

VLIV KAMENIVA NA ŠÍŘENÍ VYSOKÝCH TEPLOT V BETONU

AGGREGATE EFFECT ON PROPAGATION OF HIGH TEMPERATURES IN CONCRETE

Patrik Bayer, Jan Podroužek, Břetislav Teplý,
Pavla Rovnaníková, Barbara Kucharczyková
a Pavel Schmid

Chování betonových konstrukcí za extrémních teplot je v současnosti předmětem výzkumu v řadě důležitých oblastí týkajících se bezpečného provozu různých typů konstrukcí – tunelů, chemických provozů, průmyslových či výškových budov, jaderných elektráren, kontejnerů na vyhořelé palivo apod. Navrhování konstrukcí na účinky požáru je oprávněně věnována značná pozornost také prostřednictvím norem, předpisů a odborných publikací. Z těchto základních jmenujeme alespoň ČSN EN 1991-1-2 [1], ČSN EN 1992-1-2 [2] a *fib* Bulletin č. 38 [3] a č. 46 [4]. Odtud pak mj. vyplývá důležitost tzv. teplotní analýzy, kterou se předkládaný text zabývá zejména s ohledem na vliv kameniva; je uvedeno též ověření výpočetního řešení srovnáním s laboratorními experimenty. ■ *The behavior of concrete structures under extreme temperatures is currently being investigated in several important fields concerning the safe operation of various types of structures – tunnels, chemical plants, industrial or high-rise buildings, nuclear power plants, containers of spent fuel etc. Structural design to the effect of fire is rightly given considerable attention also through standards, regulations and professional publications. From these fundamental norms we would like to name at least ČSN EN 1991-1-2 [1], ČSN EN 1992-1-2 [2] and fib Bulletins No. 38[3] and 46[4]. As this text presents, this implies the importance of thermal analysis, particularly with regard to the impact of aggregate; the validation of numerical solution is provided by comparison with laboratory experiments.*

Zásady návrhu konstrukce na účinky požáru uvádí norma [1]: úplný analytický postup bere v úvahu chování nosného systému při vysokých teplotách, možné vlivy tepla a příznivé účinky aktivních a pasivních protipožárních opatření, spolu s nejjistotami spojenými s těmito charakteristikami a s důležitostí konstrukce dle možných následků jejího porušení. Uvádí se:

- přístup založený na předepsaných pravidlech (tzv. preskriptivní),
- přístup založený na užitných vlastnostech (performance-based přístup – obecněji viz [5]).

První přístup používá pro stanovení tepelného zatížení nominální požár a opírá se přitom o předepsané geometrické i materiálové údaje, je tedy značně restriktivní, nelze dobře uplatnit inženýrské myšlení a volbu případných alternativ.

Přístup druhý využívá inženýrské hodnocení požární bezpečnosti a vztahuje se k tepelnému zatížení vycházejícímu z fyzikálních a chemických parametrů; umožňuje tedy bezpečnější a ekonomičtější návrh.

Dle normy [1] se postupuje při návrhu konstrukce na účinky požáru tak, že nejprve se stanoví odpovídající návrhový požární scénář a na jeho základě se provede teplotní i mechanická analýza (podrobněji viz např. [6]). Obecným cílem požární ochrany je omezit rizika jednotlivců i společnosti; s tím související požární odolnost konstrukce je definována jako doba, po kterou je konstrukce schopna odolávat teplotám působícím při požáru, aniž by došlo k porušení její funkce. Takováto odolnost se ověřuje mezními podmínkami dle [1] buďto

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ} \quad (1)$$

nebo z hlediska únosnosti:

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t} \quad (2)$$

resp. z hlediska teploty:

$$T_d \leq T_{cr,d} \quad (3)$$

kde $t_{fi,d}$ je návrhová doba požární odolnosti; $t_{fi,requ}$ požadovaná doba požární odolnosti; $R_{fi,d,t}$ návrhová hodnota únosnosti prvku při požární situaci v čase t ; $E_{fi,d,t}$ návrhová hodnota příslušných účinků zatížení při požární situaci v čase t ; T_d návrhová hodnota teploty materiálu a $T_{cr,d}$ návrhová hodnota kritické teploty materiálu.

