

Alkalická aktivace mletého keramického střepu

Ing. Bohuslav ŘEZNÍK
prof. RNDr. Pavla ROVNANIKOVÁ, CSc.
VUT v Brně – Fakulta stavební

Alkalická aktivace je proces, při kterém aluminosilikátové složky, obsažené v surovině, reagují se sloučeninami alkalických kovů, nejčastěji s křemičitany. Článek se zabývá možností použití vedlejších produktů cihlářského průmyslu pro přípravu geopolymérů. Geopolymery byly podrobeny stanovení pevnosti v tlaku, tahu za ohybu, objemové hmotnosti, porozity, vybrané vzorky byly analyzovány pomocí analýz REM a XRD.

Alkali activation of the ground brick body

Aluminosilicate materials can be transformed into a very well compacted binding material by the process called alkali activation. The present work aims at the possibility of using brick body by-products from the brick industry in the development of geopolymers. Geopolymers based on the fine ground brick body were tested for compressive and flexural strength, bulk density, porosity and the pore size distribution. The microstructure of chosen specimens was examined by means of the SEM and XRD analysis.

Úvod

Alkalicky aktivované materiály, někdy nazývané geopolymery, jsou známé již mnoho let. Vznikají alkalickou aktivací aluminosilikátových látek v silně zásaditém prostředí. Díky svému mechanickým vlastnostem jsou to materiály s velkým potenciálem a širokým rozsahem použití. Vznikají geopolymery, která probíhá během chemické reakce aluminosilikátů s křemičitany, uhličitany nebo hydroxidy alkalických kovů. Při tomto procesu se vytváří pevná struktura, reakce vedoucí ke vzniku této struktury je odlišná od procesů tuhnutí a tvrdnutí cementových pojiv.

Cihlářské zeminy obsahují jílové minerály, které se řadí mezi vrstevnaté aluminosilikáty, jež mají schopnost s vodou vytvářet tvárné těsto. Kromě jílových minerálů mohou zeminy obsahovat i jiné minerály, např. krystalické i nekrystalické modifikace SiO_2 , živce, zeolity, uhličitany, oxidy nebo hydroxidy železa a hliníku, nekrystalické jílové minerály ze skupiny alofanu a organické příměsi [1]. Cihlářské výrobky se pájí při teplotách okolo $850\text{ }^\circ\text{C}$. Při této teplotě se netvoří stabilní krystalický mullit, ale jíly se přeměňují na amorfní bezvodé sloučeniny, které dávají předpoklad možnosti alkalické aktivace. Reakce s aktivátorem umožní rozpouštění těchto metastabilních nekrystalických fází obsažených ve střepu v silně zásaditém prostředí a následnou tvorbu pevné struktury.

Keramické zeminy vypálené na teplotu $800\text{--}900\text{ }^\circ\text{C}$ získávají také pucolánovou aktivitu, reagují s hydroxidem vápenatým a vodou za vzniku hydratovaných křemičitanů vápenatých, které tuhnou a tvrdnou, a jsou stálé i pod vodou [1]. V případě alkalické aktivace keramického střepu vznikají během geopolymerační reakce jiné sloučeniny než při reakci pucolánu s hydroxidem vápenatým. Výsledné vlastnosti vzniklých geopolymérů závisí na reaktivitě suroviny s alkalickým aktivátorem, která závisí na teplotě výpalu, chemickém a mineralogickém složení primární suroviny a na velikosti částic.

Alkalická aktivace aluminosilikátů

První práce o možnostech alkalické aktivace aluminosilikátů se datují do třicátých let minulého století [2]–[4]. Problematice alkalické aktivace se následně od padesátých let věnoval Gluchovsky, který poprvé popsal možnost využití pojiv na bázi aluminosilikátů s nízkým obsahem vápníku

(jílu) a roztoků sloučenin alkalických kovů. Tyto materiály pojmenoval „gruntocementy“ [5]. Od té doby bylo provedeno mnoho rozsáhlých vědeckých studií, jež stanovily trendy pro přípravu a průmyslovou aplikaci alkalicky aktivovaných pojiv a kompozitů z nich připravených, zejména pak vysoce užitných anebo environmentálně udržitelných alternativních pojiv k portlandskému cementu [6]. O výzkum vlastností a využití geopolymérů se zasloužili zejména van Deventer z Austrálie, který se věnuje především studiu geopolymérů na bázi elektrárenských popílků pro přípravu kompozitů jako náhrady betonů z portlandského cementu [7]–[10], a ve Španělsku Palomo a Puertas, jejichž práce jsou zaměřeny nejen na mikrostrukturu, ale také na trvanlivost a degradační procesy těchto pojiv [11], [12]. V ČR se této problematice věnoval od sedmdesátých let minulého století Brandštrét [13], Škvára [14] a Rovnaník [15], [16], transportními jevy v těchto materiálech se zabýval Černý a kol. [17]–[20].

