

9 MERANIE TEPELNEJ VODIVOSTI MATERIÁLU

CIEĽ LABORATÓRNEHO CVIČENIA

Cieľom laboratórneho cvičenia je skúmať stacionárne a nestacionárne vedenie tepla vedením pozdĺž valcovej vzorky daného materiálu a určenie tepelnej vodivosti vzorky materiálu.

ÚLOHY LABORATÓRNEHO CVIČENIA

- Stanovenie tepelnej vodivosti vzorky materiálu

TEORETICKÝ ÚVOD

Prestup tepla je prenos tepelnej energie z objektu teplejšieho na objekt chladnejší. Vedenie tepla je charakterizované tým, že je to odovzdávanie energie v mikroskopickej mierke, t. j. medzi atómami a molekulami systému. Vedenie tepla sa uplatňuje predovšetkým v tuhých telesách, ktorých rôzne časti majú rôznu teplotu. Teplo sa vedením šíri tiež v kvapalinách a plynch, kde sa však uplatňuje tiež prenos tepla prúdením.

Tyč s konštantným prierezom a lineárnym poklesom teploty pozdĺž tyče je veľmi zjednodušenou sústavou. Vo všeobecnosti platí pre vedenie tepla v látke rovnica:

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \quad (9.1)$$

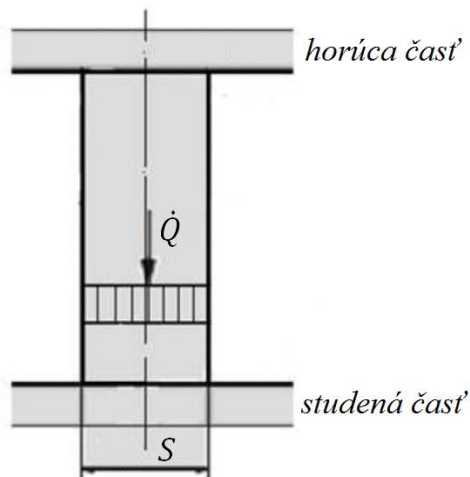
kde

\vec{q}	- vektor hustoty tepelného výkonu prenášaného vedením	(W. m ⁻²)
λ	- koeficient tepelnej vodivosti	(W. m ⁻¹ K ⁻¹)
T	- funkcia udávajúca teplotu v rôznych bodoch telesa	(K)

USTÁLENÉ VEDENIE TEPLA V TUHÝCH TELESÁCH

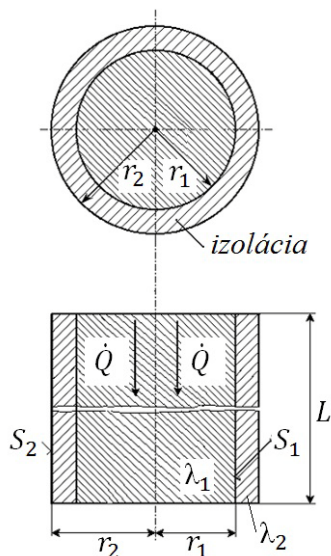
Termokinetické procesy pri dlhotrvajúcich nezmenených teplotách vnútorného a vonkajšieho prostredia môžeme skúmať ako deje nezávislé od času, t.j. ako ustálené (stacionárne) deje. Pri ustálených podmienkach tepelného režimu sa predpokladá, že predchádzajúce počiatočné rozloženie teplôt, ktoré bolo v elementoch sledované pred časovým ustálením tepelného pôsobenia, natoľko stratilo význam, že rozloženie teplôt v skúmanom objekte možno určovať iba na základe časovo nepremenných okrajových podmienok pre stacionárny prenos tepla. Tepelný tok stenou má axiálny smer. Izotermickú plochu tvorí súosový valec dĺžky L . Úloha sa rieši v cylindrických súradniciach r , φ a z .

LABORATÓRNE CVIČENIA Z VLASTNOSTÍ LÁTOK



Obr. 9.1 Množstvo tepla prestupujúceho cez prierez valca v čase T

Pri zmene polomeru r o elementárnu hodnotu dr sa zmení teplota steny T_S na ploche $S = 2\pi rL$ o elementárnu hodnotu dT_S (obr. 9.2).



