

# POTENCIÁLNÍ VYUŽITÍ RECYKLOVANÉHO SKLA JAKO KAMENIVA V BETONU

## INTERMEDIATE PERFORMANCE OF RECYCLED GLASS AGGREGATE IN CONCRETE

**EWAN BYARS, HULYING ZHU**

V minulých dvou letech byly ve Středisku pro cement a beton (CCC) Univerzity v Sheffieldu prováděny dva velké výzkumné projekty využití skla v betonu – projekty ConGlassCrete 1 a 2 [2, 3], financované organizací Waste and Resource Action Programme (WRAP) (Akční program pro odpady a zdroje), Univerzitou v Sheffieldu a 22 průmyslovými partnery.

Over the last two years, two major glass-in-concrete research and development projects – the ConGlassCrete 1 a 2 projects [2, 3], funded by the Waste and Resource Action Programme (WRAP), the University of Sheffield and 22 industrial partners – were carried out at the Centre for Cement & Concrete (CCC), University of Sheffield.

Očekáváme, že oba projekty vyústí ve

využití odpadního skla v širokém spektru betonových výrobků. Projekty jsou zaměřeny zejména na rozvoj využití drčeného skla pro dekorativní, vnější nebo leštěné betonové povrchy u zakázkových betonových produktů nebo jako hodnotného pojivového materiálu při snížení spotřeby portlandského cementu. Projekty tak reagují na tlak Evropské unie (EU) na zvýšení opětovného využití skleněných obalů (The Packaging and Packaging Waste Directive 1994/62/EC) a přicházejí před legislativními úpravami pro recyklaci (Directive 2000/53/EC, Directive 2002/96/EC), které se týkají automobilových skel, plochého skla, žárovek a sklolaminátů.

Domníváme se, že tato výzkumná studie je vůbec nejširší studií funkčních vlastností drčeného a mletého skla v reálných betonových výrobcích jako náhrady za cement a/nebo kamenivo. V přechodě po celé Velké Británii bylo vyrobeno

celkem devatenáct různých typů výrobků (z 98 směsí), které byly testovány z hlediska shody s typovými zkouškami podle britských norem, z hlediska reakce alkálií a křemíku (ASR), a byly podrobeny detailním chemickým analýzám včetně užití rastrovací elektronové mikroskopie.

Rovněž byla provedena velmi rozsáhlá laboratorní parametrická studie chování skleněného kameniva v betonu. Dlouhodobými zkouškami ASR prochází více než 200 betonových směsí obsahujících sklo. Sledované parametry zahrnují vliv barvy a zrnitosti skla, vliv hladin alkálií v cementu, vliv látek potlačujících ASR, vliv teploty vytvrzení a vliv zkušebních metod.

### EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM

#### Použité materiály

**Cement:** portlandský cement (PC, Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>: 0,62 %), vysokoalkalický portlandský cement (HAPC, Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>: 1,08 %) a bílý cement (WPC, Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>: 0,17 %)

**Skleněná drť:** různé barvy a zrnitosti (tab. 1)

**Srovnávací kamenivo:** nereaktivní hrubé přísady 5 až 10 mm a písek

**Potlačení ASR:** dva typy práškového topného popela (pfa) – BS 3892 a BS EN 450 (CPFA).

#### Směsné podíly a metody zkoušení

Směsné podíly a zkušební metody ASR použité v této studii byly převzaty z BS 812–123 a ASTM C1260 a C227.



Obr. 1 Výběr vzorků betonových prefabrikátů vyrobených v měřítku 1:1 s použitím skla

- a) dlažební kostky lisované za vlhka, Marshalls Mono
- b) šedé bloky, Stowell Concrete Ltd.
- c) obrubníky, Aggregate Industries UK
- d) střešní tašky, CRH Group (Forticrete)
- e) zdící díly, CRH Group (Forticrete)
- f) dlažební bloky – Aggregate Industries UK

Fig. 1 A selection of full-scale precast glass concrete products

### EXPERIMENTÁLNÍ PROJEKTY

Bylo provedeno dvacet dílčích experimentálních projektů ve skutečném měřítku s využitím odpadního skla jako pucolánu a jako kameniva v prefabrikovaných a monolitických betonových výrobcích (tab. 2). Výběr betonových produktů v měřítku 1:1 z výroben prefabrikátů v celém Spojeném království je uveden na obr. 1.

