

### 3 Meranie termofyzikálnych vlastností materiálov infračervenou zábleskovou metódou

Teória: Existuje celý rad experimentálnych metód merania termofyzikálnych vlastností parametrov, ktoré je možné v zásade rozdeliť na metódy **stacionárne** – využívajúce stacionárne teplotné polia a **dynamické** – využívajúce dynamické teplotné polia, kde sa meria odozva materiálu na vložený cudzí objekt väčšinou vo forme elektrického odporu resp. vo forme teploty. Jednou z dynamických nestacionárnych metód je aj **infračervená záblesková metóda**, využívajúca nestacionárne teplotné pole stimulované v testovanom materiáli veľmi krátkym impulzom externým zdrojom tepla – tzv. **zábleskovým tepelným impulzom**. Teplotná odozva povrchu odvrátenej strany ku ožiarenej strane, na takýto teplotný stimul je registrovaná pyrosenzorom a vyhodnocovaná pomocou počítača. Uvedená metóda je platná ak čas k dosiahnutiu teplotného maxima je oveľa menší ako čas kým sa teplo začne strácať bočnými stenami. Dĺžka tepelného impulzu sa pri používanej halogénovej lampe býva rovná 2-3 sekundám pri vzdialenosti zdroja tepla od vzorky cca 5cm. Analytické riešenie dynamickej tepelnej rovnice je uvedené nižšie.

V prípade polonekonečnej izotropnej rovinatej platne, ktorá je neohraničená v smere osí  $x, y$ , kým v smere osi  $z$  má konečnú homogénnu hrúbku  $L$  - pričom  $0 \leq z \leq L$  a  $z \ll x, y$  bude jej geometria dobre korešpondovať s priestorovo jednorozmerným matematicko - fyzikálnym modelom.

Za predpokladu, že obidva neohraničené povrchy uvažovanej polonekonečnej platne sú dokonale tepelne odizolované - tak, že nedochádza k žiadnej výmene tepla s jej okolitým prostredím možno teplotné pole  $T(z, t)$  v každom ďalšom časovom okamihu  $t > 0$  popísať teplotnou funkciou

$$T(z, t) = \frac{1}{L} \int_0^L T(z, 0) dz + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left[ -\alpha t \left( \frac{n\pi}{L} \right)^2 \right] \cos \frac{n\pi z}{L} \int_0^L T(z, 0) \cos \frac{n\pi z}{L} dz. \quad (3.1)$$

Nech je vzorka v podobe uvažovanej platne zo strany, pre ktorú je  $z = 0$  ožiarená veľmi krátkym homogénnym zábleskovým tepelným impulzom s plošnou hustotou  $q$ , ktorý bude okamžite a rovnomerne absorbovaný veľmi tenkou vrstvou excitovaného povrchu s hrúbkou  $g \ll L$ . V súlade s prvým zákonom termodynamiky, rozloženie teplôt v tejto vrstve v čase  $t = 0$  bude

$$T(z,0) = \frac{q}{\rho \cdot c_p \cdot g} \quad \text{pre } 0 < z < g \quad . \quad (3.2)$$

Ak v tom istom čase  $t = 0$  vzorka nevykazuje žiadne teplotné rozdiely voči okolitému prostrediu s teplotou - ktorá je len pre zjednodušenie výpočtov považovaná za nulovú - potom pre rozloženie teplôt pod touto povrchovou vrstvou  $g$  - z ktorej pre všetky časy  $t > 0$  absorbované teplo difunduje do celého objemu vzorky platí

$$T(z,0) = 0 \quad \text{pre } g < z < L \quad . \quad (3.3)$$

Pri počiatkových podmienkach (3.2) a (3.3) môže byť teplotná funkcia (3.1) zapísaná v tvare

$$T(L,t) = \frac{q}{\rho c_p L} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp \left[ -\alpha t \left( \frac{n\pi}{L} \right)^2 \right] \right\} \quad , \quad (3.4)$$

Definícia dvoch bezrozmerných parametrov

$$V(L,t) = \frac{T(L,t)}{T_M} \quad \text{a} \quad \Omega(L,t) = \frac{\pi^2 \alpha t}{L^2} \quad , \quad (3.5)$$

kde

$$T_M = \frac{q}{\rho c L} \quad (3.6)$$

je maximálna, resp. rovnovážna teplota na povrchu opačnej strany vzorky a kombinácia vzťahov (3.5) a (3.6) poskytujú výraz

$$V(L,t) = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp(-n^2 \Omega) \quad (3.7)$$

z ktorého je možné jednoduchým spôsobom určiť teplotnú vodivosť  $\alpha$ .

