

Lehké betony na bázi škváry ze spalování komunálního odpadu

*Ing. Kirill POLOZHIY
ČVUT v Praze – UCEEB*

*Ing. Pavel REITERMAN, Ph.D.
Ing. Martin KEPPERT, Ph.D.
ČVUT v Praze – Fakulta stavební*

V České republice se stále většina komunálního odpadu skládkuje (54 % v roce 2012), nicméně význam recyklace (30 %) a energetického využití odpadu průběžně roste.

Light concretes based on slag from municipal solid waste incineration

The majority of municipal solid waste produced in the Czech Republic is still landfilled (54 % in 2012); nevertheless, the importance of waste recycling (30 %) and waste exploitation in power generation is continuously growing.

Úvod

Energetické využití odpadu je možné provádět třemi způsoby – spalováním, zplynováním a pyrolýzou. Při spalování dochází k úplné oxidaci odpadu a získaná energie se přímo využívá. Zplynování spočívá v parciální oxidaci odpadu, při které vzniká syntézní plyn (směs CO a H₂), jenž slouží jako palivo, popř. pro katalytickou syntézu uhlovodíků. Zplynování probíhá při vyšší teplotě než spalování a je technologicky i finančně náročnější, nicméně díky vyšším teplotám je omezen vznik dioxinů. Nespalitelný podíl odpadu vytváří kompaktní strusku, méně náročnou na kapacitu skládek. Pro tyto výhody zplynování široce využívají v Japonsku, zatímco v ostatních částech světa je komunální odpad spalován. Třetí technologie – pyrolýza – spočívá v tepelném rozkladu odpadu za nepřístupu vzduchu, přičemž opět vzniká syntézní plyn, ale i pevný a kapalný produkt. Tato technologie se jeví jako vhodnější pro méně komplexní organické odpady, např. pneumatiky a další pryžové výrobky. V Evropě si zřejmě i do budoucna udrží výsadní postavení spalování, které je poměrně levné a koncentrace dioxinů ve spalínách se úspěšně řeší jejich čištěním. Výhřevnost komunálního odpadu závisí na místních podmínkách (ovlivňují složení odpadu a vlhkost), např. v ZEVO Praha-Malešice byla v roce 2010 průměrná výhřevnost odpadu 10 MJ/kg [2], což je hodnota porovnatelná s široce využívaným energetickým uhlím typu ps2.

V České republice pracují tři spalovny komunálního odpadu – ZEVO Praha-Malešice, Termizo Liberec a SAKO Brno. Všechny jsou vybaveny roštovými kotli a fungují jako kogenerační zdroje elektrické energie a tepla. Kapacita likvidace odpadu malešické spalovny je 310 000 t/rok, liberecké 100 000 t/rok a brněnské 230 000 t/rok [1], [3]–[5]. Dominantním pevným podílem, opouštějícím spalovnu, je škvára vznikající na roštu. Její množství odpovídá hmotnostně 24–30 % spáleného odpadu (objemově cca 10 %), ročně tedy v ČR vzniká asi 160 000 t spalovenské škváry. Kromě škváry vznikají ve spalovnách i popílky (cca 3 % hmotnosti odpadu), lépe řečeno, produkty čištění spalin [6]. V různém stadiu příprav je výstavba dalších spaloven – Chotíkov u Plzně, Komofany u Mostu, Karviná – s kapacitou spáleného odpadu celkem 440 000 t/rok a předpokládanou produkcí 100 000 t škváry. V současné době probíhá výstavba spalovny v Chotíkově. Pokud však má být dodržen současný cíl, tj. ukončení skládkování komunálního odpadu v ČR do roku 2022, bude nezbytné zdokonalit systém recyklace komunálního odpadu

a pro likvidaci nerecyklovatelného podílu vybudovat další provozy, které přispějí i ke snížení spotřeby fosilních paliv. Kromě toho je třeba najít i technologicky a ekonomicky schůdné využití pro spalovenské produkty, škváru a popílek. Popílky se v současnosti solidifikují a takto upravené ukládají na skládky nebezpečného odpadu, ale je možné i jejich využití jako složky betonu [7]. Škvára se skládkuje nebo využívá v neuzpevněné formě jako materiál pro násypy a zásypy. Hrozí sice vyluhování těžkých kovů do okolního prostředí, ovšem používání chemických rozmrazovacích látek pro zimní údržbu je pro životní prostředí mnohem rizikovější [8]. Jako environmentálně přijatelnější se jeví využití škváry jako složky betonu, který zároveň svou solidifikační a stabilizační schopností omezí mobilitu těžkých kovů a zabrání jejich uvolnění z materiálu do prostředí [9].