Geopolymery – alkalicky aktivované aluminosilikáty

Pojem „geopolymer“ zavedl prof. Davidovits v sedmdesátých letech minulého století. Nazval a popsal alkalicky aktivované aluminosilikátové materiály, složení typu „poly-sialate“ a jeho varianty [6], [21], které jsou někdy užívány v obecném popisu geopolymerních pojiv. Patří do skupiny minerálních pojiv blízké příbuzných přírodním zeolitům. Jejich struktury jsou složeny z polymerních sítí Si-O-Al podobných těm, které se objevují v zeolitech. Hlavním rozdílem je rentgenoamorfní charakter geopolymérů, zatímco zeolity jsou krystalické.

Geopolymery se vyznačují výjimečnou teplotní stabilitou [22]–[25], velmi dobrou chemickou odolností a výbornými mechanickými vlastnostmi. Z důvodu chemické stability jsou využitelné v oblasti imobilizace toxických a radioaktivních odpadů [26].

Geopolymerace

Geopolymerace je reakce aluminosilikátového materiálu s alkalickým roztokem s vysokou koncentrací OH⁻ iontů (pH > 12). Počáteční tvorba geopolyméru, spojená s rozpouštěním aluminosilikátu v silně zásaditém prostředí, je v podstatě alkalickou hydrolyzou sloučenin s kyslíkovými můstky mezi

jednotlivými polyedry SiO_4^{4-} a AO_4^{4-} . Rozpuštění amorfních aluminosilikátů je poměrně rychlé, a to vede k rychlému vytvoření přesyceného roztoku obsahujícího monomerní složky $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$, $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$ a $[\text{SiO}_2(\text{OH})_2]^{2-}$. Tyto složky mezi sebou kondenzují a vytvářejí aluminosilikátový gel, který následně vede k tvorbě nových aluminosilikátových sloučenin, jejichž struktura je závislá na celkovém poměru Si:Al. Důležitá je přítomnost iontu alkalického kovu, vyrovnávajícího záporný náboj, který se vytvoří na atomu hliníku. Geopolymery jsou chemickým složením podobné zeolitům, fáze geopolymerního pojiva bývá často popisována jako amorfni, avšak mnoho autorů popisuje tvořící se fáze jako semikrystalické nebo polykrystalické, obzvláště u produktů vznikajících při vyšších teplotách. Vzhledem k předpokladu alkalické aktivace materiálů obsahujících Si a Al je možné pro přípravu geopolymérů potenciálně použít širokou škálu výchozích surovin, a to přírodních, uměle vyrobených, ale i odpadních materiálů z různých průmyslových odvětví [27]-[29].

Charakteristika surovin a metodika zkoušek

K aktivaci byly použity cihelné střepy, které vznikají jako odpad při výrobě cihlářského zboží, a to mleté cihelné střepy z nedodělků z výroby střešní krytiny v závodě TONDACH ve Šlapanicích (dále jen ST) a cihelný prach vznikající při broušení přesných cihel FAMILY 50 v závodě HELUZ, cihlářský průmysl, v Hevlíně (dále jen PH). Další surovinou byla mletá antuka od firmy CIVAS, vyráběná z odpadu vznikajícího při výrobě cihlářských prvků, při demolici budov z cihel a při

rekonstrukci střech z pálené střešní krytiny (dále jen AM). Střepy TONDACH a antuka CIVAS byly pro dosažení vhodné velikosti zrn a dostatečného měrného povrchu pro průběh alkalické aktivace a tvorbu geopolyméru pomlety v kulovém laboratorním mlýně. Cihelný prach HELUZ měl dostatečnou jemnost, a proto se již neupravoval.

