



INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2005

NÁRODNÍ KONFERENCE

s mezinárodní účastí

Svratka, Česká republika, 9. - 12. května 2005

"SIMULATION OF THREE-POINT BENDING TESTS OF ALUMOSILICATE MORTARS AFTER HIGH TEMPERATURE LOADING

D. Matesová*, D. Lehký*

Summary: *Physical and chemical changes in quasibrittle materials loaded with high temperature affect the fracture mechanical behavior of structures. Three-point bending tests of notched beams made of aluminosilicate mortar after loading with high temperature up to 1200°C (with step 200°C) are simulated in this study. Nonlinear analysis is performed in software ATENA. A material model SBETA based on nonlinear fracture mechanics that very well describes all the aspects of quasibrittle behavior was applied. The method based on the combination of neural networks and stochastic analysis of structure was successfully employed for determination of input data. The comparison of experimentally determined parameters and input data for numerical simulation was carried out in order to evaluate the applicability of these parameters for numerical simulations.*

1. Úvod

V kvazikřehkých materiálech (např. v betonu či maltě) vystavených vysokoteplotnímu namáhání probíhají fyzikální a chemické procesy a změny, které ovlivňují mechanické parametry materiálu konstrukce, včetně parametrů lomových. To se projeví na výsledném chování konstrukce, např. na vzoru šíření trhlin, na únosnosti konstrukce/prvku apod.

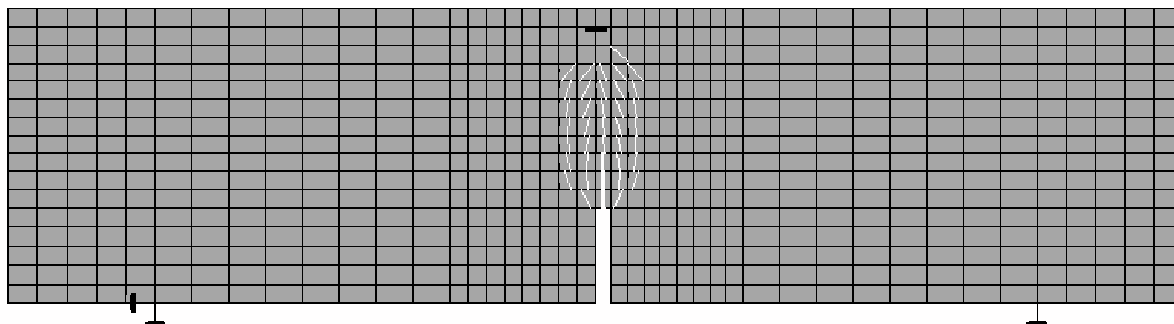
Na základě dříve vykonaných experimentů byly zjištěny mechanické/lomové vlastnosti aluminosilikátové malty po vysokoteplotním namáhání (jednalo se o teploty až do 1200°C – s krokem 200°C), které slouží jako vstupní veličiny pro nelineární modelování konstrukcí z kvazikřehkých materiálů. Konkrétně se jednalo o experimenty třibodového ohybu na trámečcích se zářezem zatěžovaných deformací, jejichž výstupem je diagram zatížení-průhyb. Detaily o provedených experimentech a materiálu lze nalézt v (Matesová et al., 2002a, b).

2. Simulace zkoušky

Pro numerickou simulaci zkoušky třibodového ohybu tepelně namáhaných vzorků byl použit software ATENA, verze pro 2D simulace (Červenka a Pukl, 2003). Pro modelování

*Ing. Dita Matesová, *Ing. David Lehký: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky, Veveří 95/331, 602 00 Brno, tel. +420 54114 7368, e-mail: matesova.d@fce.vutbr.cz