Spalovenská škvára může být použita přímo jako minoritní (do 6 %) složka při výrobě portlandského slínku [10]. Technologicky schůdnější se však zdá její využití jako složky betonu. Pera a kol. [11] upozorňují na reakci kovového hliníku ze škváry v alkalickém prostředí, která způsobuje vývin plynného vodíku, jehož bublinky snižují pevnost betonu, a navrhnou úpravu škváry roztokem NaOH. Tento problém byl studován i v [12], kde autoři vyhodnotili uvolňování vodíku jako problém pro pevnost betonu závažnější, než je reakce skleněných střepek s přítomnými alkáliemi (ASR). Ginés a kol. [13] připravili beton nízké kvality, kde jako kamenivo byla použita směs přirozeně zvětralá (několik měsíců venku uložená) škváry (95 %) a popílku. Odlezení škváry má omezit expanzi betonu vodíkem a jeho praskání vlivem ettringitu a hydratace CaO a MgO, ke kterým dochází při použití čerstvé škváry [14]. Quenee a kol. [15] pozorovali při použití škváry jako kameniva v betonu extrémní prodloužení doby tuhnutí vlivem obsahu těžkých kovů, které zredukovali přidáním mikrosiliky, dalších pucolánů a vápna. Sorlini a kol. [16] doporučují škváru vypírat vodou pro snížení negativního vlivu na pevnost betonu. Bertolini a kol. [17] použili mokré mleté spalovenské škváry a získali pucolánově aktivní příměs do betonu. Onori a kol. [18] úspěšně zvýšili reaktivitu mleté škváry pomocí aktivace CaCl₂. Autoři Li a kol. [19] připravili směsný cement (32,5) smícháním 30 % jemně mleté škváry, 10 % uhelného popílku a 40 % portlandského cementu CEM I 52,5. Úspěšně byla spalovenská škvára zhodnocena roztavením při 1 400 °C a granulací, čímž vznikla struska použitelná jako pucolánová příměs [20]. Bezcementová po-

jivo nízké pevnosti s vysokou porozitou je možné získat žíháním škváry na 700 °C a jejím smícháním s 10 % Ca(OH)₂ [21]. Škváru je možné použít i jako plnivo v hydrotermálně vytvrzeném (autoklávaném) materiálu na bázi křemene, vápenného hydrátu a granulované vysokopecní strusky [22]. Spalovenské popeloviny je možné využít i při výrobě umělého kameniva. Další, del Valle-Zermeño a kol. [23], použili škváru a popílek k výrobě betonu, který následně rozdrtili na kamenivo. Spékáním škváry lze připravit granulované kamenivo o objemové hmotnosti kolem 1 500 kg/m³ [24]. Lehké umělé kamenivo (1 200 kg/m³) lze připravit z mleté škváry a cementu pomocí talířového granulátoru [25].

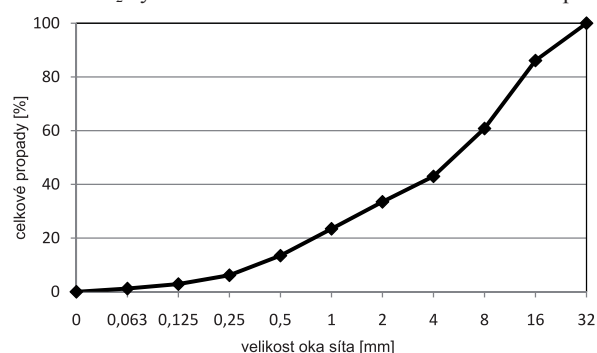
Článek se zabývá možností připravit lehký beton s nejvyšším možným obsahem neupravené spalovenské škváry. Motivace pro výrobu lehkých betonů je zřejmá, je to zejména jejich nižší součinitel tepelné vodivosti. Porézní kamenivo však má pozitivní vliv i na smrštění betonu [26]. Částice spalovenské škváry jsou sice porézní, ale nedostatečně, proto byly připravované betony formulovány jako mezerovité. Byly hledány limity pevnosti v tlaku a součinitele tepelné vodivosti v závislosti na složení materiálu.

