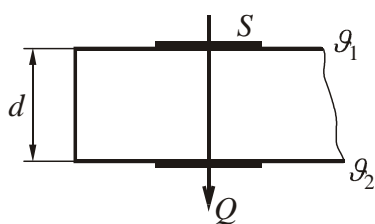


# MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI A KALIBRACE TERMOČLÁNKU

## Obecná část

Jsou-li dvě části tělesa trvale udržovány na nestejných teplotách, např. mezi dvěma lázněmi, pak mají molekuly, ionty a volné elektrony v teplejších částech trvale větší kinetickou energii než částice v chladnějších místech. Energie z teplejší části tělesa se trvale přenáší na chladnější části a v tělese vzniká časově stálý teplotní spád. Takový přenos tepelné energie se nazývá *ustálené vedení tepla*.



Obr. 1 Vedení tepla v rovinné desce

Udržíme-li povrchy rovinné desky (obr. 1), jež jsou velké proti její tloušťce  $d$ , na stálých teplotách  $\vartheta_1$  a  $\vartheta_2$  ( $\vartheta_1 > \vartheta_2$ ), vznikne po jisté době rovnovážný stav, při němž postupuje teplo deskou od povrchu s vyšší teplotou  $\vartheta_1$  k povrchu s nižší teplotou  $\vartheta_2$ . Teplo  $Q$ , jež projde za dobu  $t$  malou plochou  $S$ , je přímo úměrné velikosti plochy  $S$ , teplotnímu rozdílu  $\vartheta_1 - \vartheta_2$ , době  $t$  a nepřímo úměrné tloušťce desky  $d$ :

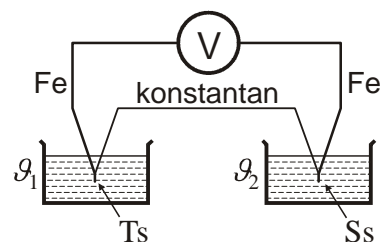
$$Q = \lambda S t \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{d}. \quad (1)$$

Konstantu  $\lambda$  nazýváme *součinitel tepelné vodivosti* materiálu desky. Udává množství tepla, které projde za jednotku času krychlí o jednotkové hraně mezi dvěma protilehlými stěnami, mezi nimiž je teplotní rozdíl  $1^\circ\text{C}$ , jsou-li ostatní stěny krychle dokonale tepelně izolovány. Jednotkou tepelné vodivosti v soustavě SI je:

$$[\lambda]_{\text{SI}} = \text{Js}^{-1}\text{m}^{-1}\text{K}^{-1} = \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}. \quad (2)$$

Dobrymi vodiči tepla jsou kovy, u nichž je vedení tepla zprostředkováno pohybem volných elektronů. Tepelná i elektrická vodivost kovů je úměrná hustotě volných elektronů v kovu. Tepelná vodivost ryzích kovů je vždy větší než slitin, v nichž přítomnost cizích atomů ruší pravidelnost mřížky a ztěžuje přenos energie. Špatnými vodiči tepla jsou často porézní, elektricky nevodivé materiály.

K měření teplot se v technické praxi nejčastěji používá termočlánek. *Termočlánek* je vytvořen pevným spojením (svařením, sletováním, apod) drátů ze dvou druhů kovu v pořadí: kov1 – kov2 – kov1. Zapojíme-li volné konce drátů z kovu1 na citlivý voltmetr, pak naměříme elektrické napětí (řádově milivoly), budou-li mít spoje kovů rozdílnou teplotu (obr. 2). Napětí je způsobeno termoelektrickými silami ze dvou příčin. První příčinou je difúze volných elektronů v drátu, jestliže má drát své konce na rozdílných teplotách. Následkem difúze volných elektronů vznikne spád elektrického potenciálu,



Obr. 2 Zapojení termočláneku

který je charakteristický pro daný materiál. Vzniklý potenciální rozdíl je obecně pro každý materiál jiný, takže v uzavřeném obvodu termočlánu ze dvou různých kovů vznikne termoelektrická síla rovná rozdílu těchto napětí. Druhou příčinou je závislost kontaktního rozdílu potenciálů na teplotě. Kontaktní rozdíl potenciálů vzniká při spojení dvou kovů, které mají různé výstupní práce elektronů, neboť potom elektrony kovu, který má menší výstupní práci než druhý, mohou přecházet snadněji do druhého kovu. Na prvním kovu pak vzniká kladný náboj, druhý kov se nabíjí záporně. Jestliže umístíme dva spoje termočlánu do lázní o různých teplotách  $\vartheta_1 > \vartheta_2$  (obr. 2), pak kontaktní rozdíl potenciálů např. železa a konstantanu v teplém spoji **Ts** se bude lišit od kontaktního rozdílu potenciálů ve studeném spoji **Ss** a vzniklá termoelektrická síla bude dána jejich rozdílem. Výsledná termoelektrická síla je proto úměrná rozdílu teplot  $\vartheta_1$  a  $\vartheta_2$ . Závislost je ve velkém rozsahu teplot mírně nelineární a pro přesná měření je potřeba převodních tabulek napětí-teplota. Tyto kalibrační tabulky jsou sestavovány pro případ, kdy má studený spoj **Ss** teplotu 0 °C popř. 50 °C. Pokud při měření nemáme k dispozici lázeň přesně s touto teplotou, je třeba monitorovat teplotu studeného spoje jiným teploměrem a provádět korekci (numericky nebo analogově).