### Materiály

Čisté skleněné materiály dodala firma Northern Cullet Ltd. a surové recyklované obalové sklo pro zkoušky ve firmě Stowell Concrete Ltd. dodala firma Valpak Ltd. Firma Conways Concrete má k dispozici vlastní surové recyklované obalové sklo. V projektech zkoušení vzorků vyrobených ve skutečném měřítku bylo použito přibližně 7 000 kg drceného skla (0,2 až 12 mm) a 1 500 kg skleněného prášku (< 0,2 mm). Další materiály pro betonáž (cement, písek, kamenivo, přísady, příměsi a tovární zkoušky vzorků ve skutečné velikosti) byly dodány partnery z cementářského a betonářského průmyslu.

### Směsné podíly

Směsné podíly použité v betonových výrobcích se pohybovaly v rozmezí poměru voda-cement ( $w/c$ ) 0,3 až 0,6, obsah cementu 110 až 480  $kg/m^3$ , obsah skleněné drti do 1 720  $kg/m^3$  a obsah skleněného pucolánu do 240  $kg/m^3$ , podle příslušných zkoušených výrobků.

### Zkušební metody

Většina vzorků zahrnutých v projektech stále zůstává v CCC monitorována na ASR podle BS 812:123. Zkoušky specifické shody produktu včetně pevnosti v tahu, abraze, smykové a skluzové odolnosti a odolnosti vůči mrznutí a tání byly provedeny podle příslušných norem (BS 6073-1, BS 6717, BS 7263-1, BS EN 490, BS EN 491, BS EN 1338) partnerskými firmami.

### VÝSLEDKY LABORATORNÍCH ZKOUŠEK A DISKUZE

#### Vliv barvy skla a hladiny alkálií v cementu na ASR expanzi

Drť ze zeleného, jantarového, flintového a modrého skla byla při splnění přísných požadavků na třídění ASTM C227 testována podle ASTM C227 s HAPC, OPC a WPC (obr. 2).

Tab. 1 Podrobné údaje o skleněné drti použité v laboratorní studii ASR

Tab. 1 Details of the glass cullet used in the laboratory ASR study

Z obrázku 2a vidíme, že pokud je skleněná drť v kombinaci s HAPC zkoušena podle ASTM C227, jsou všechny barvy reaktivní a převyšují limit zkoušky (0,1 % ve 26. týdnu). Modré sklo je nejreaktivnější, zelené je nejméně reaktivní a trend reaktivity se zdá být modrá > křišťálová > jantarová > zelená. Důvody tohoto

Barva skla	Velikostní rozsah částic	Studie
jantarová	6 – 12 mm 3 – 6 mm 1 – 3 mm 300 – 600 $\mu m$ 150 – 300 $\mu m$ méně než 90 $\mu m$	vyloučení nevhovujících velikostí
jantarová, zelená a modrá	2,36 – 4,75 mm 1,18 – 2,36 mm 0,6 – 1,18 mm 300 – 600 $\mu m$ 150 – 300 $\mu m$	vliv barvy skla, flintového skla v cementu, hladiny alkálií a přísad k potlačení reakce