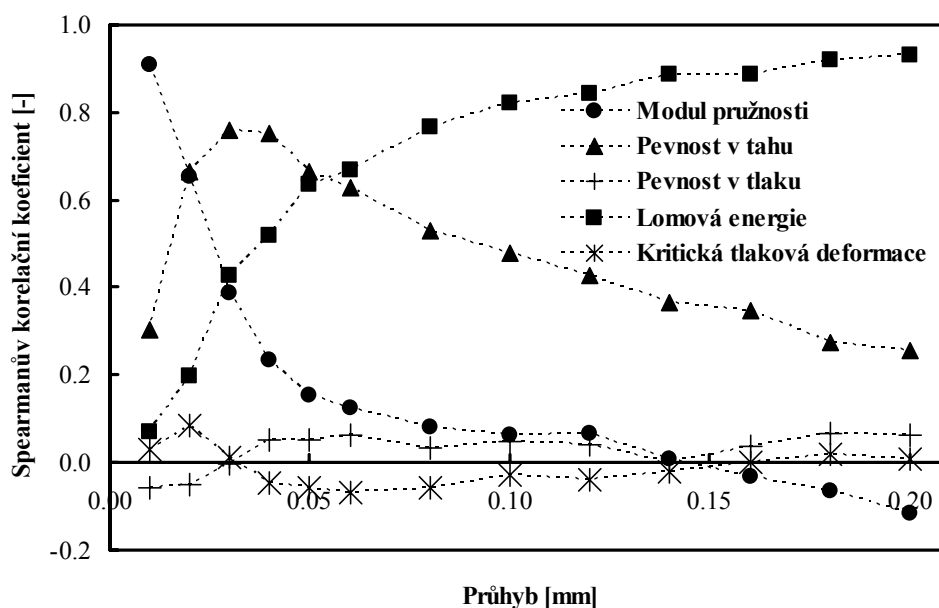
nelineárního chování posloužil materiálový model SBETA. Vzorek/trámeček se podroboval zatížení deformací ve středu rozpětí a pro výstupní křivku byla monitorována síla a odpovídající svislý průhyb v souladu s výše zmíněným lomovým experimentem. Model trámečku naznačuje obr.1 – je zde patrný stupeň rozvinutí porušení trhlinami nad zářezem při simulaci vzorku předeřátého na 200°C v okamžiku dosažení maximálního zatížení.



Obr.1 Model vzorku (po namáhání teplotou 200°C) se sítí trhlin při dosažení maximálního zatížení.

3. Identifikace parametrů

Pro stanovení vstupních lomově-mechanických parametrů pro účely numerické simulace byla využita identifikační metoda založená na kombinaci umělé neuronové sítě a stochastické analýzy nosníku (Lehký & Novák, 2004). Neuronová síť použitá při identifikaci je typu vícevrstvý perceptron s jednou skrytou vrstvou čítající 8 neuronů s nelineární přenosovou funkcí a výstupní vrstvou s 3 lineárními neurony odpovídající 3 hledaným parametrům modelu: modulu pružnosti, tahové pevnosti a lomové energii. Jako vstup sítě slouží vybraných 15 bodů na experimentálně získaném zatěžovacím diagramu.



Obr.2 Citlivostní analýza – citlivost průhybu ve středu rozpětí simulovaného trámečku na jednotlivé vstupní parametry

Aby síť dokázala adekvátně reagovat na vstupní signál, bylo nutné provést nejprve učící fázi. Učící množinu tvořilo 20 náhodných realizací zatěžovacích diagramů získaných stochastickou analýzou s náhodně generovanými parametry modelu. Součástí stochastické analýzy byla i citlivostní analýza (obr.2), která poukázala na dominantnost pouze 3 výše zmíněných parametrů a ty byly dále identifikovány. K učení sítě byl použit algoritmus zpětného šíření chyby. Poté byla provedena simulace sítě s experimentálním zatěžovacím diagramem a získány výsledné parametry modelu. Pro práci s neuronovými sítěmi byl použit software DLNNET (Lehký, 2005) vyvíjený na Ústavu stavební mechaniky brněnské stavební fakulty.