Pozn.: Pokud máme „poloviční termočlánek“ (tj. pouze dva spojené kovy připojené přímo k voltmetru), vzniká studený spoj na svorkách voltmetru. Zde se totiž vytvoří další dva termospoje Cu-kov1 a Cu-kov2 (svorky a spoje voltmetru vyrobeny z mědi). Obě svorky musí mít stejnou teplotu a tu bereme jako teplotu studeného spoje.

## **Měření**

Měření se skládá ze dvou nezávislých úkolů. Absolutní metodou budete měřit tepelnou vodivost vzorku stavebního materiálu pomocí zařízení na obr. 3. Vlastní měření probíhá, díky počítači, téměř bez zásahu obsluhy, takže mezitím budete provádět druhý úkol – kalibraci termočlánu.

### **A. Měření tepelné vodivosti absolutní metodou**

V experimentu se měří teplota na spodní straně vzorku (deska 15×15×1 cm), která je uvnitř vyhříváné tepelně izolované komůrky. Druhá teplota se měří na horní straně vzorku, ta je pokryta směsí ledu a vody v igelitovém sáčku. Součinitel tepelné vodivosti našeho vzorku se pak vypočte ze vztahu:

$$\lambda = \frac{U I d}{S (\vartheta_1 - \vartheta_2)} \quad [\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}], \quad (3)$$

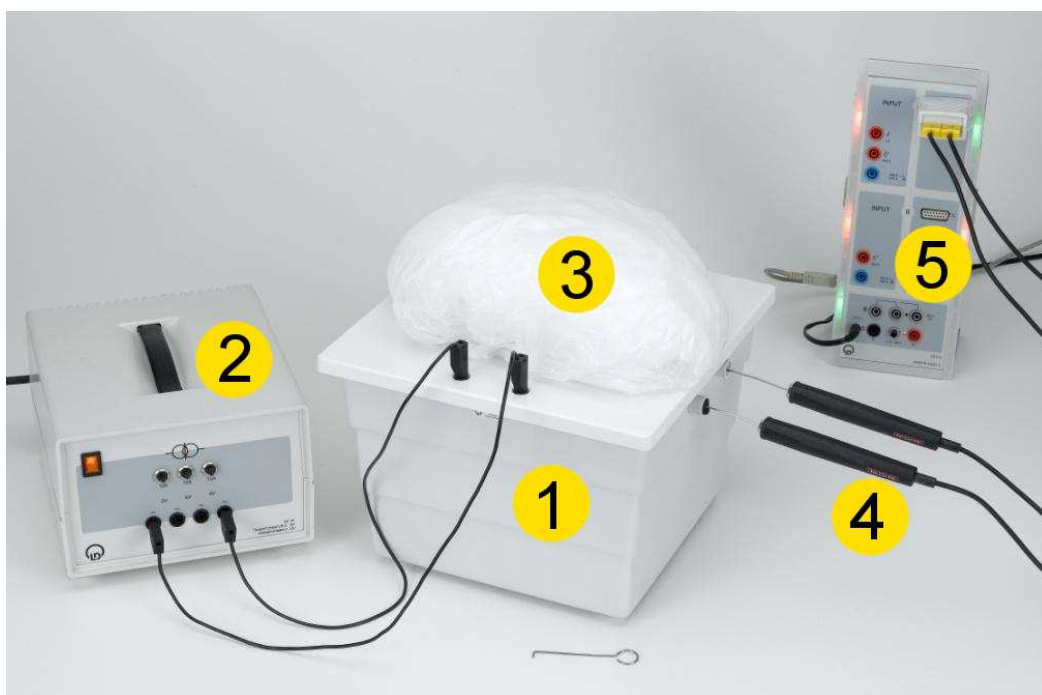
který získáme snadno ze vztahu (1). Zde  $U$  a  $I$  je napětí a proud procházející topným tělískem v komůrce,  $d$  je tloušťka vzorku,  $S$  je plocha vzorku a  $\vartheta_1 - \vartheta_2$  je rozdíl teplot mezi spodní vyhřívanou a horní chlazenou stranou vzorku. Vztah (3) platí pro ustálený stav, kdy se teploty v čase nemění. Tepelné děje jsou obecně velmi pomalé a doba ustálení je řádu hodin. Proto využijeme toho, že časový průběh teploty na spodní straně vzorku je, brzy po započítí děje, s dostatečnou přesností exponenciální:

