OVĚŘENÍ VYBRANÝCH TEPELNĚ-TECHNICKÝCH VLASTNOSTÍ BETONOVÉ SMĚSI V PRŮBĚHU HYDRATACE CEMENTU
TESTING SELECTED THERMAL PROPERTIES OF CONCRETE MIX DURING CONCRETE HYDRATION

JIŘÍ ZACH,
STANISLAV ŠŤASTNÍK

Vyšší požadavky na kvalitu stavebního díla vyžadují hlubší znalosti procesů provázejících stádium výstavby. V případě objemných betonových konstrukcí je snahou posledních let blíže a přesněji formulovat proces exotermního vývoje hydratace pojiva. Příspěvek je věnován studiu vybraných nestacionárních tepelných projevů během stádia hydratace.

Rising demands on construction quality require deeper knowledge of the processes accompanying the construction stage. In case of large-volume concrete structures, recent years have witnessed attempts to define the exothermic process of binders hydration more accurately. This paper examines selected non-stationary thermal phenomena occurring during the hydration stage.

Hydrataci cementu jako pojiva v betonu doprovází silný exotermický proces, při němž dochází k uvolnění značného množství tepelné energie (tzv. hydratační teplo). V dřívějších letech byl tento fakt mnohdy opomíjen a v mnoha případech byly objemné železobetonové konstrukce prováděny bez předchozí tepelně-technické bilance, což mělo za následek objemové změny v mikrostruktuře betonu a vznikající rozdílná tahová napětí podmiňující tvorbu trhlin. Dnes se stále více ukazuje, že je třeba tepelně-technické výpočty provádět i u konstrukcí, které nejsou přímo označovány jako masivní, ale jsou na ně kladeny zvýšené kvalitativní požadavky. Jedná se především o konstrukce z vysokohodnotných betonů (HPC), kam lze zařadit betony samozhutnitelné (SCC), vysokopevnostní (HSC) i vodostavební. U těchto betonů je vysoký požadavek na jejich kvalitu a celistvost jejich struktury, proto je nutné zvláště během procesu hydratace omezit všechny negativní vlivy, které mohou způsobit vznik trhlin a poruch ve struktuře cementového kamene. Je třeba zajistit, aby během hydratace cementu nepřekročila jeho teplota přípustnou hranici a je nutné tyto předpoklady ověřit tepelně-technickým výpočtem.

TEPELNĚ-TECHNICKÉ PARAMETRY BETONOVÉ SMĚSI PRO MODELOVÁNÍ TEPELNÉHO ŠÍŘENÍ

Při provádění tepelně-technických výpočtů v oblasti hydratace betonové směsi se jedná o modelování nestacionárního procesu tepelného šíření, které je charakterizováno Fourierovou rovnicí vedení tepla s vnitřními tepelnými zdroji ve tvaru (1), kde: t – teplota [°C], t - čas [s], x,y,z – vzdálenost [m], Q – intenzita vývinu hydratačního tepla [$Jm^{-3}s^{-1}$], l – součinitele tepelné vodivosti [$W.m^{-1}K^{-1}$], c – tepelná kapacita [$Jkg^{-1}K^{-1}$], r – objemová hmotnost [kgm^{-3}].

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial t}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial t}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z \frac{\partial t}{\partial z}\right)+\dot{Q}(x,y,z,\tau)-\rho c\frac{\partial t}{\partial \tau}=0 \qquad (1)$$

