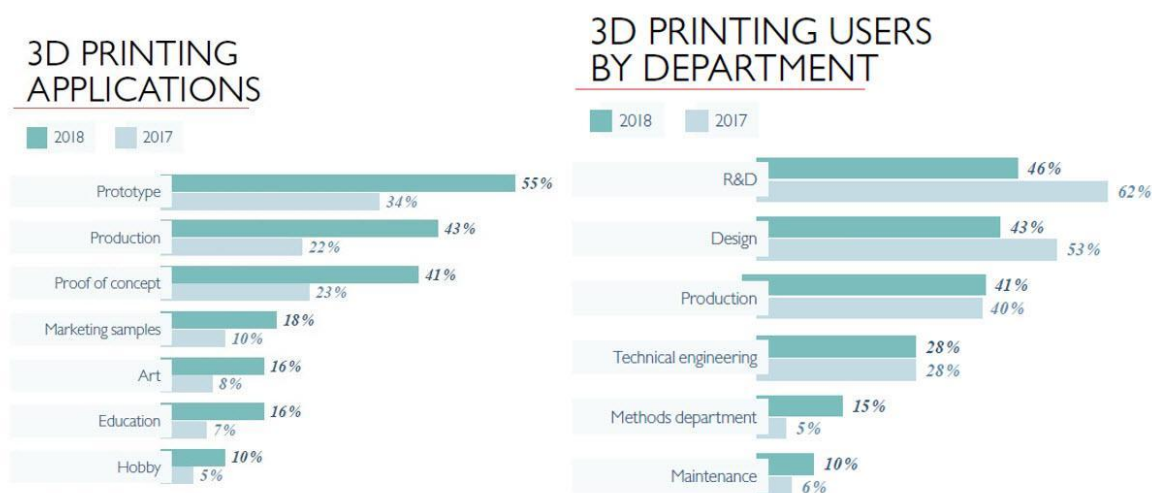
První kapitola se zabývá rozbohem současného stavu nejprve v oblasti aditivních technologií, dále pak termografických technologií a následně řešením jejich vzájemné kombinace. V druhé kapitole je popsán cíl práce a zadání pro návrhy experimentů. Ve třetí kapitole v první části je podrobný popis navržených experimentů. Ve čtvrté kapitole je provedena analýza naměřených dat z provedených experimentů a jejich vyhodnocení. Dále následuje závěrečné zhodnocení a shrnutí výsledků diplomové práce.

# 1. Současný stav termografie v 3D tisku

Tato kapitola uvádí současný stav v oblasti 3D tisku a termografické diagnostiky a jejich vzájemného propojení.

## 1.1. Technologie 3D tisku

Technologie 3D tisku je proces, při němž vzniká výrobek postupným nanášením tenkých vrstev na sebe na místo klasického odebrání materiálu z polotovaru. Materiál se vrství a spéká, popřípadě lepí, kdy cílem tohoto procesu je vytvoření objektu ze série 3D dat. Velkou výhodou takto zhotovených výrobků je možnost dosáhnout tvarově složitých součástí, které nelze, popřípadě lze příliš složitě vytvořit standardními metodami. Další výhodou je v závislosti na metodě 3D tisku rychlost zhotovení výrobku, či jen zhotovení prototypových modelů pro návrh a posouzení další výroby [2].



Obrázek 1.1 Podíl aplikací a využití 3D tiskáren [11]

V celém světě dochází k obrovskému rozvoji technologií 3D tisku v celé řadě oborů (viz obrázek 1.1). Termín 3D tisk se díky mediální osvětě stal obecně známým pojmem. Trh technologií 3D tisku na celém světě výrazně vzrostl. Dochází k velkému růstu v oblasti low-cost osobních zařízení ta jsou levná a dostupná pro různorodé aplikace (v závislosti na zakoupených modulech) v oblasti 3D tisku (např. Průša tiskárny obrázek č. 1.2).



Obrázek 1.2 Original Prusa i3 MK3S [13]

V současnosti existuje celá řada metod technologií 3D tisku lišící se od sebe způsobem, jakým jsou vytvářeny jednotlivé vrstvy modelu a použitými materiály. Technologie 3D tisku lze tedy klasifikovat mnoha způsoby, jeden z nejrozšířenějších je dle vstupního materiálu. Příklad takového rozdělení viz. Tabulka č. 1.1.

Tabulka 1.1 Rozdělení metod 3D tisku dle materiálu

Základní technologie 3D tisku	Zkratka	Materiál
Stereolitografie	SLA	Fotopolymer
Solid Ground Cutting	SGC	Foropolymer, nylon
Selective Laser Sintering	SLS	Polyamid, nylon, kovové prášky
Direct Metal Laser Sintering	DMLS	Kovové prášky
Laminated Object Manufacturing	LOM	Papír s jednostranným pojivem
Fused Deposition Modeling	FDM	ABS, vosk, polykarbonát
Multi Jet Modeling	MJM	Termopolymer, fotopolymer
Polyjet Matrix	PM	Fotopolymer
Thermoplastic inkjet with milling	TIWM	Termoplastický vosk
Digital light projection	DLP	Fotopolymer

Díky rozvoji technologií 3D tisku je dnes možné je využít například k vytvoření prostorových modelů neboli prototypů s cílem získání subjektivní představy o celkovém provedení a tvaru. Dále k vývoji součástí a optimalizace výrobku, kdy lze každý v kterékoli fázi vývoje v krátkém časovém intervalu jednoduše vyrobit. Můžeme tak zajistit kontrolu

správnosti nebo synchronizaci a v případě nedostatků následně koordinovat další vývojové fáze.

### 1.1.1. Historie

Na začátku 90. let se začal používat pojem aditivní technologie pro takzvaný rapid prototyping (RP). Prototypy nabízí možnost výzkumu a testování daných objektů z blízka a fyzicky si je vyzkoušet, než začne samotná výroba součástí. RP umožňuje mnohem rychlejší výrobu prototypů, často trvající jen několik hodin v závislosti na složitosti designu součástí. V RP jsou modely vytvářeny pomocí CAD (computer-aided design) systémů, kde stroje vyrobí prototyp pomocí vytvořeného modelu. Proces konstrukce tisknutí vrstev součástí je dnes známý jako 3D tisk. Iniciativa 3D tisku vznikla v MIT (Massachusettský technologický institut) ve společnosti 3D systems. Na začátku 90. let vzniklo na MIT certifikované označení 3D tisku, jako 3DP (3D printing) a tím začala historie 3D tisku [2].

Společnost 3D systems v čele se spoluzakladatelem Chuckem Hullem představila v roce 1986 množství 3D technik. Některé z těchto technologií, jako například stereolitografie (SLA) byla patentována a dostala ochrannou známku. Před koncem 90. let pak Hull pod hlavičkou společnosti 3D systems vytvořil první zařízení tisknoucí ve 3D formátu pro širokou veřejnost, tzv. stereolitografický aparát SLA-1 [2].



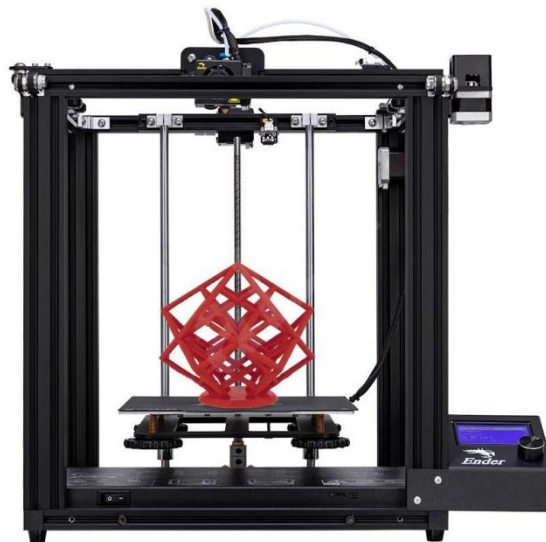
Obrázek 1.3 Stereolitografický aparát SLA-1 [2]

V té době se toto zařízení nenazývalo 3D tiskárna, nicméně modely SLA se staly základem vývoje dnešních 3D tiskáren. V roce 1987 si Carl Deckard nechal patentovat RP proces pod názvem Selective Laser Sintering (SLS). Tento patent byl vydaný v roce 1989 a technologie SLS byla později licencovaná na DTM Inc, kterou později získala společnost 3D systems. Tentýž rok 1989 si nechal Scott Crump, spoluzakladatel společnosti Stratasys Inc., patentovat technologii Fused Deposition Modelling (FDM), který byl vydaný v roce 1992. V



roce 1993 MIT patentoval technologii trojrozměrných tiskařských technik, která pracovala s práškovým materiálem a tekutým spojovačem. Licenci k této technologii poté koupila firma Z Corporation a na jejím základě započal vývoj 3D tiskáren jako takových. Pojem 3D tiskárna tedy pochází až z druhé poloviny 90. let [2].

Jedno z nejdůležitějších období v novodobé historii 3D tisku začalo v roce 2005, kdy byl v Anglii na University of Bath založen projekt RepRap doktorem Adrianem Bowyerem. Název RepRap je zkratkou pro *replicating rapid prototyper*, což znamená, že je schopný sebereplikace a rychlého prototypování. Veškerá dokumentace, firmware a řídicí software potřebné pro sestavení a provoz RepRapu jsou uvolněny pod licencí GNU (General Public License). Ideou Adriana Bowyera bylo navrhnout 3D tiskárnu, která dokáže vytisknout co nejvíce vlastních součástí. Od začátku byl projekt Open Source, což umožnilo nadšencům z celého světa zapojení do spolupráce. Díky tomu jsou nyní RepRap tiskárny nejrozšířenějším druhem tiskáren na celém světě. Příklad RepRap tiskárny viz obrázek č. 1.4 [3] [30].



Obrázek 1.4 RepRap tiskárna Creality Ender 5 [15]

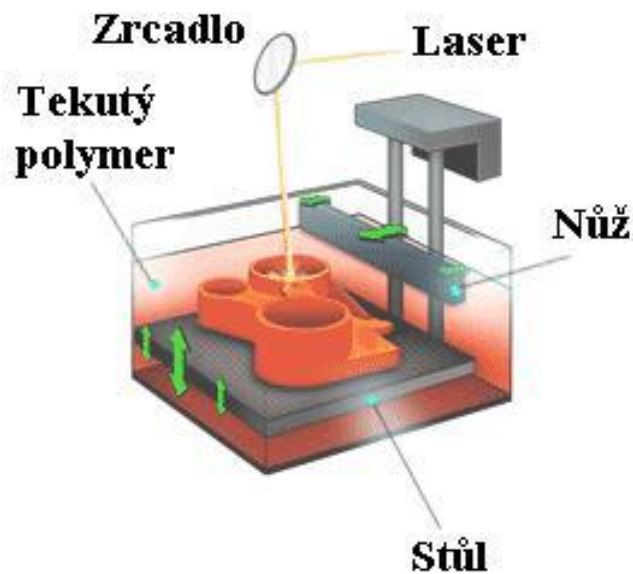
### 1.1.2. Metody 3D tisku

V této podkapitole jsou podrobněji popsány nejrozšířenější druhy technologií 3D tisku používaných v průmyslové výrobě.

- **Stereolitografie (SLA)**

Stereolitografie využívá principu tvrzení fotopolymerických pryskyřic ultrafialovým světlem (laserem, popřípadě digitálním projektorem). Tato pryskyřice je tedy vytvrzována po vrstvách, jejichž tvar vždy odpovídá dané vrstvě řezu STL modelu (formát pro CAD systémy). Díky její dostupnosti se jedná o jednu z nejpoužívanějších metod 3D tisku, obzvláště pak pro výtisky s ostrými detaily a hladkými povrchy. Uplatnění má zejména v designu, průmyslu a výrobě, zubním lékařství apod. Nabídky SLA tiskáren se neustále

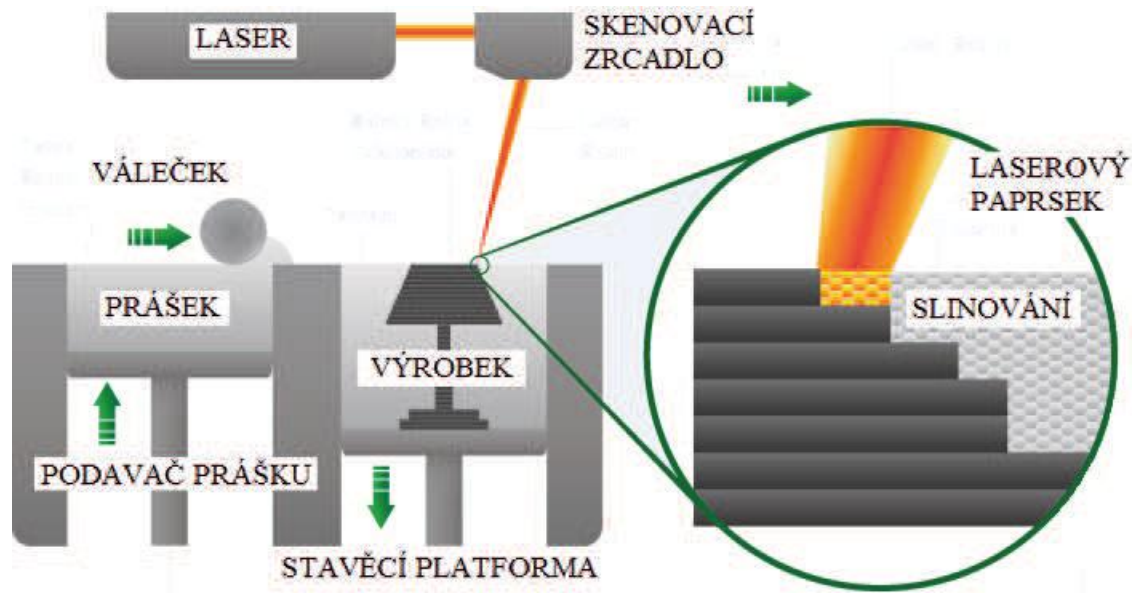
rozšiřují. Většina používaných pryskyřic se vyznačuje snadným dodatečným opracováním i barvením [4].



Obrázek 1.5 Schéma SLA 3D tiskárny [14]

- **Selective Laser Sintering (SLS)**

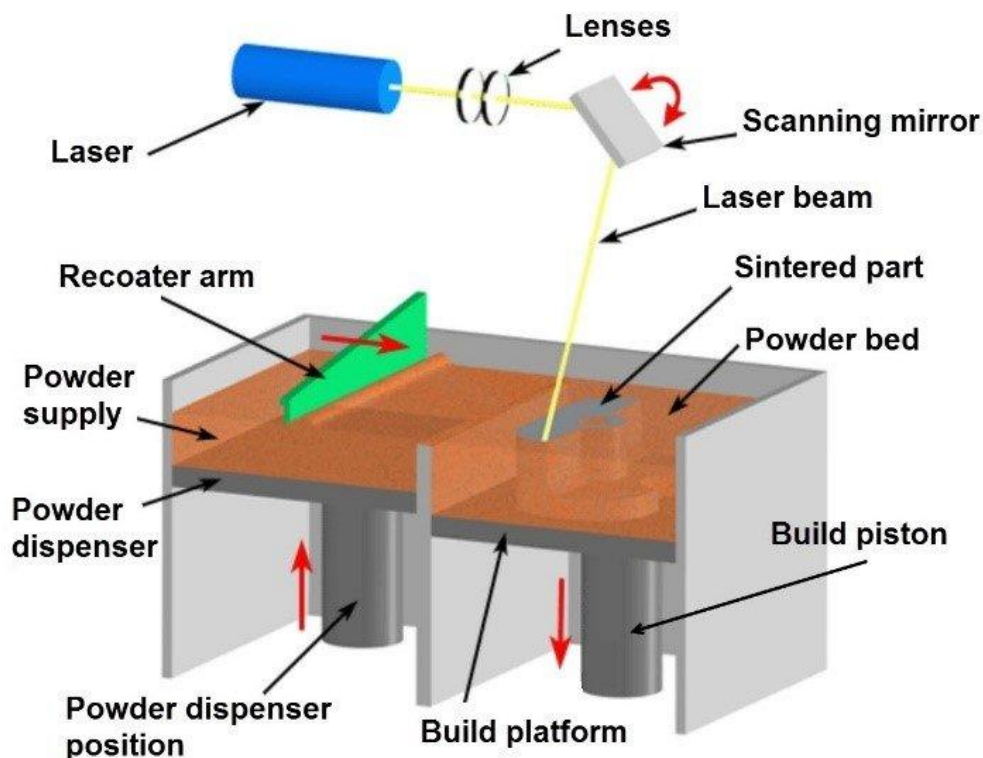
Metoda je podobná jako SLA, ale vytvrzuje se práškové médium. SLS je tedy technologie, kde se laserovým paprskem spéká do určitého tvaru materiál ve formě prášku (kovový, plastový). Přídavný materiál je nanášen na nosnou desku v ochranné atmosféře po vrstvách. Podle souřadnicového systému je řízená skenovací hlava, která vede laserový paprsek povrchem prášku. V místě působení laseru se pak materiál roztaví nebo zapeče. Okolní nezapečený materiál slouží jako nosná konstrukce. Výroba součástí probíhá po vrstvách. Lze použít kterýkoliv prášek, který se vlivem působení tepla roztaví nebo měkne. V současnosti se používají například termoplasty (polyamid, polykarbonát, polystyrén) nebo kovové prášky (povlakovaný ocelový prášek). Ve většině případů je ale daný stroj uzpůsobený k danému materiálu (nelze kombinovat tisk plastů na tiskárně pro kovy). Proto se SLS dále rozděluje dle používaných prášků [2].



Obrázek 1.6 Schéma SLS 3D tiskárny [7]

- **Direct Laser Metal Sintering (DLMS)**

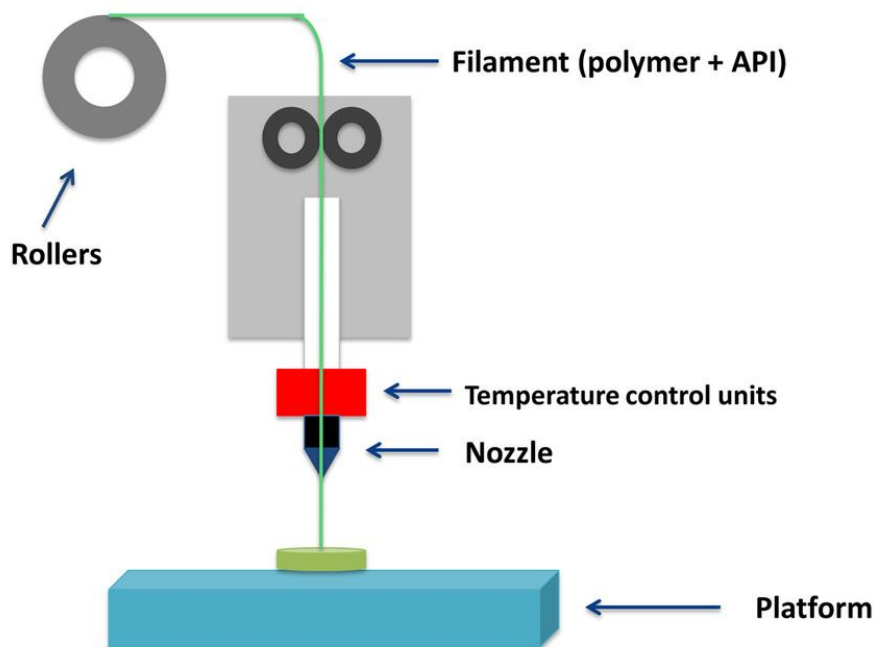
DLMS slouží pro 3D tisk z kovových materiálů, a to postupným nanášením tenkých vrstev od spodní části po horní do podoby 3D modelu. Principem je podobná SLS, kdy je materiál spékán v podobě prášku vrstvu po vrstvě pomocí laseru. Rozdílem je teplota, při které vzniká model. U SLS se například teploty pro polyamid pohybují okolo 180°C, zatímco kovový prášek u DLMS potřebuje teplotu kolem 1550°C. Je tedy nutné mít laser s vysokým výkonem [9].



Obrázek 1.7 Schéma DLMS 3D tiskárny [10]

- **Fused Deposition Modelling (FDM)**

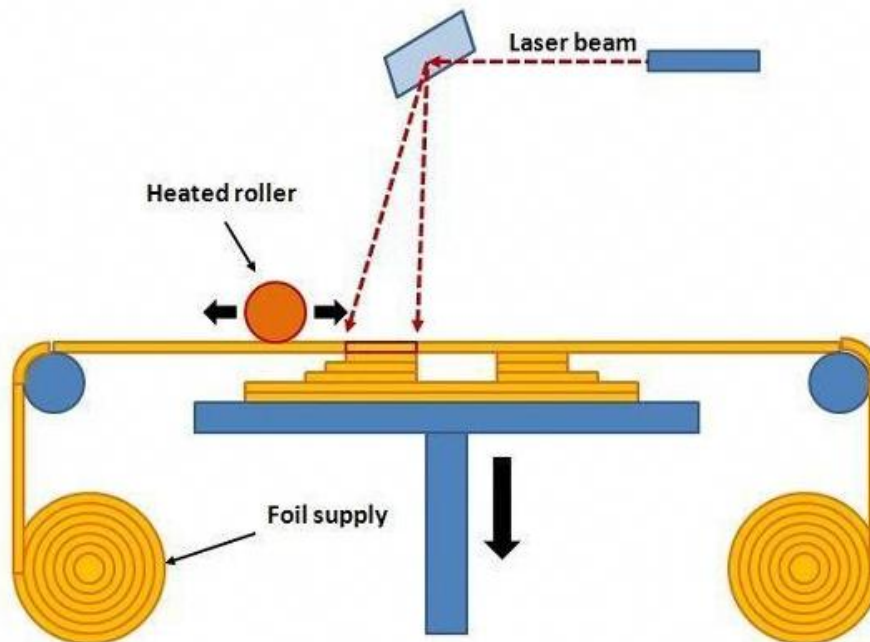
FDM je kompromisem mezi odolností modelu, rychlostí tisku a její přesností. Model se tvoří nanášením jednotlivých vrstev. Materiál ve tvaru tenkého vlákna vychází z vyhřívané trysky, která se pohybuje nad pracovním prostorem. V trysce se materiál ohřívá na teplotu vyšší, než je jeho teplota tavení. Při styku s povrchem tvořeného modelu se vlákna spojují a vytváří tak požadovanou ultratenkou vrstvu, která tak tuhne. Model se tedy vytváří na nosné desce, která se sníží po nanesení o hloubku vrstvy (lze se setkat s variantami, kde pohyb v ose Z vytváří vyhřívaná tryska). Je nutné vytvářet podpůrné konstrukce pro zachování stability vytvářeného modelu. S výhodou je tato metoda uplatňována pro 3D tiskárny pro širokou veřejnost, neboť je relativně jednoduchá a vytvářený model obvykle nepotřebuje další obráběcí operace [2].



Obrázek 1.8 Schéma FDM 3D tiskárny [8]

- **Laminated Manufacturing (LM)**

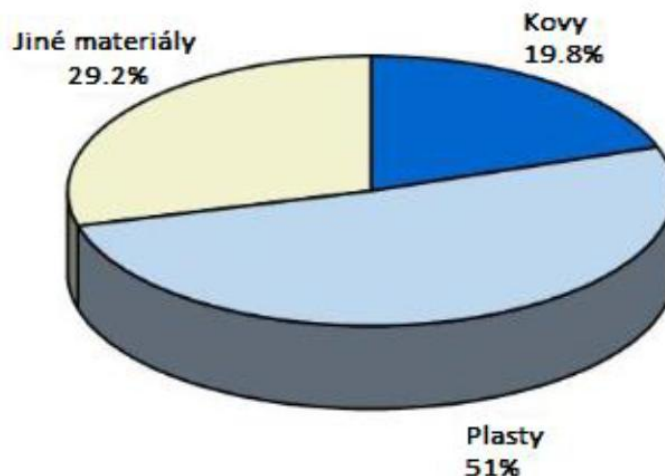
LM se s výhodou používá pro rychlé zhotovení modelu prototypu (rapid prototyping), neboť se model sestavuje z plastových, popřípadě papírových folií, které jsou oříznuty do správného tvaru laserem. Model je vytvářen na vertikálně se pohybující podložce. Na nanesenou a vyřezanou vrstvu se natáhne folie opatřená vrstvou polyetylenu, která se přitlačí soustavou vyhřívaných válců, a tím zajistí slepení obou vrstev. Paprskem laseru je poté vyřezán požadovaný obrys vytvářené vrstvy. Přebytečná folie je nařezána laserem a odstraněna. Po vytvoření vrstvy podložka klesne o tloušťku folie a postup se opakuje do té doby, dokud nedostaneme kompletní vytisknutý model. Nevýhodou této metody je velké množství odpadu [2].



Obrázek 1.9 Schéma LM 3D tiskárny [5]

### 1.1.3. Materiály

Volba vlastních materiálů pro 3D tisk závisí tedy na 3D tiskárně, a to jakou z uvedených metod 3D tisku poskytuje. Dále každý výrobce 3D tiskáren má doporučené materiálové listy, které jsou pro danou 3D tiskárnu vhodné. Pro přehled jsou zde uvedeny nejpoužívanější materiály pro 3D tisk obecně. Na obrázku 1.10 lze vidět přibližné zastoupení materiálů v oblasti 3D tisku.



Obrázek 1.10 Grafické znázornění zastoupení materiálů v 3D tisku [36]

### Plasty

Plastové materiály patří mezi nejvíce využívané materiály v oblasti 3D tisku. Existuje celá řada plastových materiálů s rozličnými vlastnostmi. Mezi nejpoužívanější plastové materiály například patří: [13] [37] [41]

- **ABS (Akrylonitrilbutadienstyren)**

Jedná se o velmi pevný amorfnní termoplastický polymer. Je odolný proti kyselinám, hydroxidům a vydrží do teplot pod 100°C. Teplota zpracování je 210 - 250 °C. Nevýhodou tohoto materiálu je vysoká smrštitelnost (0,3-0,7 %) oproti ostatním materiálům. Tento materiál lze lepit pomocí toulenu, acetonu, metylenchloridu a poly-akrylátovými lepidly. Využívá se například pro výrobu LEGO kostek, v elektronických zařízeních, automobilech a další. Přibližná cena ABS struny je 0,5 Kč/g.
- **PLA (Polylactic acid)**

Pod jiným názvem také kyselina polyléčná. Jedná se o bio plast vyráběný z kukuřičného škrobu, jehož vlastnosti se shodují s vlastnostmi plastů vyráběných z ropy. Značnou výhodou je jeho biologická odbouratelnost a recyklovatelnost. Je rozpustný při delším vystavení acetonu, popřípadě pomocí tetrahydrofurénu. Má poměrně vysokou pevnost ve srovnání s ABS. Nevýhodou je jeho nízká teplotní odolnost. Měkne při teplotách nad 50°C. Teplota zpracování je mezi 180 - 220°C.  
Využívá se převážně pro tisk prototypů, dětských hraček apod. Cena PLA struny je 0,5 Kč/g.
- **WoodFill/BronzFill/Kompozity na plastovém základu**

Jedná se o kompozitní materiály jejichž hlavní složkou je plastový základ a sekundární materiál je ve formě prášku. Plastový základ je nejčastěji z PLA. Sekundárních materiálů je celá škála, například dřevo, různé druhy kovů. Příměsi obvykle ovlivňují převážně vzhled celkového výtisku. Nevýhodou je větší abrazivost a nutnost pomalejšího tisku. Teplota zpracování se liší dle použité příměsi. Cena se odvíjí také od používané příměsi.
- **XT – Amphora copolymer**

XT je označení pro vysokopevnostní materiál dodávaný firmou Colorfab. Vyznačuje se velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Jeho teplotní odolnost je do 70°C. Cena 1,4 Kč/g.
- **PET (Polyetylen tereftalát)**

Jedná se o materiál vyznačující se nemačkovostí a nízkou navlhavostí. Při porovnání s ABS je výrazně pružnější a mechanicky odolnější. Samotné chemické složení PET materiálu se liší dle výrobce. Teplotní odolnost materiálu je mezi 220 - 260°C. Přibližná cena je 0,8 Kč/g.
- **Flexibilní materiály – FilaFlex, FlexFill, NinjaFlex**

Jedná se o speciální polymery s vlastnostmi připomínající gumu. Zachovává pružnost i při nízkých teplotách a je odolný proti celé řadě rozpouštědel. Používají se pro ochranná pouzdra na mobily, kamery, ale i pro pneumatiky RC modelů. Teplota zpracování je mezi 180 - 220°C. Přibližná cena je 2 Kč/g.
- **PVA (Polyvinyl alkohol)**

Jedná se o materiál, který je rozpustný ve vodě. Nejvíce se používá pro tisk podpor ve více hlavových tiskárnách. Jedna hlava vytiskne podpory z PVA a



ty se následně rozpustí ve vodě, zatímco druhá tiskne samostatný objekt. Teplota zpracování mezi 190 - 230°C. Přibližná cena 2,3 Kč/g.

- **HiPS**

Jedná se o velmi odolný polystyrén, který má podobné vlastnosti jako ABS. Vyznačuje se výbornou prostorovou stabilitou, díky této vlastnosti se s výhodou používá pro tisk rozměrnějších objektů. Teplota pro jeho zpracování je mezi 200 - 250°C. Přibližná cena je 1 Kč/g.

- **PC (Polykarbonát)**

Termoplast s velmi dobrou odolností proti nárazům a tepelnou odolností. Je to nejtvrší plast používaný pro 3D tisk. Jeho výhodou je schopnost zachovat si ohebnost i za studena. Nevýhoda spočívá ve vyšším bodu tání materiálu. Nejčastěji se používá pro tisk transparentních prototypů. Teplota zpracování je mezi 230 - 280 °C. Přibližná cena je 1,5 Kč/g PC struny.

- **PP (Polypropylen)**

Jedná se o flexibilní a odolný materiál, který umožňuje tisk přesných modelů, u kterých je požadována pružnost, pevnost a houževnatost.

- **Nylon**

Jedná se o termoplast, který je velice houževnatý, používaný převážně pro mechanické součástky. Teplota zpracování je mezi 230 – 280 °C. Přibližná cena 2 Kč/g

- **ASA (Akrylonitril-styrén-akrylát)**

Vlastnostmi se podobá ABS. Výhodou je velká odolnost proti vyšším teplotám a UV záření. Dále se vyznačuje dobrou prostorovou stabilitou. Má menší smrštitelnost ve srovnání s ABS. Využívá se pro tisk plastových výrobků určených do venkovního prostředí. Teplota zpracování je mezi 230 - 270°C. Přibližná cena struny je 0,8 Kč/g.



Obrázek 1.11 Jednotlivé plastové materiály pro 3D tisk [13]

## Kovy

Výchozím polotovarem pro 3D tisk u kovů je prášek o velikosti zrna v řádech desítek mikrometrů. Tyto prášky se liší dle používaného zařízení a výrobce. Každý výrobce doporučuje „vlastní“ druhy prášků s vlastním označením. Jednotlivé druhy materiálů pro tisk kovů se neustále rozšiřují. Díky tomu je možné dosáhnout různých vlastností výrobků dle požadavků zákazníka. Nejběžnější materiály pro 3D tisk kovů viz tabulka č. 1.2. Vzhledem k tomu, že se obchodní názvy materiálů liší v závislosti na výrobcu, jsou uvedena i označení dle DIN [38].

Tabulka 1 **Error! Use the Home tab to apply 0 to the text that you want to appear here..**2 Přehled kovových materiálů pro 3D tisk [38]

	<b>Materiály</b>	<b>Označení dle DIN</b>
Hliníkové slitiny	AlSi10Mg	3.2381
	AlSi7Mg	3.2371
	AlSi12	3.3581
Kobaltové slitiny	ASTM F75	2.4723
	CoCrWC	
Nástrojové oceli	AISI 420	1.2083
	Marage 300	1.2709
	H13	1.2344
	AISI D2	1.2379
	AISI A2	1.2363
	AISI S7	1.2357
Niklové slitiny	Inconel 718	2.4668
	Inconel 625	2.4856
	Inconel 713	2.4670
	Inconel 738	
	Hastelloy X	2.4665
Nerezové oceli	SS 304	1.4301
	SS 316 L	1.4404
	SS 410	1.4006
	SS 440	1.4110
	15-5 PH	1.4540
	17-4 PH	1.4542
Titanové slitiny	Titanium Grade 2	3.7035
	Ti6Al4V	3.7165
	Ti6Al4V ELI	3.7165 ELI
	TiAl6Nb7	
Drahé kovy	zlato	18 Carat
	stříbro	930 Sterling
Slitiny mědi	CC 480 K	2.1050

Proces tisku probíhá v ochranné atmosféře dusíku nebo argonu v závislosti na použitém prášku a nastavení výrobního zařízení. Použitý ochranný plyn pak musí být softwarově nastaven pro dané zařízení.

## Ostatní

- Keramika

Jedná se o relativně novou skupinu materiálů použitelných pro 3D tisk. Keramika se po výtisku musí podrobit stejným procesům jako každý keramický výrobek vyráběný tradičními způsoby, a to tedy glazovat a vypálit.

- Papír

Pro 3D tisk papíru postačí standardní kopírovací papíry formátu A4. 3D tiskové modely z tohoto materiálu mají velkou výhodu v ekologičnosti a recyklovatelnosti a nevyžadují žádné další zpracování.

- Bio materiály

V oblasti bio materiálů pro 3D tisk probíhá velké množství výzkumu s ohledem na možnost 3D tisku pro velké množství lékařských aplikací. Cílem je tisk živé tkáně, popřípadě celých orgánů pro transplantaci. Dalším výzkumem v oblasti bio materiálů je 3D tisk jídla. Mezi hlavní oblasti 3D tisku jídel patří tisk masa, čokolády, těstovin.

## 1.2. Termografická diagnostika

Jedna z nejvýznamnějších termodynamických vlastností určující stav hmoty je teplota. Není mnoho vlastností látek, které by nebyly závislé na teplotě. Teplota je také základem mnoha fyzikálních zákonů. Je také jedna z mála veličin, které nelze přímo měřit, ale využívá se měření prostřednictvím jiné fyzikální veličiny. Jedná se tedy o nepřímé měření. Bezdotykové měření teploty využívající snímání tepelného záření, které vyzařují všechna tělesa s teplotou větší, než je absolutní nula ( $-273,15^{\circ}\text{C}$ ), je stále dokonalejší. Teplotu tímto způsobem lze měřit jak bodově, tak plošně. Existuje několik principů detekce infračerveného záření, kde každý má své výhody a nevýhody. Dnes je již měření pomocí termografických systémů dostupné i komerčně a roste tak jeho použití v různých aplikacích napříč různými obory. Například v energetice a strojírenství pro zobrazování teplotních polí, stavebnictví pro zkoumání prostupnosti tepla izolací budov, v medicíně pro měření teplot a pro výzkum chorob, bezpečnostní aplikace a mnoho dalších.

Infračervená termografie jako taková je vědní disciplína, která se zabývá rozložením teplotního pole na povrchu tělesa bezkontaktním způsobem. Hlavním úkolem termografie je analýza infračervené energie vyzařované tělesy. Termografickým systémem lze zobrazit teplotní pole měřeného objektu na povrchu. Samotný obor zabývající se termografií se rozvinul společně s rozšířením dostupnosti infračervených kamer, pro které se začal používat termín termografická kamera, resp. termovize. Vznik tohoto termínu se přikládá názvu prvního výrobce infračervených kamer, a to firmě Thermovision. Termokamery umožňují zobrazovat infračervené záření tělesa tak, aby bylo možné je vidět (vizualizovat). Jako výstup termografické kamery je pak infračervený snímek (termogram). Radiometrické termokamery pak umožňují určit teplotu v jednotlivých bodech termogramu [21].

### 1.2.1. Historie termografie

Jako první výrobce průmyslových termografických zařízení byla v roce 1965 společnost AGA, později AGEMA vyrábějící zařízení s aktivním chlazením pomocí tekutého dusíku, to bylo celkem nákladné a systém byl značně rozměrný. K výraznému posunu v kvalitě termokamer došlo v 80. letech vynalezením SPRITE detektoru (speciální typ skenovacího detektoru) a nasazením skenovací technologie. Typickým pro tyto kamery bylo pracovní pásmo  $8 - 12\mu\text{m}$  a teplotní rozlišení  $0,2\text{ K}$ . Dále poté docházelo k využívání skenovacího systému ve spojení s lineárními nebo 2D FPA detektory se  $100 - 10000$  elementů, případně ještě s multiprvkovými SPRITE detektory. Tím došlo k poklesu teplotního rozlišení na  $0,1\text{ K}$ . Tyto kamery již měly menší rozměry a hmotnosti, a začaly se komerčně prodávat. A to převážně díky integraci snímacích elementů a základní čtecí logiky na jeden společný čip. Termokamery, které využívají multilineární FPA, mají teplotní rozlišení až  $0,05\text{ K}$  [20] [22].



Obrázek 1.12 AGA 750 - První termografický systém [28]

Dalším posunem bylo využití neskenovací termokamery používající 2D chlazené FPA detektory, kde je materiálem HgCdTe (telurid rtuťnokadenatý), InSb (antimonid india) nebo využití technologie QWIP, případně také nechlazené FPA založené na mikrobolometrech nebo elektrické technologii. Počet elementů tak dosahuje jeden a více milionů. Tyto se také označují staring arrays a obsahují plné digitální zpracování signálu na společném čipu, rychlé integrované vyčítací obvody ROIC, volbu pixelů, antiblooming každého pixelu, předzesílení, úpravu a filtraci v blocích apod. Vyřazením skenovací mechaniky došlo k zjednodušení optiky, která nyní jen zaostřuje infračervený obraz na FPA. První takové kamery byly k dispozici již v 90. letech, kde se také firma AGEMA spojila s americkou společností Inframetrics, později s francouzským Indigem, který vyráběl termografickou techniku nejvyšších parametrů převážně pro vědecké účely. Takto vznikl FLIR, který vyrábí dodnes jedny z nejkvalitnějších termografických kamer na trhu. Poté od počátku 21. století jsou volně na trhu i chlazené kamery s QWIP technologií nebo nechlazené kamery s detektorem s mikrobolometry. Takové se vyznačují horší kvalitou obrazu než chlazené typy, ale jsou až 4x levnější [20] [22].



