

# EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM CHOVÁNÍ RŮZNÝCH DRUHŮ CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ VYSTAVENÝCH POŽÁRU

## ■ EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF BEHAVIOUR OF VARIOUS TYPES OF CEMENTITIOUS COMPOSITES EXPOSED TO FIRE

Radek Štefan, Marek Foglar,  
Josef Fládr

V článku je popsána požární zkouška různých druhů cementových kompozitů, jejímž cílem bylo zjistit chování těchto materiálů při vystavení vysokým teplotám. Zkouška byla provedena v roce 2013 jako součást rozsáhlého experimentálního programu realizovaného v rámci projektu bezpečnostního výzkumu Ministerstva vnitra České republiky. Výsledky zkoušky byly využity při návrhu následných experimentů plného rozsahu a přinesly zajímavé informace o vlastnostech netradičních a inovativních materiálů. ■ In the paper, a fire test of various types of cementitious composites is described. The aim of the experiment was to describe behaviour of the investigated materials exposed to high temperatures. The test was performed in 2013 as a part of an extensive experimental program performed within the framework of a security research project supported by the Ministry of Interior of the Czech Republic. The results obtained by the experiment have been utilized for the subsequent full-scale tests and they also provide interesting information about the properties of non-traditional and innovative materials.

Mezi klíčové faktory ovlivňující požární odolnost konstrukcí patří fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti použitých materiálů [1], [2], [3]. Jedná se zejména o hořlavost (resp. třídu reakce na oheň), tepelnou vodivost, objemovou hmotnost a měrnou tepelnou kapacitu (tyto tři vlastnosti určují rychlost a úroveň zahřívání daného materiálu, a tedy i příslušného konstrukčního prvku), pevnostní a přetvárné charakteristiky v závislosti na teplotě (vyjádřené příslušnými pracovními diagramy, redukčními součiniteli, reziduálními pevnostmi apod.) a v případě betonu také náchylnost k odštěpování povrchové vrstvy [1 až 7]. Pro běžné druhy betonu jsou uvedené vlastnosti poměrně uspokojivě popsány v odborné literatuře a implementovány v příslušných návrhových normách (reference uvedené výše), avšak v souvislosti s aktuálním překotným vývojem nových druhů betonu (vysokohodnotné, lehké a jiné speciální betony, betony s vlákny, betony s recyklovaným kamenivem nebo jinou recyklovanou složkou) a hledáním možností jejich nového

využití (např. protihlukové stěny a obklady, ochranné prvky snižující následky výbuchu, nárazu nebo jiné nehodové události) je nutné zaměřit se také na výzkum těchto netradičních materiálů a aplikací, např. [8 až 13].

Jako součást rozsáhlého experimentálního programu v rámci projektu bezpečnostního výzkumu Ministerstva vnitra ČR byla v roce 2013 provedena požární zkouška vzorků z různých druhů cementových kompozitů za účelem zjištění jejich chování při vystavení vysokým teplotám. Výsledky zkoušky byly využity při návrhu následných experimentů plného rozsahu a přinesly zajímavé informace o vlastnostech netradičních a inovativních materiálů. Popis přípravy, průběhu a vyhodnocení uvedené zkoušky je předmětem tohoto článku.

### ZKOUŠENÉ MATERIÁLY

Cílem experimentu bylo ověření chování (odštěpování, poškození) zkušebních vzorků z dvanácti různých druhů cementových kompozitů při vystavení požáru podle normové teplotní křivky a stanovení příslušných vlastností použitých materiálů. Byly testovány cementové kompozity, které lze zařadit do pěti základních skupin.

První skupinu tvoří běžně využívaný beton třídy C30/37, pro který byly navrženy tři varianty: referenční (materiál č. 1), beton s polypropylenovými vlákny s délkou 6 mm a průměrem 18  $\mu\text{m}$  – dále označovány jako PP vlákna 6/0,018 (materiál č. 2) a beton s polypropylenovými (polyetylen + polypropylen) vlákny s délkou 55 mm a průměrem 0,48 mm – dále označovány jako PE/PP vlákna 55/0,48 (materiál č. 3).

Druhou skupinu tvoří lehký beton LC30/33, který byl opět testován ve třech variantách: referenční (materiál č. 4), s PP vlákny 6/0,018 (materiál č. 5) a s PE/PP vlákny 55/0,48 (materiál č. 6).

Třetí skupina kompozitů měla nahrazené přírodní kamenivo betonovým recyklátem a byla provedena ve dvou variantách: referenční beton (materiál č. 7) a beton ztužený PE/PP vlákny 55/0,48 (materiál č. 8), přičemž množství vláken v tomto materiálu bylo ve srovnání s ostatními případy zvýšeno přibliž-

ně na dvojnásobek (aby bylo dosaženo obdobných mechanických vlastností jako u ostatních materiálů s vlákny).