Číslo	Firma	Popis	Počet zkoušek
1	H&H	Skleněné kamenivo a pucolán v prefabrikovaných betonových dlaždicích	8
2		Skleněný pucolán a skleněný písek 1-3 mm v litých betonových tvárnících	3
3	CRH (Forticrete)	Skleněný pucolán v šedých betonových blocích	3
4		Skleněný pucolán a skleněné kamenivo v architektonickém zdivu Medici	9 + 6
5		Skleněný pucolán v deskách Fielding a Platt	6
6	Aggregate Industries UK	Skleněný pucolán a skleněné kamenivo v deskách Fielding a Platt	6
7		Skleněný pucolán v betonové dlažbě	6
8		Sklo jako odkryté kamenivo v betonových dlažebních kostkách	5 + 5
9	Marshalls Mono	Skleněný pucolán v dláždění z lisovaného betonu	2 + 2
10		Skleněný pucolán v dláždění z litého betonu	3
11		Skleněný pucolán v dláždění ze za vlhka lisovaného betonu	3
12	Tarmac Group	Skleněný pucolán v betonové směsi nižší třídy	7
13		Skleněný pucolán a písek v čerstvé betonové směsi nižší třídy	6
14	Stowell Concrete	Hodnocení výrobků z drceného skla (analyzovaných pomocí GTS)	2
15		Skleněný pucolán a skleněné kamenivo v betonových blocích	5
16	Conways	Skleněný pucolán a skleněné kamenivo v betonových blocích	6
17	Aggregate Industries UK	Skleněný pucolán a skleněné kamenivo v obrubnicích z lisovaného betonu	3
18	Stowell Concrete	Skleněný pucolán a skleněné kamenivo v betonových podstavcích	6
19	Trent Concrete	Vnější dekorativní betonové výrobky se skleněným kamenivem	8
20	CRH (Forticrete)	Skleněný pucolán a písek v litých betonových střešních taškách	7
		Celkový počet směsí	117

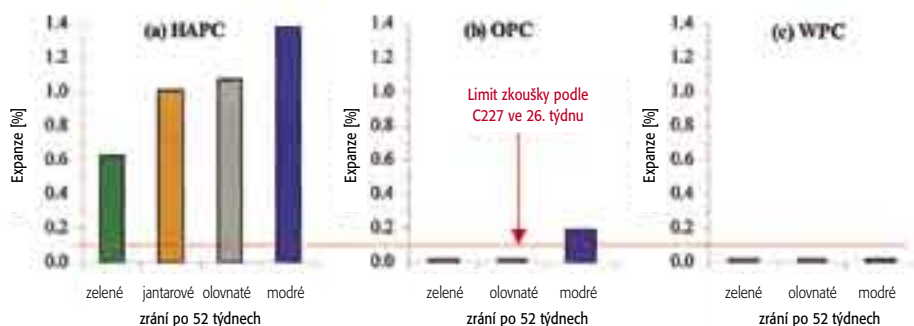
jevu souvisí s chemizmem skla, procesem drcení a fyzikálními vlastnostmi jednotlivých barevných druhů skla. Při použití OPC byla expanze betonových směsí s drtí z jantarového a flintového skla v padesátém druhém týdnu dostatečně nízko pod mezí ASTM, avšak drť z modrého skla limit nesplnila (obr. 2b). U WPC byla expanze všech testovaných skleněných

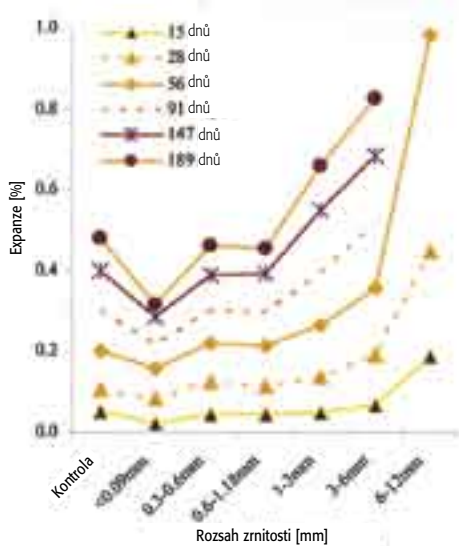
Tab. 2 Přehled zkušebních vzorků

Tab. 2 Full-scale experimental trials

Obr. 2 Vliv hladiny alkálií v cementu na ASR reaktivitu skla testovanou podle ASTM C227, a) HAPC, b) OPC a c) WPC

Fig. 2 Effect of cement alkali levels on glass ASR reactivity tested to ASTM C227, a) HAPC, b) OPC a c) WPC