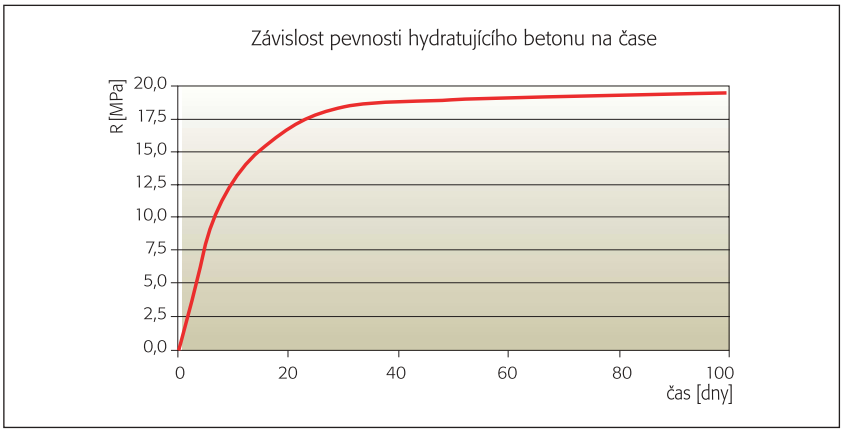
V rovnici (1) vystupuje jako materiálově specifický parametr součinitel teplotní vodivosti α [ms^{-1}], který charakterizuje v látkovém prostředí rychlost vyrovnání teplotní změny. Součinitel teplotní vodivosti α se vyjádří vztahem (2), jako poměr součinitele tepelné vodivosti λ [$Wm^{-1}K^{-1}$], který představuje schopnost materiálu vést teplo a součinu $\rho . c$ [kgm^{-3}; $Jkg^{-1}K^{-1}$], který vystihuje tepelně-akumulační schopnost materiálu. Během hydratace cementu v betonu se mění všechny tři parametry, proto je pro tepelně-technické výpočty nezbytné znát co nejpřesněji časový průběh jejich hodnot. Předpokládáme, že na hranici Γ oblasti Ω jsou zadány smíšené okrajové podmínky. Nechť Γ_1 , Γ_2 jsou nepřekrývající se části hranice Γ oblasti Ω, pro něž platí $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2$. Na části Γ_1 hranice Γ je zadána nehomogenní Dirichletova okrajová podmínka $t_{\Gamma_1} = t(x,y,z,\tau)|_{\Gamma_1}$. Na zbývající části Γ_2 hranice Γ se zadává okrajová Newtonova podmínka ve tvaru (3).

$$\alpha=\frac{\lambda}{\rho\, c} \qquad (2)$$

$$\left[\lambda_x \frac{\partial t}{\partial x}v_x+\lambda_y \frac{\partial t}{\partial y}v_y+\lambda_z \frac{\partial t}{\partial z}v_z+q(x,y,z,\tau)+\alpha(x,y,z,\tau)t-\alpha(x,y,z,\tau)t_\infty\right]\Big|_{\Gamma_2}=0 \qquad (3)$$

TEPELNÁ KAPACITA A OBJEMOVÁ HMOTNOST

Objemová hmotnost hydratujícího betonu se mění spolu s vypařováním záměsové vody z betonu a její hodnota se snižuje po dobu hydratace a i potom, až do dosažení rovnovážného stavu mezi vnitřním vlhkostním obsahem a rovnovážnou sorpční vlhkostí, která je dána podmínkám, jimž je daná konstrukce při své expozici vystavena (teplota, vlhkost). Vzhledem k tomu, že k hlavnímu uvolnění vlhkosti dochází až v pozdější fázi hydratace a že pokles objemové hmotnosti (dlouhodobý) nepřesahuje většinou hodnotu 6 %, není z hlediska tepelně technických výpočtů změna objemové hmotnosti příliš významná. Významněji se projevuje změna tepelné kapacity hydratujícího betonu, protože ke ztrátě záměsové vody je potřebné započítat ještě množství vody, které se naváže do struktury nově vznikajících hydratačních produktů (hydratační vody). K tomuto procesu dochází intenzivně již v rané fázi hydratace cementu, protože především počáteční hydratační produkty mají schopnost vázat vysoké množství vody (etringittrisulfát). Hodnota tepelné kapa-



