

STUDIUM VLIVU JEMNOZRNNÝCH PŘÍMĚSÍ Z ALTERNATIVNÍCH ZDROJŮ NA FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ PARAMETRY HSC

IMPACT STUDY OF FINE-GRAINED ADDITIVES FROM ALTERNATIVE RAW MATERIALS SOURCES FOR HSC PHYSICO-MECHANICAL PARAMETERS

Tomáš Melichar, David Procházka

Přestože v současnosti existují ucelené a poměrně propracované recyklační technologie pro nejrůznější typy odpadů, stále převládá obava následných možných zpracovatelů z využití těchto „potenciálních alternativních surovinových zdrojů“. V případě, kdy se však jedná o inertní materiál s případnými pucolánovými vlastnostmi, lze uvažovat o jeho využití ve formě jemnozrnného plniva vysokopevnostních betonů (dále jen HSC), čímž by bylo možné částečně či zcela nahradit materiály běžně používané pro tento účel. Příkladem často používaných příměsí o vysokém měrném povrchu pro HSC je např. mikrosilika či metakolin. Při využití alternativních zdrojů příměsí by bylo tedy docíleno především konsumpcí odpadů, které by jinak zatěžovaly životní prostředí deponací na skládkách, a snížení ekonomické náročnosti výroby daného typu HSC. Intencí výzkumu prezentovaného v tomto článku byl návrh receptury HSC s obsahem jemnozrnných příměsí z alternativních zdrojů a následné stanovení a studium fyzikálně-mechanických parametrů. V této první fázi byly analyzovány základní parametry charakteristické pro HSC, a to v časovém horizontu do stáří 28 dní v souladu s postupy a požadavky definovanými v příslušných technických normách souvisejících s danou problematikou. Rovněž je provedeno srovnání s běžně používanými typy příměsí. ■ The main intention of the research presented in this article was primarily design of HSC formulas, containing fine-grained additives from alternative sources and the subsequent identification and study of physico-mechanical parameters. During this first phase only the basic parameters characteristic of HSC at an early time period were analyzed, i.e. till the age of 28 days in accordance with the procedures and requirements defined in the European standards related to this issue. Also comparison with commonly used types of additives is carried out and discussed.

PŘÍMĚSÍ

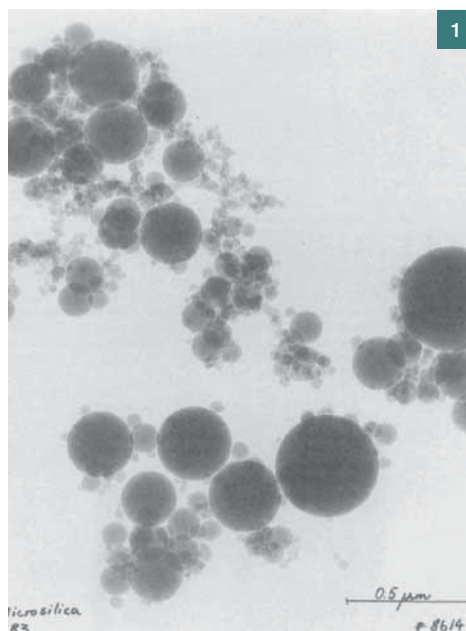
Dle ČSN EN 206-1 je příměs definována jako práškovitý materiál, který se přidává do betonu za účelem zlepšení vlastností nebo k docílení speciálních vlastností betonu, přičemž lze rozlišit dva základní druhy: téměř inertní příměsí (druh I) a pucolány nebo latentní hydraulické příměsí (druh II). Ke zlepšení parametrů betonu a konkrétně HSC jsou běžně mimo jiné používány plastifikátory resp. superplastifikátory a příměsí druhu II. Dochází k ovlivnění jak vlastností čerstvého betonu, tak finálních charakteristik ztvrdlého betonu. V praxi jsou využívány zejména vysokoteplotní popílky, vysokopecní strusky, mikrosilika a metakolin. Přestože se v případě vysokopecní strusky a mikrosiliky původně jednalo o vedlejší produkty výroby, dnes tyto příměsí zaujímají své nezastupitelné místo nejen při výrobě HSC.

Mikrosilika byla poprvé zkoušena v betonu začátkem 50. let v Norsku, kdy její aplikace ukázala zlepšení jeho pevností a síranové odolnosti. Nicméně jejímu použití bránila absence vhodné technologie pro zachycení ultrajemných částic. Začátkem 70. let však norská vláda zavedla přísné požadavky pro ochranu životního prostředí, na což musel hutnický průmysl reagovat zlepšením v technologii filtrace spalin. Několik málo let poté již byla mikrosilika dostupná v dostatečném množství.

Mikrosilika neboli křemičité odprašky vznikají jako vedlejší produkt při výrobě křemíku, ferrosilicia a dalších slitin křemíku. Jedná se o velmi jemný šedý (někdy šedobílý či černošedý) prášek složený především z amorfního oxidu křemičitého. Obsah SiO_2 se zpravidla pohybuje v rozmezí 80 až 98 %. Při výrobě ferrosilicia jsou přítomny často i jiné prvky, především železo. Částice jsou sférické, vyznačují se průměrem nejčastěji okolo 0,15 μm , přičemž často tvoří shluky.

Mikrosilika v betonu zlepšuje jeho reologické vlastnosti. Při dávkování 10 % z množství cementu připadá na jedno zrno cementu přibližně 50 000 až 100 000 mikrosfér. Zrna cementu jsou tedy obklopena zrny mikrosiliky, což má za následek zvýšení vnitřních povrchových sil a následné zvýšení koheze betonu. Na druhou stranu to ale také znamená, že je beton poněkud tužší při ukládání, což je ovšem vyvažováno zvýšením hodnoty sednutí. Mikrosilika v betonu totiž díky kohezivním silám sníží hodnotu sednutí kužele v porovnání se směsí bez mikrosiliky. To je také důvod, proč by měla být mikrosilika používána společně s plastifikátory nebo superplastifikátory. Pokud je ovšem betonové směsi s mikrosilikou dodána energie, jako při čerpání, vibraci, dusání nebo hlazení, působí kulovité částice jako kuličková ložiska a dojde k celkovému zlepšení pohyblivosti betonové směsi. Tento efekt důkladně popsali Wallevik a Gjorv. Na zpracovatelnost má ovšem vliv i velký měrný povrch, který zvyšuje potřebu záměsové vody.

Mikrosilika se řadí mezi pucolány reaguje chemicky s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a vytváří dostatek C-S-H. Důsledkem je vyšší pevnost a chemická odolnost. C-S-H má vyšší korozní odolnost než $\text{Ca}(\text{OH})_2$. 18 % mikrosiliky je teoreticky dostatečné pro reakci s hydroxidem vápenatým v průběhu hydratace cementu, více než 25 % postačuje pro zhuštění struktury cementového tmelu, [1], [2], [3].



