

SUBSTITUCE POJIVA V CEMENTOVÝCH KOMPOZITECH JEMNĚ MLETOU RECYKLOVANOU SKLOVINOU S OHLEDEM NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

CEMENT COMPOSITES BINDING AGENT SUBSTITUTION WITH MATERIALS FROM ALTERNATIVE RESOURCES - RECYCLED GLASS - AND ENVIROMENTAL ASPECT

PAVLA MATULOVÁ,
TOMÁŠ MELICHAR, JAN PŘIKRYL

V posledních letech je pozornost v oblasti spotřeby druhotných surovin směřována také na silikátové suroviny amorfního charakteru, mezi něž se řadí různé formy skel. Snad nejznámější z nich je recyklát pocházející z čirého či barevného obalového skla, jež se částečně uplatňuje při opětovné výrobě skleněných obalů. Zdrojů odpadního skla, kterých není dále využíváno, je ovšem mnoho, za zmínku stojí tabulové sklo či autosklo. Většina skel se vyznačuje poměrně vysokým obsahem amorfního SiO_2 , což je charakteristické především pro pucolánové aktivní, popř. latentně hydraulické látky. Charakteristickou vlastností těchto materiálů je jejich schopnost podílet se na tvorbě hydratačních produktů během fyzikálně-chemických pochodů vedoucích ke zkompaktnění matrice cementových kompozitů. Na základě již provedených výzkumů v této problematice vyvstává negativní jev limitující použitelnost skla v cementových kompozitech, a to možnost průběhu tzv. alkalicko-křemičité reakce (AKR), jež má za následek tvorbu nežádoucích produktů, které vyvolávají objemové změny popř. až destrukci matrice. Je tedy nasnadě ověřit tuto zajímavou možnost skýtající vysoký potenciál ve formě nadbytku zmíněných druhotných surovin, popř. odpadů s ohledem na případný vznik AKR.

The technical article deals with study of basic parameters of cement composites, in which bindings agent was partially replaced with raw material from alternative sources. Especially, it concerns cement mortars, of which the compound was modified with ultra fine grained filler, which comes from the salvage of hollow glassware. A granulometric compound of recycled product was compiled to the three basic fractions, which were tested in three different amounts in binder. By this way produced samples was tested.

The acquired collection of results was consequently analyzed. Through that, positive results were found, prompting further research in this way.

ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI SKEL

Sklo je pevnou amorfní látkou, jež vzniká obvykle tuhnutím taveniny bez krystalizace, přičemž ztuhnutí je způsobeno plynulým růstem viskozity na tak vysokou hodnotu, že se materiál jeví pevným. Na rozdíl od krystalů postrádá struktura skla pravidelné uspořádání (translační souměrnost) na delší vzdálenosti, odpovídající několika násobku rozměrů atomů. Tento základní rozdíl mezi strukturou skel a krystalických látek lze dobře demonstrovat na SiO_2 , který je znám ve stavu skelném i krystalickém. V obou případech jsou základní stavební jednotkou tetraedry (SiO_4)⁴⁻, v nichž vzdálenost atomů křemíku a kyslíku je 0,16 nm, avšak ve skle se podle rentgenografických studií ve vzdálenostech větších než cca 1 nm objevují odchylky od pravidelného vzájemného uspořádání tetraedrů, charakteristického pro krystal. Současně má vzdálenost atomů Si-O ve skelném SiO_2 určitý rozptyl [3].

Teorii tzv. nahodilé sítě navrhl poprvé Zachariassen (1932), který předpokládal náhodnou strukturu na základě již známých zákonů krystalové chemie. Zachariassen také uvedl řadu pravidel, jež specifikují podmínky potřebné k tomu, aby chemická sloučenina mohla existovat ve sklovitém stavu. Pokud tyto podmínky nejsou splněny, není možná existence náhodně uspořádané sítě mnohostěnnů, skládajících se s kationtů a aniontů [4].

Pokud existuje látka A_nO_m , kde A je nějaký prvek a O je kyslík, schopná tvořit sklo, pak musí být splněny následující podmínky:

- obsah vnitřní energie skelného A_nO_m může být pouze nepatrně vyšší, než je energie krystalického A_nO_m , což v podstatě znamená, že tepelné zbarvení přeměny $(\text{A}_n\text{O}_m)\text{sklo} \rightarrow (\text{A}_n\text{O}_m)\text{kryst.} + \text{Q}$

- nesmí být příliš velké,
- atom kyslíku nesmí být spojen s více než dvěma atomy A,
- koordinační číslo atomu A musí být ve srovnání s atomem kyslíku malé (3 až 4),
- elementární mnohostěny ve strukturní mřížce skla mohou mít pouze společné vrcholy, nesmějí mít společné plochy nebo hrany.

Tvorba nepřetržitě prostorové mřížky vyžaduje, aby nejméně tři vrcholy v každém mnohostěnu byly společně se sousedními mnohostěny [4].

Existuje celá řada anorganických i organických látek, jež utvoří sklo, jestliže je ochlazujeme z kapalného stavu tak rychle, že se nestací vytvořit pravidelná strukturní mřížka.

Z anorganických látek lze uvést následující:

- prvky: S, Se, Te, P,
- oxidy: B_2O_3 , SiO_2 , GeO_2 , P_2O_5 aj.,
- boritany a křemičitany: $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ aj.,
- jiné sloučeniny: BeF_2 , AlF_3 , ZnCl_2 , KHSO_4 aj.

