

# ZÁVISLOST MĚRNÉ TEPELNÉ VODIVOSTI OHNIVZDORNÉHO PLYNOBETONU SILTONTHERM NA OBJEMOVÉ HMOTNOSTI A VELIKOSTI PÓRŮ

ERNST SCHLEGEL, REINHARDT BOLDT

*Bergakademie Freiberg, Sektion Verfahrenstechnik und Silikatechnik  
Agricolastr. 17, 9200 Freiberg, NDR*

Došlo 7. 5. 1986

*Byla proměřena tepelná vodivost 20 ohnivzdorných plynosilikátových vzorků SILTONTHERM na bázi kalciumsilikátů objemové hmotnosti 0,28—0,72 g/cm<sup>3</sup> do teploty 900 °C. Při všech teplotách byla zjištěna lineární závislost mezi měrnou tepelnou vodivostí a objemovou hmotností. Tepelná vodivost se dá popsat známými modely pro tepelný transport v porézních materiálech a vypočítat ze strukturálních dat. Též je možné stanovit pomocí modelů vliv velikosti pórů zvláště při vyšších teplotách a vypočítat měrnou tepelnou vodivost ze znalosti radičních vlastností tepelně izolačních materiálů.*

## ÚVOD

Ohnivzdorné plynobetonu jsou vyráběny v NDR již pět roků jako makroporézní kalciumsilikátové tepelně izolační materiály pod obchodním označením SILTONTHERM. Jsou používány do vysokoteplotních agregátů až do teplot 900 °C. Jejich vlastnosti jsou uvedeny v normě TGL 33 523/02.

V některých člancích byly uvedeny tepelné vlastnosti a změny, ke kterým dochází při ohřevu SILTONTHERMU [1, 2, 3]. Publikovány byly také praktické zkušenosti při použití těchto výrobků [4]. V této publikaci jsou uvedeny další výsledky, které byly naměřeny na vzorcích SILTONTHERMU, odebraných ve 3 výrobních závodech v letech 1981 až 1985. Důraz je kladen na zjištění vlivu objemové hmotnosti, resp. pórovitosti na měrnou tepelnou vodivost.

## LITERÁRNÍ ČÁST

O závislosti měrné tepelné vodivosti  $\lambda$  porézních stavebních a jiných materiálů na strukturálních a texturních vlastnostech, obzvláště na pórovitosti a velikosti pórů, existuje mnoho naměřených hodnot a teoretických úvah. Již v roce 1925 shrnul o tomto dostupné informace Cammerer [5]. Teoretické zevšeobecnění s cílem vypočítat měrnou tepelnou vodivost provedl poprvé Boeck [6] a Raisch [7]. Rozsáhlá měření provedli Fritz-Schmidt a Gehlhoff. [8]. V disertaci a podrobné publikaci se zabýval Esser [9] vlivem pórovitosti a velikosti pórů na transport tepla zářením a vedením tepla v šamotu a dinasu.

Od této doby bylo vypracováno mnoho modelů pro transport tepla v pórovitých látkách a získány další hodnoty, např. v poslední době pro závislost měrné tepelné vodivosti šamotu na objemové hmotnosti Schullem a Kutzendörferem [10].

V literatuře existuje více rozdílných modelů pro popis měrné tepelné vodivosti heterogenních těles. Liší se hlavně v druhu a způsobu spojení tepelných odporů a částečně v tom, jak jsou vzaty v úvahu jednotlivé druhy transportu tepla. V tab. I je uveden přehled nejdůležitějších modelů. Nejsou vzaty v úvahu nové

Tabulka 1

Modelové rovnice pro výpočet měrné tepelné vodivosti heterogenních těles

Autor	Modelová rovnice
Loeb [15]	$\lambda = \lambda_s(1 - P_s) + \frac{P_c}{\frac{1 - P_1 + P_1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_r}}$ $s \lambda_r = 4\gamma\sigma d \varepsilon T^3$
Eucken [16]	$\lambda = \lambda_s \frac{1 + 2P \frac{1 - \lambda_s/\lambda_p}{2\lambda_s/\lambda_p + 1}}{1 - P \frac{1 - \lambda_s/\lambda_p}{2\lambda_s/\lambda_p + 1}}$
Eucken [16] zjednodušeno	$\lambda = \lambda_s \frac{1 - P}{1 + 0,5P}$
Russel [17]	$\lambda = \lambda_s \frac{P^{2/3} + \frac{\lambda_s}{\lambda_p} (1 - P^{2/3})}{P^{2/3} - P + \frac{\lambda_s}{\lambda_p} (1 - P^{2/3} + P)}$
Ribaud [18]	$\lambda = \lambda_p P^{1/3} + \lambda_s (1 - P^{1/3})$
Traustel aj. [19]	$\frac{\lambda}{\lambda_s} = 1 - \left(1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_s}\right) \cdot P \left[1 + 0,35 \left(1 - 1,08 \frac{\lambda_p}{\lambda_s}\right) (1 - P)\right]$
Roussey [20]	$\lambda = \frac{\lambda_s}{K} (1 - P) + \lambda_g + \lambda_r$
Torkar [21]	$\lambda = \frac{[(1 - P) \lambda_s + P \lambda_p] \cdot K \lambda_s + \lambda_s \lambda_p}{P \lambda_s + (1 - P) \lambda_p + K \lambda_s}$