Obr. 1 TEM – fotografie jednotlivých částic mikrosiliky [4] ■ Fig. 1 TEM – picture of separate microsilica particles [4]

Metakaolin (dále v textu jen MK) vzniká kalcinací kaolínu či kaolinitického jílu při teplotách 600 až 800 °C. Podstatný je především fakt, že se nejedná o vedlejší produkt, nýbrž je cíleně vyráběn. Jeho bílá barva beton zesvětluje. MK také reaguje s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a tvoří hydratační produkty, které tak nahrazují slabý, snadno rozpustný $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a zvyšují trvanlivost betonu. Tvorba hydratačních produktů CSH a C_2ASH_8 později zlepšuje kvalitu mikrostruktury betonu. Specifický povrch se pohybuje v intervalu 2 000 až 20 000 $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$. U vysoko reaktivního metakaolinu, vhodného pro HSC, je pochopitelně vyšší.

MK může částečně ovlivnit reologii potlačením odměšování a segregace. Vytváří stabilnější chemickou strukturu cementové pasty a snižuje velikost pórů (0,01 až 0,2 μm). Dále snižuje počáteční a konečnou dobu tuhnutí. MK rovněž snižuje propustnost kapalin, čímž zvyšuje odolnost vůči průniku chloridů. Přídavek MK (v dávce 20 až 25 % – vztaženo na cement) společně s redukcí w (vodního součinitele) a užitím superplastifikátorů zvyšuje pevnost zesílením vazby mezi kamenivem a pastou. MK lze použít i v kombinaci s PP, skleněnými, celulóзовými a ocelovými vlákny. Obvykle doporučovaná dávka je 10 % z hmotnosti cementu [1].

ALTERNATIVNÍ ZDROJE JEMNOZRNNÝCH PŘÍMĚSÍ

S ohledem na aktuální stav životního prostředí a s tím souvisejícího odpadového hospodářství jsou stále hledány alternativní zdroje a způsoby výroby případně modifikace složení nejrůznějších materiálů. Vzhledem k tomu, že beton zaujímá dominantní pozici mezi všemi dostupnými a běžně užívanými stavebními materiály, skýtá tato oblast širokou škálu možností, jak s výhodou zužitkovat některé odpadní látky. Jednou z nich je v současnosti i recyklované sklo obrazovek, které prozatím nenalézá širšího uplatnění. Důvodem je především obsah těžkých kovů, které se vyznačují toxickými účinky na živé organismy. Konkrétně se jedná o olovo, baryum a stroncium. Lze však předpokládat, že při vhodně navrženém složení receptury HSC, který se v konečném důsledku bude vyznačovat minimálním obsahem pórů a vysokou odolností vůči nejrůznějším externím vlivům, dojde k imobilizaci těchto těžkých kovů v cementové matici.

UPLATNĚNÍ JEMNĚ MLETÉHO SKLA V CEMENTOVÉ MATRICI

V případě velmi jemně mletého skla je možné předpokládat jednak jeho uplatnění v matici cementových kompozitů obecně jako mikroplniva a dále také jako pucolánu. Při uvážení prakticky nulové pórovitosti skla se jedná o nenasákový materiál, a tudíž při přípravě čerstvého betonu je možné předpokládat, že nebude třeba navyšovat dávku záměsové vody, jako v případě jiných jemnozrnných příměsí.

Pucolány jsou přírodní nebo průmyslové křemičité a hliníto-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 hliníkový, ve zbytku pak oxid železitý a další oxidy. Obsah aktivního oxidu vápenatého je zanedbatelný. Obsah aktivního oxidu křemičitého musí být nejméně 25 % hmotnostních.

Obrazovkové panelové sklo obsahuje zpravidla 50 až 65 % SiO_2 v amorfnní formě. Na základě uvedených skutečností a již prováděných výzkumů v této oblasti lze předpokládat, že jemně mleté sklo se uplatní v cementové matici částečně i jako pucolánový materiál. Při uvážení pořizovací ceny tohoto skla ve srovnání např. s mikrosilikou lze konstatovat, že i při zakalkulování nákladů spojených se zdvojnásobením na požadovanou jemnost nedojde k převýšení finální ceny mikrosiliky cenou jemně mletého skla. Na základě výše uvedeného se tedy jedná o velmi zajímavou možnost.

ALKALICKO-KŘEMIČITÁ REAKCE

Výsledky již provedených výzkumů použití odpadního skla v cementových kompozitech však poukazují na nutnost zabývat se otázkou alkalicko-křemičité reakce (dále v textu jen AKR). Pokud totiž beton obsahuje plnivo s obsahem amorfnního SiO_2 , není v podstatě možné vzhledem k alkáliím obsaženým v cementu AKR zabránit. Je ovšem třeba 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 rozpínavého gelu, a tudíž i k poškození konstrukce. Aby se této škodlivé alkalicko-křemičité reakci předešlo, musí být omezeny alespoň některé z 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. 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. Nicméně některé zdroje uvádějí, že u jemně mletého odpadního skla, pod 75 μm , k tomuto efektu nedochází a trvanlivost malty je zaručena [7]. Dle [8] lze použít i zrna skla o velikosti až do 100 μm . U velmi jemných částic dochází k AKR stejně jako u hrubších zrn, tlak při bobtnání ale vlivem menší velikosti zrn zůstává tak malý, že nevznikne žádné poškození ve formě trhlin. Pokud je tedy skleněný materiál vhodně mletý, může být použit v maltách a betonu jako velmi jemný přídavek bez problémů vztahujících se k alkalicko-křemičité reakci [9].

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 bór, jako je pyrex sklo, jsou z hlediska alkáliového rozpínání více reaktivní než sodno-vápeno-křemičité sklo [10].

POPIS EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ

Pro účely výzkumu předkládané problematiky bylo využito velmi jemně mleté sklo panelů obrazovek a pro porovnání také mikrosilika a metakaolin. Sklo bylo nutné zdvojnásobit v kulovém mlýnu.

Nejprve byly analyzovány všechny tři typy použitých příměsí. Dále se pak jednalo o návrh výchozí receptury pro všechny typy použitých příměsí. Primárně bylo uvažováno využití této receptury jako transportbetonu (HSC) o minimální pevnosti v tlaku na krychlích o hraně 150 mm 90 MPa.

V dalším kroku bylo nutné se soustředit na nalezení optimální dávky skla. Originalita řešení spočívala ve využití ne-

Tab. 1 Chemická složení použitých příměsí, (obsah složek v prázdných polích nebyl v rámci chemického rozboru stanoven) ■

Tab. 1 Chemical composition of mineral additives used

Složka [%]	Vzorek		
	Mikrosilika (MS)	Metakaolin (MK)	Sklo (SK)
SiO ₂	97,41	53,32	57,64
Al ₂ O ₃	0,29	42,54	2,14
Fe ₂ O ₃	0,12	0,63	0,16
BaO	---	---	11,2
CaO	0,22	0,12	1,24
SO ₃	---	0,89	---
MgO	0,38	---	0,65
Na ₂ O	0,07	0,04	8,13
K ₂ O	0,78	0,39	6,8
PbO	---	---	1,99
SrO	---	---	5,45
TiO ₂	---	---	0,28
Li ₂ O	---	---	0,01

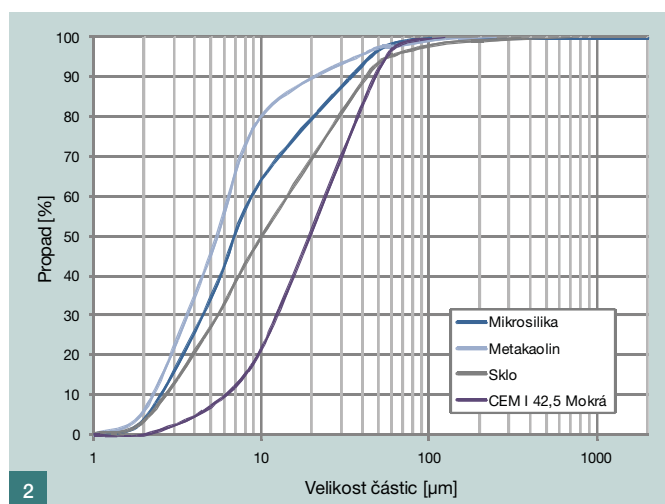
destruktivních metod pro hodnocení základních charakteristik ztvrdlého HSC v čase do stáří 28 dní. Hodnoceny byly: pevnost v tlaku, dynamický a statický modul pružnosti v tlaku nedestruktivně, Schmidtovými tvrdoměry (typ L a N) a ultrazvukovou impulzovou metodou (dále jen UZ).

