



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

**LOMOVÉ CHARAKTERISTIKY ALKALICKY AKTIVOVANÝCH
ALUMOSILIKÁTŮ PO NAMÁHÁNÍ VYSOKÝMI TEPLOTAMI**

Dita Matesová¹, Patrik Bayer², Pavel Schmid³, Zbyněk Keršner⁴

Materiál na bázi alkalicky aktivovaných alumosilikátů, zastoupených vysokopecní granulovanou struskou, sloužil pro výrobu vzorků, které byly po 28 dnech zrání na vzduchu a ve vodě podrobeny tepelnému namáhání při teplotách 200, 400, 600, 800, 1000 a 1200°C. Vzorky byly opatřeny centrálním zářezem a lámány tříbodovým ohybem. Zjišťovaly se mechanické/lomové charakteristiky a souběžně byly sledovány změny mikrostruktury alumosilikátů.

Klíčová slova: alkalicky aktivovaný alumosilikát, lomové charakteristiky, namáhání vysokými teplotami

Úvod

Lomové charakteristiky nám umožňují dozvědět se více o křehkosti či tažnosti materiálu, kvantifikovat jeho odolnost proti šíření trhlin. Doplňují tak klasickou informaci o vlastnostech kompozitů v podobě pevnostních charakteristik. Zvláště u teplotně namáhaných vzorků je zajímavé sledovat průběhy celé škály materiálových charakteristik a jejich variabilitu.

Změny v chování kompozitů při vysokých teplotách jsou úzce spjaty s probíhajícími chemickými a fyzikálními procesy. Lze sledovat migraci vody plynné či kapalné fáze, volné či chemicky vázané, v objemu materiálu. Migrací vody pak následně dochází k dehydrataci/hydrataci, chemickému rozpadu cementové matrice, atd. Zhoršení mechanických/lomových vlastností může být také způsobeno rozdílným koeficientem teplotní roztažnosti plniva/kameniva a matrice. S rostoucí teplotou roste rozpínání kameniva, zatímco matrice se začne smršťovat – u zatvrdlé cementové pasty asi kolem teploty 150°C. Spojením těchto dvou jevů dochází k rozvíjení trhlin v kompozitu. Např. malá propustnost betonu způsobuje velká vnitřní napětí při migraci vody a vodní páry, vedoucí k rozevírání trhlin a degradaci materiálu [1, 2, 3].

¹ Ing. Dita Matesová, Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 662 37 Brno, matesova.d@fce.vutbr.cz

² Ing. Patrik Bayer, Ústav chemie, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Žižkova 22, 662 38 Brno, bayer.p@fce.vutbr.cz

³ Ing. Pavel Schmid, PhD., Zkušební laboratoř ústavu stavebnin a zkušebních metod, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 662 37 Brno, schmid.p@fce.vutbr.cz

⁴ Ing. Zbyněk Keršner, CSc., Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 662 37 Brno, kersner.z@fce.vutbr.cz

Zkoumaný materiál

V předkládaném příspěvku byl pro experimenty použit materiál na bázi alkalicky aktivované jemně mleté vysokopeční granulované strusky [4, 5]. Pro aktivaci posloužilo sušené vodní sklo sodné SUSIL 2020 se silikátovým modulem $M_s = 2,07$. Jako plnivo byl použit křemenný písek do velikosti zrna 3 mm. Detaily složení zkoumané směsi uvádí tabulka 1.

