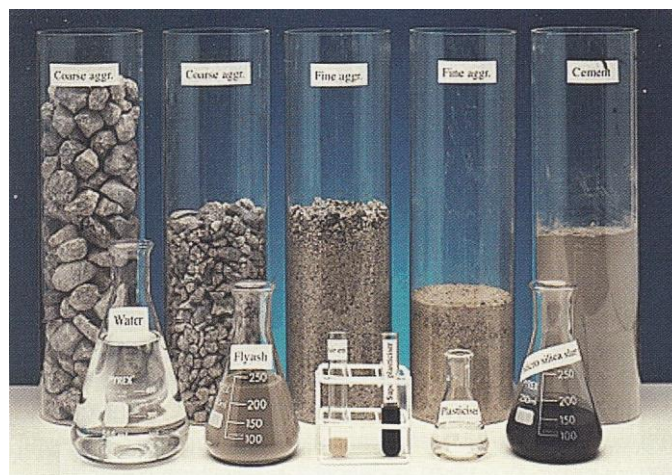


Složení, návrh a příprava vysokopevnostního a ultravysokopevnostního betonu

Rešeršní článek pro grant SGS 2011 :

Betony a cementové kompozity s řízenými vlastnostmi



autor : Ing. Martin Tipka

Praha 2011

OBSAH :

ABSTRAKT	3
1 ÚVOD	3
2 SLOŽENÍ BETONOVÉ SMĚSI HSC A UHSC	4
2.1 Výběr složek betonové směsi HSC a UHSC	5
2.2 Druh a význam příměsí pro vysokohodnotný beton	9
Cement	5
Voda	6
Plastifikátory, superplastifikátory a ostatní přísady	6
Kamenivo, mikrokamenivo a jemnozrnné minerální příměsi	7
Vláknitá výztuž	9
3 NÁVRH RECEPTURY VYSOKOPEVNOSTNÍHO BETONU	14
4 PŘÍPRAVA, ZPRACOVÁNÍ A OŠETŘOVÁNÍ HSC	16
5 ZÁVĚR	18
LITERATURA	18

Abstrakt :

Rešerše se zabývá okolnostmi návrhu receptury vysokopevnostního (HSC = high-strength concrete) a ultravysokopevnostního betonu (UHSC = ultra-high-strength concrete). Upozorňuje na základní odlišnosti těchto kompozitů od běžných betonů a odkrývá úskalí spojená s jejich návrhem. Autor věnoval pozornost popisu jednotlivých složek receptury, včetně jejich kvality a přibližného rozsahu dávkování. Samostatná kapitola je věnována jemnozrnným příměsím, které jsou zásadní, pro návrh směsi takových kompozitů. Pro ilustraci je v článku popsána jedna z dříve publikovaných metod návrhu receptury vysokopevnostního betonu. Následuje popis přípravy, zpracování a ošetřování čerstvého betonu. Cílem článku bylo shrnout základní poznatky o návrhu a přípravě cementového kompozitu ultravysokých pevností, seznámit čtenáře se základními aspekty spojenými s tímto návrhem a ilustrovat celkovou náročnost takového postupu.

1. Úvod

Betonové a železobetonové konstrukce patří v současnosti k nejrozšířenějším druhům stavebních konstrukcí. Mezi přednosti betonu jako stavebního materiálu patří dobré mechanické vlastnosti, možnost variability návrhu a vysoká trvanlivost v porovnání s ostatními konstrukčními materiály. Většina železobetonových konstrukcí, se kterými se setkáváme ve svém okolí, je z běžného betonu, jehož výroba je již detailně propracována a nepředstavuje pro výrobce betonu zásadní problém.

S rostoucími požadavky na trvanlivost konstrukcí a trvale udržitelný rozvoj se v poslední době dostávají do popředí také konstrukce z vysokohodnotného betonu (HPC = high-performance concrete). Pojem vysokohodnotný beton označuje kompozitní materiál, vyznačující se oproti běžnému betonu určitými specifickými vlastnostmi. Jako hlavní zástupce jmenujme vysokopevnostní beton (HSC), vykazující mnohdy až několikanásobně vyšší pevnosti než běžný beton, nebo samozhutnitelný beton (SCC). Důvody použití vysokohodnotného betonu jsou kromě jeho vysoké pevnosti také zvýšená tuhost, trvanlivost, odolnost vůči působícím činitelům a optimalizované reologické vlastnosti. Použití vysokopevnostního betonu umožňuje zmenšování průřezů nosných železobetonových prvků, úsporu výztuže, díky vyššímu modulu pružnosti snížení deformací a v neposlední řadě možnosti vytváření nových konstrukčních řešení. V současnosti se nejčastěji používá pro konstrukce mostů a výškových objektů.