Obr. 9.2 Priebeh teploty v homogénnej valcovej stene

Tepelný tok plochou S možno vyjadriť diferenciálnou rovnicou:

$$\dot{Q} = -2\pi rL\lambda \frac{dT_S}{dr} \quad (9.2)$$

kde

\dot{Q}	- tepelný tok	(W)
r	- polomer vzorky	(m)
L	- dĺžka vzorky	(m)
T_S	- teplota steny	(K)

LABORATÓRNE CVIČENIA Z VLASTNOSTÍ LÁTOK

Upravením vzťahu (9.2) sa získa elementárna zmena teploty :

$$dT_s = - \frac{\dot{Q}}{2\pi L \lambda} \frac{dr}{r} \quad (9.3)$$

Pri vedení tepla valcovou stenou je závislosť teploty v stene od jej polomeru logaritmická. Hustota tepelného toku sa vypočíta zo vzťahu:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (9.4)$$

kde

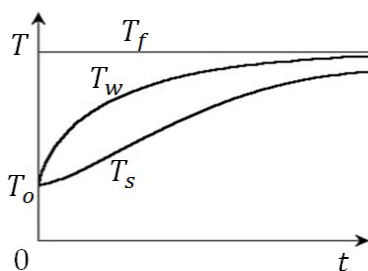
\dot{q}	- hustota tepelného toku	(W. m ⁻²)
A	- teplovýmenná plocha	(m ²)

Teplovýmenná plocha je potom definovaná vzťahom:

$$A = 2\pi L \lambda \quad (9.5)$$

NEUSTÁLENÉ VEDENIE TEPLA V TUHÝCH TELESÁCH

O neustálenom (nestacionárnom) vedení sa hovorí vtedy, ak sa teplotové pole mení s časom, t.j. je funkciou nielen polohy, ale i času. Neustálenosť tepelných procesov je podmienená zmenou entalpie telesa a vždy je spojená s ohrevom alebo ochladzovaním telesa. Ako príklad sa využije teleso, ktoré sa vloží do prostredia s vyššou teplotou T_f . V tomto okamihu začne proces výmeny tepla. Spočiatku sa ohrievajú povrchové vrstvy a postupne sa proces ohrevu rozširuje do hĺbky telesa. Charakter zmeny teploty telesa v závislosti od času ohrievania je na obrázku 9.3.



Obr. 9.3 Priebeh teplôt v telese pri neustálenom vedení tepla

T_w - teplota povrchu telesa, T t 0

T_s - teplota v strede telesa,

T_0 - počiatočná teplota telesa,

T_f - teplota prostredia

Po uplynutí určitého času (teoreticky nekonečne dlhého) sa teplota všetkých vrstiev vyrovná teplote obklopujúceho prostredia T_f , t.j. nastane tepelná rovnováha. Pri nestacionárnom režime sa aj intenzita odvodu (prívodu) tepla s časom sa mení. Teplotný tok sa s narastaním času znižuje a v limite sa blíži k nule.

Neustálený tepelný dej je vždy spojený so zmenou entalpie telesa. Pretože rýchlosť zmeny entalpie je priamo úmerná schopnosti materiálu viesť teplo, t.j. tepelnej vodivosti λ

LABORATÓRNE CVIČENIA Z VLASTNOSTÍ LÁTOK

a nepriamo úmerná schopnosti akumulovať teplo, t.j. objemovú mernú teplotu $\rho \cdot c_p$, potom celková rýchlosť tepelného procesu určuje koeficient teplotovej vodivosti $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$, ktorý má v tomto prípade takú dôležitosť ako koeficient tepelnej vodivosti pri stacionárnych dejoch.

Ľubovoľný proces ohrevu alebo ochladzovania je možné rozdeliť na tri režimy.

Prvý tvorí počiatok procesu, pre ktorý je charakteristické rozšírenie teplotových vzruchov v priestore a zasahovanie stále nových vrstiev telesa. Rýchlosť zmeny teploty v jednotlivých bodoch je pritom rozdielna a teplotové pole závisí od počiatočného rozdelenia teplôt. Postupom času vplyv počiatočných nerovností prestáva a pomerná rýchlosť zmeny teploty vo všetkých bodoch sa stáva rovnaká.

Riešiť úlohy neustáleného vedenia tepla znamená nájsť závislosť zmeny teploty a množstva odovzdaného tepla od času. Tieto závislosti možno získať riešením Fourier-Kirchhoffovej rovnice vedenia tepla. Cieľom riešenia je nájsť všeobecné úlohy a zosúladiť ho s okrajovými podmienkami úlohy.

V súčasnosti sa mnohé zložité úlohy nestacionárneho vedenia tepla úspešne riešia pomocou počítačov. Existujú tiež metódy riešenia neustálených dejov, ktoré sú založené na analógiách: hydrotepelná analógia, elektrotepelná analógia a pod.

