

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270011 - Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality

Studijní specializace: Bez specializace

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vlastnosti a využití vysoce emisivních termografických barev pro bezkontaktní měření teploty v aditivních technologiích

Autor: Bc. Michal MATĚJKA

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk VESELÝ, Ph.D.

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal MATĚJKA**
Osobní číslo: **S20N0009P**
Studijní program: **N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**
Téma práce: **Vlastnosti a využití vysoce emisivních termografických barev pro bezkontaktní měření teploty v aditivních technologiích**
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Úvod do problematiky a cíle řešení
2. Rešerše současného stavu v oblasti aditivních technologií a bezkontaktního měření povrchové teploty
3. Příprava vzorků vysoce emisivní termografické barvy, jejich tepelné zatěžování a analýza emisivity
4. Využití znalosti emisivity termografické barvy pro analýzu emisivity materiálu využívaného při 3D tisku
5. Aplikace dosažených výsledků pro bezkontaktní měření teploty při 3D tisku
6. Závěr

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

Seznam doporučené literatury:

- Vědecké články z databází Elsevier / Scopus
- DeWitt D.P., Nutter G.D. Theory and Practise of Radiation Thermometry. New York: Willey – Interscience Publications, 1988.
- Modest, M. Radiative Heat Transfer, 2nd Edition, Academic Press, Boston, 2003.
- Honner M. Infračervená kvantitativní termografie ve výzkumu fyzikálních technologií. Habilitační práce. Plzeň: ZČU v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, 2004.
- Litoš P. Měření emisivity a teplotních polí ve fyzikálních technologiích. Disertační práce. Plzeň: ZČU v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, 2006.
- Tesař J. Termografie v plazmových a laserových technologiích. Disertační práce. Plzeň: ZČU v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, 2014.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Veselý, Ph.D.**
Nové technologie – výzkumné centrum

Konzultant diplomové práce: **Prof. Ing. Milan Honner, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2022**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

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

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Matějka	Jméno Michal	
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270011 - Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Veselý, Ph.D.	Jméno Zdeněk	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Vlastnosti a využití vysoce emisivních termografických barev pro bezkontaktní měření teploty v aditivních technologiích		

FAKULTA	strojn ^í	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------------------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	111	TEXTOVÁ ČÁST	96	GRAFICKÁ ČÁST	15
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Tato diplomová práce se zabývá zjišťováním optických vlastností vysoce emisivních termografických barev. Na základě znalosti jejich emisivity je analyzována emisivita materiálu využívaného u aditivní technologie DMLS. Získaná emisivita tiskového materiálu je poté aplikována pro bezkontaktní měření teploty při tisku aditivní technologií DMLS.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	3D tisk, DMLS, emisivita, LabIR, měření teplot, termografie

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Matějka	Name Michal	
STUDY PROGRAMME	N0715A270011S00 - Machining, Additive Technology and Quality Assurance		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Veselý, Ph.D.	Name Zdeněk	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Properties and utilization of high emissivity thermographic paints for non-contact temperature measurement in additive technologies		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	111	TEXT PART	96	GRAPHICAL PART	15
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This diploma thesis focuses on determining the optical properties of high emissivity thermographic paints. Based on the knowledge of their emissivity, the emissivity of the material used in the additive DMLS technology is analyzed. The obtained emissivity of the printing material is then applied for non-contact temperature measurement during printing with the additive DMLS technology.
KEY WORDS	3D printing, DMLS, emissivity, LabIR, temperature measurement, thermography

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Zdeňkovi Veselému, Ph.D. za odborné vedení, vstřícnost při konzultacích a trpělivost, kterou mi v průběhu zpracování celé diplomové práce věnoval. Dále děkuji konzultantovi prof. Ing. Milanu Honnerovi, PhD. za cenné rady a věcné připomínky k diplomové práci. Také děkuji Regionálnímu technologickému institutu za umožnění přístupu k jejich zařízení a výzkumnému centru Nové Technologie za možnost vypůjčení vybavení pro provedení experimentu. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině za podporu a poskytnutí ideálních podmínek nejen při psaní diplomové práce, ale také během celého studia.

Obsah

Zadání DP.....	2
Seznam zkratk	9
Seznam použitých veličin.....	11
Seznam použitých konstant.....	11
Seznam obrázků	12
Seznam tabulek	15
1. Úvod.....	16
2. Rozbor současného stavu.....	17
2.1. Měření teploty.....	17
2.1.1. Teplota.....	17
2.1.2. Kontaktní měření teploty.....	18
2.1.3. Bezkontaktní měření teploty	20
2.2. Infračervené záření a optické vlastnosti materiálů	21
2.2.1. Infračervené záření.....	21
2.2.2. Optické vlastnosti materiálů.....	23
2.2.3. Měření optických vlastností	25
2.3. Aditivní technologie	27
2.3.1. Technologie vytvrzování tekutého materiálu.....	29
2.3.2. Technologie spojování práškového materiálu.....	31
2.3.3. Technologie spojování pevného materiálu.....	34
3. Cíle.....	37
4. Metody zpracování.....	38
4.1. Přehled přístrojů	38
4.1.1. Disperzní spektrofotometr Specord 210 Plus.....	38
4.1.2. FTIR spektrometr Nicolet iS50.....	39
4.1.3. Topná deska PZ 28-3TD s PID regulátorem PR 5-3T.....	40
4.1.4. Laboratorní pec Linn LM-412.....	40
4.1.5. Termografická LabIR barva	41
4.1.6. Software LabIR	42
4.1.7. Termovizní kamera MIKRON MCS640.....	43
4.1.8. Termovizní kamera FLIR A320.....	43
4.1.9. Termovizní kamera FLIR A615	43
4.1.10. Termovizní kamera FLIR A6751	44
4.1.11. Černé těleso BB-4A.....	44

4.1.12.	Tiskárna EOS M 290	45
4.2.	Postup zpracování.....	45
4.2.1.	Měření vlastností termografické barvy	45
4.2.2.	Měření vlastností tiskového materiálu	48
4.2.3.	Měření teplot na 3D tiskárně.....	52
4.2.4.	Příprava parametrů pro vyhodnocení měření teploty při 3D tisku.....	55
5.	Výsledky a diskuze	58
5.1.	Vlastnosti LabIR barvy před a po tepelném zatěžování	58
5.1.1.	Vizuální změny na vzorcích.....	58
5.1.2.	Změna emisivity LabIR barvy v rozsahu UV/VIS/NIR.....	59
5.1.3.	Změny emisivity LabIR barvy v rozsahu MIR	61
5.2.	Vlastnosti tiskového materiálu	64
5.2.1.	Absolutní emisivita tiskového materiálu v rozsahu UV/VIS/NIR a MIR.....	64
5.2.2.	Efektivní směrová emisivita tiskového materiálu	66
5.3.	Povrchové teploty u procesu 3D tisku.....	69
5.3.1.	Teploty z kamery MIKRON MCS640.....	70
5.3.2.	Teploty z kamery FLIR A6751	74
5.3.3.	Teploty z kamery FLIR A615	79
6.	Závěr	92
	Použitá literatura	94
	PŘÍLOHA č. 1.....	I
	PŘÍLOHA č. 2.....	III

Seznam zkratk

2D	Two-dimensional- dvourozměrný
3D	Three-dimensional- trojrozměrný
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene- akrylonitrilbutadienstyren
AT	Additive technology- aditivní technologie
BJ	Binder Jetting
CAD	Computer aided design- počítačově podporovaný návrh
CAM	Computer aided manufacturing- počítačově podporovaná výroba
CCD	Charge-coupled device- zařízení s vázanými náboji
CNC	Computer Numerical Control- počítačové číslicové řízení
DED	Directed energy deposition
DLP	Digital Light Processing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EDEHT	Effective directional emissivity at high temperature- efektivní směrová emisivita za vysoké teploty
FDM	Fused Deposition Modeling
FIR	Far infrared- daleká oblast infračerveného záření
FT	Fourier transform- Fourierova transformace
IN718	Inconel 718- slitina niklu
IR	Infrared radiation- infračervené záření
LED	Light-Emitting Diode- Světelná dioda
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LOM	Laminated Object Manufacturing
LWIR	Long wavelenght infrared radiation- dlouhovlnné infračervené záření
MIR	Middle infrared radiation- střední oblast infračerveného záření
MJ	Material jetting
MS1	Maraging steel- maraging ocel
MWIR	Mid wavelenght infrared radiation- středněvlnné infračervené záření
NASA	National Aeronautics and Space Administration- Národní úřad pro letectví a vesmír
NIR	Near infrared radiation- blízká oblast infračerveného záření
NTC	New Technologies Research centre- Výzkumné centrum Nové Technologie
PETG	Polyethylene terephthalate glycol- polyethylentereftalát glykol
PLA	Polylactic acid- kyselina polylactická
RTI	Regionální technologický institut

SI	Système international d'unités- mezinárodní systém jednotek
SLA	Stereolithography- stereolitografie
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
SNHRRT	Spectral normal hemispherical reflectance at room temperature- spektrální normálová hemisférická odrazivost za pokojové teploty
SWIR	Short wavelengh infrared radiation- krátkovlnné infračervené záření
T2SL	Typ II Superlattice
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing
UV	Ultraviolet- ultrafialové záření
VIS	Visible radiation- viditelné záření

Seznam použitých veličin

α (-)	pohltivost (absorbance)
ε (-)	emisivita
θ (°)	polární úhel
λ (m)	vlnová délka
λ_{\max} (m)	vlnová délka maximální spektrální intenzity vyzařování při dané teplotě
ρ (-)	odrazivost
τ (-)	propustnost
ϕ (°)	azimutální úhel
Φ_a (W)	absorbovaný tok záření
Φ_i (W)	dopadající tok záření
Φ_r (W)	odražený tok záření
Φ_t (W)	prošlý tok záření
f (Hz)	frekvence
L (W.m ⁻³ .sr ⁻¹)	spektrální zář
T (K)	teplota

Seznam použitých konstant

$c_0 = 299\,792\,458$ m.s ⁻¹	rychlost světla ve vakuu
$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s	Planckova konstanta
$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J.K ⁻¹	Boltzmannova konstanta
$b = 2,898 \cdot 10^{-3}$ m.K	Wienova konstanta

Seznam obrázků

Obr. 1 Kapalinový teploměr [1]	18
Obr. 2 Schéma bimetalového teploměru [3]	18
Obr. 3 Schéma termočlánku [4]	19
Obr. 4 Schéma uspořádání plynového teploměru [5].....	19
Obr. 5 Schéma bolometru [6].....	21
Obr. 6 Elektromagnetické spektrum [14]	21
Obr. 7 a) Schéma radiačních toků, b) Schéma odrazu paprsku a průchodu paprsku materiálem [6]	23
Obr. 8 Schéma FT spektrometru [16].....	26
Obr. 9 Schéma metody SLA [24].....	29
Obr. 10 Schéma metody MJ [26]	30
Obr. 11 Schéma metody DMLS [24]	32
Obr. 12 Schéma metody BJ [26]	33
Obr. 13 Schéma metody LENS [20]	34
Obr. 14 Schéma metody LOM [24]	35
Obr. 15 Schéma metody FDM [24].....	36
Obr. 16 Specord 210 Plus [29]	38
Obr. 17 Schéma principu integrační sféry pro Specord 210 Plus [29].....	38
Obr. 18 Spektrometr Nicolet iS50.....	39
Obr. 19 Schéma principu integrační sféry pro Nicolet iS50 [29].....	39
Obr. 20 Topná deska PZ 28-3TD	40
Obr. 21 PID regulátor PR 5-3T	40
Obr. 22 Laboratorní pec Linn LM-412 [30].....	40
Obr. 23 Termovizní LabIR barvy [31]	41
Obr. 24 Aplikace LabIR barvy na výfuku [31]	41
Obr. 25 Ukázka softwaru LabIR	42
Obr. 26 Termovizní kamera MIKRON MCS640 [32].....	43
Obr. 27 Termovizní kamera FLIR A320 [33]	43
Obr. 28 Termovizní kamera FLIR A615 [34].....	43
Obr. 29 Termovizní kamera FLIR A6751 [35].....	44
Obr. 30 Černé těleso BB-4A [36].....	44
Obr. 31 Tiskárna EOS M 290 s nainstalovanými termovizními kamerami	45
Obr. 32 Ukázka připraveného vzorku	45
Obr. 33 Podložka s připravenými vzorky.....	47

Obr. 34 Podložky na měření prášku, s drážkou 1 mm vlevo, s drážkou 2 mm vpravo.....	48
Obr. 35 Vytisknutý vzorek s nanesenou termografickou barvou.....	49
Obr. 36 Ukázka měření tiskového prášku přes KBr okénko.....	49
Obr. 37 Uspořádání při měření emisivity metodou EDEHT: a) s 2 kamerami, b) s 3 kamerami	50
Obr. 38 Analýzy na oblasti s termografickou barvou	51
Obr. 39 Analýzy pro oblasti bez termografické barvy	51
Obr. 40 Popis oblastí na vytisknutém vzorku 220427-001	52
Obr. 41 Experimentální uspořádání kamer při měření teplot 3D tisku: a) kamera MIKRON MCS640 a FLIR A615, b) kamera FLIR A6751 a FLIR A615	53
Obr. 42 Zaznamenávané vrstvy (zleva 680, 832, 1691).....	54
Obr. 43 a) závislost propustnosti sklíčka GEW-404 na vlnové délce [37], b) citlivost detektoru kamery FLIR A615 v závislosti na vlnové délce [38]	57
Obr. 44 Vzorky 220301-005-004 až 220301-010-004 po tepelném zatěžování v peci	59
Obr. 45 Sada 220330-003 po laserovém tepelném zatěžování	59
Obr. 46 Graf srovnávající spektrální emisivitu vzorků po zatěžování.....	60
Obr. 47 Graf spektrální emisivity vzorků zatěžovaných do 500 °C.....	62
Obr. 48 Graf spektrální emisivity vzorků zatěžovaných od 600 do 673 °C.....	63
Obr. 49 Graf spektrální emisivity vzorků zatěžovaných od 800 do 1000 °C.....	63
Obr. 50 Graf spektrálních emisivit pro tiskové materiály.....	65
Obr. 51 Graf spektrálního průběhu emisivity vzorku 220427-001 v rozsahu 0,3-1,2 μm a vyznačená hodnota získané emisivity pro prášek 220413-001-002.....	65
Obr. 52 Graf závislosti emisivity na teplotě a úhlu měření pro vzorek 2201413-002-002, měřeno kamerou FLIR A615	66
Obr. 53 Vzhled prášků 220413-001-002 (na snímcích vlevo), 220413-001-001 (na snímcích vpravo): a) při teplotě 300 °C, b) při teplotě 400 °C.....	66
Obr. 54 Prášek 220413-003-002 (vlevo) a 220413-003-001 (vpravo) po zahřívání na teplotu 570 °C.....	67
Obr. 55 Graf závislosti emisivity na teplotě a úhlu měření pro vzorek 220427-001, měřeno kamerou FLIR A615	67
Obr. 56 Vzorek 220427-001 před tepelným zatížením (vpravo) po zahřátí na 570 °C (vlevo).....	67
Obr. 57 Graf závislosti emisivity na teplotě u skupiny 220413 a vzorku 220427-001 na úhlu měření 20°, měřeno kamerou FLIR A615.....	68
Obr. 58 Ilustrační model tisknuté frézovací hlavy	69
Obr. 59 Přehled řezů modelem frézovací hlavy na zvolených výškách.....	70
Obr. 60 Termogram zachycující tepelnou stopu laserového paprsku u vrstvy 680	71
Obr. 61 Snímaný kus vrstvy 832 rozdělený do 4 oblastí	71
Obr. 62 Získané termogramy z jednotlivých skupin snímků u vrstvy 832	72

Obr. 63 Termogram znázorňující ztrátu kontrastu při spojení dvou HoldMax termogramů ...	72
Obr. 64 Teplotní stopa laseru u vrstvy 1691	73
Obr. 65 HoldMax termogram se zachycenou plnou šířkou pruhu	73
Obr. 66 HoldMax termogram ze zaznamenávané vrstvy 680 při frekvenci 125 Hz.....	75
Obr. 67 HoldMax termogram ze zaznamenávané vrstvy 832 při frekvenci 125 Hz.....	75
Obr. 68 HoldMax termogram ze zaznamenávané vrstvy 1691 při frekvenci 125 Hz.....	76
Obr. 69 HoldMax termogram ze zaznamenávané vrstvy 1695 při frekvenci 407 Hz.....	77
Obr. 70 HoldMax termogram ze zaznamenávané vrstvy 1698 při frekvenci 1070 Hz: bez analýzy (vlevo), s analýzou pro vyhodnocení teplot (vpravo)	77
Obr. 71 HoldMax termogram ze zaznamenávané vrstvy 1709 při frekvenci 2082 Hz: bez analýzy (vlevo), s analýzou pro vyhodnocení teplot (vpravo)	77
Obr. 72 HoldMax termogram ze zaznamenávané vrstvy 1706 při frekvenci 125 Hz s analýzou pro vyhodnocení teplot.....	78
Obr. 73 HoldMax termogramy s analýzou pro vyhodnocení teplot z vrstev 1705 (vlevo) a 1704 (vpravo)	78
Obr. 74 HoldMax termogram z vrstvy 1703 s analýzou pro vyhodnocení teplot.....	78
Obr. 75 HoldMax termogram vrstvy 680 z 1. experimentu	81
Obr. 76 HoldMax termogram vrstvy 680 z 2. experimentu	81
Obr. 77 HoldMax termogram vrstvy 832 z 1. experimentu	82
Obr. 78 HoldMax termogram vrstvy 832 z 2. experimentu	82
Obr. 79 HoldMax termogram vrstvy 1691 z 1. experimentu	83
Obr. 80 HoldMax termogram vrstvy 1691 z 2. experimentu	83
Obr. 81 Snímky pro porovnání teplot prášku: a) z vrstvy 667 (rozsah -20-150 °C), b) z vrstvy 669 (rozsah 100-650 °C)	84
Obr. 82 HoldMax termogram vrstvy 680 s teplotními profily: a) z 1. experimentu, b) z 2. experimentu	85
Obr. 83 Graf teplotních profilů P1	86
Obr. 84 Graf teplotních profilů P2	86
Obr. 85 Graf teplotních profilů P3	87
Obr. 86 termogram vrstvy 680 s analýzami teplotních průběhů: a) z 1. experimentu, b) z 2. experimentu	87
Obr. 87 Teplotní průběhy oblastí T1, T2 a T3 z 1. experimentu	88
Obr. 88 Teplotní průběhy oblastí T1, T2 a T3 z 2. experimentu	88
Obr. 89 HoldMax termogram z periodického záznamu v časech přibližně 2 h od začátku tisku	89
Obr. 90 HoldMax termogram z periodického záznamu v časech přibližně 12 h od začátku tisku	90
Obr. 91 Ukázka termogramu bez aplikace HoldMax funkce	90

Obr. 92 Detailně znázorněná tepelná stopa zachycená kamerou FLIR A615	91
---	----

Seznam tabulek

Tab. 1 Přehled vzorků a teplot jejich zatěžování	46
Tab. 2 Nastavené parametry při měření metodou SNHRRT	47
Tab. 3 Vlastní označení práškových tiskových materiálů	48
Tab. 4 Nastavené parametry termogramu v softwaru LabIR	50
Tab. 5 Přehled nastavovaných hodnot emisivity pro jednotlivé teploty	50
Tab. 6 Přehled vybraných řezů a k nim odpovídajících hlavních vrstev a výšek tisku	53
Tab. 7 Přehled získaných hodnot emisivity	56
Tab. 8 Přehled hodnot propustnosti pro Ge sklíčko v rozsahu 3-5 μm	57
Tab. 9 Přehled propustností pro použité měřicí systémy	57
Tab. 10 Přehled měřených vzorků a teplot zatěžování	58
Tab. 11 Vypočítané hodnoty pásmové emisivity a rozdílů v rozsahu 850-1000 nm	60
Tab. 12 Vypočítané hodnoty pásmové emisivity a rozdílů v rozsahu 3-5 a 7-14 μm	61
Tab. 13 Označení tiskových materiálů	64
Tab. 14 Pásmová emisivita tiskových materiálů	64
Tab. 15 Srovnání pásmové a efektivní směrové emisivity v rozsahu 7-14 μm	68
Tab. 16 Získaná efektivní emisivita v vzorku 220427-001 pro úhel 20° v spektrálním rozsahu 3-5 μm	69
Tab. 17 Přehled získaných hodnot efektivní směrové emisivity pro různá spektrální pásma .	69
Tab. 18 Zvolené tiskové vrstvy a tomu odpovídající výšky tisku	70
Tab. 19 Přehled parametrů záznamu vyhodnocovaných vrstev	70
Tab. 20 Parametry záznamu vrstev z kamery FLIR A6751 použitých pro vyhodnocení	74
Tab. 21 Srovnání naměřených teplot z kamery FLIR A6751	79
Tab. 22 Měřicí parametry kamery FLIR A615 pro 1. experiment	80
Tab. 23 Měřicí parametry kamery FLIR A615 pro 2. experiment	80
Tab. 24 Teploty získané z oblastí A a B vrstev 667 a 669	84
Tab. 25 Přehled získaných termogramů z periodického záznamu	89

1. Úvod

Aditivní technologie jsou pokročilé výrobní metody, které se používají k výrobě prototypů, geometricky složitých nástrojů či funkčních materiálů. Jejich podstatou je vytváření trojrozměrných objektů nanášením materiálu vrstvu po vrstvě, dokud nevznikne hotový výrobek. Díky tomu umožňují vyrábět i složité součásti jako jeden kus. Při zhotovování dílů s vyšší složitostí geometrického návrhu a s přídavnými funkcemi, jako jsou vnitřní chladičí kanály, je výroba konvenčními technologiemi finančně, časově náročná nebo dokonce až neproveditelná. Zavedení aditivních technologií může přinést úsporu času, nákladů, omezení lidské interakce a možnost na základě modelu vytvořeného počítačem vyrobit téměř libovolný tvar součásti.

Aditivní technologie mají také svá omezení. Skoro každý kovový díl vyrobený jednou z aditivních technologií bude potřebovat následné zpracování, než bude připraven k použití. To zvyšuje celkové náklady a dobu dodání. Nezávisle na zvolené technologii je k výrobě finálního dílu téměř vždy zapotřebí kombinace tepelných úprav, obrábění, broušení a dalších dokončovacích metod. Další nevýhodou aditivních technologií je, že zatím nemůžou konkurovat tradiční výrobě, pokud se jedná o velkosériovou výrobu. Vyskytuje se pro ně též limitované množství materiálů a typů aditivních výrobních technologií.

Využívaná aditivní technologie v diplomové práci je metoda Direct Metal Laser Sintering (DMLS), která vytváří kovové díly postupným vrstvením jemných kovových prášků a jejich spékání pomocí koncentrovaného paprsku energie ve formě laserového paprsku. Jelikož během aditivních technologií dochází k tepelnému zpracování vstupního materiálu, bude docházet k ovlivnění struktury a vlastností vytisknuté součásti. Pokud se bude proces technologicky lišit, bude docházet k různé kvalitě výtisku. Optimalizace technologických parametrů procesu napomáhá v součástech vyrobených aditivními technologiemi eliminovat defekty. Případná přítomnost defektů má přímý vliv na fyzikální i mechanické vlastnosti materiálu, které mohou potenciálně vést k selhání vytvořených dílů při jejich zatěžování.

Pro optimalizaci procesu z hlediska kvality je vhodné doplnit tiskové zařízení monitorovacími systémy. Nejvýznamnější informace lze při tisku získat monitorováním procesu spékání, k čemuž je zapotřebí zaznamenávat teploty. Jelikož tisk probíhá v uzavřené atmosféře ochranného plynu, nabízí se bezkontaktní způsoby měření teplot.

Bezkontaktní metody měření povrchové teploty jsou takové, při nichž se teplota měří bez kontaktu mezi snímačem a měřeným objektem. Zařízení pro bezkontaktní měření teploty fungují na principu měření radiačního toku od měřeného objektu a následného zpracování dat pro získání teploty. Zdrojem nejistoty při stanovení povrchové teploty jsou radiační procesy mezi měřeným objektem a jeho okolím včetně parametrů měření. Mezi parametry ovlivňující měření patří emisivita, propustnost prostředí, vlhkost a okolní nebo odražená teplota. V případě měření teplot u aditivních technologií je získání a nastavení těchto parametrů problematické. Navíc v průběhu tisku může docházet k jejich změnám.

Tato diplomová práce se zabývá zjišťováním optických vlastností vysoce emisivních termografických barev. Na základě znalosti jejich emisivity je analyzována emisivita materiálu využívaného u aditivní technologie DMLS. Získaná emisivita tiskového materiálu je poté aplikována pro bezkontaktní měření teploty při tisku aditivní technologií DMLS.

2. Rozbor současného stavu

2.1. Měření teploty

Teplota a její měření má zásadní význam pro mnoho aspektů lidské činnosti, od zdravotnických aplikací přes řízení procesů až po zjišťování defektů. Mnoho fyzikálních procesů a vlastností je závislých na teplotě a její měření je tudíž klíčové. Škála metod a zařízení pro měření teploty je rozsáhlá. Možnosti měření zahrnují kontaktní metody, jako jsou termočlánky a odporové teploměry, či bezkontaktní techniky využívající například infračervené detektory [1]. Cílem této kapitoly je představit pojmy teplota, metody jejího měření a popsat konkrétní zařízení dostupná pro měření teploty.

2.1.1. Teplota

Teplota je jednou ze sedmi základních veličin systému SI (Mezinárodní systém jednotek) s plným názvem termodynamická teplota, označovaná jako T . Její jednotkou je kelvin, který se definuje jako podíl $1/273,16$ termodynamické teploty trojného bodu vody. Trojný bod vody odpovídá teplotě rovnovážného stavu soustavy led, voda a sytá vodní pára. Teplotní stupnice v kelvinech se nazývá termodynamická teplotní stupnice a její počátek odpovídá teplotě, při které by ustal všechny neuspořádaný pohyb částic. Teploty 0 K se lze pouze přiblížit, protože částice se v látkách vždy pohybují i když nepatrně. Teplota se může popsat také jako míra kinetické energie pohybujících se molekul [2].

Obecně je pojem teplota známý z každodenní zkušenosti s horkými a studenými předměty. S tím souvisí také přenos tepla, konkrétně tok tepelné energie. Je běžnou zkušeností, že k přenosu tepla dochází mezi horkým a studeným předmětem. Na teplotu lze proto nahlížet jako na potenciál a na teplotní rozdíl jako na sílu, která pohání přenos tepla z jednoho systému na druhý s nižší teplotou.

Termín systém se používá k definování makroskopické entity, tj. entity sestávající ze statisticky významného počtu částic, které se rozprostírají v prostoru a čase. Systém může být ovlivněn dvěma způsoby. Když jeho teplota stoupá, dochází ke zvýšení neuspořádaného tepelného pohybu jeho složek. Čím je systém teplejší, tím rychleji jeho částice kmitají. Podobně, čím je systém chladnější, tím pomaleji budou částice kmitat, přičemž nastává limit, kdy lze částice považovat za neuspořádanější. Tento limit teoreticky nastává, když teplota systému dosáhne absolutní nuly.

Jako příklad lze uvést zahřívání pevné látky, jejíž atomy zpočátku kmitají v mřížce. S rostoucí teplotou atomy kmitají stále intenzivněji, až dosáhnou bodu, kdy se atomy mohou vzájemně posouvat a nejsou udržovány v pevné poloze, a látka je klasifikována jako kapalina. Pokud se teplota dále zvýší, atomy se od sebe odtrhnou, čímž se přeruší všechny vazby, a kapalina se stane se plynem. Další zahřívání opět zvýší teplotu, což způsobí, že molekuly zvýší svou rychlost až do bodu, kdy dojde k prudkým srážkám mezi molekulami, které je ionizují a plyn se změní v plazmu obsahující ionty a elektrony. Kromě neuspořádaného tepelného pohybu molekul excitují zvýšení teploty také vyšší energetické stavy uvnitř složek systému [1].

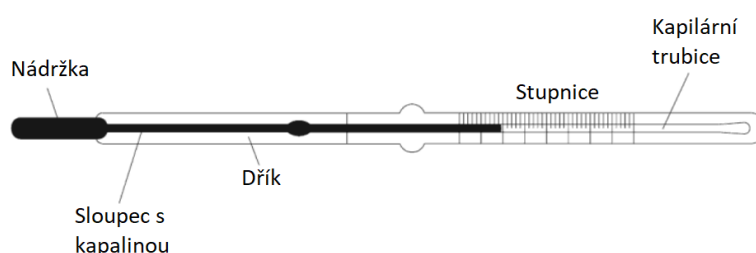
Teplotu nelze měřit přímo. Místo toho je třeba pozorovat účinky na některé další fyzikální jevy a vztahovat je k teplotě. Existuje mnoho fyzikálních jevů, které jsou závislé na teplotě, například odpor, objemová roztažnost, tlak par a spektrální charakteristiky. Tohoto principu je využíváno k výrobě zařízení pro měření teploty. Různé metody měření teploty lze pro usnadnění rozdělit podle povahy kontaktu mezi měřeným médiem a zařízením na kontaktní a bezkontaktní. Výběr konkrétního typu techniky měření teploty vyžaduje pečlivé zvážení, aby bylo zajištěno, že měření bude funkční a bude poskytovat hodnotné informace.

2.1.2. Kontaktní měření teploty

Kontaktní měřicí metody jsou takové, při nichž je snímač v přímém kontaktu s měřeným médiem. Umístění měřidla musí být zvoleno tak, aby došlo k co nejmenšímu ovlivnění teploty měřeného objektu a zároveň aby mezi objektem a čidlem byl zajištěn dobrý kontakt. Příkladem této metody je kapalinový teploměr ponořený do vody, termočlánek na povrchu tělesa nebo termočláneková sonda uvnitř tělesa.

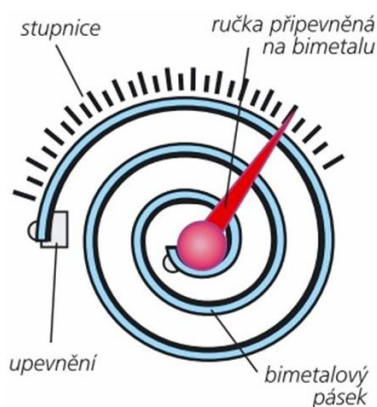
Mezi snímače teploty kontaktních přístrojů patří zejména kapalinové teploměry, bimetalové pásky, termočláanky, odporové detektory teploty a plynové teploměry.

Tradiční kapalinový teploměr ve skle se skládá z nádržky a kapilární trubice uložené v dřívku (obr. 1). Nádržka obsahuje kapalinu, která se s teplotou rozpíná a nutí tekutinu stoupat kapilární trubicí do sloupce. Skleněné teploměry umožňují rychlou vizuální indikaci teploty a mohou poskytovat výsledky s velmi nízkou nejistotou.



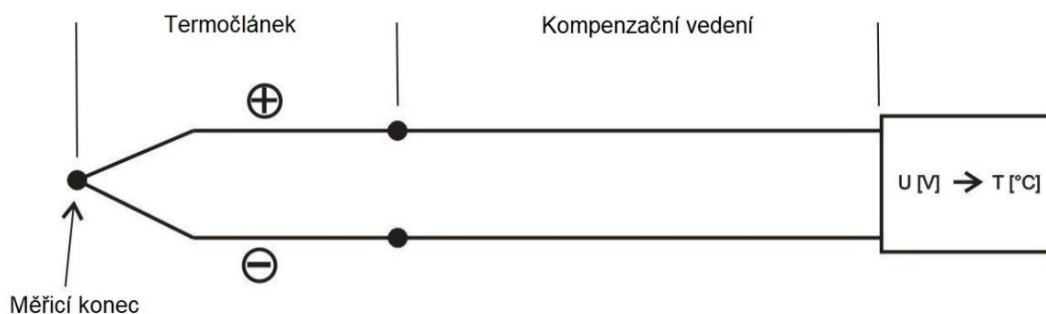
Obr. 1 Kapalinový teploměr [1]

Bimetalové teploměry používají dva proužky materiálu s různými koeficienty tepelné roztažnosti, které jsou spojeny dohromady. Při změně teploty sestavy a absenci vnějších sil se pásek ohne v důsledku rozdílu roztažnosti obou materiálů. Rozsah ohybu lze využít jako měřítko teploty. Bimetalické pásky jsou robustní a relativně levné. Jsou široce používány jako zařízení pro regulaci teploty.



Obr. 2 Schéma bimetalového teploměru [3]

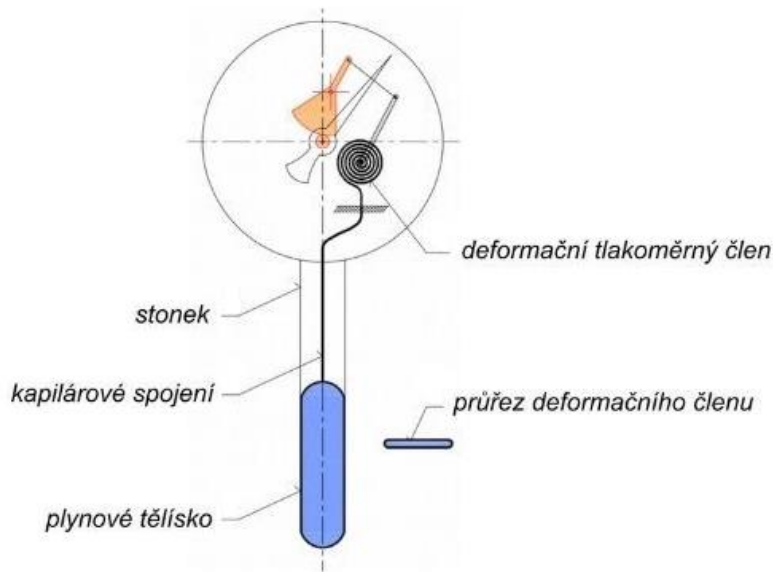
Termočláanky využívají principu termoelektrického jevu. Ve své nejjednodušší podobě se termočlánek skládá ze dvou různorodých vodičů spojených na jednom konci a zařízení pro měření napětí připojeného přes volné konce (schéma znázorněno na obr. 3). Termočláanky jsou běžnou volbou v průmyslu a výzkumu díky svému širokému teplotnímu rozsahu a odolnosti.



Obr. 3 Schéma termočlánu [4]

Řada měřicích zařízení také využívá změnu odporu v závislosti na teplotě, jako jsou například platinové odporové teploměry nebo termistory. Typický odporový detektor teploty je částečně tvořen z materiálu, jehož odpor je citlivý na teplotu a převodníku umístěného v pouzdře a připojeného k elektronickému obvodu. Převodník měří odpor a převádí jej na odpovídající hodnotu teploty.

Chování mnoha plynů je popsáno zákonem ideálního plynu, který říká, že plyn má při stálém objemu přímo úměrnou teplotní závislost svého tlaku. Tohoto vztahu se využívá k určení neznámé teploty měřením tlaku a objemu pomocí plynových teploměrů. Konstrukčně jsou řešeny tak, že na jedné straně je vlastní baňka s plynem spojená kapilárou s měřicím ústrojím na druhé straně. Měřicím ústrojím bývá většinou deformační tlakoměr.



Obr. 4 Schéma uspořádání plynového teploměru [5]

Jednou z hlavních nevýhod spojených s kontaktními způsoby měření je ovlivnění rozložení teploty v systému. Vložení teplotního snímače dojde ke změně teploty v soustavě. Příkladem je použití termočlánu vloženého na povrch tělesa. Samotný termočlánek a případný materiál použitý k jeho upevnění mají za důsledek změnu rozložení teploty. Je třeba posoudit míru ovlivnění způsobeného danou aplikací a v případě, že je významná, ji zohlednit nebo zvážit alternativní metodu měření, například bezkontaktní měření teploty [1].

2.1.3. Bezkontaktní měření teploty

Bezkontaktní metody jsou takové, při nichž se teplota měří bez kontaktu mezi snímačem a měřeným objektem. Příkladem je použití infračervené termografie, kdy je senzor umístěn v určité vzdálenosti od cílového materiálu.

Bezkontaktní metody měření teploty mají oproti kontaktním přístrojům řadu významných výhod. Kontaktní měřidla musí být schopny provozu při daných teplotách. Ve vysokoteplotních nebo chemicky reaktivních aplikacích, jako jsou plameny či plazma, se mohou kontaktní teploměry časem opotřebovávat a může se výrazně zvýšit jejich chybovost. Bezkontaktně se měří i procesy, do kterých nelze fyzicky zasahovat z důvodu pohybu měřeného dílu nebo v případech, kdy je to technologicky velmi obtížné nebo nemožné, například u aditivní technologie. Kromě toho bezkontaktní měření obvykle nenarušuje rozložení teplot v systému jako kontaktní měřidla. Každá metoda měření teploty má jiné přednosti a vyžaduje zvláštní ohledy na aplikaci.

Bezkontaktní měření teploty snímá teplotu na povrchu tělesa a zahrnuje řadu infračervené měřicí metody, které jsou založeny na analýze elektromagnetického záření emitovaného od měřeného objektu [1]. V závislosti na typu kamery je zorné pole postupně skenováno nebo je celá snímaná oblast zaostřena na detektorovou část najednou. Detektor převádí záření na analogový elektrický signál. Ten je v mikroprocesorové části dále zpracován na digitální signál a následně převeden na teplotu, ze které vytvoří obraz umožňující následné zpracování [6].

Infračervené snímače

Bezkontaktní měření se může provádět pomocí pyrometru nebo infračervené kamery. Pyrometr je základním infračerveným zařízením obsahující pouze jeden senzor a tím umožňuje pouze bodové měření. Oproti tomu termovizní kamery pak obsahují senzorů více pro vytvoření podrobného infračerveného snímku scény.

Termovizní kamery, též se lze setkat s označením infračervené kamery nebo také termokamery, jsou založeny na stejném principu měření jako pyrometry, ale skládají se z matice snímačů, optiky podobné optice videokamery a softwaru pro následné zpracování, který je schopen vrátit obraz termálního pole, označovaný jako termogram. V těchto přístrojích se infračervené záření promítá na matici snímačů a každý jednotlivý pixel vráceného obrazu odpovídá jednomu detektoru v matici. Z naměřeného záření se získají mapy teploty povrchu, často reprezentovány pomocí barev, při čemž každá barva odpovídá příslušné teplotě. Pomocí softwaru pro následné zpracování je možné kvantitativně vyhodnotit teplotu v každém jednotlivém pixelu snímku, při čemž je třeba také korigovat parametry ovlivňující měření, jako je například emisivita, vlhkost a okolní nebo odražená teplota [7]. Tyto parametry jsou podrobněji rozebrány v kapitole 2.2.2.

V infračervených kamerách se využívají dva základní druhy infračervených detektorů - kvantové a tepelné.

Kvantové (fotonové) detektory

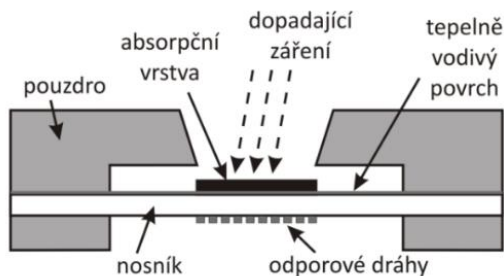
U kvantových detektorů se záření absorbuje v interakci s elektrony vázanými v atomech mřížky, příměsí či s volnými elektrony. Absorpce fotonu může proběhnout například fotoelektrickou emisí elektronu z povrchu nebo přechodem elektronu mezi kvantovými stavy v polovodičích. Výstupní signál detektoru tedy závisí na počtu absorbovaných fotonů a nezávisí přímo na jejich energii [8]. Tento typ detektorů pracuje při kryogeních teplotách (do 4 K v kapalném heliu nebo až do 77 K v tekutém dusíku), protože signální výstup by byl za pokojové teploty velmi malý a byl by zastíněn vlastním šumem detektoru. Požadavek na chlazení je jednou z hlavních nevýhod jejich použití, na druhou stranu však nabízí vyšší citlivost, přesnost a kratší dobu odezvy než tepelné detektory [9]. V termovizních systémech lze nalézt kvantové detektory vyrobeny z

materiálů jako jsou třeba InSb, HgCdTe a InGaAs, jejichž citlivost závisí právě na absorpci fotonů [10].

Tepelné detektory

Absorpci infračerveného záření dochází k zahřívání detekčního prvku tepelných detektorů, což vede ke změnám fyzikálních vlastností, které lze detekovat pomocí externích přístrojů. Tepelné detektory pracují při pokojové teplotě a mají širokou spektrální odezvu. Protože činnost tepelných detektorů zahrnuje změnu teploty, mají ze své podstaty pomalou odezvu a relativně nízkou citlivost ve srovnání s fotonovými detektory. Doba odezvy a citlivost tepelných detektorů jsou ovlivněny zejména tepelnou kapacitou struktury detektoru [11]. Tepelné detektory lze rozdělit na pyroelektrické, termoelektrické a bolometrické.

Bolometr funguje prostřednictvím pohlcování infračerveného záření na absorpční vrstvě, která zahřívá tělo bolometru a zvyšuje jeho teplotu. Tato změna teploty se snímá materiálem termistoru integrovaným v bolometru, tj. materiálem, jehož měrný odpor se mění se změnou teploty. Celé tělo detektoru se skládá z tenké membrány, která je tepelně odizolovaná, aby nedocházelo k ovlivnění okolí [12]. Spektrální citlivost bolometru je určena spektrální pohltivostí absorpční vrstvy jeho detektoru. Doba potřebná k dosažení termodynamické rovnováhy detektoru určuje velikost jeho časové konstanty a tím i maximální frekvenci vzorkování pro snímání teploty [6]. Schéma bolometru se nachází na obr. 5.

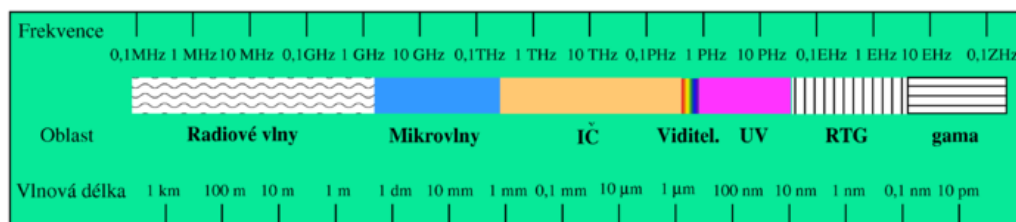


Obr. 5 Schéma bolometru [6]

2.2. Infračervené záření a optické vlastnosti materiálů

2.2.1. Infračervené záření

Infračervené záření (IR), neboli infračervené světlo, je druh zářivé energie, kterou do určité úrovně vyzařují všechny objekty ve vesmíru. Je pro lidské oči neviditelná, ale lze ji cítit jako teplo. IR je druh elektromagnetického záření o vlnové délce přibližně 760 nm až 1 mm. Od nejvyšší po nejnižší frekvenci zahrnuje elektromagnetické záření gama záření, rentgenové záření, ultrafialové záření, viditelné světlo, infračervené záření, mikrovlny a rádiové vlny. Společně tyto typy záření tvoří elektromagnetické spektrum [13] viz obr. 6.



Obr. 6 Elektromagnetické spektrum [14]

Podle NASA objevil infračervené světlo britský astronom William Herschel v roce 1800. V experimentu na měření rozdílu teplot mezi barvami ve viditelném spektru umístil teploměry do dráhy světla v každé barvě viditelného spektra. Pozoroval zvýšení teploty z modré na červenou a našel ještě vyšší teploty těsně za červeným koncem viditelného spektra. V rámci elektromagnetického spektra se infračervené vlny vyskytují na frekvencích vyšších než mikrovlny a těsně pod těmi, které má červené viditelné světlo, odtud název „infračervené“. Všechny objekty s teplotou nad 0 stupňů Kelvina (minus 273,15 stupňů Celsia) vyzařuje IR záření a je jedním ze způsobů přenosu tepla z jedné oblasti do druhé [13].

Planckův vyzařovací zákon

Planckův vyzařovací zákon je jeden z nejdůležitějších zákonů popisujících tepelné záření. Vyjadřuje rozdělení emitované energie v závislosti na vlnové délce pro danou termodynamickou teplotu. Výkon, který vyžáří černé těleso z jednotky plochy do jednotky prostorového úhlu, se označuje spektrální zář L a je vyjádřen pomocí vztahu (1) [6]:

$$L = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc_0}{\lambda kT}} - 1 \right)}, \quad (1)$$

kde je c_0 rychlost světla ve vakuu, h Planckova konstanta a k Boltzmannova konstanta.

Wienův posunovací zákon

V závislosti na teplotě absolutně černého tělesa se mění maximum spektrální intenzity vyzařování. Vlnovou délku maxima spektrální intenzity vyzařování λ_{\max} (μm) při dané teplotě lze stanovit z Planckova zákona vyhledáním lokálního extrému. Tuto skutečnost vyjadřuje Wienův posunovací zákon [6]:

$$\frac{\partial M_{\lambda}^{BB}(\lambda, T)}{\partial \lambda} = 0 \Rightarrow \lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (2)$$

kde b je Wienova konstanta a T je teplota tělesa.

Rozdělení IR podle vlnových délek

Vlnové délky infračerveného záření jsou delší než 700–800 nm, což je horní hranice rozsahu vlnových délek viditelného záření. Za horní hranici infračervené spektrální oblasti z hlediska vlnové délky se obvykle rozumí hodnota zhruba 1 mm. Pro termografii se využívá pásmo v rozsahu vlnových délek 0,7 až 1000 μm [6].

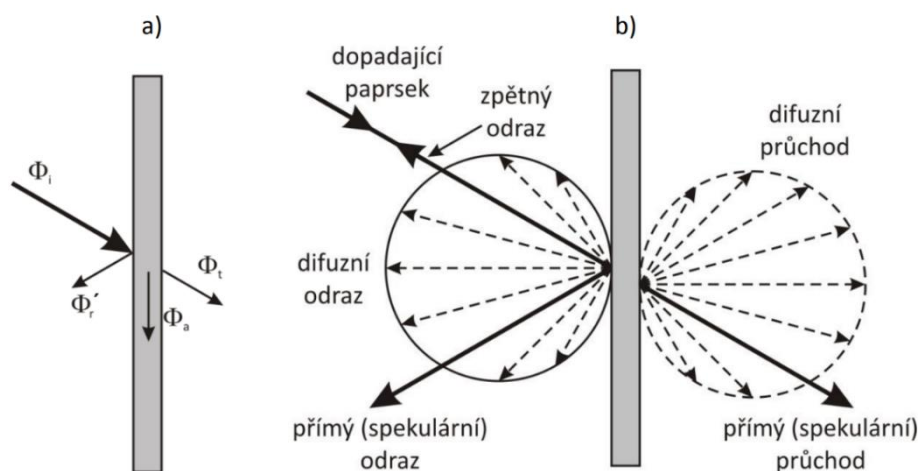
Infračervené záření lze dále rozdělit do oblastí podle vlnových délek. Rozsahy těchto oblastí mohou být definovány následovně [15]:

- Blízká infračervená spektrální oblast (NIR) je brána v rozsahu od 0,76 do 1,4 μm .
- Krátkovlnné infračervené záření (SWIR) sahá od 1,4 do 3 μm . V této oblasti se využívají kvantové detektory. Na rozdíl od jiných vlnových délek se zde pro zobrazování používá nejčastěji odražené záření. Obrazy získané pomocí SWIR senzoru mají malé rozlišení, neboť k výrobě těchto senzorů nelze použít běžné křemíkové technologie. V závislosti na složení materiálu jsou tyto senzory citlivé v různých vlnových délkách a mohou vyžadovat silné chlazení k dosažení správného poměru signál-šum [9].
- Středněvlnné infračervené záření (MWIR) se pohybuje od 3 do 8 μm . U rozsahu MWIR probíhá detekce přes chlazený fotodetektor, podobně jako u pásma SWIR. Pro detekci ve vlnových délkách 3 až 6 μm se používá HgCdTe polovodičový materiál, T2SL (typ 2 SuperLattice) nebo také InSb (antimonid india). Typicky musí být MWIR detektor chlazen na 77 K [9].

- Dlouhovlnné infračervené záření (LWIR) se pohybuje od 8 do 15 μm . Mezi detektory pro tuto oblast patří jak nechlazené mikrobolometry (přesněji mikrobolometrická pole) tak chlazené kvantové detektory. Pro většinu aplikací se v současné době využívají termokamery s mikrobolometrickými detektory [9].
- Následuje daleká oblast infračerveného záření (FIR), sahá od 15 až do 1000 μm .

2.2.2. Optické vlastnosti materiálů

Chování reálných povrchů je odlišné od černých těles. Ta totiž celý dopadající tok pohlcují a vyzařují maximální možnou energii, jejíž množství je závislé pouze na teplotě. U reálných těles se absorbuje jen část dopadajícího toku Φ_i , část se odrazí a další část se propustí, viz obr. 7 a). Dopadající paprsek a jeho možné způsoby odrazu (přímý, difuzní) a průchodu (přímý, difuzní) materiálem jsou znázorněny na obr. 7 b) [6].



Obr. 7 a) Schéma radiačních toků, b) Schéma odrazu paprsku a průchodu paprsku materiálem [6]

Odražené, propuštěné a absorbované části dopadajícího toku nezávisí jen na vlnové délce (λ), směru (azimutální úhel ϕ' , polární úhel θ') a teplotě, ale i na dalších povrchových vlastnostech. Absorbovaný tok zvyšuje vnitřní tepelnou energii a tím také teplotu materiálu, ale odražený tok předmět neovlivňuje. Součet všech energií je při dodržení znaménkové konvence podle zákona zachování energie roven nule. Dopadající tok Φ_i je tedy roven součtu toku odraženého Φ_r' , absorbovaného Φ_a a prošlého Φ_t [6]

$$\Phi_i = \Phi_r' + \Phi_a + \Phi_t. \quad (3)$$

Určité látky mohou mít některé hodnoty nulové. Například pro látky nepropustné je $\Phi_t = 0$, odraz a absorpce se odehrávají pouze v omezené hloubce pod povrchem – do 1 μm . Pro dokonalá zrcadla se prošlý tok Φ_t a absorbovaný tok Φ_a rovnají nule a dochází k odražení veškerého dopadajícího toku. U černého tělesa je naopak veškerý dopadající tok absorbován ($\Phi_i = \Phi_a$). Obecně se dá říct, že členy na pravé straně rovnice (3) jsou mírou těchto třech vlastností – odrazivosti, pohltivosti a propustnosti [6].

Při úpravě rovnice (3) lze dojít ke vztahu (4), který vzájemně propojuje výše uvedené vlastnosti, ve tvaru (4)

$$\rho + \alpha + \tau = 1, \quad (4)$$

kde koeficienty ρ , α , τ popisují poměrnou část energie předmětem odražené ρ , absorbované α a propuštěné τ . Tato rovnice platí pro stejné nebo celkové spektrální, tj. $\lambda(0 \rightarrow \infty)$, a směrové podmínky. Pro nepropustný materiál, kdy $\tau = 0$, se tvar (4) zjednoduší na vztah (5) [6]:

$$\rho + \alpha = 1 \quad (5)$$

Emisivita

Reálné povrchy emitují jen část záření absolutně černého tělesa, a proto musí být při popisu záření reálného povrchu vztah korigován. Zavádí se proto veličina emisivita, která slouží jako korekční faktor. Emisivita je vlastnost povrchu tělesa, která udává, jak je objekt schopný vyzařovat energii. Je definována jako poměr záření emitovaného povrchem tělesa a záření emitovaného povrchem absolutně černého tělesa za stejných podmínek – vlnová délka, směr, teplota nebo spektrální pásmo. Emisivita je bezrozměrná veličina a nabývá hodnot mezi 0 a 1 [6].

Emisivita není konstanta, ale obecně závisí na zmíněných parametrech. V důsledku těchto závislostí je používán koncept spektrálně-směrové emivity $\varepsilon(\lambda, T, \theta', \phi')$. Spektrálně směrová emivita povrchu při teplotě T emitujícího záření o vlnové délce λ ve směru (θ', ϕ') je definována [6]

$$\varepsilon(\lambda, T, \theta', \phi') = \frac{L_{\lambda}(\lambda, T, \theta', \phi')}{L_{\lambda}^{BB}(\lambda, T)}. \quad (6)$$

U kovových materiálů vzrůstá emisivita s teplotou. Závislost na úhlu se u kovů projeví až od určité hodnoty polárního úhlu tj. úhlu od normály, pro menší úhly je spíše konstantou. U nekovových materiálů s rostoucím úhlem emisivita klesá.

Pohltivost

Při pohlcování zářivého toku se záření přeměňuje na jinou formu energie, nejčastěji teplo [16]. Pohltivost nebo také absorptivita vyjadřuje poměr absorbovaného toku a dopadajícího toku.

$$\alpha(\lambda, T, \theta, \phi) = \frac{d\Phi_a}{d\Phi_i} \quad (7)$$

Pohltivost závisí stejně jako u emivity na teplotě, směru a vlnové délce [6].

Odrazivost

Při odrazu se část zářivého toku dopadajícího na povrch vrací do stejné polokoule. Odraz může být přímý (ve směru zrcadla), difuzní (rozptýlený do celé polokoule) nebo kombinace obou způsobů [16]. Odrazivost se charakterizuje pomocí směrových podmínek odraženého i dopadajícího toku. Spektrální odrazivost se pak vyjadřuje jako poměr diferenciálního odraženého toku k diferenciálnímu dopadajícímu toku.

$$\rho(\lambda, \theta, \phi, 2\pi) = \frac{d\Phi_r'}{d\Phi_i}. \quad (8)$$

Pro daný dopadající tok jsou uvažovány všechny možné směry odrazu proto lze vztah (8) použít ve většině běžných případů. V některých případech, jako jsou například izotropicky difuzní povrchy (Lambertovské reflektory), je odražené záření rovnoměrné v prostoru polokoule nad povrchem a nezávislé na směru odrazu. Ideální bezetrátový difuzní reflektor má odrazivost $\rho = 1$, tudíž je dopadající tok celý odražen [6].

