

NETISKNOUT!
Titulní list

NETISKNOUT!
Zadání

NETISKNOUT!

Licenční smlouva-oboustranně

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá tématem bezdotykového měření povrchových teplot. Popisuje základní fyzikální principy, podle kterých jsou dané přístroje navrhnuté, jejich technické parametry a porovnání mezi jednotlivými typy. Zabývá se aplikací této technologie v různých oblastech lidské činnosti a hlavně jejím využití ve strojírenství.

Klíčová slova

Bezdotykové měření povrchových teplot, infračervené záření, Stefanův-Boltzmannův zákon, Planckův vyzařovací zákon, absolutně černé těleso, termovizní kamera,

ABSTRACT

This Diploma thesis deals with non-contact measurement of surface temperatures. Describes the basic physical principles by which individual instruments are designed, their technical parameters and compares the different types. It deals with the applications of this technology in various fields of human activity and especially its use in engineering

Key words

Contactless measurement of surface temperature, infrared radiation, Stefan-Boltzmann Law, Planck's law, absolute black body, thermal cameras

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ANAXAGOROU, Georgios. *Název: Bezdotykové měření povrchových teplot ve strojírenství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. s. 61. Vedoucí práce: Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

Prohlášení

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

Datum

.....
Georgios Anaxagorou

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 LITERÁRNÍ STUDIE SE ZAMĚŘENÍM NA PROBLEMATIKU MĚŘENÍ POVRCHOVÝCH TEPLOT.....	10
1.1 Základní pojmy a zákony	10
1.1.1 Energie (1, s.5)	10
1.1.2 Tepelná energie (1, s.5).....	10
1.1.3 Vnitřní energie (1, s.5).....	10
1.1.4 Teplo (1, s.5).....	10
1.1.5 Práce (1, s.5).....	10
1.1.6 Nultý termodynamický zákon	11
1.1.7 První termodynamický zákon (1, 2).....	11
1.1.8 Druhý termodynamický zákon (1, 2)	12
1.1.9 Třetí termodynamický zákon (1, 2).....	12
1.1.10 Teplota (1, 2, 6).....	13
1.1.11 Mezinárodní praktická teplotní stupnice (7).....	14
2 PŘÍSTROJE A ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ TEPLoty.....	16
2.1 Hlavní typy, jejich začlenění a princip funkce.....	16
2.1.1 Objev a vývoj teploměru.....	16
2.1.2 Teploměr.....	17
2.1.3 Senzory pro měření teploty.....	18
2.2 Fyzikální princip bezdotykového měření teploty	18
2.2.1 Přenos tepla zářením	18
2.2.2 Elektromagnetické záření	19
2.2.3 Druhy elektromagnetického záření.....	19
2.2.4 Pyrometrie	21
2.2.5 Absolutně černé těleso	25
2.2.6 Šedé těleso	26
2.2.7 Barevná teplota	27
2.2.8 Teoretické základy bezdotykového měření teploty (10, 13).....	28
3 POROVNÁNÍ CHARAKTERISTIK A VLASTNOSTÍ PŘÍSTROJŮ K BEZDOTYKOVÉMU MĚŘENÍ POVRCHOVÝCH TEPLOT	29
3.1 Pyrometry	29
3.1.1 Základní rozdělení pyrometrů.....	29
3.1.2 Jasové pyrometry	29
3.1.3 Pyrometry na celkové záření.....	29
3.1.4 Pásmové pyrometry	30
3.1.5 Uspořádání pásmového pyrometru	30
3.1.6 Použití pyrometrů	31
3.1.7 Vlivy působící při měření pomocí pyrometrů	31
3.1.8 Hlavní zdroje chyb při měření teploty pomocí pyrometrů	32
3.1.9 Laserový zaměřovač u infračervených pyrometrů.....	34
3.2 Termovizní kamery	36

3.2.1 Základní rozdělení termovizních kamer (10)	36
3.2.2 Zásady při práci s termovizní kamerou (10)	36
3.2.3 Měření neprůteplivých objektů v průteplivém prostředí (10)	37
3.2.4 Měření neprůteplivých objektů v částečně neprůteplivém prostředí (10)	37
3.2.5 Měření částečně průteplivých objektů (10)	37
3.2.6 Měření radiační teploty okolního prostředí (10)	38
4 APLIKACE A POUŽITÍ PŘÍSTROJŮ K BEZDOTYKOVÉMU MĚŘENÍ POVRCHOVÝCH TEPLOT V PRAXI	39
4.1 Klady, zápory a vhodné aplikace přístrojů ke bezdotykovému měření povrchových teplot	39
4.2 Vhodné aplikace a použití v oblasti strojírenství (12)	42
4.2.1 Použití poměrového pyrometru	42
4.2.2 Teplotní měření vysokopecní vsázky	43
4.2.3 Měření teploty proudu roztaveného železa během odpichu	43
4.2.4 Bezdotykové měření teploty rychle se pohybujícího drátu	43
4.2.5 Bezdotykové měření teploty skrze mechanickou překážku	44
4.2.6 Měření teploty proudu roztaveného kovu	44
4.2.7 Měření teploty svaru při indukčním svařování	44
4.2.8 Měření teploty v zóně hoření rotační cementářské pece	45
4.2.9 Hlídání plamene pomocí poměrového pyrometru	45
5 NÁVRH PRAKTICKÉHO EXPERIMENTU	46
5.1 Návrh experimentu, hlavní zásady a postup	46
5.1.1 Co vzít na vědomí před začátkem experimentu	46
5.1.2 Protokol o termovizním měření (10)	46
5.1.3 Popis termovizní kamery Flir SC 2000	47
5.1.4 Technologie obloukového svařování	48
5.1.5 Elektrický svařovací oblouk	48
5.1.6 Obloukové svařování v ochranných atmosférách	48
5.1.7 Pracovní podmínky experimentu	50
5.1.8 Sklo z Germania (2, 3, 5, 7)	53
5.1.9 Pracovní postup termovizní kamery Flir SC 2000	54
Závěr	59
Seznam použitých zdrojů	60
Seznam použitých zkratk a symbolů	61
Seznam příloh	62

ÚVOD

V současné době jsou kladeny stále větší požadavky na rozvoj technologických procesů výrobních zařízení, na mechanizaci a automatizaci výroby a kontrolu jakosti.

Zvyšování produktivity práce ve strojírenské výrobě lze zvýšit zaváděním nových výrobních technologií, použitím výkonnějších strojů, jejich mechanizaci a automatizaci a kontrolou jejich účinnosti.

Ve vývoji nových technologií ve strojírenství to často vypadá jako v evolučním procesu, již minimální změny v součástkách, ve strojích, jejich nastavení a použití nástrojů, může znamenat podstatný rozdíl v zdokonalení procesu a lepších výsledku.

Teplota je druhou nejčastěji měřenou fyzikální veličinou hned po měření času. Teplota hraje důležitou roli jako indikátor stavu výrobků nebo částí strojů a zařízení, ať už ve výrobě nebo při kontrole jakosti.

Přesné monitorování teploty zlepšuje kvalitu výrobků a zvyšuje produktivitu. Snižují se prostoje, protože výrobní proces může probíhat bez přerušení a za optimálních podmínek.

Technologie měření povrchových teplot je daleko od toho aby byla dokonalá, má sice svoje nedostatky, ale je to technologie která má velký potenciál a získává stále rozsáhlejší využití v různých oblastech lidské činnosti.

Aplikace technologií bezdotykového měření povrchových teplot v oblasti strojírenství může zlepšit kontrolu, vnímání a pomoci všude, kde teplota hraje kritickou roli, například u odlitků (tuhnutí materiálů), v obrábění (chlazení obrobku, odvod tepla), svařování (oblast ovlivněná teplotou během svařovacího procesu). Je důležitou technologií hlavně tam, kde nelze měřit teplotu tradičními metodami.

1 LITERÁRNÍ STUDIE SE ZAMĚŘENÍM NA PROBLEMATIKU MĚŘENÍ POVRCHOVÝCH TEPLŮT

1.1 Základní pojmy a zákony

Kapitola se zabývá literární studii která je zaměřená na fyzikální zákony a principy na kterých je postavena problematika měření teplot. Zabývá se teorií která je nutnou základnou pro lepší pochopení dané problematiky a obsah v následujících kapitolách.

1.1.1 Energie (1, s.5)

Pojem energie znamená schopnost soustavy konat fyzikální nebo chemické změny, a to buď uvnitř soustavy samé, nebo mimo ni. Známe energii mechanickou, tepelnou, elektrickou, magnetickou, chemickou a jadernou. Tyto energie se mohou dále vyskytovat v různých formách, například energie mechanická se vyskytuje ve formě potenciální, kinetické a podobně.

1.1.2 Tepelná energie (1, s.5)

Tepelná energie je dána součtem energií neuspořádaných pohybů částic (molekul atomů), z nichž se soustava skládá. Pohyb těchto částic a jejich vzájemné silové působení je neusměrněné, což je zásadní odlišnost tepelné energie od všech ostatních druhů energií, které jsou vyvolány usměrněným silovým působením.

Energii termodynamické soustavy lze vypočítat jako sumu energií všech objektů soustavy, závisí na stavu soustavy a je proto veličinou určující stav soustavy.

1.1.3 Vnitřní energie (1, s.5)

Vnitřní energie je jednou z forem tepelné energie, která je jednoznačně dána stavem soustavy a je proto veličinou určující stav soustavy či látky.

1.1.4 Teplo (1, s.5)

Teplo je forma přenosu tepelné energie mezi termodynamickou soustavou a okolím za současné změny stavu soustavy. Jelikož teplo je jedním ze způsobu, jimiž soustava reaguje s okolím a velikost této reakce závisí na podmínkách za kterých ke změně soustavy dochází, nelze zařadit teplo mezi veličiny určující stav soustavy či látky.

1.1.5 Práce (1, s.5)

Práce je forma přenosu energie mezi termodynamickou soustavou a okolím za současné změny stavu soustavy. Jelikož práce je podobně jako teplo jedním ze způsobu působení soustavy na své okolí závisící na podmínkách, za kterých ke změně soustavy dochází, nelze zařadit práci mezi veličiny určující stav soustavy nebo látky.

Jednotkou energie - energie tepelné, tepla a práce je joule [J], který představuje práci vykonanou stálou silou jednoho Newtona [N] působící po

dráze jednoho metru [m] ve směru síly. Další jednotkou je například elektronvolt [eV], nebo dříve používané jednotky kilopondmetr [kpm], watthodina [Wh], kilokalorie [kcal], British thermal unit [Btu] a jiné.

1.1.6 Nultý termodynamický zákon

Jsou-li dvě různé soustavy A - B v termomechanické rovnováze se soustavou C, pak je i soustava A v termodynamické rovnováze se soustavou B.

Pro teploty pak platí (1, s.7):

$$\text{Je-li } T_a = T_c \text{ a } T_b = T_c, \text{ pak je } T_a = T_b \quad (1.1)$$

Tento empirický fakt má zásadní význam pro měření teploty, jelikož lze zvolit třetí látku (nebo soustavu) jako standard kterým je teploměr, pomocí kterého je možné porovnávat teploty jiných látek (nebo soustav), aniž by tyto byly v přímém styku.

1.1.7 První termodynamický zákon (1, 2)

První termodynamický zákon (také první termodynamická věta) představuje ve fyzice formulaci zákona zachování energie. Obecně byl formulován Helmholtzem v roce 1847, pro potřeby termodynamiky byl zákon zachování energie definován Robertem Mayerem v roce 1842.

Podle tohoto zákona je celková energie izolované soustavy stálá (časově neměnná). Energie tedy v izolované soustavě nemůže samovolně vznikat ani zanikat. Druh energie se však může měnit, např. mechanická energie může přecházet na teplo nebo konat pohyb, přeměna na kinetickou nebo dynamickou energii, to znamená přemístění tělesa do jiné polohy nebo pozice.

První hlavní termodynamickou větu je tedy možno vyjádřit následujícím tvrzením. Energie se neztrácí ani nevzniká, ale jeden druh energie se mění na jiný. Jinak řečeno, součet všech energií v izolované soustavě je konstantní. Existují však i jiné formulace, například nelze sestavit stroj, který by trvale dodával mechanickou energii, aniž by spotřeboval odpovídající množství energie jiného druhu. Tato formulace říká, že neexistuje tepelný stroj, který by porušoval zákon zachování energie tím, že by cyklicky vykonával mechanickou práci bez přísunu energie. Takový stroj se označuje jako perpetuum mobile (latinsky stále pohyblivé) prvního druhu.

Dojde-li ke změně vnitřní energie uzavřené neizolované soustavy, poruší se obecně tepelná a mechanická rovnováha mezi soustavou a okolím a dojde také ke sdílení tepla s okolím a silovému působení na okolí, které se projeví jako práce soustavy (objemová). Jinak řečeno, narušíme-li rovnováhu mezi soustavou a okolím přivedením či odvedením tepla dQ [J], dojde obecně ke změně vnitřní energie soustavy dU [J] a jednak bude soustava konat nebo spotřebovávat práci dA [J] dle vztahu:

První termodynamický zákon (1, s.28):

$$dQ = dU + dA, \text{ nebo } dq = du + da \quad (1.2)$$

Vztahy jsou matematickou formulací první formy prvního zákona termodynamiky. Pro měrné teplo q [J.kg], měrnou vnitřní energii u [J.kg] a měrnou práci a [J.kg] platí: $q = Q/m$, $u = U/m$, $a = A/m$.

1.1.8 Druhý termodynamický zákon (1, 2)

Druhý termodynamický zákon (také druhá termodynamická věta) je důležitý termodynamický zákon určující přirozený směr, kterým přírodní procesy probíhají.

První termodynamický zákon je zákonem kvantitativním, který říká, že všechny druhy energie jsou kvantitativně ekvivalentní a vzájemně je lze transformovat. Tedy z hlediska tepelné energie ji lze jako formu energie přeměňovat na jiné formy.

Druhý termodynamický zákon je kvalitativní, uvádí jak probíhají tepelné děje v případě, že je tepelnou energii možno přeměňovat s určitým omezením. Je empirický a pravděpodobnostní. Veličina která charakterizuje směr vývoje systému se nazývá entropie.

Historicky známe slovní formulace druhého zákona termodynamiky, jsou na první pohled různé, jelikož se liší svou formou, která se vztahuje vždy jen k určitému jevu v přírodě. Tyto slovní formulace mají však společnou podstatu, která vymezuje oblast možných jevů, a to v široké množině jevů vyhovujících prvnímu zákonu termodynamiky. Ze známých formulací druhého zákona termodynamiky lze vybrat následující (1, s.57):

- není možné realizovat perpetuum mobile druhého druhu,
- nelze získávat ze soustavy neživých látek práci tím, že ji ochlazujeme pod teplotu nejchladnější látky v okolí (Kelvin),
- není možné sestrojít periodicky pracující stroj, který by nezpůsobil nic jiného, než by odebíral teplo ze zásobníku a konal tomuto teplu ekvivalentní práci (Kelvin - Planck),
- teplo nemůže samovolně přecházet z tělesa o teplotě nižší na těleso o teplotě vyšší (Clausius).

1.1.9 Třetí termodynamický zákon (1, 2)

Třetí termodynamický zákon (též třetí termodynamická věta) popisuje chování látek v blízkosti absolutní nulové teploty.

Tato věta umožňuje určit absolutní hodnotu entropie, což má význam při určování hodnot volné energie, která má vliv na průběh chemických reakcí.

Tento zákon nijak nevyplývá z předchozích termodynamických zákonů, lze jej však odvodit ze statistické fyziky a kvantové mechaniky.

Planck (1912) vyslovil předpoklad, že konvergence změny entropie je možná jen tak, že sama absolutní hodnota entropie látek S je při $T=0$ K rovna nule. Tento předpoklad je Planckova formulace třetího termodynamického zákona: Absolutní entropie každé kondenzované chemicky čisté látky má při teplotě 0 K nulovou hodnotu a lze jej vyjádřit rovnicí.

Planckova formulace třetího termodynamického zákona (1, s.80):

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0 \quad (1.3)$$

Vztah je považován za matematické vyjádření třetího termodynamického zákona.

1.1.10 Teplota (1, 2, 6)

Teplota je základní fyzikální veličinou (nelze ji definovat pomocí jiných veličin) a základní termodynamickou stavovou veličinou. Je makroskopickým projevem tepelného pohybu molekul v látce, přičemž je mírou střední energie tohoto pohybu. Rozlišujeme termodynamickou (absolutní) teplotu T , která se udává v Kelvinech [K] a Celsiovu teplotu t , která se udává v Celsiových stupních [°C]. Kelvin je definován jako 273,15 - ta část termodynamické teploty trojného bodu vody (0,01 °C). Celsiuv stupeň je definován jako jedna setina rozdílu teploty varu vody (100 °C) a teploty tuhnutí vody (0 °C) při tlaku 0,101325 MPa. Svou velikostí je Celsiův stupeň roven Kelvinu.

Tab.1.1 Teplotní stupnice

Stupnice	Kelvinova	Celsiova	Fahrenheitova
Jednotka	Stupeň Kelvina	Stupeň Celsia	Stupeň Fahrenheita
Značka	K	°C	°F
Dolní referenční hodnota	0 K	0 °C	0 °F
Horní referenční hodnota	273,15 K	100 °C	96 °F
Navrhl	W. Thomson Lord Kelvin	Anders Celsius	Gabriel Fahrenheit
Rok vzniku	1848	1742	1714

Dolní referenční hodnota Kelvina 0 K odpovídá teplotě absolutní nule v stupnici Celsia -273,15 °C. Absolutní nula je hypotetický stav látky ve které se zastaví veškerý tepelný pohyb částic.

Horní referenční hodnota Kelvina 273,15 K odpovídá v stupnici Celsia 0 °C.

Dolní referenční hodnota Fahrenheita 0°F odpovídá tělesné teplotě zdravého člověka v stupnici Celsia 35,6 °C.

Horní referenční hodnota Fahrenheita 96 °F odpovídá teplotě chladicí směsi ledu, vody a salmiaku (negomorské soli) v stupnici Celsia -17,8 °C.

Tab.1.2 Přepočítání teploty mezi stupnicemi

Stupnice	Kelvinova	Celsiova	Fahrenheitova
Kelvinova	$= T/K$	$= t/^{\circ}\text{C} + 273,15$	$= (t/^{\circ}\text{F} + 459,67) \cdot 5/9$
Celsiova	$= T/K - 273,15$	$= t/^{\circ}\text{C}$	$= (t/^{\circ}\text{F} - 32) \cdot 5/9$
Fahrenheitova	$= T/K \cdot 1,8 - 459,67$	$= t/^{\circ}\text{C} \cdot 1,8 + 32$	$= t/^{\circ}\text{F}$

Měření teploty se provádí nejčastěji na principu sledování roztažnosti látek, nebo sledováním změn elektrických vlastností látek zapříčiněných změnou jejich teploty. Na principu roztažnosti pevných látek jsou založeny bimetalové teploměry, na principu roztažnosti kapalin pracují rtuťové, lihové a pentanové teploměry a na principu roztažnosti plynu pracují plynové teploměry (roztažnost plynu způsobí deformaci prostoru čidla, ze které lze usuzovat na teplotu). Nejčastější používané principy měření teploty pomocí změn elektrických vlastností látek (elektrických veličin) jsou měření elektromotorické síly (termočlánky), měření elektrického odporu (odporová čidla, termistory, polovodičové diody a tranzistory) a měření frekvence krystalu (frekvenční čidla která mívají přesnost až 10 K). V praxi se setkáváme i s bezdotykovým měřením teploty (radiační teploměry, termovize), které je vlastně založeno na měření tepelného toku sdíleného sáláním. Potřebná čidla ve vlastním přístroji pro bezdotykové měření teplot mohou být někdy realizována některým z výše uvedených způsobů měření teplot. Pro měření teploty se někdy používá i sledování změn skupenství látek, jejich barvy, nebo jiných vlastností (tání ledu, var vody, zbarvení tekutých krystalů apod.).

