

# REZIDUÁLNÍ VLASTNOSTI VYSOKOHODNOTNÉHO VLÁKNOBETONU PO VYSTAVENÍ VYSOKÝM TEPLOTÁM

## RESIDUAL QUALITIES OF HPFRC EXPOSED TO HIGH TEMPERATURES

Zbyšek Pavlík, Jan Fořt,  
Milena Pavlíková, Jaroslav Pokorný,  
Anton Trník, David Čítek,  
Jiří Kolísko, Robert Černý

V článku je prezentována analýza vlivu vysokoteplotního zatížení na parametry vysokohodnotného betonu vyztuženého ocelovými vlákny (HPFRC – High Performance Fiber Reinforced Concrete). HPFRC byl vystaven teplotám v rozsahu 200 až 1 000 °C. Pro stanovení vlivu teplotního zatížení na chování betonu byly experimentálně stanoveny jeho reziduální parametry. Fyzikální a chemické procesy v HPFRC za vysokých teplot byly popsány pomocí simultánní termické analýzy (STA), termické dilatometrické analýzy (TDA) a infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací (FT-IR). Vystavení zkoumaného materiálu vysokým teplotám vedlo k nárůstu pórovitosti, velikosti pórů a k značnému poklesu mechanických pevností. Bylo zjištěno, že hodnoty vlhkostních a tepelných parametrů odpovídají změnám v materiálové struktuře. Výsledky simultánní termické analýzy, termické dilatometrické analýzy a infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací umožnily popsat strukturální změny zkoumaného betonu a identifikovat kritické teploty pro jeho poškození. ■ The effect of high temperatures on properties of High Performance Fiber Reinforced Concrete (HPFRC) was analysed in the paper. HPFRC was exposed to the temperatures of 20-1000°C. Among the studied material properties, basic physical, mechanical, hygric and thermal parameters were measured. The physical and chemical processes in concrete during its high temperature exposure were identified using STA, TDA and FT-IR analyses. The high-temperature load of studied HPFRC led to the increase in porosity and pore size and thus to the decrease in mechanical strength. Analogically, hygric and thermal parameters corresponded to the changes in material pore structure. Finally, the basic decay mechanisms and processes of HPFRC induced by high temperatures were described.

Vysokohodnotný beton vyztužený vlákny (HPFRC) se stal populárním a moderním konstrukčním materiálem pro specifické betonové konstrukce a infrastrukturu, jako např. výškové budovy, mosty, dálniční a železniční tunely, tenkostěnné skořepiny a mnoho dalších. Použití vláken v směsi HPFRC umož-

ňuje překonat nedostatky vysokopevnostního betonu (HSC) a vysokohodnotného betonu (HPC) bez vláken, jako je zejména v porovnání s běžným betonem (NSC) jejich větší křehkost, která omezuje možnosti jejich aplikace. Efektivita výtuzných vláken závisí na mnoha faktorech jako jsou vlastnosti samotného vlákna, objemové zastoupení vláken, geometrie vláken, typ a orientace vláken v betonové směsi. Obecně je přijímán fakt, že použití vláken umožňuje výrobu betonu se zvýšenou tahovou pevností, duktilitou, houževnatostí a zlepšenou trvanlivostí.

Za normálních podmínek není většina betonových konstrukcí vystavena teplotám vyšším, než je teplota okolního prostředí. Za těchto podmínek betonové konstrukce slouží bez větších problémů, a to především v případě použití vysokohodnotných materiálů s vysokou trvanlivostí. Nicméně existují situace, kdy mohou být betonové konstrukce vystaveny mnohem vyšším teplotám, např. při výbuchu motorů proudových letadel, při požárech budov a explozích v důsledku požáru, v chemických a metalurgických průmyslových aplikacích, v kterých je beton blízko pecí, příp. v podmínkách vyvolaných nehodami jaderných elektráren. V těchto případech zatížení betonu vysokými teplotami výrazně snižuje jeho vynikající užité vlastnosti. Požáry v eurotunelu pod Lamanšským průlivem (Channel Tunnel) v letech 1996 a 2008 či požár v tunelu St. Gotthart v roce 2001 jsou typické příklady vážného poškození HPC konstrukcí v důsledku vysokého teplotního zatížení. Poškození konstrukce z HPC vyvolané požárem je spojováno s vypařováním značného množství vody, které je v HPC ve formě volné kapilární vody, fyzikálně absorbované vody či chemicky vázané vody hydratačních produktů. Důsledkem zvýšených teplot vzrůstají vnitřní napětí v betonu, která mohou překonat jeho tahovou pevnost. Jelikož HPC má ve srovnání s NSC značně jemnou pórovou strukturu, která umožňuje pouze limitovaný transport vodní páry, je mnohem obtížnější, aby tato vnitřní napě-

tí byla uvolněna. V důsledku výše uvedeného působení vodní páry v betonu dochází k opadávání malého množství betonu z povrchu konstrukce a tento destruktivní proces se neustále opakuje, dokud není vnitřní napětí betonu v rovnováze s jeho pevností. Tento proces se nazývá postupné oprýskávání. Betonový prvek také může náhle selhat za uvolnění velkého množství energie při explozivním oprýskávání. V obou případech je nosnost konstrukce snížena a může nastat její celkové selhání.

V oblasti aktivní nebo pasivní ochrany betonu proti oprýskávání byl proveden intenzivní výzkum. Pro omezení degradujících účinků vysokých teplot byla zkoušena různá vlákna z oceli, čediče, juty, polyvinylalkoholu (PVA), polypropyleny (PP), polyakrylonitrilu (PAN) aj. Tato vlákna byla použita samostatně nebo jako hybridní rozptýlená vláknová výtuz v různých kombinacích z pohledu materiálu, velikosti a tvaru vláken či jejich aplikovaného množství.

