

CRACK RESISTANCE OF CARBON FIBRES REINFORCED COMPOSITES AFTER HIGH TEMPERATURE LOADING

D. Matesová*, **Z. Keršner****, **P. Rovnaníková*****, **M. Drdlová******

***Summary:** Presented paper deals with fracture behavior of carbon fiber reinforced composites on the basis of Portland (PC) and alumina (HC) cement. Carbon fibers can be used for these composites to improve their high temperature resistance and mechanical/fracture properties. For quantification of the resistance against a crack propagation the laboratory specimens 40x40x160 mm were heated with temperatures up to 200, 400, 600, 800 and 1000°C with holding time 1 hr; a set of comparative specimens was made as well. After cooling to the laboratory temperature, the specimens were notched with a diamond saw and subjected to the three point bending test with a notch in a tensile zone. Determined mechanical/fracture parameters served for comparison of suitability of PC and HC composites utilization as protective fire resistant slab structures.*

1. Úvod

Aplikace přístupů lomové mechaniky na oblast cementových kompozitů s uhlíkovými vlákny umožňuje komplexnější hodnocení těchto materiálů také z hlediska chování po namáhání vysokými teplotami. Vysoké teploty ovlivňují chování většiny materiálů, tedy i kompozitů na bázi cementu, na různých strukturálních úrovních. Na základě chemických změn probíhají na mikro a meso úrovni změny fyzikální, které následně ovlivňují vlastnosti materiálu a konstrukce na makroúrovni.

Při zvyšování teploty nad 200°C dochází z hlediska makroúrovně k poklesu pevnosti v tlaku, při teplotě 700°C činí asi 5 % původní pevnosti. Obdobně se snižuje také pevnost v tahu za ohybu – např. Valenta (1965), Chan et al. (1999), Handoo et al. (1997). Odolnost cementových kompozitů proti vysokým teplotám je vedle podmínek při tvrdnutí (Matesová et al., 2002) a způsobu zahřívání a chlazení ovlivněna zejména složením směsi. Tento příspěvek zkoumá odolnost materiálu proti šíření trhlin (Keršner et al., 2003) v závislosti na typu

* Ing. Dita Matesová: Ústav stavební mechaniky, FAST VUT v Brně; Veveří 95; 662 37 Brno; tel.: +420.541 147 370; e-mail: matesova.d@fce.vutbr.cz

** Ing. Zbyněk Keršner, CSc.: Ústav stavební mechaniky, FAST VUT v Brně; Veveří 95; 662 37 Brno; tel.: +420.541 147 360; e-mail: kersner.z@fce.vutbr.cz

*** Doc. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.: Ústav chemie, FAST VUT v Brně; Žižkova 17; 616 62 Brno; tel.: +420.541 147 633; e-mail: rovnanikova.p@fce.vutbr.cz

**** Ing. Martina Drdlová: Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s.; Hněvkovského 65; 617 00 Brno; tel.: +420.543.529.266

cementu (portlandského a hlinitanového) v kompozitu s uhlíkovými vlákny po vystavení vysokým teplotám.

Portlandský cement vytváří pevnou strukturu hydratací slínkových minerálů, při níž vznikají zejména hydratované křemičitany a hlinitany vápenaté, sulfoaluminátové fáze a hydroxid vápenatý. Při zahřívání se postupně rozkládají hydratované křemičitany vápenaté (CSH gely), od 195°C aluminátové a sulfoaluminátové fáze, při teplotě okolo 490°C se rozkládá hydroxid vápenatý. Pokud je cementový tmel karbonátován, rozkládá se uhličitan vápenatý při teplotě okolo 800°C (Taylor, 1992).

Hlinitanový cement představuje žárovzdorné pojivo, jehož složení se zcela liší od složení portlandského cementu. Vyznačuje se rychlým nárůstem počátečních pevností a žárovzdorností až do teploty nad 1500°C. Žárovzdornost se zvyšuje s obsahem oxidu hlinitého. Při zahřívání dochází k tepelnému rozkladu hydratovaných sloučenin a unikání vázané vody, což vede ke snížení pevností až do teploty zhruba 1100°C. Při vyšších teplotách dochází opět k rychlému nárůstu pevností díky vytvoření keramické vazby.

Přidáním uhlíkových vláken do směsi kompozitu se zvyšuje jeho odolnost proti vysokým teplotám. Zlepšení vlastností se projeví vyšší tuhostí a pevností a také zvýšením odolnosti proti šíření trhlin, o kterém bude rozhodovat zejména schopnost přemostování trhlin vlákny. Vlákna mohou také zamezit rozpadu vzorků při zahřívání (tzv. explosive spalling), ke kterému může dojít zejména při rychlém nárůstu teplot (Ahmad & Hurst, 1997).

