

Měření tepelné a teplotní vodivosti polymerů

Václav Valtr

Bakalářská práce
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

nascannované zadání s. 1

nascannované zadání s. 2

ABSTRAKT

V této bakalářské práci jsou popsány metody měření tepelné a teplotní vodivosti polymerů. Jsou zde zastoupeny metody jak stacionární s využitím přístroje dle Bocka, tak nestacionární s využitím přístrojem dle Fitcha. Dále jsou zde obsaženy metody měřené na přístroji Alambeta nebo novější metoda Short-hot-wire-method.

Klíčová slova: Tepelná vodivost, teplotní vodivost, kompozity.

ABSTRACT

In this bachelor thesis there are described the methods of measuring the thermal conductivity and the heat diffusivity of polymers. These methods are represented by both the stationary methods using the Bock's instrument, and the non-stationary methods using the Fitch's instrument. There are also present methods using the Alambeta instrument or the latest one: Short-hot-wire-method.

Key words: Thermal conductivity, heat diffusivity, composites.

Dovolte, abych na tomto místě poděkoval vedoucímu mojí bakalářské práce doc. Ing. Antonínu Blahovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi poskytoval v průběhu zpracování bakalářské práce.

Prohlašuji, že jsem na celé bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Souhlasím s tím, že s výsledky mé práce může být naloženo podle uvážení vedoucího bakalářské práce a ředitele ústavu. V případě publikace budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně, 08. 08. 2008

.....

podpis

OBSAH

ÚVOD.....	7
1 TEORETICKÁ ČÁST	8
1 SDÍLENÍ TEPLA VEDENÍM	9
1.1 TEPELNÁ VODIVOST	9
1.2 TEPLOTNÍ VODIVOST	9
2 STACIONÁRNÍ A NESTACIONÁRNÍ METODY MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOST A TEPLOTNÍ VODIVOSTI POLYMERŮ	11
2.1 STACIONÁRNÍ MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI DLE BOCKA	12
2.2 NESTACIONÁRNÍ MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI DLE FITCHE.....	15
2.3 MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI METODOU HOT-WIRE-METHOD.....	17
2.4 MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI PŘÍSTROJEM ALAMBETA.....	18
2.5 TEPLOTNÍ VODIVOST	21
3 MATEMATICKÉ MODELY MĚŘENÍ A ZPŮSOBY VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍCH DAT.....	24
3.1 MATEMATICKÝ MODEL MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI DLE FITCHE.....	24
3.1.1 Nelineární regresní modely	25
3.1.2 Statická analýza nelineární regrese	26
4 MĚŘENÍ VODIVOSTI PLASTŮ, TAVENIN PLASTŮ, LEHČENÝCH HMOT A KOMPOZITŮ S PLASTOVOU MATRICÍ.....	28
4.1 KOMPOZITY.....	28
ZÁVĚR.....	32
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	33
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	34
SEZNAM OBRÁZKŮ	36

ÚVOD

Měření tepelné a teplotní vodivosti je nedílnou součástí zjištění fyzikálních vlastností polymerů. Tyto vlastnosti jsou důležité z několika důvodů. Tím nejdůležitějším je jejich praktické využití.

Výše uvedené parametry lze zjišťovat více způsoby. Nejčastějšími jsou metody měření ve stacionárním a nestacionárním režimu. Na základě znalostí tepelných vlastností lze říci, že pro měření stacionárními metodami se používají materiály tepelně vodivé a pro nestacionární metody jsou to tepelné izolanty.

V současné praxi se začínají uplatňovat metody založené na neustálém toku tepla, mající řadu výhod. Mezi tyto výhody patří především krátká doba měření, jednoduchost postupu a měřicího zařízení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SDÍLENÍ TEPLA VEDENÍM

Sdílení tepla se zabývá procesy přenosu tepla. Podmínkou sdílení tepla je existence teplotního rozdílu. Sdílení tepla je možné dělit podle mechanismu na:

- a) sdílení tepla vedením (kondukcí)
- b) sdílení tepla prouděním (konvencí)
- c) sdílení tepla sáláním (radiací). Vedení tepla je molekulárním mechanismem sdílení tepla. Týká se látek kapalných i plynných.

1.1 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost λ je vlastnost, která se vyskytuje při řešení problémů sdílení tepla. Zákon, který definuje tepelnou vodivost plynu, kapalin nebo pevných látek se nazývá Fourierův zákon vedení tepla a jeho základní tvar je dán rovnicí:

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \quad (1)$$

kde \vec{q} je intenzita toku tepla ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

λ – tepelná vodivost ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$)

∇T – gradient teploty ($\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$)

V proudící tekutině představuje q hustotu toku tepelné energie vzhledem k místní rychlosti tekutiny, u tuhých látek je souřadnicový systém pevně spojen s tuhou látkou [1].

1.2 Teplotní vodivost

Diferenciální bilancí energie, když vedení tepla probíhá v tuhé látce podle Fourierova zákona a když tepelná vodivost je konstantní, získáme tzv. Fourierovu rovnici:

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

kde a je teplotní vodivost ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)

Rovnice (2) je definována na oblasti prostoru Ω (uvnitř oblasti, ne na hranici), kterou zaujímá homogenní tuhá látka. Popisuje teplotní pole v tuhé látce, jak se vyvíjí čas. Rovnice je parciální diferenciální rovnicí druhého řádu parabolického typu. Přísluší k ní počáteční podmínka a okrajové podmínky na hranici oblasti.

Okrajové podmínky se dělí na jednotlivé druhy:

- okrajová podmínka 1. druhu předepisuje hodnotu tepla na hranici
- okrajová podmínka 2. druhu předepisuje tepelný tok přes hranici
- okrajová podmínka 3. druhu popisuje situaci, kdy přes povrch tuhé látky (přes hranici) dochází ke sdílení tepla do proudící tekutiny.
- okrajová podmínka 4. druhu popisuje sdílení tepla na dokonalém styku dvou různých tuhých látek.

Tepelná vodivost a teplotní vodivost spolu souvisí vztahem:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (3)$$

kde ρ je hustota ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

c_p – měrné teplo za stálého tlaku ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

Teplotní vodivost se používá především při nestacionárním sdílení tepla vedením [2].

2 STACIONÁRNÍ A NESTACIONÁRNÍ METODY MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOST A TEPLTNÍ VODIVOSTI POLYMERŮ

Zjišťování tepelné vodivosti lze provést několika způsoby, které závisí na tepelném režimu, v němž se dané měření uskutečňuje. Nejčastěji se měření provádí ve stacionárním nebo nestacionárním režimu. Pro každý z těchto způsobů existuje několik metod, které se používají úspěšně v praxi. Obecně platí, že pro tepelné izolanty jsou vhodnější nestacionární metody a pro materiály dobře tepelně vodivé metody stacionární.

