

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2019

**MARTIN
CRKAL**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Crkal** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **424842**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Měření závislosti emisivity na polotovarech za vysokých teplot

Název bakalářské práce anglicky:

The measurement of emissivity on high- temperature semifinished products

Pokyny pro vypracování:

1. Problematika kontaktního měření teplot
2. Problematika infračerveného (bezkontaktního) měření teplot
3. Experimentální část

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

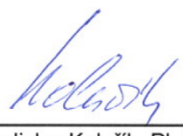
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **26.10.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **08.01.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.06.2019**


doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


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


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

9.11.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma **Měření závislosti emisivity na polotovarech za vysokých teplot** vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu. Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 7.1.2019



Martin Crkal

Poděkování

Děkuji panu **doc. Ing. Aleši HERMANOVI, Ph.D.** za jeho odborné vedení a užitečné rady při zpracování bakalářské práce. Dále děkuji společnosti "**TMV SS**" **spol. s r.o.** za zapůjčení termografické techniky a vyhodnocovacího softwaru.

**MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI EMISIVITY NA POLOTOVARECH
ZA VYSOKÝCH TEPLŮT**

THE MEASUREMENT OF EMISSIVITY ON
HIGH-TEMPERATURE SEMIFINISHED PRODUCTS

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá popisem teplotní závislosti koeficientu emisivity při bezkontaktním měření. V úvodu práce jsou velmi stručně popsány fyzikální zákony, na jejichž principu bezkontaktní měření teploty funguje. Dále popisuje základní metody kontaktního a bezkontaktního měření teploty včetně příkladů přístrojů. V hlavní části se práce zaměřuje na experimentální zjištění průběhu hodnot emisivity na povrchu materiálu. V závěru se práce věnuje zhodnocení vhodnosti použití obou infračervených kamerových systémů pro měření teploty polotovarů za vysokých teplot.

Klíčová slova:

Termokamera, Teplota, Infračervené záření, Měření, Technologie

Summary

This bachelor thesis describes the temperature dependence of the emissivity coefficient during contactless measuring. At the beginning of the thesis, there are very briefly described physical laws on the principle of which the non-contact temperature measurement works. The basic methods of contact and non-contact temperature measurement are described, including examples of instruments. In the main part of the thesis there is the experimental determination of the emissivity coefficients on the material surface. At the end, the thesis is devoted to assessing the suitability of both infrared camera systems for temperature measurement of semifinished products at high temperatures.

Keywords:

Thermal camera, Temperature, Infrared radiation, Measurement, Technology

Obsah

1	Úvod.....	2
1.1	Cíl práce.....	2
2	Problematika kontaktního měření teplot.....	3
2.1	Dotykové teploměry	3
2.1.1	Termoelektrické snímače teploty	4
3	Problematika infračerveného (bezkontaktního) měření teplot	6
3.1	Historie infračerveného záření	6
3.2	Infračervené záření	6
3.3	Fyzikální zákony.....	7
3.3.1	Záření černého tělesa	7
3.3.2	Planckův vyzařovací zákon.....	8
3.3.3	Wienův zákon posuvu.....	10
3.3.4	Stefan-Boltzmanův zákon	11
3.3.5	Kirchhoffův zákon.....	13
3.4	Bezkontaktní teploměry	14
3.4.1	Principy IR detektorů	17
4	Experimentální část.....	20
4.1	Návrh experimentu	20
4.2	Použité přístroje.....	21
4.2.1	Infračervené kamery (termokamery).....	21
4.2.2	Termočlánky a měřicí stanice	24
4.2.3	Pec	26
4.3	Popis experimentu	27
4.3.1	Materiál	27
4.3.2	Zkušební vzorek.....	27
4.4	Vyhodnocení	33
4.4.1	Měření 1	34
4.4.2	Měření 2	36
4.4.3	Měření 3	37
4.4.4	Měření 4	39
4.5	Diskuze	41
5	Ekonomické zhodnocení	44
6	Závěr	46
	Použitá literatura	48
	Seznam tabulek.....	50
	Seznam obrázků.....	51
	Seznam grafů	53

1 Úvod

Měření teploty materiálu je v oblasti technologie velice důležité, ať už v oblasti vývoje a výzkumu či procesního řízení a monitoringu, například pro kontrolu ohřátí materiálu v peci před procesem tváření. Teplotu můžeme měřit kontaktně i bezkontaktně. Tato práce se níže zabývá oběma způsoby, ale především bezkontaktním pomocí termokamer.

1.1 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je seznámení s problematikou bezkontaktního měření a upozornění na úskalí bezkontaktního měření vysokých teplot v oblasti strojírenské technologie. V rámci experimentu budou provedeny tyto kroky:

- změření teploty povrchu termočlánkem
- záznam dat bolometrickou termokamerou
- záznam dat fotonovou termokamerou
- vyhodnocení emisivity

Dále stručné popsání závislosti koeficientu emisivity měřeného vzorku na jeho teplotě a typu termokamery. V závěrečné části zhodnocení vhodnosti obou typů termokamer pro měření v této oblasti.

2 Problematika kontaktního měření teplot

2.1 Dotykové teploměry

Jak již z názvu vyplývá, měření teploty dotykovými teploměry spočívá v přímém kontaktu snímače (senzoru nebo čidla) s měřeným objektem. Využívá se přenosu tepla. Rozsah měřených teplot se pohybuje mezi -250°C až 2000°C . Dotykové měření teploty se využívá především u stacionárních a dobře přístupných objektů. Výhodou dotykových snímačů je jejich univerzálnost a vysoká přesnost. Používají se pro měření teploty pevných, kapalných i plynných látek. Dalším benefitem je jejich nízká pořizovací cena. Nevýhodou je nutnost zajistit dostatečný kontakt s měřeným předmětem k přenosu tepla. Tento kontakt musí také trvat po dlouhou dobu.

Dle fyzikálního principu je dělíme na:

Dilatační - Fungují na principu teplotní roztažnosti tuhých látek, plynů a kapalin.

Odporové - Využívají schopnosti vodičů a polovodičů měnit v závislosti na teplotě vnitřní odpor.

Polovodičové - Velice často jsou řazeny k odporovým, protože využívají vlastnosti polovodičů, které mění své parametry v závislosti na teplotě. Nejčastěji odpor.

Termoelektrické - Využívají teplotní závislosti termoelektrického napětí termoelektrického článku. (podrobněji kapitola 2.1.1)

Optovláknové - Fungují na principu změny optických vlastností vláken s měnící se teplotou.

Speciální - Využívají ostatních fyzikálních vlastností tuhých a kapalných látek s teplotou (např. index lomu, měknutí, tvrdnutí, tavení atd.).

2.1.1 Termoelektrické snímače teploty

K převodu teploty na elektrické napětí využívají tyto snímače termoelektrického jevu. Z elektrického hlediska je termočlánek aktivním zdrojem el. energie o téměř nulovém vnitřním odporu a velmi malém svorkovém napětí. Jde o velmi rozšířenou metodu, zejména při požadavku velmi širokého rozmezí měřených teplot a pro měření vysokých teplot (-600 až 2800°C). Měřicí rozsah jednotlivých typů termočláneků je uveden v tabulce 1. [7]

Tabulka 1: Měřicí rozsahy termočláneků [7]

Typ termočlátku	Měřicí rozsah [°C]
T (Cu - CuNi)	- 200 až 400
J (Fe - CuNi)	-200 až 760
E (NiCr - CuNi)	- 100 až 700 (900)
K (NiCr - NiAl)	- 200 až 1000 (1300)
S (PtRh10 - Pt)	0 až 1300 (1600)
R (PtRh13 - Pt)	0 až 1300 (1600)
B (PtRh36 - PtRh6)	300 až 1600 (1800)
A (WRe5 - WRe20)	0 až 2500
N (nicrosil - nisil)	- 270 až 1370

Při rozdílných teplotách měřícího a srovnávacího spoje se na měřidle objeví napětí, jehož velikost závisí na volbě kovů termočlátku a na rozdílu teplot obou spojů. Závislost tohoto napětí na rozdílu teplot je nelineární, jeho velikost pro různé dvojice kovů je tabelována. Pro praktické použití se většinou vystačí s kvadkvadratická závislost, viz. rovnice 2.1. Schéma základního zapojení termočlátku je na obr. 1 [7]

$$E = A + B \cdot (t_2 - t_1) + C \cdot (t_2 - t_1)^2$$

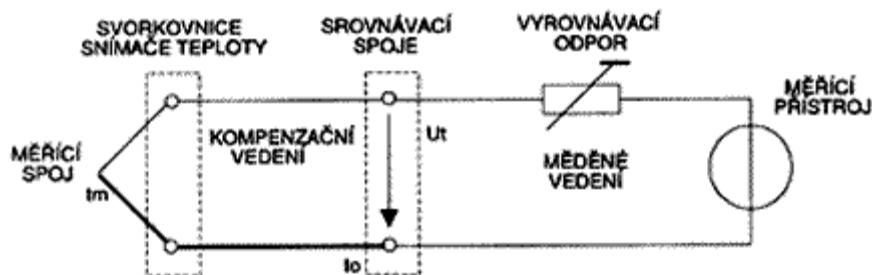
Rovnice 2.1

kde

E je termoelektrické napětí [V]

$t_2 - t_1$ je rozdíl teplot mezi oběma spoji [K]

A, B, C jsou konstanty závislé na použité dvojici kovů



Obrázek 1: Schéma zapojení termočlánekového spoje [7]

Výhodou termočláneků je možnost pracovat ve velmi širokém rozmezí měřených teplot, a to až do 2800°C za předpokladu použití speciálních slitin. Termočlánky se rovněž vyznačují velkou přesností. Např. termočlánek Pt - Pt + 10% rhodia je používán jako kalibrační teploměr pro rozsah teplot 630,5 až 1063°C. Další výhodou je nízká tepelná kapacita čidel. [7]

Pro měření nízkých teplot -250 až +500°C se používá běžně termoelektrický snímač Cu-ko. Při přechodu přes 0°C se mění znaménko termoelektrického napětí snímače. Pro vyšší teploty je vhodná dvojice Fe-ko. Konstantan (ko) má podle normy 45%Ni, 55%Cu a nepatrný obsah jiných přísad (Mn, Si, Co, Mg), jehož zvětšení může nepříznivě ovlivnit termoelektrické vlastnosti snímače. Tyto přísady jsou vhodné zejména pro zvětšení odolnosti proti korozi. Velmi choulostivá je konstantanová větev v sirtém prostředí. Někdy bývají též jako konstantan označovány slitiny s poněkud odlišným složením, které se pro realizaci snímačů tohoto typu nehodí. [15]

Pro vyšší teploty používáme termoelektrického článku NiCr-Ni. Pro měření teploty se používá tato dvojice déle než 50 let (Hoskins). Niklová větev má 95% Ni zbytek tvoří dezoxidační a jiné přísady. Větev niklochromová má mít 85% Ni, 10% Cr a zbytek tvoří opět dezoxidační a jiné přísady. Zachování předem stanoveného složení, zvláště obsahu chromu je velmi obtížné. Odchytky ve složení přirozeně vedou k odchylkám termoelektrických vlastností snímačů, vyrobených z různých materiálů, různých taveb nebo různými výrobci. Ve snaze po sjednocení byla proto stanovena mezinárodní srovnávací stupnice termoelektrických napětí pro různé teploty pro snímač NiCr-Ni. Složení této dvojice je následující :

Větev NiCr - 89% Ni, 9,8% Cr, 1% Fe, 0,2% Mn

Větev Ni - 94% Ni, 2% Al, 1% Si, 2,5% Mn

[15]

3 Problematika infračerveného (bezkontaktního) měření teplot

3.1 Historie infračerveného záření

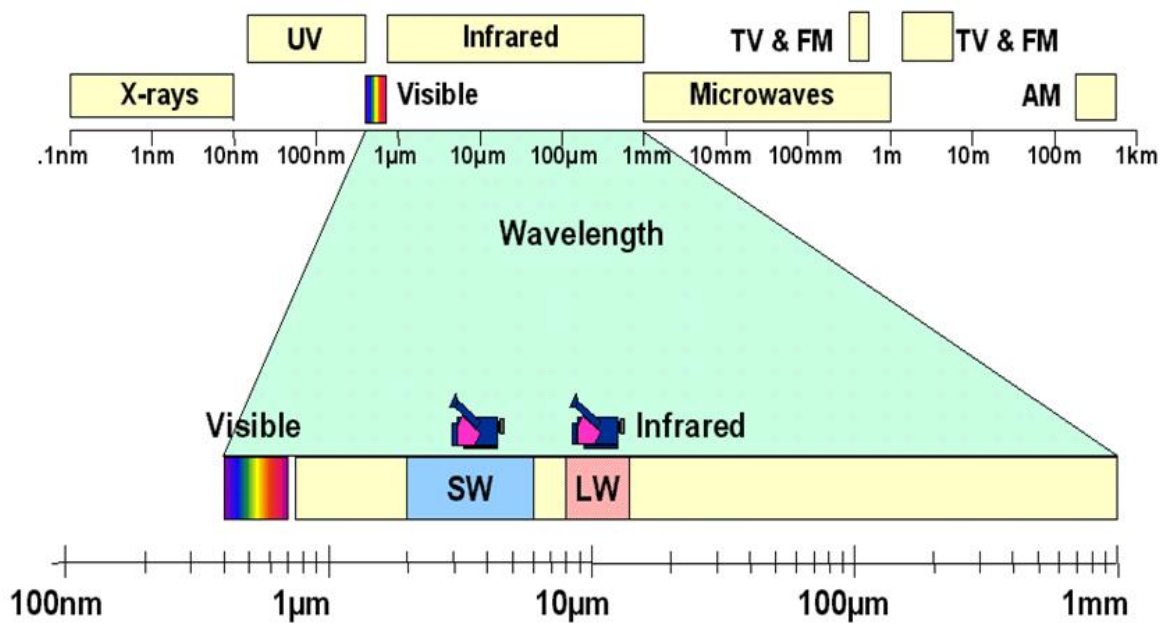
Objevitelem infračerveného záření je Sir William Herschel (dříve Friedrich Wilhelm). V roce 1800 při hledání vhodného materiálu, který by mohl použít, jako filtr pro pozorování Slunce použil skleněný hranol (podobně jako Isaac Newton) pomocí něhož rozkládal světlo na jednotlivé vlnové délky ("barvy"). U světla, které bylo hranolem rozložené na jednotlivá spektra, měřil teploměrem se začerněnou baňkou teplotu jednotlivých "barev". Směrem od fialové až k červené pozoroval nárůst teploty, ale maximální teploty dosáhl až při umístění teploměru za červenou barvu, mimo okem viditelné spektrum.

