



## INFRAČERVENÉ TERMOGRAFICKÉ (NEDESTRUKTIVNÍ) TESTOVÁNÍ INFRARED THERMOGRAPHIC (NON-DESTRUCTIVE) TESTING

Jiří SVOBODA

“TMV SS“ s.r.o., jiri.svoboda@tmvss.cz

### **Abstrakt**

*Infračervená termografie (dále IČT) je metoda zobrazování teplotních polí / zdánlivých teplot na objektech v reálném čase. Je to nekontaktní, nedestruktivní metoda zobrazování povrchových i podpovrchových teplot, která se prakticky používá od r. 1965; v tomto roce byl představen první ič termografický systém na světě (AGA 665 Thermovision), který zobrazoval teplotní pole na povrchu objektů v reálném čase. V dalších letech se ič termografická technika dále vyvíjela (obdobně jako například výpočetní technika) a to jak po technické stránce, tak i podle jejího využití a zaměření. V současné době je možné rozdělit ič termografické metody zkoušení /testování na dvě základní skupiny a to na „pasivní“ a „aktivní“. V příspěvku je uveden základní přehled používaných metod v ič termografii, včetně základních informací o používané ič termografické technice - ič termografických systémech.*

**Klíčová slova:** *Infračervená termografie, ič termografický systém, termogram, infračervené nedestruktivní testování*

### **Abstract**

*Infrared (hereinafter referred to as IR) thermography is a method of imaging thermal fields and apparent temperatures on the targets in real time. It is a non-contact as well as a non-destructive method of imaging temperatures on and also below the surfaces. This method is used practically since year 1965. In that year was introduced the first IR thermographic equipment on the wide world called AGA 665 Thermovision, which could display a thermal field on the surfaces of targets in real time. The IR thermographic technique has been developing in the following years (in similar way as for example a computer technique) from their technical side and also in application and specialization in use. Currently it's possible to divide the IR thermographic methods / testing into two basic groups – “passive” and “active”. This article introduces a basic overview used methods in IR thermography including basic information about a used IR thermographic technique – IR thermographic equipments.*

**Keywords:** *Infrared thermography, IR thermographic equipment, thermogram, infrared non-destructive testing*

## Úvod

Infračervenou termografií (dále IČT) je možné, podle zaměření, rozdělit do několika skupin či oblastí:

- Prediktivní údržba a diagnostika (PM)
- IČ nedestruktivní testování (IČ NDT)
- Výzkum a vývoj (R&D)
- Automatizace a požární bezpečnost
- Speciální měření (v pecích,...)
- Zobrazování plynů

Další dělení může být na kvalitativní nebo kvantitativní IČT a dále zda se jedná o pasivní či aktivní IČT.

Kvalitativní IČT je metoda vyhodnocování odstínů či kontrastů v obrazech-termogramech bez toho, aby byly vypočítávány/kvantifikovány absolutní hodnoty teplot.

Kvantitativní IČT je metoda, kdy jsou vypočítávány/kvantifikovány absolutní hodnoty teplot. Zde jenom krátké připomenutí, že žádný termografický systém (a ani standardní bezkontaktní teploměr) neměří teplotu přímo. Pro výpočet či kvantifikaci teplot musí být uvažovány a co nejpřesněji použity všechny fyzikální zákony a parametry IČT, aby byly získány správné hodnoty absolutních teplot. Těmito parametry IČT jsou: emisivita, odražená zdánlivá teplota, vzdálenost a relativní vlhkost atmosféry (vyhodnocení přenosu atmosférou) a teplota atmosféry. V případě, že je ještě použita tzv. externí optika, tj. optický, v dané spektrální ič oblasti transparentní prvek-okno, které je v optické ose mezi měřeným objektem a měřícím systémem, je nutné znát jeho propustnost a v době měření i jeho teplotu.

### **Prediktivní údržba a diagnostika (PM)**

Tuto oblast je možné charakterizovat jako oblast s největším využitím ič termografických systémů. Základní zaměření je na diagnostiku strojů, rozvodů elektrické energie a stavebnictví. Převážně se používá pasivní, kvantitativní termografie. Nejvíce používané termografické systémy v PM jsou systémy s mozaikovými nechlazenými mikrobolometrickými (teplnými) detektory.

(Více informací o diagnostice (mechanických) strojů je možné vyhledat např. v ČSN ISO 18434-1 : Monitorování stavu a diagnostika strojů – Termografie – Část 1: Všeobecné postupy. Pro diagnostiku rozvodů elektrické energie zatím nebyla zpracována žádná (ČSN, ISO, EN,...) norma, existují ale různé metodiky či předpisy, které jsou používány při diagnostice rozvodů elektrické energie. Pro diagnostiku stavební objektů existuje v současné době revidovaná ČSN EN 13187: Tepelné chování budov – Kvalitativní určení tepelných nepravidlostí v pláštích budov – Infračervená metoda.)