Tab. 1 Složení směsi

Složka	Jednotka	Dávka
Struska	g	400
Křemenný písek	g	1200
SUSIL 2020	g	80
Voda	ml	200

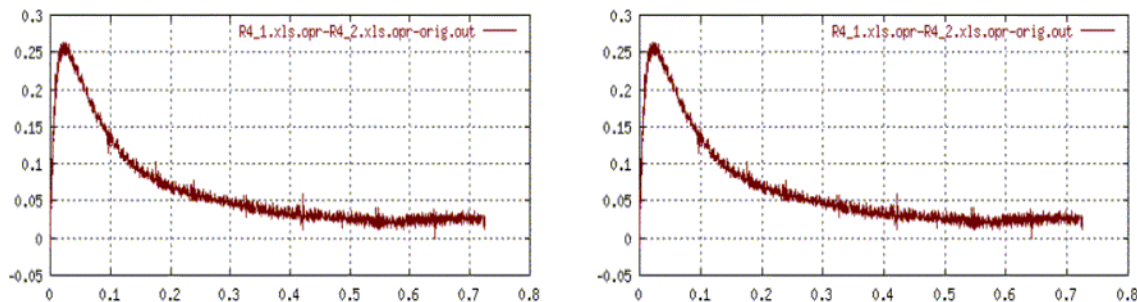
Mikrostruktura vytvrzeného materiálu má odlišný charakter od cementového tmelu v betonu. Hlavním rozdílem v mikrostruktuře je absence krystalických novotvarů a hutnost hlavní pojivové fáze, kterou je rentgenoamorfni C-S-H gel [6, 7, 8] (struktura tohoto gelu je na obrázku 11 v závěru příspěvku). Gelový charakter pojivových fází vede k rozdílným mechanickým a fyzikálně-chemickým vlastnostem.

Experimentální detaily

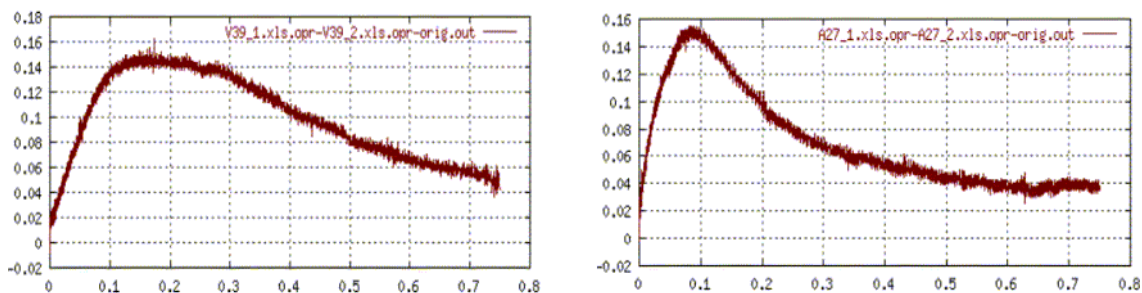
Postupně bylo vyrobeno 42 zkušebních trámečků se zářezem o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm alkalicky aktivovaného aluminosilikátu. Polovina vzorků zrála v suchém laboratorním prostředí (A), druhá polovina ve vodním uložení (V). Po 28 dnech zrání byla vždy šestice vzorků (tři typu A, resp. V) vypálena na určitou teplotu, rychlost výpalu $3^\circ\text{C}/\text{min.}$, výdrž při maximální teplotě 60 min. Zkoumané teploty byly – vedle srovnávací 20°C – 200, 400, 600, 800, 1000 a 1200°C . Zářez byl proveden ve středu rozpětí vzorků do jedné třetiny výšky trámečku před zkouškou tříbodovým ohybem. Zatěžování probíhalo přírůstkem deformací při rozpětí 120 mm. Hodnoty zatížení a průhybu ve středu rozpětí byly průběžně snímány. Prováděly se také zkoušky pevnosti v tlaku na zlomcích trámečků.