3.2 Infračervené záření

Infračervené záření je neviditelná část elektromagnetického spektra (viz obr. 2), které se projevuje tepelnými účinky. Toto záření je definováno ve vlnových délkách 0,78 μm až 1 mm - tedy nad viditelnou částí. Lidské oko je schopné zachytit záření v rozsahu přibližně 0,38 až 0,78 μm . Tato infračervená oblast se v literatuře nejčastěji rozděluje do těchto pět oblastí:

Blízká oblast	0,75 μm	-	2 μm	NWIR (NearWave IR)
Krátkovlnná oblast	2 μm	-	3 μm	SWIR (ShortWave IR)
Střední oblast	3 μm	-	5 μm	MWIR (MiddleWave IR)
Vzdálená oblast	5 μm	-	15 μm	LWIR (Long Wave IR)
Velmi vzdálená oblast	15 μm	-	1 mm	VLWIR (Very Long Wave IR)

[4]

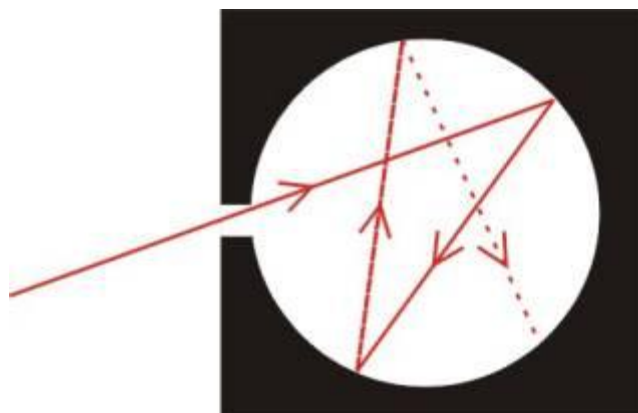


Obrázek 2: Elektromagnetické spektrum [4]

3.3 Fyzikální zákony

3.3.1 Záření černého tělesa

Absolutně černé těleso představuje určitý fyzikální model, který pohlcuje veškeré záření na všech vlnových délkách dopadajících na jeho povrch. Nedochozí k žádnému odrazu. Zároveň je také ideálním zářičem, protože množství vyzářené energie závisí pouze na jeho teplotě.



Obrázek 3: Schematické znázornění černého tělesa [16]

Schematicky se dá zobrazit jako dutina, do které dopadá záření a na stěnách této dutiny po opakovaných odrazech dochází k pohlcení tohoto záření. Otvor této dutiny se jeví jako černé těleso. Černé těleso je možné popsat jako těleso, jehož koeficient pohltivosti je $\alpha = 1$ (koeficient odrazivosti $\rho = 0$ a koeficient propustnosti $\tau = 0$).

3.3.2 Planckův vyzařovací zákon

Max Planck zjistil roku 1890, že tělesa nevyzařují svoji energii spojitě, ale v určitých intervalech (dávkách) - kvantech. Molekuly, nebo atomy pohlcující, nebo vyzařující energii v kvantech se označují jako fotony. Dále odvodil, že množství energie v kvantu, je přímo úměrné kmitočtu ν

$$E = h \cdot \nu$$

Rovnice 3.1

Písmeno h je Planckova konstanta

$$h = 6,624 \cdot 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}]$$

$$\nu = \frac{1}{\lambda}$$

Rovnice 3.2

λ je vlnová délka záření

Na základě poznatku o nespojitém vyzařování těles definoval spektrální intenzitu nepolarizovaného elektromagnetického záření vyzařovaného černým tělesem na všech vlnových délkách při absolutní teplotě T [K]. [4]

Zákon spektrální intenzity monochromatického vyzařování černého tělesa:

$$M_{0,\lambda}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1}$$

Rovnice 3.3

respektive

$$M_{0,\lambda}(T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad [W \cdot m^{-2}]$$

Rovnice 3.4

kde:

$$c_1 = 2\pi hc^2 = 3,741 \cdot 10^{16} [W \cdot m^2] - \text{první radiační konstanta}$$

$$c = 2,998 \cdot 10^8 [m \cdot s^{-1}] - \text{rychlost světla ve vakuu}$$

$$h = 6,627 \cdot 10^{-34} [J \cdot s] - \text{Planckova konstanta}$$

$$c_2 = \frac{hc}{k} = 1,439 \cdot 10^{-2} [m \cdot K] - \text{druhá radiační konstanta}$$

$$k = 1,3805 \cdot 10^{-23} [J \cdot K^{-1}] - \text{Boltzmannova konstanta}$$

λ je vlnová délka [m]

T je absolutní teplota [K]

Pro každou vlnovou délku je intenzita vyzařování černých těles jiná. Pokud je celková intenzita vyzařování M, pak je spektrální intenzita vyzařování pro určitou vlnovou délku úměrná derivaci:

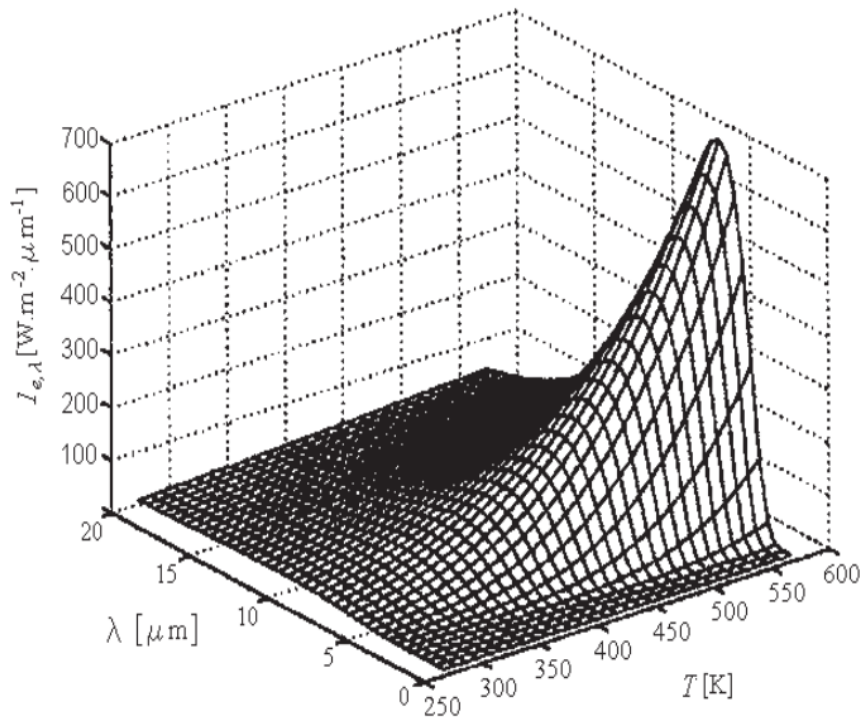
$$M_\lambda = \frac{dM}{d\lambda}$$

Rovnice 3.5

M je celková intenzita záření tělesa

M_λ je spektrální intenzita vyzařování tělesa

λ je vlnová délka záření



Obrázek 4: Závislost intenzity vyzařování $M(I)$ na vlnových délkách při různých teplotách [3]

3.3.3 Wienův zákon posuvu

Wilhelm Wien odvodil z Planckova zákona závislost vyzařování černého tělesa na vlnové délce, která se snižuje s rostoucí termodynamickou teplotou T . Čím teplejší těleso je, tím kratší jsou vlnové délky, na kterých vyzařuje. [4]

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

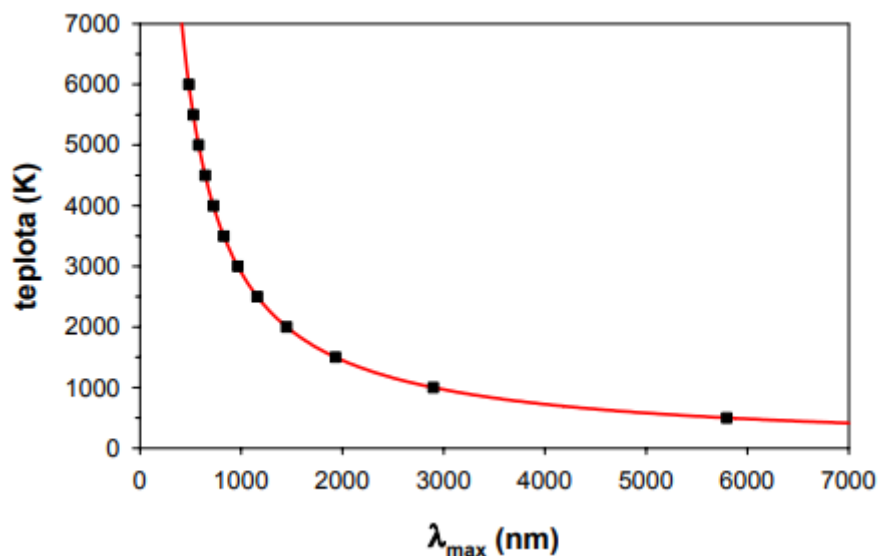
Rovnice 3.6

kde:

λ_{max} – vlnová délka maxima spektrální hustoty vyzařování

T – teplota tělesa

b – Wienova konstanta = $2,898 \cdot 10^{-3} [m \cdot K]$



Obrázek 5: Wienův posunovací zákon [8]

Z obrázku 5 je jasně viditelné, že mění teplota tělesa [K] v závislosti na vlnové délce λ_{\max} .

3.3.4 Stefan-Boltzmannův zákon

Stefan-Boltzmannův zákon vyjadřuje vztah pro výpočet vyzařování dokonale černého tělesa. Vztah se získá integrací Planckova zákona v celé oblasti vlnových délek.

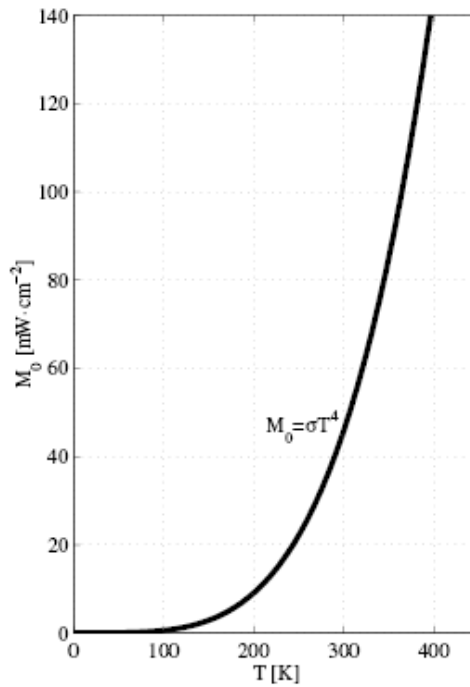
$$M_0(T) = \int_0^{\infty} M_{\lambda}(T) d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \cdot d\lambda = \sigma T^4$$

Rovnice 3.7

kde:

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

je Stefan – Boltzmannova konstanta vyzařování absolutně černého tělesa



Obrázek 6: Intenzita vyzařování černého tělesa [8]

Stefan-Boltzmanův zákon lze použít i pro výpočet vyzařování ostatních těles při známé emisivitě povrchu.

$$M_{(0,\lambda)}(T) = \varepsilon \sigma T^4 = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

Rovnice 3.8

kde:

$C_0 = 5,67 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ - redukovaná Stefan-Boltzmanova konstanta

ε – emisivita tělesa

3.3.5 Kirchhoffův zákon

Gustav Kirchhoff stanovil zákon vycházející ze stavu termodynamické rovnováhy. Pokud je energetická bilance těles v prostoru vyrovnaná (bilance vyzářené i pohlcené energie), pak mají stejnou teplotu.

Pro dvě libovolná tělesa v tepelné rovnováze platí: Těleso pohlcuje (absorbuje) nejsilněji právě ty složky spektra, které nejsilněji vyzařuje. Poměr záře (měrné zářivosti) L respektive intenzity vyzařování M k pohltivosti závisí pouze na absolutní teplotě tělesa: [4]

$$\frac{L}{\alpha} = \frac{M}{\alpha \cdot \pi} = f(T)$$

Rovnice 3.9

resp.

$$\frac{L(\lambda)}{\alpha} = \frac{M(\lambda)}{\alpha \cdot \pi} = f(T, \lambda)$$

Rovnice 3.10

Pro tělesa v termodynamické rovnováze také platí, že energie tělesem pohlcená (absorbovaná) se rovná energii vyzářené (emitované), potom platí i rovnost koeficientů pohltivosti α a koeficientu emisivity ε a u nečerných (reálných) těles jsou tyto koeficienty závislé na vlnové délce λ , na úhlu dopadu zářivé energie ϕ respektive na úhlu vyzařování energie ϕ povrchu nečerného tělesa. [1]

potom platí:

$$\alpha_{(\lambda, \phi, T)} = \varepsilon_{(\lambda, \phi, T)}$$

Rovnice 3.11

$$\alpha_{(\lambda, \phi, T)} + \rho_{(\lambda, \phi)} + \tau_{(\lambda, \phi)} = \varepsilon_{(\lambda, \phi, T)} + \rho_{(\lambda, \phi)} + \tau_{(\lambda, \phi)} = 1$$

Rovnice 3.12

Povrchy, jichž radiační vlastnosti nezávisí na úhlu ϕ se nazývají difúzní povrchy.