2. K použité metodě zjišťování lomových parametrů

Nejrůznější metody a postupy při určování lomových parametrů kvazikřehkých materiálů shrnují např. Karihaloo (1995) či Bažant (1998). Pro zjišťování vybraných lomových parametrů zkoumaného materiálu byl použit model efektivní trhliny, který slouží k výpočtu tzv. efektivní trhliny a_e a efektivní lomové houževnatosti K_{Ic} . Zkoušky se provádějí na trámečcích se zářezem, zatěžovaných tradičně třibodovým ohybem. Ve zkušebním postupu nejsou požadovány informace na diagramu zatížení-průhyb ($F-d$) po dosažení maximálního zatížení, obvykle však lze docílit stabilního lomu po vrcholu zatížení a odhadnout tzv. lomovou energii G_F (Karihaloo, 1995, Stibor, 2001). Přibližná linearita diagramu $F-d$ v úvodním stádiu zatěžování se využívá také pro výpočet modulu pružnosti E ze vztahu mezi průhybem uprostřed rozpětí trámečku se zářezem a zatížením.

Poznamenejme, že model efektivní trhliny (Nallathambi a Karihaloo) a upravená Hillerborgova metoda určení lomové energie jsou užívány pro účely postihnutí různých aspektů chování cementových kompozitů (zatvrdlé cementové pasty, malty, betonu) při jejich stárnutí – viz např. všechny tři uvedené odkazy Bílek et al. (2002). Sledování chování alumosilikátových kompozitů po namáhání vysokými teplotami z hlediska právě lomových vlastností uvádí Matesová et al. (2002).

3. Experimentální detaily a materiál vzorků

Pro experimenty byla použita zkušební tělesa s nominálními rozměry 40 x 40 x 160 mm, opatřená zářezem přibližně do 1/3 výšky; rozpětí 120 mm. Zkušební tělesa byla vyrobena ze dvou kompozitů:

- Kompozit na bázi portlandského cementu (PC) s uhlíkovými vlákny na bázi smoly v množství 1 % z celkové hmotnosti směsi.
- Kompozit na bázi hlinitanového cementu (HC) s uhlíkovými vlákny na bázi smoly v množství 1 % z celkové hmotnosti směsi.

Přesné složení kompozitů nebylo výrobcem těles sděleno. Vlastnosti uhlíkových vláken na bázi smoly: průměr 18 μm , hustota 1600 kg/m^3 , modul pružnosti 30 až 32 GPa, pevnost v tahu 600 až 750 MPa, protažení při přetržení 2 až 2,4 %.

Tělesa byla po 28 dnech od výroby vysušena v sušárně při teplotě 105°C do konstantní hmotnosti a následně vložena do elektrické pece, kde byla zahřívána s teplotním nárůstem 2°C/min na určenou teplotu 200, 400, 600, 800 nebo 1000°C s hodinovou výdrží. Tělesa zůstala ve vypnuté peci až do snížení teploty na 22°C. Takto ošetřená zkušební tělesa byla podrobena zkoumání lomově mechanických vlastností.