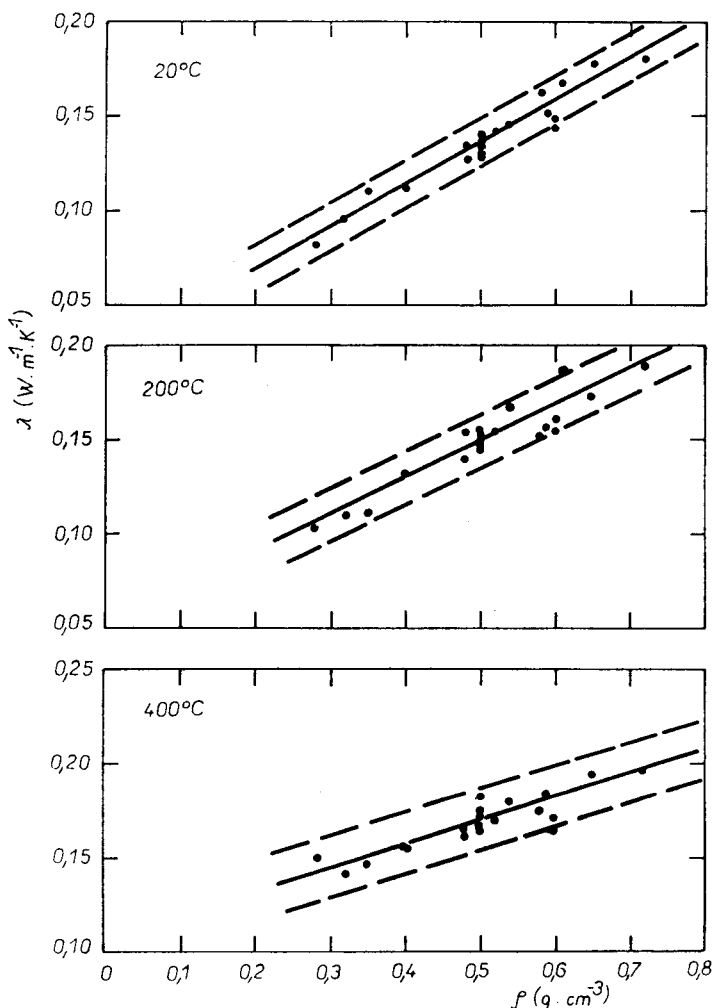
## Seznam symbolů

- $\lambda$  měrná tepelná vodivost heterogenního tělesa  
 $\lambda_g$  měrná tepelná vodivost plynu v pórech  
 $\lambda_p$  měrná tepelná vodivost pórů  
 $\lambda_r$  měrná tepelná vodivost podmíněná výměnou záření stěnou pórů  
 $\lambda_s$  měrná tepelná vodivost pevné fáze bez pórů  
 $s$  emisivita  
 $\gamma$  tvarový faktor (2/3 pro kulové póry)  
 $\sigma$  Stefan—Boltzmannova konstanta  
 $P$  pórovitost v objemovém podílu  
 $P_1$  podíl pórů v ploše kolmé ke směru tepelného toku  
 $P_c$  líniový podíl pórů ve směru tepelného toku  
 $d$  průměr pórů  
 $T$  termodynamická teplota  
 $K$  strukturální nebo tvarový faktor

modely pro transport tepla v pevných drtích [11, 12], protože nejsou vhodné pro transport tepla v kompaktních pevných látkách. Stejně tak nejsou uvedeny modifikované modely Euckena z novější japonské literatury [13, 14].

### EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Výrobky SILTONTHERM jsou vyráběny v NDR ve třech závodech. Přesto se tyto produkty liší chemickým a mineralogickým složením jen málo. Mají s ohledem na výrobní plynoproces kulovité makropóry o průměru řádově  $10^{-4}$  m a mikropóry



Obr. 1. Měrná tepelná vodivost  $\lambda$  ohnivzdorného plynobetonu SILTONTHERM v závislosti na objemové hmotnosti  $\rho$  při teplotě 20, 200 a  $400^\circ\text{C}$ . (Čárkované přímky ohraničují oblast  $\pm 2s$ , tj. 95,5 % všech naměřených hodnot.)

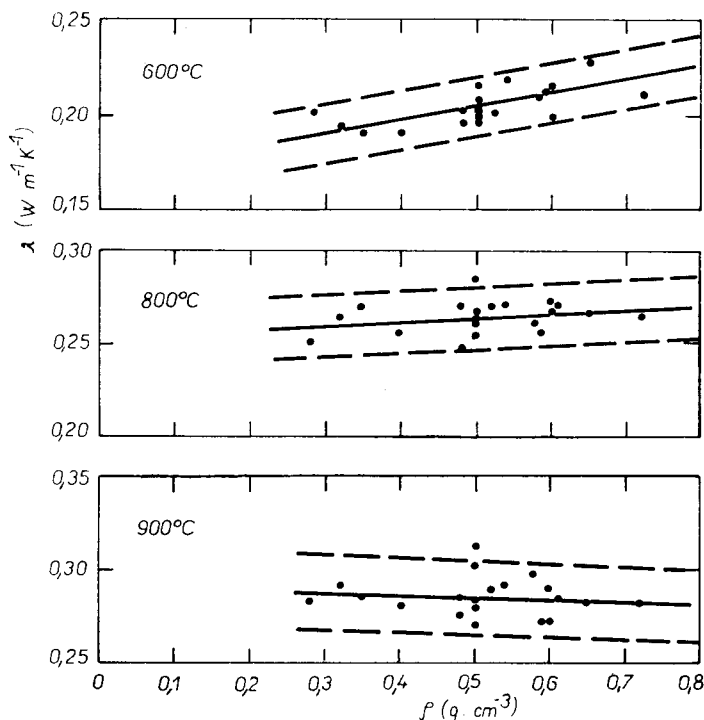
o průměru  $10^{-7}$  m. Proměřeno bylo 20 vzorků, na nichž byla stanovena objemová hmotnost po vysušení, pórovitost, velikost pórů a měrná tepelná vodivost. Objemová hmotnost byla zjišťována po vysušení na konstantní hmotnost při  $105^\circ\text{C}$  na zkušebních těliscích, která byla nutná k měření měrné tepelné vodivosti, měřením a vážením tvarovky o rozměrech  $240 \times 60 \times 120$  mm. Měrná tepelná vodivost byla stanovena do teploty  $900^\circ\text{C}$  na nepálených vzorcích metodou topného drátu ve shodě s normou TGL 32153.

Byly zvoleny vzorky s objemovou hmotností po vysušení 0,28 až  $0,72\text{ g/cm}^3$ , což odpovídá pórovitosti 89 až 72%. Naměřené hodnoty jsou při následujícím vyhodnocení vztahovány stále na objemovou hmotnost po vysušení, resp. pórovitost v nevypáleném stavu. Objemová hmotnost a pórovitost se mění do teploty  $900^\circ\text{C}$  vzhledem k probíhající ztrátě hmotnosti a smrštění jen málo.

Střední velikost pórů byla zjištěna z měření průměru pórů na optickém mikroskopu a přepočtením.

### Výsledky a vyhodnocení

Byly naměřeny křivky závislosti měrné tepelné vodivosti na teplotě po cca 50 K. Z nich byly odečteny měrné tepelné vodivosti při 20, 200, 400, 600, 800 a  $900^\circ\text{C}$  a vyneseny do grafů v závislosti na objemové hmotnosti (obr. 1 a 2).



Obr. 2. Jako obr. 1, teplota 600, 800 a  $900^\circ\text{C}$ .

Z obrázků je zřejmé, že objemová hmotnost a měrná tepelná vodivost jsou lineárně závislé a že vnesenými body lze proložit přímkou. Kladná hodnota směrnice přímk se zmenšuje se stoupající teplotou a dosahuje při 900 °C mírně záporné hodnoty.