Podle Kirchhoffova zákona u těles v rovnovážném stavu je množství emitované energie z objektu stejné s množstvím absorbované energie. Pro absolutně černé těleso tedy platí:

$$\varepsilon = \alpha$$

Rovnice 3.13

Pokud označíme intenzitu vyzařování absolutně černého tělesa M_o , pak pro absolutně černé těleso platí:

$$\frac{M_o}{\pi} = f(T)$$

Rovnice 3.14

Intenzita absolutně černého tělesa závisí jen na jeho absolutní teplotě. [4]

3.4 Bezkontaktní teploměry

Základním prvkem je tzv. termočlánekový snímač. Ten je složena z termočláneků, které využívají Seebeckův jev. Jev funguje na principu spojení dvou různých kovů nebo polovodičů. Jsou-li jejich spojení umístěny do míst s různou teplotou, na konci rozpojeného obvodu vzniká tzv. termoelektrické napětí, jeho velikost závisí pouze na teplotě spojů.

Termografie

Pojem termografie zahrnuje metody pro zobrazování teplotních polí na povrchu snímaných těles (rozložení povrchových teplot), které je reprezentováno energií a hustotou fotonů emitovaných z povrchu snímaného tělesa a jeho vyhodnocením – kvantifikací. IČ termografie je i názvem pro techniku, která je určitým transformačním systémem, pomocí kterého je možné zobrazit neviditelné (pro lidské oko) IČ záření vyzařované z objektů a to v závislosti na jejich tepelných stavech. [4]

Koeficient emisivity

Pokud chceme bezkontaktně měřit co nejvíce přesnou hodnotu teploty, musíme znát několik parametrů objektu a prostředí, ve kterém se nachází. Jedná se o odraženou zdánlivou teplotu, vzdálenost, teplotu a vlhkost mezi objektem a přístrojem. Základním parametrem objektu je součinitel (koeficient) emisivity ϵ . Tento koeficient závisí na materiálu tělesa, vlastnostech jeho povrchu, vlnové délce snímací techniky, teplotě tělesa a na směru (úhlu) vyzařování energie tělesa. Hodnotu emisivity můžeme přibližně zjistit z tabulek v literatuře nebo v materiálech dodávaných s přístrojem na bezkontaktní měření. Tyto hodnoty byly zjištěny experimentálně v laboratoři.

Níže se nachází tabulka (č. 2) vybraných materiálů a jejich emisivit dle výrobce infračervených kamer FLIR Systems

Tabulka 2: Tabulka emisivit vybraných materiálů [6]

Materiál	Specifikace	Teplota [°C]	Vln.délka [μm]	Emisivita [-]
Hliník	Anodiz. černý	70	2.5	0,67
Hliník	Anodiz. černý	70	8.14	0,95
Hliník	Folie	27	10	0,04
Hliník	Folie	27	3	0,09
Cihla	Běžná	17	2.5	0,86 - 0,81
Beton	Suchý	36	2.5	0,95
Ocel	Leštěná	100	Celé IR spektr.	0,07
Ocel	Korodovaná	17	2.5	0,96
Ocel	Oxidovaná	500	Celé IR spektr.	0,98
Papír	Bílý	20	Celé IR spektr.	0,7 - 0,9
Papír	Černý, matný	70	2.5	0,86
Papír	Černý, matný	70	LLW	0,89
Dřevo		17	2.5	0,98
Dřevo		19	8.14	0,96

Pokud nemáme k dispozici správnou hodnotu emisivity pro náš měřený objekt, můžeme využít několik způsobů, jak tuto hodnotu zjistit.

1. změříme teplotu kontaktním teploměrem a po nastavení ostatních parametrů (např. zdánlivě se odrážející teplota, vlhkost, vzdálenost apod.) zadáváme hodnotu emisivity tak dlouho, dokud systémem vypočtená teplota souhlasí s teplotou změřenou kontaktně.

2. Na místo, kde potřebujeme měřit teplotu, umístíme prvek, u kterého známe emisivitu. Může se jednat například o předem definovanou izolační pásku, speciální černou barvu, případně štítek o známé emisivitě. Následně změříme bezkontaktně teplotu v místě s tímto krytím. Teplota v místě krytí bude stejná jako v jejím bezprostředním okolí, získáme tak údaj o skutečné teplotě. Známou teplotu můžeme použít k zjištění emisivity povrchu v okolí dle předchozího postupu.

3. V případě nutnosti měření členitých těles jako jsou například desky plošných spojů (DPS), je vhodné použít následující postup: prohřejeme DPS v zahřívacím boxu na homogenní teplotu. V co možná nejkratším čase pořídíme termogram a z předpokladu stejného rozložení teplot na celé DPS můžeme určit emisivity pro jednotlivé komponenty a části desky dle bodu 1.

Pokud se měřený objekt nenachází v nebezpečném prostředí (atmosféra, vysoké napětí atd.) a můžeme jeho povrch před měřením upravit, je možné na povrch objektu nanést tenkou vrstvu materiálu, jehož emisivitu jsme předem určili, nebo ji definuje výrobce. Tímto způsobem lze také sjednotit emisivity měřeného objektu, který se skládá z dvou a více rozdílných materiálů. Jako příklad lze uvést desku plošných spojů (DPS).

Pro tyto účely lze využít několik produktů ve formě samolepících štítků, teplotně odolných barev, nebo vodou smývatelných barev (viz obr. 7).

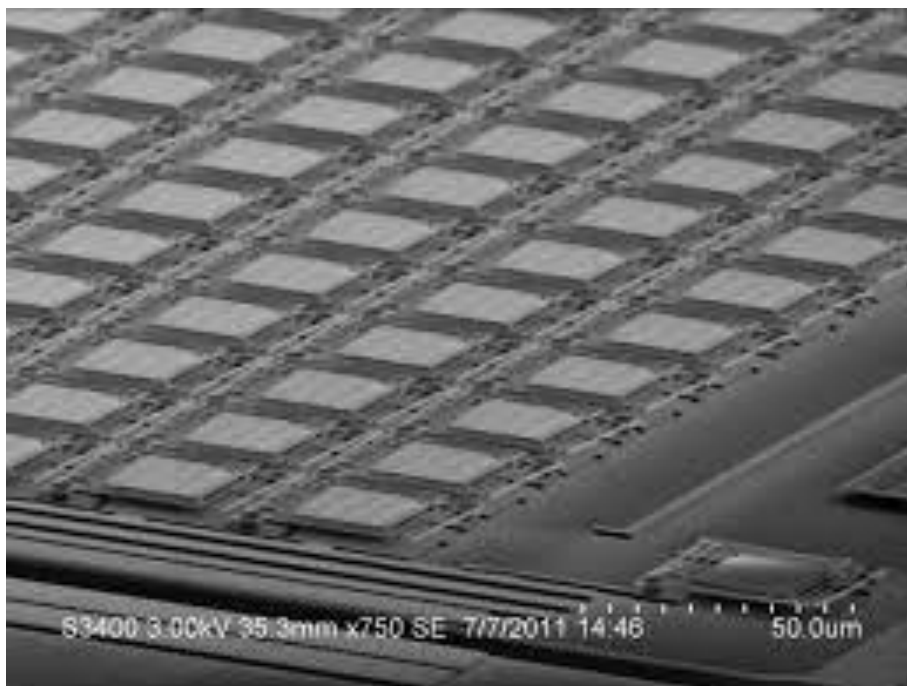


Obrázek 7: Produkty pro usnadnění IČ měření [13] [14] [15]

3.4.1 Principy IR detektorů

Tepelný (bolometrický) detektor

Princip bolometru je znám již od roku 1880 a spočíval v tenkém plátku začerněné platiny připojeném k jedné větvi Wheatstonova můstku. Změna zářivého toku dopadajícího na bolometr reprezentuje změnu teploty měřeného objektu. Zářivý tok ovlivňuje teplotu bolometru a ten mění svůj vnitřní odpor. Změnu odporu se projeví v můstkovém nebo základním zapojení a je následně jako výstupní signál vyhodnocována. V dnešních maticových snímačích jeden bolometr představuje jeden pixel. Bolometrický systém se dnes již běžně osazují detektory s rozlišením 640x480 nebo 1024x768px. Tyto detektory není nutné chladit na nízké teploty, ale z důvodu teplotní stabilizace jsou stabilizovány Peltierovými články. Tím lze dosáhnout konstantní provozní teploty až $\pm 1^\circ\text{C}$ a tím minimalizovat změny vlastností detektoru s teplotou a zpřesnit tak měření. Z hlediska spektrální charakteristiky jsou tyto senzory využívány v LWIR pásmu.



Obrázek 8: Pixely bolometrického detektoru[19]

Kvantový (fotonový) detektor

Zjednodušené lze princip vysvětlit takto: Detektor se skládá z třech pásem: valenčního, zakázaného a vodivostního. Pokud foton, o správné vlnové délce, dopadající na detektor předá elektronu ve valenčním pásmu dostatečně velkou energii, tak se tento elektron vybudí a následně přeskočí přes zakázané pásmo do vodivostního pásma. Výstupním obvodem detektoru začne při dopadu určitého počtu elektronů protékat výstupní proud. V praxi se systémy s fotonovým detektorem často označují výrazem "chlazené". Je to z důvodu potřeby chladit detektor na specifickou teplotu, která zajistí vytvoření "zakázaného" pásma. Zakázané pásmo zaručí, že elektrony nebudou samovolně přeskakovat z valenčního do vodivostního pásma. Nejčastěji používaný detektor z antimonitu india (InSb) je chlazen na teplotu přibližně -196°C . Dříve se k chlazení používal tekutý dusík, ale z důvodu vhodnosti tohoto řešení spíše do laboratorního prostředí (složitá manipulace, drahý provoz, složité skladování tekutého dusíku) se přešlo k využívání tzv. Stirlingova chladiče. Díky tomu jsou také nazývané jako chlazené kamery.

Stirlingův motor je tepelný stroj pracující s cyklickým stlačováním a expanzí vzduchu, nebo jiného pracovního plynu. V režimu motoru je dodávána tepelná energie, která se mění na energii mechanickou. V režimu chladiče je dodávána mechanická energie, která se mění na energii tepelnou. Protože je stlačován plyn, při jeho stlačování se odvádí vznikající tepelná energie stlačovaného plynu a stlačovaný plyn při expanzi v další části chladiče expanduje a přitom se snižuje jeho teplota a tím je chlazená tato část chladiče.



Obrázek 9: Stirlingův chladič [18]

Mezi základní charakteristiky fotonových detektorů patří velká stabilita v čase, vysoká citlivost a přesnost. Díky vysoké rychlosti záznamu, lze považovat termokamery s tímto detektorem za vysokorychlostní kamery. Tyto vlastnosti spolu s vyšší cenou předurčují použití těchto systémů především ve vědě a vývoji. Z hlediska spektrální charakteristiky jsou tyto senzory využívány v SWIR a LWIR pásmu.

4 Experimentální část

4.1 Návrh experimentu

Cílem experimentu je popsat vlastnosti v praxi běžně používaného materiálu při bezkontaktním měření teploty. Při návrhu bylo uvažováno několik způsobů jak toto měření provést. Jako nejsnazší možnost se jevil potažení části vzorku měřeného materiálu povlakem s jasně popsány parametry především emisivitou. Pro tyto účely je možné použít teplotně odolné spreje s definovanou emisivitou a nízkou odrazivostí LabIR[®] nebo ThermaSpray 800 (viz kapitola 3.4). V tomto experimentu je ovšem použití těchto speciálních povrchových úprav omezené z důvodu překročení jejich maximálního teplotního namáhání a to pro ThermaSpray maximálně 800°C a LabIR[®] paint 1 000°C. Teplota plamene propan butanu může dosahovat až 1 600°C. Při této teplotě by došlo k nevratnému poškození tohoto povrchu. Bylo tedy nutné přistoupit k provedení měření pomocí měření referenční teploty termočlánky. Pro přichycení termočlánku k povrchu měřeného objektu bylo využito svářečky (viz kapitola 4.2.2), která se obvykle využívá pro vytvoření termočlánekového spoje.

Pro průběh experimentu byl zvolen následující postup: Spuštění plynové pece pro dosažení provozní teploty. Příprava zkušební vzorku dělením materiálu, svařením do profilu L a připevněním termočlánekových snímačů teploty pro referenční hodnoty. Vložení vzorku do pece a postupné ohřívání na teplotu > 1 000°C. Spuštění záznamu měřicích přístrojů, vyjmutí vzorku z pece a umístění na pracovní plochu snímanou kamerami. Snímání procesu chladnutí záznamovou rychlostí 2 snímky za sekundu až do dosažení teploty < 100°C. Chladnutí vzorku pasivní, bez aktivního ofukování proudem vzduchu. Po dosažení teploty < 100°C opětovné vložení do pece a opakování celého měření ještě jednou pro získání hodnot ovlivněných další silnější vrstvou okují na povrchu. Opakování celého měření s druhým vzorkem.

4.2 Použité přístroje

4.2.1 Infračervené kamery (termokamery)

K bezkontaktnímu vyhodnocení teploty byly použity dvě termokamery německého výrobce InfraTec. Obě kamery byly pro měření zapůjčeny společností "TMV SS" spol. s r.o.