Experimentální metody

Byla použita škvára odebraná jednorázově (cca 50 kg) z třídící linky v ZEVO Praha-Malešice. Neoddělitelné kusy oceli a nežádoucí částice byly odstraněny ručně. Čára zrnitosti škváry byla stanovena dle ČSN EN 933-1. Objemová hmotnost jednotlivých frakcí škváry byla stanovena dle ČSN EN 1097-6. Hustota frakcí škváry i přírodního kameniva byla stanovena pomocí héliového pyknometru. Chemické složení škváry bylo stanoveno rentgenovou fluorescenční spektroskopii na přístroji Thermo ARL 9400. Pevnost v tlaku zkušebních těles (krychlí o hraně 150 mm) byla stanovena ve stáří 28 dní na stroji EU40 dle ČSN EN 12390-3. Objemová hmotnost betonových krychlí byla stanovena vážením a měřením. Součinitel tepelné vodivosti λ byl zjištěn přístrojem ISOMET 2104 (šest měření na vysušených krychlích).

Výsledky a diskuze

Odebraná škvára byla vysušena v laboratoři a následně byly odstraněny nepočtené částice větší než 32 mm (rozměrné škvárové spečence). Distribuce velikosti částic škváry je široká (obr. 1); sítý byla škvára roztríděna na frakce 0-1, 1-2, 2-4, 4-8, 8-16 mm a ty byly analyzovány. Horní hranice byla zvolena s ohledem na maximální velikost zrna kameniva dostupného v laboratořích. Hmotnostní obsah jednotlivých popelotvorných oxidů, síranů (jako SO₃) a chloridů je uveden v tab. 1, v níž lze sledovat i několik významných trendů. Obsah SiO₂ výrazně roste s velikostí zrna až na 50 %. Naopak



Obr. 1. Čára zrnitosti škváry

obsah ze stavebního hlediska problematických aniontů, tj. chloridů, síranů a fosforečnanů, je nejvyšší v jemnějším podílu. Stejný trend sleduje i vápník zčásti přítomný jako Ca₃(PO₄)₂ a CaSO₄, resp. jeho hydráty. Obsah MgO, Al₂O₃ a Fe₂O₃ výrazný trend nevykazuje. Poměrně výrazně rostoucí obsah sodíku směrem k větším částicím je poměrně překvapivý a naznačuje, že jde převážně o sodík vázaný v silikátech. V porovnání s publikovanými údaji o složení škváry z různých spaloven ve světě [25] vykazuje malešická škvára spíše příznivé složení.

Tab. 1. Obsah popelotvorných oxidů, chloridů a SO₃ ve škváře

Obsah	0-1 mm	1-2 mm	2-4 mm	4-8 mm	8-16 mm
	[% hm.]				
CaO	33,3	29,3	27,2	24,2	18,6
MgO	1,8	1,9	1,9	1,8	1,8
SiO ₂	28,7	32,3	35,8	42	50,9
Al ₂ O ₃	11,9	12,1	12,0	10	8,7
Fe ₂ O ₃	6,6	7,3	6,5	6,1	4,7
P ₂ O ₅	2,5	2,5	2,5	2,1	1,2
K ₂ O	1,8	1,9	1,8	1,6	1,3
Na ₂ O	2,8	3,5	3,9	5,5	7,8
TiO ₂	1,3	1,3	1,2	0,9	0,6
SO ₃	5,8	4,8	4,4	3,6	2,9
Cl	1,9	1,6	1,4	1,1	0,6