ANALÝZA POUŽITÝCH PŘÍMĚSÍ

Před přistoupením k návrhu receptur a experimentálním stanovením bylo třeba analyzovat použité příměsi. Z hlediska použití v cementové matici HSC byla pozornost zaměřena na chemické složení (silikátový rozbor), stanovení velikosti částic (na principu laserové difrakce) a pucolánovou aktivitu (Chapelle test). Chemické složení použitých příměsí uvádí tab. 1.

Z výsledků chemické analýzy je patrné, že obrazkovové sklo (stířítkové) se vyznačuje téměř srovnatelným množstvím SiO₂ jako metakaolin, což je pro spolupůsobení v cementové matici jedním z podstatných kritérií. Dále je z tab. 1 zřejmé, že analyzované částice skla se vyznačují zvýšeným množstvím alkálií, čemuž bude třeba věnovat pozornost v rámci zkoumání zrnitosti této alternativní příměsi.

Obr. 1 uvádí křivky zrnitosti analyzovaných surovin. Tyto byly stanoveny s využitím přístroje pracujícího na principu laserové difrakce. Pro srovnání je v grafu uvedeno i granulometrické složení částic cementu (CEM 42,5 Mokrý), ja-



2

Tab. 2 Výsledky stanovení pucolánové aktivity – Chapelle test

■ Tab. 2 Results of pozzolan activity measurement – Chapelle test

Označení vzorku	Měrný povrch [m ² kg ⁻¹]	Objemová hmotnost [kgm ⁻³]	Míra pucolánové aktivity ¹ mgCa(OH) ₂ [g ⁻¹]
Mikrosilika Norsko	22 000	2 800	278
Mikrosilika Chryso	23 000	2 100	429
Mikrosilika AVAS	27 000	2 150	999
Mikrosilika Degussa	23 000	2 170	337
Metakaolin	25 000	2 430	921
Popílek Chvaletice	287	2 250	344
Popílek Chvaletice – mletý	439	2 250	703
Mikrosilika	18 100	2 200	623
Metakaolin	23 050	2 310	615
Sklo	4 680	2 750	394

¹ Míra pucolánové aktivity metodou Chapelle test – metoda slouží pro určení relativní schopnosti pucolánů 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.

kožto pojivové složky cementové matrice HSC vyrobeného v rámci experimentů.

Z vyhodnocení velikosti částic plyne, že použitá mikrosilika se vyznačuje obsahem zrn větších rozměrů v porovnání s metakaolinem, přesto však lze konstatovat, že se jedná o jemnější práškovitý materiál než v případě cementu. Rovněž sklo se v porovnání s cementem vyznačuje přítomností mnohem menších částic. Podstatné je především, aby sklo obsahovalo zrna maximálně do velikosti 100 µm, čehož bylo dosaženo.

Stanovení pucolánové aktivity příměsí probíhalo v souladu s interní metodikou VÚSTAH, a. s., a dle francouzské podnikové normy pro výrobu metakolinů, takzvané Chapelle test (tab. 2). V rámci analýz byly zkoumány tři příměsi, které jsou v tabulce zvýrazněny tmavým podkladem. Ostatní výsledky jsou citovány z [6], jmenovitě se jednalo o čtyři druhy mikrosiliky (prášková mikrosilika od firmy Chryso – ChrysoSilica, prášková mikrosilika od firmy AVAS, prášková mikrosilika od firmy Degussa, prášková mikrosilika od norského výrobce a mikrosilika vyráběná jako vodní suspenze 1 : 1 od firmy Degussa), popílek, který byl použit v původní a mleté podobě (hnědouchelný popílek Chvaletice původní od výrobce a mletý na kulovém mlýnu po dobu 2 h), a jeden druh metakaolinu z produkce Českých lupkových závodů.

Sklo, které bylo podrobena mletí v kulovém mlýnu po dobu

Obr. 2 Porovnání výsledků granulometrické analýzy příměsí a cementu ■ Fig. 2 Comparison of mineral additives and cement grain size analysis results

Obr. 3 Časový vývoj pevnosti betonu v tlaku stanovený destruktivně, SK – HSC s příměsí obrazkovového skla, MK – HSC s příměsí metakaolinu, MS – HSC s příměsí mikrosiliky ■ Fig. 3 Compressive strength of concrete (measured destructively) development in time

Obr. 4 Časový vývoj relativní pevnosti betonu v tlaku stanovené destruktivně ■ Fig. 4 Development of relative compressive strength of concrete (measured destructively) in time

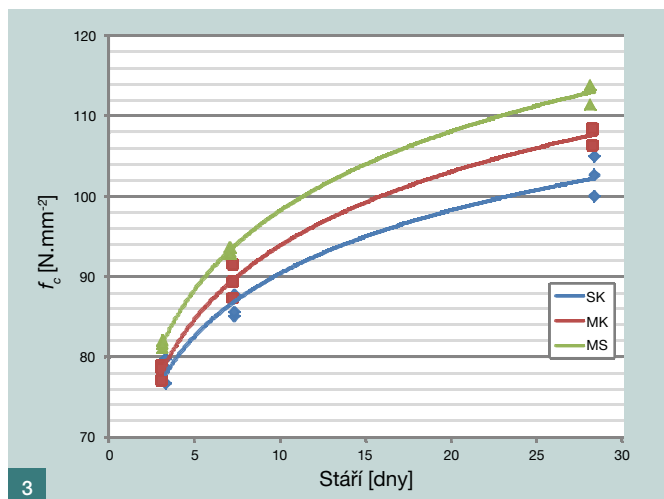
Tab. 3 Návrh receptur HSC s různými typy příměsí ■ Tab. 3 HSC with various types of additives – design of batches

Specifikace složky	Receptura – dávka jednotlivých složek		
	HSC-MS	HSC-MK	HSC-SK
Cement CEM I 42,5 R [kgm ⁻³]	450	450	450
0 – 4 mm Žabčice [kgm ⁻³]	898	903	903
4 – 8 mm Olbramovice [kgm ⁻³]	353	355	355
8 – 16 mm Olbramovice [kgm ⁻³]	489	492	492
Mikrosilika [kgm ⁻³]	45	0	0
Metakaolin [kgm ⁻³]	0	45	0
Sklo [kgm ⁻³]	0	0	45
Superplastifikátor	4,5	4,5	4,5
Voda [lm ⁻³]	147	149	140
w _b [-]	0,3	0,31	0,29

4 h, se vyznačuje v porovnání s ostatními příměsmi velmi rozdílným měrným povrchem, tj. několikanásobně nižším, vyšší měrnou hmotností, avšak relativně srovnatelnou pucolánovou aktivitou. Dle průzkumu dostupných technologií mletí by bylo možné v současnosti využít ještě propracovanější technologie vysokorychlostního mletí, kterým by bylo možné docílit mnohem vyšší jemnosti mletí a pravděpodobně i vyšší míry pucolánové aktivity. Z hlediska pucolánové aktivity je patrné (tab. 2), že analyzované obrazovkové sklo v tomto ohledu předčí i některé popílky a druhy mikrosiliky.

