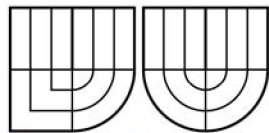




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ POVRCHOVÝCH TEPLOT VE STROJÍRENSTVÍ

**CONTACTLESS MEASUREMENT OF SURFACE TEMPERATURES IN MECHANICAL
ENGINEERING**

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAKUB GORČICA

VEDOUČÍ PRÁCE
SUPERVISOR
BRNO 2009

Ing. ALEŠ POLZER, Ph.D.

**SEM VLOŽTE
ZADÁNÍ**

Licenční smlouva

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na teorii bezdotykového měření povrchových teplot pomocí termovizní kamery Flir SC2000 a na principy na jejichž základě kamera zpracovává sledovaný obraz. V praktické části jsou zpracovány tabulky a aplikace v programovacím jazyce Visual Basic usnadňující práci s kamerou. Dále je sestaveno a popsáno pracoviště pro přesné zjišťování emisivity a jsou experimentálně zjištěny emisivity různých materiálů a povrchů fréz.

Klíčová slova

Infračervené záření, termovize, měření teploty, zjišťování emisivity

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on the theory of contactless measurement of surface temperatures with thermovision camera Flir SC2000 and on the principles of imaging the camera is based on. The tablets and the applications making work with camera easier are processed in the Visual Basic in practical part. The stand for fine taking emissivity is compiled and described, and emissivity of different materials and different milling cutters is taken in this diploma thesis.

Key words

Infrared radiation, thermovision, measurement of temperature, taking emissivity

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

GORČICA, Jakub. *Název: Bezdotykové měření teplot ve strojírenství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 72 s., 10 příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Bezdotykové měření teplot ve strojírenství** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum: 29.5.2009

.....
Bc. Jakub Gorčica

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Aleši Polzerovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	9
1 Historie a současnost.....	10
2 Teplota a teplo.....	11
2.1 Přenos tepla.....	12
2.1.1 Přenos tepla vedením.....	12
2.1.2 Přenos tepla prouděním.....	14
2.1.3 Přenos tepla zářením.....	15
3 Infračervené záření.....	16
3.1 Chování IR záření v prostředí.....	18
3.2 Koncepce absolutně černého tělesa (AČT).....	20
3.3 Emisivita.....	21
4 Proces zobrazování termovizní kamerou.....	23
4.1 Konstrukce infrazobrazovacích systémů.....	24
Skenování obrazu.....	25
4.2 Detektory.....	26
4.2.1 Bolometry.....	27
4.2.2 Mikrobolometry.....	28
4.2.3 Mikrobolometrické mozaikové pole.....	29
4.3 Optická soustava.....	29
4.3.1 Objektiv infrakamery.....	30
4.3.2 Clonění.....	31
5 Metodika měření s termovizní kamerou Flir SC2000.....	32
5.1 Zjištění emisivity.....	32
5.1.1 Pomocí tabulek.....	32
5.1.2 Pomocí termoelektrického článku.....	33
5.1.3 Pomocí referenční – porovnávací emisivity.....	33
5.2 Vzdálenost.....	34
Zjištění potřebné vzdálenosti mezi měřeným objektem a objektivem.....	34
5.3 Teplota okolí.....	37
5.4 Relativní vlhkost.....	38
6 Šablona pro opakovaná měření.....	39
7 Programy pro práci s termogramy.....	40
7.1 ThermaCAM Researcher™.....	40
7.2 ThermaCAM Reporter.....	40
7.3 ThermaCAM Explorer.....	41
7.4 Report Viewer.....	41
7.5 Report Database.....	41
8 Výhody a nevýhody měření s termovizní kamerou Flir SC2000.....	42
8.1 Výhody.....	42
8.2 Nevýhody.....	43
9 Použité vybavení při vypracování experimentů.....	44
9.1 Termovizní kamera Flir SC2000.....	44

9.2 Barva ThermaSpray 800.....	45
9.3 Silikonová pasta.....	45
9.4 Měřidla ovlivňujících parametrů měření.....	46
10 Pracoviště pro přesné zjišťování emisivity.....	47
10.1 Termokamera.....	48
10.2 Ochranná clona termokamery.....	48
10.3 Trubka.....	48
10.3.2 Chyba vzniklá odrazem teploty.....	49
10.4 Zdroj tepla.....	50
10.5 Těleso vedoucí teplo.....	50
10.6 Experimentální vzorek.....	53
10.6.1 Ovlivnění vzorku.....	54
10.6.2 Oblast měření.....	56
10.7 Zarážka.....	57
10.8 Odstíněný termogram.....	57
10.9 Přípravek na měření emisivity fréz.....	59
Vkládání nástroje.....	60
11 Výsledky měření.....	62
Emisivita materiálů.....	62
Emisivita povlaků fréz.....	63
Diskuse.....	65
Závěr.....	66
Seznam použitých zdrojů.....	68
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	70
Seznam příloh.....	71

ÚVOD

Bezdotykové měření povrchových teplot je velmi jednoduchý, rychlý a přesný způsob měření teploty, který je využíván v různých odvětvích lidské činnosti. Avšak pro správné a přesné stanovení měřené veličiny, dosažení co největší přesnosti, využití všech předností, které tato technika nabízí, je potřebné znát alespoň základní fyzikální zákony a principy, na kterých je tento způsob měření založen. Tato diplomová práce shrnuje danou problematiku tak, aby se nový uživatel této techniky dokázal orientovat v základních pojmech a zásadách správného měření.

Nejdůležitějším parametrem ovlivňujícím přesné získání teploty měřeného objektu je hodnota emisivity povrchu materiálu. Hodnoty emisivity různých materiálů jsou snadno zjistitelné z tabulek emisivit. Avšak je-li zapotřebí zcela přesné zjištění povrchové teploty objektu, je třeba tyto hodnoty považovat pouze za hodnoty orientační, vzhledem k faktu, že hodnoty obsažené v tabulkách jsou mnohdy zjištěny za odlišných podmínek, než za jakých je prováděno konkrétní měření. Z tohoto důvodu je v diplomové práci sestaveno pracoviště pro přesné zjišťování emisivity povrchu materiálů a je vypracována metodika práce na tomto pracovišti.

Vlastní proces měření může být sice poměrně rychlý, avšak následné odborné vyhodnocení termogramů je mnohdy velice komplikované. Na trhu je k dostání množství programů a aplikací k vyhodnocování termogramů, archivaci dat a tvorbě protokolů o měření. Jejich cenová náročnost je ovšem značná, proto se část této diplomové práce zabývá zjednodušením tvorby protokolů o měření a jejich automatizací.

1 HISTORIE A SOUČASNOST

Anglický vědec Sir Isaac Newton (1642-1727)¹ v roce 1666 separoval elektromagnetickou energii slunečního záření přes skleněný hranol, kterým ji rozložil na základní barvy duhy, čímž položil základy pro objevení energií mimo viditelné spektrum. Na tyto výzkumy navázal britský astronom William Frederic Herschel (1738–1822)¹, který v roce 1800 objevil infračervené záření. W.F.Herschel použil stejně jako Newton hranol pro rozložení slunečního světla na spektrum. Poté pomocí přesného teploměru zjistil, že rtuť nevystoupá nejvýše v oblasti záření nejjasnějších barev, ale až za oblastí červeného světla tam, kde lidské oko nic nevidí. Správně usoudil, že objevil novou oblast neviditelného záření a dle zjištěných účinků jej nazval tepelným zářením. Jeho syn John Herschel (1792–1871)¹ pak zavedl pojem termogram, což je obraz povrchového teplotního reliéfu. Pojem infračervené záření se objevil až koncem 19. století, kdy pánové Planck, Stefan, Boltzmann, Wien a Kirchhoff dále definovali elektromagnetické spektrum sepsáním rovnic, kterými přesně identifikovali Infračervené záření.

V roce 1931 byly na trh zavedeny první komerčně využitelné radiační termometry, které nachází své využití dodnes, zejména pro nízkoteplotní aplikace¹⁸. Velký rozvoj doznala infračervená technika za druhé světové války, kdy byly vyvinuty první naváděcí systémy raket a systémy pro noční vidění. V roce 1965 byl firmou AGA IR Systems (nyní společnost Flir Systems Inc.), představen první komerčně využívaný zobrazovač infračerveného záření.¹⁴

V dnešní době našly systémy infračerveného bezdotykového měření teplot velmi široké využití v průmyslu i laboratořích. Používají se u materiálů horkých, pohybujících se, nedostupných kvůli nebezpečnému prostředí nebo tam, kde hrozí poškození, poškrábání či roztržení materiálu dotykovými teploměry. Průmyslově se používají ve výrobě, údržbě a kontrole kvality, pomáhají snížit energetické nároky, zvýšit produktivitu a zlepšit kvalitu výrobků. Najdou uplatnění v lékařském, chemickém, potravinářském průmyslu, ve strojírenství, stavebnictví, armádě a jsou taktéž rozšířeny v ekologických a meteorologických aplikacích.

2 TEPLOTA A TEPLLO

Teplota je základní fyzikální veličina soustavy SI. Její hlavní jednotka je Kelvin (K) a vedlejší jednotkou je stupeň Celsia (°C). Nejnižší možnou teplotou je teplota absolutní nuly (0 K = -273,15 °C). Teplotu kteréhokoli objektu je možno změřit množstvím metod a prostředků a ve své podstatě nám říká, kterým směrem poteče tepelný tok mezi dvěma objekty.¹

Tepllo je energie přenesená mezi systémem a jeho okolím při teplotním rozdílu mezi nimi. V soustavě SI jej měříme v Joulech (J). Další jednotkou jsou například kalorie (cal, 1 cal = 4,168 J).¹

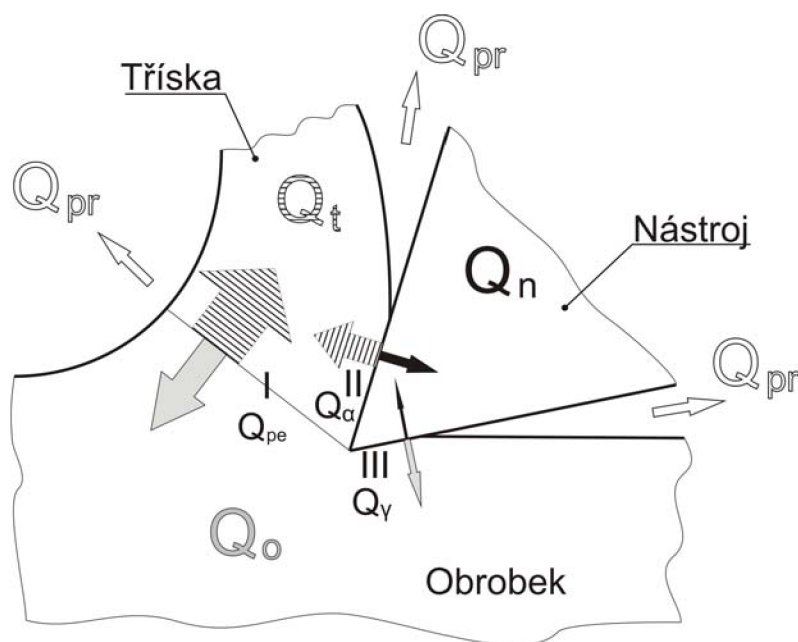
Při obrábění je prakticky veškerá mechanická energie, přivedená pro tvorbu třísky, přeměněna na energii tepelnou (95–98%). Zbývající část energie je uložena jako zbytková energie v třískách. Množství vzniklého tepla závisí na podmínkách deformace a tření při obrábění.²

Při obrábění vzniká teplo ve třech oblastech. Je to v oblasti primární plastické deformace (I), v oblasti sekundární plastické deformace (II) a v oblasti III (Obr 2.1). Vzniklé teplo je odváděno z řezného procesu čtyřmi činiteli. Je to třískou, nástrojem, obrobkem a řezným prostředím. Na základě předpokladu, že teplo přivedené a odvedené musí být v rovnováze, lze sestavit rovnici tepelné bilance řezného procesu v následujícím tvaru:

Rovnice tepelné bilance¹⁶:

$$Q_{pe} + Q_{\gamma} + Q_{\alpha} = Q_t + Q_n + Q_o + Q_{pr} \quad (2.1)$$

kde Q_{pe} je teplo vzniklé v důsledku plastických a elastických deformací, Q_{γ} je teplo vzniklé v důsledku tření mezi čelem nástroje a třískou, Q_{α} je teplo vzniklé v důsledku tření hlavního hřbetu nástroje o přechodovou plochu na obrobku, Q_t je teplo odvedené třískou, Q_n je teplo odvedené nástrojem, Q_o je teplo odvedené obrobkem a Q_{pr} je teplo odvedené prostředím.¹⁶



Obr. 2.1 Vznik a odvod tepla při obrábění

2.1 Přenos tepla

K přenosu tepla dochází třemi různými typy dějů. Je to vedení (kondukce), proudění (konvekce) a záření (radiace). Veškeré teplo je přenášeno jedním z těchto typů přenosu, obvykle pak ale kombinací dvou nebo všech tří typů přenosu zároveň.³ Problém termovizní kamery Flir SC2000, jakožto i celá problematika infračervené termografie je pochopitelně nejvíce spjat s radičním přenosem tepla, ale abychom dokonale pochopili význam a metodiku měření termovizní kamerou, jakožto i samotné infračervené záření, je třeba pochopit všechny tři druhy přenosu tepla.

2.1.1 Přenos tepla vedením

Přenos tepla vedením se uplatňuje nejen u pevných látek, ale taktéž u kapalin a plynů. Vedení tepla umožňuje nejintenzivnější přenos tepelné energie. Nutnou podmínkou k přenosu tepla vedením je existence spojitého látkového prostředí. Ve vakuu přenos tepla vedením tedy není možný.³

Mohou nastat dva druhy vedení. Vedení ustálené a neustálené. Vedení ustálené nastává v případě, kdy se teplotní rozdíl mezi jednotlivými částmi tělesa v čase nemění. Vedení neustálené nastává, když se teplotní rozdíly

mezi jednotlivými částmi tělesa, mezi kterými se teplo přenáší, postupně vyrovnávají.³

Vedení tepla u pevných látek probíhá oscilací (kmitáním) částic kolem své rovnovážné polohy, čímž vyvolávají oscilaci i u svých sousedních částic. Přirozený směr tepelného toku je vždy z místa s vyšší teplotou do místa s teplotou nižší, o čemž pojednává druhá věta termodynamiky. K tomuto jevu dochází proto, že částice s vyšší teplotou kmitají intenzivněji než částice s nižší, a tudíž předávají přebytek své kinetické energie pomalejším částicím a tím je ohřívají.³

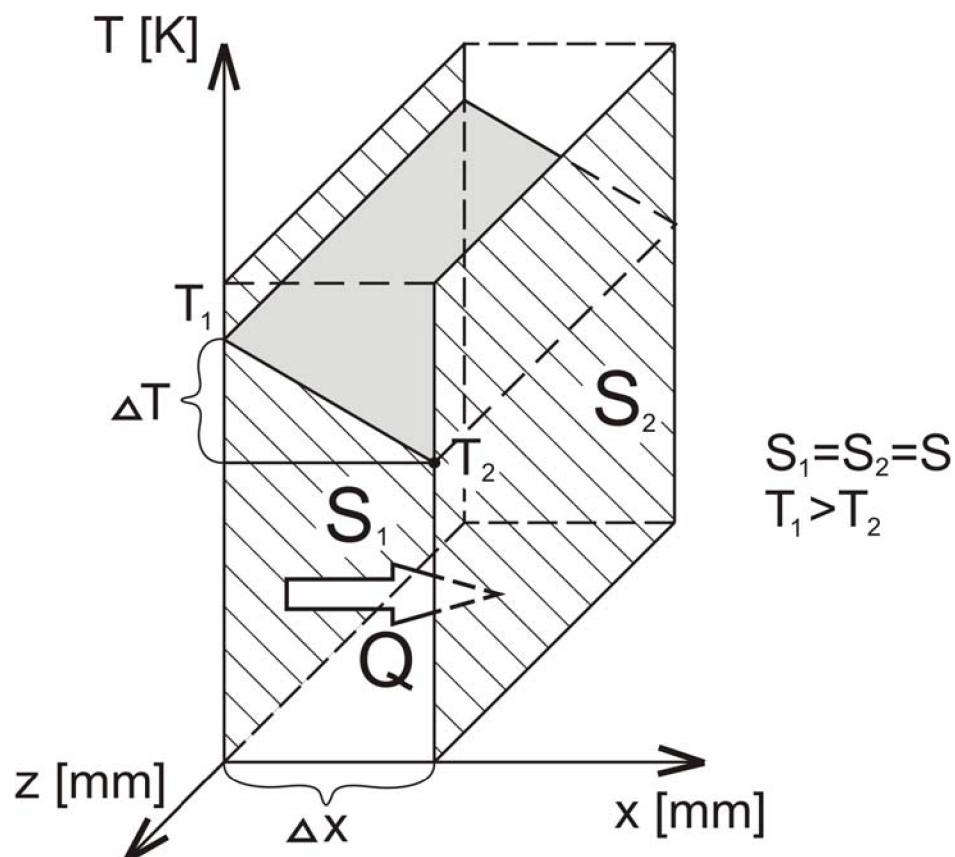
Vedení tepla u kapalin rovněž probíhá kmitáním částic kolem svých rovnovážných poloh, ale po jistém počtu kmitů změni své polohy na nové, aby provedly další skupinu oscilací. Následkem těchto pohybů jsou schopny mezi sebou přenášet kinetickou energii a tímto se navzájem tepelně ovlivňovat.³

Vedení tepla u plynných fází probíhá nejjednodušeji, protože částice plynu se pohybují svobodně a nezávisle na ostatních, přičemž tento chaotický pohyb vede ke vzájemným srážkám částic a tím k přenosu kinetické energie, což je vedení tepla.³

Vedení tepla popisuje První Fourierův zákon vedení tepla (tepelný tok), který ukazuje, že teplo Q přenesené médiem včleněným mezi dvě rovnoběžné tuhé desky je úměrné ploše desek $S_{1,2}$, jejich teplotnímu rozdílu ΔT a době t , ale nepřímo úměrné vzdálenosti desek Δx . Schopnost media vést teplo je kvantifikována součinitelem teplotní vodivosti ξ , který je materiálovou konstantou (Obr. 2.2).³

První Fourierův zákon vedení tepla:³

$$Q = \xi \cdot S \frac{\Delta T \cdot t}{\Delta x} \quad (2.2)$$



Obr. 2.2 První Fourierův zákon vedení tepla

2.1.2 Přenos tepla prouděním

Přenos tepla prouděním nastává tehdy, když částice mění v prostoru svou polohu ve větším měřítku. Nutnou podmínkou je existence látkového prostředí, tudíž ve vakuu proudění nenastane. Tento děj nastává pouze v plynech a kapalinách. Podle důvodu pohybu částic rozeznáváme dva typy proudění. Je to volné a nucené proudění.⁴

Při volném proudění vzniká pohyb v důsledku různých hustot kapalin či plynů, které se vyrovnávají. Různé hustoty přitom nastávají vlivem nestejných teplot v objemu kapalin či plynů.⁴

Při nuceném proudění na kapalinu či plyn působí vnější vlivy (čerpadlo, ventilátor). V technické praxi je toto proudění využíváno k zesílení přenosu tepla. Nucené proudění může nastat i proti teplotnímu spádu, tudíž prouděním lze i chladit.⁴

2.1.3 Přenos tepla zářením

Přenos tepla zářením na rozdíl od předchozích dvou mechanismů přenosu tepla nepotřebuje pro své fungování látkové prostředí. Jelikož je tepelné záření elektromagnetické, je schopno se šířit i ve zcela vzduchoprázdném prostoru. Takto se dostává teplo ze Slunce na Zemi a tímto způsobem lze také vytápět pomocí infrazářičů, či tepelně zpracovávat jídlo.⁴

Jak již bylo naznačeno v předchozím textu, infračervené záření je nejvíce spjato s přenosem tepla zářením, proto veškerá problematika vztahující se k záření bude podrobně vysvětlena v následujících kapitolách.

