

Možnosti stanovení součinitele tepelné vodivosti u keramických zdicích tvarovek

Jiří Zach¹

Jitka Hroudová²

¹ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, THD; zach.j@fce.vutbr.cz

² Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, THD; hroudova.j@fce.vutbr.cz

Grant: FR-TI3/231

Název grantu: Vývoj zděných konstrukcí za účelem zlepšení užitných vlastností staveb

Oborové zaměření: Stavebnictví

© GRANT Journal, MAGNANIMITAS Assn.

Abstrakt Pro provedení výpočtového stanovení tepelných vlastností zdiva je nutné znát geometrické uspořádání zdiva a tepelně izolační vlastnosti materiálů, z nichž je zdivo složeno (tedy hodnoty součinitele tepelné vodivosti jednotlivých materiálů). V případě keramických tvarovek je nutné znát hodnotu součinitele tepelné vodivosti cihelného střepu, z něhož jsou tvarovky vyrobeny, kterou je nutné pro daný výrobek laboratorně změřit. Příspěvek se věnuje možnostem stanovení součinitele tepelné vodivosti cihelného střepu na reálných vzorcích keramických tvarovek pro zdění pomocí nestacionární metody horkého drátu a možnostem aplikace výsledků výzkumných prací do stavební praxe.

Klíčová slova součinitel tepelné vodivosti, metoda horkého drátu, keramický střep, zdivo

1. ÚVOD

Stanovení tepelných vlastností u zděných konstrukcí je možné v praxi několika základními způsoby. Měřením na fragmentu reálné konstrukce (laboratorní nebo in situ) nebo teoretickým výpočtem na matematickém výpočtním modelu konstrukce.

Výpočtové stanovení tepelných vlastností zděných konstrukcí je v praxi výhodné především při návrhu nových výrobků nebo v případě změny vlastností zdicích prvků, nejedná-li se o změnu geometrie nebo vnitřního uspořádání.

Mezi základní vstupní parametry pro výpočet tepelných vlastností patří geometrické uspořádání konstrukce a samotného zdicího prvku a dále informace o tepelných vodivostech materiálů, z nichž jsou konstrukce a samotný zdicí prvek složeny. Výpočet se v praxi provádí v souladu s ČSN EN 1745.

2. SOUČINITEL TEPELNÉ VODIVOSTI

Součinitel tepelné vodivosti patří k nejdůležitějším tepelně-technickým parametrům u stavebních materiálů. Charakterizuje schopnost látek vést teplo. Hodnota součinitele tepelné vodivosti je obecně závislá na mnoha vnějších i vnitřních vlivech, které daný materiál ovlivňují. Hodnota součinitele tepelné vodivosti je závislá

na vlastnostech materiálu. Přičemž součinitel tepelné vodivosti materiálu lze vyjádřit obecně následujícím vztahem:

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{(\theta_1 - \theta_0) \cdot S \cdot \tau} \quad (1)$$

kde:

λ součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 Q množství prošlého tepla [J],
 θ_0, θ_1 teplota mezi dvěma body, mezi kterými dochází k šíření tepla [$^{\circ}\text{C}$],
 d vzdálenost [m],
 S plocha [m^2],
 τ čas [s].

Reálná hodnota součinitele tepelné vodivosti stavebních materiálů je funkcí řady vnitřních a vnějších proměnných:

$$\lambda = f(\rho_v, w_m, \theta, P, \varphi(I)) \quad (2)$$

kde:

ρ_v objemová hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 w_m hmotnostní vlhkosti materiálu [%],
 θ teplota materiálu [$^{\circ}\text{C}$],
 P pórovitost [-],
 $\varphi(I)$ funkce vnitřních proměnných – chemicko-mineralogické složení, fázové složení, krystalické modifikace, ...

