

Termokamery a pyrometry – princip měření, vlastnosti a využití

V posledních letech se značně rozšířilo používání pyrometrů (IČ teploměrů) a termokamer pro bezdotykové měření teploty, termografii a termodiagnostiku. Pyrometry nacházejí původně uplatnění jen v takových provozech a aplikacích, kde bylo třeba měřit vysoké teploty (obvykle nad 500 °C). Značný pokrok v oblasti bezdotykového měření teploty se dosáhl díky rozvoji v optice a elektronice a aplikace bezdotykového měření teploty se posunula k podstatně nižším teplotám, včetně měření teplot výrazně nižších než 0 °C. Pyrometry jsou dnes standardně nasazovány pro mnoho aplikací bezdotykového měření teploty v řadě procesů strojírenské technologie a technologie výroby kovů. K měření rozložení teploty na povrchu objektů a k diagnostickým účelům se stále častěji využívají termokamery, které patří k nejmodernější termodiagnostické technice. Jejich uplatnění je v průmyslu velmi široké a od monitorování a diagnostiky strojů, kontroly elektrických instalací, monitorování žáruvzdorného obložení pecí a stavu tepelné instalace až po kontrolu výrobních procesů.

Principy využívané při bezdotykovém měření teploty

Pro pochopení funkce a pro správné používání měřicí techniky při bezdotykovém měření teploty je důležitá znalost teoretických základů používaných měřicích metod. Všechna tělesa, jejichž teplota je vyšší, než absolutní nula vyzařují elektromagnetické záření. Záření je emitováno v důsledku tepelného pohybu částic hmoty a označuje se jako tepelné záření. Při bezdotykovém měření teploty se využívá elektromagnetické záření o vlnových délkách 0,4 až 15 μm. Toto záření spadá částečně do viditelné oblasti, z větší části do infračervené oblasti spektra. Uvedené rozsahy vlnových délek pokrývají měření teplot v rozmezí od -60 °C do +6 000 °C.

K bezdotykovému měření teploty se využívají jednak pyrometry (IČ teploměry), které měří teplotu v určité vymezené oblasti a poskytují obvykle číselnicový výstup na displeji a jednak termokamery (IČ termokamery, IČT kamery), které snímají rozložení teploty na celém povrchu objektu a výstupem je termogram na displeji termokamery (obr. 1). Tepelné záření z objektu je soustředěno optickým systémem na vhodný detektor, jehož elektrický signál je dále zpracován v elektronických obvodech měřicího zařízení.

Intenzita emitovaného záření závisí na teplotě a liší se svou vlnovou délkou. Vzájemné souvislosti mezi intenzitou záření, teplotou, vlnovou délkou a dalšími veličinami popisují fyzikální zákony: zákon Planckův, Wienův, Stefanův-Boltzmannův a Kirchhoffovy zákony [1 až 4]. Podrobný teoretický výklad však přesahuje rámec tohoto článku, který se dále omezuje pouze na vybrané vztahy,

důležité pro pochopení principu měření a pro praktické aplikace.

Idealizovaný objekt, který se používá při teoretickém popisu dějů probíhajících při vyzařování, je černé těleso. Je to teoretický objekt, který při dané teplotě vyzařuje nejvyšší možné množství energie, a také naopak pohltí veškerou energii, která na něj dopadá.

Celková intenzita vyzařování černého tělesa M_0 (W/m²) je podle Stefanova-Boltzmannova zákona úměrná čtvrté mocnině termodynamické teploty T (K)

$$M_0 = \sigma \cdot T^4, \text{ kde } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}. \quad (1)$$

Skutečné těleso vyzařuje (i pohlcuje) méně tepelného záření než černé těleso a tuto skutečnost koriguje faktor, který se nazývá emisivita. Emisivita je definována jako poměr energie vyzařované objektem při dané teplotě k energii vyzařované černým tělesem při stejné teplotě. Emisivita může nabývat hodnot 0 až 1; emisivita černého tělesa je rovna 1,0; pro reálná tělesa je emisivita vždy menší než 1.

Emisivita závisí obecně na vlnové délce a na teplotě, dále pak na materiálu, kvalitě povrchu a úhlu pozorování. Existují však tělesa, jejichž emisivitu můžeme považovat za konstantní v širokém rozsahu vlnových délek. Takové zářiče označujeme jako šedá tělesa s emisivitou menší než 1 a tato tělesa jsou pro bezdotykové měření nejvhodnější.

Pro intenzitu vyzařování šedého tělesa M pak platí Stefanův-Boltzmannův zákon ve tvaru

$$M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \text{ kde } \varepsilon \text{ je emisivita šedého tělesa.} \quad (2)$$

Intenzita vyzařování M je dána podílem zářivého toku F (W) a plochy povrchu S (m²) zdroje záření a pro zářivý tok z povrchu tělesa tedy platí:

$$\Phi = M \cdot S \quad (3)$$

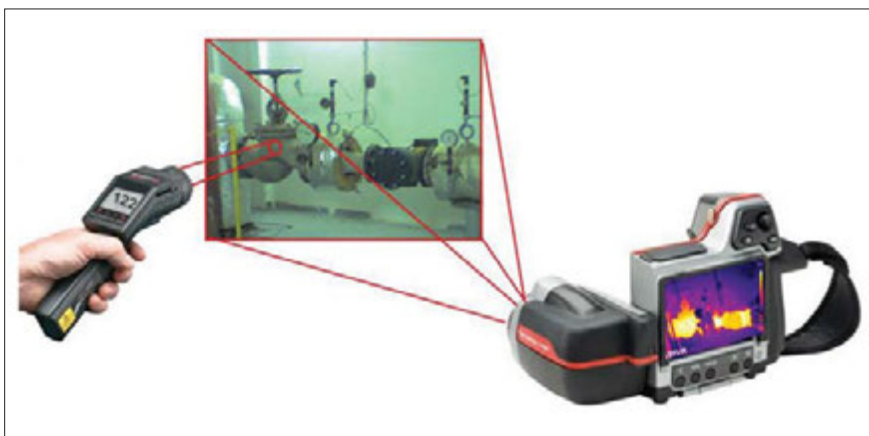
Energie vyzařovaná šedým zářičem, v porovnání s energií vyzařovanou černým tělesem, bude menší úměrně k hodnotě emisivity šedého tělesa.

Jestliže je těleso ve stavu tepelné rovnováhy, nedochází ani k ohřívání ani ochlazování, a tedy energie, kterou těleso vyzařuje, musí být rovna energii pohlcované. Podle Kirchhoffova zákona platí, že emisivita ε se rovná pohltivosti α . Je-li teplota tělesa větší než teplota okolí, převažuje vyzařování energie nad jejím pohlcováním a obráceně. Intenzita vyzařování černého tělesa M_0 závisí jen na jeho termodynamické teplotě T . U černého tělesa je emisivita i pohltivost $\varepsilon = \alpha = 1$. U šedého tělesa je emisivita i pohltivost vždy menší než 1.

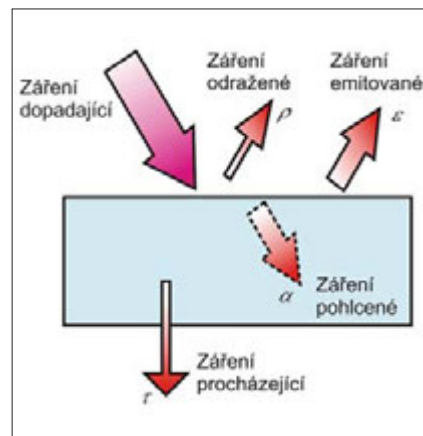
Existují tři jevy, které se projevují u reálných objektů (obr. 2):

- část dopadajícího záření může být pohlcena (ve stavu rovnováhy se rovná vyzařování),
- část záření může být odražena a
- část záření může tělesem prostoupit.

Vedle pohltivosti α a emisivity ε jsou definovány i odrazivost ρ jako míra schopnosti odrazit záření, a propustnost τ jako míra schopnosti propustit záření. Všechny tyto veličiny jsou obecně závislé na vlnové délce; pro šedá tělesa je však můžeme považovat za konstantní v dosti široké oblasti vlnových délek. Protože jsou tyto veličiny pro bezdotykové měření teploty velmi důležité,



Obr. 1 – Měření teploty IČ teploměrem a termokamerou



Obr. 2 – Interakce záření s tělesem

jsou dále uvedeny v souhrnu jejich definice:

- Emisivita ε je poměr zářivého toku reálného objektu a černého tělesa při stejné teplotě.
- Pohltivost (absorbance) α je poměr pohlceného a dopadajícího zářivého toku.
- Odrazivost (reflektance) ρ je poměr odraženého a dopadajícího zářivého toku.
- Propustnost (transmitance) τ je poměr prostupujícího a dopadajícího zářivého toku.

Součet pohltivosti nebo emisivity s odrazivostí a propustností je vždy roven jedné

$$\alpha + \rho + \tau = 1, \text{ nebo } \varepsilon + \rho + \tau = 1$$

Pro nepropustné materiály je propustnost $\tau = 0$, a pak platí:

$$\varepsilon + \rho = 1$$

Ze známé emisivity můžeme vypočítat odrazivost nepropustného tělesa:

$$\rho = 1 - \varepsilon$$

Čím nižší bude emisivita, tím vyšší bude odrazivost tělesa.

Informativní hodnoty emisivity ε pro vybrané povrchy jsou uvedeny v tab. 1. Podrobné tabulky emisivit pro různé materiály, vlnové délky a teploty je možno nalézt v odborné literatuře, případně na internetu [1, 5]. Tabulka by měla obsahovat vždy i údaj o teplotě a vlnové délce, neboť emisivita je na teplotě a vlnové délce závislá. Emisivita je velmi důležitým faktorem termografie a její vliv je nutno vždy respektovat.