Ověřování podmínky (3) se opírá jen o teplotní analýzu, zatímco podmínky (1) a (2) vyžadují provedení teplotní i mechanické analýzy. Dokumenty [2], [4] a skriptum [6] přitom popisují několik stupňů návaznosti a přesnosti postupů (využití požárních zkoušek zde nediskutujeme):

- nejjednodušší, preskriptivní metodu „tabulkovou“, kdy je k dispozici souprava přípustných hodnot geometrických parametrů průřezů (vč. krytí výztuže);
- metodu „izotermie 500 °C“, která vychází z předpokladu, že beton zahřátý nad 500 °C je zcela vyřazen z nosné funkce, pod 500 °C naopak plně funkční;
- „zonální“ metodu, která zavádí poněkud realističtější redukci průřezu ve více zónách, kde charakteristiky betonu (pevnost v tlaku a modul pružnosti) závisí na rozložení teploty po průřezu;
- termo-mechanické aplikace metody konečných prvků či sofistikované přístupy integrující termo-hydro-mechanické metody – např. [7], [8], resp. nedávné práce [9] či [10]. Připomeňme zde, že v [8] je popsána velmi komplexní a rozsáhlá práce s výsledky experimentálními i numerickými, které vznikly v rámci evropského výzkumného programu HITECO; beton je modelován jako vícefázový materiál (pevná, plynná a tekutá fáze), neumožňuje však specificky sledovat vliv kameniva.

Jde tedy vesměs o řešení na úrovni průřezu, odkud je obvykle nutno přejít dále na posuzování konstrukčních prvků či jejich soustav. Aplikaci druhé a třetí metody vždy předchází **teplotní analýza**. Je nutná znalost teplotních a mechanických vlastností materiálů [2] – pevnostních a deformačních vlastností betonu (závislosti na teplotě se rozlišují též pro betony s křemičitým či vápencovým kamenivem), vlastností betonářské či přepínací výztuže ovlivněné vysokými teplotami, dále např. znalost hodnot teplotní roztažnosti, měrného tepla a tepelné vodivosti.

Připomeňme, že materiál betonu je – velmi zjednodušeně – tvořen cementovým tmelem a kamenivem. Tyto složky mají odlišné tepelné vlastnosti, což by mělo být při analýze uvažováno. Na druhé straně jsou znalosti o vlivu těchto okolností doposud neúplné a vykazují značnou variabilitu. Kromě právě zmíněného vlivu kameniva na hodnoty pracovního diagramu betonu lze uvést další poznatky:

- v původním znění Eurokódu EN 1992-1-2 z roku 1995 se uvádějí v Appendixu A vztahy pro součinitele vedení tepla λ_c betonu jako funkce teploty T ; rozlišuje se beton s křemičitým, vápencovým a lehčeným kamenivem. Jsou tam také jako orientační uvedeny konstantní hodnoty 1,6; 1,3 a 0,8 [W/mK] těchto tří druhů betonu. Ve stávajícím znění [2] je funkce $\lambda_c(T)$ uvedena již jen jako horní a dolní mez pro normální beton;

- jinde v odborné literatuře lze nalézt hodnoty součinitele vedení tepla betonů běžných tříd v rozmezí od 0,4 do 2,25 [W/mK] [11]. Přitom ani vliv objemu kameniva či jeho frakcí nebyl stanovován, bylo ale poznamenáno, že typ kameniva a složení směsi pro výrobu betonu může hrát významnou roli;
- v práci [12] byla na základě experimentů nalezena přibližně lineární závislost tepelné vodivosti betonu na objemu kameniva, přitom zvýšení objemu z 10 na 70 % vedlo k 2,3násobnému zvýšení vodivosti. Tyto experimenty byly prováděny jen při teplotách do 60 °C; z hlediska požárních vlastností jsou tedy neprůkazné;
- v lit. [3] je uveden rozsah hodnot tepelné vodivosti pro kamenivo v rozmezí 0,7 až 4,2 W/mK, pro vodou nasycený beton od 1 do 3,6 a pro cementovou pastu 1,1 až 1,6 W/mK. Je zde upozorněno na problematiku měření tepelné vodivosti a odtud plynoucí rozdíly mezi měřeními obdobných vzorků různými pracovišti (až s násobkem 2);
- v normě [2], příloha B, je také zahrnuta mezi zjednodušenými výpočtovými metodami řešení betonových konstrukcí tzv. metoda „izotermie 500 °C“ (zmíněná již výše). V této metodě se předpokládá, že beton, v němž teplota dosáhne hranice 500 °C, již k únosnosti průřezu nepřispívá. Ve [3] je však namítáno, že tento závěr je založen jen na zkouškách betonů s křemičitým kamenivem a pro jiná kameniva může být hranice dosti odlišná – posunuje se až k hodnotám menším než 400 °C. Poznamenejme ještě, že v normě [2] v příloze A jsou připojeny teplotní profily pro řadu průřezů jednoduchých tvarů a způsobů vystavení požáru; s tím související hodnota součinitele vedení tepla je tam uvedena zřejmě chybně jako nereálně vysoká.