Stacionární metody měření tepelných veličin patří mezi klasické metody, protože se používají poměrně dlouho. K největším přednostem stacionárních metod patří možnost pohodlného přesného změření teplot. Méně přesné je však možnost podchytit rozdílné tepelné toky, které způsobují často velké systematické chyby, proto úsilí eliminovat tyto toky vede k stavbě složitých aparatur.

Při stacionárním vedení tepla není teplota funkcí času, ale jen souřadnic. Nejjednodušší případ vedení tepla je jednorozměrné vedení rovinnou deskou.

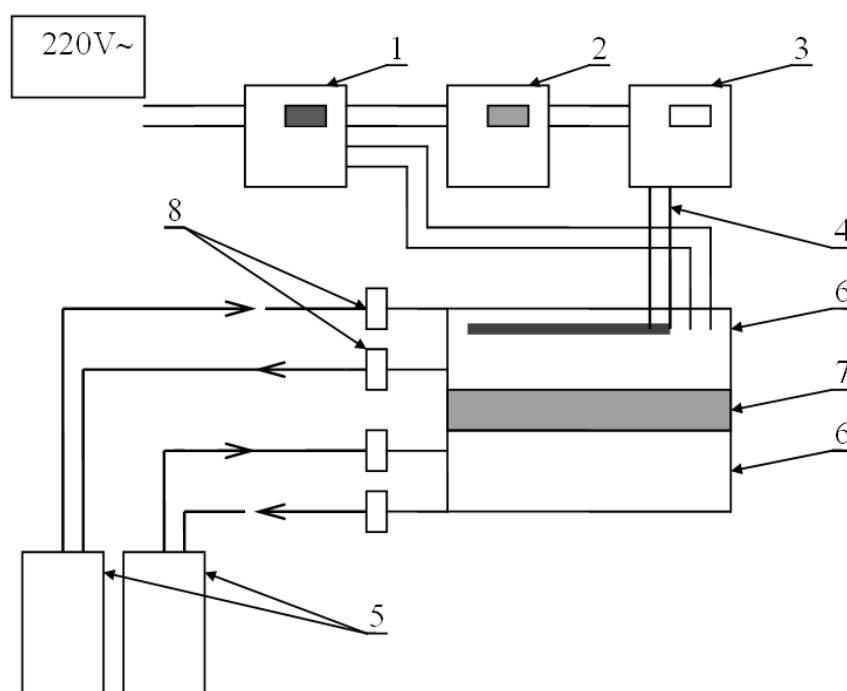
Nevýhodou stacionárních měřicích metod je časová náročnost měření a nutnost stanovit tepelnou vodivost jen suchých materiálů.

V současné praxi se začínají uplatňovat metody založené na neustálém toku tepla, mající řadu výhod. Mezi tyto výhody patří především krátká doba měření, jednoduchost postupu a měřicího zařízení.

U nestacionárního vedení tepla se teplota v určitém místě mění s časem. V praxi se nejčastěji setkáváme s případem, kdy je teplo vedeno pouze v jednom směru. Teplota je teda funkcí času a pouze jediné souřadnice.

2.1 Stacionární měření tepelné vodivosti dle Bocka

Při stacionárním měření koeficientu tepelné vodivosti se obvykle používá komerčně vyráběný přístroj dle Bocka znázorněný na obr. 1.



Obr. 1. Schéma přístroje pro měření tepelné vodivosti dle Bocka

- 1 – motorový kompenzátor
- 2 – wattmetr r
- 3 – dvanácti stupňový přepínač topení
- 4 – topení (12Ω)
- 5 – termostaty
- 6 – topné desky
- 7 – zkušební deska
- 8 – odporové teploměry (100Ω)

Podstatou zkoušení je, že se zkušební těleso vloží mezi dvě vytemperované desky a za ustáleného stavu teplot obou desek, z nichž horní má teplotu o 5 – 10 °C vyšší než deska dolní, se měří kolmý průtok tepla zkušebním tělesem o známé tloušťce.

Zkušební zařízení se skládá ze dvou rovnoběžně položených desek. Konstantní teplota obou desek je udržována pomocí kapaliny čerpané z termostatu nebo přímo regulací odporového topení v kovovém bloku. Přesnost regulace teploty musí být nejméně $\pm 0,1$ °C při rozdílu teplot obou desek 10 °C. uprostřed horní desky je vsazena menší kruhová tepelně odizolovaná deska, která je opatřena topnou spirálou. Je spojena s okolní termostatovou částí diferenciálním termočlánkem, který zapíná okruh topné spirály tak, aby diference teplot obou částí byla menší než 0,05 °C v ustáleném stavu. Elektrický příkon topné spirály tvoří tepelný tok přes zkušební těleso do spodní chladnější vrstvy.

Elektrický příkon se měří watthodinami a je možno jej měnit v několika stupních. Stupeň příkonu je nutno nastavit tak, aby regulace byla symetrická, což znamená, že interval zapnutí a vypnutí topení musí být stejně dlouhý.

Zkušební tělesa jsou kruhového tvaru o průměru nejméně o 20 mm větším, než je průměr měrné desky. Plochy zkušebních těles musí být ploché a hladké.

Postup zkoušky je ten, že se mezi dokonale očištěné desky přístroje vloží zkušební těleso a mikrometry se měří jeho tloušťka s přesností 0,01 mm.

Mezi zkušebním tělesem a přístrojem nesmí být vzduchové bubliny nebo vrstvy. Nejsou-li plochy zkušebního tělesa i přes veškerou péči rovné a hladké, doporučuje se použít vhodné kapaliny k vyplnění vzduchových vrstev (olej, glycerin, nebo jiná kapalina, ve které těleso za dané teploty nebobtná).

Na deskách přístroje se nastaví požadované zkušební teploty tak, aby jejich rozdíl byl 5 – 10 °C.

Po uvedení přístroje do chodu a dosažení ustáleného stavu (přibližně za jednu hodinu) se odečítají po 15 minutových intervalech údaje watthodin a teploměrů horní a dolní desky přístroje. Teploty se měří nejlépe odporovými teploměry s přesností $\pm 0,05$ °C [3].