Prakticky používaná skla anorganická nejsou až na výjimky stechiometrickými sloučeninami, nýbrž složitějšími systémy s variabilním poměrem složek, k nimž přistupují i látky, jež samy o sobě sklo netvoří. Tím dostáváme rozsáhlou paletu složení, obvykle uvnitř jednotlivých typů sloučenin. Nejběžněji vyráběna jsou skla oxidová a z nich dle převažujících složky skla křemičitá a borito-křemičitá. Pro speciální účely se používají v menším množství skla fluoridová, fosforečná, chalkogenidová (na bázi S-Se-Te) aj.

Dnešní komerčně vyráběná skla lze z hlediska chemického složení rozdělit do těchto typů:

- sodno-vápenaté sklo,
- olovnat-alkalické sklo,
- boro-silikátové sklo,
- hliníko-silikátové sklo,
- silikátové sklo (96 %),
- složené sklo [5].

MOŽNOSTI VYUŽITÍ ODPADNÍHO SKLA

Pucolánová aktivita skla

Pucolány jsou přírodní nebo průmyslové křemičité, hlinito-křemičité látky nebo směsi těchto látek. Po smíchání s vodou samy netvrdnou. Jsou-li však jemně semlety, reagují v přítomnosti vody za normální teploty s rozpuštěným hydroxidem vápenatým za tvorby sloučenin vápenatých silikátů a vápenatých aluminátů, které jsou nositeli postupně narůstající pevnosti. Tyto sloučeniny jsou podobné těm, které vznikají při tvrdnutí hydraulických látek. Pucolány musí v podstatě obsahovat aktivní oxid křemičitý a oxid hlinitý. Ve zbytku pak oxid železitý a další oxidy. Obsah aktivního oxidu vápenatého je zanedbatelný. Obsah aktivního oxidu křemičitého musí být nejméně 25% hmotnostních.

Skleněný pucolán je vyráběn mletím odpadního skla do jemného prášku, který je pak přidáván do betonové směsi jako možná náhrada části cementu, což snižuje 28denní pevnosti dosažené s obyčejným portlandským cementem. Jemně mleté sklo má vhodné chemické složení pro reakci s alkáliemi v cementu a vlastní formování cementových produktů, které je známo jako pucolánová reakce (Byars).

Sklo má vysoký obsah SiO_2 , což ho činí vhodným pro použití jako pucolánový materiál. Jeho částice jsou amorfní křemen (85 % SiO_2) s extrémně velkým měrným povrchem, chemicky reagují s hydroxidem vápenatým z cementu a tvoří CSH gel. C – S – H je hydratační produkt obsažený v zatvrdlé cementové pastě. Použitím recyklovaného skla jako pucolánového materiálu se zvyšuje tvorba CSH gelu, což vede k snižování množství pórů, čímž se snižuje propustnost betonu, zároveň roste pevnost, a tak se zvyšuje kvalita a trvanlivost betonu.

Možnost použití skla jako náhrady cementu

Dřívější laboratorní práce ukazují uspokojivé technické parametry skleněného prachu v betonu jako pucolánového materiálu. Při podobné velikosti částic má mletý skelný prach vyšší měrný povrch podle Blaina než portlandský cement. Toto je způsobeno díky ostrohranné morfologii skleněných částic. Jemně mleté skelné prachy vykazují velmi vysokou pucolánovou aktivitu. Zvýšení vytvrzovací teploty urychluje aktivaci pucolánové reaktivity skelného prachu v rámci vývoje pevnosti.

Obr. 1 Tetraedrické znázornění nahodilé struktury sodno-silikátového skla (šedá – křemík, červená – kyslík, fialová – sodík) [6]

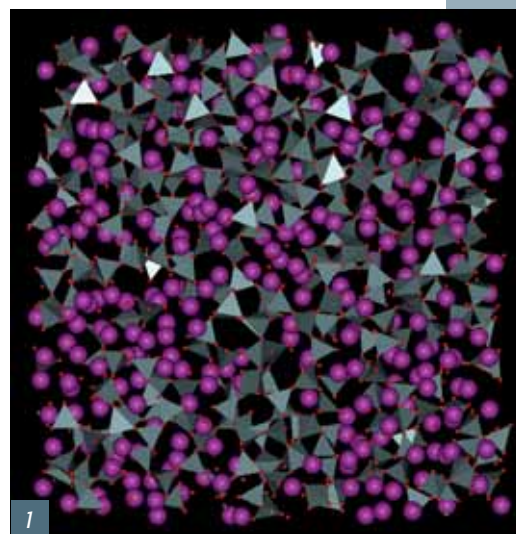
Fig. 1 Tetrahedral visualisation of soda-silicate glass accidental structure (grey-silica, red-oxygen, violet-sodium) [6]

Negativním faktorem je možnost vzniku alkalicko-křemičité reakce. Toto riziko lze ovšem eliminovat velikostí částic použitého skelného recyklátu. A pokud i přesto k reakci dojde, tak objemové změny u takto malých částic jsou tak nepatrné, že nedochází k narušení struktury kompozitu [7]. Další možnou negativní stránkou je ekonomická náročnost mletí, ale ta je do jisté míry eliminována možností náhrady cementu.