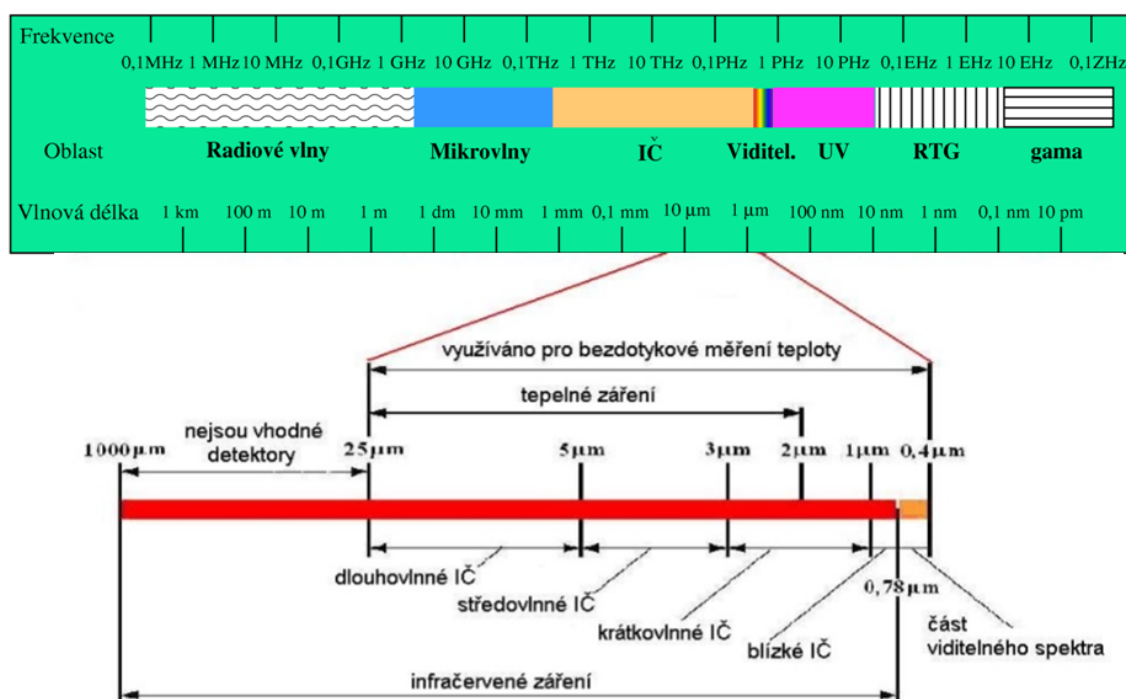
Obrázek 1.13 Termokamera FLIR ThermaCAM PM595 [29]

Tento postupný vývoj nahrával vzniku hned několika firem specializujících na výroby termografických zařízení, mezi nejznámější patří Raytheon (USA), Santa Barbara Focal Plane (USA), Indigo (USA), Mikron (USA), NEC (Japonsko), CEDIP (Francie), AEG Infrarot-Module (Německo). V roce 2002 se na světový trh přihlásili také čínští výrobci termokamer WuHan Guide Electronic Industrial a Guangzhou Sat Infrared.



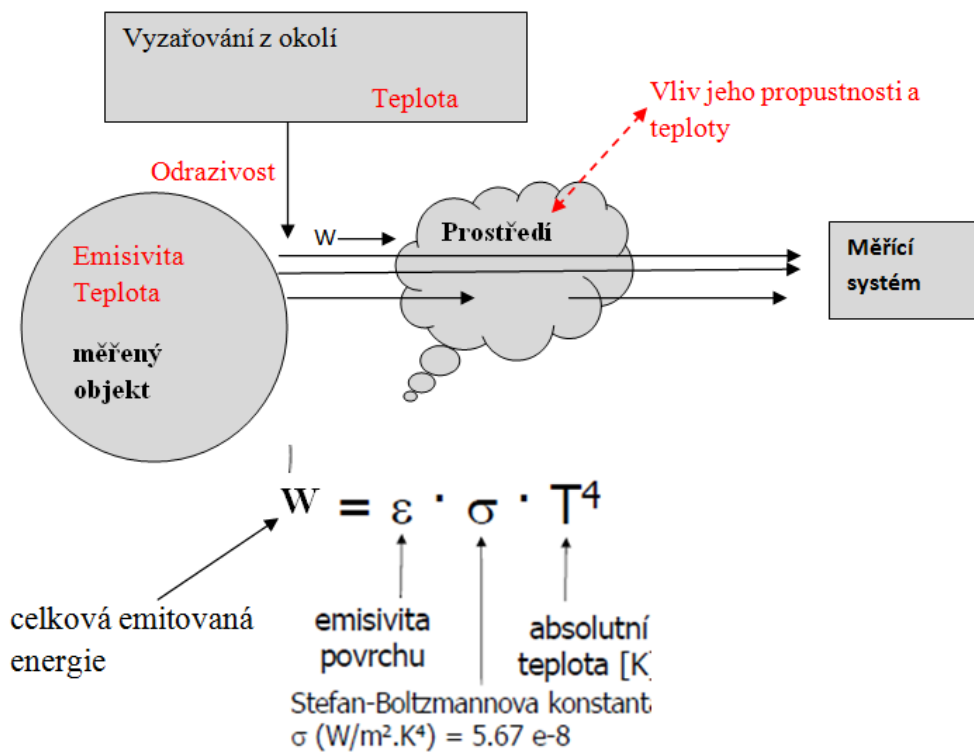
### 1.2.2. Princip bezkontaktního měření teploty

U bezdotykového měření teploty se využívá vyzařování infračerveného záření z měřeného objektu. Toto záření je optickým systémem soustředěno na vhodný detektor, jehož elektrický signál je dále zpracován v elektronických obvodech a výstupem je pak údaj zobrazený na displeji nebo termogram na monitoru vyhodnocovacího zařízení (počítače) [24]. Všechny objekty, jejichž teplota je vyšší než absolutní nula, vyzařují elektromagnetické záření v určité části spektra.



Obrázek 1.14 Záření využívané pro bezdotykové měření teploty [24]

K samotnému určení teploty však nestačí pouze termokamera, pyrometr nebo jiné zařízení pro zpracování infračerveného záření objektu. Neboť záření je ovlivněno několika parametry, které je potřeba znát.



Obrázek 1.15 Schéma parametrů ovlivňující měření

Jedním z nejdůležitějších parametrů je emisivita tělesa, která nám udává poměr vyzařování reálného tělesa k vyzařování absolutně černého tělesa. Absolutně černé těleso je teoretický objekt, který při dané teplotě vyzaří nejvyšší množství energie, a který naopak pohltí veškerou energii, která na něj dopadá.

$$\varepsilon = \frac{W_o}{W_{bb}}$$

$W_o$  = celková vyzařovaná energie emitovaná tělesem při dané teplotě  $T$ .

$W_{bb}$  = celková vyzařovaná energie emitovaná absolutně černým tělesem při stejné teplotě  $T$ .

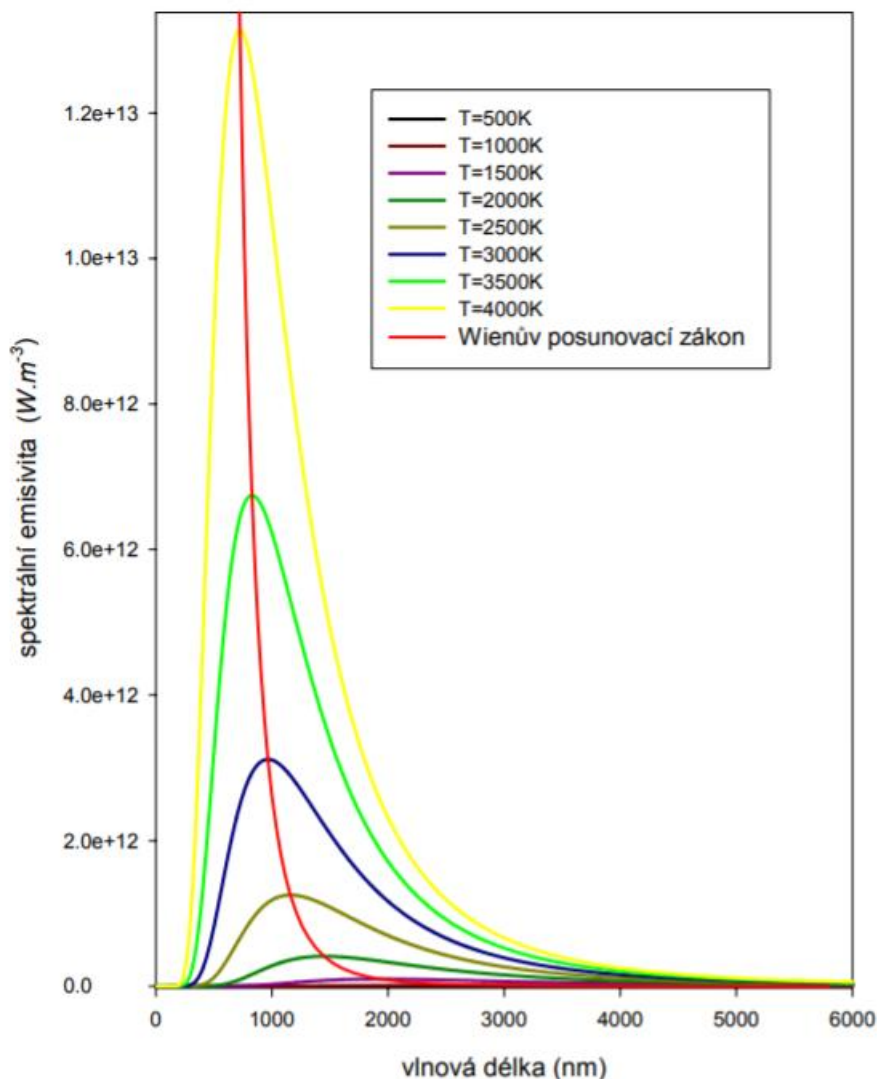
Závislost spektrální hustoty intenzity vyzařování na vlnové délce a na teplotě pro černé těleso je dána Planckovým vyzařovacím zákonem. Příjem infračerveného záření a určení jeho vlnové délky tak umožňuje bezdotykové měření teploty.

$$W_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5 \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)}$$

$W_\lambda$  = Energie vyzařovaná z černého tělesa

$\lambda$  = Vlnová délka

$C_1, C_2$  = Zavedené konstanty zahrnující rychlost světla a Planckovu konstantu



Obrázek 1.16 Planckův vyzařovací zákon [27]

Za účelem získání celkové emitované energie černého tělesa je nutné integrovat Planckův zákon přes všechny vlnové délky (0 až nekonečno). Výsledkem je Stefan-Boltzmannova rovnice:

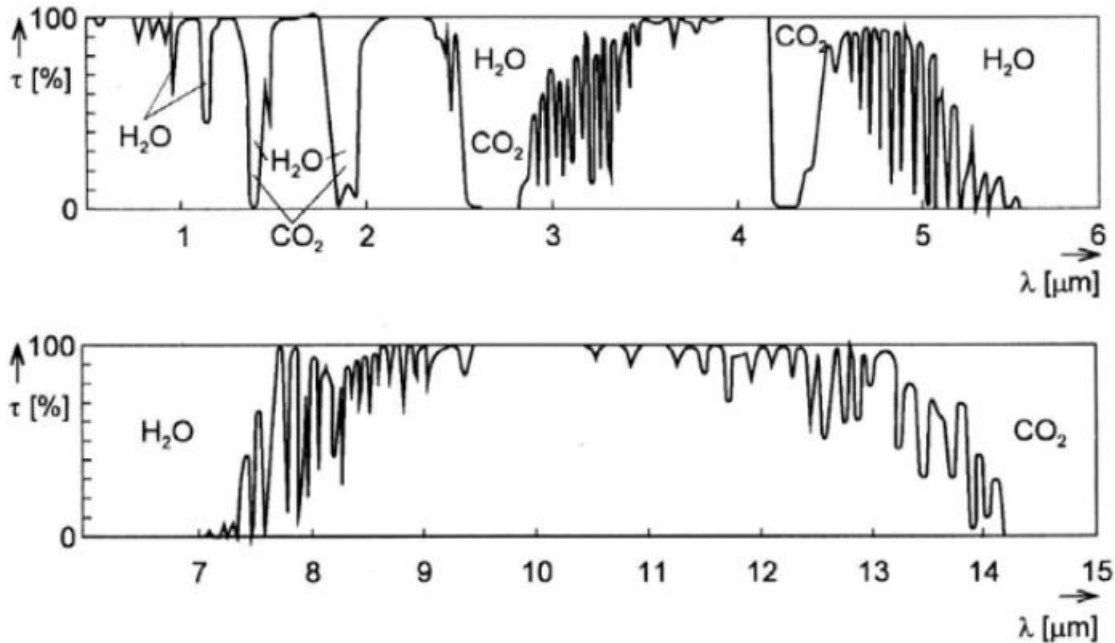
$$W = \varepsilon \sigma T^4$$

$\sigma$  = Stefan-Boltzmannova konstanta

Teplota černého tělesa může být získána přímo z radiční energie černého tělesa pomocí této rovnice. Abychom zjistili hodnotu vlnové délky, při které je při dané teplotě dosaženo maximálního radičního toku, lze stanovit Wienův posunovací zákon, kde  $T$  je v Kelvinech a výsledná vlnová délka v  $\mu m$ .

$$\lambda_{\max} = 2897,8/T$$

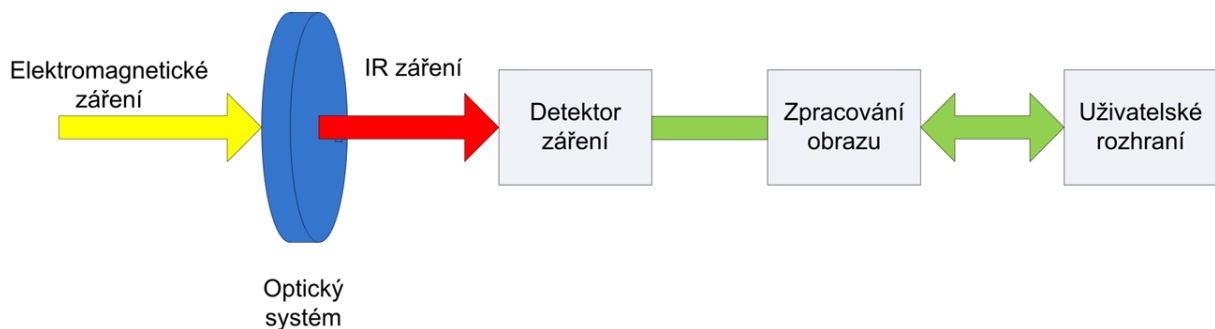




Obrázek 1.19 Propustnost atmosféry v závislosti na vlnové délce [25]

### 1.2.3. Konstrukce termokamer

Konstrukce termokamery je principiálně stejná jako konstrukce digitálního fotoaparátu. Optika, která funguje zároveň jako filtr (selektuje jen část elektromagnetického spektra, která je důležitá z hlediska bezdotykového měření teploty), soustředí dopadající elektromagnetické záření na detektor. Zde dochází k převodu elektromagnetického záření na elektrický signál, který je dále zpracováván elektronikou pro zobrazení termogramu [31].



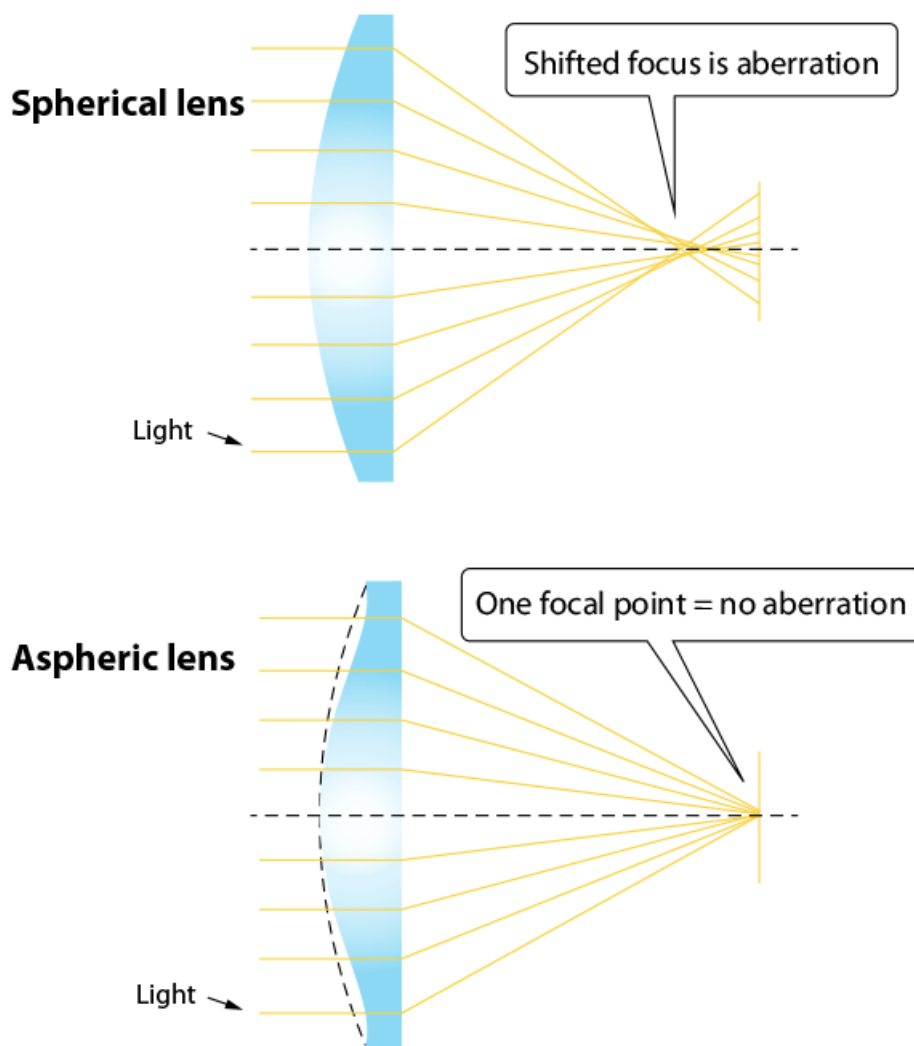
Obrázek 1.20 Schéma konstrukce termokamery [31]

### Optika

Optika funguje zároveň jako filtr procházejícího elektromagnetického záření. Propouští tak pouze požadované vlnové délky. Z toho důvodu je zásadní volba materiálu optiky (filtru) a jeho geometrický tvar. Materiálem je nejčastěji germánium (Ge) s antireflexní vrstvou na povrchu pro zabránění odražení infračerveného záření na povrchu čočky. Používá se pro spektrální oblasti vlnových délek od 2 do 12 mikronů. Díky použití antireflexní vrstvy lze tímto způsobem dosáhnout propustnosti vyšší než 90 %. Dalším materiálem může být

sulfid zinečnatý (ZnS). Tento materiál se často používá pro spektrální oblasti vlnových délek od 8 do 12 mikronů. Díky vysoké odolnosti proti dešťové erozi a vysokorychlostnímu oděru prachu a částic je zvláště vhodný pro venkovní IR systémy. Mezi další materiály dále například patří selenid zinečnatý (ZnSe), křemík (Si), Multi Spectral sulfid zinečnatý (ZnS MS), fluorid vápenatý ( $\text{CaF}_2$ ), amorfni materiál přenášející infračervené záření (AMTIR) [32].

Po volbě materiálu je zásadní jeho geometrie. Ta by měla být taková, aby se docílilo co největší propustnosti. Nejčastější varianty geometrie čoček jsou sférické, asférické, difrakční a pole volně formovaných čoček [32].



Obrázek 1.21 Sférické a Asférické čočky [32]

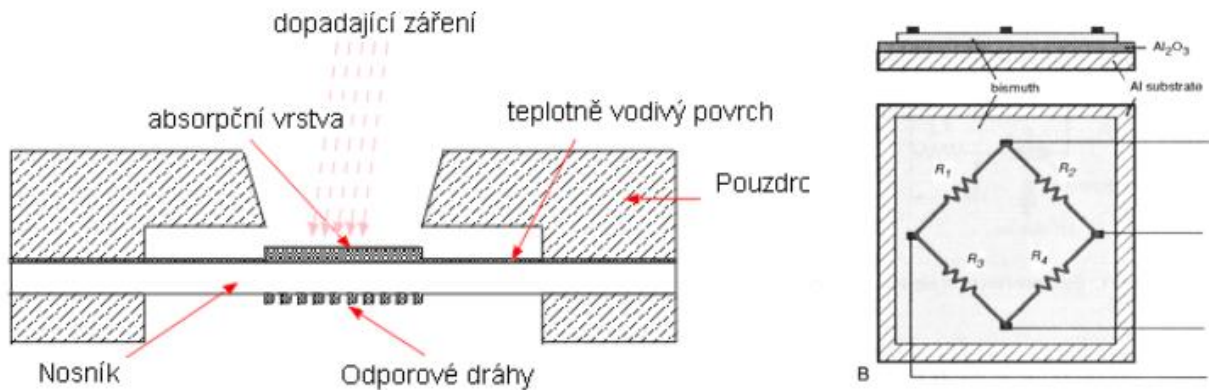
## Detektory

Detektory infračerveného záření slouží tedy k převodu dopadajícího infračerveného záření na elektrický signál, který lze pak další elektronikou převést na výsledný termogram. Dle principu jejich funkce se rozdělují na dva typy, a to tepelné a fotonové.



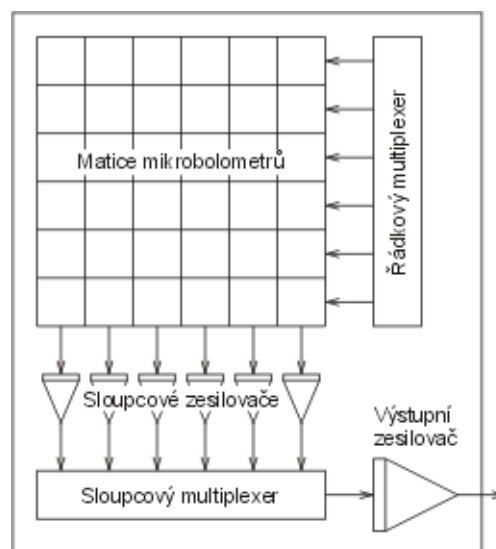
- Tepelné detektory

Tyto detektory fungují na principu změny elektrických vlastností v závislosti na intenzitě dopadajícího infračerveného záření. Například tzv. bolometrické detektory, které mění elektrický odpor v závislosti na intenzitě dopadajícího záření (dopadem záření dochází k ohřevu). Zásadní je poté dostatečná izolace bolometru od svého okolí tak, aby byla změna teploty přímo úměrná změně odporu.



Obrázek 1.22 Princip bolometrického detektoru [33]

Dalším typem jsou mikrobolometrické detektory, kde rozdílem oproti bolometrickým je počet odporových plošek na jednom detektoru. Odporový materiál je ve formě 2D plošek (délka hrany obvykle 1 až 2 cm), který slouží k absorpci infračerveného záření. Mikrobolometrické detektory dále obsahují vlastní elektroniku, pomocné obvody a jsou umístěny ve vakuovém obalu. Mikrobolometrické detektory jsou využívány u většiny dnes komerčně nabízených termokamer. Jejich hlavní charakteristikou je nižší citlivost (okolo  $0,05^{\circ}\text{C}$ ), široká detekce v IR spektru a malé pořizovací náklady, nepotřebují chlazení a mají pomalejší odezvu [34] [31].



Obrázek 1.23 Blokové schéma mikrobolometrického detektoru [33]

- Fotonové (kvantové) detektory

Principem je tzv. počítání fotonů (kvant elektronového záření). Tím, že dochází k absorpci fotonů, přenáší valenční elektrony materiálů do vyšších energetických stavů a následně tak dochází ke změně vodivosti, napětí a proudu. Jsou výrazně citlivější než tepelné detektory, ale vyžadují chlazení. Termokamery využívající kvantové detektory jsou tedy těžší díky chladicímu zařízení. Důležitý je pak materiál detektoru, který určuje spektrální rozsah měření termokamery. Např. InSb detekuje střední IR záření, pro dlouhé vlny se používá HgCdTe [34] [31].

### **Zpracování obrazu**

Díky vyvolání elektrického signálu dopadem IR záření na detektor můžeme s elektrickým signálem dále pracovat. Pro praktické využití těchto signálů je třeba, aby byl termografický systém vybaven dalšími obvody, které zajistí jejich zpracování a korekci [31].

### **Uživatelské rozhraní**

Uživatelské rozhraní nám dovoluje ovládat nejen samotnou kameru, ale i její měřicí a vestavěné funkce. Každá kamera má odlišné funkce závislé na jejím výrobci. Mezi nejzákladnější funkce nacházející se u většiny kamer jsou: [35]

- Alarm – funkce, oznamující překročení nastaveného kritéria.
- Izoterma – funkce určující, zda je hodnota teploty měřeného objektu "nad" nebo "pod" či "v intervalu" daného teplotního rozsahu.
- Barevná stupnice – funkce pro nastavení zobrazení barevné kombinace v termogramu (barevné, ve stupních šedi apod.)
- Spotmetr – funkce pro vyhledání určitého bodu v termogramu dle teploty (nejteplejší, nejchladnější)
- Profil – funkce pro zobrazení grafu teplotního profilu v dané oblasti.
- Bodové, čárové a plošné analýzy pro určení minimální a maximální teploty, popřípadě průměrné teploty.

## **1.3. Termografická technologie v technologiích 3D tisku kovů**

Důležitá oblast v technologiích 3D tisku kovů je jejich optimalizace. Optimalizací můžeme docílit vyšší kvality tisknutých dílů a možnost jejich opakovatelnosti. Monitorovací systémy nám slouží k analyzování procesu 3D tisku v reálném čase, a tak poskytují informace o vnitřních charakteristikách procesu. Lze kombinovat více druhů monitorovacích systémů pro dosažení co nejvyšší kvality tisku. Záznam dat v reálném čase lze použít k ovlivnění ovládacích prvků 3D tiskárny a eliminaci možných vad v procesu. Například opětovným natavením materiálu, který vykazuje malé teploty oproti okolí a hrozí riziko nedokonalého spojení v rámci tisknutého modelu. Dále mohou sloužit jako podpora pro tvorbu



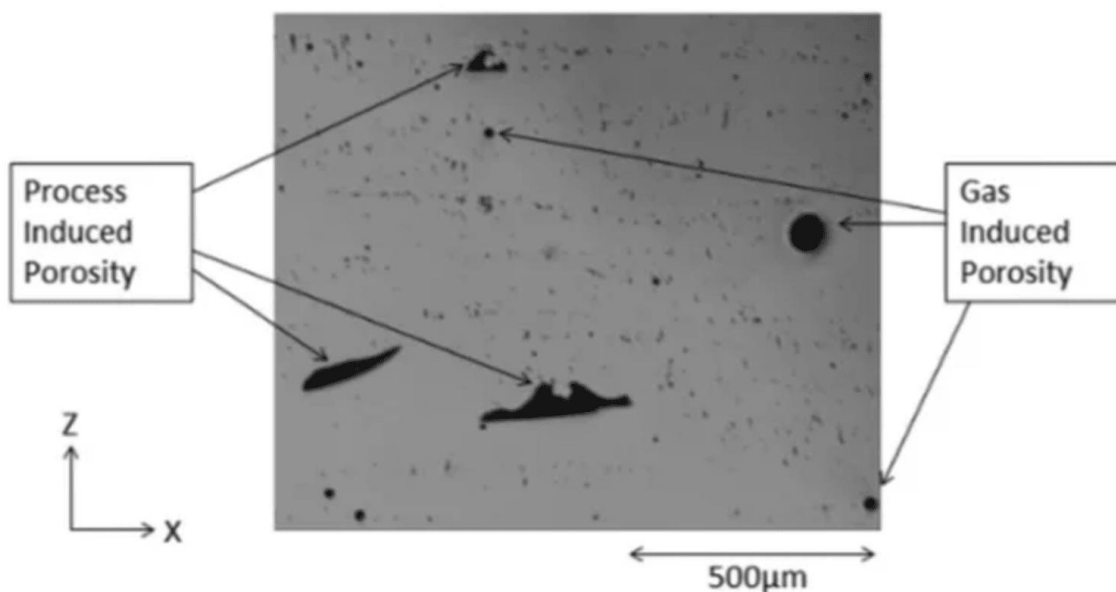
dokumentace. Díky rozvoji monitorovacích systémů lze pak technologie 3D tisku více směřovat do sériové výroby a do odvětví s vysokými nároky na kvalitu.

### 1.3.1. Vady v 3D tisku kovů

Proces 3D tisku kovů není bezproblémový a vyžaduje neustálý monitoring a aktivní řešení těchto problémů k dosažení požadovaných kvalit 3D tisku. Mezi nejčastější vady vznikající při 3D tisku patří: [16] [17] [38]

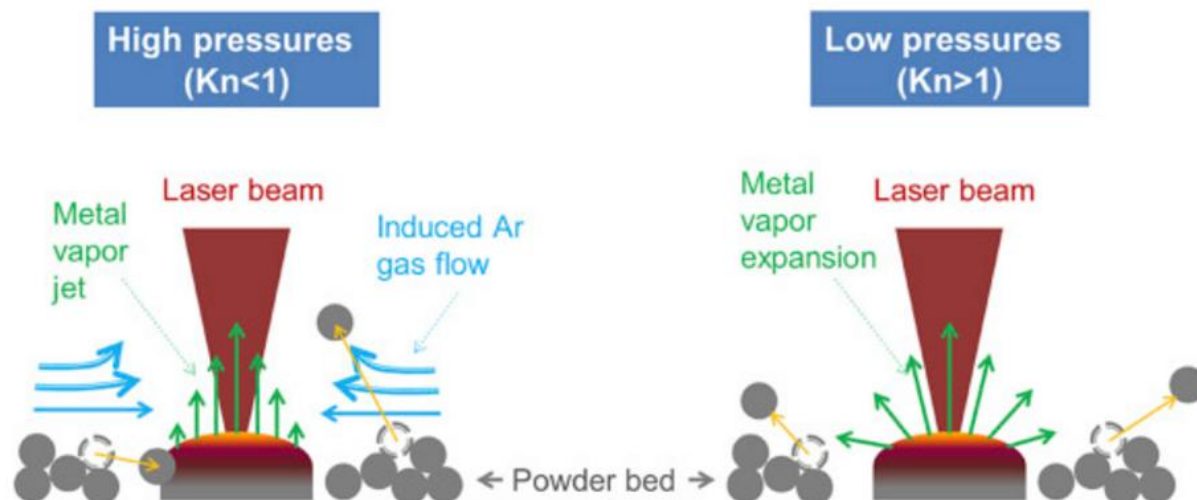
- **Porozita**

K porozitě dochází během samotného procesu 3D tisku, a to tvorbou malých děr, dutin mikroskopického rázu uvnitř tisknutého dílu. Tyto mikroskopické póry způsobují nižší hustotu tisknutého výrobku. Mohou ovšem také přímo ovlivnit mechanické vlastnosti a způsobují náchylnost k tvorbě prasklin a dalšímu poškození, a to zejména při vystavení vysokému zatížení.



Obrázek 1.24 Porozita dle jednotlivých vlivů [16]

Obvykle existují 2 hlavní důvody pro vysoce porézní 3D tištěné kovové části. Prvním je vlastní kvalita a způsob výroby prášku. Druhým je samotný proces 3D tisku kovů. Pro řešení prvního důvodu je proto nutný správný výběr materiálu s ohledem na požadované vlastnosti tištěných dílů. Častějším důvodem je však proces 3D tisku. Je nutné sledovat energii laseru, neboť je nutné správné roztavení práškového materiálu. Při nadměrné energii může dojít k rozstříknutí kapiček roztaveného materiálu a tím mohou vzniknout vady (póry). Naopak při nedostatečné energii laseru může dojít jen k částečnému natavení prášku, a tak ke vzniku vad. Dále je nutné sledovat tok plynu v samotném zařízení, neboť i ten může ovlivnit vznik pórovitosti. Při samotném procesu 3D tisku kovů se pohybujeme v teplotách poblíž bodu varu kovového materiálu, a to zapříčiňuje vznik toku páry z tavicí oblasti.

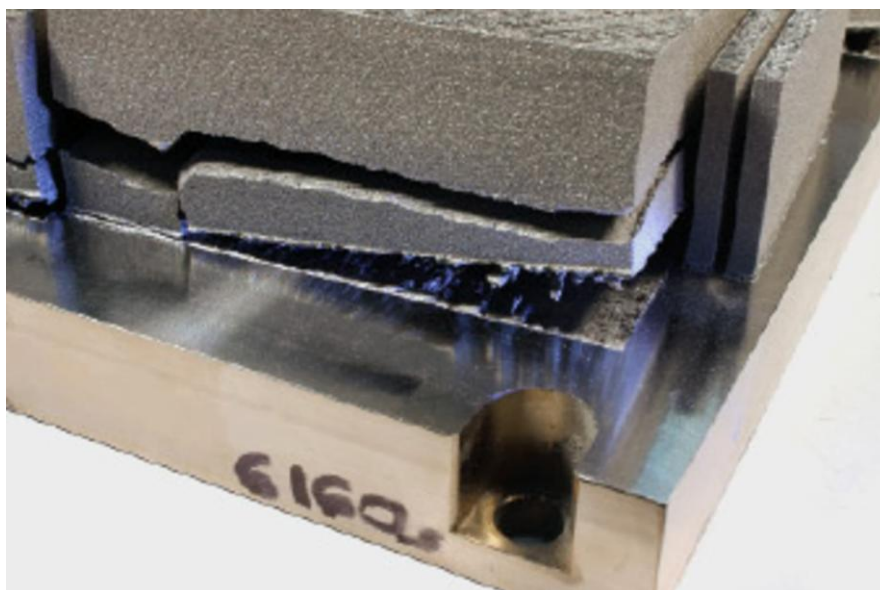


Obrázek 1.25 Druhy vaporizace materiálu práškového lože [17]

Pro odstranění porozity při 3D tisku kovů je tedy kromě správné volby práškového materiálu důležité sledovat proces 3D tisku a postupnou optimalizací docílit takových parametrů, které zajistí potřebnou kvalitu tisknutých dílů.

- **Vnitřní pnutí**

Při 3D tisku kovů je nutné dosáhnout vysokých teplot (okolo 1700°C v závislosti na použitém prášku) pro natavení práškového materiálu a následně dochází k ochlazení. S ohledem na tyto extrémní teplotní změny dochází ke vzniku zbytkového napětí. Toto napětí má nepříznivý vliv na integritu vyráběné součásti, což má za následek různé formy deformace. Obvykle se nejvyšší koncentrace zbytkového napětí nachází na kontaktní ploše mezi dnem tištěné součásti a tiskového lože.



Obrázek 1.26 Roztržení titanové části během procesu 3D tisku důsledkem zbytkového napětí [16]

Pro snížení zbytkového napětí je nutné sledovat proces 3D tisku kovů s ohledem na koncentrace teplot během tisku. Následně lze z nasbíraných dat sestavovat modely, které slouží pro predikci koncentrace rizikových oblastí. Díky těmto modelům lze upravovat parametry (přívod tepla, tloušťka vrstvy) pro snížení napětí v daných oblastech. Popřípadě lze navrhnout takové podpůrné struktury a upravit orientaci součástí pro minimalizaci výskytu oblastí náchylných na výskyt zbytkového napětí.

Dalším způsobem, jak minimalizovat výskyt zbytkového napětí je předeheat tiskového lože, nebo zkrácením délky skenovacích vektorů a rozdělením expoziční oblasti na menší části.

- **Drsnost tisknutého povrchu**

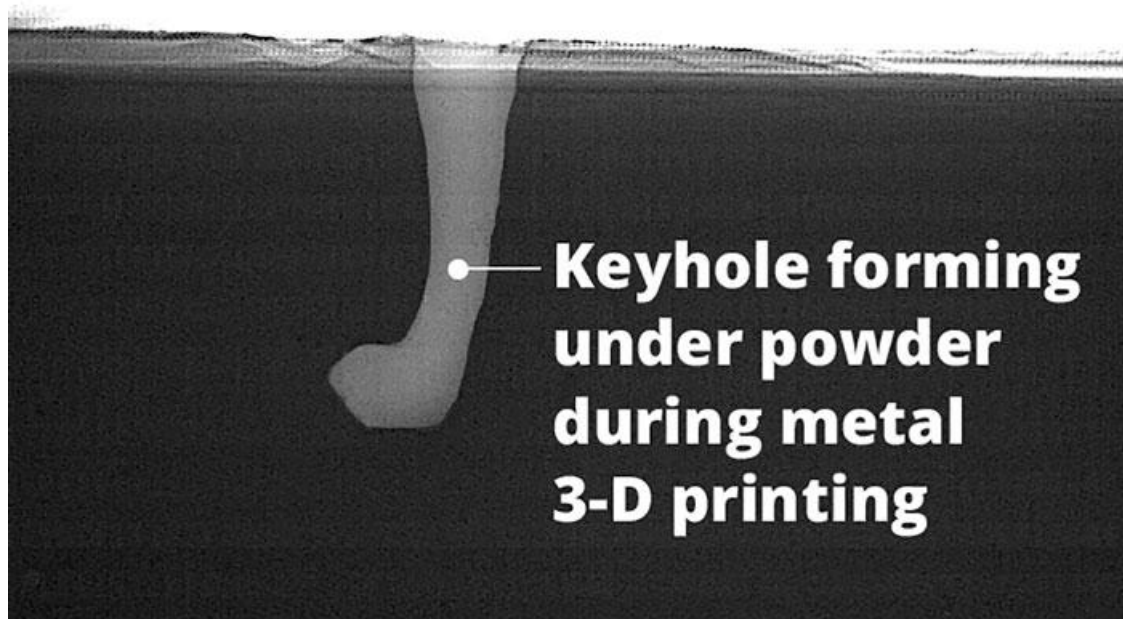
Vytištěná součást se vyznačuje poměrně vysokou drsností. Pro aplikace, kde je nutná vysoká úroveň drsnosti povrchu, je nutné následné opracování povrchů tištěného dílu (obrábění, broušení, leštění apod.). Drsnost povrchu souvisí s tloušťkou tištěné vrstvy, díky tomu jí lze zmírnit tiskem tenčích vrstev. To se ale negativně projevuje na délce tisku. Výrazně hrubé povrchy mohou být také důsledkem nesprávného natavení prášku. Proto i s ohledem na drsnost je nutné sledovat energii laseru pro natavení a vznikající teplo v procesu. Pro zvýšení kvality povrchu (snížení drsnosti) lze tedy zvýšit výkon laseru a zajistit tak úplné tavení práškového materiálu.