Drátkobeton (SFRC – Steel Fibre Reinforced Concrete) má mnoho výborných vlastností. Použití ocelových vláken zlepšuje ohybovou, tahovou a smykovou pevnost, tuhost, odolnost proti nárazu, odolnost proti vzniku trhlin a mrazuvzdornost. V betonu s rozptýlenou ocelovou výtuzí dochází k překlenutí mikrotrhlin, čímž je omezen či eliminován rozvoj poškození způsobených např. smrštěním při odpařování vody nebo jiným zatížením. Přestože ocelová vlákna nemusí poskytnout žádnou zjevnou výhodu z pohledu požární odolnosti, předchozí výzkumy ukázaly, že ocelové drátky mohou ovlivňovat šíření trhlin, a tak potenciálně zlepšit chování betonu po vystavení vysokým teplotám [1]. Ocelové drátky mohou navíc způsobit jisté časové oddálení oprýskávání díky nárůstu tahové pevnosti cementové matrice, oprýskávání však může být pozdrženo pouze v řádu minut. Ocelové drátky také mohou posunout výše prahovou teplotu, jak uvádí například Sideris a kol. [2].

Jelikož SFRC již našel uplatnění ve stavebnictví, např. v tunelových ostě-

ních či prefabrikovaných tunelových segmentech, informace o jeho chování během vysokoteplotního zatížení či o reziduálních vlastnostech po působení vysokých teplot jsou pro stavební praxi a materiálový výzkum v oblasti požární odolnosti betonových konstrukcí velmi cenné. Z tohoto důvodu je v předloženém článku studován vliv vysokoteplotního zatížení na chování a vlastnosti HPFRC vyztuženého ocelovými vlákny v množství 120 kg/m<sup>3</sup> betonové směsi.

## EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### Zkoušené materiály a zkušební tělesa

Zkoušený HPFRC se skládal z cementu CEM II 42,5 R, křemičitého písku s maximálním zrnem 2 mm, minerálních mikrofilérů, ocelových drátků a vody. Použité drátky měly pevnost v tahu 2200 MPa, byly rovné, 13 mm dlouhé s průměrem 0,2 mm (štíhlostní poměr 65) a potažené mosazí. Do směsi byl přidán superplastifikátor na bázi polykarboxylát éteru pro snížení dávky záměsové vody a pro dosažení optimální zpracovatelnosti čerstvé betonové směsi. Vysoká dávka superplastifikátoru s menším množstvím záměsové vody byla navržena z hlediska samozhutnitelnosti, zvýšení mechanických vlastností a snížení pórovitosti směsi. Detailní složení zkoušené směsi je uvedeno v tab. 1.

Jako zkušební vzorky byly vyrobeny krychle s hranou 100 mm a trámce o rozměrech 40×40×160 mm. Vzorky byly během prvních 24 h uloženy ve formách a udržovány v prostředí s vysokou vlhkostí okolo 98 % RH. Po odbednění byly vzorky uloženy ve vodě při teplotě 20 °C po dobu 27 dnů a poté byly umístěny v laboratorních podmínkách (RH = 50 ± 5 %, T = 20 ± 2 °C). Ve stáří 120 dnů byly sušeny při 105 °C, dokud nebylo dosaženo jejich ustálené hmotnosti. Ve stejný čas byla část vzorků umístěna do zkušební elektrické

ke pece, kde byly zahřívány rychlostí 1 °C/min do dosažení maximálních teplot 200, 400, 600, 800 a 1 000 °C, při kterých byly temperovány po dobu 2 h. Před zkoušením reziduálních vlastností se nechaly vzorky volně vychladnout v laboratorních podmínkách.

### Experimentální zkoušky reziduálních vlastností

Zkušební testy zahrnovaly měření základních fyzikálních vlastností, distribuce velikostí pórů, mechanických, vlhkostních a tepelných vlastností. Objemová hmotnost  $\rho_b$  [kg/m<sup>3</sup>] byla zkoušena na krychlich o hraně 100 mm gravimetricky, měřením objemu a hmotnosti suchého vzorku. Hustota matrice  $\rho_{mat}$  [kg/m<sup>3</sup>] byla změřena heliovým pyknometrem (Pycnomatic ATC, Thermo Scientific). Na základě stanovených hodnot objemové hmotnosti a hustoty matrice byla vypočtena celková otevřená pórovitost  $\phi$  [%]. Tyto vlastnosti jsou uvedeny v tab. 2.

Účinek vysokoteplotního zatížení na pórovou strukturu zkoušeného betonu byl studován pomocí rtuťové porozimetrie (MIP). Distribuce velikosti pórů byla měřena kombinací porozimetrů Pascal 140 a Pascal 440 (Thermo Scientific).

Z reziduálních mechanických vlastností byly stanoveny: pevnost v tahu ohybem, pevnost v tlaku a Youngův dynamický modul pružnosti.

Pevnost v tahu ohybem  $f_t$  [MPa] byla stanovena v třibodovém uspořádání zkoušky dle EN 12390-5. Zkušebními vzorky byly trámce rozměrů 40×40×160 mm.

Pevnost v tlaku  $f_c$  [MPa] byla měřena dle normy EN 12390-3 na zlomcích zkušebních trámců z ohybové zkoušky. Zatěžovací plocha byla 40×40 mm.

