

# TECHNOLOGICKÉ ASPEKTY VÝVOJE A APLIKACE VYSOKOPEVNOSTNÍHO BETONU V PODMÍNKÁCH ČESKÉ REPUBLIKY – ČÁST I. ÚVOD A SLOŽKY VYSOKOPEVNOSTNÍHO BETONU ■ HIGH-STRENGTH CONCRETE – TECHNOLOGY, DEVELOPMENT AND APPLICATION CONDITIONS IN THE CZECH REPUBLIC – PART I. INTRODUCTION AND COMPONENTS OF HIGH-STRENGTH CONCRETE

Ivailo Terzijski

Článek se zabývá aktuálními poznatky z vývoje vysokopevnostních betonů v podmínkách ČR a navazuje tak volně na přehled aplikací vysokopevnostního betonu v mostních konstrukcích, publikovaný v čísle 4/2010 tohoto periodika. Článek se zaměřuje hlouběji jen na některé oblasti kompozice či vlastností vysokopevnostních betonů, např. na problematiku nejnovějších polyfunkčních přísad. Některé jiné oblasti jsou pojednány jen okrajově. Nemá se tedy jednat o ucelenou příručku z oblasti technologie vysokopevnostních betonů. ■ In the article some actual findings reached in the development of high-strength concrete in condition of the Czech Republic territory are presented. It is a non formal addition to the bridge structures application roundup published in the vol. 4/2010 of this journal. Some scopes of concrete composition and development are discussed in more details, only – for example questions of the most up-to date multi-functional additives. Other topics are not presented in full details. It is not a complete manual of high-strength concrete technology.

## VYMEZENÍ POJMU „VYSOKOPEVNOSTNÍ BETON“

„Vysokopevnostní beton“ anglicky „High-Strength Concrete“ (dále jen HSC) je, jak vyplývá z logiky názvu, beton s vysokou pevností. O tom, co lze za vysokou pevnost již považovat a co ještě nikoli, rozhodují obvykle normativní předpisy.

Vysokopevnostní beton se často (a oprávněně) zařazuje mezi vysokohodnotné betony „High-Performance Concretes“ (HPC), které jsou jakousi „nadmnožinou“ HSC. Je to proto, že paralelně se zvyšující se pevností se zlepšují i další užité vlastnosti betonu, jako jsou např. modul pružnosti, odolnost proti průniku kapalin (vodotěsnost) a trvanlivost vůbec. Někteří odborníci, např. [6], název vysokopevnostní beton zcela zavrhnou a preferují univerzální používání označení HPC. Jelikož se ale betonové konstrukce stále navrhují především na základě normalizovaných pevnostních parametrů betonu, budeme v tomto článku vycházet především z poněkud užšího termínu „vysokopevnostní beton“.

Z definice norem [2 a 3] vyplývá, že vysokopevnostní beton je v případě obvyklého a těžkého betonu beton s pevnostní třídou vyšší než C50/60. Podle „technologické“ ČSN EN 206-1 jsou vysokopevnostní betony definovány rozmezím tříd C55/67 až C100/115 (tab. 1). Konstrukční norma Eurokód 2 [3] má definovaný obor platnosti pouze do třídy C90/105. To znamená, že třída C100/115 je zatím „projekčně nepoužitelná“. Navíc „mostní norma“ ČSN 1992-2 [4] doporučuje používat v mostních konstrukcích pouze třídy betonu C30/37 až C70/85. Díky normativnímu charakteru příslušného článku národní přílohy je vlastně použití jiných pevnostních tříd betonu v mostních konstrukcích zakázáno. Je zjevné, že omezení „shora“ je zapříčiněno obavami z nízké duktility HSC, a tedy i ze zvýšeného rizika náhlého porušení

konstrukce (viz též část II. článku). Naproti tomu v bulletinu [5] z roku 2008 se objevuje klasifikace pevnostních tříd prezentovaná v tab. 2. Jelikož bulletin *fib* jsou obvykle jakýmsi „předvojem“ pozdějších normativních předpisů, lze z údajů v tab. 2 vyvodit (možná i poněkud spekulativně) následující dvě skutečnosti:

- Do budoucna se předpokládá rozšíření „využitelných“ HSC betonů až do charakteristické válcové pevnosti  $f_{ck} = 120$  MPa.
- Soudě podle značení, se výhledově též předpokládá opuštění zkoušek pevnosti v tlaku na vzorcích krychle. (Viz další diskuze k problému v části věnované zkoušení HSC.)

## PŘEDNOSTI A VYUŽITELNOST HSC

Základní předností vysokopevnostního betonu je pochopitelně jeho vysoká pevnost, od níž lze odvodit některé další přínosy. Záleží samozřejmě na tom, jak efektivně, a zda vůbec, se zvýšené pevnosti využije. Dále podáváme jen stručný přehled nejčastěji uváděných výhod HSC, s komentářem v závorce, zasazujícím deklarovanou přednost do širších souvislostí:

- Zmenšení průřezových rozměrů prvků vedoucí k úspore materiálů, přepravních nákladů apod. (Jde nepochybně o plus, pokud se ovšem tato skutečnost neprojeví negativně na chování konstrukce – např. v důsledku vyšší stíhlosti prutů apod.)
- Zmenšení množství výztuže při zachování průřezových rozměrů. (Mohlo by být jednou z cest pro efektivní nasazení HSC, ale dosud tomu tak obvykle není. Často se totiž používá HSC až tehdy, kdy už se do průřezu víc výztuže „nevejde“.)
- Zvýšení odolnosti a trvanlivosti betonu. (Je pravdou, že HSC je obecně odolnější než běžný beton, pokud však využijeme některých ustanovení Eurokódu 2, umožňujících např. u betonů vyšších pevností snížit krytí výztuže betonem, nemusí se tato přednost na konstrukci vůbec projevit.)
- Zmenšení deformací konstrukcí v důsledku lepších materiálových vlastností, jako jsou modul pružnosti, smršťování či dotvarování. (Velmi problematické tvrzení, může být pravdivé, ale také zcela nepravdivé – např. u ohýbaných prvků je průhyb nepřímo úměrný modulu pružnosti betonu, ale přímo úměrný třetí mocnině výšky průřezu. To znamená, že pokud využijeme vyšší pevnost betonu ke zmenšení rozměrů průřezu, může naopak dojít k podstatně větším průhybům.)
- Nová konstrukční řešení. (Mohou být dobrým důvodem pro nasazení HSC – zejména u náročných, např. mostních konstrukcí [1].)

Závěrem lze konstatovat, že je nutné mít stále na paměti



Obr. 1 Typické složení HPC či HSC dle S. Rostama | Fig. 1 Typical composition of HPC or HSC according to S. Rostam

Tab. 1 Vymezení a použitelnost tříd HSC z hlediska různých norem | Tab. 1 Definition and usability of HSC grades from different codes point of view

Základní charakteristiky HSC	Doporučená pro mostní konstrukce					Definováno jen v ČSN EN 206-1
	C55/67	C60/75	C 70/85	C80/85	C90/105	C100/115
Pevnost v tlaku	$f_{ck}$ [MPa]	55	60	70	80	90
	$f_{ck, cube}$ [MPa]	67	75	85	95	105
	$f_{cm}$ [MPa]	63	68	78	88	98
Pevnost v tahu	$f_{ctm}$ [MPa]	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
	$f_{ctm,0,05}$ [MPa]	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5
	$f_{ctk;0,95}$ [MPa]	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
$E_{cm}$ [GPa]	38	39	41	42	44	není definováno ČSN 1992-1-1

Tab. 2 Třídy betonu definované v bulletinu fib 42 | Tab. 2 Concrete grades according to bulletin fib 42

Concrete grade	C12	C20	C30	C40	C50	C60	C70	C80	C90	C100	C110	C120
$f_{ck}$ [MPa]	12	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$f_{ck, cube}$ [MPa]	15	25	37	50	60	75	85	95	105	115	130	140

ti skutečnost, že to, co skutečně potřebujeme, není HSC či HPC beton jako takový, ale „vysokohodnotné betonové konstrukce“, jak výstižně konstatoval jeden s předních odborníků na tuto problematiku S. Rostam.

### SLOŽENÍ HSC

Dříve se často uvádělo, že složení HSC či HPC musí být v porovnání s běžným betonem podstatně komplikovanější (obr. 1). V tomto článku si ukážeme, že tomu tak (zejména při využití moderních polyfunkčních přísad) nemusí být vždy.