Výsledky

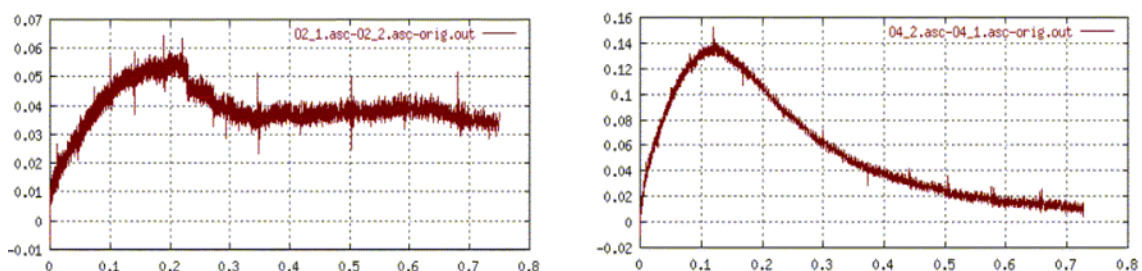
Příklady diagramů [10] zatížení v kN a průhybu v mm ze zkoušek tříbodovým ohybem představují obr. 1 až 4.



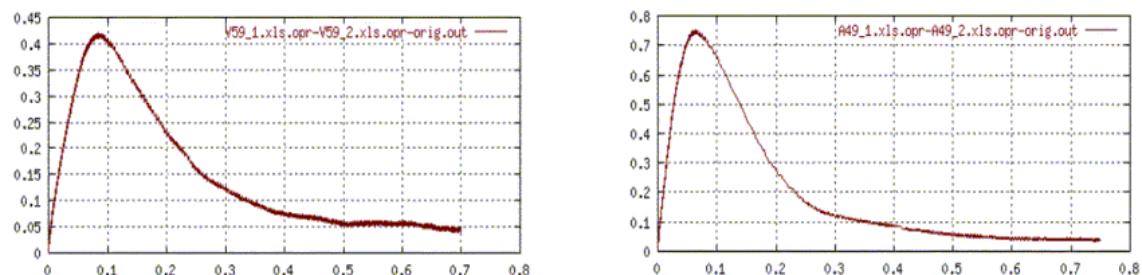
Obr. 1 Diagramy zatížení-průhyb:
srovnávací vzorky (V vlevo, A vpravo).



Obr. 2 Diagramy zatížení-průhyb:
vzorky s cílovou teplotou výpalu 600°C (V vlevo, A vpravo).



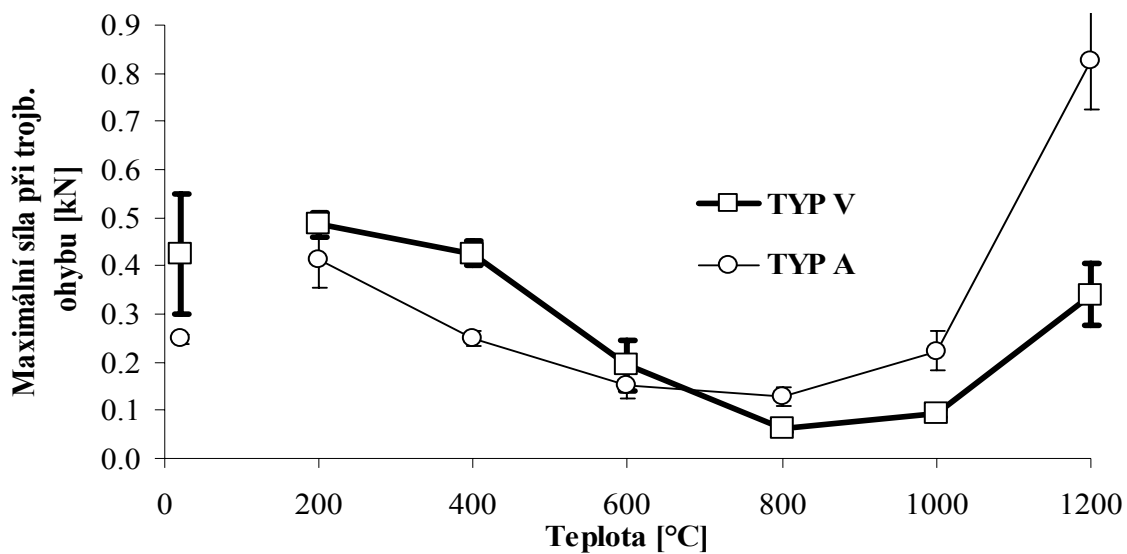
Obr. 3 Diagramy zatížení-průhyb:
vzorky s cílovou teplotou výpalu 800°C (V vlevo, A vpravo).