Druhy povrchů lze na základě praktických případů rozdělit do dvou oblastí: dokonale spekulární povrch (leštěný kovový povrch nebo zrcadlo) nebo izotropicky difuzní povrch (drsné nebo rozptylující povrchy), viz obr. 7 b). Při předpokladu izotropicky difuzního odrazu se řešení daných problémů zjednodušuje a je v mnoha případech dostačující [6].

Propustnost

Propustnost skrz polopropustné médium je komplikovaná kvůli své obousměrné podstatě a možným vnitřním odrazům, které způsobí nutnost uvažovat tloušťku materiálu a jeho vlastnosti. Z makroskopického hlediska je možné definovat spektrálně-směrově-poloprostorovou propustnost jako poměr dopadajícího toku k prošlému toku v poloprostoru výstupního povrchu (obr. 7 b)) [6].

$$\tau(\lambda, \theta, \phi, 2\pi) = \frac{d\Phi'_{\lambda,t}}{d\Phi_{\lambda,i}}. \quad (9)$$

2.2.3. Měření optických vlastností

Měření optických vlastností materiálů úzce souvisí se spektroskopií, která studuje interakci světla s látkou. Zahrnuje rozdělení elektromagnetického záření na jednotlivé vlnové délky, což se provádí podobným způsobem, jako když hranol rozděluje světlo na duhové barvy. V minulosti se spektroskopie prováděla právě pomocí hranolu a fotografických desek. Moderní spektroskopie používá k rozptýlení světla difrakční mřížku, která se pak promítá na CCD senzor, podobně jako je tomu u digitálních fotoaparátů.

Infračervená spektroskopie

Infračervená spektroskopie je jednou z nejpoužívanějších spektroskopických technik. Poskytuje totiž celou řadu výhod. Tato metoda je rychlá, citlivá, snadno se s ní manipuluje a umožňuje mnoho různých způsobů vzorkování plynů, kapalin a pevných látek. Důležitým aspektem je jednoduché kvalitativní a kvantitativní vyhodnocení spektra. Vlastnosti infračerveného spektra, jako je počet infračervených absorpčních pásů, jejich intenzita a tvar, přímo souvisí s molekulární strukturou sloučeniny.

Při infračervené spektroskopii se měří záření prošlé nebo odražené od vzorku. Absorpce IR záření souvisí se změnou vibračního nebo rotačního stavu molekul. Kdykoli vázané atomy vibrují, absorbují infračervenou energii, tj. vykazují IR absorpční pásy. S ohledem na směr vibračního pohybu můžeme rozlišovat vibrace protahovací (změny vazebných délek) a vibrace deformační (změny vazebných úhlů). Deformační vibrace lze rozdělit na ohybové módy, torzní módy, vahadlové módy a kývavé módy. Další dělení se týká symetrie vibrací, např. symetrické nebo antisymetrické, v rovině nebo mimo rovinu. Komplikací při vyhodnocování IR spekter je výskyt vyšších harmonických přechodů a kombinovaných přechodů, které mohou být způsobeny neharmoničností některých vibrací.

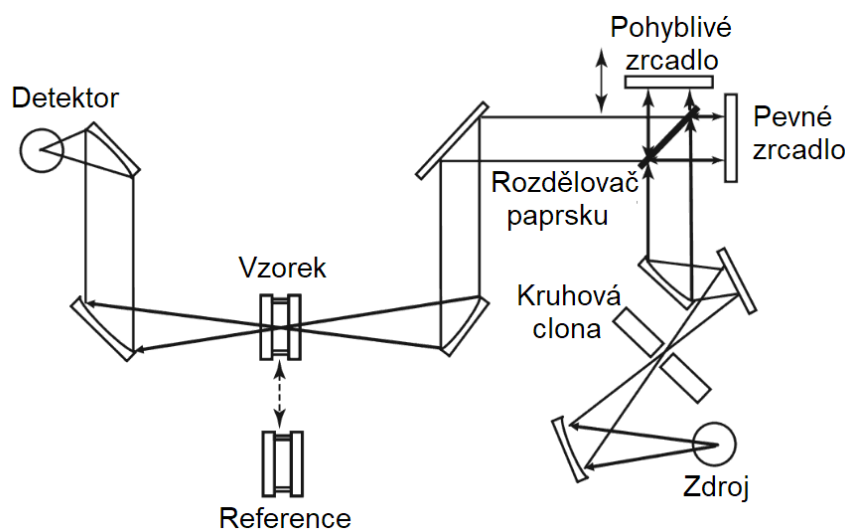
V NIR oblasti jsou všechny přechody vyšší harmonické nebo kombinované. Jejich intenzita je vždy slabší než intenzita příslušných normálních vibračních přechodů. NIR spektroskopie využívá k analýze procesů koncept charakteristických vibrací, který umožňuje kvalitativní analýzu víceatomových molekul. V organických sloučeninách se charakteristické vibrace vyskytují obvykle mezi 4000 a 1500 cm^{-1} . Anorganické sloučeniny obsahující těžké atomy mohou vykazovat charakteristické vibrace na mnohem nižších frekvencích.

Charakteristické vibrace jsou založeny na pohybech, většinou protahovacích vibracích, které jsou umístěny v typických funkčních skupinách a jsou pro ně charakteristické. I když jednotlivé pásy nejsou dostačující pro potvrzení identity molekuly, poskytují užitečné informace o typu a množství substruktur, které molekulu tvoří. Všechny frekvence organických sloučenin pod 1500 cm^{-1} zahrnují molekulové vibrace, obvykle ohybové pohyby, které představují charakteristický otisk celé molekuly nebo alespoň jejích velkých fragmentů. Kvalitativní analýzu lze provést porovnáním spektra neznámé sloučeniny se spektry uloženými v knihovnách spekter. Vyhledávací rutiny bývají založené na kompletních spektrech, informacích o sloučenině, molekulových strukturách a substrukturách. Intenzity pásů v čistých složkách a směsích jsou

úměrné koncentraci složek. Vztah mezi naměřenými intenzitami a koncentrací je vyjádřen Lambert-Beerovým zákonem, který říká, že absorpce je přímo úměrná koncentraci aktivní látky ve vzorku a tloušťce měřené vrstvy vzorku. Je tedy možné provádět kvantitativní vyšetřování metodami založenými na výškách pásů nebo přednostně metodami založenými na integrovaných intenzitách. Lze provádět jak jednosložkovou analýzu, tak vícesložkovou analýzu pomocí vícerozměrných metod [17].

Spektrometry

Rozsah vlnových délek v konvenční optické spektroskopii sahá od 200 nm (UV) do 500 μm vzdálené infračervené oblasti (FIR). Ve velmi moderních aplikacích dosahuje oblast dlouhých vlnových délek dokonce 1 cm. Není však možné sestavit jediný spektrální přístroj, který by byl schopen celou tuto oblast kompletně pokrýt a poskytnout informace o různých procesech absorpce, emise a rozptylu světla. Zdroje světla, detektory a další optické komponenty mají omezený operační rozsah, což je způsobeno základními fyzikálními principy jejich chodu. Volba vhodného typu přístroje závisí na aplikaci. Je třeba vzít v úvahu proces interakce světla s materiálem a spektrální interval zájmu. Jedno z možných rozdělení spektrometrů optimalizovaných pro měření v různých pásmech vlnové délky je na UV/VIS (175-750 nm), blízkou infračervenou oblast (NIR) (750 nm-2,5 μm), střední infračervenou oblast (MIR) (2,5-50 μm), FIR (50-1000 μm) a oblast mikrovln (1-10 mm) [17]. Některé komerční spektrometry jsou schopny pokrýt i sousední spektrální oblasti, například UV/VIS/NIR nebo MIR/FIR. Spektrometry lze kombinovat s vhodnými mikroskopy a shromažďovat spektrální informace z vybraných malých oblastí vzorku. Tato kombinace se někdy nazývá mikrospektrometr. K mikroskopu lze přidat motorizovaný stolek x,y nebo maticový detektor, aby bylo možné vytvořit podrobné mapy vzorku. Takové spektrometry se často označují jako spektrální zobrazovací zařízení [17].



Obr. 8 Schéma FT spektrometru [16]

MIR spektrometry

Existují dva typy MIR spektrometrů, disperzní a spektrometry s Fourierovou transformací (FT). V současné době se převážně používají FT spektrometry (obr. 8). Významnou výhodou FT spektrometrů je, že záření všech vlnových délek lze měřit současně, zatímco u disperzních spektrometrů se všechny vlnové délky měří postupně. Díky tomu je FT spektrometr mnohem rychlejší a citlivější. Informace o absorpci infračerveného záření ve vzorku získávají měřením

poměru intenzity záření před a po vzorku. Aby bylo možné tento poměr získat s dostatečnou přesností, měly by být IR absorpční spektrometry dvoukanálové.

FT spektrometry získávají jedнокanálová spektra vzorku a reference a jejich poměr se následně vypočítá. Vzorek a reference mohou být automaticky nahrazeny posuvníkem vzorku nebo lze IR paprsek přepínat mezi vzorkem a referencí pomocí naklápěcích zrcadel. V případě vyšších akumulacních čísel přístroj opakovaně přepíná mezi skenováním vzorku a reference. Jádrem každého FT spektrometru je interferometr. Jedním z typů je Michelsonův interferometr, jež se v principu skládá z rozdělovače paprsků a dvou plochých zrcadel. Jedno ze zrcadel je pevně umístěno na jednom rameni interferometru a druhé zrcadlo je pohyblivé na druhém rameni interferometru. Běžné MIR paprskové rozdělovače jsou vyrobeny z KBr s vícevrstevným povlakem. Rozdělovač paprsků by měl mít odrazivost 50 % a nulovou absorpci v celém rozsahu použití [17].

NIR spektrometry

Absorpce elektromagnetického záření v NIR oblasti je způsobena vyššími harmonickými a kombinovanými vibracemi. NIR spektra obsahují molekulární informace o vzorku a tyto informace lze získat vyhodnocením pomocí metod, které vyžadují vysokou kvalitu shromážděných spektrálních dat. Důležitými kritérii pro výběr NIR spektrometru jsou rozlišení vlnové délky, fotometrická validita a poměr signálu k šumu. Dále se mohou lišit velikostí, přenosností, dobou měření a podmínkami prostředí pro in-line aplikace v průmyslu. NIR spektrometry mají také rozsáhlé množství aplikací, například analýza optických vlastností materiálu, dále pak v zemědělství, při zpracování potravin, ve zdravotnictví a ve farmacii, při zpracování polymerů a plastů, při analýze životního prostředí, při recyklaci materiálů a v družicích nebo letadlech pro dálkový průzkum. V porovnání s ostatními optickými spektroskopickými metodami nabízí NIR spektroskopie vysokou rozmanitost principů přístrojů. Podle principu měření se NIR spektrometry mohou rozdělit do šesti kategorií:

- 1) spektrometry s Fourierovou transformací
- 2) spektrometry se skenovací mřížkou
- 3) spektrometry s diodovým polem (spektrometry s pevnou mřížkou)
- 4) spektrometry s filtrem
- 5) spektrometry s LED (světelnou diodou)
- 6) spektrometry s akusticko-optickým laditelným filtrem

NIR spektrometry s Fourierovou transformací jsou totožné se spektrometry FT, které již byly popsány v podkapitole MIR. Nejpoužívanějším zdrojem světla pro FT-NIR spektrometr je wolfram-halogenová lampa. Tento druh lampy dodává vysokou a konstantní energii v celém rozsahu NIR, je velmi stabilní a má dlouhou životnost. Rozptylovače paprsků pro FT-NIR spektrometry jsou obvykle vyrobeny z CaF₂ s pracovním rozsahem 1000-6000 nm. Není k dispozici žádný detektor, který by pokrýval celý rozsah NIR nebo vyhovoval všem typům NIR spektrometrů. Nejpoužívanějšími detektory v rozsahu 1100-2500 nm jsou detektory PbS a PbSe, zatímco v rozsahu 400-1100 nm se dává přednost Si diodám [17].

2.3. Aditivní technologie

Aditivní technologie (AT), známá také jako 3D tisk nebo Rapid Prototyping je technika výroby trojrozměrných objektů po vrstvách přímo z digitálního modelu. V současnosti je jedním z nejrychleji vyvíjejících se výrobních procesů [18]. Získává zvýšenou pozornost a zájem kvůli podstatnému nárůstu poptávky po vysoce výkonných materiálech s vyšší složitostí geometrického návrhu a s přidavnými funkcemi jako jsou vnitřní chladicí kanály nebo vnitřní mřížkové struktury, které je obtížné vyrobit konvenčními výrobními procesy [19].

První formou vytváření trojrozměrného objektu vrstvu po vrstvě pomocí počítačem podporovaného navrhování byl Rapid Prototyping, vyvinutý v 80. letech 20. století pro vytváření modelů a prototypových dílů. Tato technologie byla vyvinuta, aby pomohla realizovat přesně to, co měli návrháři na mysli. Rychlé prototypování je jedním z dřívějších procesů aditivní výroby, které umožňuje tvorbu nejen modelů, ale i výsledných produktů. Tisk trojrozměrných předmětů byl umožněn až rozvojem počítačů a spojením tří technologií, jimiž jsou počítačově podporovaný návrh (CAD), počítačově podporovaná výroba (CAM) a počítačové numerické řízení (CNC). Mezi hlavní pokroky, které tento proces přinesl pro vývoj produktu, patří snížení času a nákladů, omezení lidské interakce a také možnost vytvořit téměř jakýkoli tvar, který by mohl být normálně velmi obtížně obrobitelný [20].

Dříve Rapid Prototyping hojně využívali zejména vědci, lékaři, studenti, profesori, výzkumníci trhu či umělci. Díky této metodě mohli vědci a studenti rychle vytvářet a analyzovat modely pro teoretické porozumění a studium. Lékaři mohli sestavit model poškozeného těla, aby jej analyzovali a lépe naplánovali potřebné procedury, průzkumníci trhu mohli vidět, co si lidé myslí o konkrétním novém produktu a Rapid Prototyping usnadňoval umělcům rozvinout jejich kreativitu [20]. Díky svým výhodám nachází nyní uplatnění téměř ve všech oblastech od leteckého, automobilového, lékařského, strojního, potravinářského, elektronického průmyslu až po spotřebitelské aplikace [19].

AT poskytuje inženýrům inovativní přístup k navrhování a výrobě dílů, jelikož na rozdíl od konvenčních subtraktivních procesů, které odřezávají materiál z většího obrobku, aditivní technologie vytváří hotový kus v po sobě jdoucích vrstvách, z nichž každá přilne k předchozí. Podstatně snižuje množství následného zpracování a umožňuje zlepšit kvalitu produktu. Tím, že některé z procesů AT nevyžadují žádné nebo pouze minimální následné zpracování lze vyrobené díly často přímo použít v reálných aplikacích [19].

Pomocí aditivní technologie lze vyrobit i tvarově složitý výrobek jako jeden předmět, což bylo v minulosti komplikované nebo úplně nemožné. U tradičních výrobních procesů se složité díly obvykle rozdělují na menší části kvůli snadnosti výroby těchto dílů a součásti se skládají v pozdější fázi různými spojovacími postupy. Nejenže tato praxe zahrnuje pracné procesy, ale vede také k plýtvání materiálem během tvarovacích a řezacích operací a materiálem přidaným pro spojování prvků. Přebytný materiál zvyšuje hmotnost produktu a komplikuje manipulaci při montáži. Aditivní technologie dokáže vyrobit produkt pouhým přidáváním materiálu vrstvu po vrstvě na základě 3D modelu, čímž se limituje nadměrné množství materiálu. Také díky tomu lze vyrobit téměř jakoukoliv součást, bez ohledu na její složitost, kterou lze pomocí CAD softwaru vytvořit jako samostatný objekt [21].

Konstruktor se při návrhu nemusí starat o vyrobitelnost produktu, zabývá se zejména funkčností navrhovaného dílu. Další velkou výhodou je velmi rychlý vývoj a testování prototypů a produkce výrobků s nízkým objemem výroby [21]. Aditivní technologie stále není nejlepším řešením pro všechny případy, v některých případech je stále potřeba používat CNC obráběcí procesy. Jedním z nich je například, když by rozměry dílu byly větší, než je velikost dostupných 3D tiskáren. Také využitelné materiály jsou stále omezené. Je zřejmé, že je možné tisknout minimálně kovy a keramiku, ale ne všechny běžně používané výrobní materiály [20]. Mezi největší omezení 3D tisku se řadí to, že je obtížné vyrobit součásti s materiálovými vlastnostmi odpovídajícími dílům vytvořených jinými metodami. Většina technologií 3D tisku vytváří díly, jehož stavební prvky jsou orientovány určitým směrem a jeho vlastnosti závisí na směru měření či zatěžování. Aditivní technologie má také omezení na opakovatelnost, stejné součásti vyrobené touto technologií se budou od sebe mírně lišit z důvodu rozdílného chlazení a deformace při vytvrzování [22].

Aditivní technologie je v následujícím textu rozdělena do oddílů podle využívaného druhu materiálu, u něhož dojde ke spojování. V každém oddílu jsou popsány vybrané aditivní technologie, přiblíženy principy jejich fungování a jsou zmíněny i některé jejich výhody, omezení či oblasti využití.

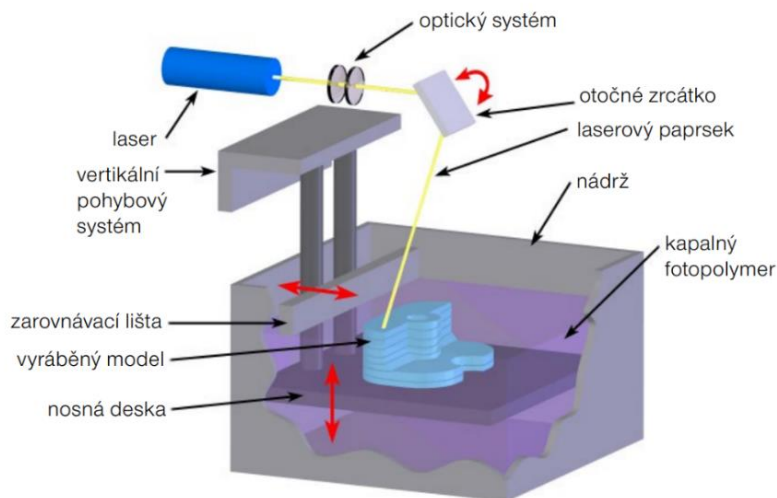
2.3.1. Technologie vytvrzování tekutého materiálu

Foto polymerace kádě

Stereolitografie

Stereolitografie (SLA) je jedna z prvních a zároveň nejvíce používaných technologií 3D tisku. Základním principem tohoto procesu je vytvrzování kapalně fotopolymerní pryskyřice pomocí UV projektoru nebo laseru a vytvoření celého objektu za použití metody nanášení materiálu vrstvy po vrstvě [23].

Systémy SLA používají nízkoenergetický vysoce zaostřený UV laserový paprsek ke skenování jednotlivých průřezů trojrozměrného objektu v nádrži kapalného polymeru. Laserový paprsek se pohybuje po dráze vytvořené počítačovým modelem, čímž vznikne vrstva vytvrzené pryskyřice. Následně se tisková plošina sníží o vzdálenost rovnající se tloušťce vrstvy (25 až 50 μm) a další vrstva je vytvořena na dříve dokončené vrstvě. Po snížení plošiny je povrch vyhlazen hladicí čepelí. Tyto procesy se opakují, dokud součást není dokončena. Po dokončení části je přebytečný polymer z povrchu otřen nebo odplaven a vysušení dílu probíhá přímo nad nádrží s polymerem. Po závěrečném vytvrzení, které se v mnoha případech provádí umístěním součásti do UV trouby, jsou odříznuty podpory a povrch je vyleštěn, broušen, případně dokončen dalšími způsoby [23].



Obr. 9 Schéma metody SLA [24]

Digital Light Processing

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

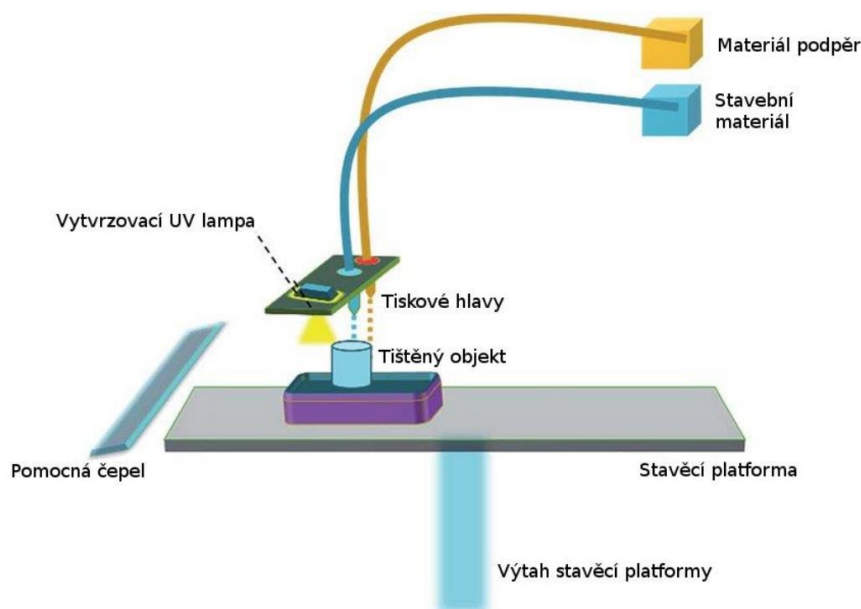
Tato metoda má tu výhodu, že není třeba pořizovat drahé lasery a navíc nevyžaduje velkou nádrž fotopolymerního materiálu. Stačí mít mělkou nádrž, do které může být materiál dodán v okamžiku, kdy je použit. Velká nádrž fotopolymerního materiálu, jako je používána v SLA, je zpravidla nákladnější a nepoužitý materiál je snadněji vystaven kontaminaci a degradaci. Tato metoda také nabízí velmi dobré rozlišení a rychlý provoz, díky tomu, že je celá vrstva vystavena záření najednou [23].

Tryskání materiálu

Material Jetting

Material jetting (MJ) je jednou z nejrychlejších a nejpřesnějších technologií 3D tisku. Během tisku dochází k selektivnímu tryskání stovek drobných kapiček fotopolymerního materiálu z tiskových hlav. Za nimi následují zdroje UV světla, které okamžitě vytvrzují nastříkanou pryskyřici. Po dokončení celé vrstvy klesne konstrukční platforma o výšku vrstvy a proces se opakuje. Vzhledem k tomu, že fotopolymerní pryskyřice je před ztuhnutím nastříkána v kapičkách, je MJ často přirovnáván k procesu 2D inkoustového tisku. S tím rozdílem, že zatímco inkoustové tiskárny nanášejí pouze jednu vrstvu inkoustu, MJ tiskne hned několik vrstev materiálu na sebe [25].

Dalším aspektem, který činí MJ jedinečným, je způsob nanášení a vytvrzování materiálu. MJ tiskárny v podstatě tryskají pryskyřici z několika tiskových hlav podél nosiče v ose x, který se pohybuje sem a tam napříč vyvíjejícím se tiskem. Díky tomu, že dochází k nanášení materiálu v jedné linii a nikoli bodovým způsobem, jakým je to běžné u ostatních technologií, jsou MJ tiskárny schopny tisknout několik součástí najednou, aniž by byla ovlivněna rychlost tisku. Kromě toho, že více tiskových hlav umožňuje nanášení materiálu v celé ose x, přináší další výhodu, a to tisk z více materiálů. Podobně jako u jiných vícemateriálových 3D tiskáren, je i u této technologie umožněno použití rozpustného podpůrného materiálu nebo tisk více druhů či barev funkčního materiálu. Hlavní využití nachází MJ u výroby vzhledných, realisticky vypadajících prototypů. Pro jejich výrobu se používá standardní fotopolymerní pryskyřice, ale k dispozici jsou také pružné, odlévatelné, průhledné a teplotně odolné materiály [25].



Obr. 10 Schéma metody MJ [26]

2.3.2. Technologie spojování práškového materiálu

Fúze v práškovém loži

Selective Laser Sintering

Selective Laser Sintering (SLS) je proces, při kterém se prášek spéká nebo taví paprskem laseru. Začíná zahřátím komory s polymerovým práškem na teplotu těsně pod bod tání polymeru. Hladící válec připraví velmi tenkou vrstvu práškového materiálu na tiskovou platformu a poté je povrch naskenován laserem. Laser selektivně spéká prášek podle modelu a vytvrzuje průřez součásti. Poté, co je celý průřez naskenován, se celá platforma posune níže o výšku jedné vrstvy.

Na čerstvě spečenou vrstvu přijde nový prášek, který je následně laserem opět spékán. Tento proces se opakuje, dokud součást není plně dokončena. Nespečený prášek na součásti zůstává jako podpora při tisku, tím se eliminuje potřeba dodatečných podpor, což je jedna z hlavních předností SLS [22]. Další výhodou této technologie je široká škála použitelných materiálů a recyklovatelnost nepoužitého prášku. Nevýhodou je omezená přesnost určená velikostí částic materiálu, spékání je třeba provádět v atmosféře inertního plynu, aby se zabránilo oxidaci a proces musí probíhat při konstantní teplotě blízko bodu tání [20].

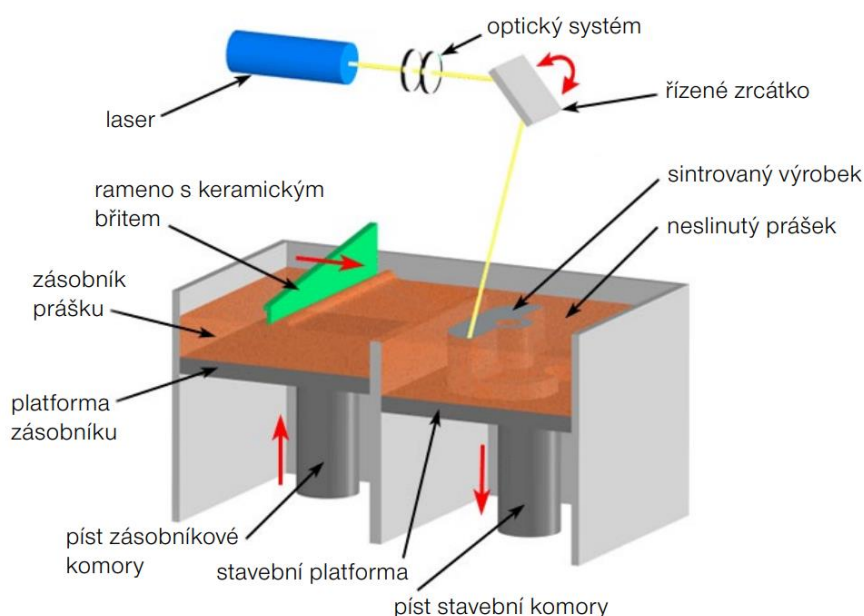
Direct Metal Laser Sintering / Selective Laser Melting

Technologie Direct Metal Laser Sintering (DMLS) i Selective Laser Melting (SLM) produkují díly pomocí podobné metody jako SLS s tím rozdílem, že se tyto technologie využívají pro výrobu kovových dílů. DMLS netaví materiál, ale místo toho jej spéká. Dochází tedy k zahřívání na vysokou teplotu, avšak pod její teplotu tání, přičemž dochází k vzájemnému splynutí práškových částic. Naproti tomu SLM využívá laser k plnému roztavení kovového prášku, čímž vznikne homogenní součást. Obě zmíněné metody vyžadují strukturní podpěry za účelem limitovat pravděpodobnost jakékoliv deformace i přesto, že okolní materiál poskytuje mechanickou podporu. Součásti vyrobené touto technologií mají velké riziko deformace z důvodu výskytu zbytkového napětí po zpracování při vysokých teplotách. Výrobky jsou proto obvykle žíhaný na snížení vnitřního pnutí [22].

Aby bylo možné vyrobit díl bez defektů, musí být parametry procesu pečlivě vyladěny, protože mají rovněž významný vliv na mechanické vlastnosti výrobků. Některé z těchto parametrů procesu jsou výkon laseru, rychlost laserového skenování, vzdálenost šraf, přesahy šraf, styl šraf atd. Celý proces probíhá uvnitř uzavřené komory, obvykle naplněné inertním plynem. Jako inertní plyn se používá N_2 nebo Ar v závislosti na reaktivitě zvoleného kovového prášku. Kromě toho je stavební komora vystavena přetlaku. Přítomnost inertního plynu a přetlakové podmínky v komoře minimalizují kontaminaci kyslíkem během procesu. Pokud je to žádoucí, existuje možnost použít ohřev substrátové desky (200–500 °C), aby se minimalizovala rychlost chlazení. Ohřev podkladové desky se obecně používá při zpracování křehkých a vysokoteplotních materiálů ke snížení rychlosti ochlazování, aby se zabránilo možnému praskání během tuhnutí [19].

Tyto technologie jsou považovány za nejuniverzálnější procesy AT a mají množství výhod. Dokážou zpracovat široké spektrum materiálů včetně slitin na bázi Al, Ti, Fe, Ni, Co, Cu a jejich kompozity. Kromě toho jsou schopny produkovat amorfní materiály díky vysokým rychlostem chlazení pozorovaných během tisku. Mechanické vlastnosti slitiny lze vyladit v závislosti na požadavcích změnou procesních parametrů během procesu a lze tak ovlivnit i konečnou mikrostrukturu dílů. Výsledkem jsou tvarové součásti připravené k použití, pokud jsou ovšem hodnoty drsnosti povrchu přijatelné [19].

Na druhou stranu mohou mít i následující nevýhody. Proces je relativně pomalý, je však možné zavést více laserových zdrojů, aby se rychlost tisku zvýšila. Rozměry vyráběných součástí omezuje velikost tiskové plochy stroje, která je často poměrně malá. Tiskárny mají vysokou spotřebu energie, stejně tak i vysoké počáteční náklady. Optimalizace parametrů procesu je časově náročná a je možné, že při výrobě bude docházet k tvorbě anizotropní mikrostruktury materiálu ve směru tisku. Manipulace s práškem může být složitá a vyrobené díly mohou vykazovat velmi drsný povrch (v závislosti na velikosti prášku a parametrech procesu). Kromě toho křehké materiály a vysokoteplotní materiály, které se nemohou vyrovnat s vysokým vnitřním napětím během výrobního procesu, povedou k praskání dílů, které lze do určité míry překonat snížením rychlosti chlazení, jak už bylo zmíněno, např. použitím ohřevu podkladové desky [19]. Zařízení na tomto principu se nachází na Fakultě strojní a bude využíváno k experimentu v této práci.



Obr. 11 Schéma metody DMLS [24]

Tryskání pojiva

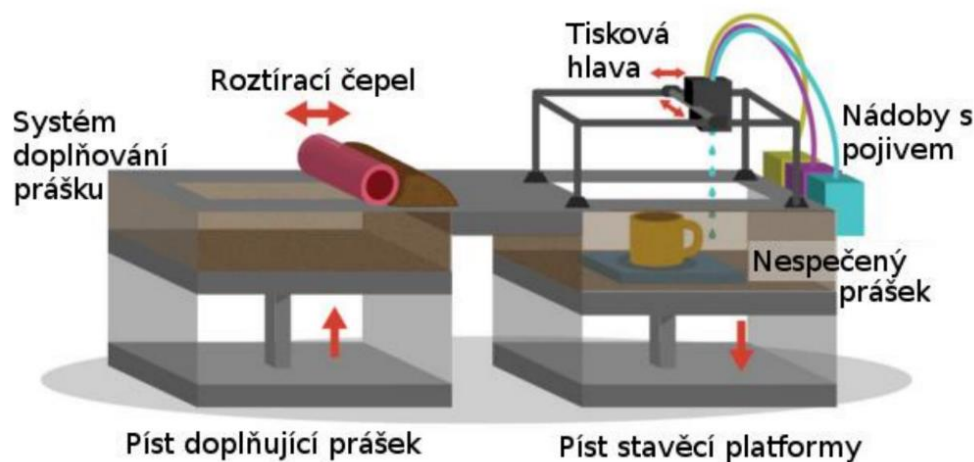
Binder Jetting

Binder Jetting (BJ) je jedním z vícekových procesů AT schopný zpracovávat kovy, slitiny (včetně slitin na bázi Al, Cu, Fe, Ni a Co) a keramiku (včetně skla, písku, grafitu atd.). Údajně však pracuje s jakýmkoliv materiálem, který je dostupný ve formě prášku a umožňuje barevný tisk [19]. BJ obvykle používá dva materiály – kovový nebo keramický prášek, ze kterého má být část vyrobena a tekuté pojivo, které spojuje prášek dohromady. Samotný tisk je podobný jakémukoli jinému tiskovému procesu, který se odehrává při výrobě součástí AT. Tiskárna pohybuje tiskovou hlavou nad rozprostřeným práškem a vypouští kapky pojiva, které vážou částice prášku dohromady, čímž dojde k vytvoření vrstvy. Dráhy jsou opět generovány na základě CAD modelu. Po vytvoření celé vrstvy se práškové lože posune níže a na povrch se roznese nová vrstva prášku. Tento proces se opakuje pro vytvoření celé součásti. Vytvořený díl se poté nechá v prášku vytvrdit. Po odebrání součásti z lože se nepoužitý materiál odstraní prostřednictvím stlačeného vzduchu [22].

Proces BJ zahrnuje post procesy, které následují po tisku dílů. Mezi ně patří například vytvrzování, odstranění prášku, slinování, žihání a dokončování. Tyto následné procesy někdy trvají

déle než vlastní tisk, zejména spékání součástí. Jednou z významných výhod BJ je, že díly lze vyrábět bez podpěrných konstrukcí. Tisknuté díly leží na sypkém práškovém loži, které není spojeno dohromady. Celý tiskový objem lze tedy zaplnit díly s mezerou jen několika vrstev mezi nimi [19].

Vzhledem k tomu, že BJ používá jako adheziva pojiva, materiálové charakteristiky nejsou vždy vhodné pro konstrukční aplikace leteckých a automobilových dílů, jelikož je u nich riziko vzniku porézности jako u konvenčního slinovacího procesu. V procesu BJ nedochází k žádnému tavení a konsolidace probíhá převážně slinováním a tudíž vždy existuje možnost přítomnosti pórů. Objem, velikost a tvar pórů se může lišit i v částech vyrobených ve stejné šarži. Navíc je očekáváno, že díly budou mít hrubou mikrostrukturu, jelikož musí projít tepelným zpracováním, jako je vytvrzování, slinování a žíhání. Mechanické vlastnosti dílů BJ tedy nejsou tak dobré jako díly vyráběné SLM. Samotný tiskový proces je rychlejší než procesy SLM a lze jej urychlit zvýšením počtu otvorů v tiskové hlavě, které nanáší materiál a pojivo. Je také umožněn dvou materiálový přístup, kde různé kombinace materiálů mohou vést k různým mechanickým vlastnostem, jednoduchou změnou poměru prášku a pojiva. V tomto procesu lze také použít hrubé prášky, což výrazně snižuje náklady na výrobu oproti velmi jemným práškům. Vzhledem k tomu, že tyto metoda nezahrnuje ohřev během stavebního procesu, nevznikají v dílech žádná zbytková napětí a BJ je považován za jeden z nákladově nejefektivnějších procesů AT pro tvorbu trojrozměrných dílů [19].



Obr. 12 Schéma metody BJ [26]

Directed energy deposition

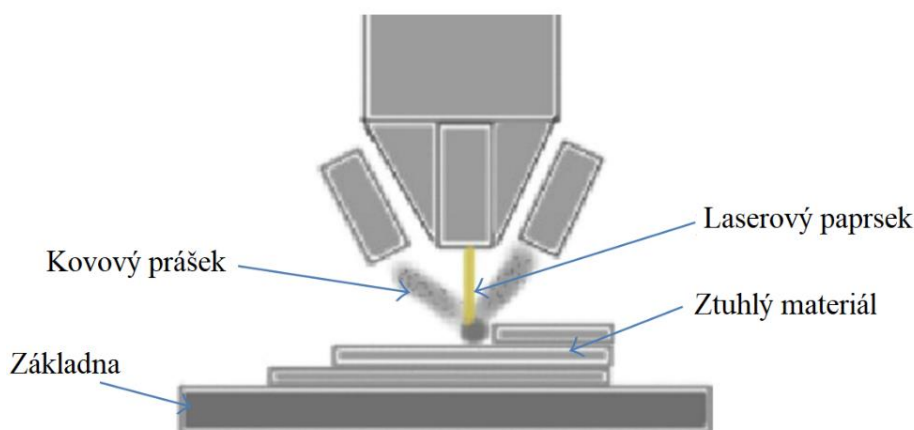
Directed energy deposition (DED) je typ aditivní výroby, která využívá energii laserového nebo elektronového paprsku k vytvoření lázně taveniny na povrchu substrátu, kde je nanášen koaxiální prášek nebo drát, po dráze popsané CAD modelem. Příkladem tohoto procesu je laserové nanášení kovů, známé také jako Laser Engineered Net Shaping (LENS), proces s vysokou účinností využití materiálu a nákladovou efektivitou [21].

Laser Engineered Net Shaping

V tomto aditivním výrobním procesu je součást vyrobena tavením kovového prášku, který je vstříkovan do konkrétního místa. Prášek je roztaven se pomocí výkonného laserového paprsku a po ochlazení ztuhne ve formě pevné stopy. Proces probíhá v uzavřené komoře s atmosférou argonu. Tato technologie umožňuje použití široké škály kovů a jejich kombinace, jako je nerezová ocel, slitiny na bázi niklu, titan, hliník, vanad, nástrojová ocel, slitiny mědi, keramika, kompozity a další [20].

V porovnání s ostatními procesy AT má tato technologie jedinečné postavení díky svému potenciálu vyrábět monolitické kovové a funkčně odstupňované díly či povlaky [27]. Mezi další její výhody patří schopnost provádět vysoce hodnotnou opravu součástí, která jiným procesem není proveditelná nebo je nákladnější. Jedním z problémů u tohoto procesu jsou zbytková napětí způsobená nerovnoměrnými procesy ohřevu a chlazení, které nabírají významu u vysoce přesných procesů, jako je například oprava lopatek turbíny [20].

Povlaky se nanášejí pro zvýšení životnosti hodnotných součástí. Aplikovaná vrstva má většinou odlišné povrchové vlastnosti než základový materiál a dochází ke zlepšení dílu z hlediska odolnosti proti opotřebení, korozi nebo oxidaci. Vzhledem k nevýhodám tradičních metod povlakování byly vyvinuty procesy LENS k nanášení odolných povlaků se silnou metalurgickou vazbou mezi naneseným materiálem a substrátem, s vysokou rychlostí nanášení, malým plýtváním materiálem a minimální zkřivením. Keramické povlaky jsou díky jejich vysoké mikrotrvdosti a odolnosti proti opotřebení používány v různých odvětvích průmyslu, jako je například letectví nebo strojírenství. Bylo zjištěno, že problém smáčení, který je hlavním problémem keramických povlaků, byl vyřešen pomocí procesu LENS a zároveň se tím zlepšil i celkový výkon povlaku [27]. Obrázek 13 ilustruje, jak je díl v tomto procesu vyroben.



Obr. 13 Schéma metody LENS [20]

2.3.3. Technologie spojování pevného materiálu

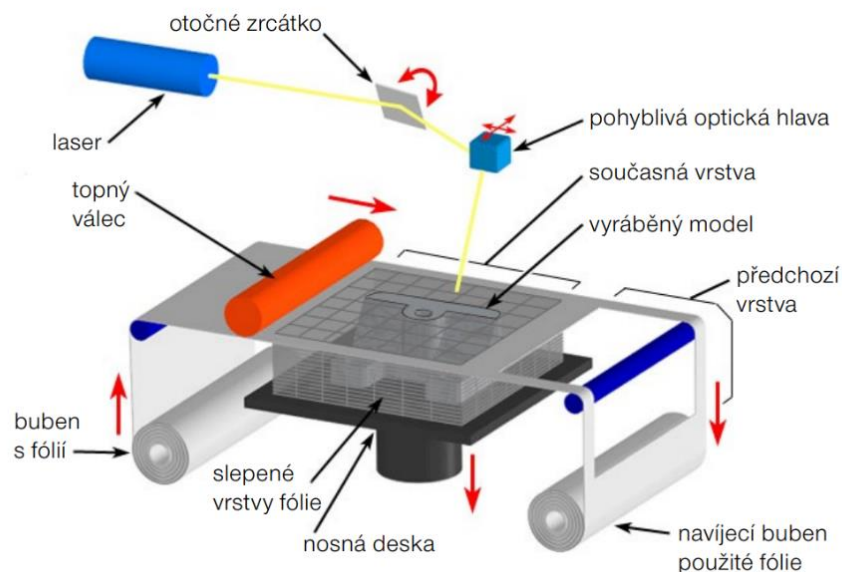
Laminace plechů

U tohoto procesu existují dvě varianty, jmenovitě: Laminated Object Manufacturing (LOM) a Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM)

Laminated Object Manufacturing

LOM je proces, který kombinuje aditivní a subtraktivní techniky k vytvoření součástí po vrstvách. Používanými materiály jsou papír, plasty a kovy ve formě listů nebo plechů, které představují tloušťku vrstvy. Spodní strana listů obsahuje adhezivní povlak, který při zahřátí a přejetí válečkem způsobí přilepení k předchozímu listu. CO₂ laser vyřeže u každé vrstvy materiál do tvaru na základě informací o 3D modelu z CAD souboru. Poté, co je každá vrstva spojena a vyřezána, je díl oddělen od podávaného materiálu řezem kolem obrysu. Pro snadné odstranění odpadního materiálu po dokončení celého dílu jsou vyžadovány další řezy ve tvaru křížů. Díly LOM jsou tedy obklopeny pevným materiálem a během stavebního procesu nevyžadují podpěrné konstrukce [20].

Tato technologie se vyznačuje nízkými výrobními náklady, vysokou pevností modelu, schopností řídit rozsah rychlosti procesu pro vytvoření požadovaného výsledku a možností vyrábět velké součásti. Dále je přínosné, že není potřeba žádná dodatečná zpracování dílů a během procesu neprobíhá žádná deformace nebo změna fáze. Kromě výhod dosažených při použití této technologie existují také její omezení. Mezi ně patří závislost vlastností výsledného produktu na použitém materiálu a proces spojování materiálu dohromady vyžaduje náročné techniky. Další nevýhody spočívají v tom, že se odebírá výrobní materiál, čímž dochází k plýtvání. Rozlišení povrchu je nízké, obrobiteľnosť a mechanické vlastnosti materiálu jsou směrově závislé a složité vnitřní dutiny se vytváří velmi obtížně [19,20].



Obr. 14 Schéma metody LOM [24]

Ultrasonic Additive Manufacturing

Ultrasonic Additive Manufacturing používá kov jako svůj pracovní materiál a využívá techniky vrstvení po vrstvách, kdy jsou vrstvy k sobě svařovány ultrazvukem. Tento proces pracuje s kovy jako je hliník, měď, nerezová ocel a slitina titanu [21].

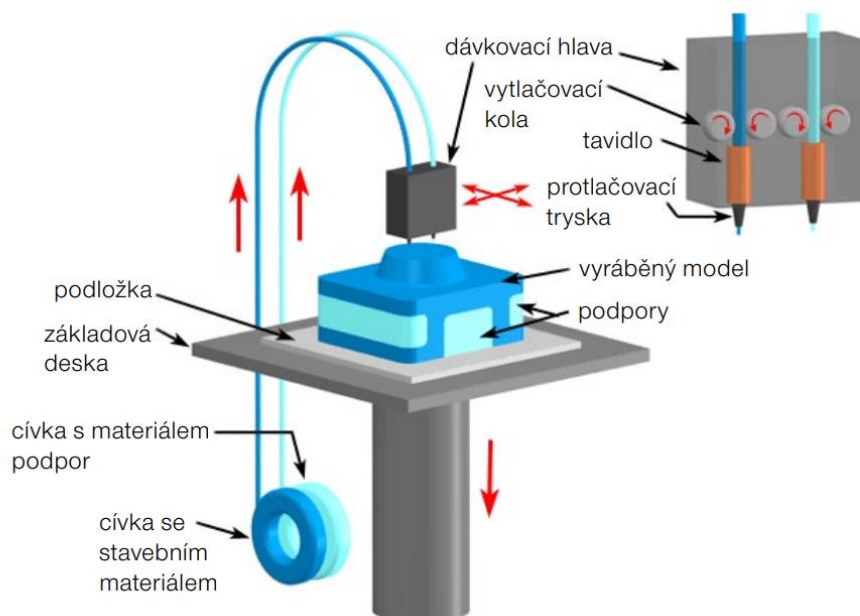
Vytlačování materiálu

Fused Deposition Modeling

V technologii Fused Deposition Modeling (FDM) jsou nejčastěji používanými materiály termoplastické polymery (např. PETG, PLA, ABS), které se dodávají ve formě tiskové struny. Při tisku se do stroje nejprve vloží cívka s navinutou strunou z termoplastu a tisková struna se přivede do tiskové hlavy. Když se tryska zahřeje na požadovanou teplotu, motor vede a natavuje strunu skrz rozehřátou trysku. Tiskárna poté pohybuje tiskovou hlavou po počítačem vygenerované dráze a nanáší roztavený materiál na dané pozice, kde se materiál ochladí a opět ztvrdne. Nejdříve se tiskne obrys součásti a až poté se následují další dráhy, které dokončí vrstvu. V některých případech je chlazení materiálu na platformě urychleno použitím chladicích ventilátorů připevněných k tiskové hlavě. Po dokončení celé vrstvy se platforma posune výše a celý proces se opakuje pro další vrstvy, dokud není celá část dokončena [22].

Hlavní výhody tohoto procesu spočívají v tom, že není potřeba žádná chemická následná zpracování, termoplasty se nemusí vytvrzovat, levnější stroj a materiály, což vede k nákladově efektivnějšímu procesu. Nevýhody jsou v malém rozlišení na ose z, které je ve srovnání s jinými

aditivními výrobními procesy nízké. Při požadavku na hladký povrch je zapotřebí dokončovací proces, který probíhá pomalu. Pro úsporu času umožňují tiskárny zvolit množství výplně dílu. Tisk s menší hustotou stěn šetří čas, ale zjevně snižuje mechanické vlastnosti [20]. FDM musí používat podpůrné struktury pro převislé prvky. Vývoj se proto zaměřuje na použití rozpustného nosného materiálu, který lze odstranit s minimálním mechanickým poškozením součásti [28]. Na obrázku 15 je schematicky znázorněn proces FDM.



Obr. 15 Schéma metody FDM [24]

3. Cíle

Diplomová práce zpracovaná v rámci studijního oboru Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality na Katedře technologie obrábění se zaměřuje na problematiku bezkontaktního měření teplot v technologiích 3D tisku. Cílem práce je prostřednictvím termovizních kamer zaznamenat proces 3D tisku a následně vyhodnotit průběh a rozložení teplot za pomoci stanovené emisivity pro tiskový materiál. Práce je proto rozdělena do tří částí. První teoretická část se věnuje zpracování teoretických poznatků a uvedení do problematiky související s aditivními technologiemi a bezkontaktním měření teploty. Druhá praktická část práce se zabývá zjišťováním vlastností termografické barvy LabIR pro vysokoteplotní aplikace a měřením emisivity materiálu používaného při 3D tisku. Třetí aplikační část práce se pak zaměřuje na využití zjištěných poznatků v analýze tepelných procesů při 3D tisku.

Hlavní dílčí cíle práce tedy zahrnují:

1. Zpracování rešerše současného stavu v oblasti aditivních technologií a bezkontaktního měření povrchové teploty.
2. Získání poznatků o změně emisivity na vzorcích s nanosenou vysocoemisivní termografickou barvou, před a po jejich tepelném zatěžování na různých na teplotách.
3. Stanovení emisivity materiálů využívaných při 3D tisku ve formě prášku i v podobě již vytištěného vzorku s pomocí termografické barvy.
4. Využití dosažených výsledků stanovení emisivity při bezkontaktním měření teploty frézovací hlavy při 3D tisku.

4. Metody zpracování

4.1. Přehled přístrojů

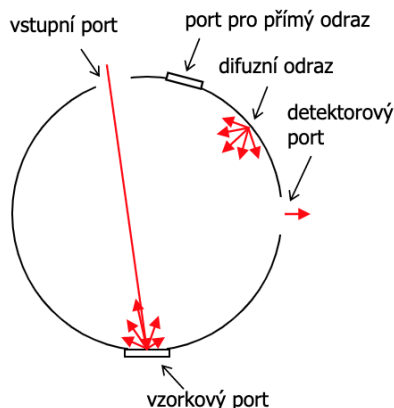
4.1.1. Disperzní spektrofotometr Specord 210 Plus

Pro měření optických vlastností v UV-VIS-NIR rozsahu byl použit disperzní spektrofotometr Specord 210 Plus (obr. 16). Jedná se o dvoupaprskový spektrofotometr s chlazeným polovodičovým detektorem. Zdroj světla je zajišťován kombinací halogenové a deuteriové lampy. Rozsah vlnových délek, ve kterých tento přístroj pracuje, se pohybuje v rozmezí 0,32 – 1,2 μm . Na stroji měřená veličina byla spektrální normálová hemisférická odrazivost relativní. Výstupem měření jsou pak data a grafické zobrazení spektrálního průběhu analyzované veličiny. Specord 210 Plus obsahuje software ASpect UV, který umožňuje kompletní řízení, monitorování a záznam všech měřicích procesů.



Obr. 16 Specord 210 Plus [29]

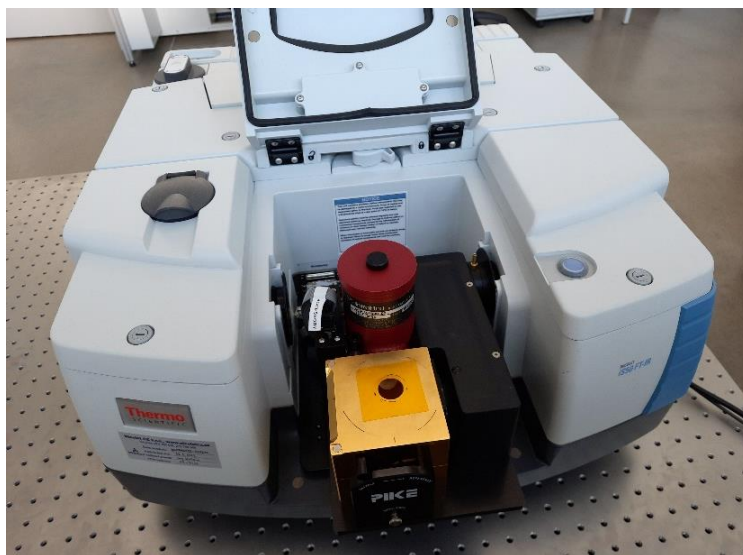
Jednou z jeho základních částí je nástavec – integrační sféra s úhlem dopadu 8° (její schéma na obr. 17) využívaná pro měření hemisférické odrazivosti. Při měření je vzorek nebo standard odrazivosti umístěn do otvoru na integrační sféře a ozáren vnitřním světelným zdrojem spektrometru. Záření se od vzorku odrazí a dopadá na stěnu integrační koule, která je vyrobena z vysoce odrazivého materiálu. Odrazem od stěny sféry dojde k rozptýlení záření do všech směrů. Světlo je poté ještě několikrát od povrchu integrační sféry odraženo a následně vystupuje skrz detektorový port na detektor [29].



Obr. 17 Schéma principu integrační sféry pro Specord 210 Plus [29]

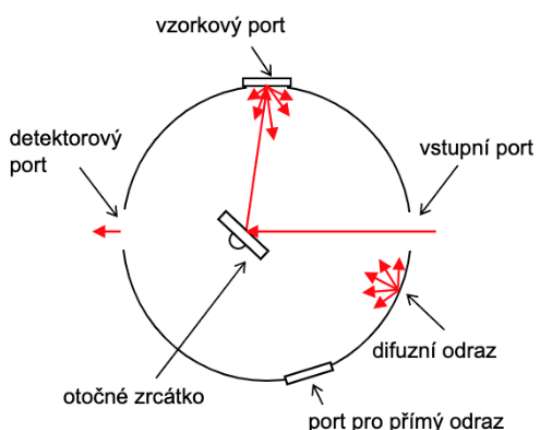
4.1.2. FTIR spektrometr Nicolet iS50

Měření optických vlastností materiálů v MIR rozsahu bylo prováděno na spektrometru Nicolet iS50 (obr. 18). Jedná se o spektrometr s Fourierovou transformací. Dokáže měřit na vlnových délkách v rozsahu od 1,5 do 20 μm . Stejně jako výše zmíněný Specord 210 Plus, umí i tento přístroj měřit veličinu, kterou je spektrální normálová hemisférická odrazivost relativní. Ovládání probíhá pomocí softwaru Omnic, který umožňuje i řízení měření pomocí makra.



Obr. 18 Spektrometr Nicolet iS50

Ve stroji se při měření hemisférické odrazivosti používá nástavec s integrační sférou s úhlem dopadu 12° . Do této sféry dopadá záření z vnitřního zdroje spektrometru a je otočným zrcátkem odraženo na analyzovaný vzorek nebo standard odrazivosti. Od vzorku se záření dále odrazí do integrační sféry opatřené odrazivým povlakem a dochází k rozptýlení světla do všech směrů. Záření se poté ještě několikrát odrazí a vystupuje detektorovým portem na detektor. Jelikož integrační sféra sbírá záření odražené ze všech směrů, lze určit absolutní hodnotu odrazivosti pro vzorek s libovolnou drsností povrchu [29]. Schéma principu této sféry se nachází na obr. 19.



Obr. 19 Schéma principu integrační sféry pro Nicolet iS50 [29]

4.1.3. Topná deska PZ 28-3TD s PID regulátorem PR 5-3T

Ohřev vzorků v rámci jejich tepelného zatěžování se prováděl na topné desce PZ 28-3TD s titanovým povrchem (obr. 20). Její rozměry jsou 280 x 200 mm a maximální výkon 2000W. Maximální dosažitelná teplota na povrchu desky činí 600 °C. Obsahuje odklápěcí víko vyplněné izolačním materiálem, které výrazně snižuje tepelné ztráty. Teplota se reguluje pomocí PID regulátoru PR 5-3T (obr. 21). Díky tomuto regulátoru je možné ovládat rychlost teplotního náběhu desky a dobu výdrže na dané teplotě.