- **Hustota vytištěného dílu**

Pro splnění vysokých nároků na mechanické vlastnosti je důležitá již zmíněná nižší hustota tištěných dílů oproti požadované. Pro její zvýšení je nutná konzistentní kvalita prášku (velikost částic, tvar, distribuce a zatékavost). Například kulový tvar vede k vyšší hustotě, protože lze dosáhnout maximální relativní hustoty ve srovnání s jinými tvary. Samotné parametry procesu s ohledem na zvýšení hustoty tištěného dílu se upravují až v druhé řadě.

- **Tvorba „kapes“**

„Vzduchová kapsa“ při 3D tisku kovů vzniká během fúze laseru s práškovým ložem bez ohledu na to, o jaký kov se jedná a jaký druh laseru je použit. Principiálně dochází k tvorbě "kapes" díky „vyvrtání“ kovového materiálu při procesu natavení kovového prášku pomocí laseru. Důležité je rozlišit, zda mohou způsobit vadu či nikoliv. Při ideálních podmínkách je tvar natavené plochy laserem mělký a půlkruhový (vodivý režim). Ve skutečnosti však často dochází ke změně tvaru na tzv. klíčovou díрку, tedy větší kulatý tvar nahoře s úzkým hrotem dole. Tento jev se nejčastěji projevuje při vyšší hustotě energie laseru [18].



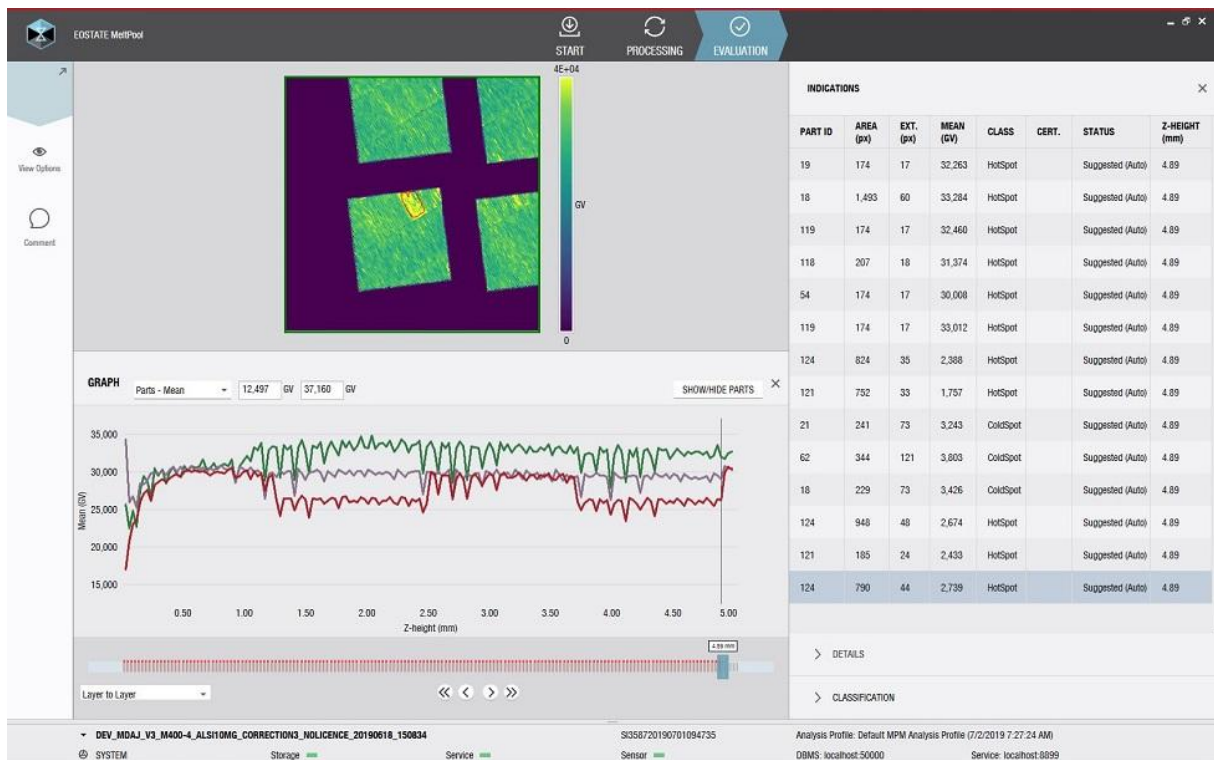
Obrázek 1.27 "Klíčová dírka" tvořená během fúze laseru s práškovým ložem [18]

### 1.3.2. Současné systémy monitoringu v 3D tisku kovů

Druhy jednotlivých monitorovacích systémů se liší dle výrobce 3D tiskáren. Pro příklad jsou zde uvedeny monitorovací systémy od firmy EOS, SLM Solutions a GE Additive.

- **EOSTATE MeltPool Monitoring (MPM)**

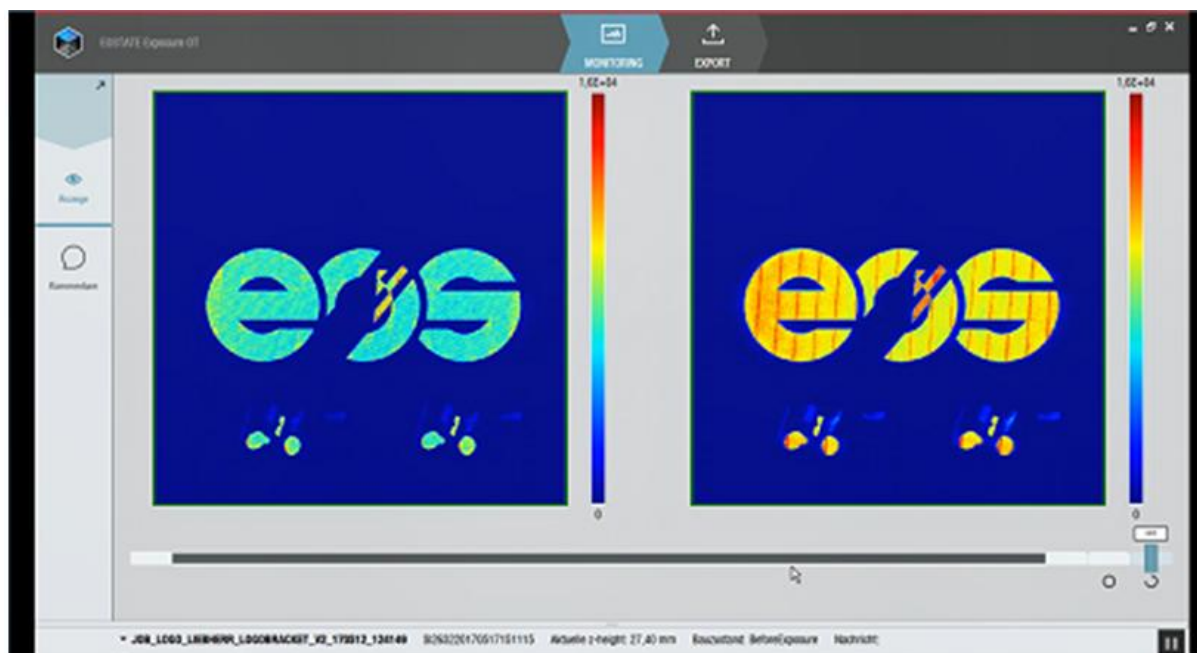
Systém založený na využití 2 fotodiód namontovaných v pracovním prostoru. První pozoruje záření taveniny vyzařované z celé platformy v NIR spektru (oblast vlnových délek 800 – 2500 nm) a druhá umístěná v ose laseru, která je připojena k dráze paprsku pomocí přizpůsobeného poloprůhledného zrcadla (děliče paprsků). Nastavení na ose umožňuje pozorovat intenzitu záření emitovaného taveným materiálem v malé oblasti kolem místa působení laseru. Volba spektra se dá upravit pomocí vhodného filtru umístěného před fotodiódami. Fotodiody shromažďují data při vzorkovací frekvenci 60 kHz. Signály jsou zesíleny, digitalizovány a ukládány ve formě 16bitových hodnot. V kombinaci se snímáním informací o poloze skeneru, typu expozice a laserové modulaci a výkonu laseru je umožněno vizualizovat a vyhodnotit profil nataveného materiálu v každém místě vrstvy s vysokou přesností. Lze také přesně identifikovat výchozí body signálu fotodiody. Rozlišení snímání závisí na rychlosti skenování. Na základě naměřených parametrů se vypracovává korekční maska, která se posléze upravuje pomocí algoritmů, které zvýrazňují jevy procesu, které mohou nejvíce ovlivňovat kvalitu dílu. Takto zpracovaný signál využívá tzv. prahového přístupu. To znamená, že kdykoliv signál opustí prahové pásmo, je pozice označena, a to umožňuje vyhodnocení procesu. Následuje tedy úprava vstupních parametrů nebo další analýza zaznamenaných dat [19].



Obrázek 1.28 Software EOSTATE MeltPool Monitoring [19]

- **EOSTATE Exposure OT (OT)**

Systém využívající kameru na čipu sCMOS se speciálně navrženou optikou pro shromažďování obrázků s vysokým rozlišením a vysokou ohniskovou hloubkou v rozsahu NIR vlnové délky celé platformy. Po průchodu filtrem je světlo emitované z interakční zóny laseru a jejího okolí zaostřeno na čip kamery, tak že projde jen úzké pásmo infračervené vlnové délky. Tento systém přiřazuje data zaznamenané v každém pixelu k příslušnému bodu stavební platformy. Hardware kamery a její optika jsou umístěny do speciálního držáku v horní části pracovní komory. Tento držák odráží emisní světlo do kamery. Rozlišení kamery je 2560 x 2160 pixelů. Snímkování kamery je 10 fps (snímků za sekundu), které jsou překrývány tak, aby poskytoval obraz vrstvy. Po každé vrstvě jsou snímky sloučeny do jednoho obrazu, a tak tvoří mapu procesu. Obraz vyžaduje další korekci kvůli umístění kamery a její optice [19].



Obrázek 1.29 Software EOSTATE Exposure OT [19]

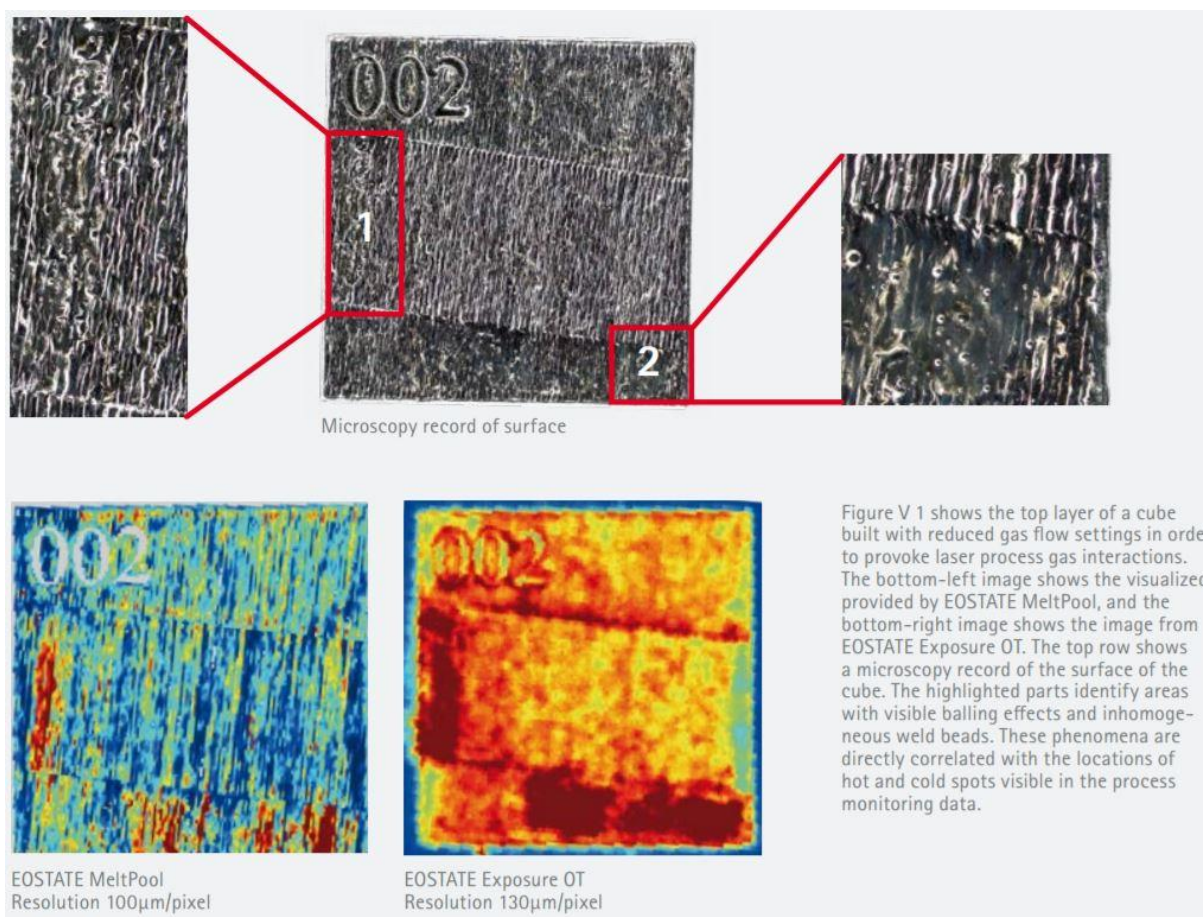
- **EOS Process Flow – Monitoring Investigation**

Klíčem je udržet stabilní proces v souvislosti s tokem inertního plynu využívaný v 3D tiskárně. Rychlost a profil proudění jsou zásadní, a proto je důležitá jejich optimalizace. Cílem je odstranit vedlejší produkty procesu jako je kouř, kondenzát, stříkance taveniny apod. Tyto nevhodné vedlejší produkty nejen zhoršují samotnou kvalitu 3D tisku, ale i možnost termografického monitoringu. Z tohoto důvodu je důležité, aby tok plynu byl co nejvíce laminární a objemová rychlost co nejvyšší. Je však nutné brát ohledy na neodstranění prášku z plošiny proudem plynu. Volba parametrů toku tedy musí být kompromisem mezi maximálním odstraněním vedlejších produktů a minimálním odstraněním prášku. Avšak i při optimálně nastavených parametrech je možný výskyt nežádoucích jevů mezi vedlejšími produkty procesu a laserovým paprskem. To může být způsobené například kolísáním velikosti částic prášku nebo jeho chemickým složením. Další příčinou vzniku nežádoucích jevů může být i směr šrafování (způsob nanášení laseru po vrstvách). Tyto nežádoucí jevy jsou do určitého stupně závažnosti viditelné pouhým okem během procesu tavení a také na povrchu čerstvě vytištěných výrobků. Takovéto typy procesů jsou označovány jako "splash" procesy neboli rozstříky horkých a chladných míst. K přesnější identifikaci těchto procesů se využívá MPM a OT monitorovací systémy [19].

MPM a OT však tyto nežádoucí procesy identifikují s určitými rozdíly (viz. jejich princip zmíněný dříve). MPM spojuje signály fotodiod s jejich počátečním bodem (dle souřadnic skeneru). Proto lze přesně lokalizovat místa původu horkých a studených míst. OT přiřazuje zaznamenaná data bodům detekce na základě prostorového rozlišení čipu kamery. Teplá a studená místa jsou tak vizualizována po celé oblasti. Studené skvrny mohou vznikat například při zastínění laseru v důsledku kouře. Horká místa mohou vznikat například



rozptylem částic v oblaku kouře. Rozostření laseru v oblaku kouře také může vyvolat kulový efekt, to může vyvolat nedostatečné natavení jednotlivých zrn prášku. S ohledem na tyto nežádoucí jevy při 3D tisku je nutné využívat termografického monitoringu a určit tak, o který jev se jedná, a následně se ho pokusit eliminovat. To ovšem vyžaduje průběžné monitorování celého procesu [19].

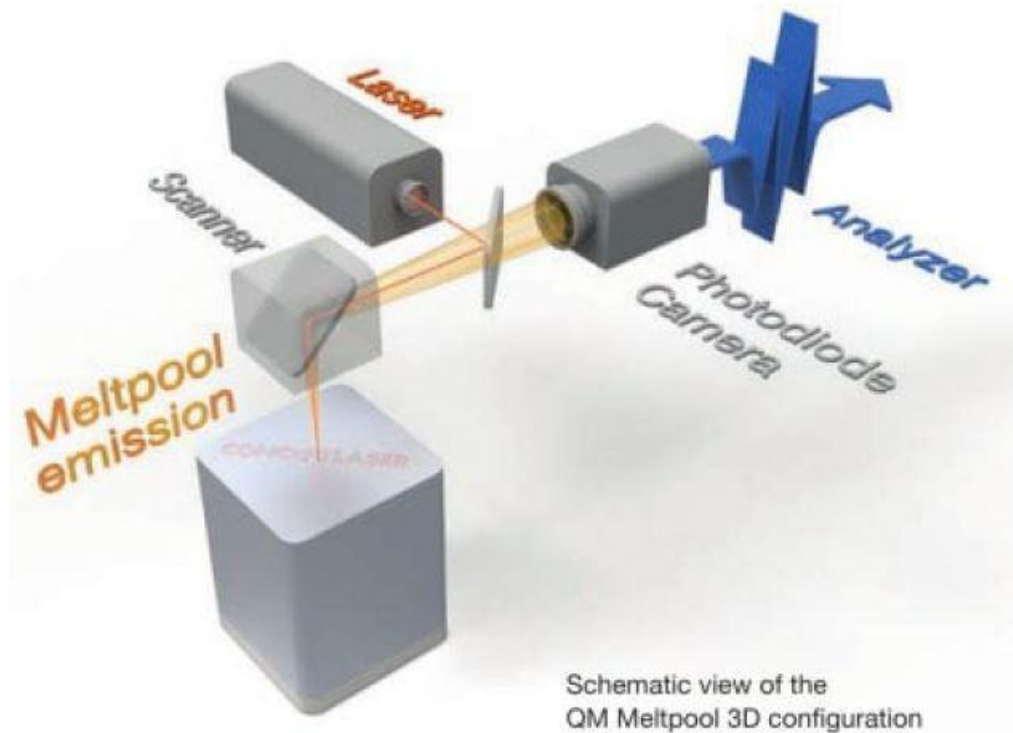


Obrázek 1.30 Porovnání MPM a OT a mikroskopického snímku [19]

Na obrázku lze vidět horká (červená) a studená místa (modrá) vlivem záměrně snížené průtokové rychlosti plynu k zobrazení nežádoucích jevů.

- **CONCEPTLASER QM Meltpool 3D**

Jedná se o systém pro sledování taveniny pomocí fotodiody a kamery. Fotodioda zaznamenává emise taveniny, které vznikají během procesu tavení v infračerveném pásmu. Fotodioda má pozorovací plochu 4 cm<sup>2</sup> a určuje tak intenzitu taveniny, zatímco kamera detekuje oblast 1 mm<sup>2</sup> a umožňuje detailní pohled do oblasti taveniny. Pomocí naměřených dat se generuje 3D popřípadě 2D obraz součásti. Díky tomu lze analyzovat pomocí softwaru celý proces 3D tisku [6].



Obrázek 1.31 Schéma QM Meltpool 3D systému [6]

- **CONCEPTLASER QM Powder**

Systém sledující koncentraci kyslíku v procesní komoře a průběžně analyzuje stav filtru. 3D tiskárna obsahuje několik senzorů kyslíku pro dostatečné pokrytí procesu. Cílem tohoto systému je umožnit bezpečný proces 3D tisku a následnou manipulaci s reaktivními materiály [6].

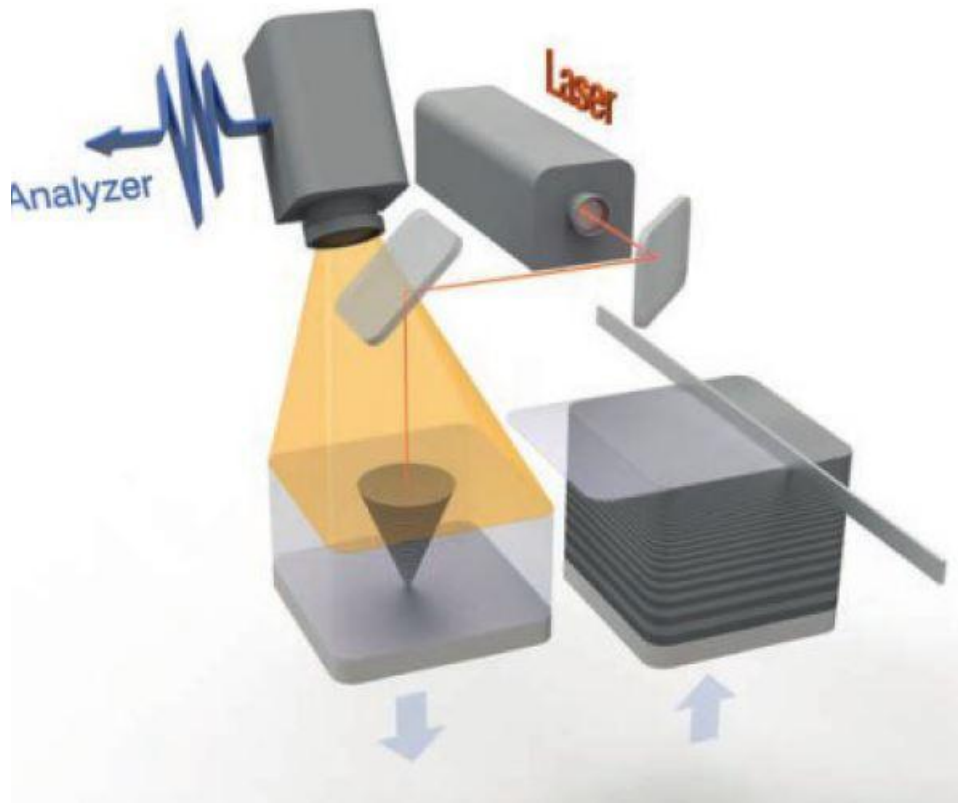
- **CONCEPTLASER QM Live View**

Systém, který využívá další kameru v procesní komoře, která zaznamenává celý proces s vysokým rozlišením. Pomocí ní je umožněn vzdálený přístup [6].



- **CONCEPTLASER QM Coating**

Jedná se o systém redukce dávek kovového prášku během procesu 3D tisku, který je monitorován pomocí fotoaparátu s vysokým rozlišením. Ten pořídí snímek před a po aplikaci vrstvy, následně pomocí algoritmu je porovnán obraz zaznamenaných dat. Analyzátor dále rozhoduje, zda byla aplikace prášku dostatečná či nikoliv [6].



Obrázek 1.32 Schéma QM Coating systému [6]

- **CONCEPTLASER QM Fiber Power**

Jedná se o systém monitorující laserový zdroj v procesu 3D tisku. Při výskytu nesrovnalostí (pokles výkonu) jsou data přenesena do softwaru zařízení. Díky tomuto systému je zajištěna stálá kontrola s možným okamžitým zásahem obsluhy [6].

- **CONCEPTLASER QM Cusing Power**

Systém monitorující přívod energie (požadovaného výkonu) laseru. Proveden je na konci optické dráhy a zaznamenány jsou všechny faktory, které ruší výkon laseru [6].

- **CONCEPTLASER QM Documentations**

Systém pro shromáždění všech dat senzorů do jednoho protokolu. To je výhodné z hlediska přehledu obsluhy a zpětné kontroly jednotlivých fází procesu 3D tisku [6].

- **SLM SOLUTIONS GROUP AG - Meltpool monitoring (MPM)**

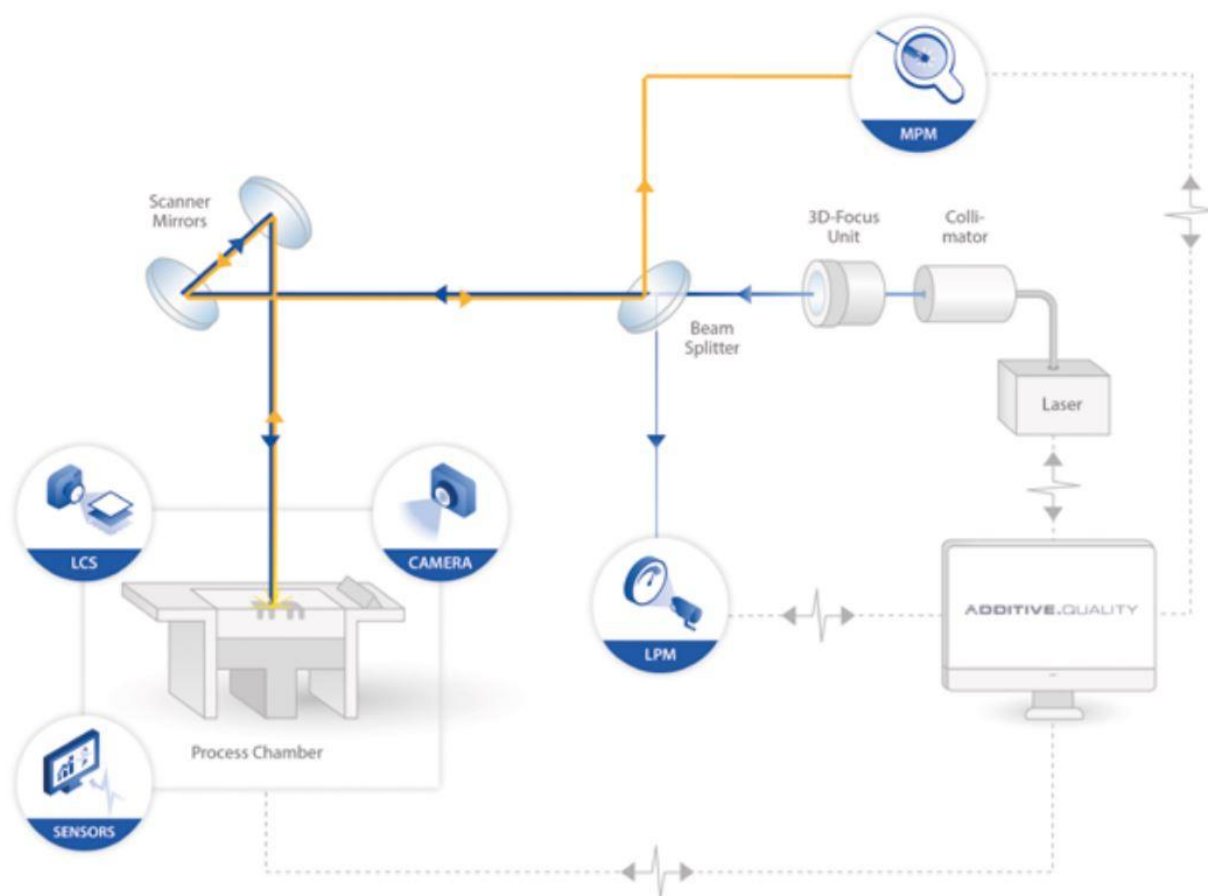
Monitorování pomocí pyrometrů umístěných na ose tak, aby snímaly záření z taveniny v práškovém loži. Zaznamenaná data následně umožňují analýzu a identifikaci možných nesrovnalostí během procesu 3D tisku, a tak odhalit vznik případných anomálií. Hlavní výhodou je průběh měření nezávisle na materiálu, sekvenční výstup obrazů jednotlivých vrstev a podpora pro vývoj a optimalizaci procesu 3D tisku [26].

- **SLM SOLUTIONS GROUP AG - Laser power monitoring (LPM)**

Samostatný systém na ose, který trvale monitoruje skutečný emitovaný laserový výstup během celého procesu 3D tisku. Okamžitý výstup se měří díky rozdělovači laserového paprsku v optické dráze a jeho odrazem do senzoru. Tyto procesy probíhají v reálném čase a případné odchylky jsou identifikovány softwarem a dochází k upozornění obsluhy. Hlavní výhodou je trvalé sledování skutečné energie vláknového laseru [26].

- **SLM SOLUTIONS GROUP AG - Layer Control System (LCS)**

Jedná se o systém pro kontrolu a dokumentaci každé vrstvy práškového lože s cílem odhalit nepravidelnosti. V případě detekce je obsluha zařízení upozorněna [26].



Obrázek 1.33 Schéma MPM, LCS, LPM systémů od společnosti SLM SOLUTIONS GROUP AG [26]

## **2. Cíle práce**

V této kapitole budou rozepsána jednotlivá zadání k provedení experimentů.

### **2.1. Zpracování rešerše současného stavu využití termografického měření ve výzkumu a výrobě pomocí aditivních technologií (3D tisku).**

Účelem tohoto cíle je zpracování teoretických poznatků pro uvedení do problematiky související s kombinací technologie 3D tisku a termografické technologie.

### **2.2. Návrh a provedení experimentů analýzy vad pomocí krátkovlnného termografického systému**

Účelem tohoto cíle je navržení metodiky zpracování dat pro analýzu vad pomocí termografického systému a zjistit jeho schopnost odhalení vad v procesu 3D tisku.

### **2.3. Návrh a provedení experimentů s využitím dlouhovlnného termografického systému s globálním pohledem na vyráběný díl**

Účelem tohoto cíle je zpracování globálního pohledu na teplotní pole během celého procesu 3D tisku a zjištění vhodnosti pro posouzení rizikových míst s ohledem na teplotní průběh.

### **2.4. Návrh a provedení experimentů zjištění emisivity kovového prášku a přetaveného materiálu v závislosti na teplotě**

Účelem tohoto cíle je nalezení skutečných hodnot emisivity pro materiál MS1 během celého procesu 3D (od počátečního práškového materiálu po konečný vytištěný materiál).

### 3. Provedené experimenty

V této kapitole budou popsány jednotlivé experimenty a způsoby jejich zpracování. Jednotlivé experimenty byly prováděny ve spolupráci s Regionálním technologickým institutem při Fakultě strojní na Západočeské univerzitě v Plzni a Nové technologie výzkumné centrum Západočeské univerzity v Plzni.

#### 3.1. Měření termografickou kamerou pro nalezení vad procesu 3D tisku

Tento experiment byl zvolen pro zjištění schopností termografických kamer z hlediska nalezení vad (pórovitosti, dutin) v tištěném dílu.

##### 3.1.1. Použité zařízení

Pro provedení samotného experimentu byla využita následující zařízení:

- **Termografická kamera MCS640 (LumaSense)**



Obrázek 3.1 Termografická kamera MCS640 [47]

Tabulka 3.13 Specifikace termokamery MIKRON MCS640

<b>MIKRON MCS640 (LumaSense) specifikace MB30</b>	
Typ detektoru	Si, nechlazený detektor
Rozlišení detektoru	640 x 480 pixelů
Zorné pole stand. objektivu / minimální zaostřitelná vzdálenost	10,8° × 8,1° / 0.3 m
Spektrální rozsah detektoru	780 - 1080 nm
Teplotní rozsah kamery	800°C až +3000 °C <ul style="list-style-type: none"> <li>• R1: 673 až 1530° <ul style="list-style-type: none"> <li>○ integrační doba: IT=16ms</li> <li>○ s prop. 0,5 max T = 1690°C</li> </ul> </li> <li>• R2: 857 až 2080°C <ul style="list-style-type: none"> <li>○ IT=1,7ms ?</li> <li>○ s prop. 0,5 max T = 2354,3°C</li> </ul> </li> <li>• R3: 746 až 3015°C <ul style="list-style-type: none"> <li>○ IT=40-50us</li> </ul> </li> </ul> (Pro experiment byly použity filtry s propustností 0,5 a tím dochází ke změně měřitelné max. teploty na 1690°C)
Teplotní citlivost (Noise equivalent temperature difference NETD)	1°C při +600°C
Přesnost (% z hodnoty)	± 0,5% hodnoty v Kelvinech
Vzorkovací frekvence	60 Hz při plném rozlišení
Rozsah pracovních teplot	0°C až +50°C
Celková hmotnost	0,7 kg
Velikost kamery (D x Š x V)	170 x 63 x 56 mm (+ cca 30 mm objektiv)
Další funkce	komunikace: GigE

Ke kameře byl připevněn objektiv s následujícími vlastnostmi.

Tabulka 3.14 Specifikace objektivu

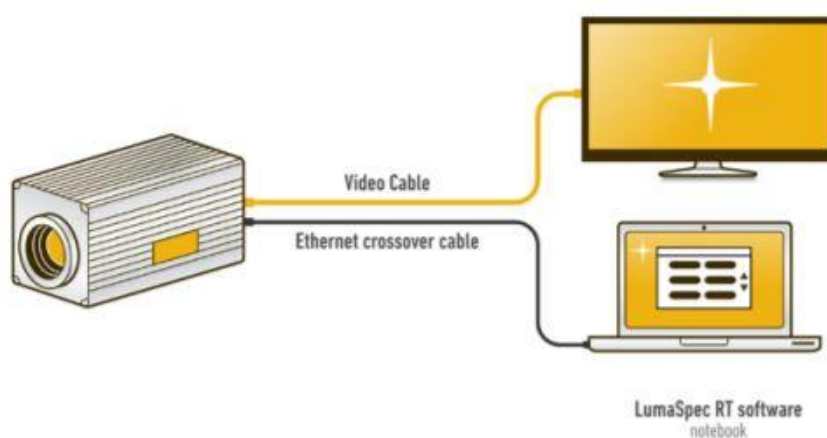
<b>Objektiv</b>	<b>ohnisková vzdálenost</b>	<b>zorný úhel (H x V FOV)</b>	<b>minimální fokusační vzdálenost</b>
teleskopický	75 mm	3,5° x 2,6°	0,5 m

Dále byla kamera opatřena dvojicí filtrů pro blokaci vlnové délky laseru (1064 nm, tato dvojice umožňuje blokovat i 805 nm) viz příloha č.2 (*propustnost filtrů 780 - 1080nm.xlsx*):

- FEL850 – propouští vlnové délky vyšší než 850 nm
- FES1000 – propouští vlnové délky kratší než 1000 nm
- Do IR kamery tak může procházet záření o vlnovém rozsahu 850 až 1000 nm

• **Notebook se softwarem pro ovládání termografické kamery [46]**

Využívaný software pro zaznamenávání a nastavení kamery je LumaSpec RT, jedná se o systém pro vysokorychlostní termografické zobrazování v reálném čase. Dále umožňuje analýzu a vyhodnocování obrazu pomocí řady funkcí.



Obrázek 3.2 Schéma konfigurace propojení kamery se softwarem [46]

Tabulka 3.13 Výpis funkcí softwaru LumaSpec RT

Akvizice obrazu a ovládání kamery ↓	Záznam obrazu a dat ↓
Dálkové ovládání kamery (ostření, rychlost, korekce uniformity atd.)	Histogramy a izotermy
Nastavitelná emisivita, pozadí a nastavení přenosu	ROI zpracování (až 32 ROI na kameru)
Nastavitelné palety obrázků včetně barev, rozpětí a rozsahu	Více typů ROI (bod, čára, plocha atd.) se zobrazením teploty
Auto-gain pro celý obraz nebo individuální ROI	ROI informace o minimální, maximální, průměrné a standardní odchylce teploty od každého pixelu
Získání obrázků a ukládání termálních dat	Zobrazení 3D profilu
Uložení videí termálních snímků	Lineární teplotní graf
Použití exportovaných obrázků s offline analyzátořem LumaSpec	Detekce horkých a studených míst
Až 8násobné přiblížení	Odčítání obrázku
Přehrávejte a analyzujte zaznamenané snímky / videa	Trendové grafy měření ROI

Automatické přepínání rozsahu (pro kameru MCS640)	Nástroj pro měření profilu kolmých os (teplotní diagram X-Y)
Sdílení dat ↓	Automatizace a zařízení DCS ↓
Uložit obrázky jako JPG nebo BMP	Nástroje pro alarm ROI
Export jedním kliknutím do aplikace Microsoft Excel	Konfigurace více kamer s funkcí automatického spuštění
Nástroje pro export dat textových souborů	Podpora protokolu OPC a server webové stránky
Archivační nástroje	Podpora protokolu Modbus (sériový a Ethernet)

V softwaru IR kamery byly nastaveny následující parametry:

- emisivita = 1 (Při záznamu není nutné znát její skutečnou hodnotu, lze ji měnit dodatečně. Pro účel měření a odhalování vad není její znalost bezpodmínečně nutná, proto zvolena hodnota 1).
- propustnost = 0,5 (propustnost dvojice filtrů změřená na referenčním černém tělese při různých teplotách)
- frekvence záznamu – 60 Hz

### • 3D tiskárna kovů EOS M290

3D tiskárna kovů EOS M290 patří mezi tiskárny využívající technologii DLMS (viz kapitola 1.1.2 Metody 3D tisku). Postupným spékáním práškového materiálu se tedy vytváří jednotlivé vrstvy.