Uspořádání pyrometru a termokamery

Zjednodušené blokové schéma uspořádání pyrometru a termokamery je znázorněno na obr. 3. Tepelné záření, vyzařované měřeným objektem, se soustřeďuje optickým systémem na detektor IČ záření měřícího přístroje. Optický systém funguje většinou i jako filtr a musí propouštět záření požadovaných vlnových délek. Termokamera pracuje na principu bezdotykového měření teploty a princip

Charakteristika povrchu	Teplota (°C)	Emisivita
Černý lak matný	40 - 100	0,96 - 0,98
Lidská pokožka	32	0,96
Voda	20	0,96
Cihla (červená, normální)	20	0,93
Papír (bílý, matný)	20	0,93
Dřevo hoblované	20	0,8 - 0,9
Železo zoxidované	100	0,74
Železo lesklé	150	0,16
Měď leštěná	100	0,03

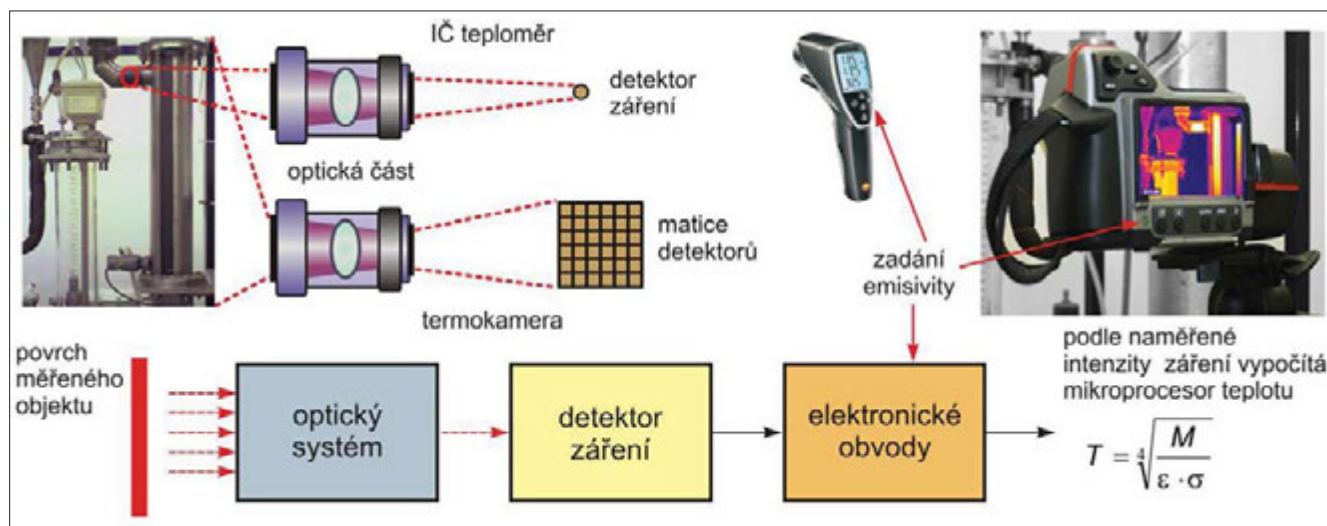
Tab. 1 - Informativní hodnoty emisivit pro vybrané povrchy při $\lambda = 7$ až $14 \mu\text{m}$

funkce je tedy stejný jako u pyrometrů. Zásadní rozdíl je v tom, že pyrometr vyhodnocuje teplotu v jednom bodě (přesněji řečeno vyhodnocuje průměrnou teplotu v určité oblasti), zatímco termokamera vyhodnocuje teplotní pole na povrchu celých objektů (obr. 1). Většina současných typů termokamer využívá tzv. maticové (mozaikové) detektory. Rozdíl je tedy v tom, že v pyrometru je použit jeden senzor IČ záření, v termokameře je maticový detektor, obsahující velký počet jednotlivých senzorů tepelného záření.

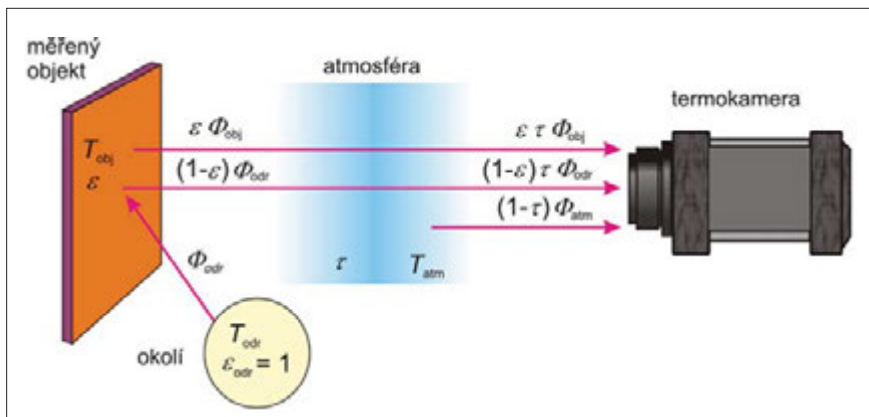
Jako senzory infračerveného záření se používají jednak tepelné senzory, u nichž IČ záření vyvolává změnu teploty, která se poté vyhodnocuje. Takovým senzorem je například mikrobolometr (miniaturní odporový teploměr), který mění elektrický odpor v závislosti na intenzitě dopadajícího záření. Tepelné senzory pracují v široké oblasti vlnových délek a nevyžadují chlazení detekčního systému. Dále se používají kvantové fotonové senzory (fotodiody a fotoodpory), které poskytují po dopadu IČ záření elektrický signál (změna napětí či elektrické vodivosti). Kvantové detektory jsou citlivější než tepelné detektory, vyžadují většinou chlazení a detekují záření jen v úzkém rozsahu spektra. Mikrobolometrické maticové detektory jsou typem tepelného detektoru a v současné době nejčastějším typem detektoru

v termokamerách. Rozlišení maticového detektoru je dáno počtem prvků (pixelů), uspořádaných do matice. Matice detektorů pro nižší modely termokamer obsahují např. 100×100 elementů, střední třída termokamer obsahuje detektory s rozlišením 320×240 (tj. 76 800) elementů a termokamery vyšší třídy pracují s rozlišením např. 640×480 (i více) elementů.

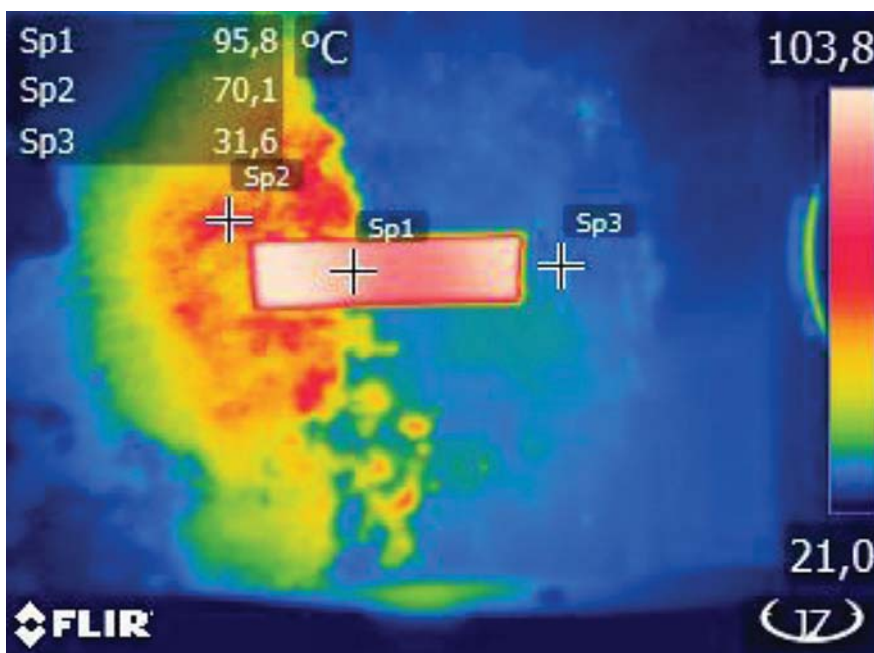
Vstupní optická část termokamery se velmi podobá digitálnímu fotoaparátu. Objektiv termokamery však musí propouštět IČ záření požadovaných vlnových délek je proto vyroben ze speciálního materiálu. Pro termokamery pracující v rozsahu vlnových délek 8 až $14 \mu\text{m}$, což je v současné době nejčastější typ termokamer, jsou objektivy vyráběny z germánia s nanesenou antireflexivní vrstvou. Objektiv promítá dopadající tepelné záření na maticový detektor, na kterém se vytváří „infračervený obraz“ povrchu měřeného objektu. Teplota maticového detektoru je udržována na konstantní hodnotě (obvykle 30°C) obvodem s Peltierovým článkem. Moderní mikrobolometrické detektory obsahují již na čipu potřebné elektronické obvody pro analogovou nebo digitální úpravu signálu. Řídící logika zajišťuje postupné čtení signálu z jednotlivých elementů. Signály z jednotlivých senzorů maticového detektoru, které odpovídají zářivému toku IČ záření jednotlivých