Zdá se tedy, že teplotní analýza betonu při vysokých teplotách bude mj. záviset také na frakcích a objemu kameniva, přitom toto hledisko není v normách dostatečně zohledněno. Cílem prezentovaného výzkumu je proto přinést další poznatky, příp. vytvořit nástroj pro studium těchto závislostí a zlepšit tak posuzování doby požární odolnosti, resp. návrhových hodnot teploty materiálů.

Následující text se proto zabývá teplotní analýzou průřezů betonových konstrukčních prvků a klade přitom důraz na stanovení vlivu kameniva. Výsledky analýzy pomocí metody celulárních automat (CA) jsou porovnány s výsledky laboratorních experimentů, které byly pro tyto účely navrženy a provedeny.

LABORATORNÍ EXPERIMENTY

Zkušební tělesa

Pro možnost srovnávání a hodnocení výsledků numerické 2D teplotní analýzy betonu vystavenému působení vysokých teplot i s ohledem na vliv kameniva, byly vyrobeny zkušební trámce normového rozměru 100 × 100 × 400 mm, jejichž část byla použita pro zkoušky sledování průběhu teplot v betonu a na zbývajících tělesech byly stanoveny základní mechanické vlastnosti betonu. Pro určení orientační pevnosti betonu byly vyrobeny zkušební krychle o hraně 150 mm.

V první fázi výzkumu byla zkušební tělesa vyrobena ze dvou druhů betonu lišících se druhem použitého kameniva. V prvním případě se jedná o kamenivo z lomu Olbramovice (granodiorit), které se běžně využívá pro výrobu betonu v Jihomoravském kraji. Ve druhém případě bylo pro výrobu zvoleno čedičové kamenivo z lomu Bílčice. Tento druh kameniva lze s výhodou použít zejména při výrobě vysokopevnostních betonů [13]. Vzhledem k tomu, že se z organizačních důvodů nepodařilo u tohoto konkrétního kameniva zajistit stanovení

součinitele tepelné vodivosti, a vzhledem k velkému rozptylu hodnot tohoto součinitele uváděných v literatuře (tab. 2), výsledky teplotní analýzy pro příslušná zkušební tělesa zde podrobně nekomentujeme. Poznamenejme současně, že jsme zatím nepřistoupili k vyšetřování betonu s vápencovým kamenivem, protože toto je v ČR jen výjimečně používáno k výrobě betonu, vápenc je u nás využíván pro výrobu pojiv, pro odsiřování a další aplikace. V jiných státech je beton s vápencovým kamenivem běžný, a proto také (jak bylo naznačeno již v úvodu) jsou v Eurokódu [2] uváděny informace o materiálových vlastnostech betonu nejen s křemičitým, ale i vápencovým kamenivem.

Oba druhy betonu byly vyrobeny ve dvou variantách složení, a to jako beton dvoufrakční se zrnem kameniva do 8 mm (OB_0/8) a jako třífrakční beton s kamenivem do 16 mm (OB_0/16). Návrh složení betonů byl vždy koncipován tak, aby obě varianty betonu obsahující kamenivo stejného původu spadaly do stejné pevnostní třídy. Bližší specifikace vyrobených betonů, zejména objemové zastoupení cementového tmele a kameniva v betonu, je uvedena v tab. 1.

Pro přesnější interpretaci dosažených výsledků byla pro obě kameniva stanovena hodnota objemové hmotnosti hydrostatickým vážením sypaného materiálu frakce 8/16 mm a pro granodiorit také hodnota součinitele tepelné vodivosti přístrojem SHOTHERM na vzorku odebrané horniny, který pracuje na principu tzv. horkého drátu. Výsledky zkoušek jsou shrnuty v tab. 2.

Za účelem získání lepší představy o vlastnostech zkušebního materiálu byly v rámci experimentů stanoveny základní mechanické charakteristiky zkoušených betonů. Průměrné hodnoty objemových hmotností, pevností v tlaku a modulů pružnosti v tlaku jsou shrnuty v tab. 3. Je nutné poznamenat, že vlhkost obsažená v betonu má zpravidla zásadní vliv na konečné hodnoty výše uvedených parametrů; pro vyloučení tohoto jevu byly proto všechny zkoušky provedeny na tělesech vysušených do ustálené hmotnosti při teplotě 105 °C. Pro představu lze uvést, že hodnota dynamického modulu pružnosti všech vyrobených betonů po vysušení klesla o více než 10 GPa.