Regresní analýzou s pomocí metody nejmenších čtverců byly pro naměřené hodnoty vypočteny příslušné přímky a naznačeny v obr. 1 a 2. V tabulce II jsou pak uvedeny konstanty přímky  $a$  a  $b$  rovnice

$$\lambda = a\rho + b, \quad (1)$$

kde  $\lambda$  je měrná tepelná vodivost ve  $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ,  
 $\rho$  objemová hmotnost po vysušení v  $\text{g cm}^{-3}$

Tabulka II

Konstanty  $a$ ,  $b$  rovnice (1), korelační koeficient  $r$  a směrodatná odchylka vyrovnané přímky podle (1), maximální  $a_{\max}$  a minimální  $a_{\min}$  regresní koeficient rovnice (1) pro pravděpodobnost 95 % v závislosti na teplotě

Teplota (°C)	$a$	$b$	$r$	$s$ ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	$a_{\max}$	$a_{\min}$
20	0,2239	0,0236	0,97	0,0057	0,2514	0,1963
200	0,1954	0,0495	0,94	0,0077	0,2295	0,1613
400	0,1237	0,1064	0,85	0,0080	0,1614	0,0860
600	0,0701	0,1703	0,67	0,0082	0,1083	0,0319
800	0,0214	0,2527	0,27	0,0078	0,0557	-0,0129
900	-0,0111	0,2901	0,13	0,0095	0,0326	-0,0545

Průběh regresního koeficientu  $a$ , konstanty  $b$  a klesajícího korelačního koeficientu  $r$  ukazují na zmenšující se vliv objemové hmotnosti na měrnou tepelnou vodivost při stoupající teplotě, jak ukazuje obr. 1 a 2.

Malá směrodatná odchylka  $s$  dokazuje spolehlivost aproximace vnesených bodů lineární závislosti. S jejich pomocí se nechá zjistit na základě známých statistických vztahů interval spolehlivosti, to znamená, že v intervalu střední hodnota  $\pm s$  leží 68,3 %,  $\pm 2s$  95,5 % a  $\pm 3s$  99,7 % všech naměřených hodnot. Oblasti vnesené na obrázcích 1 a 2 odpovídají spolehlivosti 95,5 %, tj. uvedené procento všech naměřených hodnot leží uvnitř této plochy. Podobně se obdrží konfidenční interval, když se regresní koeficienty  $a_{\max}$  a  $a_{\min}$  vypočítají takzvaným  $t$ -testem. Pro koeficient spolehlivosti 95 % je to uvedeno v tabulce II.

Změna směrnice přímk na obr. 1 a 2 je zřejmě způsobena transportem tepla zářením ve výrobcích ze SILTONTHERMU. Póry jsou při vysokých teplotách vlivem záření prakticky prozářeny a netvoří tím žádnou zábranu pro transport tepla. Tento efekt se musí projevat v vzorků s vyšší pórovitostí a tedy nižší objemovou hmotností silněji než u materiálů s pórovitostí nižší, majících vyšší objemový podíl pevné látky a tím větší odpor proti transportu zářením. Většinou se toto projeví minimem tepelné vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti. Vzhledem k malé změně pórovitosti ze 72 na 89 % ukáže se však u materiálů ze SILTONTHERMU pouze změna směrnice přímk na obr. 1 a 2.

K výpočtu měrné tepelné vodivosti podle modelových rovnic uvedených v tab. I je nezbytné, aby byla známa pórovitost, průměr pórů, emisní koeficient a měrná tepelná vodivost pevných a plynných fází i závislosti na teplotě. Tyto vlastnosti

byly u materiálů ze SILTONTHERMU změřeny, o čemž se informuje na jiném místě.

Tabulka III ukazuje na příkladu dvou produktů ze SILTONTHERMU rozdílných objemových hmotností a velikosti pórů při třech teplotách porovnání naměřených měrných tepelných vodivostí s hodnotami vypočtenými z modelových rovnic. Při tom je překvapující, že za různých předpokladů odvozené a tím rozdílně sestavené rovnice od Loeba [15], Euckena [16], Russela [17], Ribauda [18] a Traustela [19] dávají většinu hodnot, které leží uvnitř korelačních intervalů vynesných na obr. 1 a 2. Hodnoty měrné tepelné vodivosti vypočtené podle Rousseye [20] jsou naopak příliš vysoké, hodnoty podle Torkara [21] a zjednodušené rovnice podle Euckena [16] příliš nízké ve srovnání s naměřenými.