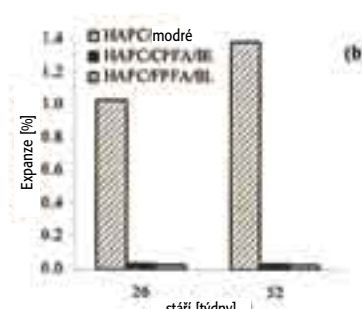
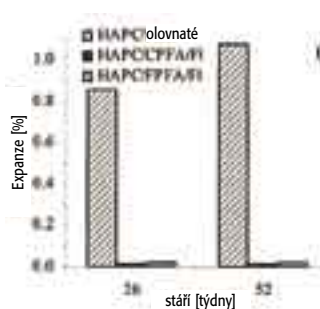


Obr. 3 Vliv zrnitosti jantarového skla na ASR reaktivitu (zkouška ASTM C1260)

Fig. 3 Effect of amber glass particle size on ASR reaktivitu (ASTM C1260 test)

Obr. 4 Vliv pfa a CPFA na ASR expanzi skleněného kameniva zkoušené podle ASTM C227, a) flintové (křehké, olovnaté) a b) modré sklo

Fig. 4 Effect of pfa and CPFA on ASR expansion of glass aggregate tested to ASTM C227, a) Flint and b) Blue



betonů dostatečně nízko pod limitem 0,1% až do padesátého druhého týdne zrání (obr. 2c). To jasně dokazuje, že hladiny alkálií v cementu dramaticky ovlivňují ASR reaktivitu skleněných přísad.

**Vliv zrnitosti jantarového skla na ASR**

Zjištěné výsledky expanze ASR při použití jantarové skleněné drti v rozsahu zrnitosti od < 90 μm do 6 až 12 mm v betonu testovaného podle ASTM C1260 až do 189. dne zrání jsou uvedeny na obrázku 3. Ten jasně ukazuje, že beton vyrobený s jantarovou drtí o zrnitosti menší než 1,18 mm vykazuje nižší expanzi, než

drti testované v kombinaci s HAPC jsou velmi reaktivní a naměřené expanze dalece převyšují zkušební limit ASTM C227 0,1 % v 2. týdnu (0,85 % a 1,025 % ve 26. týdnu, podle pořadí). U 30% náhrady CPFA nebo pfa za HAPC se však až do 52. týdne testu expanze flintové (křehké) a modré skleněné drti držela dostatečně nízko pod zkušebním limitem ASTM C227 (obr. 4a a b).

Za účelem dalšího zkoumání účinnosti zmírnění ASR u CPFA a pfa u malt s použitím flintového (křehkého) skla byly tři vzorky malty podrobeny rozboru pod rastrovacím elektronovým mikroskopem

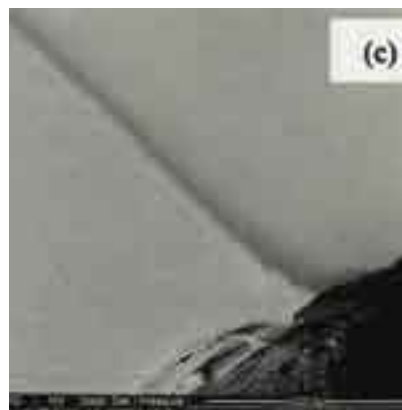
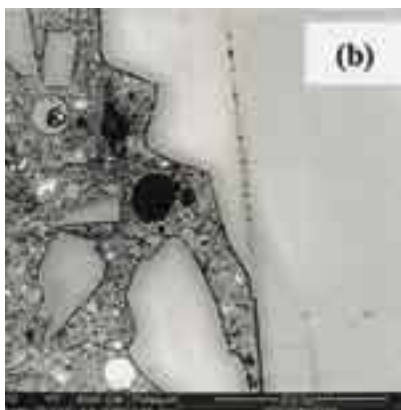
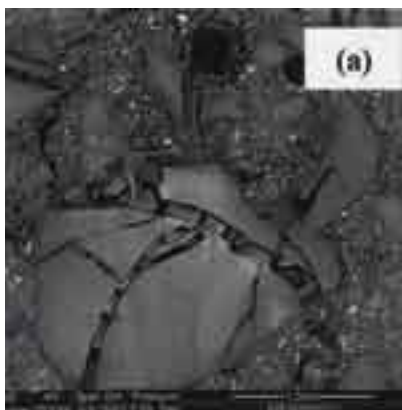
(SEM) (obr. 5). Obrázek 5a) jasně ukazuje, že většina velkých zrn flintového (křehkého) skla se zdá být postižena ASR gelem. Gely do mocnosti až 100 μm lze pozorovat v trhlinách, které se vytvořily v kouscích skla. Kromě toho je evidentní popraskání cementové masy ve velkém rozsahu, což naznačuje, že celistvost betonu byla narušena. Testováním energetickou disperzní spektroskopií (EDS) bylo zjištěno, že gel je bohatý na draslík i vápník, avšak ve srovnání se sklem je ochuzený o sodík.