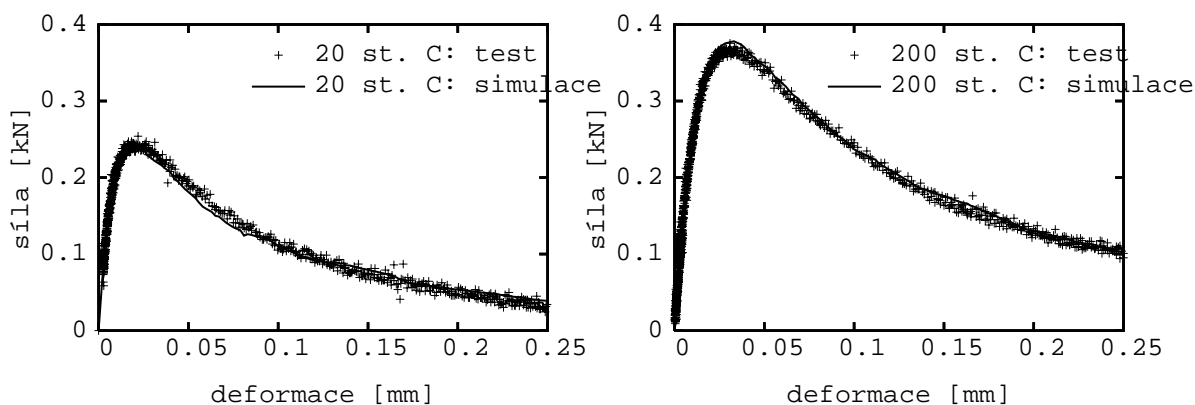
4. Výsledky

Výstupy identifikace parametrů jsou pro všechny sledované teploty uvedeny v tab.1. Tyto parametry doplnily vstupní hodnoty modelu lomového experimentu v softwaru ATENA, resp. materiálový model SBETA. S těmito vstupy proběhly simulované zkoušky tříbodovým ohybem vzorků s centrálním zářezem. Výsledky simulací jsou tu prezentovány skrze diagramy zatížení-průhyb uprostřed rozpětí. Simulované diagramy doplňují experimentálně získané sady a pro příslušné maximální teploty výpalu je uvádějí obrázky 3-6: pro teplotu 20°C a 200°C obr.3, pro 400°C a 600°C obr.4, pro 800°C a 1000°C obr.5 – vše pro srovnání v jednotném měřítku sil i deformací; pro maximální teplotu 1200°C lze diagramy nalézt na obr.6 (upozorněme na jiné měřítko zatížení – bylo dosaženo podstatně vyššího maxima – a na relativně krátkou sestupnou větev diagramu). Ve všech případech bylo dosaženo vynikající shody křivek simulovaných při použití identifikovaných vstupních parametrů s experimentálními výstupy.

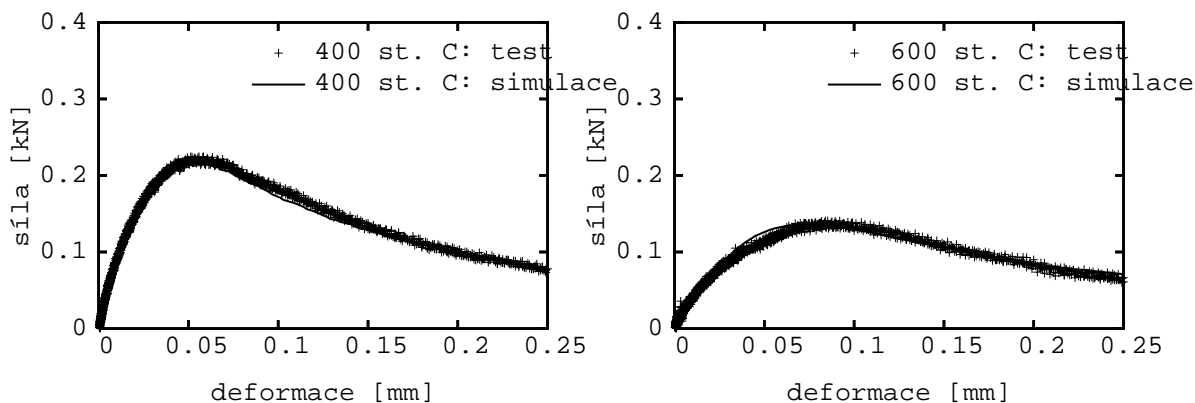
Dále byl posouzen vztah mezi parametry získanými z experimentů a vstupními daty pro numerickou simulaci. Na obrázcích 7-9 jsou vykresleny hodnoty modulu pružnosti, tahové pevnosti a lomové energie. Z jednotlivých průběhů a uvedeného korelačního koeficientu r je zřejmý vztah mezi veličinou spočtenou z experimentálně získaných křivek zatížení-průhyb a vstupními daty použitými pro nelineární simulaci experimentu. Poznamenejme, že v obr.8 jsou srovnávány dvě odlišné veličiny – pevnost v tahu za ohybu na trámci se zářezem dostupná z experimentů a hodnota pevnosti v tahu potřebná jako vstup SBETA modelu. Z uvedených obrázků je patrný velmi podobný trend porovnávaných veličin tudíž vysoká korelace mezi nimi. Jediný modul pružnosti se prakticky přesně shoduje pro obě uvedené křivky a případné odlišnosti jsou dané ne zcela přesným podchycením počátečního sklonu vzestupné větve l-d diagramu při simulaci. Sama vysoká korelace mezi parametry z experimentu a vstupními daty pro simulaci ovšem neumožní přímé použití experimentálně určených dat jako vstupních parametrů pro numerickou simulaci díky proměnlivosti poměru mezi jednotlivými veličinami v závislosti na teplotě zahřívání. Normalizované poměry mezi danou vstupní veličinou pro simulaci a výstupní veličinou z experimentu jsou vidět na obr.10. Pouze modul pružnosti vykazuje stálou hodnotu poměru díky výše zmíněné shodě dat z experimentu s parametry materiálového modelu.