U vstupních surovin byla síťovým rozbořem laboratorně stanovena granulometrie, mineralogické složení surovin (Bruker D8 Advance) a byl proveden chemický rozbor. Síťový rozbor (tab. 1) ukázal u mletých střepů ST přítomnost 93,9 % částic menších než 0,063 mm, prach PH měl obsah těchto částic 75 %, AM 72 %. Dostatečně vysoká jemnost a velký měrný povrch vstupních surovin (tab. 2) jsou vhodné a nezbytné pro průběh alkalické aktivace a tvorbu geopolyméru. Z chemického rozboru vyplývá, že všechny suroviny mají vysoký obsah oxidů křemíku a hliníku, který je předpokladem možnosti alkalické aktivace a přípravy geopolymérů.

Rentgenová difrakční analýza ukázala, že dominantní krystalickou fází u ST je křemen, dále byly identifikovány živce, amfibol, hematit a muskovit. V cihelném prachu převažuje křemen, živce a muskovit. Dále byly přítomny oxidy železa, magnetit a hematit. U antuky analýza prokázala přítomnost zejména křemene, muskovitu, illitu, dále byly přítomny oxidy železa, magnetitu, hematitu a malé množství kalcitu, sádrovce a amfibolitu.

Jako aktivátor byl použit koloidní roztok křemičitanu sodného (vodní sklo), jehož silikátový modul ($M_s = 1,6$) byl upraven hydroxidem sodným na hodnotu $M_s = 1,3$, resp. 1,0. Silikátový modul je dán poměrem

$$M_s = \frac{\text{SiO}_2}{M_2\text{O}},$$

kde M je alkalický kov (Na, K, Li). Chemické složení a hodnota silikátového modulu použitého vodního skla je uvedeno v tab. 3.

Tab. 3. Chemické složení základního aktivátoru (vodního skla) a jeho silikátového modulu

Vodní sklo [%]			Silikátový modul M_s [-]
SiO ₂	Na ₂ O	H ₂ O	SiO ₂ /Na ₂ O
25,58	16,92	57,50	1,60

Pro aktivaci byly použity tři roztoky aktivátoru se silikátovým modulem $M_s = 1,0$; 1,3 a 1,6. Dávka aktivátoru byla 25 % hm. z hmotnosti použitého střepu. Směs byla homogenizována v laboratorní míchačce, z ní následně vyrobena zkušební tělesa, která byla uložena volně v laboratoři (teplota 21 ± 1 °C

Tab. 1. Síťový rozbor vstupních cihelných střepů

Velikost zrn [mm]	Mleté cihelné střepy TONDACH	Cihelný prach HELUZ	Antuka CIVAS
	obsah [%]		
> 0,025	1,40	4,82	19,46
0,025-0,045	13,90	11,16	36,75
0,045-0,063	78,60	58,97	15,21
0,063-0,090	3,07	4,56	10,59
0,090-0,125	0,22	1,82	7,87
0,125-0,250	1,58	4,11	10,10
0,250-0,500	0,60	3,46	0,02
0,500-1,000	0,27	4,33	0,00
< 1,000	0,36	6,77	0,00

Tab. 2. Chemické složení vstupních surovin

Surovina	Složení [%]								ztráta žiháním (1 100 °C)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	
mleté cihelné střepy TONDACH	63,45	13,98	5,39	8,18	2,27	2,43	0,90	0,10	1,13
cihelný prach HELUZ	57,67	14,91	5,02	9,81	3,74	3,20	1,45	1,86	–
antuka CIVAS	61,89	13,56	6,78	7,52	3,16	1,98	0,97	0,12	1,95