Při studiu spalovenských popelovin je vždy třeba sledovat i minoritní složky, zejména těžké kovy, které v těchto materiálech představují významné hygienické a environmentální riziko. Rovněž i stopové množství některých prvků zásadním způsobem ovlivňuje vlastnosti betonu, především v kombinaci s některými typy přísad. Orientační hodnoty koncentrace těžkých kovů v jednotlivých frakcích jsou uvedeny v tab. 2. Těžké kovy je možné v tomto kontextu rozdělit do dvou skupin. Obsah Co, Mn, Ni a V nevykazuje vzhledem k velikosti částic výrazný trend. Obsah Cr je nejvyšší v nejhrušší sledované frakci, ale trend není příliš přesvědčivý. Koncentrace Ba, Cu, Pb, Sb, Sn a Zn s rostoucí velikostí částic klesá, nejvýraznější je pokles u Cu, Sb a Zn. Pozitivní je, že koncentrace tří hygienicky velmi významných prvků, tj. As, Cd a Hg, byly pod mezí detekce použité metody. Všechny tyto prvky tvoří silně těkavé sloučeniny a během spalování přecházejí do plynné fáze, ze které jsou odlučovány jako složky popílku, nicméně jejich absence ve škváře není běžná [27]. Koncentrace olova je výrazně nižší než v publikovaných studiích. Ostatní těžké kovy nevybočují ze zveřejněných údajů. Pro odůvodnění odlišného chování jednotlivých kovů, jak v jejich distribuci škvára/popílek [28], tak v tendenci hromadit se v jemnější/hrubší frakci škváry, nemáme dostatek dat. Je však zřejmé, že prvky tvořící těkavé soli (kromě zmíněných As, Cd a Hg jsou to Cu, Pb, Sn a Zn) se ve škváře hromadí v jemnější frakci, zatímco koncentrace prvků karbidotvorných (Co, Cr, Mn, Ni, V) na velikosti částic škváry nezávisí. Z hlediska využití škváry v betonu je zejména významný pokles koncentrace Cu a Zn s rostoucí velikostí částic, protože tyto prvky výrazně zpomalují hydrataci cementu [29]. Je možné konstatovat, že z hlediska složení jsou hrubší frakce škváry pro využití, a to nejen ve stavebnictví, vhodnější.

Tab. 2. Koncentrace těžkých kovů ve škváře

Obsah	0-1 mm	1-2 mm	2-4 mm	4-8 mm	8-16 mm
	[mg/kg]				
As	<	<	<	<	<
Ba	3 130	3 136	3 140	2 419	1 792
Cd	<	<	<	<	<
Co	73	66	0	44	37
Cr	479	342	410	481	684
Cu	1 838	1 438	1 678	799	959
Hg	<	<	<	<	<
Mn	1 084	1 393	1 088	929	1 090
Ni	79	55	60	51	94
Pb	742	835	842	464	459
Sb	102	122	86	99	0
Sn	240	236	39	158	95
V	56	56	56	50	45
Zn	4 497	4 095	3 533	2 409	1 205

Objemovou hmotnost, hustotu a porozitu jednotlivých frakcí škváry uvádí tab. 3. Částice do 4 mm jsou v podstatě stejně porézní, u částic hrubších postupně porozita klesá. Drobnější frakce se tedy pohybují na hranici objemové hmotnosti definující lehké kamenivo ($2\,000\text{ kg/m}^3$), hrubé ji překračují. Z tohoto důvodu byly kýžené lehké betony se spalovenskou škvárou formulovány jako betony mezerovité, s omezeným množstvím cementového tmelu. Složení záměsí studovaných betonů je v tab. 4. Jako pojivo byl použit cement CM II 32,5. Dávka vody byla volena tak, aby bylo dosaženo konzistence směsi S 1 (ČSN EN 12350-2). Jako referenční směs 0 byl použit mezerovitý beton s přírodním hutným kamenivem. Objemová hmotnost přírodního kameniva frakce 4-8 mm byla

$2\,500\text{ kg/m}^3$, frakce 8-16 mm $2\,495\text{ kg/m}^3$. Dávka vody byla zvyšována s množstvím užitě škváry, kvůli její porozitě, a tedy nasákavosti.