NÁVRH A VÝBĚR RECEPTUR

Pro účely výzkumu bylo navrženo několik receptur, na nichž byly stanoveny pouze destruktivně pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání ve vlhkém uložení. Na základě vyhodnocení byly vybrány optimální receptury tak, aby se jednalo ve výsledku o srovnatelné betony z hlediska parametrů čerstvého betonu a následně bylo možné objektivně posoudit a porovnat základní fyzikálně-mechanické a chemické parametry. Byly uvažovány různé dávky skla, a to 10, 15, 20 a 25 %, přičemž bylo experimentálně zjištěno, že jako optimální dávka se jeví 10 % skla (vztaženo na množství cementu). V tab. 3 je uvedeno složení receptur, z nichž byla zhotovena zkušební tělesa pro stanovení základních pevnostních a elastických vlastností destruktivními i nedestruktivními technikami.



Při návrhu a přípravě receptur bylo dbáno na to, aby se receptury vyznačovaly konzistencí, která charakterizuje dostatečnou zpracovatelnost betonu, např. při čerpání do monolitických konstrukcí. U ČB receptur MK a MS bylo dosaženo konzistence sednutí kužele S3 a SK pak S4, která je běžně užívaná pro transportbetony.

VÝSLEDKY A DISKUZE

Záměrem výzkumu prezentovaného v článku byl návrh receptur HSC s obsahem příměsí z alternativních zdrojů a následné porovnání výsledků s parametry receptur běžně užívaných pro výrobu HSC. Pro tyto účely byla vyrobena zkušební tělesa ve tvaru krychlí o hraně 150 mm. Pozornost byla soustředěna na stanovení pevnosti betonu v tlaku destruktivně a nedestruktivně (Schmidtovými tvrdoměry typu L a N), statického modulu pružnosti destruktivně a dynamického modulu pružnosti nedestruktivní UZ metodou.

V grafech na obr. 3 až 11 jsou zobrazeny průběhy sledovaných parametrů v časových intervalech 3, 7 a 28 dní. Z tvaru křivek sledovaných parametrů jsou odvozeny pomocí regresní analýzy rovnice vyjadřující jejich průběh v čase včetně korelačních koeficientů charakterizujících míru závislosti daných veličin. Hodnota korelačního koeficientu R je podstatná především u rovnic charakterizujících predikční a kalibrační vztahy, přičemž je uvažováno minimální kritérium $R \geq 0,85$.

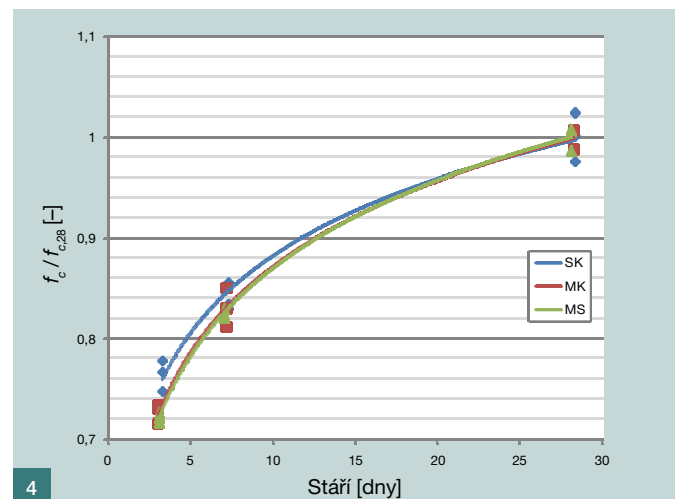
Vývoj pevnosti betonu v tlaku do stáří 28 dní je patrný z grafu na obr. 3. Nejvyšších pevností bylo dosaženo dle očekávání u receptury MS a nejnižších v případě SK. Rozdíl mezi pevnostmi betonů SK a MS v tlaku činí 8,9 %. Závislost pevnosti betonu v tlaku na čase nejlépe vystihuje logaritmická funkce, a to pro všechny tři receptury, rovnice (1) až (3). Všechny tři rovnice se vyznačují vysokými korelačními koeficienty, a tudíž charakterizují zkoumané závislosti velmi přesně. Je třeba brát také v úvahu interval hodnot, se kterými bylo kalkulováno, tj. cca 78 až 113 Nmm⁻².

$$\text{SK: } f_{c,t} = 11,32 \ln(t) + 64,35 \text{ [N.mm}^{-2}\text{]} \quad R = 0,987 \quad (1)$$

$$\text{MK: } f_{c,t} = 13,26 \ln(t) + 63,33 \text{ [N.mm}^{-2}\text{]} \quad R = 0,995 \quad (2)$$

$$\text{MS: } f_{c,t} = 14,23 \ln(t) + 65,47 \text{ [N.mm}^{-2}\text{]} \quad R = 0,998 \quad (3)$$

Pro možnost predikce 28denních pevností betonu v tlaku byly odvozeny rovnice (4) až (6). Nejprve byla stanovena relativní pevnost betonu v tlaku (bezrozměrné číslo), která udává poměr mezi pevností betonu v daném čase (tj. v tomto pří-



padě 3 a 7 dní) a pevností betonu po 28 dnech zrání. Z těchto rovnic byly početně vyjádřeny predikční vztahy (7) až (9). Všechny tři závislosti nejlépe vystihuje logaritmická funkce, přičemž koeficienty korelace lze charakterizovat jako velmi vysoké. Z uvedených průběhů na obr. 4 je zřetelně pozorovatelná podobnost pro všechny tři receptury s nepatrnou odchylkou SK v rané fázi zrání betonu, což vypovídá o obdobném procentuálním nárůstu pevnosti betonu v tlaku v čase. Receptura SK se vyznačuje v časovém období 3 až 10 dní poněkud výraznějším nárůstem pevností.

$$\text{SK: } f_{c,t}/f_{c,28} = 0,110 \ln(t) + 0,627 \quad [-] \quad R = 0,987 \quad (4)$$

$$\text{MK: } f_{c,t}/f_{c,28} = 0,123 \ln(t) + 0,588 \quad [-] \quad R = 0,995 \quad (5)$$

$$\text{MS: } f_{c,t}/f_{c,28} = 0,126 \ln(t) + 0,579 \quad [-] \quad R = 0,998 \quad (6)$$

Uvedené závislosti a výpočty platí pouze pro receptury SK, MK a MS, při použití uvedených složek, receptury a normového postupu přípravy čerstvého betonu.

$$\text{SK: } f_{c,28} = \frac{f_{c,t}}{0,110 \cdot \ln(t) + 0,627} \quad [\text{N.mm}^{-2}] \quad (7)$$

$$\text{MK: } f_{c,28} = \frac{f_{c,t}}{0,123 \cdot \ln(t) + 0,588} \quad [\text{N.mm}^{-2}] \quad (8)$$

$$\text{MS: } f_{c,28} = \frac{f_{c,t}}{0,126 \cdot \ln(t) + 0,579} \quad [\text{N.mm}^{-2}] \quad (9)$$

V dalších dvou grafech jsou znázorněny průběhy odrazů stanovených Schmidtovými tvrdoměry typu N a L v čase. Tyto jsou zde uvedeny pro srovnání s vývojem pevnosti betonu v tlaku (obr. 3). Výsledné průběhy poukazují (z hlediska vizuálního posouzení) na výrazné rozdíly zejména v případě závislosti odrazů (zjištěných Schmidtovým tvrdoměrem typu N).