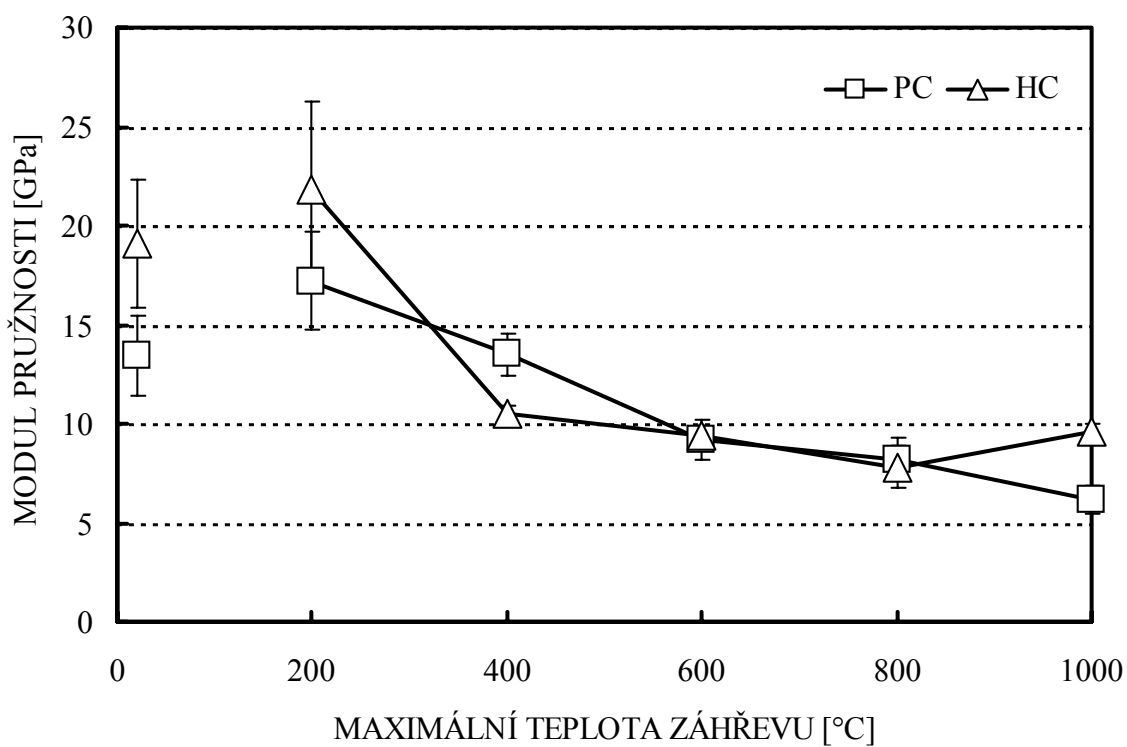
4. Výsledky a diskuse

Zahříváním zkušebních těles z kompozitu na bázi cementu vyztuženého uhlíkovými vlákny se uvolňuje z hydratovaných slínekových minerálů a hydroxidu vápenatého voda, čehož důsledkem je zvýšení porozity cementového tmelu. Vzniklými póry pak může difundovat vzduch s obsahem kyslíku k povrchu uhlíkového vlákna; tím se vytvoří oxidační atmosféra v okolí vlákna, to znamená, že vlákno vyhoří. Tento proces nastává při teplotě nad 600°C.

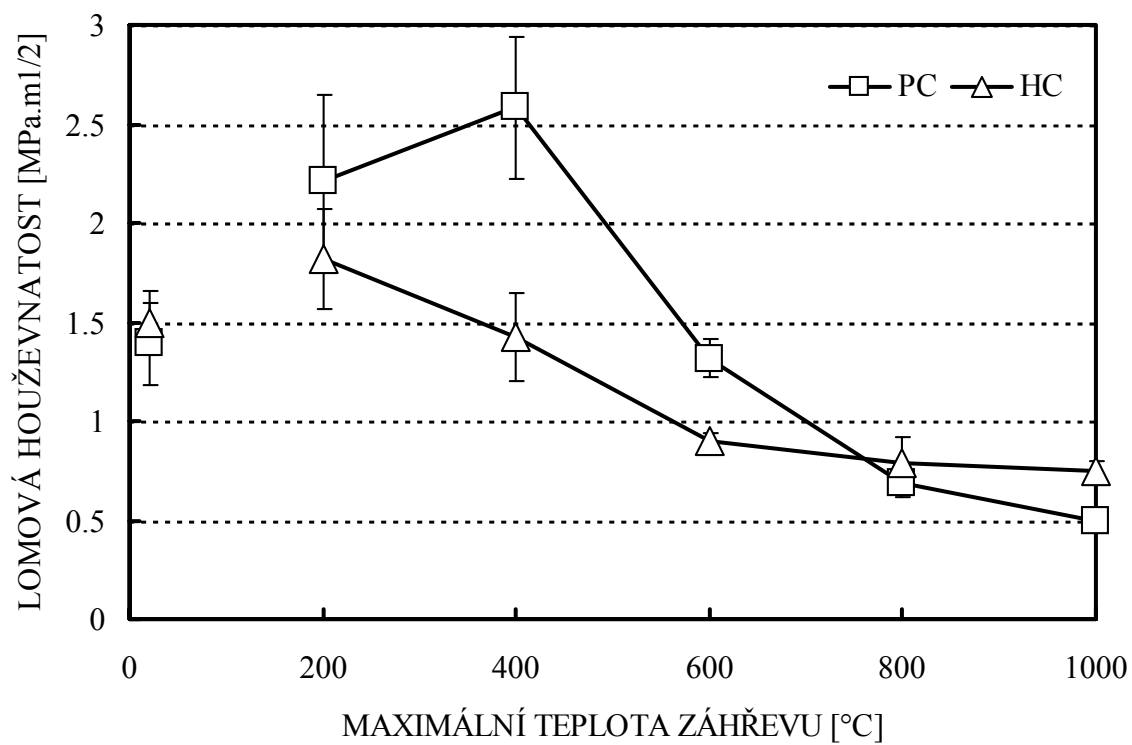
Obrázek 1 ukazuje modul pružnosti E v závislosti na maximální teplotě záhřevu – jde vždy o aritmetický průměr ze tří měření \pm směrodatná odchylka. Oba kompozity vykazují přibližně stejnou tendenci – nárůst při 200°C oproti E vzorků při referenční teplotě a pro vyšší teploty postupný pokles s výjimkou HC kompozitu při 1000°C. HC kompozit vykazuje o něco vyšší modul pružnosti pro laboratorní teplotu a 200°C; pro vyšší teploty se výsledné hodnoty u obou kompozitů výrazně neliší. Pokles modulu pružnosti od 200°C pro PC kompozit je spíše pravidelný, na rozdíl od HC kompozitu s výrazným skokem mezi 200 a 400°C. Je nutno si povšimnout variability zkoumaného parametru zejména při 20 a 200°C – nárůst E v tomto intervalu není pak zcela jednoznačný.

