

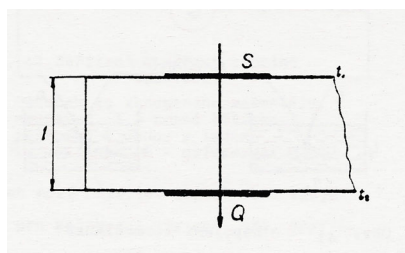
9. MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI

Měřicí potřeby

- 1) střídavý zdroj s regulačním autotransformatorem
- 2) elektromagnetická míchačka
- 3) skleněná kádinka s olejem
- 4) zařízení k měření tepelné vodivosti se třemi vzorky z různých materiálů
- 5) digitální multimetr V553
- 6) termočlánek železo – konstantan
- 7) teploměry
- 8) termoizolační nádoba s vodou
- 9) termoizolační nádoba pro chladicí lázeň (směs vody a ledu)

Obecná část

Jsou-li dvě části tělesa trvale udržovány na nestatejných 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 část a v tělese vzniká časově stálý teplotní spád. Takový přenos tepelné energie se nazývá *ustálené vedení tepla*.



Obr. 1 Vedení tepla v rovinné desce

Udržujeme-li povrchy rovinné desky (obr. 1), jež jsou velké proti její tloušťce l , na stálých teplotách t_1 a t_2 ($t_1 > t_2$), vznikne po jisté době rovnovážný stav, při němž postupuje teplo deskou od povrchu s vyšší teplotou t_1 k povrchu s nižší teplotou t_2 . Teplo Q , jež projde za dobu τ malou plochou S , je přímo úměrné velikosti plochy S , teplotnímu rozdílu $t_1 - t_2$, době τ a nepřímo úměrné tloušťce desky l :

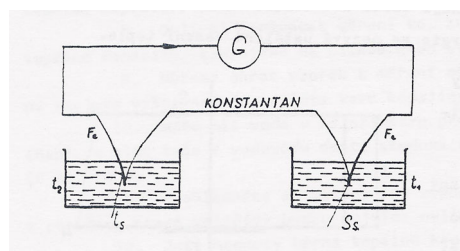
$$Q = \lambda S \tau \frac{t_1 - t_2}{l}. \quad (1)$$

Konstantu úměrnosti λ nazýváme *tepelnou vodivostí* materiálu desky. Je zřejmé, že udává množství tepla, které projde za jednotku doby krychlí o jednotkové hraně mezi dvěma protilehlými stěnami, mezi nimiž je teplotní rozdíl 1°C , jsou-li ostatní stěny krychle dokonale tepelně izolovány. Jednotkou tepelné vodivosti v soustavě SI je:

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

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.

K měření rozdílů teplot budeme využívat 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 kovu 1 na citlivý



Obr. 2 Zapojení termočlánu

galvanoměr, pak v tomto uzavřeném obvodu bude procházet proud, budou-li mít spoje kovů rozdílnou teplotu (obr. 2). Tento proud je způsoben termoelektrickými silami, vznikajícími ze dvou příčin. První příčinou je difúze volných elektronů v drátu jestliže má drát své konce na rozdílných teplotách $t_2 > t_1$. Následkem difúze volných elektronů vznikne spád elektrického potenciálu, který je charakteristický