1.1.11 Mezinárodní praktická teplotní stupnice (7)

Z praktických důvodů a přesnější měření teplot byly snahy o zavedení mezinárodně platné teplotní stupnice. První pokusy se datují do roku 1927, dále pak 1948.

V roce 1960 a 1968 byla mezinárodní teplotní stupnice revidována. Od té doby je známá pod názvem Mezinárodní praktická teplotní stupnice.

Podle daných přesných definic si lze kterýkoliv bod stupnice (teplotu) realizovat buď experimentálně, nebo podle dohodnutých mezinárodních interpolačních vztahů.

Jednotlivé body byly voleny tak, aby co nejpřesněji vyjadřovaly teploty, které přísluší termodynamické stupnici.

U mezinárodní praktické teplotní stupnice jsou zákonem stanoveny i způsoby interpolace mezi jednotlivými teplotními body. Používají se speciální etalonové teploměry.

I když jednotlivé body stupnice byly získány velmi přesnými experimentálními metodami, jsou pouze přibližnou realizací termodynamické stupnice. Pro většinu technických měření jsou dostatečně přesné. Příslušné definice a teploty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab.1.3 Mezinárodní praktická stupnice. Primární body z roku 1968 IPTS - 68 (International Practical Temperature Scale) (7, s.73)

	Pevný bod	T 68 / K /	t 68 / °C
1	Trojný bod rovnovážného vodíku	13,81	-259,34
2	Bod varu rovnovážného vodíku při $p=0,0333306$ MPa	17,042	-256,108
3	Bod varu rovnovážného vodíku	20,28	-252,87
4	Bod varu neonu	27,102	-246,048
5	Trojný bod kyslíku	54,361	-218,789
6	Bod varu kyslíku	90,188	-182,962
7	Trojný bod vody	273,16	0,01
8	Bod varu vody	373,15	100
9	Bod tuhnutí zinku	692,73	419,58
10	Bod tuhnutí stříbra	1235,08	961,93
11	Bod tuhnutí zlata	1337,58	1064,43

Všechny body varu a tuhnutí jsou vztaženy k normálnímu tlaku $p=0,101325$ MPa. Součástí mezinárodní praktické stupnice jsou i korekční vztahy pro změnu tlaku.

Protože uvedené primární body jsou poměrně hrubé, jsou doporučovány některé sekundární body jako například:

Tab.1.3 Mezinárodní praktická stupnice. Sekundární body (7, s.73)

	Pevný bod	T 68 / K /	t 68 / °C
1	Bod tuhnutí rtuti	234,28	-38,87
2	Bod tuhnutí cínu	505,1181	231,9681
3	Bod tuhnutí niklu	1725,15	1452
4	Bod tuhnutí platiny	2042,15	1769
5	Bod tuhnutí wolframu	3653,15	3380

2 PŘÍSTROJE A ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ TEPLoty

2.1 Hlavní typy, jejich začlenění a princip funkce

Základní princip měření teploty lze rozdělit do dvou hlavních skupin:

Dotykové měření senzor musí se dotýkat objektu či látky, jejíž teplotu má měřit. Využívá se zde přímého přenosu tepla mezi dvěma objekty. Lze ho využít všude tam, kde je snadný přístup k měřenému objektu, okolní prostředí nebo sám měřený objekt chemicky nebo jinak nereaguje se senzorem.

Bezdotykové měření senzor se nachází v určité vzdálenosti od měřeného objektu a tím nedochází k vzájemnému ovlivňování. Využívá se zde jevu, kdy každý objekt o určité teplotě vyzařuje určitou vlnovou délku infračerveného záření, princip se nazývá pyrometrie.

2.1.1 Objev a vývoj teploměru

Před objevem zařízení k měření teploty, se teplota určovala podle tělesných pocitů, při výrobě kovů a keramiky se lidé řídili barvou rozžhavených předmětů nebo roztavením kovů.

První metoda měření teploty byla pomocí roztažnosti kapalin. První doklady o tom jsou ze starověku. Hérón Alexandrijský popsal zařízení pracující na roztažnosti vzduchu (později nazývané vzduchový termoskop), který je nejstarším doloženým přístrojem k indikaci tepelných stavů.

Galileo Galileji, slavný profesor univerzity v Padově v Itálii, na začátku 17. století využil tepelné roztažnosti vzduchu k měření teploty. Jeho primitivní teploměr byl tvořen tenkou skleněnou trubičkou dlouhou asi 30 cm a zakončenou baňkou. Baňku zahřál rukou a teploměr (vzduchový termoskop) vložil otevřeným koncem trubičky do nádoby s obarvenou vodou. Chladnoucí vzduch se smršťoval a vlivem tlaku okolního vzduchu na hladinu, voda vnikala do trubičky. Po vychladnutí přejímala baňka teplotu okolního vzduchu a výška vodního sloupce v trubičce se měnila podle změn objemu vzduchu v baňce, který se zase měnil podle teploty vzduchu. Na rozdíl od dnešních teploměrů při oteplení hladina klesala a při ochlazení stoupala. Přístroj ještě neměl stupnici.

Po Galileovi experimentovali s podobnými teploměry Otto von Guericke a Gaspar Schott. Zdokonalili termoskop tím, že použili uzavřeného systému se dvěma baňkami na koncích spojovací trubička ve tvaru U, v níž byla tekutina. Ještě v 17. století se objevily teploměry, v nichž je teploměrnou látkou kapalina.

Zřejmě první teploměr sestrojil roku 1631 francouzský lékař Jean Rey, který použil jako teploměrnou látku vodu. Nevýhodou tohoto teploměru byla malá roztažnost vody. Proto se hledaly jiné vhodné tekutiny. Jako nejvhodnější se ukázaly líh a rtuť.

První lihový teploměr sestrojil roku 1641 toskánský velkovévoda Ferdinand II., Gabriel David Fahrenheit v roce 1714 použil pro měření tepelné roztažnosti rtuť. Zavedl první reprodukovatelnou tepelnou stupnici, kde bod tání ledu označil jako +32° a bod varu vody 212°.

Švéd Andreas Celsius (1701 - 1744) zavedl známou teploměrnou stupnici, kde pro teplotní interval mezi táním ledu a varem vody použil 100 dílků (°C). Původní stupnice však byla obrácená (0 °C byl bod var u vody, 100 °C bod tání ledu).

Teprve další významný vědec Caři Linné (1707 - 1778) upravil stupnici do dnešní podoby.

Lékařský teploměr vynalezl roku 1866 sir Thomas Clifford Allbutt, anglický fyzik.

2.1.2 Teploměr

Teploměr je zařízení sloužící k měření teploty. Většinou je princip teploměru založen na tepelné roztažnosti jednotlivých látek, kdy je objem měrné látky závislý na její teplotě. Tyto teploměry se pak nazývají dilatační. V současnosti však existují i další metody zjišťování teploty.

Hlavní rozdělení teploměru (7, s.74):

Dotykové teploměry jsou takové, jejichž činná část je v přímém styku s prostředím jehož teplotu měříme.

Bezdotykové teploměry měří teplotu bez přímého dotyku z určité vzdálenosti od měřeného prostředí.

Zvláštní teploměry jejich princip vychází ze specifických změn fyzikálních vlastností některých látek s teplotou.

Tab.2.1 Rozdělení teploměru (7, s.74)

Dotykové	Bezdotykové	Zvláštní
Dilatační - skleněné, tlakové, tyčové, dvojkové	Pyrometry - radiační, pásmové, spektrální	Keramické, žároměrky
Elektrické - odporové, termoelektrické	infrafotografie	Teploměrná tělíska
Speciální - krystalové, teploměrné barvy, nálepku tablety	termovize	

Rozdělení teploměrů podle principu fungování.

Kapalinový teploměr- k měření teploty se využívá teplotní roztažnost teploměrné kapaliny které obsahuje jeho měřicí kapilára (rtuť, líh).

Bimetalový teploměr- k měření teploty se využívá bimetalový pásek složený ze dvou kovů s různými teplotními součiniteli délkové roztažnosti. Při změně teploty se pásek ohýbá a tento pohyb se přenáší na ručičku přístroje.

Plynový teploměr- k měření teploty se využívá závislost tlaku plynu na teplotě při stálém objemu plynu, popřípadě závislost objemu plynu na teplotě při stálém tlaku.

Odporový teploměr- k měření teploty se využívá závislost elektrického odporu vodiče nebo polovodiče na teplotě.

Termoelektrický teploměr (také termočlánek)- k měření teploty se využívá termoelektrický jev (elektrony, které jsou nositeli elektrického proudu se významně podílejí na vedení tepla). Změnou teploty spoje dvou různých kovů se mění vzniklé termoelektrické napětí.

Radiační teploměr (infrateploměr)- teploměr určený k měření vysokých teplot založený na zákonech tepelného záření (Planckův vyzařovací zákon, Wienův posunovací zákon, Stefanův-Boltzmannův zákon). Měří záření vysílané tělesy do okolí.

Speciální teploměry- kontaktní teploměr sepne kontakt při dosažení nastavené teploty. Používá se v regulaci a automatizaci, například termostat pro klimatizaci nebo v akváriu.

2.1.3 Senzory pro měření teploty

Podle principu měření teploty lze senzory rozdělit do dvou skupin. Senzory pro dotykové měření teploty a senzory pro bezdotykové měření teploty.

U dotykové měření teploty se senzor musí dotýkat objektu či látky jejíž teplotu má měřit. Využívá se zde přímého přenosu tepla mezi dvěma objekty. Metodu lze využít všude tam, kde je snadný přístup k měřenému objektu, okolní prostředí nebo sám měřený objekt chemicky, tepelně nebo jinak nereaguje se senzorem. U bezdotykové měření teploty se senzor nachází v určité vzdálenosti od měřeného objektu, nedotýká se objektu a tím nedochází k vzájemnému ovlivňování. Využívá se zde jevu, kdy každý objekt o určité teplotě vyzařuje určitou vlnovou délku infračerveného záření. Pyrometrie je bezdotykové měření teploty daného předmětu pomocí měření jeho vlastních emisí a emisivity.

2.2 Fyzikální princip bezdotykového měření teploty

2.2.1 Přenos tepla zářením

Dva základní mechanismy přenosu tepla jsou vedení a konvekce. V obou mechanismech teplo se přenáší pomocí zprostředkující látky. Pokud se hovoří o vedení tepla, musíme mít vždy nějakou látku či hmotu, kterou se teplo šíří vedením nebo též se někdy nazývá tepelnou difúzí. Pokud jde o konvekci, pak je situace podobná, musí existovat nějaká proudící tekutina (kapalina, plyn, tekutý kov), která odnímá nebo přivádí teplo nejčastěji nějaké pevné stěně.

Můžeme se však setkat i se zcela odlišným mechanismem přenosu tepla. Teplo může být přeneseno z jednoho místa na druhé aniž by muselo být

přítomno zprostředkující medium. Přenos tepla lze tedy realizovat i v absolutním vakuu. A tímto mechanismem je elektromagnetické záření.

2.2.2 Elektromagnetické záření

Elektromagnetické záření je kombinace příčného postupného vlnění magnetického a elektrického pole, tedy elektromagnetického pole. Elektromagnetickým zářením se zabývá obor fyziky nazvaný elektrodynamika, což je podobor elektromagnetizmu. Infračerveným zářením, viditelným světlem a ultrafialovým zářením se zabývá optika.

Jakýkoli elektrický náboj pohybující se s nenulovým zrychlením vyzařuje elektromagnetické vlnění. Když vodičem (nebo jiným objektem, např. anténou) prochází střídavý elektrický proud, vyzařuje elektromagnetické záření o frekvenci proudu. Na elektromagnetické záření se stejně jako na cokoli jiného dá nahlížet jako na vlnu nebo proud částic. Jako vlnu je charakterizuje rychlost šíření (rovná rychlosti světla ve vakuu $3 \cdot 10^8$ m/s), vlnová délka a frekvence. Částicí elektromagnetického vlnění je foton.

2.2.3 Druhy elektromagnetického záření

Řazeno sestupně podle vlnové délky:

Rádiové vlny- dále se dělí podle vlnové délky na jednotlivá pásma: Extrémně nízká frekvence (ELF Extreme Low Frequency), super nízká frekvence (SLF Super Low Frequency), ultra nízká frekvence (Ultra Low Frequency), velmi nízká frekvence (VLF Very Low Frequency), nízká frekvence (LF Low Frequency), střední frekvence (Medium Frequency), vysoká frekvence (HF High Frequency), velmi vysoká frekvence (VHF Very High Frequency), ultra vysoká frekvence (UHF Ultra High Frequency), super vysoká frekvence (Super High Frequency), extrémně vysoká frekvence (EHF Extrême High Frequency).

Infračervené záření (také IR, z anglického infrared)- je elektromagnetické záření s vlnovou délkou větší než viditelné světlo, ale menší než mikrovlnné záření. Název značí pod červenou (z latiny infra = pod). Infračervené záření zabírá ve spektru 3 dekády a má vlnovou délku mezi 760 nm a 1 mm, resp. energii fotonů mezi 0,0012 a 1,63 eV. Infračervené záření je často považováno za tepelné záření.

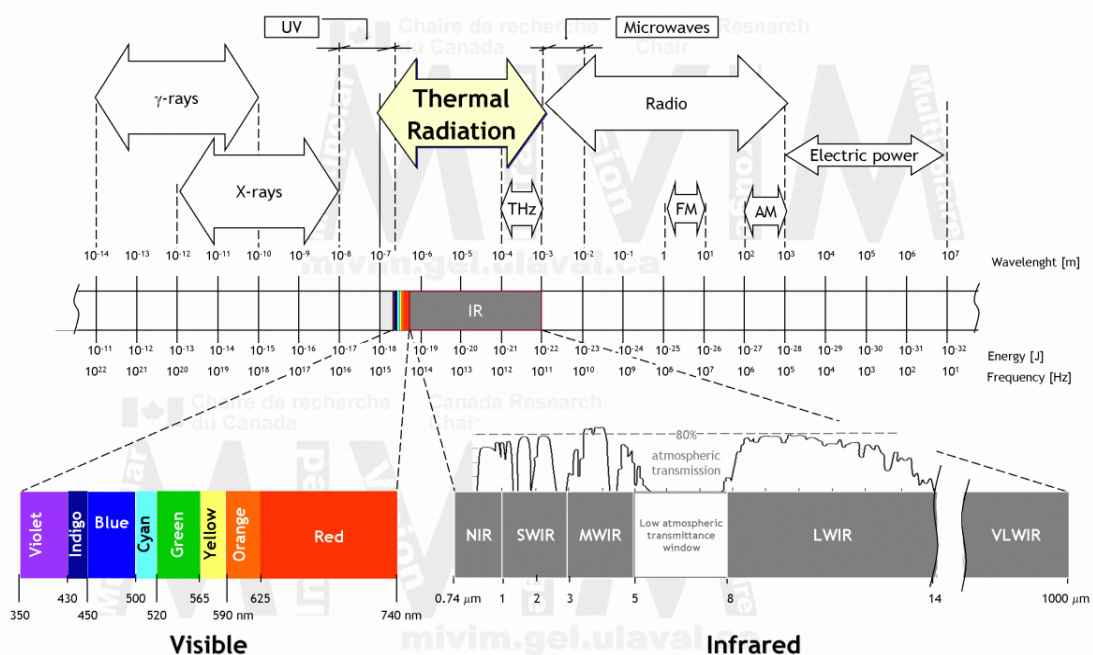
Infračervené záření se dále dělí na jednotlivá pásma. Toto dělení ovšem není jednoznačně dané.

- blízké (near) infračervené záření neboli NIR (Near Infrared)
IR-A podle normy DIN, vlnová délka 0,74–1,0 μm , definováno podle vodní absorpce, často používané v telekomunikacích optických vláken.
- IR krátké vlnové délky (short wave) neboli SWIR (Short Wave Infrared)
IR-B podle DIN, vlnová délka 1–3 μm , při 1450 nm značně roste vodní absorpce.
- IR střední vlnové délky (medium wave) neboli MWIR (Medium Wave Infrared)
IR-C podle DIN, též prostřední (intermediate IR neboli IIR), 3–5 (8) μm .

- IR dlouhé vlnové délky (long wave) neboli LWIR (Long Wave Infrared) IR-C podle DIN, 8–14 μm .
- dlouhé (far) infračervené záření neboli FIR (Far Infrared) někdy VLWIR (Very Long Wave Infrared) 14–1000 μm .

Tab.2.2 Rozdělení infračervených detektorů

Spektrální pásmo	Vlnová délka [μm]	Materiál detektoru	Aplikace - použití
NIR	0,74-1	SiO ₂	Telekomunikace
SWIR	1-3	InGaAs, PbS	Cenzory
MWIR	3-5	InSb, PbSe, PtSi, HgCdTe	Měření vysokých teplot
LWIR	8-14	HgCdTe	Venkovní teploty
VLWIR	14-1000		Spektrometrie, astronomie



Obr. 2.1 Spektrum Elektromagnetického Záření

Další často používané rozdělení pro infračervené záření je (zdroj):

- infračervené záření blízké (0,76–5 μm)
- infračervené záření střední (5–30 μm)
- infračervené záření dlouhé (30–1000 μm)

Pásmu mezi 100 μm a 1 mm se říká také submilimetrové vlny nebo terahertzové záření.

Viditelné světlo je elektromagnetické záření o vlnové délce 400–750 nm. Vlnové délky světla leží mezi vlnovými délkami ultrafialového záření a infračerveného záření. V některých oblastech vědy a techniky může být světlem chápáno i elektromagnetické záření libovolné vlnové délky. Tři základní vlastnosti světla (a elektromagnetického vlnění vůbec) jsou svítivost (amplituda), barva (frekvence) a polarizace (úhel vlnění). Kvůli dualitě částice a vlnění má světlo vlastnosti jak vlnění, tak částice. Studium světla a jeho interakcemi s hmotou se zabývá optika.

Ultrafialové záření (Používá se zkratka UV, z anglického ultraviolet) záření je elektromagnetické záření s vlnovou délkou kratší než má viditelné světlo, avšak delší než má rentgenové záření. Pro člověka je neviditelné, existují však živočichové (ptáci, plazi, některý hmyz), kteří jej dokáží vnímat. Jeho přirozeným zdrojem je Slunce.

Rentgenové záření je forma elektromagnetického záření o vlnových délkách 10 nanometrů [nm] až 100 pikometrů [pm]. Využívá se při lékařských vyšetřeních a v krystalografii. Jedná se o formu ionizujícího záření a jako takové může být nebezpečné. Záření vlnové délky větší než 0,1 nm je nazýváno měkké a kratší tvrdé rentgenové záření. Vlnové délky nejenergičtější části se částečně překrývají s těmi záření gama, avšak rozlišujeme je dle původu. Foton rentgenového záření vzniká při interakcích vysoce energetického elektronu, kdežto záření gama při procesech uvnitř jádra atomu. Rentgenové záření je též využíváno v analytické chemii. Částice látky jsou ionizovány rentgenovým zářením. Vzniklé sekundární rentgenové záření, které je charakteristické pro prvky, je analyzováno detektorem a přiřazeno konkrétním prvkům, ze kterých se analyzovaná látka skládá. Tato analytická metoda se nazývá rentgenfluorescenční spektroskopie.