Obrázek 3.3 EOS M 290 [43]

Tabulka 3.14 Parametry EOS M290

<b>EOS M 290</b>	
Velikost prostoru pro tisk	250 mm x 250 mm x 325 mm
Typ laseru	Yb-vláknový laser; 400 W
Přesná optika	F-theta-čočka; vysokorychlostní skener
Rychlost skenování	až 7,0 m/s
Průměr ostření	100 μm
Zdroj napájení	32 A
Spotřeba energie	max. 8,5 kW / typical 3,2 kW
Generátor dusíku	integrováný
Spotřeba energie	maximum 12 kW / typical 3,7 kW
Rozměry (B x D x H)	
Systém	2,500 mm x 1,300 mm x 2,190 mm
Doporučený instalační prostor	min. 4,800 mm x 3,600 mm x 2,900 mm
Hmotnost	cca. 1,250 kg
Příprava dat	
Software	EOS RP Tools; EOSTATE; EOSPRINT; Materialise Magics RP with SG+ and further modules
CAD rozhraní	STL. Volitelně: převaděč pro všechny standardní formáty
Síť	Ethernet

- **Prášek MS1 [39]**

EOS Maraging Steel (MS1) je ocelový prášek, který byl optimalizován speciálně pro zpracování na systémech EOS. Tato ocel má velmi dobré mechanické vlastnosti a je snadno tepelně zpracovatelná pomocí jednoduchého procesu – tepelné kalení pro získání vynikající tvrdosti a pevnosti. Tento materiál je ideální pro mnoho nástrojových aplikací (DirectTool), jako jsou nástroje pro vstřikovací lití, tlakové lití slitin lehkých kovů, děrování, vytlačování atd., a také pro vysoce výkonné průmyslové a strojní součásti, například v leteckém a automobilovém průmyslu.





Obrázek 3.4 Vytištěný model z MS1 [42]

Díly vyrobené z EOS MaragingSteel MS1 lze po procesu výstavby snadno obrobít a lze je po vytvrzení při 490 ° C po dobu 6 hodin snadno dodatečně vytvrdit na více než 50 HRC. Díly mohou být dále obrobena, jiskrově erodována, svařována, mikroostrována, leštěna a potažena, pokud je to potřeba. Díky způsobu vytváření vrstev mají části určitou anizotropii, kterou lze vhodným tepelným zpracováním redukovat nebo odstranit [39].

Tabulka 3.15 Přehled vlastností MS1[39]

Materiálové složení Fe (bilance)			
Ni (17 - 19% hmotn.)	Mo (4,5 - 5,2% hmotn.)	Al (0,05 - 0,15% hmotn.)	C (0,03% hmotn.)
Co (8,5 - 9,5% hmotn.)	Ti (0,6 - 0,8% hmotn.)	Mn, Si (každý - 0,1% hmotn.)	P, S (každý - 0,01% hmotn.)
Relativní hustota cca. 100 %	Hustota 8,0 - 8,1 g /cm <sup>3</sup>	Pevnost v tahu min. 1930 MPa	Modul pružnosti [GPa] Horizontálně 160 ± 25 Vertikálně 150 ± 20
Tepelné vlastnosti součástí	Vytištěné	Po vytvrzení	Maximální provozní teplota cca. 400 ° C
Tepelná vodivost	15 ± 0,8 W / m ° C	20 ± 1 W/m°C	
Měrná tepelná kapacita	450 ± 20 J / kg ° C	450 ± 20 J/kg°C	

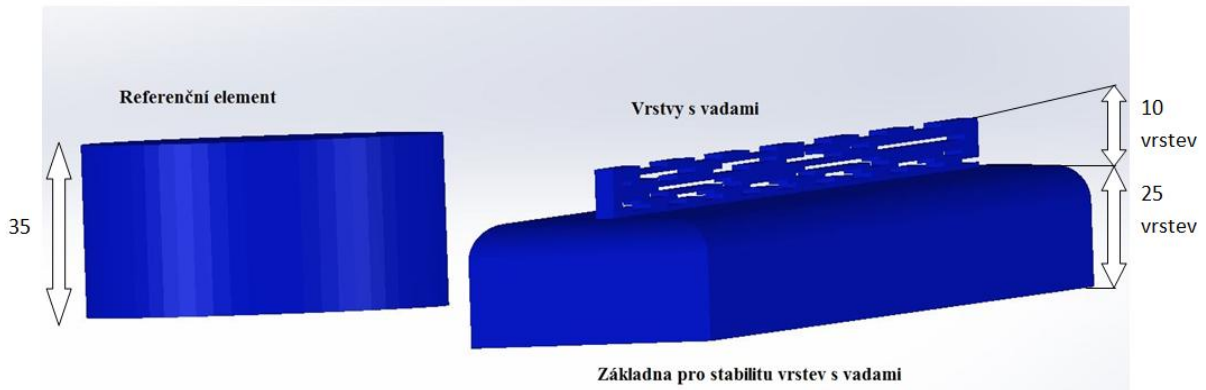
### 3.1.2. Postup záznamu dat experimentu

Před začátkem samotného měření byla nejprve umístěna kamera do pozice nad průzor do pracovního prostoru stroje. Průzor byl vybaven propustným sklíčkem.



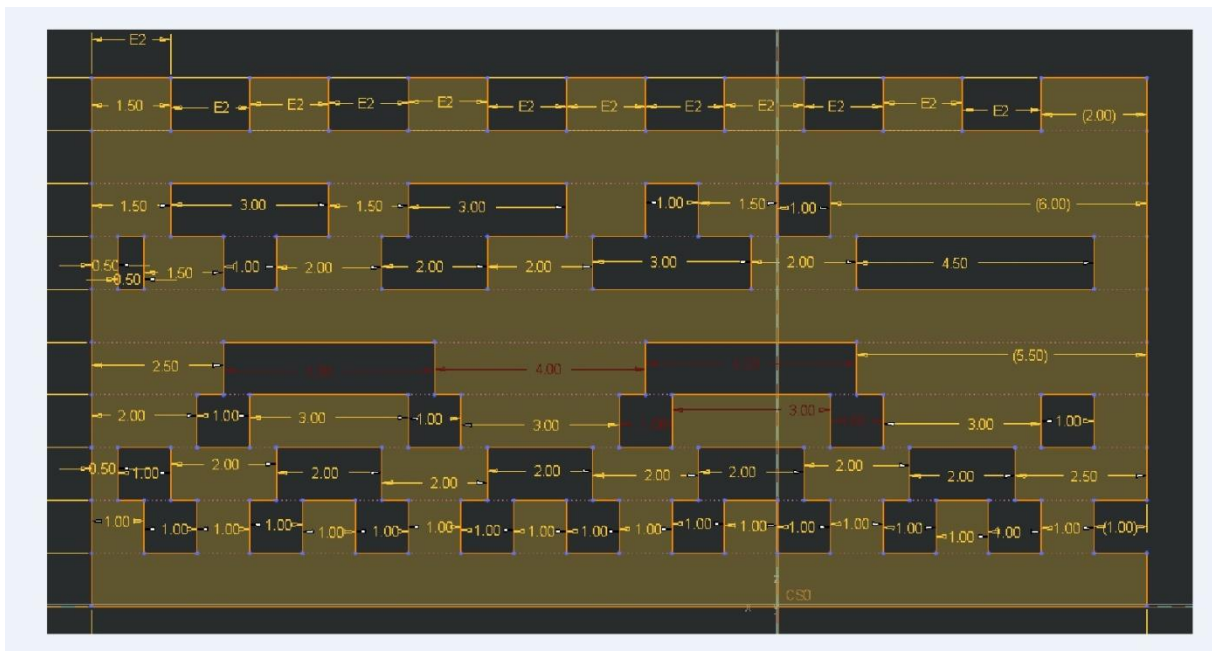
Obrázek 3.5 Termografická kamera umístěná nad průzorem do pracovního prostoru

Následně bylo potřeba kameru zaostřit na předem vyhrazené místo pro 3D tisk navrženého modelu obsahující vady. Po zaostření je pracovní prostor uzavřen, je z něho vyčerpán vzduch a posléze napuštěn pracovním plynem, který zabraňuje oxidaci roztaveného kovu (dusík). Po napuštění a kontrole nastavených parametrů 3D tisku je proces spuštěn. Tištěný model vytvořený pro experiment se skládal z (25 vrstev) základny zajišťující stabilitu vytvářeného dílu. Tento díl je tvořen 10 vrstvami s vadami různých rozměrů pro zjištění detekovatelnosti vad (vady jakých rozměrů je kamera ještě schopna odhalit). Dále byla součástí modelu kruhovitá struktura sloužící jako referenční element pro jednoduchou rozlišitelnost, ve které vrstvě se v daný moment nacházíme.



Obrázek 3.6 Tisknutý model pro měření vad při 3D tisku

Velikost části modelu s vadami, která je zásadní pro záznam vad, je 20 x 1,5 mm, výška jedné vrstvy je 0,4 mm, celková výška modelu je tedy 4 mm (10 vrstev).

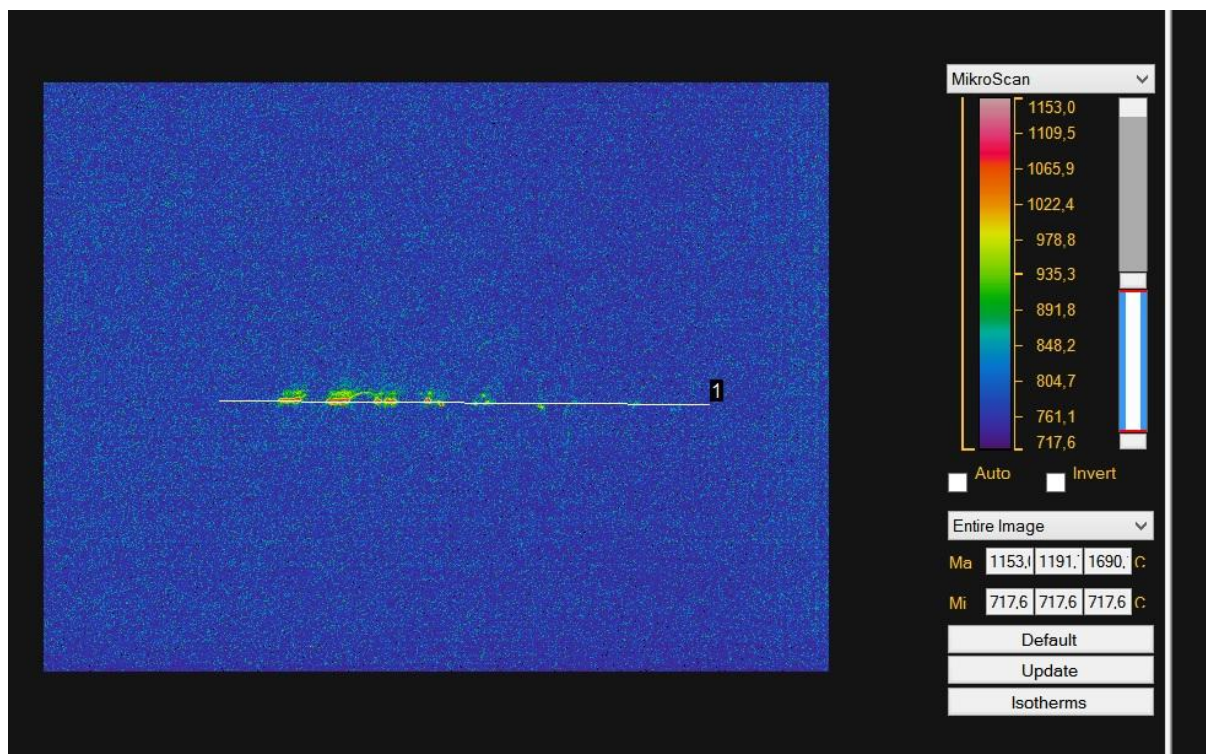


Obrázek 3.7 Schéma vad (dutin) v modelu

Nejprve tedy byly zhotoveny vrstvy základny pro dosažení stability navržených ve dvou rozdílně nastavených parametrech 3D tiskárny označených jako testovací a standardní.

1. Parametry laseru – testovací
  - rychlost laseru 250 mm/s
  - výkon: 285 W
2. Parametry laseru – standardní
  - rychlost laseru 960 mm/s
  - výkon: 285 W

Záznam dat IR kamerou byl zahájen se spuštěním procesu 3D tisku. Vrstvy s vadami byly naměřené ve všech 3 teplotních rozsazích termokamery (R1, R2, R3 viz. tabulka č. 3.1 Specifikace termokamery MIKRON MCS640, každý s odlišnou integrační dobou detektoru) pro získání maxima dat pro následnou analýzu. A to tak, že se nejdříve vytiskla celá část modelu s vadami pro jeden rozsah a poté pro další.



Obrázek 3.8 Zaznamenaný termogram pro jednu z vrstev s vadami

Takto zaznamenaná data byla uložena a připravena pro další zpracování a analýzu.

Rozdělení jednotlivých měření dle zaznamenaných dat:

Tabulka 3.16 Jednotlivé záznamy měření vad

Číslo měření / rychlost laseru	Použitý rozsah IR kamery	Vrstva
M. 1 / Testovací	R2	Základna
M. 2 / Testovací	R3	Základna
M. 3 / Testovací	R2	Vrstvy s vadami
M. 4 / Testovací	R3	Vrstvy s vadami
M. 5 / Standardní	R2	Vrstvy s vadami
M. 6 / Standardní	R3	Vrstvy s vadami
M. 7 / Standardní	R1	Vrstvy s vadami
M. 8 / Testovací	R1	Vrstvy s vadami

### 3.2. Experiment zobrazení globálního teplotního pole

Tento experiment byl zvolen pro zobrazení globálního teplotního pole při 3D tisku tzv. Krakena neboli modelu frézovací hlavy.

#### 3.2.1. Použité zařízení

- Termografická kamera FLIR A615 [40]



Obrázek 3.9 Termografická kamera FLIR A615 [40]

Tabulka 3.2 Parametry IR kamery FLIR A615

Typ	FLIR A615
Rozlišení detektoru	640 x 480 pixelů
Teplotní citlivost	< 0,05°C
Teplotní rozsah	-40°C...+2 000°C
Standardní objektiv / minimální fokusační vzdálenost	25° × 18.8° / 0.4 m
Volitelné objektivy	6°, 15°, 45°, 80° close-up 2,9x, 5,8x, 4x
Přesnost	± 2°C nebo ± 2%
vzorkovací frekvence pozn.: frekvence 100 a 200 Hz jsou při tzv. windowingu, tj. vyšší frekvence je dosaženo na úkor zmenšení rozlišení obrazu	50Hz / 100Hz / 200Hz
Spektrální rozsah:	7,5 – 13μm
Napájení přes Ethernet	Ano, IEEE 802.3
Ethernet	Gigabit Ethernet
Komunikace	GigE Vision a GenICam
Software	Ano, FLIR Tools
Rozměry	216 x 73 x 75 mm



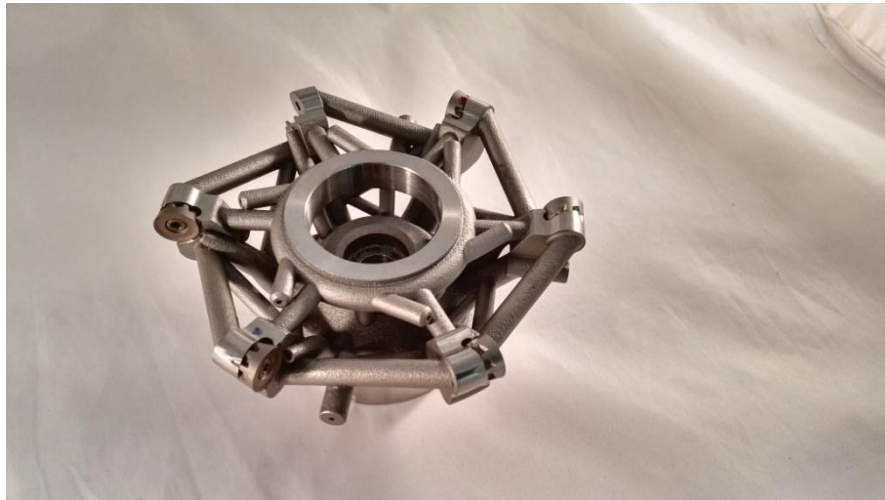


- **3D tiskárna kovů EOS M290**

Viz. kapitola 3.1.1 Použité zařízení pro experiment pro nalezení vad procesu 3D tisku.

- **Model**

Model, na kterém bylo prováděno měření je tzv. "Kraken" neboli model frézovací hlavy vyvinuté v Regionálním technologickém institutu (RTI) Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni [44].



Obrázek 3.11 Vytisknutý model frézovací hlavy "Kraken" [44]

### 3.2.2. Postup měření

IR kamera byla umístěna nad průzor s germaniovým okénkem do pracovního prostoru 3D tiskárny a propojena s notebookem pro uložení zaznamenaných dat (obdobně jako v případě experimentu v kapitole č. 3.1). Frekvence záznamu IR kamery byla 25 Hz a samotné měření se provádělo ve 2 teplotních rozsazích.

- R1: -40 až 150°C
- R2: 100 až 650°C

IR kamera byla následně zaostřena na část pracovního prostoru tak, aby byl pohled na model dostačující. Po zaostření je pracovní prostor uzavřen, je z něho vyčerpán vzduch a posléze napuštěn pracovním plynem, který zabraňuje oxidaci roztaveného kovu (dusík). Po napuštění a kontrole nastavených parametrů 3D tisku je proces spuštěn. Záznam IR kamery byl spuštěn se spuštěním procesu 3D tisku. Část záznamu byla prováděna v již zmiňovaném rozsahu R1 a další část v R2 pro lepší zobrazení teplotního pole. Takto zaznamenaná data byla připravena pro analýzu.

### 3.3. Experiment pro zjištění emisivity

Tento experiment byl zvolen pro zjištění skutečné emisivity materiálu jednotlivých fází (kromě samotné taveniny), kterými si během procesu 3D tisku prochází.

#### 3.3.1. Použité zařízení

- **Elektrická topná deska**

Jedná se o plošný zdroj tepla, který slouží k ohřevu předmětů až na 600 °C. Její rovnoměrná teplota je nastavována programovatelným regulátorem.



Obrázek 3.12 Plošný zdroj tepla a regulátor

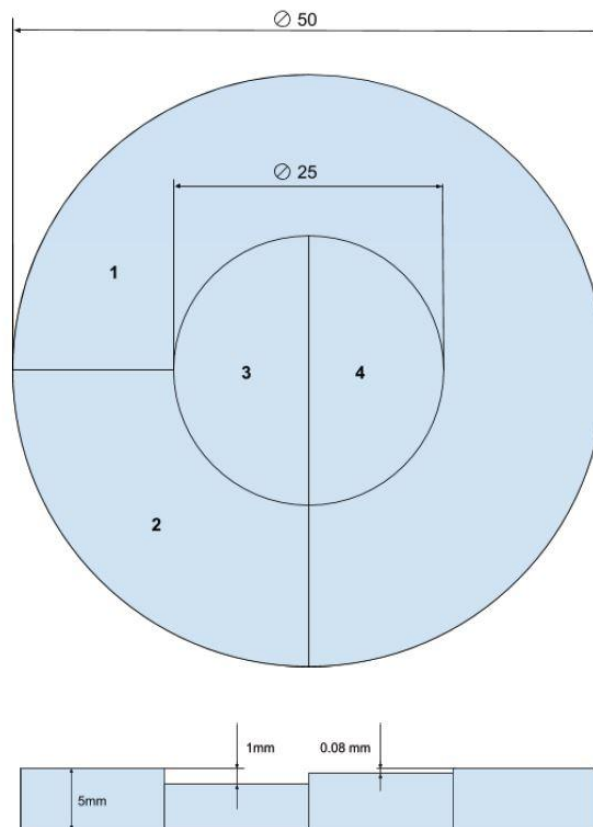
- **Termografická kamera FLIR A615**

Viz. kapitola 3.2.1 Použité zařízení pro experiment pro zobrazení globálního pole.

- **Model pro měření emisivity**

Jedná se o kruhový model, rozdělený na 4 oblasti s rozdílnými parametry 3D tisku, tak aby byla zjištěna změna emisivity během procesu 3D tisku.





Obrázek 3.13 Schéma modelu pro měření emisivity

Při tištění objemu materiálu se používá vyšší výkon (285 W) a vyšší rychlost laseru (960 mm/s), tento druh tištění je zastoupen oblastí, která je označena č. 2. Takto zvolené parametry umožňují vyšší produktivitu tisku a dostatečné provaření materiálu. Zároveň však způsobují horší kvalitu vytvořeného povrchu a rozměrovou přesnost, to je však v běžném případě eliminováno tištěním dalších vrstev. Další oblast (označena č. 1), reprezentuje způsob tištění zajišťující kvalitu povrchu v posledních vrstvách dílu, tedy tištění, kde se používá nižší rychlost (500 mm/s) a výkon laseru (165 W). Oblast označena č. 3 a č. 4, je tištěna stejnými parametry jako oblast č. 1. Tyto oblasti slouží pro nanesení prášku a měření jeho emisivity tak, že na oblast č. 3 byla nanášena větší vrstva prášku a na oblast č. 4 menší.

- **Prášek MS1**

Viz. kapitola 3.1.1 Použité zařízení pro experiment pro nalezení vad procesu 3D tisku.

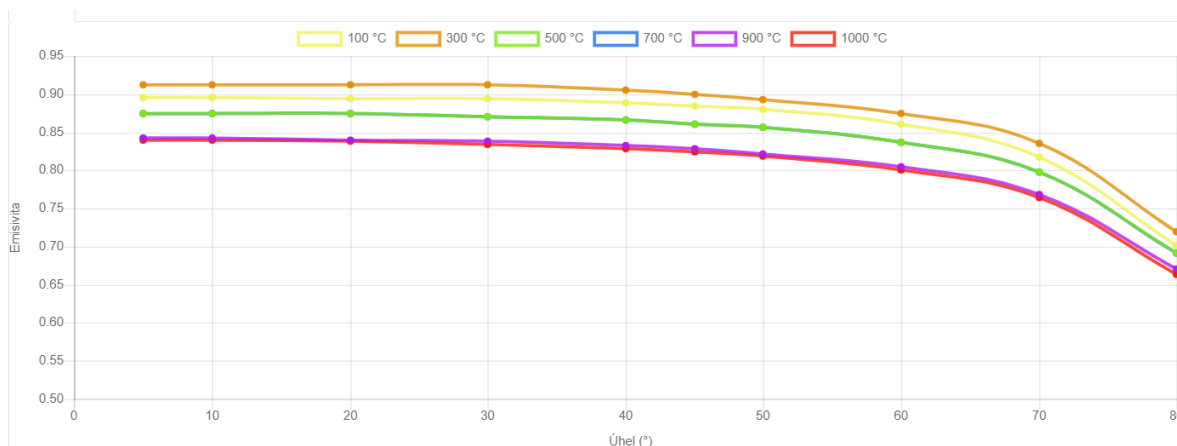
- **Software LabIR**

Viz. kapitola 3.2.1 Použité zařízení pro experiment zobrazení globálního teplotního pole.

- **LabIR® Paint HERP-HT-MWIR-BK-11 [45]**

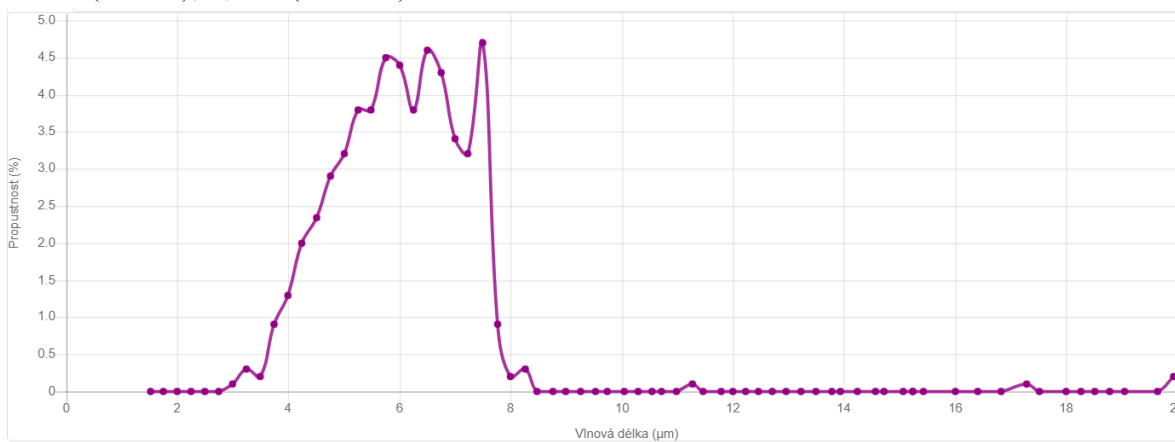
Jedná se o nesmývatelnou termografickou barvu ve spreji do vysokých teplot. Barva má garantované fyzikální vlastnosti (teplotní odolnost až 1 000 °C) a závislost emisivity na vlnové délce, úhlu snímání kamery. Díky tomu lze dosáhnout velmi přesných výsledků termografického měření.

Optické vlastnosti barvy jsou následující:

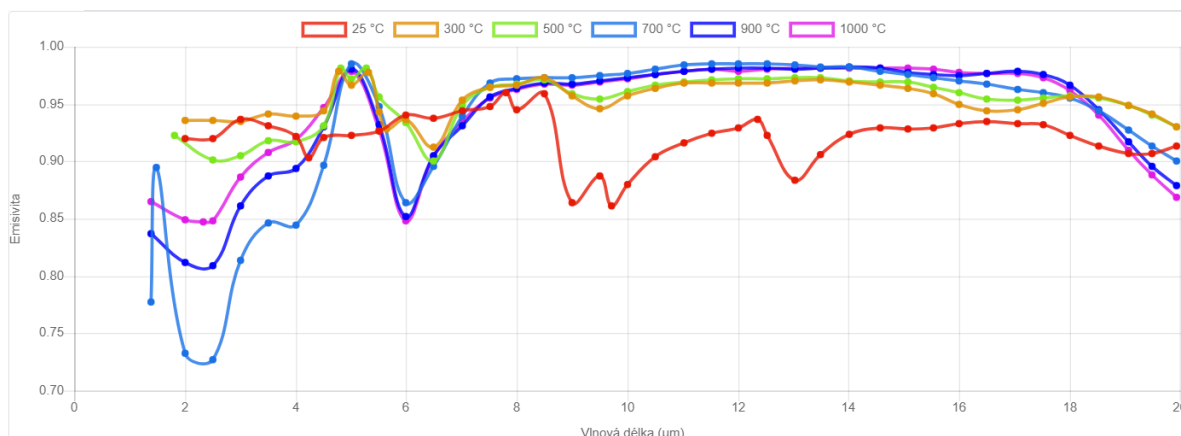


Obrázek 3.14 Závislost pásmové emisivity na úhlu pro vybrané teploty pro pásmo 7,5 - 13 μm [45]

- Propustnost do 1,2 % v pásmech běžně používaných termografických kamer
- Pásmová normálová emisivita pro pásmo 3 - 5 μm: 0,922 (25°C); 0,948 (300°C); 0,946 (400°C); 0,930 (500°C); 0,899 (600°C); 0,867 (700°C); 0,885 (800°C); 0,902 (900°C); 0,922 (1000°C)
- Pásmová normálová emisivita pro pásmo 7,5 - 13 μm: 0,913 (25°C); 0,963 (300°C); 0,966 (400°C); 0,966 (500°C); 0,971 (600°C); 0,976 (700°C); 0,973 (800°C); 0,970 (900°C); 0,969 (1000°C)



Obrázek 3.15 Spektrální závislost propustnosti [45]



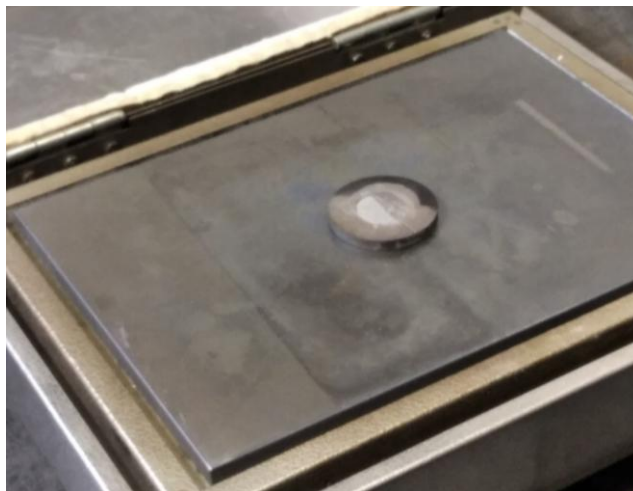
Obrázek 3.16 Spektrální závislost emisivity pro vybrané teploty [45]

### 3.3.2. Postup měření

Před zahájením experimentu se na část modelu nanasla termografická barva, která slouží jako referenční oblast, jejíž emisivitu známe. S využitím softwaru LabIR lze stanovit emisivitu ostatních oblastí za předpokladu, že mají stejnou teplotu, a lze takto dopočítat oblasti další (teplotu známe díky regulátoru topné desky). Dále se na místo vyhrazené na modelu nanasla prášek pro měření jeho emisivity.



Obrázek 3.17 Model s nanesenou barvou a práškem



Obrázek 3.18 Model umístěný na topné desce

Samotný experiment se skládal ze 2 částí, nejprve se model ohříval na teplotu (uvnitř topné desky)  $450^{\circ}\text{C}$ , následně se poklop topné desky otevřel a spustil se záznam IR kamery s chladnutím modelu (frekvence záznamu 1 snímek za 5s). Vzhledem ke vzniklé oxidaci prášku umístěného na povrchu modelu se experiment prováděl znovu s odlišným postupem.



Obrázek 3.19 Model se zoxidovaným práškem

A to takovým, že se model nahříval při otevřeném poklopu topné desky, tak aby se dosáhlo max. teploty před počátkem oxidace ( $301,08^{\circ}\text{C}$ ) a přitom byl měřen. Po počátku oxidace se topná deska uzavřela a model se dohřál, následně se znovu otevřela a změřil se průběh chladnutí. Díky tomu byla naměřena emisivita jak zoxidovaného prášku, tak prášku bez oxidace, který odpovídá prášku v reálném procesu 3D tisku. Po tomto zaznamenání dat, byla připravena na analýzu v softwaru LabIR (výpočet emisivity).

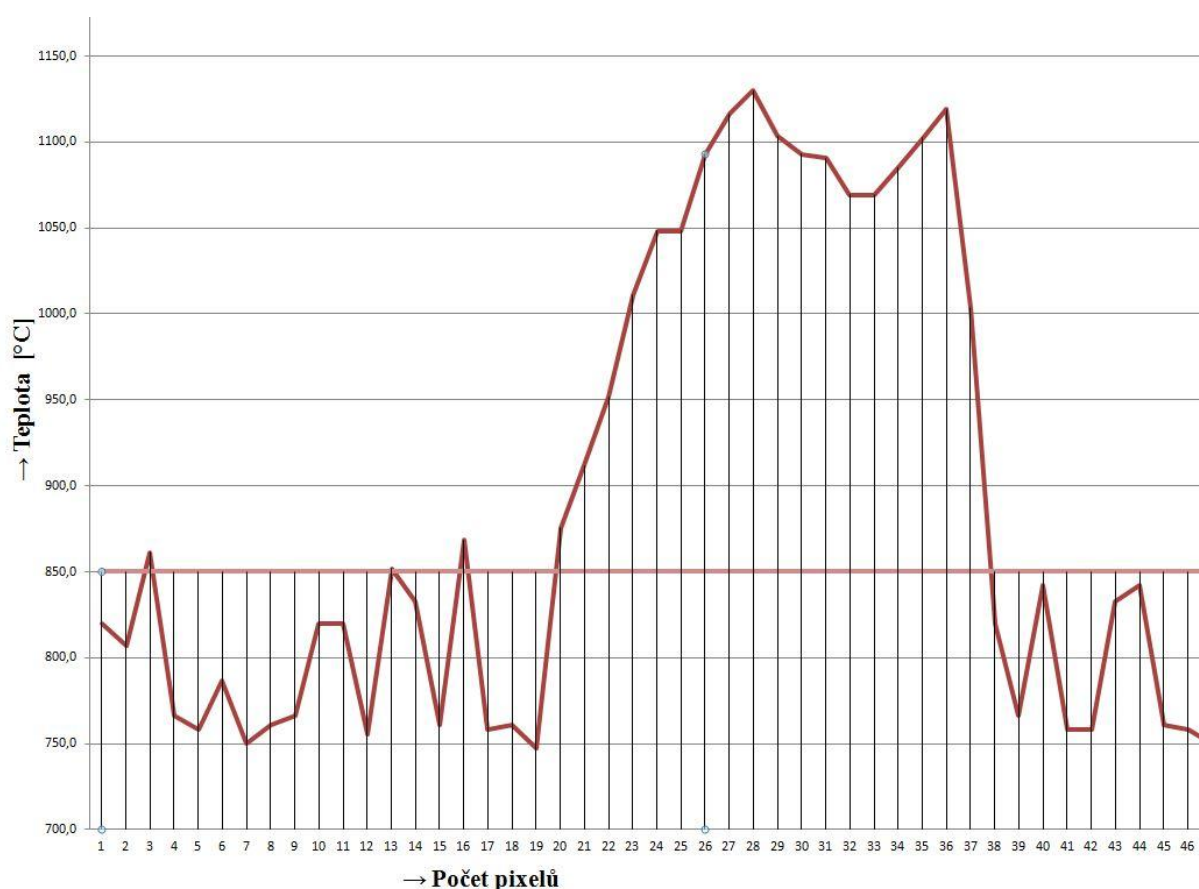
## 4. Analýza naměřených dat

V této kapitole bude podrobně popsána analýza naměřených dat jednotlivých experimentů ve sledu, jak byly popsány v předešlé kapitole.

### 4.1. Měření termografickou kamerou pro nalezení vad procesu 3D tisku

Tato část navazuje na kapitolu 3.1 Měření termografickou kamerou pro nalezení vad procesu 3D tisku, zde je provedeno vyhodnocení naměřených dat.

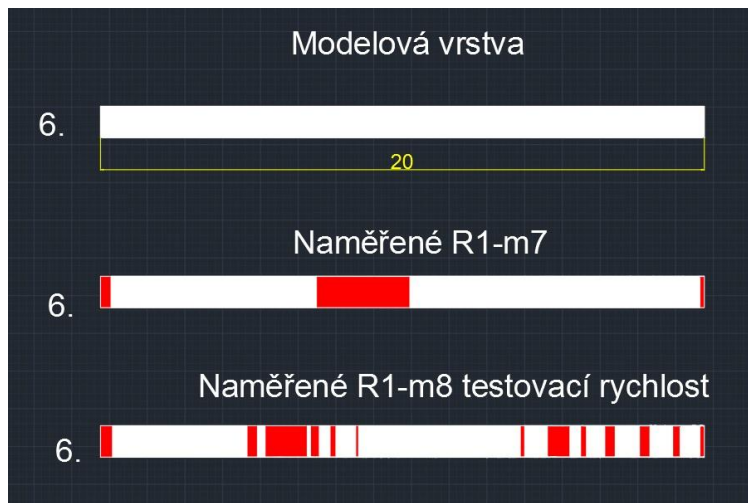
Výsledné záznamy rozsahu R1 byly exportovány do Excelu a jednotlivé snímky (termogramy) pro vrstvy sjednoceny pro vytvoření grafu průběhu teplot celé vrstvy (teploty naměřené rozsahem R1 neodpovídají reálným, neboť rozsah je nedostatečný a není zadána skutečná emisivita, pro zjištění naměřených vad je však dostačující). Rozsah R1 byl vybrán pro analýzu proto, že z něj lze nejnázorněji odhalit vady rozmístěné v modelu, rozsahy R2 a R3 jsou vhodnější spíše pro analýzu spotu laseru. Jednotlivé snímky lze složit do jednoho snímku pro celou vrstvu díky znalosti délky modelu a přepočtu na pixely (400 pixelů je délka modelu (20 mm), 1 pixel tedy je 0,05 mm).



Obrázek 4.1 Ukázka složeného snímku a vyhodnocení záznamu exportovaného v Excelu



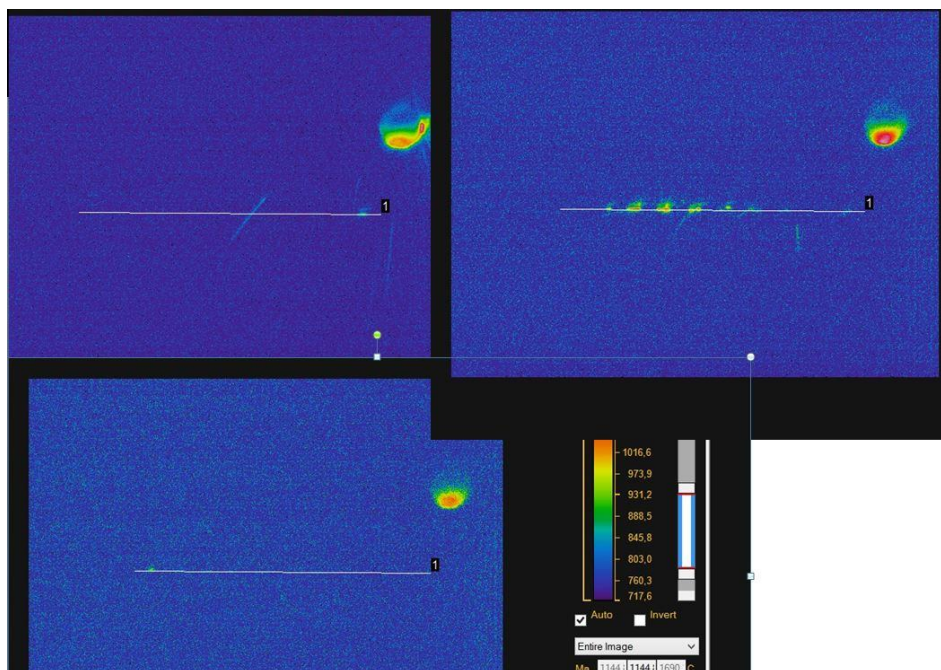
V grafu je vyznačena oblast s teplotou nižší než 850 °C, která spadá do oblasti šumu IR kamery díky příliš nízké teplotě. Následně byl zpracován rozbor jednotlivých vrstev vymodelovaných v CAD systému (Autocad) na základě modelu pro 3D tisk a vložení jednotlivých naměřených hodnot pro porovnání.