Následující části se budou věnovat čistě vysokopevnostnímu (HSC) a ultravysokopevnostnímu betonu (UHSC), ačkoli nárůst pevnosti s sebou automaticky přináší zlepšení i dalších vlastností.

2. Složení betonové směsi HSC a UHSC:

Složení betonové směsi má zásadní význam pro vlastnosti výsledného betonového prvku. Čím kvalitnější materiál chceme připravit, tím větší pozornost musíme věnovat druhu, kvalitě a poměru jednotlivých složek. Pro přípravu běžného betonu můžeme použít základní, místně dostupné složky, jejichž množství a vzájemný poměr lze stanovit dle jednoduchých postupů, ověřených dlouholetou praxí. Při výrobě vysokohodnotného betonu se možnosti výběru značně zužují, základní složky musejí vyhovovat přísným kritériím a pro dosažení požadovaných vlastností betonové směsi i výsledného betonu musejí být doplňovány řadou přísad a příměsí. Vybrané složky se nesmí vzájemně negativně ovlivňovat ani vyvolávat nežádoucí chemické reakce. Volba složek tedy nepředstavuje pouze výběr nejkvalitnějších surovin, nýbrž vyváženou kombinaci dostupných komponentů, které vytvoří co nejkvalitnější kompozit.

Betony lze na základě své pevnosti rozdělit do následujících 3 skupin :

- **betony běžných pevností** - třídy betonu C8/10 až C50/60
- **vysokopevnostní betony (HSC)** - třídy betonu C55/67 až C100/115, obecně beton s tlakovou pevností do 150 MPa
- **ultravysokopevnostní betony (UHSC)** - beton s tlakovou pevností přes 150 MPa

Pro přechod od obyčejného betonu k vysokopevnostnímu je nutné redukovat množství přirozených nedokonalostí materiálu a vytvořit celkově homogennější strukturu. Tento proces se neobejde bez zásahu do receptury a technologie výroby.

Pevnost betonu je obecně dána jeho pórovitostí a pevností jeho jednotlivých komponentů, neboť iniciátorem poruchy je vždy nejslabší článek kompozitu. Pórovitost má negativní vliv na pevnost cementového tmele obklopujícího zrna kameniva. Z toho důvodu se snažíme, aby struktura vysokopevnostního betonu byla co nejhutnější a počet uzavřených vzduchových pórů byl co nejmenší. Toho lze obecně dosáhnout snížením hodnoty vodního součinitele. Tato hodnota však musí zůstat dostatečně vysoká, aby zabezpečila krystalizaci hydratačních

produktů. Klesající vodní součinitel navíc negativně ovlivňuje konzistenci a zpracovatelnost čerstvého betonu, kterou je tak nutné zajistit jiným způsobem (viz superplastifikátory).

Při dostatečné pevnosti cementového tmelu se trhлина šíří zrny kameniva nebo tranzitní zónou (oblast na rozhraní cementového tmelu a zrn kameniva). Z toho důvodu je potřeba při návrhu vysokopevnostního betonu vybírat kvalitní kamenivo, vyšší pevnosti, s minimem defektů. Důležitým parametrem, týkajícím se kameniva, je také jeho zrnitost. Pro přípravu vysokopevnostních a ultravysokopevnostních betonů je potřeba optimalizovat křivku zrnitosti a přihlížet k tvarovému indexu zrn použitého kameniva. Pevnost tranzitní zóny lze zlepšit použitím ultrajemných příměsí, které z tranzitní zóny vytlačují přebytečnou vodu a umožňují tak vytvoření její silnější mikrostruktury.

Kromě složení má na pevnost výsledného kompozitu vliv také způsob zpracování a ošetřování čerstvého betonu, jak bude objasněno z závěrečné kapitole.

2.1 Výběr složek betonové směsi HSC a UHSC

Jak bylo v předchozí kapitole v krátkosti ukázáno, příprava a výroba vysokopevnostního cementového kompozitu vyžaduje sofistikovanější výběr složek i výrobních postupů. Zásadní vliv na vlastnosti výsledného betonového prvku má tedy složení čerstvého betonu. Mezi v současnosti používané složky patří cement, voda, kamenivo, mikrokamenivo, superplastifikační a modifikující přísady, jemnozrné minerální a latentně hydraulické příměsí a v případě ultravysokopevnostních betonů i vláknitá výztuž.