Youngův dynamický modul pružnosti  $E_u$  [Pa] byl měřen pulzní ultrazvukovou metodou přístrojem DIO 562 (Starmans Electronics) pracujícím na frekvenci 50 kHz. Vzhledem k zkoušením vzorků menších rozměrů dosahují vzorky HPFRC vyšších hodnot tlakových a tahových pevností než je tomu u standardně zkoušených vzorků HPC.

Za účelem charakterizace vlivu strukturálních změn způsobených vysokými teplotami na tepelně vlhkostní chování betonu bylo provedeno měření jeho vlhkostních a tepelných parametrů. Součinitel absorpce pro kapalnou vodu  $A$  [kg/m<sup>2</sup>s] byl stanoven na zákla-

Tab. 1 Složení směsi HPFRC  
Tab. 1 Design of the HPFRC mixture

Materiál	Dávkování [kg/m <sup>3</sup> ]
křemičitý písek 0 – 2 mm	1 235
ocelové drátky 0,2/13 mm	120
CEM II 42,5 R	690
křemičitý úlet	100
struska	80
superplastifikátor	40
voda	160



Odborníci na bednění.

# Pomáháme realizovat vaše plány

Základem výstavby každé monolitické konstrukce je správná bednicí technika. Jen bednění vtiskne betonu tvar, strukturu a vzhled. S moderními profesionálními systémy Doka je realizace monolitu snazší - od prvotního plánování, přes dodávky bednění až po finální servis a vyhodnocení vaší stavby.



S výrobou bednění přímo pro požadavky stavby pomůžeme zrealizovat i projekty, na které systémové bednění nestačí.

[www.doka.cz](http://www.doka.cz)



Firemní prezentace

BEDNĚNÍ  
FRAMAX XLIFE PLUS

dě principu sorptivity publikovaného Hallem [3] z lineární části graficky vynešené závislosti kumulativní hmotnosti vody absorbované na jednotku plochy vzorku a druhé odmocniny času kontaktu materiálu s vodou. Z takto zjištěného součinitele absorpce  $A$  a obsahu saturované vlhkosti  $w_{sat}$  [kg/m<sup>3</sup>] ve zkušební vzorku byl vypočten součinitel efektivní vlhkostní vodivosti  $\kappa_{eff}$  [m<sup>2</sup>/s<sup>1</sup>].

Pro měření součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  [W/mK], součinitele teplotní vodivosti  $a$  [m<sup>2</sup>/s] a objemové tepelné kapacity  $c_v$  [J.m<sup>-3</sup>.K<sup>-1</sup>] byl použit přístroj ISOMET 2114 (Applied Precision), který pracuje na dynamickém měřicím principu. Experimenty byly provedeny povrchovou kruhovou sondou na krychlích o hraně 100 mm.

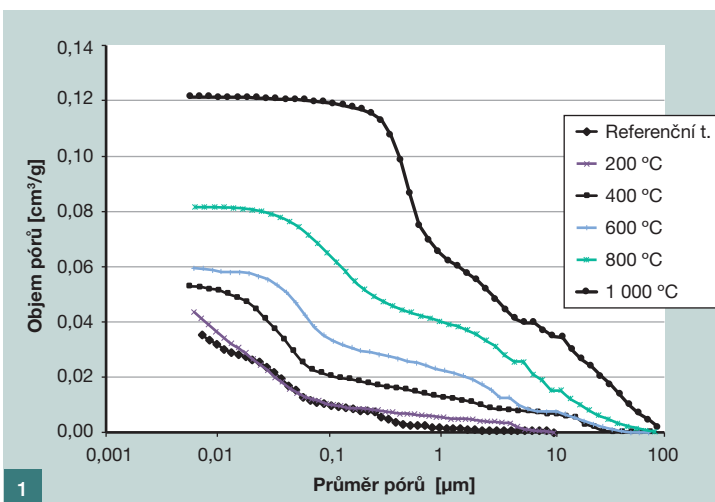
Materiálové parametry charakterizující transport vodní páry mají zásadní vliv na výpar vodní páry při zahřívání betonu. Jejich stanovení bylo provedeno pomocí miskové metody za izotermických podmínek. Zkoušené vzorky měly čtvercový půdorys o hraně 100 mm a tloušťku 30 mm. Experimenty byly provedeny v uspořádání „dry-cup“, což znamená, že v misce pod vzorkem bylo umístěno medium pohlcující vzdušnou vlhkost (v našem případě silikagel).

**Simultánní termická analýza**

Simultánní termická analýza (STA) byla použita pro zjištění chemických a fyzikálních procesů v HPFRC během jeho vystavení vysokým teplotám. Pro měření bylo použito zařízení Labsys Evo (Estaram), které umožňuje současně realizovat diferenční kompenzační kalorimetrii (DSC) a termogravimetrickou analýzu (TG).

Vzorky betonu byly namlety a umístěny do hliníkového kelímku s objemem 100 mm<sup>3</sup>. Hmotnost vzorků byla kolem 80 mg. STA byla provedena v argonové atmosféře s průtokovou rychlostí 40 ml/min v teplotním rozsahu 25 až 1200 °C s rychlostí ohřevu 5 °C/min.

Obr. 1 Kumulativní křivky distribuce velikosti částic  
Fig. 1 Cumulative pore size distribution curves



**Termická dilatometrická analýza**

Délkové změny zkoumaného materiálu vystaveného vysokým teplotám byly měřeny pomocí termické dilatometrické analýzy (TDA). Zkoušené vzorky byly trámce rozměru 20×20×160 mm. Měření bylo provedeno v horizontálním uspořádání za konstantní vzdušné atmosféry v teplotním intervalu 25 až 1 000 °C. Rychlost ohřevu byla 1 °C/min.

