

Krátké původní sdělení

VÝVOJ TEPLOTNÍHO PROFILU V KERAMICKÉM TĚLESE

JIŘÍ HAVRDA, EVA NOVOTNÁ, FRANTIŠEK OUJÍŘÍ

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

Došlo 1. 3. 1983

Je proveden numerický výpočet vývoje teplotního profilu v tělese tvaru desky, který je porovnán s experimentálně stanoveným. Bylo zjištěno, že závislost koeficientu teplotní vodivosti na teplotě lze v podmínkách binární směsi zanedbat. Výsledky potvrdily spolehlivost koeficientu teplotní vodivosti stanoveného metodou dvou tepelných zdrojů.

ÚVOD

Řada technologických operací při výrobě keramiky je spojena s přenosem vlhkosti a tepla. Popis těchto operací matematickými modely je spojen s řešením přenosových rovnic tepla a vlhkosti pro dané počáteční a okrajové podmínky. Matematický model popisující přenos vlhkosti jako difúzi v binární směsi za současného přenosu tepla v tělese vyžaduje znalost difúzního, termodifúzního a barodifúzního koeficientu, popř. jejich závislost na vlhkosti, teplotě a tlaku. K popisu přenosu tepla jsou to pak koeficient tepelné a teplotní vodivosti prostředí a měrné teplo za konstantního tlaku, popř. jejich závislost na vlhkosti a teplotě. Společným řešením přenosových rovnic vlhkosti a tepla se pak získá vývoj teplotního a vlhkovostního pole v tělese.

V práci [1] byla vypracována metoda pro stanovení koeficientu teplotní vodivosti vodou nasyceného keramického tělesa. Bylo konstatováno, že závislost tohoto koeficientu na vlhkosti je významná, zatímco jeho teplotní závislost lze v úzkém teplotním intervalu zanedbat.

Považovat vodou nasycenou keramickou směs v plastickém stavu za binární směs pevné fáze (keramický materiál) a kapalnou fázi (voda) lze zhruba do její teploty $T = 325$ K. Při vyšších teplotách vznikající plynnou fází již nemůžeme zanedbat a vodou nasycená keramická směs přestává splňovat podmínky binární směsi.

Cílem této práce je proto ověřit, zda předpoklad nezávislosti koeficientu teplotní vodivosti na teplotě je splněn pro podmínky binární směsi.

K dosažení daného cíle byl zvolen postup, který spočívá v porovnání vypočteného a experimentálně stanoveného časového vývoje teplotního profilu v tělese. Výpočet je proveden pro koeficient teplotní vodivosti vodou nasycené porcelánové směsi $\alpha = 0,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ [1]. Tato hodnota byla získána při malých změnách střední teploty tělesa a současně byly splněny podmínky polonekonečného prostředí. V této práci je použita tato hodnota i pro podmínky konečného tělesa, kdy celková změna jeho střední teploty je významná. V případě platnosti předpokladu nezávislosti koeficientu teplotní vodivosti na teplotě jsme očekávali shodu mezi výpočtem a experimentem.

VÝPOČET VÝVOJE TEPLOTNÍHO PROFILU V TĚLESE

Uvažujeme-li jednorozměrné vedení tepla v tělese tvaru desky určené počáteční podmínkou:

$$\tau = 0, \quad T = T_1, \quad x \in \langle 0, L \rangle \quad (1)$$

a okrajovými podmínkami:

$$\begin{aligned} \tau \leq \tau_1 \quad x = 0, \quad T = T_2 \\ x = L, \quad T = T_1 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \tau > \tau_1, \quad x = 0, \quad T = T_2; \\ x = L, \quad T = f(\tau), \end{aligned} \quad (3)$$

pak vývoj teplotního profilu v tělese je možno získat analytickým nebo numerickým řešením Fourierovy-Kirchhoffovy rovnice.