Gama záření (psáno řeckým písmenem gama γ) je vysoce energetické elektromagnetické záření vznikající při radioaktivních a jiných jaderných a subjaderných dějích. Je často definováno jako záření o energii fotonů nad 10 keV, což odpovídá frekvencím nad 2,42 EHz či vlnovým délkám kratším než 124 pikometrů [pm], přestože do tohoto spektrálního pásma zasahuje i velmi tvrdé rentgenové záření. To souvisí se skutečností, že hranice není stanovena uměle, ale tyto druhy záření se rozlišují dle svého zdroje, přičemž se samo záření jinak fyzikálně neliší. Záření gama je druh ionizujícího záření. Do materiálů proniká lépe než záření alfa nebo záření beta, která jsou korpuskulární (ani jedno není elektromagnetické záření), ale je méně ionizující.

2.2.4 Pyrometrie

Pyrometrie je bezdotykové měření teploty daného předmětu pomocí měření jeho vlastních emisí a emisivity. Tak se dá pomocí Stefan-Boltzmannova zákona určit povrchová teplota horkého tělesa, zatímco se měří jím vyzařované záření.

Stefanův-Boltzmannův zákon publikovaný roku 1879 Ludwigem Boltzmannem a Josefem Stefanem popisuje celkovou intenzitu záření absolutně černého tělesa. Tento zákon říká, že intenzita vyzařování roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty zářícího tělesa. Zákon lze získat integraci spektrální hustoty zářivého toku Černého objektu, a to přes celý rozsah vlnových délek (od nuly do nekonečno) a za konstantní teploty. Výsledkem je hustota zářivého toku E_o , pro kterou platí:

Stefanův-Boltzmannův zákon (1, s.248):

$$E_o = \sigma T^4 \quad (2.1)$$

Kde E_o je zářivost černého tělesa [W/m^2], σ je Stefan-Boltzmannova konstanta která má hodnotu $\sigma=5,669 \cdot 10^{-8}$ [$W/m^2 \cdot K^4$] a kde T je teplota v Kelvinech [K].

V některých literaturách se můžeme setkat s tím, že místo E_o se používá označení I a reprezentuje celkovou intenzitu záření tělesa (podíl výkonu a plochy).

Přístroj, který měří teplotu na základě pyrometrie se nazývá pyrometr, také optický pyrometr, pyranometr nebo pyrhelimetr. Emisivita je schopnost předmětu vysílat elektromagnetické záření. Hodnota emisivity se přitom pohybuje v rozsahu od 0 do 1, přičemž hodnoty 1 dosahuje absolutně černé těleso, které veškerou energii vyzáří, zatímco těleso, které nevyzařuje žádnou energii, dosahuje emisivity 0. Nejvyspělejší pyrometry měří jak emisi, tak i emisivitu objektu, zatímco jiné pyrometry požadují po uživateli zadání emisivity jako vstupní hodnoty (číselníková nebo digitální komunikace). Pyrometry jsou využívány k různorodým účelům, od monitorování teploty lidského těla až po měření teplot v průmyslových provozech při tvorbě kovů a výrobě polovodičů, či měření teploty povrchu Slunce.

Emisivita ε závisí na materiálu, úpravě povrchu, oxidaci povrchu a je funkcí vlnové délce λ a teplotě T , obecně platí:

Emisivita ε (1, s.253):

$$\varepsilon = f(\lambda, T) \quad (2.2)$$

Termovizní měření vyžaduje znalost fyzikálních základů této měřicí metody, pro možnost vhodného uspořádání měření a získání co nejvíce kvalitních záznamů pro další zpracování a kvantitativní vyhodnocení. Mezi základní zákony potřebné pro pochopení termovizních měření patří již zmíněný Stefanův-Boltzmannův zákon, dále Planckův vyzařovací zákon, Wienův zákon a také první a druhý Kirchhoffův zákon.

Tab.2.3 Emisivita pro vybrané povrchy (14, s.72-76)

Charakteristika povrchu	Teplota °C	Emisivita povrchu
Absolutně černé těleso	-	1,00
Papír	38-371	0,93
Guma, Mekka šedá	74	0,86
Porcelán	72	0,92
Sklo, 6,88 mm	282	0,93
Sklo, 6,88 mm	838	0,47
Malta	38-260	0,90-0,92
Sníh, drobné částičky	-7	0,82
Písek	20	0,76
Půda, země povrch	38	0,38
Cihla červená drsná	21	0,93
Dřevo, dubové hoblované	38	0,91
Voda	38	0,67

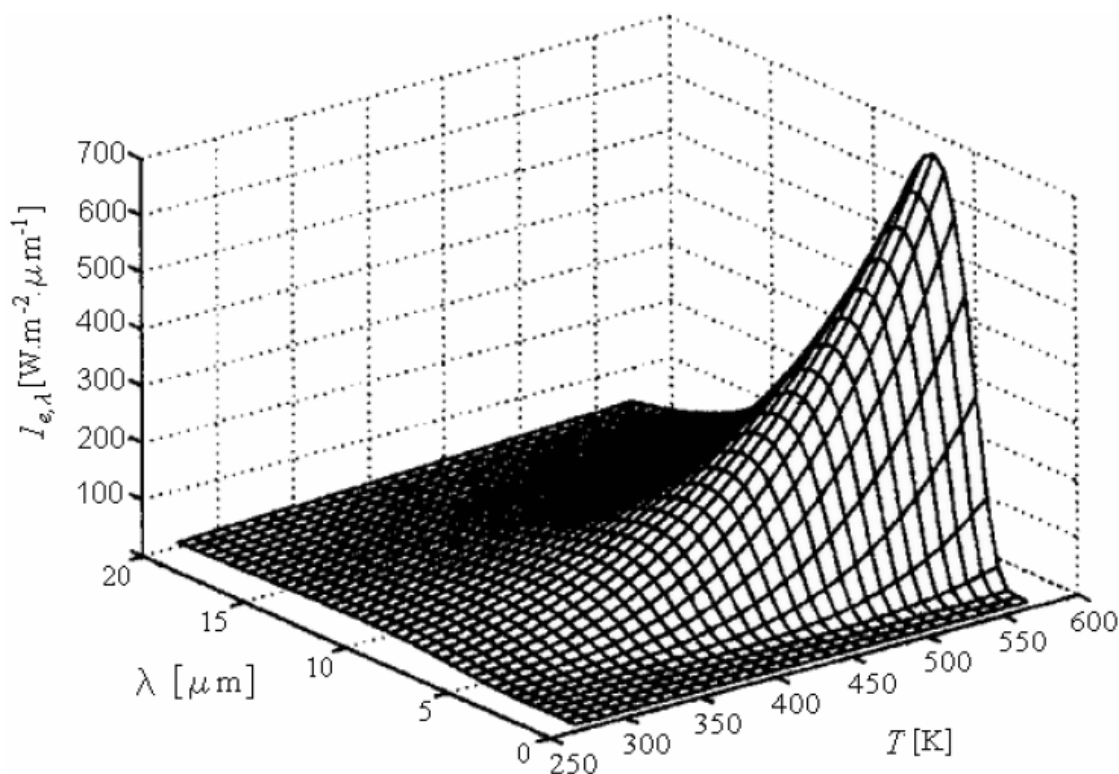
Planckův vyzařovací zákon udává závislost spektrální hustoty intenzity na vlnové délce a teplotě. Tuto formuli odhadl v roce 1900 Max Planck (1858 - 1947) a o rok později přišel i na způsob jakým to lze odvodit, za což byl později v roce 1918 oceněn Nobelovou cenou za fyziku.

Planckův vyzařovací zákon (10):

$$E_{o\lambda} = \frac{c_1 \times \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \times T}\right) - 1} \quad (2.3)$$

Kde $E_{o\lambda}$ [W.m⁻³] je spektrální hustota zářivého toku černých objektů do poloprostoru, kde T je udávaná teplota objektu v Kelvinech [K], λ je vlnová délka záření udávaná v metrech [m], C_1 a C_2 jsou konstanty, $C_1=3,74 \cdot 10^{-16}$ [W.m] a $C_2=1,44 \cdot 10^{-2}$ [K.m].

V následujícím obrázku je znázornění Planckova vyzařovacího zákona v energetickém tvaru. Teplotní závislost generovaného spektra infračerveného záření na teplotě tělesa a vlnové délce.



Obr. 2.2 Znázornění Planckova vyzařovacího zákona v energetickém tvaru. (9, s.1)

Wienův posunovací zákon říká, že rostoucí teplotou zářiče se posouvá maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku E_{λ} ke kratším vlnovým délkám. Tento zákon formuloval v roce 1893 Wilhelm Wien (1864-1928) pouze na základě empirických zkušeností a v roce 1911 za tento zákon a související objevy získal Nobelovu cenu za fyziku. Dnes lze Wienův zákon odvodit z obecnějšího Planckova vyzařovacího zákona. Matematicky to lze popsat rovnicí:

Wienův posunovací zákon (10):

$$\lambda_{\max} \times T = 2,8978 \times 10^{-3} [\text{m.K}] \quad (2.4)$$

Kde T je teplota objektu (soustavy) v Kelvinech [K] a kde λ je vlnová délka jeho záření udávaná v metrech [m].

První Kirchhoffův zákon se zabývá interakci záření s objektem. Říká, že součet reflektance r (někdy udáváno v české literatuře jako odrazivost a značeno písmenem ρ) což je míra schopnosti odrážet záření, absorptance α a transmittance t (taky udáváno jako prostupnost a značeno písmenem τ) daného objektu je vždy roven jedné.

První Kirchhoffův zákon (1, s.249):

$$r + \alpha + t = 1 \quad (2.5)$$

Druhý Kirchhoffův zákon konstatuje, že objekt je tak dokonalým zářičem, jak dovede záření pohlcovat a proto platí:

Druhý Kirchhoffův zákon (1, s.251):

$$\varepsilon = \alpha \quad (2.6)$$

Kde ε je emisivita objektu a α je jeho absorptance.

Při interakci záření s povrchem je třeba také uvažovat o kvalitě povrchu, který má vliv na šíření záření po odrazu. Z tohoto pohledu rozlišujeme dva mezní typy povrchů, a to zrcadlový povrch, kdy úhel dopadu záření je roven úhlu odrazu a difúzní povrch, který dopadající záření odráží rovnoměrně do všech směrů a projevuje se pak jako sekundární Lambertův zdroj.

2.2.5 Absolutně černé těleso

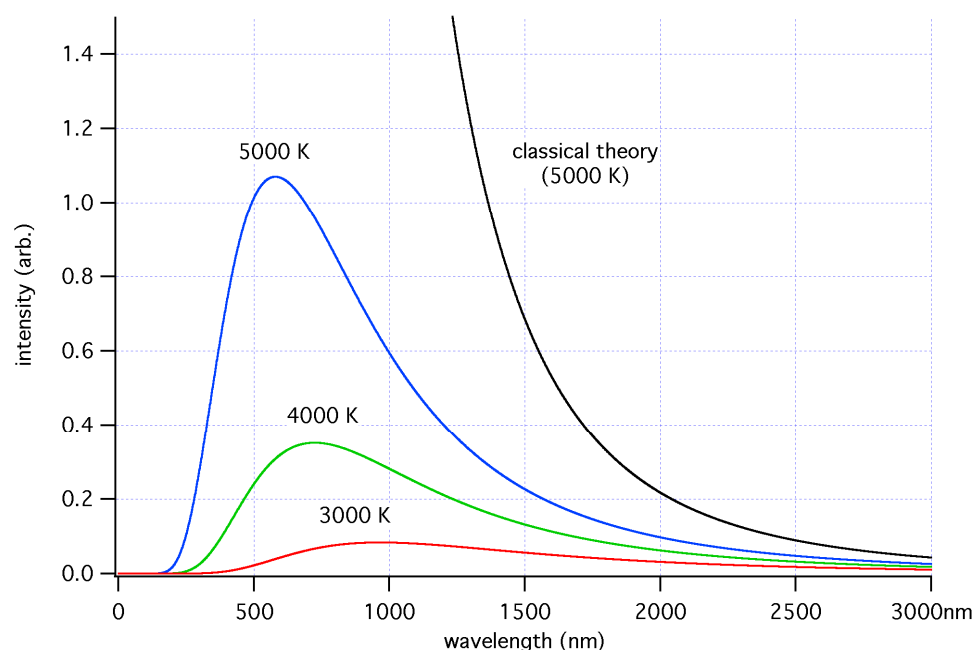
Absolutně černé těleso, černé těleso a nebo černý zářič je ideální těleso, které pohlcuje veškeré dopadající záření všech vlnových délek na jeho povrch. Absolutně černé těleso je současně ideální zářič, ze všech možných těles o stejné teplotě vysílá největší možné množství zářivé energie. Celkové množství energie, které se vyzáří z povrchu absolutně černého tělesa za jednotku času a rozložení intenzity záření podle vlnových délek závisí jen na jeho teplotě.



Obr. 2.3 Kalibrační černá tělesa (13, s.4)

- 1 – OMEGA BB702 ($\varepsilon = 0,96$, rozsah 20 až 215 °C)
- 2 – HYPERION-R ($\varepsilon = 0,995$, rozsah -10 až 80 °C),
- 3 – GEMINI-R ($\varepsilon = 0,995$, rozsah 50 až 550 °C)
- 4 – PEGASUS-R ($\varepsilon = 0,995$, rozsah 150 až 1200 °C)

Záření Slunce se poměrně dobře blíží záření absolutně černého tělesa s teplotou přibližně 5800 Kelvinů, reliktní záření odpovídá záření absolutně černého tělesa s teplotou 2,7 K. Tento fyzikální pojem zavedl Gustav Kirchhoff v roce 1862.



Obr. 2.4 Experimentální aproximace absolutně černého tělesa (13)

S rostoucí teplotou tělesa se vrchol intenzity záření posouvá ke kratším vlnovým délkám. Schopnost tělesa vysílat elektromagnetické záření úzce souvisí s jeho schopností pohlcovat záření, protože těleso při konstantní teplotě je v termodynamické rovnováze se svým okolím, tedy získává pohlcováním energie od okolí stejné množství energie, jako do okolí vysílá. Absolutně černé těleso možno aproximovat dutým tělesem s velmi malým otvorem. Všechno záření, které vniká do dutiny zůstává v dutině a postupně je stěnami dutiny pohlcené. Stěny dutiny neustále vysílají a pohlcují záření. Záření které z dutiny uniká přes malý otvor má vlastnosti blízké záření absolutně černého tělesa. Experimentálně se zjistilo, že množství vyzařené energie závisí na teplotě a je tím větší, čím je teplota tělesa vyšší. Vysílané záření obsahuje elektromagnetické vlny různé vlnové délky a experimentálně se zjistilo, že relativně množství energie záření s jistou vlnovou délkou se též mění. Množství vysílané energie se hodnotí pomocí spektrální hustoty záření $E_{\omega\lambda}$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$], definované jako množství energie připadající na jednotkový interval vlnové délky, závislost je dána Planckovím vyzařovacím zákonem. Pro všechny velikosti vlnové délky hodnota klesá k nule.

2.2.6 Šedé těleso

Pro snadnější analýzu přenosu tepla zářením se zavádí koncept šedého tělesa. Je to těleso, které při stejné teplotě jako těleso černé emituje méně energie než těleso černé. Kolik energie emituje závisí na druhu povrchu.

2.2.7 Barevná teplota

Barevná teplota (též teplota chromatičnosti) charakterizuje spektrum bílého světla. Světlo určité barevné teploty má barvu tepelného záření vydávané černým tělesem zahřátým na tuto teplotu. Barevná teplota se měří v Kelvinech.



Obr. 2.5 Rozhraní barevné teploty

Příklady barevných teplot různých světelných zdrojů:

- 1200 K: svíčka
- 2800 K: žárovka, slunce při východu a západu
- 3000 K: studiové osvětlení
- 5000 K: obvyklé denní světlo, zářivky
- 5500 K: fotografické blesky, výbojky; toto je obvyklá barevná teplota používaná v profesionální fotografii
- 6000 K: jasné polední světlo
- 6500 K: standardizované denní světlo
- 7000 K: lehce zamračená obloha
- 8000 K: oblačno, mlhavo (mraky zabarvují světlo do modra)
- 10 000 K: silně zamračená obloha nebo jen modré nebe bez Slunce

Zrak člověka má schopnost barevnou teplotu subjektivně přizpůsobovat světelným podmínkám, bílý papír vnímá jako bílý, i když je vlivem osvětlení zabarvený. Fotoaparáty a kamery se naproti tomu musí na barevnou teplotu nastavovat (vyvažovat), moderní digitální fotoaparáty jsou též zpravidla schopny vyvážením bílé odhadnout automaticky, ale v některých situacích je výhodné prostředí napevno nastavit, často se tak dá předejít například oranžovému zabarvení snímků pořízených v žárovkovém osvětlení nebo naopak modrému nádechu u fotek při zatažené obloze.

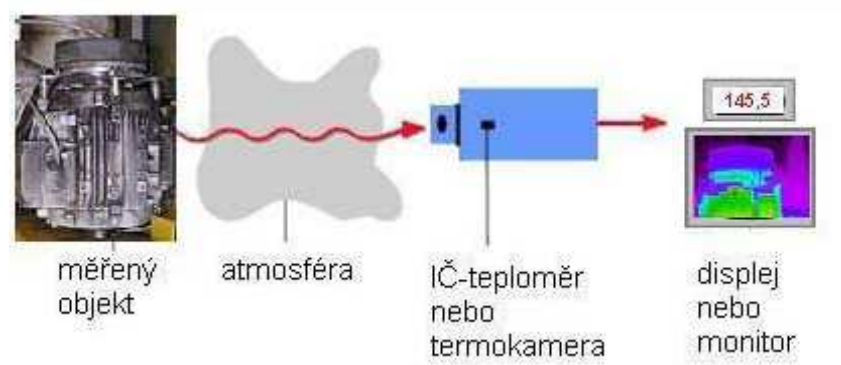
Filmový materiál je naproti tomu většinou kalibrován na denní světlo, a barevné tónování se upravuje buď speciálními filtry, nebo dodatečně při vyvolávání v laboratoři.

Teplota na povrchu Slunce činí asi 5 800 K, proto ho lidé vnímají jako žluté (i když maximum jeho vyzařování je v zelené části viditelného spektra). Slunce je viděno ze Země jako červené jen při svém východu a západu. Tedy tehdy, kdy je nízko nad obzorem a sluneční světlo na Zemi dorazí až poté, co vykonalo dlouhou cestu nižší a hustší vrstvou atmosféry. Molekuly vzduchu rozptylují více kratší vlnové délky světla (modré světlo), takže pozorovateli zůstane převážně červená.

Díky rozptýlenému světlu se jeví obloha jako modrá. Obsahuje-li ovšem atmosféra velké množství vodních par, dojde k absorpci i vlnových délek odpovídajících modré barvě a na obloze tak vznikají mraky, které mají šedou až černou barvu.

2.2.8 Teoretické základy bezdotykového měření teploty (10, 13)

Při bezdotykovém měření teploty se využívá zejména vyzařování infračerveného záření z měřeného objektu. Toto záření je optickým systémem soustředěno na vhodný detektor, jehož elektrický signál je dále zpracován v elektronických obvodech a výstupem je pak údaj na displeji nebo termogram na monitoru vyhodnocovacího zařízení.



Obr. 2.6 Princip bezdotykového měření teploty (13, s.5)

Všechny objekty, jejichž teplota je vyšší než absolutní nula, vyzařují elektromagnetické záření v určité části spektra.

Pro bezdotykové měření teploty se využívá elektromagnetické záření o vlnových délkách 0,4 až 25 μm .

Toto záření spadá částečně do viditelné oblasti, z větší části pak do infračervené oblasti spektra, které odpovídá vlnovým délkám v rozmezí od 0,74 μm do 1,0 μm .