Někdy bývají HSC z hlediska kompozice rozdělovány do dvou skupin:

- HSC betony „běžného“ složení, v jejichž kompozici není třeba uplatňovat speciální příměsi, zejména mikroplniva.
- HSC betony vyšších pevnostních tříd, v jejichž kompozici je třeba uplatňovat mikroplniva.

Hranice mezi uvedenými skupinami je důležitá zejména z ekonomického hlediska. HSC betony první skupiny jsou totiž výrazně levnější a navíc nekladou zvýšené nároky na vybavení betonárny. Jejich využití v reálných konstrukcích je tak daleko lépe „průchozí“. Předěl mezi oběma skupinami ležel dříve v oblasti pevnostní třídy C60/75 [1]. V souvislosti s příchodem nových polyfunkčních přísad se však v poslední době posouvá směrem k vyšším pevnostním třídám, takže nyní lze i v našich podmínkách vyrobit vysokopevnostní beton třídy C70/85 bez použití mikroplniva. To znamená, že např. celou oblast pevnostních tříd betonů pro mostní konstrukce lze dnes pokrýt HSC z první skupiny. Je pravděpodobné, že v budoucnu se dočkáme dalšího posunutí této hranice.

Co se týče jednotlivých komponent skladby HSC, je zřejmé, že je třeba dbát na jejich kvalitu více, než u betonů normálních pevností. Co však možná není tak zřejmé, je skutečnost, že důležitým parametrem není jen „kvalita“ jako taková, ale i její vyrovnanost. Kompozice HSC jsou totiž (zejména v čerstvém stavu) mnohem citlivější na změnu kvality použitých komponent, než kompozice betonů běžných pevností.

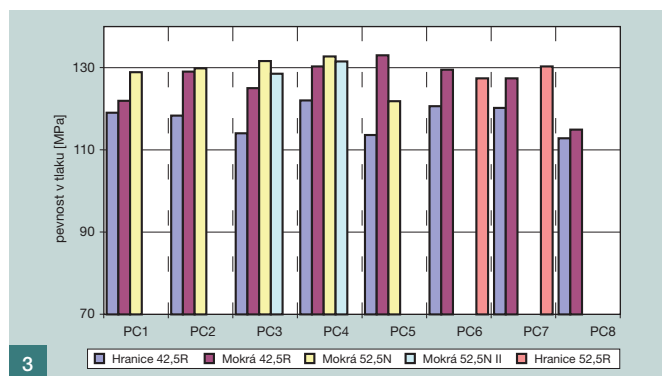
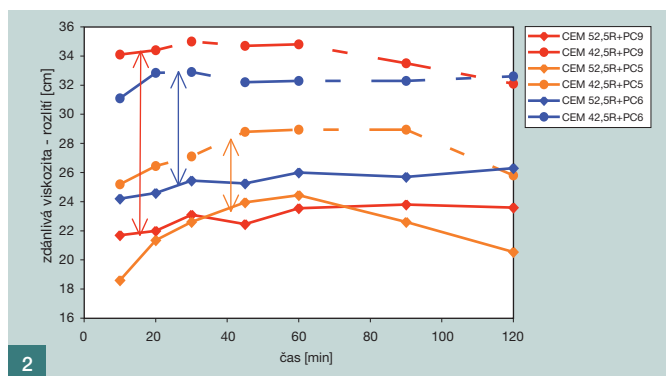
### CEMENTY PRO HSC

V odborné literatuře lze najít celou řadu úvah o výběru vhodného cementu pro HSC či HPC, a to jak z hlediska mineralogického složení cementu, tak i jeho fyzikálně-mechanických vlastností.

Hlavní problém (naštěstí nikoli nepřekonatelný) tkví ve skutečnosti, že cementy se vyrábějí a zkoušejí podle normovaných principů řádově sto let starých, a to i v současné době, kdy technologie betonu (zejména díky použití moderních polyfunkčních přísad) udělala značný krok kupředu. Detailní údaje o chemickém složení cementu, které lze často najít např. na webových stránkách výrobců, proto většinou neřeknou nic podstatného pro využitelnost tohoto cementu v HSC. Proto někteří praktičtější orientovaní odborníci, jako např. P.-C. Aitcin [6], doporučují sledovat jen měrný povrch cementu, difraktogram cementu (kvůli obsahu a formě  $C_3A$  a síranu vápenatého) a chování cementu v přítomnosti superplastifikátoru.

Autor článku může takový přístup jen potvrdit s tím, že je nutné vzít v potaz i již dříve avizovanou vyrovnanost kvality, zejména z hlediska spolupráce s uvažovanými polyfunkčními přísadami (viz dále). Podle zkušeností autora jsou v našich podmínkách nejhodnější cementy CEM I, a to jednak v důsledku dostatečného zpevňovacího potenciálu, a též proto, že jednodušší složení cementu snižuje variabilitu jeho vlastností.

Cementy CEM I se v našich podmínkách vyskytují v pevnostních třídách 42,5 a 52,5. (Výjimečně a obvykle jen přechodně i v třídě 32,5.) Výrobci cementu obvykle doporučují pro HSC jako optimální třídu 52,5. Že tomu tak ale nemusí být zdaleka vždy, ukázaly experimenty provedené v uplynulých letech na FAST VUT v Brně. Při nich jsme mj. sledovali reologické chování a pevnosti mikrobetonů připravených s využitím různých polykarboxylátových superplastifikátorů a cementů. Na obr. 2 je znázorněno reologické chování čerstvého mikrobetonu konstantního poměrového složení připraveného s využitím CEM I 42,5R a CEM I 52,5R stejného výrobce, v kombinaci se třemi rozdílnými superplastifikátory.



ry. Ukázalo se, že bez ohledu na použitý superplastifikátor je reologické chování mikrobetonu s CEM I 52,5R vždy horší (tj. ztekucení je menší), než při použití CEM I 42,5R. To je celkem očekávaný výsledek, vzhledem ke skutečnosti, že vyšší pevnostní třídy cementu se v našich podmínkách dosahuje především vyšší jemností mletí cementu, a nikoli lepšími parametry slinku.

Méně očekávané již ovšem byly výsledky na obr. 3 znázorňující hodnoty pevnosti betonu v tlaku u mikrobetonů konstantního poměrového složení, připravených z pěti různých šarží cementů od dvou výrobců a opět s využitím tří různých superplastifikátorů. Ukázalo se, že neexistuje jednoznačná závislost mezi pevnostní třídou cementu a pevností výsledného mikrobetonu. Výsledek záleží nejen na pevnostní třídě cementu, ale i na jeho výrobní šarži a dokonce i na použitém superplastifikátoru (bude diskutováno dále).

Souhrnně lze konstatovat, že v našich podmínkách je z technického i ekonomického hlediska zřejmě nejvhodnější v HSC používat portlandské cementy CEM I 42,5, vhodné může být i použití CEM I 52,5. Obecně bude více vhodný takový cement, který předepsaných pevnostních parametrů dosahuje nikoli vysokou jemností mletí, ale kvalitou použitého slinku. (Lze odvodit z měrného povrchu cementu, případně ze spotřeby vody na normální konzistenci, což jsou běžně dostupné údaje.)

Pro masivní konstrukce (což je v případě vysokopevnostního betonu poněkud protismysl) mohou být vhodné i směsné cementy vyšších pevnostních tříd. Například německý cementářský koncern Dyckerhoff nabízí pro tyto účely cement CEM III/A 52,5N – HS/NA s obchodním názvem „Variodur“. Tento výrobce nabízí pro HSC a HPC i další speciální cementy, jako je např. produkt „Nanodur“, zatříděný jako CEM II B/S-52,5R. Tento cement obsahuje mimo běžné komponenty portlandského cementu i mikrosiliku. Autor článku je však přesvědčen, že ve velké většině případů se lze bez těchto speciálních cementů obejít.

### KAMENIVO PRO HSC

Kamenivo zabírá přibližně 70 až 75 % objemu betonu, a proto jeho kvalitu a vlastnosti nelze v běžném, natož vysokopevnostním betonu podceňovat. Je samozřejmě nezbytné, aby použité kamenivo splňovalo všechna normová ustanovení pro použití v betonu. V dalším textu se omezíme jen na některá základní doporučení, protože kamenivo je silně lokálně závislá komodita, takže návrhovatel HSC může spíše narazit na technologicko-ekonomické problémy, než na to, že by na našem území nebyly vhodné zdroje kameniva.