Obr. 20 Topná deska PZ 28-3TD



Obr. 21 PID regulátor PR 5-3T

4.1.4. Laboratorní pec Linn LM-412

Tepelné zatěžování vzorků za vyšších teplot probíhalo v elektrické laboratorní peci Linn LM-412 (obr. 22). Pec disponuje užitečným prostorem 8,4 litru s rozměry 175 x 320 x 150 mm. Topný výkon činí 3,2 kW a je schopná dosáhnout teplot až 1340 °C. Médium uvnitř topné komory je vzduch. V peci je zabudovaný regulátor pro jednoduché naprogramování funkce rychlosti náběhu, aby nedocházelo k překmitu teplot a pro její lepší ustálení na požadované hodnotě. Konstantní rozložení teploty uvnitř pece zajišťují topné spirály a topná komora z karbidu křemíku, která je izolována vrstvami vláknité rohože, vláknitých izolačních desek a desek z minerální vlny.



Obr. 22 Laboratorní pec Linn LM-412 [30]

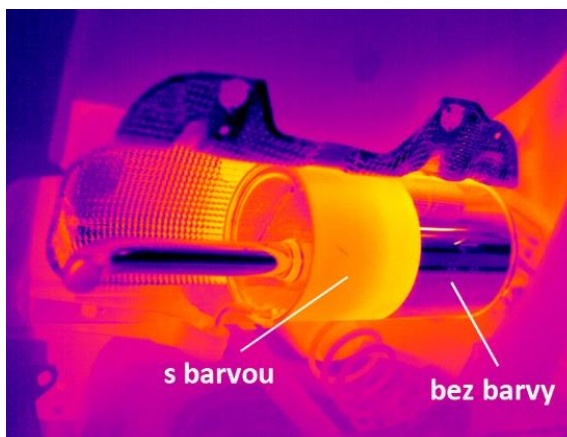
4.1.5. Termografická LabIR barva

Jedná se o speciální termografické barvy (obr. 23) vyvinuté ve výzkumném centru Nové Technologie (NTC) Západočeské univerzity v Plzni. Barvy mají předepsané parametry umožňující přesné termografické měření. Mezi dané parametry se řadí zejména emisivita pro pásma termovizních kamer v závislosti teplotě, úhlu měření, vlnové délce a další vlastnosti jakými jsou například mechanická odolnost či optická nepropustnost. Aplikací LabIR barvy lze na měřený objekt nanést homogenní a vysoce emisivní vrstvu. Tato vrstva pak umožňuje přesné měření teploty i u materiálů s lesklými povrchy, vysokou odrazivostí, či neznámou nebo nízkou emisivitou.

Na obr. 24 je příklad konkrétní aplikace, kdy byla na polovinu výfuku aplikována termografická barva. Z obrázku je možné pozorovat rozdíl barev, kde polovina s nanesenou barvou se jeví teplejší a také nevykazuje známky odrazu, jako je tomu u části bez barvy. Díky tomu a známé hodnotě emisivity je možné změřit teplotu výfuku výrazně přesněji. Existuje několik druhů barvy (nízkoteplotní, vysokoteplotní, smývatelná), tudíž její vlastnosti se dají vybrat přesně podle požadované aplikace a zpřesnit tak výsledky měření pomocí termovizních kamer.



Obr. 23 Termovizní LabIR barvy [31]



Obr. 24 Aplikace LabIR barvy na výfuku [31]

Jeden z dostupných druhů termografické barvy je nízkoteplotní barva LabIR pro trvalé použití nesoucí označení HERP-LT-MWIR-BK-11. Je použitelná pro teploty do 100 °C, při kterých dosahuje tepelné vodivosti $0,70 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Nanáší se v tloušťkách 30 μm . Dále se vyznačuje vysokou mechanickou odolností a velmi nízkou elektrickou vodivostí a velkým elektrickým $8,83 \cdot 10^8 \Omega$, takže je vhodná i pro aplikace na elektrická zařízení.

Dalším nabízeným typem je nízkoteplotní smývatelná barva LabIR pro dočasné použití s označením HEWP-LT-MWIR-BK-11. Využívá se pro smývatelné aplikace do 100 °C. Barva je časově stabilní, avšak je snadno odstranitelná vodou bez použití hrubých mechanických metod nebo chemických látek. Nanáší se v tloušťce 100 μm .

Posledním vyráběným druhem LabIR barvy je vysokoteplotní barva pro trvalé použití s produktovým označením HERP-HT-MWIR-BK-11. Oproti předchozím barvám se liší zejména teplotami, do kterých je schopná barva odolávat. Díky tomu nachází uplatnění například v průmyslových pecích, v oblasti tepelného zpracování materiálu, při obrábění kovových částí či v žáruvzdorných stavebních materiálech pro vysoké teploty. Dle doporučeného množství se nanáší vrstva 150 μm . Vysokoteplotní barva má též vysokou mechanickou odolnost [31].

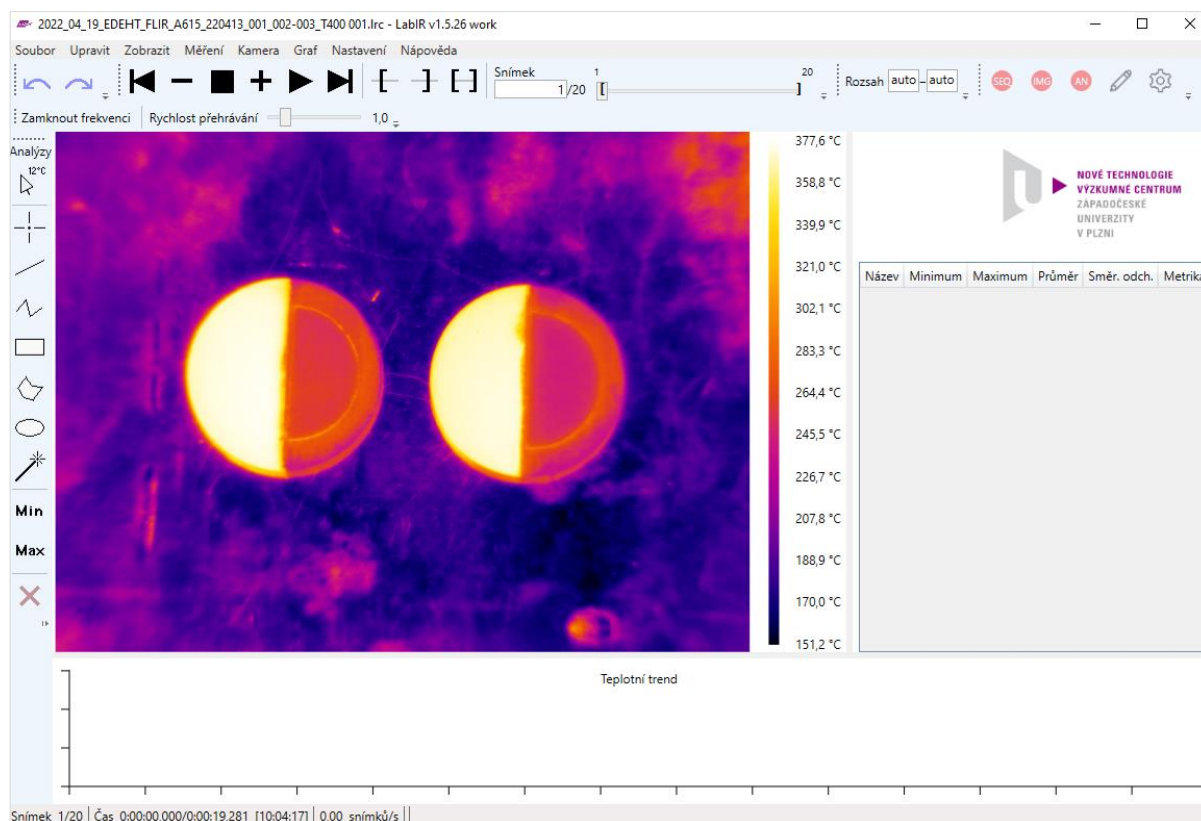
Další informace k termografickým barvám jsou uvedeny na internetových stránkách LabIR [31].

4.1.6. Software LabIR

LabIR je software také vyvinutý výzkumným centrem Nové Technologie (NTC) Západočeské univerzity v Plzni. Tento software slouží pro získávání, zpracování a vyhodnocování termografických snímků a sekvencí. LabIR obsahuje funkce jak pro online vyhodnocení, které probíhá v reálném čase během záznamu kamery, tak i pro offline vyhodnocení, kde dochází k analýze již dokončeného záznamu. Příkladem online vyhodnocení by bylo například sledování procesu 3D tisku, kde by byla snímána teplota každé vrstvy a při detekci místa s nižší teplotou by byl díl vyhodnocen jako defektní nebo jakékoliv jiné začlenění do výrobní linky pro řízení či kontrolu kvality výroby.

Program je přehledný a lze v něm snadno a intuitivně najít nástroje k tvorbě analýz či další vyhodnocovací funkce. Ukázkou softwaru a jeho rozložení lze nalézt na obrázku 25. LabIR také umožňuje připojit široké množství termovizních kamer od různých výrobců a jeho prostřednictvím lze po zapojení kamery vytvořit snímek, nahrát sekvenci nebo zahájit online kontrolu. Po získání termografických snímků nebo sekvencí je lze do programu nahrát a začít offline vyhodnocení.

LabIR obsahuje unikátní vyhodnocovací funkce jako jsou výpočty s emisivitou, rozdílové analýzy teplotních změn, kontrola teploty na úrovni obrazových bodů, kontrola svarů. Dále umožňuje například tvorbu vyhodnocovacích analýz či změnu parametrů záznamu. Na sekvence je také možné aplikovat pokročilé vyhodnocovací metody a pomocí nich zjistit, zda měřená součást obsahuje defekty. Z této kategorie se v programu se nachází metody jak pro lock-in termografii, tak i pro pulzní termografii.



Obr. 25 Ukázka softwaru LabIR

4.1.7. Termovizní kamera MIKRON MCS640

Termovizní kamera MIKRON MCS640 (obr. 26) obsahuje křemíkový detektor se spektrálním rozsahem 780-1080 nm. Kamera je schopná produkovat snímky s rozlišením 640 x 480 pixelů s frekvencí snímkování 60 Hz. Standardně nabízí pro měření dvě konfigurace s rozdílnými teplotními rozsahy, a to 600 až 1600 °C a 800 až 3000 °C s nepřesností $\pm 0,5$ % naměřené hodnoty v Kelvinech. Rozsahy jsou dále rozděleny do podrozsahů, které jsou dány výrobcem pro specifickou konfiguraci kamery. Kameru je možné osadit různými typy objektivů. Pro standardní objektiv se zorným úhlem $10,8^\circ \times 8,1^\circ$ je minimální fokusační vzdálenost 0,3 m a pro druhý používaný objektiv se zorným úhlem $3,5^\circ \times 2,6^\circ$ mm činí tato vzdálenost 0,5 m. Ke kameře je dodáván software LumaSpec RT pro měření a vyhodnocení dat [32].



Obr. 26 Termovizní kamera MIKRON MCS640 [32]

4.1.8. Termovizní kamera FLIR A320

FLIR A320 (obr. 27) je termovizní kamera citlivá na infračervené záření v rozsahu vlnových délek 7.5-13 μm . Obsahuje nechlazený mikrobolometrický detektor s citlivostí 50 mK a je schopná vytvářet snímky s rozlišením 320 x 240 pixelů při frekvenci 30 Hz. Její přesnost činí ± 2 °C nebo ± 2 % z naměřené teploty. Je schopná ve dvou teplotních rozsazích měřit teploty od -20 do 350 °C (volitelně až do 1200 °C), z minimální vzdálenosti 0,4 m od měřeného objektu [33].



Obr. 27 Termovizní kamera FLIR A320 [33]

4.1.9. Termovizní kamera FLIR A615

Termovizní kamera FLIR A615 (obr. 28) měří v rozsahu vlnových délek 7-14 μm . Je vybavena nechlazeným mikrobolometrickým detektorem s teplotní citlivostí 50 mK zajišťující měření se stejnou přesností jako u výše zmíněné kamery ± 2 °C nebo ± 2 % z naměřené teploty. Kamera disponuje rozlišením snímků 640 x 480 pixelů, což umožňuje zobrazení více detailů i na větší vzdálenosti. Z důvodu zaostření musí být minimální vzdálenost měřeného objektu od kamery 0,5 m. Základní frekvence snímkování činí 50 Hz a lze jí dále navýšit na úkor rozlišení až na 200 Hz. FLIR A615 nabízí 3 teplotní rozsahy umožňující měření teplot od -20 až do 2000 °C a různé druhy vyměnitelných objektivů [34].



Obr. 28 Termovizní kamera FLIR A615 [34]

4.1.10. Termovizní kamera FLIR A6751

Termovizní kamera FLIR A6751 (obr. 29) disponuje chlazeným InSb detektorem s citlivostí 20 mK. Kamera pracuje ve vlnovém pásmu 3-5 μm a vytváří snímky s rozlišením 640 x 520 pixelů. V plném rozlišení snímá s maximální snímkovou frekvencí 125 Hz. Oříznutím snímku na nižší rozlišení lze získat vyšší snímkovací frekvence, což je zejména žádoucí u rychlých výrobních procesů. FLIR A6751 umožňuje následující kombinace rozlišení a snímkovacích frekvencí: 640 x 520 pixelů (125 Hz), 320 x 256 pixelů (407 Hz), 160 x 128 pixelů (1070 Hz), 80 x 64 pixelů (2082 Hz). S touto kamerou se dají zaznamenávat teploty od 45 do 3000 °C ve třech konfiguracích, pro které je třeba vždy použít odpovídající filtr. Každá konfigurace poté umožňuje měřit v rozsazích, které se již dají upravit bez výměny filtru. Při použití objektivu s ohniskovou vzdáleností 100 mm činí minimální fokusační vzdálenost 3 m. Pro využití takového objektivu i na kratší vzdálenost je třeba namontovat distanční kroužek, který tuto vzdálenost zmenší. S kamerou je kompatibilní software FLIR ResearchIR sloužící pro měření i vyhodnocení dat [35].



Obr. 29 Termovizní kamera FLIR A6751 [35]

4.1.11. Černé těleso BB-4A

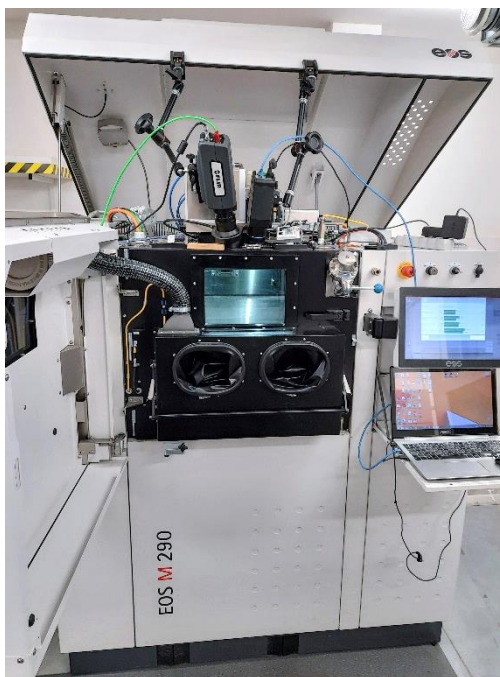
Zařízení BB-4A (obr. 30) je referenční zdroj teploty černého tělesa od firmy Omega. Má nastavitelný teplotní rozsah ohřevu od 100 do 982 °C s přesností ± 1 °C nebo $\pm 0,25$ % čtené hodnoty. Vyzařovací plocha černého tělesa o průměru 21,56 mm poskytuje oblast se známou teplotou a emisivitou $\epsilon = 0,99$ pro měření a kalibraci infračervených přístrojů. Stabilita černého tělesa činí $\pm 0,15$ °C [36].



Obr. 30 Černé těleso BB-4A [36]

4.1.12. Tiskárna EOS M 290

Měření tiskového procesu proběhlo na průmyslové 3D tiskárně kovů EOS M 290 v Regionálním technickém institutu (RTI) Západočeské univerzity v Plzni. Tiskárna umožňuje výrobu malých až středně velkých dílů v pracovním prostoru zařízení s rozměry 250 x 250 x 325 mm. Tiskárna disponuje Yb vláknovým laserem o maximálním výkonu 400 W, který zajišťuje roztažení tiskového prášku. Skenovací rychlost laserového paprsku dosahuje až 7 m/s, Pracovní komoru lze vyplnit argonem nebo dusíkem, což umožňuje zpracovávat materiály, aniž by u nich docházelo k oxidaci. EOS M 290 pracuje na principu DMLS popsáném výše v kapitole 2.3.2 a lze si jej prohlédnout na obrázku 31. Na snímku je tiskárna doplněna o dvě termovizní kamery, které byly použity pro měření v rámci této diplomové práce.



Obr. 31 Tiskárna EOS M 290 s nainstalovanými termovizními kamerami

4.2. Postup zpracování

4.2.1. Měření vlastností termografické barvy

Příprava vzorků

Před vlastním měřením bylo třeba vzorky vyrobit. Výroba začala vyřezáním kruhových destiček o průměru 25 mm a tloušťce 5 mm vodním paprskem z plechu materiálu ČSN 17153. Dále byly destičky otryskány korundovým pískem a nanasla se termografická LabIR barva HERP-HT-MWIR-BK-11 pro vysokoteplotní aplikace. Nanášení se provádělo pomalými přejezdy přes materiál ze vzdálenosti 30-50 cm. Nejdříve byly nanесeny čtyři tenké vrstvy, poté se chvíli vyčkal a následně se opět nanasly čtyři tenké vrstvy. Nástřik se prováděl při pokojových teplotách a po dvou hodinách vytvrzování byly vzorky připraveny k měření. Na obrázku 32 lze nalézt ukázkou připraveného vzorku.



Obr. 32 Ukázkou připraveného vzorku

Celkem bylo pro měření vlastností termografické barvy připraveno 50 vzorků rozdělených do 10 sad po 5 kusech. Každá sada byla zatěžována na jinou teplotu, kde první sada byla ohřívána na 100 °C a každá následující na teplotu o 100 °C vyšší až do 1000 °C. Dále byly vyrobeny další 3 sady po 3 kusech pro dodatečné informace a ověření výsledků. V tabulce 1 lze najít přehled označení sad, vzorků a jejich příslušných teplot zatěžování.

Tab. 1 Přehled vzorků a teplot jejich zatěžování

Sada vzorků	Teplota zatěžování (°C)	Vzorky
220301-001	100	220301-001-001 až 220301-001-005
220301-002	200	220301-002-001 až 220301-002-005
220301-003	300	220301-003-001 až 220301-003-005
220301-004	400	220301-004-001 až 220301-004-005
220301-005	500	220301-005-001 až 220301-005-005
220301-006	600	220301-006-001 až 220301-006-005
220301-007	700	220301-007-001 až 220301-007-005
220301-008	800	220301-008-001 až 220301-008-005
220301-009	900	220301-009-001 až 220301-009-005
220301-010	1000	220301-010-001 až 220301-010-005
220330-001	500	220330-001-001 až 220330-001-003
220330-002	700	220330-002-001 až 220330-002-003
220330-003	900	220330-003-001 až 220330-003-003

Měření vzorků metodou SNHRRT

Připravené vzorky se měřily na spektrometrech metodou SNHRRT. Jedná se o postup pro měření spektrální normálové hemisférické odrazivosti ve viditelné a infračervené části spektra za pokojové teploty.

Pro oblast UV/VIS/NIR byl využit spektrometr Specord 210 Plus. Nejdříve se do stroje vložil reflektor a konektor pro připojení integrační sféry a poté byl přístroj zapnut. Vyčkalo se 2 hodiny, než došlo k vytemperování spektrometru. Mezitím byl zapnut také počítač a spuštěn program ASpect UV, ve kterém byl následně otevřen modul Spectrum a v něm byly zadány parametry pro měření, které si lze prohlédnout v tabulce 2. Po zchlazení přístroje bylo možné začít s měřením. Při manipulaci s integrační sférou a vzorky je nutné používat latexové rukavice, aby nedošlo k jejich znečištění. Dále byly z integrační sféry vyndány pěnové krytky portů a byla do ní umístěna upínka. Před měřením každého ze vzorků se do sféry vložil molybdenový standard odrazivosti Stan-SSH a v softwaru se spustilo změření reference. Po změření se reference změnila za samotný vzorek a bylo spuštěno jeho měření, které se vždy 4x opakovalo a vzorek při tom byl pootočen podle azimutálních úhlů (0°, 45°, 90° a 135°). Po změření všech úhlů bylo třeba data exportovat, což bylo manuálně provedeno do souborů s příponou .csv.

V oblasti MIR probíhalo měření na stroji Nicolet iS50. Na začátku bylo třeba přístroj připravit připojením integrační sféry a jeho samotným zapnutím. Dále byl zapnut také počítač a spuštěn program Omnic, ve kterém se zkontroloval výběr správného detektoru. Došlo k zchlazení integrační sféry, což se provádí nalitím tekutého dusíku do zásobníku u sféry a vyčkáním 2h. Pro ovládání stroje bylo v NTC vytvořeno makro, do kterého se opět nastavily parametry měření viz tabulka 2. Na port integrační sféry byl vložen standard odrazivosti MoStan a změřena reference. Následováním instrukcí z makra se dále změřil vzorek na 4 azimutálních úhlech (0°, 45°, 90° a 135°) a tyto data byla automaticky uložena ve formě .csv souborů. Postup měření se od změření reference po uložení dat opakoval pro každý vzorek.

Tab. 2 Nastavené parametry při měření metodou SNHRRT

SNHRRT-UV/VIS/NIR		SNHRRT-MIR	
Spektrální rozsah	320 až 1200 nm	Spektrální rozsah	1,5 až 20 μm
Rozlišení	1 nm	Rozlišení	8 cm^{-1}
Rychlost	10 nm/s	Rychlost zrcadla	1,2659 mm/s
Integrační čas	0,1 s	Apertura	120 mm
Velikost štěrbin	4 nm	Gain	1

Tepelné zatěžování

Po SNHRRT měření skupiny vzorků 220301 následovalo jejich tepelné zatěžování spočívající ve výdrži na dané teplotě po dobu jedné hodiny. Tepelné zatěžování do 400 °C včetně probíhalo na topné desce PZ 28-3TD. Od teploty 500 °C probíhalo zatěžování v peci. Při nižších teplotách bylo využito topné desky z důvodu horší regulovatelnosti pece za nižších teplot a snazší manipulace na topné desce. Na začátku se na PID regulátoru PR 5-3T nastavily časy a teplota ohřevu. Mezi časy patřila doba náběhu a doba setrvání na dané teplotě. Náběh byl nastaven tak, aby se deska ohřívala rychlostí 3 °C za minutu a doba setrvání na dané teplotě byla nastavena na 2 h. Tím byl pokryt čas na ustálení teploty topné desky i čas na samotné tepelné zatěžování vzorků, po kterém byl ohřev manuálně vypnut. Po dosažení požadované teploty topné desky se vyčkalo 20 minut na její ustálení. Poté byla na topnou desku položena první sada vzorků a nechala se tepelně zpracovávat. Po jedné hodině byla sada vzorků sejmuta a nechala se vychladnout. Tento postup byl aplikován pro teploty 100, 200, 300, 400 °C, a tudíž proběhl se sadami vzorků 220301-001 až 220301-004.

Další tepelné zatěžování proběhlo v peci Linn LM-412. K přechodu k peci došlo z důvodu blízkosti se teplotního limitu topné desky. Zatěžování začalo nastavením času náběhu 30 min, času výdrže 2 h a teploty 500 °C. Po dosažení dané teploty se opět čekalo 20 min na její ustálení. Mezitím byla na kovovou podložku vyskládána zatěžovaná sada vzorků viz obr. 33 a po ustálení teploty se podložka společně se vzorky vložila do pece. Po hodinovém tepelném zpracování byly vzorky vyjmuty z pece a položeny na tepelně izolační podložku, kde došlo k jejich vychladnutí. Stejným způsobem se zatěžovalo i na teplotách 600, 700, 800, 900 a 1000 °C.



Obr. 33 Podložka s připravenými vzorky

Pro dodatečnou skupinu vzorků s označením 220330 probíhalo tepelné zatěžování působením laseru se skenovací hlavou. Ohřev byl prováděn ze zadní strany vzorku tak, aby z přední strany bylo dosažena daná homogenní teplota. Teploty, na které byla tato skupina vzorků laserem zahřívána, činily 500, 700 a 900 °C. Doba tepelného zatěžování byla opět jedna hodina.

Po tepelném zatěžování následovalo stejným způsobem SNHRRT měření všech vzorků. U sad 220301-009, 220301-010 a 220330-003 došlo během tepelného zpracování na povrchu vzorků k delaminaci barvy a k vytvoření puchýřků, které již při citlivé manipulaci začaly odpadávat. Aby se předešlo zanesení integrační sféry, nebyly tyto sady na přístroji Specord 210 Plus již měřeny. U zařízení Nicolet iS50 bylo nutné použít KBr okénko, které zabraňuje propadu částic

do sféry. Kvůli této změně došlo k úpravě postupu měření, kdy před změřením reference bylo změřeno ještě samotné okénko.

Zpracování výsledků

Naměřená data bylo třeba zpracovat a dopočítat z nich další veličiny. Exportovaná data ze spektrometrů ve formátu .csv byla vložena do předem připraveného excelovského souboru, podle kterého se v NTC standardně vyhodnocuje. V tomto souboru se pro rozsah UV/VIS/NIR z naměřené hemisférické odrazivosti vypočítala absolutní hodnota emisivity. Pro rozsah MIR ji nebyla třeba dopočítávat, jelikož byla vypočítána a exportována makrem hned po měření. Pro zvolené rozsahy vlnových délek se přes vážený průměr s ohledem na Planckovo rozdělení vypočítala pásmová emisivita. Rozsahy pásem se volily podle citlivosti kamer v používané konfiguraci na dané vlnové délky a to konkrétně 0,85-1 μm , 3-5 μm a 7-14 μm .

4.2.2. Měření vlastností tiskového materiálu

Příprava vzorků

Pro práškový materiál bylo třeba zhotovit podložky, do kterých by se mohl umístit. Pro tento účel byly z materiálu ČSN 17153 ve formě plechu vyřezány vodním paprskem dvě kruhové destičky o průměru 35 mm a do nich byla laserem s výkonem 500 W vygravírována drážka půlkruhovitěho tvaru. Hloubka drážky v první podložce byla 1 mm a v druhé činila 2 mm. Polovina destičky, kde se nacházela drážka, se poté přelepila papírovou lepicí páskou a na druhou část se nanasla vysokoteplotní LabIR barva stejným způsobem jako u vzorků v minulém oddílu. Zhotovené a připravené podložky na nasypání prášku a na měření lze vidět na obr. 34, podložka s drážkou 1 mm vlevo, s drážkou 2 mm vpravo.



Obr. 34 Podložky na měření prášku, s drážkou 1 mm vlevo, s drážkou 2 mm vpravo

Pro měření byly připraveny tiskové prášky ze 3 různých materiálů od výrobce EOS- nástrojová ocel MS1, vysokopevnostní slitina niklu Inconel 718 (IN718) a nerezová ocel 316L. Označení prášků se lišilo podle druhu materiálu a podle použité podložky viz tab. 3.

Tab. 3 Vlastní označení práškových tiskových materiálů

	Podložka s hloubkou drážky 1 mm	Podložka s hloubkou drážky 2 mm
Prášek MS1	220413-001-001	220413-001-002
Prášek IN718	220413-002-001	220413-002-002
Prášek 316L	220413-003-001	220413-003-002

Vlastnosti tiskového materiálu se měřily i na již vytisknutém pevném materiálu. Tento vzorek byl vyroben v Regionálním Technickém Institutu na tiskárně EOS M 290 z materiálu MS1. Jeho povrch by se měl shodovat s povrchem později měřených součástí, a tudíž mít i shodné vlastnosti. Vzorek byl nejdříve změřen na spektrometrech a poté byla na jednu jeho polovinu

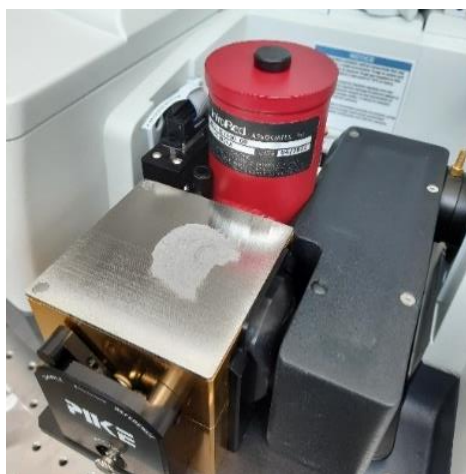
také aplikována vysokoteplotní LabIR barva. Vzorek byl označen číslem 220427-001 a lze jej vidět na obrázku 35 po aplikaci termografické barvy.



Obr. 35 Vytisknutý vzorek s nanesenou termografickou barvou

Měření tiskového materiálu metodou SNHRRT

U vzorku 220427-001 se měřila jeho hemisférická odrazivost na obou spektrometrech stejným způsobem a se stejnými parametry jako u předchozí skupiny vzorků 220301. Tiskové prášky 220413 se v rozsahu MIR měřily také se stejnými parametry. Došlo zde však ke změně při ukládání materiálu na integrační sféru. Na integrační sféru přístroje Nicolet iS50 bylo třeba umístit propustné KBr okénko, aby nedošlo k propadu prášku do sféry a jejímu znehodnocení. Do procesu měření se tímto přidal krok navíc a před změřením reference bylo třeba ještě změřit samotné okénko. Při pokládání materiálu na KBr okénko se přes jeho propustnou část nanasla vrstva prášku vysoká alespoň 2 mm a místo otáčení vzorku o azimutální úhly se prášek na okénku pouze přeuspořádal. V rozsahu UV/VIS/NIR se odrazivost prášků neměřila, jelikož přístroj Specord 210 Plus neumožňuje měření pomocí okénka a nebylo by možné prášek na sféru umístit.



Obr. 36 Ukázka měření tiskového prášku přes KBr okénko

Měření tiskového materiálu metodou EDEHT

Další zjišťovaná veličina tiskových prášků i vytisknutého vzorku byla zjištěna pomocí metody EDEHT. Tato metoda měří efektivní směrovou emisivitu v závislosti na teplotě, čímž se získá emisivita vzorku platná pro daný měřicí systém. Mezi základní části experimentálního uspořádání metody EDEHT patří zařízení pro ohřev vzorků, zařízení pro bezkontaktní měření povrchové teploty vzorku a kovová konstrukce s pohyblivým ramenem.

Před měřením se na konstrukci upevnila kamera FLIR A320 a na pohyblivé rameno se umístila FLIR A615, uspořádání viz obr. 37 a). Kamery bylo třeba zapojit do elektrické sítě a každou z nich připojit k počítači se softwarem LabIR. V programu se nastavil měřicí rozsah teplot, nastavily se parametry termogramu a cesta ukládání souboru. Použité parametry termogramu pro obě kamery lze najít v tabulce 4.

Tab. 4 Nastavené parametry termogramu v softwaru LabIR

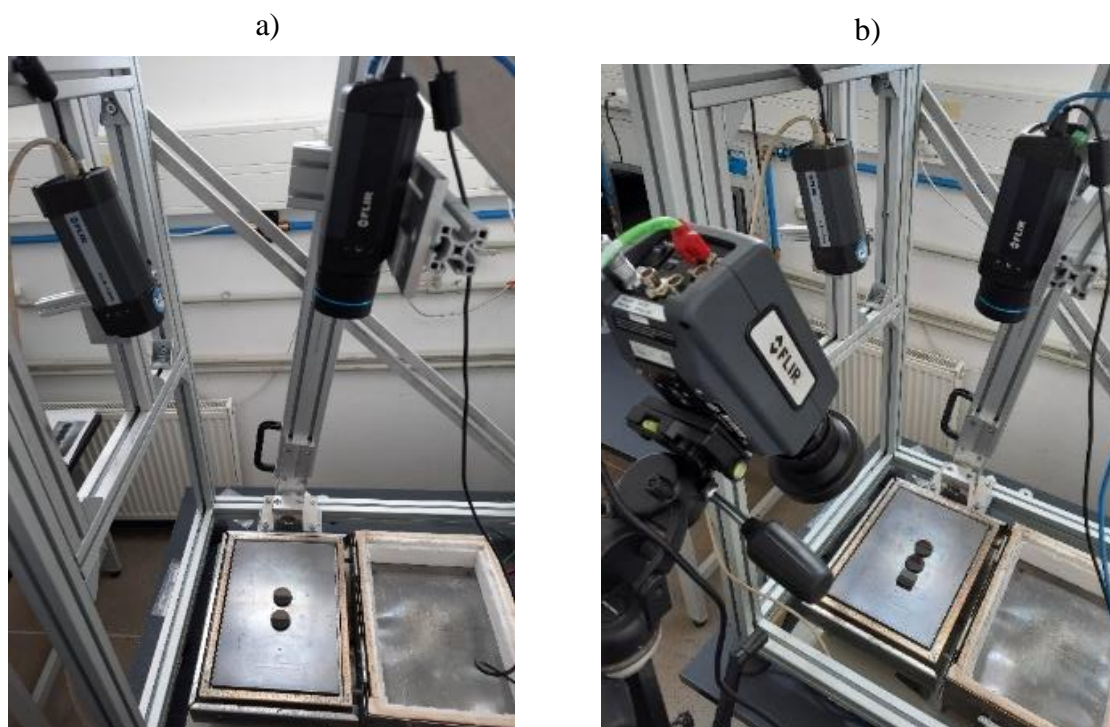
Vzdálenost	0,6 m
Relativní vlhkost	50 %
Teplota odražená	20 °C
Teplota atmosféry	20 °C
Propustnost atmosféry	1
Teplota externí optiky	20 °C
Propustnost externí optiky	1

Nastavovaná emisivita při daných teplotách byla dána výrobcem barvy, přehled jejích hodnot je znázorněn v tabulce 5.

Tab. 5 Přehled nastavovaných hodnot emisivity pro jednotlivé teploty

Teplota (°C)	100	200	300	400	500	570
Emisivita (-)	0,88	0,89	0,89	0,87	0,86	0,86

Prvním měřeným materiálem byl prášek MS1. Ten byl pomocí lžičky nasypán do již výše zmiňovaných podložek (obr. 34) a pravítkem byl zahlazen. Poté byly podložky s práškem umístěny na topnou desku a začaly se ohřívat rychlostí 3 °C za minutu. Po dosažení požadované teploty se vyčkalo 20 min na její ustálení. Během této doby se zkontrolovalo, zda jsou kamery správně zaostřeny a bylo případně provedeno doostření přes software. Po ověření, že teplota již nekolísá, bylo zahájeno samotné měření. Měření na daném úhlu začalo vždy recalibrací detektoru, a nahráním sekvence o 20 snímcích zároveň z obou kamer. Poté se pohyblivé rameno s kamerou FLIR A615 posunulo na další úhel a postup opakoval, dokud nebyly změřeny všechny úhly, konkrétně 10°, 20°, 30°, 40°, 45°, 50°, 60°, 70° a 80°. Po změření všech úhlů se vzorky nechaly na desce, její teplota se zvýšila a opět se zaznamenávalo na všechny úhlech. Po změření všech teplot 100, 200, 300, 400 °C byly podložky z desky sejmuty a prášek z nich vysypán. Následně byly podložky otryskány a byla na ně opět nanášena termografická barva pro další měření.

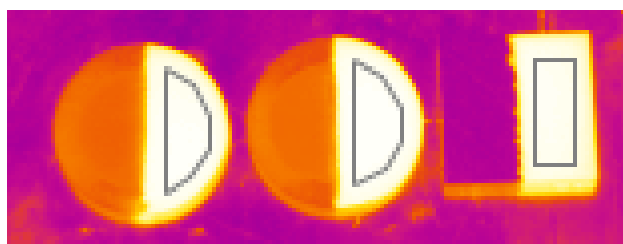


Obr. 37 Uspořádání při měření emisivity metodou EDEHT: a) s 2 kamerami, b) s 3 kamerami

Druhým měřeným práškovým materiálem byl Inconel 718 pro který byl postup totožný. Následoval materiál 316L, při jehož měření byl k podložkám s práškem přidán na topnou desku vytisknutý vzorek 220427-001. Do experimentálního uspořádání byla také přidána kamera FLIR A6751, aby byla zjištěna hodnota efektivní emisivity pro vytisknutý materiál v pásmu vlnových délek 3-5 μm . Kamera byla připevněna na stojanu a připojena k notebooku s programem FLIR ResearchIR. Uspořádání se 3 kamerami si je možné prohlédnout na obr. 37 b). Měření probíhalo obdobně jako u prvních dvou prášků. Změna nastala přidáním měřených teplot 500 a 570 $^{\circ}\text{C}$ a při měření úhlu 20°, kdy byl záznam spouštěn vždy na všech třech kamerách současně. Při měření ostatních úhlů bylo zaznamenáváno standardně pouze na kamery FLIR A320 a A615.

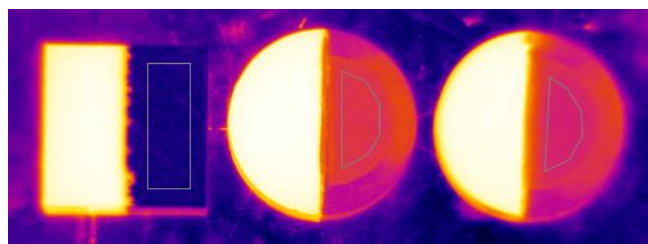
Zpracování výsledků

Zpracování dat ze spektrometrů proběhlo stejným způsobem jako u skupin vzorků s označením 220301 a 220330. Z měření metodou EDEHT byly získány termografické sekvence po 20 snímcích. Vyhodnocení začalo nahráním sekvence ze stacionární kamery FLIR A320 do softwaru LabIR. Zde byly přes části vzorků s termografickou barvou vytvořeny analýzy viz obrázky 38. Pro analýzy bylo zapnuto zjišťování minimální, maximální a průměrné hodnoty a sekvence byla vyexportována. Exportovaná data byla překopírována do hlavního excelu, kde se vypočítal časový průměr z průměrných teplot na snímcích. Výsledná průměrná teplota z vyznačených oblastí na povrchu vzorků v rámci celé sekvence se uložila a tímto způsobem se postupovalo pro všechny nahrané sekvence ze stacionární kamery.



Obr. 38 Analýzy na oblasti s termografickou barvou

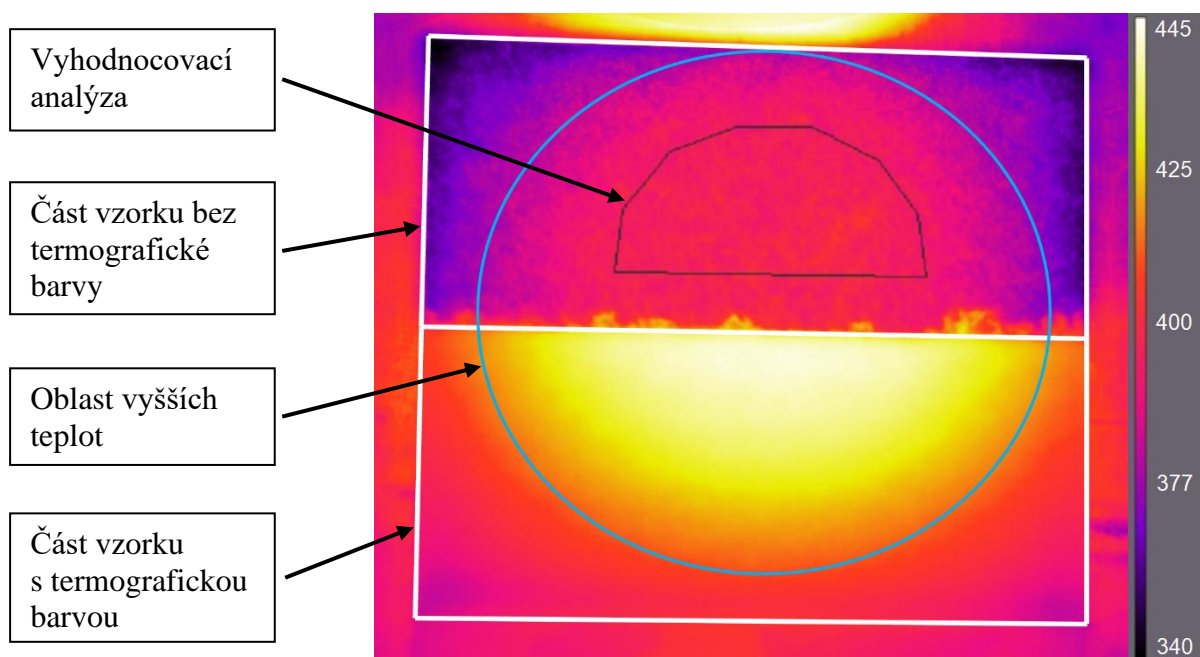
Poté byla do programu LabIR nahrána sekvence z pohyblivé kamery FLIR A615. V softwaru byly přes oblasti bez termografické barvy vytvořeny analýzy viz obr. 39. Je možné si všimnout, že vzorky jsou otočeny o 180° oproti předchozímu obrázku. Tento fakt je způsoben tím, že obrázky jsou z různých kamer, které byly otočené směrem proti sobě. U těchto analýz byla zapnuta funkce výpočtu emisivity na základě známé teploty. Zadávaná známá teplota je výsledná průměrná hodnota teploty v rámci sekvence, jejíž popis získávání je popsán v předchozím odstavci. Výsledná průměrná hodnota teploty musí být ze sekvence pro stejný úhel a teplotu jako je vyhodnocovaná sekvence. Vypočtená emisivita byla z každé analýzy na všech snímcích uložena a vyexportována do excelovského souboru. Hodnoty byly opět překopírovány do hlavního souboru, kde byl vypočten průměr z hodnot emisivity a byla získána finální hodnota efektivní emisivity pro daný materiál, úhel a teplotu. Tento postup byl proveden pro všechny naměřené úhly a teploty.



Obr. 39 Analýzy pro oblasti bez termografické barvy

Zpracování záznamů z kamery FLIR A6751 bylo prováděno v softwaru ResearchIR, jelikož tato kamera neumožňuje propojení s programem LabIR. Byla zjišťována hodnota efektivní emisivity pouze pro vytištěný vzorek při úhlu 20° a teplotách 100, 200, 300, 400 a 570 °C. Pro teplotu 500 °C nebyla data zpracována, protože došlo k poškození souboru.

Zde se postupovalo opět vytvořením analýzy půlkruhovitěho tvaru na části bez termografické barvy. Na obr. 40 je vidět vytvořená vyhodnocovací analýza na vytisknutém vzorku. Z obrázku si lze také povšimnout, že uprostřed snímku vyznačeného modrou elipsou se nachází vyšší teploty než na jeho krajích. Tento efekt byl způsoben použitím u kamery objektivu s ohniskovou vzdáleností 100 mm a distančního kroužku s výškou 1,27 cm. Pro výpočet emisivity byla zvolena zmíněná oblast uprostřed snímku. Při termovizním měření povrchové teploty s touto kamerou je vyhodnocená emisivita správná pouze pro tuto oblast uprostřed snímku. Použitím této hodnoty emisivity i pro oblasti mimo středu snímku budou vyhodnocené povrchové teploty zatíženy chybou. Vliv tohoto jevu se zmenšuje při záznamu s nižším rozlišením, jelikož dojde k oříznutí krajů snímku a oblast vyšších teplot zabírá následně větší podíl snímku. Z vytvořené analýzy se nechala počítat průměrná hodnota teploty pro každý snímek a tyto data byly exportovány do .csv souboru. Z průměrných teplot pro každý snímek se dále udělal průměr hodnot a tím byla získána průměrná teplota sekvence ve vybrané oblasti. Program FLIR ResearchIR neumí počítat a exportovat emisivitu automaticky pro všechny snímky ze sekvence. V sekvenci se tedy našel snímek, který nejlépe odpovídal průměrné teplotě v rámci sekvence a z něj byla emisivita počítána. Do výpočtu byla zadána skutečná teplota na vzorku zjištěná ze stacionární kamery FLIR A320 pro vzorek 220427-001, úhel 20° a danou teplotu.



Obr. 40 Popis oblastí na vytisknutém vzorku 220427-001

4.2.3. Měření teplot na 3D tiskárně

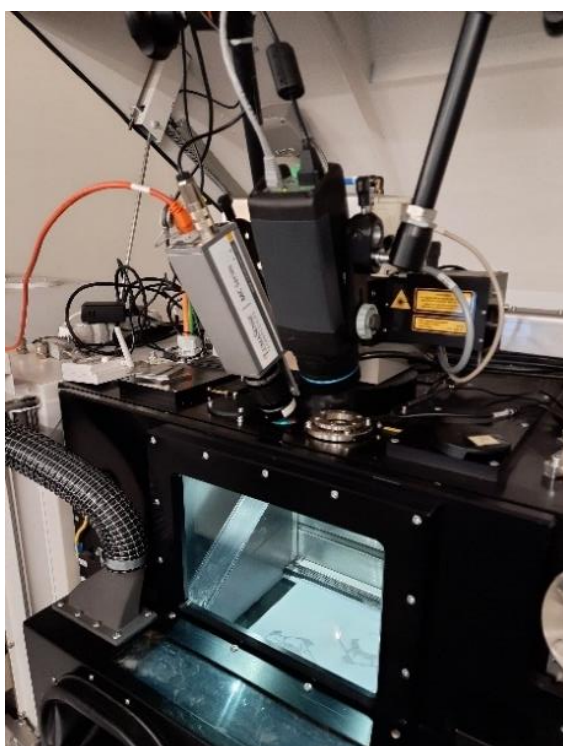
Postup

Před začátkem měření, které probíhalo v RTI, byly kamery upevněny pomocí ramenových držáků nad průzory v tiskárně EOS M 290. Kamery byly zapojeny do sítě a notebooků, kde byly připojeny k příslušným softwarům. Dále byla pozice kamer laděna tak, aby snímaly pravou zadní část pracovního prostoru tiskárny. K tomu bylo využito při prvním experimentu infračervené diodou vyzařující záření o vlnových délkách okolo 1 μm . Při druhém experimentu byly

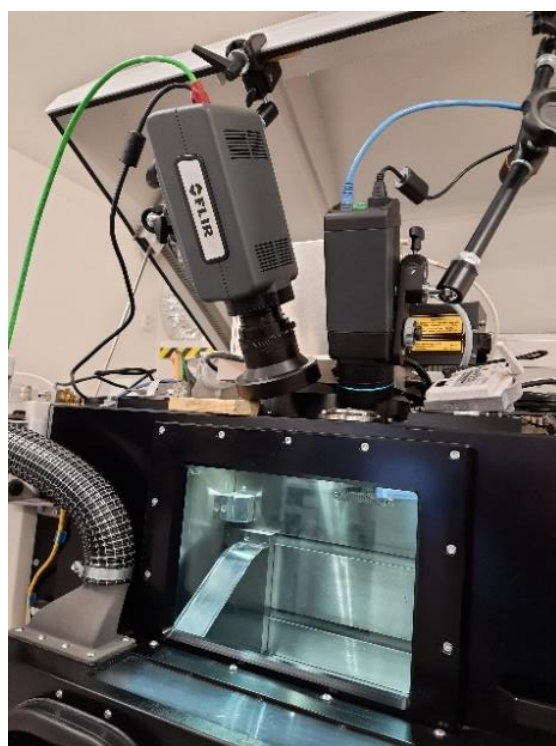
použity kamery, které neumí zachytit záření na vlnové délce diody, proto bylo k určení pozice kamer využito nahřáté pájky. Diodou či pájkou se pohybovalo nad tiskovou plochou a na počítačích se sledoval obraz kamer, kde bylo posuzováno, zda snímají žádanou oblast. Tímto způsobem se vyladila pozice kamer a také byly podle diody nebo pájky umístěných těsně nad tiskovou plochou zaostřeny. Bez využití těchto přístrojů by to nebylo možné, protože například kamera MIKRON MCS640 měří teploty od 673 °C a bez infračervené diody by nebylo možné zjistit, jakou plochu kamera snímá a ani kameru zaostřit. Proces ostření bylo nutné provést před začátkem tisku, protože poté se tisková komora uzavře a nelze do ní zasahovat.

Měření probíhalo ve dvou experimentech. Při prvním experimentu byl zaznamenáván proces tisku frézovací hlavy a během následujícího týdne byl nahráván jiný tisk stejného modelu se stejnými tiskovými parametry. Během prvního experimentu byla použita kamera MIKRON MCS640 a FLIR A615 viz obr. 41 a) a při druhém experimentu bylo využito kamery FLIR A6751 spolu s FLIR A615, jejichž uspořádání lze nalézt na obr. 41 b).

a)



b)



Obr. 41 Experimentální uspořádání kamer při měření teplot 3D tisku: a) kamera MIKRON MCS640 a FLIR A615, b) kamera FLIR A6751 a FLIR A615

Celý průběh tisku trval přibližně 48,7 h a při jeho nahrávání by vzniklo velmi velké množství dat náročné na zpracování a bez značného přínosu. Proto byly vybrány jen 3 tiskové řezy (A, B, C), ve kterých se zaznamenávaly konkrétní tiskové výšky 27,16 mm (vrstva 680), 33,24 mm (vrstva 832), 67,6 mm (vrstva 1691). Tyto vrstvy byly označeny v řezu za hlavní. Tloušťka jedné vrstvy činí 40 μ m. Pro přehlednost jsou údaje shrnuty v tabulce 6.

Tab. 6 Přehled vybraných řezů a k nim odpovídajících hlavních vrstev a výšek tisku

Řez	A	B	C
Vrstva	680	832	1691
Výška tisku (mm)	27,16	33,24	67,60

Tyto vrstvy byly zvoleny na základě jejich rozdílných geometrií obsahujících úzké i široké části zajímavé pro prezentaci výsledků. Na obrázku 42 lze vidět zvolené výšky tisku frézovací hlavy po působení laseru vyfocené přes přední průzor tiskárny během procesu tisku. Mezi vybranými řezy bylo nimi několika hodinové rozpětí. Záznam vrstev byl prováděn ručním spuštěním, tudíž bylo nutné se vždy na měření dostavit do RTI. Jelikož není předem přesně daná rychlost tisku, bylo nahráváno 5 dalších vrstev před i po hlavní vrstvě řezu. Tím byla zvýšena šance na zaznamenání alespoň jedné shodné vrstvy z každého řezu všemi kamerami při obou experimentech. Kromě záznamu vybraných řezů byl na kameře FLIR A615 zapnut periodický záznam, který spustil nahrávání v pravidelných intervalech 30 min s dobou záznamu 5 min.



Obr. 42 Zaznamenávané vrstvy (zleva 680, 832, 1691)

Jak již bylo zmíněno v prvním experimentu se měřilo pomocí kamery MIKRON MCS640, jejíž záznam byl spouštěn prostřednictvím softwaru LumaSpec RT. Byl nastavený nejnižší teplotní rozsah, pro který využitá kamera zobrazovala teploty 673-1530 °C. Nastavená emisivita byla 1, jelikož při záznamu není třeba znát její reálnou hodnotu a propustnost 0,5 z důvodu použití dvou filtrů. Na měření vrstvy 680 byl použit objektiv kamery s ohniskovou vzdáleností 25 mm a frekvence měření byla nastavena na 60 Hz. Poté se usoudilo, že viditelnost laserového paprsku je malá a došlo k výměně objektivu za typ s ohniskovou vzdáleností 75 mm, navíc byla frekvence záznamu snížena na 55 Hz.

FLIR A615 snímala v rozsahu 100-650 °C za použití objektivu se zorným úhlem 15°. Kamera byla ovládána pomocí softwaru LabIR, ve kterém se ponechaly jeho výchozí parametry pro měření (emisivita 0,92 a propustnost 1). Pro vyhodnocení byly poté použity parametry jiné, viz oddíl 4.2.4. Frekvence snímání kamery byla závislá na použité kombinaci s počítačem, při experimentech bylo nahráváno s hodnotou okolo 11 Hz. Na úvod experimentu byly provedeny testovací měření, při kterých byl použit rozsah -20-150 °C.

Při druhém experimentu byla kamera FLIR A615 nastavena stejně s tím, že po celou dobu byl zvolen rozsah 100-650 °C. Se stejnými parametry byl navíc spuštěn periodický záznam, který kromě přerušení kvůli měření zvolených řezů probíhal od začátku až do konce tisku v intervalech 30 min s dobou záznamu 5 min.

Termovizní kamera FLIR A6751 byla ovládána prostřednictvím programu FLIR ResearchIR. Pro měření byl vybrán rozsah ND2 500-1200 °C, který poskytoval nejvíce signálu a v tomto rozsahu má kamera integrační čas 0,0664 ms. Záznamy byly prováděny s hodnotou emisivity 0,92 a propustnosti 1, pro vyhodnocení byly parametry změněny, viz oddíl 4.2.4. Na kameře byl nainstalován objektiv s ohniskovou vzdáleností 100 mm a filtr ND2. Aby došlo ke snížení minimální fokusační vzdálenosti, byl použit distanční kroužek s výškou 0,5" (1,27 mm). Měření probíhalo nahráním 3 sekvencí vrstev s rozlišením 320 x 256 pixelů a frekvencí 407Hz. Poté se změřilo 5 vrstev, z nichž prostřední byla hlavní vrstva řezu, s rozlišením 640 x 512 pixelů a frekvencí 125 Hz. Následovaly opět 3 tiskové výšky s rozlišením 320 x 256 a na závěr se zaznamenávala jedna vrstva s frekvencí 1070 Hz a rozlišením 160 x 128 pixelů. V sadě měřených

tiskových výšek řezu C byla na konci navíc změřena jedna vrstva s frekvencí 2082 Hz a velikostí snímků 80 x 64 pixelů. Pro dodatečné informace se rozsah změnil na ND2 700-1500 °C, se kterým byly zachyceny čtyři vrstvy různými frekvencemi snímání (125, 407, 1070, 2082 Hz).