Z grafického zobrazenia funkcie (3.7), uvedeného na obrázku 1, je zrejmé, že pri hodnote parametra  $V = 0,5$  je hodnota parametra  $\Omega = 1,38$ . Implicitne prítomnú teplotnú vodivosť  $\alpha$  je tak možné vyjadriť z definičného vzťahu pre  $\Omega$  v tvare

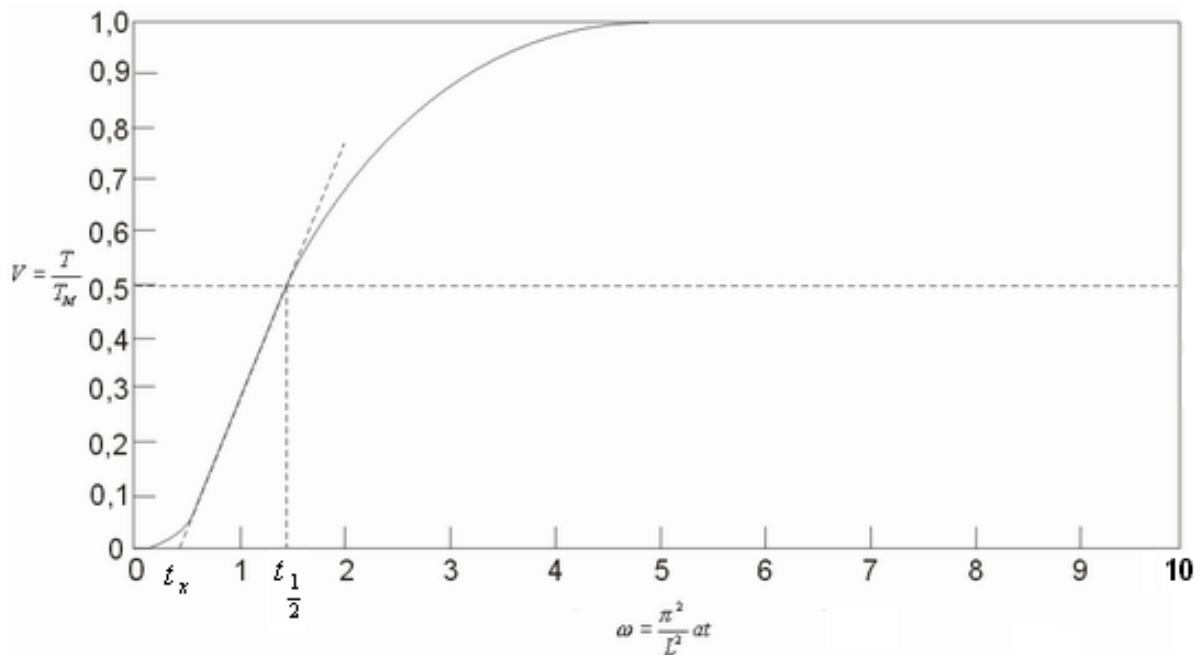
$$\alpha = 1,38 L^2 / \pi^2 t_{1/2} \quad , \quad (3.8)$$

kde  $t_{1/2}$  je čas potrebný na zvýšenie teploty povrchu opačnej strany tepelne excitovanej vzorky na polovicu jej maximálnej hodnoty od začiatku nárastu teploty.

*Tepelnú vodivosť  $k$*  je potom možné vypočítať zo známeho vzťahu ako

$$k = \alpha \rho c_p \quad . \quad (3.9)$$

kde za hodnotu špecifickej tepelnej kapacity  $c_p$  pre PMMA zadávame hodnotu  $1465 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