3 INFRAČERVENÉ ZÁŘENÍ

Energie elektromagnetických oscilátorů (objektů, u nichž dochází k periodickým změnám velikosti elektrické intenzity a magnetické indukce, např. kmitající dipól) se může šířit prostorem jako elektromagnetické záření. Toto záření má tzv. duální charakter. Za určitých podmínek se projevuje jako látka („fotony“: částicový – korpuskulární charakter), za jiných jako vlnění (vlnový charakter).⁴

Základní charakteristikou elektromagnetického záření je vlnová délka λ a frekvence f . Elektromagnetickému záření, které má vlnový charakter, lze přiřadit frekvenci záření f , a to dle vztahu:

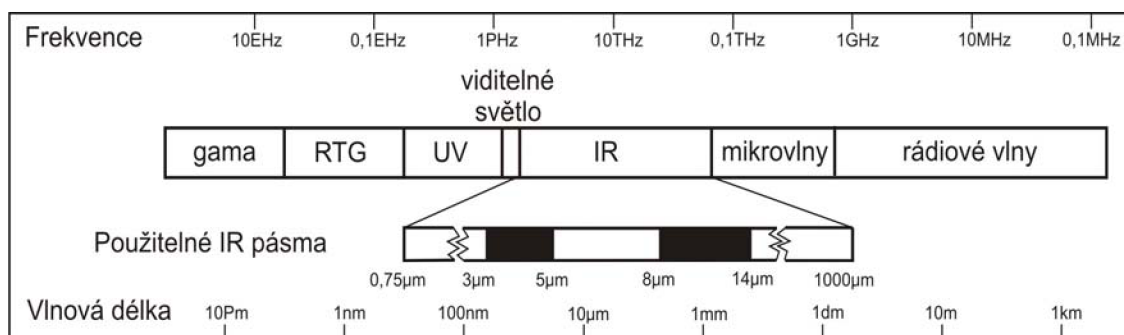
Frekvence záření:²

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (3.1)$$

kde c je rychlost šíření elektromagnetického záření v daném prostředí. Vlnění se ve vakuu šíří rychlostí světla, tj. $c = 299792458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \approx 3\cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.²

Seřazením vlnových délek záření vydávaného určitým zdrojem a zjištěním intenzity záření na jednotlivých vlnových délkách, dostaneme tzv. elektromagnetické spektrum. Infračervené záření je část elektromagnetického záření ve spektrálním intervalu 0,75–1000 μm vlnové délky (Obr. 3.1).¹⁸

Infračervené záření (dále jen IR záření), je světlo, které není kvůli jeho příliš velké vlnové délce (0,75 –1000 μm) viditelné pro lidské oko. Je to část elektromagnetického spektra, kterého si člověk všímá jako teplo. Na rozdíl od viditelného světla, v infračerveném světě, vše co má teplotu nad absolutní nulou ($T = 0 \text{ K} = -273,15 \text{ }^\circ\text{C}$), emituje teplo. Původem IR záření jsou změny elektromagnetického pole vyvolané pohybem molekul. Pohyb molekul je způsoben vnitřní energií – závisí na teplotě. Čím vyšší teplotu objekty mají, tím více IR záření emitují. Pomocí IR záření se šíří teplo a to i vakuem. Nejlepším příkladem je zahřívání povrchu Země slunečním zářením.¹²



Obr. 3.1 Elektromagnetické spektrum

Velikost, směr a spektrální složení zářivého toku závisí na vlastnostech a teplotě zdroje záření. Pro pevnou fázi hmoty se infračervené záření generuje jako spojité spektrum a pro plynnou fázi hmoty se generuje jako spektrum čárové (atomární) a pásmové (molekulární). Při zvýšení teploty stoupá rychle celková energie zářivého toku a generované spektrum se obohacuje o kratší vlnové délky.⁶

Z uvedeného vyplývá, že IR záření je jakýmsi energetickým pozadím, které vždy a všude vyplňuje každý prostor, je tedy přítomna uvnitř i vně každé hmoty na zemi.⁶

Jak již bylo zmíněno, IR záření v elektromagnetickém spektru zaujímá interval od 0,75 – 1000 µm vlnové délky. Další rozdělení IR záření je uvedeno v Tab. 3.1. Je třeba mít na paměti, že rozdělení IR záření není normalizováno, a proto je možné se v literatuře setkat i s jinou formulací. Následující rozdělení využívá ve svých systémech společnost FLIR System AB, výrobce termovizní kamery Flir SC2000, která je využita k vypracování této diplomové práce.

Tab.3.1 Rozdělení IR záření dle FLIR System AB:¹⁴

Název	Zkratka	Vlnová délka [µm]
Blízká oblast	NIR	0,8 – 2,0
Krátkovlnná oblast	SWIR	2,0 – 3,0
Střední oblast	MWIR	3,0 – 5,0
Vzdálená oblast	LWIR	5,0 – 15,0
Velmi vzdálená oblast	VLWIR	15,0 – 1000,0

IR záření v oblasti 1 µm je využíván zejména pro nezobrazovací systémy, jako ovladače s krátkým dosahem či detektory pohybu. Ve spektru IR vlnových délek se nachází několik oblastí, které nejsou použitelné u IR

zobrazovacích systému z důvodu absorpce záření atmosférou. Tyto děje jsou způsobovány převážně oxidem uhličitým a vodní párou obsaženou v atmosféře. Proto zůstávají dvě pásma, kde lze IR záření využít pro systémy zobrazovací techniky. Říká se jim „atmosférická okna“ a jsou to oblasti 3 – 5 μm a 8 – 14 μm . (Obr. 3.1). Jak je možno zjistit z křivek vyzařování absolutně černého tělesa, všesměrový zářič nejlépe vyzařuje v pásmu 8 – 14 μm , oproti tomu teplejší objekty (topeniště) nejlépe vyzařují v pásmu 3 – 5 μm . Proto je třeba před nákupem přístroje zvážit, v které oblasti IR záření se budeme pohybovat a které chceme co nejefektivněji měřit. Nicméně je třeba si uvědomit, že většina zářičů emituje IR záření v obou pásmech, tudíž mohou být také v obou pásmech zobrazeny. Je ale pravdou, že objekty při pokojové teplotě emitují nejvíce záření v infračerveném pásmu 8 – 14 μm .¹³ Termokamera Flir SC2000 pracuje v oblasti 7,5 – 13 μm .⁹

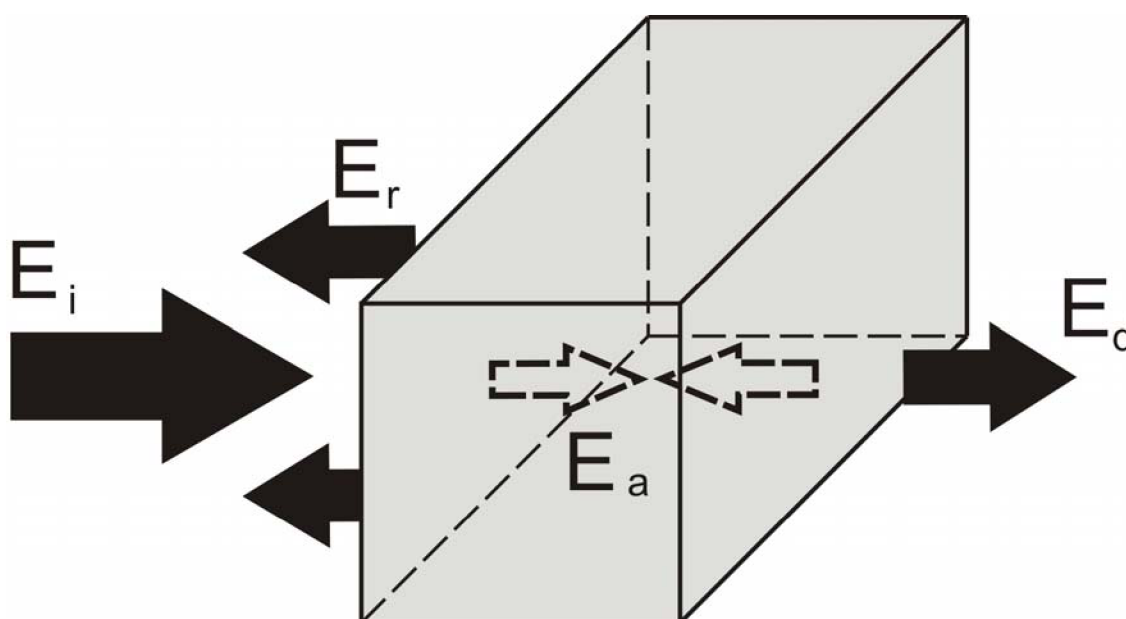
Infračervené záření je generováno třemi typy zdrojů:⁶

- Luminiscenční zdroje
- Rádiové zdroje
- Tepelné zdroje

Generace záření luminiscenčními a rádiovými zdroji podléhá specifickým zákonitostem, které ovšem přímo nesouvisí s naším tématem. Pro účely zobrazování teploty pomocí IR záření jsou relevantní pouze tepelné radiální zdroje, pro které je charakteristické, že generovaná zářivá energie je hrazena z tepelné energie zdroje. Proto pouze jim bude věnována patřičná pozornost.

3.1 Chování IR záření v prostředí

Dopadne-li IR (tepelné) záření na těleso (prostředí), je jeho počáteční energie E_i rozdělena na tři části. Jedna jeho část je odražena E_r , další je absorbována E_a a zbývající tělesem prochází E_d (Obr.3.2). Je třeba si uvědomit, že některé materiály nepropouští IR záření, ale viditelné světlo ano (např. sklo).³



Obr. 3.2 Energetická rovnováha objektu

Rovnice kontaktu IR záření s tělesem:³

$$E_i = E_r + E_a + E_d \Rightarrow 1 = \frac{E_r}{E_i} + \frac{E_a}{E_i} + \frac{E_d}{E_i} \Rightarrow 1 = R + A + D \quad (3.2)$$

Koeficienty **R**, **A** a **D** jsou bezrozměrné a nazývají se odrazivost, absorpce a propustnost. Jejich hodnoty jsou závislé na frekvenci a úhlu dopadu a mění se od nuly k jedné. Těleso s koeficientem **R** = 1 je zrcadlové (bílé) a veškerou energii na něj dopadající odráží. Těleso s koeficientem **A** = 1 se nazývá absolutně černým tělesem a těleso s koeficientem **D** = 1 je diatermní, což znamená že, nedisponuje žádnou energií a nechává všechnu zářivou energii procházet beze změny. V přírodě neexistují tělesa, která by byla absolutně černá, diatermní či bílá, ale koncepce absolutně černého tělesa je těžištěm teorie radiační termometrie.³

Pokud má těleso konstantní teplotu, musí být výkon emitovaného záření roven výkonu záření absorbovaného. V opačném případě se objekt zahřívá (vyzařování je menší než absorpce) nebo ochlazuje (vyzařování je větší než absorpce). Proto pro tělesa s konstantní teplotou platí, že absorpce propouštění a odraz záření jsou v rovnováze.⁴

3.2 Koncepce absolutně černého tělesa (AČT)

AČT je těleso, jehož vlastnosti jsou takové, že pro ně platí:

- $D = 0$
- $R = 0$
- $A = 1$

což znamená, že je to těleso, které veškerý zářivý tok na něj dopadající pohlcuje bez ohledu na vlnovou délku a úhel dopadu, pod kterým je toto těleso ozářeno. Je-li pak AČT zdrojem záření, s ohledem na platnost Kirchhoffova zákona, je ideální absorber také jeho ideálním emitorem. AČT tedy vyzařuje při dané teplotě na všech vlnových délkách maximální energii zářivého toku.⁶

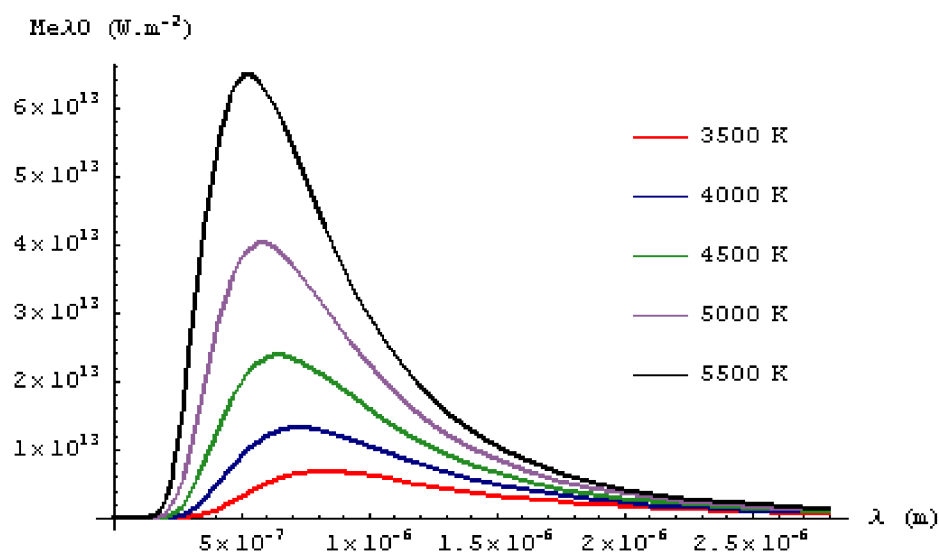
Záření AČT lze matematicky popsat dle Planckova vyzařovacího zákona, který vyjadřuje spektrální intenzitu vyzařování AČT $M_{e\lambda}$ jako funkci vlnové délky λ a absolutní teploty T (Rov. 3.3).

Planckův zákon záření:⁵

$$M_{e\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{\pi}{\left(\exp\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}\right) - 1\right)} \quad (3.3)$$

kde λ [m] je vlnová délka, $c = 299792458$ [m·s⁻¹] je rychlost světla, $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$ [J·K⁻¹] je Boltzmannova konstanta a $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ [J·s] je Planckova konstanta.⁵

Grafické vyjádření Planckova zákona je patrné z grafu 3.1. Jeho fyzikální význam vyjadřuje přeměnu tepelné energie hmoty, která je určena rotačně–vibračními kmity molekul, na energii zářivou na jednotlivých vlnových délkách záření.¹⁰

Graf 3.1 Planckův vyzařovací zákon AČT pro různé teploty¹⁰

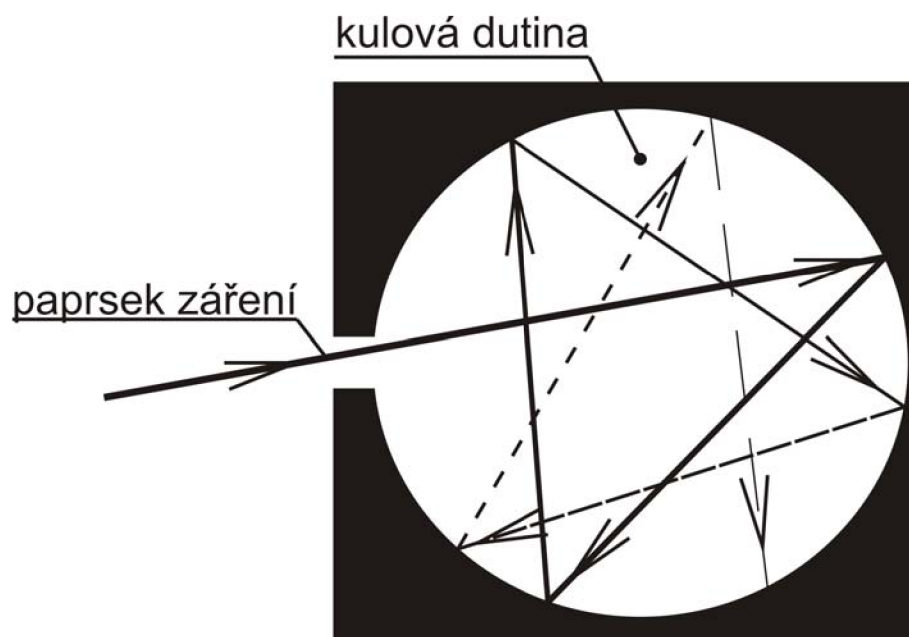
3.3 Emisivita

Jelikož AČT je pouze teoretické těleso a v přírodě se nevyskytuje, byl zaveden pojem emisivita ε , který popisuje schopnosti vyzařování reálného povrchu ve srovnání s vyzařováním AČT. Je to tedy poměr intenzity spektrálního vyzařování obecného tělesa $M_{e\lambda}$, k intenzitě spektrálního vyzařování AČT $M_{e\lambda 0}$ při téže teplotě (Rov. 3.4).⁵

Emisivita:⁵

$$\varepsilon = \frac{M_{e\lambda}}{M_{e\lambda 0}} \quad (3.4)$$

Koeficient emivity ε se mění od 0 pro nezářivé zdroje k 1 pro AČT a je bezrozměrný. Ve skutečnosti se hodnotě $\varepsilon = 1$ dá přiblížit sestrojením kulové dutiny s malým trubkovitým vstupem. Vnitřní část tohoto tvaru bude mít emisivitu 0,998 (Obr. 3.3). Tento princip se používá pro kalibraci termovizních kamer.⁵



Obr. 3.3 Kulová dutina simulující AČT

Různé druhy materiálů a plynů mají různé emisivity, a proto IR záření emitují rozdílnou intenzitou pro danou teplotu. Emisivita materiálů a plynů je dána jejich molekulární stavbou a povrchovými charakteristikami. Barva není hlavní složka, která ovlivňuje emisivitu, není-li z radikálně odlišné látky než je základní materiál. Praktickým příkladem jsou kovové nátěry na bázi hliníku. Většina nátěrů má stejnou emisivitu nehmledě na barvu, ale hliník má velice odlišnou emisivitu, což také ovlivní emisivitu tohoto kovového nátěru.¹⁷

Stejně jako u viditelné části spektra, čím více jsou některé povrchy vyleštěné, tím více IR záření odrazí. Povrchové charakteristiky taktéž ovlivňují emisivitu. Velice podstatné je to u objektů neprůhledných IR záření, které mají velice nízkou vrozenou emisivitu. Čili vysoce leštěný kovový materiál bude mít podstatně nižší emisivitu než materiál s drsným povrchem. Je to proto, že rýhy tvořené obráběním nedovolují IR záření, aby bylo odraženo. Po molekulární struktuře a struktuře povrchu je dalším faktorem ovlivňující emisivitu materiálů a plynů citlivost senzoru z hlediska vlnové délky (spektrální odezva).¹⁷

Emisivita je nejdůležitějším parametrem objektu pro správné vyhodnocení povrchové teploty termovizní kamerou Flir SC2000 a je jedním ze čtyř parametrů (dále jsou to: vzdálenost od měřeného objektu, relativní vlhkost prostředí a teplota okolí), které se zadávají přímo do softwarového rozhraní kamery.¹¹

4 PROCES ZOBRAZOVÁNÍ TERMIVIZNÍ KAMEROU

Způsob registrace termovizního obrazu je v podstatě analogický se způsobem registrace obrazu na film, respektive na CCD prvek digitálního přístroje nebo v lidském oku. Všechny tyto detektory mají společné to, že v obrazové rovině jsou umístěny světlocitlivé elementy, které zaznamenávají obraz. Do ohniskové vzdálenosti se tedy umísťuje registrační plocha detektoru označována jako FPA (*focal plane array*).⁶

Pro vytvoření měřeného obrazu se používají dvě metody zobrazení. Je to aktivní metoda zobrazení, kdy se předpokládá předběžné zahřátí zobrazovaného povrchu, po kterém následuje snímání jeho povrchového teplotního pole pasivním infrazobrazovacím systémem.⁶