Potreba výpočtu neustálených dejov v praxi je častá. Výpočet priebehu zmien teplotového poľa pri neustálenom procese je dôležitý pri hodnotení prechodových charakteristík výmenníkov tepla, pri chladení alebo ohreve vrstvy katalyzátora, pri prechodových tepelných režimoch výmuroviek pecí, reaktorov, a pod.

Pri neustálených tepelných procesoch charakterizuje rýchlosť zmeny teploty látky pri jej ohreve alebo chladnutí. Definovaná je výrazom:

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho} \quad (9.6)$$

kde

a	- teplotová vodivosť	$(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
λ	- koeficient tepelnej vodivosti skúmaného materiálu	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1})$
ρ	- hustota skúmaného materiálu	$(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
c_p	- špecifická tepelná kapacita skúmaného materiálu	$(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$

Na riešenie úloh neustáleného vedenia tepla je nutné poznať funkcie teploty a tepelného toku nielen v závislosti od súradníc, ale i času:

$$T = f_1(x, y, z, t) \quad (9.7)$$

$$\dot{Q} = f_2(x, y, z, t) \quad (9.8)$$

Pre tuhé telesá v pokoji bez vnútorných zdrojov ich možno nájsť riešením vzťahu:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T \quad (9.9)$$

spolu s okrajovými a počiatočnými podmienkami (prvé určujú rozloženie teploty na hranici telesa a druhé – počiatočné rozloženie teploty v telese).

LABORATÓRNE CVIČENIA Z VLASTNOSTÍ LÁTOK

Okrajové podmienky sa obvykle zadávajú rovnicou:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_s = \frac{\alpha}{\lambda}(T_s - T_t) \quad (9.10)$$

kde

$\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_s$	- teplotný gradient na povrchu telesa	(K. m ⁻¹)
α	- súčiniteľ prestupu tepla medzi telesom a tekutinou	(W. m ⁻² . K ⁻¹)
λ	- koeficient tepelnej vodivosti telesa	(W. m ⁻¹ . K ⁻¹)
T_s	- povrchová teplota telesa	(K)
T_t	- teplota tekutiny obklopujúcej teleso	(K)

Tepelno-fyzikálne veličiny λ , c_p a ρ sa považujú za stále.

$$T = f_1(\alpha, \lambda, a, x, y, z, t, T_0, T_t, l_1, \dots, l_n) \quad (9.11)$$

Počiatočná podmienka sa zadáva napr. tak, že teleso na počiatku deja ($t = 0$) má všade rovnakú teplotu ($T_0 = \text{konšt}$).

Je známe, že teplota v ktoromkoľvek mieste telesa závisí od veľkého počtu veličín. Nájdenie rovnice pre konkrétny prípad je v celku dosť zložitou matematickou úlohou.

V ďalšom sa preto venujeme len najjednoduchším javom neustálenej tepelnej vodivosti v tuhých telesách. Premenné veličiny pritom zoskupíme do troch bezrozmerných komplexov, príp. kritérií podobnosti:

- Biottovo kritérium Bi

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (9.12)$$

- Fourierovo kritérium Fo

$$Fo = \frac{a t}{l^2} \quad (9.13)$$

- bezrozmerná súradnica $\frac{x}{l}$

LABORATÓRNE CVIČENIE

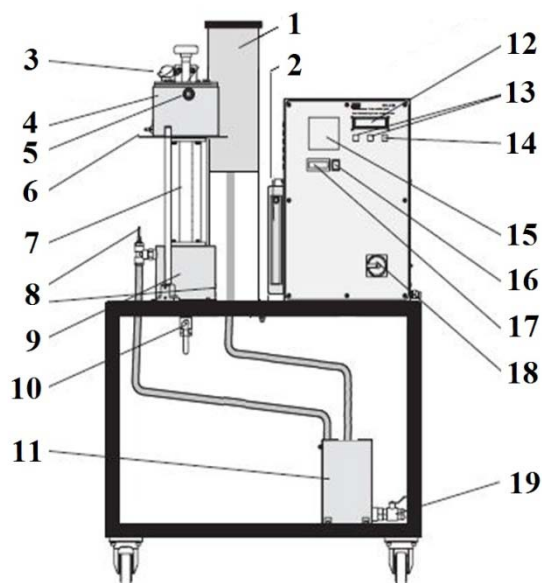
STANOVENIE TEPELNEJ VODIVOSTI MATERIÁLU

Použitý materiál:

- medená vzorka
- hliníková vzorka
- mosadzná vzorka
- ocel'ová vzorka
- vanádiová vzorka