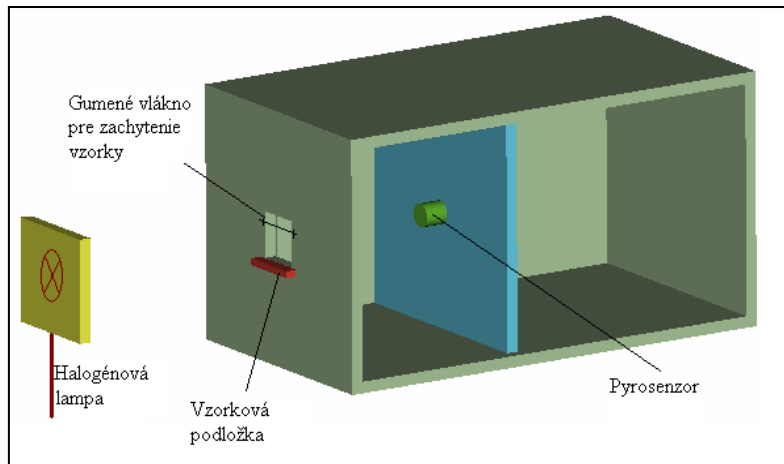


Obrázok 1. Graf funkčnej závislosti bezrozmerných parametrov  $V$  a  $\Omega$ .

Ako zdroj zábleskového tepelného impulzu bol použitý halogénový reflektor, s elektrickým príkonom  $1500 \text{ W}$ , umiestnený v konštantnej vzdialenosti od vzorky rovnej  $5 \text{ cm}$ . Koeficient emisivity povrchu použitej vzorky PMMA bol modifikovaný jeho nastriekaním tenkou vrstvou matného čierneho laku s emisivitou  $0,96$ . Teplotná odozva povrchu opačnej strany vzoriek na externý tepelný impulz je registrovaná termosnímačom *RAYTEK MI3 LTS*. Technické detaily použitého pyrosenzora uvádzame v tabuľke 1.

Tabuľka 1. *Technické detaily termosnímača*

Označenie	Raytek MI3 LTS
Spektrálna oblasť	$(8 - 14) \mu\text{m}$
Optické rozlíšenie	22:1
Rozsah teplôt	$((-40) : 600)^\circ\text{C}$
Čas odozvy	130ms
Teplotné rozlíšenie	$0,1^\circ\text{C}$



Obrázok 2. Schematické znázornenie 3D modelu experimentálnej aparatury

Postup merania:

1. Pred meraním musia byť všetky strany použitej vzorky nastriekané čiernym matným lakom (vykoná učiteľ ešte pred meraním). Ďalej musí byť lampa fixovaná v zvolenej vzdialenosti zapojená do spínacej predlžovačky s vypnutým spínačom.
2. Vyučujúci spustí program pre záznam dát s pyrosenzora a nastaví parametre okna v ktorom sa zobrazuje priebeh teploty od času.
3. Pred meraním študenti zmerajú hrúbku každej vzorky 5 krát mikrometrom a určia priemernú hodnotu hrúbky použitých vzoriek. Výsledky zapíšu do tabuľky 2. Uvedená hodnota vkladá do merania najväčšiu chybu a z toho dôvodu študenti v tomto kroku musia byť čo najpozornejší.
4. Zmerajte hmotnosť vzorky priloženými váhami.
5. Priemerné hodnoty hrúbky, hmotnosti, objemu a hustoty pre vzorku PMMA zapíšte do tabuľky 3.
6. Umiestnite vzorku PMMA do priestoru úchytu vzorky.
7. Vyučujúci zapne záznam dát pomocou tlačidla data recording. Po dosiahnutí času od začiatku nahrávania rovnému 30 sekúnd spustíte stopky s definovanou dĺžkou impulzu 3 sekundy a v rovnakom čase prepnete spínač na predlžovačke do polohy 1 (zapnuté-vzorka je ožarovaná).
8. Po skončení doby 3 sekúnd (pípanie mobilu) prepnete spínač na predlžovačke do polohy 0 (vypnuté – vzorka nie je ožarovaná) a otočte lampu obrátene k ožiarenej vzorke aby nedochádzalo k ďalšiemu ožarovaniu.

9. Sledujte časový trend teploty od času na PC a ako náhle začne teplota klesať učiteľ vypne záznam dát a exportujte hodnoty v súbore TestExport.txt do Excelu ktorý nazvite ako PMMA\_1.xlsx. Tento súbor uložte do zložky s menami študentov ktorý v danom čase vykonávajú meranie.
10. Následne opakujte kroky číslo 7 až 9 dvakrát.
11. Po nameraní 3 priebehov pre PMMA a vytvorení príslušných Excelovských zošitov vypnite program DataTempMultidrop.