InfraTec VarioCam HD



Obrázek 10: VarioCAM HD 900 [9]

Tabulka 3: Technické parametry VarioCAM [9]

Výrobce	InfraTec
Model	VarioCAM® HD research 980
Sériové číslo	1020917
Rok výroby	2018
Typ detektoru	Nechlazený FPA, pixel pitch 17µm
Rozlišení detektoru	1,024 x 768 px
Spektrální rozsah	7,5 ... 14 µm
Snímkovací rychlost při plném rozlišení	30 Hz
Teplotní rozsah	-40 ... 2000°C
Teplotní citlivost	20 mK
Přesnost	± 1 K (0 ... 100°C) nebo ±1%
Ostření	Motorizované, automatické
Provozní teplota	-25 ... 50°C

Hmotnost	1,7 Kg
Kalibrace	Ano

Tabulka 4: Parametry objektivu VarioCAM [9]

Ohnisková vzdálenost	60mm
F	1.0
Zorné pole	(16x12)°
Minimální ostřicí vzdálenost	0,5m

InfraTec ImageIR



Obrázek 11: ImageIR 8320 [10]

Tabulka 5: Technické parametry ImageIR [9]

Výrobce	InfraTec
Model	ImageIR® 8320 hp
Sériové číslo	8312516
Rok výroby	2018
Typ detektoru	Chlazený InSb, pixel pitch 15 µm
Rozlišení detektoru	640 x 512 px
Způsob chlazení	Integrovaný Stirlingův chladič


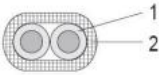
Spektrální rozsah	2,0 ... 5,7 μm
Snímkovací rychlost při plném rozlišení	355 Hz
Teplotní rozsah	-40 ... 1500°C (možno až 3000°C)
Teplotní citlivost	20 mK
Přesnost	± 1 K nebo $\pm 1\%$
Ostření	Manuální
Provozní teplota	-20 ... 50°C
Hmotnost	3,3 Kg

Tabulka 6: Parametry objektivu ImageIR [9]

Ohnisková vzdálenost	5
F	2.0
Zorné pole	(11 x 9)°
Minimální ostřicí vzdálenost	0,5m

4.2.2 Termočláanky a měřicí stanice

K vyhodnocení teploty vzorku kontaktní metodou bylo použito termočláankové vedení typu K (NiCr-Ni/K) výrobce MAVIS Nový Bor s.r.o. Vedení je izolované vysokoteplotním skelným vláknem.

Vedení pro snímače teploty <i>Cables for temperature sensors</i>		V02/18	
Vedení izolovaná vysokoteplotním skelným vláknem		<i>High Temperature Fibreglass-insulated Cables</i>	
			
Technická data Teplotní odolnost izolace od	-40°C do +600°C	Technical Data Temperature limit of the insulation from	-40°C to +600°C
Skladba izolace 1. Vnitřní opletení skelným vláknem (GH) 2. Vnější opletení skelným vláknem (GH) Napuštění vysokoteplotním lakem		Insulation Design 1. High temperature-fibreglass braid (GH) 2. High temperature-fibreglass braid (GH) Varnish impregnation	
Vodiče vedeny paralelně		Cores laid parallel	
Použití V suchých prostorech při vysokých teplotách		Application In dry rooms at high temperature	

Obrázek 12: Technický list termočláankového vedení [17]

Vytvoření termočláankového spoje a jeho následné připevnění navařením bylo provedeno navařovacím zařízením výrobce Svarsevis Thermoprozess Copperheat BT-2 (obr. 13), sériové číslo: 32/11.



Obrázek 13: Navařovací zařízení BT-2

Termočlánky byly připojeny k měřicí ústředně Ahlborn ALMEMO 5690-2M (s/n: A13110191). Jedná se o modulární datalogger s možností osazování různých měřicích karet. V našem případě byl přístroj osazen měřicími kartami MM-A9 a U-A10 s celkovým počtem vstupů 21 a aku packem pro provoz na baterii bez síťového napájení a zálohování dat při výpadku proudu (obr. 14).



Obrázek 14: Měřící ústředna

4.2.3 Pec

K zahřátí zkušebních vzorků byla použita plynová pec vyrobená na ústavu strojírenské technologie. Pec je běžně využívána k ohřevu materiálu před tvářením za tepla a dalším tepelným zpracováním kovů. Jako palivo je používán propan butan dle ČSN 65 6481 přiváděný do hořáků z přepravních lahví.



Obrázek 15: Plynová pec

Obrázek 16: Tlaková lahev s Propan-Butanem

4.3 Popis experimentu

4.3.1 Materiál

Pro experiment by zvolen materiál dle EN S235JR (ČSN 11 375). Jedná se o nelegovanou, dobře svařitelnou konstrukční ocel, vhodnou pro tváření za tepla. Polotovár je za tepla válcovaná tyč s průřezem 40x10mm.

Tabulka 7: Chemické složení materiálu [11]

Prvek	Hmotnostní procento
C max. pro tloušťku $\leq 16\text{mm}$	0,19
Mn max.	1,5
Si max.	-
P max.	0,045
S max.	0,045
N max.	0,014

Tabulka 8: Mechanické vlastnosti materiálu [11]

Minimální mez kluzu R_{eH} [MPa]	235
Pevnost v tahu R_m [MPa]	360 - 510
Minimální tažnost [%]	26

4.3.2 Zkušební vzorek

V den měření byl v dílně Fakulty strojní nůžkami připraven materiál pro přípravu vzorku. Dva kusy ploché oceli o rozměru 40x10mm a délce 300mm byly svařeny k sobě do průřezu písmene L z důvodu snazší manipulace se vzorkem ohřátým na vysokou teplotu a dostatečné stability v průběhu ohřívání i chladnutí. Svar byl proveden manuálně metodou MAG. Po vychladnutí vzorku ohřátého svařováním byly na dílenské kotoučové brusce obroušeny plochy určené pro navaření termočlánků. Obroušení povrchu bylo provedeno z důvodu odstranění okují vzniklých při výrobě a nečistot, případně mastnoty nanesené při transportu a přípravě vzorku. Termočlánky byly navařeny navařovacím zařízením BT-2 v několika kusech (vzorek č. 1 - 6 kusů a

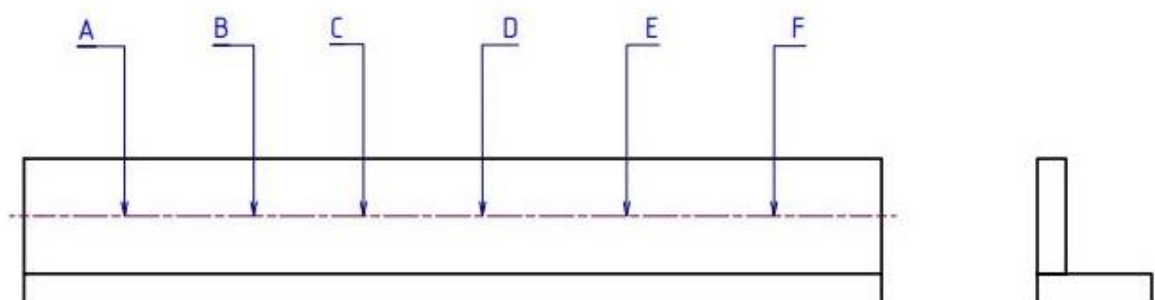
vzorek č. 2 - 5 kusů). Větší počet termočlánků jsem volil z důvodu velkého teplotního i mechanického namáhání termočlánků při testu. Teploty dosahovaly téměř 1100°C což se blížilo k maximálnímu měřicímu rozsahu těchto snímačů a při této teplotě se s těmito vzorky manipulovalo. Při opakovaných měřeních docházelo k oddělení jednotlivých termočlánků od zkušební vzorku, nebo poškození termočlánekového spoje. Po druhém měření byla věrohodná data maximálně ze dvou termočlánků.



Obrázek 17: Zkušební vzorky

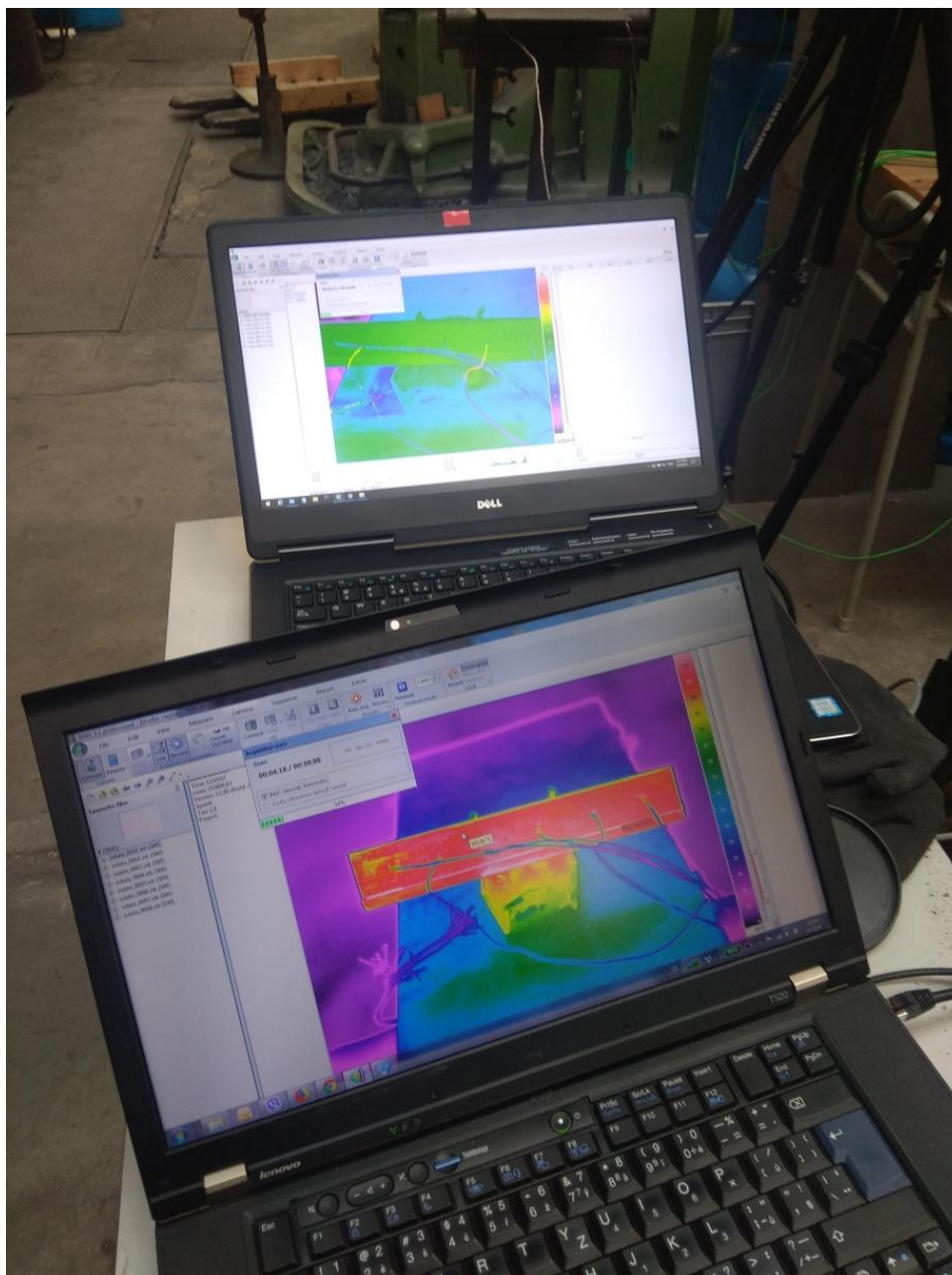


Obrázek 18: Připevněné termočlánky

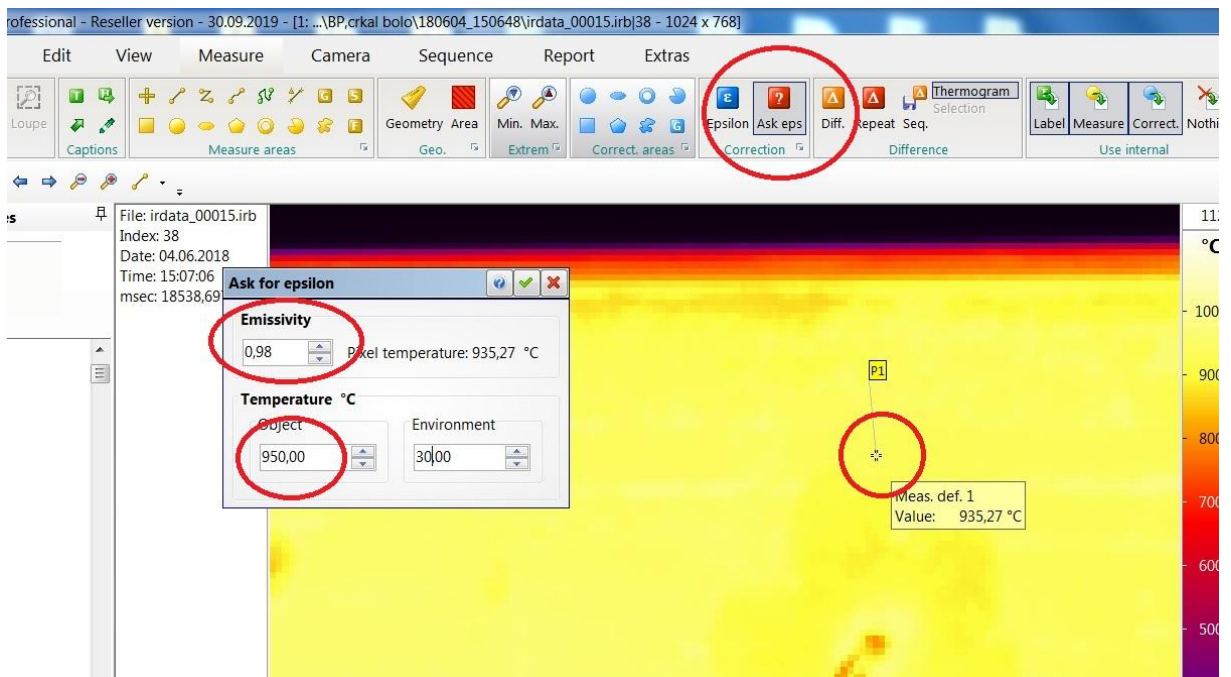


Obrázek 19: Schéma umístění termočlánků

Pro ovládání kamer při měření a pro zpracování výsledků byl použit software stejného výrobce jako termokamery, tedy InfraTec IRBIS 3 Professional.