## **IČ nedestruktivní testování (IR/IČ NDT)**

obecně patří do základních principů/metod NDT, které podle ISO 9712 jsou:

- Akustická emise/Acoustic emission (AT)
- Vířivé proudy/Eddy current (ET)
- Infračervená termografie/Infrared thermographic (TT)
- Netěsnosti/Leak (LT)
- Magnetická/Magnetic (MT)
- Penetrace/Penetrant (PT)
- Radiografie/Radiographic (RT)
- Tenzometrie/Strain gauge (ST)
- Ultrazvuk/Ultrasonic (UT)

Termíny vztahující se pro IR/IČ NDT:

Anizotropie, dutina; delaminace; emisivita; koroze; napětí; odrazivost; porositá; složení/skladba; spojování; stav vytvrzení; tepelná vodivost; tepelné tvarování; tloušťky pokovení; tloušťka; tepelné zpracování; vlhkost

V IČ NDT se používá pasivní ale hlavně aktivní termografie.

Pasivní termografie má největší využití v PM.

Aktivní termografie je založena na řízené simulaci tepelné vlny v tělese, následném snímání rozložení teplot ič termografických systémem a analýzou signálu. Defekty v podpovrchové vrstvě se projeví rozdíly v rozložení povrchových teplot. Zdrojem tepla může být halogenová lampa, pulzní laser, xenonová výbojka nebo teplý proudící vzduch. Při známých vlastnostech materiálu lze z tepelného obrazu vyhodnotit rozsah a hloubku podpovrchové vady a to teoreticky nebo srovnáním s etalonem.

Základní požadavky na ič techniku pro aktivní termografii jsou obdobné jako pro techniku pro Výzkum a vývoj (R&D) tj.:

- Krátký integrační čas (rychlé pohyby)
- Velký rozsah měřených teplot – režim Multi-TI (superframing)
- Rychlé změny teplot
- Vysoká teplotní citlivost
- Lock-in termografie
- Vysoké prostorové rozlišení (malé objekty)
- Multispektrální analýza
- Spektrální filtrace
- Možnost on-line přenosu dat do vyhodnocovacích zařízení (počítačů)
- Speciální vyhodnocovací software

Aktivní termografie může být:

- Pulzní
- Pulzní fázová
- Stupňové/krokové zahřívání
- Lock - in
- Lock - in ztrátového úhlu
- Vibro

### Teorie tepelné vlny

Při modulovaném ohřevu povrchu úhlovou frekvencí  $\omega$  se v podpovrchové oblasti šíří velmi tlumená a rozptýlená tepelná vlna. V rovinných vrstvách tělesa lze pro vyhodnocení teploty  $\vartheta$  v hloubce  $z$  a čase  $t$  použít rovnici:

$$\vartheta(z, t) = \vartheta_0 e^{-\frac{z}{\mu}} \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda} - \omega t\right) \quad (1)$$

kde  $\mu$  je hloubka vniku tepelné vlny, při které klesne teplota na hodnotu  $1/e$   $\vartheta_0$ , kde  $\vartheta_0$  je teplota na povrchu tělesa.

Platí vztahy:

$$\mu = \sqrt{\frac{2\kappa}{\omega\rho c}} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad (2)$$

$$\lambda = 2\pi\mu ; \nu = \lambda \frac{\omega}{2\pi} \quad (3)$$

$$\varphi(z) = \frac{2\pi z}{\lambda} = \frac{z}{\mu} \quad (4)$$

kde

$\kappa$  součinitel tepelné vodivosti (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)

$\rho$  hustota materiálu (kg.m<sup>-3</sup>)

$c$  měrná tepelná kapacita (J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)

$\alpha$  součinitel teplotní vodivosti (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (5)$$

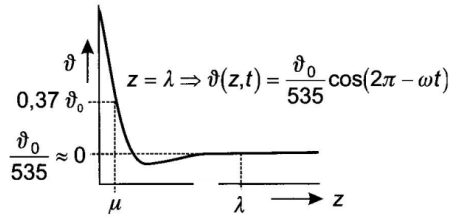
$\rho$  objemová hmotnost

$c_p$  měrná tepelná kapacita při stálém tlaku

$\lambda$  tepelná vlnová délka (m)

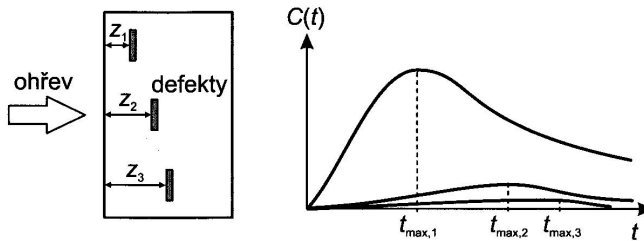
$\nu$  rychlost šíření tepelné vlny (m.s<sup>-1</sup>)