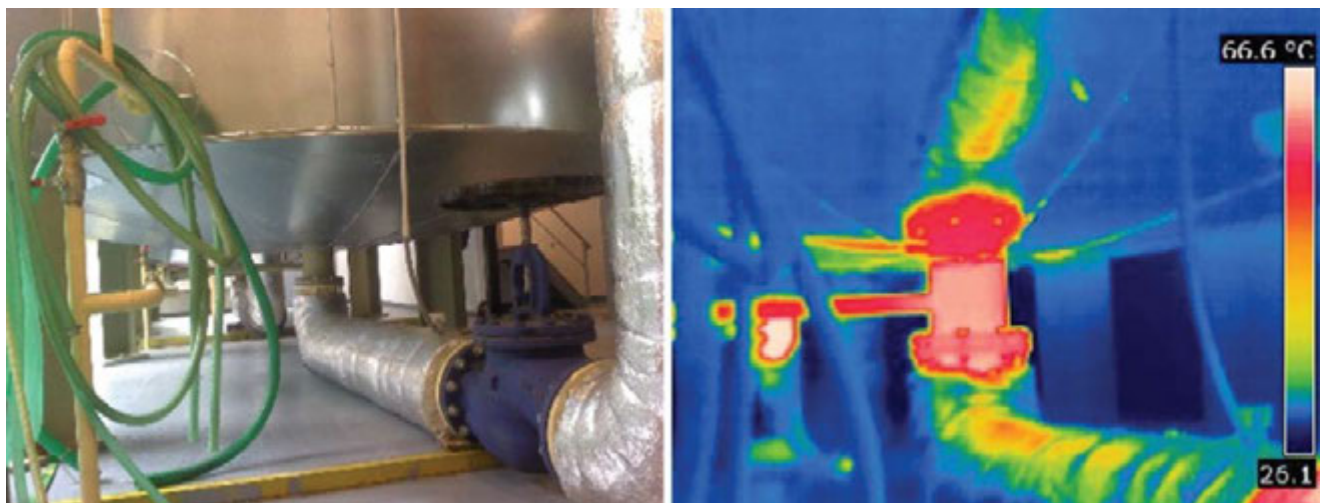
Obr. 3 - Blokové schéma pyrometru a termokamery



Obr. 4 – Situace při termografickém měření



Obr. 5 – Měření ilustrující vliv emisivity. Na termogramu je znázorněn železný plech, který je ve svém středu zahříván. Plech má tři různé druhy povrchu: 1) leštěný povrch, 2) vysoce oxidovaný povrch a 3) nalepenou pásku s vysokou emisivitou. Na leštěném povrchu je umístěn bod Sp3, na oxidovaném povrchu je umístěn měřicí bod Sp2 a na páске bod Sp1. Leštěný povrch kovů má velmi nízkou emisivitu, což platí i v tomto případě, kdy na jeho povrchu není prakticky pozorovatelné žádné oteplení, zdánlivá teplota v bodě Sp3 je 31,5 °C. Naproti tomu oxidované povrchy kovů mají výrazně vyšší emisivitu a proto je zdánlivá teplota v bodě Sp2 výrazně vyšší, tj. 70,1 °C. Teplota 95,8 °C v bodě Sp1 je blízká skutečné teplotě povrchu, neboť emisivita pásky je vysoká a známá (0,95)



Obr. 6 – Na lesklém plechovém plášti nádoby (vlevo fotografie, vpravo termogram) je pozorovatelný zrcadlový odraz teplovodu, který je pod nádobou. K odrazu dochází proto, že plášť nádoby je z leštěného kovu o velmi nízké emisivitě, tj. o vysoké odrazivosti. Tepelné záření z povrchu horkovodu dopadá na plášť nádoby a odsud je odraženo do termokamery

měřených bodů, jsou zpracovány v elektronických obvodech, jejichž výstupem je nakonec viditelný barevný obraz – termogram – na monitoru termokamery.

Termografické měření

Při termografickém měření snímá termokamera (a stejně pyrometr) záření nejen samotného objektu, ale také záření z okolí, které se odráží z povrchu objektu do kamery. Obě záření jsou do jisté míry zeslabována atmosférou mezi termokamerou a měřeným objektem. Kromě toho je třeba někdy vzít v úvahu i záření atmosféry. Tato situace je schematicky znázorněna na obr. 4.

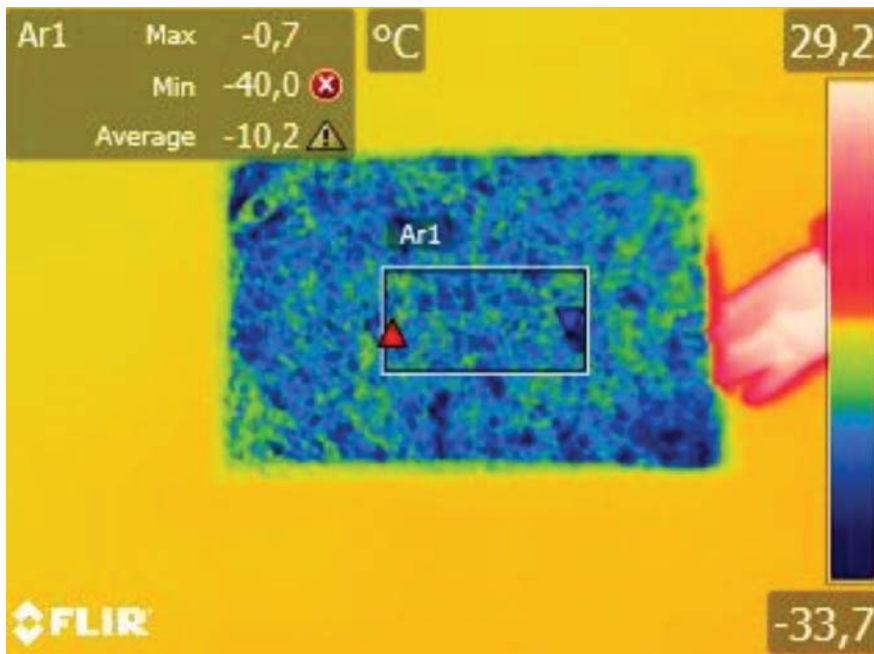
Jednotlivé složky zářivého toku přijaté detektorem termokamery jsou:

- Zářivý tok z objektu zeslabený průchodem atmosférou: $\varepsilon \tau \Phi_{obj}$ (teplota objektu je T_{obj}).
- Odražený zářivý tok z okolních zdrojů: $(1-\varepsilon) \tau \Phi_{odr}$, kde $(1-\varepsilon)$ vyjadřuje odrazivost objektu. (Předpokládáme, že záření přicházející z okolí představuje záření z povrchů v myšlené polokouli, které mají emisivitu = 1 a stejnou teplotou T_{odr}). Zdánlivá odražená teplota T_{odr} je zdánlivá teplota jiných objektů, jejichž záření se odráží od povrchu měřeného objektu do termokamery.
- Zářivý tok emitovaný atmosférou: $(1-\tau) \Phi_{atm}$, kde $(1-\tau)$ vyjadřuje emisivitu atmosféry, jejíž teplota je T_{atm} .
- Uvažujeme se plně transparentnost optiky termokamery a zářivý tok optických komponent se považuje za zanedbatelný [3].

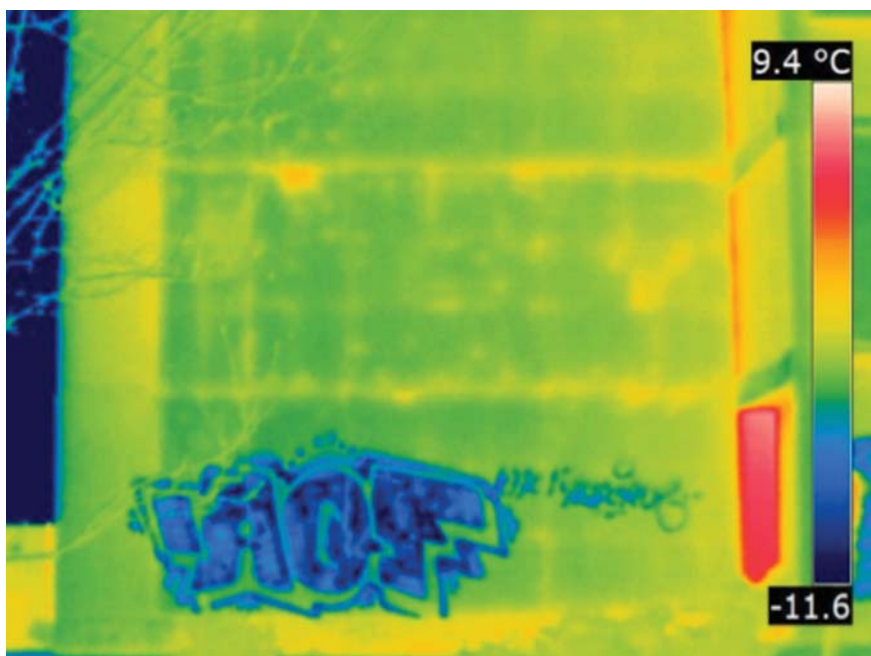
Nyní lze sestavit rovnici pro celkový zářivý tok, který dopadá na detektor termokamery. Tato rovnice se někdy označuje jako rovnice měření termokamerou.

$$\Phi_{celk} = \varepsilon \tau \Phi_{obj} + (1-\varepsilon) \tau \Phi_{odr} + (1-\tau) \Phi_{atm} \quad (4)$$

Při použití Steffanova-Bolzmannova zákona pro šedé těleso by bylo možno odvodit vztah, podle



Obr. 7 – Stanovení hodnoty zdánlivé odražené teploty na povrchu obvodového pláště budovy. Zdánlivá teplota byla stanovena jako $-10,2\text{ °C}$, tj. jako průměrná zdánlivá teplota v obdélníkové oblasti uprostřed odražeče. Na první pohled jde pouze o odhad, neboť maximální i minimální hodnoty v oblasti se od průměrné hodnoty značně liší



Obr. 8 – Povrchová teplota na plášti zatepleného panelového domu je přibližně homogenní. Na termogramu se však zdá, že místa s nasprejovaným nápisem jsou až o 5 °C chladnější. Tato chyba měření je způsobena rozdílnou emisivitou

kterého mikroprocesor termokamery vypočítává teplotu jednotlivých částí měřeného povrchu na základě signálů senzorů maticového detektoru.