$$\vartheta(t) = \vartheta_U - (\vartheta_U - \vartheta_P) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (4)$$

kde  $\vartheta_U$  je ustálená teplota,  $\vartheta_P$  je počáteční teplota v komůrce,  $\tau$  je časová konstanta. Přesné řešení je komplikované a získává se z parabolické parciální diferenciální rovnice vedení tepla. My budeme tedy měřit pouze jednu hodinu a ustálenou teplotu získáme fitováním funkce naměřenými hodnotami ve tvaru:

$$f(x) = A - B \cdot \exp(-x/C),$$

kde parametr  $A$  je hledaná ustálená teplota. Teplota chlazené strany vzorku by teoreticky měla být nulová a konstantní, při měření však zjistíte, že kolísá kolem jisté střední hodnoty – závisí to na „homogenitě“ směsi vody a ledu. Proto do výpočtu použijte střední hodnotu z grafu naměřených hodnot.



Obr. 3 Zařízení k měření tepelné vodivosti

- 1 – tepelně izolovaná komora, 2 – topný zdroj, 3 – sáček s vodou a ledu,  
4 – termočláňkové teploměry, 5 – měřicí modul CASSY2

### **Postup:**

Do komůrky se vloží vzorek. Tuto operaci provádí vyučující mimo výuku, protože je poněkud pracná a hrozí znečištění pracoviště. Vzorek musí být pokryt teplovodivou silikonovou pastou (používá se v elektronice pro zlepšení přestupu tepla mezi součástkou a chladičem) a opatřen po obou stranách hliníkovými destičkami, které tvoří ekvitermní plochu (plochu se stejnou teplotou). Podmínkou je, aby tepelná vodivost těchto destiček byla mnohem větší, než je vodivost měřeného vzorku. Toto uspořádání je proto vhodné pro měření stavebních izolačních materiálů. Vnější strana destiček je černě lakována pro lepší příjem a vyzařování tepla. Navíc jsou do vzorku vloženy kontaktní plíšky, které mají zajistit lepší kontakt

termočlánkových (Ni-NiCr) teploměrů s destičkami. Sestavu budete mít možnost si prohlédnout u úlohy.

Topné těleso v komůrce je připojeno přes ampérmetr a voltmetr ke zdroji střídavého napětí. **Napětí se volí podle měřeného vzorku (info přiloženo u úlohy) tak, aby ustálená teplota nepřesáhla 60 °C. Jinak hrozí poškození komůrky!** Voltmetr a ampérmetr je realizován pomocí měřicího modulu CASSY2, výsledky se zobrazují na počítači v programu Leybold CASSY Lab 2. Návod pro jeho ovládání najdete v doplňujících informacích a je také přiložen u úlohy.

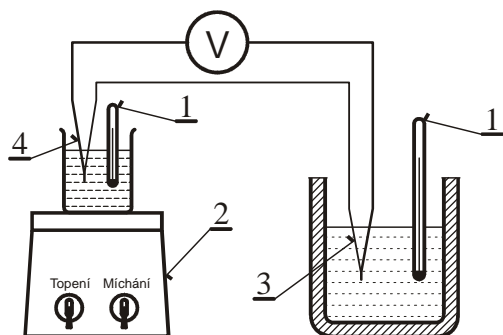
- 1) Horní (černou) stranu vzorku pokryjte potravinářskou fólií (**voda nesmí natéci do komůrky ani na vodiče!**) a položte na ni igelitový sáček naplněný ledem s trochou vody. Předtím vytlačte vzduch a sáček uzavřete svěrkou. Potřebné množství ledu je uvedeno u úlohy. Led rovnoměrně rozprostřete po povrchu, překryjte tepelně izolační vrstvou (bublinková fólie) a zatěžkejte dlaždicí.
- 2) Nejprve zjistěte topný příkon. Připravte si měřicí software (nahrát soubor *Vykon.labx*) a poté na okamžik (max. 5 s) zapněte zdroj topení. Přitom si zaznamenejte proud a napětí.
- 3) Nahrajte soubor *Vodivost.labx*, spusťte měření a pozorujte teplotu chlazené strany vzorku (modré značky). Zkontrolujte, zda jsou teploměry zasunuty na doraz. Jakmile se teplota ustálí (asi na 2 až 3 °C), zapněte topný zdroj.
- 4) Pozorujte teplotu vyhřívané strany vzorku (červené značky). Jakmile začne stoupat, vyčkejte 2 minuty, měření zastavte, smažte a hned spusťte nové. Nyní probíhá měření a můžete se věnovat úkolu **B**. Je ale nutné asi jednou za dvě minuty zkontrolovat, zda teplota chlazené strany prudce neroste (1 °C je již důvodem k zásahu). V takovém případě trochu zahýbejte se sáčkem, aby se směs voda-led promíchala. Zejména ke konci měření, je-li ve směsi již málo ledu, se musí stále promíchávat. Po jedné hodině měření zastavte (v případě nedostatku času i dříve, výsledek ale bude horší) a vypněte topný zdroj.
- 5) Proveďte fitování exponenciální funkce a zaznamenejte si parametr **A**.
- 6) Zjistěte střední hodnotu (za celou dobu měření) teploty chlazené strany vzorku.
- 7) Naměřená data uložte pod svým jménem.