Do čtvrté skupiny byly zařazeny mezerovité betony s umělým lehkým kamenivem (dále LWAC) frakce 1–4 (materiál č. 9), resp. 4–8 (materiál č. 10).

Pátou skupinu tvoří nové materiály vyvinuté v rámci řešeného výzkumného projektu: beton s umělým lehkým kamenivem a přídavkem odpadní textilní drti (materiál č. 11) a beton s drtí z odpadních minerálních vláken (materiál č. 12).

Přehled materiálů a jejich charakteristik je uveden v tab. 1. Objemové hmotnosti jednotlivých materiálů byly stanoveny vždy jako průměr z hodnot změřených na třech zkušebních krychlicích těsně před provedením požární zkoušky. Hmotnostní vlhkosti materiálů v okamžiku zkoušky se vztahují ke zkušebnímu krychlím a byly určeny gravimetrickou metodou také vždy jako průměry z hodnot vypočítaných na základě hmotností zkušebních krychlí před zkouškou a po zkoušce (za předpokladu, že po zkoušce se materiál uvažuje jako vysušený). Požární zkouška vzorků z materiálů s takto vysokou vlhkostí byla zvolena záměrně, neboť jedním z cílů zkoušky bylo také sledování vlivu vlhkosti na transport tepla a na případné odštěpení.

### ZKOUŠEBNÍ VZORKY

S ohledem na jeden z hlavních cílů experimentu, kterým bylo stanovení rizika odštěpení jednotlivých druhů betonu, a také s ohledem na plánované využití zkoumaných materiálů pro vývoj ochranných obkladů, schopných eliminovat míru poškození konstrukce požárem a výbuchem, byly vyrobeny zkušební vzorky ve tvaru malých desek s plochou vystavenou požáru 300 × 300 mm s tloušťkou 30, 60, resp. 120 mm. Během betonáže byly do vzorků umístěny termočlánky v předepsaných vzdálenostech od líce vystaveného požáru. Tyto termočlánky sloužily k měření vývoje teploty v daném místě průřezu během požární zkoušky. Při výrobě zkušebních vzorků byly použity dřevěné formy a speciální přípravky pro zajištění polohy termočlánků (obr. 1). Parametry jednotlivých

Tab. 1 Přehled zkoušených cementových kompozitů ■  
Tab. 1 Summary of the tested cementitious composites

Skupina materiálů	Číslo materiálu	Označení materiálu	Objemová hmotnost [kg m <sup>-3</sup> ]	Vlhkost [% hm.]
1	1	C30/37	2 328	7,6
	2	C30/37 + 2,5 kg m <sup>-3</sup> PP vláken 6/0,018	2 027	6,9
	3	C30/37 + 4,5 kg m <sup>-3</sup> PE/PP vláken 55/0,48	2 298	8
2	4	LC30/33 (lehčené kamenivo ve frakci 1-8)	887	13,3
	5	LC30/33 + 2,5 kg m <sup>-3</sup> PP vláken 6/0,018	978	14,4
	6	LC30/33 + 4,5 kg m <sup>-3</sup> PE/PP vláken 55/0,48	972	14,7
3	7	Betonový recyklát	1 832	16,9
	8	Betonový recyklát + 9,1 kg m <sup>-3</sup> PE/PP vláken 55/0,48	1 882	17,7
4	9	LWAC mezerovitý beton 1-4	908	8,9
	10	LWAC mezerovitý beton 4-8	911	10,9
5	11	LWAC 4-8 + textilní drť	1 152	38,4
	12	Beton s drťí z odpadních minerálních vláken	1 666	24,4

vých vzorků jsou uvedeny v tab. 2. Vzorky jsou v článku dále označovány číslem vyjadřujícím použitý materiál a spodním indexem vyjadřujícím tloušťku vzorku v cm (např. vzorek 4<sub>12</sub> je vzorek z betonu LC30/33 s tloušťkou 120 mm).

Pro všechny materiály byly dále vyrobeny zkušební krychle (šest krychlí pro každý materiál) ke stanovení tlakové pevnosti za běžné teploty (tři krychle) a po požáru (tři krychle). Pro materiály ze skupiny 5 (nově vyvinuté materiály č. 11 a 12) byly dále vyrobeny vždy tři válce a jedna kontrolní krychle pro stanovení modulu pružnosti.

Betonáž vzorků proběhla v říjnu 2013. Celkem bylo vyrobeno 36 malých desek (12 materiálů, pro každý tři desky o tloušťce 30, 60 a 120 mm), 74 zkušebních krychlí (12 materiálů, pro každý šest krychlí + dvě krychle pro materiály č. 11 a 12), šest zkušebních válců (materiály č. 11 a 12, pro každý tři vál-

ce) (obr. 2). Vzorky byly po odbednění uskladněny v prostorách s konstantní vlhkostí (RH 50 %) a teplotou (25 °C). Před zkouškou byly vzorky podrobně změřeny a zváženy. Všechny malé desky a tři zkušební kostky od každého materiálu byly převezeny do požární zkušebny PAVUS, a. s., Veselí nad Lužnicí na konci listopadu 2013 (obr. 3).