Záření využívané pro bezdotykové měření teploty pokrývá tedy oblast viditelného spektra od 0,4 μm do 0,78 μm , dále pak oblast blízkého infračerveného spektra od 0,78 μm do 1 μm , oblast krátkovlnného infračerveného spektra od 1 μm do 3 μm , oblast středovlnného infračerveného spektra od 3 μm do 5 (8) μm a konečně oblast dlouhovlnného infračerveného spektra od 5 (8) μm do 25 μm .

Elektromagnetické záření s vlnovou délkou od 2 μm do 25 μm se někdy označuje jako tepelné záření. Uvedené rozsahy vlnových délek pokrývají měření teplot v rozmezí od -40 $^{\circ}\text{C}$ do +10 000 $^{\circ}\text{C}$.

Pro detekci infračerveného záření o vlnových délkách nad 25 μm nejsou v současné době k dispozici vhodné detektory.

3 POROVNÁNÍ CHARAKTERISTIK A VLASTNOSTÍ PŘÍSTROJŮ K BEZDOTYKOVÉMU MĚŘENÍ POVRCHOVÝCH TEPLOT

3.1 Pyrometry

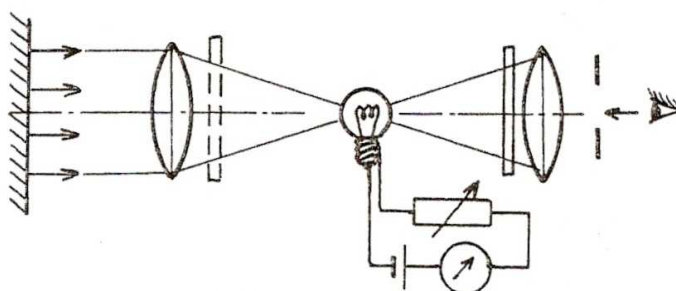
3.1.1 Základní rozdělení pyrometrů

Pro bezdotykové měření teploty těles se většinou využívá jejich elektromagnetické záření. Pyrometry používané v první polovině minulého století využívaly šest rozdílných principů činnosti. U jasových a barvových pyrometrů bylo čidlem oko pozorovatele. U zbývajících čtyř byl čidlem vhodný detektor (fotoelektrický, termoelektrický, pyroelektrický nebo bolometr). Podle provedení šlo o pyrometry monochromatické, poměrové, pásmové a na celkové záření.

Ve druhé polovině minulého století bylo věnováno velké úsilí výzkumu využití infračerveného záření pro vojenské účely. Začaly se používat nově vyvinuté materiály a mnoho fotoelektrických detektorů. V důsledku toho bylo možné modernizovat pásmové pyrometry, u nichž se také uplatnily mikroprocesorové moduly, které se v té době začaly používat v měřicích přístrojích.

3.1.2 Jasové pyrometry

Jasové pyrometry měří teplotu těles tak, že jas měřeného předmětu se porovná s jasnem pyrometrické žárovky v určitém úzkém oboru viditelného spektra. Jeden z obou jasů musí být měnitelný (žárovky) a mění se tak dlouho, až vymizí hranice obrazu vlákna žárovky na pozadí obrazu měřeného předmětu. Z proudu protékajícího vláknem žárovky při změně jasů je možno usuzovat na měřenou teplotu.



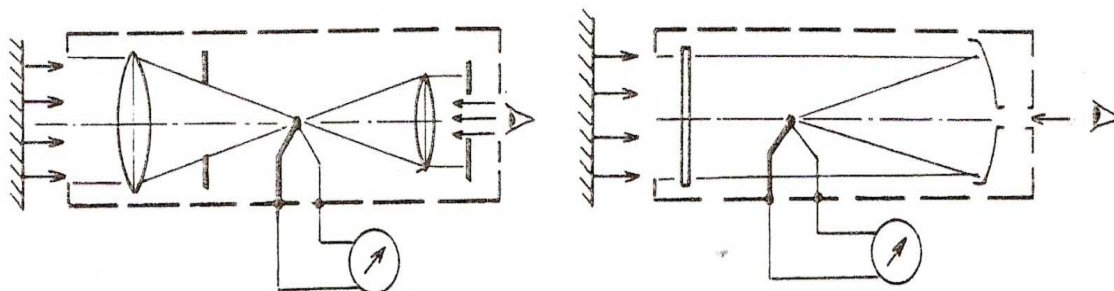
Obr. 3.1 Schéma jasového pyrometru (7, s.87)

3.1.3 Pyrometry na celkové záření

Pyrometry na celkové záření, taky nazývané pyrometry úhrnné radiční, určují teplotu z celkového měřeného tepelného záření vyzařovaného povrchem tělesa v celkovém spektru vlnových délek. Celková zářivá energie E_0 vysílaná absolutně černým tělesem při absolutní teplotě T je dána Stefan-Boltzmannovým zákonem.

Tělesa šedá vysílají záření $E < E_0$. Poměr $E / E_0 = \epsilon$ je součinitel závislý na druhu materiálu, jeho povrchu a teplotě. Protože absolutně černé těleso je idealizovaný stav, bude $\epsilon < 1$. Proto je u těchto teploměrů vždy nutná korekce,

kteřá je obtížná. Vlastní princip úhrnného pyrometru spočívá v tom, že tepelné záření je soustředěno do jednoho bodu (malé plošky), kde je umístěno teplotní čidlo, například termočlánek nebo odporový teploměr (bolometr). Soustředění tepelného záření lze dosáhnout buď vhodnou optikou nebo pomocí zrcadla.



Obr. 3.2 Schémata pyrometru na celkové záření (7, s.87)

Vhodným objektivem lze záření z měřeného zdroje zesílit a soustředit ho na teplý (měřicí) spoj termočláneku. V důsledku pohltivosti a odrazivosti objektivu přijímaná zářivá energie není nikdy pro měření zcela přesná. U pyrometru se zrcadlem jsou tyto chyby menší.

3.1.4 Pásmové pyrometry

Pásmový pyrometr využívá určitou část spektra tepelného záření měřeného tělesa, která je podstatně širší, než je přípustné pro monochromatický pyrometr a je úzká k tomu, aby bylo možné pyrometr považovat za přístroj, který pro měření využívá celkové záření. Mezi pásmové pyrometry lze zařadit většinu vyráběných pyrometrů které používají fotoelektrické detektory. Jejich výhodou je rychlá reakce přístroje a malé rozměry citlivé plochy. Které z provedení pásmového pyrometru je pro určitý případ vhodné závisí na rozmezí, v němž se pohybuje měřená teplota objektu, na materiálu objektu a vlastnostech jeho povrchu a na atmosféře, jež je mezi měřeným objektem a pyrometrem. Vliv přítomnosti CO₂ nebo vodní páry přitom lze omezit vhodnou volbou pásma vlnových délek použitých u přístroje. Pásmo vlnových délek, které pyrometr používá závisí na typu fotoelektrického článku a na materiálu optiky, například selenový fotočlánek je vhodný pro viditelné záření a křemíkové diody se používají v rozsahu vlnových délek 0,6 až 1,1 mm. Fotorezistory mají rozsah vlnových délek různý: například PbS 2 mm, 16 mm a podobně.

3.1.5 Uspořádání pásmového pyrometru

Pásmové pyrometry se vyskytují ve dvou provedeních, přenosném a stabilním. Přenosné pyrometry bývají kompaktní přístroje. Stabilní pyrometry mají dva samostatné celky: snímací část se upevní u měřeného objektu a vyhodnocovací zařízení se umístí na vhodném místě jinde.

Energie vyzařovaná měřeným objektem prochází optickým systémem pyrometru, dopadá na detektor který má požadovanou spektrální charakteristiku. Optický systém má pevnou ohniskovou vzdálenost (fixfokus).

Volbou ohniskové vzdálenosti objektivu se určuje velikost snímané (měřené) plochy, kterou detektor na měřeném objektu takzvaně vidí, a tím se definuje zorné pole přístroje. Zorný úhel má být takový, aby obraz měřeného objektu vyplnil pokud možno celé zorné pole přístroje. Jestliže měřený objekt zorné pole přístroje nevyplňuje, je naměřená teplota průměrem teploty objektu a jeho pozadí. Pro zajištění správné funkce doporučují výrobci přístrojů, aby měřený objekt přesahoval plochu zorného pole nejméně o 50 %. Většina pásmových pyrometrů umožňuje zaměřit přístroj na žádanou oblast měřeného objektu pomocí hledáčku podobně jako u fotoaparátu. Některé pásmové pyrometry mají vestavěné zdroje laserového záření které usnadní zaměření tím, že na měřeném objektu vizuálně vyznačí snímanou plochu.

Fotoelektrický detektor převádí tepelné záření na elektrické napětí, proud nebo odpor. Spektrální citlivost detektoru ve spojení s optikou určí spektrální charakteristiku pyrometru. Výstupní signál je zpracováván v modulu označovaném jako elektronický teploměr. Signál se v A/D převodníku digitalizuje, zpracuje se mikroprocesorem, který podle vloženého programu zajišťuje například linearizaci, různé korekce a matematické úpravy měřených dat, jejich ukládání do paměti, kompenzaci vnějších vlivů a převody fyzikálních jednotek. Většina pásmových pyrometrů má displej (obrazovku), na kterém je možné číst naměřené hodnoty v požadovaných jednotkách (stupeň Celsia, stupeň Fahrenheita, stupeň Kelvina). Také bývá možné zobrazit maximální a minimální teplotu v jistém časovém intervalu, vypočtenou průměrnou teplotu, rozdíl teplot a podobně.

Pásmové pyrometry jsou kalibrovány pro měření teploty absolutně černého tělesa. Pokud se u objektu nevezme v úvahu skutečná emisivita, bude přístroj ukazovat teplotu nižší, než je skutečná teplota měřeného objektu. Naměřené hodnotě se někdy říká pseudoteplota nebo taky pásmová teplota. Přístroje bývají vybaveny možností korekce emisivity měřeného povrchu. To umožní, aby pyrometr měřil skutečnou teplotu. Jiný problém je určit skutečnou emisivitu měřené plochy. Protože pásmové pyrometry pracují bezdotykově, reagují na změny teploty téměř okamžitě. Umožňují tudíž měřit teplotu pohybujících se objektů nebo objektů, jejichž teplota se rychle mění.

3.1.6 Použití pyrometrů

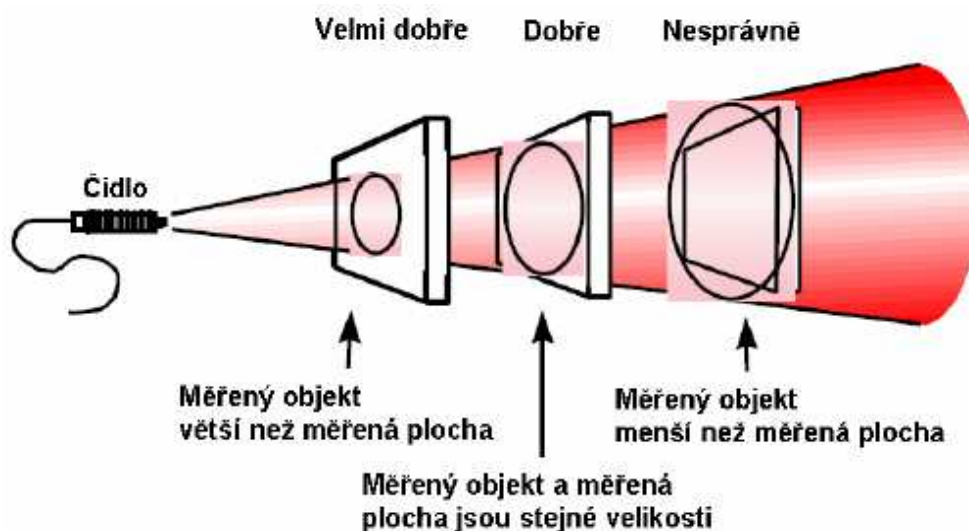
Způsob použití pyrometrů je určen jejich konstrukcí. U kompaktních přístrojů tvoří optická část s detektorem, elektronikou, indikátorem a napájecími obvody jeden celek. Tyto přístroje jsou určeny pro měření obsluhovatelem. Pyrometrický snímač, který obsahuje optickou část a detektor, se používá k trvalému zamontování. Elektrická část je oddělena a zpravidla zapojena do nadřazeného měřicího anebo řídicího systému.

3.1.7 Vlivy působící při měření pomocí pyrometrů

Předpokladem správné funkce pásmových pyrometrů je dodržení správné velikosti zaměřovací plošky na tělese, jehož teplota se měří. Velikost této plošky závisí na zaměřovacím úhlu pyrometru, na vlastnostech optické části pyrometru (ohnisková délka, vstupní pupila apod.), na velikosti účinné plochy detektoru a na zaměřovací vzdálenosti.

Vztah mezi zaměřovací vzdáleností a rozměrem měřené plochy výrobci většinou uvádějí v podobě grafu. Předepsané rozměry zaměřovací plochy je nutné dodržet.

Pyrometrické snímače bývají zabudovány tak, aby mohly trvale sledovat určitou plochu měřeného povrchu (zářiče).



Obr. 3.3 Znárodnění zaměřené velikosti snímané plochy detekované bezdotykovým teploměrem (9, s.4)

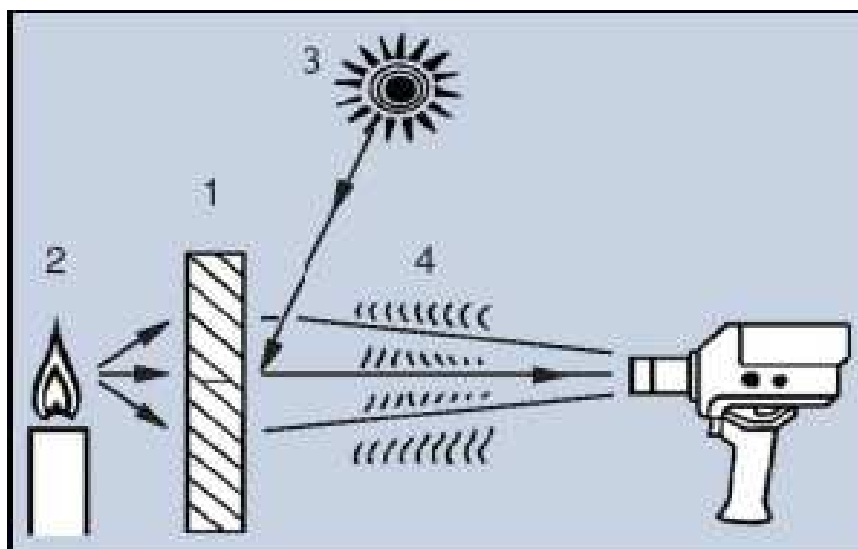
Je třeba zabezpečit, aby teplota tělesa pyrometru nepřekročila meze stanovené výrobcem. Často je nutné těleso chladit. Jeho teplota ovšem musí být vyšší než teplota rosná. To se týká zejména optiky, jejíž orosení by způsobilo velkou chybu měření.

Horké plyny a plameny jsou selektivními zdroji záření, jejichž teplotu může běžný pyrometr měřit jen s těží. Je vhodné umístit do topeniště na jednom konci uzavřenou žárovou trubicí a pyrometr zaměřit na její dno.

3.1.8 Hlavní zdroje chyb při měření teploty pomocí pyrometrů

Hlavní zdroje chyb při měření teplot infračervenými pyrometry:

- měřený objekt **1** může být lesklý, drsný, barevný, černý nebo také průhledný, přičemž tyto vlastnosti se při měření uplatňují rozdílně
 - za průhledným měřeným objektem se může v některých případech nacházet zdroj rušivého záření **2**
 - významným zdrojem rušení může být odraz záření pocházejícího z rušivého zdroje **3** například sluneční záření
 - prostředí **4** mezi měřeným povrchem a infračerveným pyrometrem může mít různou propustnost pro záření například CO₂, vodní pára, prach atd.

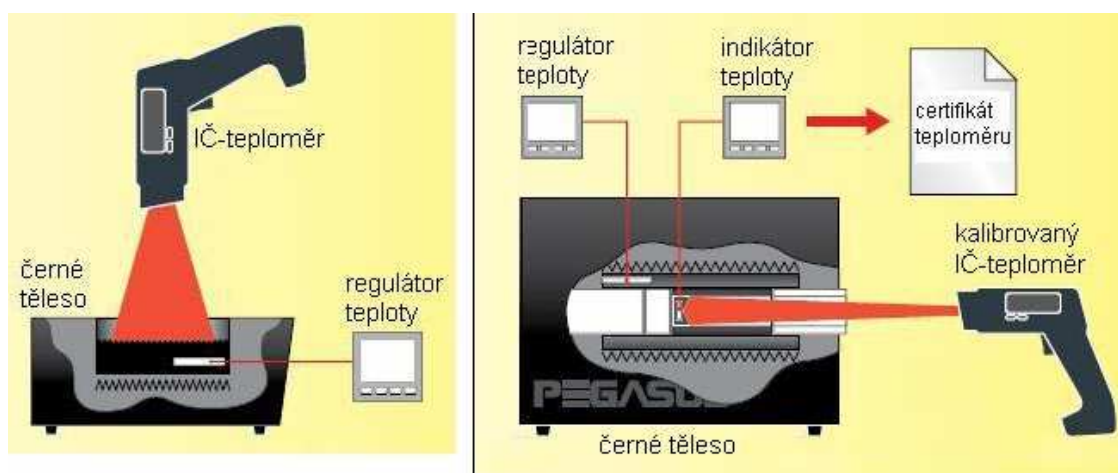


Obr. 3.4 Hlavní zdroje chyb při bezdotykovém měření teploty (13, s.20)

Další chyby mohou být způsobeny:

- nesprávně nastavenou emisivitou,
- nedodržením zaměřovací vzdálenosti určené výrobcem,
- znečištěnou optikou,
- stárnutím detektoru,
- odchylkami teploty přístroje od jmenovité hodnoty.

Bezdotykové teploměry je nutno pravidelně kalibrovat a k tomu se používá zařízení s černým tělesem s definovanou emisivitou. Základem kalibrátorů je obvykle válcová dutina vyrobená z kovového materiálu, povrchově upravená černou barvou. Emisivita povrchu dna dutiny je známa a pohybuje se v rozmezí 0,98 až 0,995. Teplota dna válcové dutiny je udržována na požadované hodnotě pomocí vhodného regulátoru teploty.



Obr. 3.5 Kalibrace bezdotykových teploměrů (13, s.21)

U zařízení s vyšší přesností je teplota dutiny měřena navíc ještě dotykovým teploměrem s vyšší přesností (obrázek napravo).

Měří-li se teplota černého tělesa, pyrometr naměří jeho skutečnou teplotu. U šedého tělesa je naměřená teplota tělesa nižší, než je teplota skutečná.