Vyhodnocení

Software LumaSpec RT dodávaný s kamerou MCS640 neumožňuje použití pokročilých funkcí, proto bylo třeba záznamy zpracovat mimo jeho prostředí. Tento software však neumožňuje automatické postupné vyexportování všech snímků do .csv souborů. Snímky bylo třeba exportovat ručně jeden za druhým. Protože tato činnost je opakovaná a velmi zdoluhavá (3462 snímků v jedné sekvenci), byl pro její provedení využit software AutoMouser. Program umožňuje libovolně naprogramovat kliky myši a klávesnice a tím zastat periodickou práci. Dále bylo v Excelu vytvořeno makro, které na jednotlivé snímky aplikuje funkci HoldMax. Tato funkce získává jeden snímek, kde jsou zobrazeny nejvyšší teploty v každém místě z celé sekvence. Funkce na principu porovnávání teplotních matic snímků a zachová vždy pouze vyšší hodnotu teploty pro daný pixel. Software LumaSpec RT neumožňuje následnou úpravu parametrů sekvence jako je emisivita a propustnost, tudíž na získané HoldMax matici v excelovských souborech bylo třeba aplikovat další makro, které přepočítá teploty na základě správné emisivity a propustnosti. Matice s přepočítanými teplotami ve formátu .csv byly následně nahrány do softwaru LabIR, kde byla upravena teplotní stupnice a snímek byl vyexportován ve formátu .png.

Postup vyhodnocení pro záznamy z kamery FLIR A6751 začíná nahráním sekvence do programu ResearchIR, kde se nastavily parametry měření (ϵ , τ) a byl přidán filtr Max – Continuous (obdoba HoldMax, pouze jiný název). Následně se nechal záznam přehrát a výsledný snímek byl vyexportován do formátu .csv. Tento soubor byl poté nahrán do programu LabIR pro sjednocení vizuálního stylu snímků ze všech kamer. Po úpravě teplotních škál byly snímky exportovány ve formátu .png souboru.

Vyhodnocení záznamů z kamery FLIR A615 bylo prováděno v softwaru LabIR. Nejdříve byla vyhodnocovaná sekvence, pro níž byl přidán filtr Držet maximum (funkce HoldMax) a záznam byl přehrán. Tím byl získán jeden snímek s maximální teplotou z nahrávky pro každý pixel, který se vyexportoval jako obrázek typu .png. Dále byly na tomto snímku byly vytvořeny teplotní profily zobrazující teplotu na snímku pro jejich jednotlivé pixely. Teploty z profilů byly exportovány do .csv souborů. Následně se filtr Držet maximum odstranil a byly vytvořeny útvary pro vyhodnocení teploty z dané oblasti v čase, které byly opět vyexportovány do .csv souborů. Poslední prováděnou činností bylo přehrání sekvence a nalezení snímku se zachycenou vhodnou teplotní stopou a její export do .png souboru.

4.2.4. Příprava parametrů pro vyhodnocení měření teploty při 3D tisku

Pro přesné měření pomocí termovizních kamer je třeba znát emisivitu objektu a propustnost prostředí. Níže jsou popsány metody zjištění a důvody pro použití konkrétních hodnot emisivity a propustnosti pro jednotlivé měřicí systémy, které byly poté využity pro vyhodnocení naměřených sekvencí.

Emisivita

Kamera MIKRON MCS640 je citlivá na záření o vlnových délkách 760-1100 nm. V použité konfiguraci byly použity filtry FEL850 a FES100, které toto rozmezí omezily na 850-1000 nm. V rozsahu těchto vlnových délek se z materiálu MS1 měřila spektrální normálová hemisférická odrazivost za pokojové teploty metodou SHNRRT pouze pro vzorek 220427-001. Měření efektivní směrové emisivity za vysoké teploty metodou EDEHT nebylo možné provést, protože

zmíněná kamera snímá teploty nad 673 °C, při nichž docházelo u materiálu již k oxidaci. Nabízela se tedy jiná možnost než použít spektrální emisivitu vypočítanou z metody SNHRRT. Konkrétně byla využita hodnota pásmové emisivity pro rozsah 850-1000 nm, která činí 0,88. Získaná emisivita nebude přesně odpovídat skutečné hodnotě, jelikož se měřilo za pokojové teploty a získaná emisivita je spektrální čili nezapočítává citlivost detektoru. I výraznější změna emisivity by však na zmiňované vlnové délce způsobila malou změnu na výsledné teplotě.

Pro kameru FLIR A6751, a tedy spektrální rozsah 3-5 μm , je možné použít spektrální emisivitu práškového materiálu, spektrální emisivitu vytisknutého materiálu či jeho efektivní emisivitu pro danou teplotu a úhel. V případě volby spektrální emisivity práškového materiálu by bylo možné přesněji vyhodnotit teplotu okolního prášku během tisku, což nebylo záměrem. Při použití spektrální emisivity pro vytisknutý materiál by byly vyhodnoceny teploty blíže skutečnosti na již vytisknuté části vrstvy dílu. V obou zmíněných případech ale není započítána citlivost měřicí kamery. Z toho důvodu je vhodné použít hodnotu efektivní směrové emisivity, která činí 0,77. Její hodnota byla vybrána pro úhel 20°, protože pod takovým úhlem byla kamera nastavena při snímání tisku, a pro teplotu 400 °C, jelikož to je nejvyšší teplota, do které tiskový prášek MS1 nezačal na vzduchu oxidovat. Nižší teploty nebyly zauvažovány, protože byla snaha zjistit co nejpřesněji teplotu v okolí laserovém spotu.

V pásmu vlnových délek 7-14 μm , ve kterém měří kamera FLIR A615 bylo možné využít stejných emisivit jako u předchozí kamery. Je zde navíc známá efektivní směrová emisivita pro tiskový prášek. Tato kamera snímá s nízkým rozsahem teplot, tudíž je možné zaznamenat teploty prášku. Z toho důvodu byla pro práškový materiál využita tato emisivita s hodnotou 0,47. Pro vytisknutý vzorek 220427-001 byla opět využita hodnota efektivní emisivity, která pro zmiňovaný spektrální rozsah činí 0,28. Získanou emisivitu podkládá i pásmová absolutní emisivita vytisknutého vzorku v rozsahu 7-14 μm se stejnou hodnotou.

Přehled vyhodnocených hodnot emisivity pro jednotlivé vzorky a jednotlivé měřicí metody se nachází v kapitole 5.1. Hodnoty emisivity využité pro vyhodnocování termovizních měření jsou uvedeny v tabulce 7.

Tab. 7 Přehled získaných hodnot emisivity

Kamera	MIKRON MCS640	FLIR A6751	FLIR A615
Emisivita ϵ vzorku (-)	0,88	0,77	0,28
Emisivita ϵ prášku (-)	-	-	0,47

Propustnost

Během 3D tisku metodou DMLS je v pracovní komoře napuštěn inertní plyn, aby se zabránilo oxidaci tiskového materiálu. Z tohoto důvodu není možné sledovat tiskový proces přímo, ale je třeba využít průzor se okénkem, který však omezuje propustnost záření.

Kamera MIKRON MCS640 zaznamenávala proces tisku přes okénko z křemenného skla. Dle Fresnelových rovnic bylo vypočítáno, že sklo odebírá 4% záření na každém rozhraní, tudíž propustnost okénka činila 0,92. V optice kamery byly použity dva filtry, jenž snižují propustnost záření na 0,5. Pronásobením hodnoty propustnosti okénka a filtrů byla získána celková propustnost systému 0,46.

S kamerou FLIR A6751 bylo použito okénko z germania. Jeho propustnost nebyla známá a pro její zjištění bylo provedeno měření s černým tělesem BB-4A, na kterém byly postupně nastavovány teploty 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 a 950 °C. Ve vzdálenosti 50 cm od černého tělesa byla umístěna zmíněná termovizní kamera. Na každé teplotě byly kamerou provedeny dva záznamy 20 snímků. Při jednom ze záznamů bylo před objektivem umístěné využívané

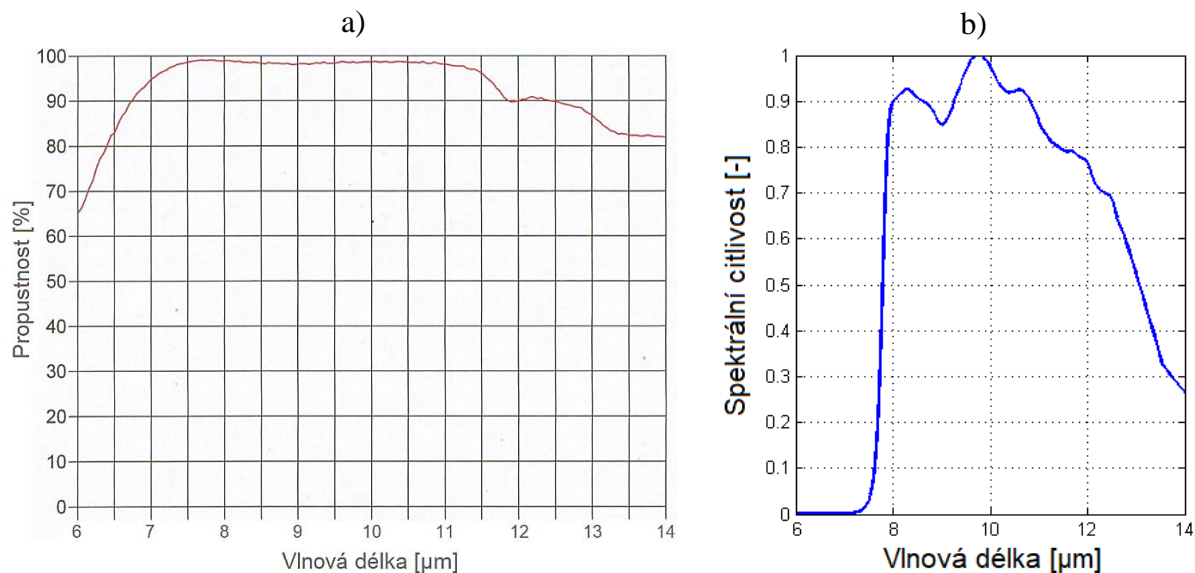
okénko z germania a pro druhý záznam bylo odebráno. Získané dvě sekvence bylo třeba následně vyhodnotit.

Na sekvenci měřené bez Ge okénka byla vytvořena kruhová analýza a z ní získána průměrná teplota pro každý snímek. Průměrná teplota každého snímku se dále zprůměrovala a byla získána průměrná teplota sekvence. Poté byl otevřen záznam měřený s použitím Ge okénka a zde se měnila v parametrech propustnost, dokud vyhodnocená teplota černého tělesa na záznamu neodpovídala průměrné teplotě ze sekvence bez okénka. Záznamy byly prováděny při emisivitě 0,99, což odpovídá emisivitě vyzařovací plochy použitého černého tělesa. Získaná hodnota propustnosti na dané teplotě a použitém teplotním rozsahu byla zaznamenána do tabulky 8. Propustnost v jednotlivých teplotních rozsazích byla zprůměrována a tím byla získána výsledná hodnota propustnosti pro Ge sklíčko 0,95.

Tab. 8 Přehled hodnot propustnosti pro Ge sklíčko v rozsahu 3-5 μm

Teplota ($^{\circ}\text{C}$)	300	400	500	600	700	800	900	950
Propustnost $\tau_{250-600\text{ }^{\circ}\text{C}}$ (-)	0,960	0,950	0,950	0,950	-	-	-	-
Propustnost τ (-)	-	-	0,950	0,950	0,945	0,950	0,943	0,947
Propustnost τ (-)	-	-	-	-	0,950	0,950	0,950	0,950

V průzoru před kamerou FLIR A615 bylo při tisku také umístěno germaniové sklíčko, avšak od jiného výrobce. Sklíčko nese označení GEW-404 a bylo vyrobeno firmou UQG Optics Ltd. Ke sklíčku je z dostupný graf propustnosti v závislosti na vlnové délce viz obr. 43 a). Při jeho porovnání s grafem spektrální citlivosti kamery na obr. 43 b) bylo možné usoudit, že v rozsahu, kdy je kamera nejvíce citlivá vykazuje sklíčko propustnost přibližně hodnotu 0,98. Je zřejmé, že u vyšších vlnových délek propustnost klesá. Zároveň však klesá i spektrální citlivost kamery, a tudíž tyto hodnoty propustnosti mají malý vliv na výslednou propustnost. Na základě této úvahy byla propustnost sklíčka zvolena zmíněných 0,98.



Obr. 43 a) závislost propustnosti sklíčka GEW-404 na vlnové délce [37], b) citlivost detektoru kamery FLIR A615 v závislosti na vlnové délce [38]

Tabulka 9 shrnuje výsledné hodnoty propustností pro použité měřicí systémy.

Tab. 9 Přehled propustností pro použité měřicí systémy

Kamera	MIKRON MCS640	FLIR A6751	FLIR A615
Propustnost (-)	0,46	0,95	0,98

5. Výsledky a diskuze

Výsledky jsou rozděleny do podkapitol na vlastnosti LabIR barvy před a po tepelném zatěžování, vlastnosti tiskového materiálu a povrchové teploty u procesu 3D tisku. Podkapitoly jsou dále rozčleněny na oddíly podle použitých metod a přístrojů.

5.1. Vlastnosti LabIR barvy před a po tepelném zatěžování

Změny vlastností termografické LabIR barvy před a po tepelném zatěžování byly sledovány vizuálně a pomocí spektrometrů v rozsazích UV/VIS/NIR a MIR.

Jednotlivé měřené sady obsahovaly 5 kusů vzorků, které se za číslem sady rozlišovaly trojmístným číslem. Získané hodnoty z měření byly pro sadu počítány jako průměr z jejich vzorků. Přehled měřených sad vzorků s teplotami jejich zatěžování shrnuje tabulka 10.

Tab. 10 Přehled měřených vzorků a teplot zatěžování

Sada vzorků	Teplota zatěžování (°C)	Druh zatěžování
220301-001	100	topná deska
220301-002	200	topná deska
220301-003	300	topná deska
220301-004	400	topná deska
220301-005	500	pec
220301-006	600	pec
220301-007	700	pec
220301-008	800	pec
220301-009	900	pec
220301-010	1000	pec
220330-001	500	laser
220330-002	700	laser
220330-003	900	laser

5.1.1. Vizuální změny na vzorcích

U některých vzorků s aplikovanou termografickou barvou LabIR HERP-HT-MWIR-BK-11 pro vysokoteplotní aplikace bylo možné po tepelném zatěžování zaznamenat vizuální změny na jejich povrchu v porovnání s výchozím stavem.

Od teploty 600 °C začalo docházet k tvorbě jemného bílého filmu na povrchu vzorků. Vznik této vrstvy byl způsoben teplotní reakcí barvy a jejím vypalováním. Všechny vzorky byly měřeny tak, jak byly vytaženy z pece. Bílý povlak se tudíž nesmýval a bylo s ním uvažováno ve výsledných závislostech získaných z měření. Na obr. 44 lze porovnat zástupce sad zatěžovaných na teplotu 500 °C až 1000 °C. V závislosti na teplotě si lze všimnout zvětšující se bílého filmu na povrchu vzorku, kdy při teplotě zatěžování 500 °C není povlak pozorovatelný až po teplotu 1000 °C, kde vznikla výrazná bílá vrstva. Z obrázku je dále u vzorků 220301-009-004 a 220301-010-004 patrný vznik delaminace barvy ve formě puchýřků, který byl charakteristický všechny zatěžované vzorky nad 800 °C. Při narušení těchto puchýřků začalo docházet k odpadávání barvy.

220301-005-004 220301-006-004 220301-007-004 220301-008-004 220301-009-004 220301-010-004



Obr. 44 Vzorky 220301-005-004 až 220301-010-004 po tepelném zatěžování v peci

K delaminaci barvy došlo i u sady 220330-003, která byla tepelně zatěžovaná laserem. Zde se vytvořilo velké množství miniaturních puchýřků, které však nebyly tak viditelné a neměly tendenci praskat. I přes to také došlo k oddělování barvy od podkladového materiálu a jejímu odpadávání. Na obrázku 45 si je možné tuto sadu po zatěžování prohlédnout. Snímek byl pořízen až po druhém SNHRRT (MIR) měření sady a u prostředního vzorku z obrázku stačilo již dojít k odloupení barvy během manipulace. U krajních vzorků si bylo v důsledku vytvoření puchýřků možné povšimnout zvýšené drsnosti povrchu. Při porovnání skupin 220301 (pec) a 220330 (laser) bylo vyzorováno, že u laserovém zatěžování nedochází k tak výrazné tvorbě bílého povlaku jako při zahřívání vzorků v uzavřené peci. U sady 220330-003 zatížené laserem na 900 °C byla tato vrstva menší než například u sady 220301-006 zatížené v peci na 600 °C.

220330-003-001

220301-003-002

220301-003-003



Obr. 45 Sada 220330-003 po laserovém tepelném zatěžování

Barva je navrhovaná pro úpravu emisivity povrchu a následné změření teploty. Vzhledem k tomu, že při teplotě 900 a 1000 °C došlo následně k odlupování barvy nezávisle na metodě tepelného zatěžování, je možné usoudit, že vysokoteplotní barva LabIR není vhodná pro aplikace při teplotě ≥ 900 °C s dobou zatěžování delší než 1 h. Ovlivnit delaminaci barvy může i použitý podkladový materiál, kterým v tomto případě byl ČSN 17153.

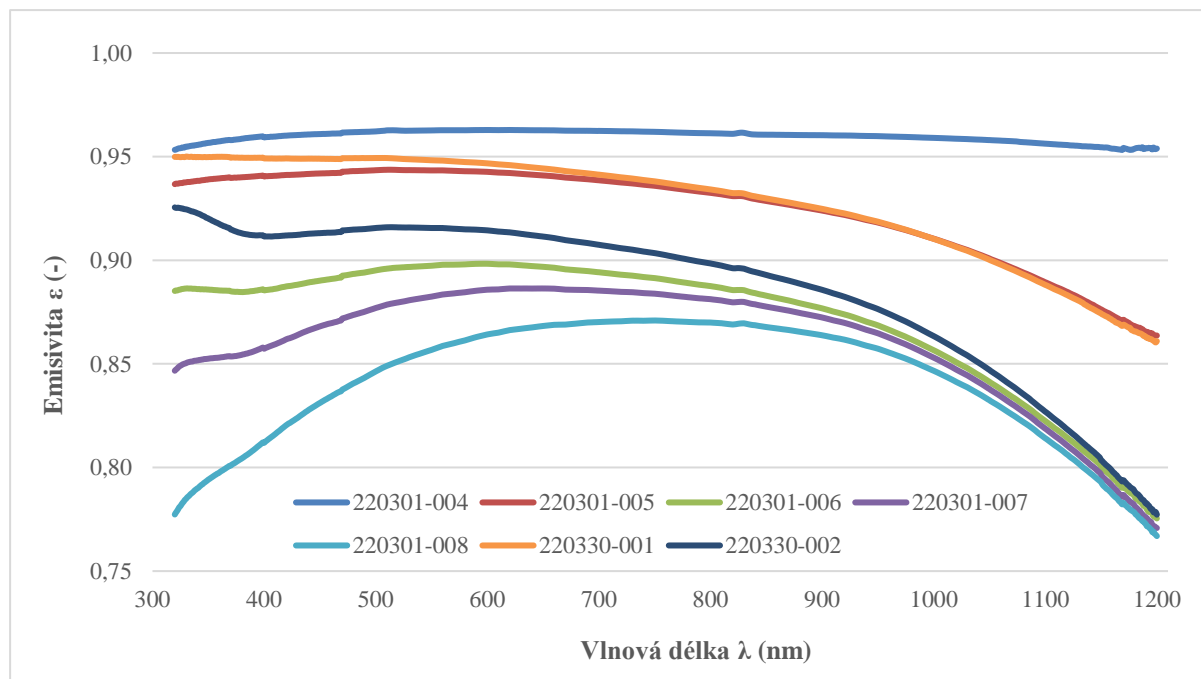
5.1.2. Změna emisivity LabIR barvy v rozsahu UV/VIS/NIR

V tabulce 11 lze nalézt pásmové emisivity pro spektrální rozsah 850-1000 nm před a po zatěžování. Hodnoty byly vypočítané na základě dat získaných metodou SNHRRT za pokojové teploty. Z hodnoty emisivity před zatěžováním (ϵ_1) a po zatěžování (ϵ_2) na dané teplotě zatěžování (T_z) byl vypočítán jejich absolutní ($\Delta\epsilon_a$) a relativní rozdíl ($\Delta\epsilon_r$).

Tab. 11 Vypočítané hodnoty pásmové emisivity a rozdílů v rozsahu 850-1000 nm

Sada vzorků	T _z (°C)	ε ₁ (-)	ε ₂ (-)	Δε _a (-)	Δε _r (%)
220301-001	100	0,959	0,960	0,002	0,2
220301-002	200	0,960	0,962	0,002	0,2
220301-003	300	0,959	0,961	0,002	0,2
220301-004	400	0,961	0,964	0,003	0,3
220301-005	500	0,959	0,914	-0,046	-4,8
220301-006	600	0,960	0,861	-0,099	-10,3
220301-007	700	0,960	0,858	-0,102	-10,7
220301-008	800	0,961	0,851	-0,110	-11,5
220301-009	900	0,961	-	-	-
220301-010	1000	0,961	-	-	-
220330-001	500	0,961	0,914	-0,047	-4,9
220330-002	700	0,958	0,869	-0,089	-9,3
220330-003	900	0,960	-	-	-

U sad 220301-001 až 220301-004 nebyly po tepelném zatížení zpozorovány žádné vizuální rozdíly. Ke značné změně nedošlo ani u jejich spektrálních průběhů, a tudíž i pásmové emisivity. Od sady vzorků 220301-005 již začala pásmová emisivita klesat. Jak se u těchto sad vzájemně lišily spektrální průběhy emisivity vystihuje graf na obrázku 46. Do grafu byl přidán i průběh u sady 220301-004 jako reference výchozího stavu vzorků před zatěžováním, který je zároveň pro první 4 sady shodný se stavem po zatěžování.



Obr. 46 Graf srovnávající spektrální emisivitu vzorků po zatěžování

S rostoucí teplotou zatěžování dochází k většímu poklesu emisivity v celém měřeném spektru. Oproti výchozímu stavu vyznačeném na vzorku 220301-004 došlo u 220301-005 k významnějšímu poklesu zejména u vyšších vlnových délek. Sada 220301-006 dále vykazuje přibližně stejný pokles v celém rozsahu. U vzorků 220301-007 a 220301-008 narůstá rozdíl hlavně u

nižších vlnových délek. S rostoucí vlnovou délkou se odchylky posledních 3 zmíněných sad mezi sebou zmenšují a v oblasti 1,1-1,2 μm se jejich hodnoty téměř shodují. Z tohoto důvodu vykazují i pásmové emisivity podobnou hodnotu, protože jsou počítány z rozsahu 850-1000 nm, kde jsou křivky již blízko u sebe. Data ze sad 220301-009, 220301-10 a 220330-003 nebylo v tomto spektrálním rozsahu možné získat. Jak již bylo v oddílu 4.2.1. zmíněno, bylo to z důvodu odpadávaní aplikované termografické barvy.

Křivka sady 220330-001 v grafu na obr. 46 odpovídá křivce sady 220301-005 s minimální odchylkou. Na vlnové délce 320 nm se emisivita liší o 0,013 a v oblasti, ze které se počítá pásmová emisivita, je již jejich průběh totožný. Obdobně tomu tak je u sady 220330-002 zatěžované na 700 °C. U ní lze také vypočítat vyšší hodnoty emisivity než u její alternativy 220301-007 zatěžované v peci, a to s větším rozdílem. U nižších vlnových délek činí odchylka hodnot přibližně 0,08, dále se jejich křivky opět sbíhají, tudíž se výsledná pásmová emisivita liší pouze o 0,01. Při teplotě 500 °C, kdy nedocházelo k tvorbě povlaku na vzorcích jsou odchylky mezi vzorky zatěžovanými v peci a laserem malé. Na teplotě 700 °C, kde se bílá vrstva začala již objevovat jsou rozdíly značně větší. Dá se tedy předpokládat, že pokles emisivity v oblasti nižších měřených vlnových délek byl způsoben filmem na povrchu vzorků. Pro ověření tohoto tvrzení by bylo nutné změřit vzorky znovu po umytí povlaku.

5.1.3. Změny emisivity LabIR barvy v rozsahu MIR

Tabulka 12 obsahuje vypočítané pásmové efektivy pro rozsahy vlnových délek 3-5 μm a 7-14 μm . Použitou metodou pro získání dat byla metoda SNHRRT a veličiny zde označeny stejně jako u tabulky 9.

Tab. 12 Vypočítané hodnoty pásmové emisivity a rozdílů v rozsahu 3-5 a 7-14 μm

Sada vzorků	T_z (°C)	Rozsah 3-5 μm				Rozsah 7-14 μm			
		ϵ_1 (-)	ϵ_2 (-)	$\Delta\epsilon_a$ (-)	$\Delta\epsilon_r$ (%)	ϵ_1 (-)	ϵ_2 (-)	$\Delta\epsilon_a$ (-)	$\Delta\epsilon_r$ (%)
220301-001	100	0,944	0,945	0,001	0,1	0,930	0,931	0,002	0,2
220301-002	200	0,948	0,947	-0,001	-0,1	0,932	0,931	-0,000	-0,0
220301-003	300	0,945	0,943	-0,002	-0,3	0,930	0,930	-0,000	-0,0
220301-004	400	0,949	0,939	-0,009	-1,0	0,932	0,938	0,006	0,7
220301-005	500	0,947	0,761	-0,186	-19,6	0,934	0,939	0,006	0,6
220301-006	600	0,946	0,667	-0,279	-29,5	0,937	0,941	0,003	0,3
220301-007	700	0,946	0,566	-0,381	-40,2	0,936	0,939	0,003	0,3
220301-008	800	0,947	0,587	-0,360	-38,0	0,934	0,952	0,018	1,9
220301-009	900	0,946	0,773	-0,173	-18,2	0,932	0,978	0,046	5,0
220301-010	1000	0,946	0,905	-0,041	-4,3	0,932	0,982	0,050	5,4
220330-001	500	0,94	0,789	-0,155	-16,4	0,931	0,939	0,008	0,8
220330-002	700	0,94	0,632	-0,307	-32,7	0,936	0,933	-0,003	-0,3
220330-003	900	0,94	0,576	-0,365	-38,8	0,932	0,933	0,001	0,1

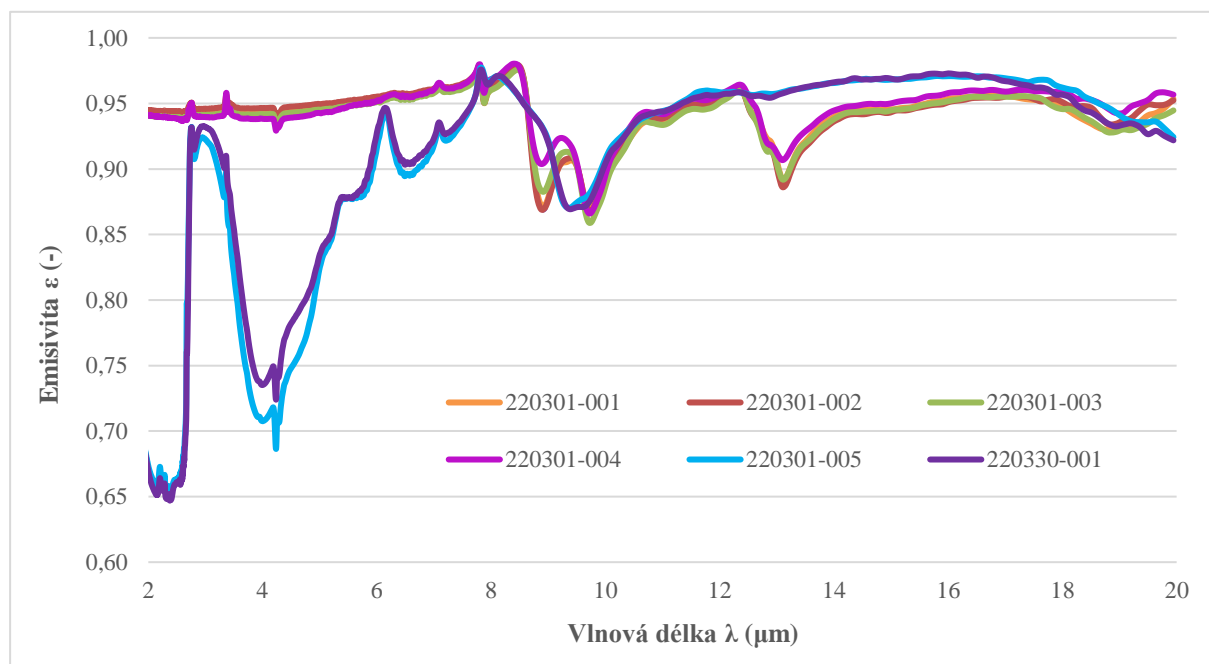
U skupiny vzorků 220301 v pásmu vlnových délek 3-5 μm do 400 °C včetně vychází pásmová emisivita před zatěžováním obdobně jako po něm. U vzorků lze pozorovat mírnou klesající tendenci až po hodnotu relativního rozdílu 1% u vzorku 220301-004, což je v rámci nejistoty měření. Od vyšších teplot pak začíná pásmová emisivita výrazně klesat. Při teplotě 800 °C se

vývojová tendence mění a v důsledku tvorby puchýřků na vzorcích následně emisivita s rostoucí teplotou stoupá.

Tento trend nebyl potvrzen skupinou vzorků 220330. Rozdíl relativních odchylek skupiny zatěžované v peci a laserem při teplotě 500 °C činí 3,2%. Na teplotě 700 °C rozdíl vyrostl na 7,5% a u teploty 900 °C se dále zvětšil až na 20,6%. Vzájemné zvyšující se odchylky mezi sebou odpovídají narůstající bílé vrstvě prášku na vzorcích. Pro ověření získaných výsledků by bylo třeba provést měření s umytými vzorky. Velký rozdíl na teplotě 900 °C mezi skupinami vzorků mohl být zřejmě způsoben změřením puchýřků.

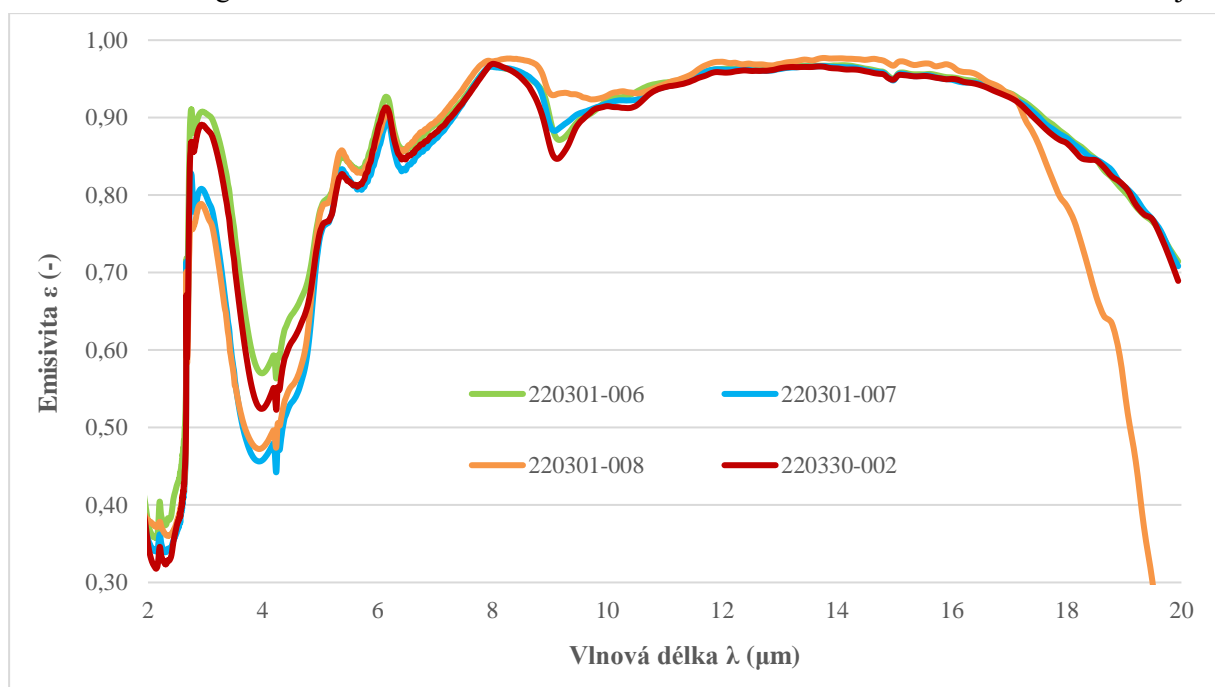
V rozsahu vlnových délek 7-14 μm nedocházelo k výrazným změnám emisivity mezi zatěžovanými teplotami. U většiny vzorků se relativní rozdíl pohyboval do 1%. Výjimku tvoří sady 220301-008 s relativním rozdílem 1,9% a sady 220301-009 i 220301-010, kde tato hodnota činila 5 a 5,4%. Lze předpokládat, že nárůst rozdílu byl způsoben vlivem vyšší teploty a rostoucí vrstvou bílého povlaku. V tomto spektrálním rozsahu je možné očekávat, že by si barva zachovala svoje vlastnosti, pokud by vzorky byly zatěžovány na všech teplotách laserem, u něhož nedocházelo k tak intenzivní tvorbě bílé vrstvy na jejich povrchu.

Na grafu na obr. 47 jsou porovnávány vzorky zatěžované na teploty 100 až 400 °C. Při analýze průběhů je možné vypořadovat, že křivky pro sady 220301-001 až 220301-004 jsou téměř shodné. Liší se výrazněji v oblasti vlnových délek kolem 10,5 a 16,5 μm výškou lokálního minima. První zmíněná oblast zasahuje do rozsahu výpočtu pásmové emisivity 7-14 μm , což způsobuje u 220301-004 o setinu vyšší pásmovou emisivitu. Pro zatěžované vzorky na teplotě 500 °C je spektrální závislost značně jiná, což indikuje první známky degradace barvy. Spektrální průběh emisivity u vzorků 220301-005 z pece s drobným rozdílem ($\sim 0,03$) kolem oblasti vlnových délek 4 μm odpovídá sadě 220330-001 zatěžované laserem.



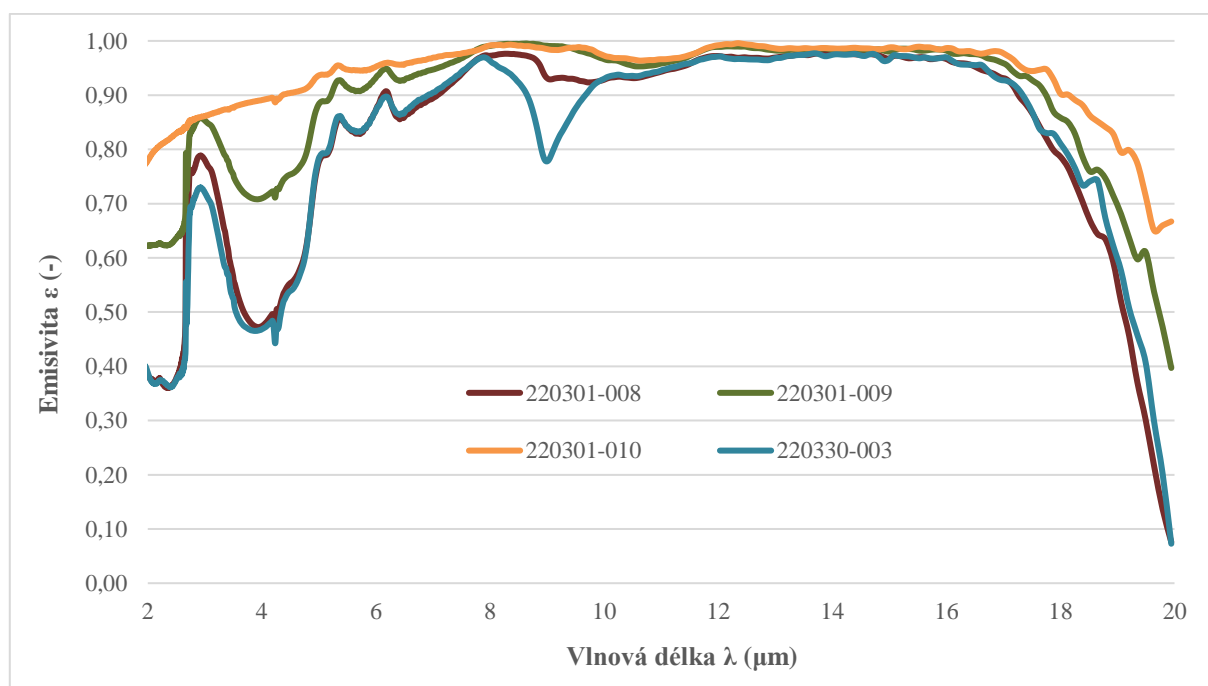
Obr. 47 Graf spektrální emisivity vzorků zatěžovaných do 500 °C

Graf na obr. 48 porovnává vzorky zatěžované na teplotách 600-800 °C. Jejich křivky vykazují mezi sebou velmi podobné tvary. Větších odchylek nastává v oblasti kolem 2,8-4,9 μm , která má velký vliv na pásmovou emisivitu 3-5 μm . V této oblasti se vzrůstající teplotou emisivity zmenšují. Další deviace nastává na vlnové délce 9 μm a od 17 μm dochází u 220301-008 ke strmému poklesu. Průběh laserově zatížených vzorků 220330-002 (700 °C) je odpovídající sadě 220301-007 z pece velmi blízký, avšak více odpovídá vzorkům 220301-006.



Obr. 48 Graf spektrální emisivity vzorků zatěžovaných od 600 do 673 °C

Na následujícím grafu na obr. 49 jsou porovnávány vzorky zatěžované na teploty 900 a 1000 °C. Pro referenci byla přidána také sada 220301-008. Při porovnání referenční sady a 220330-003 lze zjistit, že laserově zatížená sada má velmi podobný průběh. Křivka 220301-009 zachovává tvar předchozích sad, ale její emisivita nabírá v rozsahu vlnových délek 2-11 μm značně vyšších hodnot (až o 0,27). Ve stejném rozsahu vlnových délek vykazuje navýšení hodnot emisivity sada vzorků 220301-010, u které navíc došlo ke značné změně závislosti na vlnové délce. V oblasti vlnových délek od 11 do 16 μm mají spektrální průběhy emisivity všechny zatěžovaných vzorků nad 800 °C podobný průběh. Skokové a tvarové změny u křivek 220301-009 a 220301-010 jsou způsobeny enormní degradací barvy, což dokládá vizuální zhodnocení z oddílu 5.1.1.



Obr. 49 Graf spektrální emisivity vzorků zatěžovaných od 800 do 1000 °C

5.2. Vlastnosti tiskového materiálu

Vlastnosti tiskového materiálu byly zjišťovány pro 3 druhy materiálu tiskových prášků i pro již vytisknutý vzorek. Vytisknutý vzorek byl měřen metodou SNHRRT v rozsahu UV/VIS/NIR i MIR. Práškový materiál pak pouze v pásmu MIR. Oba druhy materiálu prošly měřením metodou EDEHT. Tabulka 13 shrnuje jejich označení.

Tab. 13 Označení tiskových materiálů

	Podložka s drážkou 1 mm	Podložka s drážkou 2 mm	Bez podložky
Prášek MS1	220413-001-001	220413-001-002	-
Prášek IN718	220413-002-001	220413-002-002	-
Prášek 316L	220413-003-001	220413-003-002	-
Vytisknutý vzorek z MS1	-	-	220427-001

5.2.1. Absolutní emisivita tiskového materiálu v rozsahu UV/VIS/NIR a MIR

Přehled vypočítaných hodnot pásmové emisivity ze všech měření metodou SNHRRT pro tiskový materiál lze nalézt v tabulce 14. Při porovnání prášků mezi sebou si lze povšimnout, že vzorek 220413-001-002 z materiálu MS1 má shodnou emisivitu v obou počítaných pásmech jako prášek 220413-003-002 z materiálu 316L. Souhlasný je i jejich spektrální průběh v oblasti od 2 do cca 13,5 μm , který lze pozorovat na grafu na obr. 50. Od vlnové délky 13,5 μm začíná poté docházet k jejich mírným odklonům. Důvodem velké podobnosti se jeví podobné materiálové složení prášků.

Tab. 14 Pásmová emisivita tiskových materiálů

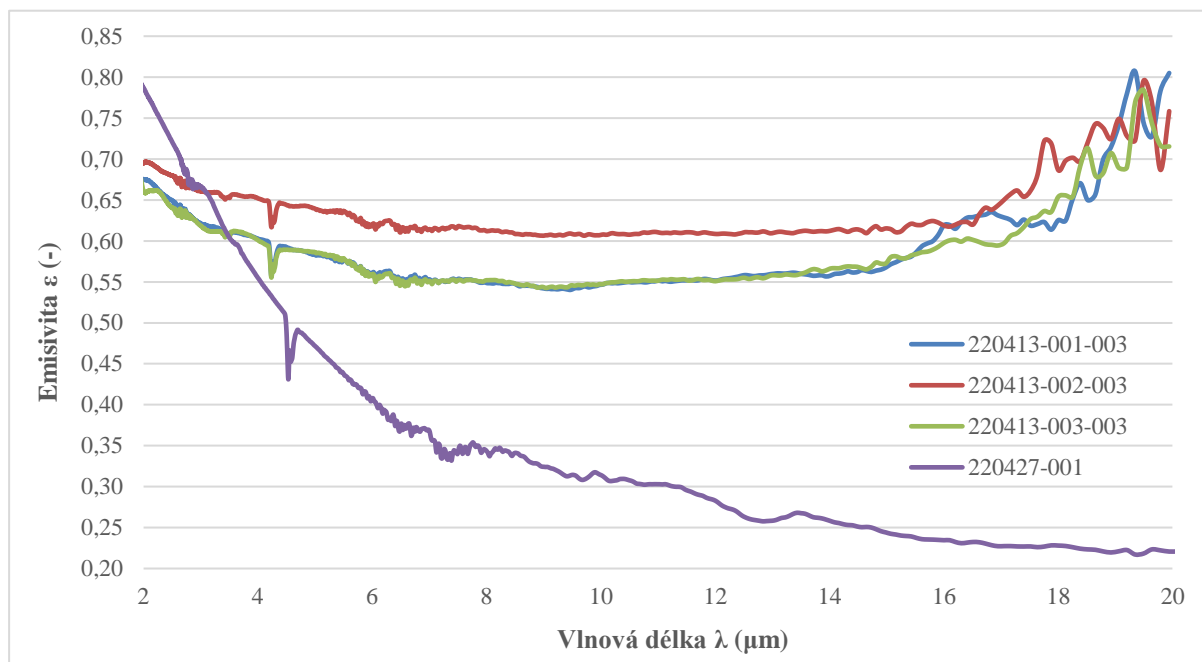
Vzorek	Emisivita ϵ pro pásmo 0,85-1 μm (-)	Emisivita ϵ pro pásmo 3-5 μm (-)	Emisivita ϵ pro pásmo 7-14 μm (-)
220413-001-002 (MS1)	-	0,591	0,551
220413-002-002 (IN718)	-	0,644	0,610
220413-003-002 (316L)	-	0,590	0,551
220427-001 (MS1)	0,876	0,486	0,279

Oba materiály spadají do kategorie ocelí, tudíž obsahují vysoké zastoupení Fe (nad 60%) a podobné jsou i jejich příměsové prvky. Nejvíce zastoupenými složkami v MS1 jsou Ni (17-19%), Co (8,5-9,5%) a Mo (4,5-5,2%). U 316L se vyskytují obdobné příměsové prvky- Cr (17-19%), Ni (13-15%), Mo (2.25-3%), chybějící kobalt zde nahrazuje chrom zajišťující korozivzdornost. Inconel je slitina niklu obsahující zejména Ni (50-55 %) a Cr (17.0-21.0%) a v porovnání se zmíněnými oceli má obsah Fe pouze 11-24,6%. Spektrální rozdíly emisivity 3-5 μm a 7-14 μm mezi vzorky jsou tedy především způsobeny rozdílnými hlavními prvky prášků.

Prášek 220413-002-002 se vyznačuje oproti ostatním zmíněným práškům vyšší hodnotou pásmové emisivity. Rozdíly mezi prášky činí cca 0,054 v rozsahu 3-5 μm a o podobnou hodnotu 0,059 se liší i v pásmu 7-14 μm . Vyšší emisivita prášku z IN718 je zřejmá i z grafu jejího spektrálního průběhu na obr. 50.

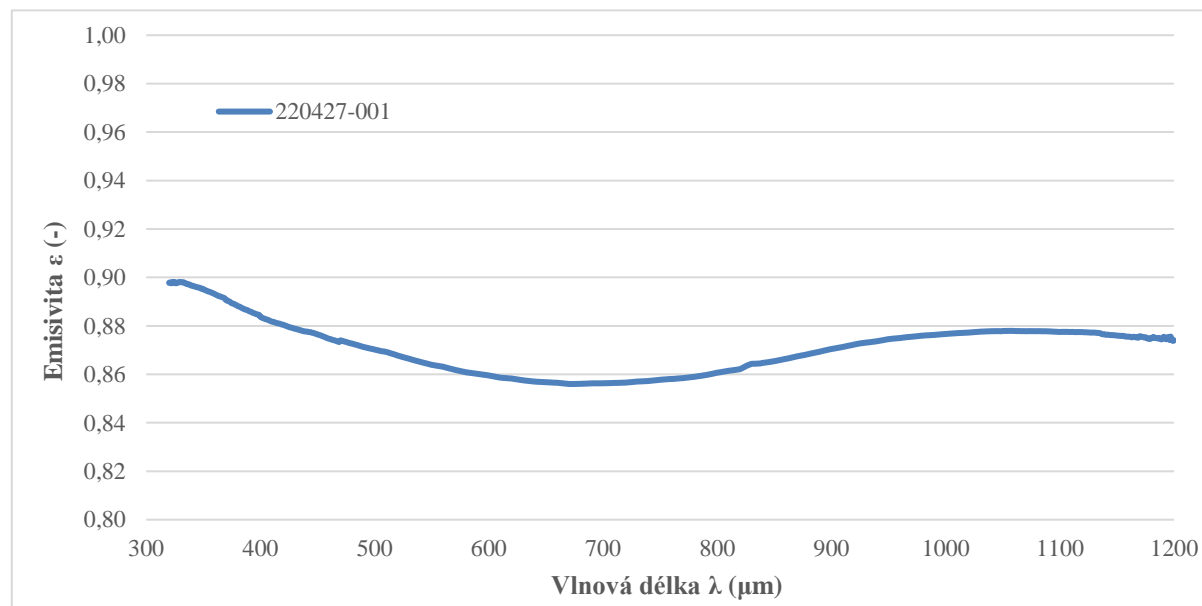
Z grafu je jednoznačně vidět, že po spečení prášku dojde v materiálu k výrazné změně ve spektrálním průběhu jeho emisivity. Spečený vzorek 220427-001 projevuje v celém měřeném rozsahu značně klesající trend emisivity v závislosti na rostoucí vlnové délce. Tato tendence je u práškových materiálů odlišná. Pro práškové materiály je v oblasti od 2 do 7 μm emisivita klesající, dále se při vlnových délkách až do 15 μm příliš nemění a v intervalu 15-20 μm dochází k jejímu růstu. Tyto trendy potvrzují i pásmové emisivity, které jsou u všech materiálů pro

pásmo 3-5 μm vyšší než pro pásmo 7-14 μm . Jak závislosti pokračují pro nižší vlnové délky není známo, jelikož práškové materiály sad 220413 nebyly pro pásmo UV/VIS/NIR měřeny.



Obr. 50 Graf spektrálních emisivit pro tiskové materiály

Grafické znázornění spektrálního průběhu emisivity vytisknutého vzorku z materiálu MS1 se nachází na obrázku 51. U křivky grafu nedochází k prudkým změnám. S rostoucí vlnovou délkou v intervalu od 0,3 do 0,7 μm emisivita klesá. Při vyšších vlnových délkách dochází k obrácení trendu a emisivita roste. V oblasti kolem 1,2 μm lze pozorovat mírný pokles.



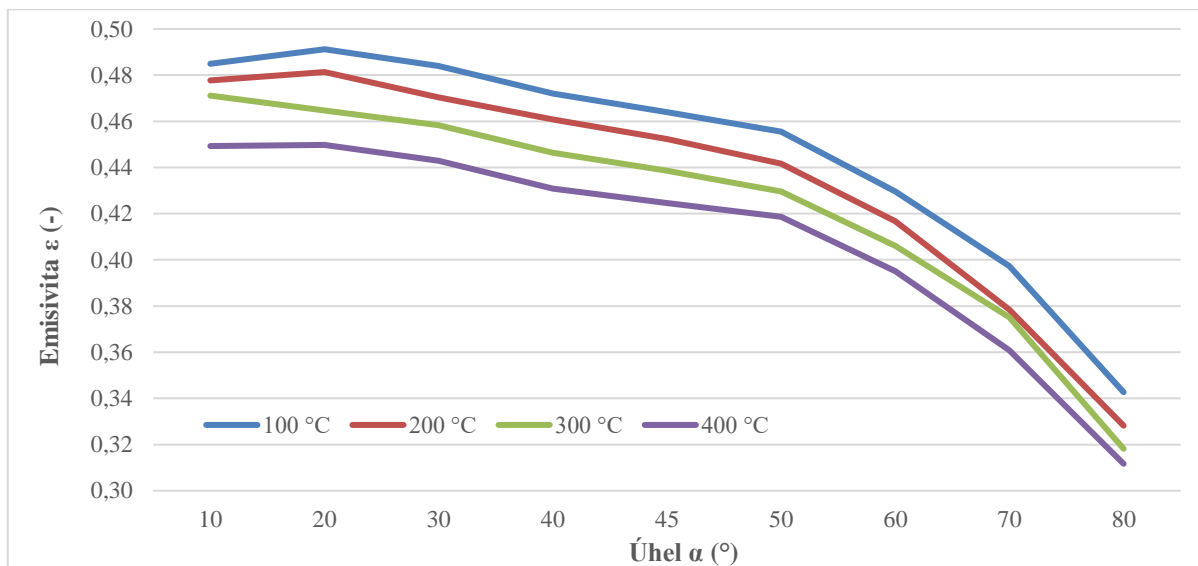
Obr. 51 Graf spektrálního průběhu emisivity vzorku 220427-001 v rozsahu 0,3-1,2 μm a vyznačená hodnota získané emisivity pro prášek 220413-001-002

Z měření metodou SNHRRT pro získání emisivity byla pro vyhodnocení dat z kamery MIKRON MCS640 použita pásmová emisivita 0,88 vytisknutého vzorku 220427-001 vypočtená z rozsahu 0,85-1 μm .

5.2.2. Efektivní směrová emisivita tiskového materiálu

Pro vyhodnocení dat z použité metody EDEHT byly do softwaru LabIR zadány hodnoty emisivity z tabulky 5 v oddílu 4.2.2 sloužící k určení povrchové teploty vzorku. Po zpracování dat byly získány efektivní směrové emisivity tiskových materiálů pro daný úhel a teplotu.

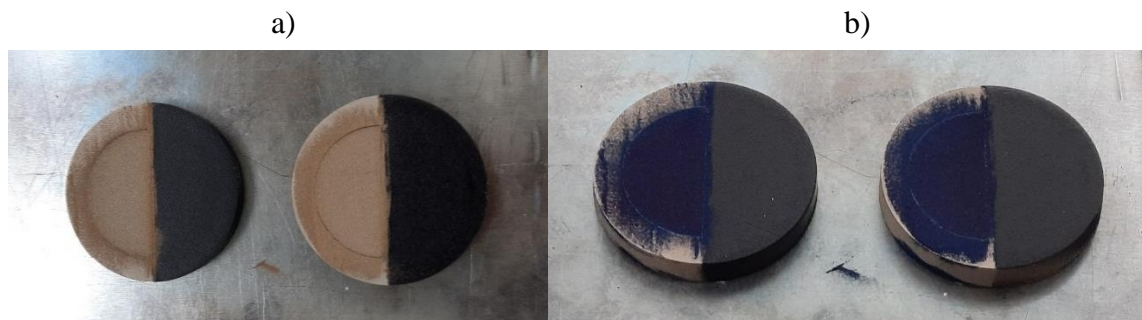
Tiskové prášky byly měřeny na 2 podložkách s různou hloubkou drážky. Výsledné závislosti na úhlu i teplotě byly stejné, u podložky s hloubkou drážky 1 mm však vycházely emisivity vyšší. Rozdíl činil 0,02-0,04 pro prášky z materiálu MS1 a 316L a 0,03-0,06 pro materiál Inconel 718. Zmíněná odchylka byla zřejmě způsobena prostupem IR záření z materiálu podložky, protože vrstva prášku v drážce byla příliš tenká. Dále prezentované výsledky jsou tedy pouze z podložky s hloubkou drážky 2 mm.



Obr. 52 Graf závislosti emisivity na teplotě a úhlu měření pro vzorek 2201413-002-002, měřeno kamerou FLIR A615

Na obr. 52 se nachází graf, který znázorňuje závislost emisivity na teplotách 100-400 °C na úhlu měření 10-80° pro vzorek 220413-002-002 (IN718). S rostoucím úhlem emisivita klesá. Tato tendence platila pro všechny práškové materiály sady 220413, proto je graficky znázorněn průběh pouze u jednoho materiálu. Při zvyšování teploty je z grafu zjevný posun křivek na nižší hodnoty emisivity rovnoměrně pro všechny úhly. Trend platil i u vzorku 220413-003-001 (316L), avšak v menší míře.