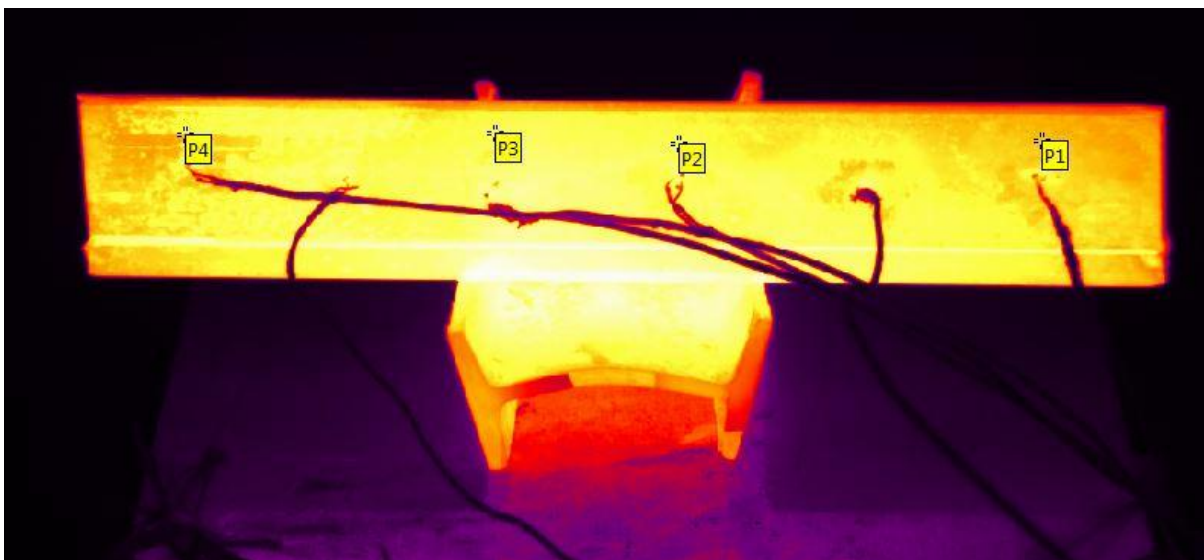


Obrázek 20: Záznam dat z termokamer



Obrázek 21: Vyhodnocovací software IRBIS professional

Vyhodnocení emisivity v bodě je možné pomocí funkce Ask for epsilon v záložce Measurement. Pomocí této funkce je možné po zadání referenční teploty, v tomto případě teploty získané z termočlánku, zjistit hodnotu koeficientu emisivity pro každý pixel v termogramu. Tento způsob je v principu stejný jako metoda postupného měnění hodnoty emisivity v bodě zájmu, dokud se referenční hodnota z dotykového měření nebude shodovat s teplotou vyhodnocenou softwarem (viz bod 1 v kapitole). Bod, ze kterého byla emisivita vyhodnocovaná, byl volen co nejbližší přivařenému termočlánku, avšak mimo oblast upravenou bruskou pro odstranění nečistot, před přivařením samotného snímače. Dalším kritériem umístění byl, co nejvíce homogenní povrch, bez viditelného zkreslení vyboulením či odlupováním oxidické vrstvy, vzniklé ohřevem na vysokou teplotu v plynové peci. Naměřené hodnoty byly vyříděny s krokem 50°C z referenčního měření termočlánkem a následně byla data z dataloggeru termočlánků a obou termokamer synchronizována dle systémových časů obou záznamových počítačů a dataloggeru.



Obrázek 22: Termogram z měření s polohami bodů pro vyhodnocení



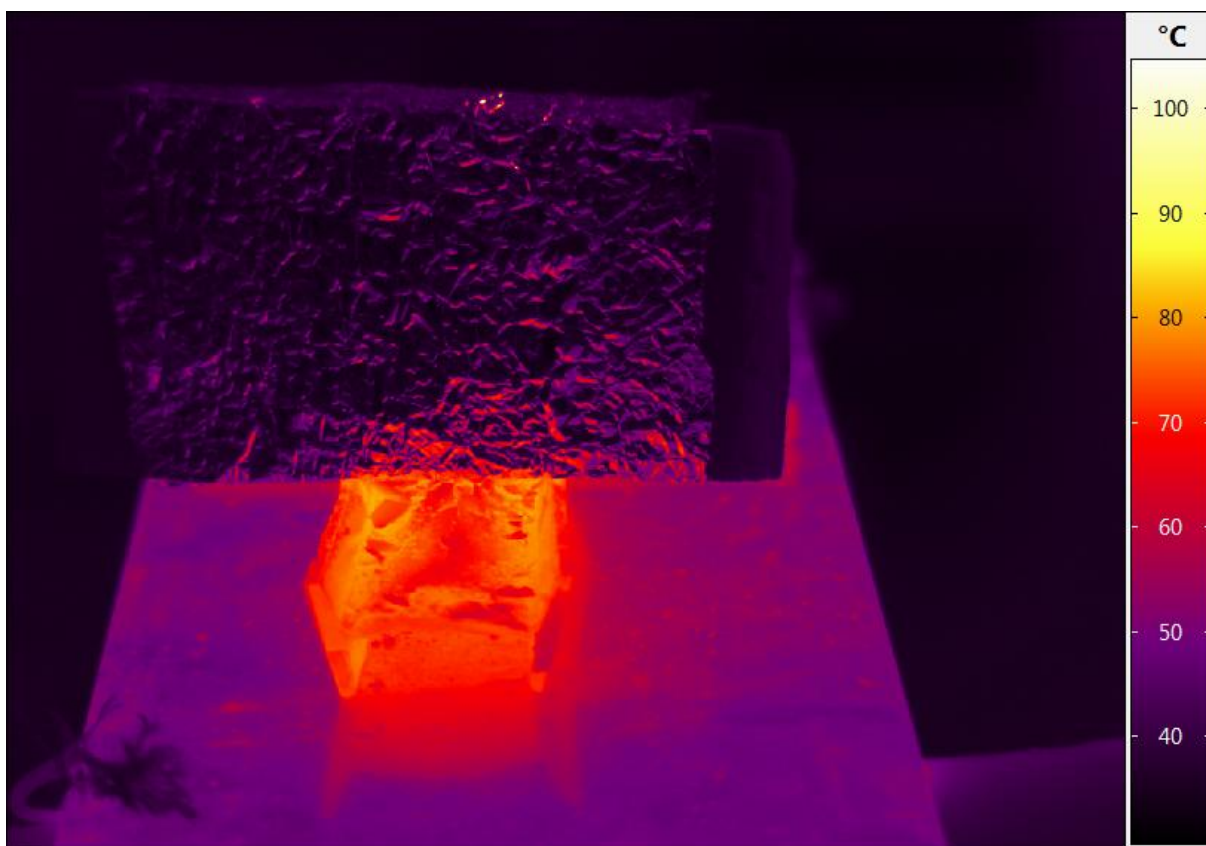
Obrázek 23: Materiál před zahřátím, rovnoměrné okujení, odlupující se okuje

4.4 Vyhodnocení

Tabulka 9: Parametry pro vyhodnocení

Parametr	Hodnota
Vzdálenost	1,5m
Zdánlivá odražená teplota	-
Vlhkost	50%
Teplota prostředí	V průběhu měřena termočlánkem

Při měření takto vysokých teplot je možné vliv zdánlivě odražené teploty považovat za zanedbatelný, ovšem pro úplnost bylo provedeno měření pomocí infračerveného odražeče (reflektoru) ze zmačkané a následně narovnané hliníkové folie. Při tomto pokusu nebyl zjištěn žádný významný zdroj záření, který by ovlivnil výsledky.

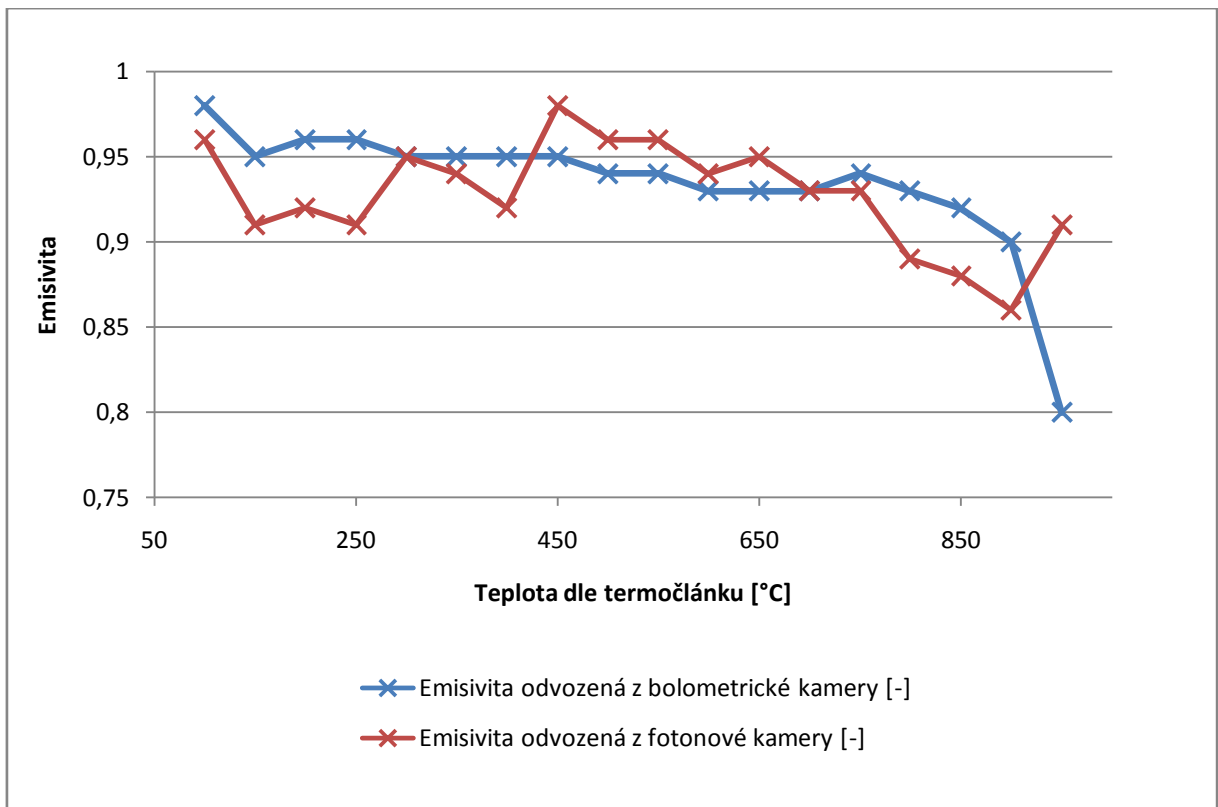


Obrázek 24: Termogram vyhodnocení zdánlivě odražené teploty

4.4.1 Měření 1

Tabulka 10: Vyhodnocená data z prvního měření

Hodnoty z bodu D			
Čas	Teplota vyhodnocená termočlánkem [°C]	Emisivita odvozená z bolometrické kamery [-]	Emisivita odvozená z fotonové kamery [-]
0:00:00	950,6	0,8	0,91
0:00:13	900,2	0,9	0,86
0:00:27	850	0,92	0,88
0:00:42	800	0,93	0,89
0:01:05	750,4	0,94	0,93
0:01:54	700	0,93	0,93
0:02:42	650,3	0,93	0,95
0:03:34	600	0,93	0,94
0:04:23	550,2	0,94	0,96
0:05:22	500	0,94	0,96
0:06:28	450,1	0,95	0,98
0:07:51	400	0,95	0,92
0:09:31	350	0,95	0,94
0:11:41	300	0,95	0,95
0:14:37	250	0,96	0,91
0:18:38	200,1	0,96	0,92
0:25:12	150	0,95	0,91
0:36:41	100	0,98	0,96



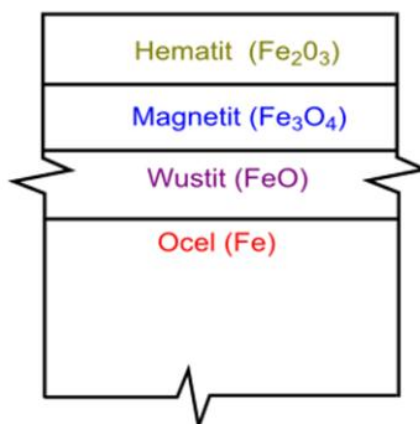
Graf 1: Porovnání emisivity kamery s bolometrickým a fotonovým detektorem v bodě D - měření 1

Z grafu 1, prvního měření vzorku č. 1 je patrné, že emisivita vyhodnocená pomocí termokamery s bolometrickým detektorem je v rozmezí teplot 150°C až 750°C relativně konstantní. Při teplotě vyšší než 750°C začíná prudký pokles hodnoty koeficientu emisivity. Konkrétně mezi teplotami 900 a 950°C je rozdíl 0,1, tedy pokles o přibližně 11%. Při těchto teplotách dochází k velkým změnám na povrchu z důvodu růstu sekundárních okujů, viz níže.

Hodnota emisivity vyhodnocená kamerou s fotonovým detektorem v průběhu teploty výrazněji osciluje, na teplotě 750°C se taktéž propadá, ovšem v posledním bodě, při teplotě 950°C kdy emisivita vyhodnocená bolometrickou kamerou dosahuje svého absolutního minima, opět stoupá.