Intenzita tepelného toku q je dána vztahem:

$$q = K \cdot \frac{N}{t} \quad (4)$$

kde K je konstanta přístroje odpovídající jednotlivým stupňům příkonu topení

N – spotřeba elektrické energie (W.h)

t – čas (h)

Tepelná vodivost λ se vypočte podle vztahu:

$$\lambda = \frac{q \cdot h}{\Delta t - q \cdot k} \quad (5)$$

kde q je intenzita tepelného toku ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

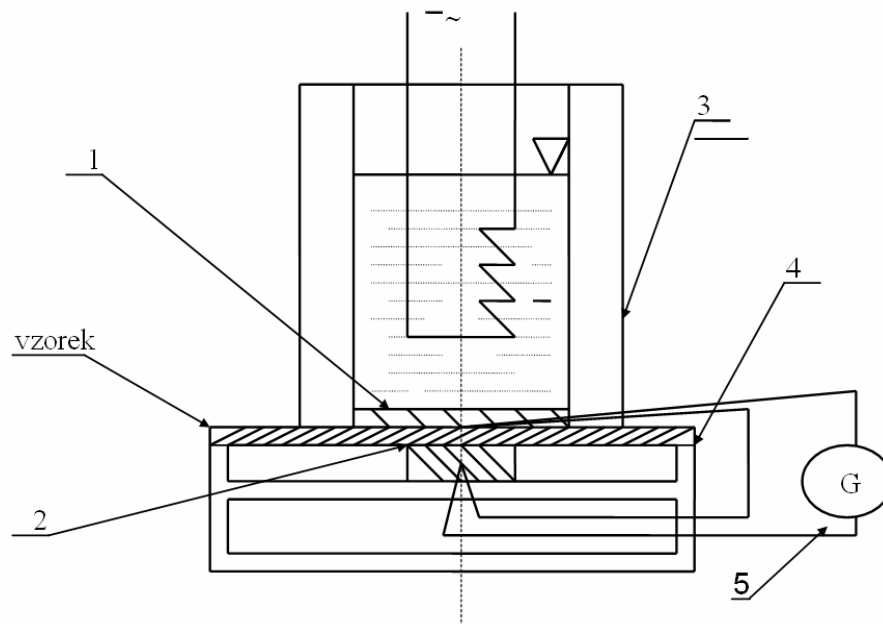
h – průměrná tloušťka zkušebního tělesa (m)

Δt – teplotní spád, rozdíl teplot mezi průměrnými hodnotami teplot horní a dolní desky (K)

k – konstanta přístroje zahrnující přestupy tepla na zkušebních tělesech a tep-
loměrech ($\text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$)

2.2 Nestacionární měření tepelné vodivosti dle Fitche

K měření tepelné vodivosti nestacionární metodou se používá přístroje dle Fitche. Zařízení je zobrazeno na obr. 2. Tohoto přístroje se používá především k měření tepelné vodivosti materiálů.



Obr. 2. Schéma přístroje pro měření tepelné vodivosti dle Fitche

- 1 – měděná deska
- 2 – měděný váleček s rovnými čelními plochami a termočlánky
- 3 – dno horní nádoby
- 4 – krabice
- 5 – galvanometr

Princip měřícího zařízení je následující. Přístroj se skládá v podstatě ze dvou částí, z měděné desky 1 a měděného válečku 2 s rovnými čelními plochami, v nichž jsou zabudovány termočlánky měď-konstantan. Měděná deska tvoří dno horní nádoby 3, v níž se udržuje stálá teplota t_h , např. vroucí vodou. Měděný váleček je izolován v krabici 4. Termočlánky Cu-Ko

jsou zapojeny jako diferenciální a jejich údaj registruje galvanometr 5. Mezi měděnou deskou 1 stálé teploty t_h a váleček 2, jehož teplota t_v se s časem mění, se při měření vkládá vzorek materiálu ve tvaru desky malé tloušťky δ .

Teplu se sdílí vedením do spodního válečku zkoušeným vzorkem, jehož tepelná vodivost je λ . Teplota t_v spodního válečku je na počátku našeho měření rovna teplotě okolí t_0 . Podle Fourierova zákona prochází zkoušeným vzorkem za krátký časový úsek $d\tau$ teplo:

$$dQ_1 = \lambda \frac{S \cdot (t_h - t_v)}{\delta} d\tau \quad (6)$$

kde S je čelní plocha válečku 2 (m^2)

Pokud veškeré teplo dQ_1 prochází beze ztrát do spodního válečku o hmotnosti m a měrném teple c , zvýší se za čas $d\tau$ teplota t_v o hodnotu dt_v . Teplo, akumulované ve spodním válečku, bude tedy:

$$dQ_2 = c m dt_v \quad (7)$$

Pro izolační materiály (přibližně $\lambda < 0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), bude teplo dQ_1 malé, takže za jistou dobu měření τ bude zvýšení teploty válečku ($t_v - t_0$) malé. Potom také prostup tepla do okolí bude zanedbatelný. Pak platí:

$$dQ_1 \cong dQ_2, \quad (8)$$

čili

$$c m dt_v = \lambda \frac{S}{\delta} (t_h - t_v) d\tau \quad (9)$$

Teplotní rozdíl ($t_h - t_v$) měříme pomocí termočlánku, za předpokladu, že napětí na termočlánku je lineární rozdílu teplot. Je-li výchylka n (dílků) přímo úměrná teplotnímu rozdílu ($t_h - t_v$), pak tedy platí $(t_h - t_v) = k'n$, a derivací obdržíme $-dt_v = k'dn$. Dosadíme-li z posledních vztahů do rovnice (9), dostaneme:

$$-cmk'dn = \lambda \frac{S}{\delta} k'nd\tau. \quad (10)$$

Po integraci rovnice (10)

$$-cm \int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = \lambda \frac{S}{\delta} \int_0^\tau d\tau, \quad (11)$$

získáme z rovnice (11) vztah pro námi hledanou tepelnou vodivost v rozmezí teplot $\langle t_h, t_0 \rangle$:

$$\lambda = \frac{c \cdot m}{S} \delta \frac{\ln n_0 - \ln n}{\tau} \quad (12)$$

kde n_0 je výchylka galvanometru v okamžiku $\tau = 0$;

n – výchylka galvanometru v okamžiku τ

Obecně lze konstatovat, že měření tepelné vodivosti nestacionární metodou je vzhledem k metodám stacionárním časově méně náročné a tím se tyto metody stávají více prakticky využitelnými. Přesnost této metody je 5 %. Chyba této metody se zvyšuje s velikostí ztrát, tj. s tepelnou vodivostí vzorku [4].

2.3 Měření tepelné vodivosti metodou Hot-wire-method

Touto metodou lze měřit tepelnou vodivost pevných látek, prášků i kapalin od nízkých teplot do 1800 °C.

Metoda využívá k měření tepelné vodivosti tepelného zdroje ve formě platinového drátu (popř. jiného kovu), který je zapuštěn do vzorku. Tímto drátkem protéká konstantní proud, což způsobuje zvyšování teploty platinového drátu. Tato zvyšující se teplota je zaznamenávána v závislosti na čase v místě tepelného zdroje a v přesně stanovené vzdálenosti od tepelného zdroje.

Příbuznou metodou „krátkého drátku“ je metoda „krátkého teplého drátku“ Short-hot-wire-method. Na rozdíl od ní však využívá jen krátkého teplého drátku (o délce okolo 10 mm a průměru 50 μm) jako sondy díky tomu je potřebné jen malé množství vzorku, čímž odpadá problém s nehomogennitou vzorku. Tato metoda je především vhodná ke stanovení tepelné vodivosti, teplotní vodivosti a měrného tepla homogenních látek a tavenin.