#### PŘÍPRAVA ZKOUŠKY

Vzhledem k tomu, že se vzorky měly zkoušet ve stěnové peci, bylo nutné navrhnout a postavit stěnu pro instalaci vzorků (obr. 4 a 5). Tato stěna byla vyzděna z pórobetonových tvárníc do speciálního ocelového rámu, aby s ní bylo možné manipulovat. Stěna slouží jako uzávěr pece z jedné strany (obr. 6) a před vlastní zkouškou je tedy nutné ji k peci přistavit a po ukončení zkoušky a vychladnutí pece opět přemístit na jiné místo, kde lze provést podrobné zdokumentování zkoušených vzorků.

Po instalaci vzorků do zkušební stěny byly na jejich rubové straně (povrch nevystavený požáru) připevněny termočlánky snímající povrchovou teplotu, všechny termočlánky byly připojeny k měřicí stanici, na straně nevystavené požáru byly vzorky izolovány minerální vatou a do prostoru pece byly rozmístěny zkušební krychle (obr. 7 až 9).

Tab. 2 Parametry zkušebních vzorků (malých desek) ■ Tab. 2 Parameters of the test specimens (small slabs)

Označení (spodní index)	Rozměry vzorku [mm]	Vzdálenost termočlánků od exponovaného povrchu [mm]
3	300 × 300 × 30	30
6	300 × 300 × 60	15, 30, 60
12	300 × 300 × 120	10, 20, 30, 50, 80, 120

#### PRŮBĚH ZKOUŠKY

Požární zkouška byla provedena dne 10. prosince 2013. Zkouška trvala 120 minut, přičemž teplota plynů v požární peci byla řízena normovou teplotní křivkou ISO 834 (obr. 10). V průběhu zkoušky byly zaznamenávány podmínky v peci (teplota, tlak) a teploty všech termočlánků ve zkušebních vzorcích. Pohled do pece v průběhu zkoušky je zobrazen na obr. 11.

Zajímavým okamžikem bylo úplné rozpadnutí vzorku 3<sub>3</sub> mezi 10. a 15. minutou zkoušky (obr. 12). Po utěsnění vzniklého otvoru izolací z minerální vaty pokračovala zkouška dále bez problémů až do požadované 120. minuty (obr. 13).

Následující den byla pec otevřena (po vychladnutí vzorků i samotné pece) a bylo provedeno důkladné zdokumentování a vizuální zhodnocení stavu vzorků (odštěpování, porušení trhlinami).

Vzorky (desky i krychle) byly vyjmuty

Obr. 1 Formy pro betonáž malých desek a přípravky pro zajištění polohy termočlánků ■ Fig. 1 Molds for casting of small slabs and the support fixtures for the thermocouples

Obr. 2 Zkušební vzorky po betonáži ■ Fig. 2 Test specimens after casting

Obr. 3 Zkušební vzorky – převoz do požární zkušebny ■ Fig. 3 Test specimens – transport to the fire testing laboratory





z pece (resp. ze zkušební stěny), opatřeny fólií pro zamezení přístupu vlhkosti, zváženy a přepraveny zpět na Fakultu stavební ČVUT v Praze, kde byly provedeny zkoušky pevnosti v tlaku jak u krychlí, které byly vystaven požáru v peci (tři krychle od každého materiálu – zjištění reziduální pevnosti), tak u krychlí, které požáru vystaveny nebyly (opět tři krychle od každého materiálu).

Vzhledem k tomu, že materiály č. 11 a 12 byly nově vyvinuty v rámci řešeného projektu a pro jejich následné při-

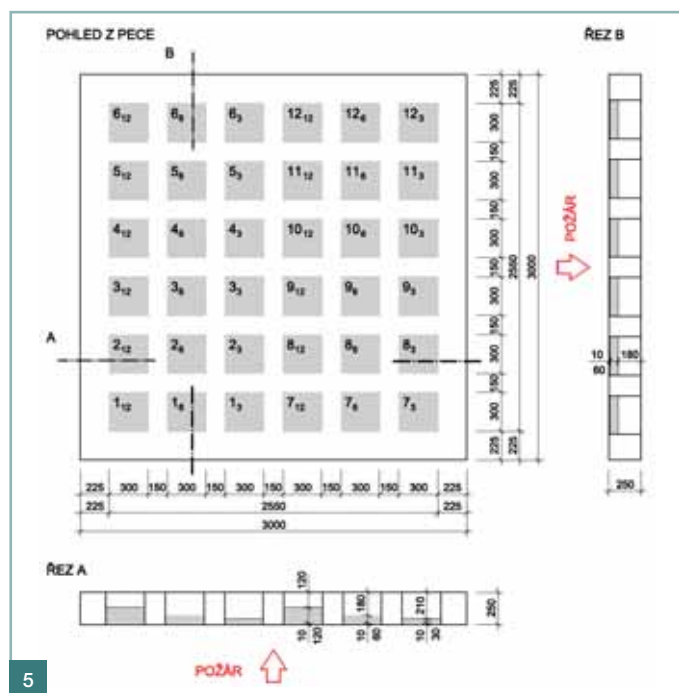
hlášení k patentové ochraně bylo nutné zjistit o nich co nejvíce informací, byly u těchto materiálů provedeny také zkoušky modulu pružnosti a zkoušky spalného tepla pro zjištění třídy reakce na oheň (zkoušky spalného tepla byly provedeny v požární zkušební PAVUS, a. s.).