Tab. 4. Vlastnosti zkušebních vzorků

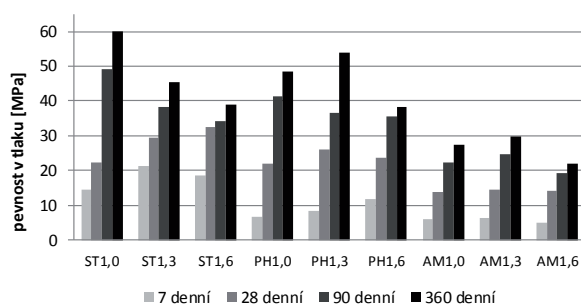
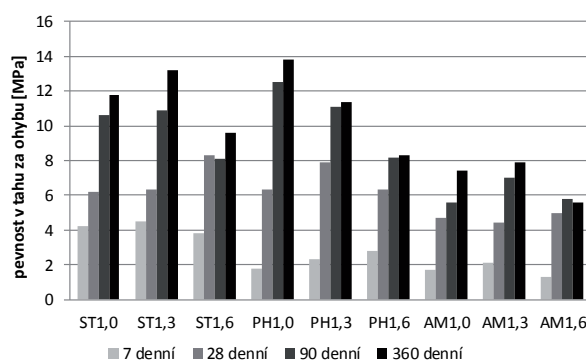
Směs	Pevnost [MPa]								Objemová hmotnost po 28 d [kg/m ³]	Smrštění stárnutím po 28 d [%]
	v tahu za ohybu				v tlaku					
	7 d	28 d	90 d	360 d	7 d	28 d	90 d	360 d		
ST 1,0	4,2	6,2	10,6	11,8	14,6	22,3	49,0	60,1	1 685	6,7
ST 1,3	4,5	6,3	10,9	13,2	21,3	29,5	38,1	45,5	1 672	4,8
ST 1,6	3,8	8,3	8,1	9,6	18,4	32,4	34,2	39,0	1 643	3,9
PH 1,0	1,8	6,3	12,5	13,8	6,7	21,8	41,3	48,6	1 721	4,4
PH 1,3	2,3	7,9	11,1	11,4	8,4	26,0	36,5	53,9	1 689	4,4
PH 1,6	2,8	6,3	8,2	8,3	11,9	24,5	35,6	38,1	1 632	3,6
AM 1,0	1,7	4,7	5,6	7,4	5,8	13,7	22,4	27,5	1 667	3,2
AM 1,3	2,1	4,4	7,0	7,9	6,4	14,4	24,8	29,8	1 640	3,0
AM 1,6	1,3	5,0	5,8	5,6	4,9	14,0	19,3	22,1	1 579	2,1

a R. H. 50±5 %). Tělesa byla zkoušena na pevnost v tlaku, v tahu za ohybu po 7, 28, 90 a 360 dnech uložení. Dále byla stanovena objemová hmotnost, pórovitost, smrštění stárnutím a na vybraných vzorcích byla provedena analýza XRD a studována vnitřní struktura pomocí REM.

Výsledky a diskuse

Výsledky pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu vyrobených produktů jsou uvedeny v tab. 4 a v grafech na obr. 1 a obr. 2. Pevnost v čase výrazně stoupá, 28denní pevnost se po roce zvýší v některých případech na více než dvojnásobek, což ukazuje, že geopolymerní reakce a tvorba vnitřní struktury probíhá v dlouhém časovém intervalu. Byla zaznamenána také vysoká pevnost v tahu za ohybu v porovnání s pevností kompozitů na bázi portlandského cementu. Geopolymery ze střepu ST dosáhly nejvyšší pevnosti s alkalickým aktivátorem se silikátovým modulem $M_s = 1,0$, pro geopolymery vyrobené ze střepů PH a AM je nejvhodnější aktivátor s $M_s = 1,3$.

Výsledky ukázaly, že geopolymery připravené aktivací AM dosahovaly v porovnání s geopolymery připravenými aktivací ST a PH nižší pevnosti v tlaku, přibližně poloviční. Nižší dosažená pevnost zkušebních těles z AM může být do určité míry způsobena tím, že antuka se vyrábí zejména ze starých pálených cihel a střešních krytin z doby před sto a více lety, kdy výpal těchto cihlářských prvků probíhal za vyšších teplot a jiných podmínek, než při jakých se pálí cihlářské

