

## ZÁVISLOST MĚRNÉ TEPELNÉ VODIVOSTI VLÁKNITÝCH ŽÁROVZDORNÝCH MATERIÁLŮ NA TEPLITĚ A OBJEMOVÉ HMOTNOSTI

JAROSLAV KUTZENDÖRFER

Vysoká škola chemicko-technologická, Katedra technologie silikátů, 166 28 Praha 6,  
Suchbátarova 5

Došlo 25. 3. 1983

Na základě představy, že měrná tepelná vodivost vláknitých materiálů se skládá ze složky radiální, přestupu tepla kondukcí v plynné fázi a kondukcí v pevné fázi, je odvozen semiempirický vztah pro závislost měrné tepelné vodivosti na teplotě a objemové hmotnosti ve tvaru:

$$\lambda = k_R \cdot T^3 \cdot \frac{1}{\rho} + \lambda_0 \sqrt{\frac{T}{273} - 1} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right) + \frac{\lambda'_S}{m} \frac{\rho}{\rho_0},$$

kde  $\lambda$  je měrná tepelná vodivost materiálu,  $\lambda'_S$  hutné pevné fáze,  $\lambda_0$  vzduchu při 546 K,  
 $T$  — absolutní teplota,  
 $\rho$  — objemová hmotnost,  
 $\rho_0$  — hustota pevné fáze,  
 $k_R, m$  — konstanty.

Platnost vztahu je ověřena pro publikovaná data v rozsahu objemových hmotností 48—334 kg m<sup>-3</sup> a teplot 315—1095 °C.

### ÚVOD

Vláknité tepelné izolační materiály patří k progresivním materiálům, jejichž význam stále roste. Kromě tepelné stálosti, z níž rezultuje teplota použití, patří k nejdůležitějším vlastnostem tepelné, zvláště měrná tepelná vodivost. Obecně závisí na teplotě, objemové hmotnosti, tloušťce vláken, radiálních vlastnostech povrchu apod. [1].

S teplotou měrná tepelná vodivost poměrně prudce roste, závislost na objemové hmotnosti při konstantní teplotě prochází minimem [2]. Pro matematické vyjádření závislosti na teplotě se zatím používalo tvaru polynomu, pro závislost na objemové hmotnosti nejčastěji nepřímé úměrnosti [3—6]. Těmito vztahy však lze aproximovat pouze oblast nižších objemových hmotností. Nevyplývá z nich např. existence minima v závislosti na objemové hmotnosti apod. Proto je nezbytné pokusit se tyto vztahy zpřesnit.

### ODVOZENÍ ZÁVISLOSTI NA TEPLITĚ A OBJEMOVÉ HMOTNOSTI

Lze předpokládat, že přestup tepla ve vláknitých materiálech probíhá paralelně kondukcí a konvekcí v plynné, kondukcí v pevné fázi a radiací. Lze tedy napsat, že

$$\lambda = \lambda_R + \lambda_G + \lambda_S, \quad (1)$$

kde  $\lambda$  je měrná vodivost materiálu,

$\lambda_R$  — složka radiální,

$\lambda_G$  — složka tvořená přestupem tepla plynnou fází,

$\lambda_S$  — složka tvořená přestupem tepla pevnou fází.

Pro odvození semiempirického vztahu se vychází z představy, že přestup tepla se děje nezávisle plynnou fází, pevnou fází a radiací, přičemž vlákna fungují jako překážky pro přestup tepla radiací.

a) Pro radiální složku měrné tepelné vodivosti vyplývá ze Stefanova—Boltzmannova vztahu:

$$\lambda_R = k_1 \sigma T^n, \quad (2)$$

kde  $T$  je absolutní teplota,

$\sigma$  — radiální konstanta,

$k_1$  — konstanta související se stíněním vlákny,

$n$  — konstanta exponentu,

$k_1$  musí být nepřímo úměrná vyplnění prostoru vlákny, tj. poměru

$$\varrho/\varrho_0, \text{ tedy } k_1 = k \frac{\varrho_0}{\varrho},$$

kde  $\varrho$  — je objemová hmotnost,

$\varrho_0$  — hustota,

$n$  — bývá pro radiaci nejčastěji roven 3 [7],

tj.

$$\lambda_R = k \cdot \sigma \cdot \frac{\varrho_0}{\varrho} \cdot T^3 = \frac{k_R}{\varrho} T^3, \quad (3)$$

kde  $k\sigma\varrho_0 = k_R$  [W kg m<sup>-4</sup> K<sup>-4</sup>].