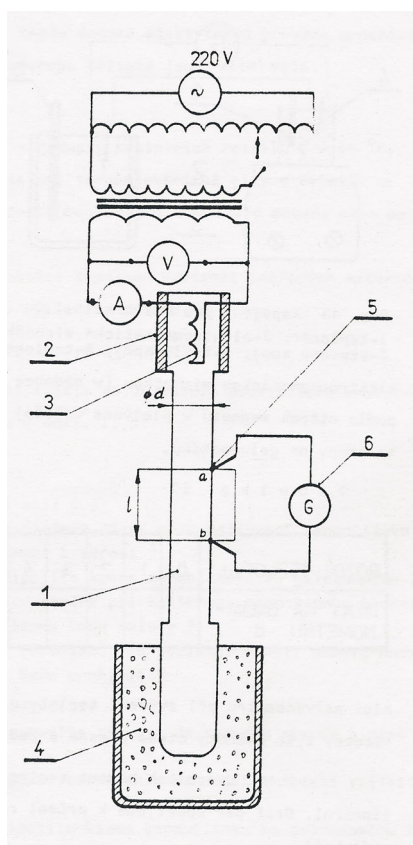
pro daný materiál. Vzniklý potenciální rozdíl je obecně pro každý materiál jiný, takže v uzavřeném obvodu termočlánu ze dvou různých kovů vznikne termoelektrická síla rovná rozdílu těchto napětí. Druhou příčinou je závislost kontaktního rozdílu potenciálů na teplotě. Kontaktní rozdíl potenciálů vzniká 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 $t_2 > t_1$ (obr. 2), pak kontaktní rozdíl potenciálů např. železa a konstantanu v teplém spoji T_s se bude lišit od kontaktního rozdílu potenciálů ve studeném spoji S_s a vzniklá termoelektrická síla bude dána jejich rozdílem. Termoelektrická síla je proto úměrná rozdílu teplot t_2 a t_1 . Budeme-li ji měřit citlivým milivoltmetrem, můžeme ze změn elektrického napětí usuzovat na změnu teploty.

Měření

K absolutnímu měření tepelné vodivosti kovů použijeme zařízení na obr. 3. Do horního konce válečku ze zkoumaného materiálu **1** je našroubován hliníkový nástavec **2**, do něhož je vsunuto elektrické topné tělísko **3**. Dolní konec válečku je opatřen chladicími žebry a je ponořen do termoizolační nádoby naplněné vodou s ledem **4**. Ve dvou různých místech vzorku se měří rozdíl teplot termočlánekem železo – konstantan **5**. Vzniklé termonapětí je měřeno milivoltmetrem **6**. Tepelná vodivost našeho měřeného vzorku se vypočte ze vztahu:

$$\lambda = \frac{U I l}{S(t_A - t_B)} \quad [\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}] \quad (3)$$

který získáme ze vztahu (1). Zde $U \dots \pm \dots$ [V] je hodnota elektrického napětí a $I \dots \pm \dots$ [A] je hodnota elektrického proudu procházejícího topným tělískem v ustáleném stavu, $l = (100 \pm 2)$ mm je vzdálenost konců termočlánu, $S = \pi D^2/4$ je průřez vzorku, kde $D = (10,0 \pm 0,1)$ mm je průměr vzorku, $t_A - t_B$ je rozdíl teplot.



Obr. 3 Zařízení k měření tepelné vodivosti

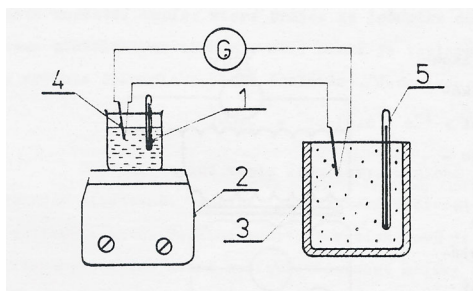
- 1 – váleček ze zkoumaného materiálu,
 2 – nástavec, 3 – topné tělísko,
 4 – termoska s vodou a ledem,
 5 – termočlánek, 6 – milivoltmetr V553

Pro určení absolutní chyby napětí a proudu nezapomeňte zapsat třídu přesnosti a použitý rozsah měřidel. Aby se zamezilo tepelným ztrátám do okolí, je celý váleček ze zkoumaného materiálu včetně nástavce a topného tělíska až po termosku s vodou a ledem zabalen do izolačního materiálu sibal, který má nízkou tepelnou vodivost $\lambda = 0,08 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Nejprve je ale třeba okalibrovat použitý termočlánek, tzn. určit jednoznačný vztah mezi rozdílem teplot obou spojů a odpovídajícím termoelektrickým napětím (zapojení pro kalibraci viz obr. 4). Grafickým znázorněním této závislosti je kalibrační křivka.