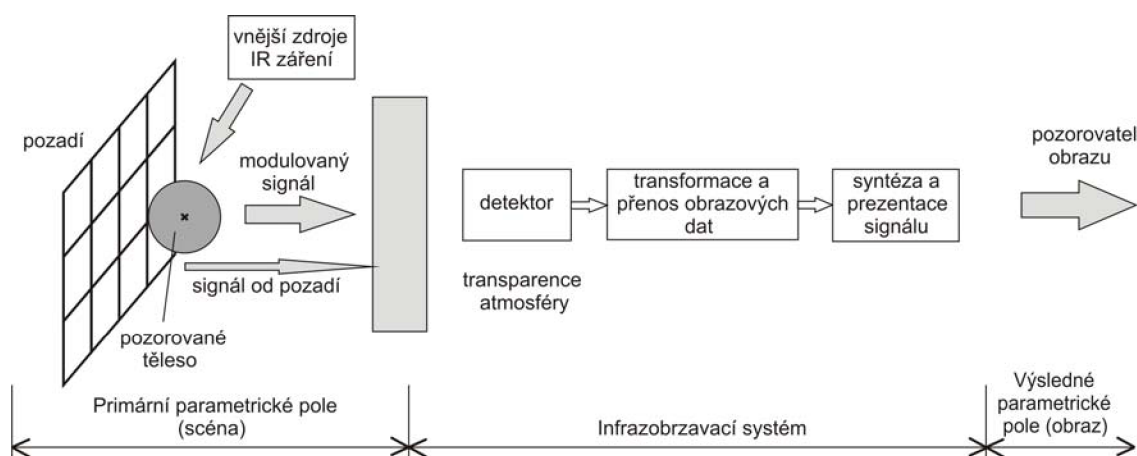
Termovizní kamera Flir SC2000 pracuje v režimu pasivní metody IR zobrazení, kdy se k přenosu informace mezi zobrazovanou scénou a zobrazovacím zařízením využívá vlastního vyzařování snímaného objektu v infračervené části spektra. Využívá se zejména v případě, kdy je vyzařování snímaného objektu vyšší než vyzařování obklopujícího prostředí.⁹

Zobrazovaná scéna se postupně nebo smíšeně snímá pomocí opticko-mechanického skeneru, což je optické zařízení využívající refrakčních (čočkových) či reflexních (zrcadlových) optických prvků, popřípadě jejich kombinaci, a mechanického pohybu k přenosu okamžitého zorného pole detektoru či mozaiky detektorů po vhodné trajektorii.⁶

Pro následné vyhodnocení termogramu je velice důležité si uvědomit, že je jeho povrchový teplotní reliéf i jeho obraz snímané scény ovlivněn řadou vnějších a vnitřních faktorů. To znamená, že radiační tok detekovaný IR zobrazovacím systémem je ovlivněn jednak tokem od vlastního snímaného objektu a jednak tokem od pozadí a vnějších radiačních zdrojů. Situace se navíc komplikuje skutečností, že detekovaný IR zářivý tok je také ovlivňován teplotou a transparentností atmosféry, ochlazováním povrchu objektů, prouděním vzduchu a u obecných zdrojů také směrovostí jejich vyzařování. A navíc teplotní povrchový reliéf je ovlivněn skladbou snímaného objektu a existencí vnitřních zdrojů tepelné energie.⁶

4.1 Konstrukce infrazobrazovacích systémů

Zobrazovaný objekt a jeho okolí vytváří v procesu IR zobrazení primární parametrické pole (Obr. 4.1), jehož vlastnosti se mění v prostoru a v čase. Infrazobrazovacím systémem jsou prostorové souřadnice pole rozloženy na elementární plošky, průměty elementárního detektoru do předmětové roviny a časová souřadnice je rozložena na nejkratší dobu, za kterou je vytvořen jeden snímek.⁶



Obr. 4.1 Obecné schéma procesu zobrazení pomocí IR záření⁶

Rychlost, s jakou dokáže systém transformovat primární parametrické pole na jeho obraz, rozděluje IR systémy na systémy pomalé (méně obrazů za sekundu) a systémy rychlé, pracující v reálném čase. Rychlé systémy jsou také označovány jako systémy FLIR (*Forward Looking Infra-Red*).⁶ Jak nám název napovídá, kamera Flir SC2000 pracuje v systému rychlého zobrazování.⁹

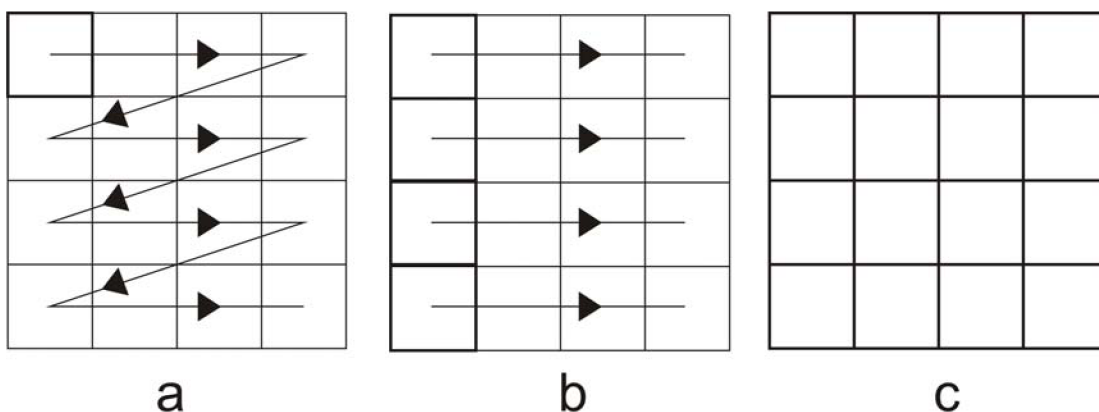
Z hlediska konstrukce infrazobrazovacích systému je možné rozdělení na skenovací a neskenovací systémy. Pro skenovací systémy je charakteristická lineární transformace prostorové souřadnice na časovou pomocí skeneru. Detekční část zobrazovacího systému je tvořena buď jedním elementárním detektorem, jehož zorné pole pomocí skeneru přesouvá přes celé snímané pole (postupné zavádění informace), nebo je tvořena malou mozaikou detektorů a skener přesouvá zorné pole malé mozaiky (smíšené zavádění informace).⁵

Neskenovací systémy pracují s lineární transformací prostorové souřadnice na souřadnici časovou pomocí mutiplexeru řízeného vnitřním hodinovým signálem. V tomto případě je detektor tvořen velkou mozaikou elementárních detektorů, jejichž konfigurace a vlastnosti určují limitní dosažitelné parametry procesu zobrazení.⁵

Skenování obrazu

U současných systémů se vyskytují tři formáty skenování obrazu (Obr. 4.2):¹⁵

- sériový (*serial, single detector scan format*)
- paralelní (*parallel, multiple detector scan format*)
- starring (*starring matrix format*)



Obr. 4.2 Formáty skenování: a–sériový, b–paralelní, c–starring¹⁵

Sériový formát je založený na principu přenášení okamžitého zorného pole elementárního detektoru po vhodné trajektorii pomocí optických členů tak, aby se překrylo celé zorné pole. Tento formát vyžaduje dva optické rozkladové prvky pohybující se v navzájem kolmých směrech (Obr. 4.2.a).¹⁵

Oproti tomu paralelní formát předpokládá dostatečný počet elementárních detektorů malé mozaiky a rozklad scény ve směru kolmém na orientaci mozaiky. Paralelní formát vyžaduje jen jeden optický rozkladový prvek (Obr. 4.2.b).¹⁵

Kamera Flir SC2000 pracuje v režimu formátu *starring*. Tento systém obsahuje velkou mozaiku elementárních detektorů překrývající celé zorné

pole, a kde v optické části IR zobrazovacího systému nejsou přítomny optické rozkladové prvky (Obr. 4.2.c).¹⁵

V procesu skenování se vyskytují tři hlavní typy obrazových chyb, které není možno zcela odstranit, a které se musí při vyhodnocování termogramu zohlednit:¹⁵

- skenovací šum
- stínování
- narcisový jev

Skenovací šum je vázán na interakce mezi skenovacím systémem a zářivým tokem od vnitřních komponent kamery nebo od radiace optických členů.¹⁵

Stínování vytváří pokles jasu scény směrem k okrajům obrazovky. Způsobuje nehomogenitu procesu zobrazení, která je způsobena optickou soustavou radiometru. Pro jeho potlačení se vyžaduje, aby úhel hlavního paprsku v obrazové rovině byl malý.¹⁵

Reflektovaný zářivý tok od ochlazeného detektoru zpět na detektor způsobuje tzv. narcisový jev, který vytváří obrazový artefakt (nehomogenitu).¹⁵

4.2 Detektory

Detektor je zařízení, které transformuje radiační energii na jinou formu měřitelné energie. Využívá k tomu fyzikálních jevů vznikajících při absorpci záření hmotou. Velikost detektoru má vliv na rozlišení snímaného pole, proto se klade důraz na co nejmenší rozměry detektoru.

Detektory se dělí na:⁶

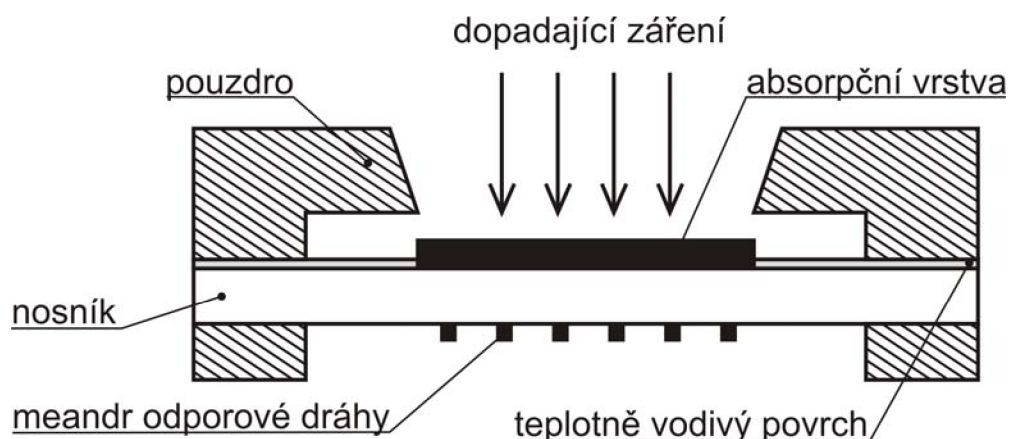
- intrinsické
- extrinsické
- fotokonduktivní
- fotovoltické
- bolometrické
- mikrobolometrické

Kamera Flir SC2000 pracuje na principu mikrobolometrického mozaikového pole, stejně jako většina dnešních kvalitních termokamer. Pro vysvětlení jeho principu je potřeba vysvětlit princip bolometru.

4.2.1 Bolometry

Bolometry pracují na principu pyrometrie, tzn. měření celkového vyzářeného tepelného výkonu prostřednictvím IR záření. Jsou to tepelné detektory konstruované tak, aby vykazovali vlastnosti ATČ. Bolometr pracuje tak, že elektrický odpor bolometru se mění v závislosti na jeho teplotě, která závisí na množství absorbovaného dopadajícího IR záření. Množství dopadajícího IR záření je následně vyhodnoceno ze změn odporu bolometru. Vlastní bolometr musí být tepelně izolován od svého okolí, aby byla změna teploty bolometru úměrná pouze absorbovanému IR záření.¹²

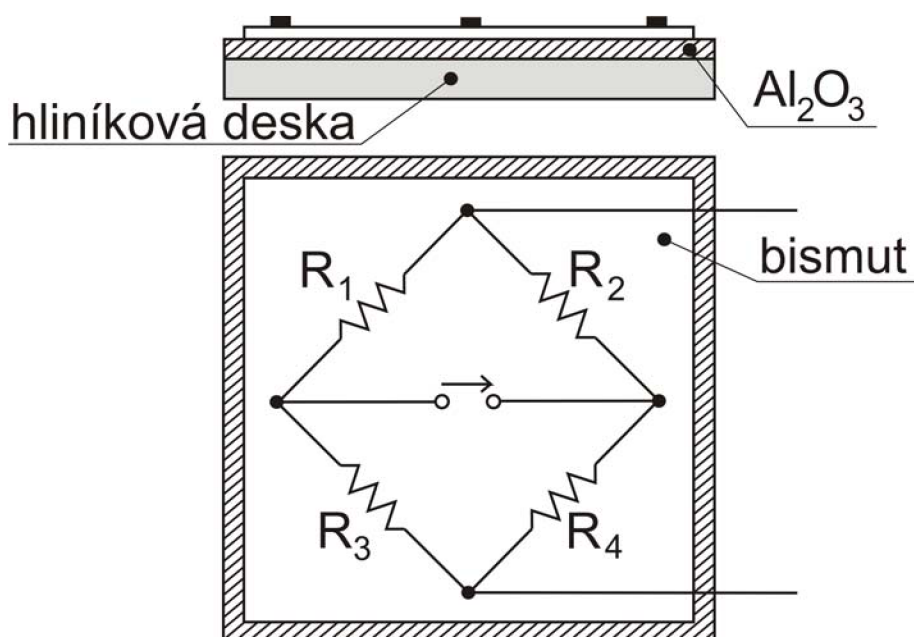
Struktura jednoduchého bolometru je na Obr. 4.3. IR záření dopadá na absorpční vrstvu senzoru tvořenou zlatou fólií, která pohlcuje až 95% záření a ohřívá teplotně vodivý povrch i nosník. Na spodní straně nosníku je napařený meandr odporové dráhy, jejíž odpor se mění lineárně s teplotou.¹²



Obr. 4.3 Provedení jednoduchého bolometru

Dnes již běžnější realizace v integrovaných bolometrech je na Obr. 4.4, kde na hliníkové desce odizolované oxidem hliníku Al_2O_3 , jsou na tepelně vodivé podložce z bismutu napařené odporové dráhy z kysličníků manganu MnO , křemíku MgO či titanu TiO nebo chalkogenidové sklo.⁶

Bolometry jsou obvykle vzájemně propojeny do klasického Wheatstonova můstku se dvěma identickými termistorovými detektory umístěnými vedle sebe na stejné základně. Jeden detektor snímá signálovou radiaci a druhý je kompenzační, který je od signálové radiace odstíněn a kompenzuje vliv teploty okolí na detekci signálu.⁶



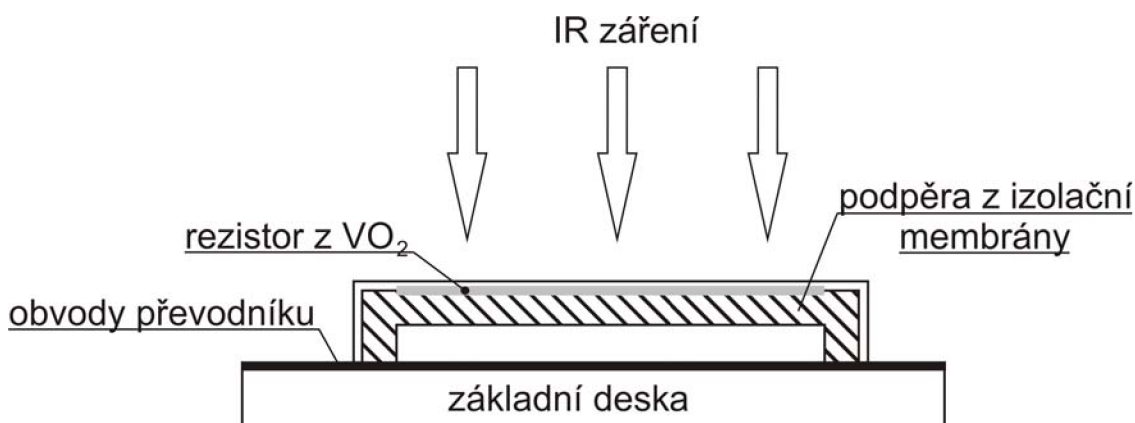
Obr. 4.4 Struktura integrovaného můstku z bolometrů¹²

4.2.2 Mikrobolometry

Využití standardních bolometrických detektorů pro konstrukci rychlých FLIR IR zobrazovacích systémů je znemožněn pro jejich velkou časovou konstantu. Proto byly vyvinuty mikrobolometry, které se vyznačují nižší tepelnou kapacitou (malý objem detekčního elementu – technologií nanášení amorfního filmu se dosahuje velmi malá plocha a tloušťka detektoru < 50 μm .) a malou tepelnou vodivostí.⁶

Minimální hodnoty tepelné vodivosti mezi detekčním elementem a základnou je možné dosáhnout, pokud je ztráta tepla z elementu způsobena jen vyzařováním, nikoliv kondukční složkou šíření tepla. Těchto podmínek je možno docílit pouze za předpokladu, že detektor nemá mechanický styk se základnou a je umístěn ve vakuu. Vzhledem k nutnosti elektrického kontaktu detektoru se čtecím systémem, nelze této situace v praxi

dosáhnout. Avšak zmíněným podmínkám se lze dostatečně přiblížit konstrukcí mikrobolometru s vhodnou podpěrou z izolační membrány umístěným ve vakuu (Obr. 4.5). Pro konstrukci mikrobolometru se používá amorfnní film z VO_2 (Vanadium–Oxid). Dále se využívá amorfnní křemík nebo germánnium.⁶



Obr. 4.5 Princip konstrukce mikrobolometrického detektoru⁶

4.2.3 Mikrobolometrické mozaikové pole

Z mikrobolometrů se obvykle konstruuje mikrobolometrické mozaikové pole, což je paralelní uspořádání mikrobolometrů do velké detekční matice (Obr. 4.6). Toto uspořádání může mít různá rozlišení. Dnes je běžné rozlišení, ve kterém pracuje i kamera Flir SC2000, 320×240 bodů⁹. Celá struktura je tepelně izolovaná od obklopujícího prostředí, teplotně stabilizovaná na teplotu blízkou pokojové teplotě a uzavřena do vakuového pouzdra se vstupním oknem z IR záření průhledného materiálu, např. z germánia. Eliminace vzájemného ovlivňování jednotlivých detektorů je zajištěna tenkou nohou suportu, která tak izoluje každý detekční element od druhého. Eliminace vlivu interní radiace je prováděna automatickým teplotním kompenzačním systémem pomocí přesných senzorů teploty a referenčního tepelného zdroje.⁶

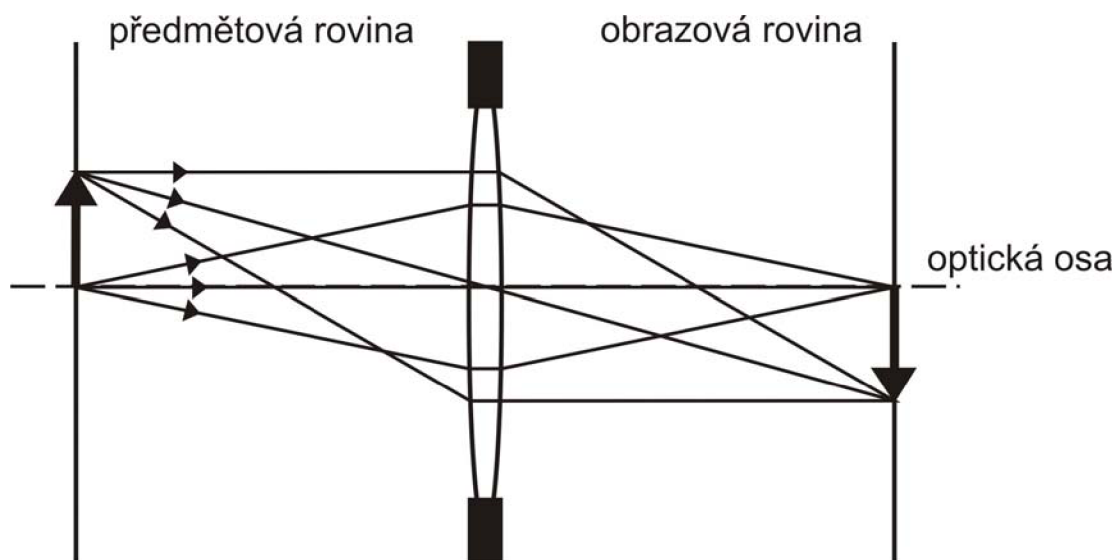
4.3 Optická soustava

Vzhledem k tomu, že pomocí optické soustavy se realizuje průmět předmětové roviny na detektor, optická část systému spolu s vlastnostmi detektoru určují limitní dosažitelné vlastnosti procesu zobrazení.