b) Přestup tepla plynnou fází

Mohou se zde uplatnit dva mechanismy, a to vedením v plynné fázi a prouděním plynné fáze. Pomocí bezrozměrných kritérií lze prokázat, že konvekce se projeví až při větších souvislých tloušťkách než jsou 2 mm vzduchové vrstvy. Protože vzdálenosti mezi vlákny jsou mnohem menší, lze předpokládat, že konvektivní přestup tepla lze zanedbat. Uvažuje se tedy pouze kondukcí. Její závislost na teplotě lze vyjádřit z tabelovaných hodnot pro vzduch výrazem [8]:

$$\lambda_{GV} = 3,688 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_0} - 1} + 5,155 \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

kde  $T_0 = 273$ .

Pro teploty nad 100 °C je prvý člen 4× větší než druhý a s rostoucí teplotou roste. Je tedy možno pro teploty nad 100 °C aditivní člen v prvním přiblížení zanedbat.

Podíl vodivosti  $\lambda_G$  je úměrný faktoru  $\left(1 - \frac{\varrho}{\varrho_0}\right)$ , který vyjadřuje podíl plynné fáze v materiálu. Je tedy:

$$\lambda_G = \left(1 - \frac{\varrho}{\varrho_0}\right) \cdot \lambda_0 \cdot \sqrt{\frac{T}{T_0} - 1}, \quad (5)$$

kde  $\lambda_0 = 3,688 \cdot 10^{-2}$  [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>].

c) Pro příspěvek pevné fáze lze použít vyjádření:

$$\lambda_s = \frac{\lambda'_s(T)}{m} \cdot \frac{\varrho}{\varrho_0} = \frac{\lambda'_s}{m} \cdot \frac{\varrho}{\varrho_0}, \quad (6)$$

$\lambda_s$  vyjadřuje příspěvek vodivosti pevné fáze.  $\lambda'_s(T)$  je vodivost hutné pevné fáze, popř. její závislost na teplotě. V prvním přiblížení je možno ji považovat za teplotně

nezávislou.  $\lambda_s$  bude úměrná podílu pevné fáze v jednotce objemu, tj.  $\rho/\rho_0$ . Vláknata jsou však rozložena všemi směry a zakřivena, což snižuje jejich podíl na tepelné vodivosti. Tento fakt je pak vyjádřen faktorem  $m$ . Shrnutím uvedených třech podílů a dosazením do rovnice (1) se dostane vztah:

$$\lambda = k_R \cdot T^n \cdot \frac{1}{\rho} + \lambda_0 \sqrt{\frac{T}{T_0} - 1} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right) + \frac{\lambda'_s(T)}{m} \cdot \frac{\rho}{\rho_0}. \quad (7)$$

Po dosazení konkrétních hodnot pro vzduch a zavedení určitých zjednodušení lze psát:

$$\lambda = k_R \cdot T^3 \cdot \frac{1}{\rho} + 3,688 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{T}{273} - 1} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right) + \frac{\lambda'_s}{m} \cdot \frac{\rho}{\rho_0}. \quad (8)$$

Vztah (8) je vlastně funkcí teploty  $T$  a objemové hmotnosti vláken  $\rho$ . Hustotu vláken  $\rho_0$  lze stanovit experimentálně, měrnou tepelnou vodivost hutné pevné fáze  $\lambda'_s$  lze pro jednotlivé druhy nalézt v tabulkách nebo extrapolovat ze změřených známých materiálů. Pak ve vztahu (8) se dále vyskytují dvě konstanty  $k_R$  a  $m$ , které bude zřejmě nutno stanovit z experimentálních dat. Konstanta  $k_R$  bude hlavně charakterizovat radiální vlastnosti materiálu, tloušťku vláken, jejich uspořádání apod. Konstanta  $m$  bude záviset především na uspořádání a orientaci vláken vůči tepelnému toku, jejich prohnutí a zkroucení.

Lze očekávat, že vztah (8) by mohl platit obecně pro vláknité materiály, pochopitelně s určitou přesností. Pro odlišné chemické složení bude nezbytné vždy určit hodnoty materiálových konstant  $\lambda'_s$  a  $\rho$ . Obecně se budou měnit konstanty  $k_R$  a  $m$ . Tyto konstanty se však mohou měnit i v rámci téhož chemického složení vláken. Budou záviset na druhu výrobku, který je z vláken připraven. V něm může být různé uspořádání a orientace vláken. Bude tedy záležet, zda jde o volné vlákno, rohož, plst, desku apod.