3.1.9 Laserový zaměřovač u infračervených pyrometrů

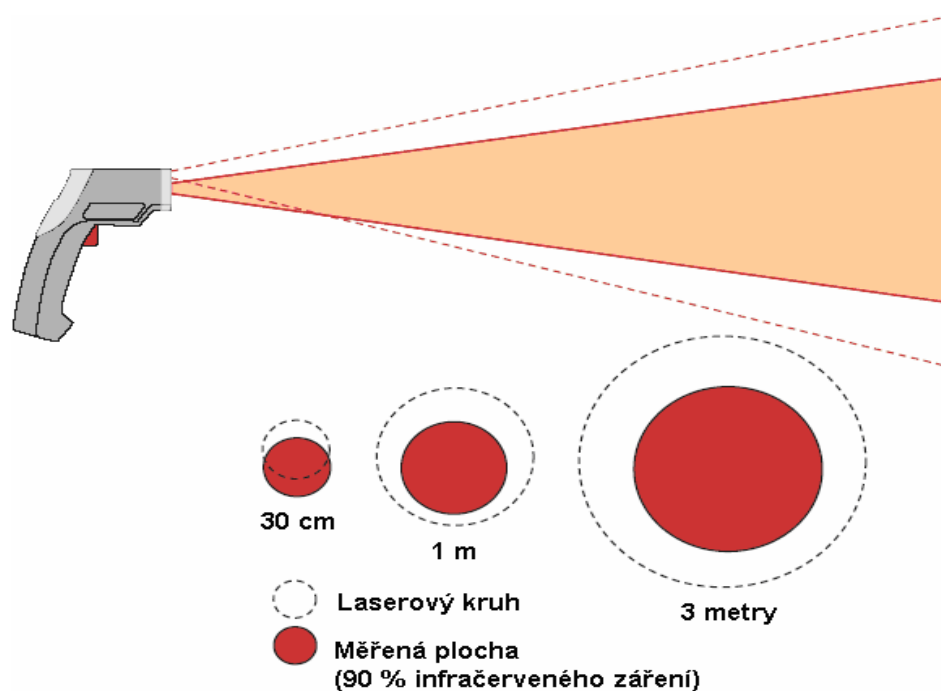
Infračervené pyrometry jsou často vybaveny laserovým zaměřovačem, který uživateli umožní zacílit na měřené místo mnohem rychleji a přesněji. Existuje několik provedení laserových zaměřovačů:

- **Jednoduchý laserový paprsek s posunem z optické osy**- laserový paprsek vychází z místa mimo střed optické osy a s optickou osou tedy přesně nesouhlasí. Toto je nejjednodušší provedení, zvláště se používá pro přístroje s nízkým optickým rozlišením (pro velké měřené objekty). Laserový bod se zamíří přibližně na střed měřeného objektu, ale při malých vzdálenostech teploměru od měřeného objektu je patrná nepřesnost v zaměření.
- **Koaxiální laserový paprsek**- laserový paprsek vychází ze středu optické osy a souhlasí s optickou osou přístroje. Střed měřené plochy je při jakékoliv vzdálenosti vždy přesně označen.



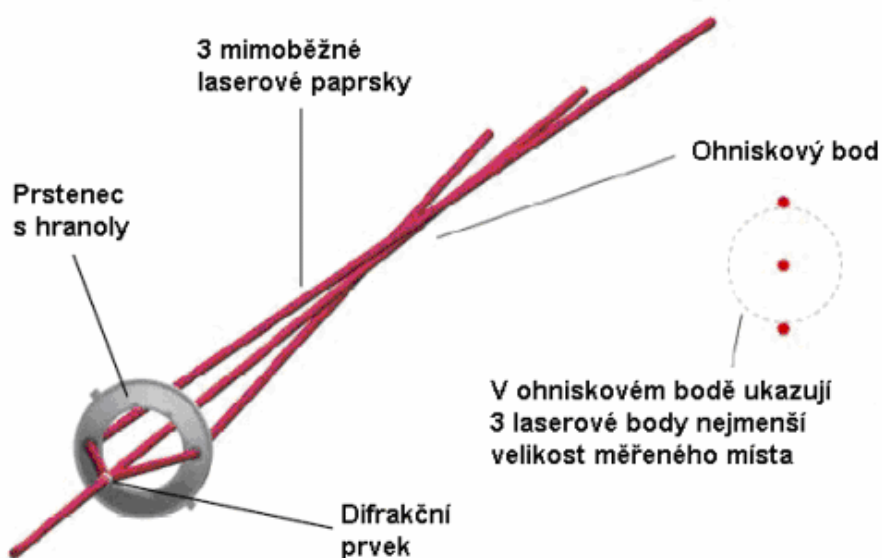
Obr. 3.6 Způsoby zaměření objektu u přenosných pyrometrů (13, s.12)

- **Dvojitý laser**- dvojitý paprsek se dvěma zaměřovacími body se používá pro vyznačení průměru měřené plochy, zejména při větších vzdálenostech. V tomto případě uživatel nemusí odhadovat nebo předem počítat průměr měřené plochy - ta je dána kružnicí, procházející oběma viditelnými body. To uživateli usnadňuje měření a zabraňuje chybám z důvodu špatného zaměření nebo nesprávného odhadu velikosti měřené plochy.
- **Kruhový laser s posunem z optické osy**- tohle je nejjednodušší řešení, které vyznačí nejen umístění měřené plochy, ale také její velikost a vnější tvar. Měřená plocha je od určité minimální vzdálenosti teploměru od měřeného objektu uvnitř laserového kruhu. Výrobce vypočítá provedení laserového kruhu tak, aby byl větší než skutečné měřené místo, čímž redukuje chybu paralaxy. Proto se uživatel musí ujistit, že laserový kruh je celý vyplněn měřeným objektem, aby dosáhl správného měření. Na druhé straně to ale uživateli brání plně využít geometrického rozlišení specifikovaného pro konkrétní přístroj.



Obr. 3.7 Kruhový laser s posunem z optické osy

• **Přesné označení měřené plochy 3-bodovým koaxiálním laserem-** laserový paprsek je při projekci rozdělen na tři jasné laserové body v řadě, které uživateli umožňují jasně vyznačit rozměry měřené plochy při všech vzdálenostech a úhlech měření. Prostřední laserový bod vždy označuje střed měřené plochy, zatímco dva vnější laserové body vyznačují její průměr. Kromě toho je možno polohu vnějších bodů využít pro indikaci vzdálenosti, při které je dosaženo nejmenší možné měřené plochy. Když se vnější body seřadí např. vertikálně nebo horizontálně, je tím indikována vzdálenost, při které je dosaženo nejmenší měřené plochy



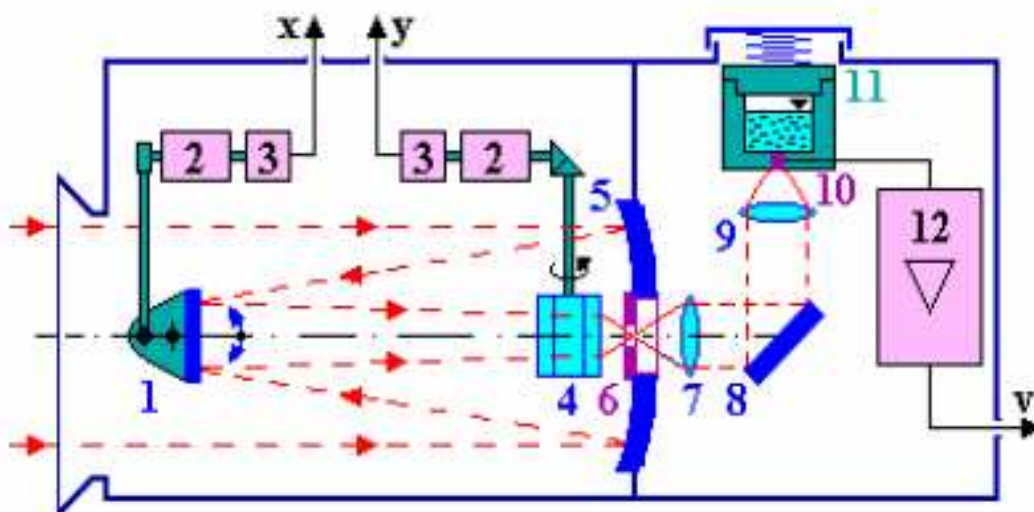
Obr. 3.8 Tříbodový koaxiální laser

3.2 Termovizní kamery

3.2.1 Základní rozdělení termovizních kamer (10)

Efektivním zařízením pro vizualizaci a bezdotyková měření povrchových teplot je termovizní kamera. Používá se k měření v energetice, v oblasti přenosu tepla, v technice prostředí, v medicíně, při dálkovém výzkumu Země a v mnoha dalších oborech. Poskytuje názorné obrazové záznamy a videozáznamy, umožňuje získání kvalitativních i kvantitativních informací pro hlubší poznání tepelných procesů různých zařízení a objektů.

Termovizní kamery lze dělit podle různých kritérií. Dle způsobu zobrazování rozlišujeme kamery s rozkladem obrazu - scannery a bez rozkladu obrazu - s maticovými detektory. Dle způsobu chlazení existují přesnější kamery s chlazeným detektorem a kamery s nechlazeným detektorem. Dle jiných kritérií lze termovizní kamery dělit na krátko vlnové a dlouho vlnové, rychlé (pro záznam videosekvencí) a pomalé, kompaktní či více komponentové a podobně.



Obr. 3.9 Termovizní kamery s rozkladem obrazu a chlazeným detektorem (10)

Na předchozím obrázku je vidět schéma termovizní kamery s rozkladem obrazu a chlazeným detektorem. Jednotlivé součásti kamery jsou označeny číslem od 1 až 10. 1 rozmítací zrcadlo, 2 motorky, 3 fotoelektrické vysílače polohy x a y , 4 křemenný osmiboký hranol, 5 duté zrcadlo, 6 clona, 7 až 9 optická soustava, 10 kvantový detektor, 11 kapalný dusík, 12 předzesilovač s video výstupem v .

3.2.2 Zásady při práci s termovizní kamerou (10)

Kameru s objektivy je třeba vždy chránit před agresivním prostředím (včetně dotyků prstů), extrémními teplotami, znečištěním, prachem, nárazy, nepřízní počasí a podobně. Při vlastních termovizních měřeních je pak třeba dodržovat jisté zásady, abychom minimalizovali chyby a nejistoty měření.

Měření pomocí termovizní kamery lze rozlišovat na měření neprůteplivých objektů (s transmitancí) či částečně průteplivých objektů a měření v průteplivém prostředí (s transmitancí) či v částečně neprůteplivém prostředí. Pokud jsou potřebné parametry známy, lze je u novějších systémů nastavit přímo na termovizní kameře nebo ve vyhodnocovacím programu a systém automaticky zobrazí žádané teploty měřeného objektu.

3.2.3 Měření neprůteplivých objektů v průteplivém prostředí (10)

Před měřením je třeba obvykle na kameře nastavit vhodný rozsah teplot, přičemž je nutné měřit dostatečné změny teplot. Např. při výzkumu tepelných ztrát budov je vhodné provádět měření, je-li rozdíl mezi vnitřní a vnější teplotou minimálně.

Rovněž je třeba dbát na to, aby sledovaný objekt byl v zorném poli kamery co největší, což lze zajistit umístěním kamery do vhodné vzdálenosti, použitím vhodného objektivu či předsádek, nebo u některých kamer také transfokátorem.

Dále je třeba znát emisivitu měřeného objektu (z tabulek, nebo z vlastního měření použitím např. dotykového teploměru), a to pokud možno i jako funkci teploty, směru, či vlnové délky. Velice důležitá je znalost střední radiační teploty okolního prostředí nebo i radiačních teplot z určitého směru (především u povrchů s malou emisivitou, které odrážejí záření částečně zrcadlově). Pokud se v okolí vyskytují horké či chladné povrchy, plameny, žárovky, Slunce, lidé apod., je třeba odclonit záření okolí přepážkami či umístit objekt do speciální komory.

Také je možné provést záznamy objektu z několika směrů, u laboratorních měření i v různých polohách a v různém natočení vůči okolí. U venkovních experimentů je vhodné provádět měření brzy ráno či pozdě odpoledne, bez slunečního záření.

3.2.4 Měření neprůteplivých objektů v částečně neprůteplivém prostředí (10)

Při měření v částečně neprůteplivém prostředí mezi měřeným objektem a kamerou (s větším množstvím par, plynů, aerosolů apod.) dochází k jistému pohlcování záření prostředím. Kromě zásad uvedených v předchozím textu je v takových případech třeba znát i parametry prostředí a to vzdálenost objektu od kamery, transmitanci prostředí a teplotu prostředí měřenou teploměrem stíněným vůči záření. Měření v částečně neprůteplivém prostředí zmenšuje přesnost měření a proto není vhodné měřit například v mlze, dešti nebo při sněžení.

3.2.5 Měření částečně průteplivých objektů (10)

Pokud je měřený objekt částečně průteplivý, projevuje se při vyhodnocování termogramu také záření z pozadí, pak je třeba znát exaktně i transmitanci objektu v rozsahu spektrální citlivosti kamery a teplotu pozadí objektu. Záření pozadí se však může projevovat i při měření příliš malých objektů, srovnatelných s velikostí obrazových bodů kamery. Pak je třeba objekt zvětšit, a to přiblížením kamery, jiným objektivem, předsádkou objektivu či transfokátorem.

3.2.6 Měření radiační teploty okolního prostředí (10)

Přesná termovizní měření vyžadují přesnou znalost radiační teploty. Pokud je okolní prostředí homogenní, je postačující znát střední radiační teplotu. V nehomogenním prostředí je vhodné pak znát rovinnou radiační teplotu z poloprostoru před měřeným objektem.

Pro detailnější zmapování poloprostoru před měřeným objektem je vhodné měřit radiační teploty pomocí radiačních teploměrů nebo též termovize a to při nastavení přístroje. Při měření radiačními teploměry můžeme postupně měřit lokální radiační teploty všech důležitých povrchů, nebo efektivněji střední radiační teploty v jistém prostorovém úhlu, například pomocí radiačního teploměru firmy TESTO v prostorovém úhlu.

Při měření radiačních teplot pomocí termovize snímáme rovněž postupně poloprostor před objektem, přičemž z termogramů lze vyhodnotit jak lokální radiační teploty, tak průměrné radiační teploty z jisté části prostoru (například stanovením průměrné teploty z celého termogramu).

Radiační teploty získané radiačními teploměry nebo termovizí lze při zkoumání objektů typu Lambertových zdrojů zprůměrovat.

Zkoumání zrcadlových povrchů je velice náročné, jelikož se na povrchu více či méně odráží záření z okolního prostředí. Máme-li však k dispozici termovizi s možností diferenčního zpracování obrazu, lze vliv okolí eliminovat.

Nejlépe je však provádět termovizní měření ve speciální laboratoři s difúzně zářícími stěnami a s konstantními teplotami povrchů. Uvedené způsoby určování radiační teploty a vyhodnocování termogramů jsou postačující při výzkumu teplot vypuklých povrchů (konvexních).

Chceme-li zkoumat duté povrchy (konkávní), je třeba si uvědomit, že kromě záření okolního prostředí působí na jednotlivé body povrchu i záření jiných bodů tohoto povrchu a vyhodnocování teplot je složitější.

Hluboké dutiny s matným povrchem se v praxi používají i jako referenční černá tělesa.

4 APLIKACE A POUŽITÍ PŘÍSTROJŮ K BEZDOTYKOVÉMU MĚŘENÍ POVRCHOVÝCH TEPLŮ V PRAXI

Jsou případy kdy nelze použít základní metody měření povrchových teplot, například teplota je příliš vysoká, že kdyby se použil dotykový teploměr nebo senzor tak by byl poškozen nebo dokonce zničen, taky se může stát, že člověk se nemůže dostat na požadované místo které je třeba změřit, jsou tam překážky nebo měřený objekt je v pohybu. Může být ohroženo zdraví a bezpečnost pracovníka, taky ekonomické a jiné praktické otázky a problémy dané technologii mohou ovlivnit aplikaci vhodné metody pro měření povrchových teplot.

4.1 Klady, zápory a vhodné aplikace přístrojů ke bezdotykovému měření povrchových teplot

Metody bezdotykového měření teplot a jejich aplikace.

Tab.4.1 Výhodné aplikace radiační termometrie (14, s.63)

Oblast aplikace	Nepřenosné			Přenosné		
	2	H	L	2	H	L
Cementová pec Žhavé zóny, předhřívání	X	X		X	X	
Úspory energie Zjišťování stavu izolací a tepelných toků			X			X
Pece, chemický průmysl Hoření, kotle, katalytické krakování	X	X		X	X	
Sklo Tažení skla, výroba žárovek, nádob	X	X	X	X	X	X
Kovozpracující průmysl (železo i neželezné kovy)	X	X		X	X	
Odlévání kovů	X					
Kontrola kvality Pájení, kontrola spojů, svaru, metrologie	X	X	X	X	X	X
Papír Lisování, vytlačování filmu, lití			X			X
Plastické hmoty Lisování, vytlačování filmu, lití			X	X		X
Vzdálená měření Mraky, zemský povrch, jezera, silnice			X			X
Textil Sušení, vlákna, spřádání	X			X		

Kde: 2 = dvoubarevný senzor, H = vysoká teplota, L = nízká teplota

Když je už třeba měřit teplotu povrchu objektu bezdotykovým způsobem, nasazení klasického radiačního pyrometru nepřináší vždy očekávaný efekt. Měření je z nějakých důvodů někdy silně zkresleno. Například není známá emisivita materiálu, emisivita materiálu se rychle mění, zorné pole pyrometru není zcela pokryto měřeným objektem, na měřené ploše se vyskytují chladná místa, provozní atmosféra je silně znečištěná kouřem nebo vodní parou (zvýšena vlhkost), může docházet k částečnému znečištění objektivu pyrometru a podobně. Často jsou tyto problémy znemožňující nebo znesnadňující měření s běžným radiačním pyrometrem. Problém lze vyřešit použitím poměrového (dvoubarevného), vícebarevného pyrometru nebo termovizní kamery.

Tab.4.2 Klady a zápory přístrojů ke bezdotykovému měření povrchových teplot (14)

Typ přístroje	Klad	Zápor
Infračervený termočlánek	Levný, cena od 99 dolarů. Samonapájecí. Bez posuvu měření. Připojení na displej standardního termočláneku a regulační zařízení. Dosažení obtížně dostupných oblastí. Vnitřní bezpečnost.	Nelineární výstup. Ovlivnění elektromagnetickou interferencí.
Infračervený pyrometr / termometr pro dlouhé vlnové délky	Přenosný a praktický. Levný, cena od 235 dolarů. Výborný nástroj pro údržbu.	Použití limituje maximální délka kabelu sondy 1m.
Infračervený pyrometr / termometr pro krátké vlnové délky	Může zaměřit jakýkoliv cíl téměř jakékoliv vzdálenosti.	Měří pouze fixní oblast na měřeném objektu. Přesnost měření je ovlivněna kouřem, prachem apod. v prostředí. Ovlivnění elektromagnetickou interferencí.
Dvoubarevný pyrometr	Měří skrze prach, kouř a další kontaminanty v prostředí. Nezávislost na emisivitě měřeného objektu.	Cena 3600 dolarů čidlo, 5000 dolarů pro displej /ovládací zařízení.
Linescanner	Jediný senzor, který provádí měření na celé šíři produktu. Kontinuální měření pohybujícího se produktu. Počítač poskytuje termografické obrazy měřeného produktu a jeho teplotní profil.	Vysoká cena 10000 dolarů pro samotné čidlo, 50000 dolarů pro kompletní systém.



Obr. 4.1 Bezdotykové teploměry používané v laboratořích v minulých letech (13, s.4)

Bezdotykové teploměry používané v laboratořích v minulých letech: **1** jasový optický pyrometr METRA, **2** stabilní pyrometr, **3** ruční teploměr na infračervené záření OMEGA.



Obr. 4.2 Moderní bezdotykové teploměry a termovizní kamery (13, s.4)

Moderní bezdotykové teploměry a termovizní kamery: **1** termovizní kamera OPTRIS-PI, **2** stabilní infračervený teploměr OPTRIS-CT-Laser, **3** ruční infračervený teploměr Proscan-530, **4** ruční teploměr s digitálním fotoaparátem FLUKE-576, **5** kompaktní termovizní kamera FLIR T400

4.2 Vhodné aplikace a použití v oblasti strojírenství (12)

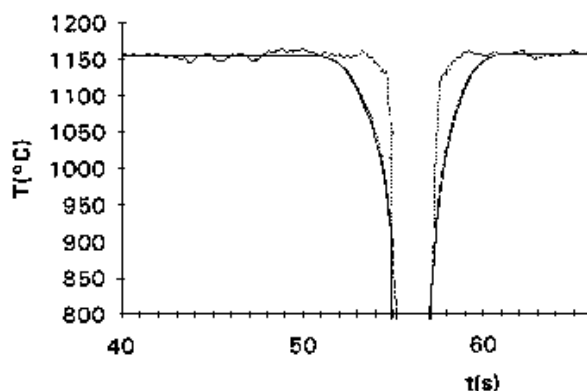
Podkapitola se zabývá aplikací technologií bezdotykového měření povrchových teplot v oblasti strojírenství.