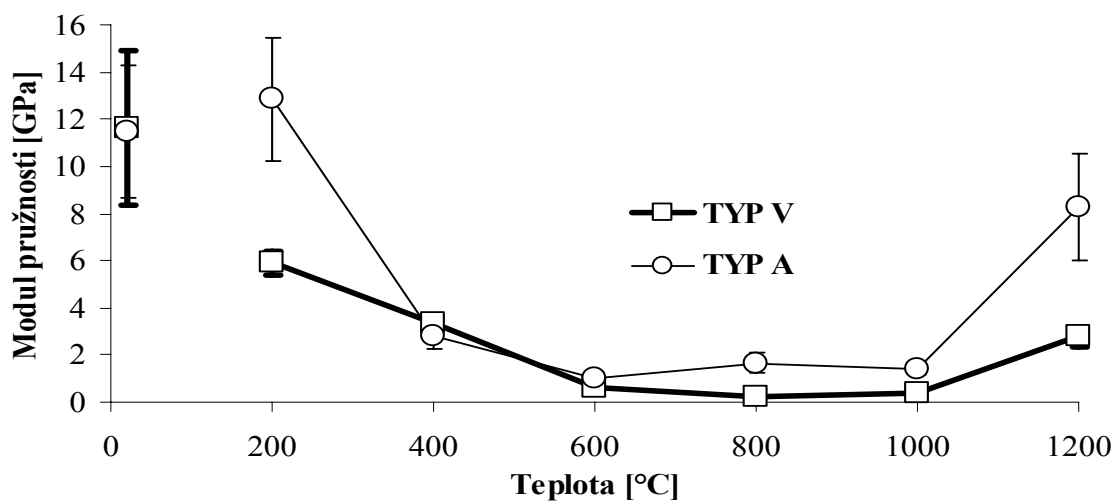
Obr. 4 Diagramy zatížení-průhyb:
vzorky s cílovou teplotou výpalu 1200°C (V vlevo, A vpravo).

Na obrázcích 5 až 10 lze nalézt některé výstupy z provedených zkoušek. V uváděných grafech jsou vyneseny aritmetické průměry ze tří (resp. pěti – v případě pevnosti v tlaku na zlomcích trámečků po zkoušce tříbodovým ohybem) měření \pm výběrové směrodatné odchylky. Modul pružnosti na obr. 6 je spočten dle [9] s uvažováním vlivu zářezu. Efektivní lomová houževnatost na obr. 7 je spočtena dle modelu efektivní trhliny [9]. Poznamenejme, že lomová energie v grafu na obr. 8 je určena jako podíl části lomové práce a vzdorující plochy průřezu [10]. Lomovou prací je v tomto případě plocha pod křivkou závislosti síla-průhyb do dosažení maximálního zatížení. Nelze si nevšimnout, že vzorky A a V se chovají poněkud odlišně. V oblasti nejnižších dosažených hodnot se ovšem téměř shodují. U vzorků V lze najít minima sledovaných charakteristik kolem 800°C, u vzorků A v 600 a 800°C. Pomineme-li výsledky u referenčních vzorků, zjistíme, že vzorky V mají „nejlepší“ vlastnosti při teplotě výpalu 200°C,