Tabulka III

Podle různých modelů vypočtené měrné tepelné vodivosti tepelně izolačních materiálů SILTONTHERM pro rozdílné objemové hmotnosti při různých teplotách

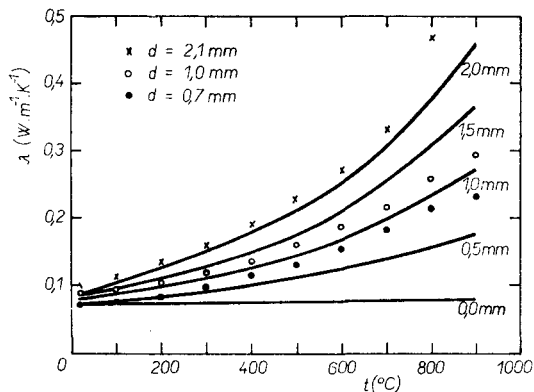
	Objemová hmotnost 0,3 g/cm <sup>3</sup> , průměr pórů 1 · 10 <sup>-3</sup> m			Objemová hmotnost 0,6 g/cm <sup>3</sup> , průměr pórů 7 · 10 <sup>-4</sup> m		
	20 °C	400 °C	900 °C	20 °C	400 °C	900 °C
vypočteno podle rovnice (1)	0,091	0,144	0,287	0,158	0,181	0,283
Loeb [15]	0,080	0,125	0,273	0,158	0,191	0,293
Eucken [16]	0,081	0,127	0,274	0,164	0,196	0,299
Eucken [16] zjednodušeno	0,077	0,078	0,082	0,160	0,164	0,172
Russel [17]	0,083	0,128	0,275	0,170	0,202	0,303
Ribaud [18]	0,080	0,125	0,274	0,158	0,191	0,296
Traustel [19]	0,081	0,127	0,274	0,166	0,198	0,300
Roussey [20]	0,100	0,161	0,313	0,170	0,221	0,343
Torkar [21]	0,050	0,102	0,262	0,102	0,143	0,266

Měrná tepelná vodivost materiálů ze SILTONTHERMU může být tedy vypočtena s dostačující přesností podle několika modelů. Značná podobnost ve výpovědi více modelů vede k domněnce, že konkrétní varianta zapojení tepelných odporů v jednotlivých modelech není tak významná a že použitelné vypočtené výsledky se obdrží kombinací paralelně a za sebou zapojených tepelných odporů. Důležitější zřejmě je, že rozhodující procesy transportu tepla jsou správně popsány a že kromě vedení tepla v pevné a plynné fázi srážkovým mechanismem se též bere v úvahu transport tepla zářením.

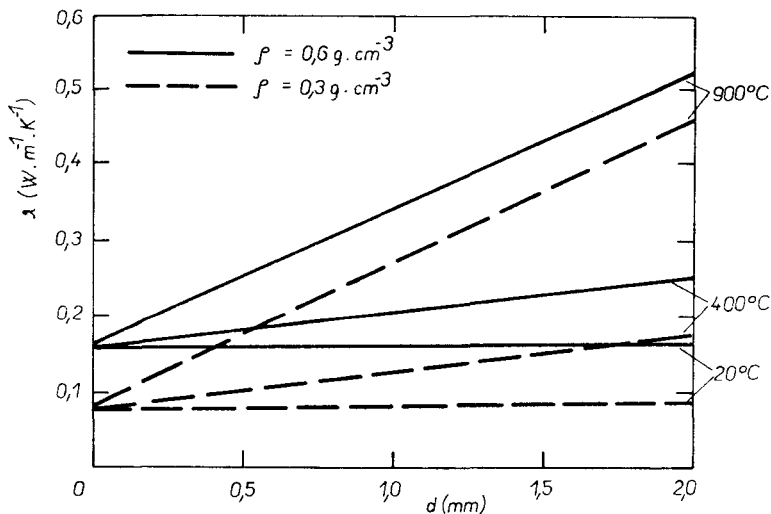
Kromě pórovitosti ovlivňuje měrnou tepelnou vodivost velikost pórů. Na obr. 3 jsou vyneseny křivky vypočtených měrných tepelných vodivostí podle Loebeho modelu [15] pro SILTONTHERM s objemovou hmotností 300 kg m<sup>-3</sup> v závislosti na teplotě při různých středních průměrech pórů a zároveň jako body naměřené hodnoty tří vzorků o stejné objemové hmotnosti, ale s rozdílnou střední velikostí pórů. Je zřejmé, že vypočtené hodnoty a naměřené výsledky velmi uspokojivě souhlasí. Loebův model tedy popisuje také velmi dobře vliv velikosti pórů na měrnou tepelnou vodivost. Obr. 3 ukazuje, že velikost pórů ovlivňuje při nízkých teplotách jen málo měrnou tepelnou vodivost, při vysokých teplotách zvyšují však póry měr-

nou tepelnou vodivost značně. Výrobky SILTONTHERM, které mohou být použity do teploty 900 °C, by měly mít, pokud možno, malé póry s průměrem do 1 mm.