U materiálu MS1, konkrétně vzorku 220413-001-002 byly změny v závislosti na teplotě minimální i přesto, že u něj došlo k výrazné oxidaci. Obrázek 53 a) znázorňuje vzhled prášku MS1 po zahřátí na 300 °C. Na obrázku 53 b) lze vidět stejný prášek zahřátý až na teplotu 400 °C. Při této teplotě došlo k oxidaci materiálu, která se projevila jasnou změnou barvy prášku na tmavě modrou.



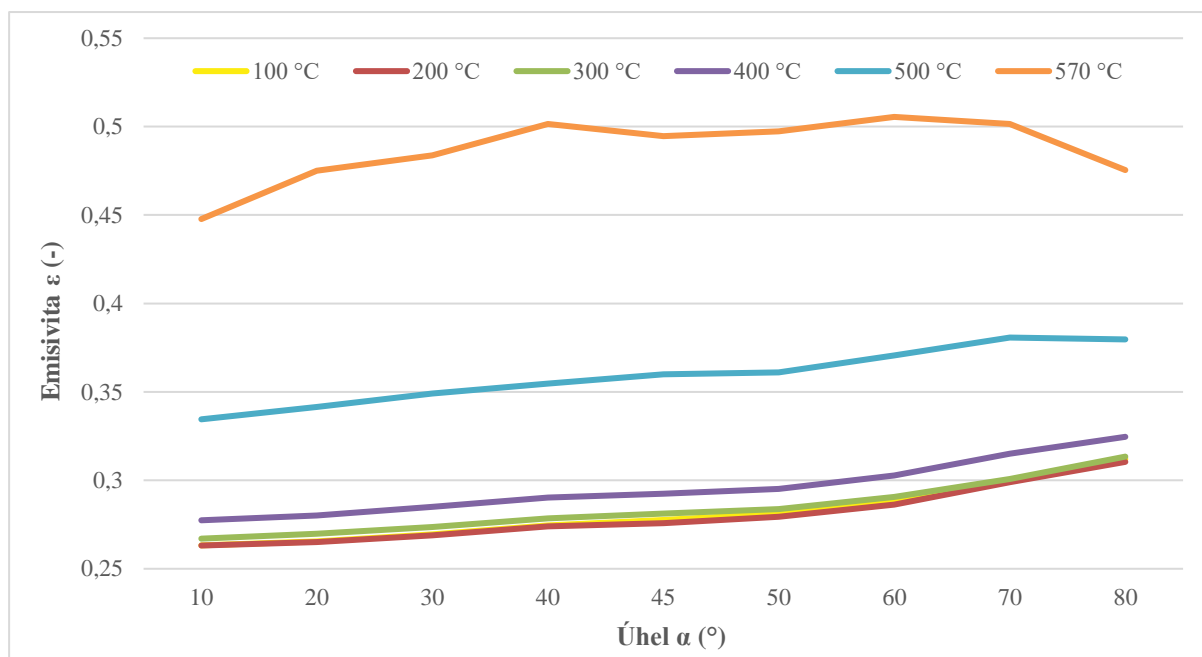
Obr. 53 Vzhled prášků 220413-001-002 (na snímcích vlevo), 220413-001-001 (na snímcích vpravo): a) při teplotě 300 °C, b) při teplotě 400 °C

U materiálu Inconel 718 nedošlo ke změně barvy prášku ani při teplotě 400 °C. Prášek 316L nevykazoval vizuální změny až do teploty 500 °C, od které začal měnit svoji barvu do odstínů hnědé. Výsledné zbarvení prášku 316L po zahřívání na teplotu 570 °C lze vidět na obrázku 54.



Obr. 54 Prášek 220413-003-002 (vlevo) a 220413-003-001 (vpravo) po zahřívání na teplotu 570 °C

Na obrázku 55 lze nalézt graf pro vzorek 220427-001, který porovnává hodnoty emisivity pro teploty 100 až 570 °C a úhly měření od 10 do 80°. Závislosti obou veličin jsou pro tento vzorek opačné než u tiskových prášků. Při zvětšování úhlu, pod kterým se emisivita měřila, dochází k jejímu mírnému nárůstu. Při zvyšování teplot lze vypořadovat, že hodnota emisivity vzrůstá. U nižších teplot pouze nevýrazně, avšak při teplotě nad 400 °C dochází ke skokovým nárůstům.



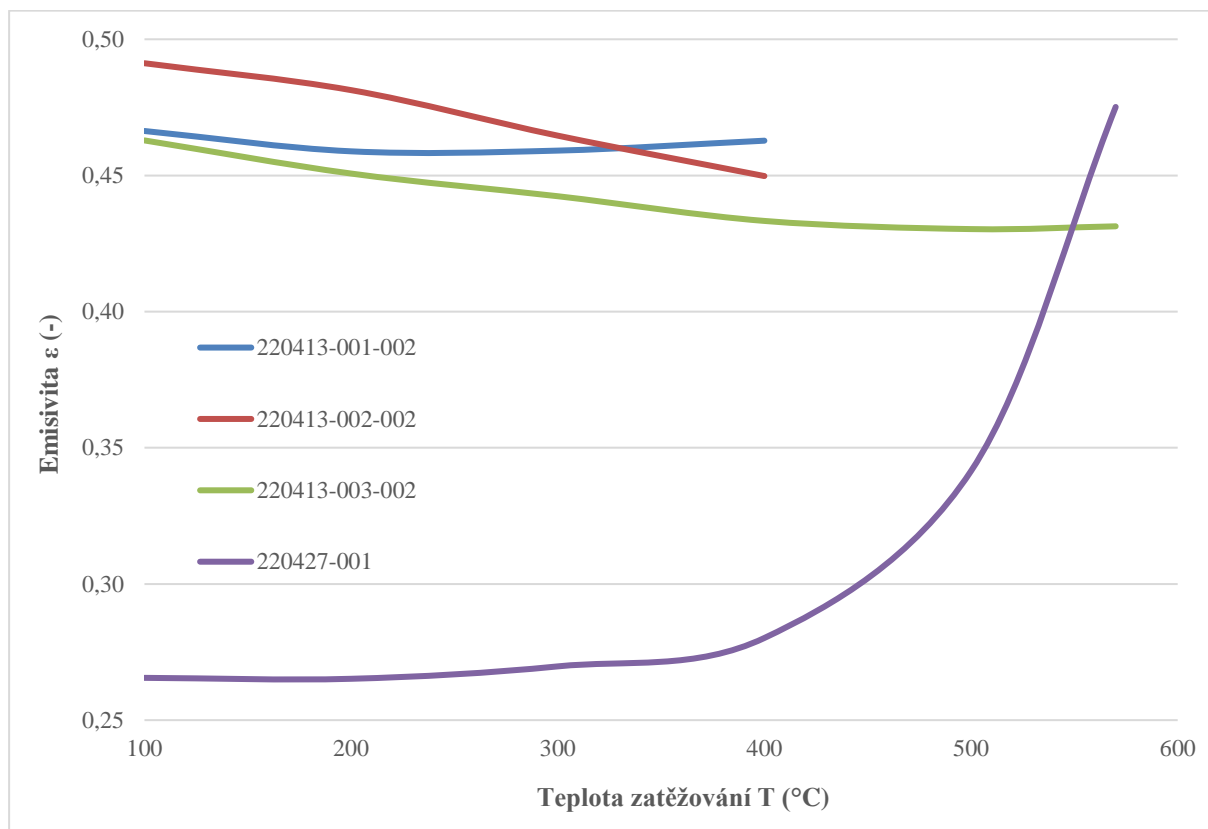
Obr. 55 Graf závislosti emisivity na teplotě a úhlu měření pro vzorek 220427-001, měřeno kamerou FLIR A615

Významné nárůsty byly způsobeny oxidací materiálu vytisknutého vzorku. Oxidace se při zahřívání nad teplotu 400 °C projevovala zmodráním vzorku. Výsledný vzhled vzorku 220427-001 po zahřívání na teplotu 570 °C si lze prohlédnout na obr. 56 vlevo. Na obrázku 56 vpravo se nachází pro porovnání stejný vzorek ale před jakýmkoliv tepelným zatížením.



Obr. 56 Vzorek 220427-001 před tepelným zatížením (vpravo) po zahřátí na 570 °C (vlevo)

V grafu na obr. 57 jsou srovnávány závislosti emisivity na teplotě u tiskových prášků skupiny 220413 a vzorku 220427-001 při úhlu měření 20°. Emisivita prášku MS1 na teplotě 200 °C mírně poklesla. Při zahřívání na vyšší teploty dochází k drobnému růstu. Stejný trend vykazuje i vytisknutý vzorek ze stejného materiálu. Pro něj však byly měřeny ještě vyšší teploty, u kterých došlo ke skokovému zvýšení emisivity. Je tedy možné předpokládat, že stejný jev by nastal i u prášku MS1 v případě jeho ohřívání na teploty 500 a 570 °C. Emisivita prášků z materiálů IN718 a 316L má s rostoucí teplotou klesající tendenci. Závislost emisivity na teplotě se u prášků nejvíce tak výrazná jako její závislost na úhlu.



Obr. 57 Graf závislosti emisivity na teplotě u skupiny 220413 a vzorku 220427-001 na úhlu měření 20°, měřeno kamerou FLIR A615

Tabulka 15 srovnává pásmové emisivity získané metodou SNHRRT a efektivní směrové emisivity zjištěné prostřednictvím metody EDEHT. Všechny porovnávané hodnoty jsou pro pásmo vlnových délek 7-14 μm. U metody EDEHT byly zvoleny emisivity pro úhel 10°, aby co nejvíce korespondoval s měřením na spektrometrech, které probíhalo kolmo. Jelikož metoda SNHRRT probíhá za pokojové teploty, byla efektivní emisivita vybrána pro nejnižší teploty, což je 100 °C. Efektivní směrové emisivity nabývají u všech vzorků nižších hodnot než jejich odpovídající pásmové hodnoty emisivity. Tato skutečnost je způsobena vlivem citlivosti detektoru kamery FLIR A615.

Tab. 15 Srovnání pásmové a efektivní směrové emisivity v rozsahu 7-14 μm

Vzorek	ϵ_{λ} z SNHRRT-MIR (-)	ϵ_{ef} z EDEHT (-)
220413-001-002	0,551	0,468
220413-002-002	0,610	0,485
220413-003-002	0,551	0,470
220427-001	0,279	0,260

Vyhodnocená data z EDEHT měření prováděného kamerou FLIR A6751 byla zapsána do tabulky 16. Jedná se o hodnoty efektivní směrové emisivity vzorku 220427-001 pro úhel 20° v rozsahu vlnových délek 3-5 μm na různých teplotách.

Tab. 16 Získaná efektivní emisivita v vzorku 220427-001 pro úhel 20° v spektrálním rozsahu 3-5 μm

Teplota (°C)	300	400	570
Emisivita (-)	0,753	0,768	0,930

Použitá emisivita pro rozsah 3-5 μm a 7-14 μm byla vybrána z výsledků metody EDEHT pro vzorek 220427-001. Konkrétně byly zvoleny hodnoty efektivní směrové emisivity pro úhel měření 20° a teplotu 400 °C. Pro rozsah 0,85-1 μm je dále používána získaná emisivita z metody SNHRRT stejného vzorku. Podrobnější popis výběru těchto hodnot je popsán v kapitole 4.2.4. Přehled hodnot emisivity využívaných pro vyhodnocení v následující kapitole pro jednotlivé rozsahy lze najít v tabulce 17.

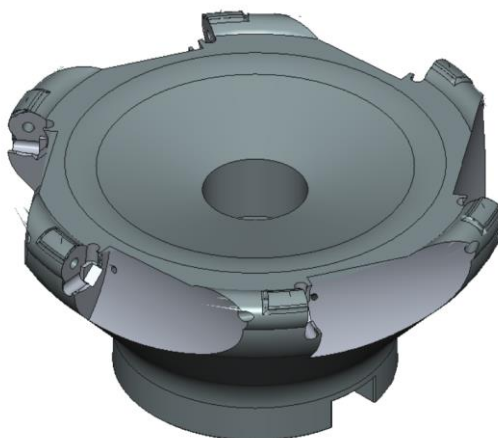
Tab. 17 Přehled získaných hodnot efektivní směrové emisivity pro různá spektrální pásma

Spektrální pásmo	0,85-1 μm	3-5 μm	7-14 μm
Emisivita (-)	0,876	0,768	0,280

5.3. Povrchové teploty u procesu 3D tisku

Pro zaznamenávání povrchových teplot 3D tisku byly využity 3 termovizní kamery, podle nichž jsou rozděleny následující oddíly. Měření probíhalo ve 2 experimentech, při kterém byl nahráván proces tisku stejné frézovací hlavy. Při prvním experimentu byla použita dvojice kamer MIKRON MCS640 a FLIR A615 a při druhém kamera FLIR A6751 a FLIR A615.

Tisknutý model se nachází v patentovém řízení, tudíž jej není možné zveřejnit. Na obrázku 58 se proto nachází pro ilustraci model velmi podobné frézovací hlavy. Průměr frézovací hlavy činí přibližně 12 cm a její výška 5,5 cm. Tisknutá fréza měla navíc u řezné části v ose umístěn útvar svým tvarem připomínající dutou tyč vysokou přibližně 10 mm. Tisk probíhal od držáků destiček po upínací část, tudíž obráceně než je znázorněno na obrázku. Na začátku byly tisknuty podpěry a dutá tyč a až poté přešel tisk na samotnou frézovací hlavu. Spékání materiálu bylo zajišťováno laserovým paprskem mm s rychlostí 960 mm/s zaostřeného na průměr spotu 0,1 mm. Skenování vrstev laserem probíhalo řádkováním 10 mm širokých pruhů s přesahem 0,08 mm. Pruhy byly vždy mezi sebou rovnoběžné a v rámci jedné vrstvy byly řádkovány laserem ze stejného směru. Pro každou vrstvu byl směr řádkování jiný. Tloušťka mezi jednotlivými tiskovými výškami činila 40 μm .



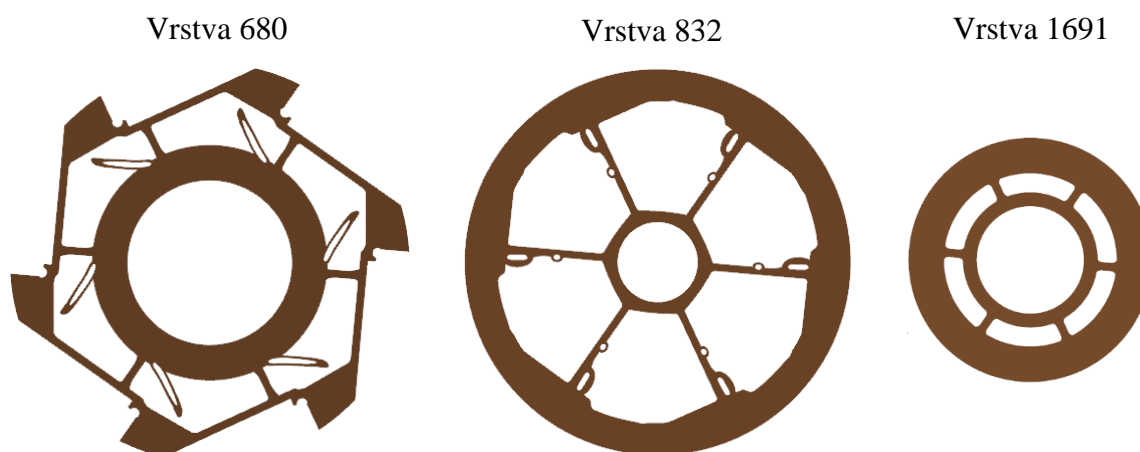
Obr. 58 Ilustrační model tisknuté frézovací hlavy

Z důvodu zdlouhavého procesu tisku byly na součásti zvoleny 3 řezy, ve kterých se měření provádělo. Vždy bylo měřeno navíc 5 vrstev před a po hlavní výšce řezu. Řezy byly voleny s dostatečným výškovým odstupem od sebe, aby došlo k podstatné změně geometrie řezu. Vybrané tiskové vrstvy a tomu odpovídající výšky tisku lze nalézt v tabulce 18.

Tab. 18 Zvolené tiskové vrstvy a tomu odpovídající výšky tisku

Řez	A	B	C
Vrstva	680	832	1691
Výška tisku (mm)	27,16	33,24	67,60

Přehled geometrie frézovací hlavy, kterou laser skenoval na vybraných řezech se nachází na obrázku 59.



Obr. 59 Přehled řezů modelem frézovací hlavy na zvolených výškách

5.3.1. Teploty z kamery MIKRON MCS640

Přehled měření

Jednou z kamer využitých pro měření teplot 3D tisku při prvním experimentu byla kamera MIKRON MCS640. Měřilo se v zobrazovaném teplotním rozsahu kamery 673-1530 °C s integračním časem kamery 16 ms. Nahrávání probíhalo se zadanou hodnotou emisivity 1 a propustností 0,5. Tyto parametry bylo nutné pro správné vyhodnocení teplot přenastavit pro emisivitu 0,88 a propustnost 0,42 z tabulek 7 a 9 v oddíle 4.2.4. Přehled parametrů záznamu vyhodnocovaných vrstev, se kterými kamera měřila, shrnuje tabulka 19.

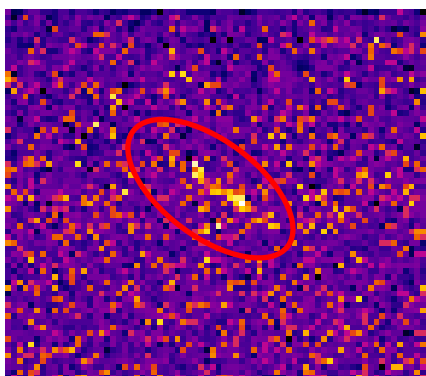
Tab. 19 Přehled parametrů záznamu vyhodnocovaných vrstev

Vrstva	Zorný úhel objektivu (°)	Frekvence snímkování (Hz)	Rozlišení (px)	Teplotní rozsah (°C)	Integrační čas (ms)
680	10.8 x 8.1	60	640 x 480	673-1530	16
832	3,5 x 2,6	55	640 x 480	673-1530	16
1691	3,5 x 2,6	55	640 x 480	673-1530	16

Vyhodnocení vrstvy 680

Jako první byl zaznamenáván tisk vrstvy 680, které odpovídá výška tisku 27,16 mm. Pro tuto vrstvu byl na kameře použit objektiv se zorným úhlem 10.8° x 8.1°. Díky tomuto objektivu bylo možné snímat velkou plochu, ale v důsledku toho bylo pixelové rozlišení nahrávaných částí malé. Na obrázku 60 se nachází termogram, na němž je zachycena a zvýrazněna tepelná stopa pohybujícího se laserového paprsku. Rozlišení stopy činí 3 x 14 pixelů a její kontrast vůči

okolí je velmi malý. Celkově se na celém snímku nachází velké množství šumu způsobeného teplotním rozsahem kamery. Kamera v použité konfiguraci MB30 umožňuje měřit teploty od 673 °C výše. Samotný šum v záznamu dosahuje na některých místech hodnot až 950 °C. Vzhledem k tomu, že maximální teplota uprostřed zachycené stopy činila 943 °C, není teplotní rozdíl stopy oproti šumu výrazný a dochází tak k jejímu splynutí s okolím. Z tohoto důvodu nebyl tento záznam vrstvy použit pro následné vyhodnocení.

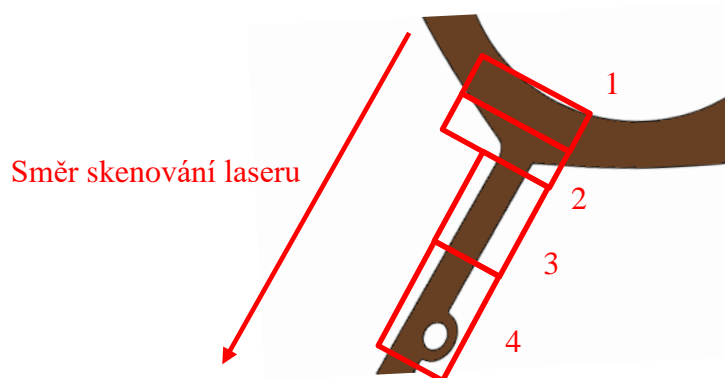


Obr. 60 Termogram zachycující tepelnou stopu laserového paprsku u vrstvy 680

Vyhodnocení vrstvy 832

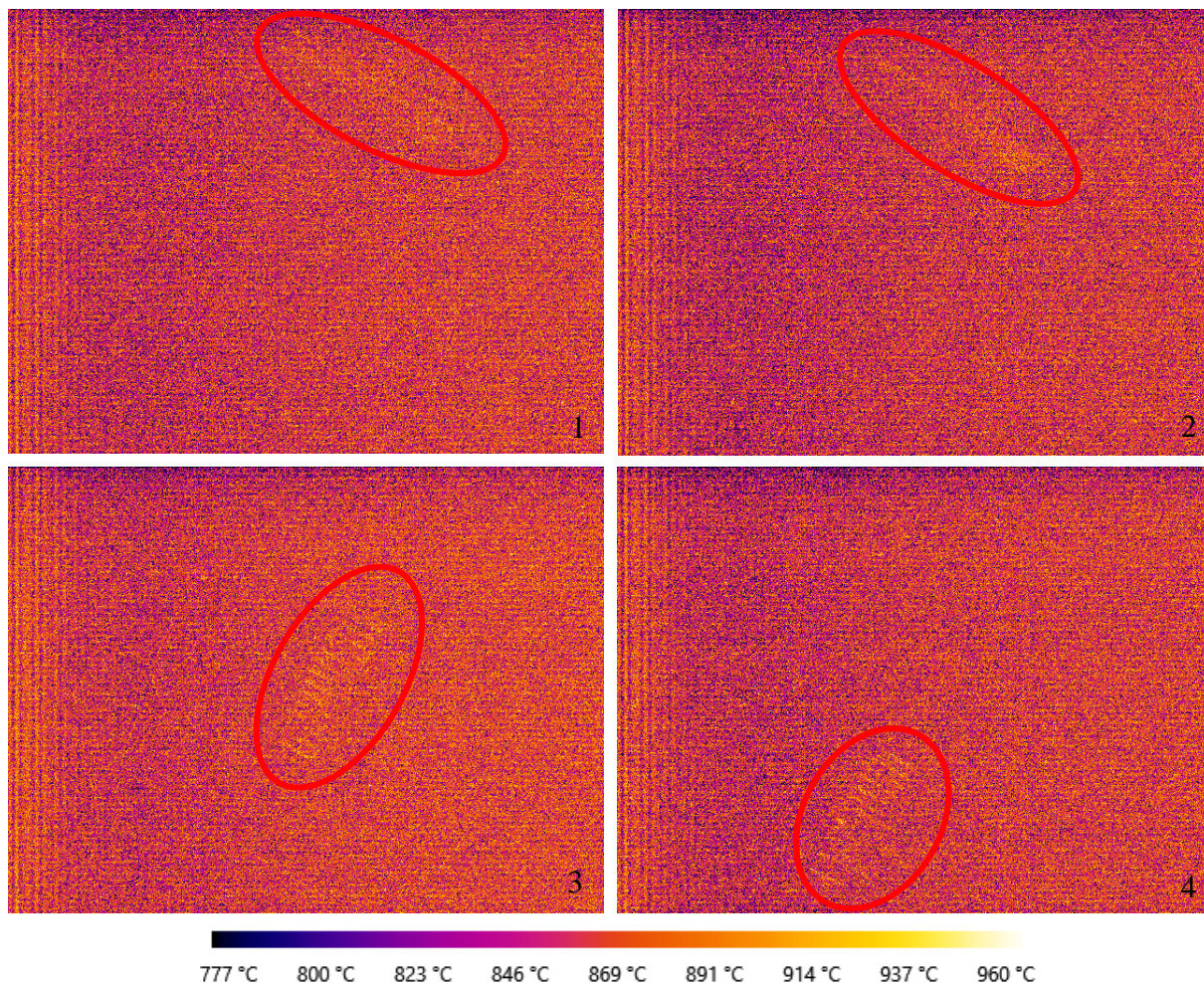
Pro měření vrstvy 832 byl použit teleobjektiv s menším zorným úhlem 3,5° x 2,6°, ale s větším přiblížením. Díky většímu přiblížení byly stopy lépe viditelné, tudíž bylo možné sekvence dále zpracovávat. Na záznam byla použita funkce HoldMax, která ukazuje maximální teploty povrchu z průběhu celého termovizního záznamu. Po aplikaci HoldMax na celou sekvenci se získal výsledný snímek, který se skládal pouze ze šumu. Jeho přílišné množství zakrylo v průběhu nahrávky i části, kde byla již předtím viditelná tepelná stopa. Proto bylo nutné aplikovat zmíněnou funkci pouze na omezený počet snímků, díky čemuž nedojde k akumulaci šumu.

Ze záznamu vrstvy 832 byly vybrány 4 skupiny snímků, kde byl přejezd laseru viditelný. Pro tyto skupiny snímků byla použita funkce HoldMax. Skenovaná plocha, kterou snímky zachycují je znázorněna na obr. 61. Jednotlivé skupiny jsou očíslovány od 1 do 4 podle toho, jak laserový paprsek chronologicky postupoval.



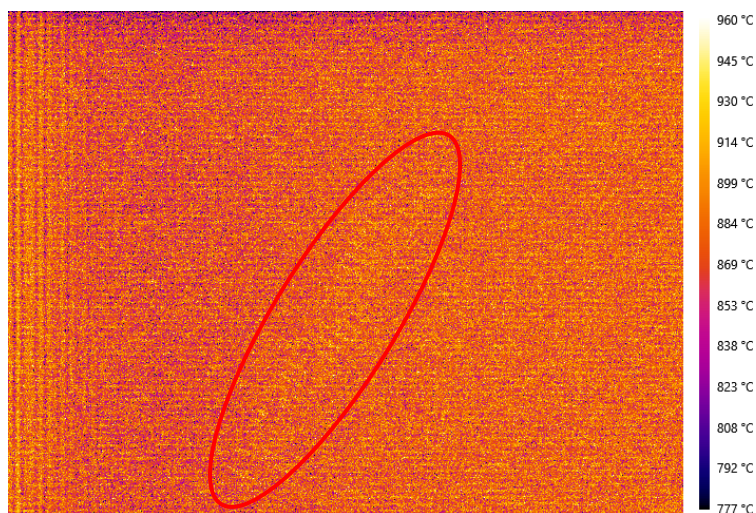
Obr. 61 Snímaný kus vrstvy 832 rozdělený do 4 oblastí

Výsledné termogramy pro skupiny snímků 1-4 s jejich číselným označením se nachází na obrázku 62. Termogramy byly získány použitím funkce HoldMax u jednotlivých skupin v průměru z 12 snímků. U skupiny číslo 3 a 4 je viditelnost tepelných stop mírně lepší. Důvodem je užší profil skenované plochy, v jehož důsledku probíhalo odvádění tepla pomaleji a vyšší teploty se na termogramu lépe znázornily.



Obr. 62 Získané termogramy z jednotlivých skupin snímků u vrstvy 832

Na následujícím obrázku 63 byla provedena ukázka ztráty kontrastu při spojení dvou HoldMax termogramů. Spojení proběhlo opět aplikací HoldMax funkce na 2 snímky, konkrétně na výsledné termogramy skupiny č. 3 a 4. Sloučením došlo ke zhoršení viditelnosti zaznamenaných tepelných stop. Na termogramu si je také možné povšimnout vyššího podílu oranžové barvy, která indikuje vyšší teploty, které se do snímku dostaly prostřednictvím šumu zachyceného funkcí HoldMax.

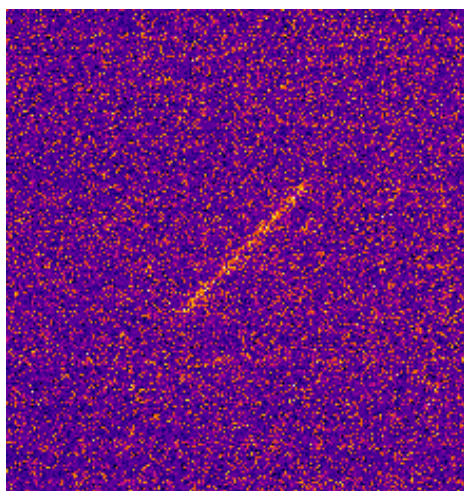


Obr. 63 Termogram znázorňující ztrátu kontrastu při spojení dvou HoldMax termogramů

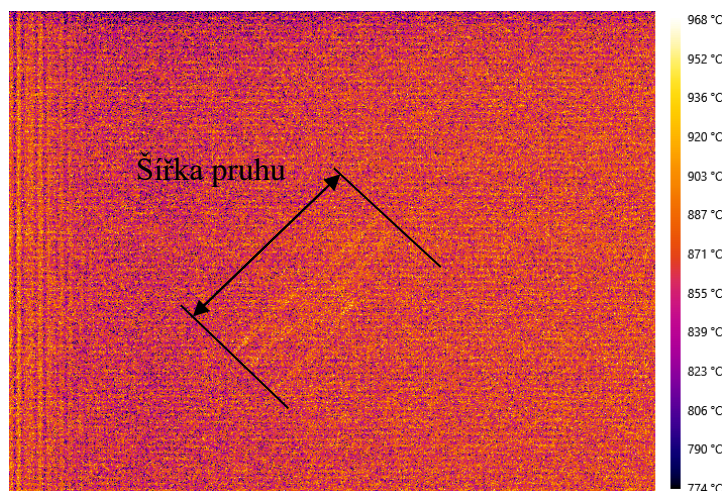
Výsledné HoldMax termogramy by bylo možné sloučit bez zhoršení kontrastu, pokud by se podařilo odstranit šum z části snímku, kde nebyl laserový paprsek zachycen. Odstranění by se dalo provést ručně, což je ale časově velice náročné a vzniká zde problém při určení, kde končí oblast tepelné stopy a kde začíná oblast samotného šumu.

Vyhodnocení vrstvy 1691

U poslední měřené vrstvy 1691 byla analyzována velikost tepelné stopy laseru při použití teleobjektivu. Na obrázku 64 lze nalézt jednu ze zaznamenaných stop, která je dobře viditelná. Její velikost činí odhadem 6 x 85 pixelů a maximální teplota dosahuje 953 °C. Obr. 65 představuje HoldMax termogram na kterém je zachycena část skenované plochy, ve které laser řádkoval v plné šířce. Laser řádkuje v pruzích širokých 10 mm. Při integračním čase 16 ms a rychlosti skenování laseru 960 mm/s dojde k uražení dráhy mezi snímky 15,36 mm. Kamera tudíž nestihne během některých skenování plně šířky pruhu zaznamenat ani jeden snímek.



Obr. 64 Teplotní stopa laseru u vrstvy 1691



Obr. 65 HoldMax termogram se zachycenou plnou šířkou pruhu

Posouzení schopnosti kamery zaznamenávat teploty při 3D tisku

Použitá kamera MIKRON MCS640 v konfiguraci MB30 byla shledána jako nevhodná pro měření teplot při 3D tisku. Hlavním důvodem je její teplotní rozsah umožňující měřit teploty až nad 673 °C. Zaznamenané teploty po průchodu laserového paprsku vykazovaly teploty do 950 °C. Ve stejném teplotním rozsahu se vyskytoval v obraze šum, který měl tendenci výsledky degradovat.

Při použití kamery v konfiguraci umožňující snímat nižší teploty by se její volba a vhodnost mohla zvážít, tato konfigurace však nebyla k dispozici. Došlo by totiž k úbytku šumu a zaznamenané teploty by byly na termogramu lépe viditelné. To by umožnilo i zpracování sekvence pomocí funkce HoldMax, která zobrazuje teplotní pole z maximálních hodnot záznamu. Jako vhodnější se osvědčil teleobjektiv se zorným úhlem 3,5° x 2,6°. Na úkor rozměrů snímané plochy výrazně zvětšil velikost a viditelnost tepelných stop po průchodu laseru. Frekvence a integrační čas kamery neumožňují zachytit každý přejezd laseru pruhem při řádkování a dochází tím k získání neúplné informace o tisku. Zobrazené teploty jsou silně ovlivněny časovým a prostorovým zprůměrováním hodnot.

Další nevýhodou kamery je k ní poskytovaný software LumaSpec RT pro záznam a zpracování dat. Software neumožňuje automatický export snímků sekvence, úpravu hodnot emisivity a propustnosti při vyhodnocení ani pokročilé funkce pro zpracování dat (HoldMax). Tyto nevýhody ztěžují práci při vyhodnocení, jelikož pro chybějící funkce bylo nutné vytvořit makra v programu MS Excel, které jejich práci zastoupily.

5.3.2. Teploty z kamery FLIR A6751

Přehled měření

Během druhého experimentu se měřilo pomocí kamery FLIR A6751 v hlavním teplotním rozsahu 500-1200 °C s integračním časem 0,0664 ms. Díky nižší minimální snímané teplotě se zde nevyskytoval šum jako u předchozí kamery MIKRON MCS640. Měření probíhalo s nastavenou emisivitou 0,92 a propustností 1. Při vyhodnocení byly tyto hodnoty upraveny na 0,77 pro emisivitu a 0,95 pro propustnost na základě výsledků z tabulek 7 a 9, jejichž postup získání je popsán v oddílu 4.2.1. Frekvence snímkování činila 125 Hz a byla pro vybrané vrstvy zvýšena až na 2082 Hz. Kamera umožňuje velmi rychlé měření s krátkými integračními časy, tudíž se od ní očekávalo nejdetailejší zobrazení procesu tisku. Podrobný rozpis parametrů záznamů vrstev použitých pro vyhodnocení se nachází v tabulce 20. Hlavní vrstvy jsou zvýrazněny tučně.

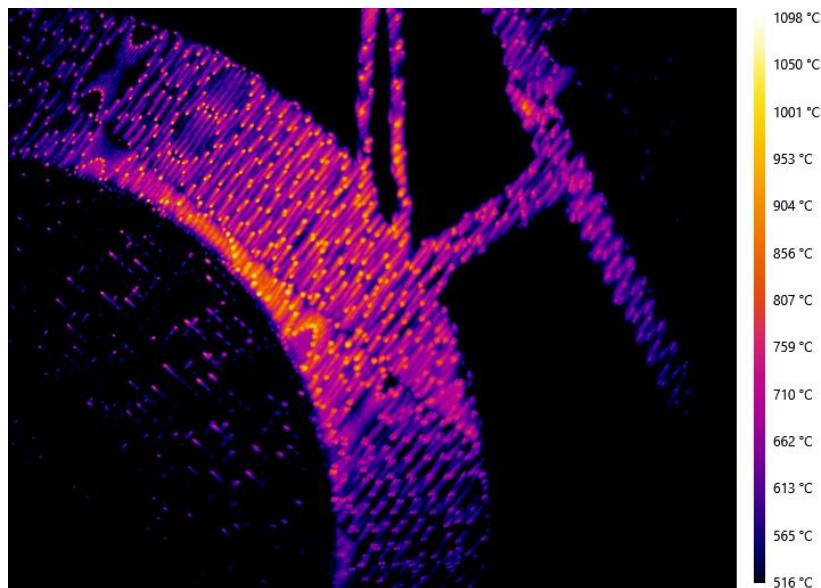
Tab. 20 Parametry záznamu vrstev z kamery FLIR A6751 použitých pro vyhodnocení

Geometrie	Vrstva	Frekvence snímkování (Hz)	Rozlišení (px)	Teplotní rozsah (°C)	Integrační čas (μs)
1	680	125	640 x 520	500-1200	66,4
	684	407	320 x 256	500-1200	66,4
	687	1070	160 x 128	500-1200	66,4
2	832	125	640 x 520	500-1200	66,4
	837	407	320 x 256	500-1200	66,4
	840	1070	160 x 128	500-1200	66,4
3	1691	125	640 x 520	500-1200	66,4
	1695	407	320 x 256	500-1200	66,4
	1698	1070	160 x 128	500-1200	66,4
	1709	2082	80 x 64	500-1200	66,4
3	1706	125	640 x 520	700-1500	41,6
	1705	407	320 x 256	700-1500	41,6
	1704	1070	160 x 128	700-1500	41,6
	1708	2082	80 x 64	700-1500	41,6

Srovnání hlavních vrstev

První měřená vrstva byla s číslem 680 se snímkovací frekvencí 125 Hz. Na její záznam byla aplikována funkce HoldMax a výsledný snímek lze nalézt na obr. 66. Z obrázku je patrný výskyt vyšších teplot uprostřed snímku. Jak již bylo v oddílu 4.2.3. zmíněno, je tento jev způsoben kombinací použitého objektivu s distančním kroužkem. Správné teploty se budou nacházet pouze ve středu termogramu, protože nastavená emisivita byla zjišťována právě pro tuto oblast.

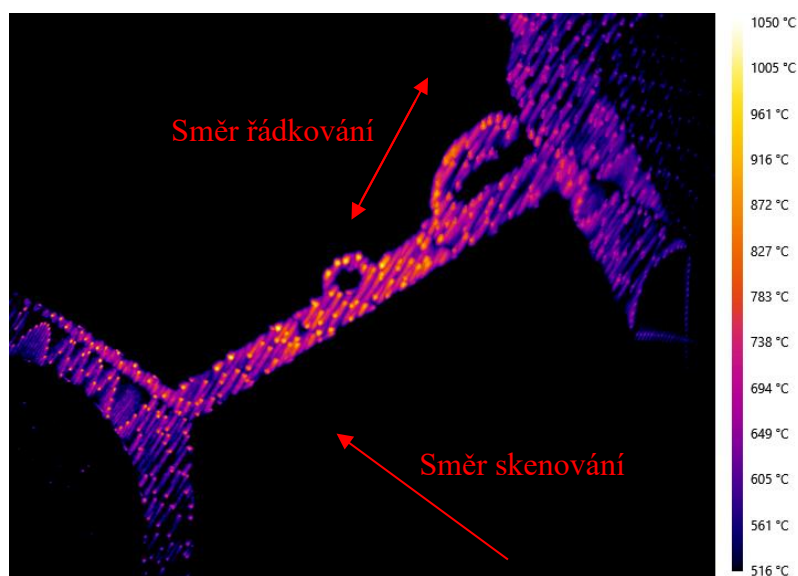
Z obrázku je možné si všimnout, že díky nízkému integračnímu času a vysoké snímkovací frekvenci přešel vzhled ohřáté plochy laserem z úsečky (u kamery MIKRON MCS640) na bod s tepelnou stopou. Integrační čas je doba, po kterou je otevřena závěrka a dochází k osvětlení detektoru. Čím bude integrační čas kratší, tím přesněji bude kamera schopná zachytit teplotu přímo v laserovém spotu. Při delších integračních časech je zaznamenáváno místo až po jeho částečném vychladnutí z důvodu rychlého posunu laserového paprsku. Při frekvenci snímání 125 Hz urazí laser rychlostí 960 mm/s mezi jednotlivými snímky vzdálenost 7,68 mm. Díky využitému integračnímu času 66,4 μs je teplo však sbíráno jen z oblasti během které se laserový paprsek posune o 0,064 mm. Zbývající dobu mezi snímky kamera data zpracovává.



Obr. 66 HoldMax termogram ze zaznamenávané vrstvy 680 při frekvenci 125 Hz

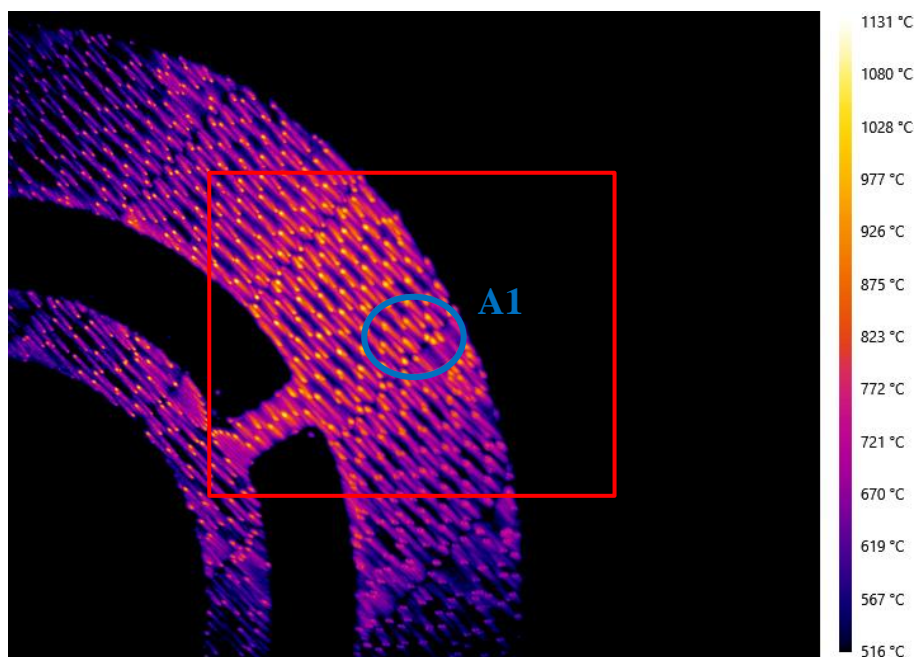
V levé spodní části termogramu je možné pozorovat od sebe navzájem vzdálené body. Tyto body indikují oblast podpěr, která se neskenuje tak četně. To znamená, že zde laser přejíždí plochu rychleji a dojde řidšímu zaznamenání teplených stop s nižšími teplotami. Maximální teplota snímku činí 1098 °C se nachází uprostřed snímku u levého kraje mezi tisknutým materiálem a podpěrami. Zde laser řádkoval v úzkém pruhu a docházelo v materiálu k akumulaci tepla, které se projevilo pásmem vyšších teplot při okraji frézovací hlavy. Průměrná teplota v této oblasti činí přibližně 835 °C.

Měřená vrstva 832 také obsahovala úzké skenované oblasti, avšak k výrazné akumulaci nedošlo. Při akumulaci tepla je důležitý směr skenování a řádkování. Zaznamenávaná vrstva a směry pohybu laseru jsou znázorněny šipkami na obrázku 67. Laser skenoval část ve směru téměř kolmém na středový profil a tím pádem směr řádkování probíhal podélně se součásti. Mírně vyšších teplot si lze všimnout u kanálku uprostřed snímku, který má tenkou stěnu a dojde k jeho ohřátí bez možnosti rychlého odvedení tepla do okolí. Maximální teplota na snímku dosahuje hodnoty 1050 °C. Teploty v prázdných oblastech mezi body jsou přibližně stejné jako v jejich okolí, došlo pouze k synchronizaci frekvencí skenování a kamery.



Obr. 67 HoldMax termogram ze zaznamenávané vrstvy 832 při frekvenci 125 Hz

Na obrázku 68 se nachází Hold Max snímek z vrstvy 1691. Rozmístění laserových stop na součásti se jeví poměrně pravidelné a homogenní. Tento jev je způsoben směrem skenování, kdy laser zde u většiny přejezdů skenuje pruhy v plné šířce. Záznam byl nahráván při frekvenci 125 Hz a rozlišení výsledného termogramu činí 640 x 520 pixelů.

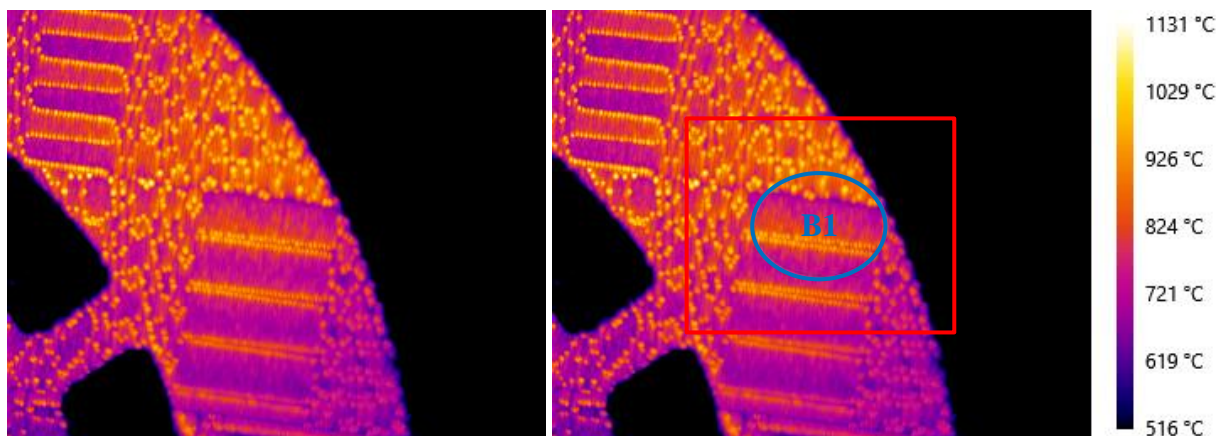


Obr. 68 HoldMax termogram ze zaznamenávané vrstvy 1691 při frekvenci 125 Hz

Srovnání použitých snímkovacích frekvencí

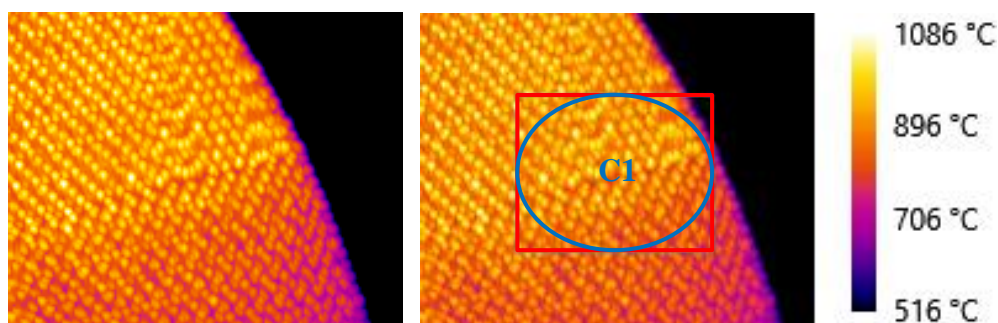
U všech vybraných hladin byly měřeny i vyšší frekvence. Celá vrstva nelze zaznamenat pomocí více snímkovacích frekvencí, tudíž záznamy s vyššími frekvencemi jsou z jiných tiskových výšek (přehled vrstev viz tabulka 20). Může tak docházet k drobným rozdílům způsobených změnou geometrie na odlišných tiskových výškách. Vyšší frekvence jsou pro ukázkou prezentovány jen u skupiny vrstev odpovídající tvaru hladiny 1691. Snímky získané ze záznamů s frekvencemi 407 a 1070 Hz pro tvary vrstev 680 a 832 byly přidány do přílohy 1. Při zvyšování snímkovací frekvence dochází ke snížení rozlišení nahrávky. Snížení probíhá oříznutím okrajů snímků. Zobrazovaná oblast při přechodu na rozlišení 320 x 256 pixelů je znázorněna na obr. 68 červeným obdélníkem. Modrou elipsou A1 je vyznačena oblast, ze které se vypočítala průměrná teplota 724 °C. Umístění této elipsy v rámci tisknutého dílu bude na korespondovat i s dalšími snímky. Analýza se bude jevit větší z důvodu menšího rozlišení termogramů.

Získaný snímek z vrstvy 1695 při měření frekvencí 407 Hz a rozlišením 320 x 256 je na obr. 69 vlevo. Díky vyšší frekvenci snímkování si lze všimnout celkově většího zahuštění tepelných stop na díle. Dále jsou k povšimnutí vniklé vzory uskupením tepelných bodů. V případě dvou obrazců ve tvaru obdélníků je efekt způsoben skenováním plné šířky pruhu. Rychlost laserového paprsku je během tisku konstantní, liší se pouze při přejíždění kontur. Z toho důvodu se při periodickém skenování shodné vzdálenosti zobrazí tepelná stopa vždy na stejných místech. Když se laser přiblíží k hraně dílu, tak nedokončí plnou šířku pulzu. Tím se změní ujetá vzdálenost a ve výsledku se záznam nejeví pravidelně. Zjištěná průměrná teplota pro oblast B1 vyznačenou na obrázku 69 vpravo odpovídala teplotě 806 °C. Červeně ohraničená část znázorňuje výřez zobrazovaný u následující vrstvy.



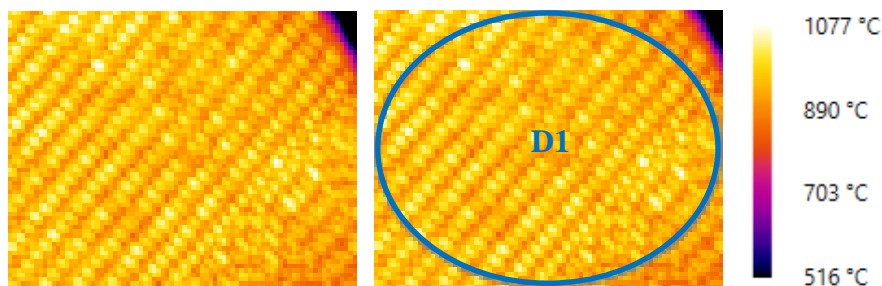
Obr. 69 HoldMax termogram ze zaznamenávané vrstvy 1695 při frekvenci 407 Hz

U snímku z vrstvy 1698 (obr. 70 vlevo) došlo k poklesu rozlišení na 160 x 128 pixelů. Při srovnání snímků s vyšším rozlišením vůči těm s nižším je patrné, že jev výskytu vyšších teplot uprostřed snímku není tak výrazný. Zde je rozlišení záznamu menší, takže se celý termogram dostává blíže do středové oblasti s vyššími teplotami. Díky vysoké rychlosti nahrávání 1070 Hz činí vzdálenost posunu laserového paprsku mezi snímky 0,9 mm. Projeví se to hustým zaplněním termogramu zachycenými laserovými spoty. Na obr. 70 vpravo lze nalézt elipsovitou analýzu C1 pro výpočet průměrné teploty, která dává hodnotu 885 °C.



Obr. 70 HoldMax termogram ze zaznamenávané vrstvy 1698 při frekvenci 1070 Hz: bez analýzy (vlevo), s analýzou pro vyhodnocení teplot (vpravo)

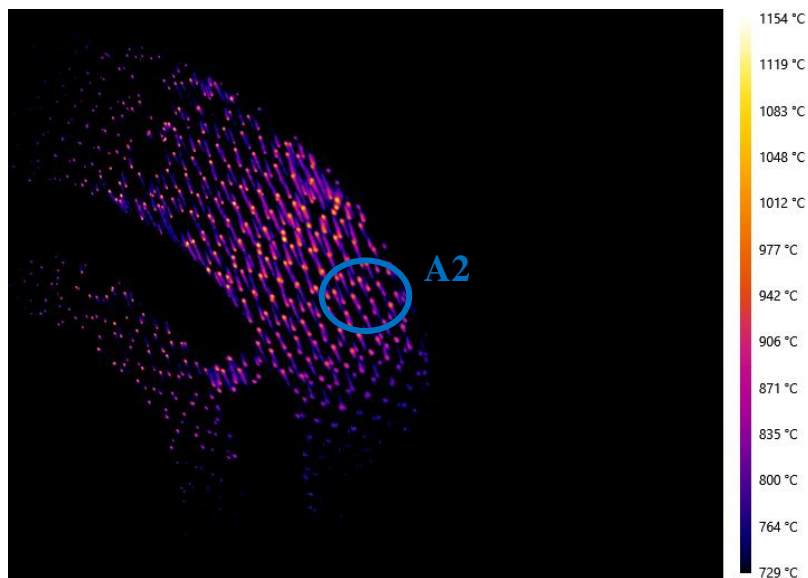
U snímku (obr. 71 vlevo) získaného ze sekvence s frekvencí snímkování 2082 Hz a rozlišením 80 x 64 pixelů je vliv vyšších teplot na středu termogramu silně potlačen. Teploty působí homogenně v celém snímku a zachycené tepelné stopy laseru se nacházejí velmi blízko u sebe, jelikož při této frekvenci urazí laserový paprsek mezi snímky vzdálenost 0,46 mm. Zde je již patrné velké zhoršení kvality způsobené snížením rozlišení. Průměr teplot z analýzy D1 na obrázku 71 vpravo činil 948 °C.



Obr. 71 HoldMax termogram ze zaznamenávané vrstvy 1709 při frekvenci 2082 Hz: bez analýzy (vlevo), s analýzou pro vyhodnocení teplot (vpravo)

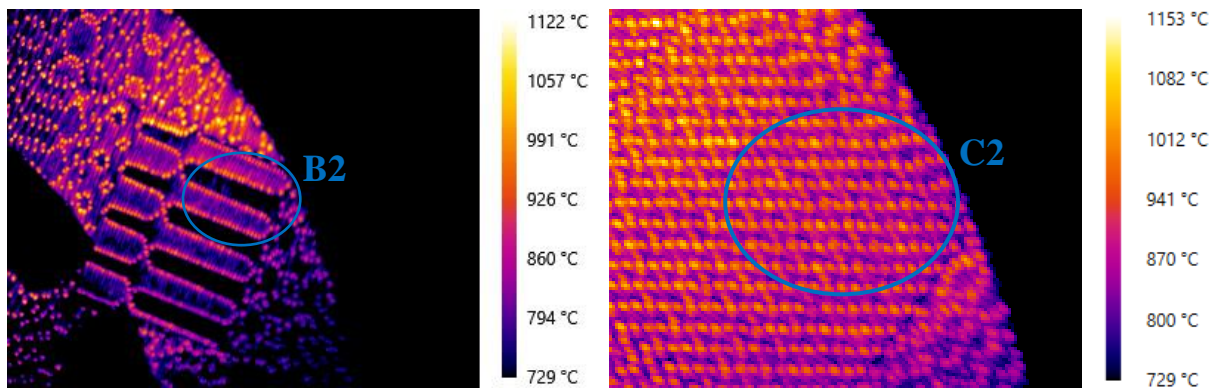
Srovnání použitých teplotních rozsahů

Při použití teplotního rozsahu 700-1500 °C dojde ke snížení integračního času na hodnotu 0,0416 ms. Vyšší minimální snímaná teplota způsobí že nižší teploty nebudou během tisku zaznamenány, ale díky kratší integrační době dojde k ostřejšímu znázornění tepelných spotů. Tento vliv lze pozorovat na obr. 72, kde se nachází HoldMax termogram vrstvy 1706 nahané ve zmíněném rozsahu s frekvencí 125 Hz. Během sbírání dat detektorem se laserový paprsek při rychlosti 960 mm/s posune o 0,04 mm. Vzhledem k rozměru samotného spotu o průměru 0,1 mm nedochází k jeho posunu ani o polovinu jeho velikosti.