$\varphi$  fáze tepelné vlny



Obr. 1 Příklad hloubky vniku tepelné vlny / An example of penetration depth of heat wave

Defekt v tělese způsobí snížení rychlosti šíření tepelné vlny a na povrchu tělesa lze pozorovat na teplotním poli podle čela tepelné vlny oblasti s rozdílnými teplotami. V důsledku tohoto jevu se defekty ve větší podpovrchové hloubce projeví/zobrazí později a se sníženým kontrastem (obr. 2)



Obr. 2 Ohřev objektu s defekty tepelnou vlnou, závislost relativní hodnoty tepelného kontrastu  $C$  na hloubce  $z$  / Heating-up of the object with defects by thermal wave, the dependency of relative values of thermal contrast ( $C$ ) at a depth  $z$

Pokles kontrastu je úměrný třetí mocnině hloubky  $z$ . Pro vyjádření kontrastu se zavádí tepelný kontrast  $C(t)$  dle vztahu

$$C(i, j, t) = \frac{\vartheta(i, j, t) - \vartheta(i, j, t=0)}{\vartheta_s(t) - \vartheta_s(t=0)} \quad (6)$$

kde

$\vartheta(i, j, t)$  je časově proměnná teplota na povrchu nad defektem (indexy  $i, j$  určují pixel senzoru ič kamery)

$\vartheta_s(t)$  je průměrná hodnota teploty na povrchu objektu bez defektů

$\vartheta(t=0)$  jsou počáteční hodnoty teploty před simulací tepelným pulzem

Matematické vyjádření může být značně složité, záleží na vlastním materiálu, jeho hustotě ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), specifické tepelné kapacitě ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ), na součiniteli tepelné vodivosti ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ), součiniteli teplotní vodivosti ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ), na součiniteli tepelné „effusivity“ ( $\text{W} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ) a dále na tvaru pulzu (Diracův pulz, obdélníkový pulz, Gaussův pulz).

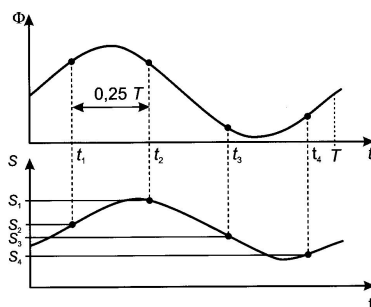
## Pulzní termografie

Pulzní termografie spočívá v rychlém (pulzním) externím nebo interním ohřevu tělesa a následném vyhodnocení teplotního pole na povrchu tělesa pomocí termokamery. Podle uspořádání zdroje ohřevu, objektu a kamery se pulzní metoda dělí na reflexní a průchodovou. Teplota povrchu se rychle mění po řízené pulzní stimulaci vlivem rozptýlu tepelné vlny, vyzařování a konvekce.

Z materiálu [3] / publikovaném na 18<sup>th</sup> WCNDT , konaném v dubnu 2012 v Durbanu je uvedena informace, že společnost General Electric používá pro pulzní termografii několik synchronizovaných xenonových lamp o výkonu 4,8 kJ, které mohou vyzařovat (pulzní) výkon až 10 MW !

## Lock-in termografie

Lock-in termografie je založena na modulaci řízeného tepelného toku dopadajícím na diagnostikovaný objekt. Tepelná (obvykle sinusová) tepelná vlna proniká dovnitř tělesa a v místě změny prostředí, tj. anomálie/odchylky ve struktuře materiálu testovaného objektu se odráží zpět k povrchu. Na povrchu objektu dochází k interferencím objektem vyzařovaného a na objekt dopadajícího zářivého (tepelného) toku, kdy potom termogramy snímané termografickou kamerou jsou modifikovány tepelnou vlnou emitovanou z vnitřku diagnostikovaného objektu. Rozborem signálu z každého pixelu detektoru kamery lze stanovit odděleně jak amplitudu, tak i fázový posuv odezvy. Amplituda signálu z jednotlivých pixelů je ovlivněna nehomogenitou parametrů (emisivita, pohltivost) a nehomogenním rozložením dopadajícím tepelným tokem na povrch objektu. Avšak ve fázové modulaci jsou uvedené efekty vyloučeny a metoda lock-in poskytuje nezkreslené informace o „podpovrchové“ teplotě objektu. Vyhodnocení amplitudy a fáze obrazového signálu lze docílit různými způsoby, nejčastěji je používáné zpracování čtyř o 90° fázově posunutých obrazů.