Provedeme-li zjednodušení tak, že zanedbáme vyzářování atmosféry, dostaneme vztah

$$\Phi_{\text{celk}} = \varepsilon \tau \Phi_{\text{obj}} + (1 - \varepsilon) \tau \Phi_{\text{odr}} \quad (5)$$

Výraz $\varepsilon \tau \Phi_{\text{obj}}$ reprezentuje zářivý tok z objektu, jehož povrchová teplota je měřena, zatímco výraz $(1 - \varepsilon) \tau \Phi_{\text{odr}}$ představuje parazitní zářivý tok dopadající na detektor a jeho vliv je zapotřebí korigovat. Uživateli termokamery musí proto zadat parametry měření: emisivitu objektu ε , zdánlivou odraženou

teplotu T_{odr} , teplotu atmosféry T_{atm} , a propustnost atmosféry τ (místo propustnosti atmosféry se obvykle zadává relativní vlhkost a vzdálenost termokamery od objektu). Parametry měření jsou u termokamery přednastaveny na určité hodnoty, pro správné vyhodnocení měřené teploty je nutno tyto parametry korigovat podle skutečné situace. Každá měřicí (radiometrická) termokamera je vybavena možností korekce těchto parametrů.

Parametry měření

Z výše uvedených vztahů vyplývá, že termokamera ani pyrometr neměří teplotu přímo, ale teplota je výpočtem stanovena z naměřených hodnot

a zadaných parametrů. Termokamery umožňují zadat následující parametry měření (jednotky jsou uvedeny v závorkách):

- emisivitu (-),
- zdánlivou odraženou teplotu (°C),
- atmosférickou teplotu (°C),
- relativní atmosférickou vlhkost (%) a
- vzdálenost mezi termokamerou a měřeným objektem (m).

V závislosti na nastavení parametrů se budou lišit i výsledné naměřené hodnoty teploty a dokonce i rozdíly teplot, což je kritérium, které je používáno při některých diagnostických postupech [7]. S tím je třeba při praktickém měření a vyhodnocování výsledků vždy počítat.

Emisivita objektu charakterizuje vlastnost měřeného povrchu. Vyskytuje se v dříve uvedených vztazích (2), (4) a (5). Zdánlivá odražená teplota charakterizuje povrchovou teplotu předmětu, jehož tepelné záření se od povrchu měřeného předmětu odráží. Odrazivost ρ nepropustného tělesa je dána vztahem $\rho = 1 - \varepsilon$, kde se opět vyskytuje emisivita povrchu ε . Ze vztahu vyplývá, že odrazivost nepropustného tělesa (a taková tělesa jsou v praxi nejčastější) je tím menší, čím větší je emisivita. A naopak: čím větší je odrazivost povrchu, tím menší je jeho emisivita.

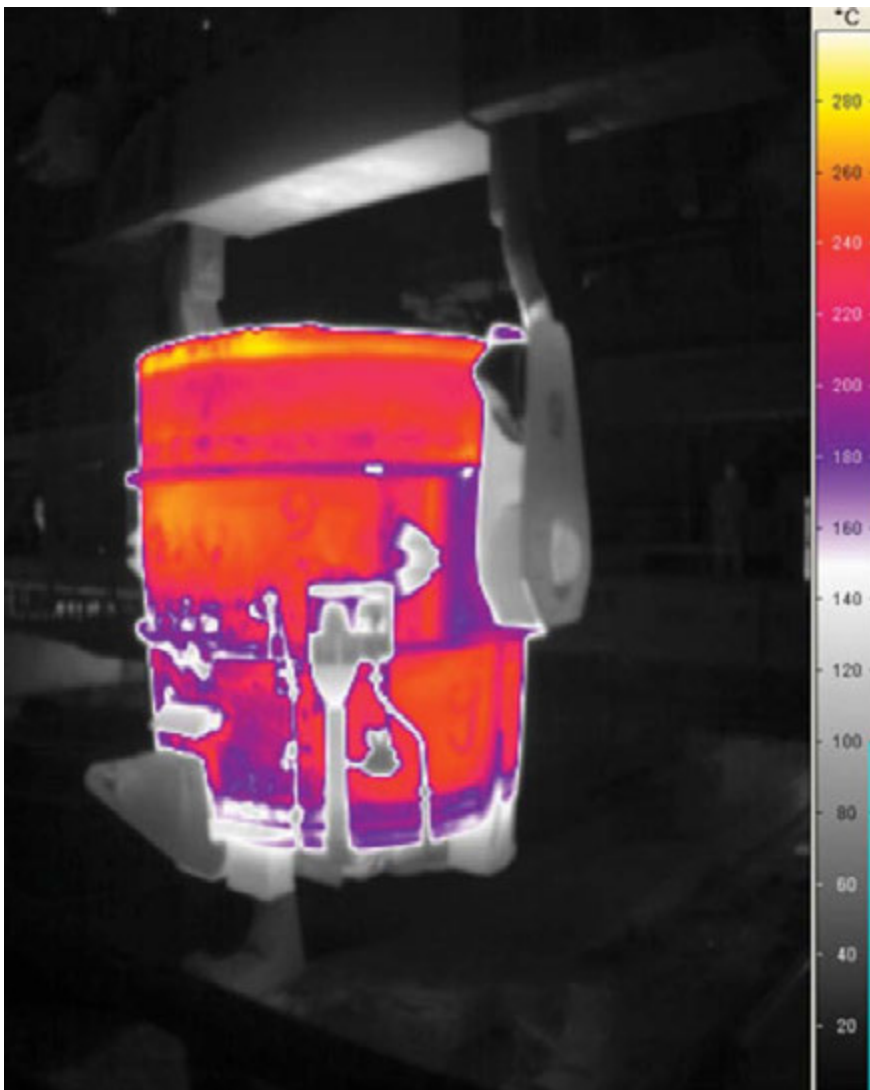
Pokud má povrch nízkou emisivitu a jeho teplota není výrazně vyšší, než je teplota okolí, může dle vztahu (5) převládat odražené tepelné záření nad vlastním tepelným zářením a to i řádově. To je důvodem, proč povrchy s vysokou odrazivostí (tj. s malou emisivitou) často v praxi není pomocí termografie vůbec možné diagnostikovat či bezdotykově měřit jejich teplotu. A jedinou možností je modifikace povrchu nanesením pásky či nátěru s dostatečně vysokou emisivitou.

Termokamery vždy umožňují nastavit emisivitu a zdánlivou odraženou teplotu. Lépe vybavené termokamery pak umožňují nastavit i parametry atmosféry, tj. i atmosférickou teplotu, relativní atmosférickou vlhkost a vzdálenost. Vliv atmosféry je tím větší, čím vzdálenější objekty jsou měřeny a pro malé vzdálenosti (v řádech jednotek metrů) je často zanedbatelný. Jednodušší modely termokamer proto ani s touto korekcí nepočítají.

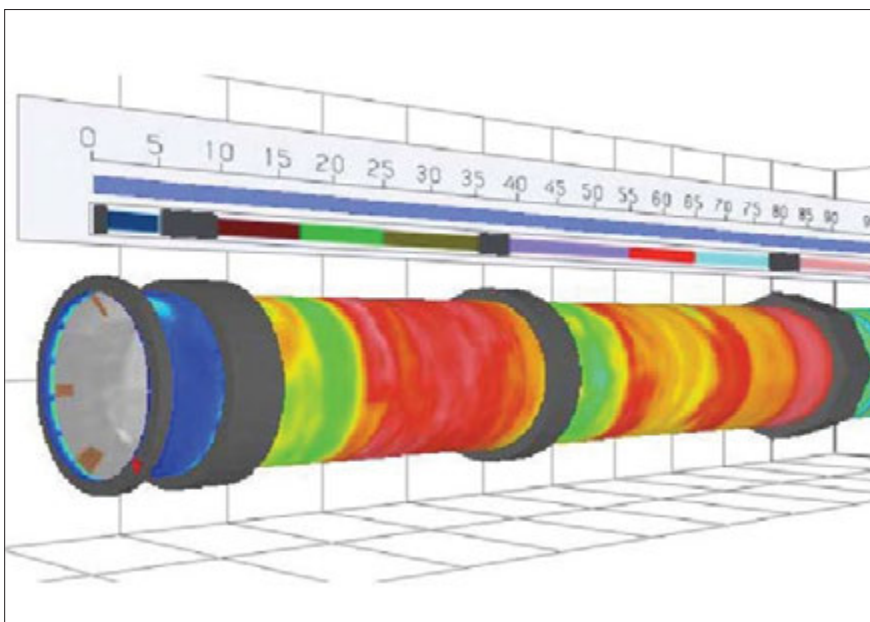
Vedle toho některé termokamery navíc umožňují korekci externí optiky. Tím je myšleno především IČ okénko, které může být instalováno např. do dveří rozvodné skříně. Slouží pak jako průzor, který je částečně průhledný pro infračervené záření. Při termografické kontrole tak může rozvodná skříně zůstat uzavřená, je ale třeba počítat s útlumem a vlastním vyzářováním IČ okénka, skrze které měření probíhá. Termokamery, které s touto možností počítají, umožňují nastavit teplotu a propustnost IČ okénka.

Pyrometry vždy umožňují nastavení emisivity a některé modely i zdánlivé odražené teploty. U řady pyrometrů je možné nastavit i útlum atmosféry.

Termokamera i pyrometr vyhodnocují naměřené údaje v °C i při nesprávném nastavení výše zmíněných parametrů měření. Pokud je údaj nekorigovaný, hovoří se o tzv. zdánlivé teplotě. Jde o terminologickou opatnost. Zdánlivá teplota je



Obr. 9 – Povrchová teplota vnějšího pláště lící pánve. V místě poruchy žáruvzdorného obložení dochází k nárůstu povrchové teploty pláště lící pánve vlivem zeslabené tepelné izolace. Tuto skutečnost termokamera snadno odhalí [8]



Obr. 10 – 3D model rotační pece. Na plášti rotační pece jsou na mapované hodnoty teplot naměřené soustavou termokamer. Z naměřených hodnot lze usuzovat na tloušťku a účinnost žáruvzdorného obložení, případně na přítomnost usazeného povlaku na vnitřním povrchu. V případě, že hodnoty povrchové teploty dosáhnou kritických hodnot, mohou být o této skutečnosti operátoři pece uvědoměni zvukovým či jiným alarmem

udávána stále ve stupních Celsia, může se však zásadně lišit od skutečné absolutní hodnoty teploty.