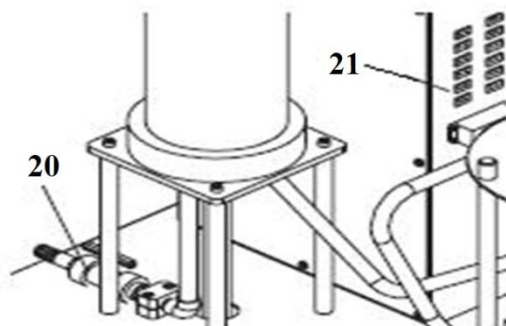
LABORATÓRNE CVIČENIA Z VLASTNOSTÍ LÁTOK

Opis aparatúry:



Obr. 9.4 Meracia stanica Gunt WL900

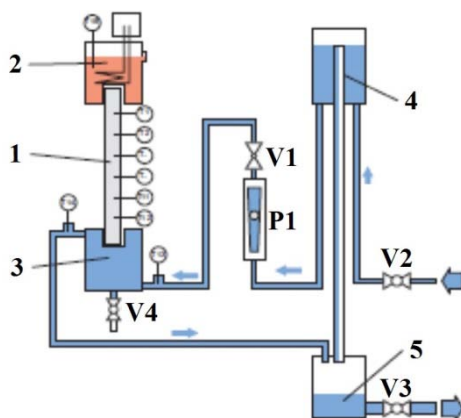
1 - prepadová nádrž na studenú vodu, 2 - prietokomer, 3 - ohrievač, 4 - nádoba na vodu s ohrievacím telesom pre ohrievanie vzorky, 5 - kontrolné okienko pre stav vody, 6 - výpustný kohútik pre horúcu vodu, 7 - vzorka, 8 - termočlánky pre vstup a výstup chladiacej vody, 9 - odvod tepla, 10 - drenáž pre chladiacu vodu V4, 11 - rezervoár pre použitú vodu, 12 - displej pre zobrazovanie teplôt na termočlánkoch, 13 - tlačidlá pre nastavenie teplôt, UP a DOWN, 14 - tlačidlo TARA, 15 - displej pre zobrazenie teplôt, 16 - tlačidlo pre zapnutie a vypnutie vyhrievača, 17 - displej zobrazujúci výhrevný výkon, 18 - hlavný vypínač, 19 - vypúšťací kohútik V3



Obr. 9.5 Detail meracia stanica Gunt WL900

20 – výpustný ventil, 21 – konektory pre zapojenie termočlánkov

LABORATÓRNE CVIČENIA Z VLASTNOSTÍ LÁTOK



Obr. 9.6 Vodný obeh stanice Gunt WL900

1 - vzorka, 2 - horúca voda, 3 - studená voda,
4 - prepad studenej vody, 5 - zberná nádoba na studenú vodu,
V1 - ventil nastavenia prietoku chladiacej vody, V2 - ventil vstupu chladiacej vody, V3 -
ventil výstupu chladiacej vody, V4 - ventil drenáže

Vodný obeh stanice Gunt WL900 je na obrázku 9.6. Ústredným prvkom stanice je valcovitá vzorka (1), ktorá slúži na prenos tepla vedením. Táto vzorka sa zahrieva na hornom konci, a chladená je na spodnom konci. To vytvára tok tepla z horúcej strany na chladnú stranu. Teplotný gradient je možné merať na dvanástich miestach po dĺžke vzorky ($T_1 - T_{12}$). Aby bolo možné sa v čo najväčšej miere priblížiť ideálnym teplotám pre jednorozmerné teplotové pole, vzorka musí byť veľmi tenká. Pre stálosť teploty sú vzorky vyhrievané nepriamo, prostredníctvom vodného kúpeľa. Homogénnu teplotu kúpeľa zaisťuje prívod stlačeného vzduchu. Stlačený vzduch je generovaný pomocou membránového čerpadla ovládaného zo spínacej skrinky. Vykurovacía teplota T_{15} je udržiavaná na konštantnej teplote. Aktuálna teplota je zobrazená na výstupe. Odvod tepla zo vzorky zabezpečuje chladiaca voda (3). Konštantný chladiaci tok zabezpečuje chladiaca voda privádzaná z nádrže na chladiacu vodu (4). Stav vody v prepadovej nádrži je usmernený konštantným prietokom. Pre minimalizáciu chýb pri meraní tepla od stredného tepelného toku (línia, žiarenie konvekciou), sa meria teplota na odvode tepla, ktoré má približne rovnakú teplotu ako okolité prostredie. Vzhľadom k tomu, že priemerná teplota, t.j. rozdiel medzi teplotou chladiacej vody a prostredia je veľmi malý, výmena prietokovej energie je tiež veľmi malá. Teplota chladiacej vody v prepadovej nádrži má približne teplotu okolia. Pre stanovenie tepelného toku sú pripojené snímače teploty - termočlánky (T_{13} , T_{14}), variabilný prietokomer (P1) pre určenie hmotnostného prietoku. K dispozícii je tiež ovládanie ventilu (V1), ktoré slúži na nastavenie prietoku chladiacej vody. Odvádzaná chladiaca voda sa zbiera spolu s prepadovou vodou v zbernej nádrži (5) a je odvedená do kanalizácie. Aby bolo možné skúmať teplotné pole, odvod tepla je možné odvieť drenážou cez ventil V4. Pokiaľ sa vzorka zohreje úplne a následne rýchle ochladí chladiacou vodou, je možné vytvoriť tepelný skok na dolnom konci vzorky.