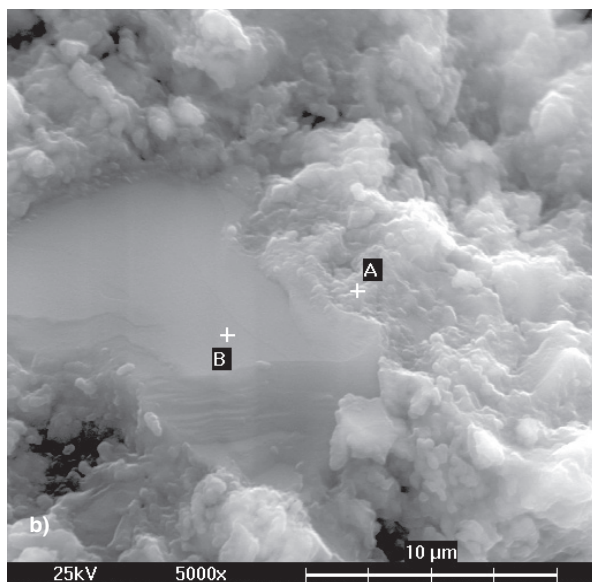
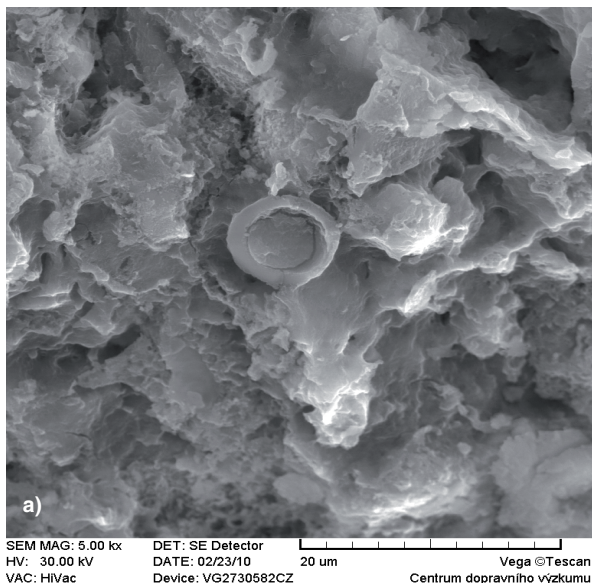
Obr. 1. Závislost pevnosti v tlaku zkušebních těles na hodnotě aktivátoru M_s a stáří vzorkůObr. 2. Závislost pevnosti v tahu za ohybu zkušebních těles na hodnotě aktivátoru M_s a stáří vzorků

prvky v dnešní době, jako je tomu právě u ST a PH. Vzhledem k vyšší teplotě výpalu starých pálených cihel a střešních tašek jsou v antuce přítomny ve větší míře stabilní krystalické sloučeniny vzniklé při výpalu, jejichž reakce s alkalickým aktivátorem je do jisté míry omezena.

Mikrostruktura geopolymerů

Snímky z elektronového mikroskopu na obr. 3a, b ukazují mikrostrukturu geopolymerů vyrobených ze střepů ST a PH. Oba geopolymery byly aktivované roztokem aktivátoru o $M_s = 1,0$ a mají velmi hutnou kompaktní strukturu. Ve struktuře je možné vidět nezreagovaná větší zrna (obr. 3b), která jsou obklopena produkty geopolymerní reakce. Tato fáze bývá někdy označována jako hlinitokřemičitý gel, tvořící pojivou složku v geopolymerních systémech.

Výsledky získané z měření kumulativního objemu pórů jsou pro jednotlivé cihelné geopolymery uvedeny na obr. 4. Z průběhu křivek je patrné, že měly přibližně stejný objem i velikost pórů, která se pohybovala přibližně v intervalu 0,1–0,02 μm . Geopolymer připravený aktivací mletých střepů ST vykazoval nepatrně menší celkový objem pórů, který koresponduje s jeho vyššími pevnostmi v porovnání s geopolymery PH a AM.

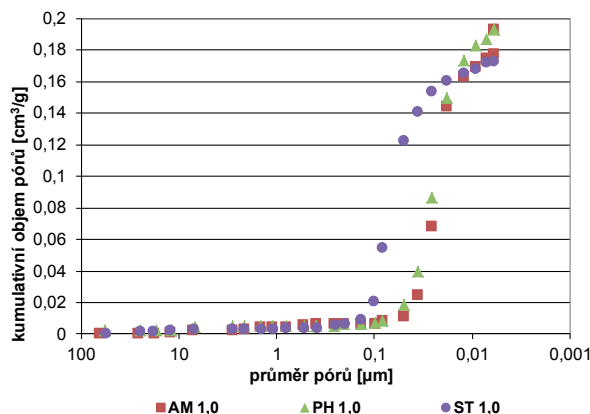


Obr. 3. Snímky vnitřní struktury geopolymérů, zvětšeno 5 000× (foto P. Bayer)
a – ze střepeu ST, b – ze střepeu PH