V práci bylo použito pro podmínky (1), (2) a (3) numerické řešení explicitní metodou sítí [2], které vychází ze vztahu:

$$T_{i+1,j} = a(k/h^2) T_{i,j-1} + (1 - 2a(k/h^2)) T_{i,j} + a(k/h^2) T_{i,j+1}, \quad (4)$$

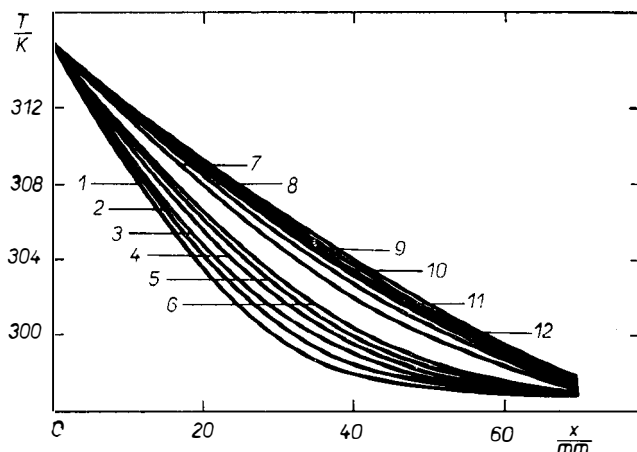
kde i je časová souřadnice a j polohová souřadnice sítě, k je časový a h je polohový krok sítě, přičemž platí podmínka $k/h^2 < 1/2$.

Vlastní výpočet byl proveden pro těleso tvaru hranolu z nasycené porcelánové směsi s vlhkostí 24,5 % o rozměrech 3×3 cm a $L = 7$ cm. Za čas τ_1 byla zvolena doba 600 s, kdy jsou ještě splněny podmínky (2). Počáteční podmínka byla zadána ve tvaru:

$$\tau = 0, \quad T_1 = 296,91 \text{ K}, \quad x \in \langle 0, L \rangle \quad (5)$$

a okrajové podmínky ve tvaru:

$$\begin{aligned} \tau \leq 600 \text{ s}, \quad x = 0, \quad T_2 = 315,50 \text{ K} \\ x = L, \quad T_1 = 296,91 \text{ K} \end{aligned} \quad (6)$$



Obr. 1. Vypočtený časový vývoj teplotního profilu v tělese pro $\tau \in \langle 300, 2400 \rangle$ s;

- 1 — $\tau = 300$ s, 2 — $\tau = 360$ s, 3 — $\tau = 420$ s,
 4 — $\tau = 480$ s, 5 — $\tau = 540$ s, 6 — $\tau = 600$ s,
 7 — $\tau = 900$ s, 8 — $\tau = 1200$ s, 9 — $\tau = 1500$ s,
 10 — $\tau = 1800$ s, 11 — $\tau = 2100$ s, 12 — $\tau = 2400$ s.

$$\tau > 600 \text{ s}, \quad x = 0, \quad T_2 = 315,50 \text{ K} \\ x = L, \quad T_1 = 296,59 \text{ K} + 5,67 \cdot 10^{-4} \text{ K s}^{-1} \cdot \tau. \quad (7)$$

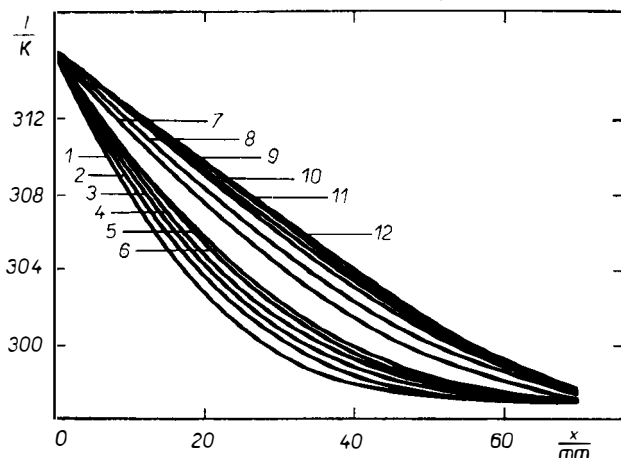
Kroky sítě byly zvoleny následující:

$$k = 0,020 \text{ s}, \quad h = 0,5 \text{ mm}.$$

Vypočtený časový vývoj teplotního profilu je znázorněn na obr. 1.