Tab. 3. Základní vlastnosti jednotlivých frakcí škváry

Frakce	Objemová hmotnost	Hustota	Porozita
	[mm]	[kg/m ³]	[%]
0-1	1 990	2 685	25,9
1-2	1 950	2 694	27,6
2-4	2 010	2 725	26,2
4-8	2 170	2 679	19,0
8-16	2 320	2 621	11,5

Tab. 5. Pevnost v tlaku, objemová hmotnost a součinitel tepelné vodivosti lehkých betonů

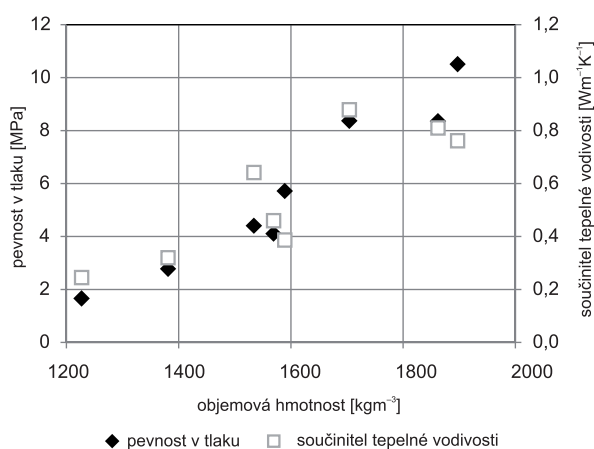
Směs	Pevnost v tlaku	Objemová hmotnost	Součinitel tepelné vodivosti
	[MPa]	[kg/m ³]	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
0	8,4	1 704	0,88
1	2,8	1 381	0,32
2	1,7	1 227	0,25
3	4,4	1 534	0,64
4	8,4	1 862	0,81
5	4,1	1 569	0,46
6	5,7	1 589	0,39
7	10,5	1 897	0,76

Tab. 4. Složení čerstvých směsí lehkých betonů

Směs	CEM II/BM (SL) 32,5	0-1 mm	2-4 mm	4-8 mm		8-16 mm		Voda
		škvára	škvára	přírodní kamenivo	škvára	přírodní kamenivo	škvára	
		[kg/m ³]						
0	283,5	–	–	420	–	1 313	–	105
1	283,5	–	–	420	–	–	1 221	155
2	283,5	–	–	–	365	–	1 221	175
3	283,5	–	–	–	365	1 313	–	140
4	283,5	70	170	420	–	1 313	–	140
5	283,5	70	170	420	–	–	1 221	200
6	283,5	70	170	–	365	–	1 221	230
7	283,5	70	170	–	365	1 313	–	200

Směsi 0 až 3 byly navrženy s obsahem pouze dvou frakcí plniva (4–8 mm, 8–16 mm), lišily se použitím hutného kameniva nebo škváry. Podle očekávání použití porézní škváry vedlo ke snížení objemové hmotnosti, pevnosti a součinitele tepelné vodivosti betonu (tab. 5). Nejvíce se vlastnostmi lišil od referenční směsi 0 materiál 2, v němž byly škvárou nahrazeny obě frakce plniva, ovšem pokles pevnosti byl velmi výrazný. Užití škváry pouze frakce 4–8 mm (směs 3) znamenalo pokles pevnosti takřka na polovinu, ovšem součinitel λ tak výrazně neklesl. Ve vzorcích 4 až 7 byla do jisté míry potlačena mezerovitost betonu tím, že byly v poměrně malém množství doplněny do směsi podíly drobného plniva – škváry frakcí 0–1 mm a 2–4 mm. Vzorek 4 (drobné plnivo škvára, hrubé hutné přírodní kamenivo) vykazoval podobné vlastnosti jako 0. Vzorek 7 (s hutným kamenivem 8–16 mm) vykazoval ze studovaných betonů nejvyšší pevnost v tlaku. Lehký beton 6 obsahoval jako plnivo pouze škváru; hodnoty jeho pevnosti a součinitele λ je přitom možné označit za vzájemný rozumný kompromis – doplnění drobnějších frakcí škváry sice vedlo k nárůstu pevnosti a objemové hmotnosti, ale s omezeným negativním dopadem na součinitel λ .