Z hlediska technické diagnostiky rozlišuje ČSN ISO 18434-1 dva druhy přístupu k vyhodnocení naměřených výsledků: tzv. kvalitativní (srovnávací) termografii a kvantitativní (srovnávací) termografii. Kvalitativní termografie vychází z vyhodnocování naměřených hodnot, aniž aby byly stanoveny absolutní hodnoty teplot. Při diagnostice se pracuje tedy pouze s hodnotami zdánlivé teploty. Tato metoda je schopna odhalit přítomnost závady, není však schopna stanovit stupeň závady. Kvantitativní termografie naproti tomu vychází ze stanovení absolutních hodnot naměřených teplot a je schopna odhalit nejen závadu, ale také stupeň závady. Vždy je ale třeba vzít do úvahy chybu stanovení parametrů měření i vlastní chybu měřicího přístroje.

Stanovení parametrů měření

Stanovení parametrů atmosféry

Stanovení atmosférické teploty, atmosférické vlhkosti a vzdálenosti mezi měřeným objektem a termokamerou (pyrometrem) není obtížné a pro tyto účely jsou běžně dostupné vhodné měřicí přístroje. Při nastavování těchto parametrů je většinou uvažována atmosféra za normálních podmínek, tj. s homogenní teplotou, při normálním atmosférickém tlaku, běžného chemického složení bez přítomnosti dalších příměsí apod. Tato podmínka zajisté nemusí být splněna vždy. Dobrým příkladem je například měření povrchu o vysoké teplotě – atmosféra v blízkém okolí tohoto povrchu bude mít výrazně vyšší teplotu než v blízkosti měřicího přístroje a není tak splněna podmínka homogenity teploty. Navíc, pokud měření probíhá například ve slévárně, může být ve vzduchu přítomno mnoho drobných prachových částic, které jednak samy tepelné záření vyzařují, jednak způsobují útlum záření vyzářeného z měřeného povrchu.

Stanovení zdánlivé odražené teploty

Stanovení zdánlivé odražené teploty a emisivity je obvykle obtížnější, a pokud tyto parametry nejsou známy (z předchozích měření, z tabulky apod.), lze použít například postupy uvedené v normě ČSN ISO 18434-1.

Stanovení zdánlivé odražené teploty metoda odrazu dle ČSN ISO 18434-1 vychází z využití IČ odražeče což je např. „zmačkaná“ a opětovně narovnaná lesklá hliníková fólie, která se připevní na rovnou desku lesklou stranou nahoru. IČ odražeč se pak umístí rovnoběžně před měřený povrch. Vzhledem ke konstrukci má IČ odražeč vysokou odrazivost a lze tedy na něm pozorovat odraz tepelného záření, které by jinak dopadalo na povrch měřeného předmětu. Při tomto měření je emisivita v termokameře nastavena na hodnotu 1 a vzdálenost na hodnotu 0. Zdánlivá teplota, která je při tomto měření naměřena na povrchu IČ odražeče je v podstatě tou hledanou, od objektu se odrážející zdánlivou teplotou.

Stanovení emisivity

I když existuje celá řada metod, jak stanovit emisivitu určitého povrchu, jsou často vhodné pouze pro měření v laboratoři se speciálním vybavením. Pro měření v terénu jsou normou ČSN ISO 18434-1 doporučovány dvě velmi podobné metody: kontaktní metoda a metoda využívající materiál s referenční emisivitou. Obě metody vycházejí ze stejné úvahy: při stanovení emisivity termokamerou je třeba znát skutečnou hodnotu teploty povrchu. Ta je v případě kontaktní metody stanovena dotykovým teploměrem, v případě metody využívající materiál s referenční emisivitou je na povrch měřeného objektu nanesen tento materiál (nejčastěji jde o nátěr či vhodnou lepicí pásku) a následně je pomocí termokamery stanovena jeho teplota. Bez změny polohy termokamery se mění nastavení hodnoty emisivity v termokamere tak, aby teplota vyhodnocená termokamerou byla stejná, jako teplota změřená kontaktně či na materiálu s referenční emisivitou. Před provedením uvedeného postupu je třeba nejprve korigovat vliv zdánlivě odražené teploty.

Průmyslové aplikace termokamer

Praktické využití termokamer je velmi široké. Termokamery nacházejí uplatnění v řadě vědeckých a technických oborů od výzkumu nových léčiv a lékařství po stavebnictví a nedestruktivní testování. V článku budou dále zmíněny následující aplikace termokamer v lehké i těžkém průmyslu:

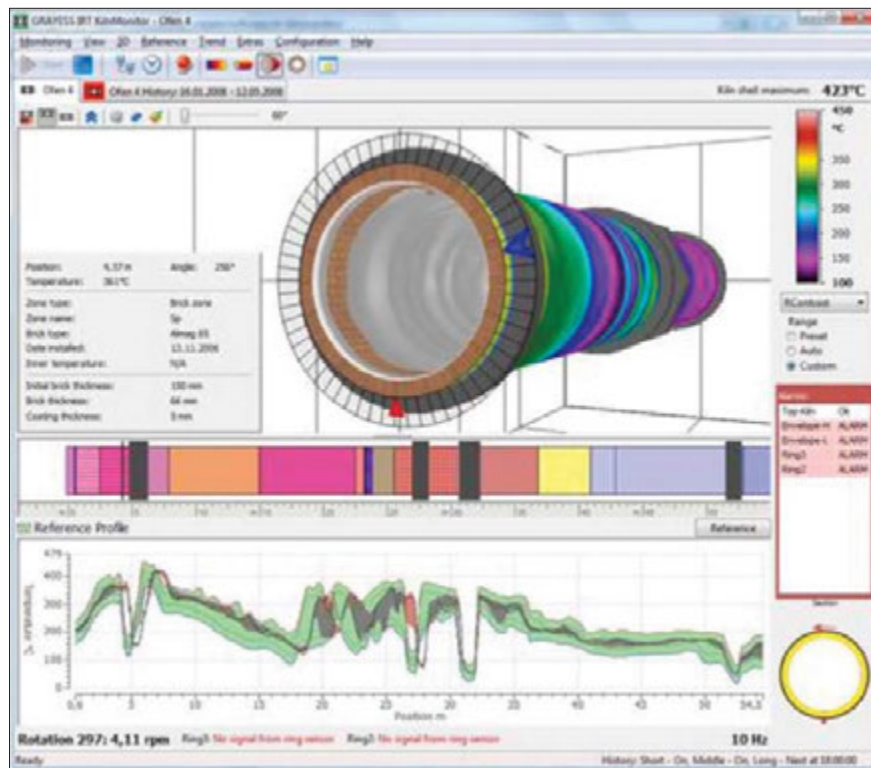
- monitorování stavu žáruvzdorného obložení,
- monitorování stavu tepelné izolace,
- monitorování a diagnostika elektrických instalací,
- monitorování stavu a diagnostika strojů a zařízení,
- protipožární ochrana a signalizace zahoření a
- optimalizace výrobních procesů.

Monitorování stavu žáruvzdorného obložení

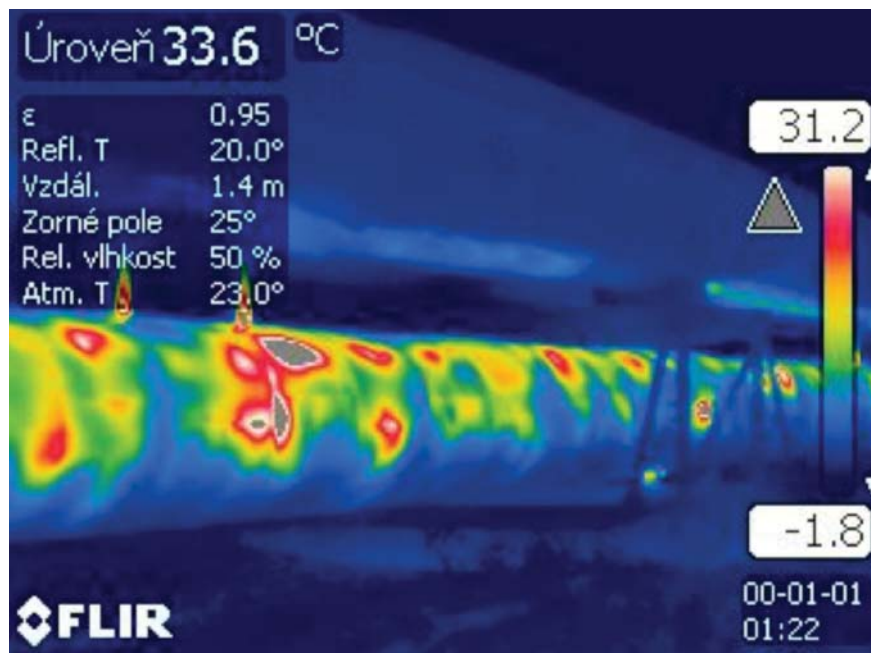
V důsledku opakovaného používání lící pánve dochází k opotřebení její vyzdívky. Toto opotřebení je dáno erozivním a korozivním účinkem roztaveného kovu a strusky. Lící pánve jsou agregáty, ve kterých díky neustálému střídání teploty dochází k velkému namáhání vyzdívky, která spolu s korozivním a erozivním působením strusky a horké oceli způsobuje nejenom velké opotřebení žáruvzdorné vyzdívky, ale často i její předčasné vyřazení způsobené vznikem trhliny [8, 9].

Termokamera v této aplikaci monitoruje povrchovou teplotu ocelového pláště lící pánve. Protože žáruvzdorná vyzdívková funguje jako tepelná izolace, projeví se její poškození nárůstem povrchové teploty vnějšího pláště lící pánve v místech poruchy žáruvzdorného obložení. Termogram, který zachycuje lící pec při přepravě železa je na obr. 9.