Tab.1. Identifikované parametry - vliv tepelného namáhání materiálu vzorků

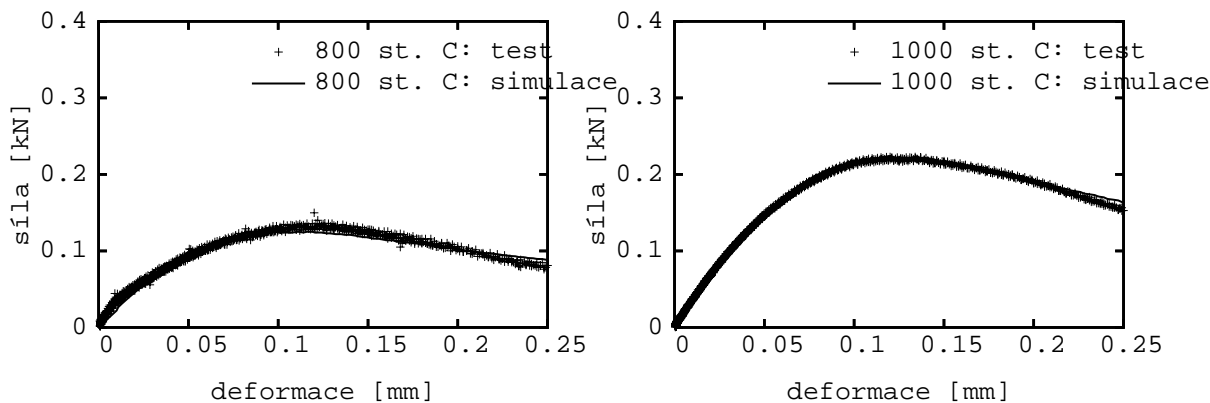
Veličina	Jednotka	Maximální teplota výpalu ve °C						
		20	200	400	600	800	1000	1200
Modul pružnosti	GPa	15,3	12,7	3,7	1,6	1	1,4	9
Pevnost v tahu	MPa	0,57	1,06	0,78	0,5	0,45	0,89	3,3
Lomová energie	J/m ²	30	71	50	47	65	110	180



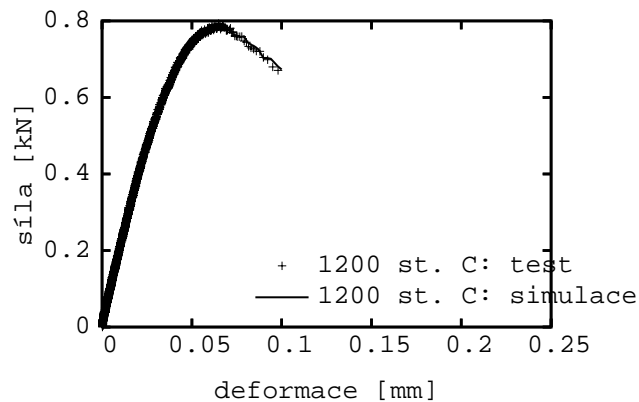
Obr.3 Diagramy zatížení-průhyb z testů a simulace: teploty 20°C (vlevo) a 200°C.