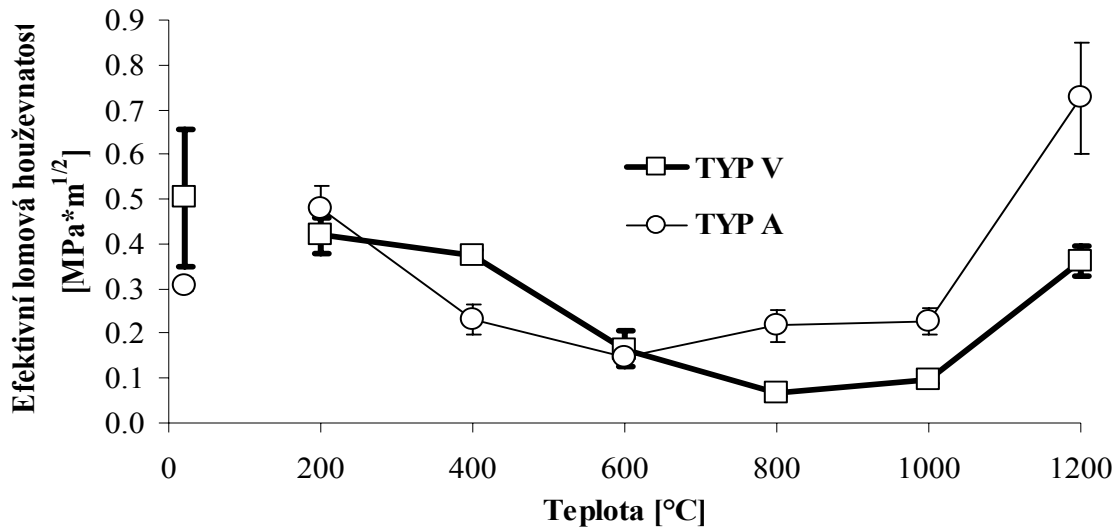
u typu A je to střídavě teplota 200 a 1200°C. Tyto výsledky mají úzkou spojitost s mikrostrukturou materiálu a jejími změnami, viz níže.



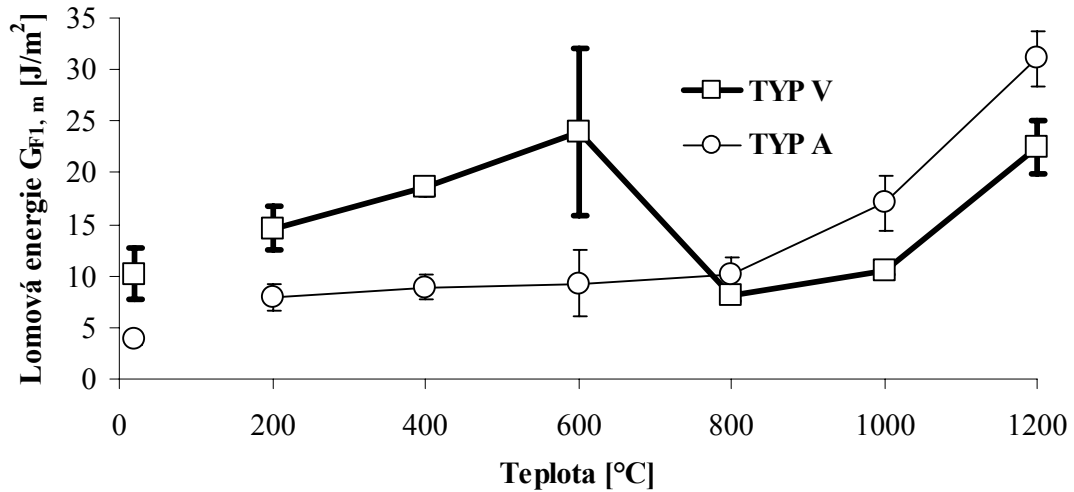
Obr. 5 Maximální dosažené zatížení při zkoušce třibodovým ohybem a teplota výpalu.