EXPERIMENTÁLNĚ STANOVENÉ VÝVOJE TEPLOTNÍCH PROFILŮ V TĚLESE

V experimentu byla použita metoda dvou tepelných zdrojů. Uspořádání experimentu splňovalo počáteční (5) a okrajové podmínky (6) a (7). Teplotní profily byly měřeny termočládky měď—konstantan. Měření za daných podmínek bylo provedeno 5krát. Typické teplotní profily stanovené při různých τ jsou znázorněny na obr. 2.



Obr. 2. Naměřený časový vývoj teplotního profilu v tělese pro $\tau \in \langle 300, 2400 \rangle \text{ s}$;

- 1 — $\tau = 300 \text{ s}$, 2 — $\tau = 360 \text{ s}$, 3 — $\tau = 420 \text{ s}$,
4 — $\tau = 480 \text{ s}$, 5 — $\tau = 540 \text{ s}$, 6 — $\tau = 600 \text{ s}$,
7 — $\tau = 900 \text{ s}$, 8 — $\tau = 1200 \text{ s}$, 9 — $\tau = 1500 \text{ s}$,
10 — $\tau = 1800 \text{ s}$, 11 — $\tau = 2100 \text{ s}$, 12 — $\tau = 2400 \text{ s}$.

DISKUSE A ZÁVĚR

Porovnání vypočtených a naměřených vývojů teplotních profilů bylo provedeno na základě vyjádření průměrného rozdílu ΔT mezi oběma průběhy. Jeho hodnota je $\Delta T = 0,35 \text{ K}$. Uvážíme-li, že přesnost měření teplotních profilů je $0,15 \text{ K}$ [1], pak lze konstatovat dobrou vzájemnou shodu mezi vypočteným a naměřeným vývojem teplotních profilů v tělese. Uvedený poznatek tedy znamená, že předpoklad nezávislosti koeficientu teplotní vodivosti na teplotě je v podmínkách binární směsi oprávněný.

Pro doplnění byly dále porovnány experimentální profily při $\tau \leq \tau_1$ s teplotními profily vypočtenými z analytického řešení Fournierovy—Kirchhoffovy rovnice:

$$T = T_1 + (T_2 - T_1) \operatorname{erfc} (x/2 \sqrt{a\tau}). \quad (8)$$

Výsledky ukázaly, že v oblasti platnosti podmínek splňujících polonekonečné prostředí vystihuje analytické řešení experimentální výsledky o 20 % lépe než použité řešení numerické. Tato odchylka je dána druhem použité numerické metody.

Závěrem lze konstatovat, že ve vodou nasycené porcelánové směsi je možné při výpočtu vývoje teplotních profilů v tělese zanedbat závislost koeficientu teplotní vodivosti na teplotě a jeho hodnota je metodou dvou tepelných zdrojů spolehlivě stanovena.

Literatura

- [1] Havrda J., Novotná E., Oujíří F.: *Silikáty* 28, 135 (1984).
 [2] Crank J.: *The Mathematics of Diffusion*. Clarendon Press, Oxford 1975.

РАЗВИТИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЯ
В КЕРАМИЧЕСКОМ ТЕЛЕ

Иржи Гаврда, Эва Новотна, Франтишек Оуири

кафедра технологии силикатов,
Химико-технологический институт, 166 28 Прага

Предположение пренебрегаемой зависимости коэффициента температуропроводности насыщенной водой керамической смеси от температуры проверяли сопоставлением рассчитанного и установленного экспериментальным путем развития температурного профиля в теле формы пластины. Расчет проводили для условий (5), (6) и (7) с помощью эксплицитного метода сетей. Для проведения эксперимента применяли метод двух термических источников. Установили, что в условиях бинарной смеси можно зависимостью коэффициента температуропроводности от температуры пренебрегать. Результаты подтвердили пригодность метода двух термических источников для надежного определения коэффициента температуропроводности насыщенной водой керамической смеси в пластичном состоянии.