Bližší prozkoumání vzorku křehkého skla s HAPC/CPFA30 poukázalo na přítomnost ASR gelů u dvou větších částic flintového (křehkého) skla. Tloušťka gelů je menší než 10 μm a gely se

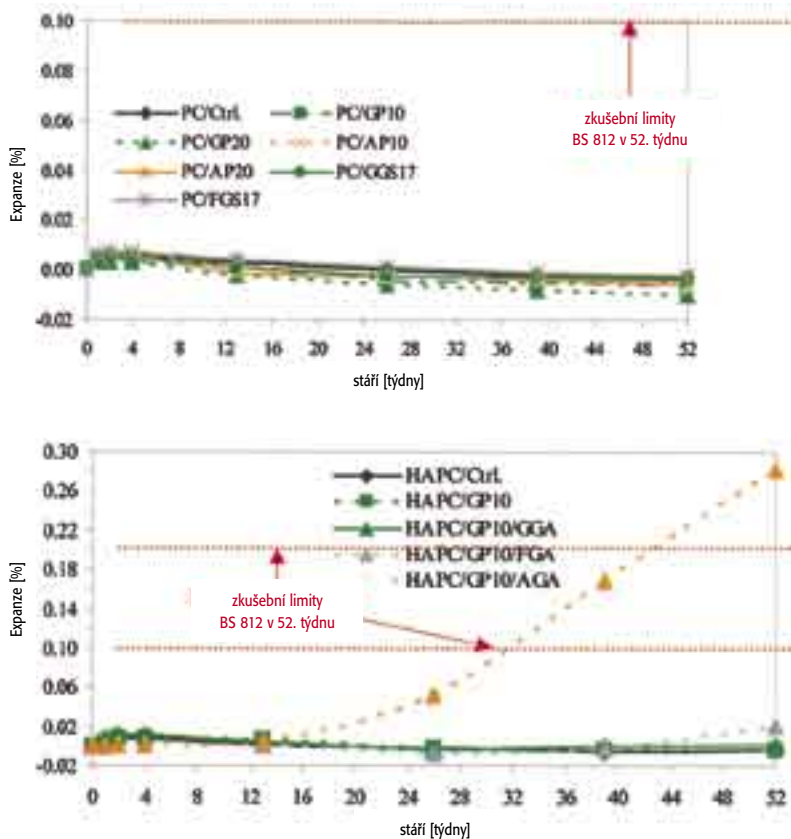
nacházely uvnitř trhlin ve skleněné přísadě (obr. 5b). Podrobné prozkoumání vzorku obsahujícího HAPC/PFA a drt flintového (křehkého) skla ukázalo, že gel typu ASR je pravděpodobně přítomen pouze

Obr. 5 Snímky malt z elektronového mikroskopu testovaných podle ASTM C227 po 22 týdnech, a) HAPC/flintové (křehké) sklo, b) HAPC/CPFA30/flintové (křehké) sklo a c) HAPC/PFA30/křehké sklo

Fig. 5 Back-scattered electron images of mortars tested to ASTM C227 after 22 weeks, a) HAPC/Flint, b) HAPC/CPFA30/Flint a c) HAPC/PFA30/Flint







Obr. 7 Vzorek výsledků ASR testů betonových výrobků z čerstvého betonu s vysokoalkalickým cementem (dílní projekt 8) testovaných podle BS-812-123

Fig. 7 Sample of ASR results tested to BS-812-123 of wet-cast concrete products using high alkali cement (sub-project 8)

u jedné z větších částic (obr. 5c). Ze srovnání obrázků 5b) a c) se vzorkem pouze s HAPC (obr. 5a) je zřejmé, že pfa i CPFA jsou velmi účinné při potlačování ASR drtí flintového (křišťalového) skla v betonu.