Z obrázku 2 je zřejmé, že pevnost v tlaku a součinitel tepelné vodivosti závisí ve studovaných lehkých betonech na objemové hmotnosti víceméně lineárně, ale zejména v případě součinitele λ nejde o vztah jednoznačný. To je dáno faktem, že v případě mezerovitého betonu jde, v porovnání např. s běžnými tepelně izolačními materiály, o komplikovaný systém vzduchových mezer, cementového pojiva a různě porézních frakcí plniva. Pokles pevnosti betonů způsobuje zejména škvára frakce 8–16 mm, která se v mezerovitém betonu významně podílí na přenosu napětí materiálem.



Obr. 2. Závislost pevnosti v tlaku a součinitele tepelné vodivosti lehkých betonů na objemové hmotnosti

Závěr

Vlastnosti škváry ze ZEVO Praha-Malešice významně závisí na velikosti částic. S rostoucí velikostí zrna klesá pórovitost; ve složení lze sledovat trend poklesu koncentrace, ze stavebního hlediska nežádoucích, aniontů (Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-}) směrem k větším částicím, roste naopak obsah SiO_2 . V hrubších částicích klesá koncentrace Cu, Pb, Sn a Zn. Z těchto důvodů jsou pro použití v betonu vhodné spíše hrubší frakce škváry. Zrnitostní frakce škváry a přírodního hutného kameniva 4–8 mm a 8–16 mm byly použity pro přípravu lehkého mezerovitého betonu, pro zvýšení pevnosti bylo použito i omezené množství zrn velikosti 0–1 mm a 2–4 mm, ovšem za cenu nárůstu objemové hmotnosti. Jako rozumný kompromis se ukázala směs obsahující pouze spalovenskou škváru výše

uvedených velikostních frakcí, která dosáhla pevnosti v tlaku 5,7 MPa a součinitele tepelné vodivosti $0,39 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Článek vznikl za podpory Evropské unie, projektu OP VaVpI č. CZ.1.05/2.1.00/03.0091 – Univerzitní centrum energeticky efektivních budov.

Literatura

- [1] Statistická ročenka životního prostředí České republiky 2013. Ministerstvo životního prostředí, 2013.
- [2] Beran, P.: Zkušenosti s provozem ZEVO – spalovna Malešice. Odpady 2011, Brno.
- [3] Pazdera, L.: Hlavní technologická zařízení spalovny SAKO Brno. El. časopis all for power.cz 5 (2011), 19–25.
- [4] Spalovna a komunální odpady Brno, a. s. Výroční zpráva 2011. Brno, 2012.
- [5] Termizo, a. s. Výroční zpráva za rok 2010, Liberec, 2011.
- [6] Quina, M. J. – Bordado, J. C. – Quinta-Ferreira, M. C.: Treatment and use of air pollution control residues from MSW incineration: An overview. Waste Management 28 (2008), 2097–2121.
- [7] Keppert, M. – Pavlík, Z. – Vejmelková, E. – Černý, R. – Šyc, M.: Popeloviny ze spalovny komunálního odpadu jako alternativní plnivo cementové malty. Stavební obzor, 20 (2011), 74–76. ISSN 1210-4027
- [8] Birgisdóttir, H. – Pihl, K. A. – Bhandar, G. – Hauschild, M. Z. – Christensen, T. H.: Environmental assessment of roads constructed with and without bottom ash from municipal solid waste incineration. Transportation Research Part D 11 (2006), 358–368.
- [9] Pohořelý, M. – Šyc, M. – Tošnarová, M. – Zychová, M. – Keppert, M. – Punčochář, M.: Imobilizace těžkých kovů z popelovin ze spalovny komunálních odpadů. Paliva 2 (2010), 113–118.
- [10] Lam, C. H. K. – Barford, J. P. – McKay, G.: Utilization of municipal solid waste incineration ash in Portland cement clinker. Clean Technology and Environmental Policy 13 (2011), 607–615.
- [11] Pera, J. – Coutaz, L. – Ambroise, J. – Chababbet, M.: Use of incinerator bottom ash in concrete. Cement and Concrete Research 27 (1997), 1–5.
- [12] Müller, U. – Rübner, K.: The microstructure of concrete made with municipal waste incinerator bottom ash as an aggregate component. Cement and Concrete Research 36 (2006), 1434–1443.
- [13] Ginés, O. – Chimenos, J. M. – Vizcarro, A. – Formosa, J. – Rosell, J. R.: Combined use of MSWI bottom ash and fly ash as aggregate in concrete formulation: Environmental and mechanical considerations. Journal of Hazardous Materials 169 (2009), 643–650.
- [14] Chimenos, J. M. – Fernández, A. I. – Miralles, L. – Rossel, J. R. – Navarro Ezquerro, A.: Change of mechanical properties during short-term natural weathering of MSWI bottom ash. Environmental Science and Technology 39 (2005), 7725–7730.
- [15] Quenee, B. – Li, G. – Siwak, J. M. – Basuyau, V.: The use of MSWI (Municipal Solid Waste Incineration) bottom ash as aggregates in hydraulic concrete. Waste Materials in Construction, Editors: Woolley, G.R., Goumans, J.J.J.M, Wainwright, P.J., Elsevier, 2000.
- [16] Sorlini, S. – Abbà, A. – Collivignarelli, C.: Recovery of MSWI and soil washing residues as concrete aggregates. Waste Management 31 (2011), 289–297.
- [17] Bertolini, L. – Carsana, M. – Cassago, D. – Curzio, A. Q. – Collepardi, M.: MSWI ashes as mineral additions in concrete. Cement and Concrete Research 34 (2004), 1899–1906.