Na obr. 4 jsou vyneseny měrné tepelné vodivosti vypočtené z Loebeho rovnice [15] pro objemové hmotnosti 300, 600 kg m<sup>-3</sup> v závislosti na průměru pórů pro různé teploty. Dále je zřejmé, že vliv velikosti pórů na měrnou tepelnou vodivost u materiálů s nižší objemovou hmotností je poněkud větší.



Obr. 3. Měrná tepelná vodivost  $\lambda$  ohnivzdorného plynobetonu SILTONTHERM v závislosti na teplotě  $t$  při rozdílné velikosti pórů podle modelu Loebeho [15] (plná křivka) podle vlastního měření (naměřené body).



Obr. 4. Měrná tepelná vodivost  $\lambda$  ohnivzdorného plynobetonu SILTONTHERM s objemovou hmotností 0,3 resp. 0,6 g/cm<sup>3</sup> v závislosti na velikosti pórů  $d$  při 20, 400 a 900 °C, vypočteno dle Loebeho [15].

Objasnění vlivu velikosti pórů na měrnou tepelnou vodivost je tedy možné opět přenosem tepla zářením, které se uplatňuje především při vysokých teplotách. Na obr. 1 a 2 je ukázán podstatný rozdíl rozptylu naměřených hodnot a tudíž vzrůst směrodatné odchylky se stoupající teplotou (tab. III) v souvislosti s vlivem velikosti pórů, neboť střední velikost tam uvažovaných pórů se mění od 0,7 do 1 mm.

#### ZÁVĚR

Na 20 ohnivzdorných tepelně izolačních vzorcích SILTONTHERM s objemovou hmotností 280 až 720 kg m<sup>-3</sup> byla proměřena měrná tepelná vodivost do 900 °C. Při všech teplotách byla zjištěna lineární závislost mezi objemovou hmotností a měrnou tepelnou vodivostí. Regresní koeficienty zjištěných lineárních vztahů ukazují, že vliv se zmenšuje se stoupající teplotou a při 900 °C je negativní.

Tepelně izolační chování výrobků ze SILTONTHERMU je ovlivňováno při vysokých teplotách ve značné míře transportem tepla zářením v pórech, zvláště u vzorků s vysokou pórovitostí.

Pomocí modelů pro tepelný transport v heterogenních tělesech byla vypočtena měrná tepelná vodivost plynobetonů. Bylo zjištěno, že modelové rovnice, které odvodil Loeb, Eucken, Russel, Ribaud a Traustel, dávají vypočtené hodnoty, které leží uvnitř intervalu rozptylu naměřených hodnot. Hodnoty měrné tepelné vodivosti vypočtené z modelu podle Rousseye jsou příliš vysoké, hodnoty podle Torkara a zjednodušené rovnice Euckena jsou příliš nízké. Měrná tepelná vodivost SILTONTHERMU může být tedy vypočtena s dostatečnou přesností za použití modelových rovnic z vlastností plynobetonu, obzvláště podle modelu Loeba.

Při normální teplotě ovlivňuje velikost pórů měrnou tepelnou vodivost jen velmi málo. Naopak zvyšuje se měrná tepelná vodivost u vzorků s velkými póry při vysokých teplotách značně. Tak stoupne měrná tepelná vodivost při 900 °C z 0,18 W · m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> při průměru pórů 0,5 mm na 0,46 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> při průměru 2 mm. Také toto chování se vysvětluje transportem tepla zářením v pórech. Závislost měrné tepelné vodivosti SILTONTHERMU na velikosti pórů se dá vypočítat z modelu Loeba. Plynobeton musí mít střední velikost pórů pod 1 mm, aby mohl být použit jako ohnivzdorné tepelně izolační materiály.