**FT-IR analýza**

Pro zjištění strukturálních změn testovaného betonu byla použita infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FT-IR). Měření bylo realizováno spektrometrem Nicolet 6700 (Thermo Fischer Scientific) v ATR režimu.

**VÝSLEDKY A DISKUZE**

Základní fyzikální vlastnosti zkoušených vzorků HPFRC jsou uvedeny v tab. 2. Tato data odpovídají průměrné hodnotě z pěti vzorků. Bylo zjištěno, že studovaný beton má nízkou pórovitost a hutnou vnitřní strukturu. Hodnoty pórovitosti naměřené pro referenční vzorky a vzorky zatížené teplotou 200 °C byly téměř shodné a odpovídají hodnotám prezentovaných např. v [4]. Stejně hodnoty pórovitosti naměřil také Wang a kol. [5], který zkoumal trvanlivost HPFRC při progresivním stárnutí. Autoři zjistili, že pórovitost betonu vyztuženého ocelový-

mi drátky je 9,5 % při tlakové pevnosti 140 MPa. Lau a Anson [1] měřili pórovitost vysokohodnotného betonu, který obsahoval 1,0 obj. % ocelových drátků a dosahoval v 28 dnech pevnosti v tlaku 110 MPa. Vzorky po vysušení při 105 °C měly pórovitost 9,8 %. Yu a kol. [4] zjistili, že nárůst obsahu ocelových drátků způsobuje parabolický nárůst pórovitosti HPFRC. Zkoumané směsi obsahovaly 0,5 až 2,5 obj. % ocelových drátků, přičemž jejich pórovitost stanovená pomocí vakuové nasákovosti se pohybovala v rozmezí 10 až 11,1 %. Nicméně u vysokohodnotných betonů se stejnou dávkou vody závisí pórovitost také na dávkce cementu v směsi, díky chemickému smrštění zatvrdlé cementové matrice.

Teplotní zatížení od 400 °C vedlo k nárůstu pórovitosti a poklesu objemové hmotnosti, což dokumentuje rozkladný vliv vysokoteplotního zatížení na betonové konstrukce. Stejně chování drátobetону zaznamenal i Biolzi a kol. [6]. Autoři naměřili u vzorků zatížených teplotou 750 °C pórovitost ~23 %, přičemž hodnota referenční pórovitosti při 20 °C byla 6,5 %.

Hrubnutí pórové struktury v důsledku chemického a fyzikálního rozkladu testovaného betonu bylo změřeno MIP analýzou a je znázorněno na obr. 1. Referenční vzorky a vzorky vystavené teplotě 200 °C měly maximální průměr pó-

Tab. 2 Základní vlastnosti HPFRC

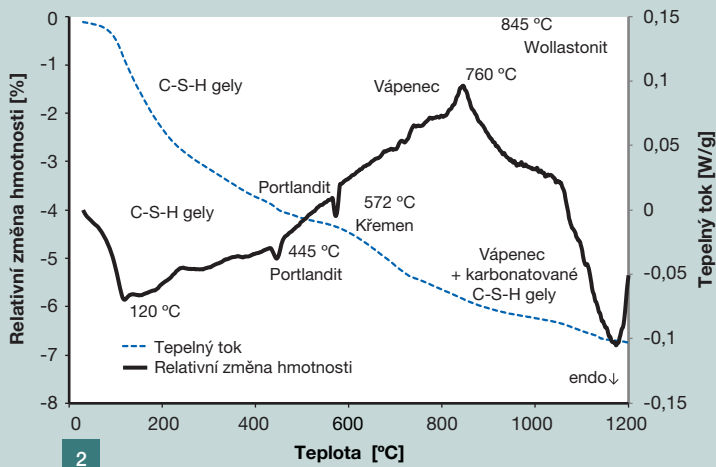
■ Tab. 2 Basic physical properties of HPFRC

Teplota $t$	Objemová hmotnost $\rho_b$	Hustota matrice $\rho_{mat}$	Otevřená pórovitost $\phi$
[°C]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]
referenční	2 363	2 561	7,8
200	2 349	2 554	8
400	2 260	2 666	15,2
600	2 250	2 670	15,7
800	2 220	2 930	24,2
1 000	2 110	2 920	27,7

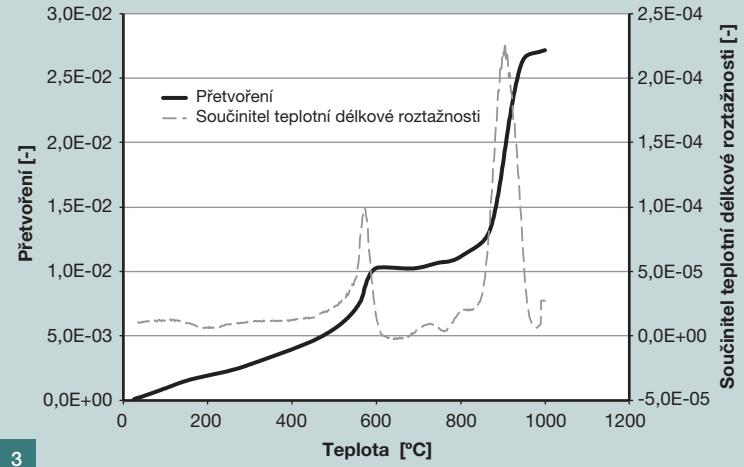
Tab. 3 Reziiduální a referenční mechanické vlastnosti HPFRC