Měření teploty

Pro sledování průběhu teploty ve zkušebních tělesech tak, aby ji přitom bylo možno dobře popsat na 2D oblasti, bylo navrženo a sestaveno zařízení, kde je zahříván pouze jeden povrch vzorku 100 × 100 mm (obr. 1 a 2). Boční stěny byly dokonale tepelně izolovány. Měření teploty zajišťovaly termočlánky typu K, umístěné uprostřed vzorku ve vzdálenostech 20, 40, 60 a 80 mm od zahřívajícího povrchu; kromě toho jeden termočlánek měřil teplotu těsně u zahřívajícího povrchu vzorku. Hroty termočlánků v betonu byly pro lepší přenos teploty zalaty do vysokoteplotního tmele (Omegabond 600). Termočlánky byly spojeny s modulem sběru dat (Omega OM-USB-TC) a s počítačem.

Vzorek byl zahříván vždy na teplotu 1000 °C s hodinovou výdrží, gradient nárůstu teploty 9 °C/min (viz horní křivka na obr. 3). Sběr dat byl prováděn po 5 s. Výsledné křivky nárůstu teplot popisují časově závislé rozložení teploty ve čtyřech bodech uvnitř vzorku při jeho ohřevu z jedné strany; sestupné větve reflektují také průběh ochlazování vzorku a dobu otevírání pece.

Po skončení zahřívání a po vychladnutí vzorku bylo možno na povrchu vystaveném vysokým teplotám pozorovat trhlinky s šířkami do 40 μm, bez náznaků odštěpování betonu

Tab. 1 Objemové zastoupení cementového tmele a kameniva v použitých betonech
 Tab. 1 Volumetric representation of cement paste and aggregate in the concretes used

Ozn. betonu		Složky betonu na 1 m ³	Cementový tmel [m ³] (cement + voda + plastifikátor)	Kamenivo [m ³]			
				0/4	4/8	8/16	Σ
OB_0/8	Olbramovice	Bílčice	0,347	0,425	0,229	-	0,653
OB_0/16	Olbramovice	Bílčice	0,315	0,335	0,130	0,219	0,685

Tab. 2 Vlastnosti použitého kameniva
 Tab. 2 Properties of used aggregates

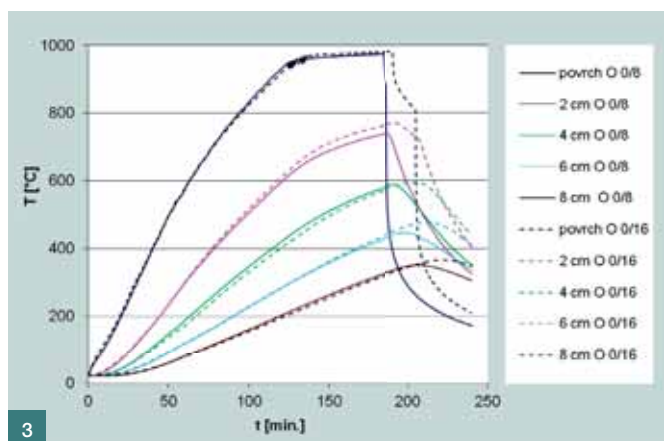
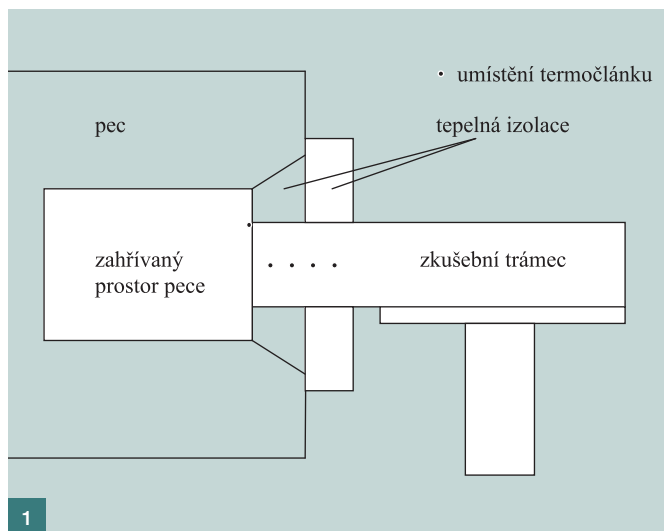
Lokalita	Druh horniny	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W/m.K]
Olbramovice	granodiorit	2 600	2,55* (3,1**)
Bílčice	čedič	3 000	(2,9 až 4,2***)

* hodnota stanovena experimentálně v laboratořích ÚTHD VUT FAST na vzorku odebrané horniny
 ** hodnoty uváděné v odborné literatuře pro žulu objemové hmotnosti 2 600 kg/m³
 *** v odborné literatuře pro čedič objemové hmotnosti 2 880 až 3 200 kg/m³ (ale byly nalezeny i údaje <2,9 W/mK).