#### OVĚŘENÍ ODVOZENÉHO VZTAHU

Pro výpočet konstant a verifikaci platnosti vztahu (8) byly použity měrné tepelné vodivosti publikované v prospektech [9] (tab. I) a následující konstanty:

hustota pevné fáze  $\rho_0 = 2600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

měrná tepelná vodivost pevné fáze  $\lambda_s = 2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Dále byly hledány vhodné hodnoty konstant  $k_R$  a  $m$ . V celém rozsahu uvedených hodnot nejlépe vyhovovaly hodnoty:

$$k_R = 10^{-8} [\text{W} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{K}^{-4}],$$

$$m = 10.$$

Z nich pak byly zpětně vypočteny měrné tepelné vodivosti a relativní odchylky od původních publikovaných dat, viz tab. I. Z tabulky vyplývá, že shoda je velmi dobrá. Odchylky ve více než 95 % případů nepřesahují 10 % rel. Nejvíce se odchyluje hodnota pro nízké teploty a vysoké objemové hmotnosti, která je z praktického hlediska málo důležitá. Na hranici tolerance (10 %) jsou též hodnoty pro vysoké teploty a nízké objemové hmotnosti. I zde lze předpokládat, že nebude tato oblast pro praxi využita.

Tabulka I

Vzájemné porovnání měrné tepelné vodivosti publikované  $\lambda_p$  a vypočtené  $\lambda_v$  pro  $k_R = 10^{-8}$ ,  $m = 10$  a  $n = 3$ .

$\rho$ , [kg m <sup>-3</sup> ]		48	64	96	128	160	192	288	384
315 °C	$\lambda_p$	0,09	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06
	$\lambda_v$	0,0900	0,0804	0,0717	0,0683	0,0670	0,0668	0,0690	0,0730
	odchylka % rel.	0	0,5	2,4	-2,4	-4,3	-4,6	-1,4	21,6
425 °C	$\lambda_p$	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08
	$\lambda_v$	0,1248	0,1080	0,0921	0,0851	0,0816	0,0799	0,0795	0,0820
	odchylka % rel.	-4	-1,8	-7,9	-5,5	1,9	-0,1	-0,7	2,5
540 °C	$\lambda_p$	0,17	0,15	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09
	$\lambda_v$	0,1716	0,1445	0,1183	0,1061	0,0995	0,0956	0,0915	0,0921
	odchylka % rel.	0,9	-3,7	-1,4	-3,6	-0,5	-4,4	1,7	2,4
650 °C	$\lambda_p$	0,22	0,19	0,15	0,13	0,12	0,12	0,11	0,10
	$\lambda_v$	0,2285	0,1883	0,1490	0,1303	0,1193	0,1132	0,1046	0,1029
	odchylka % rel.	3,9	-0,9	-0,7	0,2	-0,2	-5,7	-4,9	2,9
760 °C	$\lambda_p$	0,29	0,24	0,19	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12
	$\lambda_v$	0,2989	0,2423	0,1865	0,1594	0,1438	0,1339	0,1197	0,115
	odchylka % rel.	3,1	0,9	-1,8	-0,4	-4,1	-4,3	-7,9	-4,1
870 °C	$\lambda_p$	0,36	0,30	0,23	0,19	0,18	0,16	0,14	0,13
	$\lambda_v$	0,3846	0,3076	0,2314	0,1940	0,1723	0,1583	0,1371	0,1289
	odchylka % rel.	6,8	2,5	0,6	2,1	-4,3	-1,1	-2,0	-0,8
980 °C	$\lambda_p$	0,45	0,36	0,27	0,23	0,20	0,19	0,16	0,15
	$\lambda_v$	0,4887	0,3856	0,2846	0,2349	0,2057	0,1867	0,1572	0,1447
	odchylka % rel.	8,3	7,1	5,4	2,1	2,8	-1,7	-1,7	-3,5
1 095 °C	$\lambda_p$	0,55	0,44	0,34	0,27	0,24	0,22	0,18	0,16
	$\lambda_v$	0,6148	0,4821	0,3502	0,2851	0,2465	0,2213	0,1813	0,1636
	odchylka % rel.	11,8	9,5	6,1	5,6	2,7	0,6	0,7	2,2

## ZÁVĚR

Odvozený semiempirický vztah pro závislost měrné tepelné vodivosti na teplotě a objemové hmotnosti žárovzdorných vláken vychází z předpokladu, že měrná tepelná vodivost se skládá ze tří složek, a to: vedení v pevné fázi, vedení v plynné fázi a radiace. Podíl konduktivních složek závisí na množství příslušné fáze v materiálu a na jejím rozložení, u radiační složky tvoří vlákna překážky pro přestup.