Výroba cementu je složitý proces, ve kterém se jeden z kroků skládá z míchání vápence s ostatními složkami ve velkých rotačních pecích za vysokých teplot. Do rotační pece jsou suroviny přiváděny ve velkém množství v drčené a homogenizované směsi. To je obrovská rotující trubka cca 60 až 90 metrů dlouhá s průměrem cca 5 m.



Obr. 11 – Ukázka operátorského programu pro monitoring rotačních pecí. V programu lze nastavit alarmy, mód zobrazení a využít měřicí funkce k analýze stavu pláště



Obr. 12 – Vnější povrch pláště horkovodu vykazuje řadu teplotních anomálií různého rozsahu. Ty odpovídají místům s více či méně poškozenou tepelnou izolací

Tato obrovská pec je vyhřívána vnitřním plamenem na teplotu strusky přibližně 1 500 °C. Pec je mírně nakloněna, aby se materiál uvnitř pece přesouval pomalu na druhou stranu, kde se rychle ochlazuje na teplotu přibližně 100 až 200 °C. V peci dochází ke spojení oxidu vápenatého, oxidu křemičitého, oxidu hlinitého a oxidu železitého za vzniku slínku.

Uvnitř rotační pece je žáruvzdorné obložení, které izoluje ocelový plášť od vysokých teplot uvnitř pece a chrání tak plášť před korozivním

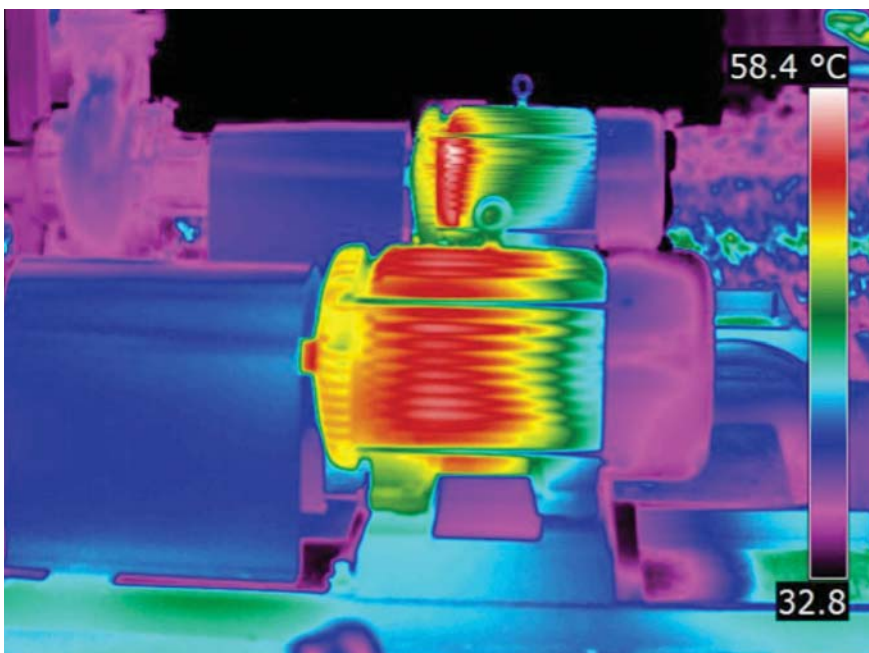
účinkem zpracovávaného materiálu. Toto obložení je často realizováno ze žáruvzdorných cihel nebo žáruvzdorného betonu a je třeba jej pravidelně vyměňovat, kdykoli vykazuje značné náznaky opotřebení.

Dobrá kondice pláště rotační pece je pro její dlouhodobý provoz zásadní. Termokamery zde mohou pomoci dvojitým způsobem:

- 1) V průběhu provozu se může hromadit část materiálu jako povlak na žáruvzdorném obložení. Důsledkem jsou sice nižší tepelné ztráty a je



Obr. 13 – Technik provádějící monitorování elektrických instalací termokamerou. Kontrola je zde prováděna skrz tzv. IČ okénko, které je propustné pro infračervené záření. Odpadá tak nutnost otevírání rozvodné skříňe z důvodu kontroly



Obr. 14 – Příklad využití termokamer při diagnostice strojů. Dva elektrické motory provozované za stejných podmínek s přibližně stejným zatížením. Již na první pohled jsou (zdnalivě) povrchové teploty obou motorů odlišné. Vzdálenější z obou motorů by mohl být částečně porouchaný

sníženo namáhání žáruvzdorného obložení, dochází ale také k zúžení vnitřního průměru pece a tím i výrobních kapacit. Přítomnost povlaku může být detekována termokamerou na základě snížených povrchových teplot vnějšího povrchu pláště v důsledku přítomnosti povlaku, který funguje jako dodatečná izolace.

- 2) Během provozu pece může dojít k lokálnímu poškození či k vypadnutí žáruvzdorného obložení. Tím je zhoršena jeho izolační vlastnost a dochází k intenzivnějšímu namáhání pláště pece. Měření teploty na vnějším povrchu pláště pece tento problém spolehlivě odhalí. Na základě naměřených hodnot dokonce může být stanovena přibližná hodnota tloušťky žáruvzdorného obložení.

Při použití více termokamer lze dosáhnout realistického 3D modelu pláště rotační pece, viz obr. 10. Na vnějším povrchu pláště jsou následně mapovány naměřené teploty. V operátorském programu, viz obr. 11, pak lze provádět analýzy, měřit teploty pomocí jednotlivých měřících funkcí apod. Kdyžli dosáhne povrchová teplota pláště nežádoucích hodnot, jsou na tuto skutečnost operátoři pece upozorněni alarmem.

Monitorování stavu tepelné izolace

Tepelná izolace zabraňuje únikům tepelné energie z určitého objemu. Může jít o interiér budovy v zimním období, ale i například o transportní objem horkovodu. Čím je tepelná izolace účinnější, tím bližší je povrchová teplota vnějšího pláště teplotě okolního vzduchu. Tuto aplikaci ilustruje

obr. 12, kde je na termogramu zachycena řada drobných i závažnějších teplotních anomálií na teplovodu. Ty odpovídají místům s více či méně poškozenou tepelnou izolací.

Při měření je třeba dávat pozor na vliv intenzivnějšího slunečního záření, které exponovaný povrch zahřívá, což může vést k falešným nálezům. Měření se proto většinou provádí v zimním období, kdy je sluneční záření málo intenzivní, případně v noci.

Monitorování a diagnostika elektrických instalací

Požáry elektrických instalací jsou v průmyslu poměrně častým, ale podceňovaným jevem. Mohou vést ke krátkodobému výpadku výroby, ale také k rozsáhlému požáru se značnými ztrátami.

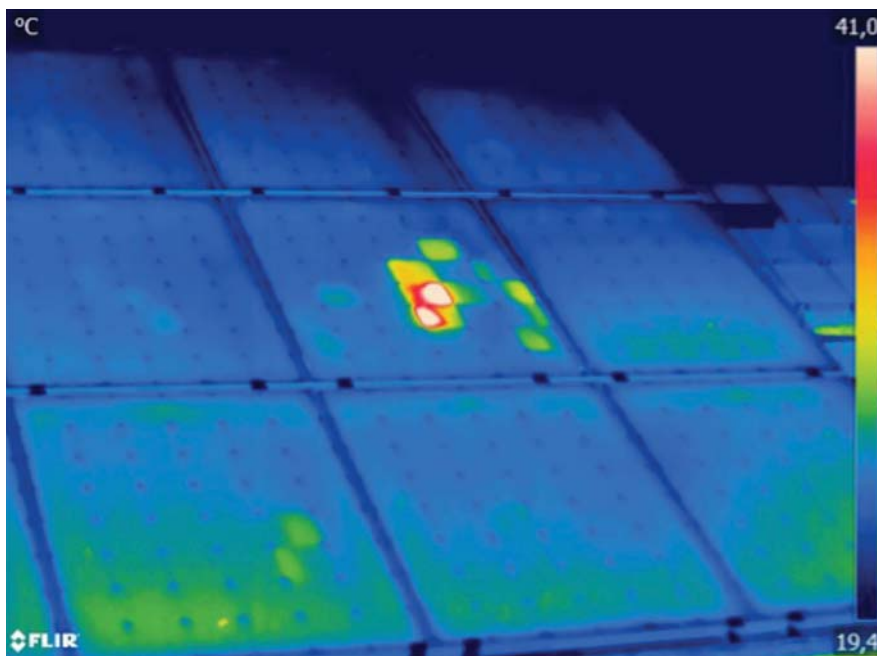
Kontrola stavu elektrických instalací je od roku 1965 první a v současné době pravděpodobně nejrozšířenější oblastí komerčního využití termokamer. Metoda je založena na stanovení intenzity tepelného záření z povrchu měřeného objektu s pomocí termokamer s následným výpočtem povrchových teplot (kvantitativní metoda). Závažnost poruchy je určena z velikosti stanoveného oteplení. V rámci systému pravidelné údržby je většinou kontrolováno větší množství zařízení a o celém měření je vypracována finální zpráva, která obsahuje i případná doporučení pro sjednání opravy.

Fyzikální princip detekce poruchy je založen na stanovení povrchové teploty (tzv. kvantitativní srovnávací termografie) měřeného objektu a srovnání této teploty s normální provozní teplotou (případně s historickými daty a přítomností trendu v těchto datech). V řadě případů si lze vystačit jen s hodnotami zdánlivé teploty (kvalitativní srovnávací termografie), tj. bez toho aniž by byly stanoveny absolutní hodnoty teplot. V takovém případě je ale možné pouze stanovit přítomnost závady, nikoli její stupeň. Velkou výhodou této metody je, že kontrolu je možné provádět při plném či částečném provozním zatížení. Metoda je podrobněji diskutována v článku [7] Kontrola elektrických instalací během plného provozu pomocí termokamer, který je uveřejněný na str. 122 tohoto vydání AllforPower.

Monitorování stavu a diagnostika strojů a zařízení

Monitorování stavu a diagnostika strojů a zařízení je jistě jedna z nejčastějších aplikací termokamer v průmyslu. Obecně tato metoda vychází z kvalitativní srovnávací termografie nebo z kvantitativní srovnávací termografie. Kvantitativní metoda vyžaduje určení (skutečných) teplot, které jsou použity pro stanovení závažnosti stavu objektů nebo jeho součástí.