4.3.1 Objektiv infrakamery

Objektiv infrakamer se skládá z tandemově uspořádaných difrakčních čoček z vhodného transparentního materiálu využitelného pro danou spektrální oblast (např. Si pro $3\ \mu\text{m} - 5\ \mu\text{m}$ nebo Ge, ZnSe či ZnS pro $7,5\ \mu\text{m} - 12\ \mu\text{m}$), navíc pokrytou antireflexní vrstvou. Optické aberace jsou v IR části spektra mnohem hůře korigovatelné než ve viditelné části, proto je konstrukce podmíněna jejich eliminací vhodnou kombinací různých typů čoček (spojek a rozptylek).⁶

Objektiv zobrazuje scénu do obrazové roviny. Vlastní předmět si lze představit jako soubor bodových zdrojů vyzařující signál. Každý tento bod pak vyzařuje signál do všech směrů od povrchu předmětu. Tyto paprsky signálu jsou objektivem soustředěny do odpovídajícího bodu v obrazové rovině (Obr. 4.6).⁶



Obr. 4.6 Princip vytváření obrazu čočkou⁶

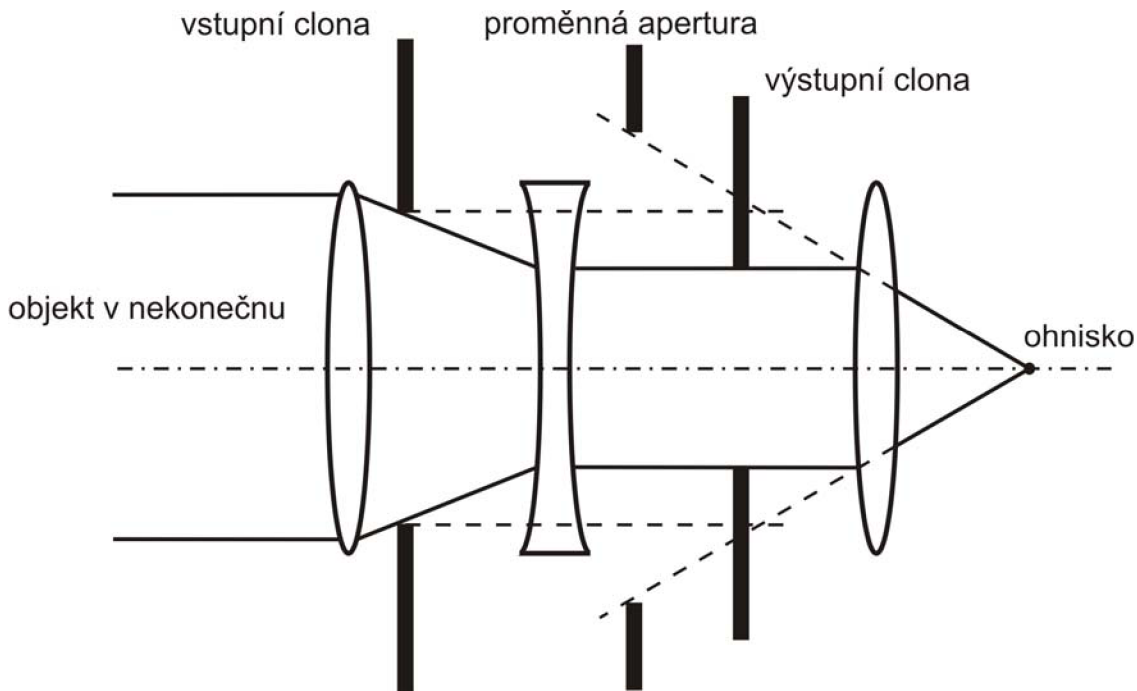
Pro IR zobrazovací systém je spektrální interval cca 10krát větší než pro zobrazovací systémy využívající viditelné světlo. Pro tentýž průměr objektivu je proto mezní prostorová frekvence, tudíž i prostorová rozlišitelnost nižší. Tato skutečnost je dána rozdílností spektrálních intervalů radiačního signálu používaného pro zobrazení (Tab. 4.1).⁶

Tab. 3.1 Srovnání spektrálních intervalů:⁶

Název	Vlnová délka [μm]	Velikost intervalu [μm]
Viditelné spektrum	0,8 – 0,4	0,4
Střední IR oblast (MWIR)	5,0 – 3,0	2,0
Vzdálená IR oblast (LWIR)	12,0 – 8,0	4,0

4.3.2 Clonění

Kvalita procesu zobrazení a také vlastní měření signálové radiace jsou ovlivněny velikostí a umístěním různých apertur v optickém systému. U termovizních kamer se využívají tři typy clon (Obr. 4.8). Vstupní a výstupní clona s neměnnou aperturou definuje využití okrajové paprsky čoček. Clona s proměnnou aperturou umožňuje ovlivnit ozáření detektoru v závislosti na velikosti zářivého toku generovaného ze snímané scény. Volbou clonového čísla se tak přizpůsobuje povolený rozsah změn vlastností detektoru daných jeho převodní charakteristikou rozsahu změn maximální a minimální velikosti zobrazovaného primárního parametru. Dynamika zobrazovaného primárního pole tak určuje teplotní interval zobrazovaný infrakamerou.⁶

Obr. 4.8 Uspořádání clon objektivu IR zobrazovacího systému⁶

5 METODIKA MĚŘENÍ S TERMOVIZNÍ KAMEROU FLIR SC2000

I když vlastní proces měření termovizní kamerou může být poměrně rychlý, jeho následné vyhodnocování bývá obvykle velice komplikované. Proto je velmi důležité určit přesnou metodiku měření pro časté opakování jednotlivých měření.

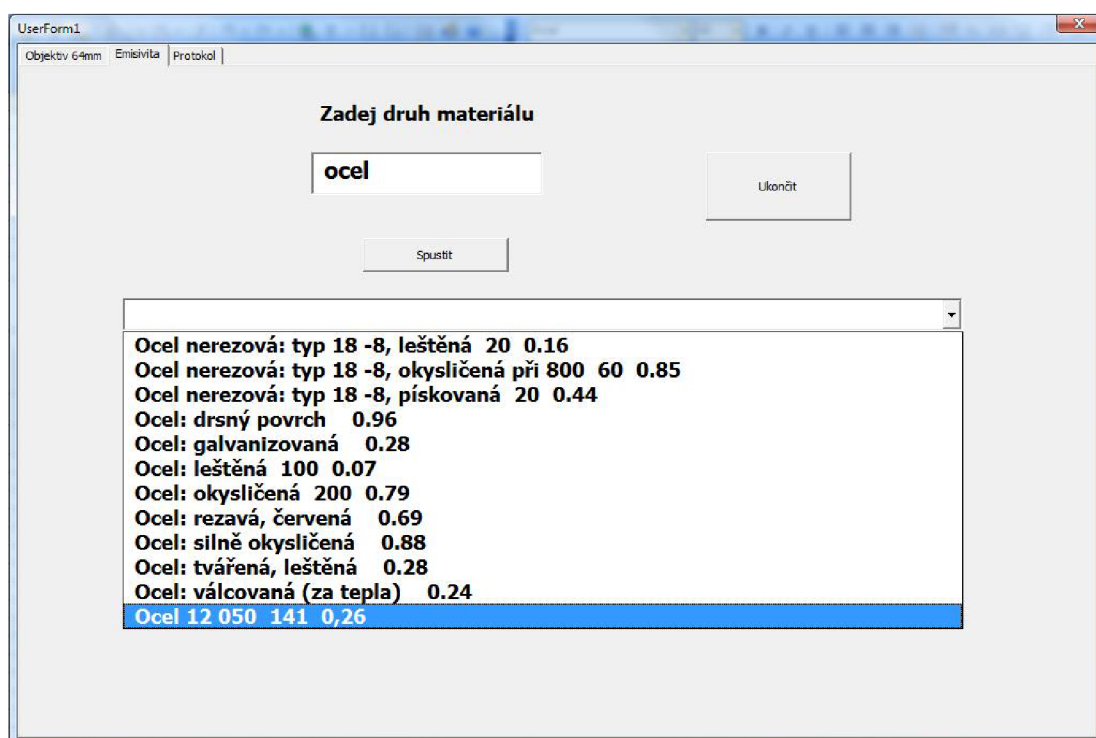
Jak již bylo naznačeno v Kap. 3.3, pro získání přesných výsledků měření je nutno do softwarového rozhraní kamery zadat hodnoty popisující vlastnosti měřeného objektu a vlastnosti prostředí, ve kterém se měření provádí. Jejich význam a způsoby určování jsou popsány v následujících kapitolách.

5.1 Zjištění emisivity

5.1.1 Pomocí tabulek

Zjišťování emisivity pomocí tabulek je snadná a rychlá metoda, ale hodnoty v těchto tabulkách je třeba brát pouze jako reprezentativní, poněvadž emisivita povrchu nepodléhá pouze skladbě materiálu, ale i mnoha jiným aspektům, jako je úprava povrchu, odolnost proti povrchové korozi atd. Proto, pokud je požadováno velmi přesné měření teploty, je třeba se uchýlit k jiným náročnějším metodám.

Tabulka obsahující reprezentativní hodnoty emisivity různých materiálů je v příloze na CD a její vyhledávání je zpracováno v programu Microsoft Office Excel 2003 v programovacím jazyce *Visual Basic for Application* formou interaktivní šablony (Obr.5.1). Ve formuláři je zapotřebí zadat pouze druh materiálu a program následně vyhledá dostupné hodnoty. Databázi lze libovolně rozšiřovat, proto s jejím použitím lze tuto metodu zjišťování emisivity dostatečně zpřesnit.



Obr. 5.1 Elektronická tabulka emisivit

5.1.2 Pomocí termoelektrického článku

Při této metodě je třeba si zvolit porovnávací bod na objektu a změřit si jeho teplotu pomocí termočlánku. Poté upravovat emisivitu v kameře dokud nebude teplota naměřená termoelektrickým článkem a teplota naměřená termokamerou stejná. Nicméně, aby bylo dosaženo dobrých výsledků v určení emisivity, nesmí být teplota takového objektu příliš blízká teplotě okolního prostředí.⁹

5.1.3 Pomocí referenční – porovnávací emisivity

Při této metodě se používají speciální nátěry či lepící pásky, jejichž emisivita je udána od výrobce. Pomocí termokamery se změří teplota nátěru či pásky se zadanou emisivitou. Poté je třeba zaměřit kameru na místo sousedící s nátěrem a měnit emisivitu, dokud termokamera nevyhodnotí na povrchu s neznámou emisivitou stejnou teplotu jako je teplota na povrchu nátěru. Výsledná emisivita odpovídá požadované emisivitě. Nicméně, aby tento postup fungoval, nesmí být teplota měřeného objektu také příliš blízká teplotě okolního prostředí.⁹

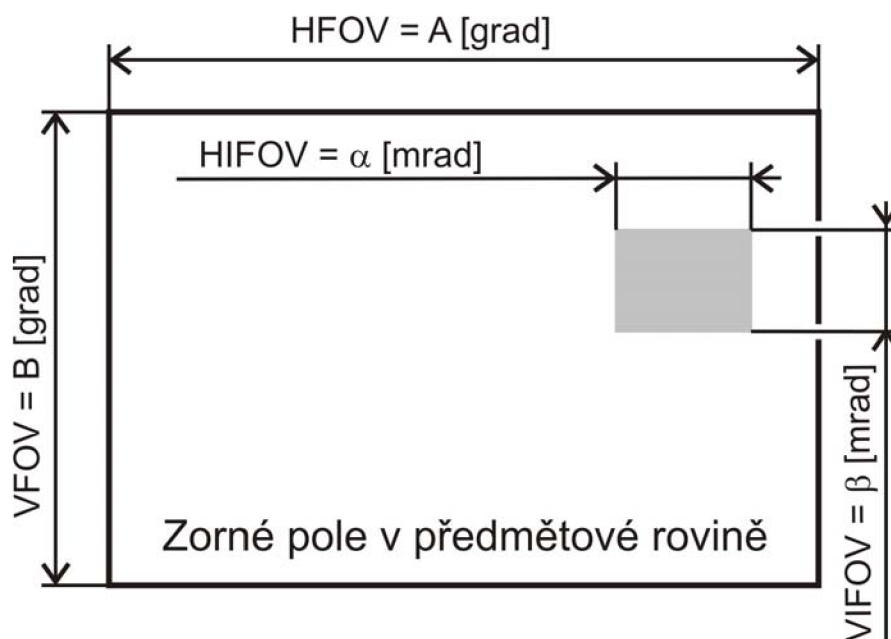
5.2 Vzdálenost

Vzdálenost je vzdálenost mezi měřeným objektem a objektivem. Tohoto parametru se používá pro korekci vlivu způsobeného skutečností, že radiace objektu je částečně pohlcována v atmosféře, která je mezi objektem a kamerou, a že přenos v atmosféře klesá (je utlumován) se vzdáleností.⁹

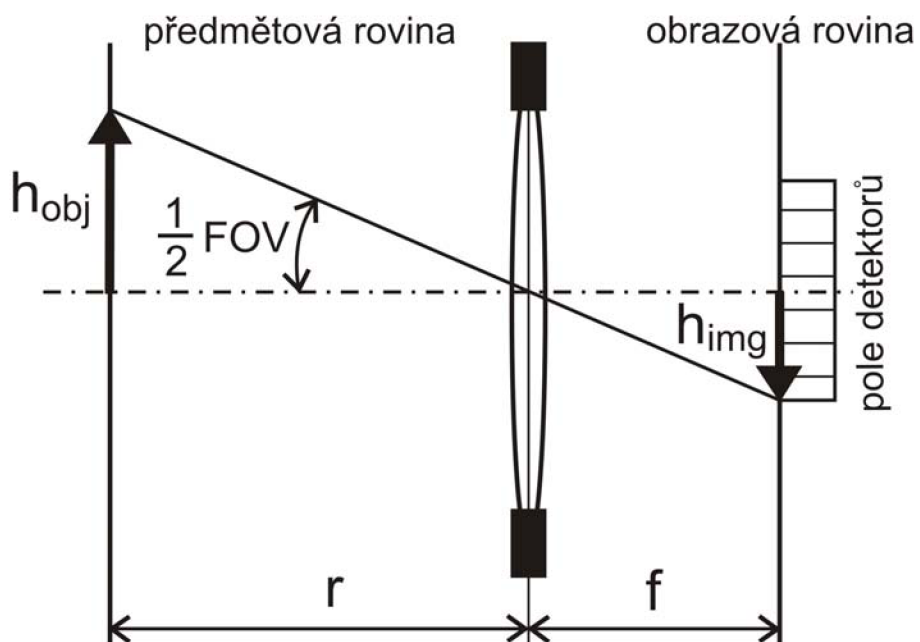
Vzdálenost je ale navíc limitována konstrukcí objektivu, zejména jeho minimální a maximální fokusací (schopností zaostřit na určitou vzdálenost). Např. vestavěný 24° objektiv kamery Flir SC2000 má minimální zaostřovací schopnost ve vzdálenosti 0,5 m⁹ od objektivu a pod tuto hodnotu již není schopen zaostřit. Mimo tyto skutečnosti je třeba vzít v úvahu při stanovování vzdálenosti velikost objektu a rozlišovací schopnosti optického systému. Pro tyto účely byl navržen dokument v programu Visual Basic for Applications, který pracuje v přijatelnějším a více rozšířenějším rozhraní programu Microsoft Office Excel 2003. Tato šablona je umístěna na přiloženém CD a pracuje na základě následující teorie.

Zjištění potřebné vzdálenosti mezi měřeným objektem a objektivem

Úhlové rozměry části předmětové roviny, ze které je snímána informace o primárním parametrickém poli a vytváří se její obraz, určují zorné pole **FOV** (*Field Of View*) IR zobrazovacího systému. Systémy FLIR mají obvykle pravoúhlé zorné pole **A = HFOV** [grad] (*Horizontal Field Of View*) v azimutu a **B = VFOV** [grad] (*Vertical Field Of View*) v úhlu (Obr. 5.2). FOV systémy, které využívají mozaiku detektorů, závisí na rozměrech mozaiky a jejím umístění na optické ose systému (Obr.5.3, Rov. 5.1).⁶



Obr. 5.2 Definice základních parametrů primárního parametrického pole

Obr. 5.3 Definice FOV mozaikového detektoru IR zobrazovacího systému⁶

Určení zorného pole FOV:⁶

$$\frac{1}{2} \cdot FOV = \left| \operatorname{tg}^{-1} \cdot \left(\frac{h_{obj}}{r} \right) \right| = \left| \operatorname{tg}^{-1} \cdot \left(\frac{h_{img}}{f} \right) \right| \quad (5.1)$$

Úhlové prostorové rozlišení elementárního detektoru definuje okamžité zorné pole detektoru $\alpha = \mathbf{HIFOV}$ [mrad] (*Horizontal Instantaneous Field Of View*), resp. $\beta = \mathbf{VIFOV}$ [mrad] (*Vertical Instantaneous Field Of View*) (Obr. 5.1). Je-li detektor čtvercový, jako u kamery Flir SC2000, potom $\alpha = \beta = \Phi_{det}$ definuje okamžité zorné pole **IFOV** (*Instantaneous Field Of View*), tedy i velikost předmětové roviny (Obr. 5.3).⁶

Určení okamžitého zorného pole:⁶

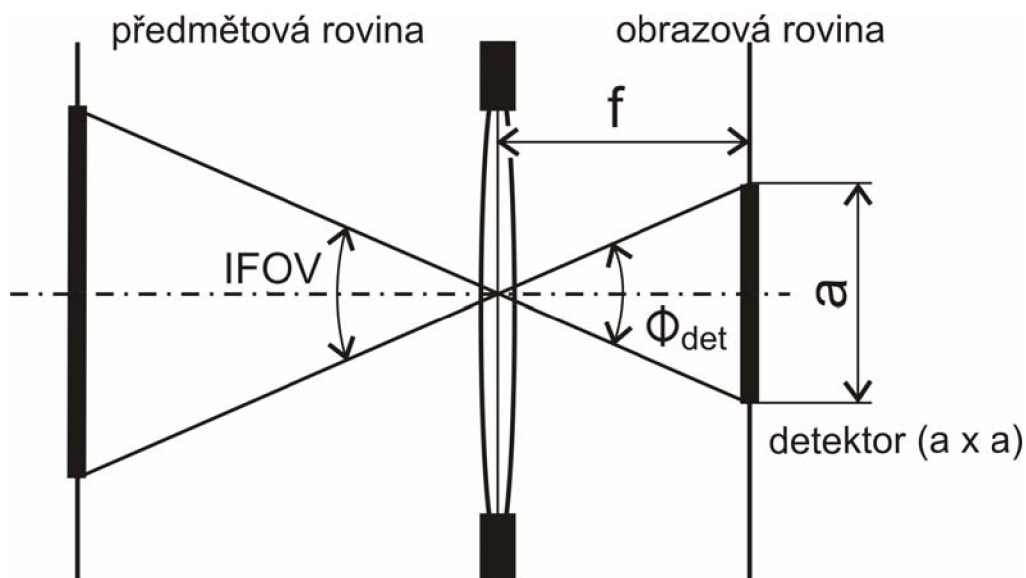
$$\operatorname{tg} \frac{\Phi_{det}}{2} = \frac{0,5 \cdot a}{f} \quad (5.2)$$

Protože je $\Phi_{det} \ll 1$, je $\operatorname{tg} \Phi \approx \Phi$, rovnice (5.2) lze tedy upravit na tvar:

Okamžité zorné pole:⁶

$$IFOV = \Phi_{det} \cong \frac{a}{f} \quad (5.3)$$

Termokamera Flir SC2000 má hodnotu **IFOV** = 1,3 [mrad] udávanou výrobcem, která je použita při výpočtu nejmenšího rozpoznatelného objektu (IFOV_{geo}) a nejmenšího měřitelného objektu (IFOV_{meas}) v šabloně pro zjištění vzdálenosti IR kamery od objektu.