Dalším sledovaným parametrem je efektivní lomová houževnatost K_{Ic} , která udává odolnost proti nestabilnímu šíření trhliny – zohledňuje nelinearitu $F-d$ diagramu před/při dosažení maximálního zatížení. Výsledky uvádí Obrázek 2 (opět aritmetické průměry \pm směrodatné odchylky). Tendencí se oba kompozity liší pouze při 400°C. HC kompozit má rostoucí lomovou houževnatost do 200°C a PC kompozit až do 400°C. Další průběh je u obou kompozitů klesající. Zhouževnatění a následné zkřehnutí PC kompozitu je podstatně výraznější ve srovnání s HC kompozitem. Naproti tomu lomová houževnatost HC kompozitu v intervalu teplot 600 – 1000°C je prakticky konstantní. PC kompozit vykazuje houževnatější chování až do teploty 600°C, poté se role vymění, ale rozdíl již není tak dramatický.

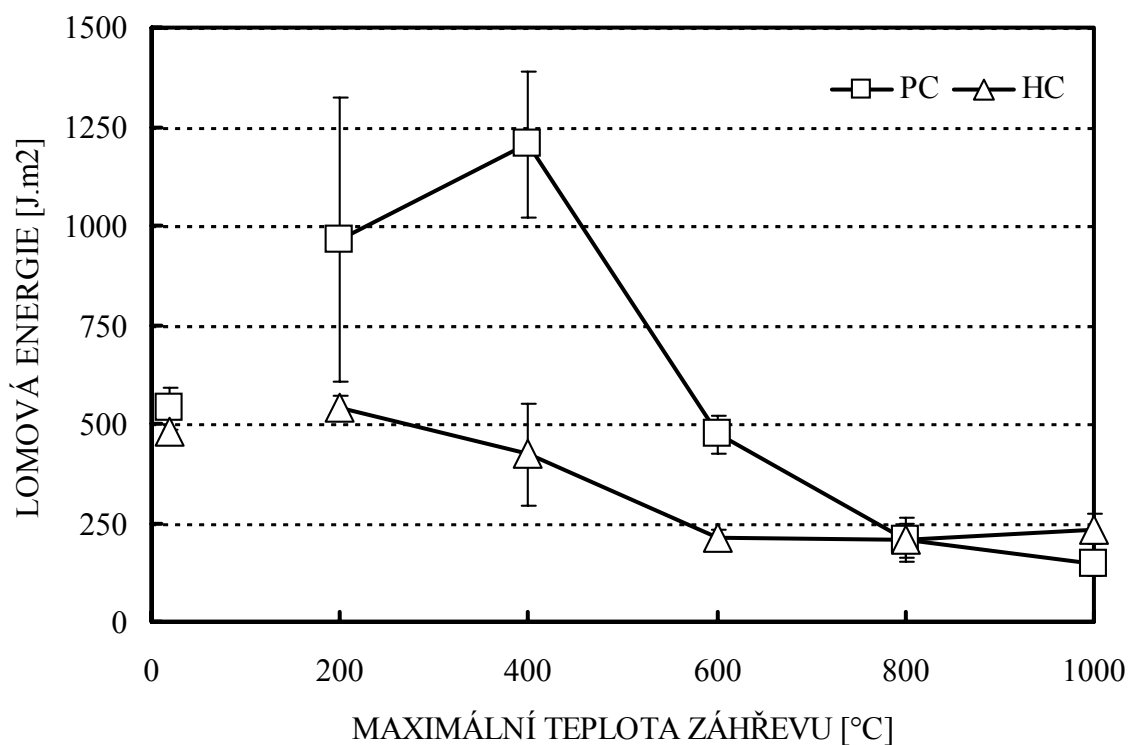
Energii spotřebovanou při celém lomovém procesu kvantifikuje tzv. lomová energie G_F – viz Obrázek 3. Tendencí a proporcemi se tento parametr velmi shoduje s lomovou houževnatostí. Pouze v teplotním intervalu 800 – 1000°C vykazuje HC kompozit mírný nárůst G_F stejně jako u modulu pružnosti.