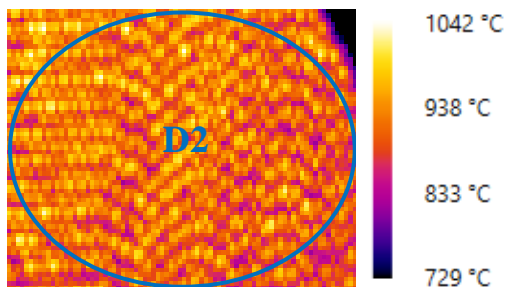


Obr. 72 HoldMax termogram ze zaznamenané vrstvy 1706 při frekvenci 125 Hz s analýzou pro vyhodnocení teplot

Pro snímky získané s vyššími frekvencemi ve stejném rozsahu teplot byly vytvořeny elipsovité analýzy A2-D2 pro zjištění teplot. Snímky lze nalézt na obrázcích 73 a 74.



Obr. 73 HoldMax termogramy s analýzou pro vyhodnocení teplot z vrstev 1705 (vlevo) a 1704 (vpravo)



Obr. 74 HoldMax termogram z vrstvy 1703 s analýzou pro vyhodnocení teplot

Srovnání získaných teplot

Tab. 21 Srovnává teploty získané z jednotlivých oblastí. Důležité je poznamenat, že nebyly porovnávány stejné vrstvy, tudíž proces tisku se mohl mírně změnit a tím dojít i ke změně vyskytovaných teplot.

Tab. 21 Srovnání naměřených teplot z kamery FLIR A6751

Oblast	Vrstva	Teplotní rozsah (°C)	Frekvence snímání (Hz)	Minimální teplota (°C)	Maximální teplota (°C)	Průměrná teplota (°C)
A1	1691	500-1200	125	516	1056	724
B1	1695	500-1200	407	627	1064	806
C1	1698	500-1200	1070	742	1081	893
D1	1709	500-1200	2082	832	1077	948
A2	1706	700-1500	125	729	1036	768
B2	1705	700-1500	407	729	1065	804
C2	1704	700-1500	1070	756	1061	895
D2	1708	700-1500	2082	813	1038	917

Maximální teploty jsou pro všechny analyzované oblasti přibližně stejné. Drobné rozdíly mohly být způsobeny reálně jinými teplotami u různých vrstev během tisku. Průměrné teploty si na shodných frekvencích také odpovídají. Frekvence ovlivňuje, jak blízko u sebe jsou zachycené tepelné stopy. Čím hustěji je oblast body zaplněna, tím více stoupají i hodnoty jejich průměrných teplot. Dochází při tom totiž k úbytku zobrazených chladnějších míst, ve kterých nebylo nic zaznamenáno.

Z tabulky lze usoudit, že teplotní rozsah neměl na maximální ani průměrnou teplotu velký vliv. Výrazný rozdíl nastal pouze u minimálních teplot oblastí A2 a B2, kde byla ve vyšším rozsahu naměřena stejná teplota. Teplota 729 °C je na snímku minimum, kterou snímek ukázal, pokud v daném místě nebyla zachycena žádná tepelná stopa. Značí to tedy reálnou minimální teplotu, kterou je kamera v daném rozsahu schopna snímat. U oblasti C2 jsou díky vyšší frekvenci snímání zachycené stopy již dostatečně blízko u sebe, tudíž zde neprosvítá chladné pozadí a její minimální teplota se oproti B2 zvedla na 756 °C.

Posouzení schopnosti kamery zaznamenávat teploty při 3D tisku

Kamera FLIR A6751 se jeví technicky značně vhodná pro měření teplot při 3D tisku. Její velice krátké integrační časy umožňují zaznamenat teplotu v laserovém spotu takovou rychlostí během níž nedojde k velkému posunu paprsku laseru. Kromě krátkého integračního času má i vhodný tepelný rozsah a frekvence snímání. Vyhovující je i software ResearchIR přes který se kamera připojuje. Obsahuje dostatečné množství funkcí a umožňuje snadné ovládání kamery. Pro vyšší frekvence může nastat problém s příliš malým rozlišením. Dalším problémem vyskytujícím se u této kamery je vznik oblasti vyšších teplot uprostřed snímku při použití objektivu s ohniskovou vzdáleností 100 mm a distančním kroužkem s výškou 1,27 cm.

5.3.3. Teploty z kamery FLIR A615**Přehled měření**

Měření teplot 3D tisku probíhalo s kamerou FLIR A615 při obou experimentech. Pro snímání jednotlivých vrstev byly nastaveny stejné parametry pro oba experimenty. Hlavní teplotní rozsah byl zvolen 100-650°C a dosažená frekvence snímání činila 11 Hz. Integrační čas pro kamery s mikrobolometrickým detektorem se pohybuje okolo 10 ms. Pro nahrávání záznamu byla nastavena emisivita 0,92 a propustnost 1. Při vyhodnocení byly tyto parametry upraveny na

0,28 pro emisivitu a 0,98 pro propustnost. Tyto hodnoty byly získány na základě předchozích výsledků z tab. 7 a 9 v oddílu 4.2.4. Pro lepší přehlednost byly měřicí parametry u vyhodnocených vrstev pro každý experiment shrnuty do tabulek 22 a 23.

Tab. 22 Měřicí parametry kamery FLIR A615 pro 1. experiment

Vrstva	Frekvence snímkování (Hz)	Rozlišení (px)	Teplotní rozsah (°C)	Integrační čas (ms)
667	11	640 x 480	-20-150	10
669	11	640 x 480	100-650	10
680	11	640 x 480	100-650	10
832	11	640 x 480	100-650	10
1691	11	640 x 480	100-650	10

Tab. 23 Měřicí parametry kamery FLIR A615 pro 2. experiment

Vrstva	Frekvence snímkování (Hz)	Rozlišení (px)	Teplotní rozsah (°C)	Integrační čas (ms)
680	11	640 x 480	100-650	10
832	11	640 x 480	100-650	10
1691	11	640 x 480	100-650	10

Při obou experimentech byla kamera umístěna shodným způsobem a byly nastaveny stejné parametry měření i vyhodnocení. Parametry pro proces tisku byly v obou případech také nastaveny totožně. Teploty výsledných záznamů se však mezi sebou výrazně lišily.

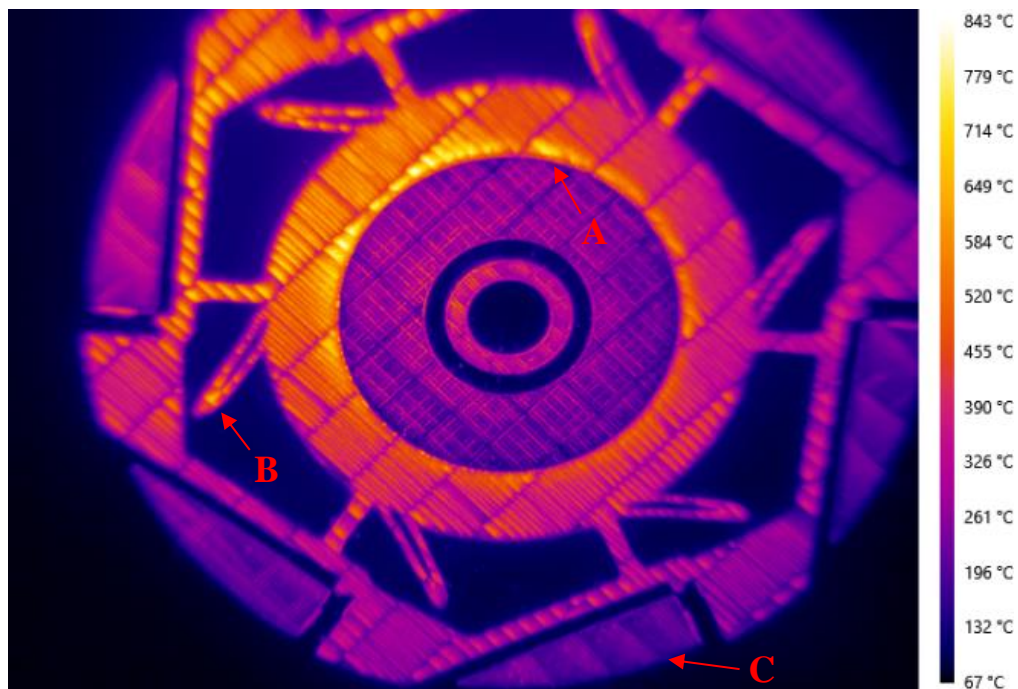
Během vyhodnocení byl mezi experimenty zaznamenán rozdíl ve větším náklonu kamery při druhém experimentu. Větší sklon způsobil vychýlení skenované části v ose y o 27 pixelů mimo obraz nahrávání. U záznamu z kamery použité při druhém měření bylo pozorováno také mírně horší zaostření. Dále bylo zjištěno, že v době mezi jednotlivými experimenty došlo k výměně kazetového filtru, který v recirkulačním filtračním systému zachycuje kovové částice z atmosféry inertního plynu. V ochranné atmosféře tiskárny se mezi experimenty lišila také koncentrace kyslíku. Významný rozdíl v teplotách byl zřejmě způsoben uvedenými skutečnostmi společně s dalšími neobjevenými jevy. Níže jsou záznamy z obou experimentů porovnány.

Porovnání experimentů

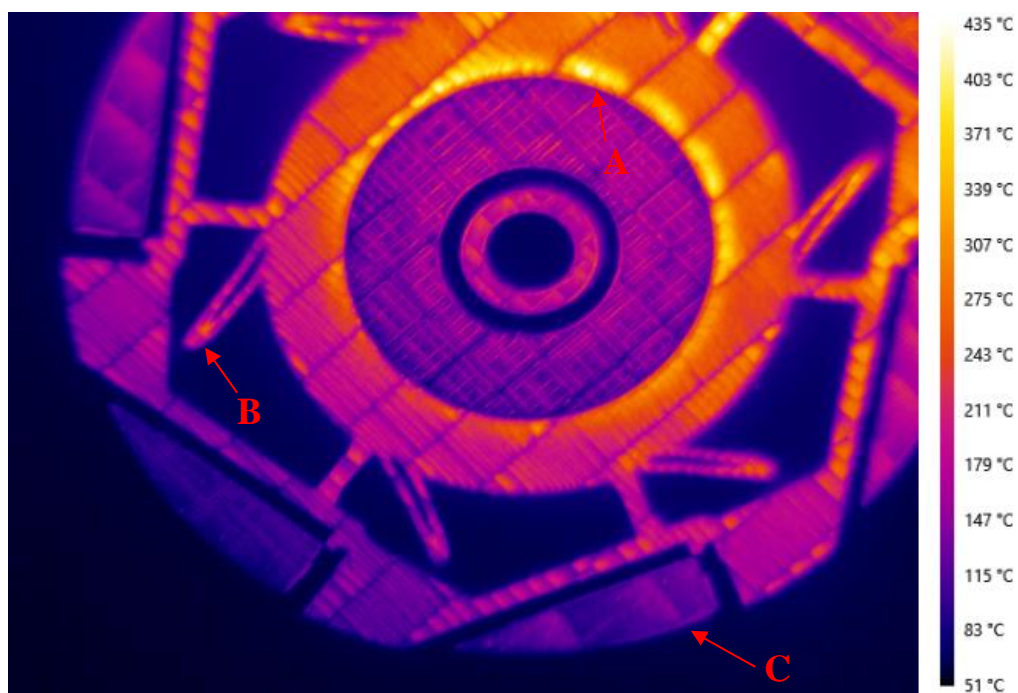
Při experimentu č. 1 byly naměřeny výrazně vyšší teploty než u druhého měření. Srovnání obrázků 75 a 76 zobrazujících HoldMax termogram vrstvy 680 ukazuje, že maximální zachycená teplota u snímku z prvního experimentu činí 843 °C vůči maximální teplotě z druhého snímku 435 °C. Mezi termogramy se neliší pouze maximální teploty, ale i průměrné teploty na skenovaném díle. Oba snímky měly také rozdílný směr, ve kterém teploty přecházely od vyšších k nižším. Tento jev byl označen směrová závislost teplot a je na něj v práci dále odkazováno. U prvního experimentu přecházela od levého horního rohu k pravému spodnímu rohu. U druhého experimentu tomu bylo zrcadlově, tudíž z pravé horní oblasti k levé dolní části.

Na plochách frézovací hlavy u hranice přechodu oblasti podpěr a samotného dílu (označena na obrázcích písmenem A) se objevuje oblast, ve které zřejmě docházelo k akumulaci tepla. Vzhledem ke kruhové geometrii byla šířka řádkování laserového paprsku často zmenšena na úzkou oblast, ve které docházelo k většímu zahřátí součásti. Vyšší teploty jsou pozorovatelné po celém obvodu vnitřního průměru hlavy na snímcích z obou experimentů. Tento jev je umocněn v rámci směrové závislosti teplot. Teplejší se také jeví špičky většiny dutých útvarů, označených na snímcích písmenem B, představující kanálky chlazení. Při porovnání útvaru C ve spodní části frézovací hlavy mezi měřeními, je možné na obr. 75 vidět přejezd laseru ve formě

4 zaznamenaných tepelných stop. U termogramu na obr. 76 jsou vidět stopy pouze dvě a náznak třetí. Tento rozdíl je dán posunem začátku nahrávání vrstvy mezi experimenty a také fluktuací frekvence snímkování, která kolísala v rozmezí ~9-13 Hz.



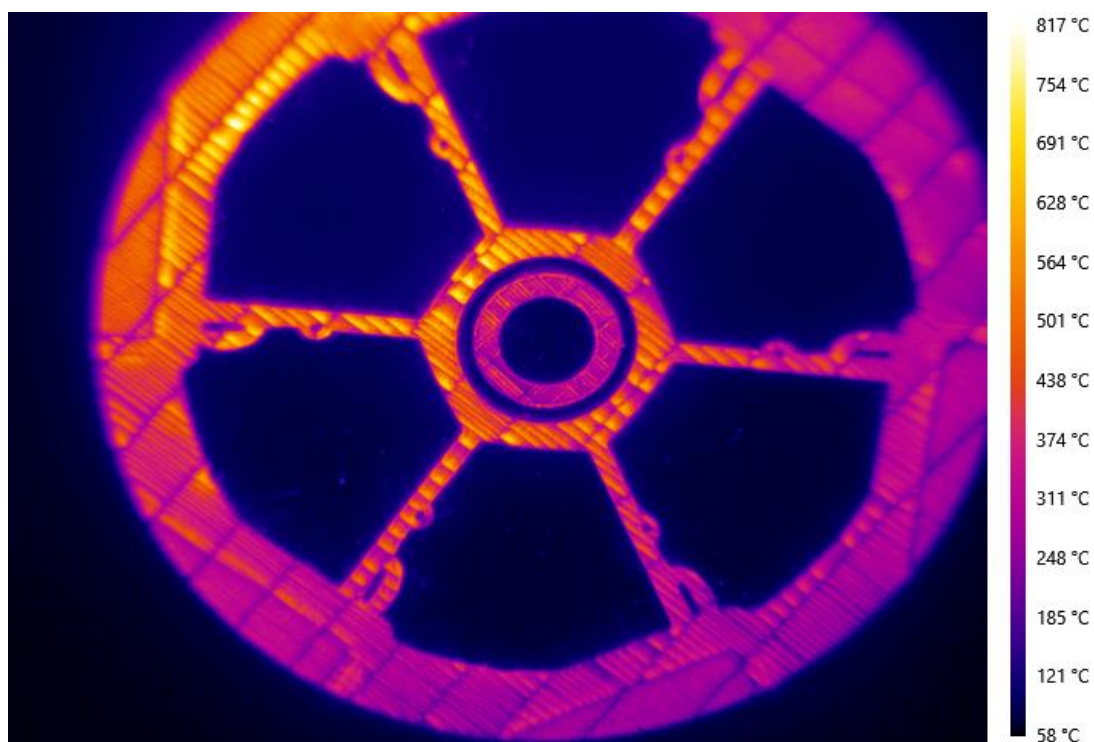
Obr. 75 HoldMax termogram vrstvy 680 z 1. experimentu



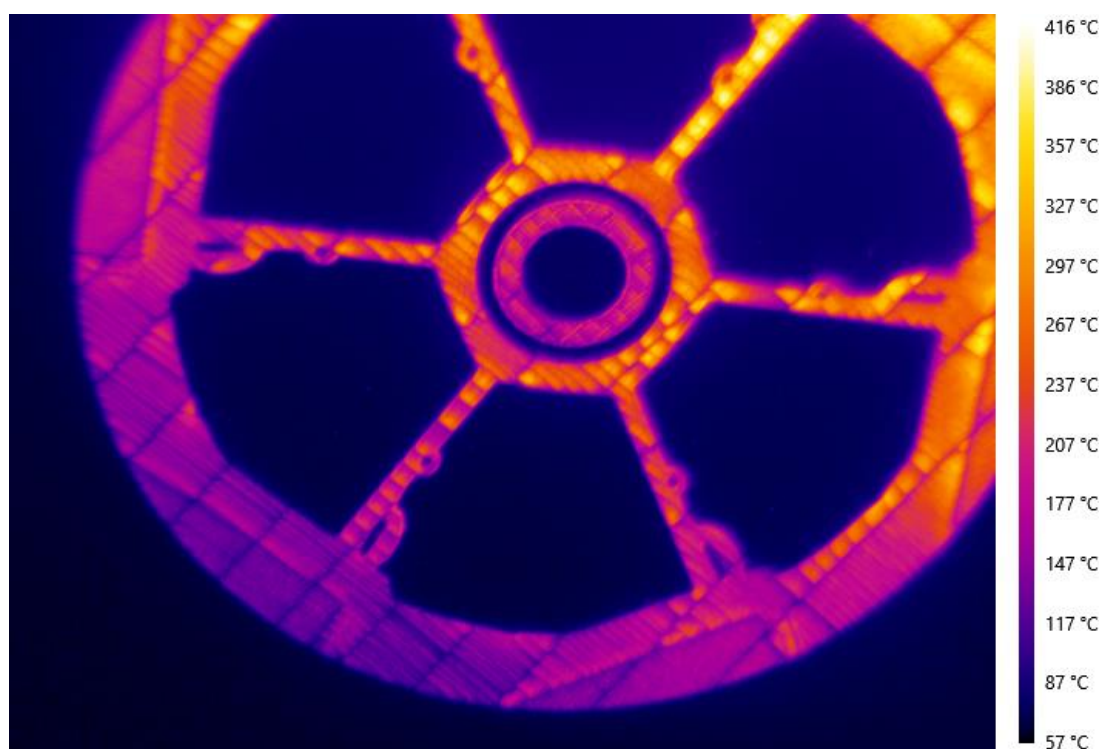
Obr. 76 HoldMax termogram vrstvy 680 z 2. experimentu

Na obrázcích 77 a 78 se nachází termogram získaný ze záznamu vrstvy 832 z obou experimentů. Výrazný je zde rozdíl v maximálních naměřených teplotách, které činí u prvního experimentu 817 °C a u druhého 416 °C. Minimální teploty se liší pouze o 1 °C. Opět byla pozorovatelná směrová závislost teplot, jejíž směr zůstává stejný jako u předchozí vrstvy. Místa, kde

na základě termogramů může docházet k akumulaci tepla, se jeví být středový hexagon a úzké profily, které jej připojují k vnějšímu kruhu.



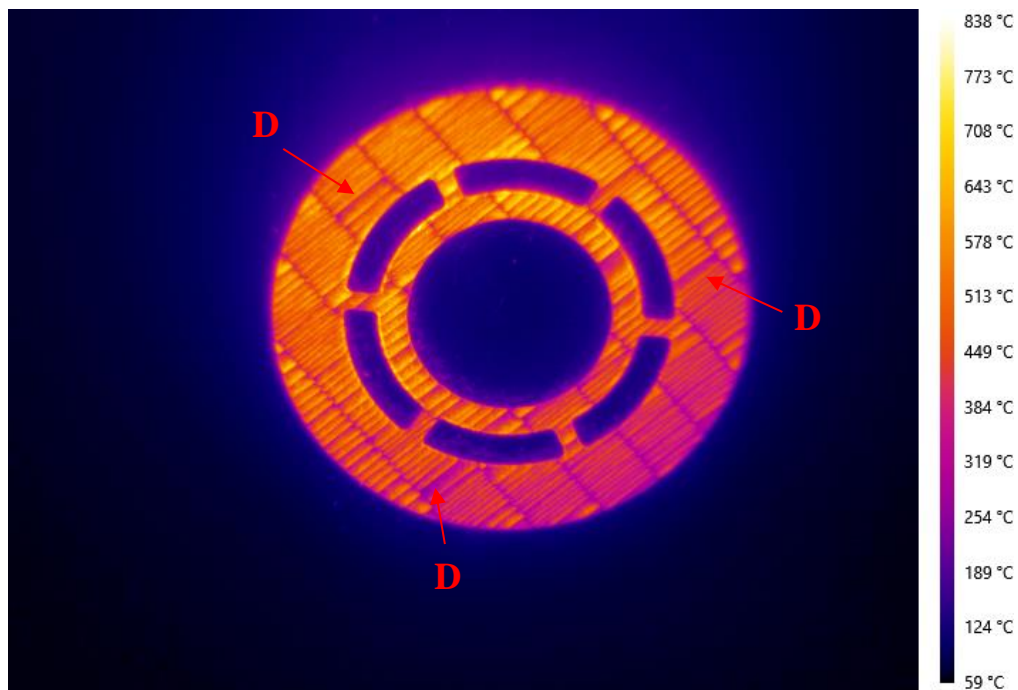
Obr. 77 HoldMax termogram vrstvy 832 z 1. experimentu



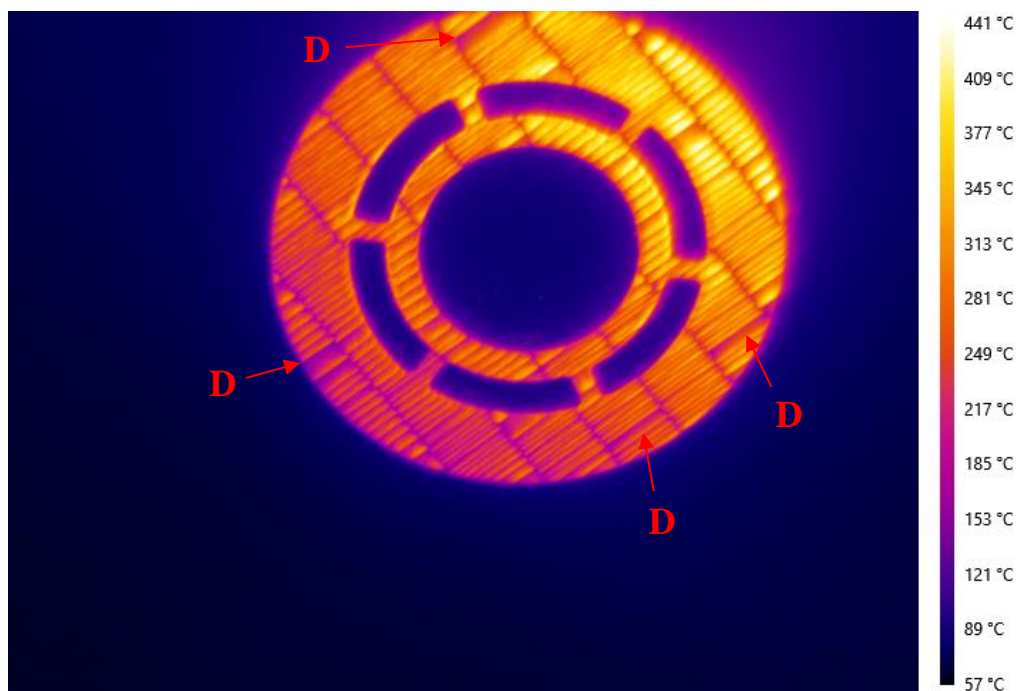
Obr. 78 HoldMax termogram vrstvy 832 z 2. experimentu

HoldMax termogramy na obrázcích 79 a 80 porovnávají mezi experimenty zaznamenanou vrstvu 1691. Maximální teploty dosáhly hodnoty 838 °C při prvním měření a 441 °C při měření druhém. Hodnoty minimálních teplot se nacházejí blízko u sebe s rozdílem 2 °C. Na první

pohled je u druhého ze zmiňovaných snímků zřejmá oblast vyšších teplot oproti zbytku dílu. U prvního termogramu se jeví teploty více homogenně, avšak u obou snímků dochází k výskytu směrové závislosti teplot. Vzhledem k malé geometrické složitosti skenované vrstvy je zde patrná nepravidelnost ve frekvenci snímání projevující se nestejným zachycováním tepelných stop. Tím byl způsoben vznik míst na termogramu, kde v řadě po sobě jdoucích tepelných stop jsou zjevná přerušení způsobená chybějící zachycenou stopou. Patrná místa s chybějící stopou jsou na snímcích označena písmenem D.



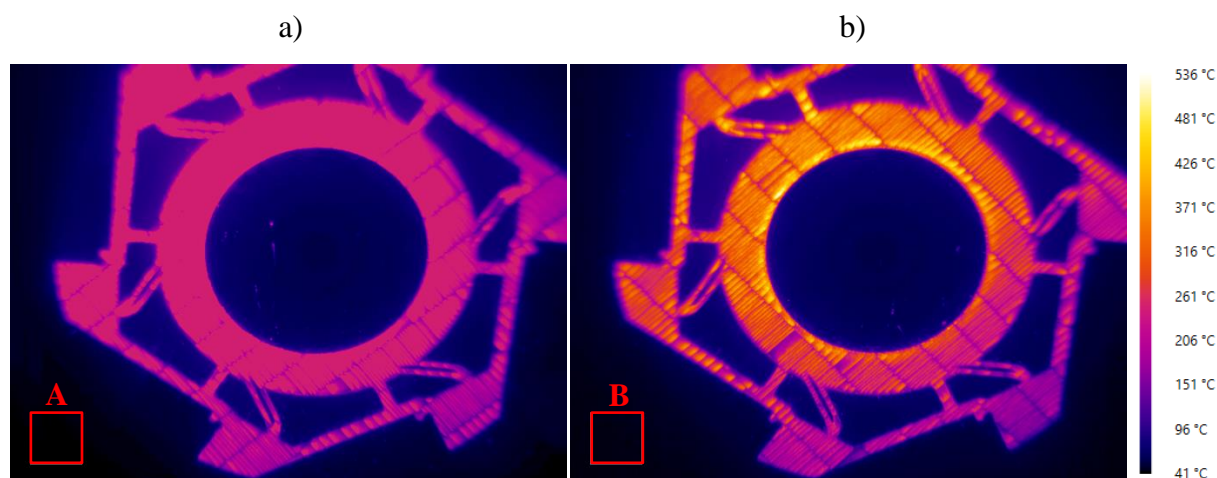
Obr. 79 HoldMax termogram vrstvy 1691 z 1. experimentu



Obr. 80 HoldMax termogram vrstvy 1691 z 2. experimentu

Srovnání teplot prášků

U předchozích snímků si je možné všimnout minimálních zobrazovaných teplot (okolo 60 °C), které se nachází pod využitým teplotním rozsahem kamery. Na těchto teplotách se nachází okolní nespečený prášek. Pro ověření, zda s použitím rozsahu 100-650 °C lze měřit přesnou teplotu prášku, bylo nutné provést porovnání. K tomu byl využit záznam vrstvy 667 z prvního měření, při kterém se měřilo s teplotním rozsahem -20-150 °C a následující vrstva 669, při jejímž měření byl využit vyšší teplotní rozsah. Pro vyhodnocení teploty prášku byla použita zjištěná efektivní směrová emisivita 0,47 pro vzorek 220413-001-002 při teplotě 100 °C a úhlu 20° získaná z tabulky 17 v kapitole 5.2.2. Na obě sekvence byla aplikována funkce HoldMax a v levém dolním rohu byla vytvořena obdélníková analýza pro srovnání teplot. Porovnání využitých snímků s vyznačenou oblastí A a B pro vyhodnocení lze nalézt na obr. 81. U termogramu vlevo je zřejmá ztráta detailů způsobená přesaturováním při měření s nižším teplotním rozsahem.



Obr. 81 Snímky pro porovnání teplot prášku: a) z vrstvy 667 (rozsah -20-150 °C), b) z vrstvy 669 (rozsah 100-650 °C)

Teploty z vyznačených oblastí jsou uvedeny v tabulce 24. Relativní rozdíl mezi průměrnými teplotami činí 13% na základě čehož lze usoudit, že si teploty neodpovídají. Důvodem jsou teploty velmi daleko od měřeného rozsahu, a tudíž nejsou dopočítány kamerou přesně. Kamera je schopna zobrazit i hodnotu teploty pod hodnotou rozsahu, kterou však dopočítává podle kalibrační křivky a při tom dochází k větší nejistotě měření. Čím se budou měřené teploty více blížit k teplotě 100 °C, tím budou přesnější. Výsledkem je, že při měření s rozsahem 100-650 °C není možné měřit a srovnávat přesnou absolutní teplotu prášků. U snímků měřených se stejným teplotním rozsahem je však možné srovnávat tyto teploty mezi sebou relativně.

Tab. 24 Teploty získané z oblastí A a B vrstev 667 a 669

Oblast	Minimální teplota (°C)	Maximální teplota (°C)	Průměrná teplota (°C)
A	41,1	43,8	42,3
B	44,8	51,6	47,9

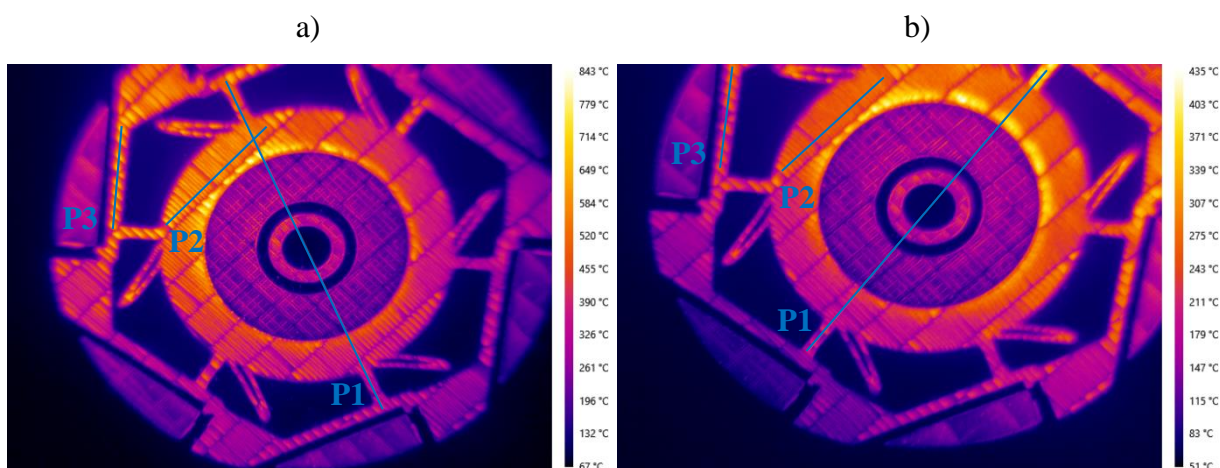
Vzhledem k tomu, že se mezi experimenty vyskytoval vliv, který způsobil výrazný rozdíl v naměřených teplotách, nebylo by smysluplné srovnávat teploty z měření absolutně. V následující části budou prezentovány možnosti vyhodnocení, které se zabývají zejména srovnáním relativním. Jedná se o názornou metodiku práce s termovizními záznamy a jejich vyhodnocení. Pro vyhodnocení byly použity termogramy, teplotní profily, teplotní průběhy v čase a funkce HoldMax.

Vyhodnocení funkcí HoldMax

Vyhodnocení záznamů z kamery FLIR A615 probíhalo v softwaru LabIR. Jednou z možností vyhodnocení sekvence je aplikace HoldMax funkce. HoldMax byla hojně využívána a většina termogramů byla zpracována pomocí této funkce. Tento způsob vyhodnocení dokáže zobrazit v jednom termogramu maximální teploty z celého záznamu ve všech místech najednou. Umožňuje tím kontrolu a vizualizaci postupu procesu. Ze zobrazených maximálních teplot na celém objektu lze zkontrolovat, zda se někde nenachází místo s nižší teplotou, které by mohlo indikovat špatné spečení a defekty.

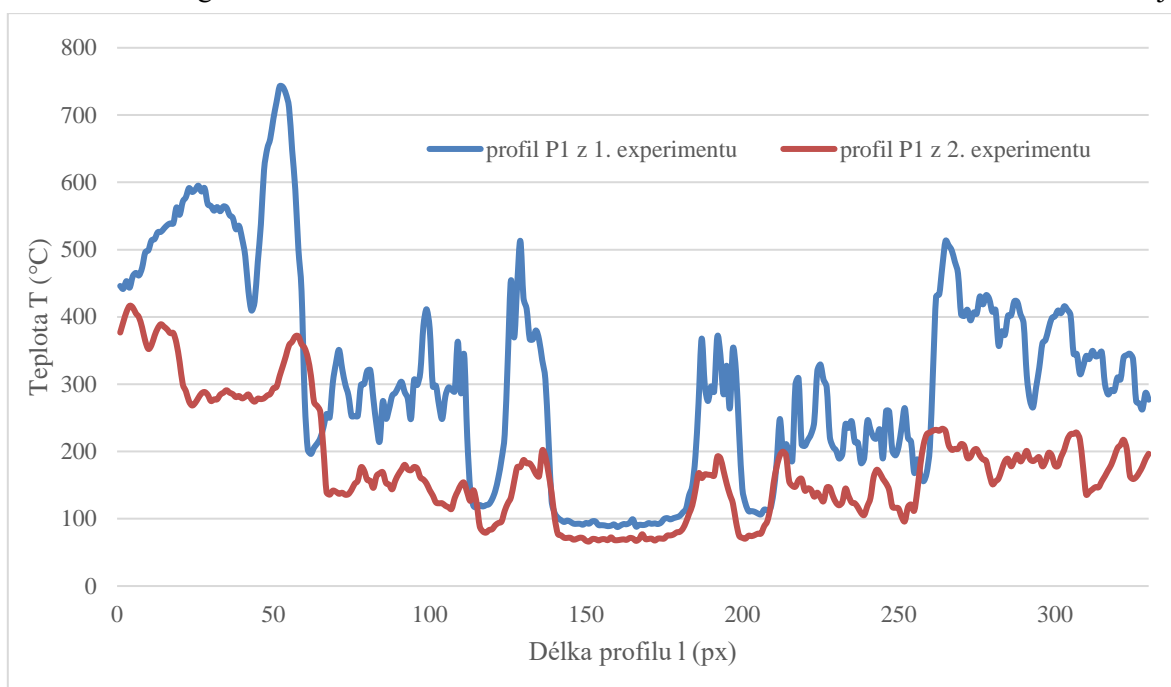
Vyhodnocení prostorového rozložení teplot

Na obrázku 82 se nachází HoldMax termogramy získané z vrstvy 680 s vyznačenými analýzami pro vyhodnocení sekvence pomocí teplotních profilů. Teplotní profil je závislý na umístění a pro každý jeho pixel je zobrazena hodnota teploty z termogramu. V tomto případě byly teplotní profily umístěny na HoldMax snímek a jejich přesnou pozici si lze prohlédnout na obr. 82. Díky použitému HoldMax snímku jsou vyhodnoceny teploty z celé sekvence. Profil P1 byl umístěn přes téměř celý průměr frézovací hlavy tak aby byl souhlasný se směrovou závislostí teplot na délce. Profily P2 a P3 byly v obou experimentech umístěny na identickou část v měřené vrstvě frézovací hlavy. Při znázornění teplotních profilů v grafu je třeba prezentovat teploty od jednoho konce profilu k druhému. Zde je směr profilů určen tak, že začínají neoznačenou částí a končí jejich popiskem.



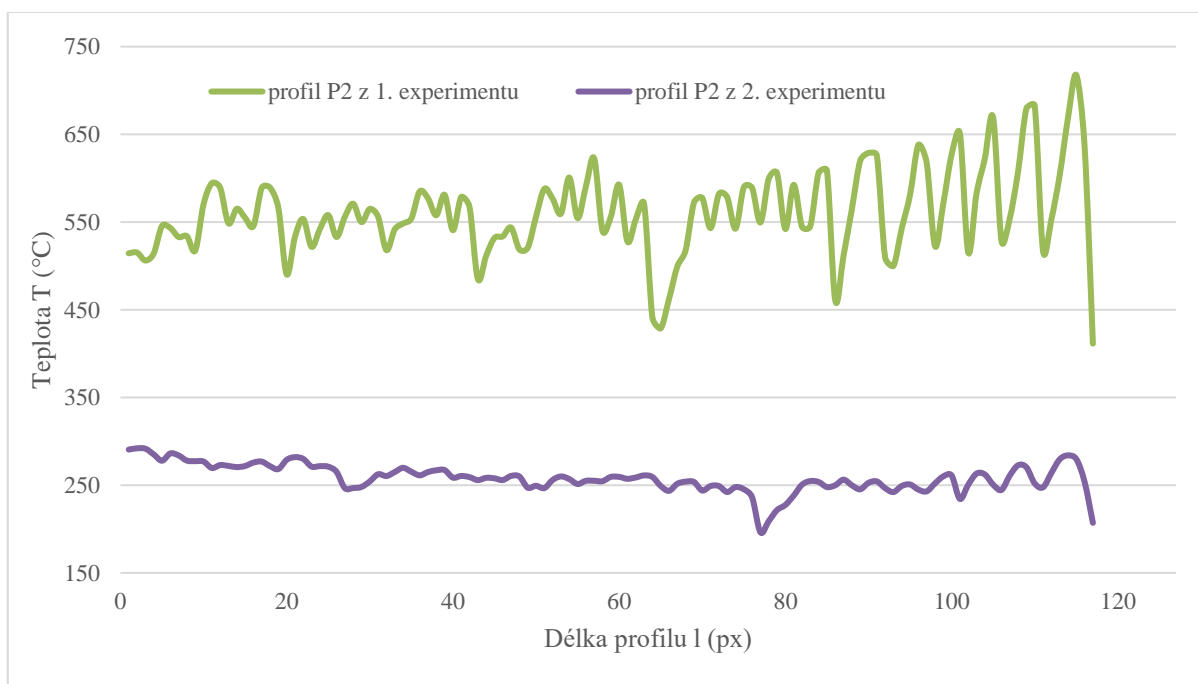
Obr. 82 HoldMax termogram vrstvy 680 s teplotními profily: a) z 1. experimentu, b) z 2. experimentu

Na obr. 83 je graf porovnávající teplotní profily P1 z obou experimentů. Z profilů je zřejmý teplotní rozdíl v celé délce profilů. Dále je patrná již zmiňovaná směrová závislost teplot, která se projevuje zejména při porovnání na délce okolo 50 pixelů a 260 pixelů (přechod oblasti podpěr na hranu dílu) výrazným poklesem teplot. Teploty ve středu součásti, kde se nachází prášek, se liší minimálně, kdyžto u vyšších teplot na vzorku dochází až k jejich dvojnásobnému rozdílu. Zajímavým zjištěním je, že u profilu P1 z 2. experimentu nedošlo v oblasti podpěr k poklesu teplot. To platí zejména pro středové mezikruží znázorněné na grafu v oblasti okolo 130 a 190 pixelů.



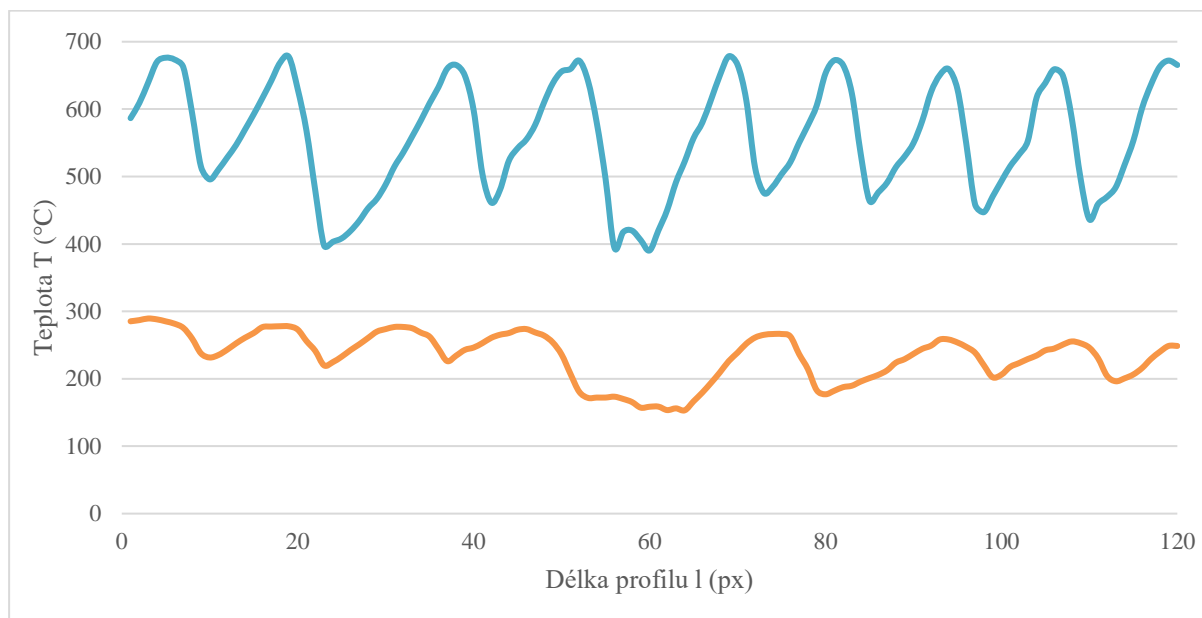
Obr. 83 Graf teplotních profilů P1

Obrázek 84 obsahuje graf srovnávající teplotní profily P2. Na grafu si lze všimnout propadu obou křivek v místě, kde kamera vynechala zaznamenání tepelné stopy. U profilu z 1. experimentu tento jev nastal nejvýrazněji na délce 65 pixelů, u druhého z profilů na délce 77 pixelů. Dále je možné u obou profilů pozorovat rozkmitání hodnot teplot způsobené změnou šířky skenovaného pruhu. Zúžením pruhu se rychleji dokončí skenovaná řádka a pohyb laseru se ve směru řádkování zrychlí. Tím pádem se prodlouží vzdálenosti mezi stopami, které je kamera schopna zachytit a dojde k výraznějšímu střídání vyšších a nižších teplot. Protože šířka skenovaného pruhu byla menší, nedocházelo k tak velkému rozvodu tepla a teploty postupně narůstaly.



Obr. 84 Graf teplotních profilů P2

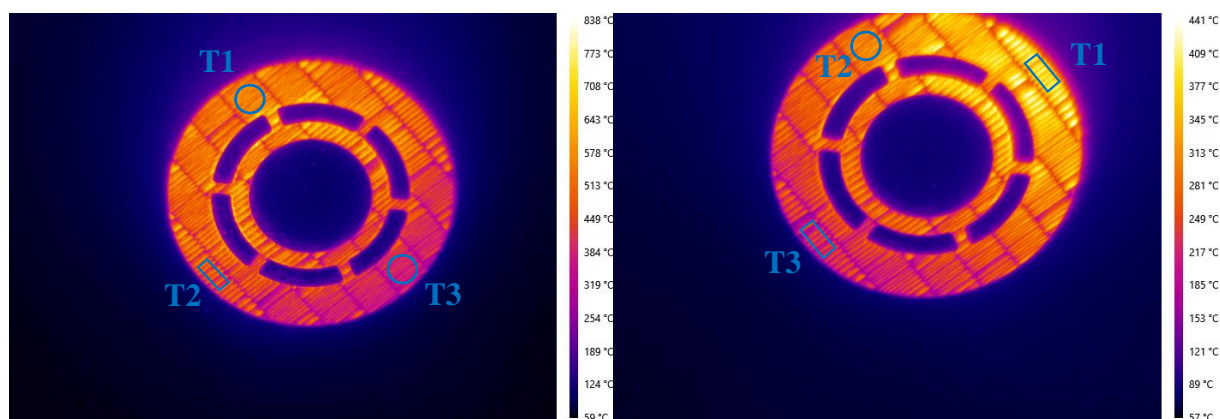
Graf teplotních profilů P3 se nachází na obr. 85. U profilu P3 z 1. experimentu bylo zachyceno střídání vyšších a nižších teplot s tím, že horní teploty se v celé délce držely kolem hodnoty 675°C. U druhého profilu k tomuto nedocházelo, jelikož jeho teploty postupně klesaly. Na vzdálenosti 60 pixelů je u obou profilů zřejmý propad teplot. Na odpovídající pozici se na snímku nacházel předěl pruhu, který způsobil, že jej kamera zachytila jako chladnější oblast. K cyklickému opakování teplot docházelo z důvodu úzké šířky pruhu v místě profilu. Laserový paprsek se posouval tak rychle, že docházelo k záznamu malého počtu snímků na plochu a kvůli tomu jsou zjevné pravidelné rozdíly v teplotě.



Obr. 85 Graf teplotních profilů P3

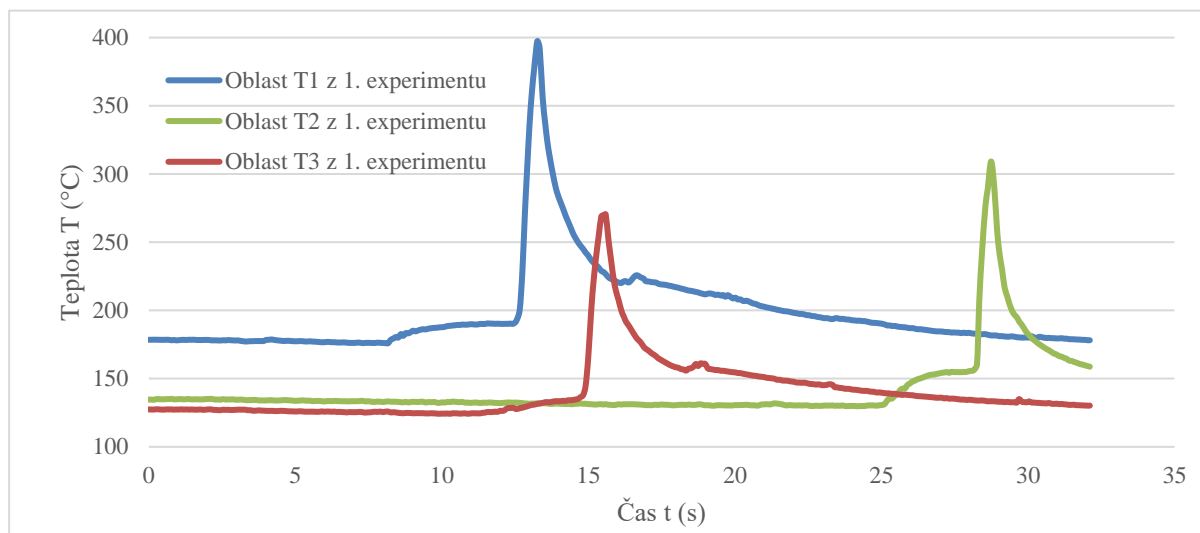
Vyhodnocení časového rozložení teplot

Dalším způsobem vyhodnocení je časové rozložení teplot. Provádí se vytvořením teplotních průběhů v čase z dané oblasti. Teplotní průběh zaznamenává průměrnou teplotu z každého snímku sekvence a na jeho základě je vytvořen graf, který ukazuje, jak teploty v oblasti postupovaly. Na obrázku 86 se nachází HoldMax termogramy z vrstvy 1691 s vyznačenými 3 oblastmi, které jsou sledovány. Analýza T1 byla umístěna do oblasti s nejvyšší teplotou a analýza T3 naopak místa s nejnižšími teplotami. T2 zaznamenávala oblast na středu mezi zmíněnými oblastmi.



Obr. 86 termogram vrstvy 680 s analýzami teplotních průběhů: a) z 1. experimentu, b) z 2. experimentu

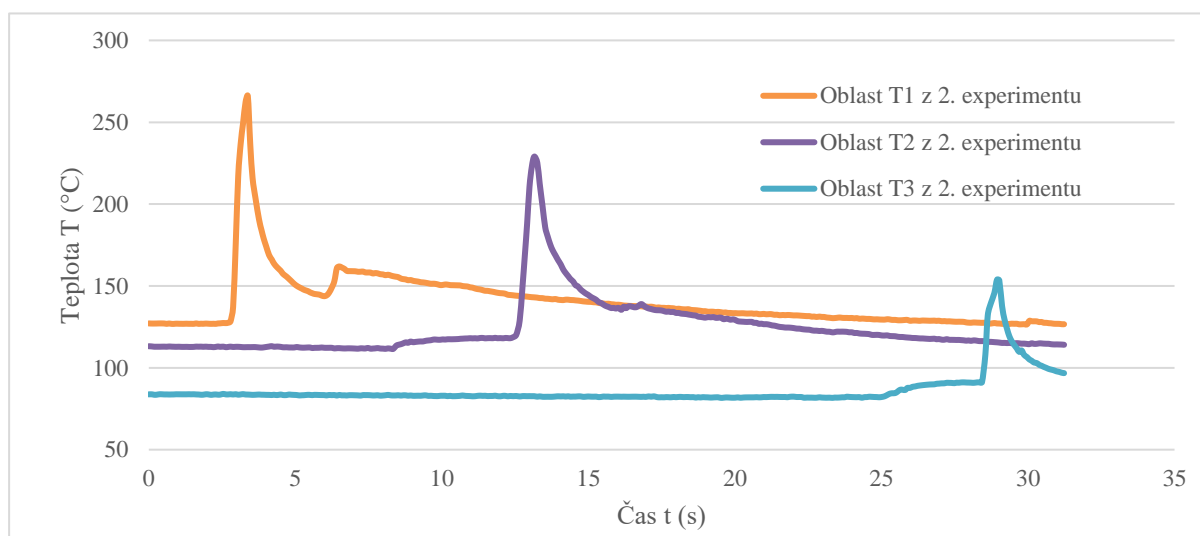
Na obrázku 87 lze nalézt graf znázorňující teplotní průběhy v čase oblastí T1-T3 z prvního experimentu. Analýzou křivek lze zjistit v jakém čase se laserový paprsek blížil k vybrané oblasti. V čase 8 s je pozorovatelný malý nárůst teploty způsobený přejezdem laseru předchozím pruhem. V čase 12,5 s je patrný strmý nárůst teploty na více než dvojnásobnou teplotu signalizující vjezd laserového paprsku do oblasti. Na křivce chladnutí je v čase 16,6 s viditelné mírné zvýšení teploty indikující přejezd laseru následujícím pruhem. Stejným principem lze analyzovat i oblasti T2 a T3. Z teplotních průběhů lze také jednoduše zjistit směr skenování porovnáním časů výskytu teplotních maxim a pozice sledovaných oblastí na zaznamenaná vrstvě.



Obr. 87 Teplotní průběhy oblastí T1, T2 a T3 z 1. experimentu

Obrázek 88 obsahuje graf porovnávající teplotní průběhy v čase oblastí T1-T3 při 2. experimentu. Při analýze průběhu z oblasti T1 si lze všimnout, že se zde nevyskytoval žádný pozvolný náběh teploty, ale rovnou prudký vzrůst. Tento jev byl způsoben kombinací umístění oblasti a směrem řádkování laseru. T1 byla umístěna na kraj vzorku u kterého laser začínal skenovat, tudíž nebylo, co by oblast před plným vjezdem laserového paprsku zahřálo.

Při porovnání maximálních teplot v oblasti T1 mezi experimenty nedošlo u 2. měření k výskytu tak vysokých teplot jako u 1. experimentu. Avšak při porovnání relativního rozdílu před a po působení laseru je možné zjistit, že došlo k velmi podobnému procentuálnímu nárůstu 204% u prvního vůči 207% u druhého experimentu.



Obr. 88 Teplotní průběhy oblastí T1, T2 a T3 z 2. experimentu

Periodické záznamy

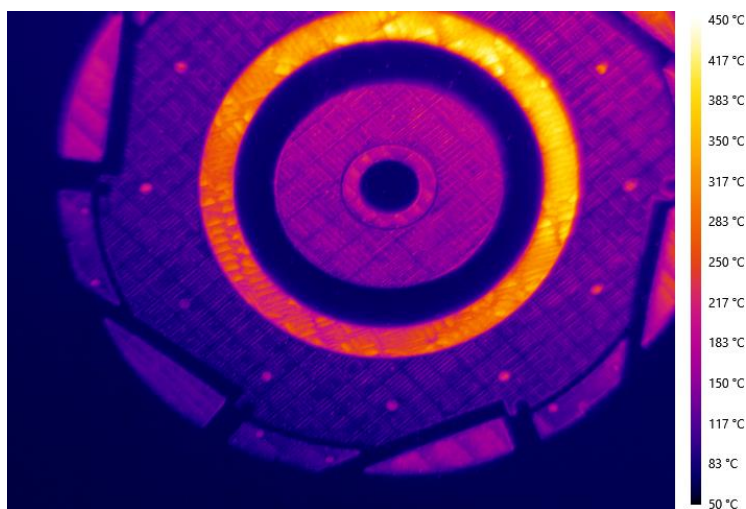
Kamerou FLIR A615 bylo kromě měření vrstev prováděno také periodické nahrávání tisku. Záznam probíhal od počátku tisku až do jeho konce s přestávkami, kdy se měřily vrstvy vybraných řezů. Perioda činila 30 min a začínala vždy samotným záznamem, který probíhal po dobu 5 min (25 minut čekání, 5 minut měření). Celkem bylo provedeno 94 záznamů, jež byly zpracovány aplikací funkce HoldMax. Jejich přehled a očíslování se nachází v tabulce 25. Šedě jsou v tabulce podbarveny časy, kdy došlo k vynechání periodického záznamu z důvodu měření vybraných řezů. Všechny výsledné snímky lze nalézt v příloze 2.