■ Tab. 3 Residual and reference mechanical properties of HPFRC

Teplota $t$	Pevnost v tahu za ohybu $f_t$	Pevnost v tlaku $f_c$	Modul pružnosti $E_u$
[°C]	[MPa]	[MPa]	[GPa]
referenční	31,9	170,3	52,1
200	31	168,9	47,9
400	23,4	128,4	31,5
600	19,1	118,1	15,4
800	10,5	64,4	9,6
1 000	1,3	16,1	4,6



2



3

Obr. 2 Výsledky simultánní termické analýzy  
 Fig. 2 Results of the simultaneous thermic analyses

Obr. 3 Přetvoření a součinitel teplotní délkové roztažnosti HPFRC  
 Fig. 3 Thermal strain and linear thermal expansion coefficient of HPFRC

rů přibližně 10  $\mu\text{m}$ , přičemž většina pórů měla průměr mezi 0,01 až 0,50  $\mu\text{m}$ . To znamená, že množství velkých kapilárních pórů negativně ovlivňujících pevnost a vodonepropustnost materiálu bylo minimální. Z tohoto důvodu měl beton nízkou pórovitost a vysokou mechanickou odolnost. Výsledky MIP odhalily efekt teplotního zatížení na změny porézní struktury. S nárůstem teploty, které byl beton vystaven, obsah pórů a jejich velikost systematicky rostla, což je v souladu se základními fyzikálními parametry betonu uvedenými výše.

Reziduální mechanické vlastnosti zkoumaného drátkobetonu jsou shrnuty v tab. 3. Ve výsledcích jsou uvedeny průměrné hodnoty z měření na pěti vzorcích rozměru 40  $\times$  40  $\times$  160 mm, resp. na jejich zlomcích. Hodnoty nejsou přepočtené na standardní velikost vzorku.

Měřené mechanické parametry pro referenční vzorky jsou typicky vyšší a jsou v souladu s výsledky publikovanými Corinaldesim a Mariconim [7], kteří zkoumali mechanické vlastnosti HPFRC složeného z křemičitého úletu, ocelových drátků, superplastifikátoru na bázi akrylu, jemného písku a cementu CEM II/A-L 42,5 R. Naměřená 28denní tlaková pevnost byla 156 MPa a ohybová pevnost byla 38 MPa. Díky vysoké mechanické pevnosti je tento materiál charakterizován jako ultra vysokohodnotný beton vyztužený vlákny (UHPFRC), což je pokročilý typ HPFRC. V našem případě byly zjištěny tři hlavní

stadia reziduálních mechanických parametrů testovaného HPFRC po zatížení vysokými teplotami. Mechanická odolnost zkušebních vzorků zatížených teplotou do 200  $^{\circ}\text{C}$  je víceméně konstantní. Po zatěžování teplotou v intervalu 400 až 800  $^{\circ}\text{C}$  mechanické vlastnosti dramaticky klesaly a po zatížení 800  $^{\circ}\text{C}$  by již většina mechanické pevnosti byla ztracena. Naměřené reziduální mechanické vlastnosti mají podobný trend jako výsledky výzkumu Biolziho a kol. [6], kde byly zjištěny obdobné reziduální mechanické vlastnosti po teplotním zatížení.

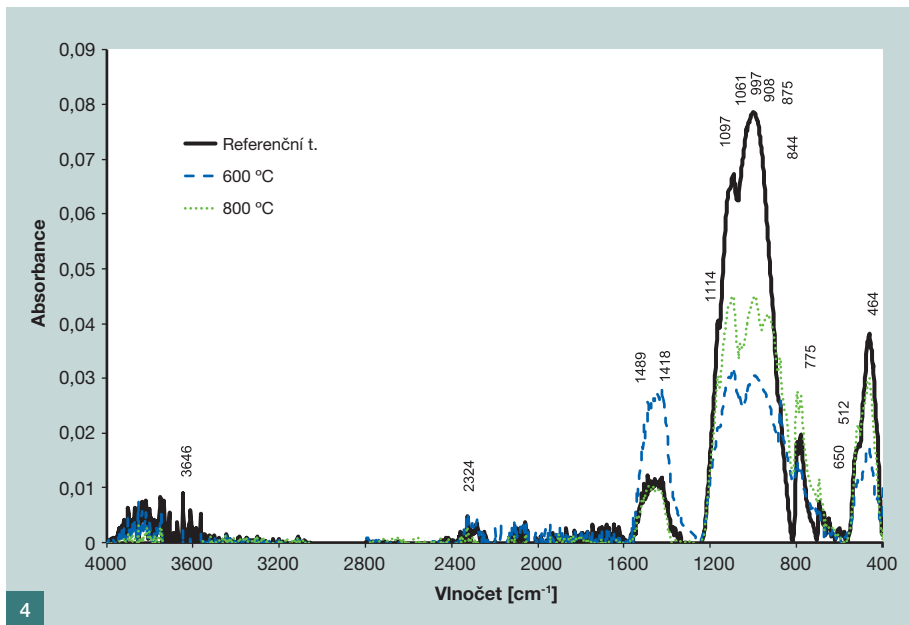
Strukturální změny studovaného betonu při vysokoteplotním zatížení popisují výsledky simultánní termické analýzy zobrazené na obr. 2. Z těchto výsledků lze rozeznat několik fyzikálních a chemických procesů. V teplotním intervalu od 25 do 300  $^{\circ}\text{C}$  se z pórů uvolňuje fyzikálně vázaná voda a nastává dehydratace C-S-H fáze. Při 110 až 156  $^{\circ}\text{C}$  dochází k dehydrataci Aft (ettringit) a AFm (monosulfát) fází. Podle kompletního přehledu chování betonu při vysokých teplotách publikovaného Maem a kol. [8] cementové hydratační produkty ztrácejí kompletně volnou a fyzikálně absorbovanou vodu a při 105  $^{\circ}\text{C}$  začínají ztrácet chemicky vázanou vodu. Kapilární voda je kompletně ztracena při 400  $^{\circ}\text{C}$ . Endotermický pík při 445  $^{\circ}\text{C}$  odpovídá rozkladu portlanditu ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Další významnou teplotou pro zkoumaný materiál byla teplota 572  $^{\circ}\text{C}$ , kdy nastává  $\alpha \rightarrow \beta$  transformace křemene. Tato reakce je doprovázena strmým endotermickým vrcholem tepelného toku a objemovou expanzí. Při transformaci křemene nedochází k změně hmotnosti. V teplotním rozsahu 560 až 900  $^{\circ}\text{C}$  dochází k dekompozici kalcitu a C-S-H gelu. Dle výzkumu Penga a Huanga [9] se C-S-H fáze začíná rozkládat při