Princip měřicího zařízení je následující. Krátký platinový drátek o délce asi 10 mm je na obou koncích spájený platinovou svorkou. Obě části prochází keramickou destičkou a jsou připojeny na napěťový a proudový vodící drátek. Keramická destička je upevněna tyčí z nerezavějící oceli, která ji umožňuje pohyb směrem nahoru a dolů. Zkumavka o obsahu 100 cm^3 je vytápěna elektrickou pískou, která je z vnější strany pokryta izolačním materiálem. Teploty vnější strany zkumavky jsou měřeny pomocí tří termočlánků, které dávají signál teplotnímu snímači.

Platinový drátek je nejprve žíhán několik hodin při teplotě 800°C, teplotní součinitel elektrického odporu β je určen pomocí kalibrace v plotním rozmezí 20 – 400 °C. Zka-

librovaná sonda je důkladně vyčištěna ultrazvukovým čističem a poté opatrně zasunuta do zkumavky, která byla ještě před začátkem vytápění naplněna malou kuličkou pevného vzorku. Při přechodu roztaveného stavu je uvnitř taveniny rovnoměrně rozmístěno mnoho vzduchových bublinek, které se účinkem vztlakové síly pomalu pohybují nahoru. Asi za tři hodiny všechny bubliny zmizí, roztavený polymer se stává transparentním. Teplota taveniny je konstantní, počáteční teplota taveniny je měřena pomocí teplého drátku [5].

2.4 Měření tepelné vodivosti přístrojem Alambeta

Tento přístroj vyvinutý Hesem a Doležalem měří termofyzikální parametry textilií a to jak stacionární tepelně – izolační vlastnosti (tepelný odpor, tepelná vodivost), tak i vlastnosti dynamické (tepelná jímavost, tepelný tok). Jedná se o poloautomatický počítačem řízený přístroj, který je zároveň s měřením schopen vyhodnocovat statistické hodnoty naměřených údajů a který také obsahuje autodiagnostický program zabraňující chybným operacím přístroje. Celá měřicí procedura, včetně měření tepelné vodivosti λ , tepelného odporu R , tepelného toku q_{\max} , tloušťky vzorku a statistické zpracování výsledků trvá méně než 3 – 5 min. jako objektivní parametr tepelného omaku textilií byla na základě analýzy vybrána tepelná jímavost b ($Ws^{0.5} \cdot m^{-2} \cdot K^1$). U přístroje Alambeta je využito impulsní okrajové podmínky 1. druhu – dané konstantní teplotou kontaktní měřicí plochy $35^\circ C$ odpovídající konstantní teplotě lidské pokožky, která si i po kontaktu s textilií díky průtoku krve tuto teplotu zachová.

Přístroj měří následující parametry:

Tloušťka materiálu h (mm).

Měrná tepelná vodivost λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$). Součinitel měrné tepelné vodivosti λ představuje množství tepla, které proteče jednotkou délky za jednotku času a vytvoří rozdíl teplot 1 K. S rostoucí teplotou teplotní vodivost klesá; hodnota udávaná přístrojem ALAMBETA se musí dělit 10^3 .

Plošný odpor vedení tepla r ($W^{-1} \cdot K \cdot m^2$) = $\frac{h}{\lambda}$; čím nižší je tepelná vodivost, tím

vyšší je tepelný odpor, hodnotu udávanou přístrojem ALAMBETA je nutno dělit 10^3 .

Tepelný tok q ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). Množství tepla šířící se z ruky (hlavice přístroje) o teplotě t_2 do textilie o počáteční teplotě t_1 za jednotku času. Pro krátkou dobu kontaktu přibližně platí:

$$q = b \cdot \frac{t_2 - t_1}{\sqrt{\pi \cdot \tau}} \quad (13)$$

Měrná teplotní vodivost a ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) = $\frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ vyjadřuje schopnost látky vyrovnávat teplotní změny. Čím je hodnota a vyšší, tím látka rychleji vyrovnává teplotu (při nestacionárním procesu).

Součinn ρc ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) = $\frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ zde představuje množství tepla potřebného k ohřátí 1 kg látky o 1 K. S rostoucí teplotou u všech látek měrná tepelná kapacita zvolna roste. Hodnota na displeji přístroje se dělí 10^6 .

Tepelná jímavost b ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-0,5}\cdot\text{K}^{-1}$); parametr zavedený Hesem v r. 1986, který charakterizuje tepelný omak a představuje množství tepla, které proteče při rozdílu teplot 1 K jednotkou plochy za jednotku času v důsledku akumulace tepla v jednotkovém objemu. Platí:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad (14)$$

Jako chladnější pocítujeme hmatem ten materiál, který má větší tepelnou jímavost (větší b). Význam tohoto parametru (již dříve jiným způsobem užívaného stavebního inženýrství) je vysvětlen v následujícím odstavci.

Za předpokladu, že doba tepelného kontaktu τ mezi lidskou pokožkou a textilií je krátká, byl naměřený plošný materiál idealizován na homogenní polomasiv o určité tepelné kapacitě ρc ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$) a počáteční teplotě t_2 . nestacionární teplotní pole mezi lidskou pokožkou (charakterizované konstantní teplotou t_1) a textilií je pak popsáno následující parciální diferenciální rovnicí:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T \quad (15)$$