PROGRAMOVÉ VYBAVENIE

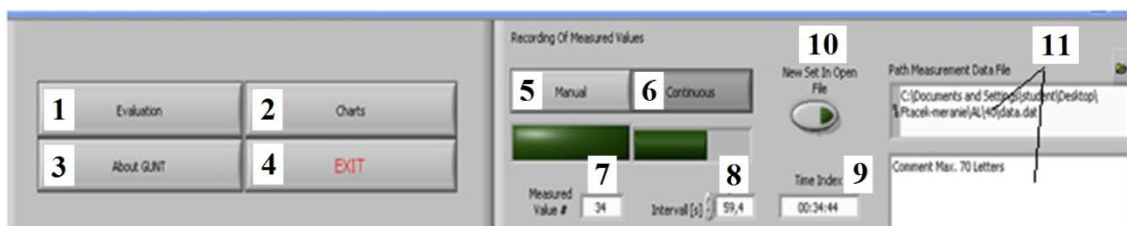
Pri zapnutí programu sa automaticky zobrazí hlavné menu (obr. 9.7), v ktorom sú štyri hlavné okná:

- Evaluation - vytváranie grafu priebehu teplôt (1),
- Charts – porovnanie nameraných hodnôt s vypočítanými hodnotami (2),
- About Gunt – zmena jazyka (3),
- Exit – ukončenie programu (4).

LABORATÓRNE CVIČENIA Z VLASTNOSTÍ LÁTOK

Na pravej strane hlavného menu sa nachádzajú dve okná (11). V hornej časti je zaznamenaná cesta uloženého súboru s nameranými dátami, v spodnej časti je priestor na komentár k meraniu.

Pre nahrávanie nameraných dát je možnosť výberu z dvoch možností. Manual (5) a Continuous (6). Pri zapnutí módu "Manual" je dátový záznam nahrávaný až po stlačení tlačidla a pri móde "Continuous" je dátový záznam nahrávaný automaticky v čase intervalu, ktorý sa navolí. Kliknutím na tlačidlo New Set In Open File (10), je možné pridať komentár ku ktorémukoľvek meraniu. Measured value (7) zobrazuje počet krokov s nameranými hodnotami. Interval nahrávania kroku merania sa volí v bunke Interval (8). Time index (9) zobrazuje čas od začatia merania.



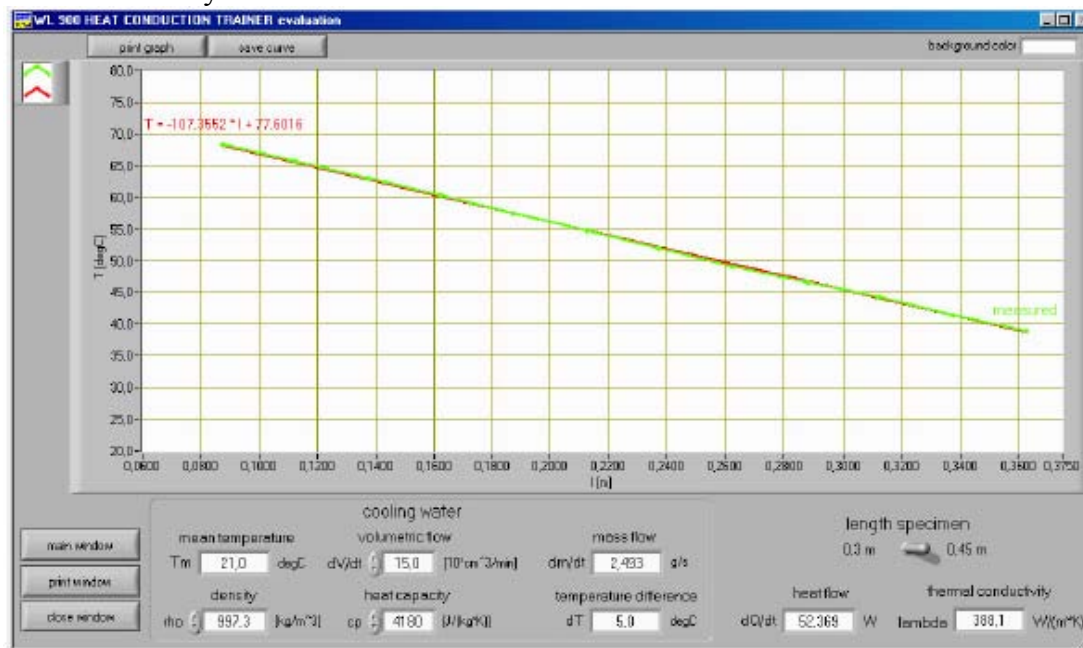
Obr. 9.7 Hlavné menu programu stanice Gunt WL900