Obr. 5.4 Definice IFOV mozaikového detektoru IR zobrazovacího systému⁶

Nejmenší rozpoznatelný objekt (IFOV_{geo}) odpovídá jednomu pixelu na displeji kamery a závisí na vzdálenosti měřeného objektu k objektivu a na použitém objektivu. Nejmenší měřitelný objekt (IFOV_{meas}), nazývaný též měřicí bod, určuje minimální velikost měřeného objektu (bodu na objektu), který je možno přesně měřit. Při výpočtu IFOV_{meas} se vychází z rovnice (5.4).¹⁹

Nejmenší měřitelný bod:¹⁹

$$IFOV_{meas} \cong 3 \cdot IFOV_{geo} \quad (5.3)$$

Do šablony je zapotřebí zadat pouze výšku **h** v cm a šířku **š** v cm, ostatní parametry (minimální vzdálenost objektivu od měřeného objektu, IFOV_{meas}, IFOV_{geo}, FOV) program dopočte na základě výše uvedených rovnic (Obr. 5.5).

The screenshot shows a software interface titled 'UserForm1' with the following sections:

- Objektiv 64mm | Emisivita | Protokol**
- Rozměry objektu [cm]**:
 - Zadej výšku objektu: 40
 - Zadej šířku objektu: 50
- Využití zorného pole v %**: 80
- Minimální vzdálenost [m]**: 1,58
- Nejmenší rozpoznatelný objekt (IFOV_{geo}) [mm]**: 2,05
- Nejmenší měřitelný objekt (IFOV_{meas}) [mm]**: 6,16
- Rozměry zorného pole [cm]**:
 - Výška H: 50,02
 - Šířka š: 67,13
- Buttons**: 'Spustit výpočet' and 'Ukončit'
- Diagram**: Shows an 'objektiv IR kamery' (red sphere) at a 'vzdálenost' (distance) from a rectangular object. The object has height 'h' and width 'š'. Two fields of view are indicated: 'IFOV_{geo}' (the larger field) and 'IFOV_{meas}' (the smaller field).

Obr. 5.5 Šablona pro zjištění vzdálenosti IR kamery od objektu

5.3 Teplota okolí

Tento parametr se užívá ke kompenzaci radiace odražené od objektu a radiace atmosféry mezi kamerou a objektem. Je-li emisivita nízká, vzdálenost vysoká a teplota objektu relativně blízká teplotě okolí, je velmi důležité hodnotu okolní teploty pro kompenzaci jejího vlivu zohlednit.⁹

5.4 Relativní vlhkost

Kamera rovněž může "vykompenzovat" skutečnost, že přenos v atmosféře závisí na její relativní vlhkosti. Pro korekci tohoto vlivu je nutné parametr relativní vlhkosti správně zadat. U malých vzdáleností může být hodnota relativní vlhkosti ponechána na předvolených 50%.⁹

6 ŠABLONA PRO OPAKOVANÁ MĚŘENÍ

V rámci této diplomové práce byla vytvořena šablona pro opakovaná měření. Šablona byla zpracována v programovacím jazyce Visual Basic for Applications, spouští se v programu Microsoft Office Excel 2003 a slouží jako software pro tvorbu zpráv z měření. V šabloně je implementována databáze strojů, nástrojů a zařízení nacházejících se v dílnách VUT v Brně na fakultě strojního inženýrství. Tuto databázi lze neomezeně rozšiřovat a doplňovat. Po vyplnění všech polí v šabloně je výstup realizován ve formě tisknutelného dokumentu, který lze uložit na harddisk počítače k případnému znovuotevření a následné úpravě. Díky této šabloně mají všechny zprávy z měření stejnou strukturu a koncepci, lze se v nich dobře orientovat a dosažené výsledky lze snadno interpretovat.

Pro snadnější a rychlejší práci jsou všechny šablony vytvořené v rámci této diplomové práce (tabulka emisivit, šablona pro zjištění vhodné vzdálenosti mezi objektivem a objektem a šablona pro opakované měření), spustitelné z jednoho souboru a přepínání mezi těmito šablonami je realizováno pomocí záložek v horní části dokumentu (Příloha 10).

UserForm1

Objektiv 64mm | Emisivita | Protokol

Jméno: Bc. Gorčica Jakub Datum: 29.05.2009

Nadpis: Šablona pro opakovaná měření

Úvod:

Charakteristika experimentu:

Vyběr měřicí techniky

Obrázky

Vložit obrázek

Řezné podmínky

Otáčky [min-1]: 1400

Posuvová rychlost [mm.min-1]: 500

Obráběcí stroj: Vertikální

Podmínky měření (parametry nastavení)

Atmosferická teplota [°C]: 20

Relativní vlhkost [%]: 40

Vzdálenost měření [m]: 1

Emisivita: nastavena dle objektu

Referenční teplota [°C]: -273

Uložit

Print

Exit

Závěr

= - pro nový řádek použít Ctrl + Enter

Obr. 6.1 Šablona pro opakovaná měření

7 PROGRAMY PRO PRÁCI S TERMOGRAMY

Společnost FLIR Systems s.r.o. vyvinula a ke svým produktům poskytuje programy pro následné vyhodnocování a archivaci získaných termogramů. Pro tyto softwary taktéž v pravidelných intervalech vydává updaty a patche. Tyto programy jsou kompatibilní s většinou IR kamer vyráběnými společností FLIR Systems AB včetně kamery Flir SC2000.

7.1 ThermaCAM Researcher™

Tento software byl vyvinut pro využití ve výzkumných aplikacích, kde je zapotřebí detailního tepelného rozboru statických i dynamických dějů. Program umožňuje propojení termovizní kamery s počítačem, vysokorychlostní přenos dat včetně ovládání veškerých funkcí kamery. Nesporná výhoda tohoto propojení je v tom, že program takto může provádět teplotní měření a statistiky v reálném čase. Tato data mohou být nadále podrobně analyzována v uložených sekvencích termogramů. Pro tuto analýzu ThermaCAM Researcher™ nabízí mnoho funkcí jako např. vytvoření izoterm, bodové měření, plošné histogramy, čárové profily apod.

Tento software byl využit pro zpracování a vyhodnocení dat získaných v experimentu v Kap. 10 a 11.

7.2 ThermaCAM Reporter

ThermaCAM Reporter je software pro rychlé a snadné vytvoření zprávy o provedeném měření. Umožňuje automatizovat vkládání obrázků, termogramů, textů, zvukových poznámek, ale také podmínek měření získaných hodnot, grafů a statistik pro vytvoření lehce interpretovatelné zprávy.

Software je integrován přímo do rozhraní programu Microsoft Word, kde uživatel může plně využívat jeho funkce formátování textu a tím zprávu přizpůsobit svým potřebám. A dále jsou k dispozici některé funkce tepelné analýzy programu ThermaCAM Researcher™. Výstup je realizován v klasickém Microsoft Word dokumentu nebo může být převeden do formátu Adobe Acrobat Reader s následným tiskem. Multimediální prezentace tohoto programu je na CD mezi přílohami.

7.3 ThermaCAM Explorer

ThermaCAM Explorer je jednoduchý a rychlý nástroj k prohlížení získaných termogramů termovizní kamerou. Pracuje v uživateli snadno ovladatelném prostředí, umožňuje převést termogram s příponou *.IMG, který je výstupním standardem termovizní kamery Flir SC2000 do více rozšířenějšího formátu Bitmap (*.bmp). Tento program je freeware a je přiložen na CD mezi přílohami.

7.4 Report Viewer

Report Viewer je program sloužící k podpoře programu ThermaCAM Reporter a slouží k prohlížení, jednoduché orientaci ve vytvořených zprávách a k tištění těchto zpráv. Tento program je freeware a je přiložen na CD mezi přílohami.

7.5 Report Database

Report Database je další software vytvořený pro podporu programu ThermaCAM Reporter a řeší organizaci zpráv a dat vytvořených v tomto programu. Software dokáže exportovat data z programu ThermaCAM Reporter nebo přímo z termovizní kamery, které lze uchovávat v jedné složce počítače a díky tomuto softwaru se v nich jednoduše a rychle orientovat a vyhledávat s následným odesláním zpět do ThermaCAM Reporter k dalšímu vyhodnocení. Program je kompatibilní s databází Microsoft Access, čímž lze přes ODBC (*Open DataBase Connectivity*) sdílet data s dalšími ODBC programy.

8 VÝHODY A NEVÝHORY MĚŘENÍ S TERMOVIZNÍ KAMEROU FLIR SC2000

8.1 Výhody

- **Rychlost**

Kamera má časovou odezvu řádově v milisekundách, proto dokáže měřit teplotu prakticky v reálném čase. Umožňuje uskutečnit více měření v relativně krátké době, což je velmi důležité pro úsporu času.

- **Nemá vliv na měřený objekt**

Na rozdíl od kontaktních způsobů měření tepla zde není z měřeného objektu odebírána žádná energie. Například v případě špatných vodičů tepla jsou měření velmi přesná bez zkreslení teplot.

- **Lze měřit ve velkém rozsahu teplot a velmi vysoké teploty**

Flir SC2000 může měřit od -40 až $+2000^{\circ}\text{C}^{\circ}$, avšak nelze měřit najednou v celém rozsahu. Tento rozsah se musí přepínat v softwarovém rozhraní kamery. Následně tedy lze pracovat v intervalech: $\langle -40; +120 \rangle^{\circ}\text{C}$, $\langle 0; +500 \rangle^{\circ}\text{C}$, $\langle +350; +1500 \rangle^{\circ}\text{C}^{\circ}$. Jelikož se intervaly dostatečně překrývají, nevznikají problémy s výběrem vhodného intervalu. Nespornou výhodou je také měřit teplotu až do $+2000^{\circ}\text{C}^{\circ}$, kdy dotykové teploměry nejsou většinou využitelné nebo mají omezenou životnost. Avšak pro tuto teplotu je třeba instalovat filtr.

- **Nehrozí destrukce či poškození měřeného objektu vlivem měření**

Na povrch není potřeba mechanicky, chemicky apod. umisťovat žádná čidla, tudíž nemůže dojít k poškrábání povrchu či naleptání povrchu. Lze měřit měkké povrchy bez ovlivnění jejich struktury.

- **Možnost měření teploty pohybujících se objektů**

Nedochází zde k žádnému kontaktu mezi čidlem a měřeným objektem.

- **Možnost měření teploty na špatně dostupných a pro obsluhu nebezpečných místech**

Lze měřit z větších vzdáleností, např. součásti pod napětím.

- **Snadnost měření**

8.2 Nevýhody

- **Měřený objekt musí být pro kameru viditelný**

V zaprášeném či zakouřeném prostředí je přesnost měření ovlivněna částicemi pohybujícími se mezi objektivem kamery a měřeným objektem, či je měření zcela znemožněno. Většina materiálů je kameře „neprůhledná“.

- **Je možno měřit pouze povrchovou teplotu**

- **Optika čidla musí být chráněna před prachem a kondenzujícími kapalinami**

Z důvodů velké ceny IR objektivů, výrobce dodává různé ochranné filtry, které jsou lehce vyměnitelné a řádově levnější než samotné IR objektivy

- **Musí se dbát na přesnost zadávaných parametrů ovlivňujících měření**

Jak již bylo naznačeno v Kap. 3.3, aby kamera vyhodnocovala přesně měřenou teplotu, musí se do jejího softwarového rozhraní zadat parametry ovlivňující měření, které je třeba předem zjistit metodikou popsanou v Kap. 5.

- **Manipulace**

Kameru není někdy možné, ať již z bezpečnostních či technických důvodů, při samotném měření držet v ruce, proto může být samotné ustavení kamery obtížné. Kabelové spojení s počítačem může také komplikovat podmínky a jednoduchost měření.

- **Vysoké pořizovací náklady na kameru**

9 POUŽITÉ VYBAVENÍ PŘI VYPRACOVÁNÍ EXPERIMENTŮ

9.1 Termovizní kamera Flir SC2000

Termokamera Flir SC2000 je součástí infračerveného kamerového systému ThermaCAM™ PM 695. Je odolná proti prachu a stříkající vodě, je testována na otřesy a vibrace, je vhodná k použití v terénu při nejnáročnějších podmínkách. Obraz – termogram o vysokém rozlišení je možné sledovat v reálném čase v integrovaném hledáčku nebo na přídavném monitoru (je nutno dokoupit), případně současně jak v hledáčku, tak na externím monitoru.⁹

Pro dokumentaci měřeného objektu je možné termogram zachytit a zaznamenat na vyjímatelnou PC-kartu. Je možné rovněž uložit s každým snímkem zvukový komentář a/nebo textový komentář spolu s informacemi, jako jsou např. identifikační data objektu, okolní podmínky atd. Zvukový komentář je zaznamenáván pomocí mikrofonu a sluchátek (náhlavní systém) připojených ke kameře.⁹

Při experimentu byla kamera upevněna na stativu a pomocí kabelu propojena s notebookem s nainstalovaným obslužným softwarem ThermaCAM™ Researcher. Přes tento Software byla kamera ovládána a pořízené termogramy byly ukládány přímo na harddisk notebooku pro pozdější vyhodnocení.



Obr. 8.1 termovizní kamera Flir SC2000⁹

Tab 9.1 Technické specifikace Flir SC2000⁹

Rozsah měřených teplot objektu	-40 až +120 °C, rozsah 1 0 až +500 °C, rozsah 2 až do +1500 °C, s příslušenstvím až do +2000 °C, s příslušenstvím
Přesnost měření	±2 %
Teplotní citlivost	< 0,08 °C při teplotě objektu +30 °C
Zorné pole (H x V)	24°×18°/0,5 m
Typ detektoru	FPA, nechlazený mikrobolometr s rozlišením 320×240 pixelů
Spektrální rozsah	7,5 - 13 μm, vestavěný filtr pro "odříznutí" na 7,5 μm
Video výstup	VHS nebo S-VHS
Hledáček	Barevný LCD (TFT)
Disková jednotka, PC-karty	Jedna zásuvka pro PC-kartu Typu II nebo III. Může být použita karta FLASH nebo harddisk (kompatibilní s ATA)
Ukládání obrazu	Plně dynamické, 14-ti bitové
Bateriový systém	2 hodiny při běžném použití (jedna baterie)
Okolní teplota	-15 až +50 °C
Krytí	Kovový kryt, IP 54
Uchytení na stativ	1/4"-20
Hmotnost	1,9 kg bez akumulátoru; 2,3 kg včetně akumulátoru
Rozměry	209×122×130 mm
Video kamera	640×480 pixelů

9.2 Barva ThermaSpray 800

ThermaSpray 800 je speciální barva pro úpravu povrchu měřeného objektu před bezkontaktním měřením teploty termovizní kamerou. Je to černá nevodivá sprejová barva o emisivitě $\epsilon = 0,96$, odolná vysokým teplotám (až 800 °C), odolná vůči otěru a chemickým látkám. ThermaSpray 800 je vhodná zejména pro dlouhodobou úpravu povrchů při opakovaných měřeních teplot, kde je třeba eliminovat vliv nízké emisivity měřeného objektu.²³

9.3 Silikonová pasta

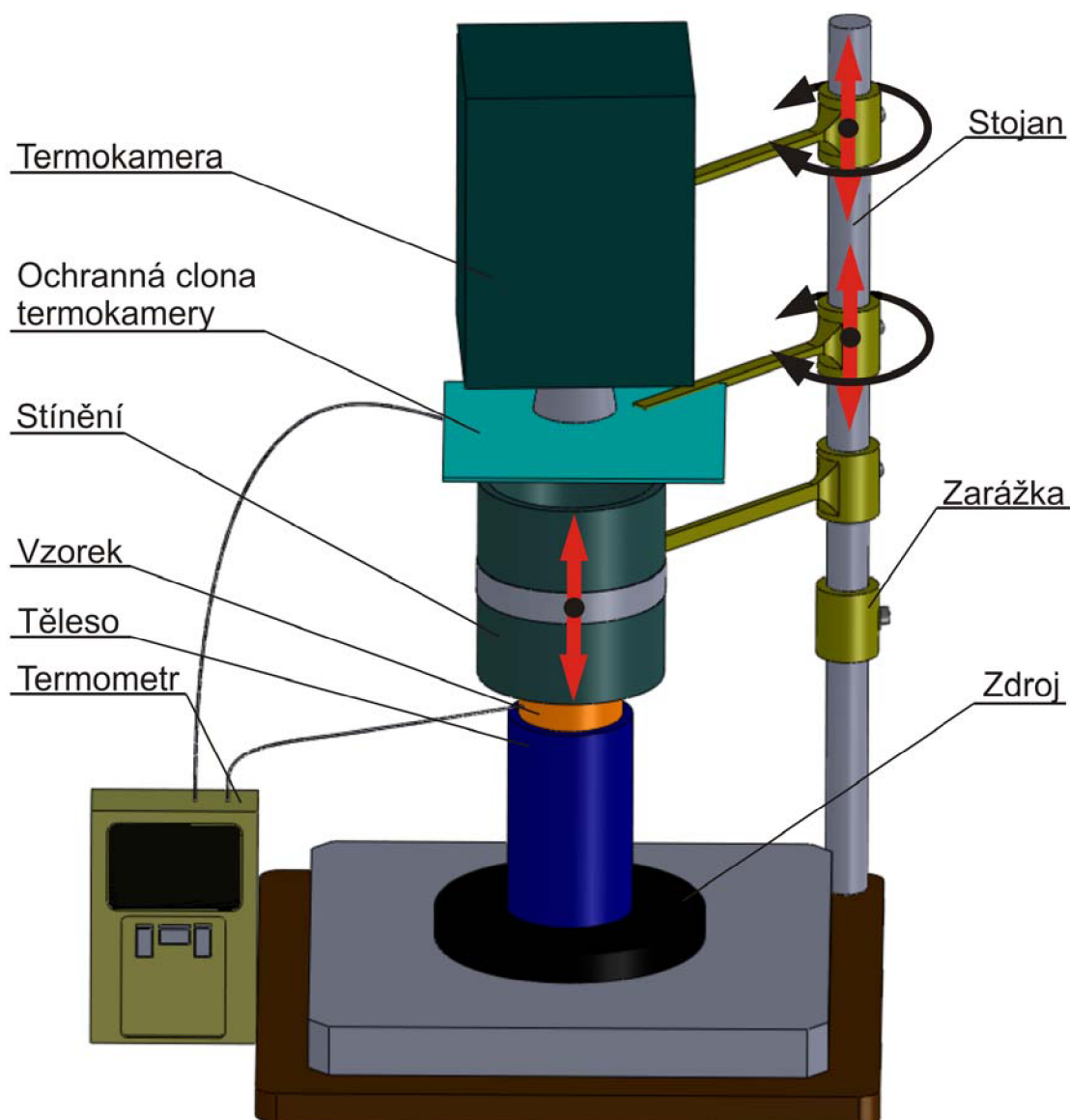
Silikonová pasta společnosti Elchemco spol. s.r.o. se používá ke konzervaci gumy, ochraně kovových povrchů, dále chrání elektrické kontakty automobilových akumulátorů, odolává vodě a vzdušné vlhkosti.

9.4 Měřidla ovlivňujících parametrů měření

Teplota okolí je určena termometrem YK-2001 TM s připojeným termočlánkem typu K a vlhkost prostředí je určena na stejném zařízení s připojenou sondou vlhkoměru YK-200PRH. Pro změření vzdálenosti termokamery od měřeného objektu je využít ultrazvukový měřič vzdálenosti BOSH DUS 20 plus.

10 PRACOVNÍŠTĚ PRO PŘESNÉ ZJIŠŤOVÁNÍ EMISIVITY

Jelikož termokamera Flir SC2000 dokáže měřit s přesností $\pm 2\%^9$, je potřeba zajistit takové podmínky, abychom zabránili chybám měření, popřípadě tyto chyby zcela eliminovali. Jak již bylo popsáno v Kap 5. největší podíl na případném nepřesném měření má hodnota emisivity¹¹, která nejvýrazněji ovlivňuje výsledky měření. Z těchto důvodů bylo sestaveno experimentální pracoviště pro přesné určování emisivity. Toto pracoviště kombinuje způsoby zjištění emisivity popsané v Kap. 5.1 a je vyobrazeno na Obr. 10.1. Jednotlivé jeho části, jejich funkce a význam jsou popsány v níže uvedených experimentech.