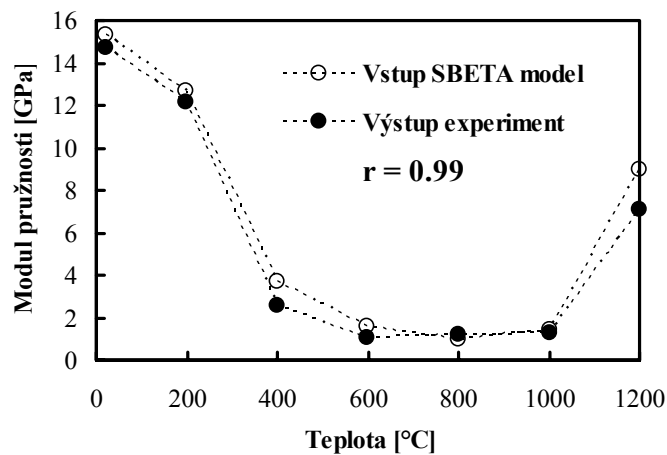
Obr.4 Diagramy zatížení-průhyb z testů a simulace: teploty 400°C (vlevo) a 600°C.



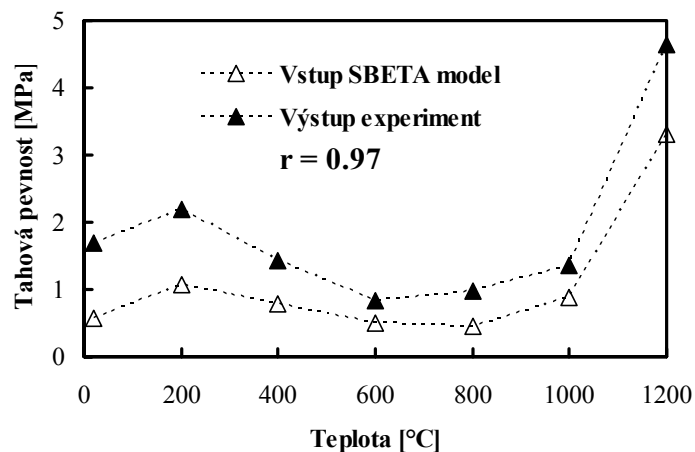
Obr.5 Diagramy zatížení-průhyb z testů a simulace: teploty 800°C (vlevo) a 1000°C.



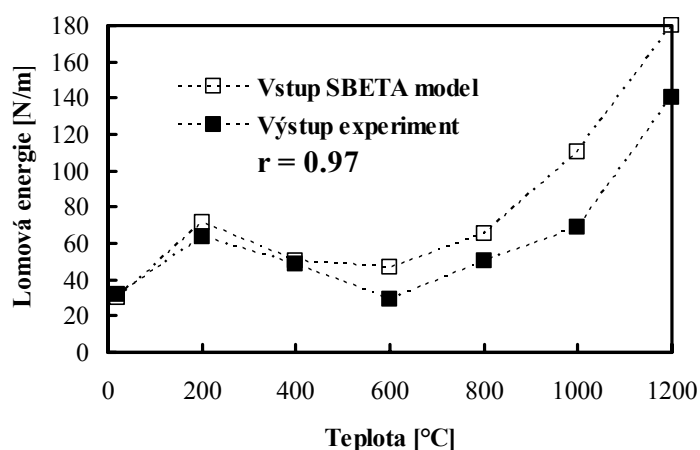
Obr.6 Diagramy zatížení-průhyb z testů a simulace: teplota 1200°C.