560  $^{\circ}\text{C}$  a je transformován na  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  při 600 až 700  $^{\circ}\text{C}$ . Míra rozkladu kalcitu při rozkladných teplotách není závislá jen na teplotě a tlaku, ale také na obsahu  $\text{SiO}_2$  v kalcitu. Při teplotách nad 800  $^{\circ}\text{C}$  je zřejmý jeden exotermický pík související s krystalizačním procesem. V našem případě tento pík odpovídá krystalizaci wollastonitu  $\text{CaSiO}_3$ .

Výsledky termické dilatometrické analýzy jsou zobrazeny na obr. 3. Teplotní deformace jasně vypovídají o změnách délky materiálu při zatěžování do 1000  $^{\circ}\text{C}$  a svědčí o několika strukturálních změnách.

Z teplotní závislosti součinitele teplotní délkové roztažnosti je možné identifikovat rozklad portlanditu (při  $\sim 445^{\circ}\text{C}$ ) a přeměnu křemene z  $\alpha$  na  $\beta$  formu (při 572  $^{\circ}\text{C}$ ). Oba tyto procesy vedly k značné teplotní expanzi. Další značná expanze nastala v teplotním intervalu  $\sim 790$  až 900  $^{\circ}\text{C}$ . Tato délková změna byla vyvolána rozkladem kalcitu ( $\text{CaCO}_3$ ), karbonatovaných C-S-H gelů a krystalizací wollastonitu, což je v souladu s výsledky STA analýzy. V teplotním intervalu 590 až  $\sim 680^{\circ}\text{C}$  nebyla zaznamenána výrazná expanze a zkoušený materiál vykazoval dokonce malé teplotní smrštění. To je možné vysvětlit jako důsledek deformační nekompatibility mezi cementovou pastou a kamenivem. Kamenivo a minerální plniva se zvětšují s narůstající teplotou, dokud nejsou chemicky degradované, oproti tomu cementová pasta se smršťuje, jakmile ztratí vodu vysycháním a dehydratací. Zjevně v tomto teplotním intervalu míra chemické degradace byla nižší ve srovnání se smrštěním cementové pasty. Smrštění při teplotách 720 až 758  $^{\circ}\text{C}$  bylo popsáno Estevezem [10] a lze ho připisovat tvorbě nové křemičité sloučeniny.

IR spektra vzorků betonu vystavených



Obr. 4 Spektrum HPFRC z infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací ■ Fig. 4 Spectrum of HPFRC from the FT-IR analyses

Obr. 5 Snímky z optické mikroskopie: a) referenční vzorek, b) vzorek po zatížení teplotou 600 °C, c) vzorek po zatížení teplotou 1000 °C ■ Fig. 5 Optical microscopy images of HPFRC: a) reference sample, b) sample exposed to temperature of 600 °C, c) sample exposed to temperature of 1 000 °C

Tab. 4 Residuální a referenční tepelné vlastnosti HPFRC ■ Tab. 4 Residual and reference thermic properties of HPFRC

Teplota <i>t</i> [°C]	Tepelná vodivost $\lambda$ [W/mK]	Tepelná kapacita $c_v$ [ $\times 10^6$ J/m <sup>3</sup> K]	Teplotní vodivost $\alpha$ [ $\times 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s]
referenční	2,2	1,72	1,37
200	2,17	1,71	1,35
400	1,7	1,69	1,01
600	1,41	1,63	0,87
800	1,22	1,56	0,78
1 000	1,06	1,4	0,76

Tab. 5 Residuální a referenční vlhkostní vlastnosti HPFRC ■ Tab. 5 Residual and reference moisture properties of HPFRC

Teplota <i>t</i> [°C]	Absorpce <i>A</i> [kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup> ]	Vlhkostní vodivost $\kappa$ [m <sup>2</sup> /s]	Součinitel difuzní propustnosti (vodní páry) $\delta$ [s]	Součinitel difuze (vodní páry) <i>D</i> [m <sup>2</sup> /s]	Faktor difuzního odporu (vodní páry) $\mu$ [-]
referenční	0,0001	1,72E-11	6,1E-12	8,3E-07	27,7
200	0,0003	1,84E-11	7,4E-12	1,0E-06	22,7
400	0,0306	5,93E-08	1,1E-11	1,5E-06	15
600	0,0803	3,06E-07	1,4E-11	1,9E-06	12
800	0,1491	5,67E-07	1,8E-11	2,4E-06	9,4
1 000	0,2124	9,45E-07	2,4E-11	3,3E-06	7,1