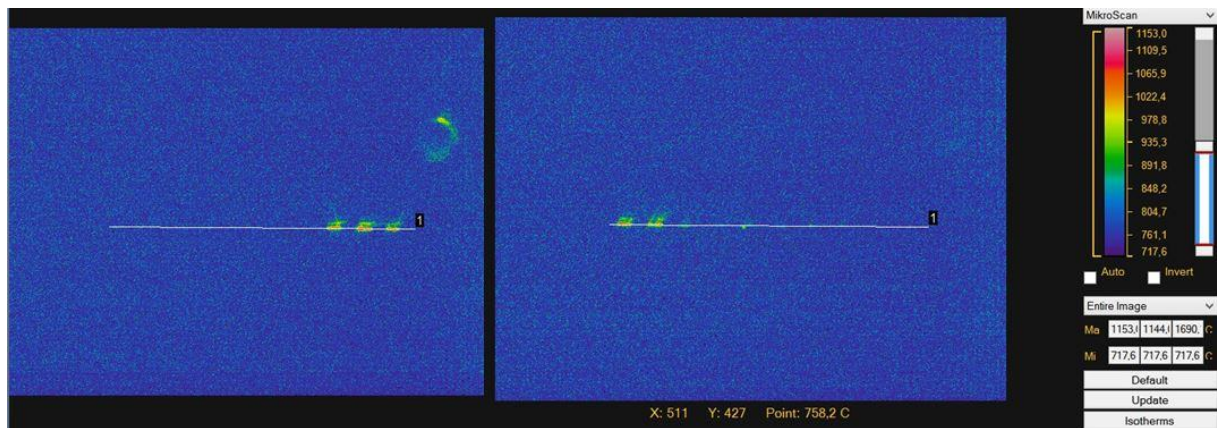
Obrázek 4.2 Příklad porovnání modelu se zaznamenanými daty

#### 4.1.1. Příklad úplné analýzy pro vrstvu č. 2

Jak již bylo zmíněno, rozsah R1 se zaznamenával ve dvou režimech. První byl proveden s testovací rychlostí laseru a druhý se standardní rychlostí laseru.

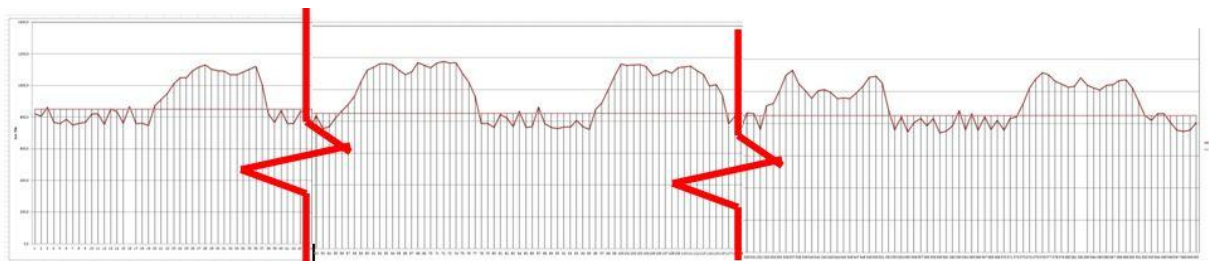


Obrázek 4.3 Termogramy pro 2 vrstvu – testovací rychlost

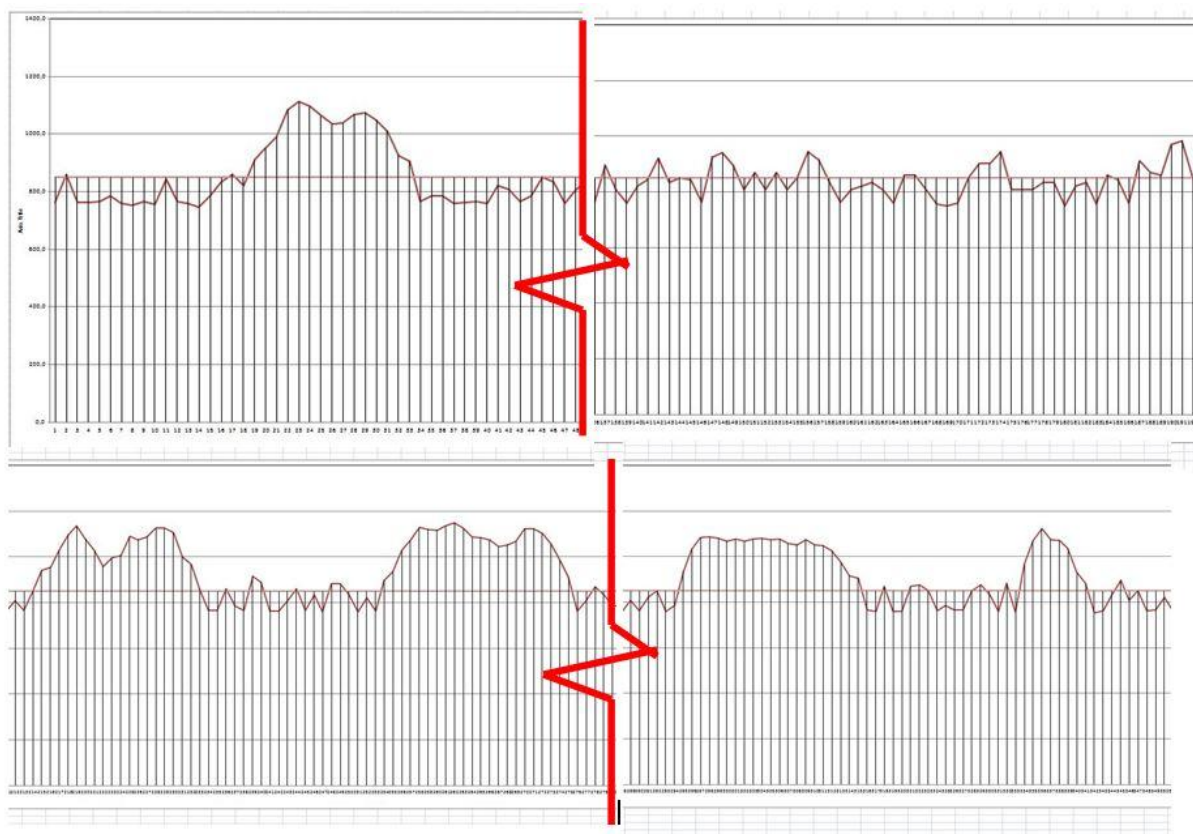


Obrázek 4.4 Termogramy pro 2 vrstvu – standardní rychlost

Po exportování jednotlivých termogramů do Excelu je bylo možné sloučit a vykreslit graf popisující celý průběh snímání termokamery pro danou vrstvu (pro názornost jsou zde zobrazeny pouze části grafu vzhledem k jejich velikosti).

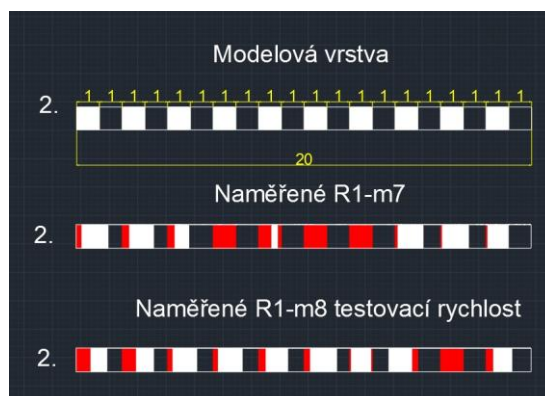


Obrázek 4.5 Exportovaná a sloučená data pro standardní rychlost (obdobně jako na obrázku č. 4.1)



Obrázek 4.6 Exportovaná a sloučená data pro testovací rychlost (obdobně jako na obrázku č. 4.1)

Po sloučení lze vytvořit zpětně model v autocadu (díky známému rozměru modelu a přepočtu z pixelů) pro porovnání se zadaným tisknutým modelem.



Obrázek 4.7 Porovnání modelů (bíle skutečně vytištěná část, mezery vyznačují hledané vady, červeně jsou odchylky od modelu)

Díky vytvoření modelu lze vidět nasnímané odchylky (vyznačené červeně) od zadaného modelu. Vznik těchto odchylek zapříčinilo několik faktorů. Jedním z těchto faktorů je integrační doba kamery, která ovlivňuje rychlost záznamu (viz tabulka č. 3.1 Specifikace termokamery MIKRON MCS640). Dalším faktorem je frekvence termokamery s ohledem na rychlost laseru. Jak lze vidět s pomalejší rychlostí laseru (testovací rychlost), je záznam úplnější. Dále jsou odchylky ovlivněny nestálostí nastavené frekvence, kdy IR kamera



"skákala" mezi 59 Hz a 60 Hz. Pro zobrazení vlivu integrační doby na naměřené hodnoty byla provedena dodatečná analýza.

#### 4.1.2. Analýza integrační doby

K analýze pro určení vzdálenosti, kterou urazí laser během integrační doby, lze využít znalost rychlosti pohybu laseru, integračního času a velikost pixelu a délku modelu z termogramů.

Tabulka 4.1 Znamé údaje pro analýzu integrační doby

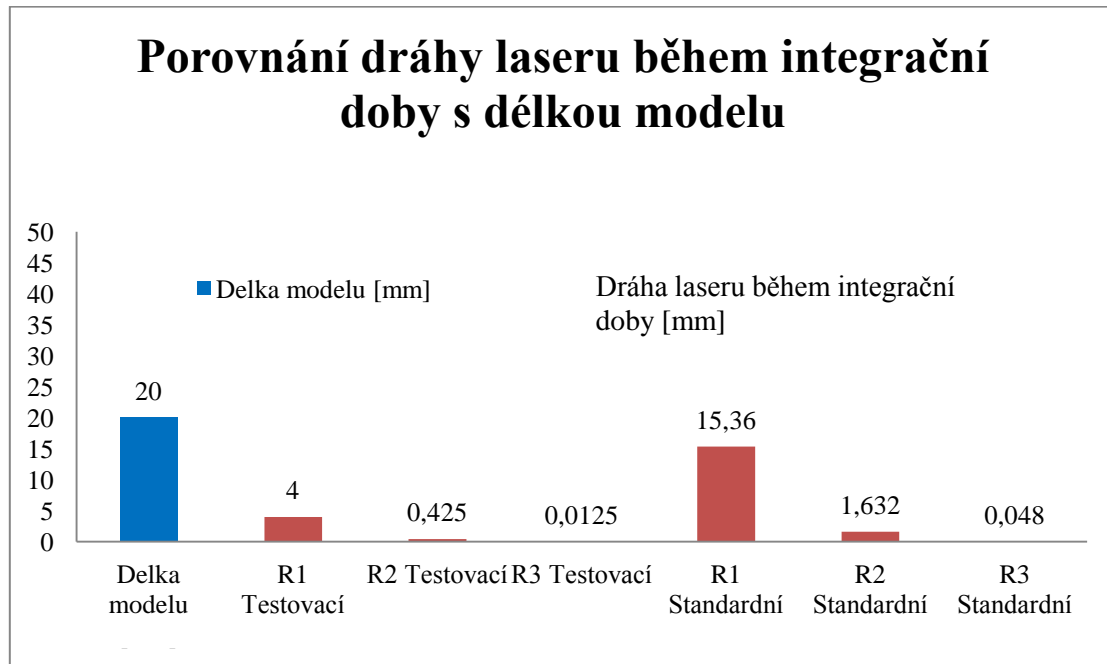
Teplotní rozsah kamery	Integrační čas pro daný rozsah [s]	Délka modelu	20 mm (400 px)
R1	0,016	Délka 1 px	0,05 mm
R2	0,0017	Rychlost laseru	Testovací 250 mm/s
R3	0,00005		Standardní 960 mm/s

Díky znalosti těchto parametrů lze dopočítat dráhu, kterou laser urazí během integrační doby kamery dle zvoleného rozsahu kamery.

Tabulka 4.2 Dopočítaná dráha laseru během integrační doby

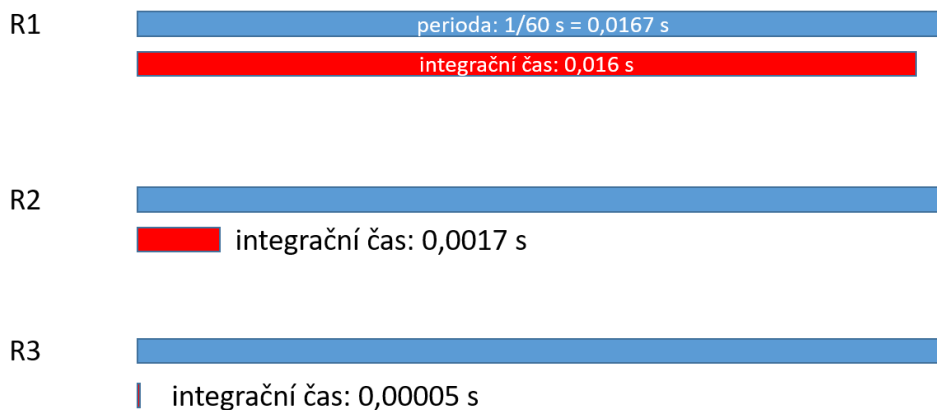
	Rozsah	Délka dráhy laseru během Integrační doby
Testovací rychlost	R1	4 mm (80 px)
	R2	0,425 mm (8,5 px)
	R3	0,0125 mm (0,25 px)
Standardní rychlost	R1	15,36 mm (307,2 px)
	R2	1,632 mm (32,64 px)
	R3	0,048 mm (0,96 px)

Pro lepší zobrazení rozdílu jednotlivých hodnot byl na základě této tabulky sestaven následující graf.



Obrázek 4.8 Grafické porovnání dráhy laseru během integrační doby

Z tohoto grafu vyplývá, že vliv integrační doby na záznam procesu 3D tisku výrazně ovlivňuje výsledky měření. Je však nutné vzít v potaz použitou frekvenci záznamu měření, v našem případě 60 Hz (1/60s), během které probíhají jednotlivé integrační časy. Například při použitém rozsahu č. 2 po záznamu 1 termogramu jen vlivem integrační doby bude min. prodleva do dalšího termogramu vyjádřena rozdílem dráhy laseru během integrační doby a dráhou laseru danou frekvencí záznamu, tento rozdíl je roven 14,3mm. Porovnání integračního času s periodou záznamu viz. obrázek č. 4.9 Průběh integrační doby během snímku termokamery.

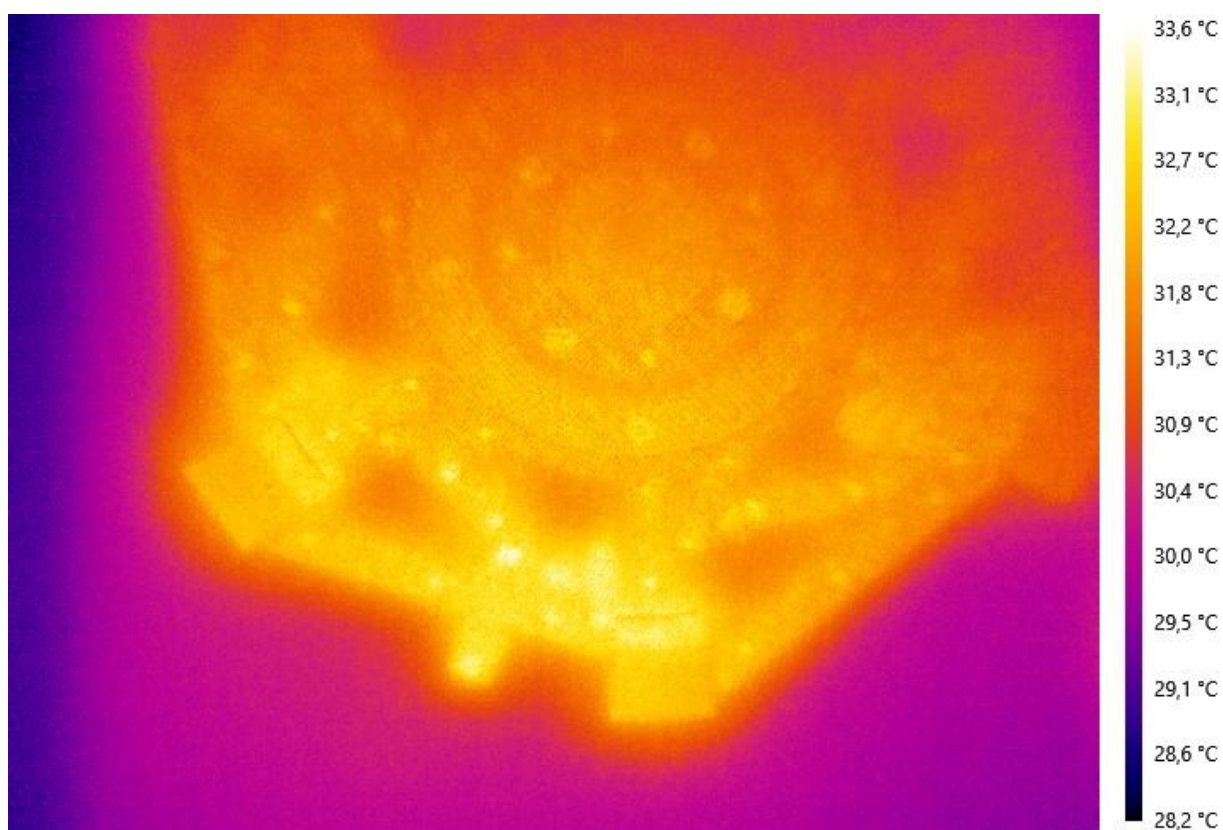


Obrázek 4.9 Průběh integrační doby během snímku termokamery

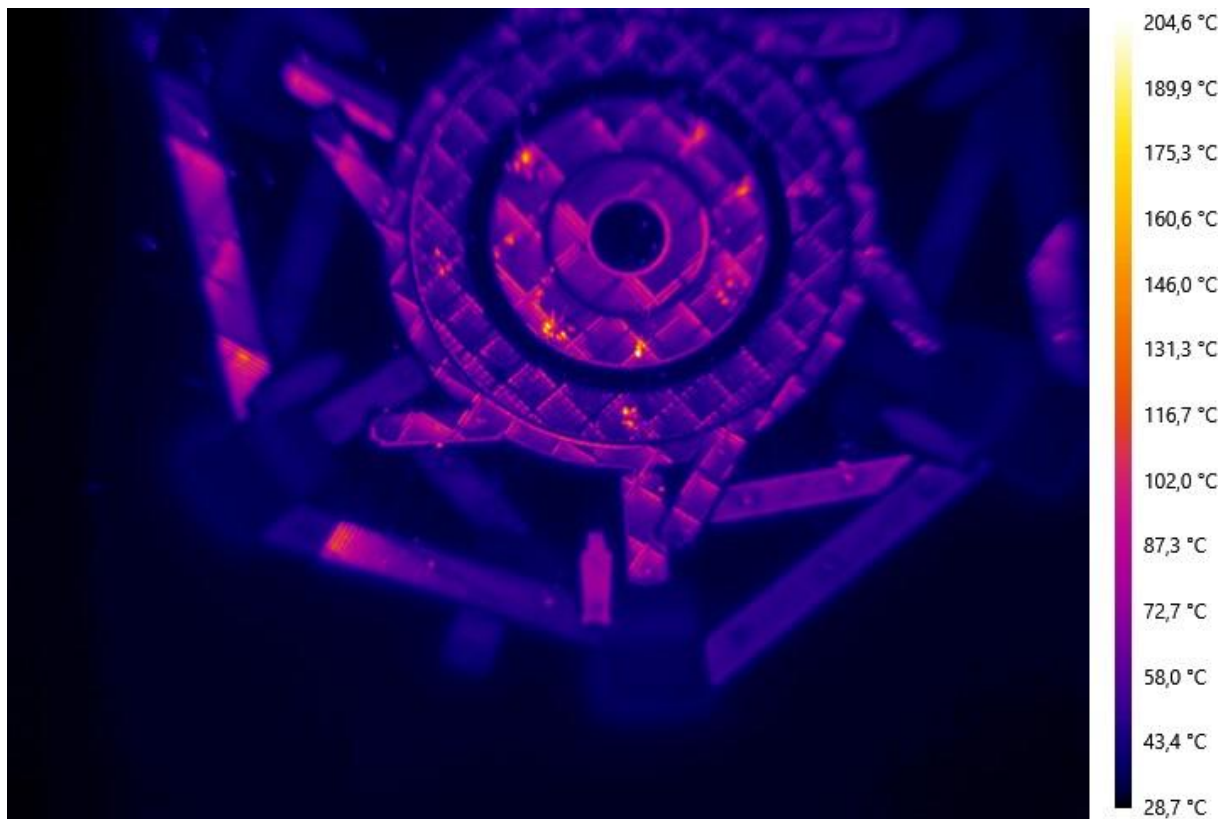
## 4.2. Experiment zobrazení globálního teplotního pole

Tato část navazuje na kapitulu 3.2 Experiment zobrazení globálního teplotního pole, v této části je provedeno vyhodnocení naměřených dat pomocí softwaru LabIR (viz. kapitola 3.2.1 Použité zařízení).

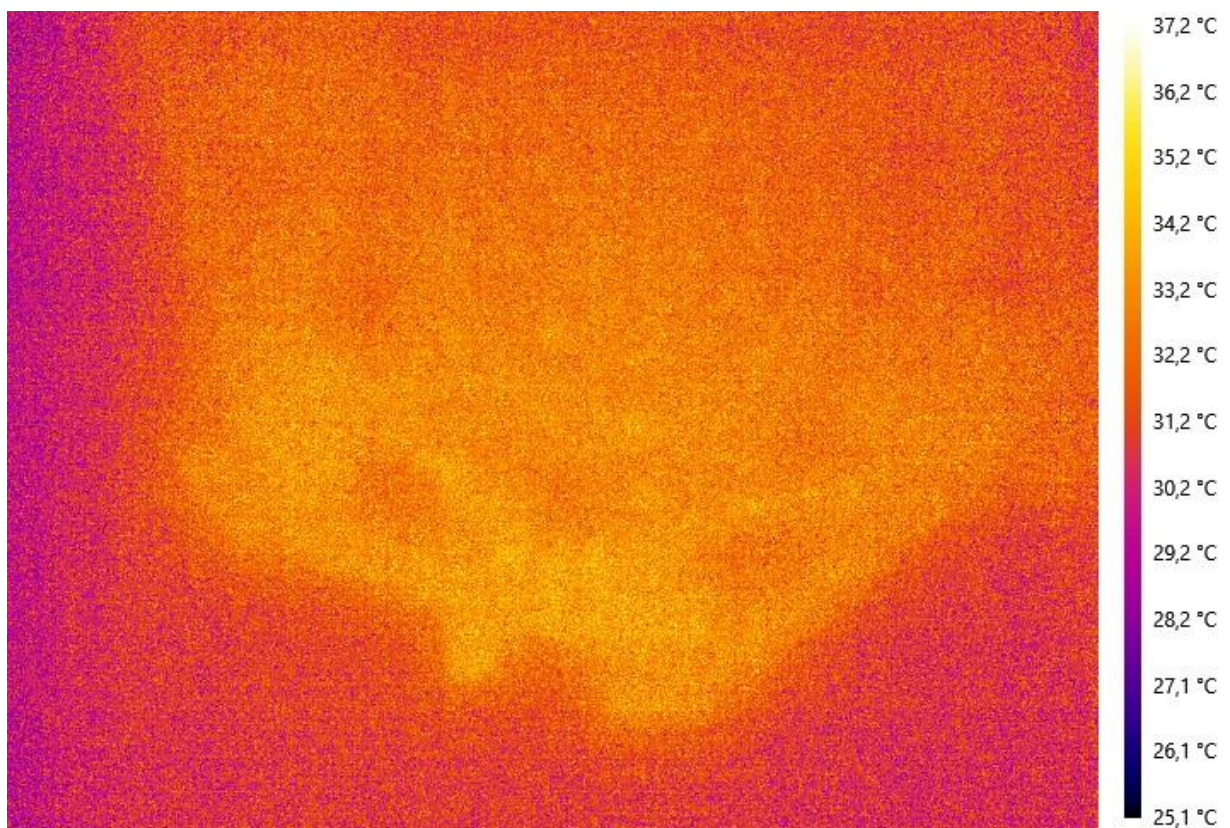
V softwaru LabIR byly vytvořeny jednotlivé snímky (termogramy) v obou rozsazích (R1 a R2) pro porovnání. Pro lepší zobrazení globálního teplotního pole byla využita funkce LabIRu pod názvem HoldMax. Funkce HoldMax konkrétně slouží k tomu, aby v každém pixelu v průběhu měření byly uloženy hodnoty časové závislosti teploty (např. je-li na pixelu zobrazena hodnota teploty během času 20 °C, 100 °C, 150 °C, 300 °C, 400 °C, 380 °C, 350 °C, 320 °C, 300 °C, tak s použitím funkce HoldMax je zobrazena na snímku hodnota 400°C).



Obrázek 4.10 Termogram – pohled základna+díl-R1 (snímek 1747)

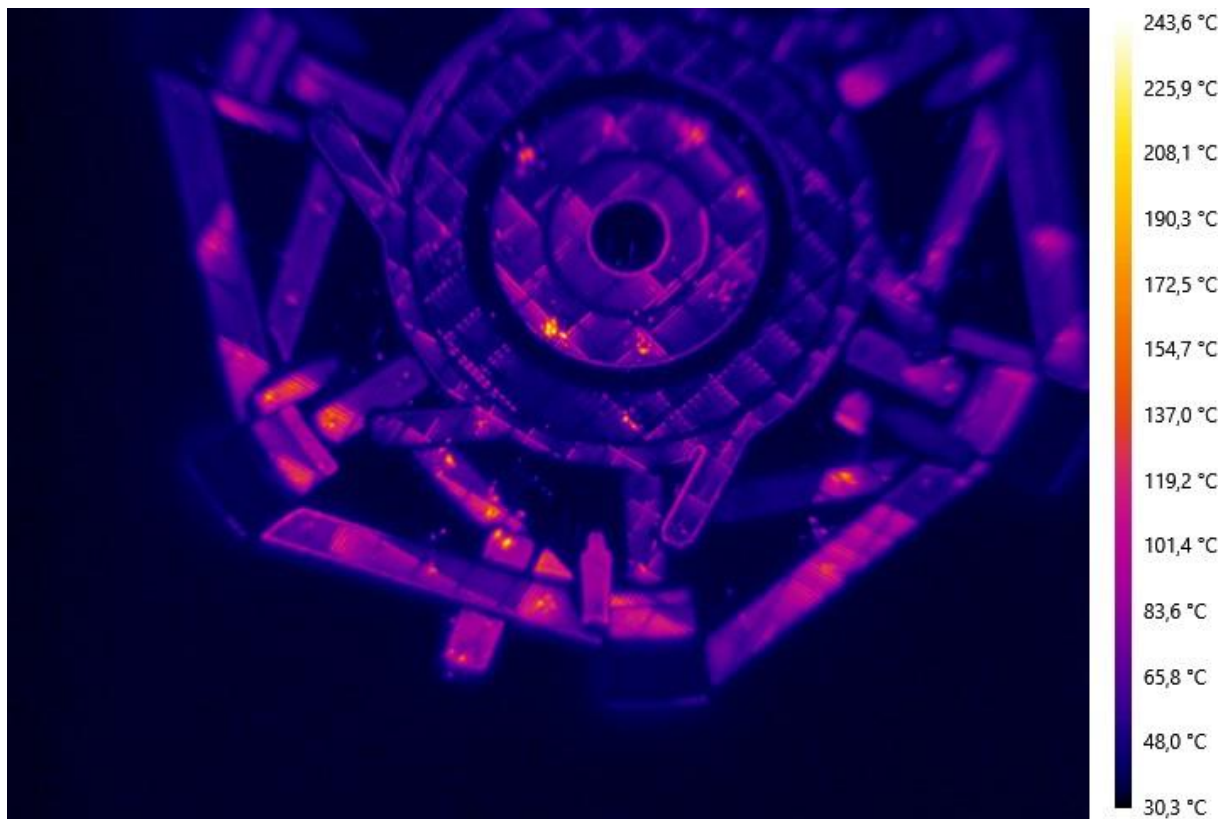


Obrázek 4.11 Termogram – pohled základna+díl-R1 (snímek 1747) – Použití funkce Hold Max



Obrázek 4.12 Termogram – pohled základna+díl-R2 – (snímek 1747)





Obrázek 4.13 Termogram – pohled základna+díl-R2 – (snímek 1747) – použití funkce Hold Max

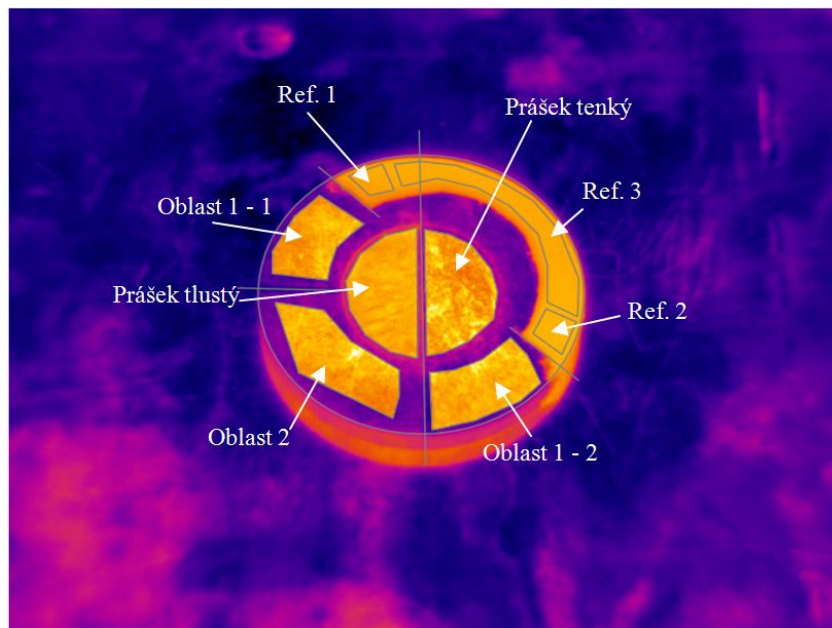
Jak lze vidět na snímku s využitím funkce HoldMax, místa vyzařující více než ostatní mohou znamenat riziko s ohledem na větší vystavení teplotnímu zatížení oproti okolí. Zobrazené teploty neodpovídají reálným, neboť cílem bylo vizualizovat riziková místa.

Kompletní přehled snímků pro porovnání viz. příloha č. 4.

### 4.3. Experiment pro zjištění emisivity

Tato část navazuje na kapitulu 4.3 Experiment pro zjištění emisivity, zde je provedeno vyhodnocení naměřených dat pomocí softwaru LabIR.

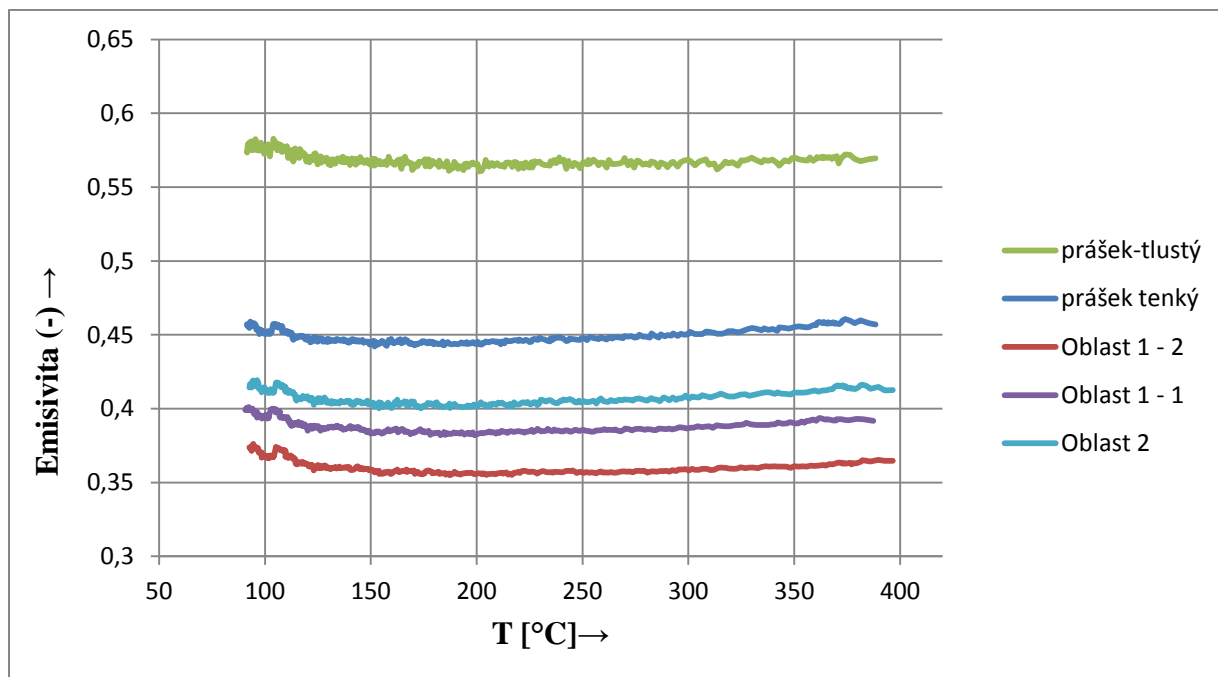
V softwaru LabIR se model rozdělil na jednotlivé oblasti dle rozdílných parametrů tisku, dále dle množství prášku, a dle referenčních oblastí, na kterých byla nanášena termografická barva sloužící pro získání emisivity na základě známé teploty.



Obrázek 4.14 Rozdělené oblasti dle modelu, připravené k analýze

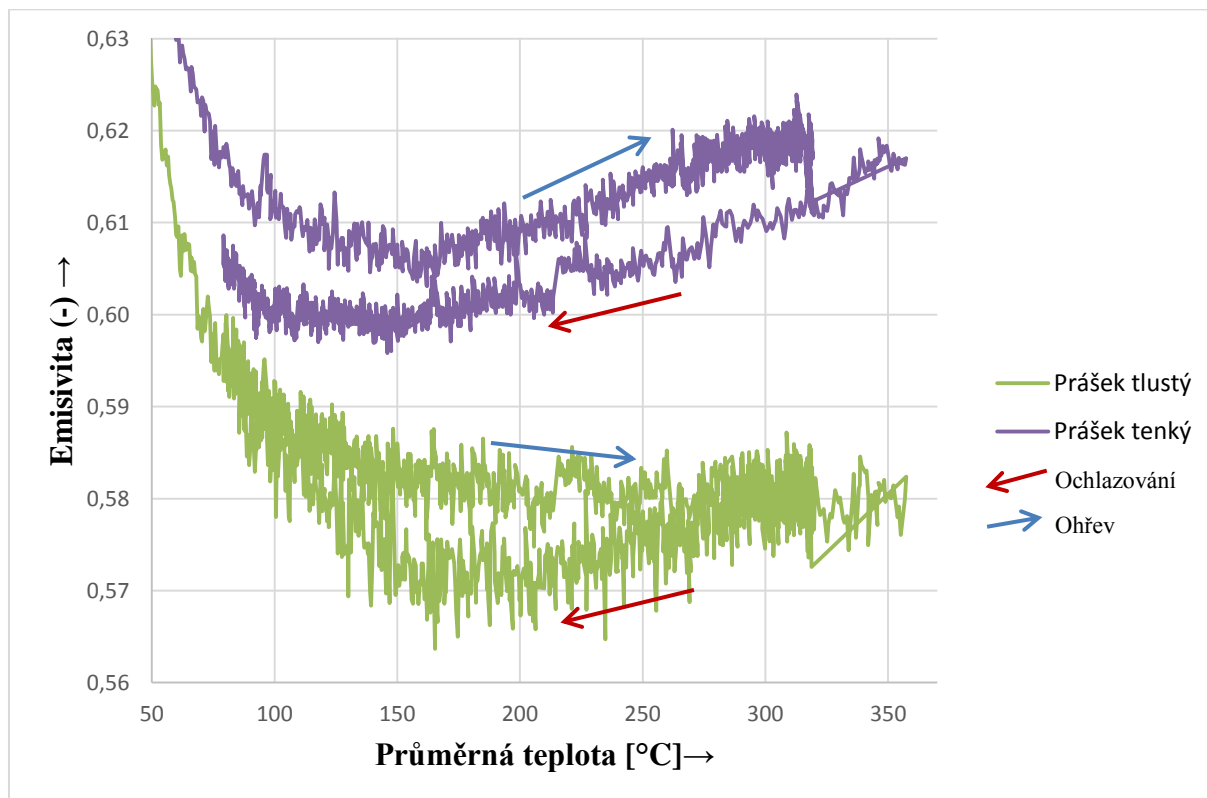
Po tomto rozdělení byl záznam spuštěn a následně byla exportována data do Excelu, kde je bylo možné upravovat a vytvořit grafy zobrazující průběh emisivity v závislosti na teplotě, která byla vypočítána pomocí funkce v softwaru LabIR pro jednotlivé oblasti, pomocí oblastí referenčních (pokryté barvou o známé emisivitě). Díky tomu lze stanovit průměrnou emisivitu pro materiál MS1 s ohledem na jednotlivé parametry 3D tisku a stav materiálu.