#### VÝSLEDKY A DISKUSE

Vyhodnocení zkoušky se zaměřuje na následující oblasti, na základě kterých lze získat poměrně detailní představu

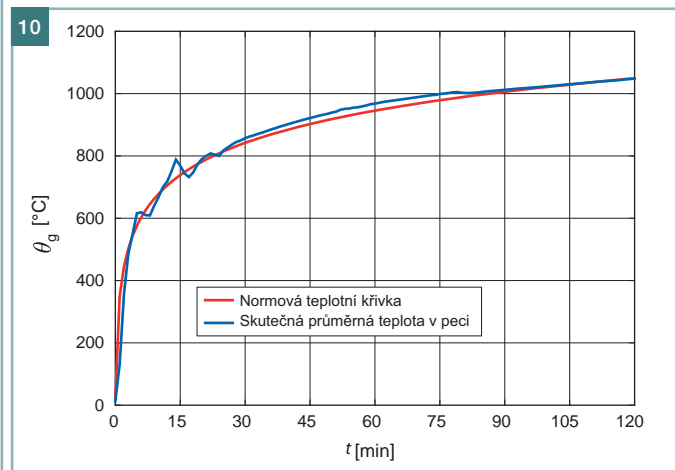
o chování daného materiálu při vystavení požáru a rozhodnout se tak o vhodnosti jeho použití pro konkrétní aplikace ve stavební praxi:

- vizuální zhodnocení poškození vzorků – porušení trhlinami a rozsah případného odštěpení povrchové vrstvy,
- časový vývoj teploty vzorků, podle kterého lze usuzovat na teplotní a fyzikální vlastnosti daného materiálu,
- reziduální tlakové pevnosti materiálů po požáru a jejich procentuální poměr vzhledem k původní tlakové pev-



Obr. 5 Schéma uspořádání zkušebních vzorků  
Fig. 5 Scheme of the test specimens arrangement

Obr. 10 Teplota v peci  
Fig. 10 Temperature in the furnace





11

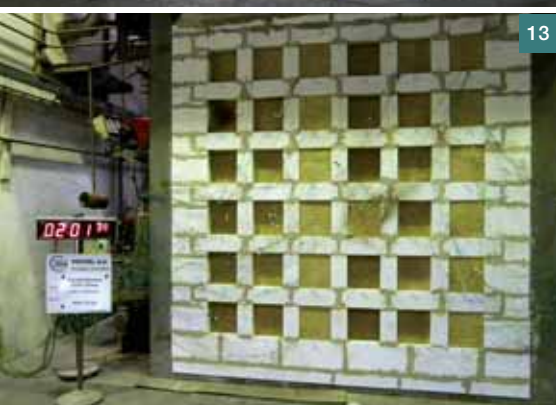
Obr. 4 Zkušební stěna pro umístění vzorků

■ Fig. 4 Testing wall for the specimens arrangement



12

Obr. 6 Zkušební pec ■ Fig. 6 Testing furnace



13

Obr. 7 Pohled na zkušební stěnu zvenku ■ Fig. 7 Outside view to the testing wall

Obr. 8 Pohled na část zkušební stěny zevnitř pece ■ Fig. 8 Inside view to the part of the testing wall in the furnace