Obr.3 Princip vyhodnocení amplitudy a fáze u lock-in termografie (nahore dopadající modulovaná vlna, dole vlna vyzařovaná povrchem objektu) / The principle of evaluation of the amplitude and phase for lock-in thermography (top incoming modulated wave, wave emitted by the surface of the object at the bottom)

Po zprůměrování více obrazů/termogramů lze u každého pixelu vyhodnotit amplitudu a fázi podle těchto vztahů:

$$\varphi = \arctg \frac{S_1 - S_3}{S_2 - S_4}$$

$$A = \sqrt{(S_1 - S_3)^2 + (S_2 - S_4)^2}$$

Vyhodnocení amplitudy a fáze obrazového signálu je možné několika různými, zde zpracováním čtyř o 90° fázově posunutých obrazů.

## Superframing

Použití hlavně u kamer s fotonovými mozaikovými detektory a u kterých je možné měnit integrační čas.

( Kamery s mikrobolometrickými detektory mají fixní integrační čas, je možné měnit pouze rozsah teplot).

## Výzkum a vývoj (R&D)

Termografické systémy pro R&D jsou kamery s nechlazenými a chlazenými mozaikovými detektory. Kamery (s chlazenými) detektory se vyznačují tím, že mají vysoké obrazové frekvence, jsou velmi citlivé, mohou být osazovány výměnnými spektrálními filtry, a obecně tyto kamery mají výstupy pro přenos a záznam dat v externích zařízeních (počítačích), mají vstupy pro synchronizaci kamer atd. Spektrální rozsahy kamer pro R&D jsou takové, že prakticky pokrývají všechna ič pásma, tj. od NIR po LW.

Základní směry v oblasti R&D:

- Ič mikroskopie
- Lékařská termografie
- Thermal signatures/„Teplotní značky“ (- superframing)
- Rychlé změny teplot/teplotních polí
- Tracking/Sledování rychle se pohybujících objektů, při up-date změnách polohy a směru objektu
- Detekce paprsků „neviditelných laserů“

## Automatizace a požární bezpečnost

Základní požadavky na techniku:

- Radiometrický/měřicí systém včetně nastavování parametrů objektu
- Ethernet (ovládání/řízení a obraz)
- USB (ovládání/řízení a obraz)
- Digitální vstupy a výstupy

### **Speciální měření (v pecích, ...)**

(Termografická radiometrická měření „skrz plameny“).

Měření jsou zaměřena především na kontrolu teplot na povrchu trubek/vlások v pecích. Vlastní měření se provádí tak, že z otevřeného (v době měření) průzoru ve stěně pece jsou pomocí ič kamery, opatřené speciálním tepelným štítem, kontrolovány trubky/vlásoky, které je možné zaměřit kamerou. U kruhových pecí jsou zaměřovány trubky umístěné na protější straně pece, kde uprostřed pece jsou umístěny hořáky a hoří plameny (většinou je spalován zemní plyn). V optické ose mezi ič kamerou a kontrolovanými trubkami hoří plameny.

Plamen při spalování zemního plynu je transparentní ( $\tau \rightarrow 1$ ) na vlnové délce 3,9  $\mu\text{m}$  a toho se využívá v této aplikaci použití.

### **Zobrazování (úniků) plynů**

Při této aplikaci je využíváno skutečnosti, že celá řada plynů není na určitých vlnových délkách transparentní ( $\tau \rightarrow 0$ ) a plyny (jejich případné úniky) je potom možné zobrazit jako „obláčky kouře“. Ič kamery musí mít vysokou citlivost a mají zabudovány (kamery FLIR) speciální funkci HSM (High Sensitive Mode). Vlastní měření – zobrazování (úniků plynů) nejsou kvantitativní, ale kvalitativní.

Termografické kamery FLIR řady GF mohou pracovat ve dvou základních režimech: v radiometrickém (kvantitativní měření) a neradiometrickém (kvalitativní zobrazování).

### **Literatura:**

- [1] ICNDT Guide to Qualification and certification of Personnel for Inspection, Testing and Condition Monitoring, 1.4.2012
- [2] Nondestructive Testing, Handbook, Thermal / Infrared Testing, Electrical Testing V.P.Vavilov, MSIA „Spectrum“, 2009
- [3] Ringermacher Thermal Imaging NDT at General Electric Referát na konferenci 18<sup>th</sup> WCNDT Durban, 2012
- [4] Technická diagnostika Marcel Kreidl, Radislav Šmíd, Technická literatura BEN 2006, ISBN 80-7300-158-6
- [5] Nondestructive Testing, Handbook, Infrared and Thermal Testing, Xavier X.P., I.Maldague, ASNDT
- [6] Infrared Thermal Imaging, Fundamentals, Research and Application M.Vollmer, K.P. Möllman, Wiley-VCH Verlag