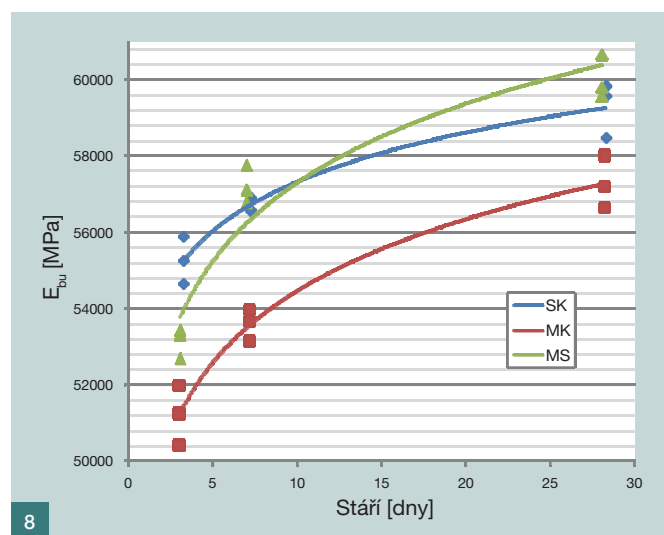
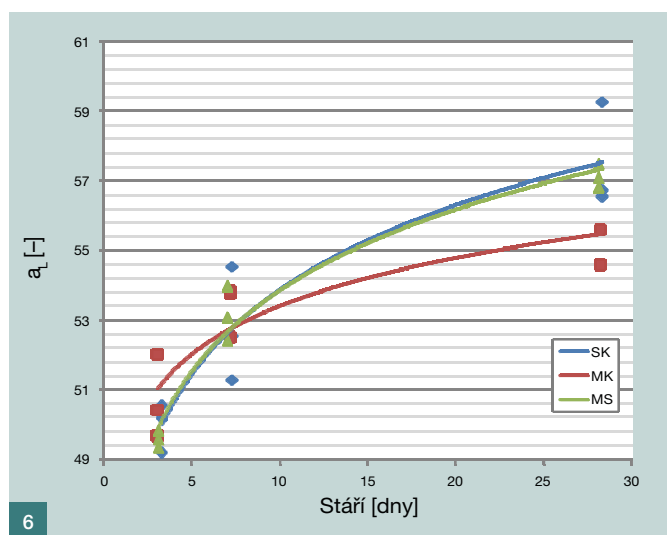
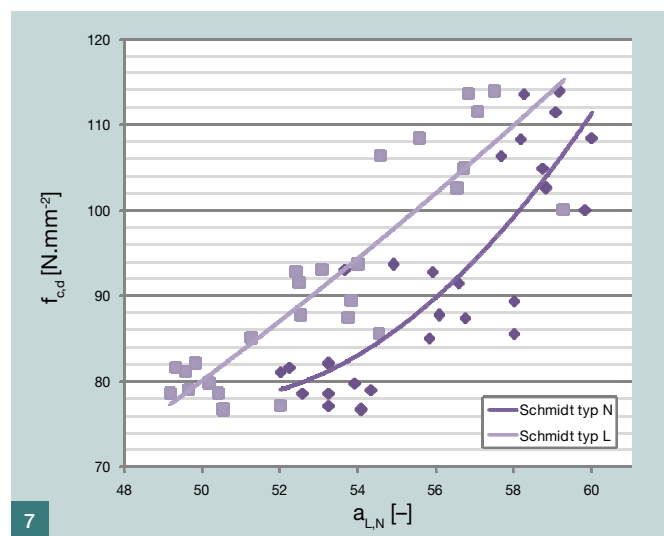
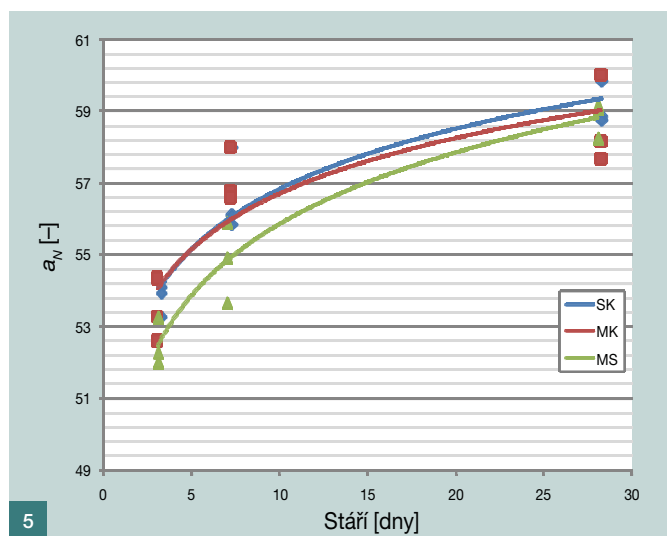
Rovnice (10), (11) a (12) vyjadřují závislosti stanovených odrazů na čase do stáří 28 dní. Pro všechny receptury byly při uvážení korelačního koeficientu jakožto nejvhodnější vybrány logaritmické závislosti, a to jak v případě a_N , tak pro a_L .

$$\text{SK: } a_N = 2,432 \ln(t) + 51,22 \quad [-] \quad R = 0,940 \quad (10)$$

$$\text{MK: } a_N = 2,231 \ln(t) + 51,58 \quad [-] \quad R = 0,875 \quad (11)$$

$$\text{MS: } a_N = 2,870 \ln(t) + 49,25 \quad [-] \quad R = 0,970 \quad (12)$$

Graf na obr. 6 poukazuje na již podobnější průběhy křivek, než tomu bylo v případě a_N . Výjimkou je pouze metakaolin, kde je nárůst hodnot a_L poněkud pozvolnější. Tyto podobnosti resp. rozdíly se nejvíce projeví na výsledných kalibračních vztazích (obr. 7). Průběhy křivek charakterizujících vývoj a_L v čase nejlépe vystihují logaritmické závislosti s poměrně vysokými hodnotami korelačních koeficientů.