Tab. 3 Základní mechanické vlastnosti vyrobených betonů
 Tab. 3 Basic mechanical properties of produced concretes

	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]	Modul pružnosti [MPa]	
			statický	dynamický
OB_0/8_Olbramovice	2 180	66,8	26 900	29 500
OB_0/16_Olbramovice	2 240	68,9	30 400	31 100
OB_0/8_Bílčice	2 410	76	31 300	34 300
OB_0/16_Bílčice	2 500	75,5	34 100	38 100

Pozn.: Všechny uvedené charakteristiky byly stanoveny na zkušebních tělesech vysušených do ustálené hmotnosti při teplotě 105 °C



Obr. 1 Zjednodušené schéma experimentu
 Fig. 1 Simplified scheme of the experiment

Obr. 2 Skutečné zařízení
 Fig. 2 The real device

Obr. 3 Teplotní profily, kamenivo 0/8 i 0/16 (Olbramovice)
 Fig. 3 Temperature profiles, aggregates 0/8 and 0/16 (Olbramovice)

Obr. 4 Povrch vzorku po výpalu; detail s měřenou trhlinou (Olbramovice)
 Fig. 4 The surface of the sample after firing; detail with measured crack (Olbramovice)

Obr. 5 Výsledky simulace teplotních profilů pro kamenivo 0/8 (čárkovaně výsledky numerické simulace)
 Fig. 5 Simulation results of temperature profiles for aggregates 0/8 (dashed line represents numerical simulations)

(obr. 4); to je zřejmě důsledkem toho, že vzorky byly před zahříváním zcela vysušeny a technické parametry pece umožnily jen relativně pomalý nárůst teploty. Trhlinky vznikly v důsledku tepelného rozkladu hydratovaných fází cementu.

Z obrázku 3 je mj. patrné, že:

- dle očekávání mají křivky nárůstu teploty uvnitř betonového vzorku podobný tvar jako křivka pro zahřívání povrch, klesající se vzdáleností (hloubkou) od povrchu;
- rozdílné frakce přinášejí jen nevýznamný rozdíl průběhu teplot. V tomto smyslu lze zřejmě větší rozdíly očekávat při srovnání případů různého objemového zastoupení kameniva v betonové směsi – k tomu doposud laboratorní zkoušky nebyly provedeny. Představu o tom lze však s výhodou získat pomocí matematické simulace (viz dále).

Byly provedeny i pokusy s betony s čedičovým kamenivem a dospělo se k obdobným poznatkům; z důvodů výše uvedených (i z důvodů úspory místa) zde nejsou tyto výsledky prezentovány.

Teplotní analýza

Teplotní analýza se rozumí výpočet/modelování šíření teploty v nosných prvcích v čase, vyvolané tepelným zatížením (požární křivky, tj. závislosti teploty a času). Nejčastěji se vyšetřují průřezy konstrukčních prvků. Přitom se k popisu vedení tepla obvykle využívá Fourierův model, který za předpokladu izotropního a homogenního tělesa, ve kterém se nenachází zdroj tepla, je představován diferenciální rovnicí

$$D\Delta T = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

přitom tepelná difusivita $D(T) = \lambda/(c\rho)$, kde λ je tepelná vodivost [W/m K], která je funkcí teploty, c je měrné teplo [J/kg K] závislé na teplotě a vlhkosti a ρ je objemová hmotnost.

Pro řešení této úlohy sice existují i jiné numerické metody, simulace s využitím techniky CA však přináší řadu výhod, a to jednoduchost a současně univerzalitu řešení, a zejména možnost zohlednit strukturu materiálu (např. u betonu druh a velikost kameniva) a různé okrajové podmínky. Jan Podroužek vypracoval softwarový nástroj CATMET [14], který používá techniku CA pro simulaci řešení rovnice (4) v úlohách 2D s tím, že popis topologie materiálu ve čtvercové síti CA se redukuje na dva komponenty (kamenivo, tmel). Přitom rozmístění a struktura kameniva se do této sítě znázorní pomocí navrženého algoritmu na základě aktuální fotografie řezu analyzovaného betonového vzorku. Jinou variantou nástroje CATMET je možnost tvorby sítě pomocí speciálního generátoru, který vytváří náhodné uskupení kameniva. Grafické výstupy obsahují mj. barevné vyznačení ploch stejné teploty.