## VÝSLEDKY ZKOUŠEK VÝROBKŮ

### A DISKUZE

Úplný soubor všech kompletních experimentálních výsledků je uveden v závěrečné zprávě projektu [2]. Hlavní poznatky vyňaté z kompletní experimentální studie dílních projektů jsou diskutovány v následujících odstavcích.

### ASR

Výsledky testu ASR do 52. týdne ukazují, že naprostá většina testovaných betonových výrobků vykazuje nulovou expanzi ASR (typická sada výsledků ASR je uvedena na obrázku 6, dílní projekt 20). Pouze u dvou z 98 směsí byla zkušební kritéria BS 812–

123 stanovená v BRE Digest 330 [6] překročena. Jedna z těchto dvou směsí obsahovala vysokoalkalický cement (obr. 7, dílní projekt 8) a druhá byla vyrobená v prostředí s nejasnou kontrolou, kde byla objevena určitá kontaminace hořčíkem [2].

### Zkoušky shody výrobků

Většina testovaných betonových výrobků vykazovala ve zkouškách specifické shody produktu dobré výsledky. U některých výrobků bylo pozorováno mírné snížení pevnosti. Domníváme se však, že vyhovující pevnosti lze docílit provedením jednoduchých úprav směsných podílů.

### Rastrovací elektronový mikroskop (SEM)

Vzorky sledované v SEM byly po paděsát dva týdnů vystaveny podmínkám testu ASR podle BS 812–123 (38 °C, RH ≥ 98 %). Typický SEM obraz betonového vzorku s neporušenými částicemi skleněného písku a se zcela spotřebovanými jemnými částicemi skla je na obrázku 8. V této zkoušce zelený skleněný písek o velikosti 1 až 3 mm vykazoval nulovou ASR (obr. 8a). Na obrázku 8b je okolo částičky o velikosti 35 μm přítomná obálka ze zreagovaného materiálu. EDS analýza tohoto produktu reakce ukázala, že je ve srovnání

Obr. 6 Vzorek výsledků ASR testů betonových střešních tašek (dílní projekt 20) testovaných podle BS-812-123

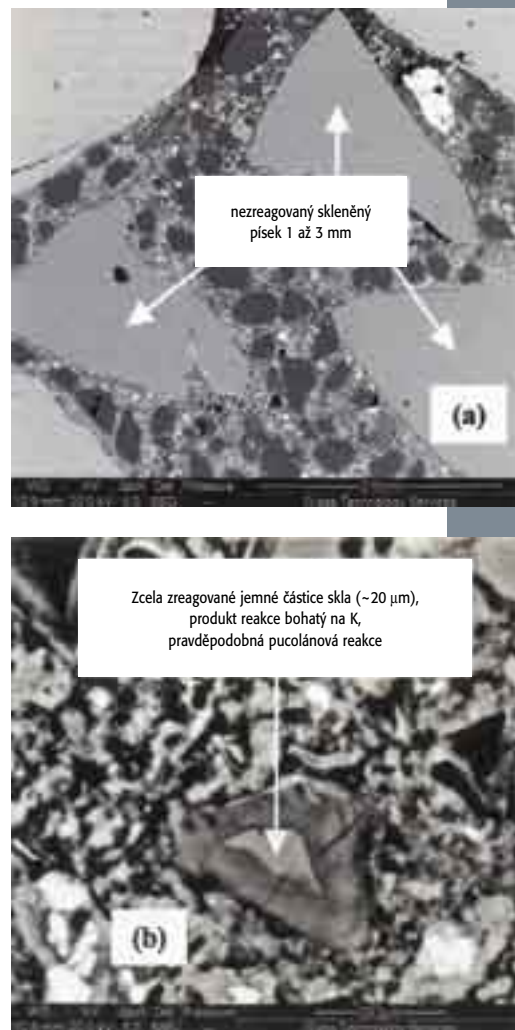
Fig. 6 Sample of ASR results tested to BS 812-123 of semi-dry cast concrete roof tiles (sub-project 20)

s částicí skla obohacen draslíkem a ochuzený o sodík, což indikuje pravděpodobnost pučolánové reakce s draslíkem namísto obvyklého vápníku.