• První měření (uzavřený ohřev v topné desce a následné měření při chladnutí)



Obrázek 4.15 Graf závislosti emisivity na teplotě (prášek byl zoxidovaný)

• Druhé měření (ohřev s otevřenou topnou deskou do oxidace prášku)



Obrázek 4.16 Graf závislosti emisivity a teploty (prášek započal oxidaci přibližně při ohřevu na 301°C)



- **Přehled emisivit**

Tabulka 4.3 Přehled emisivit

Parametry tisku / stav prášku	Průměrná hodnota emisivity
Oblast 1 (nižší rychlost laseru (500 mm/s) a nižší výkon laseru (165 W))	0,38
Oblast 2 (vyšší rychlost laseru (960 mm/s) a vyšší výkon laseru (285 W))	0,41
Oblast Prášek (tenká vrstva)	0,62
Oblast Prášek zoxidovaný (tenká vrstva)	0,45
Oblast Prášek (tlustá vrstva)	0,59
Oblast Prášek zoxidovaný (tlustá vrstva)	0,57

Kompletní zobrazení grafů jednotlivých oblastí a jejich emisivit viz. příloha č. 3.

## Závěr

V této diplomové práci byla dle zadaného cíle zpracována rešerše současného stavu využití termografického měření ve výzkumu a výrobě pomocí 3D tisku. Nejprve byla zpracována v první části rešerše samotné technologie 3D tisku a následně rešerše termografického měření a poté jejich vzájemná kombinace využívaná v současnosti.

Druhým cílem bylo navrhnout a provést experiment analýzy vad pomocí krátkovlnného termografického systému. Tato část je zpracována v kapitole 3.1 Měření termografickou kamerou pro nalezení a v kapitole 4.1 Měření termografickou kamerou pro nalezení vad v procesu 3D tisku, které se věnují této problematice. Výsledkem jsou vyhodnocená data, která zobrazují schopnost krátkovlnného termografického systému zachytit vady během procesu 3D tisku kovů. Tato schopnost zachycení vad je výrazně ovlivněna několika faktory, které byly dále popsány a následně byla provedena analýza nejvýznamnějšího z nich (Integrační doby). Z výsledků provedené analýzy vyplývá, že integrační doba pro jednotlivé rozsahy termokamer je klíčová pro schopnost zachycení vad v procesu 3D tisku.

Dalším cílem bylo navrhnout a provést experiment s využitím dlouhovlnného termografického systému s globálním pohledem na vyráběný díl. Z provedeného experimentu v kapitole 3.2 Experiment zobrazení globálního teplotního pole a v kapitole 4.2 Experiment zobrazení globálního teplotního pole vyplývá, že tímto snímáním vyráběného dílu s pomocí vhodného softwaru (LabIR) a s využitím vhodné funkce je možné vidět případná riziková místa ovlivněná teplotním zatížením.

Posledním cílem bylo navrhnout a provést experiment pro zjištění emisivity kovového prášku a přetaveného materiálu v závislosti na teplotě. Tomuto cíli se věnuje kapitola 3.3 Experiment pro zjištění emisivity a kapitola 4.3 Experiment pro zjištění emisivity, které popisují a analyzují měření emisivity prášku MS1, který byl využíván v předešlých experimentech. Díky této informaci lze přesněji měřit teplotu jednotlivých výrobků z tohoto prášku, a lze tak provádět dokonalejší měření a hledání rizikových míst z pohledu zajištění kvality tisku.

V této diplomové práci je řešena prvotní problematika týkající se zajišťování kvality procesu 3D tisku pomocí termografických systémů. Jak vyplývá z uskutečněných experimentů, lze pomocí vhodného návrhu termografického systému a znalosti základních faktorů snímat vady v procesu, a zajistit tak kvalitnější výrobu při 3D tisku kovů.

## Citovaná literatura

### 1. Publikace na internetu

- [1] Bezdotykové měření teploty. In: Zpravodaj pro měření a regulaci č. 1. [on-line] Newport Omega, 2005. <[www.omegaeng.cz/literature/PDF/techinfo\\_1.pdf](http://www.omegaeng.cz/literature/PDF/techinfo_1.pdf)> [cit. listopad 2013].
- [2] Aditivní technologie. Zpráva o stavu 3D tisku pro Českou technologickou platformu STROJÍTENSTVÍ, o.s. Josef Hodek - PDF Free Download. *Představujeme Vám pohodlné a bezplatné nástroje pro publikování a sdílení informací.* [online]. Copyright © DocPlayer.cz [cit. 02.01.2020]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/18792004-Aditivni-technologie-zprava-o-stavu-3d-tisku-pro-ceskou-technologickou-platformu-strojitenstvi-o-s-josef-hodek.html>
- [3] Historie 3D tisku... - 3dfactory.cz. *Úvod - 3dfactory.cz* [online]. [cit. 03.01.2020]. Dostupné z: <https://3dfactory.cz/2017/10/27/historie/>
- [4] SLA/DLP 3D tiskárny - 3Dwiser. *Spolehlivý 3D tisk pro profesionály | 3Dwiser* [online]. Copyright © 2019 3Dwiser s.r.o. [cit. 02.01.2020]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/3d-tiskarny/sla-dlp/>
- [5] *Mechanical, Electrical & Electronic Engineering, MEP & HVAC Firm* [online]. [cit. 02.01.2020]. Dostupné z: <https://www.meee-services.com/wp-content/uploads/2018/06/Laminated-Object-Manufacturing-LOM-Technology.png>
- [6] Concept Laser | GE Additive. *GE* [online]. Copyright © 2020 General Electric [cit. 02.03.2020]. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/de/who-we-are/concept-laser>
- [7] *DSPACE VŠB-TUO* [online]. Copyright © QB [cit. 02.01.2020]. Dostupné z: [https://dSPACE.vsb.cz/bitstream/handle/10084/114746/JAK0059\\_FS\\_B2341\\_2303R002\\_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dSPACE.vsb.cz/bitstream/handle/10084/114746/JAK0059_FS_B2341_2303R002_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [8] Fused deposition modelling (FDM) Printing system. | Download Scientific Diagram. *ResearchGate | Find and share research* [online]. Copyright © ResearchGate 2019. All rights reserved. [cit. 02.01.2020]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Fused-deposition-modelling-FDM-Printing-system\\_fig3\\_319987351](https://www.researchgate.net/figure/Fused-deposition-modelling-FDM-Printing-system_fig3_319987351)
- [9] DMLS vs SLM 3D Printing for Metal Manufacturing | Element. *Materials and Product Testing, Inspection & Certification | Element* [online]. [cit. 02.01.2020]. Dostupné z: <https://www.element.com/nucleus/2016/06/29/dmls-vs-slm-3d-printing-for-metal-manufacturing>
- [10] A schematic diagram of direct metal laser sintering (DMLS) process [6] | Download Scientific Diagram. *ResearchGate | Find and share research* [online]. Copyright © ResearchGate 2020. All rights reserved. [cit. 02.01.2020]. Dostupné

z: [https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-diagram-of-direct-metal-laser-sintering-DMLS-process-6\\_fig1\\_334114846](https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-diagram-of-direct-metal-laser-sintering-DMLS-process-6_fig1_334114846)

[11] *Forbes* [online]. [cit. 02.01.2020]. Dostupné

z: <https://www.forbes.com/sites/louiscolombus/2018/05/30/the-state-of-3d-printing-2018/#5c49bc547b0a>

[12] Moderní technologie 3D tisku (výsledky průzkumu) | Vyplňto.cz - řešení pro online průzkumy. *Vytvořit dotazník* | *Vyplňto.cz - řešení pro online průzkumy* [online]. Copyright © [cit. 02.01.2020]. Dostupné z: <https://www.vyplnto.cz/realizovane-pruzkumy/moderni-technologie-3d-tisku/>

[13] Prusa3D - 3D tisk a 3D tiskárny od Josefa Průši. *Prusa3D - 3D tisk a 3D tiskárny od Josefa Průši* [online]. Copyright © Prusa Research a.s., [cit. 03.01.2020]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/>

[14] 3D tisk-metody | 14220.cz. *14220.cz* [online]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-metody/>

[15] Creality Ender 5 - 3D tiskárna | Alza.cz. *Alza.cz - největší obchod s počítači a elektronikou* | *Alza.cz* [online]. Dostupné z: [https://www.alza.cz/creality-ender-5-d5710468.htm?kampan=adw1\\_tiskarny-a-skenery\\_pla\\_all\\_tiskarny-a-skenery-css\\_tiskarny\\_tiskarny-3d\\_c\\_21501\\_1o4\\_ENDER05&gclid=CjwKCAiAxMLvBRBNEiwAKhr-nFiH-zTXGCtGEfH\\_Au\\_74vq\\_ubQnGKObzKY5LVHWlf2EDZli\\_sH1nxoCphIQAvD\\_BwE](https://www.alza.cz/creality-ender-5-d5710468.htm?kampan=adw1_tiskarny-a-skenery_pla_all_tiskarny-a-skenery-css_tiskarny_tiskarny-3d_c_21501_1o4_ENDER05&gclid=CjwKCAiAxMLvBRBNEiwAKhr-nFiH-zTXGCtGEfH_Au_74vq_ubQnGKObzKY5LVHWlf2EDZli_sH1nxoCphIQAvD_BwE)

[16] 7 Issues to Look Out for in Metal 3D Printing > ENGINEERING.com. *ENGINEERING.com | Information & Inspiration for Engineers* [online]. Copyright © 2020 engineering.com, Inc. All rights reserved. Registration on or use of this site constitutes acceptance of our [cit. 02.03.2020]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/15202/7-Issues-to-Look-Out-for-in-Metal-3D-Printing.aspx>

[17] Denudation of metal powder layers in laser powder bed fusion processes - ScienceDirect. *ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books*. [online]. Copyright © 2016 Acta Materialia Inc. Published by Elsevier Ltd. [cit. 02.03.2020]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135964541630355X>

[18] StackPath. *StackPath* [online]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/3d-printing-cad/article/21837578/eliminating-a-3d-printing-defect-air-pockets>

[19] EOS Electro Optical Systems: Industrial 3D Printing. *EOS Electro Optical Systems: Industrieller 3D Druck* [online]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en>

[20] Termografie a její vznik | Termovizní měření. *Termovizní měření | únik tepla | měření termokamerou* [online]. Copyright © [cit. 03.01.2020]. Dostupné z: <https://www.seemore.cz/termovizni-mereni/termografie-a-jeji-vznik>

[21] O technologii - termovize a digitální noční vidění PARD. *PARD - Termovize a noční vidění* [online]. Copyright © 2020 [cit. 03.01.2020]. Dostupné z: <https://termovize-pard.cz/content/6-o-technologie-pard>

[22] *Vysoké učení technické v Brně* [online]. Copyright © [cit. 03.01.2020]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=14118](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=14118)

[23] Infračervené kvantové detektory a termokamery - úvod | Automatizace.HW.cz. *Automatizace.HW.cz | Elektronika v automatizaci* [online]. Copyright © 1997 [cit. 03.01.2020]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/infracervene-kvantove-detektory-termokamery-uvod>

[24] BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty - PDF Stažení zdarma. *Představujeme Vám pohodlné a bezplatné nástroje pro publikování a sdílení informací.* [online]. Copyright © DocPlayer.cz [cit. 03.01.2020]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/4622871-Bezdotykovemereni-teploty.html>

[25] AUTOMA časopis pro automatizační techniku *Pásmové pyrometry* [online]. Dostupné z: [https://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/pasmove-pyrometry-2003\\_01\\_28673\\_1874/](https://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/pasmove-pyrometry-2003_01_28673_1874/)

[26] *SLM Solutions Group AG: Home* [online]. Copyright ©G [cit. 02.03.2020]. Dostupné z: [https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user\\_upload/Additive.Quality\\_EN.pdf](https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/Additive.Quality_EN.pdf)

[27] Alma.Karlov.Mff.Cuni.[online]. Copyright © [cit. 03.01.2020]. Dostupné z: <http://alma.karlov.mff.cuni.cz/ufy102/Planckuv%20zakon.pdf>

[28] Design termokamery pro zdravotnictví [online]. Copyright ©C [cit. 03.01.2020]. Dostupné z: <http://www.ustavkonstruovani.cz/FileDownload/getFile/1066/Vespalec.pdf/>

[29] Tepelný dohled »Vývoj termovizních obrazů. [online]. Copyright © 2012 [cit. 03.01.2020]. Dostupné z: <https://teplonadzor.ru/history/>

[30] Historie a současnost 3D tisku. *Zajímavé články o 3D tisku | 3dtisknazakazku.cz* [online]. Copyright © 2020 3D tisk na zakázku [cit. 03.01.2020]. Dostupné z: <http://www.3dtisknazakazku.cz/9-clanky/15-historie-a-soucasnost-3d-tisku.html>.

[31] Termokamera.cz Konstrukce termokamery - Termokamera.cz | Průvodcem světem termokamer. *Termokamera.cz Termokamera.cz - Portál pro uživatele termokamery | Průvodcem světem termokamer* [online]. Copyright © Workswell s.r.o. [cit. 12.01.2020]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>

[32]II-VI Optics [online]. [cit. 12.01.2020]. Dostupné z: <http://www.iiviiinfrared.com/IR-Thermal-Imaging-Optics/ir-thermal-imaging-lenses.html>

- [33] Přehled principů el. měření teploty - 2. díl - bezdotykové | Automatizace.HW.cz. *Automatizace.HW.cz / Elektronika v automatizaci* [online]. Copyright © 1997 [cit. 10.06.2020]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/rehled-principu-el-mereni-teploty-2-dil-bezdotykove>
- [34] *Elektrorevue* [online]. [cit. 10.06.2020]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/03015/index.html#kap22>
- [35] *DSPACE VŠB-TUO* [online]. Copyright © MV [cit. 12.01.2020]. Dostupné z: [https://dSPACE.vsb.cz/bitstream/handle/10084/118556/NAV0080\\_FBI\\_N3908\\_3908T006\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=n](https://dSPACE.vsb.cz/bitstream/handle/10084/118556/NAV0080_FBI_N3908_3908T006_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=n)
- [36] Wohlers-Report-shows-growth-rate-slowing-for-additive-manufacturing. *Homepage / Plastics News* [online]. Copyright © 1996 [cit. 10.06.2020]. Dostupné z: <https://www.plasticsnews.com/article/20170406/NEWS/170409944/wohlers-report-shows-growth-rate-slowing-for-additive-manufacturing>
- [37] EOS-whitepaper-monitoring. In-process monitoring systems [online]. Copyright © [cit. 02.03.2020]. Dostupné z: [https://cdn.eos.info/839090ec135565bc/b6a6ac17dca9/EOS\\_Whitepaper\\_Monitoring.pdf](https://cdn.eos.info/839090ec135565bc/b6a6ac17dca9/EOS_Whitepaper_Monitoring.pdf)
- [38] 5 Common Problems Faced with Metal 3D printing - And How You Can Fix Them - AMFG. *AMFG - Additive Manufacturing Execution System & Workflow Automation Software* [online]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2018/05/01/5-problems-faced-when-3d-printing-metals-and-how-to-fix-them/>
- [39] EOS material data sheet[online]. Dostupné z: [http://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/1af123af9a636e61/042696652ecc69142c8518dc772dc113/EOS\\_MaragingSteel\\_MS1\\_en.pdf](http://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/1af123af9a636e61/042696652ecc69142c8518dc772dc113/EOS_MaragingSteel_MS1_en.pdf)
- [40] Termokamera FLIR A615 □ | Termokamera FLIR. *Oficiální dodavatel termokamer FLIR pro ČR a SK □ | Termokamera FLIR* [online]. Dostupné z: <https://www.termokamery-flir.cz/termokamera-flir-a615/>
- [41] Přehled dostupných materiálů. *na3D - 3D tisk pro každého!* [online]. Dostupné z: <https://www.na3d.cz/blog/prehled-dostupnych-materialu>
- [42] DMLS Maraging Steel(MS1) - 3DCompare.com. *3D Printing Services | 3D Printing Company | Online 3D Printing - 3DCompare.com* [online]. Copyright © 3DCompare.com. All Rights Reserved. [cit. 15.04.2020]. Dostupné z: <https://3dcompare.com/manufacture/dmls-maraging-steelms1/>
- [43] DSPACE at University of West Bohemia: Problematika výroby malých strojních kovových součástí 3D tiskem. *DSPACE at University of West Bohemia: NO TITLE* [online]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/28412?mode=full>

[44] Frézovací hlava Kraken z RTI získala zlatou medaili na Mezinárodním strojírenském veletrhu - INFO - zpravodajský portál ZČU. *INFO - zpravodajský portál ZČU* [online]. Dostupné z: <https://info.zcu.cz/clanek.jsp?id=1662>

[45] [online]. Copyright © 2000 [cit. 15.04.2020]. Dostupné z: <https://tpp.zcu.cz/cz/projekty/labir>

[46] 400 Bad Request. *Pyrometrcz.cz – Oficiální zastoupení pro ČR a SR* [online]. Dostupné z: <https://www.pyrometrcz.cz/produkty/mereni-teploty/termokamery-a-systemy/systemy-lumaspection/lumaspec-rt-software/>

[47] MIKRON Termo kamera MCS640 – *Pyrometrcz.cz. Pyrometrcz.cz – Oficiální zastoupení pro ČR a SR* [online]. Copyright © Všechna práva vyhrazena [cit. 15.04.2020]. Dostupné z: <https://www.pyrometrcz.cz/produkty/mereni-teploty/termokamery-a-systemy/procesni-kamery-mikron/serie-mc640/mikron-termo-kamera-mcs640/>



## **PŘÍLOHA č. 1**

**Výsledky 1. experimentu pro měření vad při 3D tisku kovů  
termovizní kamerou**

## Legenda k výsledkům

Na základě zpracovaných termovizních snímků byly vypracovány následující modely jednotlivých vrstev, které byly dále porovnány s původním modelem vrstev. Na každém obrázku je zobrazena původní modelová vrstva s, nebo bez vad a dále vrstva zaznamenaná se standartní rychlostí laseru a vrstva zhotovená zpomalenou rychlostí laseru viz. Kapitola 3.1 Měření termovizní kamerou pro nalezení vad procesu 3D tisku. Bílá barva v obrázcích zobrazuje co bylo zaznamenáno, červená barva zobrazuje odchylku od původního modelu. Mezery mezi bílou popřípadě červenou barvou jsou vady, které byly záměrně dány do modelu pro zjištění rozsahu snímatelnosti vad termovizní kamerou.

## Modelová vrstva



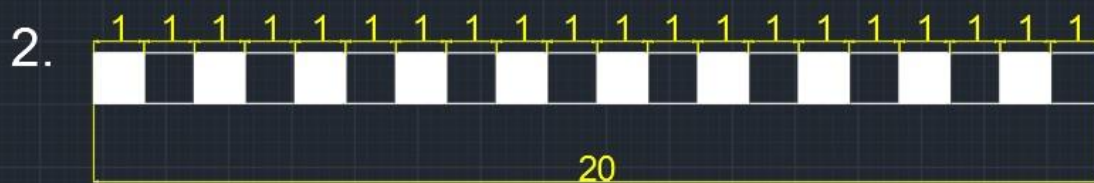
## Naměřené R1-m7



## Naměřené R1-m8 testovací rychlost



## Modelová vrstva



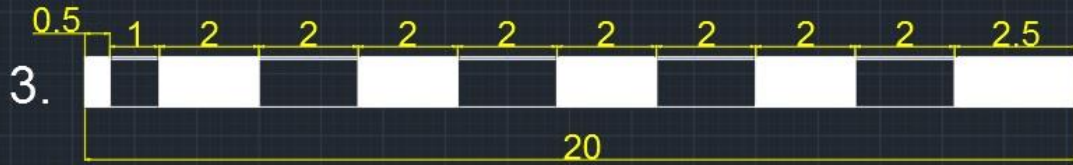
## Naměřené R1-m7



## Naměřené R1-m8 testovací rychlost



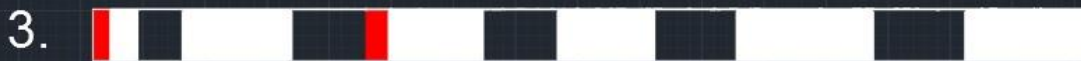
### Modelová vrstva



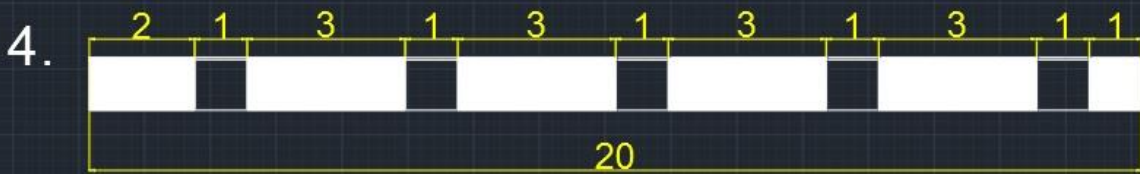
### Naměřené R1-m7



### Naměřené R1-m8 testovací rychlost



### Modelová vrstva



### Naměřené R1-m7



### Naměřené R1-m8 testovací rychlost



### Modelová vrstva



### Naměřené R1-m7



### Naměřené R1-m8 testovací rychlost



### Modelová vrstva



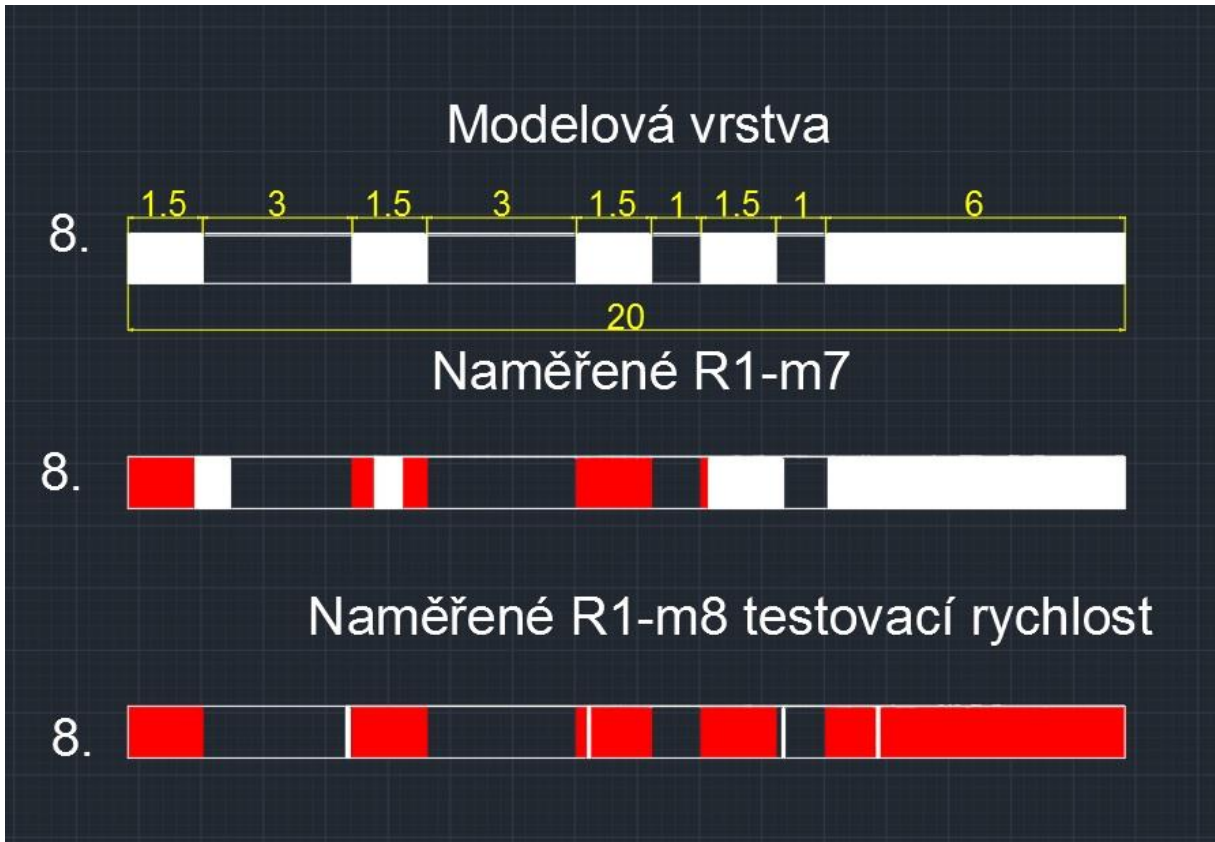
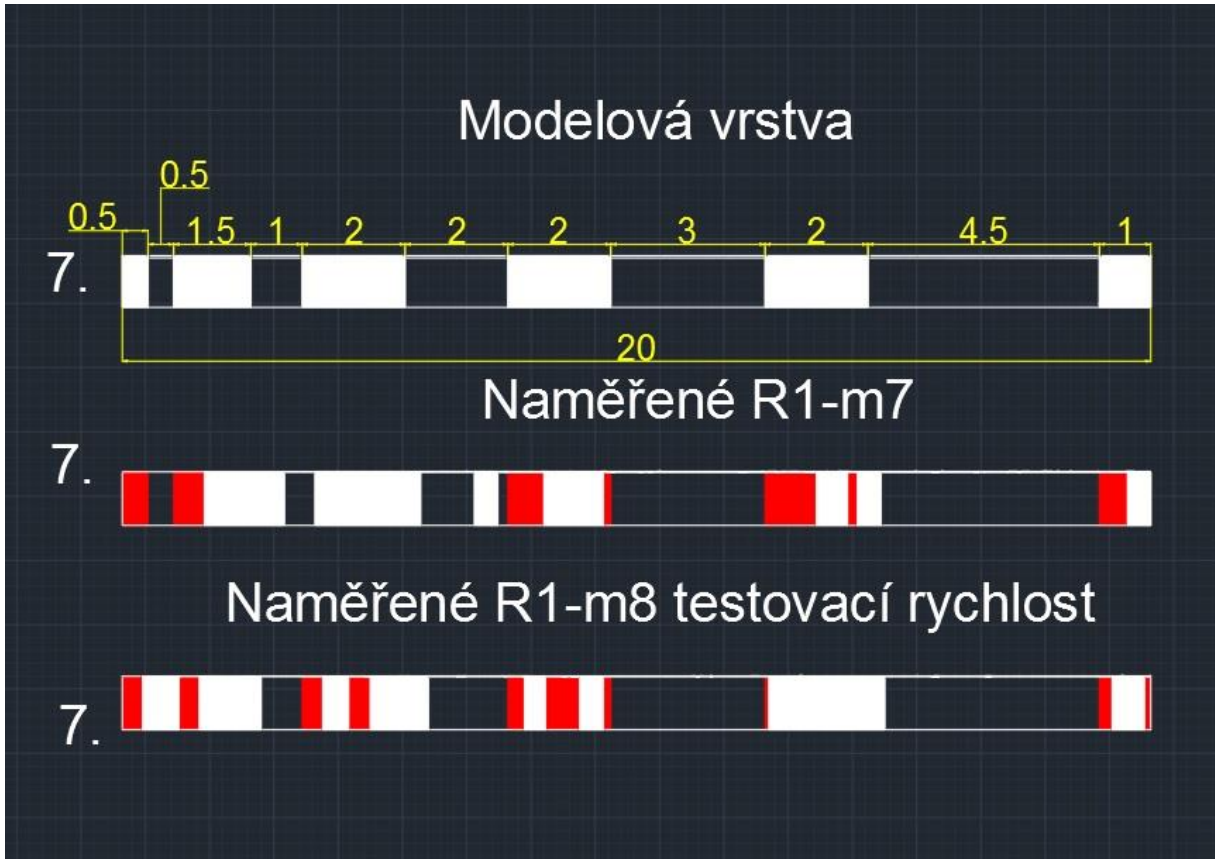
### Naměřené R1-m7



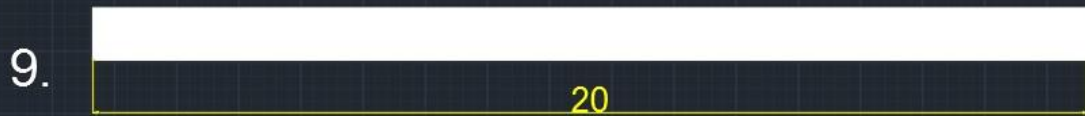
### Naměřené R1-m8 testovací rychlost







### Modelová vrstva



### Naměřené R1-m7



### Naměřené R1-m8 testovací rychlost



### Modelová vrstva



### Naměřené R1-m7



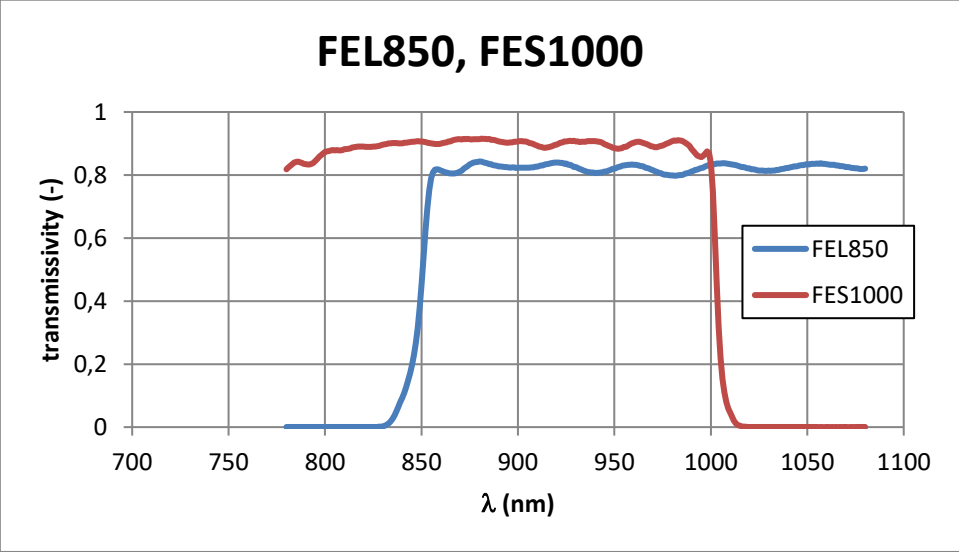
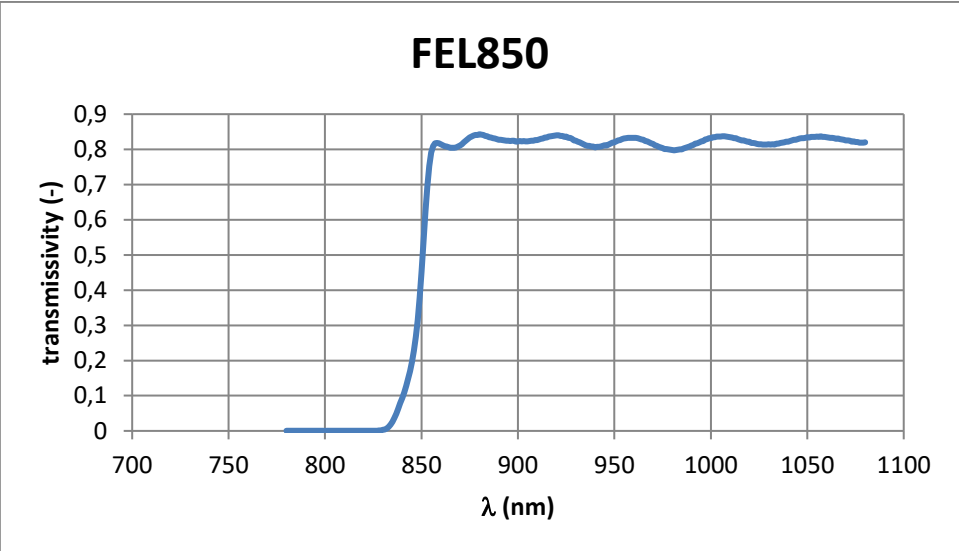
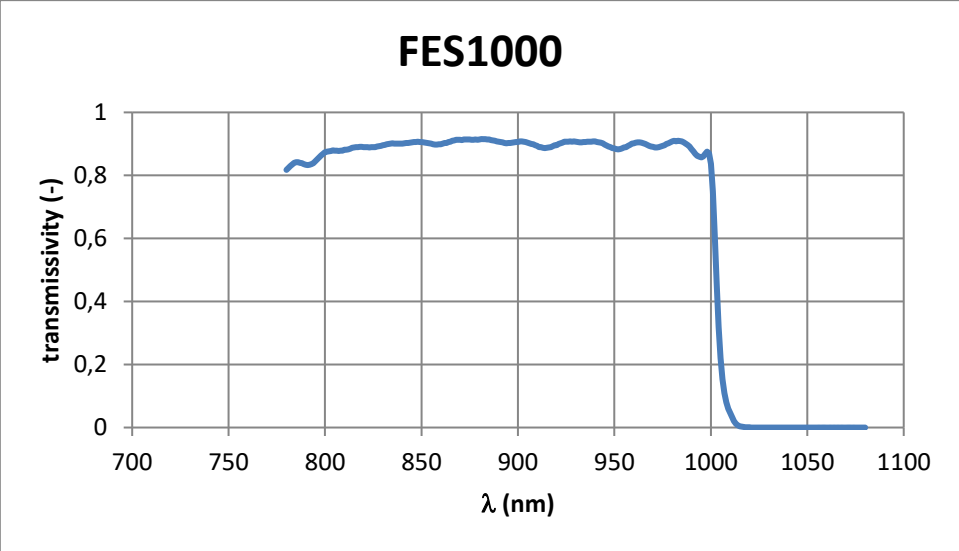
### Naměřené R1-m8 testovací rychlost



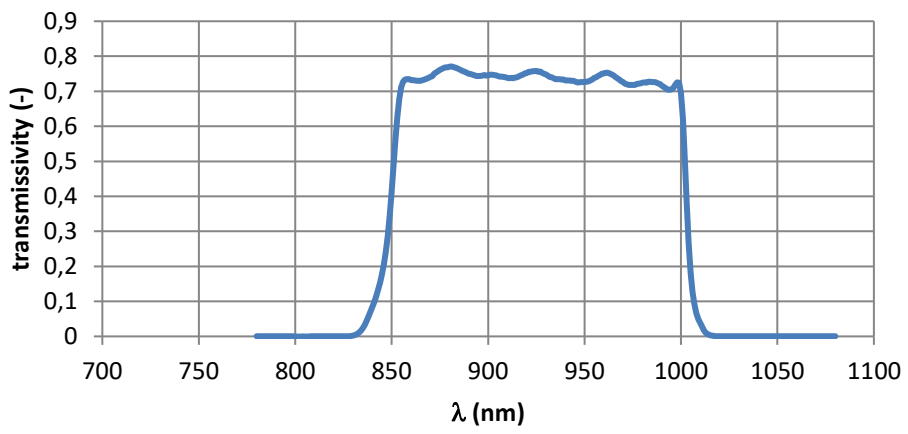


## **PŘÍLOHA č. 2**

### **Propustnost filtrů 780 -1080nm**



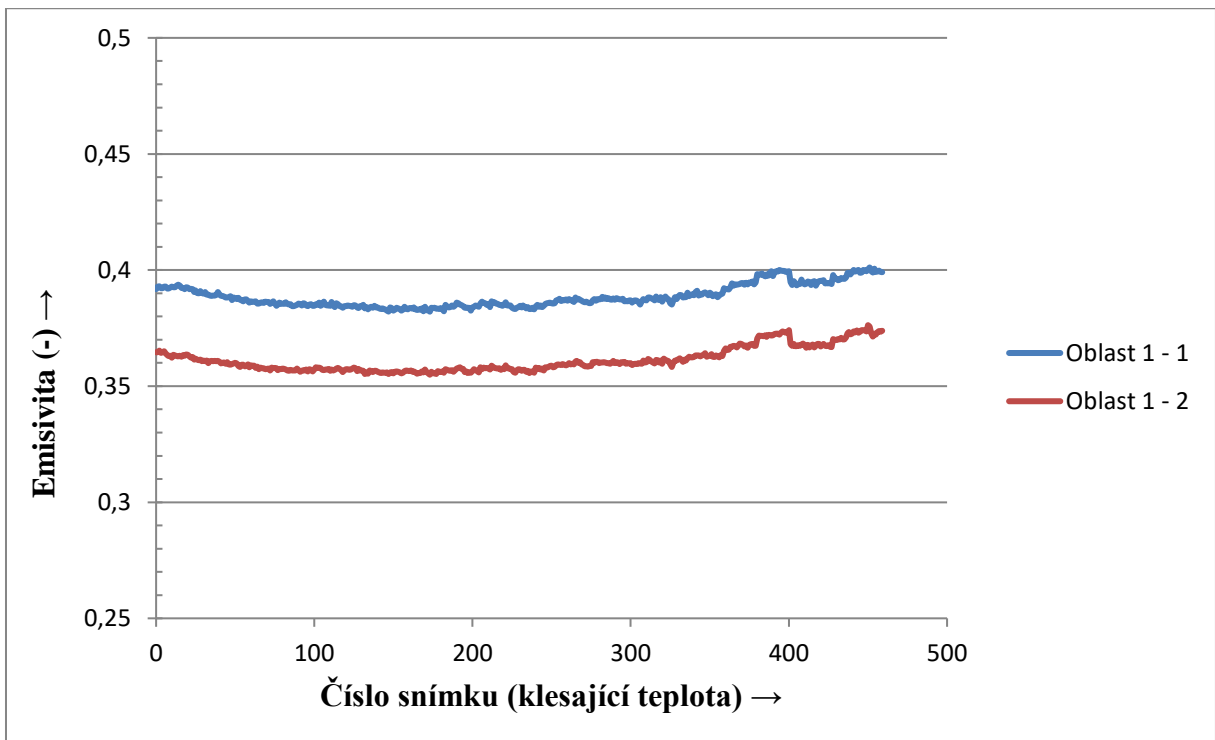
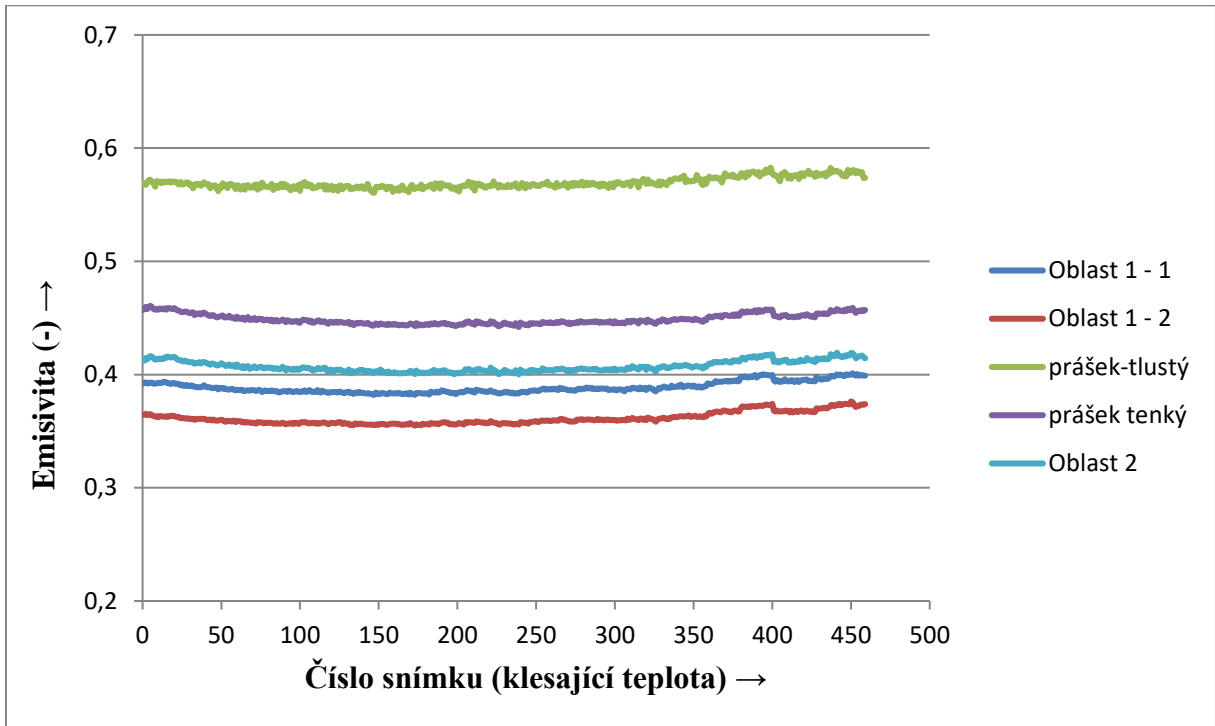
# FEL850 \* FES1000