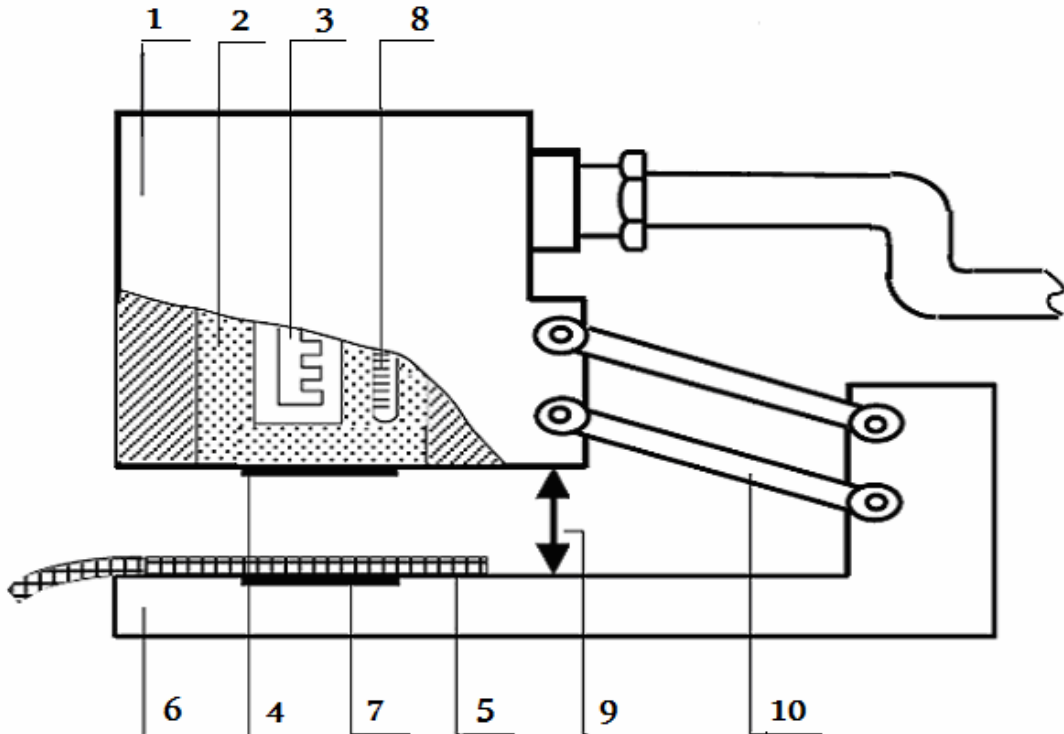
Jejím vyřešením pro příslušné okrajové podmínky a derivaci podle souřadnice vznikne následující vztah pro výpočet tepelného toku q procházejícího mezi pokožkou a textilním materiálem:

$$q_{dyn} = b \cdot (t_1 - t_2) / (\pi \cdot \tau)^{1/2} \quad (16)$$

Z toho vyplývá tepelná jímavost je pak dána již uvedeným vztahem

$$b = (\lambda \cdot \rho \cdot c) \quad (17)$$

Jak je patrné, úroveň tepelné jímavosti nezávisí ani na teplotním gradientu mezi textilií a pokožkou, ani na čase měření. Reálný kontaktní tlak je nastavitelný.



Obr. 3. Schéma pro měření tepelné vodivosti přístrojem Alambeta

- 1 – tepelně izolační kryt
- 2 – kovový blok
- 3 – topné těleso
- 4 – snímač tepelného toku
- 5 – vzorek textilie
- 6 – základna přístroje
- 7 – snímač tepelného toku
- 8 - teploměr
- 9 – směr pohybu měřicí hlavice
- 10 – paralelní vedení

Zjednodušené schéma přístroje je znázorněno na obr. 3. Princip první verze tohoto přístroje spočívá v aplikaci systému na přímé měření tepelného toku 4 připevněného k povrchu kovového bloku 2 s konstantní teplotou, která se liší od teploty vzorku. Po zahájení měření měřicí hlavice 1 se zmiňovaným měřicím systémem poklesne a dotkne se povrchu měřeného vzorku 5, který je umístěn na základně přístroje 6 pod měřicí hlavou. V tomto okamžiku se povrchová teplota vzorku náhle změní a počítač začne zaznamenávat průběh tepelného toku. Současně fotoelektrický senzor měří tloušťku vzorku. Všechna data jsou zpracována podle původního programu, který zahrnuje matematický model charakterizující nestacionární pole v tenké desce vystavené různým okrajovým podmínkám [6].

2.5 Teplotní vodivost

Polymerní materiály jsou dobrými tepelnými izolátory. Stanovení teplotní vodivosti slouží k jejich porovnání a ke správné volbě jejich aplikací. Součinitel teplotní vodivosti je schopnost materiálu vyrovnat teplotní rozdíly. Udává, jak rychle se vyrovná teplotní rozdíl na dvou protilehlých stěnách krychle o hraně 1 cm. Je definován poměrem tepelné vodivosti k měrnému teplu vztaženému na jednotku objemu [3]. Platí vztah (3).

Teplotní vodivost se zjistí buď uvedeným výpočtem ze součinitele tepelné vodivosti λ , měrného tepla c_p a hustoty ρ měřené látky nebo měřením na přístroji Pykově-Stahlanově podle ČSN 64 0142. Podstatou této metody je zjištění doby, za kterou se projeví určitá teplota (50 °C) na horní ploše zkušební destičky, položené na hladinu rtuťové lázně 100 °C. zkušební tělesa mají průměr 50 mm a tloušťku 7 – 10 mm, jejich stěny jsou

rovnoběžné a hladké. Měření teploty krystalem difenylaminu, jehož bod tání je 52,8 °C, se může nahradit termočlánkem přitlačeným k ploše destičky kouskem pěnového polystyrénu. Destička opatřená termočlánkem se položí na hladinu rtuti vyhřáté na 100 °C a zjistí se čas, za který teplota odvrácené plochy zkušebního tělesa dostoupí 50 °C. Teplotní vodivost se vypočítá podle vztahu [7]:

$$a = C \cdot \frac{\delta}{\tau} \quad (18)$$

kde C je konstanta přístroje

δ – tloušťka destičky (m)

τ – čas (s)

Teplotní vodivost se stanoví nejméně pětkrát a vypočte se průměr, který je střední teplotní vodivostí zkoušené látky v rozmezí teploty 20 až 200 °C.

Součinitel teplotní vodivosti podle novější metody se stanovuje metodou a – kalorimetru v regulárním režimu 1. druhu. Zkušební těleso vytemperované na určitou teplotu se přemístí do temperační lázně jiné teploty (měrné temperační lázně) a vyhodnocuje se průběh změny teploty středu zkušebního tělesa. Po dosažení poloviny celkové změny teploty je možné považovat logaritmus rozdílů teploty okamžité a ustálené na konci pokusu za lineární funkci času – toto stadium označujeme za regulární režim 1. druhu [3].

Pro provedení zkoušky je nutné určité přístrojové vybavení, jsou to dva kapalinové termostaty, diferenciální termočlánek, liniový zapisovač, posuvné měřítko, mikrometr. Zkušební tělesa mohou být ve tvaru válce průměru minimálně 10 mm a délky minimálně 40 mm nebo pravoúhlého hranolu o stranách základny minimálně 10 mm. Zkušební tělesa z plastu se vyrobí frézováním nebo soustružením. V nejdelší ose zkušebního tělesa se zhotoví otvor o průměru použitého termočlátku, sahající do středu zkušebního tělesa.

Postup zkoušky je, že se těleso včetně termočlátku vloží do termostatu pro vytemperování do ustálené teploty, pak se co nejrychleji přeneso do měrné temperační lázně, současně se zapne registrace spuštěním posuvu registračního papíru zapisovače.