Na základě fotografií řezů zkušebních trámečků vyrobe-

ných s kamenivem Olbramovice (ukázka je vložena na pozadí obr. 6) byla provedena výpočetní simulace ohřevu vzorků obdobným nárůstem teplot, jako při pokusech v peci pro případy kameniva 0/8 i 0/16. Hodnoty vlastností kameniva byly převzaty z tab. 2, pro cementový tmel bylo uvažováno $\lambda = 1,1$ W/mK, $c = 850$ J/kgK a $\rho = 1\,850$ kg/m³. Výsledné teplotní profily (pro stejné hloubky, v jakých bylo prováděno měření v peci) ukazují velmi dobrou shodu s výsledky měření na zahříváném trámečku pro beton s frakcí 0/8 (podobně to bylo i pro 0/16, křivky zde neuvádíme) (obr. 5). Byla použita síť buněk 200 × 200.

Výsledky prezentované na obr. 5 byly získány CA simulací při uvažování funkční závislosti difusivity D , tj. $D(T)$ s využitím funkcí pro c a λ uvedených v normě [2]; přitom D bylo „homogenizováno“. Nutno ale poznamenat, že i při použití konstantní hodnoty D odpovídající teplotě 20 °C bylo dosaženo jen nevýznamných změn ve výsledcích, proto je zde neuvádíme. Rozsah tohoto článku neumožňuje podrobný popis výpočetního algoritmu, základní princip je popsán v [17] a rozšířen o další aspekty v [14], [15] a [16].

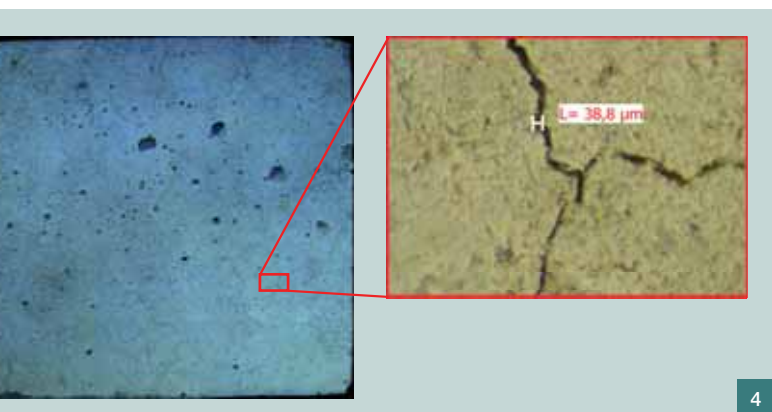
Z uspořádání experimentu vyplývá následující: úlohu by bylo také možno modelovat jako 1D v případě, že bychom uvažovali dokonalou tepelnou izolaci celých bočních stěn a nebyl by zahrnut vliv kameniva – tedy jako homogenní případ s reflektujícími okrajovými podmínkami [15]. Výsledky prezentované na obr. 5 a 6 vychází z 2D idealizace problému, umožňující simulovat vliv kameniva na základě fotografie charakteristického řezu. Je ale zřejmé, že pro úplnou virtuální rekonstrukci experimentu by byl nutný 3D popis úlohy, z výpočetního hlediska ovšem značně náročný vzhledem k vysokému počtu buněk nutných k věrnému vyjádření vnitřní struktury betonu jako dvousložkového kompozitu [14].

V souvislosti s modelováním betonu jako heterogenního materiálu je dále nutno poznamenat, že takový přístup by měl smysl pokud:

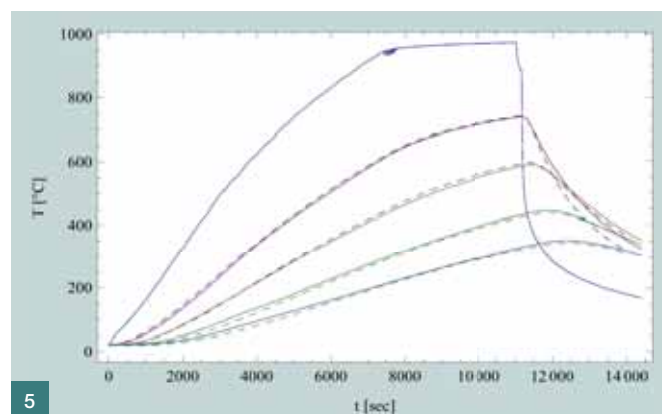
- by velikost frakce nebyla zanedbatelná vzhledem k velikosti prvku (což nebývá případ inženýrských aplikací betonu),
- si klademe za cíl objektivním způsobem kvantifikovat vliv vnitřního uspořádání kameniva v betonu na jeho teplotní nebo jiné užitné vlastnosti.