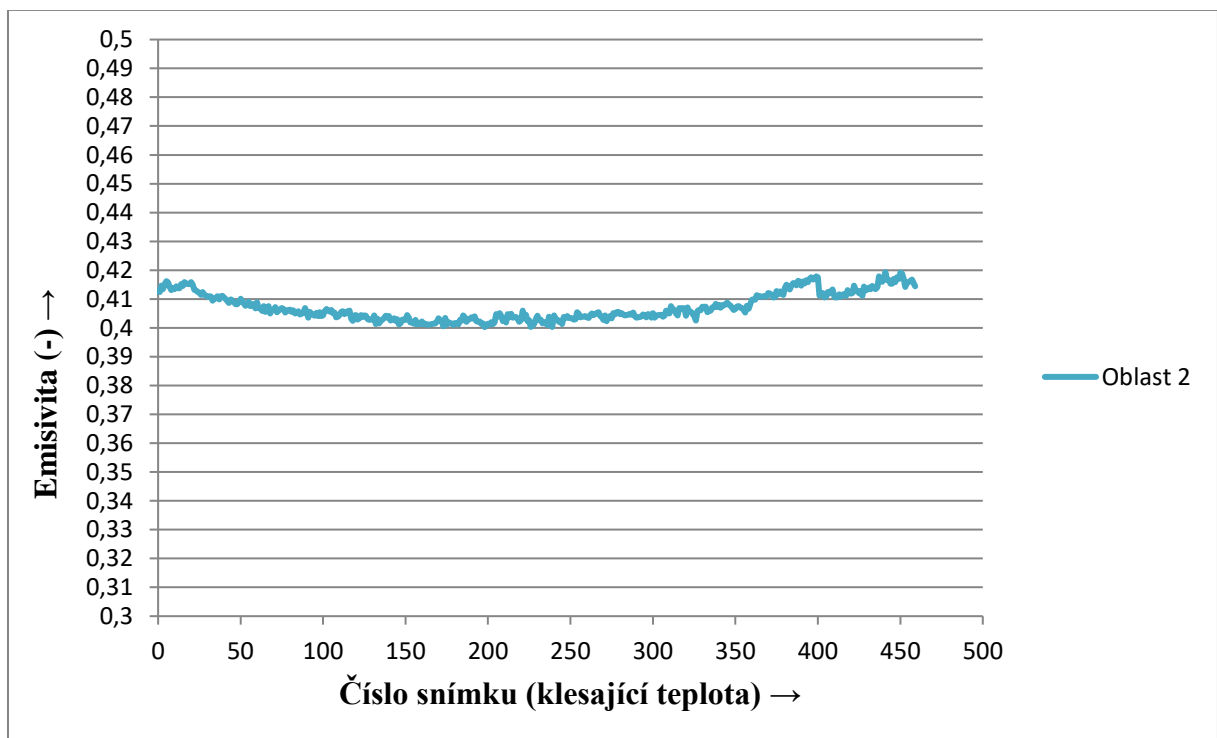
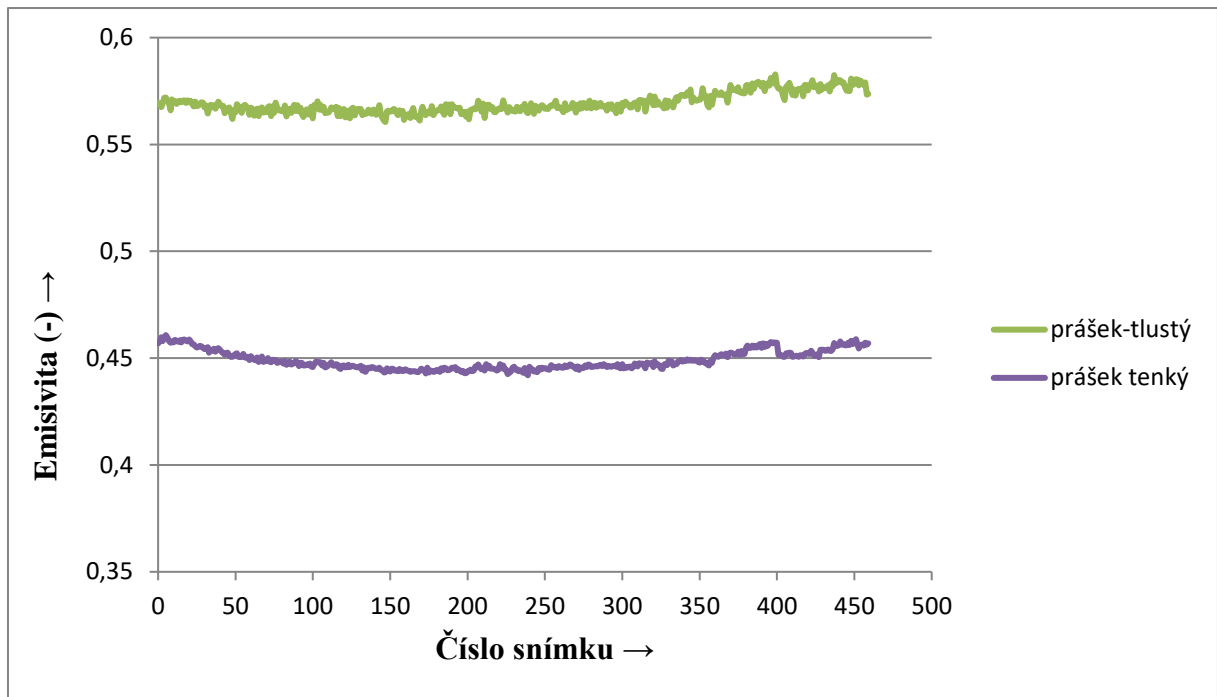


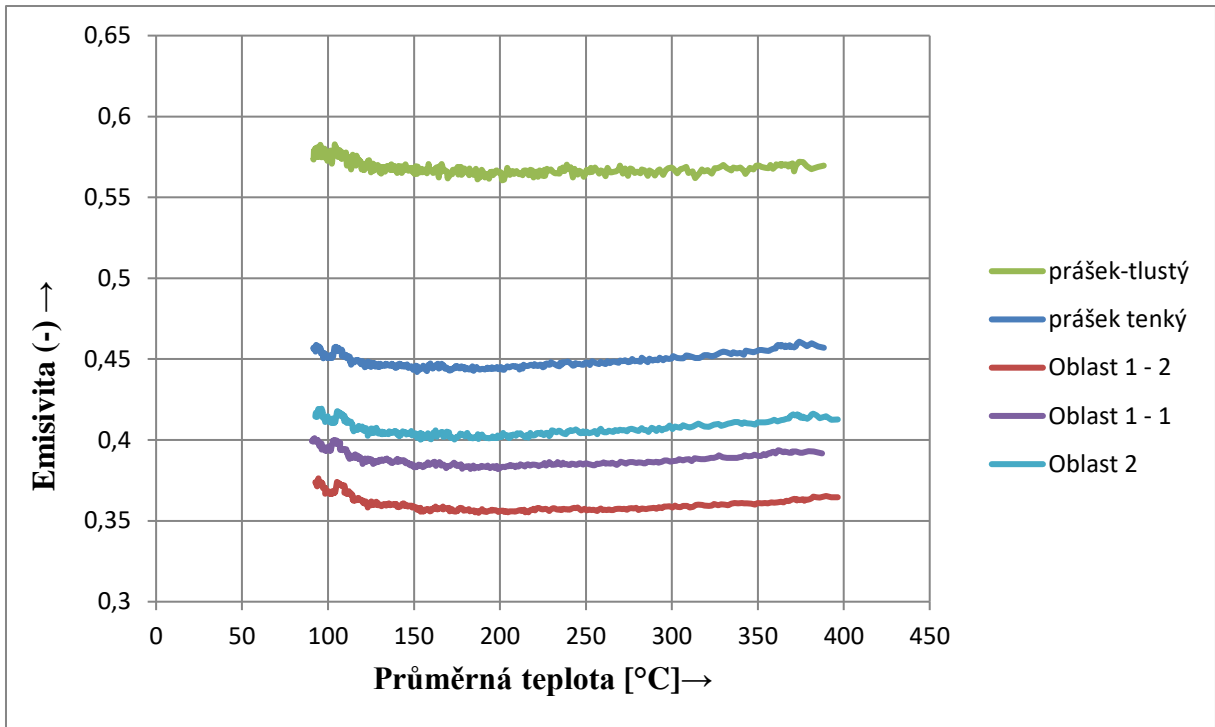
## **PŘÍLOHA č. 3**

**Výsledné grafy 3. experimentu pro získání emisivity materiálu  
MS1**

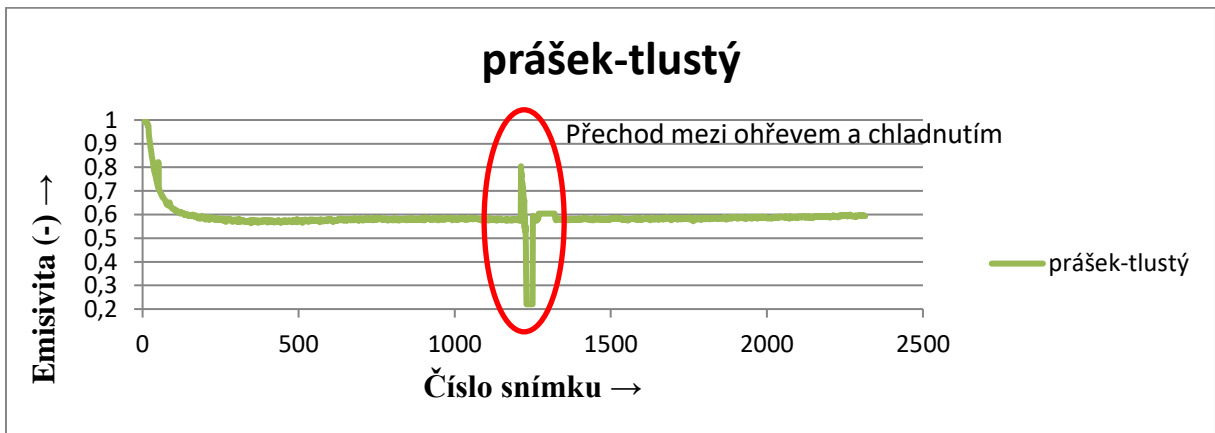
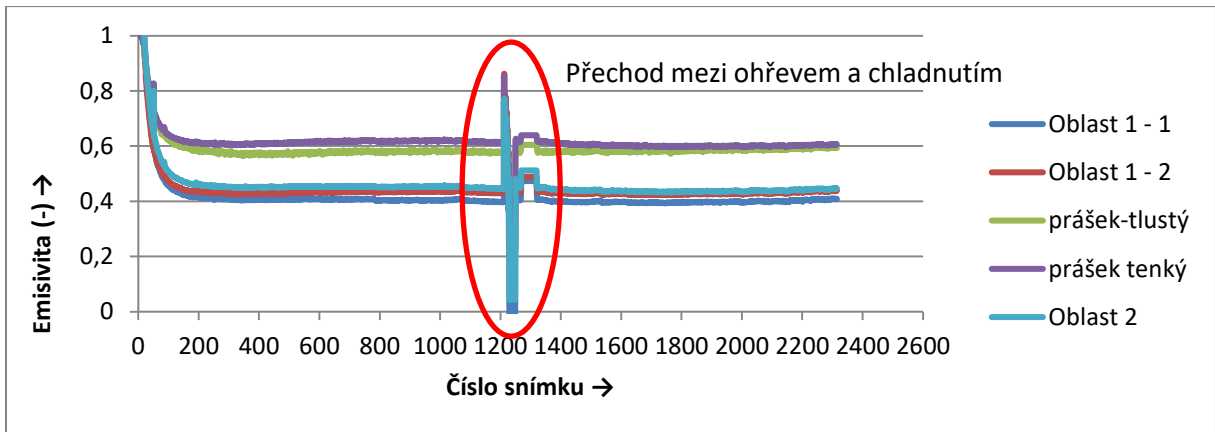
- První měření (uzavřený ohřev v topné plošině a následné měření při chladnutí)



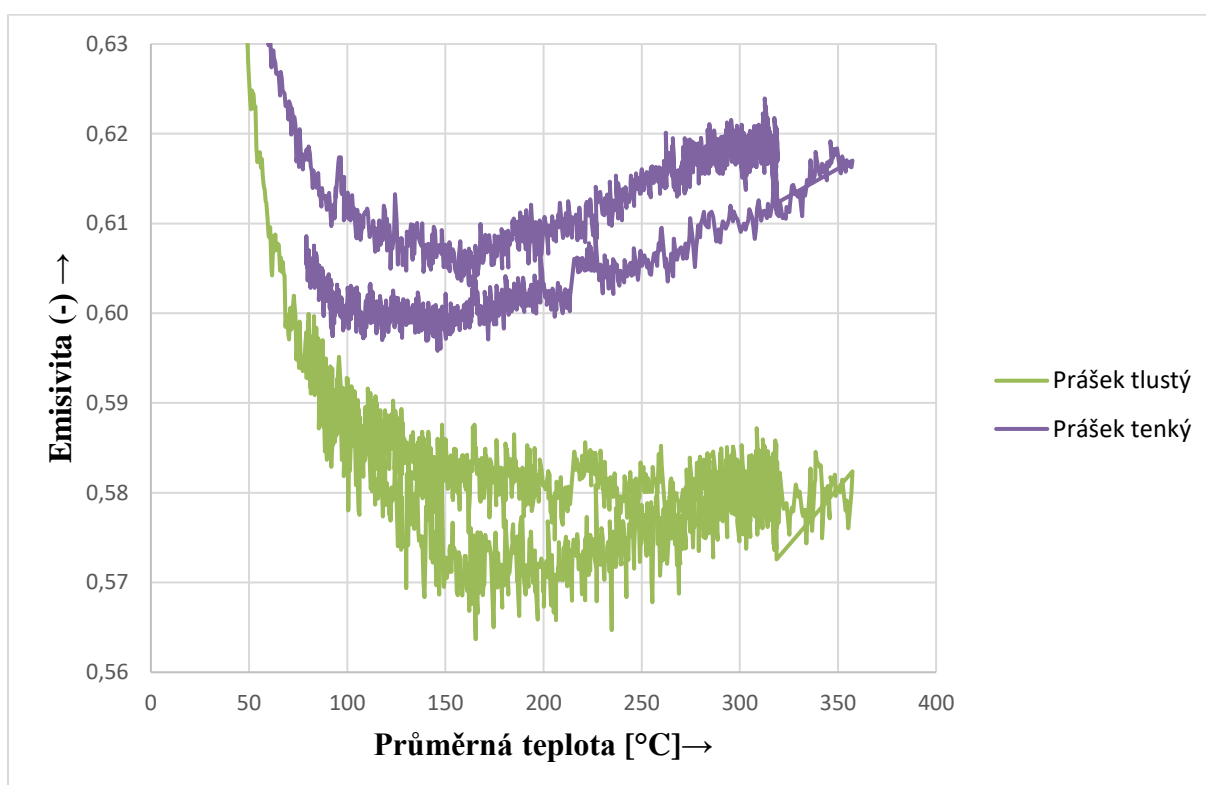
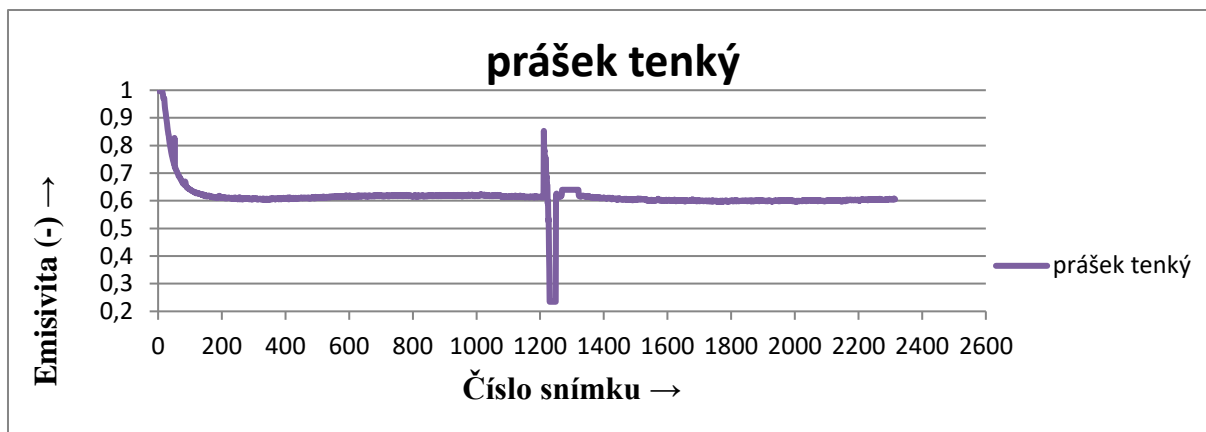




• Druhé měření (ohřev s otevřenou topnou plošinou do oxidace prášku)

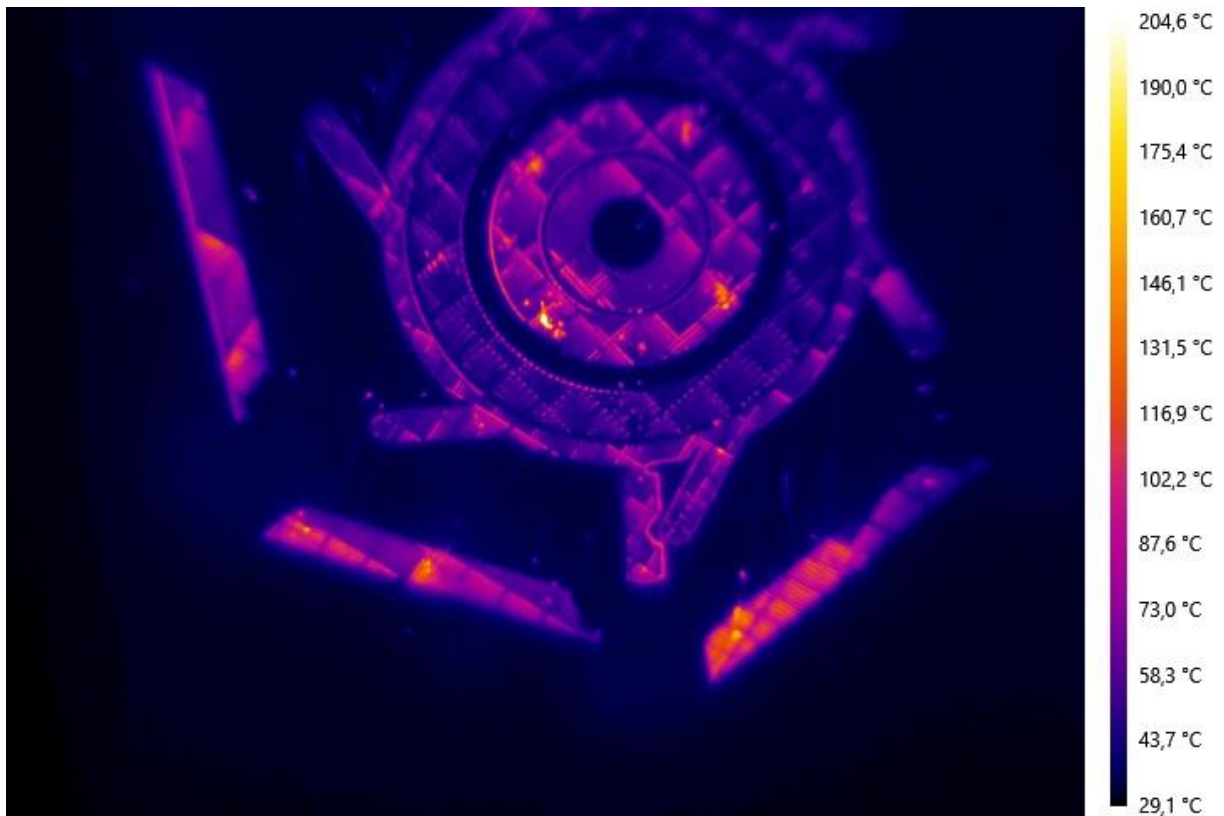






## **PŘÍLOHA č. 4**

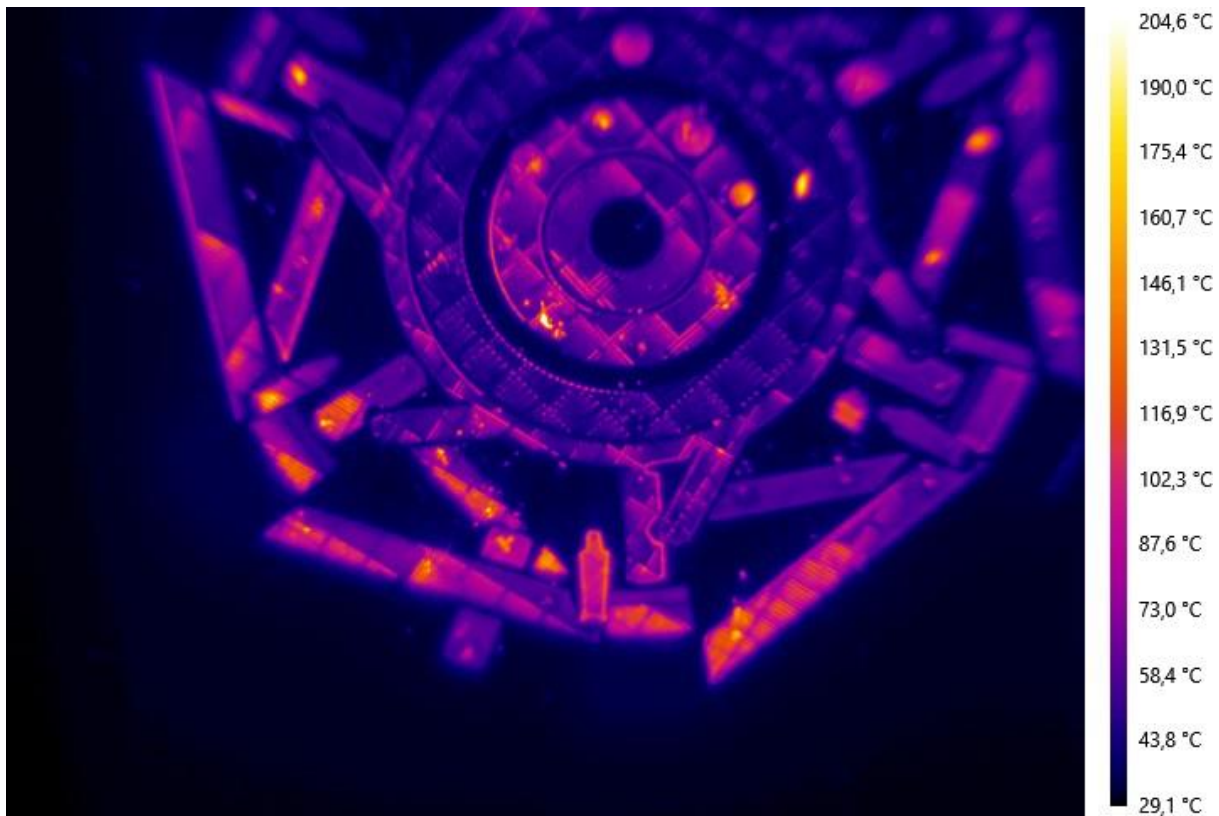
**Termogramy pro porovnání z experimentu pro zobrazení  
globálního teplotního pole**



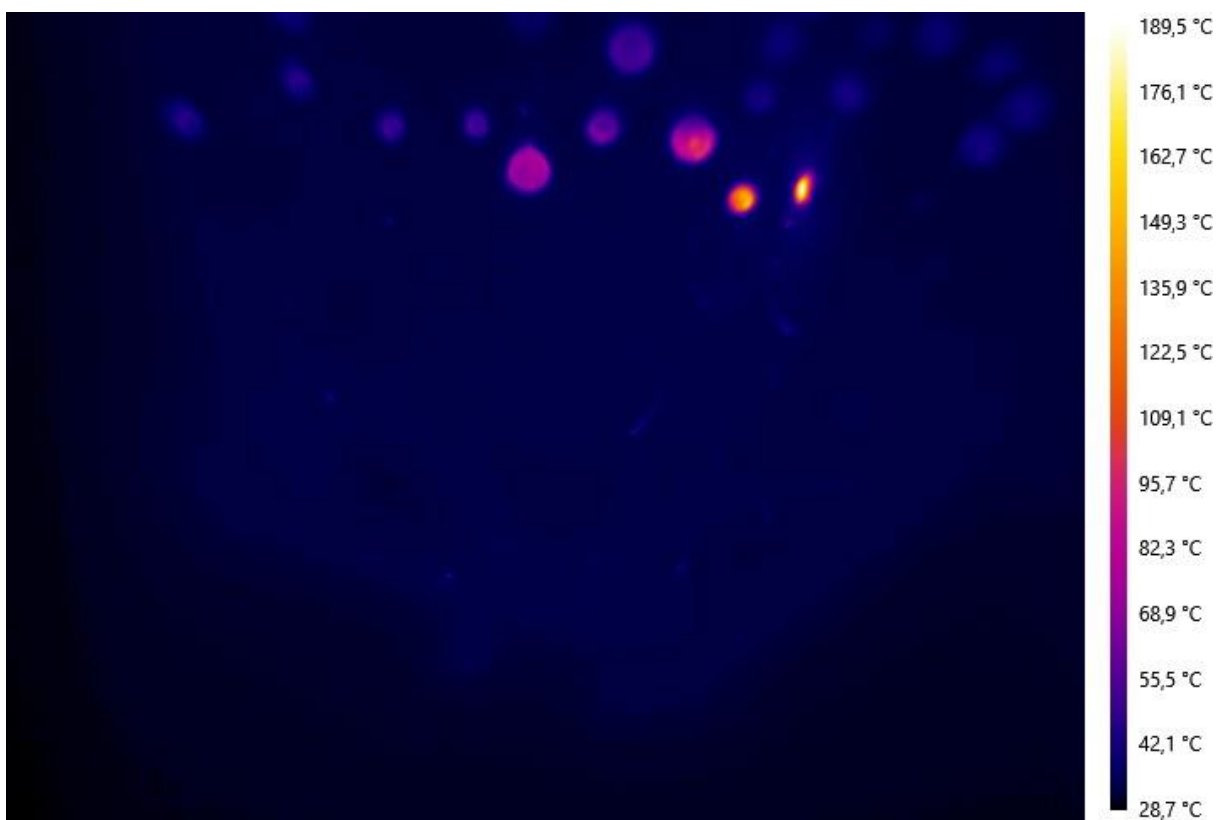
1 Termogram pohled zakladna+dil+kruh -R1 - 1 (snímek 650 Holdmax)



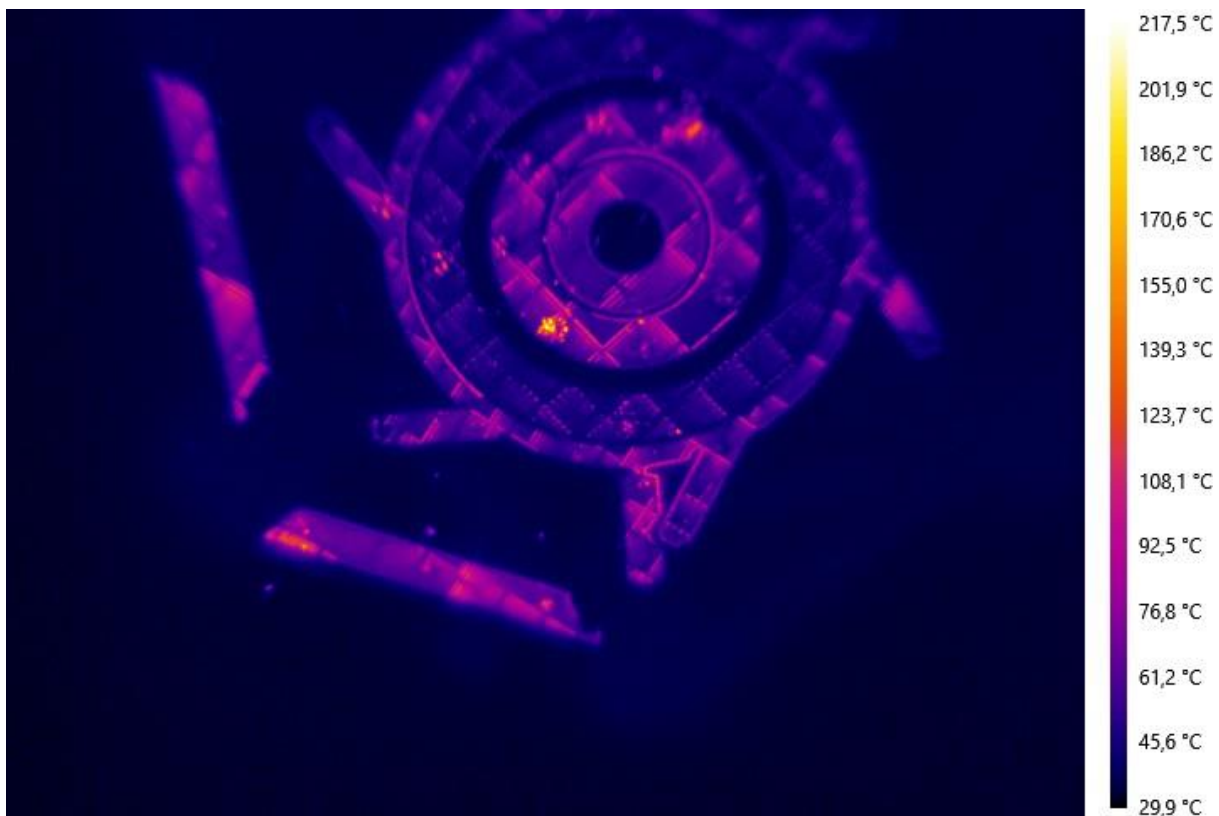
2 Termogram pohled zakladna+dil+kruh -R1 - 1 (snímek 650)



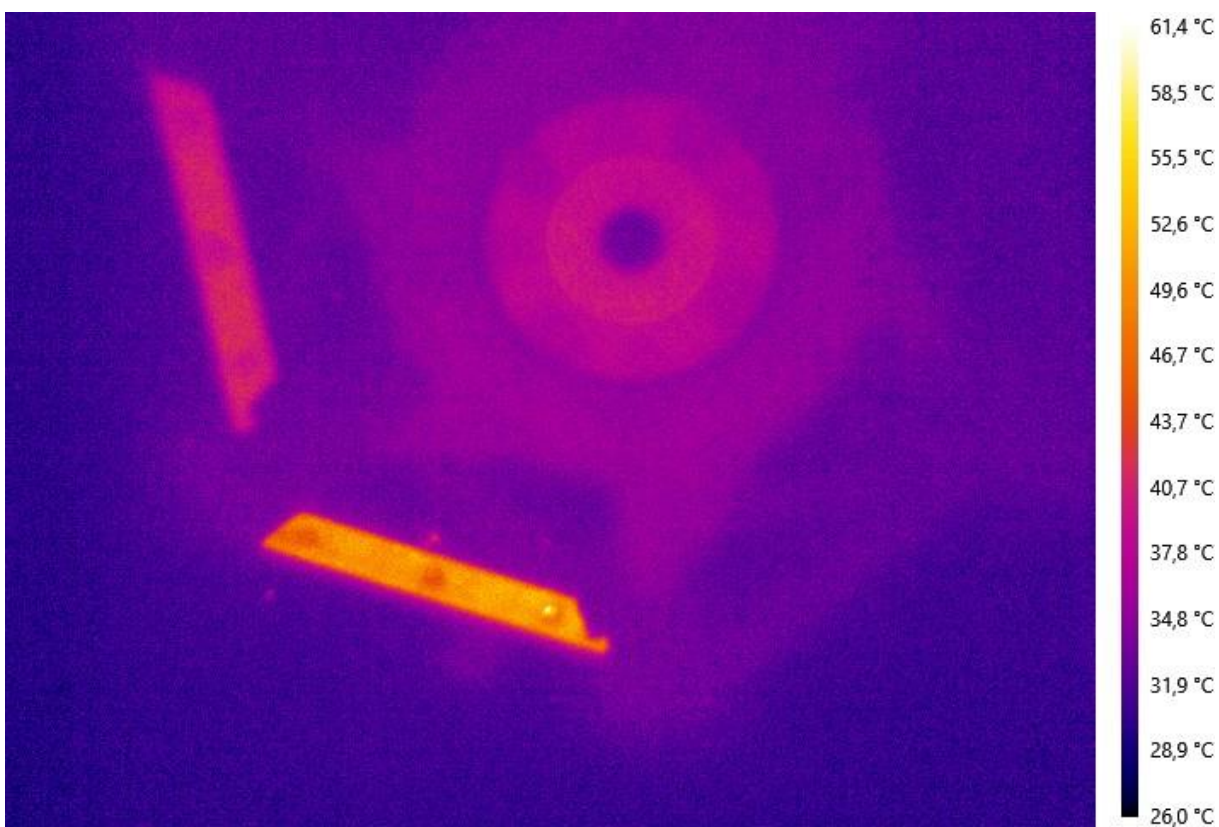
3 Termogram pohled zakladna+dil+kruh -R1 - 1 (snímek 1747 Holdmax)