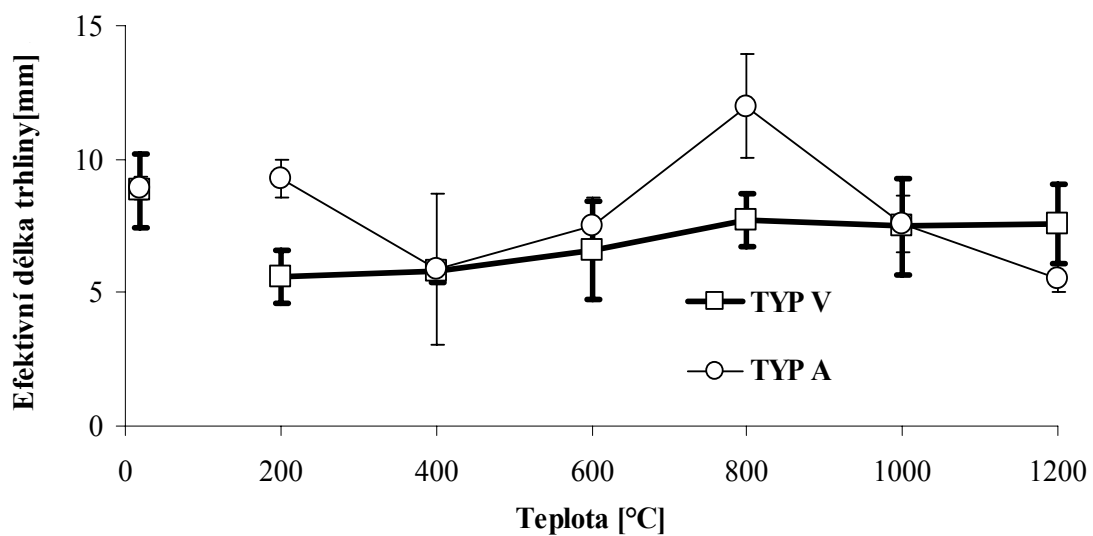
Obr. 6 Modul pružnosti ze zkoušky třibodovým ohybem a teplota výpalu.



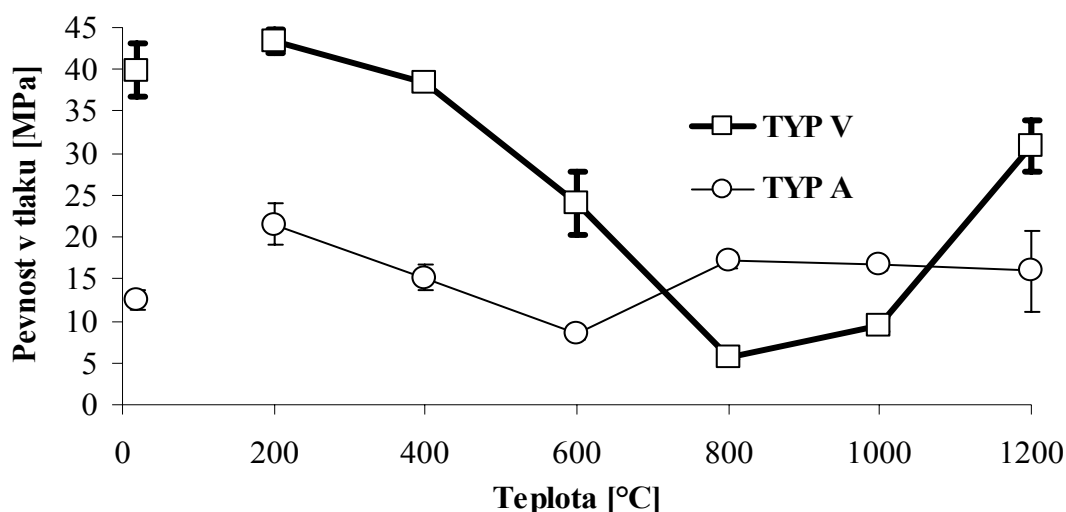
Obr. 7 Efektivní lomová houževnatost a teplota výpalu.



Obr. 8 Část lomové energie (do dosažení maximálního zatížení) a teplota výpalu.



Obr. 9 Rozdíl efektivní délky trhliny a hloubky zářezu a teplota výpalu.



Obr. 10 Pevnost v tlaku na zlomcích trámečků a teplota výpalu.