Hodnota výchylky zapisovače se udává v libovolných jednotkách. Ze záznamu se odečte hodnota x_0 , odpovídající ustálenému tvaru na konci pokusu a také hodnoty x_t příslušejícím časům τ . T těchto hodnot se stanoví regresní analýzou směrnice b (s^{-1}) přímkové závislosti dané vztahem:

$$\log(x_t - x_0) \cdot u + b \cdot \tau . \quad (19)$$

Teplotní vodivost se stanoví ze směrnice a konstanty K_2 závislé na tvaru a rozměrech zkušebního tělesa.

$$a = K_2 \cdot b . \quad (20)$$

Měření touto metodou se provádí za předpokladu, že součinitel teplotní vodivosti hodnoceného materiálu je ve zvoleném rozsahu teplot konstantní. Měření touto metodou nelze využívat při velkých odchylkách od tohoto předpokladu.

3 MATEMATICKÉ MODELY MĚŘENÍ A ZPŮSOBY VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍCH DAT

3.1 Matematický model měření tepelné vodivosti dle Fitche

Pro odvození matematického modelu popisující závislost teploty měřicího válečku na čase vycházíme z následující bilance tepla:

$$-K \frac{dt}{d\tau} = \frac{S\lambda(t-t_1)}{\delta} + B \cdot (t-t_1) \quad 0 < \tau < \infty \quad (21)$$

kde K je tepelná kapacita měřicího válečku ($J \cdot K^{-1}$)

S - plocha vzorku (m^2)

λ - tepelná vodivost ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

t - snímaná teplota měřicího válečku ($^{\circ}C$)

t_1 - teplota temperační desky 1 ($^{\circ}C$)

t_2 - počáteční teplota měřicího válečku ($^{\circ}C$)

δ tloušťka vzorku (m)

B koeficient tepelných ztrát ($J \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$)

τ čas (s)

pro B platí:

$$B = \alpha \cdot S_z \quad (22)$$

kde α je koeficient přestupu tepla ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

S_z plocha, na niž dochází ke ztrátám (m^2)

Pravá strana rovnice (21) představuje tok přes hmotu vzorku bloku 1 do měřicího válečku. Zde jsou započítány i ztráty vzniklé přirozeným prouděním vzduchu kolem měřicího přístroje.

Levá strana rovnice (21) představuje akumulaci tepla v měřicím válečku.

Řešením rovnice (21) dostaneme:

$$t = t_1 - (t_1 - t_2) \cdot \exp(-(A_1 + A_2) \cdot \tau) \quad (23)$$

kde pro A_1 a A_2 platí vztahy:

$$A_1 = \frac{S\lambda}{\delta K} \quad (24)$$

$$A_2 = \frac{B}{K} \quad (25)$$

$$A_3 = A_1 + A_2 \quad (26)$$

kde parametr A_2 vyjadřuje ztráty okolí.

Vyhodnocení se provádí podle matematického modelu:

$$t = a_1 + a_2 \cdot \exp(a_3 \cdot \tau) \quad (27)$$

parametry a_1 , a_2 a a_3 se vyhodnocují nelineární regresí. Tepelná vodivost se pak získá podle plochy a tloušťky vzorku z parametru a_3 .

3.1.1 Nelineární regresní modely

V praxi se pomocí nelineárních regresních modelů řeší celá škála přírodovědných a technických úloh. Mezi základní patří:

1. Konstrukce kalibračních modelů, jsou-li hodnoty y nelineární odezvou měřicího přístroje na změnu měřené fyzikální veličiny deterministické (nastavitelné) proměnné x .
2. Ověření teoretických modelů popisujících základní fyzikálně-chemické zákonitosti, stechiometrii, koncentraci a rovnovážné konstanty, resp. kinetické děje.
3. Tvorba empirických modelů, založená na hledání nelineární závislosti mezi vysvětlovanou proměnnou a vysvětlujícími proměnnými x .

Podle typu úlohy se volí přístup k procesu vytváření regresního modelu $f(x, \beta)$. Ten je funkcí vektoru nastavovaných (deterministických, kontrolovatelných, vysvětlujících) proměnných x a vektoru parametrů β . Měřená veličina y představuje vysvětlovanou proměnnou (odezvu, pozorování) na zvolenou kombinaci nastavovaných veličin x_i .

Vlastní regresní úloha se formuluje s ohledem na regresní triplet:

1. zadaná data
2. navržený model
3. kritérium regrese

Jde vlastně o hledání modelu $f(x, \beta)$ na základě dat $\{x_i, y_i\}$, $i = 1, \dots, n$, a zvoleného kritéria regrese.

V řadě případů je model $f(x, \beta)$ znám a regresní úloha je zjednodušena na konstrukci odhadů A parametrů β . Na rozdíl od lineárních regresních modelů mají parametry β v nelineárních regresních modelech většinou rozhodující roli. Zatímco v případě lineárních modelů nemívají regresní parametry fyzikální smysl a jsou pouhými numerickými koeficienty, mají parametry v nelineárních modelech často přesný fyzikální význam. Jejich číselné hodnoty jsou většinou hlavním cílem regresní analýzy. Příkladem jsou rovnovážné konstanty reakčních produktů nebo rychlostní konstanty u kinetických modelů, či neznámé koncentrace u titračních křivek, atd. Na druhé straně je třeba při interpretaci odhadů modelových parametrů brát v úvahu, že jde o náhodné veličiny, které mají svůj rozptyl [8].

3.1.2 Statická analýza nelineární regrese

Jelikož naměřená data se vyhodnocují pomocí nelineární regrese, bude další komentář zaměřen právě na způsob hodnocení navrženého nelineárního modelu.

Statistická analýza regrese závisí na použitém modelu měření, modelu chyb a souvisí také s užitým kritériem regrese. Omezíme se na metodu maximální věrohodnosti, kdy jsou hledány odhady A . Při konstrukci intervalů a oblastí spolehlivosti parametrů β , nebo při testování hypotéz se nejčastěji užívá metoda linearizace, která vychází z odhadu rozptylu $D(A)$. Pro případ aditivních a normálně rozdělených chyb bude platit:

$$D(A) = s^2 (J^T J)^{-1} \quad (28)$$

Což je asymptotická kovariační matice odhadů A , získaných metodou nejmenších čtverců. Tomu odpovídá linearizace regresního modelu. Užívá se zde stejných vztahů jako u lineární regrese, místo matice X se však dosazuje matice J .

Při znalosti kovariační matice $D(A)$ lze určit jak rozptyly jednotlivých odhadů $D(A_j)$, tak i korelační koeficienty r_{ij} mezi odhady A_i a A_j . Na základě (28) lze psát:

$$D(A_j) = s^2 V_{jj} \quad (29)$$

kde V_{ij} jsou diagonální prvky matice $V=(J^T J)^{-1}$. Podobně lze korelační koeficient r_{ij} vyčíslit ze vztahu:

$$r_{ij} = \frac{V_{ij}}{\sqrt{V_{jj} \cdot V_{ii}}} \quad (30)$$

Pokud se r_{ij} blíží k jedné, jsou odhady A_i, A_j lineárně závislé a model je přeurčený nebo špatně podmíněný. Pro reálná experimentální data jsou odhady A spolu s dalšími statistickými parametry vychýlené a stupeň vychýlení ovlivňuje statistickou analýzu.