Proti předcházejícím vztahům uvedeným v literatuře [3—6] má odvozený vztah

вѐходу в том, жѐ је мѐрнѐя тепелнѐя водивост функцѐй соѐчаснѐй тепелоты и обѐмовѐй хмоторностѐй а умозѐнѐуе вѐпочѐт оптимѐлнѐй обѐмовѐй хмоторностѐй, тѐ. зѐжѐстѐнѐй хотноты с нежнѐжѐшѐй мѐрнѐюй тепелнѐюй водивостѐй.

Поровнѐнѐнѐй мѐрнѐй тепелнѐй водивостѐй хотнот публиковѐнѐйх а вѐпочѐтенѐйх подлѐ ровнѐце (8) укѐзѐло велмѐй добрѐюй шоду. Вѐце нежѐ 95 % хотнот соухлѐсѐй с прѐсностѐй до  $\pm 10\%$ .

#### Literatura

- [1] Kutzendörfer J.: Sklѐя а керѐмѐк 32, 5 (1982)
- [2] Schupp M.: Wѐrme-Gas international 30, 350 (1981).
- [3] Kutzendörfer J. aj.: Stavivo 60, 278 (1982).
- [4] Каѐ S. M.: *Vysokotemperaturnyje teploizoljacionnyje materialy*. Metalurgija, Moskva 1981.
- [5] Litovskij E. J., Puѐkeleviѐ N. A.: *Teplofiziceskije svojstva ognѐuporov*. Metalurgija, Moskva 1982.
- [6] Dietrichs P. Krѐnert W.: Wѐrme-Gas international 30, 338 (1981).
- [7] Tye E. P.: *Thermal Conductivity*, str. 314. Academic Press, London, New York 1969.
- [8] Raжnѐviѐ K.: *Tepelnѐй tabulky а diagramy*. Alfa, Bratislava 1969.
- [9] Prospekt firmy Didier: *Didier-Hochtemperatur-Isolierung*. Didier-Werke, Wiesbaden 1975.

### ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЛОКНИСТЫХ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОБЪЕМНОГО ВЕСА

Ярослав Купѐндѐрѐр

*кафѐдра технолѐгии силикатѐв,  
Химѐко-технолѐгѐсѐкий институт, 166 28 Прага*

На основѐнѐнѐй предположѐнѐя, жѐто удѐльнѐя тепелпроводнѐстѐй волокнѐистѐйх матерѐялов состоѐит из радиѐционнѐго компонентѐа, тепелперѐдачи кондукцѐй в газѐвой фѐзе и кондукцѐй в тѐрдѐй фѐзе, вѐводитѐя следѐющѐе семѐмпѐричѐсѐкое отношѐнѐе длѐя зависѐмостѐй удѐльнѐй тепелпроводнѐстѐй от температуры и обѐмовнѐго вѐса:

$$\lambda = k_R \cdot T^3 \cdot \frac{1}{\rho} + \lambda_0 \sqrt{\frac{T}{273} - 1} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right) + \frac{\lambda_s}{m} \cdot \frac{\rho}{\rho_0},$$

гдѐ  $\lambda$  — удѐльнѐя тепелпроводнѐстѐй матерѐяла,  
 $\lambda_s$  — удѐльнѐя тепелпроводнѐстѐй плѐтнѐй тѐрдѐй фѐзы,  
 $\lambda_0$  — удѐльнѐя тепелпроводнѐстѐй воздѐухѐ при температурѐ 546 K,  
 $T$  — абсолютнѐя температурѐ,  
 $\rho$  — обѐмовнѐй вѐс,  
 $\rho_0$  — плѐтнѐстѐй тѐрдѐй фѐзы,  
 $k_R, m$  — константы.

Константы  $k_R, m$  явѐлѐются эмѐпѐричѐсѐкими константами, зависѐящими не только от вѐда матерѐяла, но и от его структуры и т. д.

Дѐлѐе сопоставѐялѐи в прѐделах обѐмовнѐйх вѐсов 48—384 кг · м<sup>-3</sup> и температур 315—1 095 °С расчѐтаннѐе велѐчѐны предположѐемѐйх проводимѐстѐй, вѐведеннѐйх из отношѐнѐя, с опубликовѐннѐми велѐчѐнами. Былѐ установлѐно, жѐто вѐше 95 % совѐпадает до  $\pm 10$  относ. %.