Mikrostrukturní změny

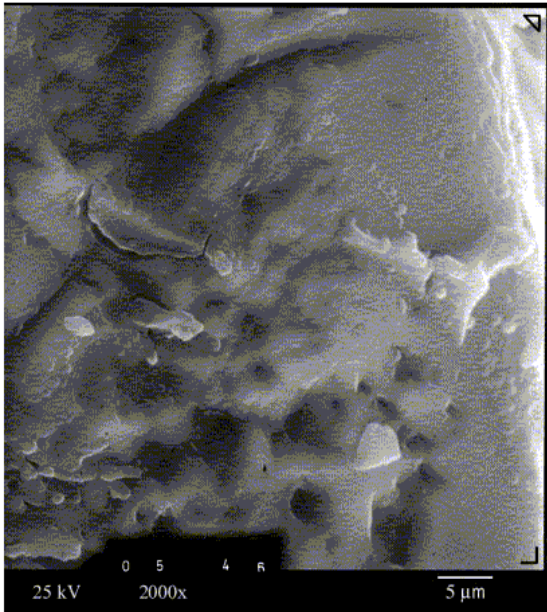
V průběhu zahřívání vzorků do 400°C dochází u zkoumaného materiálu nejprve k postupné dehydrataci pojivové fáze, která nemá výrazný vliv na její mikrostrukturu. Odrazem těchto malých změn v mikrostruktuře je mírný pokles většiny sledovaných charakteristik.

K radikálním změnám v mikrostruktuře dochází v intervalu teplot 400 – 800°C. V této oblasti dochází nejprve při teplotě 573°C k modifikační přeměně křemene alfa na beta. Tato modifikační přeměna je doprovázena objemovými změnami použitého křemenného plniva, v důsledku kterých dojde k vzniku velkého množství mikrotrhlin v pojivové fázi, jak je vidět na obrázku 12, a také k porušení mezifáze plnivo-pojivo. Důsledkem těchto změn je zhoršení fyzikálních parametrů u vzorků namáhaných teplotou 600°C.

Další závažná mikrostrukturní změna probíhá při teplotě 800°C, kdy dochází k rozkladu pojivové fáze, jejímž důsledkem je velké množství mikropórů, jež jsou patrné na obrázku 13. Tento nárůst mikropórů spolu s mikrotrhlinami po modifikační přeměně křemene má za následek další výrazné zhoršení sledovaných charakteristik.

V oblasti teplot nad 800°C dochází z hlediska mikrostruktury ke vzniku nových produktů a mezifází. Tyto produkty jsou nejlépe vidět u vzorků namáhaných teplotou 1200°C, jak ukazuje obrázek 14. Na tomto snímku je v levém horním rohu část zrna plniva a na okraji tohoto zrna je patrná vzniklá nová mezifáze plnivo-pojivo, která nahrazuje původní mezifázi rozrušenou modifikační přeměnou křemene. Pojivová fáze v této oblasti teplot také podléhá výrazným změnám, nejprve dochází k úplnému rozkladu gelu a následně k tvorbě nové pojivové fáze.

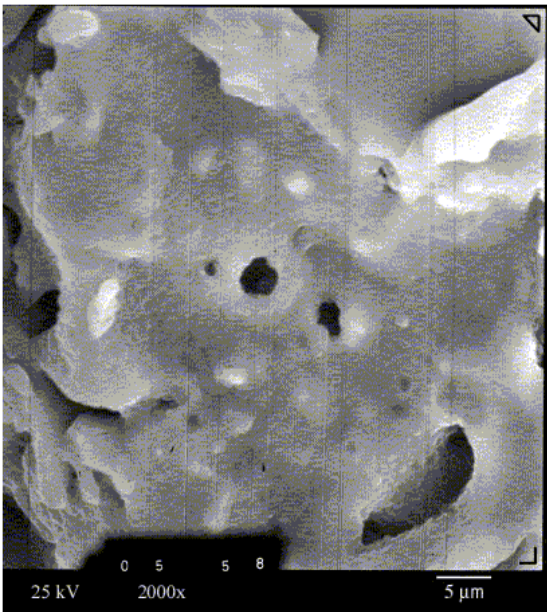
Díky vzniklým novým produktům a hlavně nové mezifáze plnivo-pojivo, která opět zaručuje částečné spolupůsobení, se materiál stává znovu kompaktnější, a to má příznivý vliv na všechny sledované fyzikální parametry.