$$\text{SK: } a_L = 3,502 \ln(t) + 45,81 [-] \quad R = 0,942 \quad (13)$$

$$\text{MK: } a_L = 1,985 \ln(t) + 48,84 [-] \quad R = 0,909 \quad (14)$$

$$\text{MS: } a_L = 3,363 \ln(t) + 46,10 [-] \quad R = 0,984 \quad (15)$$

Na obr. 7 jsou znázorněny kalibrační křivky pro hodnoty pevností betonu v tlaku zjištěné oběma použitými typy Schmidtova tvrdoměru, tj. L a N. Vzhledem k potřebě vyššího počtu hodnot pro odvození těchto vztahů, resp. početního vyjádření křivek byly sloučeny všechny naměřené hodnoty do dvou souborů dat. Bylo tedy uvažováno pouze s faktem, že hodnoty odrazů byly zjištěny na HSC a zanedbána skutečnost, že tyto HSC byly vyrobeny s několika různými typy jemnozrnných příměsí. Z korelačních koeficientů odvozených kalibračních vztahů plyne, že Schmidův tvrdoměr typu N je pro nedestruktivní posouzení pevnosti HSC v tlaku méně vhodný než typ L. Hodnota $R = 0,841$ charakterizuje vztah, který je v praxi nevyužitelný. Naopak Schmidův tvrdoměr typu L se jeví pro hodnocení pevnosti HSC v tlaku jako vhodný a využitelný v běžné praxi a je charakterizován mocninnou závislostí, rovnice (17).

$$\text{N: } f_c = 0,336 a_N^2 - 33,63 a_N + 918,1 \text{ [Nmm}^{-2}] \quad R = 0,841 \quad (16)$$

$$\text{L: } f_c = 0,018 a_N^{2,134} \text{ [Nmm}^{-2}] \quad R = 0,881 \quad (17)$$

Pro posuzování vlastností betonu resp. HSC je podstatné znát charakteristiky pružnosti. V rámci studia vlastností zkoumaných HSC byl dále tedy stanoven vývoj statického a dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku do stáří 28 dní. Tyto materiálové charakteristiky jsou důležité především pro návrh betonových konstrukcí z hlediska mezních stavů.

Z průběhů E_{bu} (obr. 8), tedy dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku je patrné, že v počátečním stádiu zrání se nejvyšší křehkostí vyznačuje receptura SK, což se však v průběhu procesu zrání mění a po 28 dnech dosahuje nejvyšší křehkosti receptura MS a nejnižší MK. Přestože sklo je obecně považováno za velmi křehký materiál, nemá v tomto případě jako příměs v HSC vliv na tento parametr.

Pro všechny tři receptury byla jako nejvhodnější shledána logaritmická závislost, která nejlépe vystihuje vývoj E_{bu} v čase. Korelační koeficienty dosahují vysokých hodnot, a tudíž lze tvrdit, že odvozené rovnice popisují dané závislosti velmi přesně.

$$\text{SK: } E_{bu} = 1878 \ln(t) + 52988 \text{ [MPa]} \quad R = 0,965 \quad (18)$$

$$\text{MK: } E_{bu} = 2720 \ln(t) + 48188 \text{ [MPa]} \quad R = 0,978 \quad (19)$$

$$\text{MS: } E_{bu} = 2991 \ln(t) + 50389 \text{ [MPa]} \quad R = 0,958 \quad (20)$$

Dále byly v rámci výzkumu vyjádřeny průběhy relativních E_{bu} v čase, aby bylo možné odvodit predikční rovnice této materiálové charakteristiky stejně jako v případě pevnosti betonu v tlaku (obr. 9). Z průběhů relativních E_{bu} v čase je patrné, že porovnáním s relativní pevností betonu v tlaku (obr. 4) dochází k výraznějším rozdílům mezi jednotlivými recepturami. Ovšem stejně jako u relativní pevnosti betonu v tlaku i pro relativní E_{bu} platí, že receptura SK je charakterizována vyšším počátečním nárůstem, kdežto receptury MS a MK se vyznačují pomalejším náběhem E_{bu} . Ve stáří 28

dní jsou pak hodnoty všech tří receptur téměř srovnány. Pro recepturu SK byla jako nejlépe vystihující tuto závislost vybrána mocninná a pro ostatní logaritmická funkce. Korelační koeficienty dosahují relativně vysokých hodnot, z čehož plyne, že odvozené rovnice popisují dané průběhy velmi přesně a je možné je pro daný typ HSC využít i v praxi pro hodnocení této charakteristiky.

$$\text{SK: } E_{bu}/E_{bu,28} = 0,889 t^{0,035} [-] \quad R = 0,979 \quad (21)$$

$$\text{MK: } E_{bu}/E_{bu,28} = 0,047 \ln(t) + 0,841 [-] \quad R = 0,978 \quad (22)$$

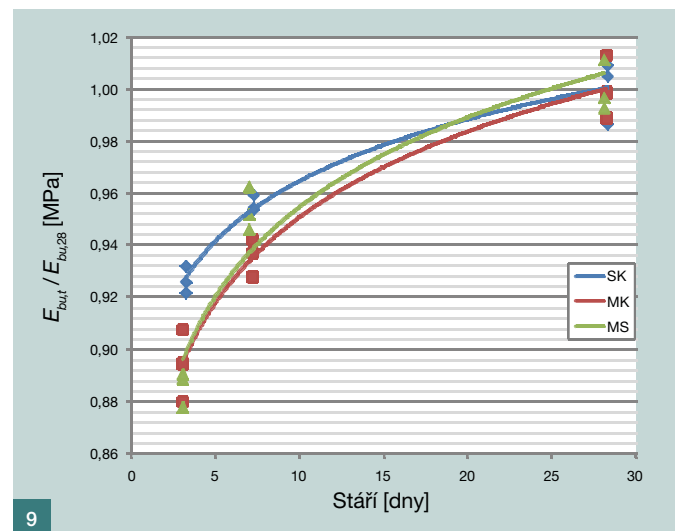
$$\text{MS: } E_{bu}/E_{bu,28} = 0,049 \ln(t) + 0,839 [-] \quad R = 0,958 \quad (23)$$

$$\text{SK: } E_{bu,28} = \frac{E_{bu,t}}{0,889.t^{0,035}} \text{ [MPa]} \quad (24)$$

$$\text{MK: } E_{bu,28} = \frac{E_{bu,t}}{0,047 \ln(t) + 0,841} \text{ [MPa]} \quad (25)$$

$$\text{MS: } E_{bu,28} = \frac{E_{bu,t}}{0,049 \ln(t) + 0,839} \text{ [MPa]} \quad (26)$$

Z průběhů statického modulu pružnosti v tlaku E_s je patrné (obr. 10), že celkově nejnižšími hodnotami v celém průběhu se vyznačuje receptura SK, vyšší pak receptura MK a nejvyššími hodnotami receptura MS. Přesto, že je sklo obecně považováno za velmi křehký materiál, nebylo opět prokázáno zvýšení modulu pružnosti v tlaku u analyzovaných HSC.