Při zpracování oceli vznikají na povrchu oceli tři typy chemických sloučenin, a to: wüstit (FeO), magnetit (Fe₃O₄) a hematit (Fe₂O₃). Tyto chemické sloučeniny železa a

kyslíku jsou zastoupeny v různých množstvích ve všech typech okují (primární, sekundární, terciární). [5]



Obrázek 25: Chemické složení vrstvy okují[5]

Jak již bylo zmíněno, primární okuje vznikají v první fázi zpracování oceli a tedy v peci při jejím ohřívání. Struktura okují je ovlivněna atmosférou v peci, která je specifická pro každou výrobu. Sekundární okuje vznikají ve fázi po vytažení oceli z pece v běžné atmosféře, tedy na vzduchu. Ani v tomto případě není okolní atmosféra pokaždé stejná, proto dochází i při formaci sekundárních okují k velké různorodosti. Tloušťka sekundárních okují není příliš velká, a to z důvodu krátké oxidační doby. Maximální hodnoty tlouštěk okují jsou $100 \mu\text{m}$. Terciární okuje vznikají v konečném procesu válcování, někdy jsou proto nazývány oxidy [5]

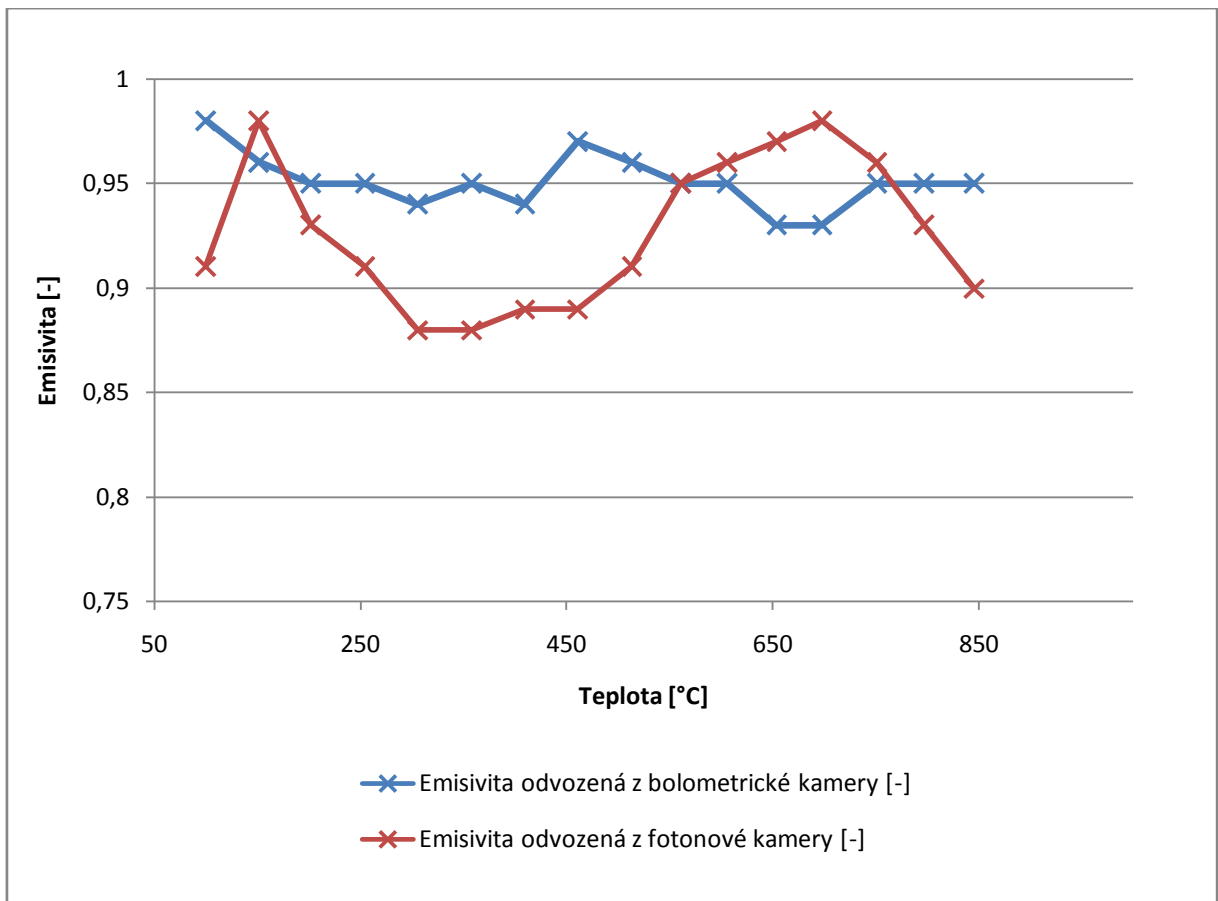
4.4.2 Měření 2

Měření číslo 2, tedy druhé měření prvního vzorku bohužel z důvodu chyby při měření nebylo možné vyhodnotit. Při nastavování parametrů bolometrické kamery byl zvolen nevhodný kalibrační rozsah. Změřené hodnoty tedy neodpovídají skutečnosti a jsou značně zkreslené. Tuto chybu není možné zpětně kompenzovat.

4.4.3 Měření 3

Tabulka 11: Vyhodnocená data z třetího měření

Hodnoty z bodu D			
Čas	Teplota vyhodnocená termočlánkem [°C]	Emisivita odvozená z bolometrické kamery [-]	Emisivita odvozená z fotonové kamery [-]
0:00:00	845,8	0,95	0,9
0:00:16	797,2	0,95	0,93
0:00:37	750,8	0,95	0,96
0:01:26	697,4	0,93	0,98
0:02:12	653,3	0,93	0,97
0:03:04	606,1	0,95	0,96
0:03:50	561,2	0,95	0,95
0:04:46	512,9	0,96	0,91
0:05:58	461,3	0,97	0,89
0:07:22	409	0,94	0,89
0:09:03	358,1	0,95	0,88
0:11:20	305,5	0,94	0,88
0:14:19	253,8	0,95	0,91
0:18:31	202,1	0,95	0,93
0:24:56	151,5	0,96	0,98
0:36:17	100,4	0,98	0,91



Graf 2: Porovnání emisivity kamery s bolometrickým a fotonovým detektorem v bodě D - měření 2

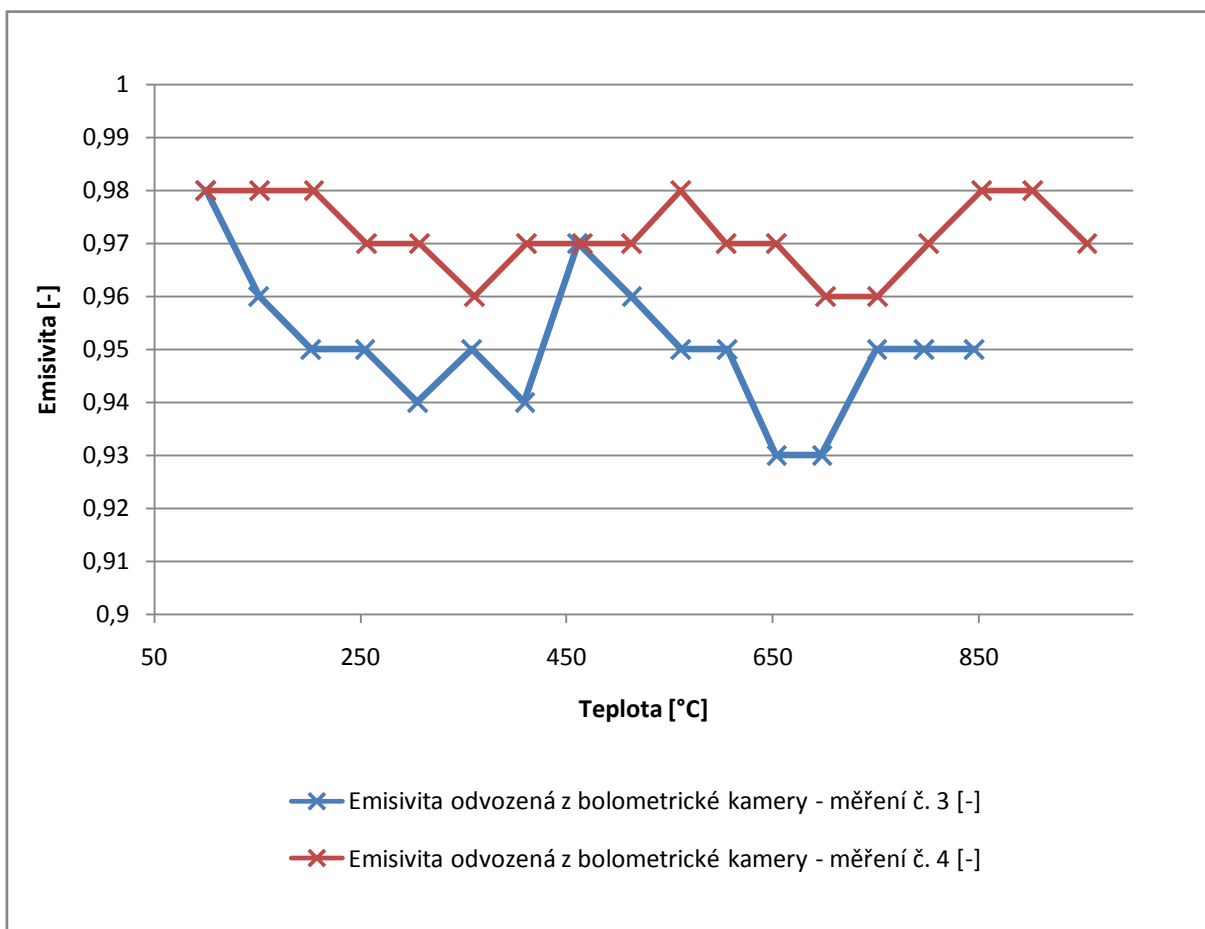
Porovnáme-li grafy obou měření vzorku č. 2, můžeme pozorovat jejich podobný profil. Koeficient emisivity vyhodnocený z kamery s bolometrickým detektorem, je oproti kameře s fotonovým detektorem, výrazně stabilnější v závislosti na emisivitě. Při tomto měření se propad hodnoty emisivity v oblasti nad 750°C projevil jen u kamery s fotonovým detektorem.

4.4.4 Měření 4

Tabulka 12: Vyhodnocená data ze čtvrtého měření

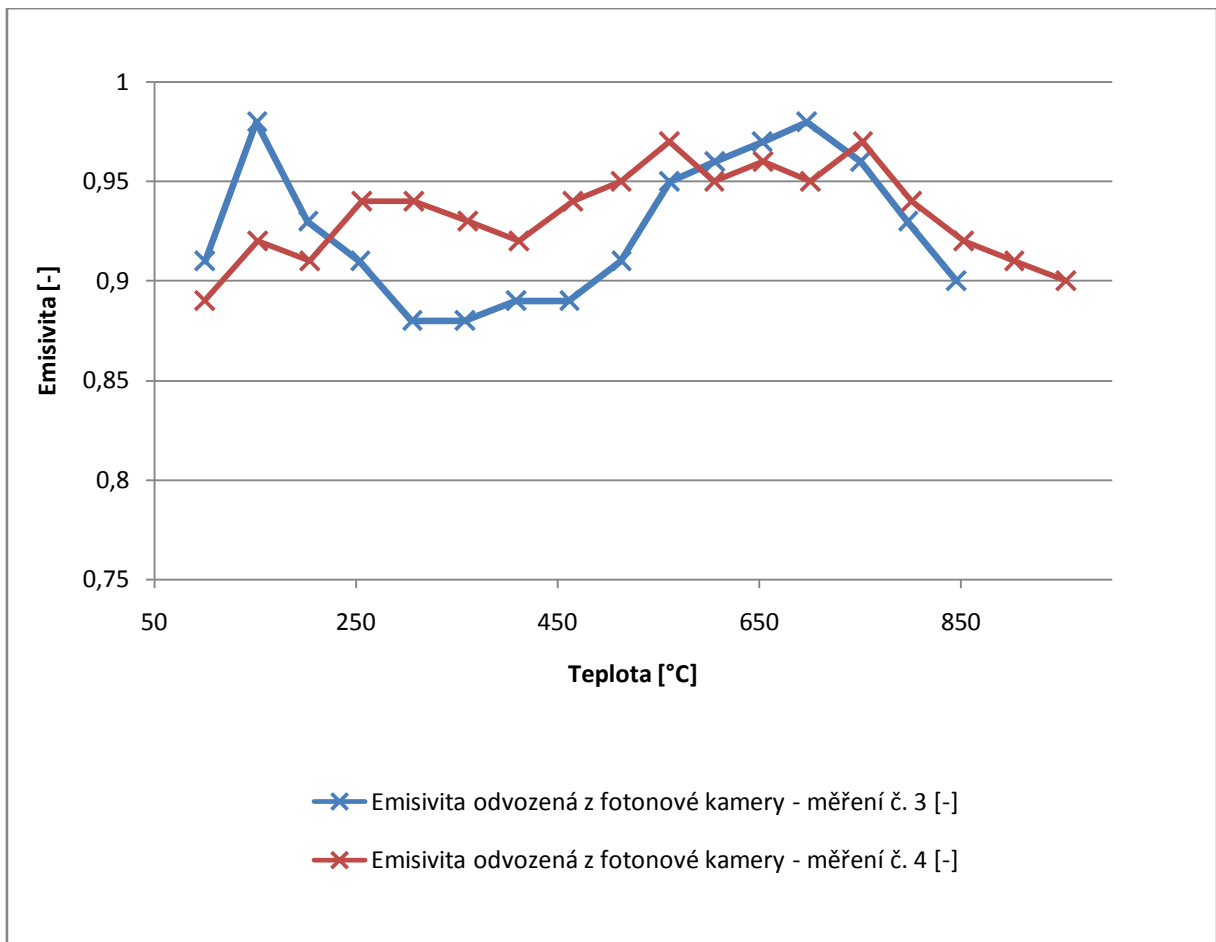
Hodnoty z bodu D			
Čas	Teplota vyhodnocená termočlánkem [°C]	Emisivita odvozená z bolometrické kamery [-]	Emisivita odvozená z fotonové kamery [-]
0:00:00	954,5	0,97	0,9
0:00:13	902,5	0,98	0,91
0:00:26	853,2	0,98	0,92
0:00:42	801,7	0,97	0,94
0:01:01	752,3	0,96	0,97
0:01:37	701,4	0,96	0,95
0:02:34	654,1	0,97	0,96
0:03:28	604,9	0,97	0,95
0:04:13	561,1	0,98	0,97
0:05:11	513,3	0,97	0,95
0:06:12	465,3	0,97	0,94
0:07:34	411,6	0,97	0,92
0:09:14	361,2	0,96	0,93
0:11:27	307,5	0,97	0,94
0:14:12	256,1	0,97	0,94
0:18:13	204,4	0,98	0,91
0:24:31	152,7	0,98	0,92
0:34:54	100,2	0,98	0,89

Vyhodnocení opakovaného měření druhého vzorku



Graf 3: Porovnání opakovaného měření vzorku kamerou s bolometrickým detektorem

Při opakovaném měření zkušební vzorku č. 2 a následném vyhodnocení emisivity pomocí kamery s bolometrickým detektorem můžeme pozorovat ustálení průběhu a mírný posun směrem k vyšším hodnotám. Tuto skutečnost připisují opětovnému zahřátí zkušební vzorku a překrytí staré vrstvy okují z prvního měření.