Hrubé kamenivo pro výrobu HSC by mělo být spíše drcené, než těžené. Druhý případ jistě nejde zcela vyloučit, jde samozřejmě taky o to, jakých parametrů HSC máme do-

sáhnout. Těžená kameniva mají sférická zrna a obvykle lepší tvarový index, což vede zpravidla k nižší dávce plastifikátoru pro požadovanou zpracovatelnost. Na druhé straně kulovitý tvar a hladký povrch zrn mají obvykle současně za následek i nižší pevnost v kontaktní zóně kamenivo – cementový tmel, a tedy i nižší výslednou pevnost betonu.

Při vývoji HSC pro lávku v Českých Budějovicích autor testoval využití jak místně běžně používaného těženého kameniva, tak běžně nepoužívaného, ale dostupného drčeného kameniva. Dosažené parametry (tab. 3) jasně svědčily ve prospěch drčeného kameniva, které také bylo použito. Podrobnosti ke složení obou variant betonu i ke konstrukci lze nalézt v [1].

### Zásadní poznámky k výběru hrubého drčeného kameniva

Petrograficky by mělo jít o horniny vyvrělé (žula, čedič, gabro, diorit, diabas), výjimečně metamorfované, sedimenty nejsou vhodné. Autorovi se dobře osvědčil čedič, který má z dostupných hornin nejlepší pevnosti v tlaku a dobrý tvarový index (to je obecně dáno odlučností čediče).

Řada publikací doporučuje omezit maximální zrno kameniva na 9,5 mm (3/8") či 11 mm, pro snížení tvorby mikrotrhlinek vznikajících ve smršťujícím se cementovém tmelu okolo nesmrštitelného kameniva, či z důvodu mikroporuch ve velkých zrnech samotných. Autor článku má ovšem pocit, že jde o jedno z doporučení, která se tradují a opisují z jedné odborné publikace do druhé, aniž by byla posouzena v širších souvislostech. Zmenšování maximálního zrna kameniva má totiž i své negativní důsledky: roste spotřeba cementu, zvyšuje se smršťovací potenciál betonu a většinou klesá i modul pružnosti betonu. Každopádně významná část úspěšných praktických aplikací HSC (nikoli UHPC!) využila kameniva s max. zrnem 16 mm i více.

Tab. 3 Srovnání vlastností variant betonu C55/67 s těženým a drceným hrubým kamenivem ■ Tab. 3 Comparison of concrete C55/67 parameters either with usage of gravel or crushed coarse aggregate

Parametr	Jednotka	Limit	Varianta s HTK	Varianta s HDK
Objemová hmotnost betonu	kg. m <sup>-3</sup>	–	2448	2456
Sednutí kužele	mm	–	190	200
Pevnost v tlaku krychlová 28d	MPa	74,5	78,8	86,6
Pevnost v tlaku hranolová 28d	MPa	–	65,6	77,8
Modul pružnosti 28d	GPa	–	44,4	46,6
Odolnost proti ChRL – odpad po 150 cyklech	g. m <sup>-3</sup>	800	140,6	89,4
Hloubka průsaku	mm	20	2, 3 a 5	6, 5 a 3

U drceného kameniva je velmi důležitý příznivý tvarový index a jeho čistota. Tvarový index závisí nejen na odlučnosti horniny, ale i na použitých drtičích a jejich aktuálním seřízení.

Hrubé kamenivo bývá dále často znečištěno kamenným prachem vznikajícím při jeho drcení. Tento prach ovlivňuje spolupráci superplastifikátoru s cementem, zhoršuje zpracovatelnost čerstvého betonu a obvykle zvyšuje i jeho lepi-  
vost. Proto je vhodné používat kameniva praná, u kterých je množství prachu podstatně omezeno.

Obsah prachu často závisí i na historii kameniva na skládce. Při deštivém počasí se prachové částice postupně vymývají z horních vrstev kameniva a naopak se koncentrují v hlubších vrstvách. Pak záleží na tom, odkud se kamenivo zrovna odebírá. I takové „maličkosti“ je vhodné při výběru a nasazení kameniva sledovat.

Co se týče písku, lze jednoznačně doporučit písek těžený. Jeho kvalita je rovněž velmi důležitá: nesmí obsahovat odplavitelné částice a jílovinu. Na druhé straně nesmí jít o písek „zcela vypraný“, kdy při odstraňování odplavitelných částic jsou někdy odplaveny i částice v rozmezí 0,063 až 0,25 mm. Takový písek pak nemá dostatečné stabilizační schopnosti, což je u HSC zvláště důležité, neboť písku je vhodné použít o cca 5 až 10 % méně než u běžných betonů. Jistě, stabilizační účinek písku lze nahradit zvýšenou dávkou cementu či mikroplniva, to však (podle názoru autora) nelze považovat za efektivní koncepci návrhu HSC.

Souhrnně lze k tomuto tématu konstatovat, že v ČR je dostatek kvalitního kameniva, takže čistě technicky vzato by neměly být v tomto směru při návrhu HSC problémy. Prakticky ovšem mohou nastat u dočasné výroby HSC (např. pro jednu určitou konstrukci) technicko-ekonomické problémy.

Ty mohou vyplývat například z faktu, že betonárna, která by měla produkovat HSC, běžně používá nejlevnější dostupný písek, či nikoli zrovna optimální drť z lomu, který je jen 2 km daleko. To, co stačí pro výrobu betonu normální pevnosti, obvykle nevyhovuje pro HSC. Pak je na technologovi, aby kouzllil, protože i když se podaří přesvědčit zainteresované, že nelze používat pro betonárnu standardní kamenivo, není to kvalitnější někdy kam dát, protože všechny bunkry jsou zavezeny „ekonomicky výhodnou“ surovinou.

### Mikroplnivo

Mikroplnivo (myšleno běžné mikroplnivo, jako dále uvedená mikrosilika či metakaolin) se v HSC uplatňuje v zásadě dvěma způsoby.

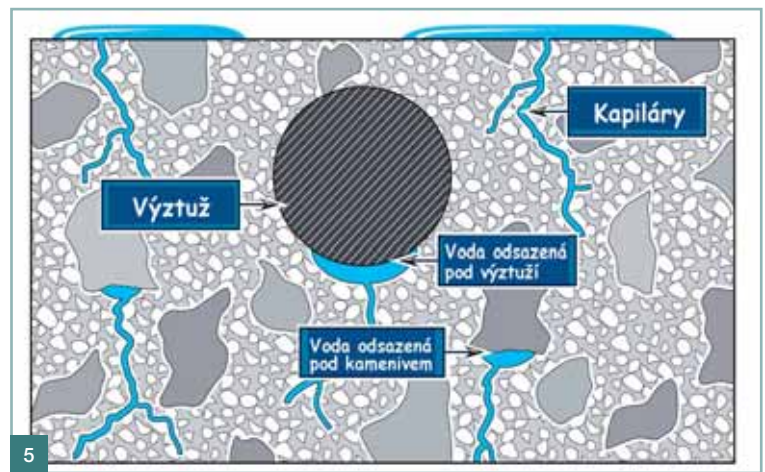
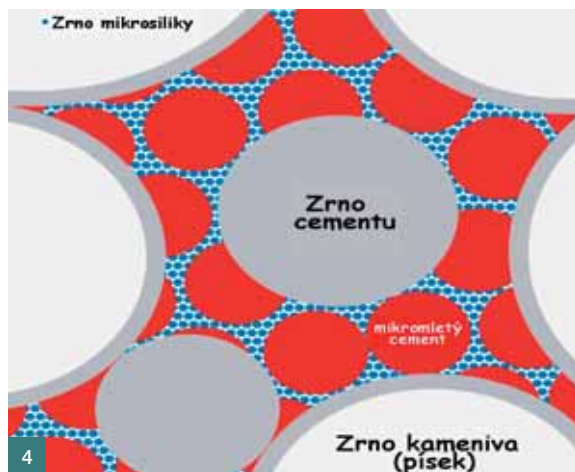
**Fyzikálně**, když se uplatňuje jeho extrémní jemnost, která nejprve v čerstvém betonu zvyšuje jeho stabilitu a kohezi. V ztvrdlém betonu pak mikroplnivo lépe vyplňuje pórovou strukturu betonu a zvyšuje tak jeho hutnost (obr. 4). (Angličtina pro to má výstižný výraz „Packing density“.)

**Chemicky**, kdy se chová jako velmi reaktivní pucolán. Např. v případě mikrosiliky jde převážně o velmi reaktivní amorfní  $\text{SiO}_2$ .

Kombinace obou způsobů se pak uplatňuje při zlepšování kvality kontaktní zóny kamenivo – cementový tmel.