#### Literatura

- [1] Schlegel E., Volec J.: *Betontechnik* 1, 18 (1980).
- [2] Schlegel E., Volec J.: *Stavivo* 60, 403 (1982).
- [3] Schlegel E., Unverricht M.: *Silikattechnik* 37, 81 (1986).
- [4] Volec J. aj.: *Gießertechnik* 31, 1 24 (1985).
- [5] Cammerer J. S.: *Mitt. a. d. Forsch.—H. f. Wärmeschutz*, München 1925, Heft 4.
- [6] Boeck P. J.: *Metallurgical and Chemical Engineering*, 225 (1916).
- [7] Raisch E.: *Mitt. a. d. Forsch.—H. f. Wärmeschutz*, München 1926, Heft 7.
- [8] Fritz-Schmidt M., Gehlhoff G.: *Glastechn. Ber.* 8, 206 (1930).
- [9] Esser H. aj.: *Sprechsaal* 64, 127, 145, 165, 187, 205 (1931).
- [10] Schulle W., Kutzendörfer J.: *Stavivo* 62, 147 (1984).
- [11] Vortmeyer D.: *Chem.-Ing.-Techn.* 51, 839 (1979).
- [12] Zehner P., Schlünder E. U.: *Chem.-Ing. Tech.* 42, 933 (1970).
- [13] Saegusa T. aj.: *Internat. Chem. Engineering* 14, 169 (1974).
- [14] Fujitsu T. aj.: referováno v *TRANS. AIME* 245, 821 (1969).
- [15] Loeb A. L.: *J. Amer. Ceram. Soc.* 37, 96 (1954).
- [16] Eucken A.: *Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens*, Berlin B 3 [3/4] (1932), VDI-Bericht 353.



- [17] Russel H. W.: J. Amer. Ceram. Soc. 18, 1 (1935).  
 [18] Ribaud M.: Chaleur et Industrie 19, 36 (1937).  
 [19] Traustel S. aj.: Tonind.-Ztg. 85, 565 (1961).  
 [20] Roussey A.: Rev. Gen. de Thermique 2, 317 (1963).  
 [21] Torkar K., Paulitsch P.: Ztschr. Phys. Chem. NF 3 [1/2], 34 (1955).

## ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ОГНЕУПОРНОГО ГАЗОБЕТОНА SILTONTHERM ОТ ОБЪЕМНОГО ВЕСА И РАЗМЕРА ПОР

Ernst Schlegel, Reinhardt Boldt

*Bergakademie Freiberg, Sektion Verfahrenstechnik und Silikatechnik,  
9200 Freiberg, DDR*

На 20 пробах объемным весом 280—720 кг · м<sup>-3</sup> измеряли пористость, средний размер пор и удельную теплопроводность с помощью метода отопительной проволоки до температуры 900 °С.

При всех температурах устанавливали линейную зависимость между объемным весом и удельной теплопроводностью. С помощью регрессного анализа рассчитывали постоянные линейной зависимости для измеряемых величин и коэффициенты регрессии и корреляции. С повышающейся температурой уменьшается влияние объемного веса на удельную теплопроводность. При температурах 800 и 900 °С оказывается удельная теплопроводность уже независимой от объемного веса. Стандартное отклонение измеряемых величин невелико, оно повышается с 0,0057 W · м<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup> при температуре 20 °С до 0,0095 W · м<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup> при 900 °С. Измеряемые величины удельной теплопроводности находятся в зависимости от объемного веса при 20 °С в пределах от 0,08 до 0,18 W · м<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup> и при температуре 900 °С достигают величины 0,27—0,32 W · м<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup>.

На термически изоляционное поведение изделий из силтонтерма оказывает влияние при высоких температурах в значительной степени транспорт тепла излучением в порах, особенно в случае проб с высокой пористостью.

При помощи моделей для термического транспорта в гетерогенных телах рассчитывали удельную теплопроводность газобетонов. Было установлено, что модельные уравнения, выведенные Лебом, Эйкенем, Расселом, Рибодом и Трауштелем, представляют расчетные величины, находящиеся внутри интервала рассеяния измеряемых величин. Величины удельной теплопроводности, рассчитанные на основании модели Руссея, весьма высоки, величины по Торкару и упрощенному уравнению Эйкена весьма низки. Следовательно, удельную теплопроводность силтонтерма можно рассчитать с достаточной точностью с применением модельных уравнений из свойств газобетона, особенно согласно модели Леба.

При нормальной температуре размер пор влияет на удельную теплопроводность весьма незначительно. Наоборот, значительно повышается удельная теплопроводность при высоких температурах у проб с большими порами. Таким образом повышается удельная теплопроводность при температуре 900 °С с 0,18 W · м<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup> при средней величине размера пор 0,5 мм до 0,46 W · м<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup> при средней величине размера пор 2 мм. Приводимое поведение объясняется также транспортом тепла излучением в порах. Зависимость удельной теплопроводности силтонтерма от размера пор можно рассчитать на основании модели Леба. Газобетоны должны иметь среднюю величину пор ниже 1 мм потому, чтобы можно было их использовать для приготовления жаростойких, термически изоляционных материалов.