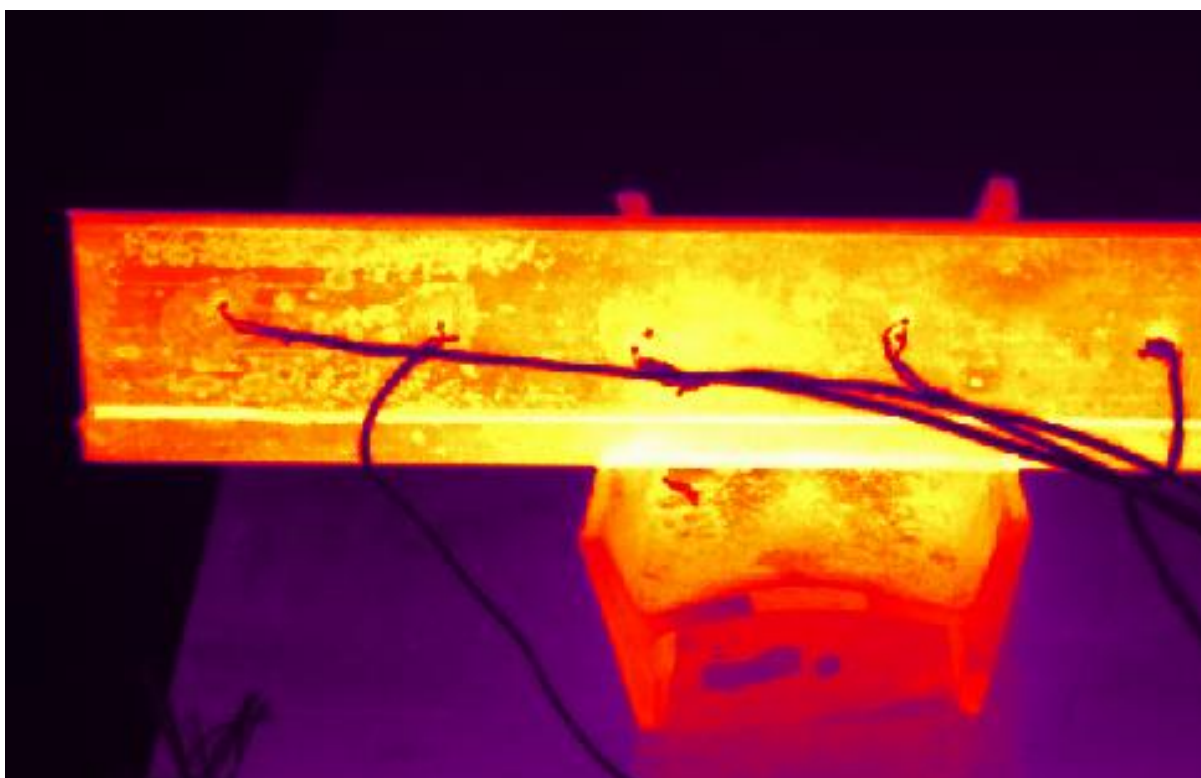
Graf 4: Porovnání opakovaného měření vzorku kamerou s fotonovým detektorem

Při vyhodnocení kamerou s fotonovým detektorem je možné pozorovat mírné vyhlazení křivky průběhu emisivity, ale rozmezí maximálních a minimálních hodnot zůstává přibližně stejné.

4.5 Diskuze

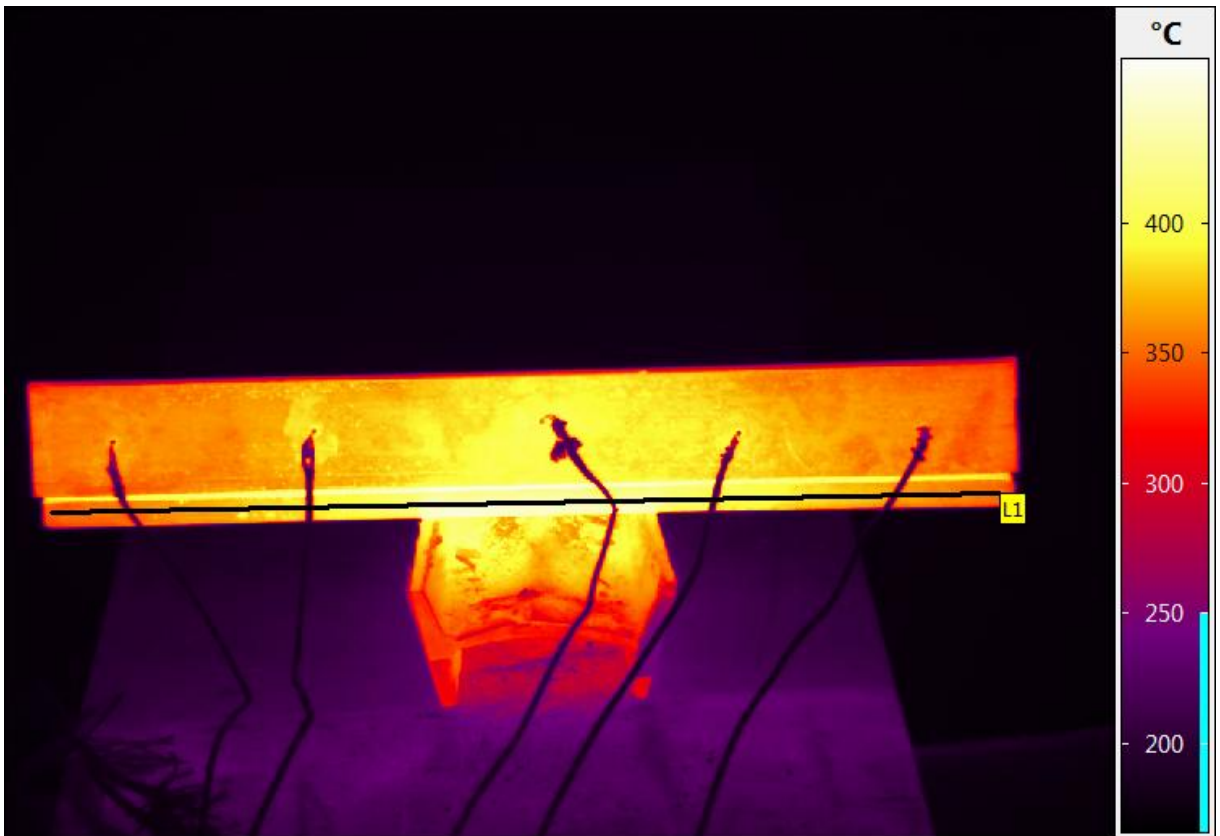
Z vyhodnocených dat vyplývá, že kromě teplotní závislosti emisivity, do měření teploty výrazně promlouvají děje, probíhající na povrchu. Nejzásadnější změnou je růst sekundárních okují. V zásadě lze konstatovat, že pro jednotlivé systémy nebyla vyhodnocena emisivita materiálu vzorku, v tomto případě ocel EN S235JR, ale emisivita okují vznikajících při ohřevu materiálu v propan-butanové peci a následném chladnutí v atmosféře. Další problematickou částí je závislost teploty okuje na povrchu a materiálu pod ním. V průběhu měření se na některých vzorcích začaly

objevovat odlupující se bubliny viz obrázek 23. Tím může být ovlivněna přesnost měření protože tyto bubliny jsou jasně pozorovatelné i na termogramu (obr.26). Pokud bychom chtěli provést měření samotného povrchu materiálu a ne na jeho povrchu vznikajících okujích, bylo by nutné experiment opakovat v prostředí s řízenou atmosférou (například dusíku). Tuto atmosféru by bylo nezbytné udržovat po celou dobu ohřívání i chladnutí a měřený objekt snímat termokamerou skrz vhodné infračervené okno.

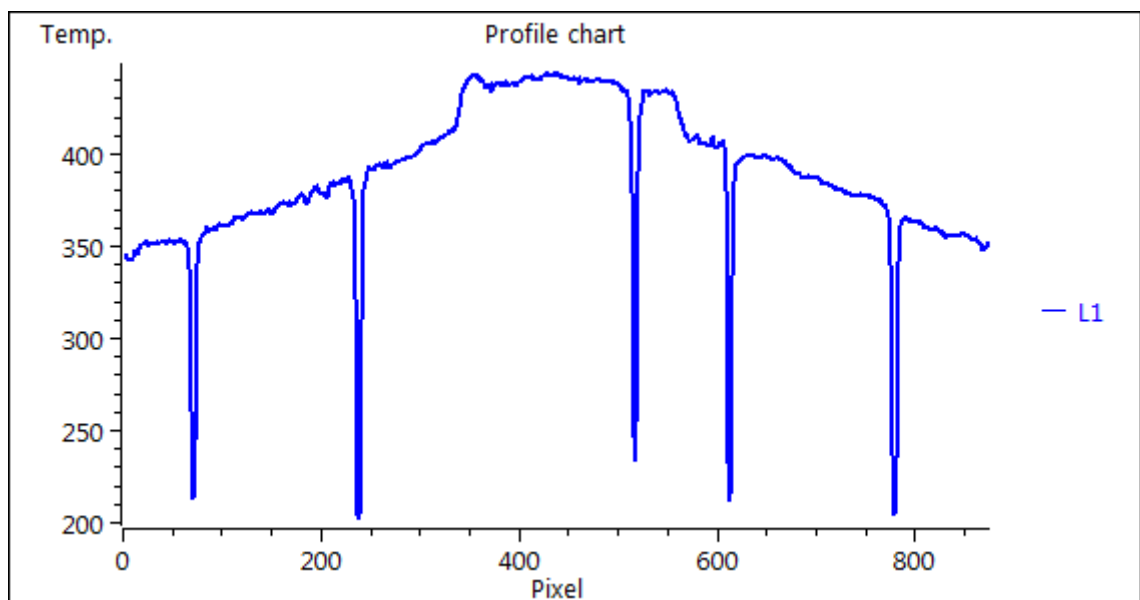


Obrázek 26: Odlupující se vrstva okují

V průběhu měření se projevilo očekávané nesouměrné chladnutí vzorku. Průběh teploty vyjadřuje graf teploty (obr. 28) vytvořený vložením měřicí funkce ve tvaru přímky do termogramu (obr. 27). V grafu se nachází 5 výrazných propadů teploty, které jsou způsobeny překrytím měřeného objektu vedením termočlánků. Celé rozložení teploty je dobře viditelné i pouhým porozváním teplotní mapy interpretované barevnou paletou.



Obrázek 27: Termogram s měřicí funkcí



Obrázek 28: Graf průběhu teploty v celé délce měřeného objektu

5 Ekonomické zhodnocení

Při dnešních trendech výroby se klade velký důraz na snížení nákladů a s tím spojené pokročilé řízení jakosti. Osazením výrobní linky termokamerou pro kontinuální monitoring polotovaru mezi pec a tvářecí stroj, lze velice efektivně odhalit špatně prohřáté, nebo naopak přehřáté polotovary. Informace o polotovaru s teplotou mimo nastavené rozmezí mohou být zobrazeny na ovládacím panelu přístroje pro upozornění obsluhy, nebo použity k automatickému řízení teploty v peci. Dá se takto velice pružně reagovat na změny vnějších podmínek při ohřevu, například teplota materiálu před vstupem do pece, nebo okolní teplota v hale.

Požizovací cena termografického systému závisí na konkrétní aplikaci. Parametry ovlivňující cenu jsou především: typ detektoru, rozlišení detektoru, teplotní rozsah, teplotní citlivost, přesnost, komunikační rozhraní a objektiv. Špičková termokamera s bolometrickým snímačem pro automatizaci s parametry: rozlišení detektoru 640x480px, teplotním rozsahem -40°C až 1 500°C, citlivostí ≥ 30 mK, přesností $\pm 1.5\text{K}/\pm 1.5\%$, komunikačním rozhraním GigE, s objektivem se zorným úhlem 30° stojí okolo 600 000 Kč bez DPH. V této ceně nejsou zahrnuty další náklady spojené s instalací a implementací do výrobního systému. Například ochranný kryt do prašného prostředí s aktivním chlazením a automatickým čištěním optiky, konzola pro připevnění, počítač pro zpracování obrazu, software pro vyhodnocení (pokud není nabízen spolu s kamerou) a přizpůsobení stávajícího systému pro příjem dat z termokamery. Po započítání všech položek cena bez problému atakuje 1 mil. Kč bez DPH.