Ve svých důsledcích vedou uvedená působení ke:

- zvýšení stability a soudržnosti čerstvého betonu,
- odstranění pórů v důsledku odsazování vody (bleeding) pod zrny kameniva či pruty výztuží (obr. 5),
- zvýšení pevnosti betonu,
- snížení propustnosti betonu pro kapaliny i plyny,
- zvýšení trvanlivosti betonu.



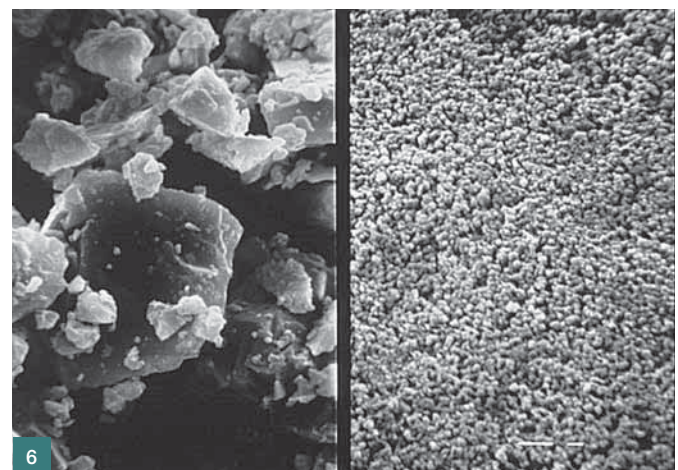
Obr. 2 Vliv třídy cementu na reologické chování HSC mikrobetonu | Fig. 2 Influence of OPC grade on the rheological behavior of HSC

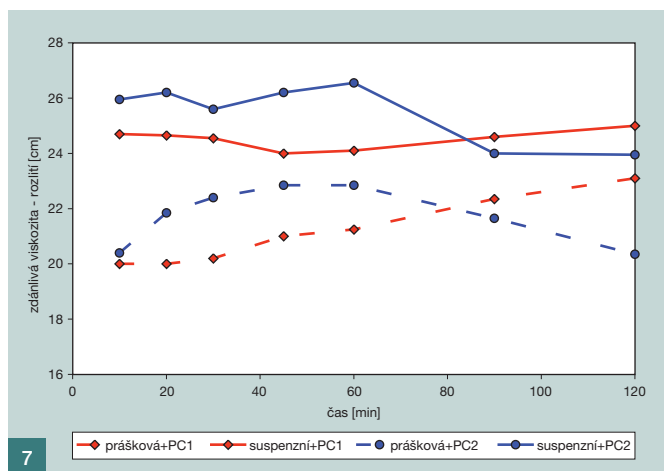
Obr. 3 Vliv třídy cementu na pevnost HSC mikrobetonu v tlaku | Fig. 3 Influence of OPC grade on the compressive strength of HSC

Obr. 4 Porovnání velikosti různých částic v betonu | Fig. 4 Comparison of the size of different particles in concrete

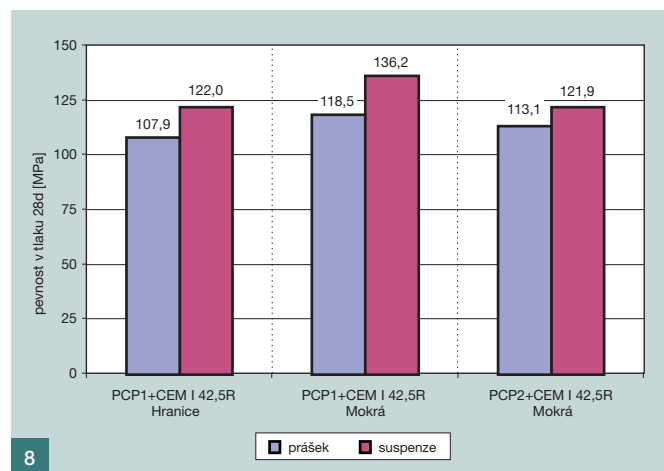
Obr. 5 Narušení struktury betonu v důsledku jeho nestability v čerstvém stavu | Fig. 5 Bleeding defects of a non cohesive fresh concrete after setting

Obr. 6 Porovnání velikosti částic cementu a mikrosiliky | Fig. 6 Comparison of particle size – Portland cement and silica fume



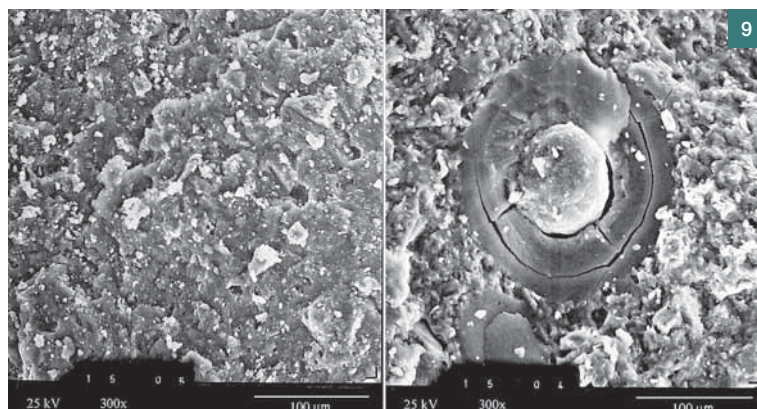


Obr. 7 Vliv formy mikrosiliky na reologii čerstvého mikrobetonu ■ Fig. 7 Influence of silica fume form on rheology of fresh micro concrete



Obr. 8 Vliv formy mikrosiliky na pevnost ztvrdlého mikrobetonu ■ Fig. 8 Influence of silica fume form on strength of hardened micro concrete

Obr. 9 Mikrofoto tmelu se suspenzí (vlevo) a práškovou mikrosilikou ■ Fig. 9 Micro photo of paste with silica fume in suspension (left) and dust form



## Mikrosilika

Nejčastěji používaným mikroplnivem je mikrosilika (Condensed Silica Fume), která je vedlejším produktem při výrobě křemíku nebo křemíkem legovaných ocelí v elektrických pecích. Primárně jde o šedý (v případě extrémní čistoty až bílý) jemný prášek s velmi nízkou sypanou hmotností. Porovnání velikosti částic cementu a mikrosiliky je na obr. 6. O využití mikrosiliky a jejích vlastnostech byla zpracována řada specializovaných manuálů, např. [7], málo kdy se však v nich uvádějí i případné komplikace a nevýhody vyplývající z jejího použití v betonu. K nim patří zejména:

- Zvýšená dávka vody pro dosažení potřebné konzistence čerstvého betonu. (V poslední době se objevující tvrzení, že mikrosilika plastifikuje beton, je nesmysl, vzniklý buď špatným překladem nebo nepatřičným zobecněním zvláštního případu mikrosiliky v suspenzi – viz dále.)
- V důsledku zvýšené dávky vody vykazuje beton s mikrosilikou obvykle vyšší smršťování a dotvarování, než srovnatelný beton bez mikrosiliky.
- Beton s mikrosilikou často vyžaduje intenzivnější a delší míchání, než beton bez ní (záleží ovšem i na formě mikrosiliky).
- Čerstvý beton s mikrosilikou ztrácí rychleji zpracovatelnost a obvykle vyžaduje i podstatně zvýšené dávkování plastifikátoru pro eliminaci tohoto jevu. (Opět záleží i na formě mikrosiliky.)
- Přídavek mikrosiliky má obvykle za následek zpomalení rychlosti nárůstu pevností betonu (což ovšem může být někdy i výhoda).
- Mikrosilika je petrograficky kyselé povahy a při pucolanické reakci s alkáliemi z cementu snižuje výslednou celkovou alkalitu betonu a jeho pasivační funkci, důležitou při ochraňování výztuže. Proto se někdy omezuje maximální dávka mikrosiliky na 10 až 12 % z dávky cementu.

- Základní prášková forma mikrosiliky má velmi nízkou sypanou hmotnost, což zvyšuje náklady na skladování a dopravu.
- Vdechování jemně rozptýlené práškové mikrosiliky je zdraví škodlivé (silikóza) a je nutné používat ochranné prostředky.
- Mikrosilika je obvykle dosti drahá (až desetkrát dražší než běžný cement).
- Mikrosilika je při výrobě betonu technickou a technologickou komplikací – je nutno vyřešit její skladování a dávkování.

Z uvedeného výčtu je zřejmé, že využití mikrosiliky (a mikroplniv obecně) v kompozici HSC může přinést řadu problémů. Autor článku proto dospěl na základě svých zkušeností k závěru, že použití mikrosiliky v kompozici HSC je dobré (pokud to lze) se vyhnout. A to tím spíše, že některé příznivé účinky mikrosiliky lze nahradit využitím vhodné polyfunkční přísady – viz dále. Záleží ovšem i na formě mikrosiliky. Vhodná forma totiž může podstatně omezit některá výše uvedená negativa.