Použití odpadního skla jako náhrady jemného kameniva

V současné době se zkoumají možnosti znovupoužití odpadního skla z rozdrcečných obalů a stavebního odpadového skla jako kameniva pro přípravu malt a betonu. Nyní toto opětovné použití ještě není běžné kvůli rizikovosti alkalicko-křemičité reakce mezi alkáliemi z cementu a oxidem křemičitým z odpadního skla. Tato expanzivní reakce může zapříčinit značně velké problémy způsobené postupným vznikem trhlin, což může být extrémně škodlivé pro trvanlivost malty a betonu. Nicméně některé literatury uvádí, že pokud je odpadní sklo jemně mleté, pod $75 \mu\text{m}$, k tomuto efektu nedochází a trvanlivost malty je zaručena [8]. U velmi jemných částic dochází k alkalicko-křemičité reakci stejně jako u hrubších zrn, tlak při bobtnání zůstává ale vlivem menší velikosti zrn tak malý, že nevznikne žádné poškození ve formě trhlin. Pokud je tento materiál vhodně mletý, může být použit v maltách a betonu jako velmi jemný přídavek bez problémů vztahujících se k alkalicko-křemičité reakci [9]. Navíc se zdá, že odpadní sklo pozitivně přispívá k mikrostrukturně-technickým vlastnostem malty, což má za následek očividné zlepšení jejich mechanických vlastností [7].

Je důležité si uvědomit, že reaktivita skla závisí na jeho konstrukčním typu, složení a fyzických parametrech, jako je přítomnost pórů a oddělených pevných fází ve skle. Bylo zjištěno, že skla obsahující bor, jako je pyrex sklo, jsou z hlediska alkaliového rozpinání více reaktivní než sodno-vápeno-křemičité sklo [11].



OMEZENÍ VZNIKU ALKALICKO-KŘEMIČITÉ REAKCE

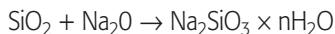
Pokud beton obsahuje plnivo s obsahem amorfního SiO_2 , není v podstatě možné vzhledem k alkáliím obsaženým v cementu alkalicko-křemičité reakci zabránit. Je třeba ovšem vyloučit, aby alkalicko-křemičité reakce – podmíněná odpovídajícím reaktivním plnivem a pojivem – mohla proběhnout tak rychle, aby během předpokládané doby životnosti betonového prvku vedla k masivní tvorbě gelu, a tudíž i k poškození. Aby se této škodlivé alkalicko-křemičité reakci předešlo, musí být omezeny alespoň některé z uvedených předpokladů nutných pro její vznik.

V suchých vnitřních prostorách je zpravidla vlhkost vzduchu tak malá, že se zde vzhledem k chybějící vlhkosti alkalicko-křemičité reakce prakticky nevyskytuje. Naproti tomu ve venkovních prostorách je prakticky nemožné této reakci zabránit cíleným zadržováním vlhkosti. Při výrobě betonu zaujímá cement malý hmotnostní podíl. Jedna z možností, jak zabránit alkalicko-křemičité reakci cementu, je omezit obsah alkálií v cementu. Podle příslušných předpisů – pokud je v betonu obsaženo plnivo citlivé na alkálie – je třeba použít cement s nízkým obsahem účinných alkálií.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Jak v ČR, tak v zahraničí již proběhly či stále probíhají výzkumné práce týkající se zužitkování skelného recyklátu. Jedním z dominantních problémů, kterými se tyto práce také zabývají, je již zmíněná AKR. Podstata této reakce spočívá v dlouhodobém působení alkálií (Na_2O , K_2O) na aktivní SiO_2 , čímž dochází k reakcím doprovázeným

objemovými změnami (tvorba gelu alkalických křemičitanů), které způsobují postupnou destrukci cementového kompozitu. Alkalicko-křemičitou reakci lze zjednodušeně popsat vzorcem:



Pro stanovení AKR existuje několik metod, které jsou v praxi využívány, např. dle ASTM C1260, ASTM C227 a ASTM C1293. Z dostupných zahraničních zdrojů bylo zjištěno, že k AKR nemusí vždy dojít, přičemž hlavním faktorem ovlivňujícím tuto skutečnost je velikost samotných částic, které jsou výchozí látkou pro AKR, tj. v našem případě skelného recyklátu. Na základě různých autorů je uvedena limitní hodnota velikosti částic 75 μm , avšak dle [5] lze použít i zrna o velikosti až do 100 μm . S úvahou výše uvedeného byla provedena předúprava velikosti a granulometrického zastoupení skloviny. Mletí výchozího netříděného číreho skelného recyklátu se tedy uskutečnilo ve vibračním mlýnu, který je využíván pro dosažení velmi vysoké jemnosti výsled-

ného produktu. Na základě empirických zkušeností byla zvolena doba mletí cca 120 s a dotřídění frakcí bylo provedeno síťovým rozbořem za pomoci sít s čtvercovým průřezem ok.

Pro účely výzkumu byly uvažovány tři frakce jemně mletého číreho skelného recyklátu, a to:

- 0,000 až 0,045 mm (dále označováno jako S1),
- 0,045 až 0,063 mm (dále označováno jako S2),
- 0,063 až 0,100 mm (dále označováno jako S3) [8].