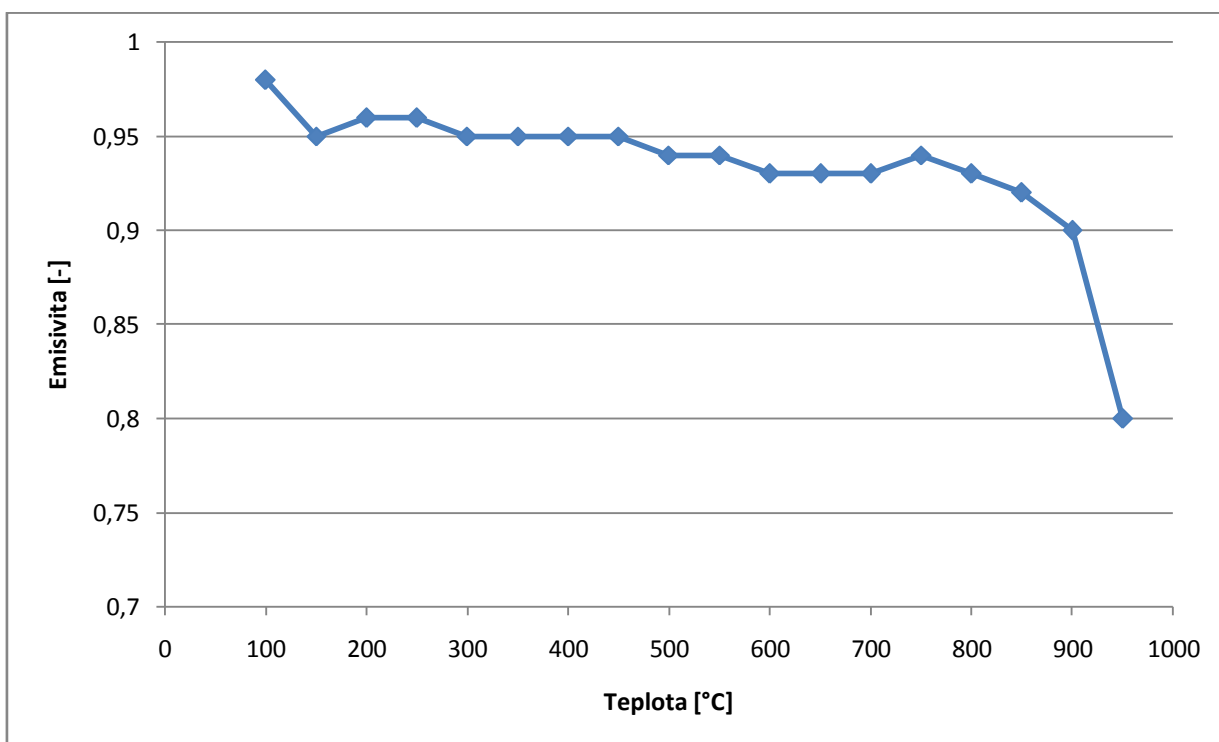
Pokud by bylo nutné použít termokameru s fotonovým detektorem je jen samotná pořizovací cena přístroje se srovnatelnými parametry o cca 200% vyšší. Další položkou je pravidelná údržba tohoto systému. Tato kamera obsahuje jako mechanickou součást Stirlingův chladič s omezenou životností (viz. kapitola 3.4.1) přibližně 20 000 hodin. Při nepřetržitém provozu, tedy 24 hodin denně, 7 dní v týdnu a 365 dní v roce je nutné přibližně každé 2 roky chladič vyměnit.

Obecně tedy nelze vyhodnotit, kdy se pořízení takového systému vyplatí a kdy ne. Je nutné vždy provést konkrétní kalkulaci pro daný případ v závislosti na zmetkovitosti, ceně a požadované jakosti výrobků.

6 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo popsat specifika bezkontaktního měření v oblasti strojírenské technologie. Za tím to účelem byl navržen a zrealizován experiment spočívající v zahřátí zkušební vzorku a následném měření teploty termočlánky a záznamu dat dvěma termografickými kamerami při jeho chladnutí. Následně byly vyhodnoceny hodnoty emisivity pro obě kamery.

Pro co nej přesnější bezkontaktní měření teploty, v oblasti strojírenské technologie je nutné znát nejen vlastnosti povrchu snímaného materiálu, atmosféry mezi měřeným objektem a termokamerou, ale také teplotní závislost emisivity a především chemické procesy probíhající na povrchu snímaného vzorku. Jedná se především o procesy růstu okují, které jsou detailněji popsány v kapitole 4.4.1. Tyto procesy jsou silně ovlivněny prostředím, v kterém se objekt nachází a není možné je popsat obecně.

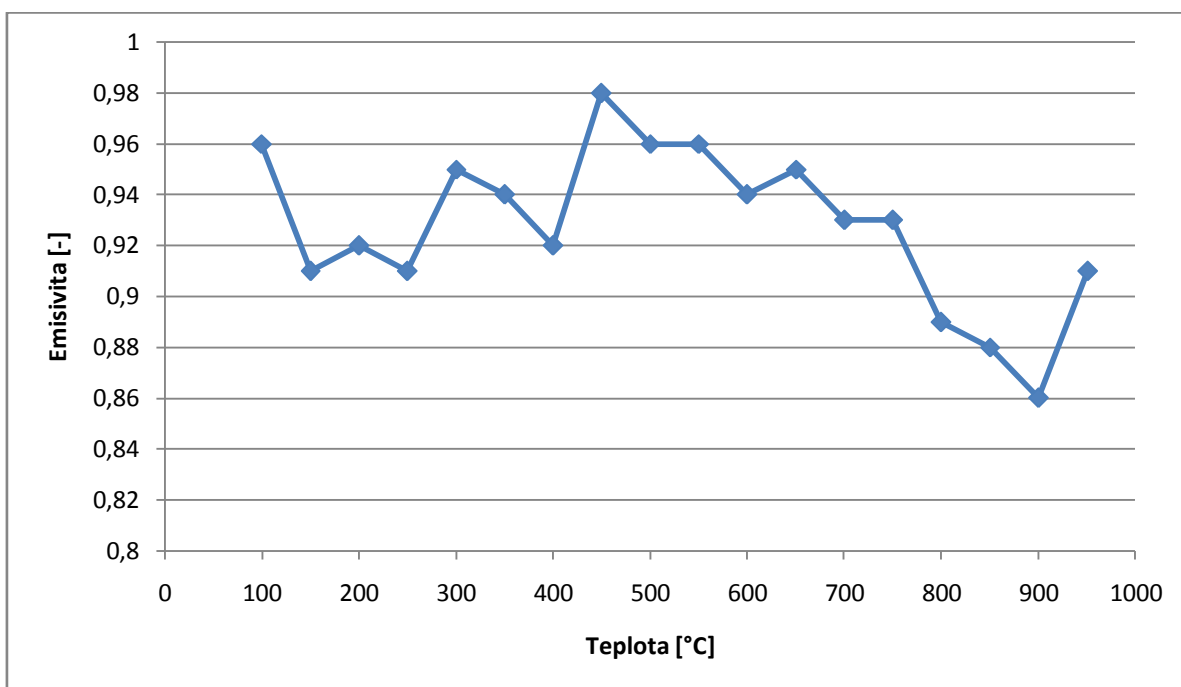


Graf 5: Vyhodnocená emisivita pro termokameru s bolometrickým detektorem

V kapitole 4.4.1 je uvedeno, že růst sekundárních okují probíhá již v peci. Při experimentu trvalo přibližně 5 - 10s než byl vzorek materiálu umístěn na pracovní desku. V té době již začaly na povrchu vznikat okuje sekundární. Z toho vyplývá že při

tomto měření nebyla zjištěna emisivita oceli S235JR, ale emisivita oxidů vzniklých na povrchu při zahřátí v plynové peci a postupném chladnutí v atmosféře.

Dle výsledků jsou na oxidické děje probíhající na povrchu materiálu za vysokých teplot mnohem více citlivě termokamery s fotonovými detektory.



Graf 6: Vyhodnocená emisivita pro termokameru s fotonovým detektorem

Při porovnání grafů č. 5 a 6 se jeví jako výhodnější využití termokamery v bolometrickém (tepelným detektorem) oproti termokameře s fotonovým detektorem z důvodu menšího kolísání hodnoty emisivity v průběhu měření. I z ekonomického hlediska (viz. kapitola 5) je v průmyslové aplikaci v tomto případě vhodnější volit termokameru bolometrickou ať už z důvodu nižších pořizovacích nákladů i nákladů na údržbu.

Použitá literatura

- [1] PEŤKOVÁ, Viera a Jiří SVOBODA. *Termodiagnostika*. Košice: VIENALA, 2016. ISBN 978-80-8126-132-9.
- [2] *Opto therm thermal imaging* [online]. [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: <https://www.optotherm.com>
- [3] VAVŘIČKA, Roman. Termovizní zobrazovací systémy. *Vytápění, větrání, instalace*. 2004, (3), 120 - 124. ISSN 1210-1389.
- [3] *The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals*. Rev 12/12. FLIR Systems, 2012.
- [4] SVOBODA, Jiří. *Termodiagnostika: Učební texty*. Praha, 2012.
- [5] HRABOVSKÝ, Jozef. *Kvantifikace mechanismů hydraulického odstranění okují*. Brno, 2012. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Jaroslav Horský, CSc.
- [6] *User's manual FLIR Ex series*. FLIR Systems, 2017.
- [7] KLEPÁRNÍK, Jan. *Termočlánky: WEB - podpora výuky* [online]. [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: http://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn_tcl.htm
- [8] *Tepelné záření. Záření absolutně černého tělesa* [online]. Praha, 2007 [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <http://alma.karlov.mff.cuni.cz/ufy102/Planckuv%20zakon.pdf>. Učební text k přednášce UFY102. Univerzita Karlova, Matematicko-fyzikální fakulta.
- [9] *IR camera VarioCAM HD research 900 series | InfraTec* [online]. [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: <https://www.infratec-infrared.com/thermography/infrared-camera/variocam-hd-research-900/>
- [10] *ImageIR 8300hp - TMV SS* [online]. [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: <https://www.tmvss.cz/vyrobci/infratec/imageir-8300hp>
- [11] *Přehled vlastností oceli S235J2G3* [online]. [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s235jrdrive-s235jrg2>
- [12] *LabIR® barvy pro termovizní měření* [online]. [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: <https://paints.labir.cz>
- [13] *ThermaSpray* [online]. [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: <https://www.tmvss.cz/vyrobci/tmv-ss/thermaspray>

- [14] *ThermaSpot* [online]. [cit. 2018-12-20]. Dostupné z:
<https://www.tmvss.cz/vyrobci/tmv-ss/thermaspot>
- [15] *Termoelektrické snímače teploty* [online]. [cit. 2018-12-20]. Dostupné z:
<http://www.technotrend.cz/stranky/teorie/teorie2.htm>
- [16] *Černé těleso* [online]. [cit. 2018-12-20]. Dostupné z:
http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/13_act/13_act_soubory/image004.jpg
- [17] *Mavis Nový Bor - měřící, regulační a kalibrační technika: Termočláňkové snímače teploty* [online]. [cit. 2018-10-15]. Dostupné z: <http://www.mavis.cz/>
- [18] *Thermal Camera purchasing* [online]. [cit. 2018-12-20]. Dostupné z:
<https://www.eevblog.com/forum/thermal-imaging/thermal-camera-purchasing-the-perils-of-buying-a-cooled-camera/?action=dlattach;attach=159065;image>
- [19] *Uncooled microbolometer - 384 X 288 FPA* [online]. [cit. 2018-12-20]. Dostupné z:
<https://www.ino.ca/en/products/uncooled-microbolometer-384-x-288-fpa/>

Seznam tabulek

Tabulka 1: Měřicí rozsahy termočlánků [7]	4
Tabulka 2: Tabulka emisivit vybraných materiálů [6]	15
Tabulka 3: Technické parametry VarioCAM [9]	21
Tabulka 4: Parametry objektivu VarioCAM [9]	22
Tabulka 5: Technické parametry ImageIR [9]	22
Tabulka 6: Parametry objektivu ImageIR [9]	23
Tabulka 7: Chemické složení materiálu [11]	27
Tabulka 8: Mechanické vlastnosti materiálu [11]	27
Tabulka 9: Parametry pro vyhodnocení	33
Tabulka 10: Vyhodnocená data z prvního měření	34
Tabulka 11: Vyhodnocená data z třetího měření	37
Tabulka 12: Vyhodnocená data ze čtvrtého měření	39

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma zapojení termočlánekového spoje [7]	5
Obrázek 2: Elektromagnetické spektrum [4]	7
Obrázek 3: Schematické znázornění černého tělesa [16]	7
Obrázek 4: Závislost intenzity vyzařování $M(\lambda)$ na vlnových délkách při různých teplotách [3].....	10
Obrázek 5: Wienův posunovací zákon [8].....	11
Obrázek 6: Intenzita vyzařování černého tělesa [8]	12
Obrázek 7: Produkty pro usnadnění IČ měření [13] [14] [15]	17
Obrázek 8: Pixely bolometrického detektoru[19]	18
Obrázek 9: Stirlingův chladič [18].....	19
Obrázek 10: VarioCAM HD 900 [9].....	21
Obrázek 11: ImageIR 8320 [10]	22
Obrázek 12: Technický list termočlánekového vedení [17]	24
Obrázek 13: Navařovací zařízení BT-2.....	25
Obrázek 14: Měřicí ústředna	26
Obrázek 15: Plynová pec	26
Obrázek 16: Tlaková lahev s Propan-Butanem	26
Obrázek 17: Zkušební vzorky.....	28
Obrázek 18: Připevněné termočlánky.....	29
Obrázek 19: Schéma umístění termočláneků	29
Obrázek 20: Záznam dat z termokamer	30
Obrázek 21: Vyhodnocovací software IRBIS professional	31
Obrázek 22: Termogram z měření s polohami bodů pro vyhodnocení	32
Obrázek 23: Materiál před zahřátím, rovnoměrné okujení, odlupující se okuje.....	32
Obrázek 24: Termogram vyhodnocení zdánlivé odražené teploty	33
Obrázek 25: Chemické složení vrstvy okují[5]	36
Obrázek 26: Odlupující se vrstva okují	42
Obrázek 27: Termogram s měřicí funkcí	43

Obrázek 28: Graf průběhu teploty v celé délce měřeného objektu43

Seznam grafů

Graf 1: Porovnání emisivity kamery s bolometrickým a fotonovým detektorem v bodě D - měření 1.....	35
Graf 2: Porovnání emisivity kamery s bolometrickým a fotonovým detektorem v bodě D - měření 2.....	38
Graf 3: Porovnání opakovaného měření vzorku kamerou s bolometrickým detektorem	40
Graf 4: Porovnání opakovaného měření vzorku kamerou s fotonovým detektorem ..	41
Graf 5: Vyhodnocená emisivita pro termokameru s bolometrickým detektorem	46
Graf 6: Vyhodnocená emisivita pro termokameru s fotonovým detektorem.....	47