Obr. 10.1 Schéma pracoviště pro přesné určení emisivity

10.1 Termokamera

Z důvodů cenové náročnosti termokamery Flir SC2000 (cca 1,6 mil. Kč)⁸, zabránění vzniku chyb měření zapříčiněných pohybem kamery, hmotnosti a dostatečné nosnosti soustavy pracoviště, je kamera pevně instalována přímo na nosnou tyč stojanu. Tento stojan je majetkem VUT Brno, Fakulty strojního inženýrství, Ústavu strojírenské technologie a je součástí vybavení laboratoře B2/410.

10.2 Ochranná clona termokamery

Jelikož je pracovní teplota kamery $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ⁹, je instalována ochranná clona termokamery sloužící k zabránění přístupu tepla stoupajícího od zdroje směrem vzhůru k termokameře, které by ji mohlo nenávratně poškodit. Tato clona je připevněna k nosné tyči a je libovolně výškově i radiálně nastavitelná. Clona musí být nainstalována v pozici před kamerou po celou dobu temperování soustavy a je odstraněna jen na dobu nezbytně nutnou k získání snímku.

10.3 Trubka

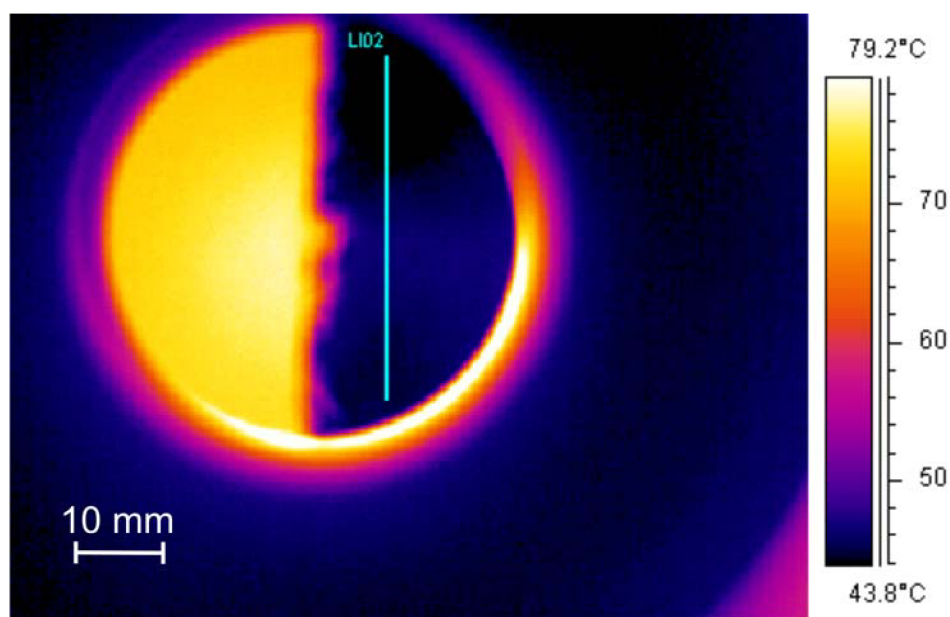
Novodurová trubka slouží jako odstínění a je instalována k eliminaci dvou chyb vyplývajících z měření. Je to chyba vzniklá prouděním vzduchu a chyba vzniklá odrazem teploty od poblíž se nacházejícího objektu či osoby obsluhující zařízení. Toto odstínění je nainstalováno po celou dobu temperování soustavy i po dobu měření. Je vysunuto směrem vzhůru pouze při vkládání vzorku na těleso vedoucí teplo. Trubka je zevnitř nastříkána speciální barvou ThermaSpray 800, která díky své vysoké hodnotě emisivity ($\epsilon = 0,96$) zabraňuje vzniku zmiňovaných nežádoucích odrazů teploty na vzorku. Do prostoru vzorku uvnitř trubky je zavedeno čidlo termočlánu, který nám identifikuje teplotu v prostoru měření, která je zadávána jako jedna z hodnot do softwarového rozhraní kamery podílející se na přesném měření. Toto čidlo je rovněž ošetřeno barvou ThermaSpray 800 z důvodů zabránění vzniku teplotních odrazů. Výrobní výkres součásti je mezi přílohami jako Příloha 1.

10.3.1 Chyba vzniklá prouděním vzduchu

Tato chyba vzniká případným prouděním vzduchu v prostoru měření a vyznačuje se poklesem či kolísáním povrchové teploty vzorku. Pro přesná měření je zapotřebí, aby vnitřní teplota vzorku byla co nejbližší povrchové teplotě vzorku.

10.3.2 Chyba vzniklá odrazem teploty

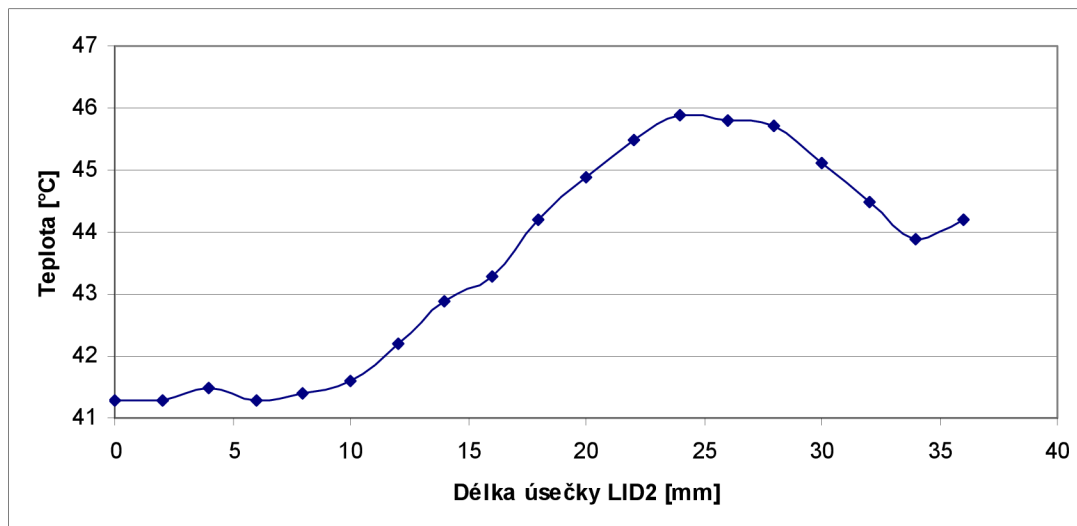
Tato chyba vzniká odrazem teploty od objektu či osoby nacházející se v blízkosti prostoru měření. Tyto odrazy se v termogramu objeví v podobě odlišně zbarvených „map“, které při vyhodnocování termogramu vykazují teploty odlišné od skutečné teploty (Obr. 10.2). Tyto odrazy jsou úspěšně eliminovány po instalaci odstínění. Avšak na vzorku je stále patrný odraz od termokamery, kterému nelze z konstrukčních důvodů stojanu zabránit, a který je třeba brát v úvahu při vyhodnocování termogramu.



Obr. 10.2 Odraz teploty na vzorku

V programu ThermaCam Researcher (dále jen TR) byla do termogramu vložena profilová čára LI02 tak, aby z části vedla přes mapu odražené teploty. Tato profilová čára určila teplotní pole, na jehož základě byl sestaven graf 10.1, znázorňující průběh teploty profilovou čarou. Jelikož program TR nedokáže určit délku profilové čáry, je nutno pomocí měřítka získaného z průměru vzorku ($D = 46 \text{ mm}$) určit tuto délku tvořící osu x v grafu. Z grafu je

patrné, že odraz teploty na vzorku zapříčinil na profilové čáře ($L = 36 \text{ mm}$) rozdíl teploty $4,7 \text{ }^\circ\text{C}$.



Graf 10.1 Teplotní průběh odrazu teploty na vzorku

10.4 Zdroj tepla

Jako zdroj tepla byl zvolen dvouplotýnkový kuchyňský vaříč Rohnson R – 221 s regulovatelnou intenzitou ohřevu. Větší plotýnka má výkon $P_1 = 1750 \text{ W}$ a menší plotýnka má výkon $P_2 = 1500 \text{ W}$. Jako zdroj je zvolena menší plotýnka. Plotýnka je pomocí regulace nastavena na maximum a po pěti minutách temperování je výkon stažen na střední hodnotu. Tento proces byl zvolen proto, aby zdroj dosáhl provozní teploty v co nejkratším čase (čas temperování zdroje je $t_z = 8 \text{ min}$). Po ustálení provozní teplota kolísá od $153 \text{ }^\circ\text{C}$ do $154 \text{ }^\circ\text{C}$ (viz. Graf 10.2).

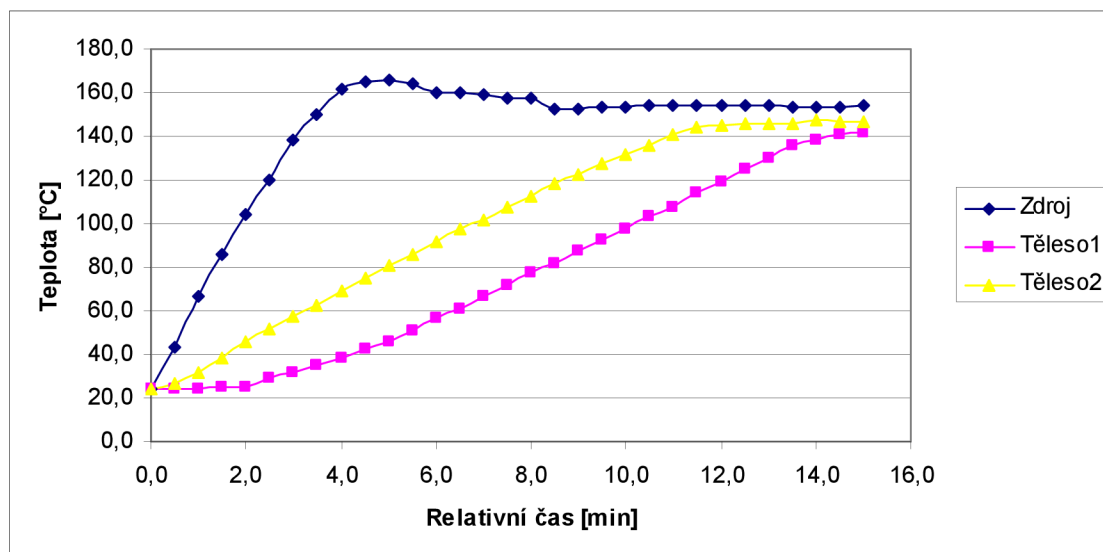
10.5 Těleso vedoucí teplo

Těleso slouží k vedení tepla od zdroje tepla k měřenému vzorku a oddálení zdroje tepla od termokamery, aby nedošlo k jejímu poškození. Jako tělesa vedoucí teplo byly vybrány dvě tělesa (Obr. 10.3). Jejich výrobní výkresy jsou mezi přílohami jako Příloha 2 a 3. Těleso 1 je vhodné využívat pro vzorky do průměru 60 mm a těleso 2 pro vzorky do průměru 26 mm . Tělesa jsou nastříkána barvou ThermaSpray 800, aby bylo možné snímat jejich teplotu termovizní kamerou.



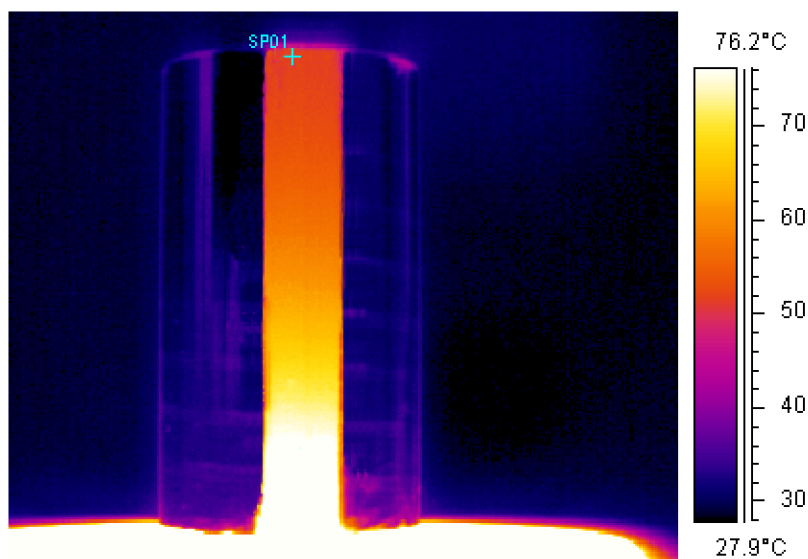
A) B)
Obr. 10.3 A) Těleso 1, B) Těleso 2

Doba potřebná k temperování těles, než je možno přiložit vzorek, byla zjištěna experimentem, při kterém bylo na zdroj tepla umístěno nejprve těleso 1. Poté byl zdroj zapnut a nastaven na maximální výkon a po pěti minutách byl výkon zdroje stažen na střední hodnotu. Teplota tělesa byla měřena termometrem YK-2001 TM s připojeným termočlánkem typu K na horní straně ve středu. Po zchlazení zdroje na pokojovou teplotu se postupovalo stejně s tělesem 2. Teploty zdroje tělesa 1 a tělesa 2 byly v závislosti na čase vyneseny do grafu 10.2.

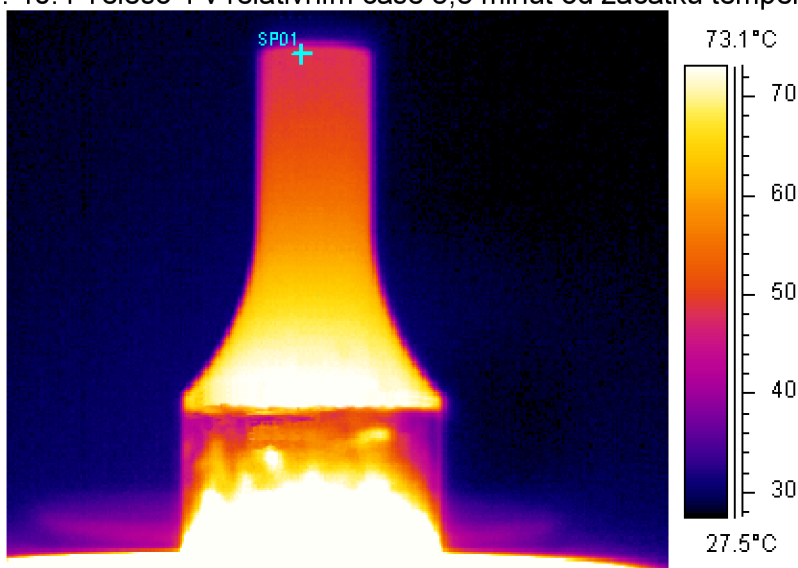


Graf 10.2 Temperování soustavy zdroj-těleso1-těleso2

Z grafu je zřejmé, že čas temperování tělesa 1 při zvolených podmínkách je $t_{t1} = 15$ min a čas temperování tělesa 2 při stejných podmínkách je $t_{t2} = 11$ min. Teplota tělesa 1 se ustálila na 143 °C a teplota tělesa 2 se ustálila na 146 °C. Skutečnost, že těleso 2 dosahuje teploty potřebné k měření rychleji (při zvolených podmínkách $t_{t2} - t_{t1} = 4$ min) než těleso 1, lze odečíst nejen z grafu, ale také z pořízených termogramů (Obr. 10.4 a 10.5). Termogramy byly pořizovány po celou dobu experimentu a následně byl v programu TR přidán měřicí bod SP01. Obr. 10.4 byl pořízen v relativním čase $t = 5,5$ min a měřicí bod SP01 vykazoval teplotu $51,5$ °C. Naopak měřicí bod SP01 na Obr. 10.5 vykazoval téměř shodnou teplotu ($49,1$ °C) již v relativním čase $t = 2,5$ min od počátku experimentu.



Obr. 10.4 Těleso 1 v relativním čase 5,5 minut od začátku temperování



Obr. 10.5 Těleso 2 v relativním čase 2,5 minut od začátku temperování

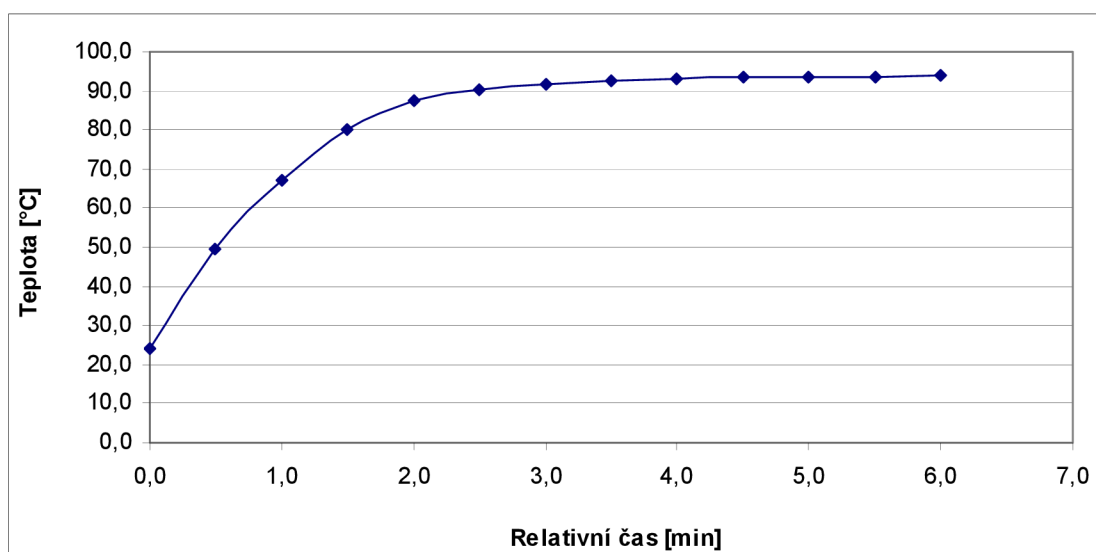
10.6 Experimentální vzorek

Tvar a rozměry experimentálního vzorku byly zvoleny s ohledem na dostatečnou rychlost a homogenitu prohřátí. Výkres vzorku je mezi přílohami jako Příloha 4. Vzorek je na jedné polovině horní strany nastříkán barvou ThermaSpray 800 se známou emisivitou ($\epsilon = 0,96$), aby bylo možno odečíst skutečnou teplotu vzorku termokamerou (Obr. 10.6). Na vzorek se přivádí teplotní čidlo termočlánku, kterým se ověřuje správné zjišťování teploty termokamerou, čímž je posílena přesnost měření celé soustavy. Čep ve středu vzorku, vzniklý upichováním, je ponechán z důvodů manipulace se vzorkem. Z důvodů tepelného ovlivnění vzorku či jeho znečištění (zamaštění) při manipulaci rukou, je se vzorkem manipulováno za tento čep pomocí kleští.



Obr. 10.6 Vzorek nastříkaný barvou ThermaSpray 800

Doba temperování vzorku před vlastním měřením byla zjištěna experimentem, při kterém se teplota vzorku snímala termometrem YK-2001 TM s připojeným termočlánkem typu K po dobu šesti minut v půl minutových intervalech. Vzorek byl položen na těleso 2 nateperované na $97\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z naměřených hodnot byl vytvořen graf 10.3. Doba temperování vzorku při daných podmínkách byla stanovena na 3 minuty, přičemž i po 6. minutách měla teplota tendenci mírně stoupat. Tento trend je však velmi mírný ($0,2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$) a na měření již nebude mít vliv.