Tab. 25 Přehled získaných termogramů z periodického záznamu

Číslo termogramu				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Čas od začátku tisku (h)				0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16	16,5	17	17,5	18,5	19
39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
19,5	20	20,5	21	21,5	22	22,5	24	24,5	25	25,5	26	26,5	27
53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
27,5	28	28,5	29	29,5	30	30,5	31	31,5	32	32,5	33	33,5	34
67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
34,5	35	35,5	36	36,5	37	37,5	38	38,5	39	39,5	40	40,5	41,5
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94
42	42,5	43	43,5	44	44,5	45	45,5	46	46,5	47	47,5	48	48,5

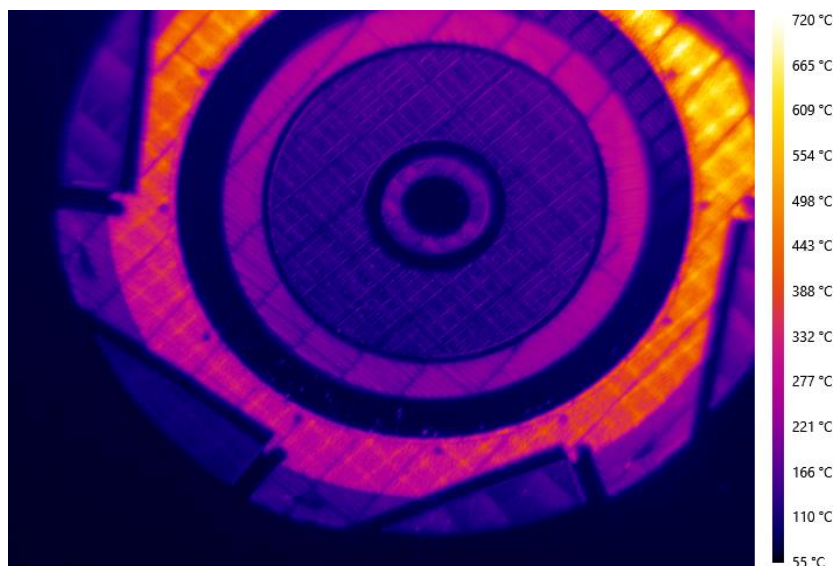
Záznamy z periodického měření se od klasických lišily tím, že během jeho nahrávání mohlo dojít k tisku několika po sobě jdoucích vrstev. To platí zejména pro záznamy ke konci tisku, kdy probíhaly vrstvy mnohem rychleji než na začátku.

Pro ukázkou byly vybrány dva snímky z periodického záznamu, které jsou v tabulce 25 zvýrazněny tučně. První ze snímků (obr. 89) zachycuje začátek tisku, kde ještě nedochází k tisku vlastní frézovací hlavy. Na termogramu je vidět pouze tepelná stopa zachycující tisk podpěr a podpěrné duté tyče, která byla po tisku odstraněna.



Obr. 89 HoldMax termogram z periodického záznamu v časech přibližně 2 h od začátku tisku

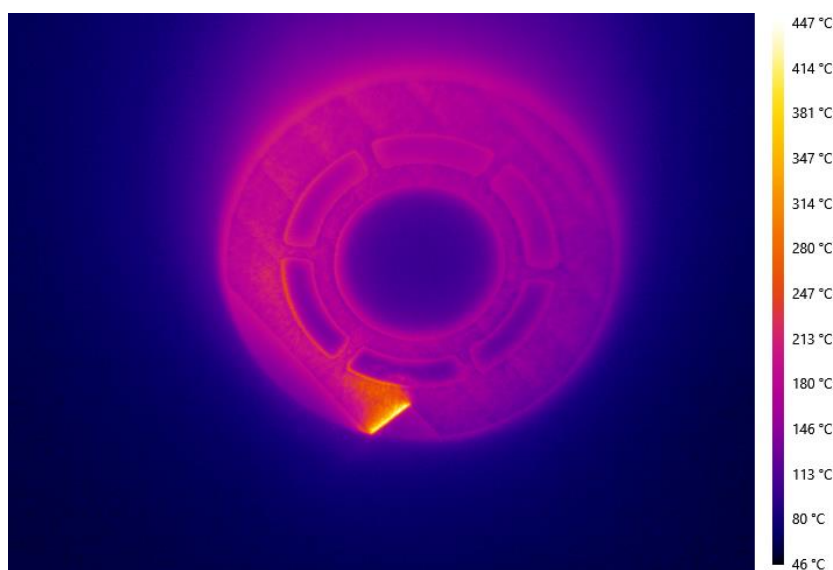
Druhý z termogramů (obr. 90) zobrazuje snímek, u kterého se vyskytly maximální teploty 720 °C. Z rozložení jeho barev je patrné, že se nejedná pouze o bodovou hodnotu, ale celou oblast s vysokými teplotami. Také je zřejmé, že se nejedná o úzké oblasti, ve kterých by docházelo k akumulaci tepla. U dalších periodických záznamů se maximální teploty pohybují běžně okolo 480 °C. To naznačuje, že během samotného tisku docházelo k působení vlivů, které mohly takto razantně ovlivnit zaznamenávané teploty. K rozdílnému působení těchto vlivů zřejmě docházelo i mezi měřeními experimenty, jelikož u 2. experimentu došlo k naměření maximálních hodnot okolo 800 °C, kterým se hodnota 720 °C velmi blíží.



Obr. 90 HoldMax termogram z periodického záznamu v časech přibližně 12 h od začátku tisku

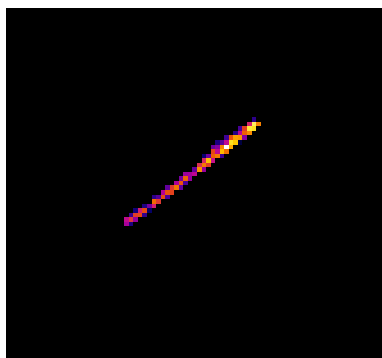
Rozbor tepelné stopy

V téměř celé práci se vyskytují termogramy na něž byla aplikována HoldMax funkce. Na obrázku 91 se vyskytuje termogram bez použití této funkce. Je tedy vidět pouze jedna tepelná stopa. Kamera FLIR A615 se při záznamu lišila oproti zbylým dvěma kamerám tím, že její teplotní rozsah umožňoval snímat teploty, jak v místě působení laseru, tak i za ním. Z toho důvodu vypadá její zachycená laserová stopa jinak.



Obr. 91 Ukázka termogramu bez aplikace HoldMax funkce

Snímek však lze dále upravit. Oříznutím všech teplot pod 390 °C se z předchozího termogramu získá detailně znázorněná jedna tepelná stopa, viditelná na obr. 92. Integrační čas kamery je 10 ms a za tuto dobu urazí laserový paprsek dráhu 9,6 mm, což téměř odpovídá šířce jednoho skenovaného pruhu.



Obr. 92 Detailně znázorněná tepelná stopa zachycená kamerou FLIR A615

Posouzení schopnosti kamery zaznamenávat teploty při 3D tisku

V porovnání s kamerou FLIR A6751 nedisponuje kamera FLIR A615 natolik vhodnými technickými parametry. S integračním časem 10 ms činí posun laserového paprsku mezi snímky 9,6 mm a dokáže tedy na rozdíl od kamery MIKRON MCS640 zaznamenat průjezd každým řádkem ve skenovaném pruhu. Její hlavní výhodou je široký teplotní rozsah s nízkou minimální zaznamatelnou teplotou. Rozsah umožňuje snímat teploty i v okolí laserového spotu a nejen v jeho těsné blízkosti jako tomu je u ostatních použitých kamer. Díky tomu se kamera při použití správného rozsahu jeví jako vyhovující pro monitorování teplot prášku či procesu chladnutí. Kamera je kompatibilní s vhodným softwarem LabIR, který umožňuje měření a vyhodnocení pomocí velkého množství funkcí.

Nevýhodou kamery je její nízká frekvence snímání, která navíc není stálá, ale v průběhu měření značně kolísá. Při použití jiné kombinace kamery s počítačem by tento problém mohl být eliminován a mohlo by být i dosaženo vyšších frekvencí.

Kamera naměřila mezi experimenty výrazné rozdíly v teplotě. Při prvním experimentu se maximální teploty měřených vrstev pohybovaly okolo 800 °C, kdežto u druhého experimentu kolem 430 °C. Na využití tiskárně není používán monitorovací systém, který by mohl procesní homogenitu ověřit. Z periodického záznamu bylo zjištěno, že teploty během druhého experimentu nejsou vždy tak nízké, jelikož došlo k naměření i hodnoty 720 °C. Teplotní profil přes frézovací hlavu poukazuje na podobnost teplot u tiskových prášků. Stejně tak teplotní průběhy, které ukazují téměř stejný relativní rozdíl teplot před a po skenování oblasti laserem. Zmíněné skutečnosti naznačují, že měření proběhlo v pořádku a že se při procesu tisku vyskytuje vliv, který dokáže teploty výrazně ovlivnit. Další experiment by mohl vliv způsobující nerovnoměrnost teplot odhalit.

6. Závěr

Diplomová práce se zabývá využitím vlastností vysoce emisivních termografických barev pro bezkontaktní měření teploty v aditivních technologiích.

Rozbor současného stavu shrnuje poznatky v oblasti měření teploty a zmiňuje její metody. Popsáno bylo také infračervené záření a optické vlastnosti materiálů. V závěru kapitoly jsou uvedené různé typy aditivních technologií rozdělené podle typu spojovaného materiálu.

Vlastnosti LabIR barvy před a po zatěžování

Pro získání poznatků o změně emisivity na vzorcích s nanesenou vysoceemisivní termografickou LabIR barvou bylo třeba provést řadu měření. Jako první byly vzorky měřeny metodou SNHRRT pro zjištění vlastností barvy před zatěžováním. Následovalo tepelné zatěžování vzorků na topné desce, v peci či laserem a opětovné měření metodou SNHRRT pro zjištění vlastností vzorků po tepelném zatěžování. Výsledkem byly spektrální průběhy emisivity termografické barvy a její pásmové emisivity pro spektrální rozsahy využívaných kamer.

Pro vlnové délky 0,85-1 μm byla změna pásmové emisivity vzorků zatěžovaných do 400 °C před a po tepelným zatěžováním zanedbatelná v rámci nejistoty měření. V rozsahu teplot zatěžování 500-800 °C emisivita s rostoucí teplotou klesá a je dosahováno rozdílu až 11,5%. Při teplotách nad 800 °C docházelo k enormní degradaci termografické barvy, což se projevilo její delaminací od podkladového materiálu. Kvůli degradaci barvy nebyly v tomto rozsahu delaminované vzorky měřeny.

V pásmu vlnových délek 3-5 μm nebyly do teploty zatěžování 400 °C projeveny znatelné změny. Pro teplotu 500 °C pásmová emisivita skokově klesá o 19,6%. Klesá i dále pro teploty do 700 °C až o hodnotu 40,2%. Na teplotě 800 °C se pokles zastavil a při teplotách zatěžování 900 a 1000 °C byla naměřena vyšší emisivita.

Změna pásmové emisivity v rozsahu vlnových délek 7-14 μm byla zanedbatelná až do teplot zatěžování 800 °C, kdy se oproti původní hodnotě zvětšila o 1,9%. Maximální odchylka nastala na teplotě 1000 °C s rozdílem 5,4%.

Vlastnosti tiskového materiálu

Znalosti emisivity termografické barvy byly použity pro další skupinu měření. První skupinou bylo měření metodou SNHRRT materiálů využívaných při 3D tisku, a to jak ve formě tiskového prášku, tak ve formě již vytisknutého materiálu. Měření tiskových materiálů proběhlo i metodou EDEHT pro zjištění efektivní hodnoty emisivity pro měřicí termovizní systémy. Výsledkem byly spektrální průběhy emisivity materiálů, pásmové hodnoty emisivity pro rozsahy podle použitých termovizních kamer a efektivní hodnoty emisivity pro tiskové materiály s daným měřicím systémem.

U práškových materiálů MS1 a 316L bylo naměřeno velice podobných pásmových emisivit. Konkrétně 0,591 pro MS1 a 0,590 pro 316L v rozsahu vlnových délek 3-5 μm . Ve stejném pásmu vycházela emisivita 0,644 pro prášek z IN718. Pásmová emisivita pro vlnové délky 7-14 μm byla u měřených prášků nižší. Výsledná hodnota činila 0,551 pro MS1 i 316L a 0,610 pro IN718. Pro vytištěný vzorek z materiálu MS1 byla měřena emisivita ve 3 spektrálních pásmech. Jejich odpovídající hodnoty byly naměřeny 0,879 (pásmo 0,85-1 μm); 0,486 (pásmo 3-5 μm) a 0,279 (pásmo 7-14 μm). Hodnota 0,879 je dále použita pro vyhodnocení termovizních záznamů.

Z metody EDEHT byly získány závislosti efektivní hodnoty emisivity na úhlu snímání a teplotě. Tyto závislosti jsou pro všechny 3 druhy tiskových prášku podobné. S rostoucím úhlem

emisivita klesá, nejprve mírně a od úhlu 50° již výrazně. Zvyšující se teplota způsobí pokles emisivity. U vytisknutého vzorku je závislost efektivní emisivity na úhlu neměnná až mírně rostoucí. S vyšší teplotou dochází ke skokovým nárůstům emisivity v důsledku oxidace materiálu. Oxidace materiálu MS1 nastávala nad teplotou 400 °C. Pro vyhodnocení termovizních záznamů byly využity výsledky z této kapitoly. Mezi použité hodnoty patří efektivní směrová emisivita na úhlu 20° a teplotě 400 °C pro tisknutý materiál 0,28 v rozsahu 7-14 μm; efektivní směrová emisivita na úhlu 20° a teplotě 400 °C pro tisknutý materiál 0,77 v rozsahu 3-5 μm a efektivní směrová emisivita na úhlu 10° a teplotě 100 °C pro práškový materiál MS1 0,47.

Povrchové teploty u procesu 3D tisku

Bylo provedeno bezkontaktní měření povrchových teplot 3D tisku, pro které byly využity 3 termovizní kamery. Měření probíhalo ve 2 experimentech, při kterém byl nahráván proces tisku stejné frézovací hlavy. Na modelu byly vybrány 3 řezy, ve kterých byl snímán tisk jednotlivých vrstev. Pro vyhodnocení záznamů bylo využito výsledků z předchozích experimentů. Samotné vyhodnocení teplot probíhalo formou termogramů, HoldMax termogramů, teplotních profilů či teplotních průběhů. Kromě snímání vrstev ve vybraných řezech byl vytvářen periodický záznam tisku od začátku až do konce v půl hodinových intervalech s délkou měření 5 min.

Na základě výsledků byla posouzena vhodnost jednotlivých kamer pro měření povrchových teplot 3D tisku. Kamera MIKRON MCS640 byla shledána jako nevhodná zejména z důvodu její vysoké minimální zaznamenávané teplotě způsobující ve snímku velké množství šumu. Další její nevýhodou je integrační čas 16 ms. Za tuto dobu urazí laserový paprsek 15,36 mm, což je větší než šířka 10 mm u skenovaných pruhů.

Kamera FLIR A6751 se jeví jako vhodná. Její velice krátké integrační časy až 41,6 μs umožňují zaznamenat teplotu v laserovém spotu takovou rychlostí během níž dojde k posunu paprsku laseru až o minimální hodnotu 0,04 mm. Vhodný je i její teplotní rozsah a frekvence snímání.

Kamera FLIR A615 nekonkuruje svými parametry předchozí zmíněné kameře. S integračním časem 10 ms činí posun laserového paprsku mezi snímky 9,6 mm a dokáže tedy zaznamenat průjezd každým řádkem ve skenovaném pruhu. Její výhodou je široký teplotní rozsah umožňující snímat teploty i v okolí laserového spotu a nejen v jeho těsné blízkosti jako tomu je u ostatních použitých kamer. Při experimentu 1 měřeného kamerou FLIR A615 byly však naměřeny výrazně vyšší teploty (~800 °C), než u druhého experimentu (~430 °C). Příčina této skutečnosti nebyla jednoznačně objasněna. U snímků vrstev z obou experimentů byly nalezeny podobné teploty tiskových prášků a trendy vývoje teplot si blízce odpovídaly, což nenaznačuje chybu v procesu měření. Dále bylo z periodického záznamu zjištěno, že teploty během druhého experimentu nejsou vždy tak nízké, jelikož došlo k naměření i hodnoty 720 °C. To naznačuje, že existují vlivy, které způsobují výrazné změny teplot v technologické části procesu. Další experiment by mohl navést na konkrétní příčinu ovlivňující teplotní nerovnoměrnost v průběhu tisku.

Použitá literatura

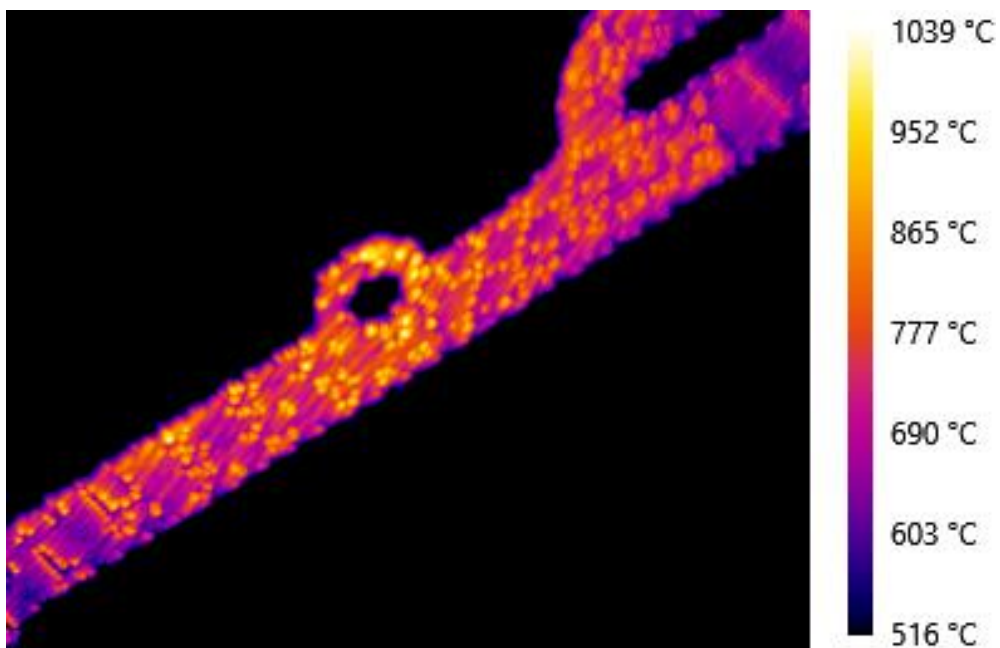
- [1] CHILDS, Peter R.N. Temperature. Practical Temperature Measurement [online]. Elsevier, 2001, 2001, s. 1-15 [cit. 2022-05-08]. ISBN 9780750650809. Dostupné z: doi:10.1016/B978-075065080-9/50001-0
- [2] BOJKOVSKÝ, Martin. Termodynamika: Termodynamická teplota. Omska [online]. 2009 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: http://www.omaska.cz/Soubory/termodynamika/doplnekove_ulohy.html
- [3] ESTERKA, Vladislav. Měření teploty. In: SlidePlayer [online]. [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2864863/>
- [4] Technické informace: Princip měření teploty termočlánkem. In: Ardatech [online]. [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: http://www.ardatech.cz/technicke_informace/
- [5] Plynové teploměry. In: Fokus Industry [online]. [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://fokusindustry.cz/i/?Pr%C5%AFmyslov%C3%A9+m%C4%9B%C5%99en%C3%AD/plynov%C3%A9+teplom%C4%9Bry>
- [6] TESAŘ, Jiří. Termografie v plazmových a laserových technologiích. Plzeň, 2014 [cit. 2022-05-09]. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [7] DELL'ISOLA, Giovanni Battista, Elena COSENTINI, Laura CANALE, Giorgio FICCO a Marco DELL'ISOLA. Noncontact Body Temperature Measurement: Uncertainty Evaluation and Screening Decision Rule to Prevent the Spread of COVID-19. Sensors [online]. 2021, 21(2) [cit. 2022-05-08]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s21020346
- [8] HONNER, Milan. Infračervená kvantitativní termografie ve výzkumu fyzikálních technologií. Plzeň, 2004 [cit. 2022-05-09]. Habilitační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [9] SOVA, Jan a Jana POKORNÁ. Bezdotykové měření teplotních polí – senzory. Aldebaran [online]. AGA, 2018, 16(2) [cit. 2022-05-09]. ISSN 1214-1674. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2018_02_cam.php
- [10] KIM, K. a S.S. FENG. Thermal Mapping Using Infrared Thermography. Application of Thermo-Fluidic Measurement Techniques [online]. Elsevier, 2016, 2016, s. 215-250 [cit. 2022-05-08]. ISBN 9780128097311. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-809731-1.00008-3
- [11] SHARMA, Uc. Infra red detectors [online]. IIT Bombay, 2004 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: https://www.ee.iitb.ac.in/~esgroup/es_mtech04_sem/es_sem04_paper_04307417.pdf
- [12] H., Henry a M. KOLAHDOUZ. Group IV Materials for Low Cost and High Performance Bolometers. PERERA, Unil, ed. Bolometers [online]. InTech, 2012, 2012-03-09 [cit. 2022-05-08]. ISBN 978-953-51-0235-9. Dostupné z: doi:10.5772/33000
- [13] LUCAS, Jim. What Is Infrared?. In: Live Science [online]. 2019 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/50260-infrared-radiation.html>
- [14] Infračervené záření: dálkové ovládání. In: Fyzikální pokusy [online]. 2019 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://fyzikalnipokusy.cz/2105/infracervene-zareni---dalkove-ovladani>
- [15] PASCHOTA, Rüdiger. Infrared Light. RP Photonic [online]. [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/infrared_light.html
- [16] Handbook of Optics. 3rd ed. Editor Michael BASS. New York: McGraw-Hill, c2010. ISBN 0071498907.

- [17] GAUGLITZ, Guenter a Tuan VO-DINH, ed. Handbook of Spectroscopy [online]. Wiley, 2003 [cit. 2022-05-08]. ISBN 9783527297825. Dostupné z: doi:10.1002/3527602305
- [18] POPOVICH, Anatolij a Vadim SUFIAROV. Metal Powder Additive Manufacturing. SHISHKOVSKY, Igor V., ed. New Trends in 3D Printing [online]. InTech, 2016, 2016-07-13 [cit. 2022-05-08]. ISBN 978-953-51-2479-5. Dostupné z: doi:10.5772/63337
- [19] GOKULDOSS, Prashanth Konda, Sri KOLLA a Jürgen ECKERT. Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines. Materials [online]. 2017, 10(6) [cit. 2022-05-08]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma10060672
- [20] WONG, Kaufui V. a Aldo HERNANDEZ. A Review of Additive Manufacturing. ISRN Mechanical Engineering [online]. 2012, 2012, 1-10 [cit. 2022-05-08]. ISSN 2090-5130. Dostupné z: doi:10.5402/2012/208760
- [21] ADEKANYE, S. A., R. M. MAHAMOOD, E. T. AKINLABI a M. G. OWOLABI. Additive manufacturing: the future of manufacturing. Materials in tehnologije [online]. 2017, 51(5), 709-715 [cit. 2022-05-08]. ISSN 15802949. Dostupné z: doi:10.17222/mit.2016.261
- [22] REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER a Brian GARRET. The 3D printing handbook: technologies, design and applications. Amsterdam: 3D Hubs, 2017.
- [23] ZHANG, Jing a Yeon-Gil JUNG. Additive manufacturing: materials, processes, quantifications and applications. Cambridge, MA: Butterworth-Heinemann, 2018.
- [24] SEKERKA, Vít. Výroba dílů technologií DMLS a jejich porovnání s jinými konvenčními technologiemi z hlediska ekonomické náročnosti [online]. Brno, 2011 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41825. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [25] KAUPPILA, Ile. What Is Material Jetting? – 3D Printing Basics. All3DP [online]. 2022 [cit. 2022-02-08]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/what-is-material-jetting-3d-printing-basics/>
- [26] PŮLPÁN, Jan. Elektrické vlastnosti fotopolymerů pro 3D tisk [online]. Praha, 2020 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/87634/F3-BP-2020-Pulpan-Jan-BP.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [27] SABOORI, Abdollah, Alberta AVERSA, Giulio MARCHESE, Sara BIAMINO, Mariangela LOMBARDI a Paolo FINO. Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair. Applied Sciences [online]. 2019, 9(16) [cit. 2022-05-08]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app9163316
- [28] BOURELL, David L., Joseph J. BEAMAN, Ian GIBSON, Amit BANDYOPADHYAY a Donald KLOSTERMAN. Rapid Prototyping. ASM handbook [online]. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2001, s. 383-387 [cit. 2022-05-09]. ISBN 978-0-87170-703-1. Dostupné z: doi:10.1361/asmhba0003397
- [29] SNHRRT. Nové technologie – výzkumné centrum ZČU v Plzni [online]. [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://irt.zcu.cz/cs/vyzkum/opticke-vlastnosti-materialu/snhrrt/> [30] <https://www.linn-high-therm.de/products/resistance-heating/batch/laboratory-furnaces/details/lm-model.html>
- [31] LabIR® barvy pro termovizní měření. LabIR [online]. [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://paints.labir.cz/>

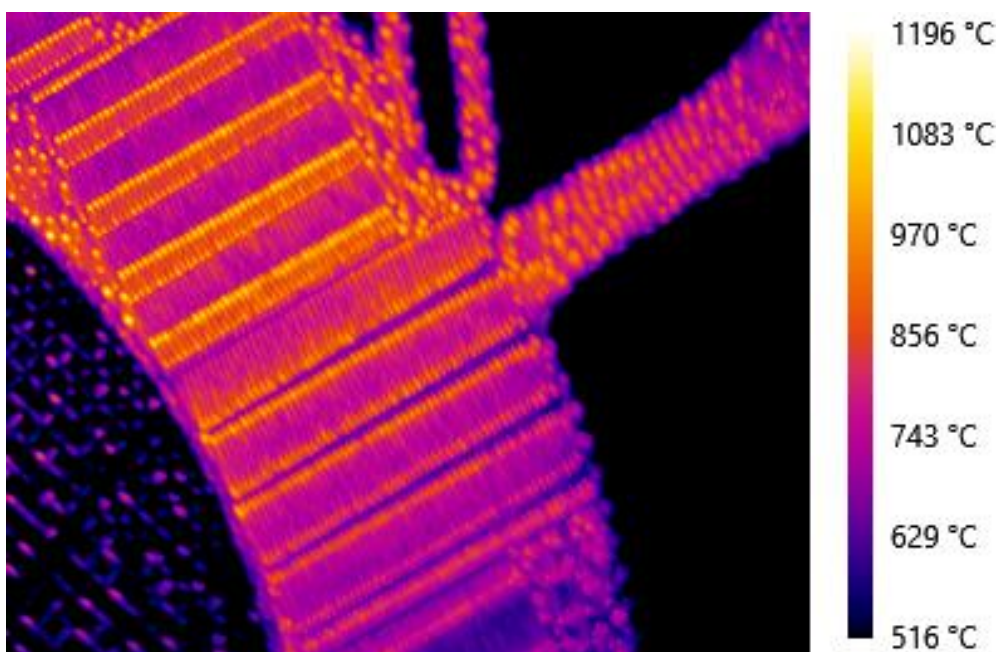
- [32] Mikron MCS640. Advanced Energy [online]. [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://www.advancedenergy.com/products/temperature-measurement/thermal-imagers-and-systems/MCS640/>
- [33] FLIR A320 Tempscreen. Teledyne FLIR [online]. [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://www.flir.eu/products/flir-a320/>
- [34] FLIR A615. Teledyne FLIR [online]. [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://www.flir.com/products/a615/>
- [35] FLIR A6750 MWIR. Teledyne FLIR [online]. [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://www.flir.com/products/a6750-mwir/?model=29440-251&vertical=rd+science&segment=solutions>
- [36] BB-4A Blackbody Calibrator. Assets Omega [online]. [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://assets.omega.com/manuals/M3014.pdf>
- [37] Germanium AR/AR Coated 4mm thick. UQG Optics [online]. [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://www.uqoptics.com/materials/germanium-ar-ar-coated-4mm-thick/>
- [38] Typical spectral response curves for microbolometers. Teledyne FLIR [online]. [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: https://flir.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/932/~~/typical-spectral-response-curves-for-microbolometers/session/L2F2LzEvdGltZS8xNjUyNjIxNDc5L2dlbi8xNjUyNjIxNDc5L3NpZC9mVXZmM2VSenFIWmloVWNxdnBE-UzZ1ZEtfb21yM010U2NVZVNvMnlCYnA2YmViRmZqT3BDNFJubXN-FVm9wY-mYwWIEwNGVZbmJ0MyU3RV83Wm52JTdFV01vaWtJbE5ISmdhelpWUEl5ZTFnRF-NUTkNiTyU3RVVHVFVta0s5T1EIMjEIMjE=

PŘÍLOHA č. 1

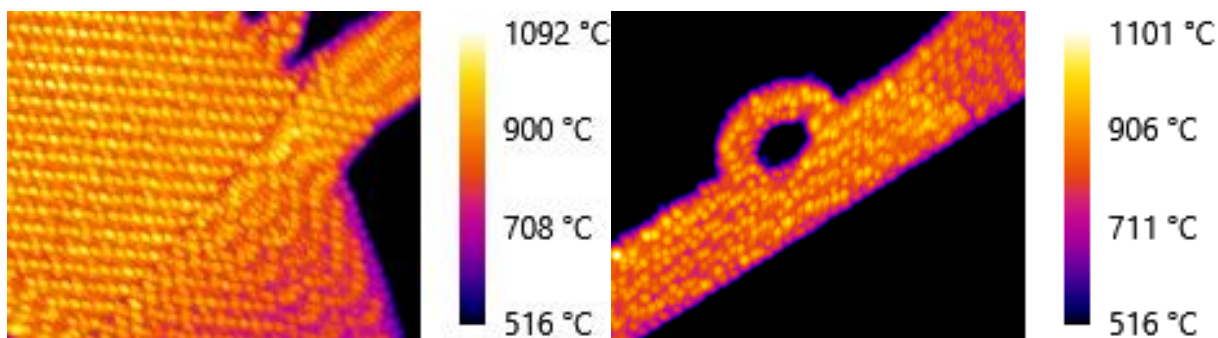
**Termogramy získané funkcí HoldMax ze sekvencí pořízených kamerou
FLIR A6751 s frekvencí snímkování 407 a 1070 Hz**



Obr. P. 1 HoldMax termogram ze zaznamenávané vrstvy 684 při frekvenci 407 Hz



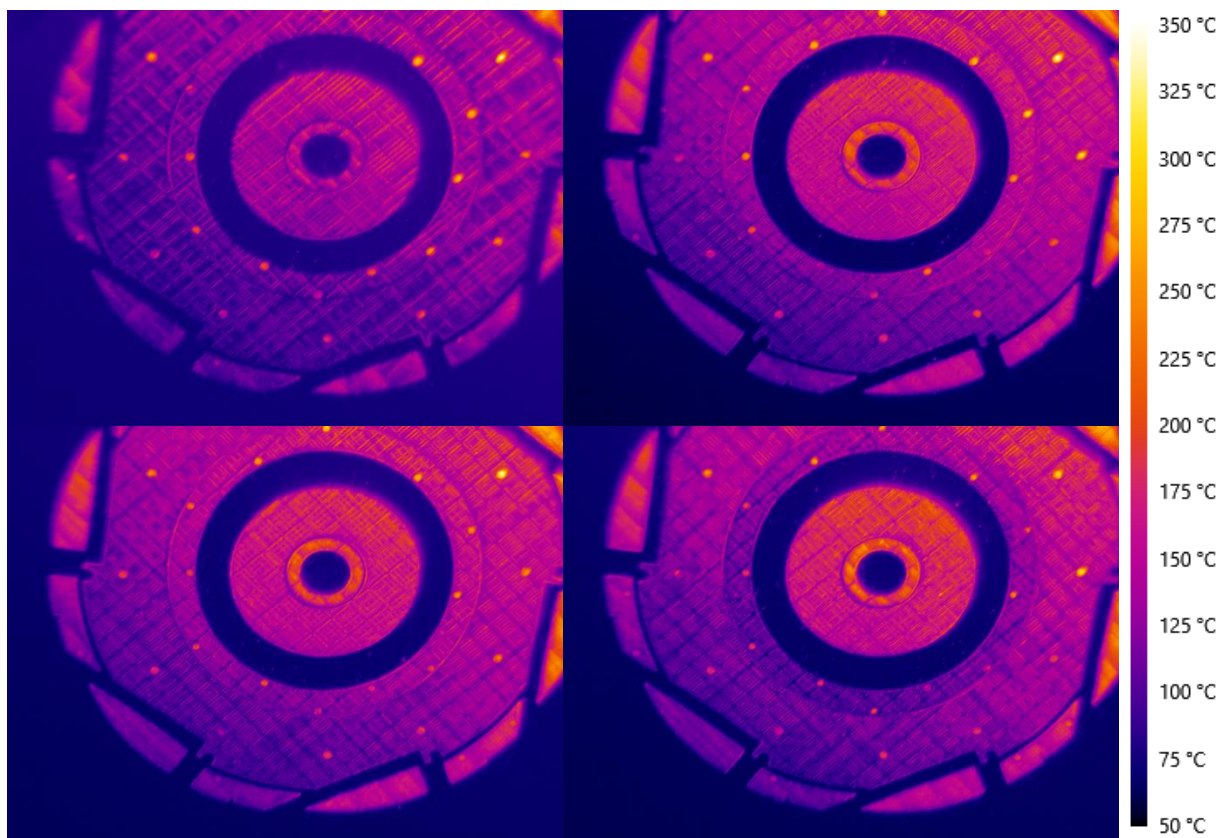
Obr. P. 2 HoldMax termogram ze zaznamenávané vrstvy 837 při frekvenci 407 Hz



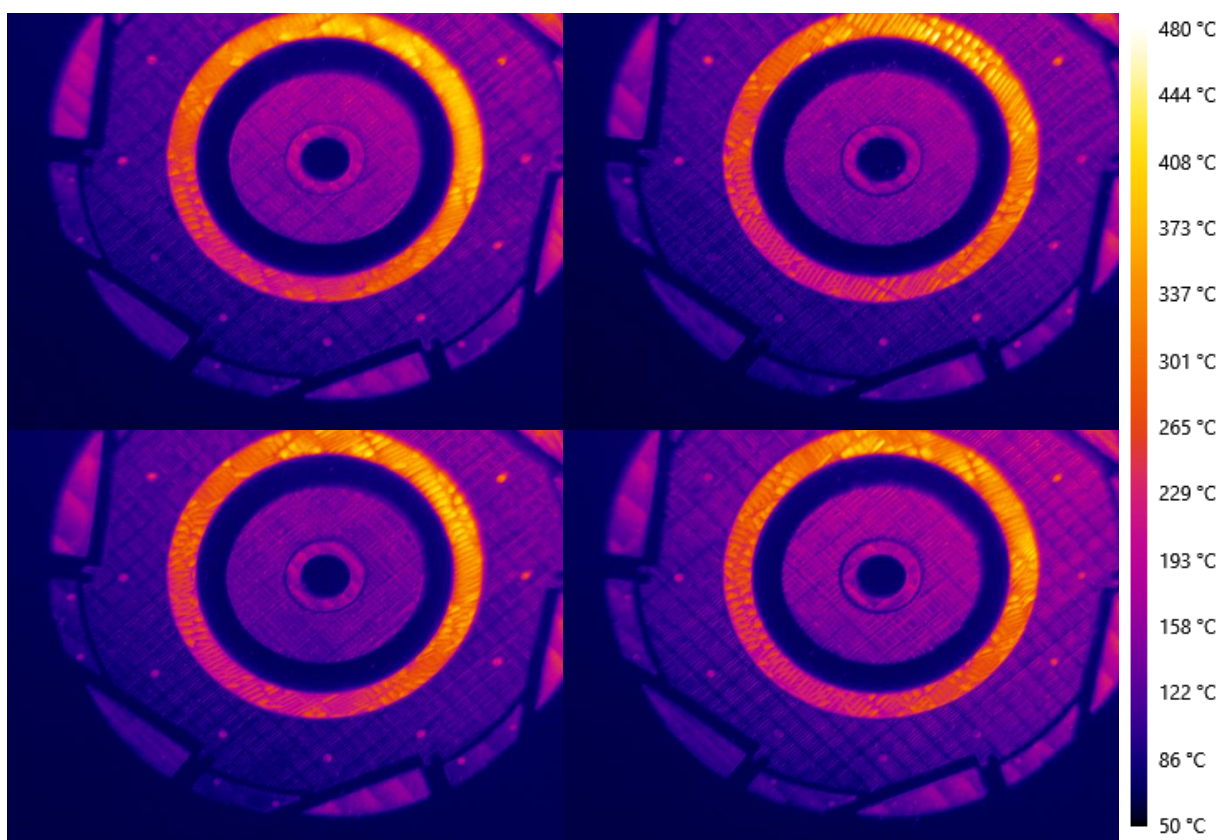
Obr. P. 3 HoldMax termogramy ze zaznamenávané vrstvy 687 (vlevo) a 840 (vpravo) při frekvenci 1070 Hz

PŘÍLOHA č. 2

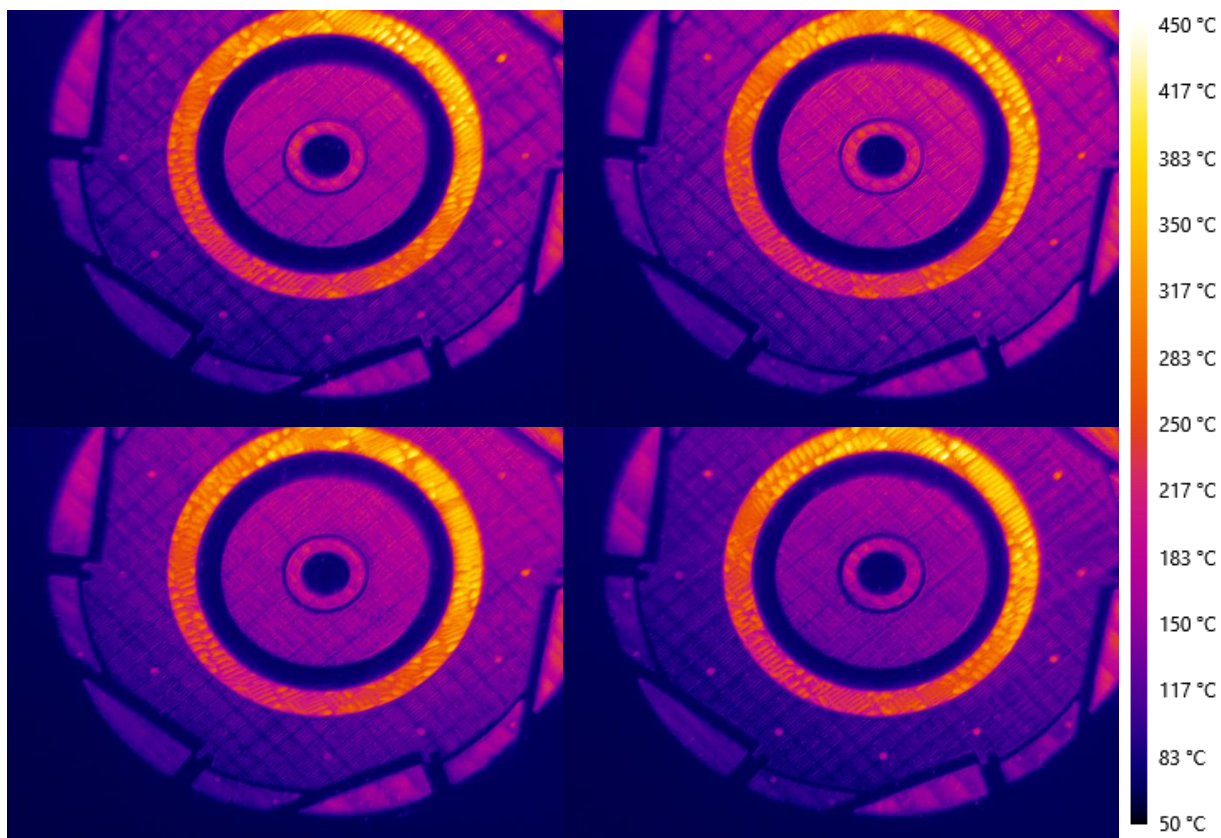
Termogramy z periodického záznamu získané funkcí HoldMax pomocí kamery FLIR A615



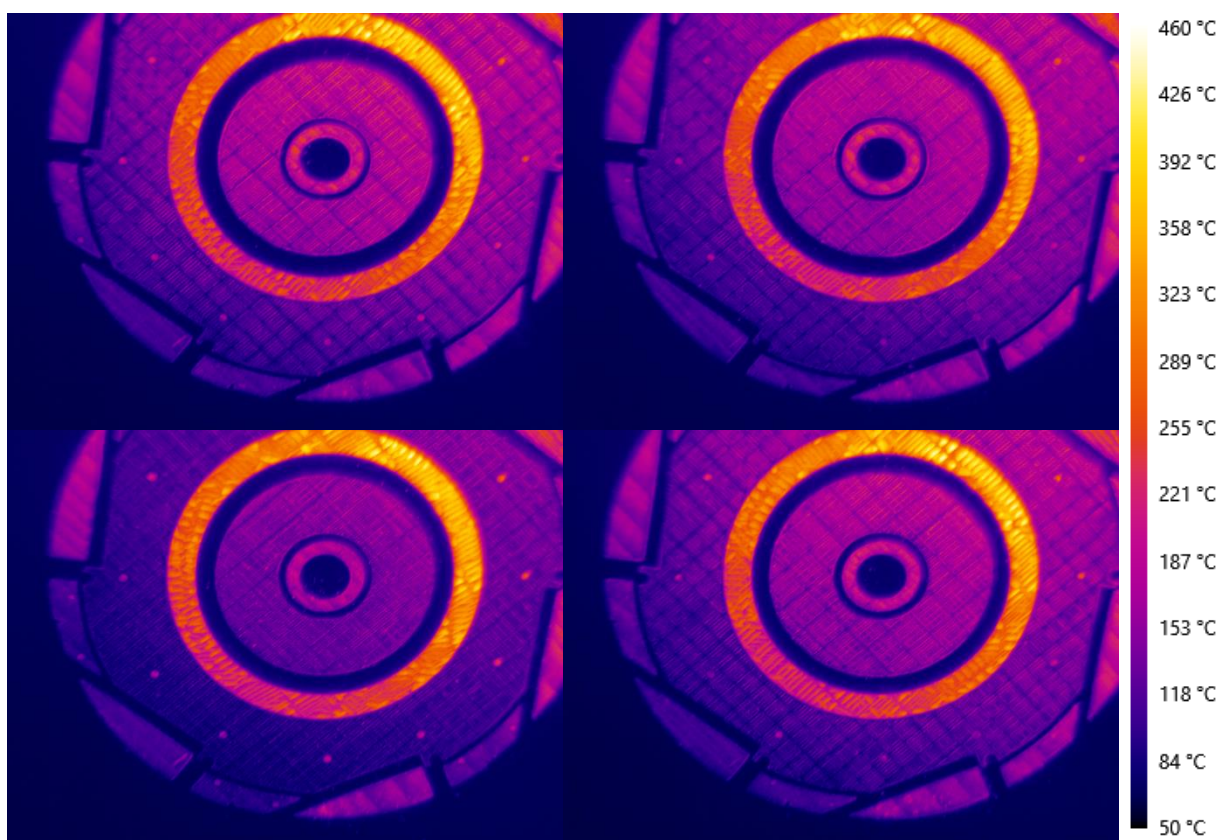
Obr. P. 4 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 0; 0,5; 1; 1,5 h od začátku tisku



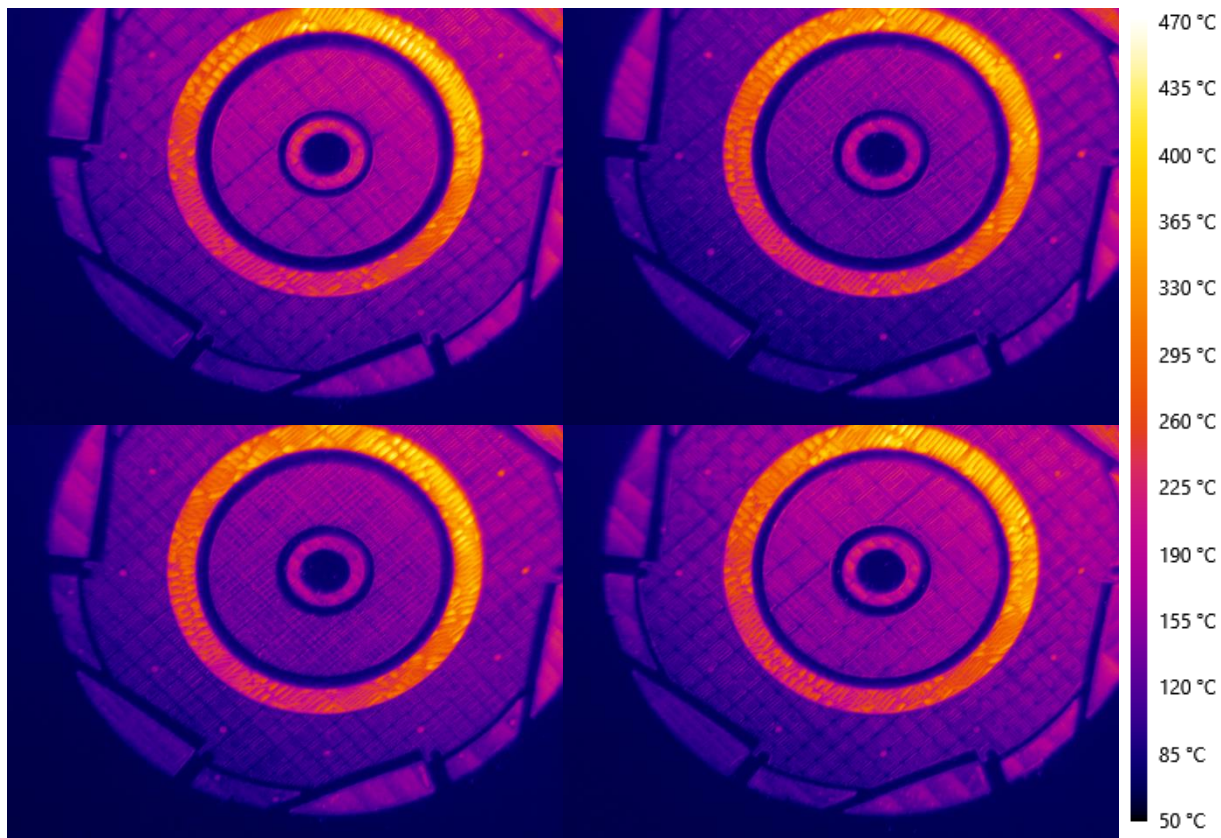
Obr. P. 5 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 2; 2,5; 3; 3,5 h od začátku tisku



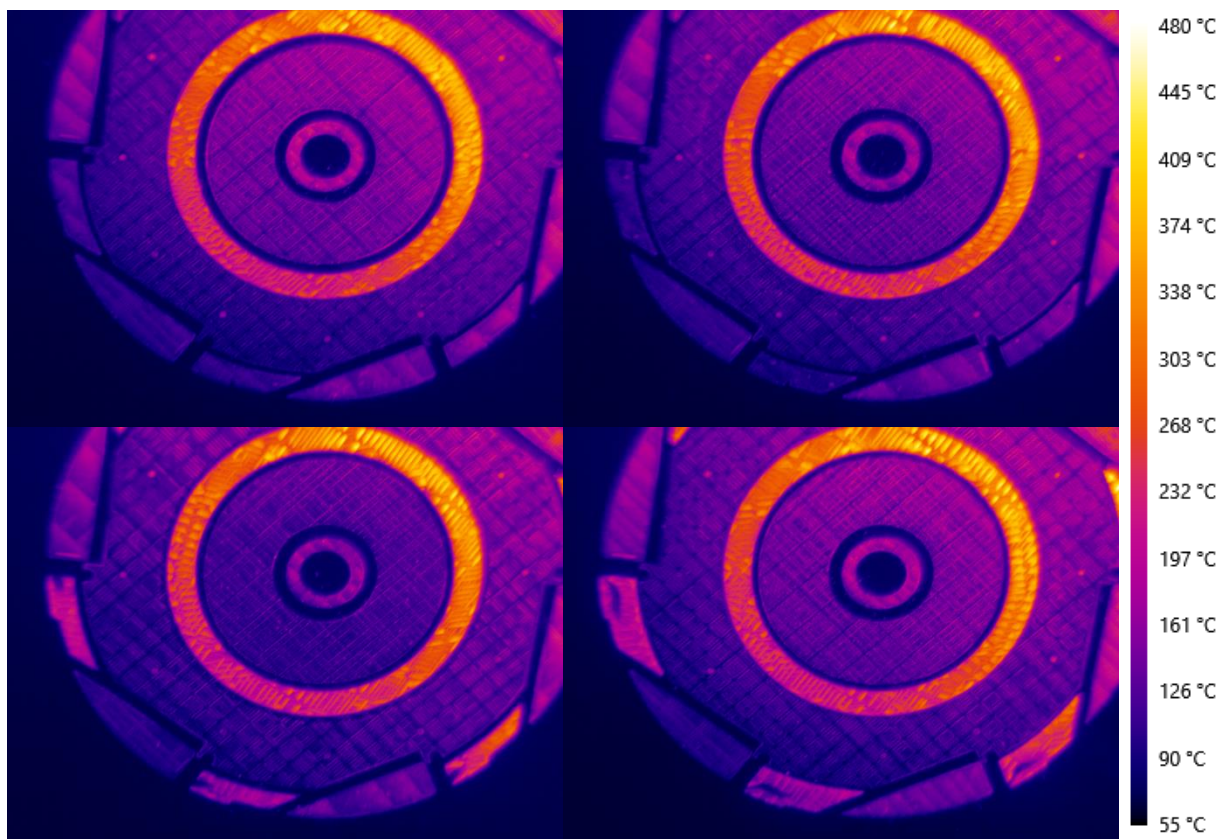
Obr. P. 6 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 4; 4,5; 5; 5,5 h od začátku tisku



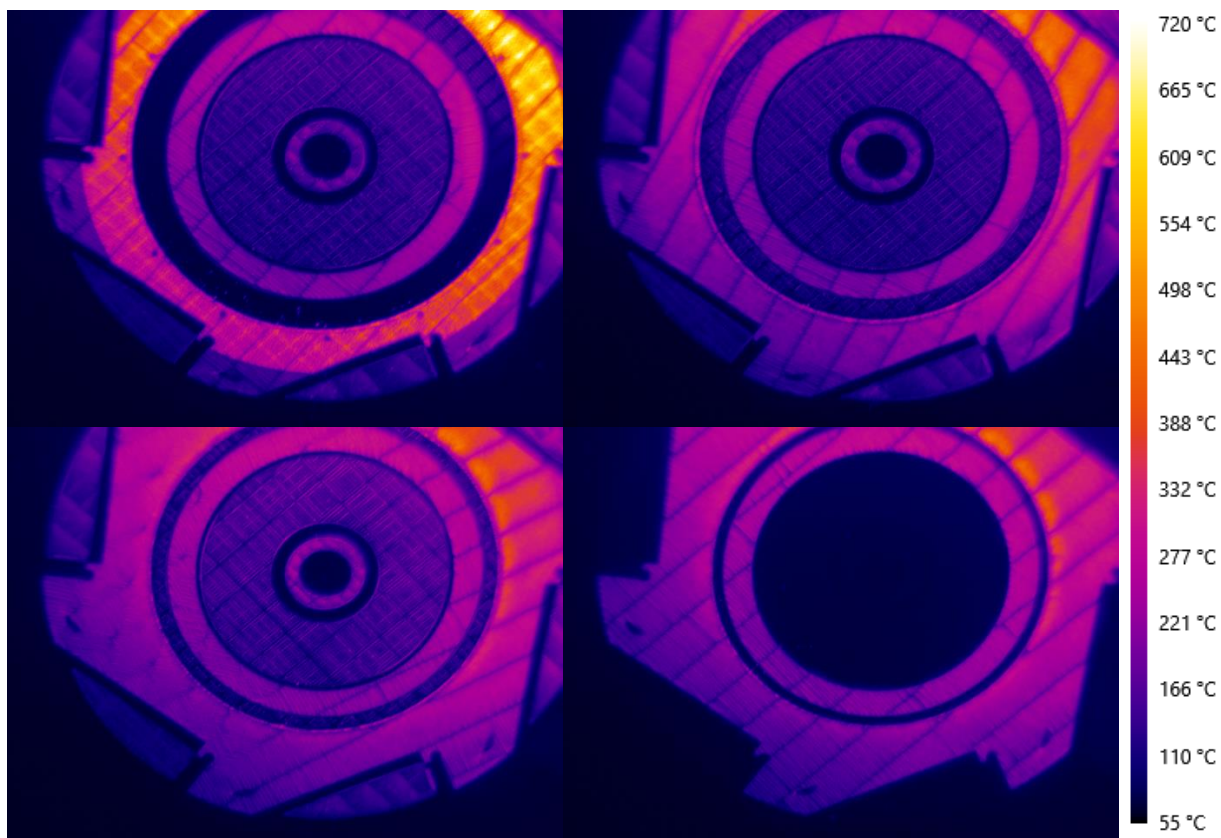
Obr. P. 7 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 6; 6,5; 7; 7,5 h od začátku tisku