Vhodná aplikace této technologií může zlepšit kontrolu, vnímání a pomoci všude, kde teplota hraje kritickou roli, například u odlitků (tuhnutí materiálů), v obrábění (chlazení obrobku, odvod tepla), svařování (oblast ovlivněná teplotou během svařovacího procesu). Je důležitou technologií hlavně tam, kde nelze měřit teplotu tradičními metodami.

4.2.1 Použití poměrového pyrometru

Poměrové zpracování signálu je výhodné z hlediska malé citlivosti poměrového pyrometru na změnu velikosti žhavého objektu v jeho zorném poli. Pokud se třeba velikost žhavého objektu v zorném poli zmenší na polovinu, poměr obou signálů a tedy i údaj teploty pyrometru zůstane nezměněn. V případě běžného pyrometru by stejná změna velikosti měřeného signálu znamenala chybu, která by zcela zkreslila celé měření.

Následující graf zobrazuje vliv zmenšení velikosti objektu v zorném poli poměrového pyrometru postupným zakrytím a opětovným odkrytím zorného pole pyrometru pomocí obdélníkové clony. Barevné teplotě TB odpovídá signál, který méně reaguje na vliv zmenšení zorného pole. Teplotám T1 a T2 odpovídají dva signály ležící těsně vedle sebe, které rychle reagují na míru zakrytí zorného pole pyrometru.



Obr. 4.3 Teplotní signály reagují na míru zakrytí zorného pole pyrometru (12)

Poměrové pyrometry je výhodné použít dochází-li k absorpci záření neselektivními složkami, například kouřem, prachem, rozptylem na vodních kapičkách a mlze. Dále v případech, kdy není pokryto celé zorné pole měřeným žhavým objektem nebo se velikost tohoto pokrytí mění v průběhu měření. Poměrový pyrometr je možno použít také v případech, kdy dochází přes umístění pyrometru ve speciálním krytu k znečištění objektivu.

Vhodnost použití poměrového pyrometru pro tyto i jiné aplikace je většinou nutno posoudit případ od případu, popř. provést zkušební měření.

4.2.2 Teplotní měření vysokopecní vsázky

Měření teploty vsázky skrz výfučnu dává údaje o životnosti pecní kampaně. Měření je nezbytným výzkumným nástrojem, který dává předběžně informace týkající se výkonu pece a výrobních podmínek, a poskytuje potřebná data o vzorku vsázky pro počítačové modelování. Pecní vsázka u výfučny je proměnnou kombinací koksu, rudy, roztaveného železa a plynu. Železo usazující se na chladných materiálech v prostoru otvoru pece může částečně zakrýt zorné pole pyrometru. Jednobarevný radiální pyrometr potřebuje pro měření celé zorné pole, a proto není schopen zajistit v tomhle případě spolehlivé měření.

Zmíněný problém je možno eliminovat užitím poměrového pyrometru, který zajistí spolehlivé výsledky neovlivněné zakrytím zorného pole. Použití delší časové konstanty odstraní vliv krátkodobého silného zakrytí terče. Pyrometr musí být dobře upevněný a měl by být opatřen ochranným krytem proti agresivnímu prostředí. Výstup systému musí být kompatibilní s přístrojovým vybavením vysoké pece a počítačovým systémem pro matematické modelování.

4.2.3 Měření teploty proudu roztaveného železa během odpichu

Kontinuální měření teploty proudu roztaveného železa poskytuje cenné informace o obou kovových složkách a pecním výkonu. Určení střední teploty proudu železa poskytuje rychlý odhad obsahu křemíku v železe. Pyrometry umožňují kontinuální měření teploty a nepotřebují velkou údržbu. Ale pro přesné měření povrchu vyžadují plochu bez strusky takovou, že pyrometr může hledět přímo na horký kov. Čistá strana odlučovače strusky v místě, kde horký kov prochází přes přepad, je nejvhodnější poloha pro zaměření pyrometru.

Obvykle se pro toto měření používají radiální pyrometry na krátkých vlnových délkách, ale někdy může docházet k ovlivňování měření velkým množstvím produkovaného kouře, a proto je vhodnější použít pro měření teploty roztaveného železa poměrový pyrometr. Kdyby zde byla použita termovizní kamera je třeba zvolit model, který je schopen dlouhodobého pracovního cyklu a je opatřen vhodným objektivem na vysoké teploty. Objektiv taky lze ochránit použitím clony skla z germania.

4.2.4 Bezdotykové měření teploty rychle se pohybujícího drátu

Měření teploty rychle se pohybujícího drátu je poměrně náročný problém. Drát vibruje kolmo na směr zaměření pyrometru nepředvídatelným způsobem tak, že se může dostat částečně nebo úplně mimo zorné pole radiálního pyrometru. Tento problém se obvykle řeší použitím pyrometru s mechanickým scénováním, který rozkmitá měřený paprsek v rozmezí 10 až 20 cm. Tyto pyrometry jsou obvykle poměrně drahé a jejich mechanická část bývá poruchová.

V mnohá případech rozkmit měřeného drátu není větší než 2 až 5 cm, což umožňuje využít schopnost přesného měření poměrového pyrometru i při ne zcela zakrytém zorném poli pyrometru měřeným objektem. Použití

poměrového pyrometru v těchto případech je lacinější, míň poruchové a bývá i přesnější.

4.2.5 Bezdotykové měření teploty skrze mechanickou překážku

Někdy se může stát, že je nutno měřit teplotu měřeného objektu skrze nějakou mechanickou překážku, která může částečně zakrývat zorné pole pyrometru. Může se jednat třeba o pletivo, nebo může být nutné měřit skrze velmi úzký otvor, například skrze závity cívky při indukčním ohřevu materiálu. V těchto případech je opět vhodným řešením použití poměrového pyrometru.

Tento způsob užití poměrového pyrometru se však netýká měření skrze sklo, slídu, průhledné plastické hmoty a podobně, kdy je nutno uvážit vliv nešedosti těchto materiálů. Při použití termovizních kamer které jsou založené na infračervené záření, problém je v tom, že nemůžou snímat (nevidí) přes tyto materiály, takže měření nelze provést, hlavně když se jedná o skleněné překážky.

4.2.6 Měření teploty proudu roztaveného kovu

K měření teploty proudu roztaveného kovu se s různým stupněm úspěšnosti používají jak poměrové tak jedno pásmové pyrometry. O úspěchu měření rozhoduje především charakter proudění. To znamená, je-li laminární nebo turbulentní. Turbulentní proudění způsobuje velké výkyvy teploty během měření a toto měření znehodnocuje.

Laminární proudění se dá poměrně dobře měřit pyrometry. Nastavení koeficientu emisivity nebo nešedosti se obvykle nedá provést ponořením termočládku do proudu kovu. Proto se užívá údaj určený z měření teploty hladiny téže slitiny v tavící peci nebo údaj z tabulek.

Není-li proud kovu příliš úzký a nepohybuje se v zorném poli pyrometru bývá pro měření vhodnější jedno pásmový pyrometr, protože se měření jeví jako více stabilní a lépe opakovatelné. Pokud se úzký proud kovu pohybuje, lze problém měření řešit pomocí poměrového pyrometru.

4.2.7 Měření teploty svaru při indukčním svařováním

Měření teploty svaru během indukčního ohřevu je poměrně náročný problém. Materiál se pohybuje v svařovacím prostoru rychlostí asi $50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Svařovací bod je malý a pohybuje se v zorném poli pyrometru ze strany na stranu. V místě svaru se vyskytují velké teplotní gradienty.

V měřícím prostoru se vyskytuje stříkající voda s emulzí, vodní pára a také velké množství jisker. Rovněž indukční proudy v induktoru mohou ovlivnit elektroniku pyrometru, pokud bude umístěn příliš blízko.

Řešením tohoto problému je použití poměrového pyrometru se speciální optickou hlavicí a optickým vláknem ke kontrole vysokofrekvenčního generátoru pro svařování.

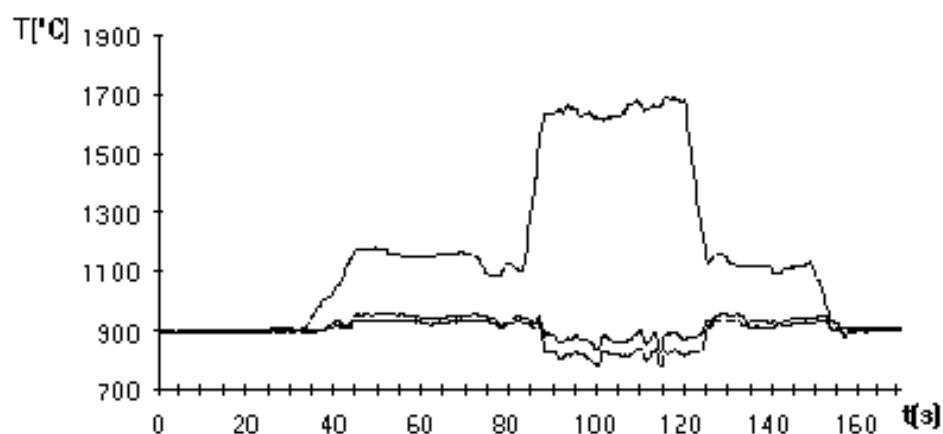
Poměrový pyrometr na bázi **Si** zajistí, že ovlivnění měření vodní parou s emulzí bude minimální.

4.2.8 Měření teploty v zóně hoření rotační cementářské pece

Měření teploty v zóně hoření rotační cementářské pece je velice důležité pro zajištění kvality produkce cementu a efektivní činnosti pece. Poměrový pyrometr zde umožňuje překonat pro tuto zónu typické problémy jako je prach a kouř, které zatemňují optickou dráhu pohledu pyrometru. Klasický jedno pásmový radiační pyrometr by zde neuspěl. Měřicí systém na bázi poměrového pyrometru je vhodný pro vlhké i suché výrobní procesy.

4.2.9 Hlídání plamene pomocí poměrového pyrometru

Poměrový pyrometr lze užít k přibližnému určení teploty plamene a hlídání hoření plamene. Následující graf zobrazuje simulaci kontroly hlídání plamene v laboratorních podmínkách.



Obr. 4.4 Zobrazení simulace kontroly hlídání plamene v laboratorních podmínkách (12)

Horní nejvíce rozkmitaný signál odpovídá teplotě naměřené poměrovým pyrometrem na bázi Si/Si. Spodní dva signály odpovídají teplotám určeným z jednotlivých kanálů Si detektorů. Prvních asi 35 s byl pyrometr zaměřen na pozadí s teplotou 900 °C. Pak byl zapálen plamen mezi pyrometrem a zdrojem záření pozadí. V přibližně 85 s experimentu bylo horké pozadí zakryto a do 125 s byla měřena pouze teplota plamene. Následně bylo pozadí o teplotě 900 °C opět odkryto. Ve 155 s byl plamen zhašen. Větší výkyvy v průběhu měření jsou způsobeny závany vzduchu, které vychylovaly plamen ze zorného pole pyrometru.

5 NÁVRH PRAKTICKÉHO EXPERIMENTU

5.1 Návrh experimentu, hlavní zásady a postup

Následující kapitola popisuje pracovní podmínky a prostředí ve kterém se bude pracovat. Popisuje možné problémy které mohou nastat a bude nutno vyřešit aby kamera pracovala správně a nedošlo k jejímu poškození. K tomuto účelu je nutno zkontrolovat emisivitu, vlhkost, prašnost a jiné znečišťující prvky které ovlivňují atmosféru. Vše co je potřeba aby měření bylo úspěšné.

Experiment spočívá v měření povrchové teploty v místě kde se bude provádět svařování elektrickým obloukem. Pracovní prostředí, v něm elektrony procházejí plazmou sloupce oblouku, který v závislosti na parách kovů a druhu ochranného plynu, dosahuje teploty 4000 °C - 8000 °C.

Kamera, která bude použita k měření je termovizní kamera Flir SC 2000 (souprava thermal CAM SC 2000 PAL), umožňuje pracovat na stálém místě v laboratoři či v provozu, ale její předností je především možnost mobilního využití při práci v terénu.

5.1.1 Co vzít na vědomí před začátkem experimentu

Na co je třeba dbát při používání bezdotykových teploměrů a termovizních kamer:

- Měřený objekt musí být pro infračervený teploměr opticky (infračerveně optický) viditelný.
- Vysoké úrovně kouře nebo prachu snižují přesnost měření.
- Vzdálenost od měřeného objektu.
- Pevné překážky, jako jsou uzavřené kovové reakční nádoby, dovolují pouze povrchová měření, vnitřní teplota v nádobě nemůže být takto měřena.
- Optika - čidla musí být chráněna před prachem a kondenzujícími kapalinami (výrobce proto dodává příslušná zařízení).
- Je možno měřit pouze povrchovou teplotu, přičemž je nutno brát v úvahu různou emisivitu jednotlivých materiálů.
- Rozsah použití kamery do jakých teplot ji lze použít a jaká jsou doporučení od výrobce.

5.1.2 Protokol o termovizním měření (10)

Z teoretického rozboru termovizních měření vyplývá, které veličiny je třeba při termovizních měřeních zaznamenávat. Před měřením je obvykle třeba vyhotovit si vhodnou tabulku pro zápis naměřených hodnot, která bude sloužit po vyplnění jako součást protokolu o termovizním měření. Příklad takové tabulky je uveden na obrázku. Pro konkrétní případy termovizních měření lze tabulku zjednodušit. U složitějších termovizních experimentů je třeba doplnit uvedenou tabulku o údaje popisující měřený objekt apod.

TERMOVIZNÍ MĚŘENÍ										Objekt:	Číslo listu:
Kamera:	VarioCAM			Rozsah:	až [°C]			Objektiv:	Datum:		
Záběr:	Okolí	T_r [K]	Prostředí	Pozadí	T_z [K]	Část objektu	T [K]	ε [-]	t [-]	Poznámka:	
	Vpředu		$T_L =$ [K]								
	Vpravo		$\phi_L =$ [%]								
	Vlevo		$t_L =$ [-]								
	Nahoře		Vzdálenost								
	Dole		$L =$ [mm]								
Záběr:	Okolí	T_r [K]	Prostředí	Pozadí	T_z [K]	Část objektu	T [K]	ε [-]	t [-]	Poznámka:	
	Vpředu		$T_L =$ [K]								

Obr. 5.1 Tabulka k protokolu o termovizním měření (10)

5.1.3 Popis termovizní kamery Flir SC 2000

Termovizní kamera Flir SC 2000 (souprava thermal CAM SC 2000 PAL), umožňuje pracovat na stálém místě v laboratoři či v provozu, ale její předností je především možnost mobilního využití při práci v terénu. Pro kvalitní záběry v terénu je vhodné používat stativ. Při transportu kamery je třeba chránit především objektiv a nejlépe je provádět transport ve speciálním kufru. Pro práci v laboratoři je vhodný síťový adaptér, pro práci v terénu jsou vhodné akumulátory s nabíječkou. Termogramy pořízené v terénu lze uchovávat na vyměnitelném paměťovém médiu, paměťová PC karta Flash s kapacitou větší než 100 MB, nebo přímo do notebooku.



Obr. 5.2 Termovizní kamera Flir SC 2000

K tělesu kamery je připojen objektiv, okulár pro pozorování barevného termogramu a také barevný LCD displej, který umožní alternativní pozorování termogramu. Na kameře jsou ovládací tlačítka Enter, Clear, Autofokus a snímek. Těmito prvky lze zajistit velké množství funkcí kamery, jelikož se rozlišuje krátký či dlouhý stisk tlačítek, a navíc lze některá tlačítka naprogramovat na různé aktivity. Kamera má také konektory, které umožní její připojení k jiným zařízením jako jsou mikrofon a sluchátka nebo k napájecímu zdroji. Některá propojení se provádějí prostřednictvím tzv. výstupního boxu. Pro možnost záznamu barevného obrazu v oblasti světelného záření je kamera vybavena jednoduchou CMOS kamerou s ručním ostřením obrazu. Rozsah měření je -40 °C až $+1500\text{ °C}$ (vysokoteplotní filtr do 1500 °C).

Software, který umožňuje spolupráci mezi počítačem a kamerou je ThermaCAM Researcher od firmy Flir, operační systémy které podporují tento software jsou Windows 98 second edition, Windows Me, Windows NT4 service pack 6, Windows 2000 a Windows XP. Výrobce varuje, že tento software nebude provozní při jeho instalaci na jiné operační systémy. Cena 1,6 milionu korun.

5.1.4 Technologie obloukového svařování

Při obloukovém svařování je jako zdroj tepla využíván elektrický oblouk hořící mezi elektrodou a svařovaným materiálem, který taví kov elektrody a roztavuje povrch základního materiálu. Roztavený kov elektrody přechází sloupem oblouku do tavné lázně a slitím tohoto přídavného materiálu a nataveného základního materiálu vzniká svar. Obloukové svařování má řadu modifikací, které výrazně rozšířily oblast jeho použití. Kromě ručního svařování obalenou elektrodou se jedná především o metodu svařování v ochranných atmosférách a pod tavidlem. Obloukové svařování je obecně nejpoužívanější technologií svařování a neustále se vyvíjí.

5.1.5 Elektrický svařovací oblouk

U převážné většiny způsobů hoří elektrický oblouk mezi elektrodou a základním materiálem. Elektrický oblouk je nízkonapěťový výboj o dostatečné proudové hustotě, který prochází částečně ionizovaným plynem. Stabilně hoří při napětí vyšším než je ionizační daného prostředí (páry Fe - 7,8V) a proudu dostatečném pro ionizaci plynu. Pro oblouk je charakteristické, že proud elektronů je emitován žhavou katodovou skvrnou s vysokou hustotou proudu - 1000 mm⁻² a teplotě 2400°C.

Elektrony procházejí plazmou sloupce oblouku, který v závislosti na parách kovů a druhu ochranného plynu dosahuje teploty 4000°C - 8000°C. Vedení proudu v oblouku zajišťují rozhodující mírou elektrony, které jsou uvolněny disociací a ionizací plynů oblouku a proudu od katody k anodě. Pohyb kladných iontů je při nižších prouděch opačný, avšak při vysoké hustotě proudu se směr proudění celého plazmatu usměrní od katody k anodě.

Dopadající elektrony jsou odváděny anodovou skvrnou, která je vlivem kinetické energie dopadajících částic teplejší než katoda o 400°C - 600°C. Anodová skvrna je rozměrnější a polohově méně stabilní než katodová. Celkový pokles napětí na oblouku dosahuje 16 - 18 V.

V závislosti na proudové hustotě, výkonu oblouku a použitých ochranných plynech, je možno nastavit různé způsoby přechodu kovu přídavného materiálu pro než jsou charakteristické různé typy oblouků.