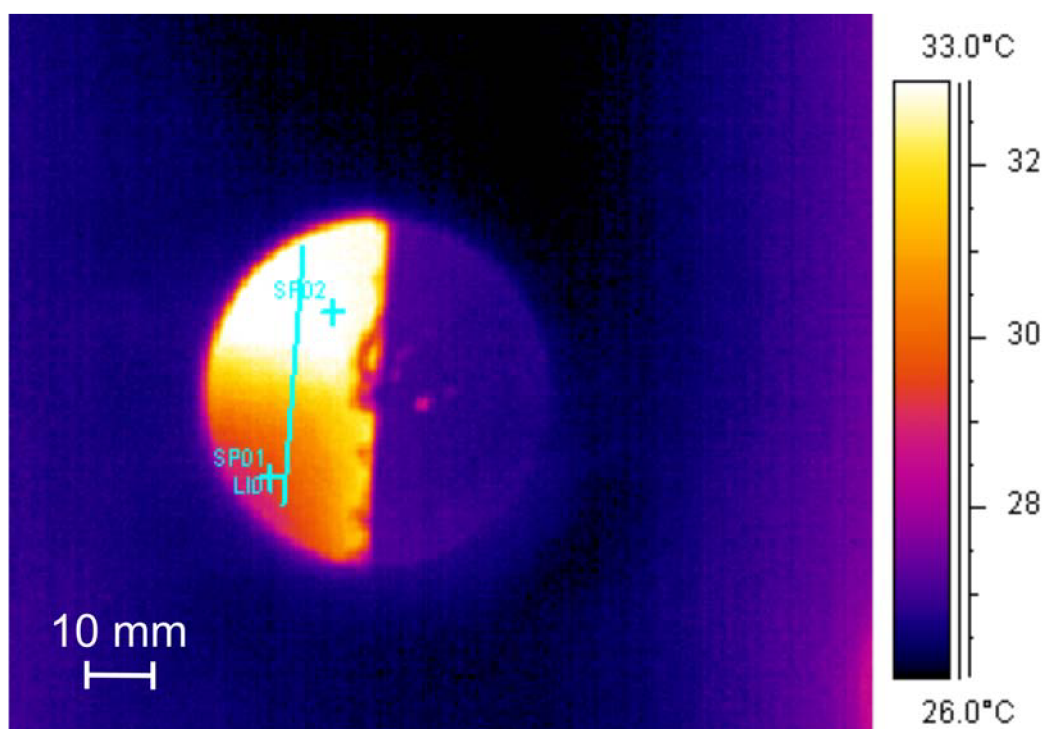


Graf 10.3 Temperování vzorku

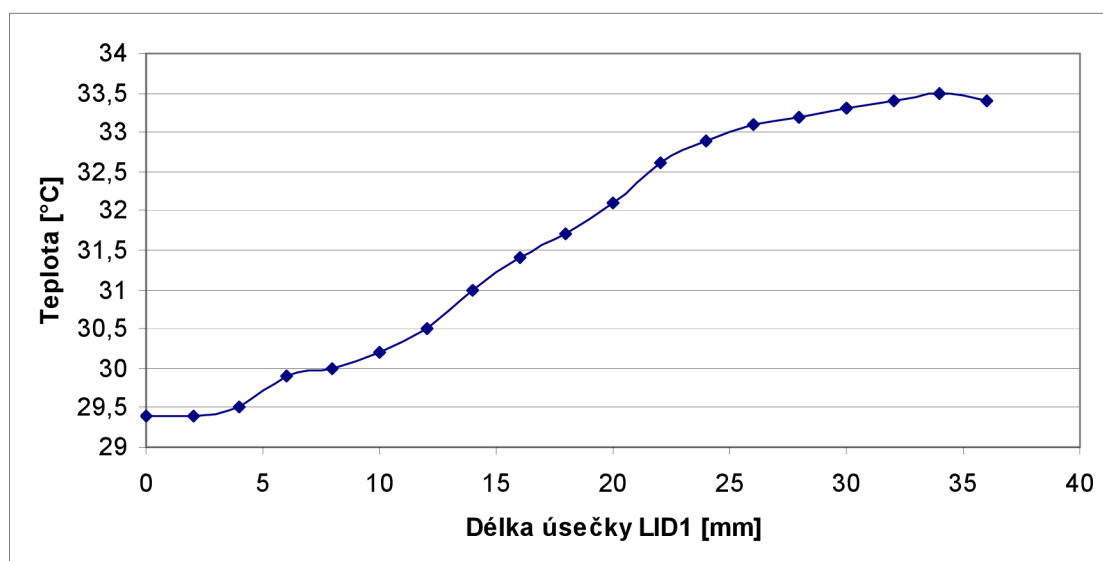
10.6.1 Ovlivnění vzorku

Při manipulaci se vzorkem rukou dochází k jeho tepelnému ovlivnění a popřípadě k jeho zamaštění. Tepelně ovlivněná oblast se projeví na termogramu jako odlišně zbarvená „mapa“. Toto ovlivnění lze odstranit dostatečným prohřátím vzorku. Oproti tomu se zamaštěný povrch sice na termogramu také projeví odlišnou barvou a tudíž také odlišnou teplotou, ale skutečná teplota vzorku pod zamaštěnou částí je stejná jako teplota nezamaštěné části. Tato chyba měření se vyznačuje rozdílnou hodnotou emisivity povrchu na vzorku, která nelze odstranit dostatečným prohřátím vzorku, ale pouze zajištěním homogenity povrchu měřené části vzorku. Proto je na manipulaci se vzorkem kladen velký důraz.

Na Obr. 10.7 je zaznamenán případ, kdy byl na vzorek přitlačen prst po dobu 1 minuty. V programu TR byla vytvořena profilová čára vedoucí jak přes oblast dotykem ovlivněnou, tak přes oblast dotykem neovlivněnou. Z této profilové čáry byly odečteny hodnoty a pomocí měřítka, vytvořeného opět z průměru vzorku určena její velikost, která tvoří osu x v grafu 10.4. Z grafu je zřejmé, že pouhý dotyk rukou způsobil teplotní rozdíl na vzorku 4,1 °C.

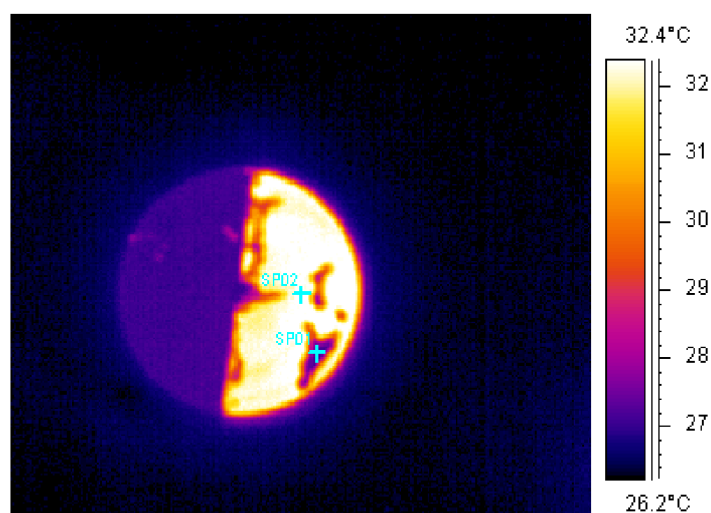


Obr. 10.7 Chyba vzniklá nesprávnou manipulací se vzorkem



Graf 10.4 Chyba vzniklá nesprávnou manipulací se vzorkem

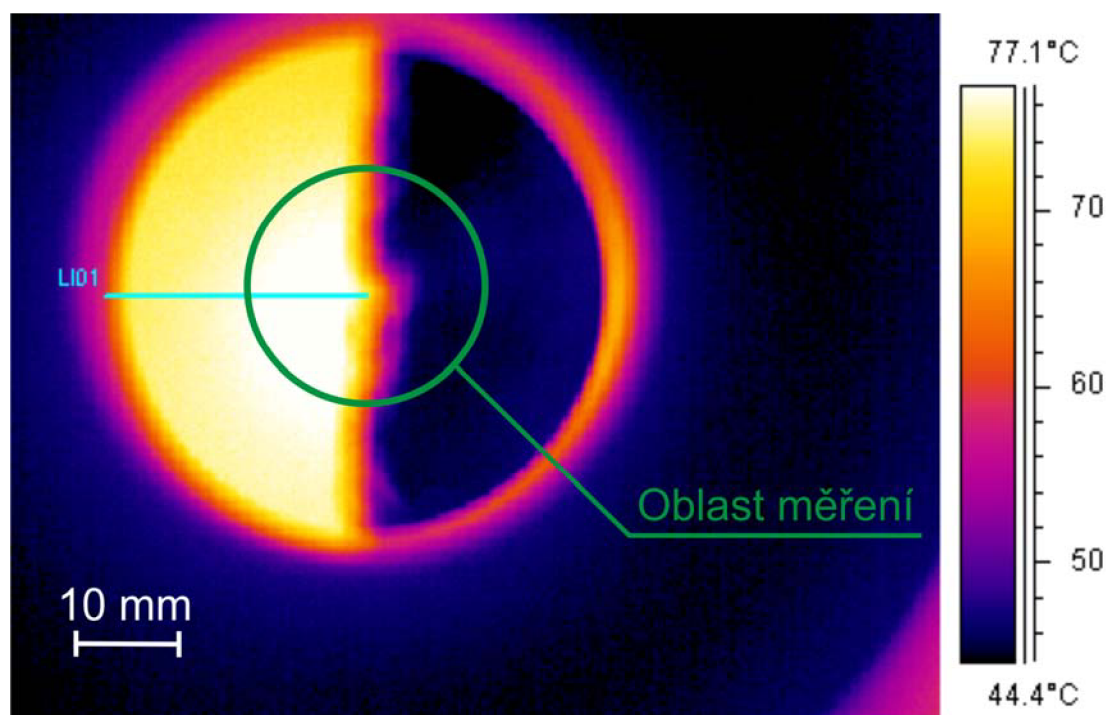
Na Obr. 10.8 je případ, kdy vzorek nebyl řádně očištěn a na povrchu ulpěly mastnoty. V programu TR byly do termogramu vloženy dva měřící body. Bod SP01 vykazuje teplotu 27,2 °C a bod SP02 vykazuje teplotu 32,3 °C. Rozdíl naměřených teplot vzniklý nedokonalým očištěním vzorku je 5,1 °C.



Obr. 10.8 Chyba vzniklá znečištěním povrchu

10.6.2 Oblast měření

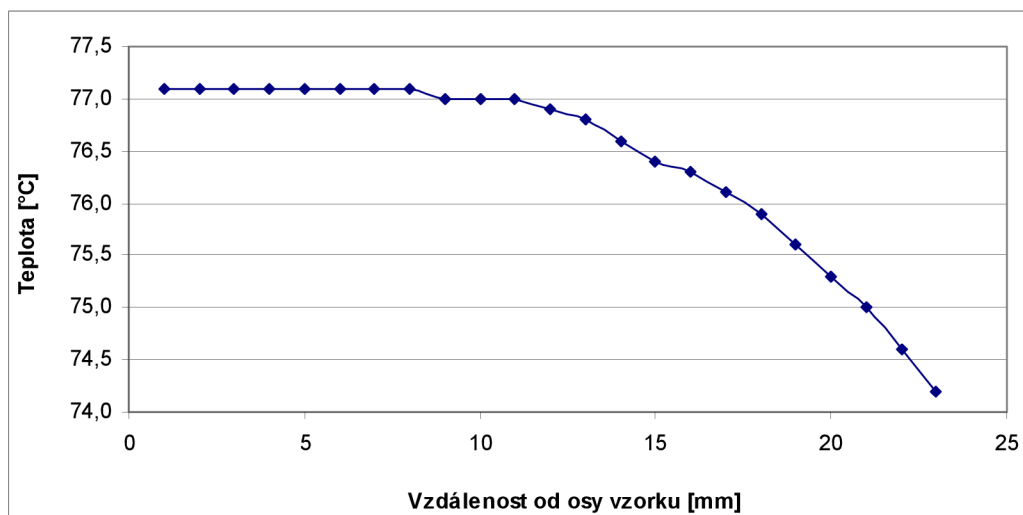
Z důvodů nedostatečného prohřátí vzorku může dojít k situaci popsané na Obr. 10.9, kde vzorek nemá stejnou teplotu na celém povrchu a jeho teplota klesá od středu vzorku směrem ke krajům.



Obr. 10.9 Oblast měření na vzorku

K vyhodnocení teplotní závislosti na vzdálenosti od středu vzorku k okraji byla opět v programu TR použita profilová čára a následně byl vytvořen graf této závislosti (Graf 10.5). Z grafu je patrné, že v čase $t = 1$ min od začátku

temperování vzorku (těleso má teplotu $T = 110,3 \text{ °C}$) je oblast, na níž se dá s dostatečnou spolehlivostí určovat emisivita, ve vzdálenosti do 12 mm od středu vzorku. Jelikož je vzorek symetrický, byly použity hodnoty z jedné poloviny vzorku.



Graf 10.5 Průběh teploty na vzorku

10.7 Zarážka

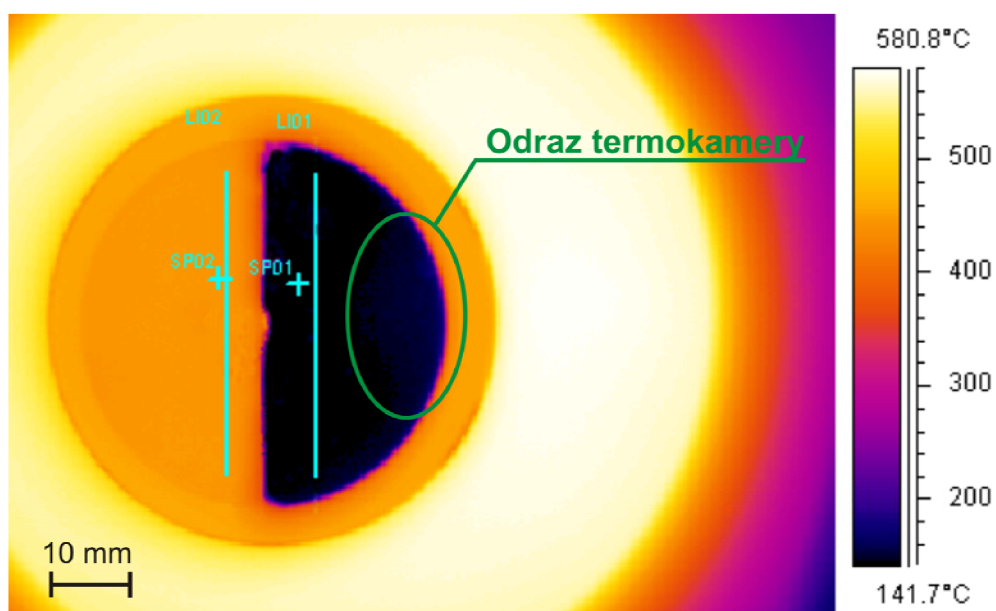
Zarážka slouží jako bezpečnostní doraz pro trubku, která se tak nedostane do kontaktu se zdrojem ani s kuželem vedoucím teplo od zdroje ke vzorku a nedojde tak k její deformaci teplem.

10.8 Odstíněný termogram

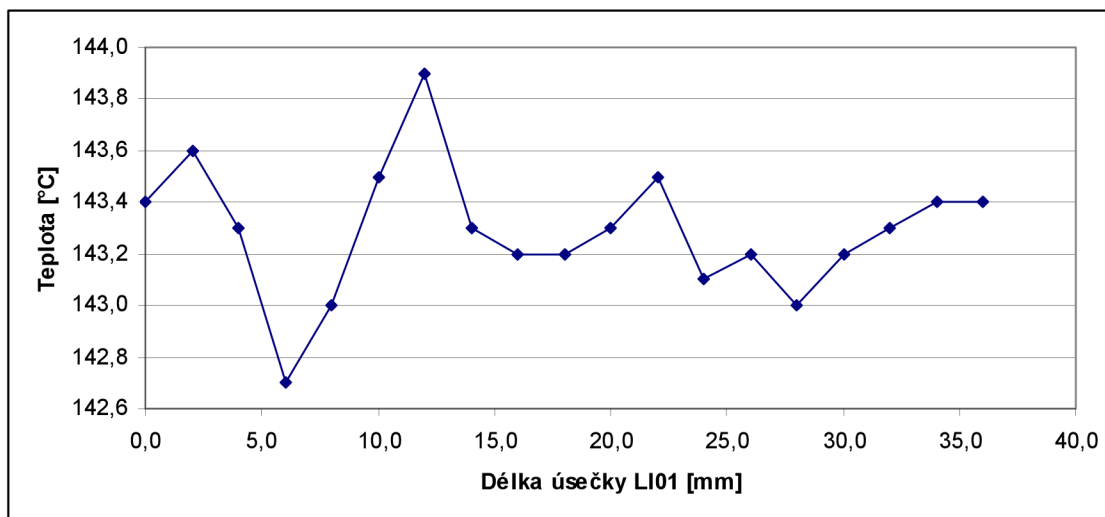
Na Obr. 10.10 je zobrazen výsledný termogram pořízený na výše popsaném pracovišti, který je zbaven všech chyb měření a připraven k přesnému vyhodnocení.

Pro ověření byly v programu TR vykresleny dvě profilové čáry, LI01 na základním povrchu vzorku a LI02 na povrchu vzorku nastříkaném barvou ThermaSpray 800. Jejich teplotní pole bylo následně pomocí měřítka vyneseno do grafů 10.7 a 10.8. Z grafů je patrné, že na profilové čáře LI01 je úchylka teplot $1,2 \text{ °C}$ a na profilové čáře LI02 je úchylka teplot $0,7 \text{ °C}$.

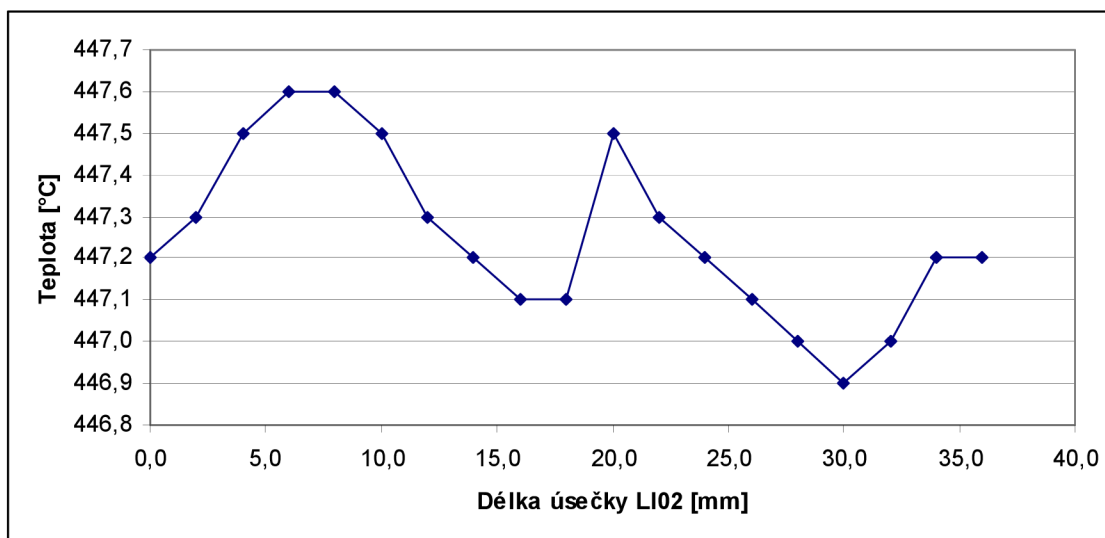
Do termogramu byly rovněž vykresleny dva měřící body, které identifikovaly teploty na daných místech. SP01 = $143,3 \text{ °C}$ a SP02 = $447,1 \text{ °C}$ při nastavené emisivitě $\epsilon = 0,19$ což je zjištěná emisivita povrchu vzorku.



Obr. 10.10 Odstíněný vzorek



Graf 10.7 Průběh teplot na odstíněném vzorku na profilové čáře LI01



Graf 10.8 Průběh teplot na odstíněném vzorku na profilové čáře LI02

Na Obr. 10.10 je vyznačen zmiňovaný odraz od termokamery, který nelze zcela odstranit, ale jeho účinky lze zmírnit posunutím vzorku mimo osu objektivu.