Existuje ale i celá řada aplikací, kde k monitorování stavu stroje nebo k diagnóze problému či ke stanovení doporučení nejsou potřebná kvantitativní data. V těchto případech lze vystačit s kvalitativní termografií. Příkladem může být provoz dvou stejných elektrických motorů za stejných provozních podmínek a stejného zatížení, kdy jeden stroj vykazuje znatelné zvýšení teploty, což může signalizovat poškození, viz obr. 14.



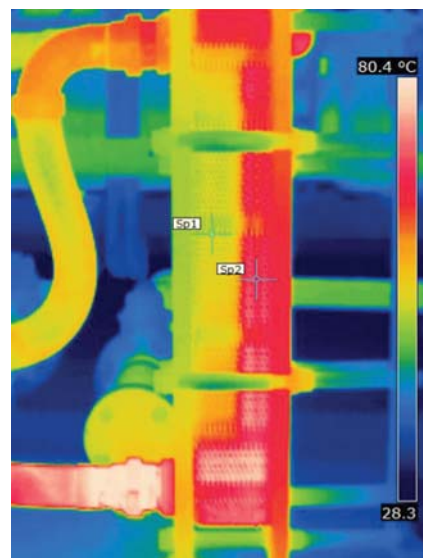
Obr. 15 – Fotovoltaický panel uprostřed termogramu vykazuje hotspots. Ty vznikly proto, že několik fotovoltaických článků uprostřed panelu bylo rozlomených (pravděpodobně na panel někdo během instalace vstoupil).

V praxi lze termokamery využít ke kontrolám: přítomnosti zkratu na vinutí elektrických motorů a transformátorů, závad prvků elektrické instalace, závad ložisek, jejich instalace či provozu (za normálních okolností není ložisko výrazně teplejší než plášť motoru), přítomnosti induktivního tepla, nerovnoměrného zatížení jednotlivých fází, přetížení vodičů, přítomnosti proudu zemnicím vodičem, nefunkčnosti chladicího systému atd. U instalací fotovoltaických elektráren má termokamera dvojí využití, může zde být použita pro

kontrolu FV panelů, a zároveň veškeré elektroinstalace FV elektrárny.

Protipožární ochrana a signalizace zahoření

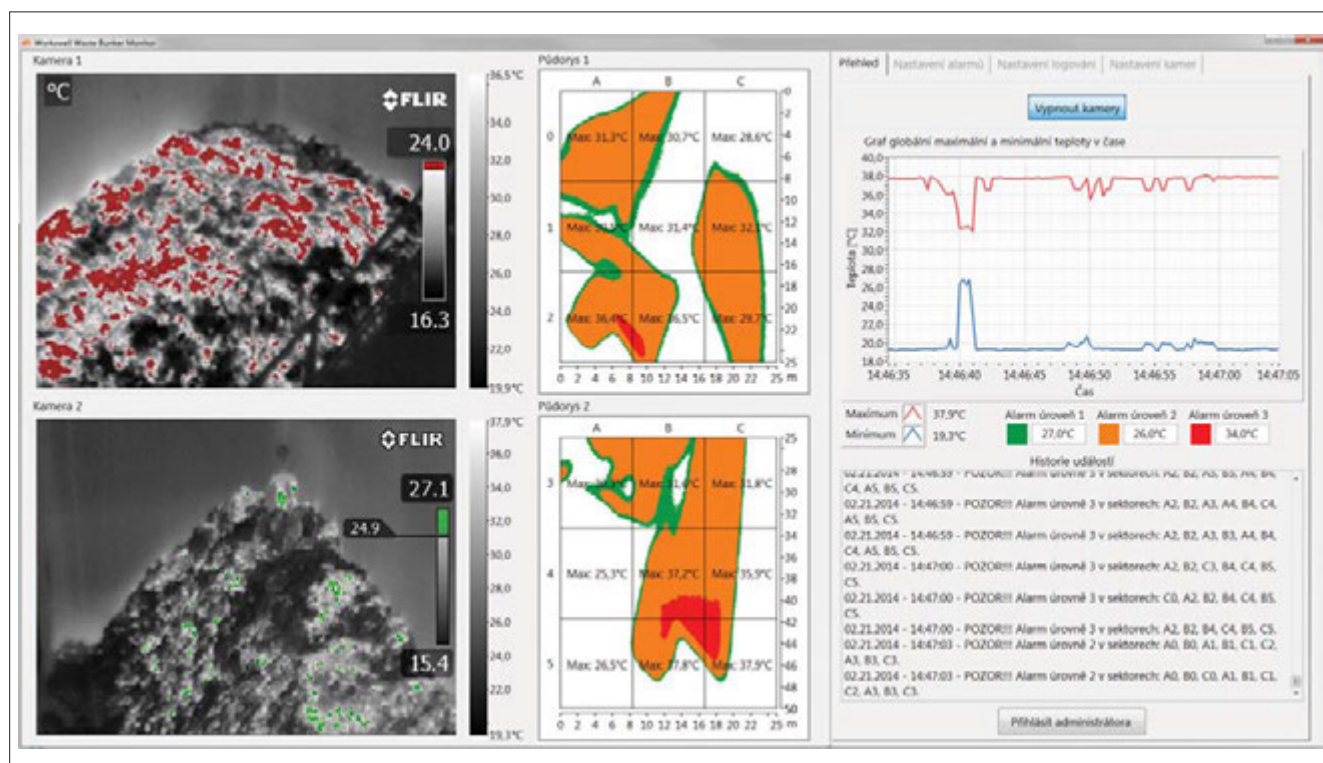
Standardní systémy požární bezpečnosti jsou založeny na detekci přímých projevů ohně, tj. především: kouře (kouřové detektory) a plamenů (např. CCTV systémy). Naproti tomu systém požární bezpečnosti využívající stacionární termokamery je založen na bezdotykovém měření teploty velké plochy pomocí stacionárních termokamer,



Obr. 16 – Tepelný výměník. Již na první pohled je zřejmé, že značná část výměníku je nefunkční (zanesená) a nedochází zde k potřebné výměně tepla

kteří umožňují detekovat a lokalizovat zvýšení povrchové teploty a tím předejít vzplanutí. Údaje mohou být zaznamenány do časové posloupnosti, z níž lze odhadovat budoucí chování sledovaného objektu.

Systém nachází uplatnění především ve skládkách a spalovnách komunálního odpadu, skládkách hořlavého a výbušného materiálu apod. Výhodou je, že jedním a tím samým systémem lze zajistit ochranu proti pohybu osob, neboť termokamery jsou schopny přítomnost osoby v monitorovaném prostoru, za řady okolností dobře detekovat.



Obr. 17 – Ukázka operátorského programu pro monitoring zahoření na skládce odpadů. V případě nárůstu teploty jsou operátoři o této skutečnosti informováni příslušným alarmem. Výskyt alarmu je zakreslen do souřadnicové a půdorysní mapy a nebezpečné místo je tak lokalizováno



Obr. 18 – Obdélníkový spot je při měření teploty tekutého kovu užitečný, neboť zajišťuje odolnost systému vůči posunu v jedné ose

Pokud systém monitoruje rozsáhlejší oblasti, skládá se většinou z více termokamer z důvodu dostatečného pokrytí monitorovaného prostoru. Počítačový program, který celý systém řídí, vyhodnocuje teplotní alarmy a zobrazuje jejich případný výskyt do souřadnicové a půdorysní mapy. Může také pomocí digitálních výstupů aktivovat či informovat nadřazený systém, pokud takový systém existuje.

Optimalizace výrobních procesů

V oblasti optimalizace výrobních procesů je využití termokamer velmi široké a vždy velmi specifické v závislosti na dané aplikaci. Příkladem může být měření teploty a teplotní homogenity lisů, pecí a forem, ale také složitější aplikace počítačového vidění a rozpoznávání.

Příkladem takové aplikace je například automatická kontrola při svařování plastových dílů. Zde je klíčovým parametrem vytvoření dostatečně vysoké a stabilní povrchové teploty obou spojovaných dílů, protože finální vlastnosti sváru jsou z velké části závislé na velikosti a rozložení teplot na styčných plochách. Nevhodné rozložení povrchových teplot se může projevit například v netěsnosti či nedostatečné pevnosti sváru. Termokamery se zde používají k bezdotykovému měření teploty v místě sváru. Princip vyhodnocení je založen na porovnání naměřeného průběhu s „ideálním“ průběhem.

Průmyslové aplikace pyrometrů

Pro řadu aplikací bezdotykového měření teploty je nasazení termokamer buď cenově neefektivní, nebo z technického hlediska nevhodné a použitím pyrometrů lze dosáhnout značné

finanční úspory nebo i lepších technických parametrů. Pyrometry se v průmyslu používají především při kontrole a optimalizaci výrobních procesů a technologií.

V praxi lze zvolit typ pyrometru se spektrálním rozsahem, který je přizpůsoben emisivitě a teplotě měřeného povrchu (u nejobvyklejších termokamer s tepelným detektorem je běžný spektrální rozsah pouze 7 až 14 μm , jiné spektrální rozsahy jsou možné, ale je třeba počítat s výrazně vyšší cenou přístroje). Další zajímavou možností je použití tzv. poměrového pyrometru, jejichž princip je dále naznačen. Z aplikačního hlediska je také důležité, že lze u pyrometru dosáhnout celkové vyšší přesnosti měření na vysokých teplotách než u běžných termokamer.

Zpracování oceli

Při měření teploty kovů zpracovávaných za tepla jsou nejčastěji používány tzv. poměrové pyrometry. Ty zaznamenávají intenzitu tepelného záření na dvou různých vlnových délkách. Výsledek měření je pak nezávislý na hodnotě emisivity povrchu. Tyto pyrometry jsou také výrazně méně citlivé na útlum atmosféry a jsou proto vhodné do prašného prostředí, případně do prostředí s různými výpary apod. Nevýhodou poměrových pyrometrů je skutečnost, že je lze použít pouze pro vyšší teploty, tj. v současné době pro teploty cca od 400 °C.