Vyhodnotenie tepelných vlastností:

1. Ako referenčný materiál sa používa vzorka PMMA, pričom za hodnotu jej kapacity berte  $1465 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .
2. Zo všetkých časových priebehov teploty určite začiatok nárastovej krivky pre ktorý platí, že teplota po tomto čase je rastúca a pred týmto časom klesajúca alebo konštantná. Koniec nárastovej krivky je v bode dosiahnutia maximálnej teploty.
3. Určite hodnoty maximálneho teplotného rozdielu z nárastovej časti krivky teploty od času pre PMMA kde minimálna teplota sa počíta pomocou príkazu MIN zo stĺpca teploty a maximálna teplota sa počíta pomocou príkazu MAX zo stĺpca teploty. Maximálny teplotný rozdiel je potom daný rozdielom  $dT_{max} = T_{max} - T_{min}$ . Pre výpočet tohto parametru je vytvorený Excelovský zošit.
4. Určite aritmetický priemer hodnôt  $T_{min}$  a  $T_{max}$  a označte ho ako  $T_{pol}$ . Následne nájdite čas dosiahnutia teploty ktorá je najbližšia k tejto teplote a označte ho ako  $t_{pol}$  ktorý uvedte do tabuľky 4. Pre výpočet parametru  $T_{pol}$  sa používa vytvorený Excelovský zošit, ale čas  $t_{pol}$  si musí každá skupina nájsť sama a síce ako hodnotu času kedy je teplota na vzorke najbližšie k hodnote  $T_{pol}$ . V prípade, že hodnota  $T_{pol}$  nie je násobkom  $0,05^\circ\text{C}$  tak hodnotu  $T_{pol}$  zaokrúhľujte na najbližší vyšší násobok  $0,05^\circ\text{C}$  teda napríklad teplotu  $22,335^\circ\text{C}$  zaokrúhľite na teplotu  $22,35^\circ\text{C}$  a hodnotu  $t_{pol}$  určíte ako priemer časov kde bola dosiahnutá teplota  $22,3^\circ\text{C}$  a  $22,4^\circ\text{C}$  pričom berte hodnoty časov tie ktoré sú za sebou.
5. Určite hodnoty teplotnej vodivosti použitých vzoriek na základe vzťahu 8 a tepelnej vodivosti na základe vzťahu 9 do tabuľky 5.
6. Po získaní všetkých hodnôt termofyzikálnych vlastností použitých materiálov uvedte ich priemerné hodnoty do tabuľky 6.

7. Vypočítajte percentuálnu odchýlku  $PO_k(\%)$  priemernej hodnoty tepelnej vodivosti k získanej meraním od tabuľkovej hodnoty  $k_T = 0,205 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  pre PMMA pomocou vzťahu  $PO_k = |k_E - k_T| \cdot 100\% / k_T$ . V prípade, že rozptyl pre PMMA je vyšší ako 10% zdôvodnite nepresnosti.

Tabuľka 2. Namerané hodnoty hrúbky

Poradové číslo merania	Hrúbka PMMA L(mm)
1	
2	
3	
4	
5	
Aritmetický priemer $\bar{L}(mm)$	

Tabuľka 3. Priemerné hodnoty fyzikálnych a geometrických parametrov použitých vzoriek

	$\bar{L}(mm)$	$\bar{V}(mm^3)$	$m(g)$	$\rho(kg \cdot m^{-3})$
PMMA				

Tabuľka 4. Namerané hodnoty času  $t_{pol}$  pre vzorku PMMA

$t_{pol}(s)$	PMMA
1	
2	
3	

Tabuľka 5. Prepočítané hodnoty tepelnej a teplotnej vodivosti pre použité vzorky

PMMA	$a_E(mm^2 \cdot s^{-1})$	$k_E(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
1		
2		
3		
Aritmetický priemer		

Tabuľka 6. Termofyzikálne parametre vzorky PMMA

PMMA	$\bar{c}(J.kg^{-1}.K^{-1})$	$a_E(mm^2.s^{-1})$	$k_E(W.m^{-1}.K^{-1})$	$PO_k(\%)$
Priemer	1465			

Kontrolné otázky:

1. Aká musí byť hrúbka vzorky v porovnaní so zvyšnými rozmermi vzorky?
2. Prečo musí byť výkon žiariča vysoký a prečo musí byť dĺžka impulzu čo najmenšia?
3. Ako závisí hodnota maximálneho teplotného rozdielu od vzdialenosti žiariča od vzorky (jedná sa o priamu alebo nepriamu úmeru)?