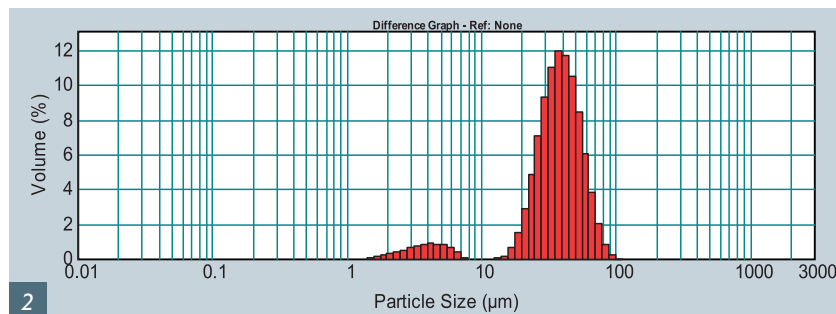
Na obr. 2 až 4 jsou uvedeny výsledky stanovení velikosti částic jednotlivých typů sklovin dle velikosti frakce. Tyto analýzy byly realizovány v přístroji Malvern Mastersizer 2000E System EPA5011, který pracuje na principu laserové difrakce.

Z uvedených grafů (obr. 2 až 4) je patrné zastoupení jednotlivých jemných frakcí skelného recyklátu ve zkoumaných vzorcích, v popisu obrázků jsou uvedeny stanovené měrné povrchy, jež taktéž vypovídají o zrnitosti materiálu. V rámci dalších

analýz ještě před samotnou aplikací skelného recyklátu do cementových kompozitů byla stanovena pucolánová aktivita a proveden chemický rozbor zkoumané skloviny. Výsledky pucolánové aktivity jsou konfrontovány s běžně užívanými přísadami v cementových kompozitech. Výstupy analýz jsou uvedeny v tab. 1 až 3.

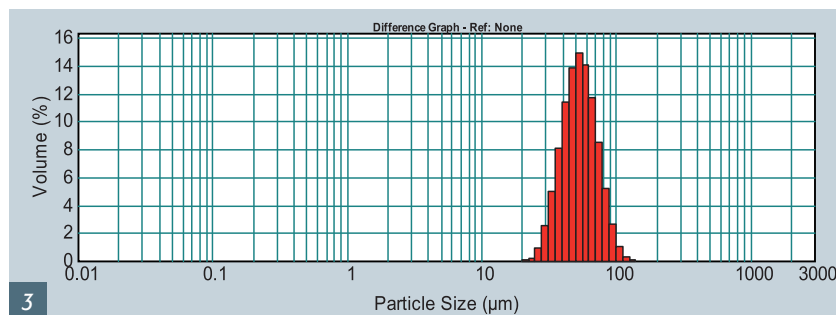
Z výsledků chemické analýzy je patrné, že vzorky obsahují vysoké procento oxidu křemičitého, což je pro spolupůsobení v cementové matici jedním z podstatných kritérií. Dále pak zvýšené množství alkálií a jisté procento organických látek, což by mohlo představovat zbytky etiket a lepidel.

Postup stanovení pucolanity probíhal v souladu s interní metodikou VÚSTAĤ, a. s., a dle francouzské podnikové normy pro výrobu metakolinů tzv. Chapelle test. Výsledky stanovení jsou uvedeny v tab. 2. Společně s mletými skelnými recykláty byly zkoušeny mikrosiliky od čtyř různých výrobců (prášková mikrosilika od firmy Chryso – ChrysoSilica, prášková mikrosilika od firmy AVAS, prášková mikrosili-



2

Obr. 2 Histogram velikosti částic frakce 0,000 až 0,045 mm – S1, měrný povrch byl stanoven na 253 m^2kg^{-1}

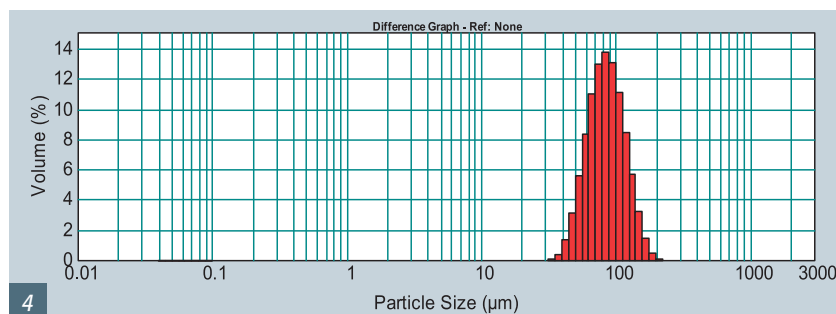


3

Fig. 2 Particle size histogram of fraction 0.000 up to 0.045 mm – S1, 253 m^2kg^{-1} specific surface area value was determined

Obr. 3 Histogram velikosti částic frakce 0,045 až 0,063 mm – S2, měrný povrch byl stanoven na 136 m^2kg^{-1}

Fig. 3 Particle size histogram of fraction 0.045 up to 0.063 mm – S2, 136 m^2kg^{-1} specific surface area value was determined



4

Obr. 4 Histogram velikosti částic frakce 0,063 až 0,100 mm – S3, měrný povrch byl stanoven na 130 m^2kg^{-1}

Fig. 4 Particle size histogram of fraction 0.063 up to 0.100 mm – S3, 130 m^2kg^{-1} specific surface area value was determined

Obr. 5 Grafické porovnání dosažených pevností v tlaku a tahu za ohybu po 28 dnech zrání

Fig. 5 Graphic confrontation of mortar compressive and bending tensile strength values after 28 days