Cement :

Cement představuje základní složku pojivového systému betonu. Pro výrobu vysokopevnostních betonů se používá portlandský (CEM I) nebo struskový portlandský cement (CEM II) třídy 42,5 R nebo 52,5 R. Při výběru měrného povrchu cementu (v ČR 300-550 m²/kg) je nutné volit optimální hodnotu, umožňující dosažení požadované pevnosti i zpracovatelnosti (při použití třídy cementu 52,5 obvykle dosahujeme menšího ztekucení). Důležitou roli hraje charakteristika slínku a množství obsaženého síranu vápenatého, sloužícího jako regulátor tuhnutí. Pro snadnější ovlivnění reologie se doporučuje cement s nižším obsahem trikalciem aluminátu C₃A (do 10%), na němž závisí mechanismus a kinetika prvních reakcí tuhnutí. Některé druhy cementů mohou obsahovat větší množství minerálních příměsí nebo i superplastifikátor v tuhé formě. Množství cementu představuje u HSC 15-22% hmotnosti betonové směsi, což odpovídá dávce 375-550 kg/m³ betonu. V ojedinělých

případech lze použít i dávky větší (do 700 kg/m³). Kromě pevnostní třídy a měrného povrchu cementu je důležitým parametrem také množství vody potřebné pro hydrataci (vodonáročnost cementu).

Voda :

Voda plní v betonové směsi dvojí funkci. Je iniciátorem hydratačního procesu cementu a její množství má zásadní vliv na konzistenci a zpracovatelnost směsi. Množství vody v běžné betonové směsi tvoří 6-7,2 %, což představuje 150-180 kg/m³ betonu a vodní součinitel okolo 0,5. Vysoké pevnosti vysokopevnostních betonů je dosaženo snížením obsahu vody na minimální hodnotu, která je potřebná k hydrataci cementových zrn. Veškerá voda nespotřebovaná hydratací totiž snižuje výslednou pevnost betonu. U vysokopevnostních betonů se vodní součinitel pohybuje v rozmezí 0,25-0,4, pro vysoké pevnosti je tato hodnota stlačena dokonce pod 0,2. Např. pro ultravysokopevnostní betony s tlakovou pevností přes 150 MPa je potřeba držet množství záměsové vody v rozsahu 120-130 l/m³ betonu. Požadované reologie směsi je v takovém případě dosaženo větší dávkou superplastifikátoru. Při dávkování je nutné snížit množství vody o hodnotu obsaženou v dávce tekutých superplastifikátorů. Také je potřeba přihlížet k vlhkosti a nasákavosti kameniva, neboť změna vlhkosti písku o 1% může znamenat změnu vodního součinitele o 2 setiny, což se u vysokopevnostního betonu projevuje výraznou změnou pevnosti i zpracovatelnosti. Nezanedbatelným faktorem je také kvalita použité vody. Je potřeba se vyvarovat vodě se sníženým (hladové vody, destilovaná voda) i příliš zvýšeným obsahem iontů (minerální vody). Jako ideální se jeví voda pitná.

Plastifikátory, superplastifikátory a ostatní přísady :

Snížením hodnoty vodního součinitele dochází k rychlejšímu tunutí čerstvého betonu a ztrátě zpracovatelnosti. Aby bylo možné s betonovou směsí manipulovat dle potřeby, je nutné zajistit požadovanou konzistenci jinými prostředky. Za tímto účelem se do betonu přidávají **plastifikátory**. Plastifikátory pracují na principu dispergace částic cementu, případně příměsí a umožňují snížit hodnotu vodního součinitele při zachování zpracovatelnosti, nebo zlepšit zpracovatelnost při zachování vodního součinitele. Používáním dřívějších levných plastifikátorů na bázi lignosulfonátů bylo možné snížit obsah vody v čerstvém betonu pouze o 5-10% a tím vytvořit betony s tlakovou pevností max. 50-60 MPa. Větší redukce vody se již projevovala nežádoucími vedlejšími účinky.