10.9 Přípravek na měření emisivity fréz

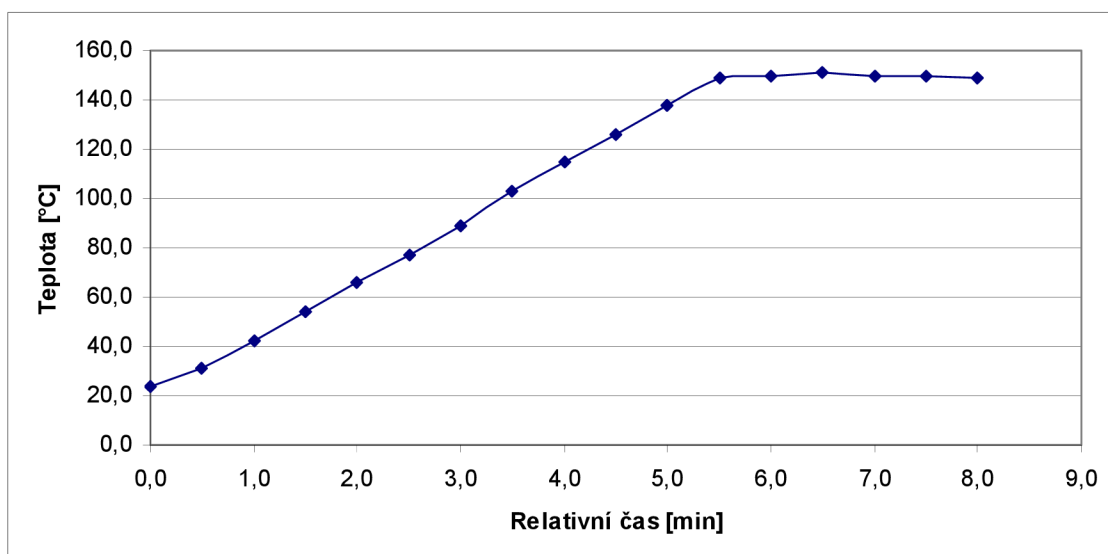
Jako další součást pracoviště byl zhotoven přípravek na měření emisivity fréz. Přípravek je zhotoven pro stopkové válcové frézy o průměru 12 mm. Jako materiál byl zvolen Silumin pro jeho dobrou tepelnou vodivost (Obr. 10.11). Výkres součásti je mezi přílohami jako Příloha 5. Emisivita se v přípravku měří na základě postupu popsaného v Kap. 5.1.3, kdy se fréza z části opatřená barvou ThermaSpray 800 vloží do přípravku, který se na zdroji nahřeje na výrazně vyšší teplotu než je teplota okolí. Tato teplota se změří pomocí termokamery (emisivita nastavena na 0,96) v místě na fréze upraveném barvou. Poté se měřící bod termokamery přesune na základní povrch frézy a vyrovnává se emisivita dokud teplota v termokameře nevykazuje původně naměřenou teplotu.



Obr. 10.11 Přípravek na měření emisivity fréz

Doba temperování přípravku byla zjištěna experimentem, při kterém se teplota přípravku snímala termometrem YK-2001 TM s připojeným termočlánkem typu K. Zdroj tepla vykazoval stálou teplotu 153 °C. Teplota byla v závislosti na čase vynesena do grafu 10.6 ze kterého je zřejmé, že čas

potřebný k prohřátí přípravku za těchto podmínek je 5 minut kdy se teplota ustálila na 150 °C.



Graf 10.9 Temperování přípravku

Vkládání nástroje

Aby nedošlo k poškození frézy či přípravku vlivem teplotní roztažnosti a následnému smršťování materiálu při chladnutí, je otvor pro frézu vyroben s vůlí ($\varnothing 12,1$). Při vkládání je navíc fréza potřena po obvodu silikonovou pastou. Tato pasta má dobré mazací účinky a navíc je mezi přípravkem a frézou zachována dobrá teplotní vodivost. Možný účinek teplotní roztažnosti materiálu na přípravek je znázorněn na Obr. 10.12, kdy musela být fréza po rychlém ochlazení (proudem vody) přípravku „vyklepnuta“ přes trn, čímž došlo k prasknutí a deformaci tenké stěny. Toto je úspěšně odstraněno vůlí mezi frézou a přípravkem a pozvolným ochlazováním soustavy na vzduchu.



Obr. 10.12 Poškození přípravku

Na tomto pracovišti lze měřit emisivitu jakéhokoliv materiálu v jakémkoliv stavu a lze nasimulovat podmínky podobné podmínkám měření teploty v praxi. Z důvodů naprosté eliminace chyb měření, byla vypracována metodika měření emisivity materiálu (Příloha 6) a metodika měření emisivity fréz (Příloha 7) na pracovišti. Hodnoty naměřené pomocí tohoto pracoviště je možno zapsat do elektronické tabulky emisivit (Kap. 5.1.1), rozšířit tak její databázi a posílit její přesnost a využitelnost v praxi.

11 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

V rámci této diplomové práce byly zjišťovány emisivity dvou materiálů a tří povrchů fréz.

Emisivita materiálů

Jako první byla zjišťována emisivita oceli 12 050. Je to ocel s obsahem uhlíku 0,45 % – 0,50 % vhodná k zušlechťování a k povrchovému kalení. Používá se na hřídele turbokompresorů, čerpadel, těžních strojů, elektromotorů a dynam, na větší ozubená kola, šneky, automobilové hřídele, ojnice, páky řízení, vřetena soustruhů, vrtací tyče či frézovací trny.

Druhým materiálem byl Silumin, což je slitina hliníku a křemíku s obsahem křemíku 4 % – 22 % (nejčastěji 12 %) s velkou odolností proti korozi. Používá se k výrobě odlitků z hliníkových slitin a má dobré slévárenské a mechanické vlastnosti.

Výsledky zjišťování emisivit obou materiálů jsou zaznamenány v Tab. 11.1. Předpoklad, že zjištěné emisivity jsou správné, je zajištěn dostatečnou shodou teploty naměřené pomocí termočládku a pomocí termokamery.

Tab. 11.1 Zjištěné emisivity materiálů

Materiál	Ocel 12 050	Silumin
Teplota zjištěná termočládkem	101,3 °C	108,9 °C
Teplota zjištěná termokameou na nastříkané části vzorku ($\epsilon = 0,96$)	102,7 °C	110,2 °C
Teplota zjištěná termokameou na základním povrchu vzorku ($\epsilon = 0,96$)	398,6 °C	561,7 °C
Zjištěná emisivita ϵ	0,26	0,19

Emisivita povlaků fréz

Emisivita povrchu fréz byla zjišťována u dvou fréz od společnosti Arno a jedné frézy od společnosti Kichi. Tab. 11.2 obsahuje pouze parametry fréz důležité pro uskutečnění a vyhodnocení měření. Kompletní parametry, vlastnosti a použití fréz je možno dohledat v příložených katalozích (Příloha 8 a 9 v elektronické podobě na CD).

Tab. 11.2 Parametry fréz²⁴

Fréza	1	2	3
Označení	Arno FP61846 – 120	Arno FP61846 – 120	Kichi 12 56 18 DIN 844
Povlak	TiAlN – černý	TiAlN – červený	nepovlakovaná
Průměr [mm]	12	12	12
Materiál	PM – HSS	PM – HSS	HSSCo8



Obr. 11.1 Frézy

Zjištěné hodnoty emisivity povrchu fréz jsou v Tab. 11.3. Předpoklad, že zjištěné emisivity jsou správné, je opět zajištěn dostatečnou shodou teploty naměřené pomocí termočlánku a pomocí termokamery.

Tab. 11.3 Výsledky měření

Fréza	1	2	3
Teplota zjištěná termočlánkem	113,5 °C	114,2 °C	106,2 °C
Teplota zjištěná termokameou na nastříkané části frézy ($\epsilon = 0,96$)	114,2 °C	115,4 °C	108,1 °C
Teplota zjištěná termokameou na základním povrchu frézy ($\epsilon = 0,96$)	278,6 °C	310,6 °C	603,2 °C
Zjištěná emisivita ϵ	0,67	0,48	0,12

Jak již bylo uvedeno v Kap. 3.3, emisivita materiálu nezávisí na jeho barvě, ale na jeho molekulové stavbě a na jeho povrchových charakteristikách. Tudíž zjištěné rozdíly emisivit na frézách 1 a 2 nejsou důsledkem rozdílných barev povlaků, ale jejich procentuálním složením jednotlivých přísad.

DISKUSE

V této diplomové práci byla zjišťována emisivita povrchů fréz pouze ve statickém stavu, tedy ve stavu, kdy fréza nekoná pracovní pohyb. Jelikož při rotačním pohybu vzniká iluze, kdy se fréza jeví jako válec, bylo by vhodné při dalších experimentech zjistit, zdali tato iluze a rotační pohyb nezapříčiňují rozdíl zjištěné emisivity termokamerou.

Jelikož byla simultánně s touto diplomovou prací vypracována práce na téma ochrany kamery před prachem a mechanickým poškozením objektivu termokamery a jelikož byl zajištěn spolehlivý způsob zjišťování emisivity fréz, je možné se s termokamerou bezpečně přiblížit k místu řezu a zajistit tak přesnější hodnoty teplotního pole frézy a obrobku. Tímto směrem by bylo vhodné směřovat další experimenty například v rámci jiné diplomové práce.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo popsání problematiky měření povrchových teplot termovizní kamerou Flir SC2000, zjednodušení procesu měření a zajištění snazší interpretace výsledků měření. Za tímto účelem byly naprogramovány tři aplikace v jazyce Visual Basic. První slouží k vyhledávání v tabulkách emisivit materiálů s možností neomezeného rozšiřování databáze emisivit. Druhá aplikace slouží ke zjištění potřebné vzdálenosti mezi měřeným objektem a objektivem, a mimo jiné udává nejmenší měřitelný bod na sledovaném objektu. Poslední aplikací je šablona pro opakovaná měření, která zajišťuje, že protokoly z měření budou mít vždy stejnou strukturu a jejich tvorba bude částečně automatizovaná.

V praktické části bylo sestaveno experimentální pracoviště pro přesné zjišťování emisivity materiálů. Funkčnost a důvody sestavení tohoto pracoviště byly prezentovány na experimentech, kdy byly simulovány situace, při kterých dochází k chybám měření. Tyto chyby byly zachyceny v termogramech a následně byl jejich vliv na měření znázorněn v diagramech.

- Při chybě měření způsobené odrazem teploty byl rozdíl mezi skutečnou teplotou vzorku a teplotou naměřenou **4,7 °C**.
- Chyba vzniklá nesprávnou manipulací se vzorkem zapříčinila teplotní rozdíl **4,1 °C**.
- Chyba vzniklá znečištěním povrchu vzorku zapříčinila teplotní rozdíl **5,1 °C**.

Po úspěšném odstínění chyb pomocí sestaveného pracoviště, byl rozdíl teplot na profilové čáře vložené do termogramu v programu ThermaCam Researcher, vedené po základním povrchu experimentálního vzorku, **1,2 °C**. Na nastříkaném povrchu vzorku barvou ThermaSpray 800 byl naměřen rozdíl **0,7 °C**. Z důvodu možného nedostatečného prohřátí vzorku byla stanovena vzdálenost od středu vzorku, do které je zaručena přesnost měření u vzorku s průměrem 64 mm, na **12 mm**.

Dále byly sledovány časy potřebné k temperování soustavy, po kterých je možné začít s vlastním měřením.

- Čas potřebný k temperování tělesa 1 při zvolených podmínkách, po kterém se teplota tělesa ustálila na **143 °C**, byl **15 minut**.
- Čas potřebný k temperování tělesa 2 při zvolených podmínkách, po kterém se teplota tělesa ustálila na **146 °C**, byl **11 minut**
- Čas potřebný k temperování přípravku při zvolených podmínkách, po kterém se teplota přípravku ustálila na **150 °C**, byl **5 minut**.
- Čas potřebný k temperování vzorku o daných rozměrech a při zvolených podmínkách, po kterém se teplota přípravku ustálila na **97 °C**, byl **3 minuty**.

Dále byly měřeny emisivity povrchu materiálů a povrchu fréz.

- Materiál ocel 12 050 na jehož povrchu jsou stopy po upichování má při teplotě **102,7 °C** emisivitu **0,26**.
- Silumin na jehož povrchu jsou stopy po frézování má při teplotě **110,2 °C** emisivitu **0,19**.
- Fréza Arno FP61846 – 120 s černým povlakem TiAlN má při teplotě **114,2 °C** emisivitu **0,67**.
- Fréza Arno FP61846 – 120 s červeným povlakem TiAlN má při teplotě **115,4 °C** emisivitu **0,48**.
- Fréza Kichi 12 56 18 DIN 844 nepovlakovaná má při teplotě **108,1 °C** emisivitu **0,12**.

Z důvodu zamezení chyb vzniklých nesprávným postupem při práci na pracovišti, byla vypracována metodika měření emisivit materiálů a emisivit povrchu fréz (Příloha 6 a 7).

Z výše uvedeného vyplývá, že pokud vyžadujeme velmi přesné zjištění emisivity a následné určení teploty povrchu materiálu, je třeba zajistit takové podmínky, aby nedocházelo k chybám měření, které zásadně ovlivňují výsledky měření.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obráběn – Kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela, 1. vyd. Praha: Scientia, 1997. 857 s. ISBN 91 – 97 22 99 – 4 – 6
2. BARON, W. R. *Principles of infrared termometry*. [online]. 2008. Dostupné na World Wide Web: <http://www.omega.com/temperature/Z/pdf/z059-062.pdf> [6.3.2009]
3. DRASTICH, A. *Infrazobrazovací systémy v lékařství a ekologii*. [online]. 2008. Dostupné na World Wide Web: http://www.dbme.feec.vutbr.cz/ubmi/courses/MKZS/ZSL_IR_2008.pdf [12.2.2009]
4. DRASTICH, A. *Metodika sběru obrazových dat v infračervené (IR) části spektra*. 1. vyd. Brno: ÚBMI FEKT, 2000. 30 s.
5. DRASTICH, A. *Netelevizní zobrazovací systémy*. 1, vyd. Brno: CERM, 2001. 174 s. ISBN 80 – 214 – 1074 – 1
6. DRASTICH, A. *Zobrazovací systémy v lékařství*. 1. vyd. Zlín: Grafia, 1990. 512 s. ISBN 80 – 214 – 0220 – 2
7. FICKER, Tomáš. *Handbook of building thermal technology*. 1. vyd. Brno: CERM, 2004. 266 s. ISBN 80 – 214 – 2670 – 5.
8. FLIR system AB. [online]. 2009. [cit. 24.2.2009] Dostupné na World Wide Web: <http://www.flir.com/thermography/eurasia/en/>
9. FLIR SYSTEMS AB. *ThermaCAM PM 695: Návod k obsluze*. 2000. 82 s.
10. FOREJT, M. – PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: CERM, 2006. 225 s. ISBN 80 – 214 – 2374 – 9
11. FRŇKA, T. – FRŇKA, V. – MANGL, P. *Zobrazování v IR spektru*. [online]. 2006. [cit. 7.2.2009] Dostupné na World Wide Web: <http://ust.fme.vutbr.cz/termokamera/default.htm>
12. GRIFFITH, B. – TURNER, D. – GOUDEY, H. *Infrared thermographic systems*. [online] 2001. [cit. 13.2.2009] Dostupné na World Wide Web: <http://gaia.lbl.gov/btech/papers/46590.pdf>
13. HALLIDAY, D. – RESNICK, R. – WALKER, J. *Fyzika: část 2: Mechanika – Termodynamika*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2003, 640 s. ISBN 80 – 214 – 1868 - 0
14. HALVORSON, M. *Microsoft Visual Basic 6.0 Professional – Krok za krokem*. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2003. 545 s. ISBN 80 – 7226 – 445 – 1
15. KOČMAN, K – PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: CERM, 2001, 270 s. ISBN 80 – 214 – 1996 – 2
16. LYSENKO, V. *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005, 146 s. ISBN 80 – 7300 – 180 – 2
17. MERCHANT, J. *Infrared temperature measurement theory and application*. [online] 2008 . [cit. 16.3.2009] Dostupné na World Wide Web: <http://www.omega.com/techref/iredtempmeasur.html>
18. POLZER, A. – DVOŘÁK, J. Internetový portál pro CNC a CAD/CAM technologie. [online]. 2006. [cit. 13.3.2009] Dostupné na World Wide Web: <http://cadcam.fme.vutbr.cz/>

19. SCHAUER, P. *Termika a záření*. 1. vyd. Brno: CERM, 1998. 112 s. ISBN 80 – 214 – 0978 – 9.
20. SVATOŠ, J. *Zobrazovací systémy v lékařství*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. 244 s. ISBN 80 – 01 – 01873 – 3
21. TERMOGRAFIE IN DER THEORIE. [online] [cit. 7.4.2009] Dostupné na World Wide Web: <http://www.eco-plan.at/bilder/Thermographieind.Theorie.pdf>
22. *Termokamera.cz*. [online]. [1.2.2009] Dostupné na World Wide Web: <http://www.termokamera.cz>
23. TMV SS s.r.o. Prospekt ThermaSpray 800 [online]. [cit. 23.4.2009] Dostupné na World Wide Web: <http://www.tmvss.cz/images/Clanky/NOVINKY/thermaspray-spot.pdf>
24. WERKZEUGE ARNO. *High performance tooling*. 2008. 148 s.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
ATČ		Absolutně černé těleso
FLIR		Rychlý zobrazovací systém (<i>Forward Looking Infra-Red</i>)
FOV		Zorné pole (<i>Field Of View</i>)
IR		Infračervené (<i>Infrared</i>)
PM - HSS		Prášková rychlořezná ocel
HSSCo8		Rychlořezná ocel s obsahem kobaltu 8%
TR		ThermaCam Researcher
A	[-]	Koeficient absorpce
c	[m·s ⁻¹]	Rychlost světla
D	[-]	Koeficient propustnosti
E _a	[J]	Absorbovaná energie
E _d	[J]	Procházející energie
E _i	[J]	Počáteční energie
E _r	[J]	Odražená energie
f	[Hz]	Frekvence
h	[J·s]	Planckova konstanta
M _{eλ}	[W · m ⁻² · m ⁻¹]	Intenzita spektrálního vyzařování obecného tělesa
M _{eλo}	[W · m ⁻² · m ⁻¹]	Spektrální intenzita vyzařování AČT
P	[W]	Výkon
Q	[J]	Teplo
Q _n	[J]	Teplo odvedené nástrojem
Q _o	[J]	Teplo odvedené obrobkem
Q _{pe}	[J]	Teplo vzniklé v důsledku plastických a elastických deformací
Q _{pr}	[J]	Teplo odvedené prostředím
Q _t	[J]	Teplo odvedené třískou
Q _α	[J]	Teplo vzniklé v důsledku tření hlavního hřbetu nástroje o přechodovou plochu na obrobku
Q _γ	[J]	Teplo vzniklé v důsledku tření mezi čelem nástroje a třískou
R	[-]	Koeficient odrazivosti
S	[mm ²]	Plocha
t	[min]	Čas
t ₁	[min]	Čas temperování tělesa 1
t ₂	[min]	Čas temperování tělesa 2
t _z	[min]	Čas temperování zdroje
T	[K]	Termodynamická teplota
ε	[-]	Emisivita
λ	[m]	Vlnová délka
ξ	[-]	Součinitel teplotní vodivosti

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Výrobní výkres trubky
- Příloha 2 Výrobní výkres válce
- Příloha 3 Výrobní výkres kužele
- Příloha 4 Výrobní výkres vzorku
- Příloha 5 Výrobní výkres přípravku
- Příloha 6 Metodika zjišťování emisivity materiálů
- Příloha 7 Metodika zjišťování emisivity povrchu fréz
- Příloha 8 Katalog nástrojů ARNO (pouze v elektronické podobě na CD)
- Příloha 9 Katalog nástrojů Kichi (pouze v elektronické podobě na CD)
- Příloha 10 Aplikace Visual Basic for Applications (pouze v elektronické podobě na CD)