3. METODY STANOVENÍ SOUČinitele TEPELNÉ VODIVOSTI

Stanovení součinitele tepelné vodivosti lze provádět v praxi několika základními způsoby, které se od sebe liší jednak teplotním stavem zkušební vzorku během měření a dále způsobem stanovení a vyhodnocení součinitele tepelné vodivosti zkušební vzorku. Metody lze tedy obecně rozdělit na:

- **Stacionární metody.** Stacionární metody stanovení hodnoty součinitele tepelné vodivosti vycházejí ze vztahu (1). Výchozím stavem je stacionární, tedy ustálený teplotní stav v měřeném vzorku.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = konst \approx 0 \quad (3)$$

Vzhledem k tomu, že stacionární stav není při běžných podmínkách prakticky dosažitelný, považuje se za stacionární takový stav, kdy změna teploty je za daný časový úsek menší než smluvně definovaná teplotní změna [1].

$$\left. \frac{d\theta}{d\tau} \leq \Delta T_{\max} \right|_{\text{sledovaný časový interval}} \quad \Delta \tau = konst. \quad (4)$$

U stacionárních metod je nezbytné zajistit ustálený tepelný tok procházející od teplejšího povrchu měřeného vzorku k chladnějšímu povrchu vzorku. Potom lze z rozdílu teplot, plochy vzorku a tloušťky vzorku vypočítat hodnotu součinitele tepelné vodivosti λ . Stacionární metody dělíme následujícím způsobem:

- Metoda desky,
 - a. Metoda chráněné teplé desky,
 - b. Metoda měřidla tepelného toku,
- Metoda válce,
- Metoda koule.

- **Nestacionární metody.** Na rozdíl od stacionárních metod je měření nestacionární metodou založeno na sledování dynamického vývoje teplot. Nestacionární metody však nepožadují ustálený teplotní stav, nýbrž se sleduje průběh šíření teplotní vlny měřeným vzorkem. Na základě různého způsobu sledování nestacionárního vývoje během měření potom existuje řada variant pro stanovení hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ .

- Metoda nestacionárního tepelného toku,
- Metody tepelných impulsů,
 - o Metoda horkého drátu (Hot Wire Method),
 - o Záblesková metoda (Laser Flash Method),
 - o Ostatní metody tepelných impulsů.

Nestacionární metody lze dále dělit z pohledu časové závislosti výkonu tepelného zdroje lze rozdělit metody na:

- Metody s impulsním tepelným zdrojem – tepelná energie je dodána zdrojem jednorázově na počátku měření ve velmi krátkém časovém intervalu,
- Metody s kontinuálním tepelným zdrojem – tepelná energie je kontinuálně dodávána tepelným zdrojem s konstantním výkonem po celou dobu měření,
- Metody s periodickým tepelným zdrojem – tepelná energie je dodávána tepelným zdrojem s konstantním výkonem periodicky v konstantních intervalech.

Pro stanovení součinitele tepelné vodivosti keramického střepu byla použita modifikovaná metoda topného drátu dle EN 993-14. Měřicí soustava je složena ze dvou ohraničených poloprostorů - zkušební sondy a zkušební vzorku. Zkušební sonda je složena z topného drátu a registračního termočlánku (v křížovém uspořádání). Protože vlastnosti zkušební sondy jsou při všech měřeních konstantní, lze měřicí přístroj kalibrovat dvěma referenčními materiály (etalony) se známou hodnotou tepelné vodivosti λ_1 a λ_2 .

$$b = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{x_2 - x_1} \quad (5)$$

$$a = \lambda_1 - b \cdot \lambda_2$$

Přičemž veličina x představuje okamžitou rychlost regulárního ohřevu:

$$x = \frac{\ln\left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)}{\Delta \theta_2 - \Delta \theta_1} \quad (6)$$

Hodnota součinitele tepelné vodivosti λ zkušební materiálu je určena pomocí kalibračních konstant podle vztahu:

$$\lambda = a + b \cdot x \quad (7)$$

4. STANOVENÍ SOUČiniteLE TEPELNÉ VODIVOSTI U KERAMICKÝCH ZDICÍCH PRVKŮ

Stanovení součinitele tepelné vodivosti u tenkostěnných dutinových zdicích prvků je poměrně problematickou záležitostí. U keramických tvarovek je často problematické odebrat z prvků zkušební vzorky takových rozměrů, aby na nich bylo možné provést stanovení součinitele tepelné vodivosti pomocí metody desky. Tloušťka stěn je u keramických zdicích tvarovek většinou největší po okrajích, tedy v místě čel a dále pak po stranách v místě styčného zazubení (pero a drážka). Boční strany tvarovky jsou však často vylehčeny vylehčovacími otvory, což prakticky vylučuje přípravu homogenního vzorku. Částečně limitující je i výškový modul keramických tvarovek, který je 238 nebo 249 mm.