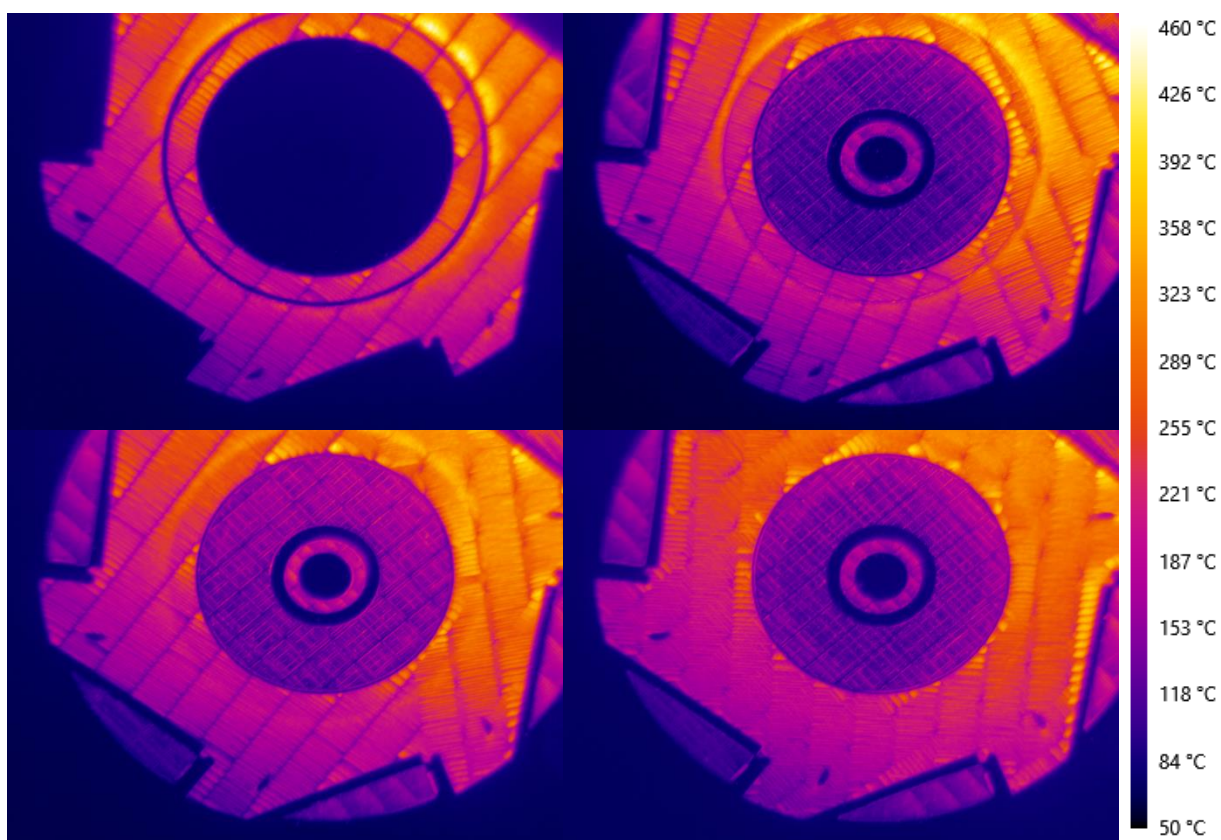
Obr. P. 8 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 8; 8,5; 9; 9,5 h od začátku tisku



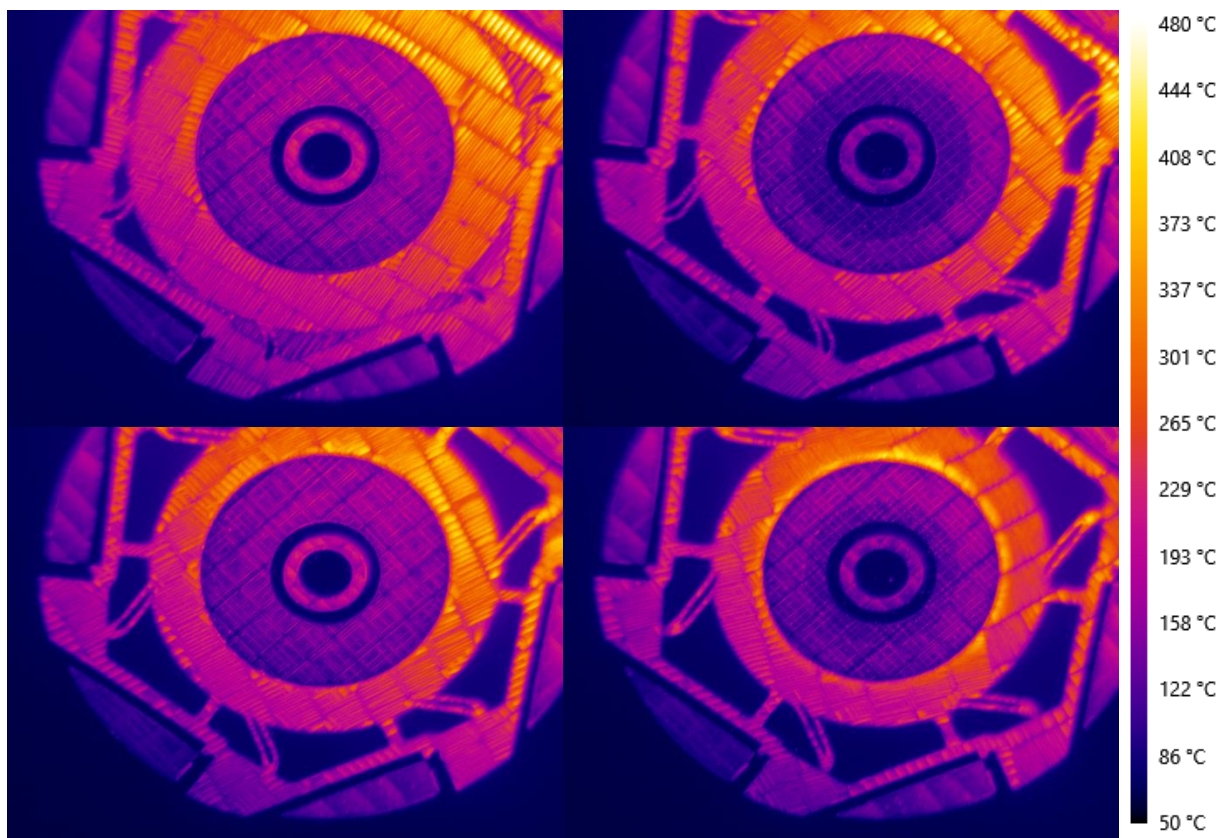
Obr. P. 9 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 10; 10,5; 11; 11,5 h od začátku tisku



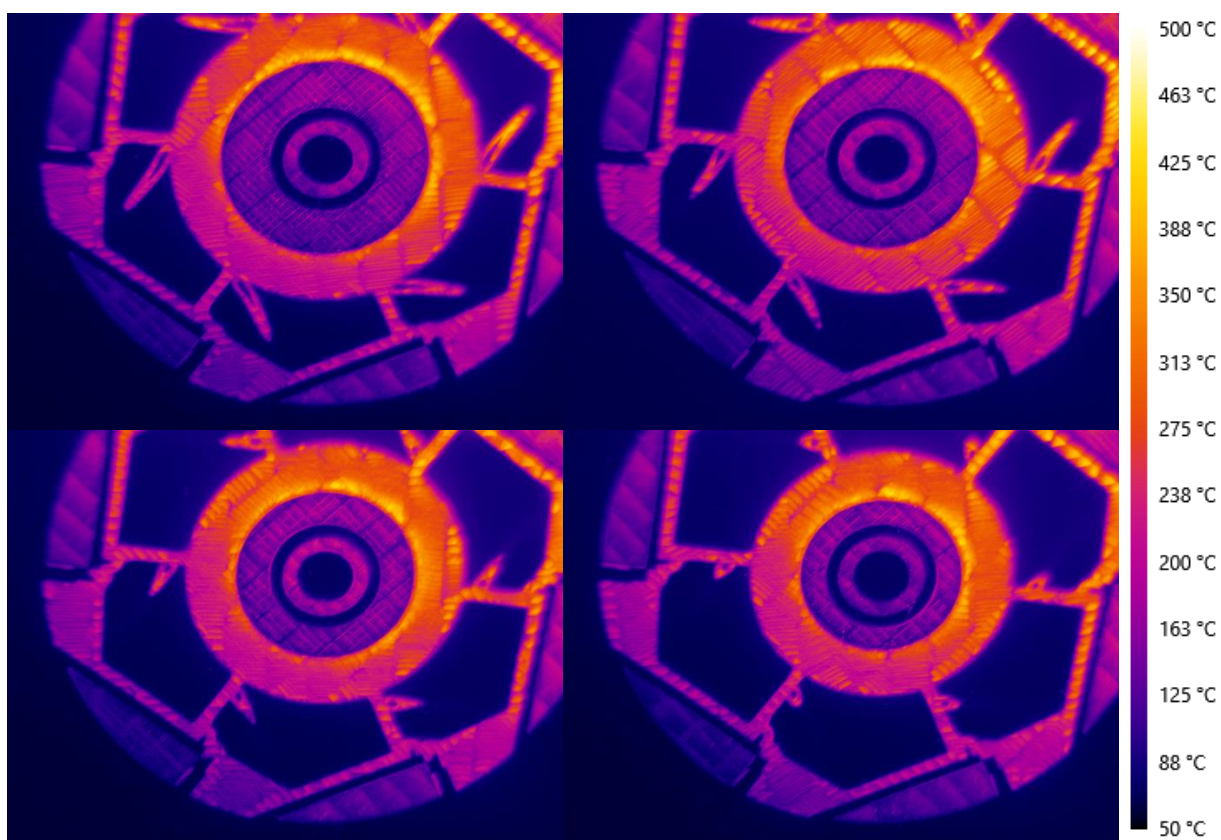
Obr. P. 10 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 12; 12,5; 13; 13,5 h od začátku tisku



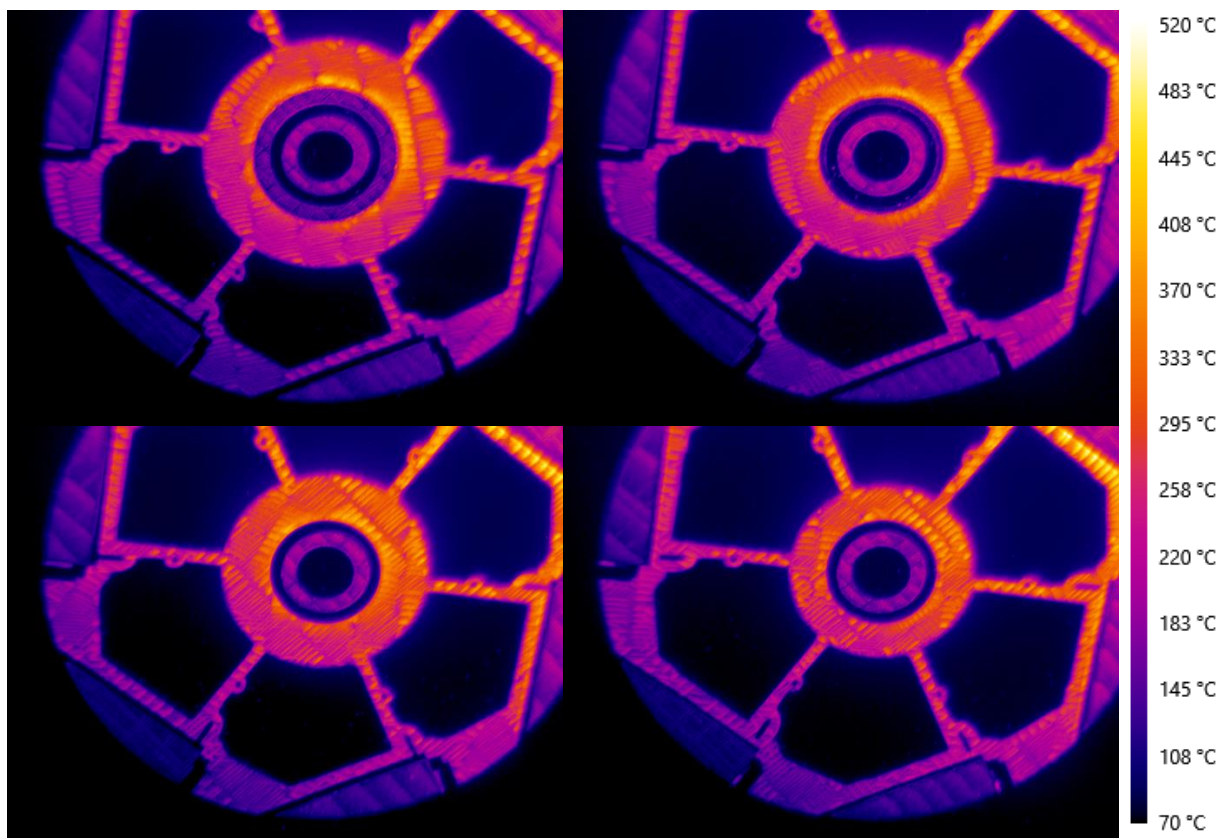
Obr. P. 11 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 14; 14,5; 15; 15,5 h od začátku tisku



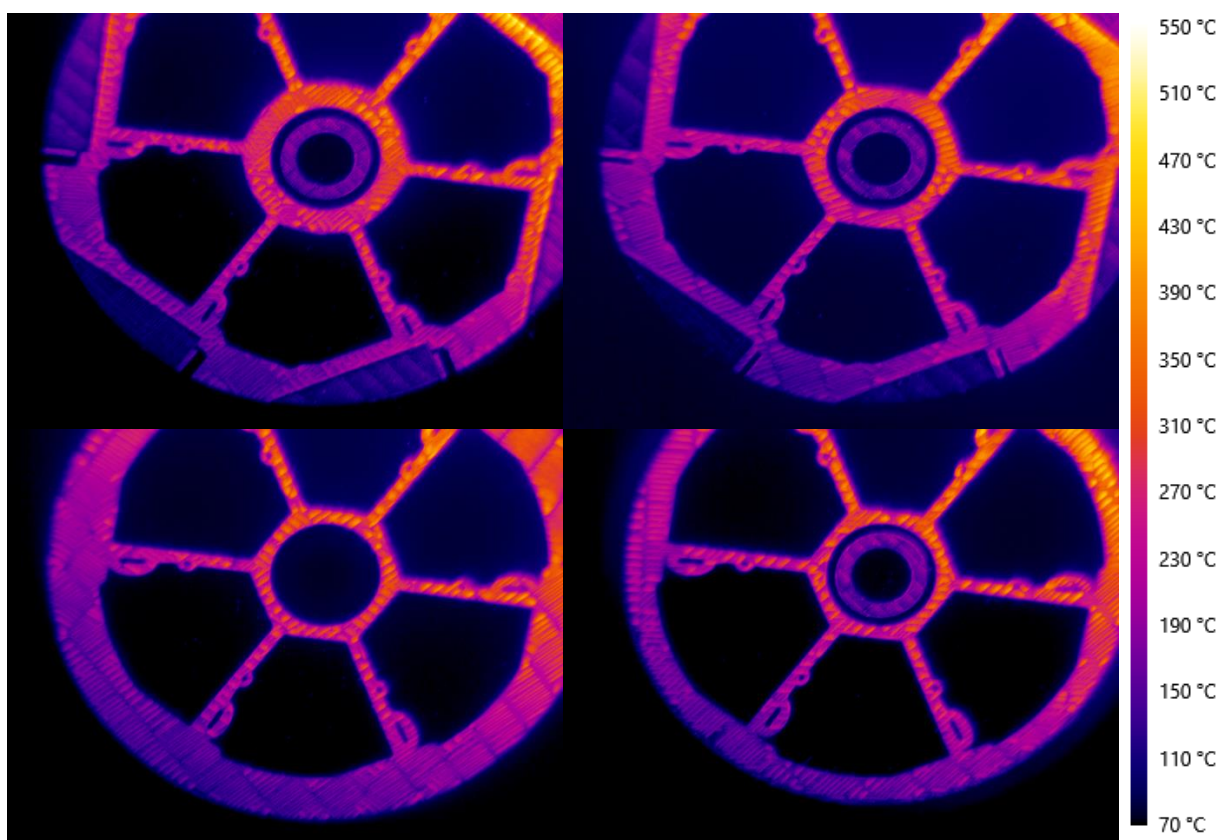
Obr. P. 12 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 16; 16,5; 17; 17,5 h od začátku tisku



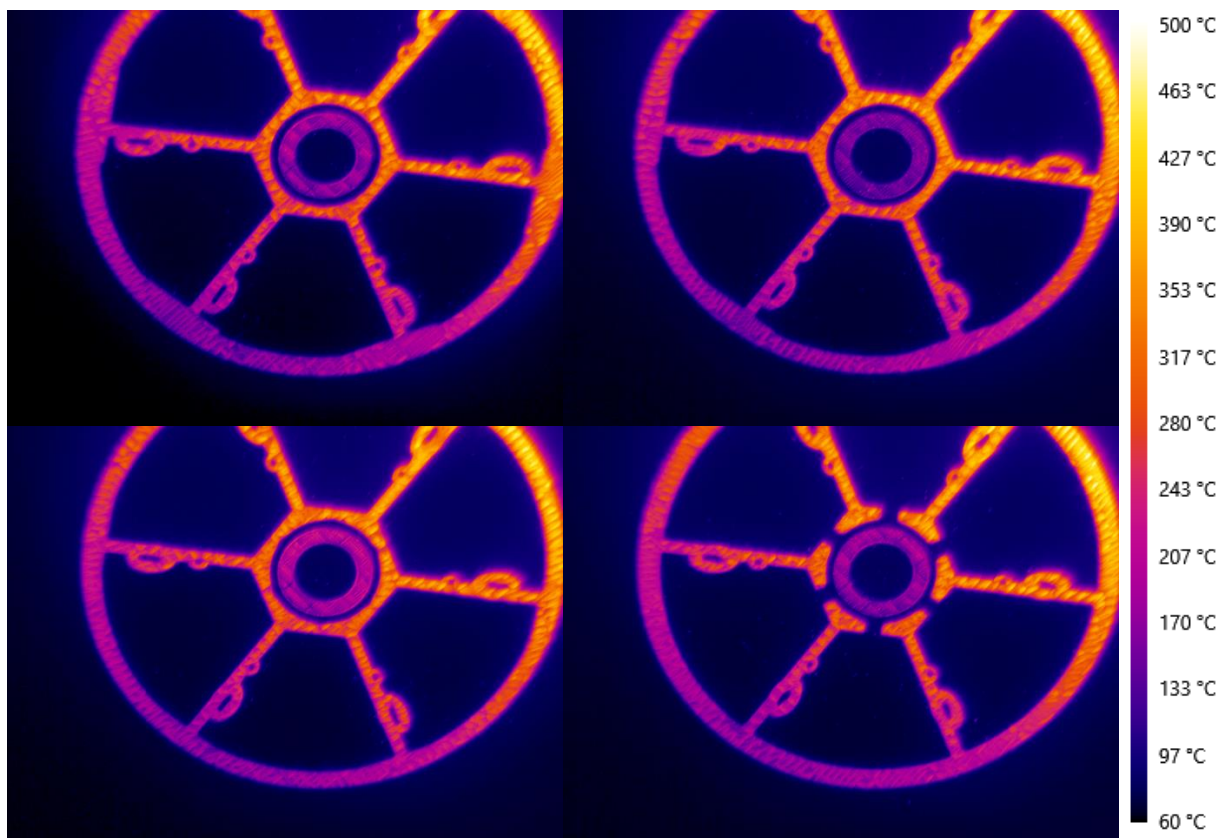
Obr. P. 13 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 18,5; 19; 19,5; 20 h od začátku tisku



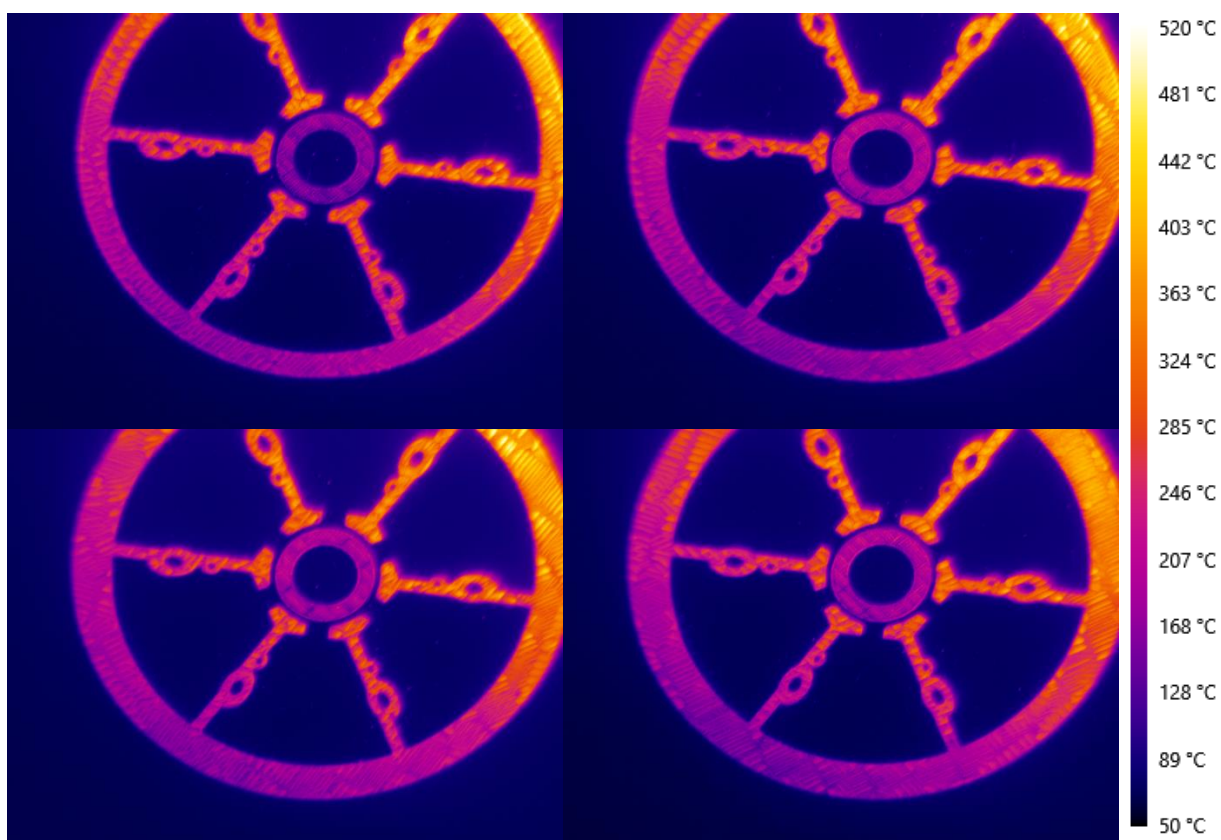
Obr. P. 14 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 20,5; 21; 21,5; 22 h od začátku tisku



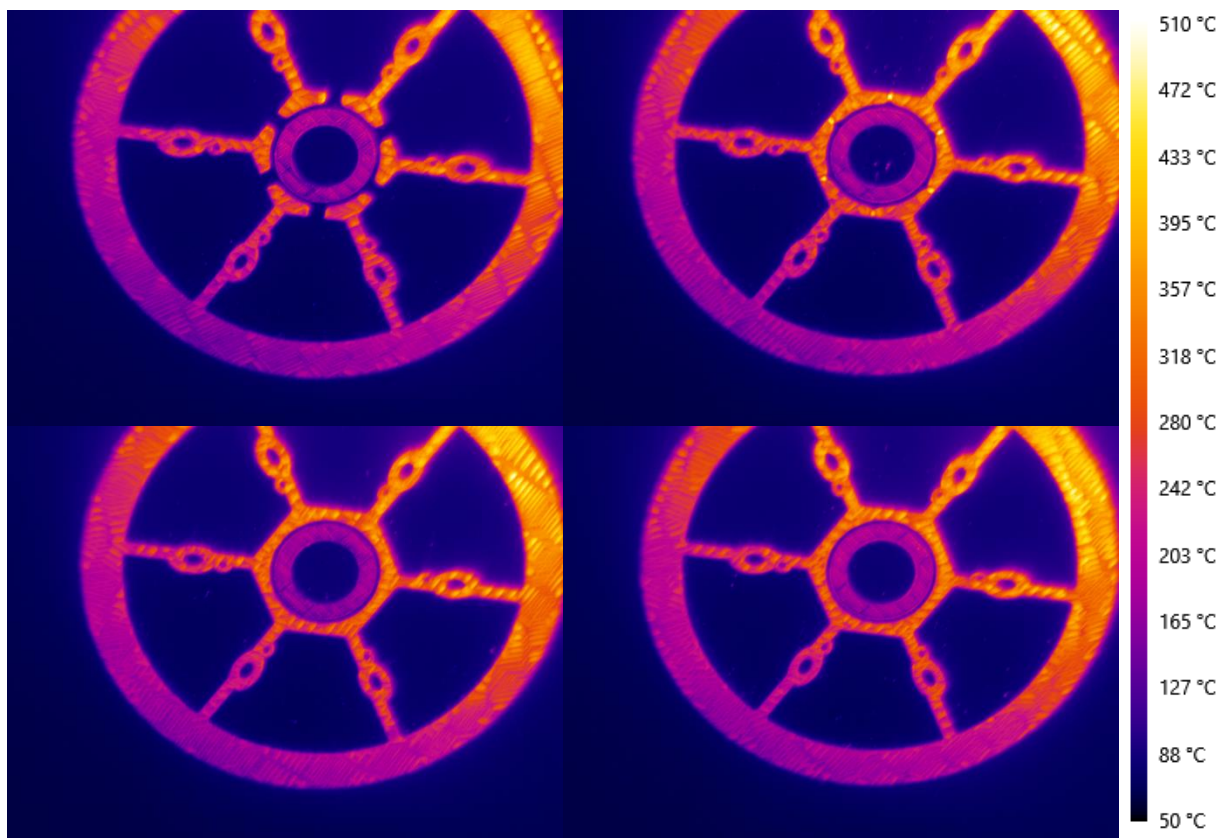
Obr. P. 15 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 22,5; 24; 24,5; 25 h od začátku tisku



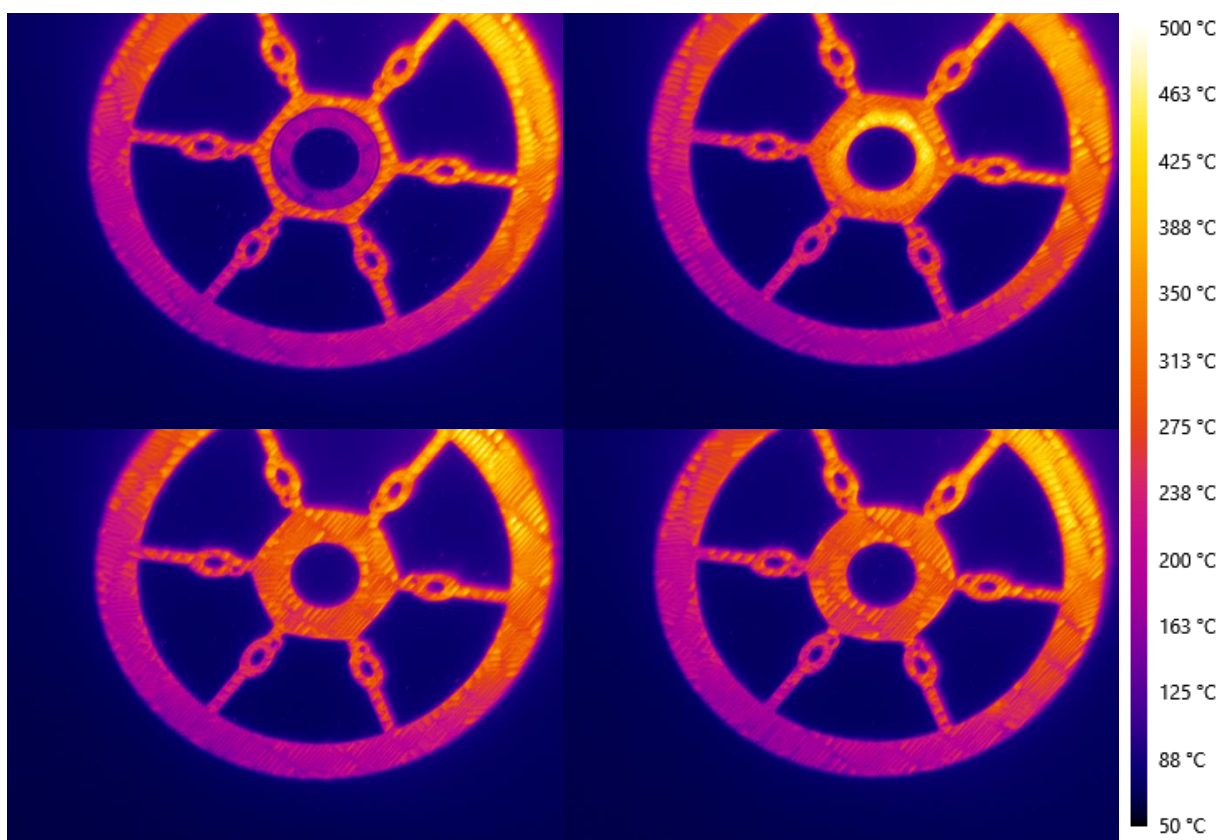
Obr. P. 16 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 25,5; 26; 26,5; 27 h od začátku tisku



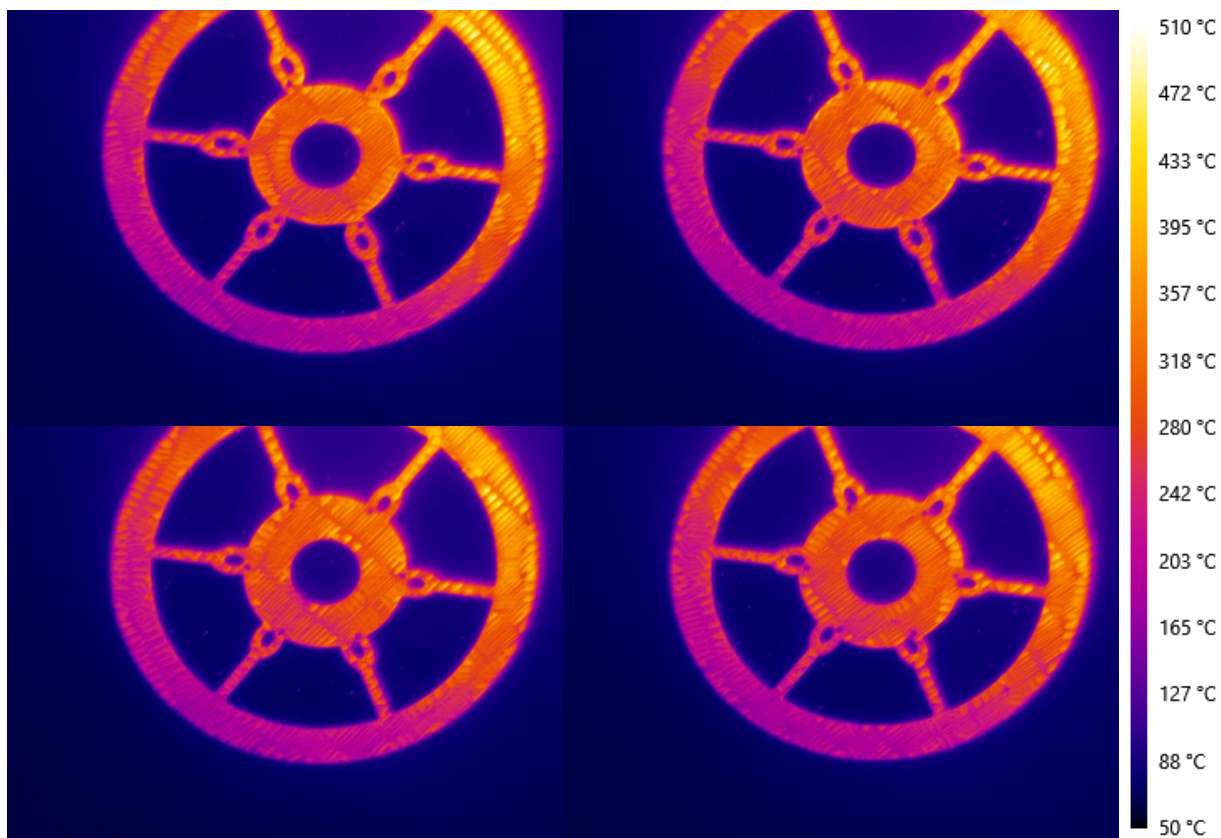
Obr. P. 17 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 27,5; 28; 28,5; 29 h od začátku tisku



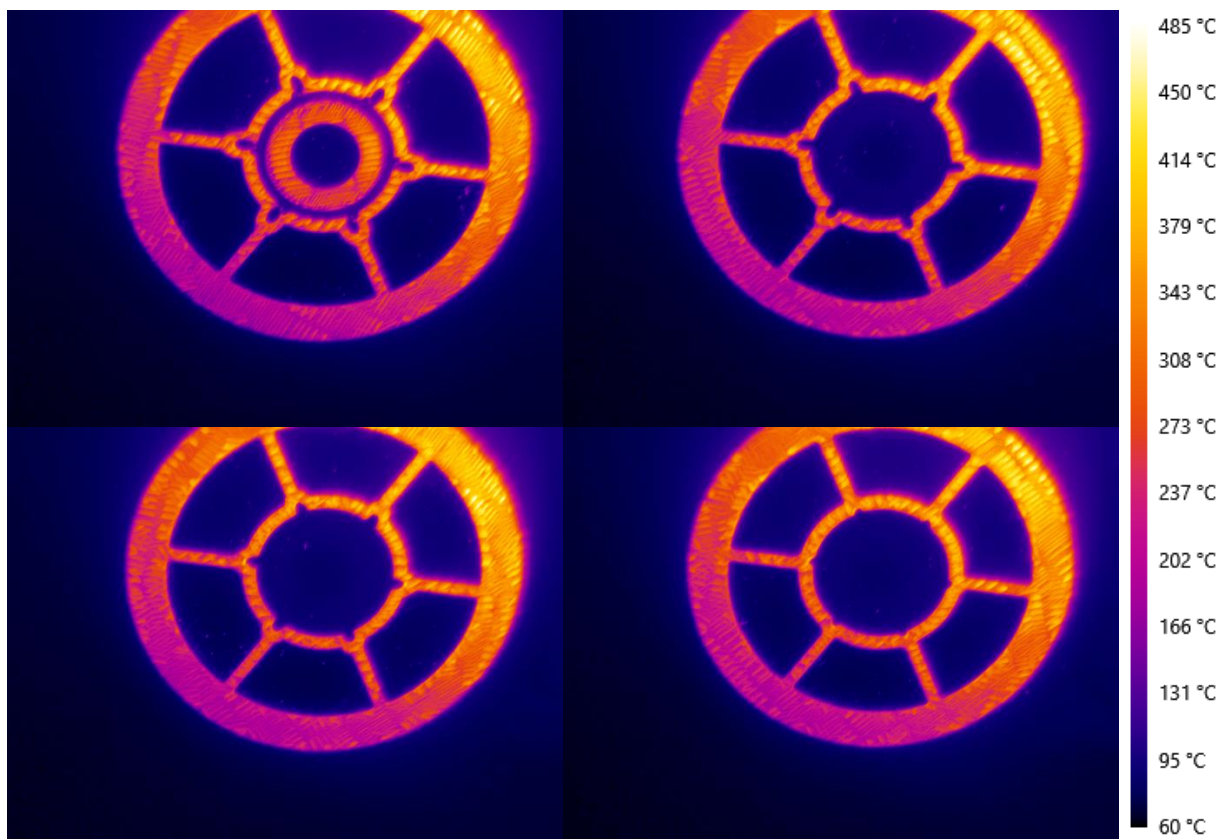
Obr. P. 18 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 29,5; 30; 30,5; 31 h od začátku tisku



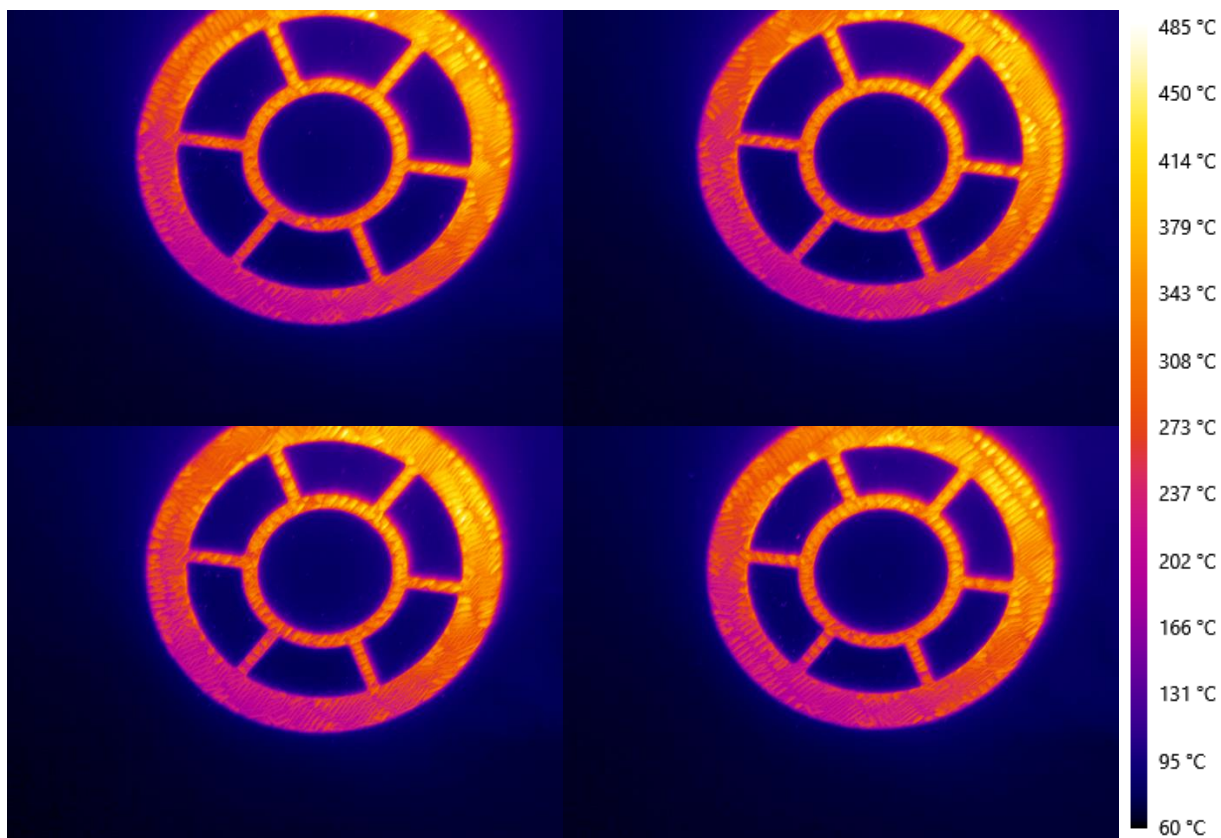
Obr. P. 19 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 31,5; 32; 32,5; 33 h od začátku tisku



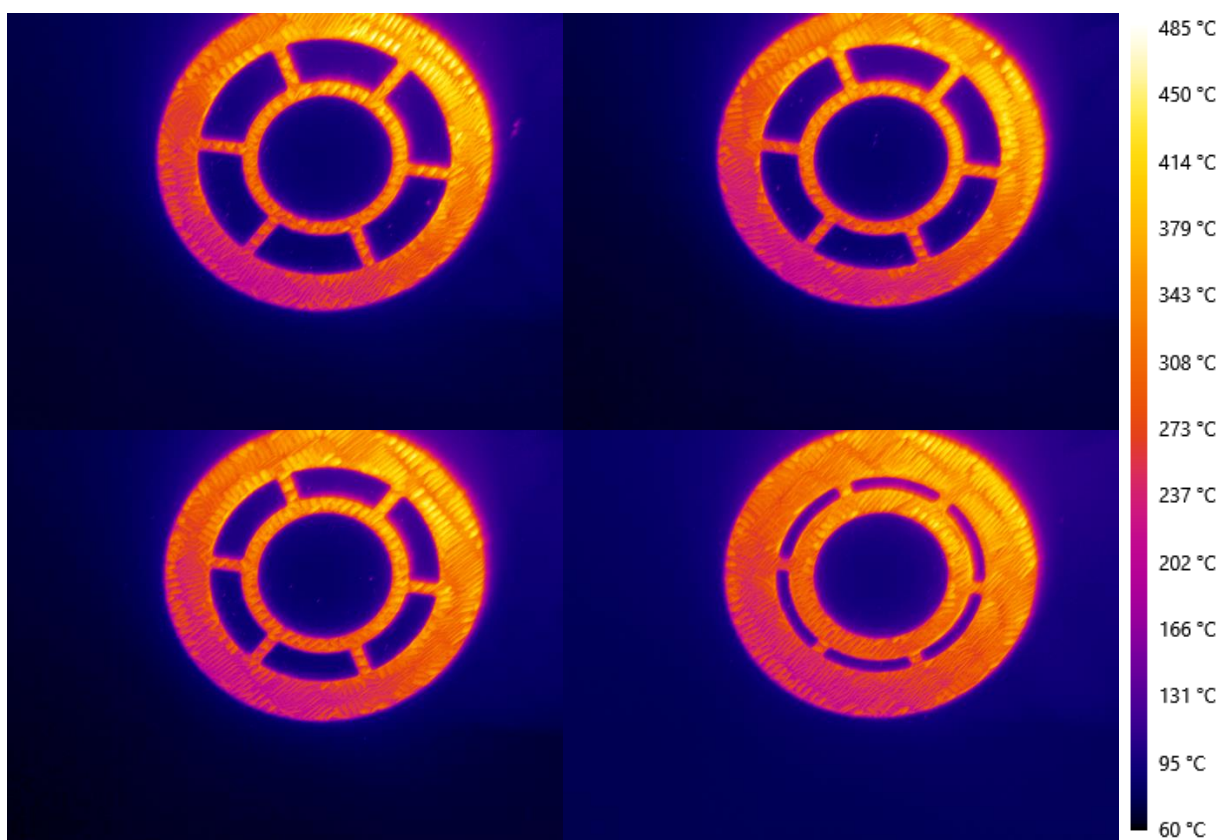
Obr. P. 20 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 33,5; 34; 34,5; 35 h od začátku tisku



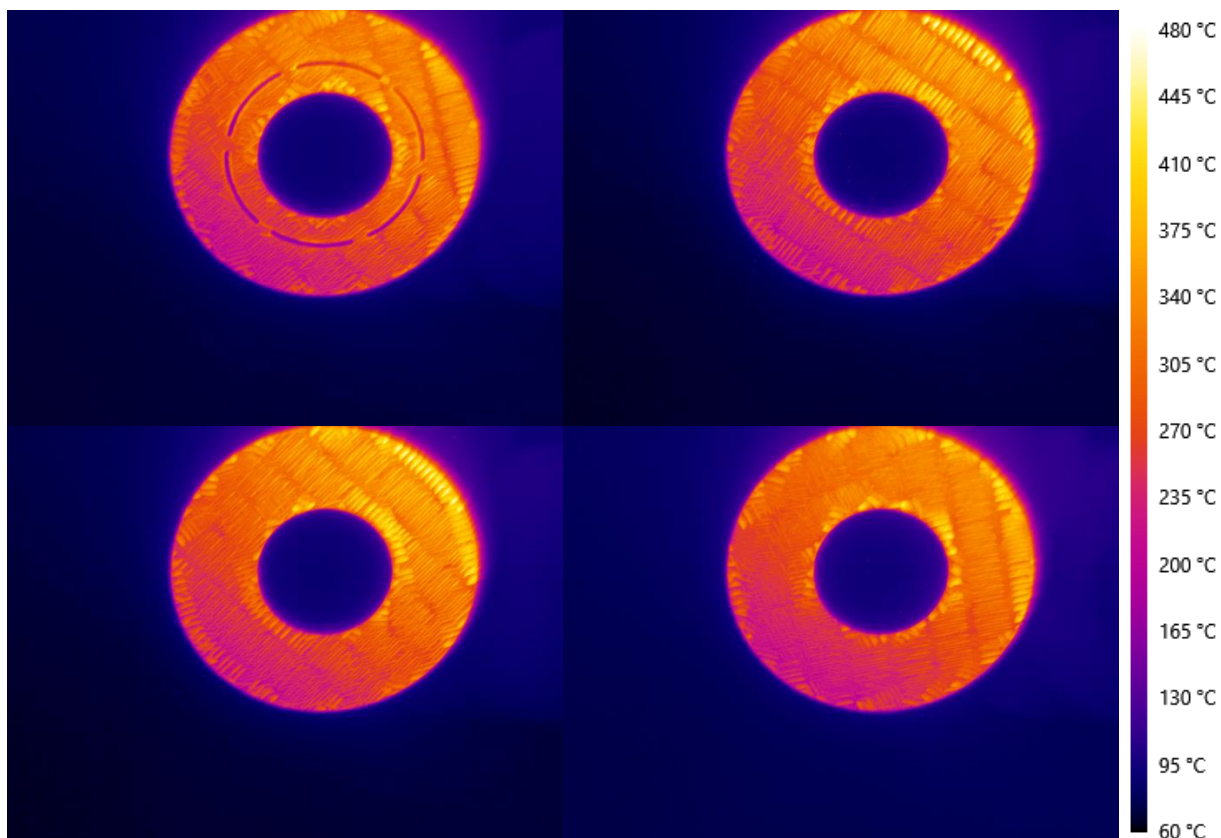
Obr. P. 21 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 35,5; 36; 36,5; 37 h od začátku tisku



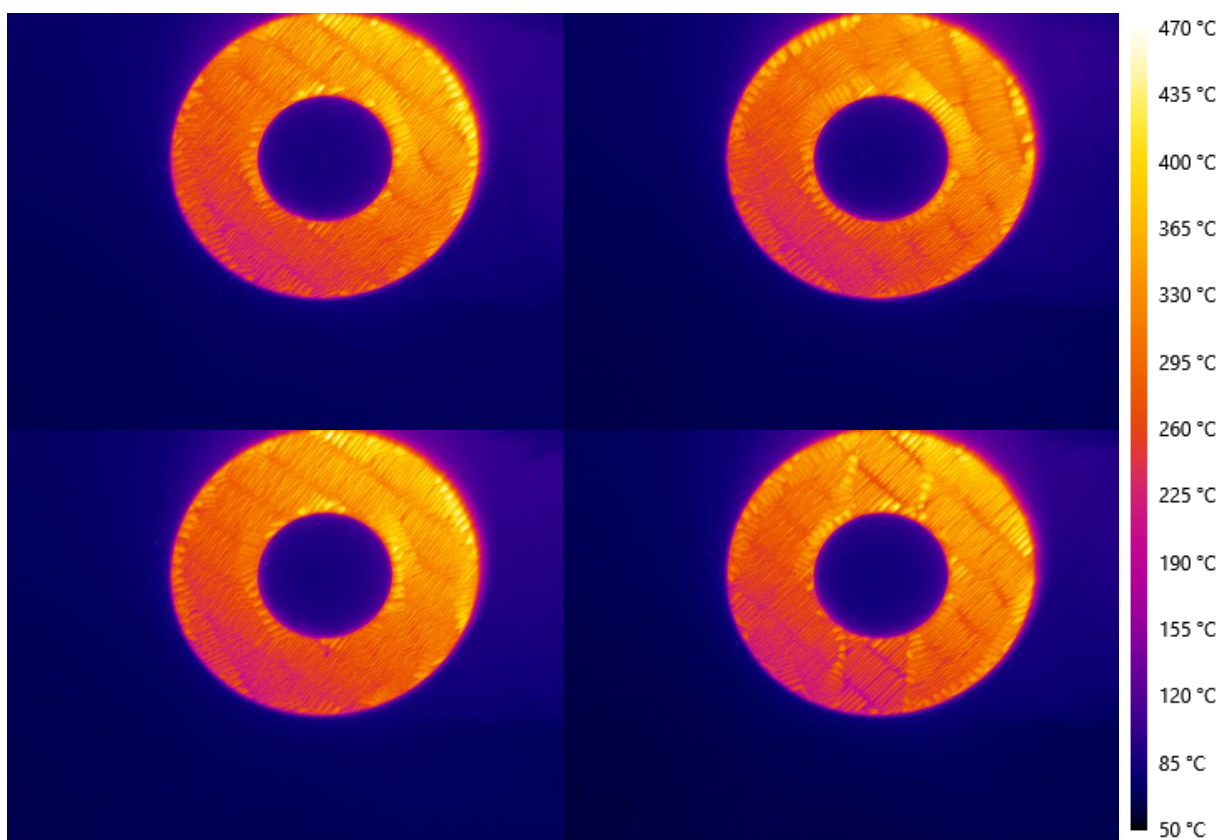
Obr. P. 22 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 37,5; 38; 38,5; 39 h od začátku tisku



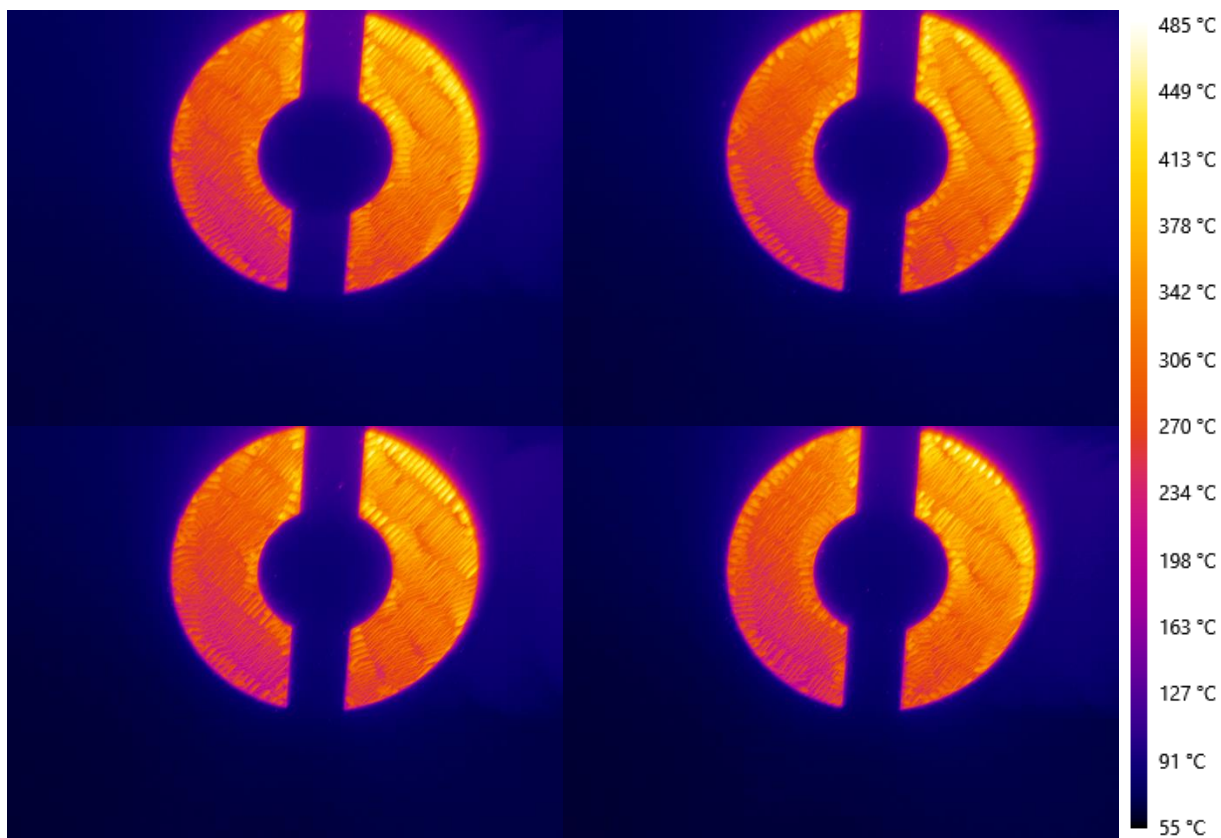
Obr. P. 23 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 39,5; 40; 40,5; 41,5 h od začátku tisku



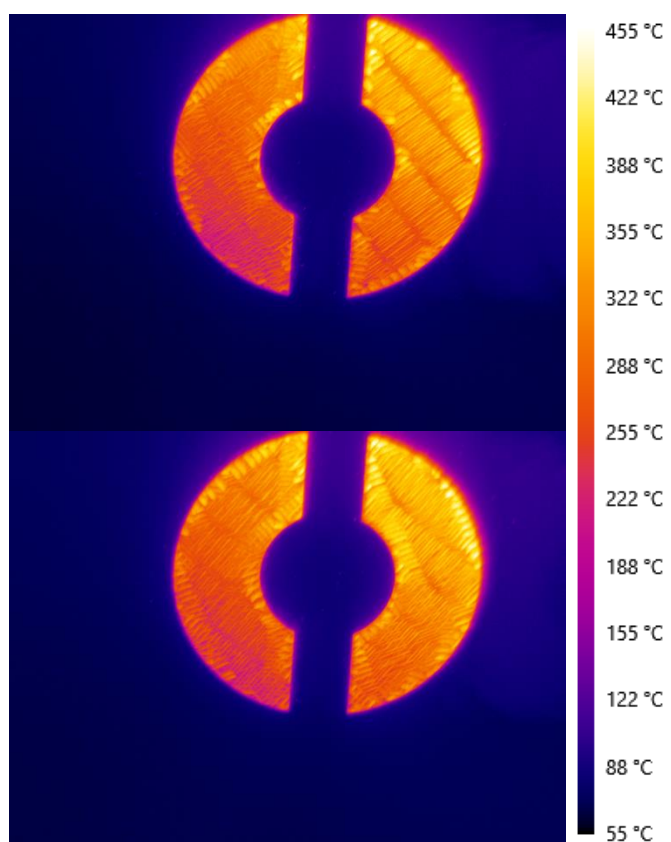
Obr. P. 24 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 42; 42,5; 43; 43,5 h od začátku tisku



Obr. P. 25 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 44; 44,5; 45; 45,5 h od začátku tisku



Obr. P. 26 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 46; 46,5; 47; 47,5 h od začátku tisku



Obr. P. 27 Termogramy z periodického záznamu v časech přibližně 48 a 48,5 od začátku tisku