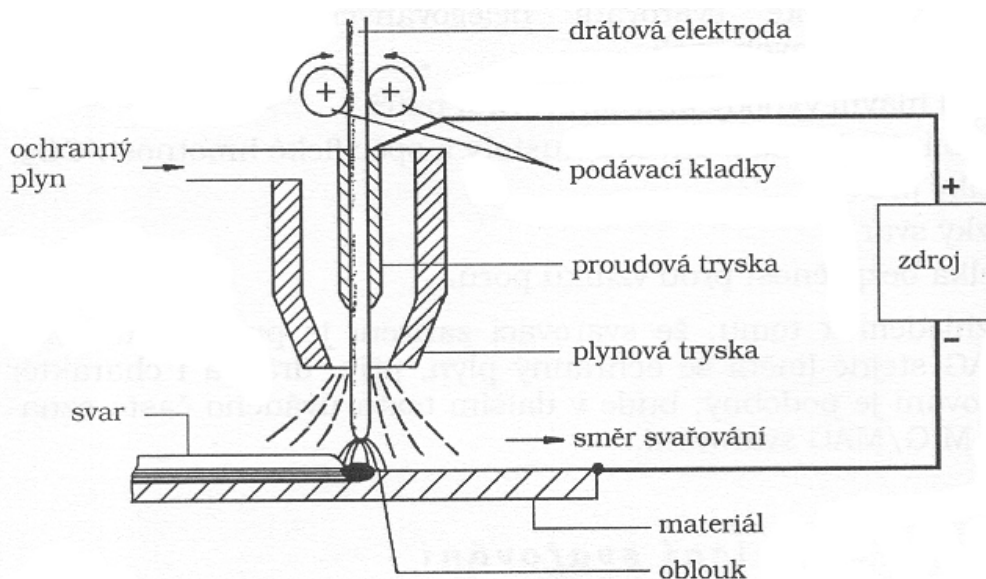
5.1.6 Obloukové svařování v ochranných atmosférách

Při obloukovém svařování v ochranných atmosférách hoří oblouk obklopen atmosférou ochranného plynu, který je přiváděn hořákem. Elektroda, oblouk i tavná lázeň je chráněna ochranným plynem před účinky okolní atmosféry. Jako ochrana se používá inertní, nebo aktivní plyn. Existuje řada metod obloukového svařování v ochranných atmosférách rozlišovaných podle druhu použité elektrody a ochranného plynu.

Základní rozdělení metod obloukového svařování v ochranných atmosférách:

- MIG (Metal Inert Gas) svařování kovovou elektrodou v inertním plynu
- MAG (Metal Aktiv Gas) svařování kovovou elektrodou v aktivním plynu
- WIG (Wolfram Inert Gas) svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu

Svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách MIG / MAG je zobrazeno na následujícím obrázku



Obr. 5.3 Svařování MIG/MAG (8)

Svařování metodou MIG. Jedná se o svařování kovovou tavící elektrodou (drát) v inertním plynu, nejčastěji argonu (Ar) nebo heliu (He), či jejich směsi. Oblouk hoří mezi drátem a základním materiálem a je zcela obklopen inertním plynem. Drát je na cívce a podávacím mechanismem je podáván do svařovacího hořáku. Povrch tavné lázně je chráněn též inertním plynem. Plyn nereaguje s materiálem, a proto je metoda MIG používána často pro svařování hliníku, mědi, titánu a dalších neželezných kovů.

Svařování metodou MAG využívá kovovou tavící se elektrodu a aktivní plyn, Obvykle CO₂, nebo směs CO₂, argonu (Ar), kyslíku (O₂) apod. Oblouk hoří mezi tavícím se drátem a základním materiálem. Drát je na cívce a je podáván do hořáku podávacím mechanismem rychlostí, která odpovídá jeho průměru a svařovacímu proudu. Ochrana svařovací lázně je prováděna prostřednictvím aktivního plynu. Plyn vstupuje do chemických reakcí. Svařování MAG se používá ke svařování nelegovaných, nízkolegovaných a vysokolegovaných ocelí.

5.1.7 Pracovní podmínky experimentu

V literatuře a v praxi se často objevují některé otázky, které je nutno odpovědět, a některé podmínky, které je nutno brát na vědomí k úspěšnému provedení měření povrchové teploty pomocí termovizních kamer.

Jaké je rozmezí teploty měřeného objektu?

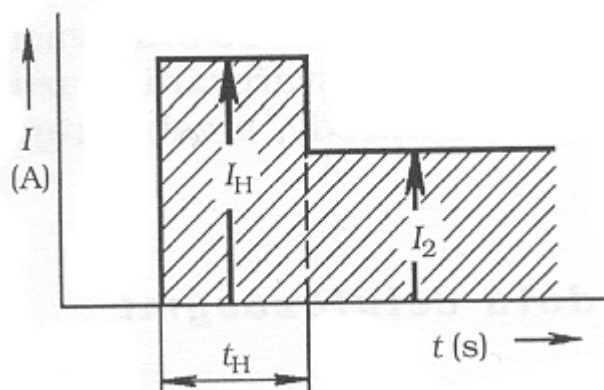
Při obloukovém svařování je pro oblouk charakteristické, že proud elektronů je emitován žhavou katodovou skvrnou o teplotě 2400°C.

Elektrony procházejí plazmou sloupce oblouku, který v závislosti na parách kovů a druhu ochranného plynu dosahuje teploty 4000°C - 8000°C. Dopadající elektrony jsou odváděny anodovou skvrnou, která je vlivem kinetické energie dopadajících částic teplejší než katoda o 400°C - 600°C.

Jak rychle se teplota mění?

Změna teploty je velice rychlá. Musíme brát na vědomí rychlost procesu svařování pomocí elektrického oblouku, během kterého se proměňuje elektrická energie na teplo. Během okamžiku to některé stroje umožňují, znamená to horký start.

Zařízení zvýší při počátku svařování na omezený čas hodnotu proudu. Po uplynutí tohoto času se hodnota proudu automaticky sníží na jmenovitý svařovací proud. Tím se dosáhne větší stupeň ohřátí na začátku svařování, to znamená, že svařovaný materiál se rychle přivede na tavicí teplotu, čímž se zabrání vytvoření studeného spoje na začátku svaru.

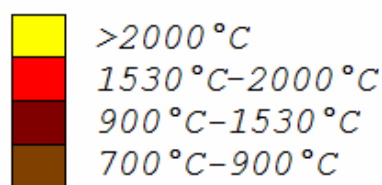
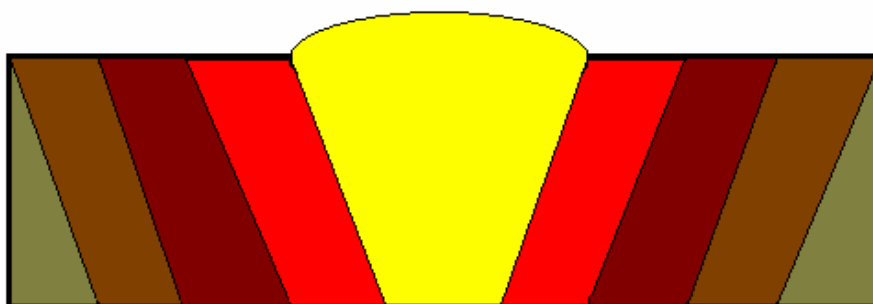


Obr. 5.4 Teplý start - proudová charakteristika (8)

Jaká je teplota okolí?

Teplota v blízkém okolí svaru je znázorněna na obrázku. Svařovaný materiál v tomto případě je ocel. Předpokládá se že místnost, kde se provede experiment, je vhodně navržena aby splnila veškeré požadavky k provedení daného experimentu, bude tam instalovaná vhodná vzduchotechnika, která odnese z místnosti výpary a jiné škodlivé produkty toho svařovacího procesu. Také se předpokládá že bude udržovaná stabilní teplota v místnosti v rozmezí

30°C až maximálně 50°C. Na vědomí je nutno brát i teplotu svařovacího přístroje a jeho zdroj energie, u kterého se předpokládá že se bude oteplovat. Pro obloukové svařování je podle potřeby používán střídavý i stejnosměrný proud. Zdroje přídatného proudu především svařovací transformátory se v posledních letech prakticky nezměnily. Jejich používání klesá ve prospěch zdrojů stejnosměrného proudu.



Obr. 5.5 Teplotní rozmezí v oblasti svaru (8, 12)

Jak blízko měřeného objektu je možné pyrometr (termovizní kameru) instalovat?

Podle doporučených hodnot které byly dány oficiálním prodejcem, ideální vzdálenost je v rozmezí 2-3 metry. Tato vzdálenost je nutná pro bezpečnost pracovníka který bude provádět toto měření, k ochraně samotného zařízení, k jeho optimálnímu použití které je dáno jeho technickými parametry.

Jak velký je měřený objekt?

Měřit se bude oblast svaru, svařovací materiál, okolní oblast, v tomto případě svařovací přístroj a jeho zdroj energie. Oba jsou zdroje tepelné energie. Pro úplnost by bylo za vhodné změřit i teplotu místnosti, ve které se bude provádět experiment.

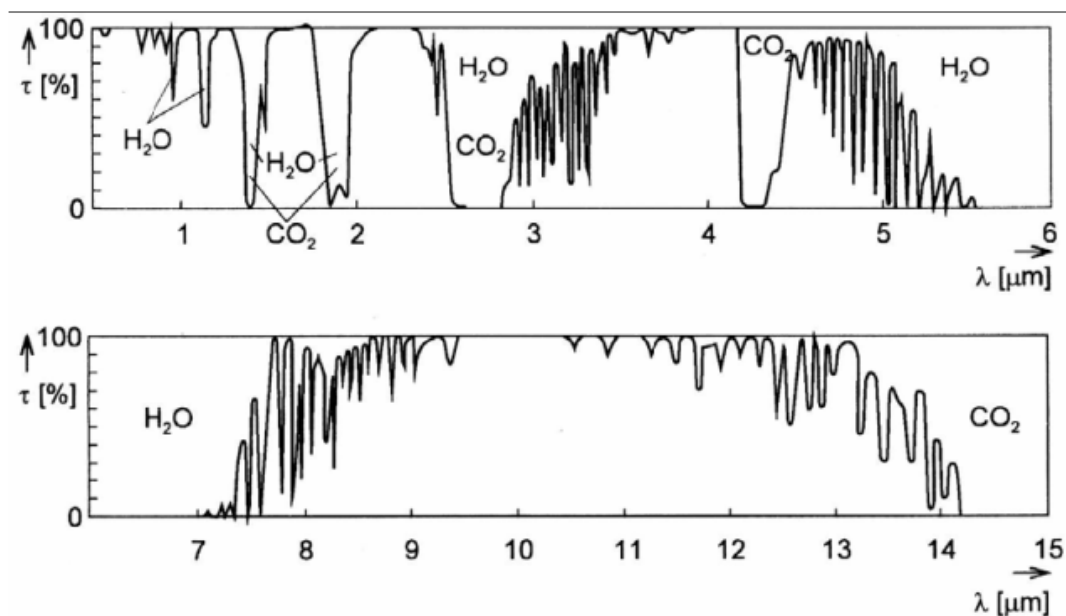
Z jakého materiálu je měřený objekt?

Svařování metodou MIG se používá pro svařování hliníku, mědi, titánu a dalších neželezných kovů.

Svařování metodou MAG se používá ke svařování nelegovaných, nízkolegovaných a vysokolegovaných ocelí.

Je okolní atmosféra znečištěna (prachem, kouřem, párou)?

Vlivy znečištěné atmosféry na měření je znázorněno na následujícím obrázku:



Obr. 5.6 Propustnost atmosféry v závislosti na vlnové délce (13, s.9)

Hodnoty emisivity ϵ pro vybrané povrchy jsou uvedeny v tabulce 2.3. Pro reálná tělesa je hodnota emisivity vždy menší než 1. Při aplikaci bezdotykových teploměrů pro měření teploty povrchu těles je znalost hodnoty emisivity nezbytná.

Během experimentu, vzhledem k tomu, že se bude měřit svařování pomocí elektrickým obloukem v ochranných atmosférách MIG / MAG se očekává, že atmosféra se bude znečišťovat výpary z roztaveného materiálu a plyny které jsou používány v těchto metodách.

Svařování metodou MIG využívá inertní plyn, nejčastěji argon (Ar) nebo helium (He), či jejich směsi. Svařování metodou MAG využívá aktivní plyn, obvykle CO_2 nebo směs CO_2 , argonu (Ar), kyslíku (O_2).

Očekává se, že během experimentu propustnost atmosféry se bude měnit, to znamená že emisivita prostředí se také bude měnit. Tohle bude dělat problémy k přesnému měření. Bude nutné během prvního provedení experimentu kontrolovat emisivitu a zjistit, jak moc se mění během celého procesu. Pokud to bude ovlivňovat experiment na tolik, že data získaná nebudou v rozmezí tolerance, bude nutno navrhnout řešení.

Může se například použít lepší ventilace prostředí k odstranění nežádoucích prvků a zlepšení kvality a propustnosti atmosféry. Pokud tohle nepomůže bude nutno změnit místnost a provést experiment v místnosti s lepší ventilací, nebo dokonce provést experiment ve venkovních podmínkách. Tohle ale ovlivní i jiné parametry experimentu jako je vlhkost. Také u venkovních podmínek musíme brát v úvahu zdroj rušivého záření jako například je Slunce. Měření bude třeba provést vícekrát a porovnat výsledky. Vhodné by bylo udělat taky porovnání mezi jednotlivými metodami svařování pomocí elektrického oblouku v ochranných atmosférách MIG / MAG. To znamená pro

každou metodou udělat vlastní měření a řešit to jako úplně jiný případ. Vzhledem k tomu, že každá metoda má svoje uplatnění v praxi a s každou metodou se svažují jiné materiály, můžeme získat zajímavá porovnání a data tykající se svařovací teploty, povrchové teploty, ovlivnění materiálů atd.

Doporučení vzhledem k měření vysokých teplot.

Obavami, že vzhledem k měření vysokých teplot, které jsou předpokládáné v experimentu, očekávají se v rozmezí 4000°C až 8000°C a vzhledem k tomu, že kamera je vybavena vysokoteplotní filtrem který má omezení do 1500 °C, bylo nutno kontaktovat a poradit se s lidmi z daného oboru.

Vzhledem k daným podmínkám bylo doporučeno, že je nutnost zvýšit vzdálenost mezi měřeným objektem a termovizní kamerou a mezi ně umístít speciální sklo vyrobené z Germania. Následující podkapitola vysvětluje podrobně prvek Germanium, jeho vlastnosti a důvod použití v navrhnutém experimentu.

5.1.8 Sklo z Germania (2, 3, 5, 7)

Germanium, chemická značka Ge, je vzácný polokovový prvek, nacházející největší uplatnění v polovodičovém průmyslu a v optice.

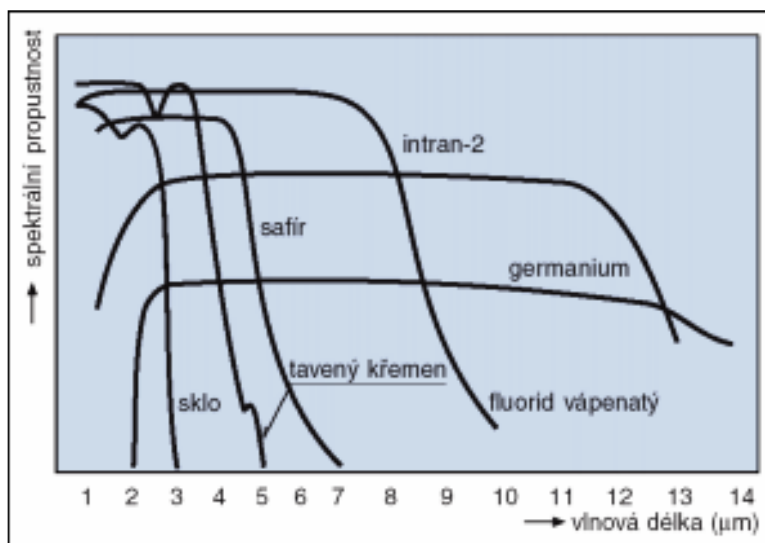
Charakteristika. Poměrně velmi řídce se vyskytující polokov, nacházející se obvykle jako příměs v rudách zinku a stříbra. Germanium vytváří sloučeniny v mocenství. Objevil jej roku 1886 německý chemik Clemens A. Winkler a pojmenoval jej podle své vlasti. Zajímavé je, že jeho existence byla předpovězena tvůrcem Periodické tabulky prvků, ruským chemikem Dmitrijem Ivanovičem Mendělejevem, který jej nazýval eka-silicium a poměrně přesně určil základní fyzikálně-chemické vlastnosti tohoto v té době ještě neznámého prvku. V pevném skupenství se germanium chová jako polovodič, a to jak v krystalické, tak v amorfní formě. Naproti tomu v kapalném skupenství je germanium kovem podobně jako například rtuť.

Výskyt a výroba. Germanium je v zemské kůře značně vzácným prvkem. Průměrný obsah činí pouze 5-7 (mg/kg). V mořské vodě je jeho koncentrace mimořádně nízká, pouze 0,07 mikrogramu germania v jednom litru. Předpokládá se, že ve vesmíru připadá na jeden atom germania přibližně 30 milionů atomů vodíku.

V horninách se vyskytuje vždy pouze jako příměs v rudách zinku a stříbra, ale bývá obsaženo jako stopová příměs v mnoha ložiscích uhlí. Z minerálů se velmi vzácně setkáme se směsným sulfidem, stříbra a germania argyroditem. Germanium se průmyslově získává ze zbytků po zpracování zinkových rud a z popele po spalování uhlí s jeho zvýšeným obsahem. Po vyredukování kovu s čistotou přibližně 99 % se germanium o vysoké čistotě připravuje metodou zonálního tavení. Další metodou získávání vysoce čistého germania je frakční destilace těkavého chloridu germaničitého GeCl_4 .

Využití. Zájem o germanium nastal v 50. letech minulého století, kdy byly připraveny první tranzistory a další elektronické součástky na bázi vysoce

čistého germania. Během dalších desetiletí bylo germanium nahrazeno křemíkem, jenž se vyskytuje v přírodě v daleko větší míře, pouze bylo nutno vyvinout postupy pro jeho průmyslovou výrobu v čistotě minimálně 99,9999 %. Avšak germanium je nadále používáno pro polovodičové diody. I v současné době se germanium používá v průmyslové výrobě polovodičů jako germanid křemíku (SiGe) pro výrobu integrovaných obvodů s vysokou rychlostí přenosu signálu. Je také součástí obvodů, které reagují na elektromagnetické vlnění v infračervené oblasti spektra. Využívá se tedy v radarové technice. Nyní toto použití poněkud klesá ve prospěch aplikací v optice.



Obr. 5.7 Spektrální propustnost vybraných materiálů v závislosti na vlnové délce záření (11, 13, s.9)

Důležité uplatnění má germanium při výrobě světlovodné optiky, protože jeho přítomnost v materiálu optických vláken podstatným způsobem zvyšuje index lomu materiálu. Tato vlastnost se uplatní i ve výrobě speciálních optických součástí jako jsou čočky pro kamery s širokým úhlem záběru, nebo optik pro zpracování signálu v infračervené oblasti spektra (například v přístrojích pro noční vidění). Gadoliniovo-germaniové granátoidy (GGG) se používají v laserové technice.

Germanium a jeho sklo GeO_2 jsou transparentní v infračerveném spektru. Skla z germania, mohou být vyrobena a montována jako ochranné čočky na termovizních kamerách. GeO_2 je materiál který je upřednostňován před ostatní IR transparentní materiály, protože je mechanicky odolný materiál a dostává přednost při drsném použití ve vojenských a vesmírných aplikaci.

Proces zlepšování mechanických a optických vlastností skla selenidu zahrnuje kroky míchání skleněných komponentů, včetně modifikátoru v elementární formě nebo selenid, tavení skleněných komponentů a vytvoření roztavené směsi, chlazení tyto směsi na pevném stavu, žíhání pevného skla a chlazení žíhaného skla na pokojové teplotě.