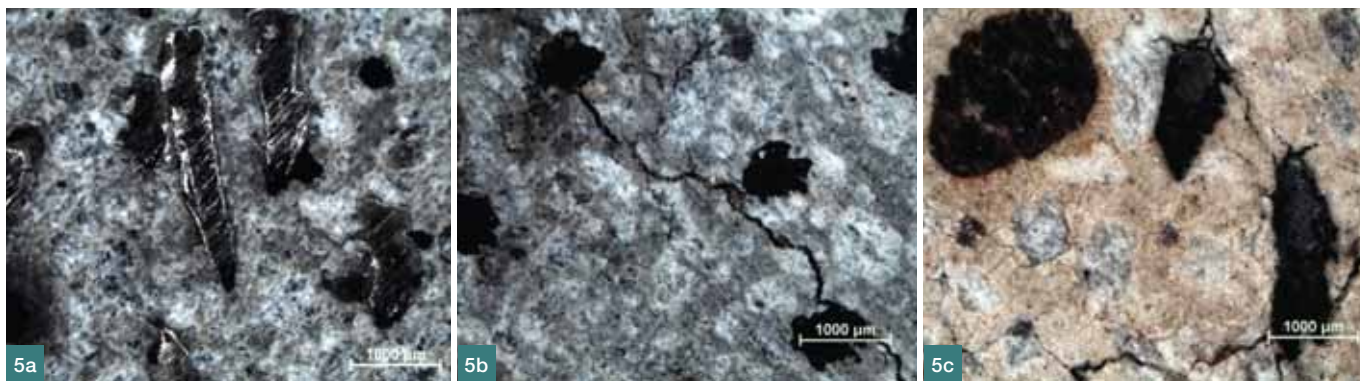
různým teplotním zatížením jsou zobrazeny na obr. 4.

Pík na vlnočtu 3646 cm<sup>-1</sup>, jehož intenzita klesala s narůstající zatěžovací teplotou, odpovídá O-H valenční vibraci Ca(OH)<sub>2</sub>. U vzorků zatížených teplotou 600 °C tento pík nebyl pozorován, jelikož v rozmezí 400 až 600 °C dochází k rozkladu portlanditu. Vrcholy v 1163 cm<sup>-1</sup> a 2324 cm<sup>-1</sup> odpovídají valenční vibraci SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> a jeho overtonu. U vzorků vystavených 800 a 1000 °C tyto vrcholy zjištěny nebyly, což dokládá počátek rozkladu anhydritu na směsný roztok CaSO<sub>4</sub> + CaO + SO<sub>2</sub>. Při vlnočtu 1114 cm<sup>-1</sup>

je zřejmá velmi silná antisymetrická valenční frekvence síranového iontu, což indikuje izolaci těchto iontů v hexagonální struktuře C<sub>3</sub>A·3CS<sup>-</sup>·H<sub>32</sub>. To zjevně dokládá rozklad etringitu, jak bylo popsáno výše pomocí STA. Pík mezi 1489 až 1418 cm<sup>-1</sup> a vrcholy při vlnočtech 1061, 875 a 775 cm<sup>-1</sup> jsou spojené s vibrací planárních CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> iontů. Jelikož tyto vrcholy klesají se stoupající zatěžovací teplotou, tato data charakterizují rozklad karbonátovaných CSH gelů. Nad 800 °C nastává rozklad kalcitu. Nově vytvořené píky při vlnočtech 997 a 908 cm<sup>-1</sup> přisuzujeme tvorbě wollastonitu. Zá-

kladní pásy valenční a vazebné vibrace Al-O v CAH fázi se objevují při 800, 512 a 464 cm<sup>-1</sup>. Tyto fáze jsou stabilní do 800 °C. CSH fáze jsou prezentovány valenční vibrací vazby Si-O v silikátovém tetraedru pásy v oblasti 870 až 1000 cm<sup>-1</sup> a okolo 520 cm<sup>-1</sup>. Pokles intenzity vibrace a její posun k nižším frekvencím dokládá rozklad CSH fáze s rostoucí teplotou. Pás valenční vibrace při 650 cm<sup>-1</sup> vazby H- naznačuje pokles koncentrace H<sup>+</sup>, což je spojeno s rozkladem CAH a CSH fáze během teplotního zatížení

Tepelné vlastnosti studovaného drátobetону jsou prezentovány v tab. 4.



## Literatura:

- [1] LAU, A., ANSON, M. Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*. 2006, Vol. 36, p. 1698–1707.
- [2] SIDERIS, K. K., MANITA, P., CHANIOTAKIS, E. Performance of thermally damaged fiber reinforced concretes. *Construction and Building Materials*. 2009, Vol. 23, No. 3, p. 1232–1239.
- [3] HALL, C. Water sorptivity of mortars and concretes: a review. *Magazine of Concrete Research*. 1989, Vol. 41, No. 147, p. 51–61.
- [4] YU, R., SPIESZ, P., BROUWERS, H. J. H. Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPC). *Cement and Concrete Research*. 2014, Vol. 56, p. 29–39.
- [5] WANG, W., LIU, J., AGOSTINI, F., DAVY, C. A., SKOCZYLAS, F., CORVEZ, D. Durability of an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPC) under progressive aging. *Cement and Concrete Research*. 2014, Vol. 55, p. 1–13.
- [6] BIOLZI, L., CATTANEO, S., ROSATI, G. Evaluating residual properties of thermally damaged concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2008, Vol. 30, p. 907–916.
- [7] CORINALDESI, V., MORICONI, G. Mechanical and thermal evaluation of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concretes for engineering applications. *Construction and Building Materials*. 2012, Vol. 26, p. 289–294.
- [8] MA, Q., GUO, R., ZHAO, Z., LIN, Z., HE, K. Mechanical properties of concrete at high temperature – A review. *Construction and Building Materials*. 2015, Vol. 93, p. 371–383.
- [9] PENG, G. F., HUANG, Z. S. Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 2008, Vol. 22, p. 593–599.
- [10] ESTEVEZ, L. P. On the hydration of water-entrained cement-silica systems: Combined SEM, XRD and thermal analysis in cement pastes. *Thermochimica Acta*. 2011, Vol. 518, No. 1–2, p. 27–35.
- [11] VEJMELOVÁ, E., PAVLÍKOVÁ, M., KEPPERT, M., KERŠNER, Z., ROVNANÍKOVÁ, P., ONDRÁČEK, M., SEDLMAJER, M., ČERNÝ, R. High performance concrete with Czech metakaolin: Experimental analysis of strength, toughness and durability characteristics. *Construction and Building Materials*. 2010, Vol. 24, p. 1404–1411.