VYHODNOCOVACIE OKNO

Vyhodnocovacie okno zobrazuje teplotný profil a zistenú tepelnú vodivosť pozdĺž celej vzorky. V spodnej oblasti je tepelná vodivosť zistená z odmeraných teplotných vlastností. Požadovanú hustotu vody pre určenie hmotnostného toku a tepelnú kapacitu možno meniť. Predvolená hodnota hustoty je $997,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a tepelnej kapacity je $4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pri $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Ďalej je vo vyhodnocovacom okne zobrazené:

- o hmotnostný tok chladiacej vody dm/dt ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$),
- o priemerná teplota chladiacej vody T_m ($^\circ\text{C}$),
- o rozdiel teplôt chladiacej vody na vstupe a na výstupe dT ($^\circ\text{C}$),
- o tepelný výkon dQ/dt (W),
- o koeficient tepelnej vodivosti - λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Dĺžku vzorky skúmaného materiálu možno meniť medzi dvomi hodnotami.



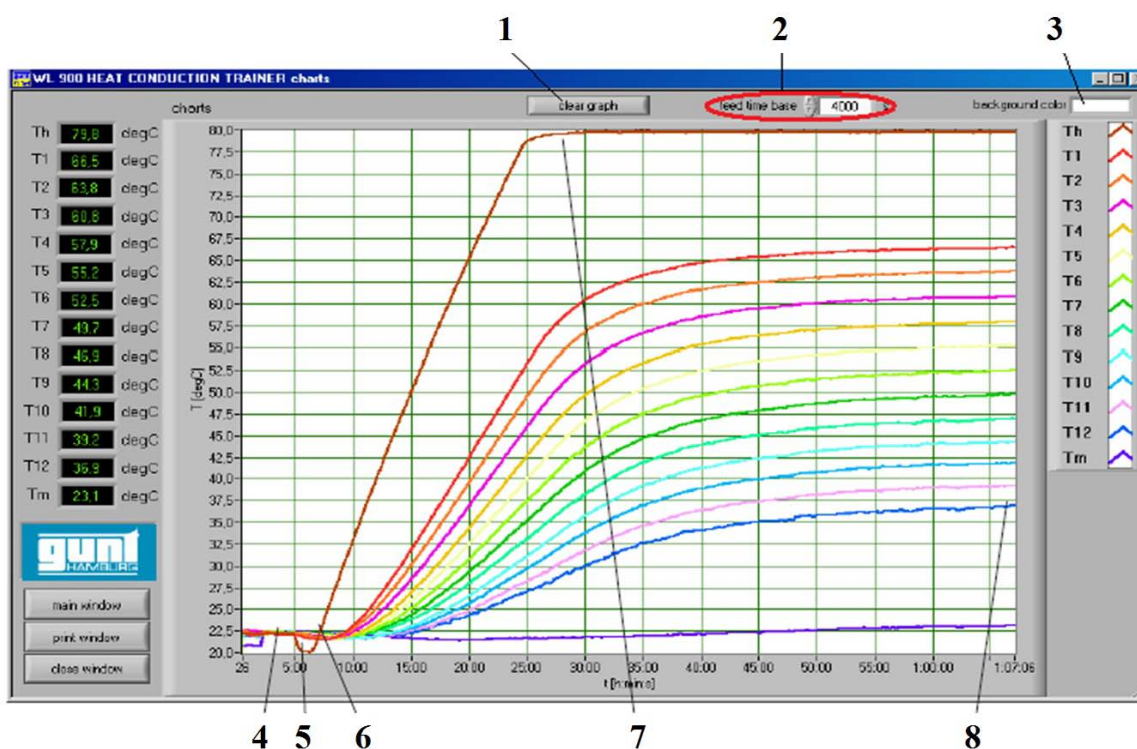
Obr. 9.8 Okno s grafickým zobrazením tepelného profilu a tepelnej vodivosti