Z výše uvedených důvodů se zdají být daleko využitelnější pro stanovení součinitele tepelné vodivosti střepu u keramických dutinových tvarovek nestacionární metody horkého/topného drátu, konkrétně výše uvedené modifikované metody horkého drátu s přílohou lineární sondou.

Z pohledu měřicího procesu je nutné upravit obvod tvarovky řezáním a broušením takovým způsobem, aby byla připravena rovná a hladká místa o dostatečných rozměrech, a to jednak z pohledu rozměrů zkušební sondy a dále pak z pohledu doby měření. V případě použití metody horkého drátu u měřicího přístroje pro stanovení součinitele tepelné vodivosti na VUT v Brně je doba měřicího intervalu stanovena na 90 s. Přičemž je nutné, aby teplotní vlna z tepelného zdroje po dobu měření neopustila zkušební vzorek. Zde je tedy nutné, aby byly splněny následující podmínky:

$$\begin{aligned} T &\geq k \\ D &\geq 2 \cdot k + d \\ L &\geq 2 \cdot k + l \end{aligned} \quad (8)$$

kde:

k	vzdálenost, kterou urazí teplotní vlna za dobu měřicího intervalu (90s) [m],
T	tloušťka stěny tvarovky v měřicím místě [m],
D	šířka rovného výbrusu v měřicím místě [m],
d	šířka topného drátu [m],
L	délka rovného výbrusu v měřicím místě [m],
l	délka topného drátu [m].

Hodnotu vzdálenosti, kterou urazí teplotní vlna za dobu měřicího intervalu (90s), určíme dle vztahu:

$$k = \sqrt{\frac{2 \tau \lambda}{\rho c}} \quad (9)$$

Budeme-li uvažovat, že měrná tepelná kapacita cihelného střepu je rovna $840 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, objemová hmotnost cihelného střepu se pohybuje v rozmezí $1450 - 1850 \text{ kg.m}^{-3}$ a součinitel tepelné vodivosti se pohybuje v rozmezí $0,25 - 0,65 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, potom se bude hodnota vzdálenosti k , kterou urazí teplotní vlna za 90s měřicího intervalu, pohybovat v rozmezí $1,7.10^{-3} - 9,8.10^{-3} \text{ m}$.

5. ZKUŠEBNÍ VZORKY

Pro ověření možnosti využití nestacionární metody horkého drátu pro stanovení součinitele tepelné vodivosti u cihelných tvarovek pro zdění bylo provedeno srovnávací měření na 8 typech zdících tvarovek pro obvodové i vnitřní zdivo z 8 různých výrobních závodů z České Republiky. V každé cihelně také proběhla výroba celkem 5 zkušebních vzorků tvaru desky o rozměru 300 x 300 x 40 mm, pro stanovení součinitele tepelné vodivosti pomocí stacionární metody desky. Každá zkušební sada vzorků byla vyrobena v jiné cihelně a na zkušebních vzorcích byly provedeny následující měření:

- stanovení součinitele tepelné vodivosti stacionární metodou desky na vzorcích 300x300x40 mm (zkušební sada byla složena z 5 vzorků, na každém vzorku bylo provedeno celkem 5 měření, přičemž bylo provedeno 25 měření na zkušební sadě),
- stanovení součinitele tepelné vodivosti nestacionární metodou horkého drátu na vzorcích 300x300x40 mm (zkušební sada byla složena z 5 vzorků, na každém vzorku bylo provedeno celkem 10 měření, přičemž bylo provedeno 50 měření na zkušební sadě),
- stanovení součinitele tepelné vodivosti nestacionární metodou horkého drátu na vzorcích reálných tvarovek (zkušební sada byla složena z 5 tvarovek, na každé tvarovce bylo provedeno celkem 5 měření, přičemž bylo provedeno 25 měření na zkušební sadě).

6. VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Stanovení součinitele tepelné vodivosti bylo provedeno na vzorcích, které byly před započetím měření vysušeny při teplotě +110°C do konstantní hmotnosti. Pro stanovení součinitele tepelné vodivosti byl v první fázi použit přístroj Lambda 2300 firmy Holometrix, jehož princip je založen na stacionární metodě desky a dále přístroj Shoterm QTM firmy Shova Denco, který využívá nestacionární metody horkého drátu. Všechna měření byla provedena při laboratorní teplotě +23±2°C, měření pomocí stacionární metody bylo provedeno při střední teplotě 23°C a teplotním spádu 10K.