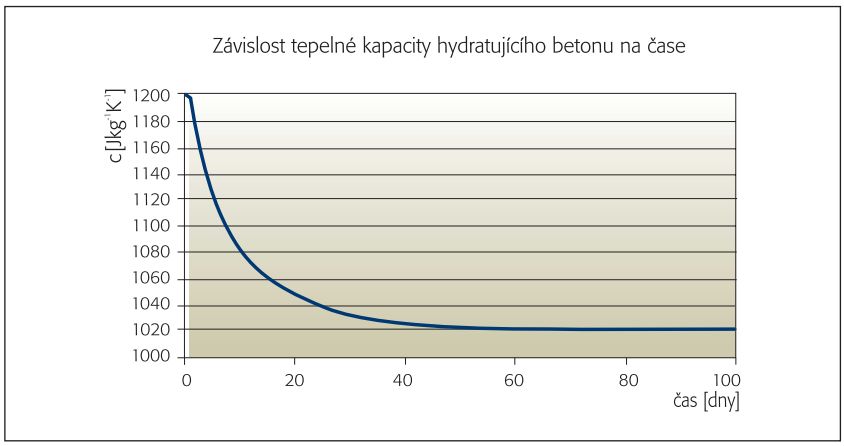
Obr. 1 Graf závislosti nárůstu pevnosti na čase u hydratující betonové směsi
Fig. 1 Dependance of strength increase of the hydrating concrete mixture on time

city čerstvé betonové směsi (při poměrném započítání tepelných kapacit jednotlivých komponent) se pohybuje zhruba kolem 1200 $Jkg^{-1}K^{-1}$ (podle hodnoty vodního součinitele a druhu použitého kameniva), ale tepelná kapacita suchého zhydratovaného betonu činí asi 1020 $Jkg^{-1}K^{-1}$, což vytváří rozdíl více jak 17 %. Vzhledem k tomu, že tepelná kapacita betonu souvisí velice úzce s vývojem jeho vnitřní struktury, lze předpokládat, že průběh poklesu hodnoty tepelné kapacity bude korespondovat s průběhem nárůstu pevnosti betonu (Obr. 1 a 2).

SOUČINITEL TEPELNÉ VODIVOSTI CEMENTOVÉ SMĚSI

Během hydratace cementu dochází k zásadním chemicko-mineralogickým změnám, které jsou současně doprovázené změnou hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ. Z pohledu fázového složení je na počátku hydratace cementová směs složena z kapalné vody a tuhých slínkových minerálů. Během hydratace se část tekuté fáze odpařuje, část zůstává a část se navazuje do struktury kalcium hydrosilikátových minerálů. Vzhledem k tomu, že hodnota součinitele tepelné vodivosti jednotlivých fází je odlišná, mění se tak i hodnota součinitele tepelné vodivosti betonové směsi v závislosti na fázovém složení. Výslednou hodnotu součinitele

$$\lambda = \frac{\lambda_v . V_v + \lambda_s . (1 - V_v - V_z) + \lambda_{vz} . V_z}{V} \quad (4)$$



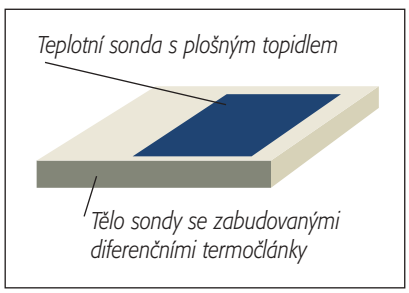
Obr. 2 Graf závislosti tepelné kapacity na čase u hydratující betonové směsi
Fig. 2 Dependance of thermal capacity of hydrating concrete mixture on time

tepelné vodivosti směsi λ lze vystihnout vztahem (4), kde: λ_v – součinitel tepelné vodivosti vody 0,6 $Wm^{-1}K^{-1}$, λ_s – součinitel tepelné vodivosti tuhé fáze [$Wm^{-1}K^{-1}$], λ_{vz} – součinitel tepelné vodivosti vzduchu 0,024 $Wm^{-1}K^{-1}$, V_z – objemové množství vzduchu obsaženého v cementové směsi [-], V_v – množství kapalné fáze, V – objem materiálového fragmentu. Z pohledu mineralogického (mikrostruktury) však dochází během hydratace cementové směsi k velmi složitým procesům. Dochází k přechodu tekuté fáze na pevnou, k vytváření a přetváření krystalických soustav. Tyto procesy jsou matematicky velmi nesnadno popsatelné a ovlivňují spolu s fázovým složením výslednou hodnotu součinitele tepelné vodivosti. Průběh hydratace je specifický pro každý druh cementu a je dán především jeho chemicko-mineralogickým složením, jemností mletí slínku, množstvím vody a dále vnějšími podmínkami hydratace, jako je teplota a vlhkost. Pro laboratorní měření bylo použito nového experimentálního plošného měřidla vyvinutého za podpory grantu FRVŠ IS 210098, protože žádným klasickým postupem není možné sledovat dynamicky hodnotu součinitele tepelné vodivosti u hydratující betonové směsi. Toto měřidlo, které využívá principu regulárního ohřevu, umožňuje dynamicky sledovat hodnotu součinitele tepelné vodivosti hydratující pojivové směsi, aniž by způsob měření ovlivnil průběh (kinetiku) hydratace.