Při měření teploty kovu za studena je problémem s vysokým podílem tepelného záření, které je měřeným povrchem odraženo. V důsledku nízké teploty a emisivity povrchu (kterou je navíc obtížné určit) může převládat odražené tepelné záření nad vlastním tepelným zářením

povrchu. Aby se i za těchto okolností dosáhlo spolehlivých a opakovatelných výsledků měření, je třeba použití sofistikovanějších metod měření. Například při bezdotykovém měření teploty zastudena válcovaných pásů je pyrometr zaměřen do místa, kde dochází ke styku válcovaného materiálu s válcem. V důsledku vysoké odrazivosti takového místa je zde výrazně vyšší emisivita a měření tak dosahuje lepších výsledků.

Měření teploty vláken a tenkých drátů

Při měření teploty tenkých kovových vláken jsou hlavní technické problémy s malými rozměry měřeného objektu a případně i s útlumem materiálu, který měřené vlákno obklopuje. Příkladem je měření teploty vlákna žárovky: vlákno je nejen velmi tenké, ale navíc obklopené sklem.

Dříve bylo pro tuto aplikaci možné pouze nasazení jasového pyrometru, který neumožňuje automatizaci měření. Každé jednotlivé měření s jasovým pyrometrem musí provést člověk, který v okuláru přístroje porovná barevnou teplotu měřeného povrchu s barevnou teplotou povrchu o známé teplotě. V důsledku technického pokroku je v současné době možné toto měření provést s pomocí spektrálních či poměrových pyrometrů s digitálním či analogovým výstupem a systém měření teploty je tak možné automatizovat. U použitého pyrometru je však třeba zajistit malou velikost měřeného spotu a přesné zacílení. Pro tuto aplikaci jsou tak vhodné pouze pyrometry s velmi precizně zpracovanou optikou a systémem osvětlení a zaměřování. Při volbě spektrálního rozsahu pyrometru je třeba vycházet ze spektrální propustnosti skla, které je pro určité vlnové délky nepropustné.

Měření teploty tekutého kovu během lití

Při procesu lití je teplota jedním z nejdůležitějších parametrů. Monitorování a řízení teploty roztaveného kovu je nezbytné pro dosažení požadovaných mechanických a chemických vlastností výsledných výrobků. Navíc příliš vysokou teplotou kovu dochází k rychlejší degradaci použité formy. Nízká teplota kovu naopak vede k jeho nižší teplotě a důsledkem může být, že kov nezateče do všech částí formy za vzniku dutin a bublinek ve výsledném odlitku. Přípustný rozsah teplot pro lití kovu je pro každý proces poměrně přesně stanoven a toleranční pásmo nebývá širší než cca 50 °C.

Teplota roztaveného kovu je ve slévárnách nejčastěji měřena dotykově pomocí ponorných sond přímo v pánvi. I když je toto měření přínosné, má celou řadu nevýhod. Předně je teplota kovu měřena v jiném okamžiku, než v okamžiku, kdy je kov naléván do formy. Vlivem chladnutí může být teplota kovu v okamžiku nalévání do formy značně jiná než teplota v pánvi. Navíc není ani jednoduché přesně stanovení teploty v pánvi pomocí dotykového teploměru a takové měření vyžaduje vysokou odbornost obsluhy. V závislosti na hloubce a místě ponoření dotykového teploměru se mohou naměřené teploty lišit o více než 20 °C. Značnou

chybu může také způsobit obalení teplotního senzoru struskou.

Při použití pyrometru je teplota měřena ve správný okamžik, tj. těsně před nalitím do formy. Naproti tomu systém s pyrometrem může sledovat a nepřetřžitě zaznamenávat teplotu kovu přímo v okamžiku nalévání do formy. Vedle případného zastavení či regulace procesu při nízké či naopak příliš vysoké teplotě kovu, mohou být pořizovány záznamy jako doklad o dodržení technologického postupu během výroby. V současné době lze pro tento typ měření použít pyrometry s obdélníkovým měřicím spotem, který zajišťuje odolnost systému vůči posunu v jedné ose (například v důsledku chvění, pohybu či otřesu měřeného materiálu), čímž dochází ke zvýšení přesnosti a opakovatelnosti měření.

Závěr

Pyrometry a termokamery představují moderní a výkonnou měřicí techniku, která je využitelná pro termografii a termodiagnostiku v celé řadě průmyslových odvětví. Pro efektivní využití této techniky je třeba vycházet jednak ze znalostí principů bezdotykového měření teploty a jednak ze znalostí řady parametrů, které ovlivňují výsledek měření.

Ing. Jan Sova
Workswell s.r.o., Praha
jan.sova@workswell.cz

Doc. Ing. Karel Kadlec, CSc.
Ústav fyziky a měřicí techniky, VŠCHT Praha
karel.kadlec@vscht.cz



Obr. 19 – Měření teploty tekutého kovu. Pyrometr měří teplotu tekutého kovu před nalitím do formy. Přístroj je chráněn odolným, vzduchem chlazeným krytem

Literatura

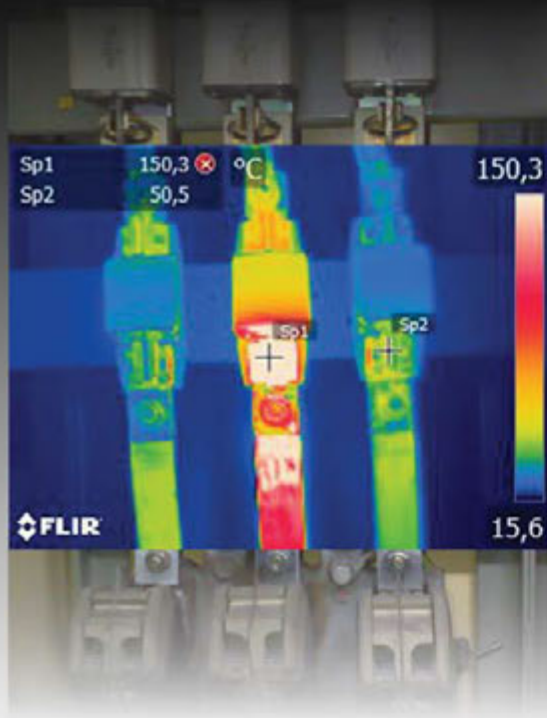
- [1] Pyrometer Handbook – Non-Contact Thermometry. IMPAC Infrared GmbH, 2004 Dostupné na <http://www.contika.dk/Download/litteratur/teori.pdf> (prosinec 2013)
- [2] Vollmer M., Möllmann K. P.: Infrared Thermal Imaging. Wiley-VCH 2010
- [3] Minkina W., Dudzik S.: Infrared Thermography. Wiley & Sons, Ltd 2009
- [4] Kadlec K.: Teoretické základy bezdotykového měření teploty. Automa 2014/2, 13, (2014)
- [5] FLIRT-series. Publ. No. 1558795. June 2008
- [6] Sova J., Kovář J.: Termokamery a pyrometry. Automa 2014/2, 16 (2014)
- [7] Sova J.: Kontrola elektrických instalací během plného provozu termokamerou. AllForPower 2014/1, xx (2014)
- [8] <http://www.termokamera-infratec.cz/lici-panev/>
- [9] Jančar D., Tvardek P, Hašek P.: Licí pánve v ocelárně AcelorMittal Ostrava – použití nové izolační vrstvy, METAL 2008
- [10] <http://www.workswell.cz/kiln-monitor/>

Thermocameras and pyrometers - principle of measurement, properties and application

Recently, the application of pyrometers (IR thermometers) and thermocameras has expanded considerably for the contactless measurement of temperature, thermography and thermodiagnosics. Pyrometers were originally used only in production premises and applications where it was necessary to measure high temperatures (usually above 500°C). The significant progress in the field of the contactless measurement of temperature has been achieved due to development in optics and electronics and the application of the contactless measurement of temperature has advanced to significantly lower temperatures, including the measurement of temperatures considerably lower than 0°C. Today pyrometers are used as a standard in a number of applications based on the contactless measurement of temperatures in the mechanical engineering technological processes and metallurgical technological systems. Thermocameras, which belong to advanced thermodiagnostic equipment, have become increasingly used for the measurement of temperatures on the surface of objects. Their application is very wide in the industrial sector where they are used for the monitoring and diagnostics of machines, inspection of electrical installations, the monitoring of the fire-resistant lining of furnaces and of the condition of thermal insulation and the inspection of manufacturing processes as well.

Термокамеры и пирометры - принцип измерений, свойства и использование

В последние годы значительно расширилось использование пирометров и термокамер для бесконтактного измерения температур, термографии и термодиагностики. Пирометры применялись изначально только в таком производстве, где необходимо было измерить высокие температуры (обычно свыше 500°C). Значительный прогресс в области бесконтактного измерения температур произошел благодаря развитию оптики и электроники, и применение бесконтактного измерения температур продвинулось к значительно низшим параметрам, включая измерения температур, значительно ниже 0°C. Пирометры сегодня стандартно используются в различных бесконтактных измерениях температур в целом ряде технологических процессов в области машиностроения и технологии производства металлов. Для измерения распределения температур по поверхности объекта и для диагностики всё чаще используются термокамеры, которые принадлежат к самому современному термодиагностическому оборудованию. Применение этого оборудования в промышленности очень широко: от мониторинга и диагностики станков, контроля электрической проводки и оборудования, мониторинга жароупорной обмуровки печей и состояния теплоинсталляции и до контроля производственных процессов



TERMOKAMERY FLIR PRO DIAGNOSTIKU STROJŮ

- žáruvzdorné izolace
 - elektroinstalace
 - stroje a zařízení
 - tepelné izolace
- a řadu dalších aplikací...



Workswell s.r.o. - oficiální zastoupení FLIR pro ČR