Рис. 1. Рассчитанное временное развитие температурного профиля в теле для $\tau \in \langle 300, 2400 \rangle$ с: 1 — $\tau = 300$ с, 2 — $\tau = 360$ с, 3 — $\tau = 420$ с, 4 — $\tau = 480$ с, 5 — $\tau = 540$ с, 6 — $\tau = 600$ с, 7 — $\tau = 900$ с, 8 — $\tau = 1200$ с, 9 — $\tau = 1500$ с, 10 — $\tau = 1800$ с, 11 — $\tau = 2100$ с, 12 — $\tau = 2400$ с.

Рис. 2. Измеренное временное развитие температурного профиля в теле для $\tau \in \langle 300, 2400 \rangle$ с: 1 — $\tau = 300$ с, 2 — $\tau = 360$ с, 3 — $\tau = 420$ с, 4 — $\tau = 480$ с; 5 — $\tau = 540$ с, 6 — $\tau = 600$ с, 7 — $\tau = 900$ с, 8 — $\tau = 1200$ с, 9 — $\tau = 1500$ с, 10 — $\tau = 1800$ с, 11 — $\tau = 2100$ с, 12 — $\tau = 2400$ с.

TEMPERATURE PROFILE DEVELOPMENT IN A CERAMIC BODY

Jiří Havrda, Eva Novotná, František Oujíří

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

The assumption of a negligible temperature dependence of the thermal conductivity coefficient of a water-saturated ceramic mix was verified by comparing a calculated development of the temperature profile in a plate-shaped body with a development established experimentally. The calculation was carried out for the conditions sub (5), (6) and (7) by the explicit network method. The method of two thermal sources was applied to the experiment. It was found that under the conditions of a binary mix, the temperature dependence of the thermal conductivity coefficient can be neglected. The results have confirmed the suitability of the two thermal sources method for a reliable determination of the thermal conductivity coefficient of a water-saturated ceramic mix in a plastic state.

Fig. 1. Calculated time development of a temperature profile in a body for $\tau \in \langle 300, 2400 \rangle$ s;
 1 — $\tau = 300$ s, 2 — $\tau = 360$ s, 3 — $\tau = 420$ s,
 4 — $\tau = 480$ s, 5 — $\tau = 540$ s, 6 — $\tau = 600$ s,
 7 — $\tau = 900$ s, 8 — $\tau = 1200$ s, 9 — $\tau = 1500$ s,
 10 — $\tau = 1800$ s, 11 — $\tau = 2100$ s, 12 — $\tau = 2400$ s.

Fig. 2. Experimentally established time development of the temperature profile in a body for $\tau \in \langle 300, 2400 \rangle$ s;
 1 — $\tau = 300$ s, 2 — $\tau = 360$ s, 3 — $\tau = 420$ s,
 4 — $\tau = 480$ s, 5 — $\tau = 540$ s, 6 — $\tau = 600$ s,
 7 — $\tau = 900$ s, 8 — $\tau = 1200$ s, 9 — $\tau = 1500$ s,
 10 — $\tau = 1800$ s, 11 — $\tau = 2100$ s, 12 — $\tau = 2400$ s.