4 Termogram pohled zakladna+dil+kruh -R1 - 1 (snímek 1747)

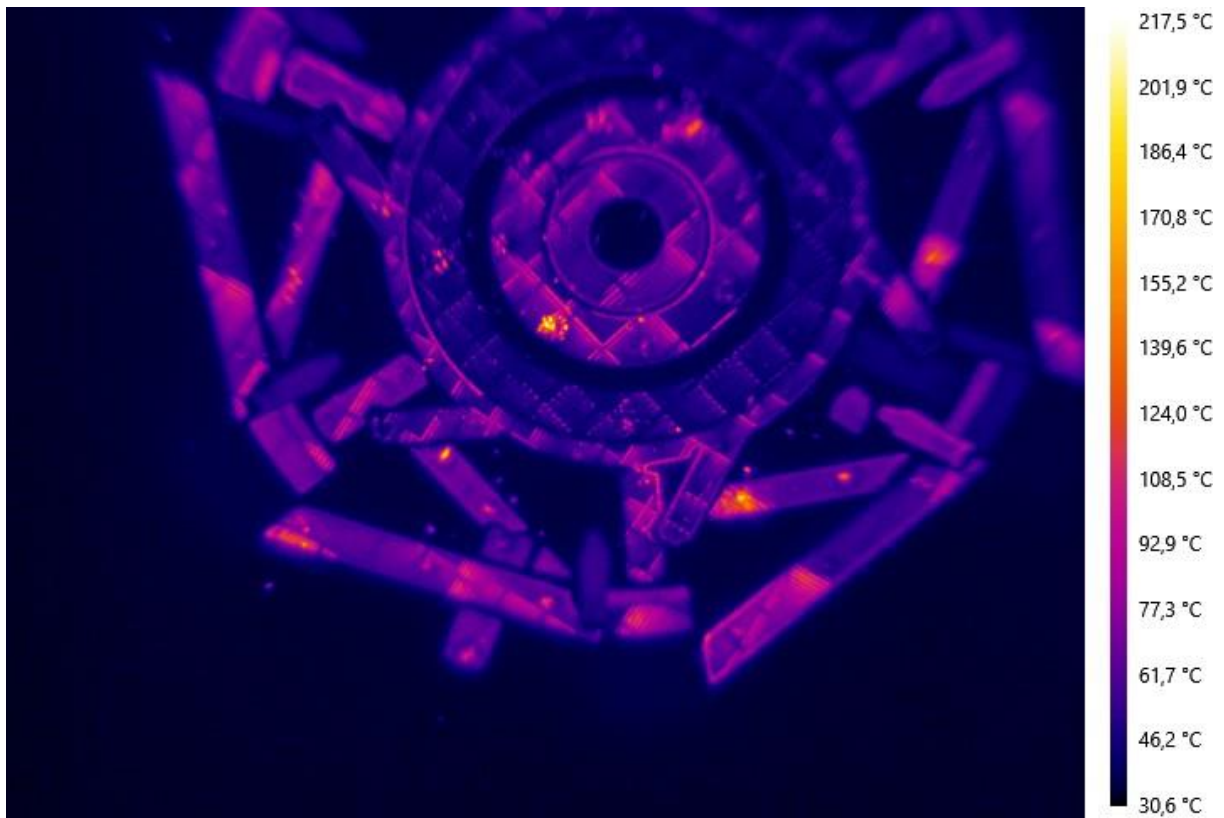


5 Termogram pohled zakladna+dil+kruh -R2 - 1 (snímek 650 Holdmax)

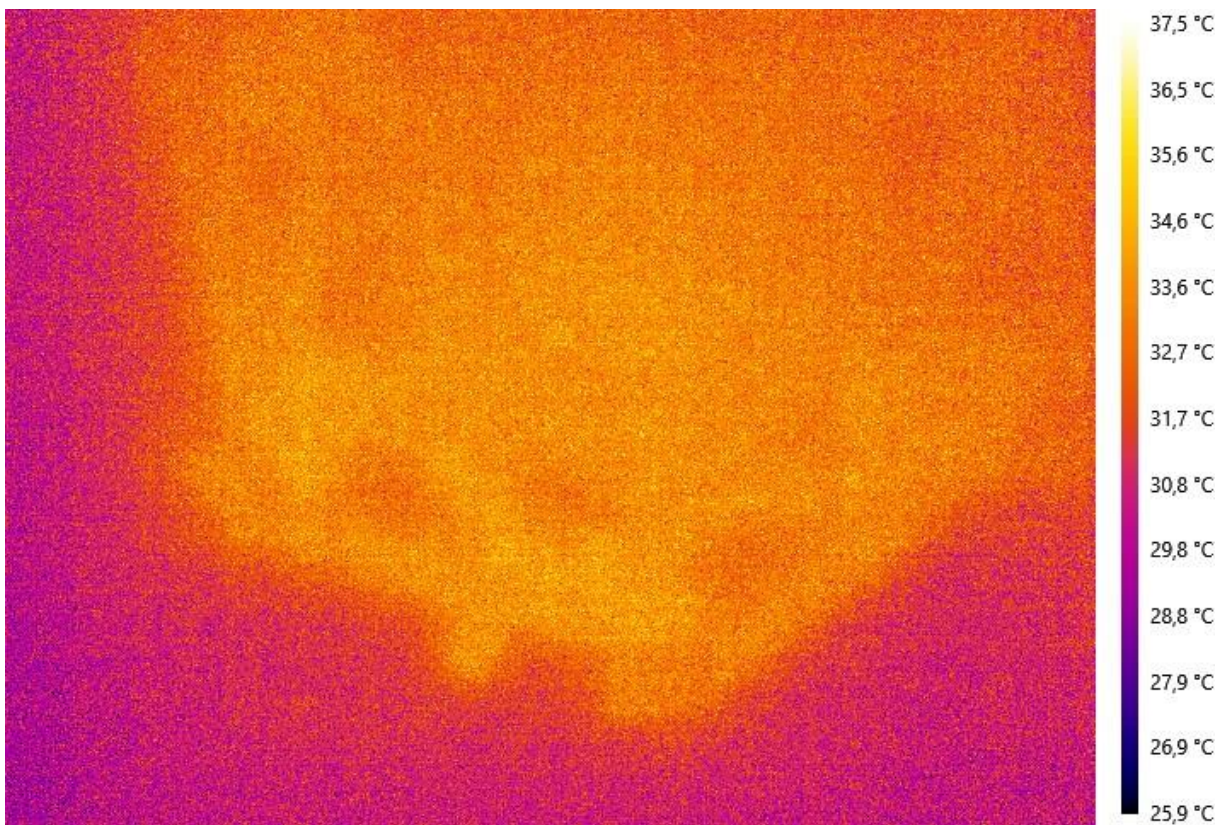


6 Termogram pohled zakladna+dil+kruh -R2 - 1 (snímek 650)

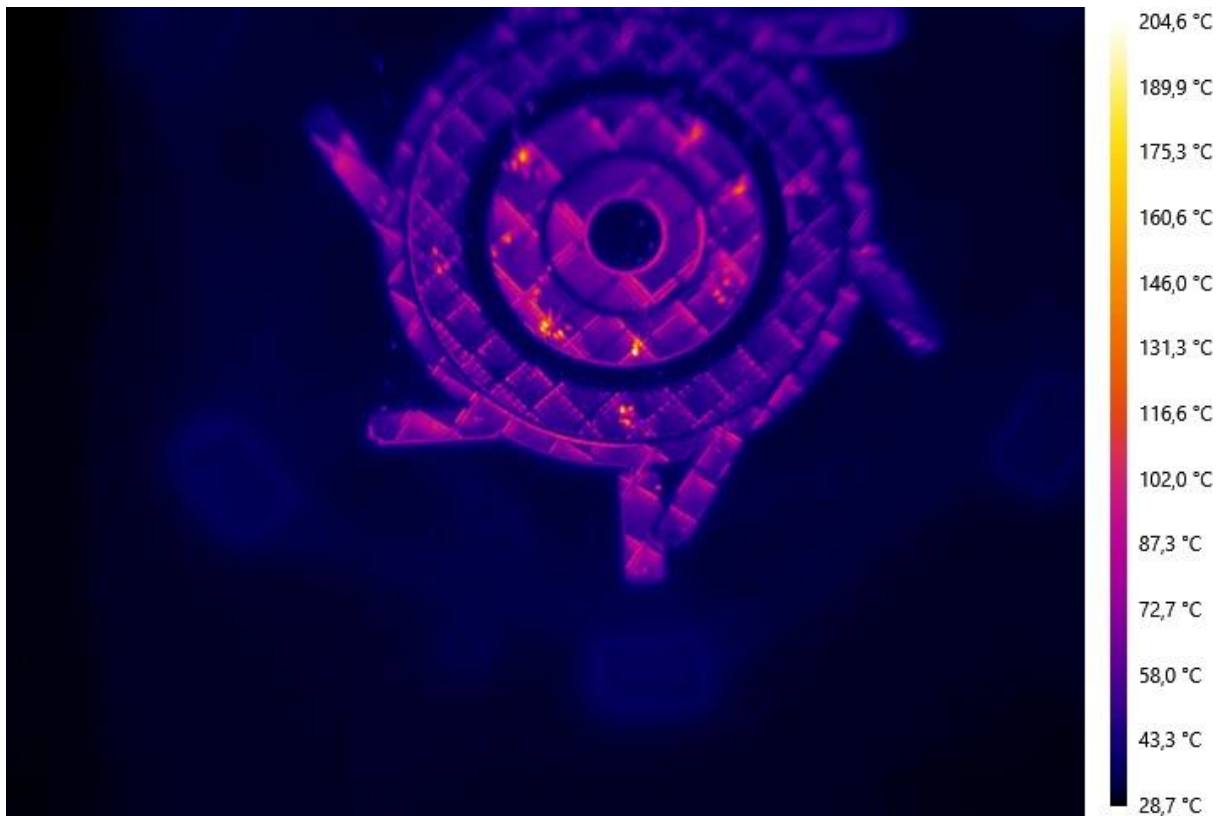




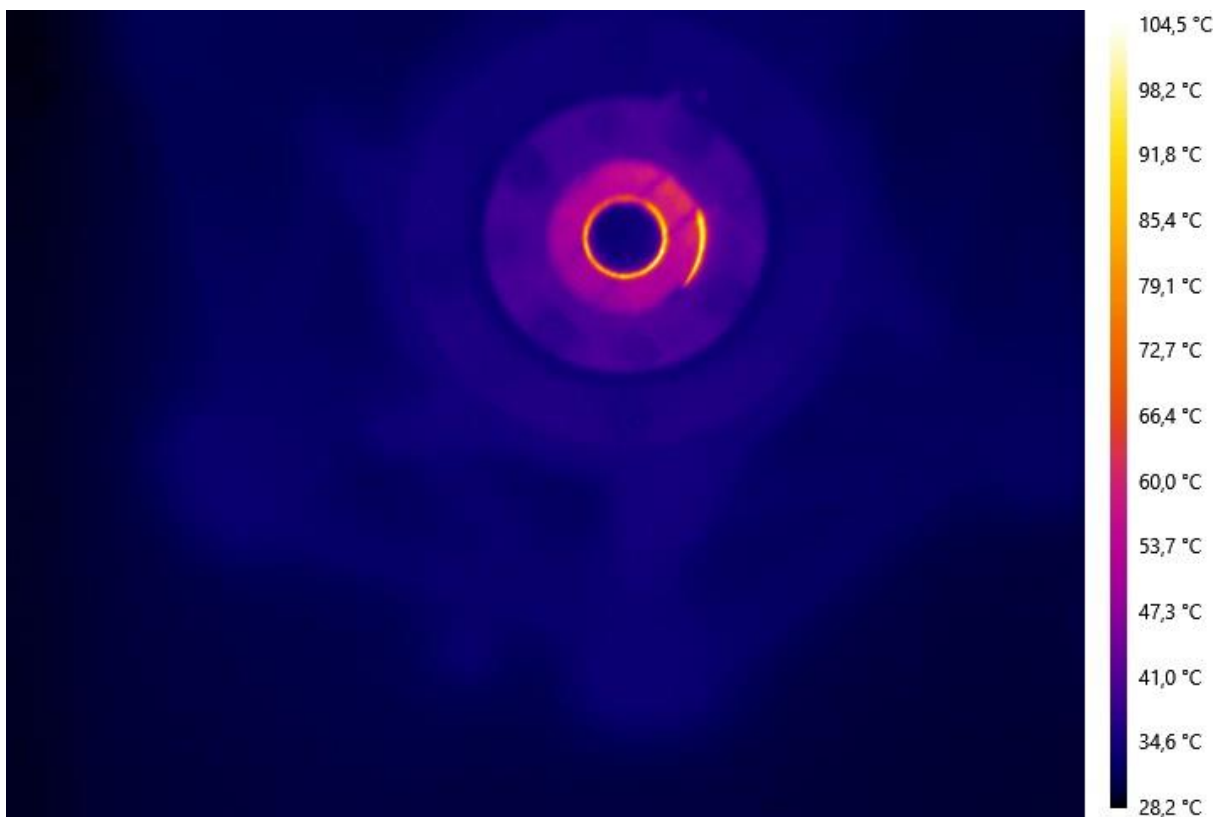
7 Termogram pohled zakladna+dil+kruh -R2 - 1 (snímek 1747 Holdmax)



8 Termogram pohled zakladna+dil+kruh -R2 - 1 (snímek 1747)

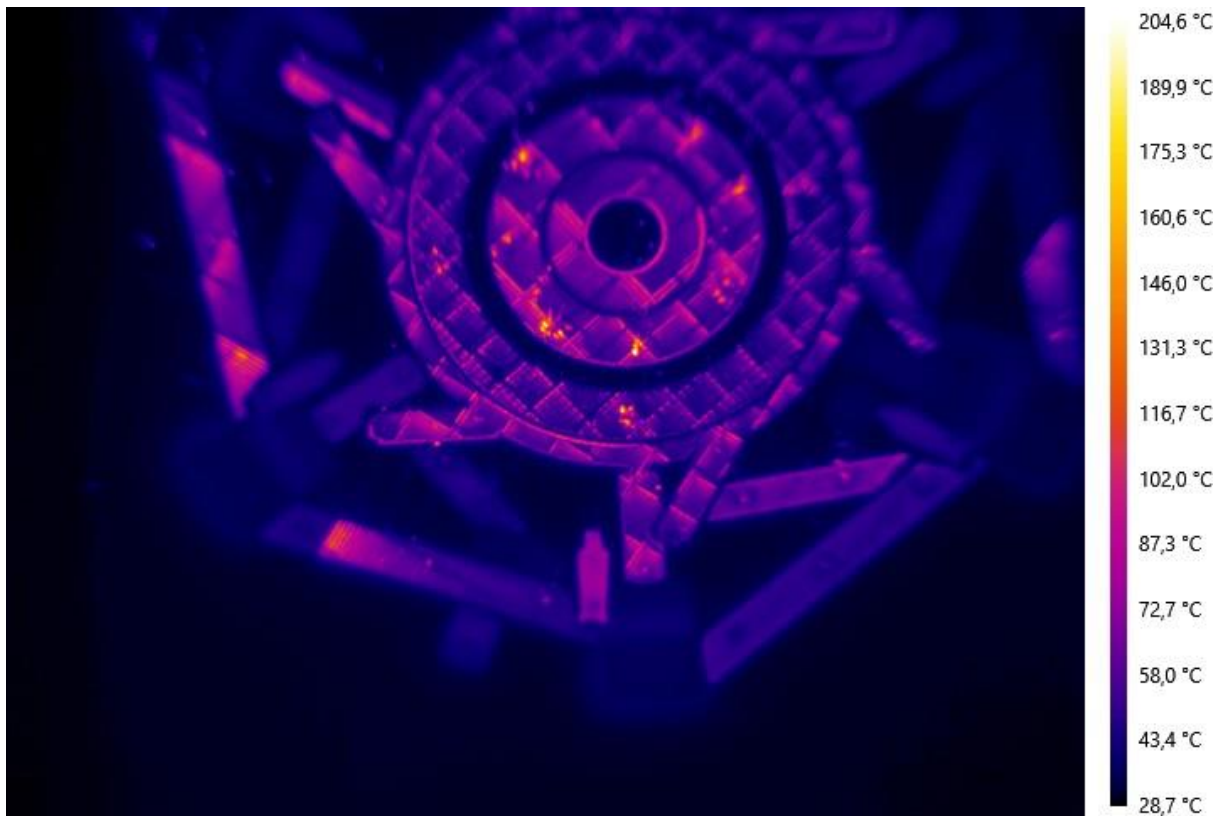


9 Termogram pohled zakladna+dil-R1 - 1 (snímek 600 HoldMax)

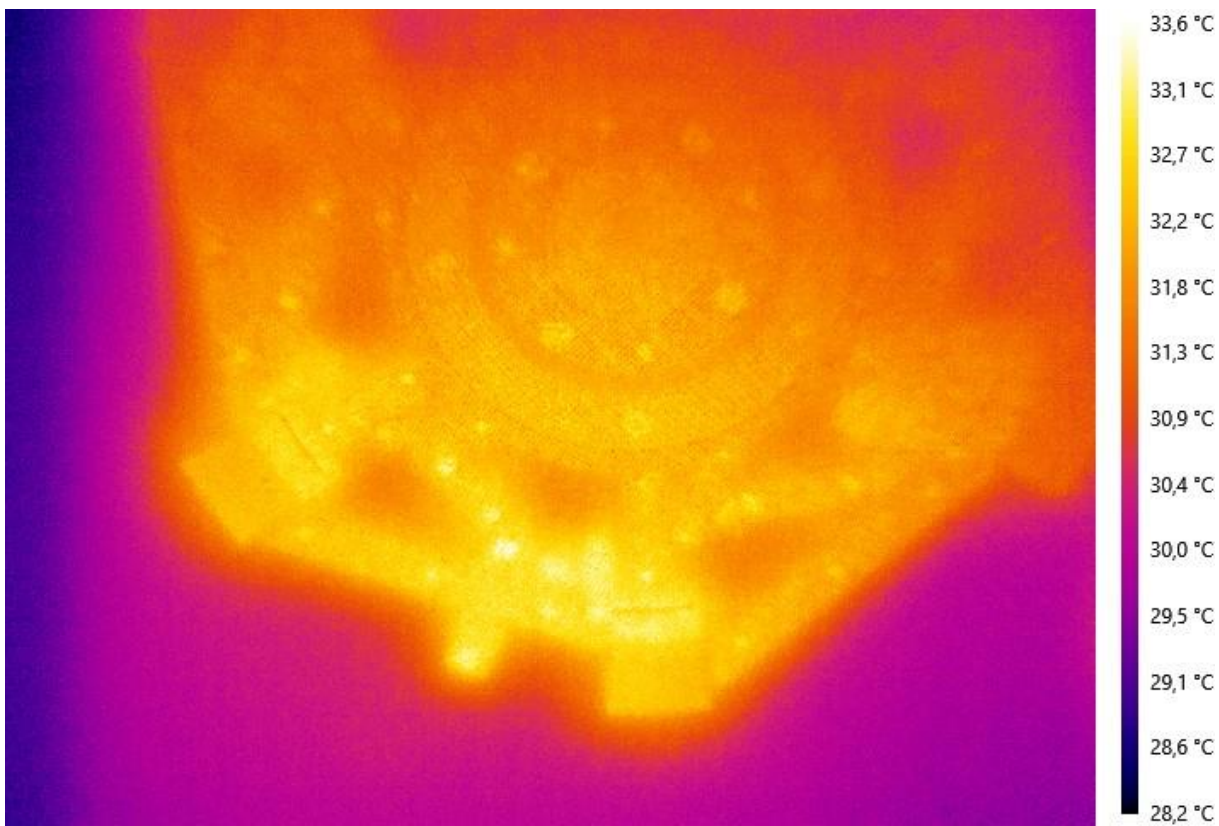


10 Termogram pohled zakladna+dil-R1 - 1 (snímek 600)

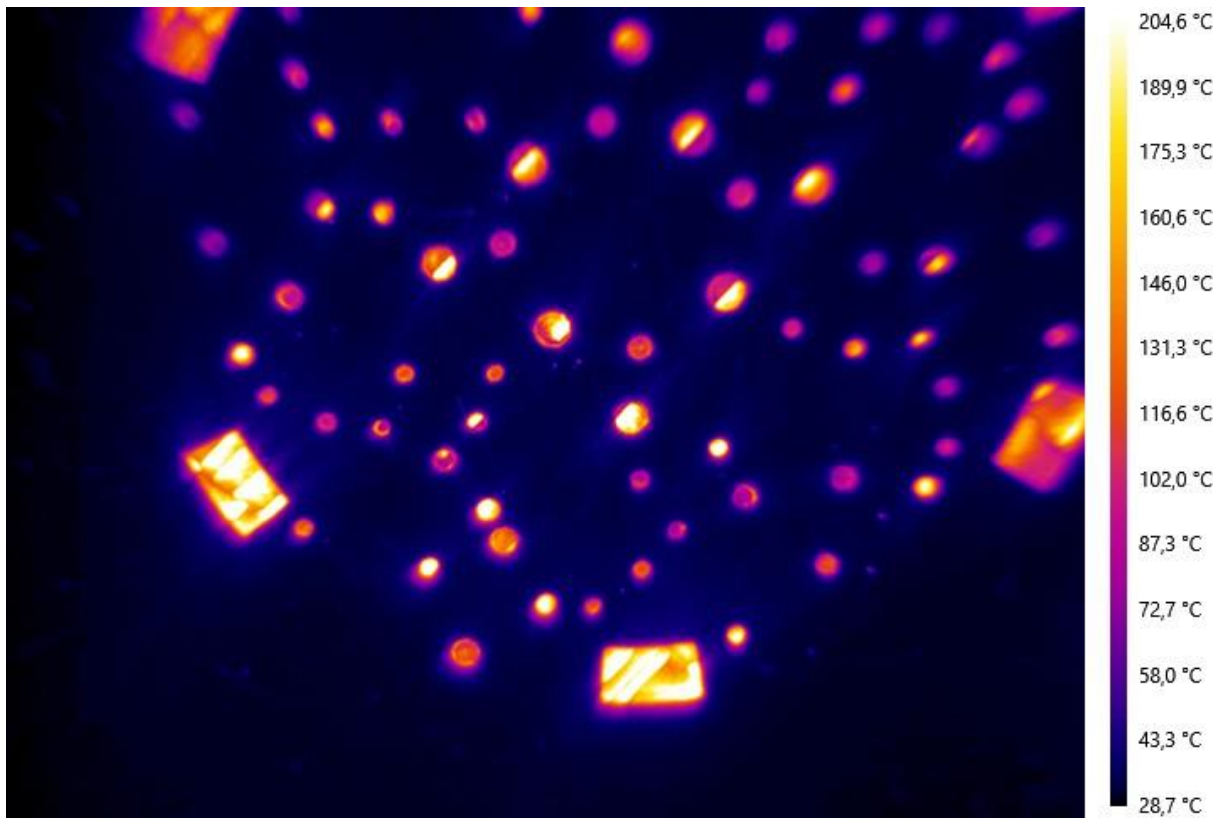




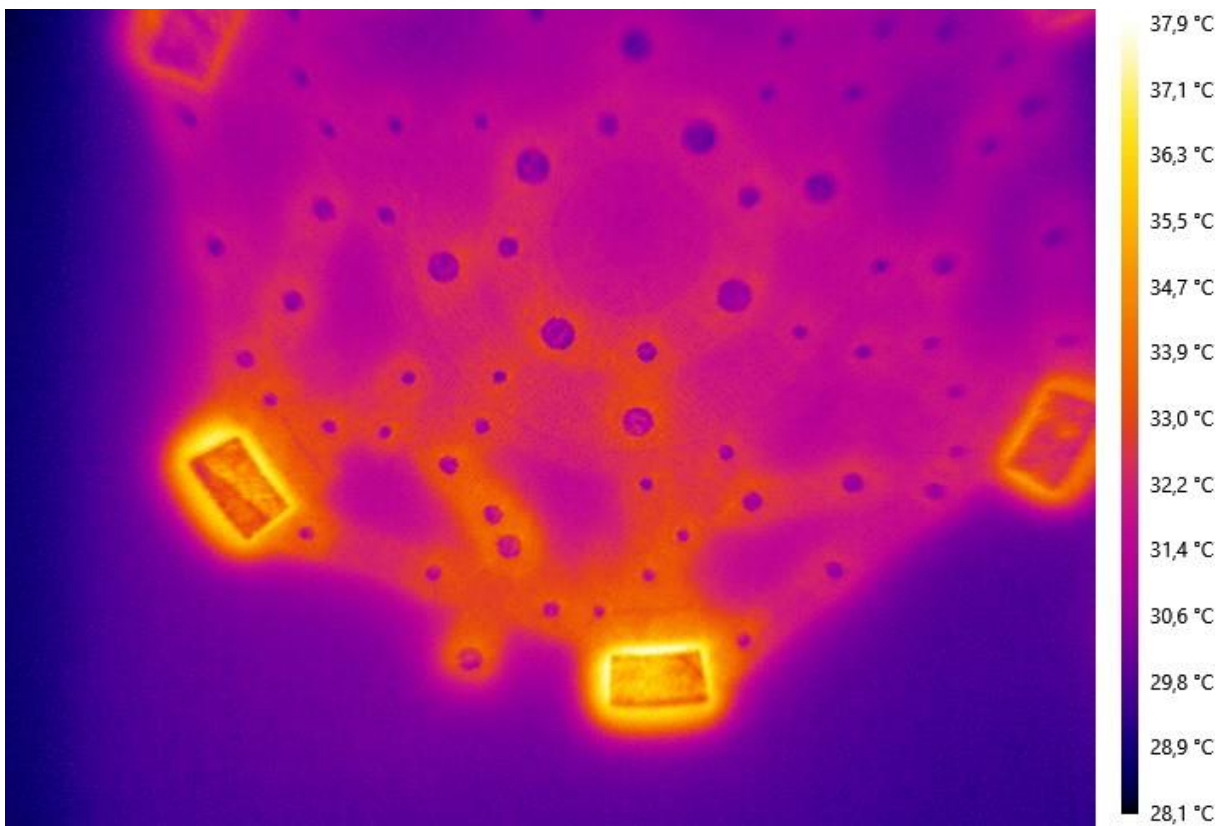
11 Termogram pohled zakladna+dil-R1 - 1 (snímek 1747 Holdmax)



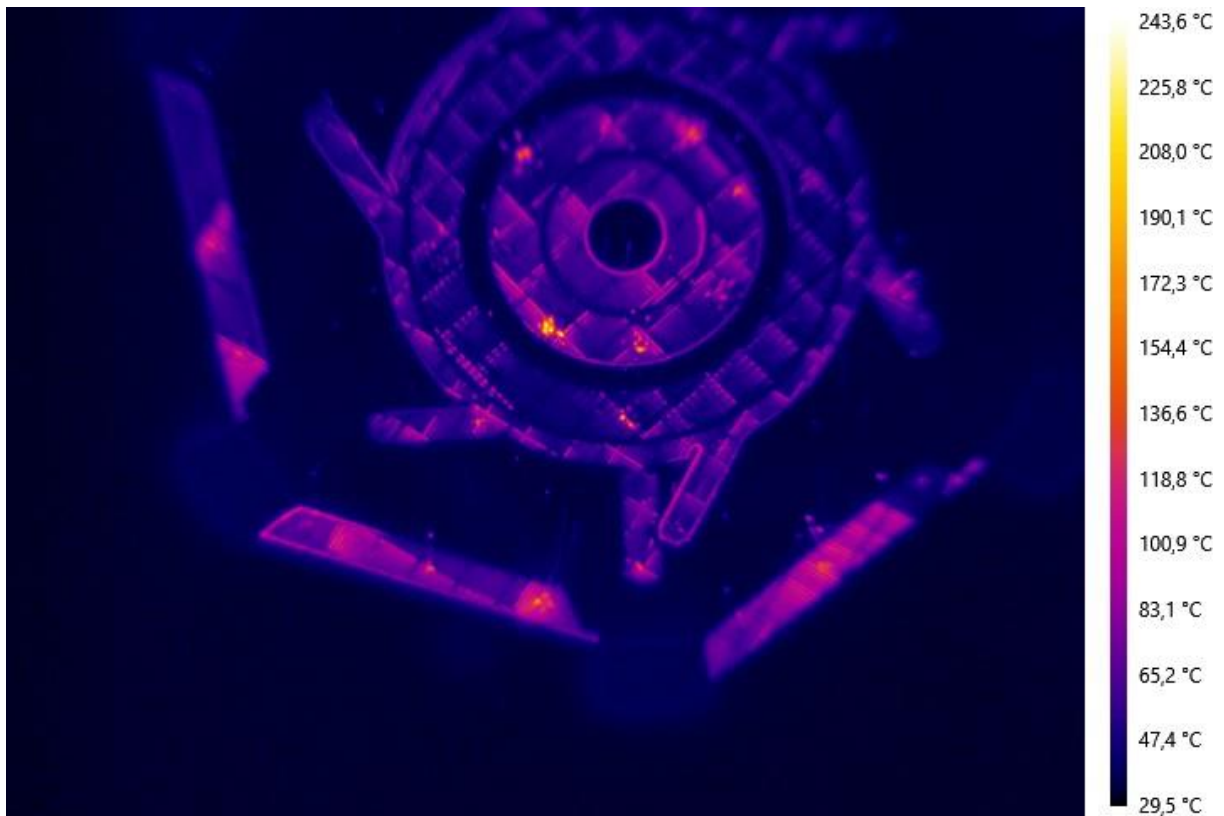
12 Termogram pohled zakladna+dil-R1 - 1 (snímek 1747)



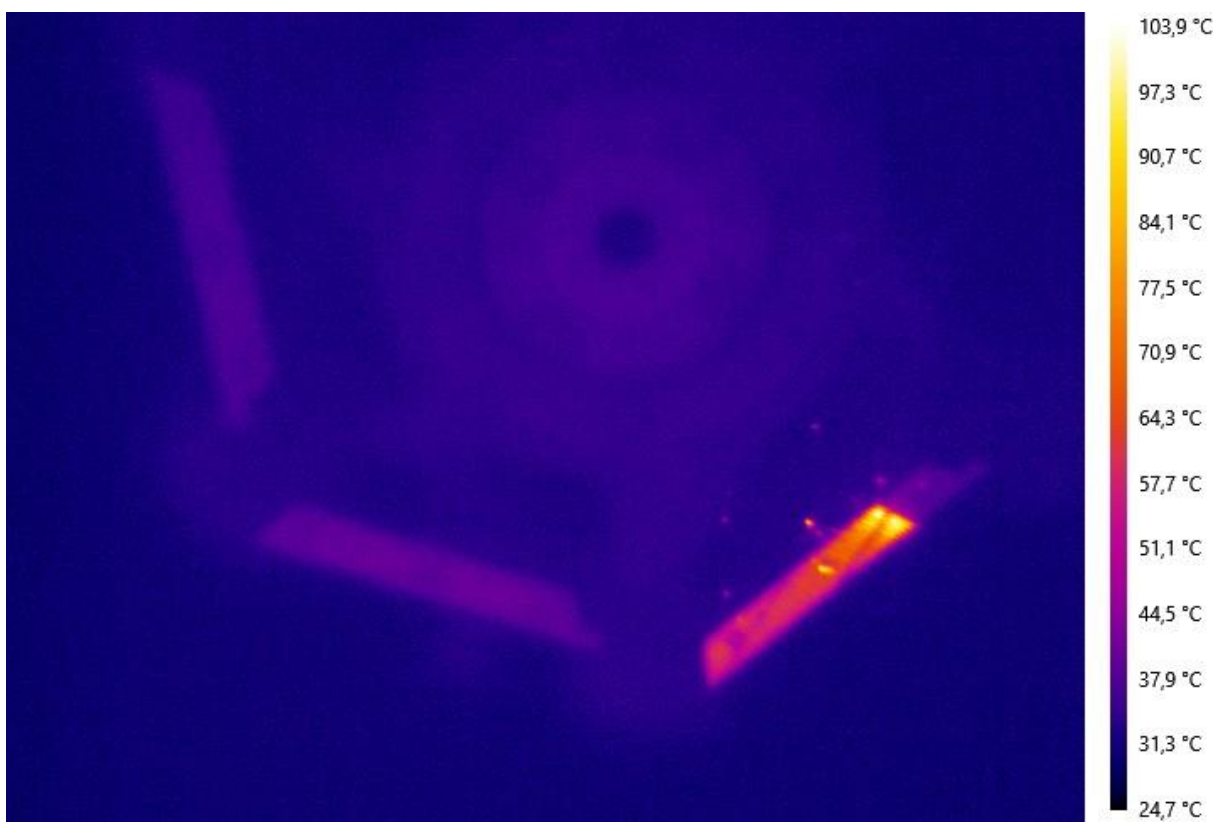
13 Termogram pohled zakladna+dil-R1 - 2 (snímek 862 Holdmax)



14 Termogram pohled zakladna+dil-R1 - 2 (snímek 862)

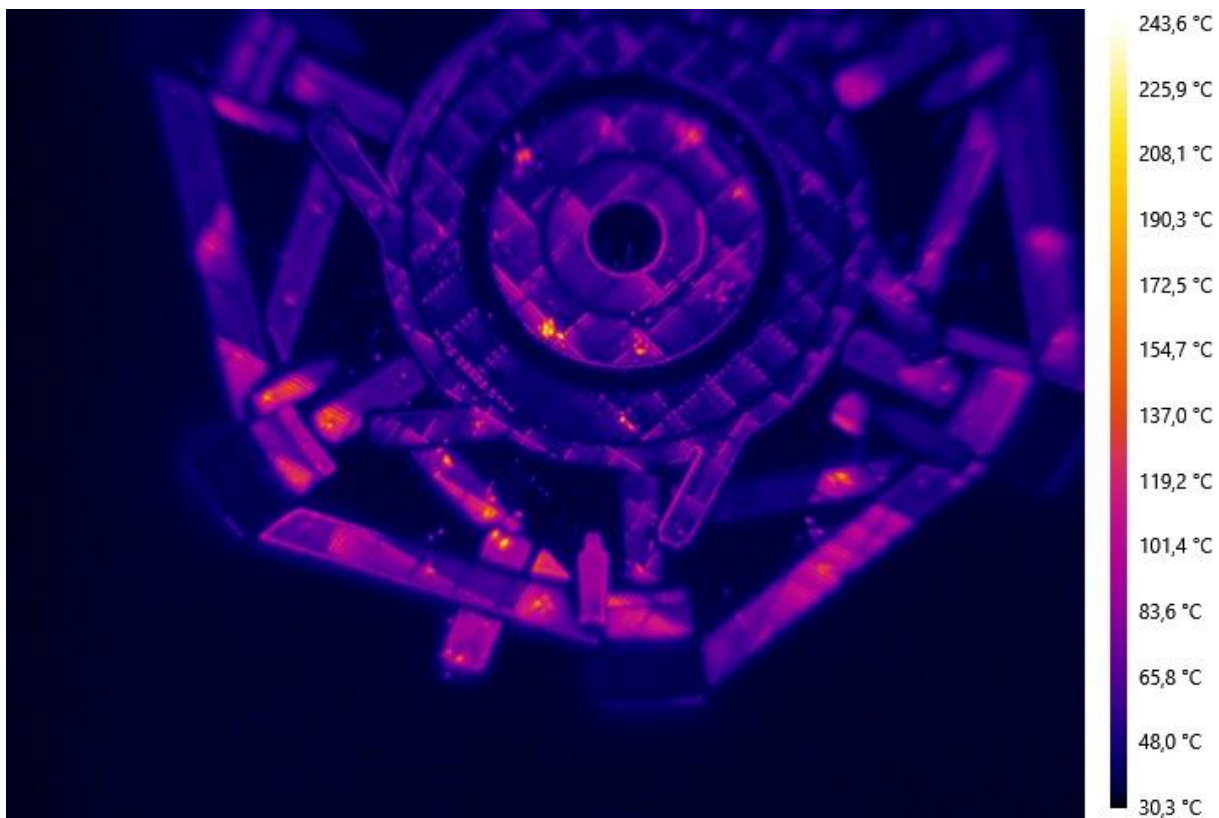


Chyba! V dokumentu není žádný text v zadaném stylu.15 Termogram pohled zakladna+dil-R2 - 1 (snímek 700 Holdmax)

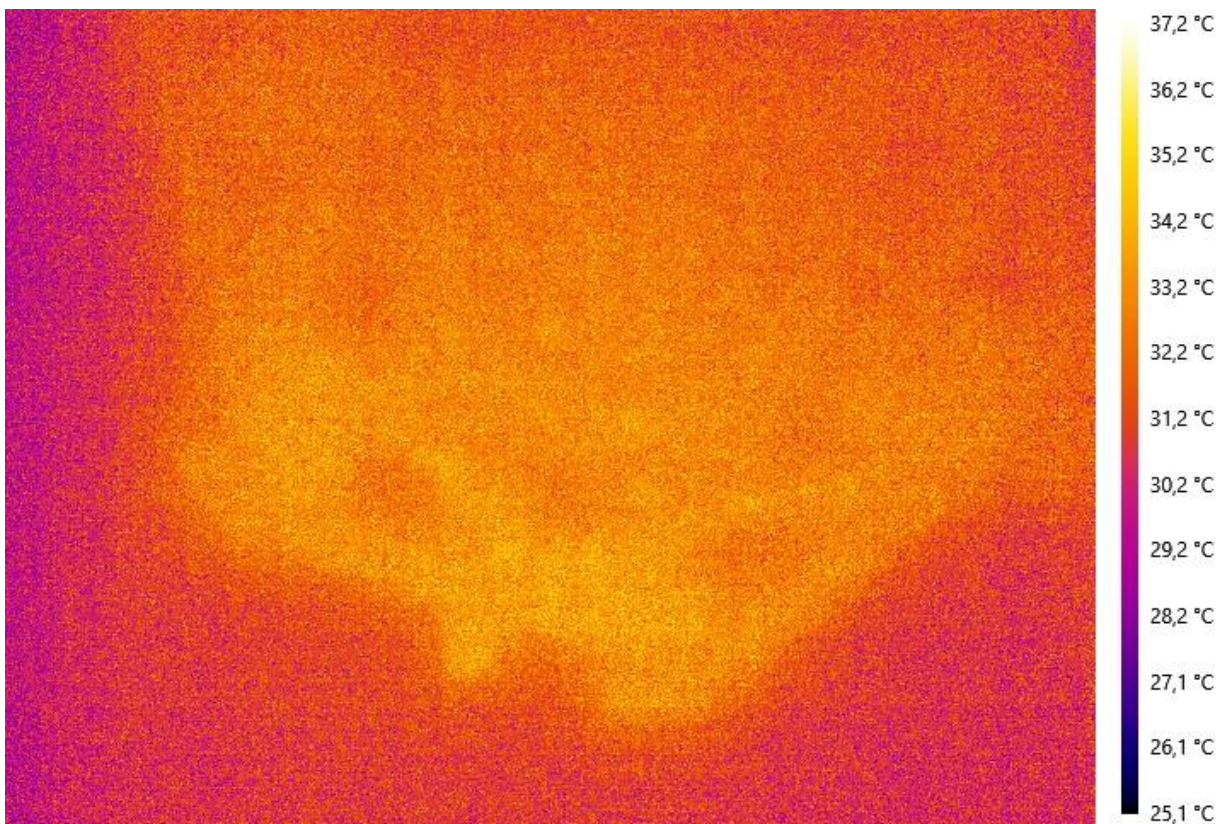


16 Termogram pohled zakladna+dil-R2 - 1 (snímek 700)





17 Termogram pohled zakladna+dil-R2 - 1 (snímek 1747 Holdmax)



18 Termogram pohled zakladna+dil-R2 - 1 (snímek 1747)