4 MĚŘENÍ VODIVOSTI PLASTŮ, TAVENIN PLASTŮ, LEHČENÝCH HMOT A KOMPOZITŮ S PLASTOVOU MATRICÍ

4.1 Kompozity

Kompozitem je každý materiálový systém, který je složen z více (nejméně dvou) složek, z nichž alespoň jedna je pevná, s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi složkami, a který dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy kteroukoliv složkou samostatně ani prostou sumací [9].

Většina doposud vyvinutých kompozitních materiálů je vyráběna pro zlepšení mechanických vlastností, jako je pevnost, tažnost, tuhost a tepelná odolnost. Je tedy přirozené, že se společně studují kompozity, které mají společný mechanismus pevnostního chování. Tento mechanismus silně závisí na geometrii vyztužení. Proto je rozdělit kompozity na základě geometrie částic plniva (výztuže). V podstatě rozlišujeme tři druhy plniv – částicové, vláknové a útržkové plnivo. Vláknová plniva můžeme ještě rozdělit na krátké a dlouhé vlákna.

Částice používané na vyztužení mohou být kulové, kostkové, čtyřstěnné, destičkové, anebo pravidelného nebo nepravidelného tvaru, ale jsou přibližně rovnoosé. Vlákna jsou charakterizovaná délkou, která je mnoho větší v porovnání s rozměry průřezu.

Dále můžeme plniva rozdělit podle chemické podstaty na:

- anorganická (sklo, sádra, uhličitán vápenatý, oxid křemičitý, azbest)
- organická (aramidy, celulóza, dřevěné piliny apod.)

I když plasty obsahují z cenového hlediska plniva a malé množství příměsí a jsou tedy složeným materiálem, nesmí být považované za kompozity, pokud jejich fyzikální vlastnosti nejsou podstatně ovlivněny těmito příměsemi. Z hlediska polymerních materiálů považujeme za kompozity skoro všechny plněné plasty. Za zvláštní případ kompozitu můžeme považovat odlehčené plasty, které se používají hlavně pro svoje tepelně izolační vlastnosti a nízkou hustotu [10].

Zvláštní místo mezi kompozitními materiály zaujímají plasty vyztužené vlákny. Do viskózní nebo křehké matrice jsou vloženy vysokomodulové a vysokopevnostní vlákna, která z velké části určují tuhost a pevnost kompozitu [9].

Nemalou měrou se na výsledných vlastnostech kompozitu podílí i matrice (pojivo), což je polymerní materiál, kterým se impregnuje výztuž. Matrice rozvádí mechanické namáhání

rovnoměrně na všechna vlákna výztuže a chrání je před mechanickým nebo chemickým poškozením, tj. dodává kompozitu odolnost proti chemickým, povětrnostním a jiným vlivům. Vzhledem k náročnosti výroby a tedy i vyšší finanční náročnosti, se kompozity vyrábějí „na míru“, to znamená s ohledem na účel, ke kterému byly vyrobeny. Rozhoduje jiné složení vláken i matrice, druh vláken, výrobní postup, zdali bude kompozit namáhaný staticky nebo dynamicky, za nižší nebo vyšší teploty, v suchém nebo vlhkém prostředí apod. Ve všech případech je potřebné určit obě součásti kompozitu [9].

Podobně jako existuje velké množství vyztužovacích vláken a částic, existují také různé typy matric, které je možné v kompozitech použít. V podstatě existují tyto typy matric:

- kovové matrice
- keramické matrice
- skleněné matrice
- silikátové matrice
- polymerní matrice - termoplastové matrice
- reaktoplastové matrice

Po návrhu určitého kompozitu, teda po zvolení vodných složek a stanovení jeho mnohofunkčních úloh, zůstává nejdůležitější krok a to samotná výroba kompozitu [9].

Kompozitní materiály je někdy problematické vyrobit. Problém spočívá v tom, že složky jsou nepodobné, a teda nekompatibilní jedna s druhou, a dále v způsobu, jak zajistit, aby v jediné struktuře byly na jedné straně zachované vlastnosti složek, a na druhé straně působily společně jako celek při jakémkoliv namáhání.

Je mylné předpokládat, že příprava dobrého kompozitu nevyžaduje víc než dobré smíchání obou složek. Naopak je potřebné řešit zároveň velké množství problémů (např. aby zůstaly původní vlastnosti složek, aby byly využívány jejich výhody a potlačené nedostatky atd.). Vedle smíchání je proto potřebné zajistit velmi pevné a přesné spojení mezi složkami. Aby došlo k pevnému kontaktu obou složek, musí mít matrice, kromě jiných vlastností, smáčecí schopnost. Matrice, která je v přímém kontaktu s okolím (často s velmi agresivním prostředím), musí tomuto okolí odolávat. Matrice musí mít také schopnost lehce se deformovat pod působícím zatížením, spojovat, a také oddělovat jednotlivé částice plniva, ale především musí působit k omezování tvorby trhlin [9].

Efektivní tepelná vodivost:

Polymery mnohdy obsahují plniva a aditiva. Ty jsou přidány pro zlepšení fyzikálních vlastností. Plniva jsou vlákna nebo částice jednotně distribuované v polymerní matici materiálu. Charakteristiky vláknitých kompozitních materiálů jsou silně závislé na vlastnostech vláken:

- na mikrostrukturních parametrech
- poloměru vláken
- distribuci délky vláken
- objemové frakci vláken
- uspořádání vláken.

Termofyzikální vlastnosti kompozitů plněných vlákny jsou anizotropní, kromě kompozitů s velmi krátkými vlákny a náhodně distribuovanými, přitom termofyzikální vlastnosti kompozitů plněných částicemi jsou izotropní. V případě, že vlákna nejsou orientována, jsou polymery dobrými tepelnými izolátory.

Tepelná vodivost těchto polymerů je $0,14 - 0,60 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. O několik řádů vyšší tepelnou vodivost než matrice kompozitu mají jejich výztuže. Důležitá vlastnost výztuží je zvýšení přenosu tepla. Nelze také zapomenout na zlepšení tepelných vlastností.

Stanovení efektivních parametrů kompozitních materiálů je významné pro další využití. Existuje mnoho teoretických metod, které zjišťují efektivní teplotní vodivost kompozitu. Každá metoda je jiná a je aplikovatelná pro různé případy a rozsahy hodnot. Je nutné mít uvedena experimentální data pro všechny typy kompozitních materiálů.

Plněné kompozity jsou nezbytné pro elektronické systémy. Snadno se vyrábí. Jsou lehké, mají dobré fyzikální vlastnosti a dají se lehce upravovat [11].