Z naměřených hodnot byly u jednotlivých zkušebních vzorků stanoveny průměrné hodnoty součinitele tepelné vodivosti $\lambda_{23, dry, ave}$ a směrodatné odchylky s . Naměřené a vypočítané hodnoty pro zkušební vzorky z jednotlivých cihlen jsou uvedeny v tabulkách níže.

Tab. 1: Přehled výsledných průměrných hodnot součinitele tepelné vodivosti a směrodatných odchylek u zkušebních vzorků 300x300x40 mm při stanovení součinitele tepelné vodivosti pomocí stacionární metody desky

Zkušební sada č.	1	2	3	4	5	6	7	8
Průměrná hodnota součinitele tepelné vodivosti	0,4275	0,5583	0,4510	0,5264	0,2706	0,4121	0,3580	0,3529
$\lambda_{23, dry, ave}$ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]								
Směrodatná odchylka s [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,0057	0,0067	0,0069	0,0087	0,0072	0,0051	0,0064	0,0060

Tab. 2: Přehled výsledných průměrných hodnot součinitele tepelné vodivosti a směrodatných odchylek u zkušebních vzorků 300x300x40 mm při stanovení součinitele tepelné vodivosti pomocí metody horkého drátu

Zkušební sada č.	1	2	3	4	5	6	7	8
Průměrná hodnota součinitele tepelné vodivosti	0,4252	0,5422	0,4618	0,5129	0,2823	0,4175	0,3733	0,3644
$\lambda_{23, dry, ave}$ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]								
Směrodatná odchylka s [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,0159	0,0211	0,0116	0,0183	0,0140	0,0137	0,0121	0,0144

Tab. 3: Přehled výsledných průměrných hodnot součinitele tepelné vodivosti a směrodatných odchylek u keramických tvarovek mm při stanovení součinitele tepelné vodivosti pomocí metody horkého drátu

Zkušební sada č.	1	2	3	4	5	6	7	8
Průměrná hodnota součinitele tepelné vodivosti	0,4338	0,5515	0,4589	0,5260	0,2839	0,4281	0,3618	0,3659
$\lambda_{23, dry, ave}$ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]								
Směrodatná odchylka s [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,0126	0,0190	0,0143	0,0121	0,0112	0,0136	0,0160	0,0133

Jak je patrné z výše uvedených výsledků, průměrné hodnoty směrodatných odchylek hodnot naměřených metodou horkého drátu jsou vyšší než u stacionární metody desky. V dalším kroku byla stanovena pro jednotlivé cihelny procentuální odchylka naměřených hodnot metodou horkého drátu (na zkušebních deskách i tvarovkách) a metodou desky.

Tab. 4: Přehled vypočítaných procentuálních odchylek v naměřených hodnotách pomocí metody horkého drátu ve srovnání k hodnotám naměřeným pomocí metody desky

Zkušební sada č.	1	2	3	4	5	6	7	8
Desky 300x300x40 mm [%]	-0,5%	-2,9%	2,4%	-2,6%	4,4%	1,3%	4,3%	3,2%
Tvarovky [%]	1,5%	-1,2%	1,8%	-0,1%	4,9%	3,9%	1,1%	3,7%

Jak je patrné z výše uvedených hodnot naměřené hodnoty dvěma různými metodami a typy zkušebních vzorků se v rámci jedné cihelny/zkušební sady neliší o více než ± 4,9 %.

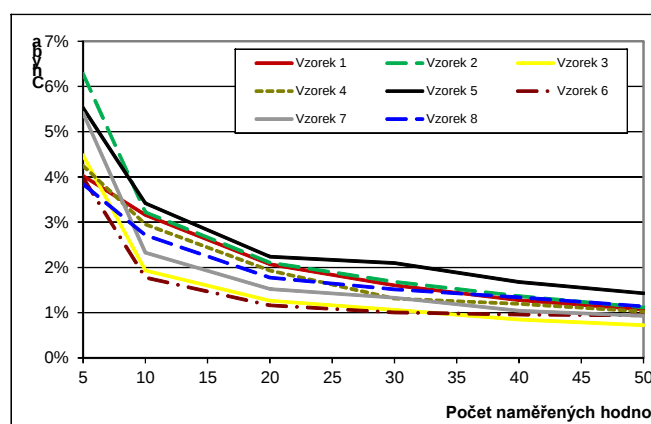
Ze souboru naměřených hodnot metodou horkého drátu u jednotlivých cihlen (u vzorků 300x300x40 mm), byly náhodným výběrem vytvořeny výběrové soubory po 50, 40, 30, 20, 10 a 5 prvcích. Pro jednotlivé výběrové soubory byla stanovena chyba měření (chyba od aritmetického průměru), přičemž při výpočtu byl uvažován 95% pravděpodobnostní kvantil. Tyto chyby zahrnují chybu měření a zároveň také chybu způsobena variabilitou jednotlivých zkušebních vzorků.