Obr. 6 Difraktogramy reprezentativních vzorků: a) referenční, b) S1/40

Fig. 6 Diffraction analysis of representative samples: a) reference, b) S1/40

ka od firmy Degussa, prášková mikrosilika od norského výrobce a mikrosilika vyráběná jako vodní suspenze 1:1 opět od firmy Degussa), dva druhy popílků, přičemž každý z nich byl použit v původní a mleté podobě (čermouhelny popílek Dětmarovice, původní od výrobce a mletý na kulovém mlýnu po dobu dvou hodin, a hnědouhelny popílek Chvaletice, původní od výrobce a mletý na kulovém mlýnu po dobu dvou hodin), by-pass odprašky z cementárny Mokrá a jeden druh meta-

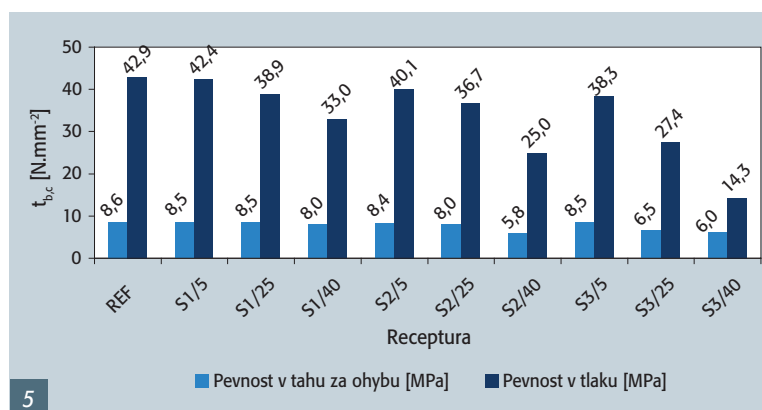
kaolinu z produkce Českých lupkových závodů.

Jak je patrné z hodnot uvedených v tab. 2, vykazují mleté skelné recykláty poměrně dobré výsledky. Míra pucolánové aktivity je srovnatelná s některými druhy běžně používaných příměsí, jako jsou např. hnědouhelny a čermouhelny popílek či některé druhy mikrosiliky. Pro účely výzkumu v oblasti substituce pojiva v cementových kompozitech bylo vyrobeno celkem třicet zkušebních těles.

Základním výchozím předpokladem pro návrh receptur byl normativní dokument ČSN EN 196-1 a ČSN EN 450-1. Byla provedena substituce 5, 25 a 40 % dávky cementu pro všechny tři frakce skelného recyklátu. Dle takto navržených receptur byla vyrobena zkušební tělesa v souladu s ČSN EN 196-1. Příprava zkušebních těles (trámečky 40 × 40 × 160 mm) spočívá v promíchání komponent dle předepsaného postupu. V drtivé většině normativních dokumentů týkajících se sta-

Tab. 1 Chemická kompozice recyklované skloviny
Tab. 1 Chemical composition of the recycled glass

Složka [%]	Vzorek		
	1	2	3
SiO ₂	71,2	71,66	71,05
Al ₂ O ₃	0,55	0,57	0,64
Fe ₂ O ₃	0,17	0,17	0,14
BaO	0,09	0,02	0,11
CaO	9,22	9,11	8,97
MgO	4,27	4,27	4,11
Na ₂ O	13,1	13,3	13,6
K ₂ O	0,11	0,33	0,24
Org. látky	0,05	0,09	0,08



Tab. 2 Výsledky stanovení pucolánové aktivity – Chapelle test
Tab. 2 Results of pozzolana activity determination – Chapelle test

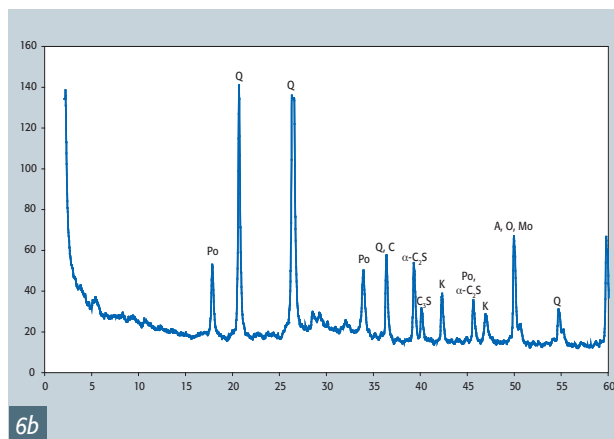
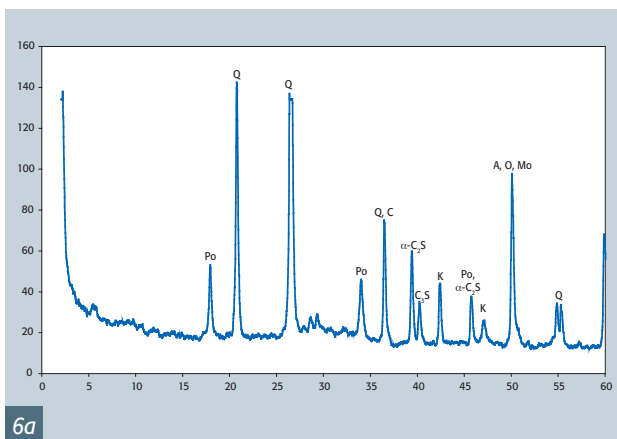
Označení vzorku	Měrný povrch [m ² kg ⁻¹]	Objemová hmotnost [kgm ⁻³]	Míra pucolánové aktivity ¹ mg Ca(OH) ₂ [g ⁻¹]
Mikrosilika Norsko	22000	2800	278
Mikrosilika Chryso	23000	2100	429
Mikrosilika AVAS	27000	2150	999
Mikrosilika Degussa	23000	2170	337
Metakaolin	25000	2430	921
Odprašky Mokrá	220	3000	0
Popílek Dětm.	254	2340	278
Popílek Dětm. ml.	391	2340	329
Popílek Chval.	287	2250	344
Popílek Chval. ml.	439	2250	703
S1	253	2400	342
S2	136	2400	264
S3	130	2400	175