- Mikrosilika se dodává:
- v základní práškové formě se sypanou hmotností cca 150 až 300 kg/m<sup>3</sup>.
  - v granulované formě se sypanou hmotností cca 500 až 700 kg/m<sup>3</sup>.
  - ve formě vodní suspenze, obvykle v 50% koncentraci.
- Často diskutovanou otázkou je, zda forma mikrosiliky (vedle zřejmých rozdílů v dávkování, prašnosti apod.) může nějak ovlivnit vlastnosti cílového betonu. Proto jsme v rámci vývoje HSC pro mostní konstrukce na FAST VUT v Brně porovnávali chování práškové a suspenzní mikrosiliky.
- Na obr. 7 je znázorněno porovnání vývoje konzistence mikrobetonu (vyjádřené jako rozliti minikužele) stejného poměro-

Tab. 4 Srovnání vlastností variant HPC s připravených s různým mikroplnivem ■ Tab. 4 Comparison of parameters of HPC variants prepared with a different micro-filler

	MB1 „Metakaolin“	MB3 „Mikrosilika“
Složka	Dávka [kg]	Dávka [kg]
CEM I 42,5 R Hranice	700	700
Metakaolin S-META 4	70	–
Mikrosilika prášek	–	70
Voda celková	177	177
PCE polyfunkční přísada	20	14,5
Retardal 540	1,65	1,65
PP vláknina Fibrin 660	2,07	2,07
Sklovlákna Anti-crak HLP	5,15	5,15
TK (čtyř-frační směs) 1/6 mm	1440	1440
<b>Vlastnosti</b>		
Pevnost v tlaku 7d [MPa]	73,3	63,2
Pevnost v tlaku 28d [MPa]	92,4	92,4
Pevnost v tlaku 90d [MPa]	110,2	107,8

vého složení, připraveného vždy s práškovou a pro srovnání i suspenzní mikrosilikou od stejného dodavatele. Toto porovnání bylo provedeno opakovaně při použití různých superplastifikátorů. Z obrázku jasně vyplývá, že tmel připravený s využitím práškové mikrosiliky má v obou prezentovaných případech horší reologické vlastnosti. To je zřejmě způsobeno skutečností, že vodou předem nesmočený velký povrch práškové mikrosiliky adsorbuje větší množství superplastifikátoru, kterého se pak nedostává pro dispergaci zrn cementu.

Další porovnání účinků suspenzní a práškové mikrosiliky je znázorněno na obr. 8. V tomto případě jde o srovnání pevností v tlaku mikrobetonů stejného poměrového složení, připravených z obou forem mikrosiliky při využití různých plastifikátorů a cementů. Výsledky porovnání ukazují, že pevnosti jsou při použití suspenzní mikrosiliky vždy dost výrazně vyšší.

Protože se někdy uvádí pravý opak, provedli jsme pro ozřejmení tohoto jevu mikrostrukturální analýzu cementového tmele připraveného opět s využitím suspenzní a práškové mikrosiliky (obr. 9). Rozdíl je zřetelný na první pohled. V případě práškové mikrosiliky nedošlo i přes intenzivní míchání v laboratoři k dokonalé dispergaci elektrostaticky aglomerovaných zrn práškové mikrosiliky. Jejich zpevňovací potenciál se tak nemohl v plné míře uplatnit. Na obr. 9 jsou navíc dobře patrné poruchy mikrostruktury, vzniknuvší okolo aglomerovaných „makrozrn“ mikrosiliky, pravděpodobně v důsledku vnitřního vysychání vznikajících C-S-H fází. (Vysokou spotřebu vody v kontaktní zóně makrozrna mikrosiliky nelze zajistit migrací z jeho okolí, neboť většina vody je zde již vázána v důsledku reakce s lépe dispergovanými částicemi tmele.)

Zdálo by se tedy, že suspenzní forma mikrosiliky odstraňuje některé z výše uvedených problémů. To je z části i pravda, jelikož profesionální dispergaci mikrosiliky (často za využití dispergátorů a stabilizátorů suspenze) nelze v běžných podmínkách výroby betonu provést. Je zde ovšem ještě jeden potenciální problém – ne ve všech případech je dodávána suspenze dokonale dispergována a současně i stabilní. Autor se v posledních letech setkal s šesti různými dodávkami suspenzní mikrosiliky. V nejlepším případě byla suspenze stabilní po dobu týdnů, a i po měsících skladování ji pro dokonalou homogenizaci stačilo jen lehce promíchat. V nejhorším případě odsedimentovaly pevné částice suspenze již během několika dnů tak, že tuto suspenzi již téměř nešlo zpětně zhomogenizovat.

## Metakaolin

Metakaolin je umělý produkt vznikající tepelným zpracováním – kalcinací přírodního kaolinu. Při tomto procesu je z kaolinu vypuzena mezimřížková voda a vzniká pucolanicky aktivní látka – metakaolin.

Vlastnosti metakaolinu se pohybují v širším rozmezí než u mikrosiliky, záleží totiž na složení výchozího kaolinu i na teplotě a době kalcinace. Z hlediska HSC lze metakaolin považovat, podobně jako mikrosiliku, za aktivní mikroplnivo. Autor článku nemá s metakaolinem tolik zkušeností jako s mikrosilikou (touto problematikou se u nás dlouhodobě zabývá řada jiných odborníků), nicméně experimenty provedené v posledních letech naznačují, že by metakaolin mohl v HSC plnohodnotně a někdy i s výhodou nahradit mikrosiliku. V tab. 4 je porovnání vlastností dvou variant HSC, který byl současně i SCC (tedy vlastně šlo o HPC) mikrobetonu připraveného na FAST VUT v Brně v roce 2009 pro fyzikální model mostní konstrukce.

Z údajů v tab. 4 stojí za zaznamenání především vyšší spotřeba superplastifikátoru při aplikaci metakaolinu a vyšší krátkodobé (zde sedmidenní) pevnosti betonu s metakaolinem. Zde se zjevně uplatňuje vyšší pucolanická aktivita metakaolinu. Dlouhodobé pevnosti jsou v postatě srovnatelné.

Závěrem k problematice mikroplniv uvádíme praktické poznatky získané při reálné aplikaci metakaolinu v silikátové matici průmyslově vyráběných tenkostěnných prvků pro městské mobiliáře. Zde, v rámci spolupráce na optimalizaci matrice, byla mimo jiné dosud používaná prášková mikrosilika nahrazena metakaolinem S-META 4. Výrobce byla tato změna přijata velmi kladně s tím, že při zachování mechanických parametrů matrice došlo ke zlepšení v následujících oblastech:

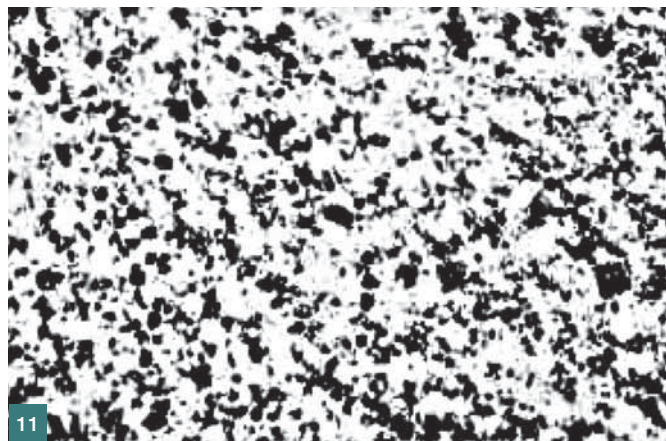
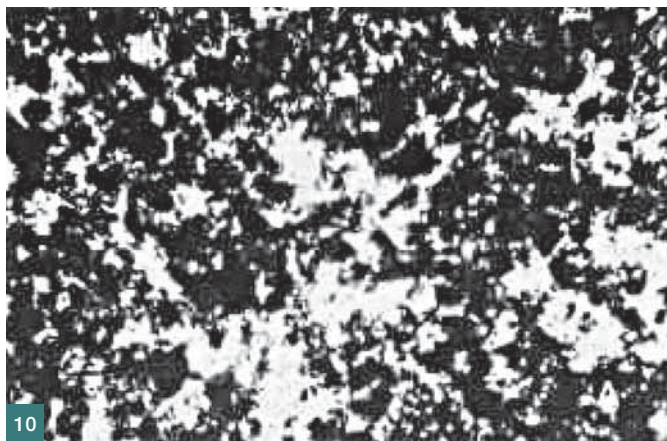
- metakaolin se lépe skladuje – díky vyšší sypané hmotnosti zaujímá méně místa a na rozdíl od práškové mikrosiliky nejeví při dlouhodobém skladování (zatím po nepříliš dlouhou dobu) tendenci k „hrudkování“;
- metakaolin vykazuje menší „prášivost“, než dosud používaná mikrosilika;
- metakaolin se při přípravě betonu lépe disperguje než prášková mikrosilika;
- metakaolin nemění barvu betonu (mikrosilika vinou obsahu uhlíku někdy ano);
- metakaolin je i o něco levnější a je v současnosti produkován přímo v ČR více výrobci.