Obrázek 1 Modul pružnosti vs. maximální teplota záhřevu



Obrázek 2 Efektivní lomová houževnatost vs. maximální teplota záhřevu



Obrázek 3 Lomová energie vs. maximální teplota záhřevu

5. Závěr

Je známo, že obě matrice (PC i HC) vykazují při zvyšování teploty snížení pevností. Porovnání lomových vlastností obou druhů kompozitů s uhlíkovými vlákny však ukázalo, že kompozity na bázi hlinitanového cementu mají menší závislost lomových vlastností na maximální teplotě záhřevu. U HC kompozitu se již při teplotě 1000°C zvyšuje modul pružnosti a lomová energie. To znamená, že kompozit je odolnější proti šíření trhlin. Zvýšení po namáhání na teplotu 400°C u kompozitů na bázi PC bude následně podrobně zkoumáno. Z předkládaných výsledků měření lze učinit závěr, že kompozity na bázi hlinitanového cementu, vyztužené uhlíkovými vlákny by bylo možno výhodněji použít pro ochranné protipožární deskové konstrukce, než kompozity na bázi portlandského cementu.

6. Poděkování

Práce na tomto příspěvku byly podporovány z prostředků projektu GA ČR 103/03/1350 a výzkumného záměru CEZ: J22/98: 261100007.

7. Literatura

Ahmad, G. N., Hurst, J. P. (1997) An analytical approach for investigating the causes of spalling of high strength concrete at elevated temperatures, in: *Proc. of Int. Workshop of Fire Performance of High Performance Concrete*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 95-108.

- Bažant, Z. P. & Planas, J. (1998) *Fracture and Size Effect in Concrete and other Quasibrittle Materials*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Bentur, A. & Mindess, S. (1990) *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. Elsevier Applied Science, London.
- Bílek, V., Keršner, Z., Salaj, J. & Schmid, P. (2002) Houževnatost betonu nás nezajímá, dokud ji beton neztratí, in: *Sborník Betonářské dny 02*, Pardubice, 261-264.
- Bílek, V., Mosler, T. & Keršner, Z. (2002) Betony s přísadou mikrosiliky a vláken, in: *Sborník Speciální betony (vlastnosti – technologie – aplikace)*, Otrokovice, 233-236.
- Bílek, V., Mosler, T., Keršner, Z. & Schmid, P. (2002) ...a nejlepší je beton, který zmrzne. Možnosti omezení anomálií ve vývoji lomových vlastností. *Stavitel*, X, 6, 34-35.
- Karihaloo, B. L. (1995) *Fracture mechanics of concrete*. Longman Scientific & Technical, New York.
- Handoo, S. K. et al. (1997) Effect of temperature on the physico-chemical and mineralogical characteristics of hardened concrete, in: *Proc. of the 10th Congress on the Chemistry of Cement*, Vol. 4, Göteborg, 4iv067.
- Chan, Y. N., Peng, G. F. & Anson, M. (1999) Residual strength and pore high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Research*, 21, 23-27.
- Keršner, Z., Rovnaníková, P., Schmid, P. & Matesová, D. (2003) Lomové vlastnosti C-vláknových kompozitů po namáhání vysokými teplotami. *Inžinierske stavby*, 51, 1 (v tisku).
- Matesová, D., Bayer, P. & Keršner, Z. (2002) Properties of alkali-activated aluminosilicate materials after high temperatures load. Part 2: Fracture aspects, in: *Proc. of Int. Symp. Non-Traditional Cements and Concrete*, Brno, 52-55.
- Stibor, M. (2001) Problémy s určováním lomové energie cementových kompozitů, in: *Sborník Problémy lomové mechaniky*, Brno, 72-77.
- Taylor, H. F. W. (1992) *Cement Chemistry*. London: Academic Press.
- Valenta, O. (1965) *Trvanlivost betonu a betonových konstrukcí*. SNTL Praha.