Tab. 3 Specifikace jednotlivých komponent receptur

Tab. 3 Specification of particular batches' components

Složka	Specifikace
cement	CEM I 42,5 R
kamenivo	normalizovaný křemičitý písek dle ČSN EN 196-1
voda	standardní voda z vodovodního řádu
S1	zkoumaný skelný recyklát frakce 0–45 μm
S2	zkoumaný skelný recyklát frakce 45–63 μm
S3	zkoumaný skelný recyklát frakce 63–100 μm

Pozn. 1 Míra pucolánové aktivity metodou Chapelle test – metoda slouží pro určení relativní schopnosti pucolánu absorbovat Ca(OH)₂. Jedná se o reakci vlastního pucolánu s přesně definovaným množstvím Ca(OH)₂ po dobu 16 h. Reakce probíhají za zvýšené teploty, a výsledek zkoušky je uváděn jako množství Ca(OH)₂ absorbované 1 g pucolánového materiálu.



novení parametrů cementových kompozitů je udáváno rozhodující kritérium stáří 28 dní. Ani v tomto případě tomu nebylo jinak. Po 28 dnech zrání byla zkušební tělesa vyňata z vodního uložení, byly stanoveny rozměry, provedena vizuální prohlídka, zda nedošlo k výrazným negativním objemovým popř. jiným změnám a následně bylo uskutečněno stanovení pevnostních charakteristik. Pevnosti v tahu za ohybu a tlaku byly stanoveny v souladu s ČSN EN 196-1, jejich průběh je zachycen na obr. 5.

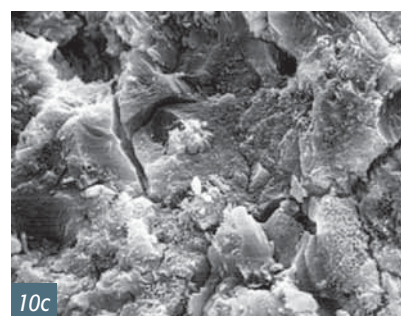
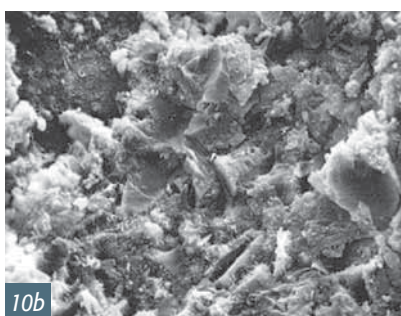
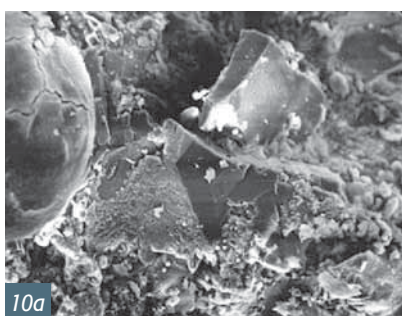
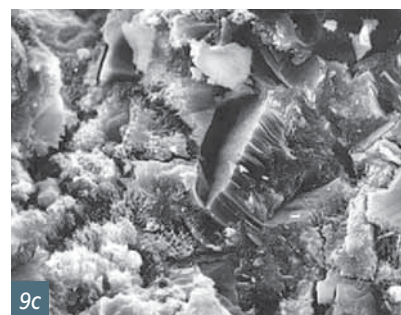
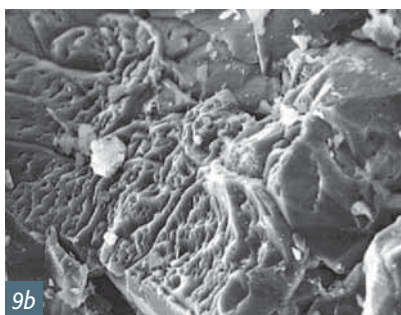
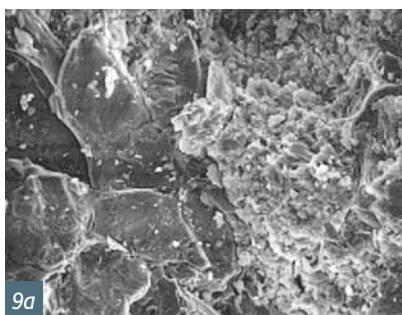
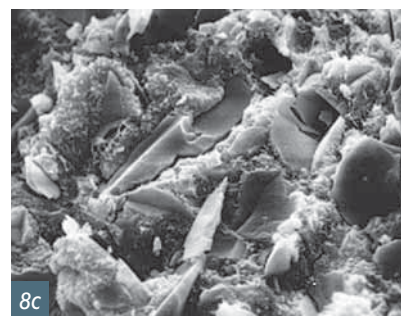
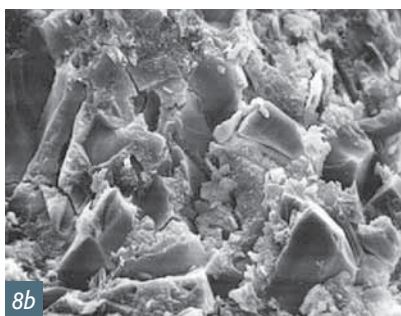
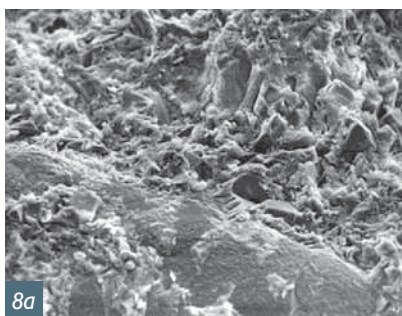
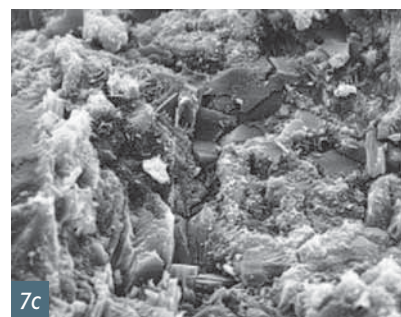
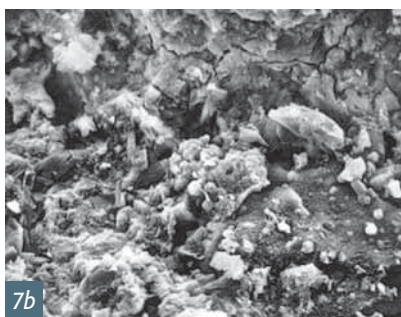
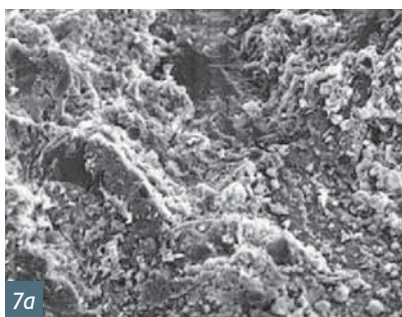
Vzhledem k tomu, že modifikace složení cementových kompozitů byla provede-