ARCHITEKTURA A FUNKCE KOSTI ŠÉPIE. Kost zpevňuje tělo sépie, ale současně má funkci pevného reservoáru síly vztlaku umožňující sépii pevnou polohu v žádané hloubce pod hladinou. Její struktura vykazuje vysokou pevnost v tlaku (musí překonávat vnější hydrostatický tlak v hloubce až 250 m) při minimální hmotnosti. J. D. Birchall a N. L. Thomas (J. Mater. Sci 18, 2081 (1983)) ukázali, že struktura tohoto materiálu je tvořena tenkými ($\approx 2 \mu\text{m}$) rovnoběžnými vrstvičkami aragonitu stabilizovaného přítomností stroncia, které jsou od sebe vzdáleny $\approx 250 \mu\text{m}$. Spojení mezi vrstvičkami tvoří tenké lamelky esovitého tvaru, mezi nimiž je spojitá síť dutin. Stěny lamel i nosných vrstev jsou pokryty tenkým filmem organické hmoty bílkovinné povahy, který pravděpodobně hraje důležitou roli při výstavbě celé struktury. Mechanické vlastnosti, zejména schopnost odolávat hydrostatickému tlaku až 2,4 MPa při pórositě 93 % a objemové hmotnosti 190 kg m^{-3} představují inspiraci pro každého, kdo se zabývá vývojem pórovitých materiálů.

V. Šatava

M. A. BEZBORODOV: STĚKLOKRISTALIČESKIJE MATERIÁLY (SINTÉZA, SOSTAVY, STROJENIJE, SVOJSTVA). Skelné krystalické materiály (syntéza, složení, struktura, vlastnosti). Vyđ. nakl. Nauka i technika AN BSSR, Minsk 1982, 256 s.

Mezi monografií o sklokeramice se zařadila kniha akademika A. M. Bezborodova, který je znám jako autor řady přehledných monografií. Např. v posledních 10 letech vydal prof. Bezborodov tyto přehledné práce: Chemická odolnost silikátových skel (1972), Viskozita silikátových skel (1975), Samovolná krystalizace silikátových skel (1981). Na tuto práci přímo logicky navazuje předložený svazek, který systematicky zpracovává širokou oblast sklokeramiky.

I. kapitola je věnována katalyzované (podle autora stimulované) krystalizaci. V úvodu se zabývá celkovou situací ve sklokeramice (jsou uvedeny názvy 24 typů sklokeramiky, vyvinutých v 8 různých státech), dále je podán přehled nejrůznějších nukleačních činidel: kovy (Cu, Pt, Ag, Au), oxidy (TiO_2 , ZrO_2 , P_2O_5 , Cr_2O_3 , V_2O_5 a V_2O_3), fluoridy a sulfidy.

II. kapitola pojednává o odmísení (mikrolivkaci) silikátových skel, které předchází vlastní nukleaci. Po uvedení obecných zákonitostí je systematicky probráno odmísení ve více než 40 oxidových soustavách, počínaje binárními až po multikomponentní.

Ve III. kapitole je popsána syntéza sklokeramických hmot v různých oxidových systémech, od trojsložkových až po mnohosložkové. U některých důležitějších soustav jsou podrobněji popsány technologické postupy, zvláště teplotní režimy krystalizace, dále pak vlastnosti a struktura.

Ve IV. kapitole je zpracována syntéza sklokeramiky na bázi přírodních hornin a hlin (petrosity) a strusek (šlakosity). Rovněž je věnována pozornost přípravě sklokeramických smaltů a glazur.

V V. kapitole jsou shrnuty údaje o vlastnostech (mechanická pevnost, chemická odolnost, tepelné, optické a elektrické vlastnosti). V závěru je připojen soupis literatury obsahující 1057 odkazů, který, jako v předchozích pracích, svědčí o pečlivém prostudování velmi široké literatury. Pro nás je zajímavá, že je v tomto soupisu uvedeno 16 citací našich autorů, z čehož plyne, že autor je o naší práci velmi podrobně informován.

Oproti jiným monografiím si autor všimá i okrajových problémů, čehož dokladem je IV. kapitola (petrurgie, petrosity, šlakosity, skelné krystalické smalty a glazury).

Knize lze vytknout pouze přehození textu na s. 223 a 224 (seznam literatury).

Kniha jistě vzbudí zasloužený zájem specialistů z oboru sklokeramiky, jakož i dalších pracovníků z příbuzných silikátových odvětví.