Postupem času byly vyvinuty přísady umožňující snížení vodního součinitele pod hodnotu 0,2, při zachování zpracovatelnosti 45-90 min. Tyto přísady se označují jako **superplastifikátory**. Superplastifikátory vstupují do hydratace cementu, podporují lepší rozptýlení cementových zrn a ovlivňují rozpustnost síranů, které zodpovídají za reologii a kompatibilitu směsi. V současnosti existují 4 druhy superplastifikátorů : sulfonáty naftalenu, sulfonáty melaninu, lignosulfonáty s velmi malým obsahem sacharidů a polykarboxyláty (PCE superplastifikátory). Polykarboxyláty se jeví jako nejúčinnější, vyžadují nejmenší dávky, při jejich použití je však obtížnější dosáhnout správného provzdušnění betonu. Důležitá pro účinnost superplastifikátorů je jejich kompatibilita s použitým druhem cementu a ostatními přísadami. Kompatibilitu je možné zjistit sledováním reologických charakteristik, odzkoušených na pastě, např. metodou minikužele, Marchova kužele aj. Superplastifikátory se v případě HSC používají v množství 0,5-3,0% hmotnosti cementu, což odpovídá dávce 3-18 kg/m³ betonu. V případě ultravysokopevnostních betonů může dosáhnout toto množství až 5% hmotnosti cementu, tedy okolo 30 kg/m³ betonu. Nejvhodnější pro stanovení dávky superplastifikátoru je nalezení tzv. bodu nasycení, tj. hranice, při jejímž překročení již rostoucí dávka superplastifikátoru nemá vliv na reologii směsi.

Kromě superplastifikačních přísad se mohou používat také další **chemické modifikující přísady** (provzdušňující, odpěňovací, mrazuvzdorné, retardéry a urychlovače tuhnutí), regulující kinetiku hydratace a reologické vlastnosti směsi. Jejich konkrétní množství a účinnost je však nutné odvodit experimentálně pro každou recepturu individuálně.

Kamenivo, mikrokamenivo a jemnozrné minerální příměsi :

S rostoucí pevností betonu se nejslabším článkem kompozitu stává **kamenivo**. Kamenivo do HSC a UHSC je potřeba používat pevné, kompaktní, s minimem dislokací. Z petrografického hlediska volíme horniny vysoké pevnosti, jako vápenec, žula, syenit, gabro, diorit, diabas nebo čedič. Při potřebě extrémně vysoké pevnosti se používá umělé kamenivo (např. tavený bauxit) nebo extrémně pevné kamenivo přírodní (např. korund). Pevnost kameniva by měla být alespoň 1,5x větší než pevnost zamýšleného betonu. Z důvodu minimalizace dislokací by bylo nasnadě používat kamenivo těžené, horniny vysokých pevností lze však většinou získat jen jako drcené. Povrch zrn kameniva musí být kvalitní, zbavený vrstviček jílu a slínu. Při výrobě vysokopevnostních betonů se obecně používá menších frakcí kameniva oproti běžnému betonu, max. zrno hrubé frakce kameniva by nemělo přesáhnout 10-12 mm. Větší zrna vyvolávají nerovnoměrnost betonu, koncentrace napětí při zatížení a jsou náchylnější k výskytu dislokací. To vše vede ke snižování pevnosti betonu. Vhodný tvar zrn kameniva je

kulovitý nebo kubický, s tvarovým indexem blízkým 1. Zásadní vliv na soudržnost s cementovým kamenem má zrnitost kameniva. Pevnost betonu roste s jeho hutností, mezerovitost kameniva by proto měla být co nejmenší (doporučená mezerovitost kameniva v setřeseném stavu menší než 34%). Z toho důvodu je zapotřebí při návrhu receptury vysokopevnostních betonů používat kamenivo s optimalizovanou granulometrickou křivkou. K tomuto účelu je možné použít např. Fullerův či Bolomeyův model zrnitosti, popisující minimálně mezerovitou látku s přibližně kulovými zrny, nebo některý z dostupných programů, simulujících možné uspořádání různě velkých částic v 3D prostoru. Na druhou stranu s rostoucí hutností čerstvého betonu klesá jeho zpracovatelnost. V tomto případě je nutné teoretické vyladění čáry zrnitosti korigovat experimentálně. Vzhledem k předpokladu použití jemnozrnných složek plniva se preferuje použití drobné frakce kameniva (0-4 mm), blížící se horní hranici zrnitosti (modul jemnosti 2,7-3). U vysokopevnostních a ultravysokopevnostních malt lze vhodně uplatnit těžký křemičitý písek. Celkové doporučené množství kameniva (obecně 70-75% objemu betonu) pro HPC nelze jednoznačně určit, závisí na množství použitého cementu a jemnozrnných minerálních příměsí a zvoleném max. zrnu kameniva. Poměr zastoupení jednotlivých frakcí vychází z optimalizované křivky zrnitosti.