na běžně nepoužívanou surovinou, bylo třeba také ověřit fyzikálně-chemické charakteristiky vyrobených vzorků, zejména mineralogické složení. V praxi je pro tento účel běžně užíváno rentgenové difrakční analýzy, jež pomáhá objasnit mikrostrukturální chování zejména krystalických silikátových materiálů (beton apod.).

Vzhledem k tomu, že byl analyzován poměrně velký soubor dat, jsou zde uvedeny pouze dva ze zpracovaných difraktogramů (obr. 6). Vyhodnocení RTG difraktogramů dokazuje skutečnost, že po 28 dnech zrání cementových kompozitů s částečnou substitu-

cí pojiva nedochází k žádným negativním změnám a jevům během hydratačních reakcí. Všechny nalezené minerály jsou běžné a typicky se vyskytující v cementové matici např. malt a betonů.

Další metodou, která hraje významnou roli v problematice popisu mikrostruktury cementových kompozitů, je elektronová rastrovací mikroskopie. Elektronová mikroskopie umožňuje sledovat mikrostrukturu analyzovaných materiálů při zvětšení a rozlišení, jež se vymyká možností optického mikroskopu. Monitorování mikrostruktury probíhalo po 28 dnech zrání v režimu sekundárních elektronů s dosa-



Literatura:

- [1] *Matoušek J.*: Anorganické nekovové materiály, VŠCHT v Praze, 1992
- [2] *Fanderlík I.*: Vlastnosti skel, INFORMATORIUM Praha, 1996
- [3] *Hlaváč J.*: Základy technologie silikátů, SNTL Praha, 1988
- [4] *Brandštetl J., Šauman Z.*: Teorie struktury stavebních látek, Ediční středisko VUT Brno, 1979
- [5] *Bodnárová L.*: Kompozitní materiály ve stavebnictví, Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., Brno, 2002
- [6] www.vscht.cz/sil/sem/gallery.html
- [7] *Corinaldesi V., Gnappi G., Moriconi G., Montenero A.*: Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars. Waste Management 25 (2005) pp. 197–201
- [8] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 1st ed., 1993, reprint 1995, Int. Org. for Standardization (Geneva, Switzerland)
- [9] *Meyer C., Baxter S.*: Use of recycled glass and fly ash for precast concrete, Final Report to New York State Energy Research and Development Authority, Rep. 98–18, Albany, NY, Oct. 1998
- [10] www.concrete-decor.net
- [11] *Figg J. W.*: Reaction between cement and artificial glass in concrete, Proc. 5th Int. Conf. on AAR in concrete, Cape Town, South Africa, 1981, paper S252/7
- [12] THE WASTE AND RESOURCES ACTION PROGRAMME. Recycled glass market study and standard review – 2003 update, WRAP, 2003 (available for download from www.wrap.org.uk/publications/RecycledGlassMarketStudyStandards2003.pdf).