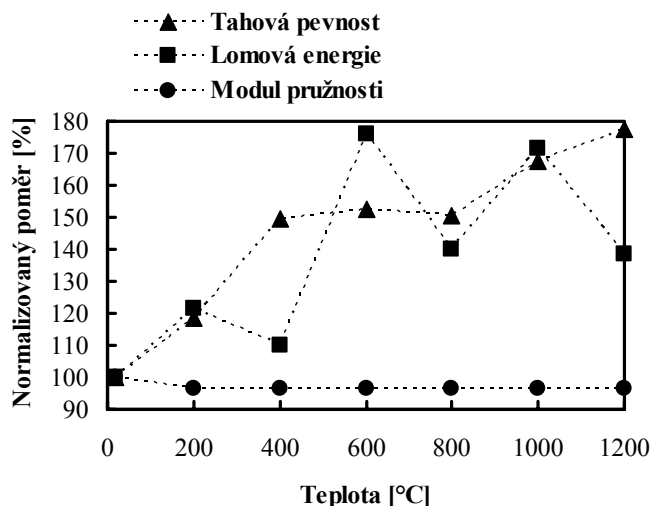
Obr.7 Vztah mezi veličinou spočtenou z experimentálních dat a vstupní veličinou pro numerickou simulaci: modul pružnosti.



Obr.8 Vztah mezi veličinou spočtenou z experimentálních dat a vstupní veličinou pro numerickou simulaci: tahová pevnost.



Obr.9 Vztah mezi veličinou spočtenou z experimentálních dat a vstupní veličinou pro numerickou simulaci: lomová energie.



Obr.10 Normalizovaný poměr mezi danou vstupní veličinou pro simulaci a výstupní veličinou z experimentu v závislosti na teplotě.

5. Závěry

Z uvedených digramů zatížení-průhyb lze jednoznačně uzavřít, že simulace velice dobře vystihuje skutečné chování trámečků při lomové zkoušce v celém rozsahu maximálních teplot výpalu. To můžeme interpretovat tak, že změna sledovaných dominantních vstupních parametrů (modulu pružnosti, pevnosti v tahu, lomové energie) vlivem aplikovaných tepelných namáhání alumosilikátového kompozitu poslouží při nelineárním modelování k věrohodnému zachycení výsledné odezvy konstrukce/prvku z tohoto materiálu. Účinným nástrojem pro zjištění vstupních parametrů pro simulaci je zde sofistikovaná identifikační metoda kombinující umělé neuronové sítě a stochastickou analýzu konstrukce. Vstupní parametry použitého materiálového modelu totiž nelze přesně určit z parametrů spočtených z výstupního diagramu zatížení-průhyb získaného z experimentů. Korelace mezi těmito parametry je sice velmi vysoká, avšak jejich vzájemné poměry se mění v závislosti na teplotě

výpalu. Z výsledků vyplývá, že přímo použitelný ze sledovaných parametrů je pouze modul pružnosti.

6. Poděkování

Práce na tomto příspěvku byly podporovány z prostředků projektu MŠMT 1K041111 a projektu GAČR 103/04/2092.

7. Literatura

Červenka, V. & Pukl, R. (2003) ATENA Program documentation, theory guide, Červenka Consulting, Praha.

Lehký, D. & Novák, D. (2004) Identification of material model parameters using stochastic training of neural network. In: *Proc. of 5th PhD Symposium in Civil Engineering*, Delft, pp.535-542.

Lehký, D. (2005) DLNNET – program documentation, theory and user's manual, Brno, (v přípravě).

Matesová, D., Bayer, P., Schmid, P. & Keršner, Z. (2002a) Lomové charakteristiky alkalicky aktivovaných alumosilikátů po namáhání vysokými teplotami. In: *sborník CD Inženýrská mechanika 2002*, Svratka.

Matesová, D., Bayer, P. & Keršner, Z. (2002b) Properties of alkali-activated aluminosilicate materials after high temperatures load. Part 2: Fracture aspects. In: *Proc. of Symposium Non-Traditional Cements and Concrete*, Brno, pp.52-55.