OKNO ČASOVÉHO ZÁZNAMU

Okno časového záznamu (obr. 9.9) graficky zaznamenáva priebeh dvanástich teplôt (T_1-T_{12}), ktoré sú zaznamenávané v časovom priebehu. Okrem týchto teplôt sú na grafe zaznamenávané aj teploty chladiacej vody (T_m) a ohrievanej vody (T_h). V hornej časti okna sú tri aktívne políčka:

- Clear graph (1) slúži na vyčistenie grafickej plochy pre nové meranie alebo zachovanie pôvodného merania ale len s požadovanými hodnotami.
- Feed time base (2) slúži na nahrávanie meracích krokov, ktoré sa zadáva manuálne a zobrazuje len ten časový úsek, ktorý bol zadaný.
- Background colour (3) slúži na nastavenie východiskovej farby. Po kliknutí na políčko sa zobrazí ponuka s farebnou paletou pre nastavenie podkladu grafickej plochy.

Celý výhrevný proces je zaznamenaný v okne. Na začiatku je možné pozorovať vynulovanie teplôt termočlánkov (4) po stlačení tlačidla "TARA" (**NESTLAČAŤ PO ZAPNUTÍ OHRIEVAČA!!!**). Následne na to bolo ohrievacie teleso zaplnené vodou (5) a následne je možno vidieť zapnutie ohrievača (6). Ohrievač prestane vyhrievať vzorku po 25. minútach a už len udržiava požadovanú teplotu (7). Stacionárny stav je dosiahnutý po hodine merania (8).



Obr. 9.9 Okno časového záznamu
1-8 - popis v texte

LABORATÓRNE CVIČENIA Z VLASTNOSTÍ LÁTOK

Postup merania:

Zapojte prívod vody a otvorte plniaci ventil V2 (obr. 9.5 - pozícia 20). Zapojte hadicový prívod k odtokovému ventilu a ku drenáži. Uistite sa, že voda môže bezproblémovo tiecť cez ventil V3. Otvorením prívodového ventilu V2 umožníte vode tiecť do prepadovej nádrže (obr. 9.4 - pozícia 1). Hladina v prepadovej nádrži sa následne naplní na špecifickú úroveň. Voda tečie cez prietokomer P1 (2) a cez nádobu s chladiacou vodou do zásobníka (9) a odtiaľ prostredníctvom odtokového ventilu do drenáže (10). Prítok sa ovláda prírodným ventilom a nastavte ho na minimálny prepad.

Vložte skúmanú vzorku medzi zásobník s teplou a studenou vodou, zapojte 12 ks izolovaných medených káblov (termočlánkov) z hlavného panela do vzorky. Následne pripojte vzduchovú hadicu k zdroju tepla (nádobu s horúcou vodou). Na zabezpečenie dobrého kontaktu medzi vzorkou, odvodom tepla a zdrojom tepla je potrebné ohrievacie teleso úplne pritlačiť na vzorku. Do vzorky umiestňujte termočlánky v nasledovnom poradí: termočlánok T1 je zapojený do najvyššieho otvoru na vzorke a termočlánok T12 je zapojený do najnižšieho otvoru na vzorke. Po zapojení všetkých termočlánkov je potrebné zaizolovať vzorku izolačnou penou a pritiahnuť pásmi na suchý zips.

Do nádoby s ohrievačom (4) nalejte približne 2 litre vody. Stav vody je možné vizuálne kontrolovať cez kontrolné okienko (5).

Zapojte stanicu na napájanie. Uistite sa, že napätie zodpovedá údajom na výkonnostnom štítku. Zapnite hlavný vypínač (18), po ktorom by sa mali na hlavných displejoch panela zobrazovať údaje. Zapnite počítač a spustíte program WL 900. Spustíte okno „Evaluation“.

Zapnite vyhrievanie (16). Teplota sa reguluje na hlavnom paneli (13), pomocou tlačidiel Up a Down. Hornú teplotu je možné nastaviť po maximálnu hodnotu 85 °C. Po prejdení týchto krokov je zariadenie pripravené na meranie. V okne časového záznamu sledujte nestacionárne a následne stacionárne vedenie tepla. Na vyhodnocovanom okne sledujte a zaznamenajte všetky potrebné údaje potrebné na neskorší výpočet. Na konci merania uložte súbor s nameranými údajmi.