Je také zřejmé, že v takovém případě by potom bylo třeba přejít k pravděpodobnostním výpočtům, kde lze s výhodou uplatnit např. generátor vnitřní struktury.

Vzhledem k výše uvedenému je třeba chápat obr. 5 jako nejlepší dosaženou shodu s experimentem při relativně nízké výpočetové náročnosti, kde explicitně modelované dostupné informace o vnitřní povaze struktury, tj. fotografie řezu, vedly ke stejným závěrům jako simulace homogenního průřezu se zprůměrovanými vnitřními charakteristikami, založe-



4



5

nými též na fotografiích řezu. Na obr. 6 je znázorněn vliv kameniva na teplotní izočáry a odpovídá výsledkům dle obr. 5 pro čas 7 000 s. Vzhledem k velkému spádu teploty jsou izočáry škálovány v logaritmickém měřítku. Ilustrativní fotografie průřezu pro frakci 0/16 je na pozadí obr. 6 (poněkud zmenšeno). I v horní části obrázku, tj. v oblasti vzdálenější od zahřívajícího okraje, je patrna nerovnoměrná distribuce teploty vlivem rozmístění kameniva, i když méně výrazná než u zahřívajícího povrchu.

Programem CATMET byla také provedena na ilustrativním příkladu studie vlivu objemu kameniva [14] pro 78, 51 a 22 % (objemově); hodnoty λ pro kamenivo a tmel zde byly uvažovány v poměru 3,3. Na obr. 7 uvádíme průběh teploty v bodě o hloubce 1/10 vyšetřované čtvercové oblasti; v tomto případě je patrný relativně značný vliv objemu kameniva na teplotní profil. Rozmístění kameniva přitom bylo generováno pomocí výše zmíněného algoritmu.

ZÁVĚREČNÉ POZNÁMKY

Předložená studie potvrdila, že simulační technikou celulórních automat lze velmi věrně modelovat působení vysokých teplot na betonové prvky. To může výhodně usnadnit a urychlit studium těchto jevů.

Vyhodnocením a srovnáním výsledků laboratorního sledování působení vysokých teplot na betonové vzorky ze dvou druhů kameniva (granodiorit, čedič) s CA simulací se uká-

zalo, že vliv velikosti kameniva má zanedbatelný vliv. Zdá se ale, že výraznější vliv může mít objem kameniva ve směsi zřejmě v případech, kdy poměr součinitelů tepelné vodivosti pro kamenivo a tmel bude větší.

Autoři mají v plánu provést obdobné studie pro další druhy kameniva, zejména kameniva na vápencové bázi.

Výsledek byl získán v rámci činnosti projektu 1M0579 – výzkumné centrum CIDEAS, financovaného Ministerstvem školství ČR.



Ing. Jan Podroužek



Prof. Ing. Břetislav Teplý, CSc., FEng.
Prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.



Ing. Barbara Kucharczyková, Ph.D.

Ing. Pavel Schmid, Ph.D.

oba: Ústav stavebního zkušebnictví

Stavební fakulta VUT v Brně



Ing. Patrik Bayer, Ph.D.