5.1.9 Pracovní postup termovizní kamery Flir SC 2000

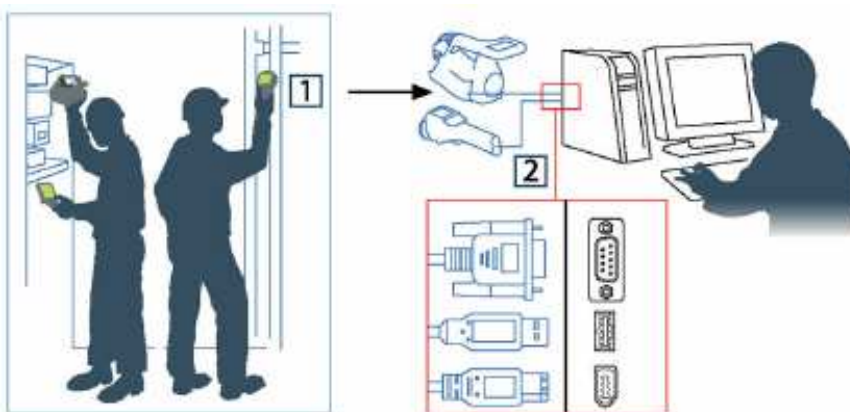
Infračervené měření neboli inspekce se obvykle provádí po typickém pracovním toku, který je dán použitou kamerou Flir SC 2000 a popsán

výrobce v manuálu který je dodáván společně s kamerou. ThermaCAM QuickView je důležitou součástí tohoto pracovního toku, a umožní snadně pro někoho přemístit infračervené snímky z fotoaparátu do počítače, vytvářet jednoduché zprávy, nebo uložit obrázky na pevný disk pro pozdější použití v ThermaCAM Reporter, který je průmyslový standard pro vytváření pokročilých a dobře vypadajících infračervených inspekčních zpráv.

Pracovní postup lze rozdělit jednoduše na čtyři kroky:

Krok 1 Během infračerveného měření pomocí používané termovizní kamery zachytíme infračervené a nebo současně vizuální obrázky, které nás zajímají.

Krok 2 Infračervenou kameru připojíme na počítač pomocí jednoho z těchto tří komunikačních protokolů. RS-232 sériová komunikace, USB (USB Universal Serial Bus) komunikační protokol, nebo FireWire komunikační protokol.



Obr. 5.8 Pracovní postup termovizní kamery Flir SC 2000 krok 1 a 2 (17, s.18)

Krok 3 Práce s vizuálními obrázky podle vlastního výběru, pomocí vestavěné funkce ThermaCAM QuickView. Je tu možnost si vybrat a zrušit výběr obrázků, pohybovat s obrázkem na různých místech na počítači, nebo úplně odstranění obrázků které nechceme dále zachovávat. Můžeme také přidat k obrázkům popisy, přečtenou hodnotu teploty a změny tlaku atd.

V ThermaCAM QuickView můžeme prohlížet infračervené nebo vizuální obrázky za použití různých obrazových (image) názorů. Například, pokud jsme si stáhli několik set snímků z fotoaparátu a budeme chtít začít se získáním obecné představy o obrazové skupině, kde určité obrázky jsou v obraze průtoku, poměr mezi infračervenými a vizuálními obrázky a tak dále. Za tímto účelem by bylo vhodné použít funkci malé miniaturny (Small Thumbnails) pro pohled na obrázky. Po získání obecné představy o snímcích, které jsme stáhli, dalším krokem by bylo, abychom jsme se blíže podívali na některé obrázky. V tomto bodě možná budeme chtít zobrazit jména obrazových souborů a datum nahrávání. Použitím funkce střední velikost miniaturny (Medium Thumbnails) znázorní nám jen jména obrazových souborů a datum nahrávání. Pomocí tohoto pohledu na obrázek jsou všechny názvy souborů a záznam dat přečteny z obrázků, ale stále máme dobrý přehled o obrázcích. Použitím

funkce velké miniatury (Large Thumbnails) pohled na obrázek nás dostane ještě blíže. Pomocí tohoto zobrazení můžeme snadno provést porovnání dvou nebo více obrázků vedle sebe, nebo jeden nad druhým, tj. že se obrázky překrývají. Pokud chceme se podívat na obrázky jeden po druhém, použijeme funkci jednotlivý obrázkový pohled (Single Image view). Tahle funkce poskytuje prostředky k tomu, že pouze jeden obrázek je zobrazen na celé obrazovce a teplotní stupnice je zobrazena na pravé straně obrázku.

Přemísťování obrázků je velmi snadné v ThermaCAM QuickView a funguje velmi podobně, jako když se přemísťují obrázky nebo jiné soubory ve Windows Explorer pomocí tahat (drag) a pustit (drop) operaci. Lze také přesunout obrázky pomocí klávesových menu, nebo pomocí příkazů nabídky. Před přemístěním obrázku musíme obrázek vybrat, to se provádí kliknutím na obrázek. Šedý rám znamená, že obraz je v současné době vybrán.

V ThermaCAM QuickView můžeme analyzovat naše obrázky pomocí jedné ze následujících metod:

- Čtení teploty z obrázku pomocí funkcí Létajícího Spotu (Flying Spot).
- Přemísťování stávajících měřicích markerů v obraze.
- Změna úrovně a rozpětí.
- Změna parametrů objektu.

Tyhle metody ale, podporují jenom radiometrické .jpg soubory (radiometric jpg).

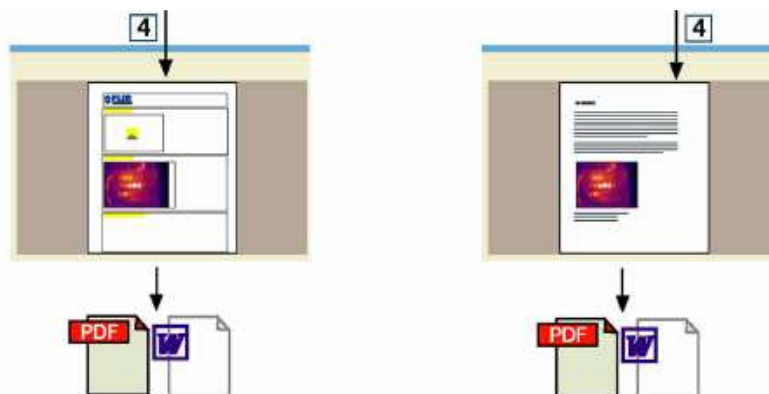


Obr. 5.9 Pracovní postup termovizní kamery Flir SC 2000 krok 3 a 4 (17, s.18)

Krok 4 Vytvoření zprávy jedním z následujících způsobů:

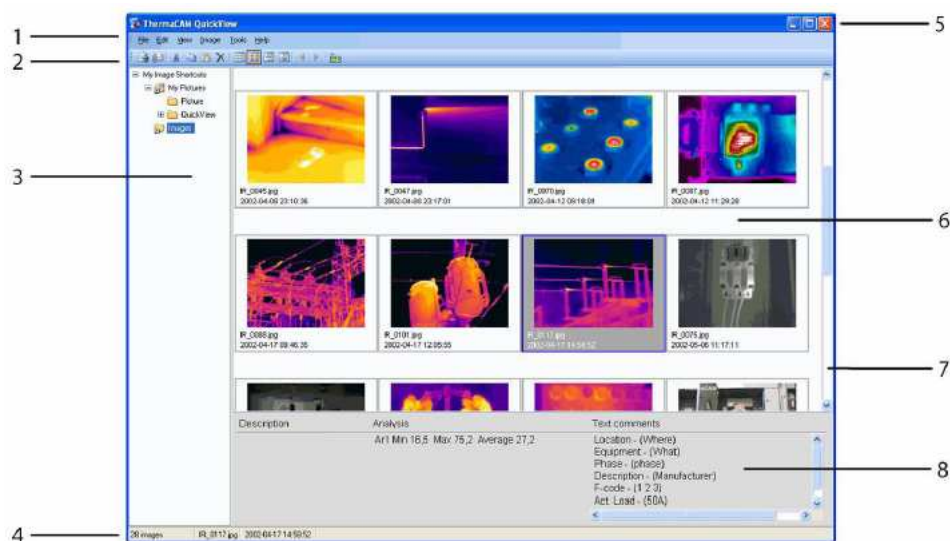
- Vytvoření jednoduché zprávy v podobě Adobe Acrobat PDF pomocí generátoru na zprávy v souborovém menu (File menu) použitím uložit jako PDF (Save as PDF).
- Vytvoření zprávy pomocí aplikace Microsoft Word přetažením obrázků do aplikace Microsoft Word a potom k tomu přidat svůj vlastní komentář a popisy.
- Vytvoření zprávy pomocí programu FLIR Systems ThermaCAM Reporter , přetažením obrázků které jsem vytvořili do aplikace ThermaCAM Reporter. Můžeme pomocí těchto způsobů vytvářet jednoduché zprávy, které obsahují jeden nebo více infračervených nebo vizuálních obrazů, jakož i všechny interní informace týkající se daných obrazů, například text, poznámky, názvy

souborů, data a podobně. Zprávy jsou uloženy v platformě nezávislého Adobe Acrobat PDF formátu. Tento formát umožňuje přečtení nebo vytisknutí zprávy z libovolného počítače pomocí volně ke stažení programu PDF Reader ze stránek Adobe.



Obr. 5.20 Vytvoření termovizní zprávy (17, s.18)

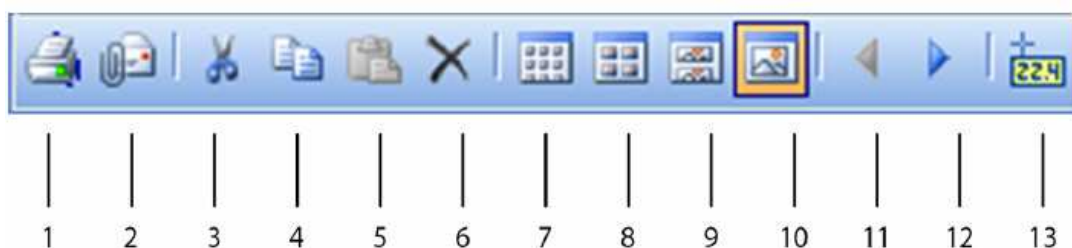
Při vytváření zprávy, každá její strana bude vytvořena v souladu s následující strukturou. Od shora dolů: obrázek, popis obrázku, analýzy, textové komentáře, název souboru.



Obr. 5.31 Pohled na pracovní oblast ThermalCAM QuickView (17, s.20)

Vysvětlení pracovní oblasti:

1 Hlavní tabulka neboli lišta (Menu bar), **2** Panel nástrojů (Toolbar), **3** Složka tabulce – pod okno (Folder pane), **4** Tabulka statusu (Status bar), **5** Tlačítka Minimalizovat, Maximalizovat a Zavřít (Minimize, Maximize, and Close buttons), **6** Obrázek tabule, pracovní oblast (Image pane) **7** Posuvník obrázu (Scroll bar), **8** Oblast pro atributy fotek (Pane for image attributes).



Obr. 5.42 ThermalCAM QuickView. Panel nástrojů (17, s.21)

Tab.5.1 Vysvětlení funkce nástrojů ThermalCAM QuickView (17, s.21)

Popisek	Funkce	Vysvětlení
1	Tisk	Kliknutím na tohle tlačítko se vytiskne aktuálně vybraný obraz pomocí místní nebo síťové tiskárny.
2	Příjemce pošty	Kliknutím na tohle tlačítko se pošle e-mailem aktuálně vybraný obraz (nebo obrázky).
3	Střih (Cut)	Kliknutím na tohle tlačítko se vyberou k přemístění obrázky z dané složky.
4	Kopie (Copy)	Kliknutím na tohle tlačítko se provede kopírování obrázku do složky.
5	Přilepit (Paste)	Kliknutím na tohle tlačítko se vloží obrázek do složky. Po použití příkazu kopie nebo střih.
6	Vymazat	Kliknutím na tohle tlačítko se provede smazání vybraných obrázků ze složky.
7	Malé miniatury	Kliknutím na tohle tlačítko se provede zobrazení obrázků jako malé miniatury.
8	Střední miniatury	Kliknutím na tohle tlačítko se provede zobrazení obrázků jako střední miniatury.
9	Velké miniatury	Kliknutím na tohle tlačítko se provede zobrazení obrázků jako velké miniatury.
10	Jeden obrázek	Kliknutím na tohle tlačítko se provede zobrazení jednotlivých obrázků.
11	Předchozí	Kliknutím na tohle tlačítko se zobrazí předchozí obrázek v obrazovém katalogu.
12	Následující	Kliknutím na tohle tlačítko se zobrazí následující obrázek v obrazovém katalogu.
13	Létající Místo (Flying Spot)	Když pracujeme v režimu jeden obrázek a chceme přečíst teplotu z radiometrického obrázku, kliknutím na tohle tlačítko a přesunem kurzoru nad obrázkem, teplota se nám zobrazí dvěma různými způsoby: V malé výsledkovém poli na stejném místě jako kurzor (funguje jenom pro Windows XP) nebo na stavovém řádku okna. Tato funkce je podporována pouze pro obrázky obsahující radiometrické informace.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá bezdotykovým měřením povrchových teplot. Popisuje základní fyzikální principy, podle kterých jsou jednotlivé přístroje navrženy, jejich technické parametry a porovnává jednotlivé typy. Zabývá se, aplikací této technologie v různých oblastech lidské činnosti a hlavně jejím využitím ve strojírenství.

Podle daného zadání, doporučené literatury a jiných zdrojů například Internetové stránky firem a výrobních katalogů různých firem techniků jsem vypracoval studii a zhodnotil ji v diplomové práci. Využil jsem veškeré poznatky a odbornou pomoc vysokoškolských profesorů a lidí z praxe v oboru.

Součástí diplomové prací byl návrh praktického experimentu. Experiment spočívá v měření povrchové teploty pomocí termovizní kamery Flir SC 2000 (souprava thermal CAM SC 2000 PAL).

Zvoleno bylo provést měření procesu svařování elektrickým obloukem.

Experiment spočívá v měření povrchové teploty v místě kde se bude provádět svařování elektrickým obloukem. Pracovní prostředí, v něm elektrony procházejí plazmou sloupce oblouku, který v závislosti na parách kovů a druhu ochranného plynu, dosahují teploty 4000 °C - 8000 °C.

Obavami, že vzhledem k měření tak vysokých teplot, které jsou předpokládány v experimentu a vzhledem k tomu, že kamera je vybavena vysokoteplotní filtrem který má omezení pouze do 1500 °C, bylo nutno kontaktovat a poradit se s lidmi z daného oboru.

Vzhledem k daným podmínkám bylo doporučeno, že je nutnost zvýšit vzdálenost mezi měřeným objektem a termovizní kamerou a mezi ně umístit speciální sklo vyrobené z Germania.

Všechny tyto poznatky byly vzaty na vědomí a provedly se opravy k vypracování finální podobě zvoleného experimentu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. 3. Vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM. červen 2003. 284s. ISBN 80-214-2409-5.
2. HALLIDAY, David a RESNICK, Robert a WALKER, Jearl. *FYZIKA část 4 Elektromagnetické vlny – Optika – Relativita*. Přel. J. Komrška, J. Obdržálek, P. Dub. 1.Vyd. Praha: Nakladatelství VUTIUM a PROMÉTHEUS. 168s. ISBN 80-214-1868-0.
3. SPN pedagogické nakladatelství, a.s. *Přehled středoškolské chemie*. 4.Vyd. Praha: Pedagogické nakladatelství. 1999. 368s. ISBN 80-7235-108-7.
4. KREIDL, Marcel. *Měření teploty - Senzory a měřicí obvody*. 1.Vyd. Praha: Nakladatelství BEN – Technická literatura. 2005. 240s. ISBN 80-7300-145-4.
5. LYSENKO, Vladimír. *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. 1.Vyd. Praha: Nakladatelství BEN – Technická literatura. 2005. 160s. ISBN 80-7300-180-2.
6. Edice ALBATROS. *Rozum do kapsy - Malá encyklopedie*. 8. Vyd. Praha: Nakladatelství ALBATROS, a.s . 2002. 766s. ISBN 80-00-01025-9.
7. MEDEK, Jaroslav. *Experimentální metody*. 1. Vyd. Brno: PC-DIR spol. s.r.o – Nakladatelství. listopad 1993. 182s. ISBN 80-214-0552-X.
8. MINAŘÍK Václav. *Obloukové svařování*. 2. Vyd. Praha: Scientia, spol. s.r.o., pedagogické nakladatelství. 2003. 240s. ISBN 80-7183-285-5.
9. VAVŘIČKA Roman. *Bezdotykové měření teplot* [Online] ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ustav techniky prostředí. Dostupné na World Wide Web:<<http://utp.fs.cvut.cz/vz/clanky/104.pdf>>
10. PAVELEK Milan. *Teorie termovizních měření*. [Online] VUT v Brně, Fakulta strojní, Ustav termomechaniky. Dostupné na World Wide Web:<<http://147.229.133.6/~pavelek/optika/0700-z01.pdf>>
11. BETAK Jindřich. *Pásmové pyrometry*. [Online] Česka metrologická společnost, Praha. Dostupné na World Wide Web:<www.>
12. SZERUDA Rostislav. *Bezdotykové měření teploty poměrovým pyrometrem*. [Online]. Dostupné na World Wide Web:<<http://pyrometrie.sweb.cz/Pompyr.htm>>
13. KADLECK K. *Bezdotykové měření teploty – Příprava na práci v laboratoři* [Online] Ustav fyziky a měřicí techniky VSCHT Praha. Dostupné na World Wide Web:< <http://www.vscht.cz/ufmt/kadleck.html>>
14. OMEGA Zpravodaj pro měření a regulaci *Bezdotykové měření teplot*. Číslo 1, 2.Vydání. [Online] Dostupné na World Wide Web:< <http://www.newport.cz>>
15. KOLEKTIV AUTORŮ: *Zvárač II*. Nakladatel Vydavatelstvo technickéj a ekonomickém literatury Bratislava, Bratislava 1974, 5. vydání 63-066-74
16. MILOŠ HAMMER A KOLEKTIV: *Elektrotechnika: Laboratorní cvičení pro bakalářské studium*. Nakladatel VUT Brno, Brno 1999, 1. vydání ISBN 80-214-1301-8
17. FLIR Systems. *ThermalCAM QuickView, Users manual Version 1.3*. English (EN) February 21, 2005. Publ. No. 1 557 953 Revision a88.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
Q	J	Teplo
U	J	Vnitřní energie soustavy
A	J	Práce
q	J.kg	Měrné teplo
u	J.kg	Měrnou vnitřní energii
a	J.kg	Měrnou práci
p	Pa	Tlak
E _o	W/m ²	Hustota zářivého toku
σ	W/m ² .K ⁴	Stefan-Boltzmannova konstanta
E _{oλ}	W.m ⁻³	Spektrální hustota zářivého toku
λ	m	Vlnová délka záření
T	K	Termodynamická (absolutní) teplota
IR	λ	Infračervené záření
SWIR	λ	IR krátké vlnové délky
MWIR	λ	IR střední vlnové délky
LWIR	λ	IR dlouhé vlnové délky
FIR - VLWIR	λ	Dlouhé infračervené záření
UV	Hz	Ultrafialové záření
γ	Hz	Gama záření
ε	f(λ, T)	Emisivita
ELF	Hz	Extrémně nízká frekvence
SLF	Hz	Super nízká frekvence
ULF	Hz	Ultra nízká frekvence
LF	Hz	Nízká frekvence
MF	Hz	Střední frekvence
HF	Hz	Vysoká frekvence
VHF	Hz	Velmi vysoká frekvence
UHF	Hz	Ultra vysoká frekvence
SHF	Hz	Super vysoká frekvence
EHF	Hz	Extrémně vysoká frekvence

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	...
Příloha 2	...
Příloha 3	...
Příloha 4	...
Příloha 5	...
...	...
Příloha 10	...

Příloha 1