*Рис. 1. Удельная теплопроводность  $\lambda$  жаростойкого газобетона силтонтерм в зависимости от объемного веса  $\rho$  при температуре 20, 200 и 400 °С. (Штриховые прямые ограничивают область  $\pm 2$  с, т. е. 95,5 % всех измеренных величин).*

*Рис. 2. Удельная теплопроводность  $\lambda$  жаростойкого газобетона силтонтерм в зависимости от объемного веса  $\rho$  при температуре 600, 800 и 900 °С. (Штриховые линии ограничивают область  $\pm 2$  с, т. е. 95,5 % всех измеренных величин).*

*Рис. 3. Удельная теплопроводность  $\lambda$  жаростойкого газобетона силтонтерм в зависимости от температуры  $t$  при различном размере пор согласно модели Леба*

[15] (сплошная кривая) и согласно нами проводимому измерению (измеренные точки).

Рис. 4. Удельная теплопроводность  $\lambda$  жаростойкого газобетона силтонтерм объемным весом 0,3 или 0,6 г/см<sup>3</sup> в зависимости от размера пор  $d$  при температуре 20, 400 и 900 °C; рассчитано согласно Лебу [15].

## DEPENDENCE OF SPECIFIC THERMAL CONDUCTIVITY OF THE SILTONTHERM CELLULAR CONCRETE ON ITS APPARENT DENSITY AND PORE SIZE

Ernst Schlegel, Reinhardt Boldt

Bergakademie Freiberg, Sektion Verfahrenstechnik und Silikatechnik,  
9200 Freiberg, GDR

Porosity, mean pore size and specific thermal conductivity at temperatures up to 900 °C by the heating wire method were measured on 20 samples with apparent densities over the range of 280 to 720 kg m<sup>-3</sup>.

A linear dependence of apparent density on specific thermal conductivity was determined at all the temperatures. Using regression analysis, the constants of the linear dependence for the experimental values, the regression coefficients and the correlation coefficients were calculated. The effect of apparent density on specific thermal conductivity decreases with increasing temperature. At temperatures of 800 to 900 °C, the specific thermal conductivity no longer depends on apparent density. The standard deviations of the experimental values is small, increasing from 0.0057 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> at 20 °C up to 0.0095 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> at 900 °C. The values of specific thermal conductivity in terms of apparent density at 20 °C are 0.08 to 0.18 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> and at 900 °C attain values from 0.27 to 0.32 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>.

The thermally insulating properties of SILTONTHERM products at high temperatures are significantly affected by radiation in pores, particularly in highly porous samples.

Using models for heat transfer in heterogeneous bodies, the specific thermal conductivity of the cellular concretes was calculated. It was found that the model equations derived by Loeb, Eucken, Russel, Ribaud and Traustel provide calculated values that lie within the dispersion interval of the experimental values. The thermal conductivity values calculated from Roussey's model are too high, while those obtained according to Torkar and by Eucken's simplified equation are too low. The specific thermal conductivity of SILTONTHERM can therefore be calculated with satisfactory accuracy with the use of model equations and the properties of cellular concrete, most conveniently according to Loeb's model.

The thermal conductivity of cellular concrete is little affected by pore size at room temperature. However, it increases considerably at high temperatures with samples containing large pores. For example, the thermal conductivity at 900 °C amounts to 0.18 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> for cellular concrete with a mean pore size of 0.5 mm and increases up to 0.46 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> for a mean pore size of 2 mm. This difference is also explained by radiation heat transfer in the pores. The dependence of specific thermal conductivity of SILTONTHERM on pore size can be calculated by means of Loeb's model. The cellular concrete should have a mean pore size of less than 1 mm to be applicable as refractory thermal insulation.

Fig. 1. Specific thermal conductivity  $\lambda$  of fireproof cellular concrete SILTONTHERM in terms of apparent density at 20, 200 and 400 °C respectively. (The dashed lines show the  $\pm 2\sigma$  region, i.e. that of 95.5% of all the values measured.)

Fig. 2. As in Fig. 1, for temperatures of 600, 800 and 900 °C.

Fig. 3. Specific thermal conductivity  $\lambda$  of SILTONTHERM cellular concrete in terms of temperature at various pore sizes according to Loeb's model [15] (full line) and according to measurement (points).

Fig. 4. Specific thermal conductivity  $\lambda$  of fireproof cellular concrete with apparent densities of 0.3 and 0.6 g/cm<sup>3</sup> respectively, in terms of pore size  $d$  at 20, 400 and 900 °C, calculated according to Loeb [15].