A. Postup při kalibraci termočlánu

- 1) Na topnou plotnu elektromagnetické míchačky postavíme malou kádinku s vychlazeným olejem z lednice, do něhož ponoříme přesný teploměr a měřící spoj kalibrovaného termočlánu. Druhý (tzv. referenční) spoj kalibrovaného termočlánu je v termosce s vodou, která má konstantní teplotu.
- 2) Přívodní vodiče od termočlánu připojíme ke zdírkám LO a HI multimetru V553. Rozsahy volíme V_{DC} a AUTO (na displeji musí svítit symbol „mV“). 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 termočlánu.
- 4) POZOR: v okamžiku, kdy je napětí termočlánu přesně nulové, odečteme rychle teplotu olejové lázně. Nulové napětí odpovídá nulovému teplotnímu rozdílu konců termočlánu.
- 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.



Obr. 4 Zapojení pro kalibraci termočlánku
1 a 5 – teploměry, 2 – elektromagnetická
míchačka, 3 – referenční spoj, 4 – měřící spoj

Tabulka 1

rozdíl teplot Δt [°C]	napětí termo- článku [mV]
0	0,00
1	
2	
3	
4	
5	
...	

- 6) Z uvedených hodnot sestojíme graf $U = f(\Delta t)$. Tato závislost je téměř přesně lineární. Graf pak použijeme k určení rozdílu $\Delta t = t_A - t_B$ při vlastním měření tepelné vodivosti.

B. Postup při měření tepelné vodivosti

Proud pro topný článek odebíráme z výstupního konektoru střídavého zdroje. Zdířky na připojení ampérmetru a voltmetru pro měření výkonu topného článku jsou umístěny vedle výstupního konektoru. Multimetrem V553 opět měříme termoelektrické napětí. Termočlánky na měřených vzorcích jsou stejného typu jako termočlánek kalibrovaný (Fe – Konstantan), a proto použijeme pro převod napětí na teplotu kalibrační graf z předchozího měření.

Po ustálení teplot zůstávají oba konce měřeného válečku na konstantních teplotách a je možno pro výpočet tepelné vodivosti válečku použít rovnici (3). Díky tepelné izolaci celého zkušebního válečku včetně topného tělíska jsou tepelné ztráty na povrchu minimální a všechno teplo dodané elektrickým proudem prochází zkušebním vzorkem.

Abychom dříve dosáhli ustáleného stavu, vytápíme tělísko po dobu asi tří minut vyšším výkonem při napětí 6 V, potom snížíme napětí na 3 až 4 V. Pak odečítáme po minutových intervalech napětí termočlánku tak dlouho, dokud nedosáhneme ustáleného stavu (rozdíl teplot se nemění min. po dobu 3 minut). Naměřené hodnoty zapisujeme do tabulky 2. Zapišeme též hodnotu proudu a

Tabulka 2

čas [min]	1	2	3	4	5	...
napětí termočlánku [mV]						
$t_A - t_B$ [°C]						

napětí na topném tělísku. Do tabulky doma doplníme příslušný teplotní rozdíl $t_A - t_B$ odečtený z kalibrační křivky.

Ustálený teplotní rozdíl $t_A - t_B$ dosadíme spolu s ostatními údaji do rovnice (3). Tak získáme tepelnou vodivost materiálu zkušebního válečku při průměrné teplotě $\frac{t_A + t_B}{2}$.

Pracovní úkol

- 1) Okalibrujte termočlánek v rozmezí teplotních rozdílů $0 \div 15$ °C.
- 2) Sestrojte (doma) závislost termoelektrického napětí na rozdílu teplot. Závislosti proložte přímkou pomocí lineární regrese. (viz kap. „Chyby měření“, odst. D)
- 3) Změřte a vypočítejte tepelnou vodivost dvou vzorků z různých materiálů.
- 4) Stanovte směrodatné chyby naměřených hodnot a konečných výsledků. Výsledky uveďte ve standardním tvaru $\lambda = \dots \pm \dots$ [Wm⁻¹K⁻¹]. (Potřebné informace najdete v kapitolách „Chyby měření“ a „Příklad na výpočet chyb měření“ v úvodní části skript.)