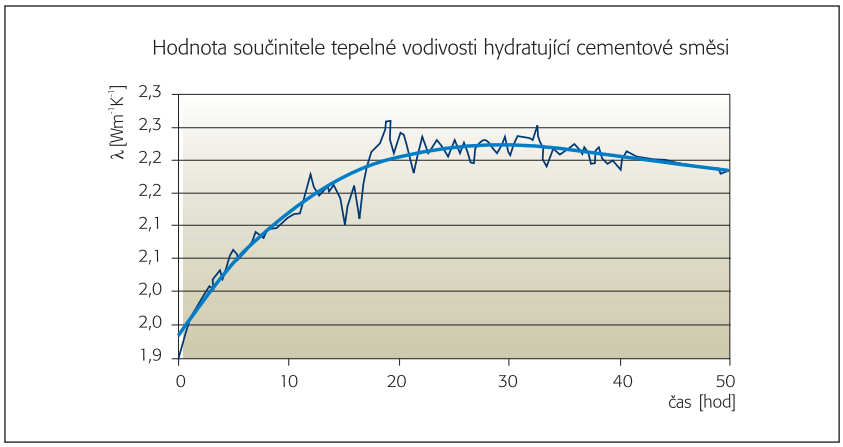
Měření probíhá v tepelně-izolačním boxu, ve kterém je cementová směs částečně izolována od vnějšího prostředí a průběh hydratace tak není ovlivněn výkyvem okolní teploty.

Bezprostředně po uložení cementové směsi do měřícího boxu bylo spuštěno měření řízené automaticky v půlhodinových intervalech po dobu 50 hodin.

Výsledky měření se automaticky ukládaly do datového souboru v počítači. Laboratorní měření bylo provedeno na



Obr. 3 Schéma sondy plošného měřidla pro stanovení hodnoty součinitele tepelné vodivosti stavebních materiálů
Fig. 3 Probe schema of the surface measuring device for determination of the thermal

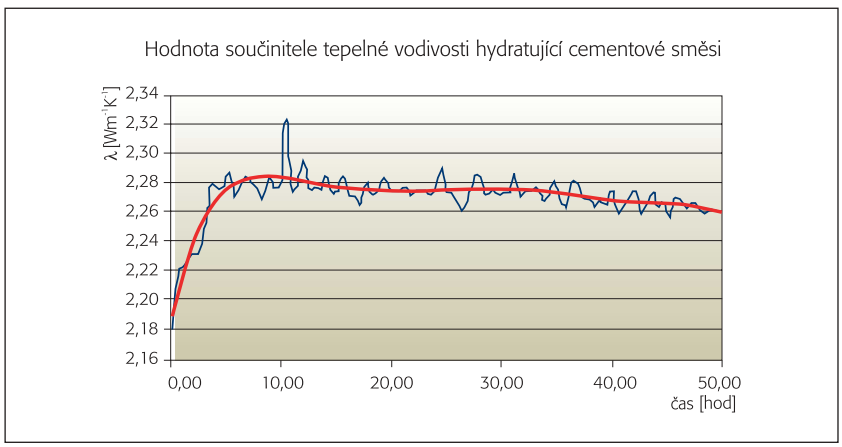


Obr. 4 Graf závislosti hodnoty součinitele tepelné vodivosti na průběhu hydratace betonové směsi o složení cement : plnivo (kamenivo) – 1 : 2

Fig. 4 Dependence of the thermal conductivity coefficient on the hydration process of concrete mixture with the composition cement : filler (aggregate) – 1 : 2