Oproti běžným betonům je křivka zrnitosti HSC doplněna o nejjemnější frakce, plnící funkci **mikroplniva**. Jedná se o velmi jemné částice (do 0,125mm), které působí jako filler mezi hrubšími zrny kameniva. Optimální poměr jemných frakcí lze stanovit vážením zvládnuté směsi, která má mít co největší hmotnost. Jako mikrokamenivo se používá mikromletý vápenec, čedičový a granodioritový prach nebo křemenná moučka. Množství mikroplniva závisí na skladbě zrnitosti hrubších frakcí kameniva. Do budoucna se jako vhodné jeví nanokompozity s mikrovlákny.

Funkci mikroplniva často plní také **jemnozrnné minerální příměsí** jako křemičitý úlet, vysokopecní mletá struska, jemný elektrárenský popílek nebo metakaolín. Naprostá většina dnes používaných příměsí je umělých, vznikajících jako vedlejší produkt jiné průmyslové výroby. Jemnost těchto produktů (velikost částic se pohybuje v rozsahu 0,1-10 μ m) má příznivý vliv na pevnost tranzitní zóny, hutnost mikrostruktury a zpracovatelnost. Většina těchto materiálů se kromě minimálních rozměrů zrn vyznačuje latentně hydraulickými a pucolánovými vlastnostmi, tj. v přítomnosti vody a hydroxidu vápenatého se podílejí na tvorbě CSH gelu, podobně jako cement. Z toho důvodu se u vysokopevnostních betonů část cementu těmito příměsemi nahrazuje. Pro účinnost příměsí je rozhodující jejich měrný povrch, který se druh od druhu příměsí může výrazně lišit. Zatímco používaná mletá vysokopecní struska má měrný povrch pouze 450-600 m²/kg, u křemičitých úletů tyto

hodnoty dosahují 15000-25000 m²/kg. Výběr druhů a množství příměsí je jedním z nejsložitějších problémů návrhu receptury vysokohodnotných betonů (minerálním příměsím je věnována celá následující kapitola). Obecně lze říci, že při výrobě vysokopevnostních betonů se jemnozrnné minerální příměsi používají v dávce 10-30% hmotnosti cementu, což v případě UHSC může představovat až 200 kg křemičitého úletu na 1 m³ čerstvého betonu (běžná dávka do 10% hmotnosti cementu). Příměsi lze používat jednotlivě nebo vzájemně kombinovat. V takovém případě bývá zvykem, že jednou z nich je křemičitý úlet, neboť se jeví z hlediska nárůstu pevnosti jako nejúčinnější. Použití minerálních příměsí usnadňuje dosažení vhodné reologie, šetří spotřebu cementu i plastifikátorů.

Vláknitá výztuž :

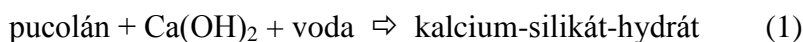
Použití **vláknité výztuže** má své opodstatnění jen u některých druhů vysokohodnotných betonů. Vláknitá výztuž se do kompozitu přidává za účelem zvýšení pevností v tahu za ohybu i v tlaku a omezení křehkosti materiálu (zvýšení duktility). Běžné vysokopevnostní betony s tlakovou pevností do 150 MPa se s úspěchem vyrábí i bez aplikace vláknité výztuže, naopak ultravysokopevnostní betony se již bez tohoto komponentu neobejdou. Vlákna se používají jak minerální (ocelová), tak organická (PVA, karbonová), nejčastěji v podobě rozptýlené mikrovláknité výztuže. Rozhodující pro účinnost vláken je jejich pevnost, tvar, štíhlostní poměr (poměr délky a průměru vlákna) a objemové zastoupení v betonu (až 2%). Na rozdíl od běžných vláknitých a drátkobetonových konstrukcí se v případě ultravysokopevnostních betonů používají přímá krátká vlákna a mikrovlákna, příp. jejich kombinace. Pevnost vláken dosahuje až 2500 MPa a jejich hmotnostní zastoupení se v případě ocelových vláken pohybuje v rozmezí 75-200 kg/m³ betonu. Podmínkou správného působení vláken je jejich dostatečné kotvení v betonové matici, které je v případě krátkých vláken podmíněno hlavně dostatkem cementu v cementovém tmelu.