Matematické modely slouží k teoretickému odhadu tepelné vodivosti. Vychází se z vlastností jednotlivých složek kompozitních materiálů. Nejjednoduššími modely jsou sériový a paralelní, podle toho, jestli jsou komponenty uspořádány v plochách sériově nebo paralelně k teplotnímu toku.

Model paralelního zapojení odporu

Tento model vychází ze souvislosti mezi sdílením tepla vedením a vedením elektrického proudu. Z této souvislosti vyplývá vztah určený pro výpočet odhadu tepelné vodivosti kompozitu λ_c z objemových zlomků výztuže v_1 a matrice v_2 , tepelné vodivosti výztuže λ_1 a tepelné vodivosti matrice λ_2 [12]:

$$\lambda_c = \lambda_1 \cdot v_1 + \lambda_2 \cdot v_2 \quad (31)$$

Tento model paralelního zapojení odporu teoreticky odpovídá vodivosti kompozitu při sdílení tepla podél vláken, poněvadž toto geometrické uspořádání odpovídá teoretickému odvození tohoto modelu [13].

Model sériového zapojení odporu

Model je analogický se sériovým zapojením elektrických odporů. Z toho vyplývá vztah vhodný pro výpočet odhadu tepelné vodivosti kompozitu λ_c z objemových zlomků výztuže v_1 a matrice v_2 , tepelné vodivosti výztuže λ_1 a tepelné vodivosti matrice λ_2 [12]:

$$\lambda_c = \left(\frac{v_1 + v_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \right)^{-1} \quad (32)$$

Tento model sériového zapojení odporu odpovídá měření kompozitů kolmo na vlákna jen s tou odchylkou, že složky kompozitů nemají rovinný tvar kolmý na směr sdílení tepla a navíc matrice je v kompozitu kontinuálně spojena [13].

ZÁVĚR

Práce se zabývá způsoby měření tepelné vodivosti polymerních materiálů. Jsou popsány metody měření a způsoby vyhodnocení experimentálních dat. Jedna část práce je věnována také měření vodivosti kompozitních materiálů s plastovou maticí.

Polymerní materiály mají relativně nízkou tepelnou vodivost, která se pohybuje v rozmezí $0,14 - 0,20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a u kompozitních materiálů s plastovou maticí až několikrát vyšší podle druhů použité výztuže. Těmto hodnotám tepelné vodivosti odpovídají způsoby měření tepelné vodivosti popsané v kapitole 2.

Podrobně je popsán způsob měření a vyhodnocení experimentálních dat tepelné vodivosti dle Fitcha. Popsaný způsob dobře charakterizuje problémy vzniklé ze souvislosti vlastního měření a vyhodnocení experimentálních dat. V této části práce je kladen důraz na souvislost mezi způsobem měření získaných experimentálních dat a vyhodnocením měření již celý experiment je popsán matematicko-fyzikálním modelem vycházejícím ze základních zákonů sdílení tepla.

Popis sdílení tepla v kompozitních materiálech vychází obvykle s představy, že se jedná o homogenní materiál a tepelná a teplotní vodivost je popsána takzvanými efektivními hodnotami. Odhad tepelné vodivosti kompozitů se provádí podle složení kompozitů, tedy zastoupení polymerní matrice a výztuže a vodivosti těchto složek. V práci jsou uvedeny mezní teoretické hodnoty tepelné vodivosti kompozitů podle analogie vedení tepla a elektrického proudu tzv. sériového a paralelního zapojení.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NEUŽIL, L., MÍKA, V.: *Chemické inženýrství I B*. Ediční středisko VŠCHT, Praha 1992.
- [2] NEUŽIL, L., MÍKA, V.: *Chemicko inženýrské výpočty I, II*. Ediční centrum VŠCHT, Praha 1996.
- [3] SCHÖTZ, M., VONDRÁČEK, P.: *Zkoušení polymerů*. VŠCHT Praha, SNTL Praha 1979.
- [4] KVĚTOŇ, K.: *Strojírnoství*. 10, 1966, str. 777.
- [5] DLABAJOVÁ, S.: *Měření teplotní a tepelné vodivosti plastů a pryží*. [Bakalářská práce], Fakulta technologická, UTB Zlín, 2004.
- [6] HES, L., SLUKA, P.: *Úvod do komfortu textilií*. Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 80-7083-926-0.
- [7] RYBNÍKÁŘ, F.: *Analýza a zkoušení plastických hmot*. SNTL, Praha 1965.
- [8] MELOUN, M., MILITKÝ, J.: *Statistické vyhodnocení experimentálních dat*. Plus, Praha 1995.
- [9] BAREŠ, R. A.: *Kompozitní materiály*. SNTL, Praha 1988.
- [10] ŠUBA, O.: *Dimenzování a navrhování výrobků z plastů*. VUT Brno, 1988.
- [11] TAVMAN, I. J.: *Effective thermal conductivity of isotropic polymer composites*. Int. Comm. Heat Mass Transfer, No. 5, 1998.
- [12] MÍKA, V.: *Základy chemického inženýrství*. SNTL, Praha 1981.
- [13] BLAHA, A., MRKVIČKOVÁ, S.: *Tepelná vodivost kompozitů vyráběných pultruzí*. In: XXII Reinforced plastics 2003, Karlovy Vary, 2003.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

a	-	teplotní vodivost ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
b	-	tepelná jímavost ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{0,5} \cdot \text{K}^{-1}$)
B	-	koeficient tepelných ztrát ($\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
C	-	konstanta přístroje
c_p	-	měrné teplo při konstantním tlaku ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
h	-	průměrná tloušťka zkušebního tělesa (m)
k	-	konstanta přístroje zahrnující přestupy tepla na zkušebních tělesech a teplo- měrech ($\text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$)
K	-	tepelná kapacita měřicího válečku ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$)
n	-	výchylka galvanometru v čase τ
n_0	-	výchylka galvanometru v čase $\tau = 0$
N	-	spotřeba elektrické energie (Wh)
q	-	intenzita tepelného toku ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
r	-	plošný odpor vedení tepla ($\text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$)
S	-	plocha (m^2)
t_1	-	teplota temperační desky ($^{\circ}\text{C}$)
t_2	-	počáteční teplota měřicího válečku ($^{\circ}\text{C}$)
T	-	gradient teploty (K)
Δt	-	rozdíl teplot (K)
α	-	koeficient přestupu tepla ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
δ	-	tloušťka (m)
λ	-	tepelná vodivost ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
ρ	-	hustota ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

τ - čas (s)

∇ - diferenciální operátor

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Schéma přístroje pro měření tepelné vodivosti dle Bocka	12
Obr. 2. Schéma přístroje pro měření tepelné vodivosti dle Fitche	15
Obr. 3. Schéma pro měření tepelné vodivosti přístrojem Alambeta.....	20