## Další příměsi

V kompozici HSC lze teoreticky, a někdy i úspěšně prakticky, využít dalších příměsí, jako jsou létavý elektrárenský popílek, či mletá vysokopecní struska.

## Elektrárenský popílek

Autor není příznivcem využití této příměsí v HSC, protože nepřinese obvykle nic, co by nebylo možno zajistit jinak, a to včetně obvyklého argumentu nižší ceny betonu. Popílek jako odpadní materiál totiž obvykle nesplňuje v podmínkách ČR požadavek na stálost kvality. Mimo to mají betony s příměsí popílku i určitá specifika. Patří k nim např. zajímavý jev, kdy čerstvý beton při delším míchání (např. v domíchávači) postupně výrazně zhoršuje svou zpracovatelnost, a to i v případě, že analogický beton bez přídavku popílku se tak nechová. To souvisí zřejmě se skutečností, že duté sférické částice popílku se při míšení za přítomnosti kameniva postupně bortí, a odebírají tak stále více vody ke smočení zvětšujícího se



povrchu těchto částic. Popisovaný jev je pochopitelně zvláště nepříjemný u HSC, které nemají vody nikdy nazbyt.

### Mletá vysokopecní struska

Mletá (odděleně od slinku) vysokopecní struska je technicky velmi zajímavý komponent s podstatně větší pucolanickou aktivitou, než má elektrárenský popílek, a současně i větší než má struska ve směsných cementech. Ta je zde totiž obvykle vzhledem ke své horší melitelnosti hruběji mletá, a tudíž i méně aktivní. Betony využívající ve své kompozici odděleně mletou strusku dosahují poměrně vysokých pevností a vykazují vysokou trvanlivost v některých typech agresivního prostředí – zejména při působení síranů.

Mletá struska je certifikovaný produkt a její kvalita kolísá méně než u elektrárenského popílku. Na rozdíl od něj však není „skoro zadarmo“ a ne vždy se podaří přesvědčit provozovatele betonárny, aby pro mletou strusku uvolnil silo, když už ji „má“ ve směsném cementu.

### PŘÍSDADY (ADITIVA)

Příspěvky, zejména plastifikační jsou v podstatě „povinnou“ součástí HSC betonů. Troufáme si tvrdit, že v posledních desetiletích se technologie obyčejného (tj. nikoli např. lehkého) betonu vyvíjela tak, jak se vyvíjely dostupné přísady. Základní a nejčastěji používanou kategorií přísad jsou ty, které mají za úkol zlepšovat zpracovatelnost čerstvého betonu (nebo snížit poměr voda/cement, a tím zvýšit pevnost betonu, nebo obojí současně).

Tyto přísady byly nejprve nazývány „plastifikátory“, později „superplastifikátory“ nebo dokonce „hyperplastifikátory“, „ztekucovače“, „vodoredukující přísady“ či „silně vodoredukující přísady“ (zde se analogicky v anglosaské literatuře používá zkratka HRWR – High-Range Water Reducer). Důvodem pro tuto terminologickou „pestrost“ byla především snaha výrobců odlišit svůj nový výrobek od starších a konkurenčních výrobků, případně „vědecká“ snaha kategorizovat vše, co se jen trochu kategorizovat dá.

Základní princip účinku všech těchto látek je stejný – **dispergace částic** cementu a případně i příměsí. V cementovém tmelu bez dispergátoru jsou částice elektrostaticky aglomerovány (obr. 10), což zvyšuje jeho vnitřní tření a/nebo je tmel při nadbytku vody nestabilní. Dojde-li k dispergaci částic (obr. 11), vzniká homogennější tmel s vyšší stabilitou a vyšší schopností působit jako „mazivo“ v kompozici čerstvého betonu. V případě HSC je samozřejmě extrémně důležité, jak účinná je ona dispergace, případně jaké další změny v chování čerstvého betonu ji provází.

**Dispergátory** (dovolme si v tomto místě použít tento ná-

zev) lze dělit podle převládajícího chemického složení, či podle principu, díky kterému se dispergace dosahuje. Podle chemického složení lze zmínit zejména (úmyslně uvádíme jen hlavní typy):

- **Ligninsulfonáty (L)** – jde o nejstarší chemický základ, s nízkou účinností – redukce záměsové vody do 10 %, zpomalují tuhnutí a tvrdnutí betonu a mohou i provzdušňovat.
- **Naftaleny** – (sulfonované naftalenformaldehydové kondenzáty – SNF) a **Melaminy** – sulfonované melaminformaldehydové kondenzáty – SMF) případně směsky posledně jmenovaných, jsou účinnější než ligninsulfonáty – redukce záměsové vody do 20 %. Naftaleny mírně zpomalují tuhnutí a tvrdnutí betonu, melaminy nikoli.
- **Polykarboxyláty** či **polykarboxylát-étery (PC, PCE)** jsou nejmodernější i neúčinnější skupinou přísad, zvláště vhodné pro užití v HSC. Způsob jejich působení, vlastnosti i možnosti využití proto budou dále blíže analyzovány.

V běžné vodo-cementové suspenzi jsou elektrické náboje na povrchu částic cementu (např. +Ca ionty a -SiO<sub>2</sub> ionty) uspořádány tak, že se částice elektrostaticky přitahují a dochází k jejich aglomeraci (obr. 10 a 12). Voda hůře proniká k povrchu cementu, který se tak podílí nedokonalě na pohyblivosti čerstvého betonu a je omezen i jeho zpevňovací potenciál.

Jsou-li v kompozici betonu použity L, SNF a SMF dispergátory, jejich záporně nabitě molekuly se přichytí na povrchu cementu, jehož zrna jsou pak obklopena zápornými náboji – dochází k elektrostatickému odpuzování a dispergaci (obr. 13).

Molekula PC či PCE dispergátoru sestává obvykle z páteřního řetězce nesoucího záporný náboj a elektricky neutrálních bočních řetězců. Páteřní řetězec se prostřednictvím záporného náboje přichytí na zrnech cementu s tím, že boční řetězce jsou „vystrčeny“ venkovním směrem. Dochází tak k mechanickému tzv. „stérickému“ odpuzování jednotlivých zrn cementu (obr. 14). Jde o velmi efektivní proces, díky kterému mohou být PC a PCE dispergátory velmi účinné.

Jak je z obr. 14 zřejmé, stérické odpuzování může být doplněno i elektrostatickým odpuzováním v tomto smyslu aktivních skupin. Molekulární struktura PC a PCE dispergátorů může být velmi pestrá a variabilní [8 a 9]. K páteřní makromolekule tvořené obvykle kyselinou polymetakrylovou mohou být připojeny boční řetězce různé délky. Ty jsou obvykle tvořeny hydrofilními oxyethylenovými (EO) makromolekulami. V případě polykarboxylátů platí, že může být cíleně měněna délka páteřní makromolekuly, délky bočních EO řetězců, případně i druh „naroubovaných“ afinních skupin

Obr. 10 Aglomerované částice cementu v běžné vodní suspenzi | Fig. 10 Agglomerated particles of Portland cement in regular water suspension

Obr. 11 Dispergované částice cementu ve vodní suspenzi s dispergátorem | Fig. 11 Dispersed particles of Portland cement in water suspension with dispersing agent

Obr. 12 Elektrostatické přitahování zrn cementu bez přítomnosti dispergátoru | Fig. 12 Electrostatic attraction of Portland cement grains – without dispersing agent

Obr. 13 Elektrostatické odpuzování zrn cementu za přítomnosti dispergátoru | Fig. 13 Electrostatic repulsion of Portland cement grains – with dispersing agent

Obr. 14 Sterické odpuzování zrn cementu za přítomnosti polykarboxylátového dispergátoru | Fig. 14 Steric repulsion of Portland cement grains – with polycarboxylate dispersing agent

Obr. 15 Přehled možných skupin tvořících makromolekulu polykarboxylátu | Fig. 15 Overview of possible groups applicable in polycarboxylate molecule