Výpočet:

STACIONÁRNE VEDENIE TEPLA

Výpočet súčiniteľa tepelnej vodivosti vychádza zo základného vzťahu:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{\delta} A \frac{1}{\lambda} \quad (9.14)$$

kde

\dot{Q}	- tepelný tok	(W)
ΔT	- rozdiel teplôt medzi koncami vzorky	(K)
δ	- hrúbka vrstvy skúmaného materiálu	(m)
λ	- koeficient tepelnej vodivosti telesa	(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)
A	- teplovýmenná plocha	(m ²)

Teplovýmenná plocha A je v tomto prípade definovaná ako:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (9.15)$$

kde priemer valca v tomto prípade je $D = 0,04$ m.

LABORATÓRNE CVIČENIA Z VLASTNOSTÍ LÁTOK

Koeficient tepelnej vodivosti sa vypočíta:

$$\lambda = \frac{4 \dot{Q} \delta}{\pi \Delta T D^2} \quad (9.16)$$

NESTACIONÁRNE VEDENIE TEPLA

Pri nestacionárnom vedení tepla je potrebná hodnota Biottovho kritéria:

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (9.12)$$

kde

- α - súčiniteľ prestupu tepla (W. m⁻². K⁻¹)
 l - charakteristický rozmer (m)

V tomto prípade sa uvažuje s hodnotou súčiniteľa prestupu tepla $\alpha = 6 \text{ W. m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ a charakteristický rozmer l je výška vzorky skúmaného materiálu $L = 0,04 \text{ m}$.

Hodnota teplotovej vodivosti je definovaná:

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho} \quad (9.6)$$

kde koeficient tepelnej vodivosti telesa sa získa zo stacionárneho vedenia tepla a špecifická tepelná kapacita vzorky c_p a hustota vzorky ρ závisí od skúmaného materiálu. (mosadz: $c_p = 390 \text{ J. kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $\rho = 8600 \text{ kg. m}^{-3}$)

Hodnotu Fourierovho kritéria možno vypočítať:

$$Fo = \frac{a t}{l^2} \quad (9.13)$$

kde t je čas, od ktorého možno považovať vedenie tepla ako stacionárne a charakteristický rozmer l je výška vzorky skúmaného materiálu $L = 0,04 \text{ m}$

Výpočet tepelného výkonu v čase t možno vypočítať zo vzťahu:

$$\dot{Q}_{(t)} = \pi R_0^2 L \rho c_p \vartheta_0 \sum_{i=1}^{\infty} A_i \left(1 - e^{-\mu_i^2 Fo}\right) \quad (9.17)$$

kde

- R_0 - polomer vzorky skúmaného materiálu (m)
 ϑ_0 - prevyšujúca teplota medzi koncami vzorky v čase t (K)
 A_i - konštanta závislá na hodnote Biottovho čísla (1)
 μ_i - konštanta závislá na hodnote Biottovho čísla (1)

Hodnoty konštánt A_i a μ_i je možné pre jednotlivé materiály nájsť v tabuľkách 9.1 a 9.2.

LABORATÓRNE CVIČENIA Z VLASTNOSTÍ LÁTOK

Tabuľka 9.1 Hodnoty konštánt A_i

materiál	A_1 (1)	A_2 (1)	A_3 (1)	A_4 (1)	A_5 (1)
meď	1,0015	0,0016	0,0004	0,0002	0,0001
hliník	1,0159	0,0197	0,0050	0,0022	0,0013
ocel' St37	1,0065	0,0080	0,0020	0,0009	0,0005
mosadz	1,0030	0,0040	0,0010	0,0004	0,0003
vanádiová ocel'	1,0099	0,0119	0,0030	0,0013	0,0007

Tabuľka 9.2 Hodnoty konštánt μ_i

materiál	μ_1 (1)	μ_2 (1)	μ_3 (1)	μ_{41} (1)	μ_5 (1)
meď	0,0893	3,1441	6,2845	9,4256	12,5670
hliník	0,3111	3,1737	6,2991	9,4354	12,5743
ocel' St37	0,1987	3,1543	6,2895	9,4290	12,5696
mosadz	0,1410	3,1479	6,2864	9,4269	12,5680
vanádiová ocel'	0,2425	3,1606	6,2927	9,4311	12,5711

Súčiniteľ tepelnej vodivosti v čase t sa určí zo vzťahu:

$$\lambda = \frac{\dot{Q}_{(t)} \delta}{\Delta T_{(t)} A} \quad (9.18)$$

ZÁVER