Rentgenová difrakční analýza neukázala v mineralogickém složení mezi vstupními surovinami a geopolymery z nich připravených výraznější změny. Analýza XRD prokázala přítomnost krystalických látek stejných, jako byly identifikovány v neaktivovaných vstupních surovinách. To je způsobeno tím, že střepe reaguje pozvolna a v době stanovení byly přítomny nezreagované podíly surovin. Produkty geopolymerní reakce jsou převážně amorfního charakteru, což dokazuje i výsledek analýzy XRD. Na difraktogramu je patrný nárůst difúzního pásu, který vzniká v důsledku přítomnosti amorfních, nebo nedokonale krystalických fází.

Závěr

Výsledky experimentů ukázaly, že suroviny vznikající jako odpad při keramické výrobě lze s výhodou použít na přípravu geopolymérů dosahujících velmi zajímavých vlastností, a to jak v případě mletých střepeu ze závodu TONDACH, tak i v případě prachu z broušení přesných cihel HELUZ Family.



Obr. 4. Kumulativní objem pórů geopolymérů

Při aktivaci byly vyrobeny geopolymery dosahující pevnosti až 60 MPa v tlaku, a téměř 12 MPa v tahu za ohybu. V případě antuky byla pevnost výrazně nižší, zřejmě vzhledem k využití různých druhů cihelných výrobků pro její přípravu, a to i takových, které nemají vhodné vlastnosti pro geopolymernizaci. Nevýhodou u cihelných střepeu TONDACH a antuky při výrobě geopolymérů je nutnost úpravy mletím před použitím, která u prachu z broušení cihel HELUZ není nutná. Určitou výhodou je červená barva vzniklých geopolymérů, která může být bonusem v případě uplatnění v praxi, např. na výrobu replik atypických keramických prvků. Geopolymerní materiály, připravené aktivací cihelných střepeu, dosahují nepřehlédnutelných charakteristických vlastností, které je možné s úspěchem aplikovat při výrobě nových stavebních materiálů, jako alternativu k materiálům stávajícím, přičemž využití těchto vedlejších průmyslových produktů pro výrobu plnohodnotných stavebních materiálů bude mít nemalý význam pro ekologii.

Článek vznikl za podpory projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0097 „OP Výzkum a vývoj pro inovace“ v rámci činnosti regionálního Centra AdMaS „Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie“

Literatura

- [1] Rovnaníková, P. – Navrátilová, E. – Šmerdová, L.: Možnosti využití pálených jílu ve vápenných maltách. Vysoké učení technické v Brně, <http://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/9554-moznosti-vyuziti-palenyh-jilu-ve-vapennyh-maltach>
- [2] Köhl, H.: Zement, 1930, 19.
- [3] Chassevent, L.: Hydraulicity of slags. *Comptes Rendus*, 1937, 205, 670-672.
- [4] Purdon, A. O.: The action of alkalis on blast furnace slag. *Journal of the Society of Chemical Industry*. 1940, vol. 59, pp. 191-202.
- [5] Gluchovsky, V. D.: *Soil Silicates (Gruntosilikaty)*. Kiev, Budivelnik Publisher 1959.
- [6] Davidovits, J.: 30 Years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs. [Proceedings], Conference on Géopolymere. Saint-Quentin, 2002, 1-16.
- [7] van Jaarsveld, J. G. S. – van Deventer, J. S. J. – Lukey, G. S.: The effect of composition and temperature on the properties fly ash- and kaolinite-based geopolymers. *Chemical Engineering Journal*, 2002, vol. 89, 63-73.
- [8] Duxson, P. – Fernández-Jimenez, A. – Provis, J. L. – Lukey, G. C. – Palomo, A. – van Deventer, J. S. J.: Geopolymer techno-