řadě záměsí cementu CEM I 42,5 R (Radotín) a písku 0 – 4 mm s vodním součinitelem w/z = 0,6. Prvním v řadě vzorků byla cementová pasta a postupně byl zvyšován poměr plniva k množství cementu. Vzorky byly ihned po smíšení uloženy do zkušebního boxu. Jako oddělující vrstvy měřící sondy v měřícím boxu a zkušebního vzorku sloužila velmi tenká polyetylénová fólie, u které bylo předpokládáno, že její přítomnost neovlivní naměřenou hodnotu součinitele tepelné vodivosti zkušebního vzorku betonu. Vzorek byl zhutněn vibrací a propichováním do stavu, kdy bylo zaručeno, že se mezi zkušebním vzorkem a sondou plošného měřidla nebudou nacházet žádné vzduchové dutiny, které by ovlivňovaly výsledky měření.

Fyzikální vlastnosti betonových směsí jsou proměnné, protože při jejich utváření působí řada faktorů, které není možné dostatečně přesně formulovat (zejména kvalitu jednotlivých komponent, přesnost dávkování složek, podmínky hydratace pojiva atd.), proto většina naměřených výsledků nese převážně stochastické znaky. Jinak tomu není ani u závislosti hodnoty součinitele tepelné vodivosti na čase u hydratující betonové směsi. Z grafů na obr. 4 a 5 je patrné, že změna hodnoty součinitele tepelné vodivosti *l* činí až 25 %. Při srovnání s tabelovanou hodnotou 1,3 $Wm^{-1}K^{-1}$ (ČSN 73 0540-3) u zhydratované betonové směsi (prostý beton) bylo zjištěno, že během počáteční fáze hydratace pojiva je nejvyšší zjištěná hodnota součinitele tepelné vodivosti během tohoto procesu o 77 % vyšší. Průběh hodnoty součinitele tepelné vodivosti u hydratující pojivové směsi je závislý především na její vnitřní struktuře, ale výsledné hodnoty součinitele tepelné vodivosti betonu ovlivňují také hodnoty součinitele tepelné vodivosti jednotlivých komponent, které se například u plniva (kameniva) podle druhu kameniva mohou pohybovat v rozmezí hodnot *l* = 0,9 až 4,2 $Wm^{-1}K^{-1}$, proto je nutné tyto závislosti před započetím výpočtů experimentálně naměřit na vzorku stejného složení, jako je složení předpokládaného konstrukčního betonu. Nejběžněji používaná kameniva jsou uvedena v tabulce 1.



Obr. 5 Graf závislosti hodnoty součinitele tepelné vodivosti na průběhu hydratace betonové směsi o složení cement : plnivo (kamenivo) – 1 : 3

Fig. 5 Dependence of the thermal conductivity value on hydration process of concrete mixture with the composition cement : filler (aggregate) – 1 : 3

Plnivo / Homina	ρ_v [kgm^{-3}]	λ [$Wm^{-1}K^{-1}$]
Čedič	3200	4,2
Vápenec	2000	1,2
Žula	2500	3,1
Písek	1750	0,95
(Popílek)	(1050)	(0,36)

Tab. 1 Přehled objemové hmotnosti a součinitele tepelné vodivosti vybraných druhů plniv do betonu

Tab. 1 Survey of volume mass and thermal conductivity coefficients of selected filler types for concrete

Při tepelně-technických výpočtech spojených s hydratačními procesy betonových směsí je tedy zapotřebí znát poměrně přesně všechny vstupní tepelně-technické veličiny a u veličin nestacionárních zjistit jejich přesné průběhy pomoci laboratorního měření. V souvislosti s novými vývojovými technologiemi a technickými požadavky na monolitické stavební konstrukce se vytváří nové možnosti přesnější formulace průběhu hydratace a tím i predikce důležitých fyzikálních vlastností betonu po dlouhou dobu jeho následného užívání.

Příspěvek vznikl s podporou grantu FRVŠ IS 20098 a výzkumného záměru CEZ J22/98:261100008.

Ing. Jiří Zach
Doc. Ing. RNDr. Stanislav Šťastník, CSc.
Ústav stavebních hmot a dílců
FAST VUT v Brně
Veveří 95, 662 37 Brno
tel: 05 4114 7507
e-mail: zach.j@fce.vutbr.cz
stastnik.s@fce.vutbr.cz