## **B. Kalibrace termočlánku**

Někdy je třeba okalibrovat či ověřit použitý termočlánek, tzn. určit jednoznačný vztah mezi teplotou měřicího spoje a odpovídajícím termoelektrickým napětím (uspořádání při kalibraci viz obr. 4). Grafickým znázorněním této závislosti je kalibrační křivka.

### **Postup:**

- 1) Na topnou plotnu elektromagnetické míchačky postavíme malou kádinku s vychlazeným olejem z lednice. Do něj ponoříme přesný teploměr a měřicí spoj kalibrovaného termočlánku. Druhý (referenční) spoj kalibrovaného termočlánku je v termosce s vodou, která má konstantní teplotu.
- 2) Přívodní vodiče od termočlánku připojíme ke zdírkám LO a HI multimetru V553. Rozsahy volíme  $V_{DC}$  a AUTO (na displeji musí svítit symbol „mV“).



Obr. 4 Zapojení pro kalibraci termočlánku  
1 – teploměry, 2 – elektromagnetická míchačka,  
3 – referenční spoj, 4 – měřící spoj

Tabulka 1

rozdíl teplot $\Delta \vartheta$ [°C]	napětí termočlánku [mV]
0	0,00
1	
2	
3	
4	
...	

Polaritu vodičů zvolte tak, aby multimetr ukazoval záporné napětí, má-li olej nižší teplotu než voda v termosce.

- 3) Zapneme topení a míchání elektromagnetické míchačky. V nádobce s olejem je kovová tyčinka, která je unášena rotujícím magnetem v plotýnce míchačky. Sledujeme teplotu oleje a hlavně napětí termočlánku.
- 4) POZOR: v okamžiku, kdy je napětí termočlánku přesně nulové, přečteme rychle teplotu olejové lázně. Nulové napětí odpovídá nulovému teplotnímu rozdílu konců termočlánku.
- 5) Od tohoto okamžiku budeme zaznamenávat do tab. 1 velikost napětí vždy při zvýšení teploty olejové lázně o 1 °C, až do 15 °C. Hodnoty čteme a zaznamenáváme přesně.
- 6) Z uvedených hodnot sestrojíme graf  $U = f(\Delta \vartheta)$ . Tato závislost je ve velkém rozsahu teplot přibližně kvadratická, ale v našem úzkém rozsahu ji můžeme považovat za lineární. Je třeba si také uvědomit, že kalibrace je platná pro použitou teplotu studeného referenčního spoje. Zaznamenejte si ji také.

### Pracovní úkol

- 1) Změřte a vypočítejte (doma) součinitel tepelné vodivosti přímou metodou pro jeden materiál.
- 2) Stanovte směrodatné chyby naměřených veličin a nakonec konečného výsledku. Uveďte výsledek ve standardním tvaru  $\lambda = \dots \pm \dots$  [Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]. Potřebné informace najdete u úlohy a v kapitole „Chyby měření“.
- 3) Součinitel tepelné vodivosti často vychází u této metody větší, než je skutečná hodnota. Pokuste se odhadnout co může být příčinou.
- 4) Okalibrujte termočlánek Fe-Ko (železo-konstantan) v rozmezí teplotních rozdílů 0 ÷ 15 °C.
- 5) Sestrojte (doma) závislost termoelektrického napětí na rozdílu teplot. Závislostí proložte pomocí lineární regrese přímku (viz kap. „Chyby měření“, odst. D, přímka procházející počátkem) a určete směrnici. Máte-li k dispozici tabulkový procesor (Excel, apod.), proložte též parabolou a zhodnoťte která funkce je vhodnější.