- logy: the current state of art. *Journal of Material Science*, 2007, vol. 42, 2917-2933.
- [9] Sofi, M. – van Deventer, J. S. J. – Mendis, P. A. – Lukey, G. C.: Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs). *Cement and Concrete Research*, 2007, vol. 37, 251-257.
- [10] Xu, H. – van Deventer, J. S. J. The geopolymerisation of aluminosilicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 2000, vol. 59, 247-266.
- [11] Fernández-Jimenez, A. – García-Lodeiro, I. – Palomo, A.: Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials. *Journal of Material Science*, 2007, vol. 42, 3055-3065.
- [12] Fernández-Jimenez, A. – Palomo, A.: Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. *Fuel*, 2003, vol. 82, no. 18, 2259-2265.
- [13] Talling, B. – Brandstetter, J.: Present state and future of alkali-activated slag concretes. [Proceedings], International Conference on Fly ash, Silica Fume, Slag and Natural, Trondheim, 1989.
- [14] Škvára, F. – Jílek, T. – Kopecký, L.: Geopolymer materials based on fly ash. *Ceramic-Silikáty*, 2005, vol. 49, 195-204.
- [15] Rovnaník, P.: Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*. 2010, vol. 24, 1176-1183.
- [16] Rinnová, M. – Rovnaník, P.: Vliv složení směsi na strukturu a vlastnosti geopolymerního pojiva. *Stavební obzor*, 22, 2013, č. 5, s. 132-136. ISSN 1805-2576 (Online)
- [17] Bayer, P. – Černý, R. – Rovnaníková, P. – Zuda, L.: Vliv vysokých teplot na vlastnosti kompozitních materiálů se struskovým pojivem – I. část. *Stavební obzor*, 15, 2006, č. 1, s. 17-20. ISSN 1210-4027 (Print)
- [18] Bayer, P. – Černý, R. – Rovnaníková, P. – Zuda, L.: Vliv vysokých teplot na vlastnosti kompozitních materiálů se struskovým pojivem – II. část. *Stavební obzor*, 15, 2006, č. 2, s. 44-49. ISSN 1210-4027 (Print)
- [19] Černý, R. – Rovnaník, P. – Rovnaníková, P. – Zuda, L.: Tepelné vlastnosti kompozitního materiálu na bázi alkalicky aktivované strusky s elektroporcelánem za vysokých teplot. *Stavební obzor*, 15, 2006, č. 7, s. 207-210. ISSN 1210-4027 (Print)
- [20] Bayer, P. – Černý, R. – Drchalová, J. – Rovnaník, P. – Zuda, L.: Tepelné, vlhkostní a mechanické vlastnosti kompozitního materiálu zatíženého vysokými teplotami. *Stavební obzor*, 16, 2007, č. 4, s. 116-120. ISSN 1210-4027 (Print)
- [21] Davidovits, J.: *Geopolymer Chemistry and Applications*, 2nd ed. Saint Quentin, Institut Géopolymère, 2008. 592 p.
- [22] Lyon, R. E. et al.: Fire resistant aluminosilicate composites. *Fire and Materials*, 1997, 21, 67-73.
- [23] Rovnaníková, P. – Bayer, P. – Rovnaník, P. – Novák, J.: Properties of alkali-activated aluminosilicate materials with fire-resistant aggregate after high temperature loading. [Proceedings], Cement combinations for durable concrete (R. K. Dhir, T. A. Harrison and M. D. Newlands eds.), London, Thomas Telford 2005, 277-286.
- [24] Rovnaník, P. – Bayer, P. – Rovnaníková, P.: Properties of alkali-activated aluminosilicate composite after thermal treatment. [Proceedings], Non-Traditional Cement and Concrete (V. Bilek and Z. Keršner eds.), Brno University of Technology, 2005, 48-54.
- [25] Rovnaník, P. – Rovnaníková, P. – Bayer, O.: New possibilities of fire protection of tunnel walls. [CD-ROM Proceedings], CCC Congress, Hradec Králové, 2006, 496-501.
- [26] van Jaarsveld, J. G. S. – van Deventer, J. S. J.: The effect of metal contaminants on the formation and properties of waste-based geopolymers. *Cement and Concrete Research*, 1999a, vol. 29, 1189-1200.
- [27] Shi, C. – Krivenko, P. V. – Roy, D.: *Alkali-activated cements and concretes*. London and New York, Taylor and Francis 2006, 376 p. ISBN 0-415-70004-3, ISBN 3: 978-0-415-70004-7
- [28] Xu, H. – van Deventer, J. S. J.: Geopolymerisation of multiple minerals. *Minerals Engineering*, 2002b, vol. 15, no. 12, 1131-1139.
- [29] Xu, H. – van Deventer, J. S. J.: Effect of source materials on geopolymerization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2003a, vol. 42, no. 8, 1698-1706.