J. Voldán

F. X. EDER: „ARBEITSMETHODEN DER THERMODYNAMIK“ BAND I TEMPERATURMESSUNG (Pracovní metody termodynamiky Díl I. Měření teploty). 442 str., 301 obr.; Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1981; cena 148 DM.

Technika experimentální práce a měřicí metody v oblasti termodynamiky se v poslední době značně změnily díky možnostem, které jí poskytla mikroelektronika a použití počítačů. Bylo dosaženo vyšší přesnosti měření a objeveny zcela nové způsoby měření, jejich automatizace, registrace a vyhodnocování dat a objevilo se i mnoho způsobů řešení problémů dříve neřešitelných.

Učebnice, která by přinášela přehled moderních metod dosud v literatuře chybí. Několikasvazkové dílo profesora F. X. Edera z Technické university v Mnichově však splní rozhodně i velmi náročné požadavky všem, kteří v této oblasti experimentální fyziky pracují. Prvý díl se zabývá měřením teploty, druhý bude věnován tepelným a kalorickým vlastnostem látek, zejména měření tepelné roztlačnosti, kalorimetrií, metodám studia heterogenních fázových rovnováh v jedno i vícesložkových systémech, měřením tepelné vodivosti a otázkám přenosu tepla. Poslední díl bude věnován termodynamickému měření za vysokých a velmi nízkých teplot, což je hlavní oblast experimentální práce autora knihy, který je ředitelem Ústavu pro výzkum jevů za nízkých teplot Bavorské akademie věd v Mnichově.

Prvý svazek je rozdělen do tří kapitol. Prvá pojednává o základech měření teploty, druhá je věnována praktické termometrii a zahrnuje veškeré principy využívané v praxi k měření teploty, s popisem zařízení a jejich funkce, dále konstrukce termostatů, způsoby kalibrace měřících zařízení a také podmínky, které je třeba zachovat k získání správných výsledků. V poslední, nejrozsáhlejší kapitole, se autor zabývá měřením nízkých teplot.

Knihy je neobyčejně cennou příručkou pro experimentátory, kterým poskytne dostatečné informace k volbě nejvýhodnější metody měření a také bohatý soubor citací literatury o původních pracích, které se zvolené metody týkají.

V. Šatava

F. X. EDER: ARBEITSMETHODEN DER THERMODYNAMIK. BAND 2. THERMISCHE UND KALORISCHE STOFFEIGENSCHAFTEN. (Pracovní metody termodynamiky. Díl 2. Tepelné a kalorické vlastnosti látek). 524 str., 366 obr., cena 158 DM, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1983.

Tento druhý svazek je rozdělen stejně jako první do tří kapitol. První kapitola se zabývá tepelnou roztlačností a způsoby jejího měření, a to jak u plynů, tak u kapalin a pevných látek. Druhá je věnována kalorimetrii, popisuje úkoly a cíle kalorimetrického měření, základní pojmy a měřitelné veličiny, způsoby kalorimetrického měření (směšovací, izotermní, adiabatické kalorimetry, dynamické metody a řada metod speciálních), jsou popsány metody měření specifických tepep plynů, kapalin i pevných látek a tepel, doprovázejících fázové přeměny a chemické reakce a konečně i tepel rozpouštěcích.

Další kapitola je věnována rovnováhám v jednosložkových systémech, metodám vyšetřování stavového chování plynů (p — V — T diagram, T — s a h — s diagram) fázových rovnováh kapalina—pára, pevná látka—kapalina, pevná látka—pára a polymorfních přeměn. U každé metody je vysvětlen princip, je podána stručně teorie, popis zařízení pro různá použití a také významné výsledky (data). To vše je doplněno bohatými citacemi literatury, zahrnujícími i nejnovější prameny.

Také tento druhý díl má charakter dokonalé příručky pro toho, kdo pracuje experimentálně v oblasti termodynamiky.

V. Šatava