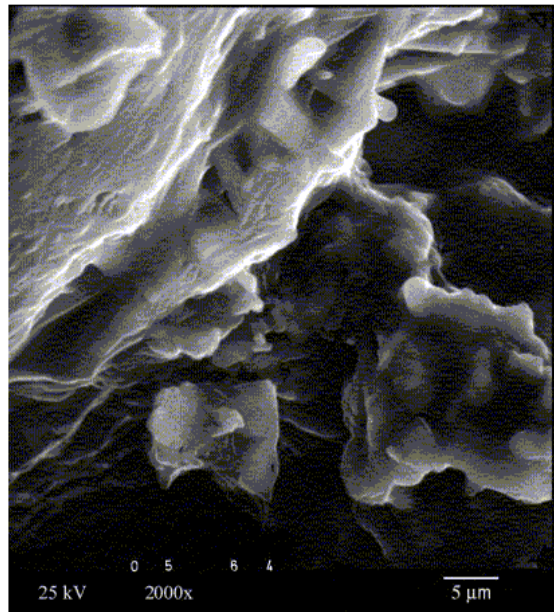
*Obr. 11 Referenční vzorek.
600°C.*



*Obr. 12 Teplota výpalu
600°C.*



Obr. 13 Teplota výpalu 800°C.



Obr. 14 Teplota výpalu 1200°C.

Závěry

Z porovnání grafů a mikrosnímků si lze učinit představu o vlivu mikrostruktury na sledované mechanické/lomové charakteristiky zkoumaných alumosilikátů v celém rozsahu maximálních teplot výpalu 200 – 1200°C. Bylo zaznamenáno rozdílné chování vzorků podle typu jejich ošetřování. Nejnižších hodnot je u sledovaných charakteristik dosahováno pro maximální teplotu výpalu 600, resp. 800°C.

Poděkování

Práce na tomto příspěvku byly podporovány z prostředků grantového projektu GA ČR 103/02/1030 a výzkumných záměrů CEZ: J22/98: 261100007,8.

Literatura

- [1] Gawin, F. et al.: Modelling thermo-hygro-mechanical behaviour of High Performance Concrete in high temperatures environments. *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, vol. 1, 199 – 206, Cachan, 2001.
- [2] Nechnech, W. et al.: On the modeling of thermo-mechanical concrete for the finite element analysis of structures submitted to elevated temperatures. *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, vol. 1, 271 – 278, Cachan, 2001.
- [3] Zhang, B., Bicanic, N.: Fracture energy of high performance concrete at temperatures up to 450°C. *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, vol. 1, 461 – 468, Cachan, 2001.
- [4] Gluchovskij, V.D.: Šlakošćoločnyje betony na mělkozernistyeh zapolnitěljach. *Vyšća škola, Kyjev*, 1981.
- [5] Brandšter, J.: Stuskoalkalické betony. *Stavivo* 62, 1984, 3.
- [6] Mololepszy, J., Petri, M.: Microstructure and Mechanical Properties of Alkali-Activated Blast Furnace Slag Pastes. *TIZ-Fachberichte*, 111, 1987, 3.
- [7] Talling, B.: Accelerated Hardening of Slag when Used as Active Binder. *ACI Symposium „Technology of Concrete when Pozzolan and Slag are Used“*. Montreney, 1985.
- [8] Škvára, F.: Struskoalkalické cementy. *Stavivo* 63, 1985, 1.
- [9] Karihaloo, B. L.: *Fracture mechanics of concrete*. Longman Scientific & Technical, New York, 1995.
- [10] Stibor, M. Problémy s určováním lomové energie cementových kompozitů. *Sborník Problémy lomové mechaniky*, Brno, 2001, 72 – 77, ISBN 80-214-1906-7.