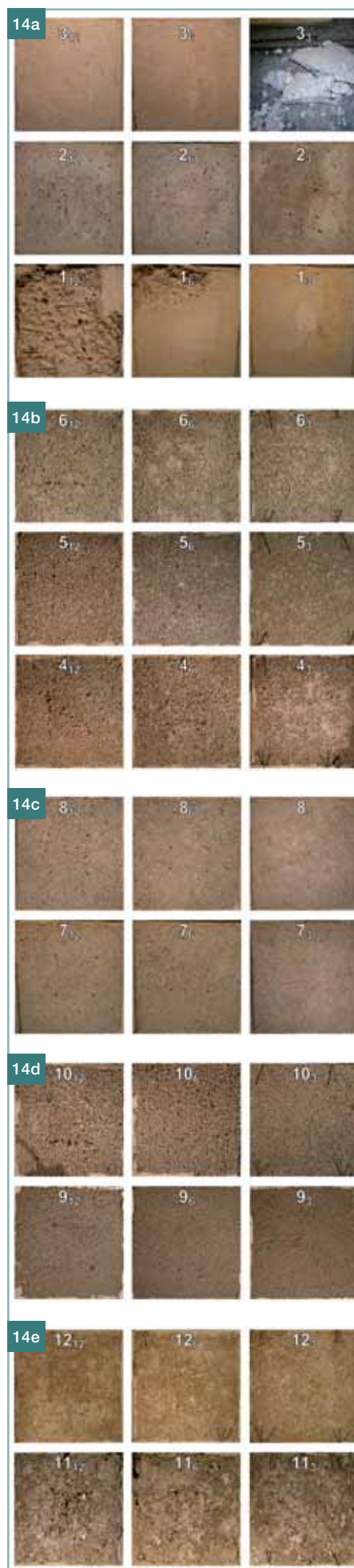
Obr. 9 Zkušební krychle na podlaze uvnitř pece ■ Fig. 9 Test cubes on the floor in the furnace

Obr. 11 Pohled do pece v průběhu zkoušky ■ Fig. 11 View into the furnace during the test

Obr. 12 Rozpad vzorku 3<sub>3</sub> (foceno po zkoušce) ■ Fig. 12 Destruction of the specimen 3<sub>3</sub> (recorded after the test)

Obr. 13 Okamžik ukončení zkoušky ■ Fig. 13 Time of termination of the test

Obr. 14 Pohled na vzorky z materiálů skupiny: a) 1, b), 2, c) 3, d) 4, e) 5 ■ Fig. 14 View on the specimens made of the materials of group: a) 1, b), 2, c) 3, d) 4, e) 5



14a

14b

14c

14d

14e

(beton s PP vlákny 6/0,018) neodštěpily vůbec, což je opět v souladu s poznatky publikovanými v literatuře a všeobecně přijímanými odbornou veřejností, tedy že přidáním drobných polypropylenových vláken lze účinně eliminovat vznik a rozvoj odštěpení, např. [5], [14].

Zajímavé chování bylo zaznamenáno u vzorků z materiálu č. 3 (beton s PE/PP vlákny 55/0,48). Tato velmi dlouhá vlákna dokázala zabránit odštěpení u vzorků s tloušťkou 120, resp. 60 mm (vzorky 3<sub>12</sub> a 3<sub>6</sub>), avšak u vzorku s tloušťkou 30 mm (vzorek 3<sub>3</sub>) došlo k jeho úplnému rozpadu (doprovázeného poměrně silným akustickým efektem) již mezi 10. a 15. minutou zkoušky. Toto chování lze vysvětlit tím, že délka vláken (55 mm) byla vzhledem k tloušťce vzorku (30 mm) příliš velká (navíc množství vláken přidávaných do směsi bylo poměrně značné – 4,5 kg na 1 m<sup>3</sup> směsi) a vnitřní struktura vzorku tak byla těmito vlákny příliš oslabena. Pro vzorky s větší tloušťkou se již tento negativní vliv neprojevil – naopak, díky vláknům nedošlo k žádnému odštěpení.

Zajímavé je také porovnání povrchů vzorků z materiálů č. 1 až 3 (obr. 14a). U materiálu č. 1 je patrný homogenní, celistvý povrch bez póru a trhlin. Povrch vzorků z materiálu č. 2 je narušen velkým množstvím otevřených pórů a dutin. U povrchu vzorků z materiálu č. 3 lze pozorovat útvary připomínající trhlinky, po podrobnějším ohledání je však

nosti příslušného materiálu za běžné teploty.

Po vizuálním zhodnocení materiálů skupiny 1 lze konstatovat, že u vzorků z referenčního betonu (bez vláken) došlo k poměrně masivnímu odštěpení (obr. 14a).

U vzorku 1<sub>12</sub> je patrné odštěpení v téměř celé exponované ploše, přičemž hloubka tohoto odštěpení byla přibližně 10 mm. U vzorku 1<sub>6</sub> byla odštěpením zasažena přibližně jedna čtvrtina exponované plochy (s hloubkou odštěpení opět přibližně 10 mm), u vzorku 1<sub>3</sub> k odštěpení nedošlo. Tím byl potvrzen obecně přijímaný předpoklad, že běžně využívaný beton třídy C30/37 (beton relativně velmi kvalitní) bez přidavku vláken je při vystavení normovému požáru (relativně velmi vysoká rychlost zahřívání) poměrně náchylný k odštěpování, např. [14].

Oproti tomu vzorky z materiálu č. 2

zřejmé, že se jedná o dutiny vzniklé odpařením dlouhých polymerových vláken. Uvedené charakteristiky povrchů se plně shodují s pozorovaným rozsahem odštěpení u jednotlivých materiálů.

U žádného z materiálů skupiny 1 nedošlo k výraznému rozvoji trhlin.