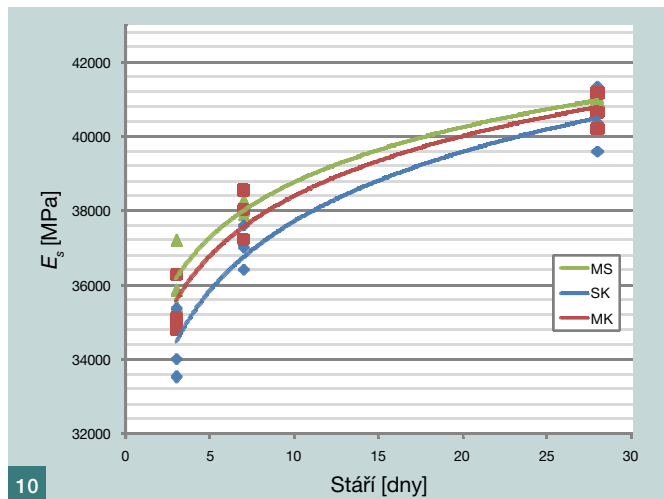
Obr. 5 Vývoj odrazu a_N (Schmidt typ N) v čase ■ Fig. 5 Rebound a_N (Schmidt N type) development in time

Obr. 6 Vývoj odrazu a_L (Schmidt typ L) v čase ■ Fig. 6 Rebound a_L (Schmidt L type) development in time

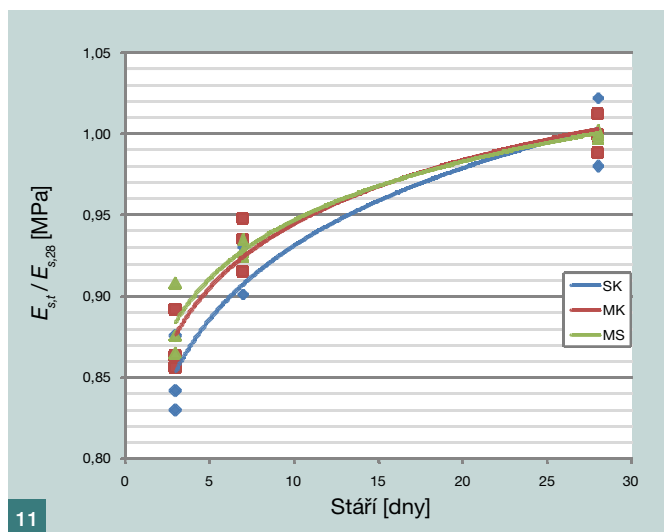
Obr. 7 Závislost odrazů na pevnosti betonu v tlaku – kalibrační křivky ■ Fig. 7 Relation between rebounds and compressive strength of concrete – calibrating curves

Obr. 8 Vývoj dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku v čase ■ Fig. 8 Dynamic modulus of elasticity of concrete in compression development in time

Obr. 9 Vývoj relativního dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku v čase ■ Fig. 9 Development of relative dynamic modulus of elasticity of concrete in compression in time



10



11

Obr. 10 Vývoje statického modulu pružnosti betonu v tlaku v čase
 ■ Fig. 10 Development of static modulus of elasticity of concrete in compression in time

Obr. 11 Vývoje relativního statického modulu pružnosti betonu v tlaku v čase
 ■ Fig. 11 Development of relative static modulus of elasticity of concrete in compression in time

Opět byly odvozeny rovnice vyjadřující vývoj statického modulu pružnosti betonu E_s do stáří 28 dní. Jako nejvhodnější byly shledány závislosti logaritmické, které se vyznačovaly vysokou mírou závislosti, viz. korelační koeficienty – rovnice (27) až (29).

$$\text{SK: } E_s = 2708 \ln(t) + 31\,478 \text{ [MPa]} \quad R = 0,963 \quad (27)$$

$$\text{SK: } E_s = 2323 \ln(t) + 33\,054 \text{ [MPa]} \quad R = 0,963 \quad (28)$$

$$\text{SK: } E_s = 2139 \ln(t) + 33\,851 \text{ [MPa]} \quad R = 0,975 \quad (29)$$

Pro predikci E_s v čase byly vyčísleny relativní hodnoty $E_{s,t}$ a z nich následně odvozeny příslušné rovnice. Z průběhu křivek na obr. 11 lze vyvodit, že jednotlivé receptury se sice vyznačují rozdílnými náběhy hodnot relativního $E_{s,t}$, ovšem ve stáří 28 dní dochází k jejich vyrovnání a všechny tři receptury HSC jsou v tomto ohledu srovnatelné.

Pro predikční závislosti E_s nejlépe vystihovaly průběhy křivek rovnice (30) až (32), kdy pro recepturu SK se jednalo o mocninovou funkci a pro ostatní pak logaritmické funkce. Korelační koeficienty dosahovaly vysokých hodnot a nelze tedy pochybovat o vhodnosti odvozených rovnic.

$$\text{SK: } E_{s,t} / E_{s,28} = 0,788 t^{0,072} \quad R = 0,961 \quad (30)$$

$$\text{MK: } E_{s,t} / E_{s,28} = 0,057 \ln(t) + 0,812 \quad R = 0,964 \quad (31)$$

$$\text{MS: } E_{s,t} / E_{s,28} = 0,052 \ln(t) + 0,826 \quad R = 0,975 \quad (32)$$

Z rovnic (30) až (32) byly jednoduše vyjádřeny predikční vztahy pro výpočet E_s po 28 dnech s použitím hodnot E_s v rané fázi zrání HSC. Výpočet resp. predikční vztahy vyjadřují rovnice (33) až (35).

$$\text{SK: } E_{s,28} = \frac{E_{s,t}}{0,788 \cdot t^{0,072}} \text{ [MPa]} \quad (33)$$

$$\text{MK: } E_{s,28} = \frac{E_{s,t}}{0,057 \cdot \ln(t) + 0,812} \text{ [MPa]} \quad (34)$$

$$\text{MS: } E_{s,28} = \frac{E_{s,t}}{0,052 \cdot \ln(t) + 0,826} \text{ [MPa]} \quad (35)$$

ZÁVĚR

Hlavním cílem uvedeného výzkumu byl návrh, výroba a studium základních fyzikálně-mechanických parametrů HSC s příměsí z alternativních zdrojů včetně porovnání s vybranými běžně užívanými jemnozrnnými příměsmi. Důraz byl také kladen na vývoj sledovaných charakteristik v čase.

Jako alternativní příměs bylo vybráno sklo pocházející z demontovaných obrazovek (stínítková část), které bylo mleté na požadovanou jemnost. V rámci analýz samotných příměsí bylo zjištěno, že lze získat zdrobněním v kulovém mlynu relativně jemný prach skla, který se vyznačuje pucolánovou aktivitou.

Vyrobená zkušební tělesa s příměsí tohoto skla dosahovala po 28 dnech zrání v normových podmínkách průměrně pevnosti v tlaku cca 102 Nmm⁻², s příměsí mikrosiliky 113 Nmm⁻² a metakaolinu 107 Nmm⁻². Nejedná se tedy o výrazné rozdíly a s uvážením ekonomických a environmentálních aspektů lze shledat ve využití jemně mletého skla z obrazovek výhodný alternativní zdroj skýtající vysoký potenciál. Statické moduly pružnosti betonů v tlaku po 28 dnech zrání dosahovaly průměrných hodnot cca 59 GPa (s příměsí skla), 58 GPa (s příměsí metakaolinu) a 60 GPa (s příměsí mikrosiliky).

Pro pevnostní charakteristiky a moduly pružnosti byly odvozeny i predikční rovnice pro výpočet normových hodnot, tedy parametrů stanovených po 28 dnech zrání, s využitím charakteristik zjištěných např. již po třech dnech zrání. Vzhledem k zjištěným korelačním koeficientům se jedná o rovnice vystihující tyto závislosti velmi přesně a pro dané typy HSC lze tedy uvažovat o jejich praktickém využití.