## DEPENDENCE OF SPECIFIC THERMAL CONDUCTIVITY OF FIBROUS REFRACTORY MATERIALS ON TEMPERATURE AND APPARENT DENSITY

Jaroslav Kutzendörfer

*Institute of Chemical Technology, Department of the Technology of Silicates, 166 28 Prague*

On the basis of the conception that specific thermal conductivity of fibrous material consists of a radiation component, heat transfer by conduction in gaseous phase and conduction in solid phase, the following semiempirical equation has been derived for the dependence of specific thermal conductivity on temperature and apparent density:

$$\lambda = k_R T^3 \frac{1}{\rho} + \lambda_0 \sqrt{\frac{T}{273} - 1} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right) + \frac{\lambda'_s}{m} \frac{\rho}{\rho_0}$$

where  $\lambda$  — the specific thermal conductivity of the material,  
 $\lambda'_s$  — the specific thermal conductivity of the dense solid phase,  
 $\lambda_0$  — the specific thermal conductivity of air at 546 K,  
 $T$  — absolute temperature,  
 $\rho$  — apparent density,  
 $\rho_0$  — the density of the solid phase,  
 $k_R, m$  are constants.

The  $k_R$  and  $m$  are empirical constants depending not only on the type of the material, but also on its structure, etc.

Within the range of apparent densities from 48 to 384 kg m<sup>-3</sup> and temperatures from 315 °C to 1095 °C, the values of possible thermal conductivities calculated from the equation derived were compared with published values. More than 95 % of the values showed an agreement within  $\pm 10$  % rel.

CALCIUM ALUMINATES. Seminario Internazionale Torino, Italia 1982. Ed.: M. Murat, A. Bachiurrini, B. Guilhot, A. Negro, M. Regourd, M. Soustelle.

Ve dnech 14. až 16. září 1982 se konal v Turinu za předsednictví prof. Negra mezinárodní seminář o kalciumaluminátech, na němž byly předneseny příspěvky týkající se těchto témat: I. téma: Syntéza, fázové diagramy, struktura a charakterizace:

Na toto téma bylo předneseno celkem pět příspěvků. A. Mathieu (Reaktivita aluminiumoxidu a získaných kalciumaluminátů) zdůraznil význam výchozích složek na vznik kalciumaluminátů a důležitou roli C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>, který katalyzuje hydratační reakce hlinitanových cementů. F. P. Sorentino a F. P. Glasser (Fázové složení vysokohlinitanových cementů) se zabývali skutečným a vypočteným obsahem fází, které podle jejich postupu ukázalo dobrý souhlas. M. Regourd (Krystalová struktura a charakterizace C<sub>3</sub>A — Nové poznatky) studovala strukturu C<sub>3</sub>A a jeho tuhých roztoků s Na, Si, Fe na monokrystalech. U tuhých roztoků Ca<sub>0-2</sub>Na<sub>x</sub>Al<sub>6</sub>O<sub>18</sub> zjistila čtyři krystalové formy (C<sub>1a</sub> C<sub>11</sub>, O, M), takže v portlandském cementu se může vyskytovat C<sub>3</sub>A jako kubický, ortorombický a monoklinický, jejichž stabilita je dána přítomností alkálií. M. Murat (Teplotná stabilita kalciumaluminiumhydrátů a příbuzných fází. Jejich charakteristika DTA) uvádí různé výsledky cizí i svoje a rozebírá vliv krystalové struktury, podmínek hydratace a vliv tlaku vodní páry na tepelnou stabilitu. J. Bensted (Infračervená spektrometrie kalciumaluminiumhydrátů a sulfoaluminátů vyskytujících se v hydratovaném portlandském cementu) srovnával synteticky připravené produkty s těmi z portlandského cementu a zjistil horší krystaličnost vlivem nečistot u hydratačních produktů v portlandském cementu. B. Guilhot a M. Soustelle (Kinetika hydratace monokalciumaluminátů) použili ke studiu kinetiky kalorimetrii a konduktometrii. Maximum reakce bylo dosaženo při 17 °C, minimum při 27 °C. Při nižších teplotách vzniká CAH<sub>10</sub>, při vyšších C<sub>3</sub>AH<sub>5</sub>. O ostatních tématech bude ještě referováno.

Lach