Slibné výsledky zkoušek betonových produktů ve skutečné velikosti vedly Ústav pro stavební výzkum [3, 7] k vydání nezávislé předběžné certifikace prefabrikovaných betonových výrobků zahrnující

Obr. 8 a) b) Snímky z elektronového mikroskopu čerstvé betonové směsi s 25 % zeleného pučolánu a 50 % písku ze zeleného skla (dílní projekt 13)

Fig. 8 a) b) Back-scattered elektron image of ready mixed concrete using 25% green puzzolana and 50% green glass sand (sub-project 13)



Literatura:

- [1] Zhu H., Byars E.: Potential for use of waste glass in concrete, *Concrete*, Vol. 39, No. 2, Febr. 2005
- [2] Byars E., Zhu H. and Morales B.: ConGlassCrete 1, Project final report, [www.wrap.org.uk](http://www.wrap.org.uk), June 2004
- [3] Byars E., Zhu H. and Morales B.: ConGlassCrete 2, Project final report, [www.wrap.org.uk](http://www.wrap.org.uk), June 2004
- [4] Zhu H., Byars E.: Alkali-Silica Reaction of Recycled Glass in Concrete, Proc. of 12th Inter. Confer. on Alkali-Aggregate Reaction, Beijing, China, Oct. 2004, pp. 811–820
- [5] Byars E., Morales B. and Zhu H.: Waste glass as concrete aggregate and pozzolan – laboratory and industrial projects, *Concrete*, Vol. 38, No. 1, January 2004, pp. 41–44
- [6] BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, Alkali-silica reaction in concrete, Digest 330. Part 1–3, 1999
- [7] El-Alami I.: Pre-certification of concrete products containing glass pozzolan and aggregate, BRE Certification report for pre-certification activities on ConGlassCrete Projects, report No. 216–519, BRE Certification, March 2004

cích šedé tvárnice, dlažební bloky a architektonické zdící materiály.

**ZÁVĚR**

Z výsledků uvedených v tomto článku lze vyvodit následující závěry:

- obsah alkálií v cementu je nejvýznamnějším faktorem ovlivňujícím míru ASR skla v betonu,
- zdá se, že 30% BS 3892 nebo BS EN 450 pfa účinně zmírňuje ASR expanzi skla v betonu, minimálně do jednoho roku za urychlených podmínek (potvrzeno analýzou SEM),
- reaktivita skleněných částic obecně stoupá s velikostí částic od hodnot okolo 1 až 2 mm a zdá se, že částice skla pod touto velikostí snižují náchylnost větších částic skla k ASR,
- zkoušky na Univerzitě v Sheffieldu ukázaly, že sklo ve formě pucolánu nebo drtě lze použít u řady prefabrikovaných betonových výrobků bez škodlivých účinků až do jednoho roku,
- až do jednoho roku stáří byla pozorována nulová ASR expanze u série více než sta prefabrikovaných betonových výrobků se skleněným pucolánem a/ nebo skleněnou drtí s výjimkou výrobků, ve kterých byl použit vysokoalkalickej cement, a bylo to potvrzeno jak fyzikálními, tak chemickými testy.

Článek získal ocenění Concrete Society Student Trust za rok 2004.