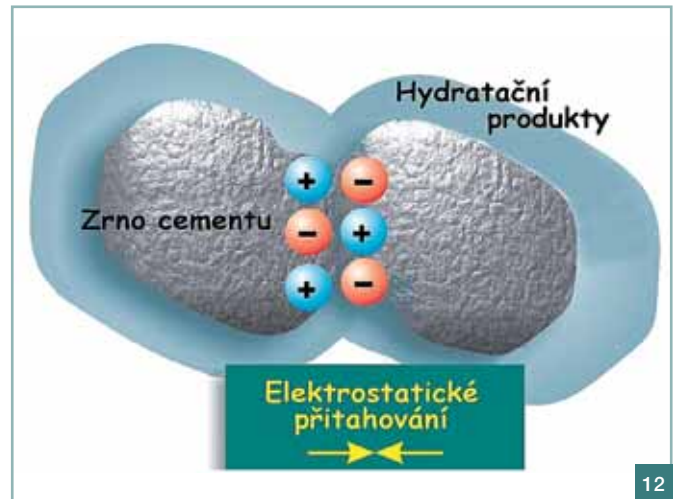
Obr. 16 Příklad molekulární struktury různých polykarboxylátů podle Yamady | Fig. 16 Example of molecular structure of different polycarboxylate agents according to Yamada

– viz schematické znázornění variant molekulární struktury na obr. 15 a 16. Z uvedeného je zřejmé, že vlastnosti PCE přísad mohou silně kolísat. Experimentálně bylo zjištěno [9], že plastifikační účinnost PCE roste s délkou bočních EO řetězců. Naopak kratší řetězce znamenají delší dobu zpracovatelnosti s takovým PCE připraveným betonem. Pokud použijeme makromolekulární řetězce bez vůči slinkovým minerálům cementu afinních skupin, získáme především stabilizující přísadu. PC a PCE přísady tak mají v betonu obvykle více funkcí. Může jít zejména o funkce:

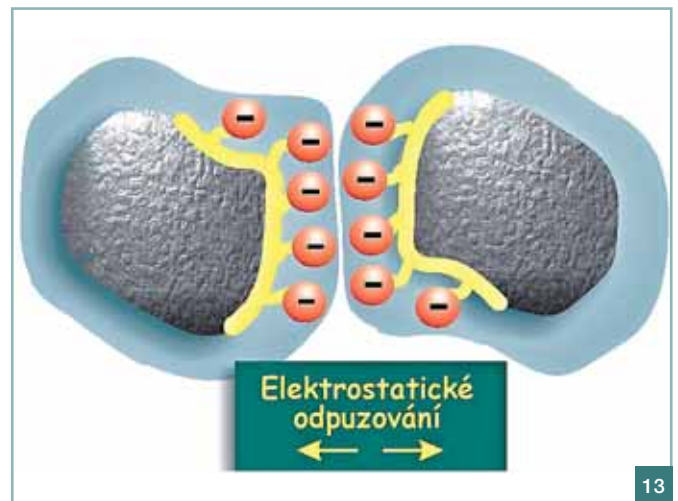
- dispergační,
- stabilizační (stabilizace čerstvého betonu),
- regulace doby zpracovatelnosti čerstvého betonu,
- regulace rychlosti tvrdnutí betonu.

V podstatě tedy můžeme hovořit o **polyfunkčních přísadách**. Jsme toho názoru, že je pro tyto moderní přísady vhodnější používat tento výraz, než ony super., hyper.. a případně jiné předpony a výrazy – viz dříve. Již bylo řečeno, že vlastnosti polyfunkčních přísad mohou silně kolísat, přičemž se mění i charakter jejich spolupráce s cementem, případně i některými příměsmi v cementu. Proto byla definována veličina nazvaná jako „kompatibilita“ [10], charakterizující kvalitu spolupráce přísada – cement.

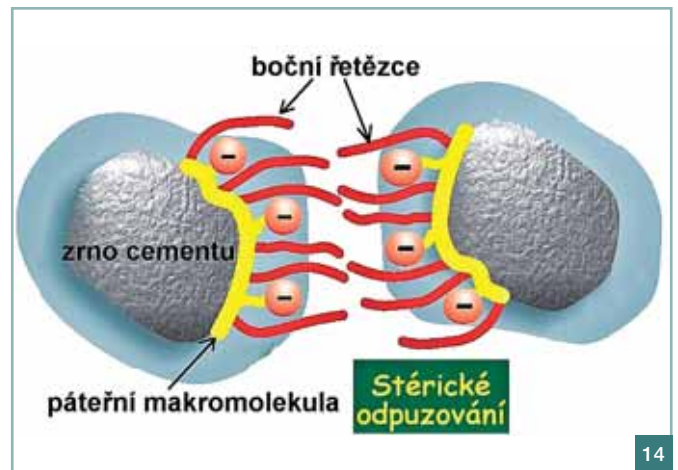
Při vývoji HSC betonů pro mostní konstrukce, prováděném v uplynulých letech na FAST VUT v Brně, jsme nejprve postupovali tak, že jsme pro požadovanou třídu betonu a další podmínky aplikace (používaný cement, požadovaná konzistence čerstvého betonu atd.) hledali vhodnou polyfunkční přísadu. Např. na obr. 17 je znázorněn vývoj konzistence vybraných variant mikrobetonu stejného poměrového slože-



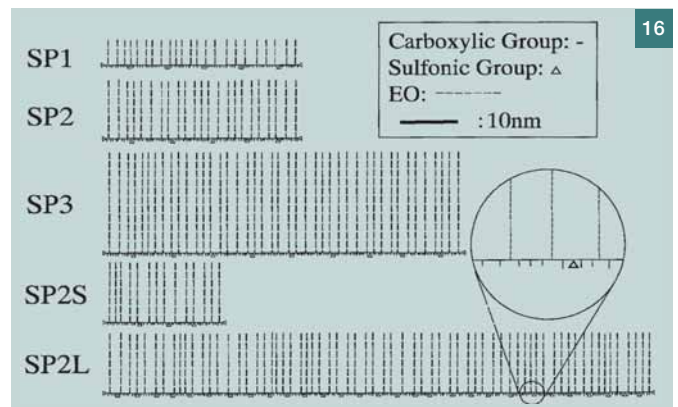
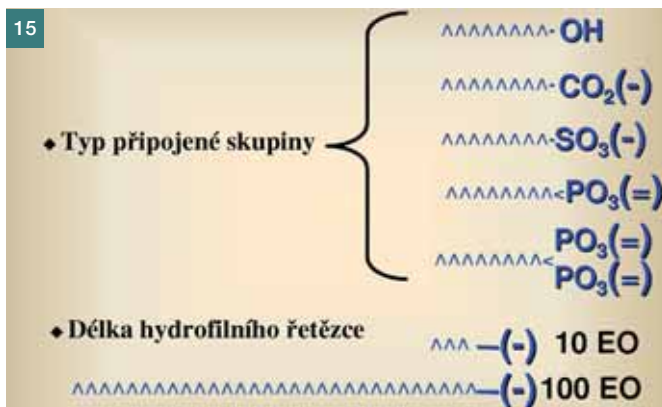
12



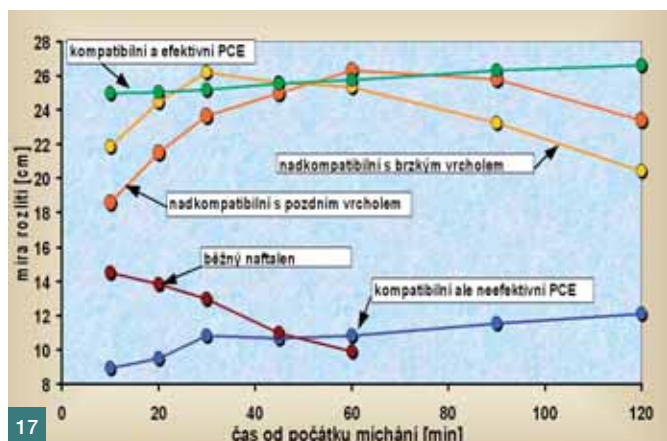
13



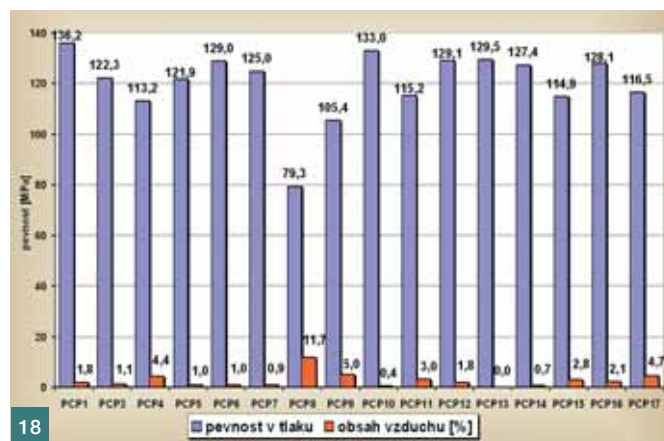
14







Obr. 17 Reologické chování cementového tmele s různými polykarboxyláty ■ Fig. 17 Rheological behavior of cement paste with different polycarboxylate agents