Pro nedestruktivní hodnocení pevnostních parametrů bylo využito dvou typů Schmidtova tvrdoměru – L a N. Bylo zjištěno, že z naměřeného souboru hodnot je možné odvodit prakticky použitelný kalibrační vztah pouze pro typ L, což je pro orientační posouzení pevnostních charakteristik v tlaku přínosným zjištěním, protože pro tento typ betonu (tj. HSC) v současnosti existuje velmi málo kalibračních vztahů.

Literatura:

- [1] *Slivirski J.*: New generation cement concretes :ideas, design, technology and applications 3: LLP – Erasmus 9203-0574/IP/ Košice 03/REN /Brno : TU Brno, Fac. of CE, 2010. 3rd, enl. and updated ed. 189 p., ISBN 978-83-7242-531-7
- [2] *Wallewik O. H., Gjorv O. E.*: Effekt av silika på betongens stopelighet og arbeidbarhet. Trondheim: Institutt For Bygningsmateriallaere, 1988, Report no. BML 88.202
- [3] *Hewlett P. C.*: Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Elsevier Science & Technology Books, 2004
- [4] *Aitcin P.-C.*: Binders for Durable and Sustainable Concrete, New York: Taylor & Francis, 2008. 529 pp. ISBN 978-0-415-38588-1
- [5] *Aitcin P.-C.*: Vysokohodnotný beton. Z angl. orig. přeložil V. Bílek a kol., 1. české vyd., Praha: IC ČKAIT, 2005, 320 str., ISBN 80-86769-39-9
- [6] *Melichar T., Přikryl J., Matulová P.*: Substituce pojiva v cementových kompozitech jemně mletou recyklovanou sklovinou s ohledem na životní prostředí, Beton TKS 3/2009, p. 50–55, ISSN 1213-3116
- [7] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, first edition, 1993, corrected and reprinted 1995, International Organization for Standardization (Geneva, Switzerland)
- [8] *Corinaldesi V., Gnappi G., Moriconi G., Montenero A.*: Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars, Waste Management 25 (2005), pp. 197–201
- [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, Report 98-18, Albany, NY, October 1998
- [10] *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
- [11] ČSN 73 1317 Stanovení pevnosti betonu v tlaku
- [12] ČSN 73 1370 Nedestruktivní zkoušení betonu. Společná ustanovení
- [13] ČSN 73 1371 Ultrazvuková impulzová metoda skúšania betónu
- [14] ČSN 73 2011 Nedeštruktívne skúšanie betónových konštrukcií
- [15] ČSN EN 206-1 Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- [16] ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutí
- [17] ČSN EN 12390-2 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti
- [18] ČSN EN 12390-2 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles
- [19] ČSN ISO 6784 Beton. Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku

Závěrem lze doporučit další analýzy ubírající se jednak směrem k ověření i jiných podstatných materiálových charakteristik HSC s příměsí jemně mletého obrazkového skla a samozřejmě opětovné porovnání s běžnými typy užívaných příměsí do betonu. Dále by bylo vhodné rozšířit soubor hodnot především zjištěných nedestruktivně Schmidtovým tvrdoměrem typu L obecně pro několik typů HSC, včetně zde analyzovaných receptur a odvodit tak obecně platný kalibrační vztah udávající závislost mezi stanoveným odrazem a pevností betonu v tlaku.

Příspěvek byl vytvořen v rámci výzkumného záměru MSM 0021630511 „Progresivní stavební materiály s využitím druhotných surovin a jejich vliv na životnost konstrukcí“.



Ing. David Procházka
e-mail: prochazka.d@fce.vutbr.cz



Ing. Tomáš Melichar
e-mail: melichar.t@fce.vutbr.cz

oba: Fakulta stavební VUT v Brně
ÚTHD
Veveří 95, 602 00 Brno
tel.: 541 147 463
www.fce.vutbr.cz/thd

Text článku byl posouzen odborným lektorem.



Kvalifikační kurzy



Pořádá BETONCONSULT, s.r.o. pod záštitou Sdružení pro sanace betonových konstrukcí

- NAVRHOVÁNÍ A POSUZOVÁNÍ ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ** Termín: **17. 2. 2012** Cena 1 550,- Kč + DPH
- JAK SPRÁVNĚ PROJEKTOVAT A PROVÁDĚT PODLAHY** Termín: **2. 3. 2012** Cena 1 550,- Kč + DPH
- POHLEDOVÉ BETONY** Termín: **3. 2. 2012 a 9. 3. 2012** Cena 1 550,- Kč + DPH
- PROJEKTOVÁNÍ A PROVÁDĚNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ S OHLEDEM NA VZNIK TRHLIN**
Termín: **10. 2. 2012 a 29. 2. 2012** Cena 1 550,- Kč + DPH
- GEOMETRICKÁ PŘESNOST VE STAVEBNICTVÍ** Termín: **24. 2. 2012** Cena 1 550,- Kč + DPH
- VADY A PORUCHY STAVEB – POUČENÍ Z CHYB**
Termín: **6. 2. – 8. 2. 2012 a 5. 3. – 7. 3. 2012** Cena 2 900,- Kč + DPH
- PROVÁDĚNÍ A KONTROLA SANACÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ I**
Termín: **13. 2. – 16. 2. 2012** Cena 4 370,- Kč + DPH
- PROVÁDĚNÍ A KONTROLA SANACÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ II**
Termín: **20. 2. – 23. 2. 2012** Cena 4 370,- Kč + DPH

pro pracovníky stavebních firem, investory, pracovníky státní správy, projektanty

Místo konání: Praha
Garant kurzů:
Doc. Ing. J. Dohnálek, CSc.
dohnalek@sanacebetonu.cz
Tel.: + 420 602 324 116
Sekretariát:
Tel/fax: + 420 244 401 879
kurzy@dohnalek.org
Akreditace:
Kurzy jsou akreditovány komorami ČKAIT a ČKA.

Přednášejí: Prof. Ing. J. Bilčík, CSc.; Ing. M. Birnbaumová; Ing. L. Bukovský; Doc. Ing. J. Dohnálek CSc.; Ing. P. Dohnálek MScE; Prof. Ing. R. Drochytka, CSc.; Ing. K. Dvořák, Ph.D.; Ing. Fabich; Ing. H. Geiplová; Ing. J. Hromádka; Ing. P. Hruža; Ing. D. Jedinák; Ing. L. Káně; Ing. H. Kotorová; Ing. J. Labuda; Doc. Ing. D. Makovička, DrSc.; Ing. J. Margoldová, CSc.; Doc. Ing. Z. Matějka, DrSc.; Ing. M. Mazurová; Prof. Ing. P. Novák CSc.; Ing. V. Pumpl CSc.; Ing. R. Schejbal; Ing. V. Šanda; Doc. Ing. Š. Šilarová, CSc.; Ing. T. Tayerle; Ing. P. Tůma Ph.D.; JUDr. D. Uhlíř; Doc. Ing. M. Vašek CSc.; Ing. K. Zetková; Ing. J. Zmek

On-line přihláška a podrobné informace na www.dohnalek.org