2.2 Druh a význam příměsí pro vysokohodnotný beton

Příprava směsi vysokopevnostních betonů vyšších pevností (pevnost v tlaku přes 100 MPa) je bez použití jemnozrnných minerálních příměsí velmi obtížná. Naprostá většina dnes používaných příměsí vzniká jako odpadní produkt při výrobě jiných surovin, přírodní pucolány se již používají výjimečně, zvláště pro výrobu vysokohodnotného betonu. V dřívější době byly tyto vedlejší produkty bez využití ukládány na skládky nebo dokonce vypouštěny

do atmosféry. Až s příchodem vysokohodnotných betonů našly své uplatnění a dokonce komerční využití.

Jemné minerální příměsi mohou v betonové směsi plnit dvojí úlohu: Díky své jemné zrnitosti plní funkci **mikroplniva**, a doplňují zrnitostní křivku kameniva o nejjemnější frakci. Tím se struktura betonu stává hutnější, beton je díky menší pórovitosti trvanlivější a odolnější vůči chemické korozi. Také se zvyšuje jeho vodonepropustnost. Mikročástice mají příznivý vliv na pevnost tranzitní zóny (přechodová oblast mezi cementovou pastou a kamenivem), z níž vytlačují vodu, která se může následně účastnit probíhající hydratace. Toho všeho je dosaženo při zachování zpracovatelnosti betonové směsi. Současně mohou minerální příměsi sloužit jako **náhrada části cementu**. Většina příměsí se řadí mezi pucolány nebo materiály vykazující latentně hydraulické vlastnosti, tj. v přítomnosti vody a hydroxidu vápenatého se podílejí na tvorbě CSH gelu, podobně jako cement. Tento vytvrzující proces označujeme jako tzv. pucolánovou reakci :



Nahrazení určitého množství cementu pucolánovými příměsemi skýtá řadu výhod. Při hydrataci portlandského cementu vzniká v prvotní fázi kromě CSH gelu také velké množství vápna (hydroxid vápenatý), zárodek málo pevného a snadno vyluhovatelného portlanditu. Přidané pucolány právě tento nežádoucí produkt hydratace zpracovávají a v přítomnosti vody transformují na žádaný CSH gel. Snížení množství portlandského cementu dále vede ke snížení hydratačního tepla, čímž lze omezit vznik mikrotrhlin v raném stáří betonu a v neposlední řadě přináší i ekonomické úspory. Dávka minerálních příměsí závisí na požadovaných počátečních pevnostech ve vztahu ke zpracovatelnosti. V následující části jsou popsány nejčastěji používané druhy minerálních příměsí pro výrobu vysokopevnostních a ultravysokopevnostních betonů.

Křemičitý úlet :

Křemičitý úlet je vedlejší produkt výroby křemíku a ferosilicia v elektrické peci. Jedná se o velmi jemné částice SiO₂ (vznikající oxidací plynného SiO), doplněné malým procentem nečistot. Částice křemičitého úletu jsou kulovitého tvaru, s průměrem 0,1 - 2 μm (10x menší než zrno cementu). Objemová hmotnost křemičitého úletu je kolem 2200 kg/m³, specifický povrch se pohybuje v rozmezí 15000 - 25000 m²/kg (oproti 500 m²/kg cementu). Kvalita

křemičitého úletu je dána poměrem obsahu SiO_2 a nečistot (alkálie, uhlík), měrným povrchem částic, pucolanitou, případně množstvím přítomné nežádoucí krystalické fáze. Skutečné složení a reaktivita konkrétního úletu by měla být deklarována jeho dodavatelem. Teoreticky možné množství úletů v betonové směsi je 25 - 30% hmotnosti cementu, v praxi se však jejich množství pohybuje v rozmezí 3 - 10%. Při takovém dávkování se projevuje podstatný nárůst pevnosti, naopak další přídavek již nemá na pevnostní charakteristiky výraznější vliv. Křemičitý úlet může být dodáván v neupravené (sypaná hmotnost 200 - 250 kg/m^3) nebo v tzv. "zahuštěné" podobě (sypaná hmotnost 400 - 500 kg/m^3), ve formě suspenze (obsah pevné složky kolem 50%) nebo ve směsi s cementem (podíl 6 - 10%). "Zahuštěná" forma je oproti neupravené výhodnější z hlediska dopravy (větší množství na jednotku objemu) a manipulace, objevily se však zprávy, že : *silně zahuštěné křemičité úlety byly důvodem pro iniciaci lokální alkalicko-křemičité reakce. Ta se objevila kolem některých nedispergovaných zrn zahuštěných úletů, ale případy nebyly dosud plně dokumentovány* [1].