vřichni: Výzkumné centrum CIDEAS
Stavební fakulta VUT v Brně

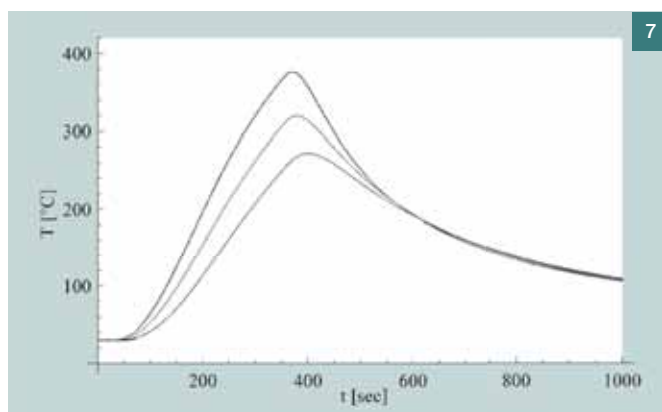
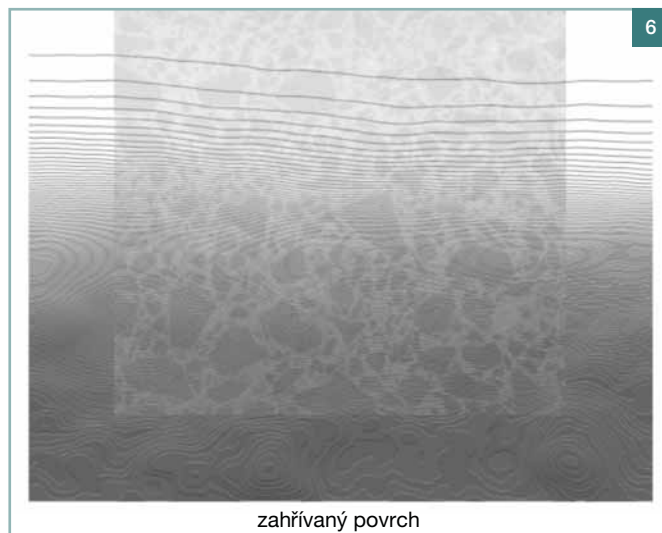


Text článku byl posouzen odborným lektorem.

Obr. 6 Vizualizace výsledku simulace – teplotní izočáry v čase 7 000 s

Fig. 6 Visualization of simulated results – temperature isolines at time 7 000 s

Obr. 7 Vliv objemu kameniva (78, 51 a 22 %) Fig. 7 Effect of aggregate volume (71, 51 and 22 %)



Literatura:

- [1] ČSN EN 1991-1-2 Zatížení konstrukcí – Část 1-2: Obecná zatížení – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru, CEN, 2002
- [2] ČSN EN 1992-1-2 Navrhování betonových konstrukcí Část 1.2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru, CEN, 2004
- [3] *fib* Bulletin No. 38: Fire design of concrete structures – materials, structures and modeling, 2007
- [4] *fib* Bulletin No. 46: Fire design of concrete structures – structural behavior and assessment, 2008
- [5] *Teplý B.*: Performance-based navrhování betonových konstrukcí a specifikace betonu. Beton TKS 2/2009, s. 42–45
- [6] *Procházka J., Štefan R., Vašková J.*: Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru. Učební text ČVUT Praha, 2010
- [7] *Bažant Z. P., Thonguthai W.*: Pore pressure in heated walls – theoretical prediction. Magazine of Concrete Research, 31(107), 67–75, 1979
- [8] *Khoury G. A. et al.*: Modelling of Heated Concrete. Magazine of Concrete Research 54, No. 2, 2002, 77–101
- [9] *Biondini F., Nero A.*: A Cellular Beam Element for Nonlinear Analysis of Concrete Structures under Fire, Journal of Structural Engineering, ASCE, 5 (137), 545–559, 2011
- [10] *Beneš M., Štefan R.*: Povrchové odštěpování betonových konstrukcí při požáru, Stavební obzor, 6/2011, 161–166
- [11] *Kodur V., Dwaikat M. M., Dwaikat M. B.*: High-Temperature Properties of Concrete for Fire Resistance Modeling of Structures, ACI Material Journal, September-October 2008, 517–524
- [12] *Kim K. H., Jeon S. E., Kim J. K., Yang S.*: An experimental study on thermal conductivity of concrete, Cement and Concrete Research 33 (2003) 363–371
- [13] *Terzijski I.*: Technologické aspekty vývoje a aplikace vysokopevnostního betonu v podmínkách České Republiky – Část I. Úvod a složky vysokopevnostního betonu. Beton TKS 1/2011, s. 54–63
- [14] *Podroužek J., Vořechovská D., Teplý B.*: Aggregates effect on heat transfer properties: Numerical experiments, In Proc. Non-Traditional Cement & Concrete IV (edit. Bílek V., Keršner Z.), Brno, 2011, 196–205
- [15] *Podroužek J., Teplý B.*: Modelling of chloride Transport in concrete by cellular automata, Engineering Mechanics, Vol. 15, 2008, No.3, p. 213–222
- [16] *Vořechovská D., Podroužek J., Chromá M., Rovnaníková P., Teplý B.*: Modelling of chloride concentration effect on reinforcement corrosion, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2009, Vol. 24, 446–458
- [17] *Wolfram S.*: Cellular Automata and Complexity – collected papers, www.stephenwolfram.com