Také tato data představují průměrné hodnoty z měření pěti vzorků.

Naměřená data korespondují s výsledky pórovitosti a charakterizují chování materiálu z pohledu transportu a akumulace tepla se zohledněním jeho vysokoteplotního zatížení. V literatuře jsou tepelné a vlhkostní vlastnosti HPC studovány velmi zřídka. Vejmelková a kol. [11] zkoumala teplotní a vlhkostní vlastnosti HPC s metakaolínem. Pro HPC s pórovitostí 13 % byla hodnota součinitele tepelné vodivosti ~1,8 W/mK a součinitel teplotní vodivosti byl ~1,04 × 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s. V našem případě byly získány obdobné výsledky pro vzorky vystavené teplotě 400 °C, které měly pórovitost 15,2 %. Je zřejmé, že vysokoteplotní zatížení vede k zpomalení transportu tepla, a tudíž k pomalejšímu odpařování vody ze zhydratovaného betonu. Tento jev je příznivý k vypařování volné vody a vody z hydratačních produktů, protože hutná struktura HPC brání odchodu volné vody.

Vlhkostní vlastnosti zkoumaného drátkobetonu jsou uvedeny v tab. 5.

U referenčních vzorků a u vzorků vystavených teplotě 200 °C byly vlastnosti transportu kapalné vlhkosti téměř neměřitelné. S narůstající zatěžovací teplotou všechny zkoumané vlhkostní vlastnosti vzrůstaly kvůli změnám struktury popsáním výše. Z praktického hlediska nárůst obsahu pórů a změny v distribuci velikostí pórů urychlily vypařování vodní páry. V případě podzemních tunelových ostění a jiných konstrukcí vystavených nadměrné vlhkosti může otevření pórové struktury betonu a nárůst objemu vody transportované do materiálu vyvolat či urychlit jeho poškození.

Pro dokumentaci poškození drátkobetonu vlivem vysokoteplotního zatížení byla využita optická mikroskopie. Optické snímky referenčních vzorků a vzorků vystavených teplotám 600 a 1000 °C jsou na obr. 5. Jsou zde vidět značné změny v struktuře materiálu sledovatelné v změnách barvy, poškození ocelových drátků a trhliny způsobené kombinací tepelných, vlhkostních a mechanických vlivů popsáním výše.

## ZÁVĚR

Experimentální analýzy a zkoušky provedené v rámci této práce odhalily u zkoušeného drátkobetonu při teplotách vyšších než 200 °C značné strukturální změny. Nárůst celkové otevřené pórovitosti a velikosti pórů vedl k značné redukci mechanických vlastností. Toto chová-

ní drátkobetonu bylo vysvětleno pomocí výsledků simultánní termické analýzy, termické dilatometrické analýzy a infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací, které umožnily identifikaci změn a rozpadů hydratačních produktů HPC matrice.

Prezentovaná souhrnná data referenčních a reziduálních tepelných a vlhkostních vlastností drátkobetonu představují velmi cenou informaci pro jeho praktické použití. Lze je použít i jako vstupní data pro modelování poškození betonu spojeného s mechanicko-vlhkostně-tepelným chováním betonu při zatížení vysokými teplotami. Stanovení vlhkostní a tepelné parametry zkoušeného betonu naleznou také uplatnění při návrhu inženýrských staveb a budov. Na základě literární rešerše je evidentní, že získaná experimentální data představují důležité podklady pro budoucí výzkum zaměřený na vývoj HPFRC odolného zvýšeným teplotám.

Výzkum byl financován Grantovou Agenturou České Republiky v rámci řešení projektu č. GA15-05791S.

prof. Ing. Zbyšek Pavlík, Ph.D.  
Fakulta stavební ČVUT v Praze  
e-mail: pavlikz@fsv.cvut.cz



Ing. Jan Fořt  
Fakulta stavební ČVUT v Praze  
e-mail: jan.fort.1@fsv.cvut.cz



prof. Ing. Milena Pavlíková, Ph.D.  
Fakulta stavební ČVUT v Praze  
e-mail: milena.pavlikova@fsv.cvut.cz



Ing. Jaroslav Pokorný  
Fakulta stavební ČVUT v Praze  
e-mail: jaroslav.pokorny@fsv.cvut.cz



RNDr. Anton Trník, Ph.D.  
Fakulta stavební ČVUT v Praze  
e-mail: anton.trnik@fsv.cvut.cz



Ing. David Čitek  
Kloknerův ústav ČVUT v Praze  
e-mail: david.citek@cvut.cz



doc. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.  
Kloknerův ústav ČVUT v Praze  
e-mail: jiri.kolisko@cvut.cz



prof. Ing. Robert Černý, DrSc.  
Fakulta stavební ČVUT v Praze  
e-mail: cernyr@fsv.cvut.cz



Text byl posouzen odborným lektorem.  
The text was reviewed.