Obr. 18 Pevnosti a provzdušnění mikrobetonů s různými polykarboxyláty ■ Fig. 18 Strength and air content of microconcretes with different polycarboxylate agents

Obr. 19 Možnosti zjednodušení kompozice HPC či HSC ■ Fig. 19 Possibilities for simplifying of composition of HPC or HSC



ni ovšem s různou plastifikační či polyfunkční přísadou. Podobně jsou na obr. 18 jsou uvedeny pevnosti v tlaku srovnatelných kompozitních variant. Domníváme se, že z uvedených případů je zcela zřejmé, že na výběru vhodného typu polyfunkční přísady pro daný HSC beton skutečně záleží.

V současné době však díky spolupráci s předními dodavateli stavební chemie můžeme jít ještě dále – pro daný typ betonu lze vhodnou polyfunkční přísadu cíleně navrhnout! Moderní polyfunkční přísady jsou totiž nyní jen zřídka tvořeny jednou makromolekulární bází. Naopak jsou obvykle tvořeny jejich směskami navrženými tak, aby tyto vykazovaly přijatelné vlastnosti buď zcela univerzálně, nebo pro určitou širší skupinu aplikačních případů (typicky pro transportbeton nebo pro prefabetony). V posledních letech byla na FAST VUT v Brně vyvinuta metodika umožňující otestovat parametry jednotlivých makromolekulárních bází a zkom-

binovat je tak, aby výsledná směs byla optimální pro určitý požadovaný typ betonu. V tomto článku nelze prezentovat všechny detaily týkající se zmíněné metodiky či výchozího spektra bází, lze však uvést dva konkrétní úspěšné případy tohoto přístupu.

První je, v našem dřívějším článku již zmíněný, případ HSC betonu pro pylon mostu přes Odrů a Antošovické jezero. Zde se díky speciálně vyvinuté směsné polyfunkční přísadě Stachment St 2180 podařilo navrhnout HSC s velmi dlouhou dobou čerpatelnosti, podrobnosti lze najít v [1].

Druhý příklad je jen z nedávné doby. Odběratel zde definoval zadání zhruba takto: Je třeba najít vhodnou směs makromolekulárních bází tvořících polyfunkční přísadu, která by u transportbetonu třídy C35/45 při využití CEM I 42,5R Mokrá zajistila jeho stabilitu a čerpatelnost po dobu minimálně 60 lépe až 90 min. Dále bylo specifikováno rámcové složení betonu (tab. 5). Bylo zřejmé, že jde o beton s vysokým podílem HDK a poměrně malým obsahem písku. Připravit takový beton (při daném obsahu cementu) s běžnými dispergátory je téměř nemožné. Buď by nebyl dostatečně pohyblivý, nebo by byl (při vyšších dávkách přísad) zase nestabilní, o dlouhodobé čerpatelnosti ani nemluvě. Přesto se podařilo vyvinout polyfunkční přísadu (označme ji jako PFX, jelikož ještě nemá komerční název), která zadaný úkol umožnila splnit, což vyplývá z parametrů v tab. 5. Nejenže se podařilo dosáhnout požadovaného, ale vyrobený beton, původně koncipovaný jako C35/45, odpovídal v podstatě vysokopevnostnímu betonu C60/75, tj. o čtyři pevnostní třídy výše. Zbývá ještě dodat, že čerstvý beton byl naprosto stabilní a nelepkavý (což byl někdy problém polykarboxylátů první generace).

Je tedy zřejmé, že složení HSC a HPC betonů lze dosti výrazně zjednodušit, což pro názornost prezentujeme pomocí obr. 19, jenž vznikl modifikací obr. 1 z úvodu článku.

Tab. 5 Složení a vlastnosti betonu s experimentální polyfunkční přísadou PFX ■ Tab. 5 Concrete mix composition and properties of concrete with experimental multifunctional additive PFX

Složka	Dávka [kg/m <sup>3</sup> ]
CEM I 42,5 R Mokrá	380
Voda celková	152
TDK 0/4 mm	780
HDK 4/8 mm	220
HDK 8/16 mm	880
Polyfunkční přísada Stachment PFX	5,4 <sup>1)</sup>
<b>Vlastnosti</b>	
Sednutí kužele po 90 min [mm]	180
Pevnost v tlaku 24h [MPa]	37,1
Pevnost v tlaku 28d [MPa]	81,5

<sup>1)</sup> Při běžné výrobě lze očekávat snížení dávky na cca 3,5 kg

## Literatura:

- [1] Terzijski I.: Mosty z vysokopevnostního betonu v České republice, Beton TKS 4/2010, s. 4–13
- [2] ČSN EN 206-1. Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. ČSN, Praha, 2001
- [3] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, 2006
- [4] ČSN EN 1992-2 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady, 2006
- [5] Constitutive modeling of high strength/high performance concrete. *fib* bulletin 42., 2008
- [6] Aitcin P.-C.: Vysokohodnotný beton. IC-ČKAIT, 2005
- [7] Holland T. C.: Silica fume User's Manual. Silica Fume Association. Lovettsville. 2005
- [8] Yamada K. at all: Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer. *Cement and Concrete Research* 30 (2000) p. 197–207, Pergamon Press
- [9] Winnefeld F. at all: Effects of the molecular architecture of comb-shaped superplasticizers on their performance in cementitious systems. *Cement & Concrete Composites* 29 (2007) 251–262, Elsevier
- [10] Terzijski I.: Compatibility of Components of High and Ultra High Performance Concrete. Proc. of Inter. Symp. on Ultra High Performance Concrete. p. 175–186, Kassel 2004
- [11] Mec P.: Studium vlastností metakaolínů vyrobených z alternativních surovin, FAST VŠB-TU Ostrava, 2010

## DALŠÍ PŘÍSDADY

Z dalších přísad využitelných v HSC lze jmenovat zejména **retardéry**, resp., zpomalovače tuhnutí. Lze je použít tehdy, je-li vyžadováno vyšší oddálení tuhnutí, než lze docílit pouze polyfunkčními PC a PCE přísadami – viz [1]. Retardéry ale mohou mít i jinou funkci: zvyšují počet kondenzačních jader v tuhoucím cementovém tmelu, což se projevuje zvýšením dlouhodobých pevností HSC. Uvedený účel použití má však obvykle smysl u vysokopevnostních betonů s pevnostmi nad 100 MPa.

U dnešních moderních betonů (i HSC) se často požaduje omezené smršťování. Toho se nejčastěji dosahuje protismršťovacími přísadami na bázi vícemocných alkoholů. Problematice omezení smrštění se budeme podrobněji věnovat v druhém díle tohoto článku. Na tomto místě pouze upozorníme na skutečnost, že tyto protismršťovací přísady často snižují pevnosti HSC.

Teoretické podklady pro presentované výsledky byly získány za finančního přispění MŠMT ČR, v rámci výzkumného záměru MSM 0021630519 „Progresivní spolehlivé a trvanlivé nosné stavební konstrukce“ a za finančního přispění MPO ČR, v rámci projektu FI-IM5/128 „Progresivní konstrukce z vysokohodnotného betonu“.

Doc. Ing. Ivailo Terzijski, CSc.

Ústav betonových a zděných konstrukcí  
Fakulta stavební Vysokého učení technického v Brně  
e-mail: terzijski.i@fce.vutbr.cz, tel.: 541 147 850



Formujeme  
beton

## RECKLI®-Strukturální matrice pro všechny oblasti betonových staveb

Jak pro prefabrikáty, tak pro monolitní stavby.

Vyžádejte si náš nový katalog s četnými referenčními objekty.



### RECKLI GmbH

Eschstraße 30 · 44629 Herne · Telefon +49 2323 1706-0 · Telefax +49 2323 1706-50 · www.reckli.de · info@reckli.de  
Zastoupení v Praze: Mgr. Iveta Heczková · Telefon 724 888 718 · www.reckli.cz · iheczkova@reckli.com