Dr Ewan A Byars BSc PhD MICT  
 Hulying Zhu

oba: Concrete Material Research Unit  
 Centre for Cement and Concrete  
 Dep. of CSE, University of Sheffield  
 Sheffield S1 3JD, UK

tel.: +44 114 222 5715

mob.: +44 777 581 7714

e-mail: e.byars@shef.ac.uk, drbyars@aol.com

[www.shef.ac.uk/civil/start/eab.html](http://www.shef.ac.uk/civil/start/eab.html)

[www.shef.ac.uk/cmru](http://www.shef.ac.uk/cmru)

Pozn. red.: Český překlad článku [1] je otištěn s laskavým souhlasem vydavatelství časopisu *Concrete* i autorů. Autor požádal redakci o úpravu názvu české verze.

Ověřovací testy na Univerzitě v Sheffieldu pokračují. V současné době jsou vyhodnocovány výsledky po dvou letech sledování vzorků. U některých z nich se začíná ASR projevovat. Proto autoři doporučují čtenářům časopisu *BETON TKS* ještě nějakou dobu vyčkat, než začnou do betonů používat kamenivo z recyklovaného odpadního skla.

Český překlad byl lektorován.

## NORMOVANÉ OBJEKTY PRO ŽELEZNIČNÍ TECHNIKU

Švýcarské spolkové dráhy (SBB) využívají všech možností snížení nákladů na provoz. V letech 1996 až 2001 nahradily přes padesát zastaralých stavědel betonovými „celami“ bez lidské posádky. Jejich nový technický obsah – řídicí automatika namísto drážního zaměstnance – vyžaduje zvláštní stavební obal. Aby „cely“ mohly být rychle navrženy a postaveny, byly standardizovány a do délky modulárně variabilní. Jejich provoz je výhodný, jsou-li náklady na topení a chlazení co nejnižší. Citlivá vyspělá technologie je chráněna archaickými prostředky. Těžké duté betonové kvádry jsou obloženy množstvím setvačné hmoty. V letním horku má vlhkost vypařovaná ze střešních 1,2 m silných a zeminou pokrytých elementů chla-

divý efekt, v mrazu silná vrstva zeminy a konstrukce izolují techniku uvnitř. Akumulační a vyrovnávací vlastnosti zeminy jsou o to více vítány, protože náplň pro střešní prvky vznikla při kopání základů; vykopaná zemina, která nemusela být odvezena, stala se akumulační hmotou, která nemusela být dovezena. Plnění 600 mm silných betonových stěn pískem, zeminou nebo vzduchem se řídilo množstvím odpadního tepla vyprodukovaného uvnitř cely. Díky transportu po kolejích až ke staveništi nebyla váha konstrukce překážkou. Vyšší stavební náklady jsou více než vyrovnány téměř bezplatným provozem. Stavědla bez lidské posádky – jednoduché tmavé kvádry leží v železniční krajině jako bludné balvany. vs, jm

## SLUNEČNÍ SVĚTLO JAKO OCHRANA BETONU

V letošním prvním čísle internetového vydání časopisu BFT – Betonwerk + Fertigteil-Technik (v anglické verzi *Concrete Plant + Precast Technology*, viz [www.bft-online.info](http://www.bft-online.info)) v článku s názvem „Cementové materiály a fotokatalýza“ informoval autor Luigi Cassar o výsledcích výzkumu působení slunečního světla na povrchy betonových konstrukcí. Experimentální i provozní zkoušky potvrdily, že prvky betonových konstrukcí s přídavkem TiO<sub>2</sub> si udržují svůj estetický vzhled nezměněný po dlouhou dobu, neboť jejich povrch je odolnější proti znečištění NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, CO, benzenem, tolu-

enem, organickými chloridy a aldehydy. Jako příklady uvádí autor bílé betonové stěny chrámu Misericordia v Římě (2003), Centrum hudby v Chambéry ve Francii (2000) a budovu školy v Mortaře v Itálii (1999). Betonové povrchy s TiO<sub>2</sub> přispívají i k snížení znečištění okolního prostředí. Podmínkou je pouze dostatek slunečního světla. Při zkoušce na městské komunikaci v Miláně s 6000 m<sup>2</sup> sledovaného povrchu s provozem 1200 vozidel/hod. došlo během letního slunečního dne (síla větru 0,7 m/s, osvětlení 90 000 lx) k snížení znečištění NO<sub>x</sub> o 50 %. jm