- [18] Onori, R. – Poletti, A. – Pomi, R.: Mechanical properties and leaching modeling of activated incinerator bottom ash in portland cement blends. *Waste Management* 31 (2011), 298-310.
- [19] Li, X.-G. – Lv, Y. – Ma, B.-G. – Chen, Q.-B. – Yin, X.-B. – Jian, S.-W.: Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash in blended cement. *Journal of Cleaner Production* 32 (2012), 96-100.
- [20] Lin, K. L. – Lin, D. F.: Hydration characteristics of municipal solid waste incinerator bottom ash slag as a pozzolanic material for use in cement. *Cement Concrete Composites* 28 (2006), 817-823.
- [21] Qiao, X. C. – Tyrer, M. – Poon, C.S. – Cheeseman, C.R.: Characterization of alkali-activated thermally treated incinerator bottom ash. *Waste Management* 28 (2008), 1955-1962.
- [22] Jing, Z. – Ran, X. – Jin, F. – Ishida, E. H.: Hydrothermal solidification of municipal solid waste incineration bottom ash with slag addition. *Waste Management* 30 (2010), 1521-1527.
- [23] del Valle-Zermeño, R. – Formosa, J. – Chimenos, J. M. – Martínez, M. – Fernández, A. I.: Aggregate material formulated with MSWI bottom ash and APC fly ash for use as secondary building material. *Waste Management* 33 (2013), 621-627.
- [24] Cheeseman, C. R. – Makinde, A. – Bethanis, S.: Properties of lightweight aggregate produced by rapid sintering of incinerator bottom ash. *Resources Conservation and Recycling* 43 (2005), 147-162.
- [25] Cioffi, R. – Colangelo, F. – Montagnaro, F. – Santoro, L.: Manufacture of artificial aggregate using MSWI bottom ash. *Waste Management* 31 (2011), 281-288.
- [26] Kucharczyková, B. – Daněk, P. – Barák, L. – Pospíchal, O. – Mišák, P.: Vliv obsahu pórovitého kameniva na objemové změny betonu. *Stavební obzor*, 20, 2011, s. 302-304. ISSN 1210-4027
- [27] Lam, C. H. K. – Ip, A. W. M. – Barford, J. P. – McKay, G.: Use of incineration MSW ash: A review. *Sustainability* 2 (2010), 1943-1968.
- [28] Keppert, M. – Pavlík, Z. – Tydlitát, V. – Volfová, P. – Švarcová, S. – Šyc, M. – Černý, R.: Properties of municipal solid waste incineration ashes with respect to their separation temperature. *Waste Management and Research* 30 (2012), 1041-1048.
- [29] Keppert, M. – Reiterman, P. – Pavlík, Z. – Pavlíková, M. – Jerman, M. – Černý, R.: Municipal solid waste incineration ashes and their potential for partial replacement of Portland cement and fine aggregates in concrete. *Cement Kapno Beton* 15 (2010), 187-193.