Kromě příspěvku k hydrataci působí křemičité úlety také jako filler. Jemné částice vyplňují prostor mezi zrny cementu a mění mikrostrukturu tranzitní zóny mezi zrny kameniva a cementovou pastou, která se stává kompaktnější. Obecně křemičité úlety zvyšují tlakovou pevnost a redukují porozitu betonu. Bez křemičitého úletu lze obstojně vyrábět betony s tlakovou pevností do 100 MPa (za použití jiné jemnozrnné příměsi), omezeně do 125 MPa. Nad tuto hodnotu se již bez křemičitých úletů při výrobě HPC neobejdeme.



Obr. 1 Křemičitý úlet

Vysokopecní granulovaná struska :

Vysokopecní granulovaná struska je vedlejší produkt výroby surového železa ve vysoké peci. Struska představuje soubor nečistot železné rudy, tvořený převážně třemi sloučeninami (SiO_2 , CaO , Al_2O_3) s drobnými příměsemi Fe_2O_3 , MgO a síry. Specifická hmotnost roztavené

strusky je kolem 2800 kg/m^3 . Dle způsobu jejího chlazení můžeme získat 3 odlišné strukturální formy. Při chlazení na vzduchu vzniká její krystalická forma bez hydraulických vlastností, kterou lze použít jako kamenivo do betonu. Při skrápění vodou vznikají drobné částice, označované jako granulovaná struska, s vyvinutou latentní hydraulicitou a pucolánovými vlastnostmi. Při kombinovaném působení vody a vzduchu vzniká tzv. peletizovaná struska, vhodná pro výrobu hydraulického prášku. Kvalita strusky závisí na měrném povrchu ($450 - 600 \text{ m}^2/\text{kg}$) a skelném charakteru. Dávka strusky se pohybuje v rozmezí 15 - 30% dávky cementu (v kombinaci s 10% křemičitého úletu), v budoucnu lze očekávat i dávky větší. Mletá struska může být do betonové směsi přidávána jako samostatná příměs nahrazující část cementu, případně je již zastoupena jako složka portlandského směsného cementu (měrný povrch obsažené strusky $< 300 \text{ m}^2/\text{kg}$). Struska bývá používána v kombinaci s křemičitými úlety pro výrobu betonů s tlakovou pevností do 125 MPa.



Obr. 2 Granulovaná vysokopecní struska

Popílek :

Popílek představuje drobné částice hromadící se v odlučovacím systému uhelných elektráren. Podle druhu spalovaného uhlí a způsobu spalování se liší složení popílků i tvar jejich částic. Dle ASTM (American Society for Testing and Materials) lze popílků rozdělit do dvou kategorií : popílků s nízkým obsahem vápníku (třída F) a popílků s vysokým obsahem vápníku (třída C). Většina popílků patří mezi pucolánové materiály (obsahují velké množství skelné fáze), některé mohou být však pouze polohydraulické nebo i bez pucolánových vlastností. Kvalita popílku závisí na jeho chemickém složení, měrném povrchu a obsahu skelné fáze přítomné ve struktuře. Množství popílku v betonové směsi se pohybuje mezi 10 a 30% dávky cementu, obvyklá dávka je 15%. Popílků lze používat pro betony s tlakovou

pevností do 75 MPa, výjimečně do 100 MPa. Použití pro betony s pevností nad 100 MPa bez použití křemičitého úletu je prozatím nereálné.



Obr. 3 Elektrárenský popílek

Rostoucí dávka strusky a popílku zpravidla snižuje počáteční pevnost betonu (pomalejší nárůst). Na druhé straně jejich použití má za následek nižší produkci hydratačního tepla (snížení množství portlandského cementu), čehož se využívá při betonáži masivních konstrukcí.