U vzorků z materiálů skupiny 2 nedošlo k odštěpení povrchové vrstvy ani v jednom případě (obr. 14b). Toto bylo možné předpokládat, neboť použitý lehký beton s umělým kamenivem má vysokou permeabilitu, čímž se snižuje riziko odštěpení bez ohledu na přítomnost vláken (podrobnější informace o vlivu permeability materiálu na riziko odštěpení lze nalézt např. v práci [14]). Jediné poškození, které lze na vzorcích z materiálů skupiny 2 pozorovat, je lokální odštěpení jednotlivých zrn kameniva, což ale nemá z hlediska aplikace

v inženýrské praxi žádný podstatný význam (spolehlivost konstrukce nemůže být tímto jevem významně snížena).

Vzorky z materiálů skupiny 3 (kamenivo nahrazeno betonovým recyklátem) nevykazovaly žádné viditelné poškození (obr. 14c).

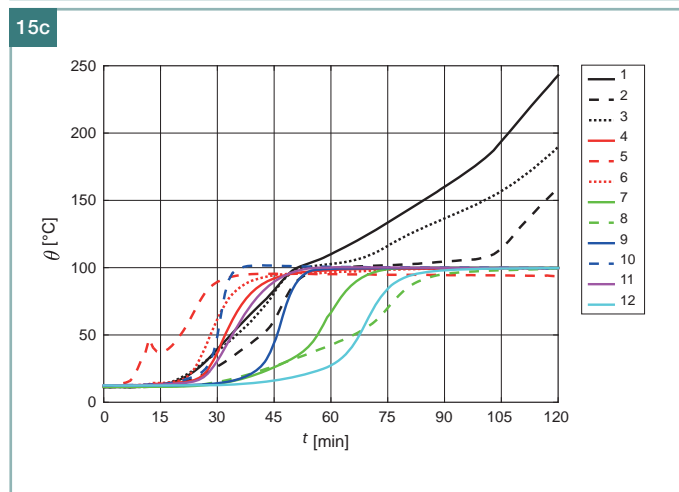
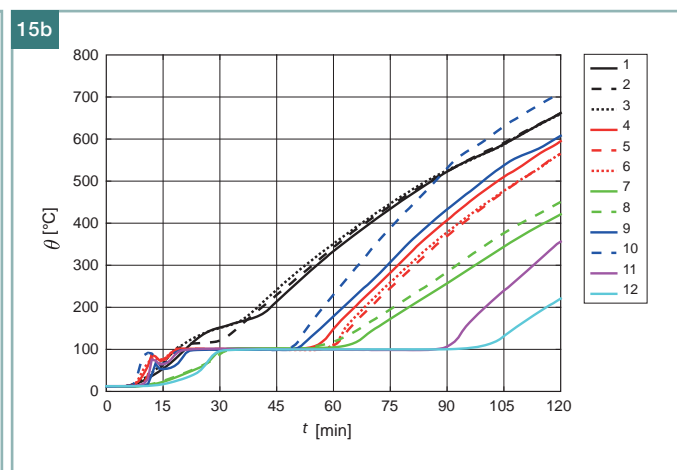
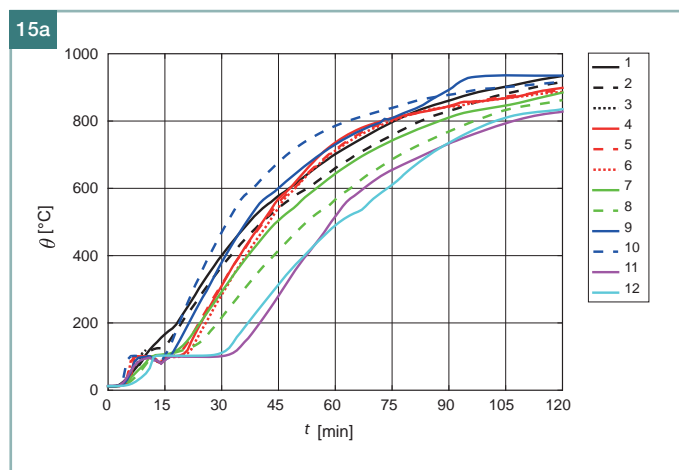
Pro materiály skupiny 4 (obr. 14d) lze z hlediska vizuálního vyhodnocení formulovat stejné závěry jako pro materiály skupiny 2.

Vzorky z materiálů skupiny 5 jsou zobrazeny na obr. 14e. Materiál č. 11 (beton s textilní drtí) byl rozrušen soustavou trhlin, místy došlo k vydrolení kameniva. Odštěpení zaznamenáno nebylo. U materiálu č. 12 (beton s drtí z odpadních minerálních vláken) nedošlo k žádnému viditelnému poškození, zajímavá byla pouze významná změna barvy materiálu.