Tab. 4: Přehled vypočítaných chyb naměřených hodnot u metody horkého drátu

Počet měření / Zkušební sada č.	1	2	3	4	5	6	7	8
5	4,0%	6,3%	4,5%	4,2%	5,5%	4,0%	5,4%	3,8%
10	3,2%	3,2%	1,9%	3,0%	3,4%	1,8%	2,3%	2,7%
20	2,1%	2,1%	1,3%	1,9%	2,2%	1,2%	1,5%	1,8%
30	1,6%	1,7%	1,1%	1,3%	2,1%	1,0%	1,3%	1,5%
40	1,3%	1,4%	0,8%	1,2%	1,7%	1,0%	1,0%	1,3%
50	1,1%	1,1%	0,7%	1,0%	1,4%	0,9%	0,9%	1,1%

Jak je patrné z výše uvedených výsledků, chyba měření u všech cihlen spolu se zvyšujícím se počtem měření klesá, přičemž při 20 měřeních poklesla u všech cihlen pod 3 % a po celkovém počtu 50 měření nebyla větší než 1,5 %.

Graf 1: Závislost chyby naměřených hodnot na počtu měření u metody horkého drátu



7. ZÁVĚR

Jak je z výsledků měření patrné, pro stanovení součinitele tepelné vodivosti keramického střepu je v praxi velmi dobré použitelná metoda horkého drátu, přičemž rozdíl mezi naměřenými hodnotami pomocí metody horkého drátu a stacionární metodou desky je do 5 % (při srovnání měření provedených na stejných vzorcích). Výsledné hodnoty lze potom dále použít pro výpočet tepelného odporu zdiva dle ČSN EN 1745. Při provedených měření byla dále zjištěna velmi dobrá korelace výsledků měření na keramických tvarovkách a vzorcích ve tvaru desky vyrobených ze stejné suroviny se stejnou technologií sušení a výpalu.

Dále pak bylo zjištěno, že celkovou přesnost měření lze účinně ovlivnit počtem provedených měření, přičemž aby chyba aritmetického průměru poklesla pod 3 %, je nutné provést více než 20 měření, při 50 měření je pak možné snížit tuto chybu pod hranici 1,5 %.

Zdroje

1. ČSN 72 7010 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Společná ustanovení
2. ČSN 72 7011 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda válce
3. ČSN 72 7012-1 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky. Část 1: Společná ustanovení
4. ČSN 72 7012-2 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky. Část 2: Metoda chráněné teplé desky
5. ČSN 72 7012-3 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky. Část 3: Metoda měřidla tepelného toku
6. ČSN 72 7013 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda koule
7. ČSN 72 7014 Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Vyhodnocení
8. ČSN 72 1105 Stanovení součinitele tepelné vodivosti metodou nestacionárního tepelného toku
9. ČSN 64 0526 Zkoušení plastů. Stanovení součinitele tepelné vodivosti
10. ČSN EN 993-14 Zkušební metody pro žárovzdorné výrobky tvarové hutné - Část 14: Stanovení tepelné vodivosti metodou topného drátu (křížové uspořádání)
11. ČSN EN 993-15 Zkušební metody pro žárovzdorné výrobky tvarové hutné - Část 15: Stanovení tepelné vodivosti metodou topného drátu (paralelní uspořádání)
12. ČSN EN 821-2 Speciální technická keramika - Monolitická keramika - Termofyzikální vlastnosti - Část 2: Stanovení teplotní vodivosti metodou laserového záblesku (nebo tepelného pulsu)
13. ČSN EN 1745 Zdivo a výrobky pro zdivo - Metody stanovení návrhových tepelných hodnot