žitelnou rozlišovací schopností 9 nm, při zvětšeních 400, 1000 a 2000x, popř. doplňkových 3000x apod.

Cílem této studie bylo exaktně posoudit a prokázat, zda se jemně mletý skelný recyklát aktivně uplatní jakožto substituent pojiva v cementových kompozitech při hydratačních procesech, jež jsou základem tvorby minerálů cementové matrice, či poslouží pouze jako plnivová složka (jemné podíly). Chemickým rozbohem bylo stanoveno množství oxidů charakteristických pro sklo. Základním předpokladem pucolanity je přítomnost aktivního SiO₂ v amorfni formě, jako je tomu např. u popílků. Skelný recyklát se vykazuje vysokým obsahem tohoto oxidu, čímž je tedy splněn základní předpoklad pro jeho pucolánové vlastnosti.

Na základě provedených rešerší a stávajících poznatků v oblasti použití skla v cementových kompozitech byla provedena předúprava skelného recyklátu ve vibračním mlýně, následně byly vytříděny zájmové frakce, jejichž distribuce včetně velikosti částic byla stanovena na přístroji Mastersizer 2000E. Pucolánová aktivita, jež je podstatnou informací o tom, zda je daná látka schopná reagovat a účastnit se reakčních pochodů vedoucích ke zkompatnění struktury, byla stanovena metodou Chappelle test. S přihlédnutím k dosaženým výsledkům

a porovnání s hodnotami jiných pucolánových materiálů se lze domnívat, že skelný recyklát vykazuje jisté pucolánové schopnosti, v některých případech se dokonce vykazuje vyšší mírou pucolánové aktivity než popílek nebo mikrosilika.

ZÁVĚR

Tři frakce skloviny (tj. S1, S2 a S3), jež byly podrobeny uvedeným analýzám, byly aplikovány jakožto částečná náhrada cementu, a to v dávkách 5, 25 a 40 %. Nejprve byly stanoveny pevnostní parametry po 28 dnech zrání zkušebních těles dle ČSN EN 196-1, jimiž bylo jednoznačně prokázáno následující:

Substituce pojiva cementových kompozitů jemně mletým skelným prachem se jeví jako výhodná zejména při dávce 5 % a to o velikosti frakce 0 až 45 μm. Jakožto nejméně vhodné se jeví receptury S2/40, S3/25 a S3/40.

Dále je patrné, že s přidávkou skelného recyklátu dochází k větším rozptylům hodnot v případě pevnosti v tlaku, než je tomu u pevnosti v tahu za ohybu. Tato skutečnost se projevila zejména u pevnostních charakteristik receptur vyrobených s použitím recyklované skloviny frakce 63 až 100 μm (S3).

V oblasti studia mineralogické kompozice cementové matrice RTG analýzou nebyly zjištěny žádné výrazné odchylky

od složení běžných cementových kompozitů (receptura REF). Vizualní posouzení mikrostruktury cementové matrice bylo provedeno REM analýzou, přičemž bylo prokázáno (obr. 7 až 10), že částice skla se uplatňují spíše jako plnivo, pouze v případě receptury S2/40 (obr. 9b) byl zjištěn výskyt pravděpodobně zreagované částice skla. S přihlédnutím k výsledkům pevnosti betonu v kombinaci s Chappelle testem lze usuzovat na jisté pucolánové vlastnosti mletých odpadních skel, což je evidentní z provedeného porovnání s některými druhy běžně používaných příměsí, jako jsou např. hnědouhelné a černouhelné popílků či některé druhy mikrosiliky.

Příspěvek byl vytvořen v rámci výzkumného záměru MSM 0021630511 „Progresivní stavební materiály s využitím druhotných surovin a jejich vliv na životnost konstrukcí“ a za finanční podpory společnosti EKO-KOM, a. s., v rámci projektu HS 12835147 „Ověření možnosti alternativního využití skla pocházejícího z odděleného sběru obcí“.

Ing. Pavla Matulová
e-mail: matulova.p@fce.vutbr.cz
tel.: 541 147 511

Ing. Tomáš Melichar
e-mail: melichar.t@fce.vutbr.cz
tel.: 541 147 463

Ing. Jan Píkrýl
e-mail: pikryl.j@fce.vutbr.cz
tel.: 541 147 468

všichni: VUT v Brně
Fakulta stavební, ÚTHD
Veveří 95, 602 00 Brno
www.fce.vutbr.cz/thd

Obr. 7 Mikrostruktura referenčního vzorku zvětšená: a) 400x, b) 1000x, c) 2000x
Fig. 7 Microstructure of reference sample, enhanced: a) 400x, b) 1000x, c) 2000x

Obr. 8 Mikrostruktura vzorku S1/40 zvětšená: a) 400x, b) 1000x, c) 2000x
Fig. 8 Microstructure of S1/40 sample, enhanced: a) 400x, b) 1000x, c) 2000x

Obr. 9 Mikrostruktura vzorku S2/40 zvětšená: a) 390x, b) 1000x, c) 2000x
Fig. 9 Microstructure of S2/40 sample, enhanced: a) 390x, b) 1000x, c) 2000x

Obr. 10 Mikrostruktura vzorku S3/40 zvětšená: a) 390x, b) 1000x, c) 2000x
Fig. 10 Microstructure of S3/40 sample, enhanced: a) 390x, b) 1000x, c) 2000x