Časový vývoj teploty vzorků byl zaznamenáván pomocí termočlánků umístěných uvnitř vzorků a na jejich odvráceném povrchu. Podrobné vyhodnocení této části experimentu je předmětem následujícího výzkumu. Zde jsou pro ilustraci uvedeny pouze časové průběhy teplot na odvrácených stranách vzorků (obr. 15a až c), ze kterých lze vyvodit následující předběžné závěry:

- nejrychlejší nárůst teploty byl zaznamenán u vzorků z materiálů skupiny 1 (běžně používaný beton C30/37),
- přítomnost vláken v materiálu příliš neovlivňuje úroveň prohřátí příslušného vzorku,
- u vzorků z lehkého betonu (materiály skupiny 2) bylo dosaženo nižších teplot než u betonu obyčejného (materiály skupiny 1),
- přes počáteční mírnější nárůst bylo nejvyšších teplot dosaženo u vzorku z materiálu č. 10 (mezerovitý beton s lehkým kamenivem frakce 4/8), což lze přisuzovat právě vysoké mezerovitosti materiálu, která ovlivňuje celistvost daného prvku (je umožněno pronikání horkých plynů strukturou materiálu),
- u nově vyvinutých materiálů č. 11 a 12 bylo v porovnání s ostatními materiály dosaženo nejnižších teplot,
- vliv vlhkosti na rozložení teploty je velmi podstatný – vodorovné části grafů na obr. 15a až c lze interpretovat tak, že na odvrácené straně vzorků docházelo k významnému odpařování vody; teplo se spotřebovávalo na fázovou změnu vody a nikoli na nárůst teploty materiálů, proto se teplota na odvrácené straně držela na hodnotě 100 °C

Obr. 15 Teplota na odvrácené straně vzorků tloušťky: a) 30 mm (vzorky označené indexem 3), b) 60 mm (vzorky označené indexem 6), c) 120 mm (vzorky označené indexem 12) ■ Fig. 15 Temperature on the unheated side of the specimens of the width of: a) 30 mm (specimens denoted by the index 3), b) 60 mm (specimens denoted by the index 6), c) 120 mm (specimens denoted by the index 12)



Tab. 3 Průměrné tlakové pevnosti materiálů za běžné teploty a po požáru ■ Tab. 3 Average strengths in compression of the materials at normal temperature and after fire

Materiál	Průměrná pevnost v tlaku [MPa]	Průměrná reziduální pevnost v tlaku [MPa]	Poměr průměrné reziduální a původní pevnosti v tlaku [%]
1	62	13,8	22,2
2	33,2	5,0	15,2
3	62,5	10,9	17,5
4	5,7	1,3	23,3
5	6,0	1,9	32,4
6	5,4	1,8	33,1
7	17,1	2,4	13,9
8	23,2	3,3	14,2
9	3,6	0,7	18,4
10	3,0	0,9	31,5
11	7,4	0,8	11,4
12	12,3	3,9	31,5

## Literatura:

- [1] BUCHANAN, A. H. *Structural Design for Fire Safety*. Wiley, 2002.
- [2] KUPILÍK, V. *Stavební konstrukce z požárního hlediska*. Grada, 2006.
- [3] PURKISS, J. A. *Fire Safety Engineering: Design of Structures*. Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2007.
- [4] BAŽANT, Z. P., KAPLAN, M. F. *Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models*. Longman, 1996.
- [5] ČSN EN 1992-1-2, Eurokód 2: *Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. Praha: ČNI, 2006.
- [6] GUO, Z., SHI, X. *Experiment and Calculation of Reinforced Concrete at Elevated Temperatures*. Elsevier, 2011.
- [7] ŠTEFAN, R. *Transport Processes in Concrete at High Temperatures: Mathematical Modelling and Engineering Applications with Focus on Concrete Spalling* (PhD thesis). CTU in Prague, 2015.
- [8] CREE, D., GREEN, M., NOUMOWÉ, A. Residual strength of concrete containing recycled materials after exposure to fire: a review. *Construction and Building Materials*, 45 (2013), 208–223.
- [9] FOGLAR, M., HÁJEK, R., KOVÁŘ, M., ŠTOLLER, J. Blast performance of RC panels with waste steel fibers. *Construction and Building Materials*, 94 (2015), 536–546.
- [10] LI, M., QIAN, C. X., SUN, W. Mechanical properties of high-strength concrete after fire. *Cement and Concrete Research*, 34 (2004), 1001–1005.
- [11] MOUSA, M. I. Effect of elevated temperature on the properties of silica fume and recycled rubber-filled high strength concretes (RHSC). *HBRC Journal*, (2015), In Press.
- [12] NETINGER, I., KESEGIĆ, I., GULJAS, I. The effect of high temperatures on the mechanical properties of concrete made with different types of aggregates. *Fire Safety Journal*, 46 (2011), 425–430.
- [13] SAKR, K., EL-HAKIM, E. Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties. *Cement and Concrete Research*, 35 (2005), 590–596.
- [14] KHOURY, A., ANDERBERG, Y. *Fire Safety Design. Concrete Spalling Review*. Swedish National Road Administration, 2000.

až do okamžiku vysušení vzorku. Je zřejmé, že pro vlastní návrh a posouzení konstrukce na účinky požáru je nutné stanovit teplotní a fyzikální vlastnosti daného materiálu a jejich závislosti na teplotě tak, aby bylo možné stanovit rozložení teploty pro různé tvary a rozměry prvku a pro různé požární scénáře (jedná se zejména o objemovou hmotnost, měrnou tepelnou kapacitu a tepelnou vodivost, pokud se řeší složitější model sdílení tepla – např. se sdruženým transportem vlhkosti, je nutné znát ještě další vlastnosti, jako je permeabilita, pórovitost atd.). V rámci popisovaného experimentálního programu byly tyto vlastnosti měřeny pouze za běžné teploty a pouze u materiálů č. 11 a 12. V rámci dalšího výzkumu bude provedeno stanovení příslušných vlastností (včetně jejich závislosti na teplotě) pomocí inverzní analýzy z naměřených průběhů teplot (s využitím modelu sdílení tepla popsáno v práci [7]).

Reziduální pevnosti materiálů po požáru vztažené k původní pevnosti daného materiálu za běžné teploty dosahují hodnot v intervalu 11,4 až 33,4 % (tab. 3). Vliv vláken na reziduální pevnost není zřejmý (srov. materiály č. 1 až 3 a materiály č. 4 až 6).

U materiálu č. 2 došlo pravděpodobně ke špatnému zhuštění (případně k jinému porušení technologické kázně), což se projevilo snížením objemové hmotnosti materiálu (tab. 1) i výrazným snížením pevnosti v tlaku (tab. 3). V následujících experimentech již byla tato chyba eliminována.

Největší pokles tlakové pevnosti byl zaznamenán u materiálu č. 11, což bylo možné předpokládat, neboť při orientačním měření spalného tepla bylo zjištěno, že se jedná o materiál s třídou reakce na oheň A2, případně B (to souvisí s typem použité odpadní textilní drti). Oproti tomu všechny ostatní materiály splňují požadavky třídy reakce na oheň A1 (nepřispívají k požáru, např. [2]).

### ZÁVĚR

Článek byl zaměřen na popis přípravy, průběhu a vyhodnocení požární zkoušky realizované v rámci projektu bezpečnostního výzkumu Ministerstva vnitra ČR za účelem zjištění chování vzorků z různých druhů cementových kompozitů při vystavení vysokým teplotám.

Výsledky zkoušky potvrdily některé všeobecně přijímané předpoklady (vliv vláken na odštěpování betonu, dobré teplotní vlastnosti lehkých betonů)

a přinesly zajímavé informace o vlastnostech netradičních a inovativních materiálů.

Poznatky získané při realizaci a vyhodnocení experimentu budou využity pro další výzkum v dané oblasti.

Tato práce vznikla za podpory poskytnuté Ministerstvem vnitra České republiky v rámci projektu VG20132015114 – Užití vláknocementových kompozitů pro zvýšení ochrany technické infrastruktury a obyvatelstva proti teroristickému útoku.

Ing. Radek Štefan, Ph.D.  
e-mail: radek.stefan@fsv.cvut.cz



doc. Ing. Marek Foglar, Ph.D.  
e-mail: marek.foglar@fsv.cvut.cz



Ing. Josef Fládr  
e-mail: josef.fladr@fsv.cvut.cz



všichni: Fakulta stavební ČVUT v Praze  
Katedra betonových a zděných konstrukcí

Text článku byl posouzen odborným lektorem.  
The text was reviewed.



## ZVÝHODNĚNÉ PŘEDPLATNÉ PRO STUDENTY, STAVEBNÍ INŽENÝRY DO 30 LET A SENIORY NAD 70 LET

Zvýhodněná cena za roční předplatné (šest čísel) pro studenty, stavební inženýry do 30 let a seniory nad 70 let je 270 Kč bez DPH, 311 Kč s DPH (včetně balného a distribuce). Součástí předplatného na rok 2015 jsou pro všechny nové zájemce příloha *Betonové konstrukce 21. století – Betony s přidanou hodnotou*, která vyšla v prosinci 2012, a příloha *Povrchy betonu*, z roku 2008.

### ZASLÁNÍ UKÁZKOVÉHO VÝTISKU ZDARMA

Na našich webových stránkách [www.betonks.cz](http://www.betonks.cz) si můžete objednat jeden výtisk *Beton TKS* zdarma na ukázkou. Přehled všech výtisků naleznete v pdf formátu v archivu, starší výtisky jsou k dispozici v plné verzi, novější pouze v náhledu (první stránky článků)

Kontaktní e-mail: [předplatne@betonks.cz](mailto:předplatne@betonks.cz)

JIŽ VÍCE NEŽ ROK JSME PRO VÁS I NA FACEBOOKU