Metakaolín :

Metakaolín je pucolán vyrobený výpalem kaolinů a kaolinitických jílů v teplotním rozmezí 600 - 900°C. Základními složkami metakaolínu jsou SiO_2 (cca 60%) a Al_2O_3 (cca 38%). Zbylou nepatrnou část tvoří oxidy vápníku, hořčíku a jiných kovů. Velikost částic metakaolínu se pohybuje v rozmezí 1,0 - 10 μm , měrný povrch je 9000 - 18000 m^2/kg . Metakaolín je nejúčinnější pucolánovou příměsí z hlediska spotřeby $\text{Ca}(\text{OH})_2$ při hydrataci cementu. Náhradou části cementu metakaolínem dochází ke zvýšení pevnosti betonu v tlaku i tahu za ohybu, snížení nasákavosti a zlepšení reologických vlastností betonu. Zvyšuje odolnost povrchu betonu proti působení agresivního prostředí, vody a rozmrazovacích látek, uzavřením struktury brání průniku tlakové vody a tvorbě výkvětů. Přídavek metakaolínu do 3% hmotnosti cementu zlepšuje plastičnost betonové směsi, aniž by byly ovlivněny mechanické vlastnosti betonu. Obvyklá dávka se však pohybuje okolo 10% hmotnosti cementu (40 kg/m^3 betonu), při které je přínos pro mechanické vlastnosti betonu nejvýraznější. Beton, v jehož složení byla část cementu nahrazena metakaolínem vykazuje strmější nárůst modulů pružnosti - vysoké hodnoty již ve stáří 28 dnů (u běžné receptury obdobné hodnoty až ve stáří 6 - 12 měsíců).



Obr. 4 Metakaolín

Mezi další používané jemnozrné příměsi patří mikromletý vápenec, sloužící jako filler urychlující tuhnutí během počátečního stádia hydratace cementu, dále křemenná moučka, zeolity, čedičový prach a další.

3 Návrh receptury vysokopevnostního betonu

Návrh receptury je složitý proces i u běžného betonu, tím spíše u betonu vysokohodnotného či vysokopevnostního. Složení směsi HSC se většinou navrhuje experimentálně, je však možné použít i částečně analytické metody. Návrhové metody běžné pro obyčejný beton nelze pro HSC použít z několika důvodů. Velmi nízký vodní součinitel již nesplňuje okrajové podmínky těchto metod, použití superplastifikátorů ruší jednoznačnou závislost konzistence na množství základních složek, příměsi nahrazují značnou část cementu. Většina metod také nezahrnuje vliv kvality cementu, kameniva, dávky příměsí a přísad. Z těchto důvodů byly pro návrh HPC a HSC sestaveny a ověřeny metody nové, např. metoda doporučená ACI 363 Committee on high-strength concrete, metoda de Larrardova nebo zjednodušená metoda podle Mehty a Aitcina [1].

Zde je naznačena jedna z možností postupu návrhu receptury vysokopevnostního betonu :

1. **specifikace betonu** : třída pevnosti, konzistence, využití
2. **kvalitativní výběr složek** :
 - cement - třída, druh, minimální množství
 - superplastifikátor - druh, kompatibilita s cementem
 - kamenivo - hornina, frakce, D_{\max}

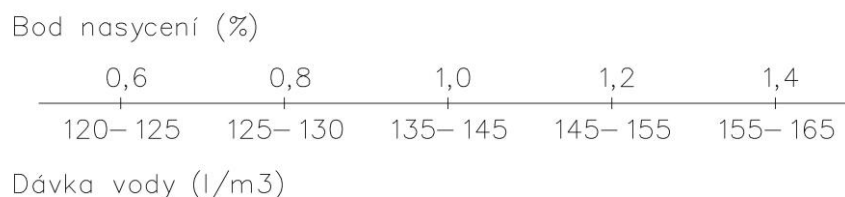
3. **vodní součinitel** : může být stanoven na základě vzorců (např. de Larrardův vztah) nebo grafů uvedených v odborné literatuře [1] a [3], v závislosti na požadované pevnosti a použitých složkách
4. **stanovení množství cementu, vody a příměsí**
5. **objem cementového tmelu** : ze známých hodnot hmotností a objemových hmotností použitého cementu, vody a příměsí
6. **objem kameniva** : doplnění objemu cementového tmelu do 1 m³ betonu
7. **hmotnost kameniva** : pomocí známé objemové hmotnosti kameniva
8. **hmotnost jednotlivých frakcí kameniva** : z procentuálního zastoupení frakcí
9. **množství superplastifikátoru** : experimentálně pomocí zkoušek konzistence, při testování se doporučuje začít na dávce superplastifikátoru 1% hmotnosti cementu.
10. **korekce množství vody** : na základě vlhkosti kameniva a množství vody obsažené ve stanovené dávce superplastifikátoru
11. **zkoušky konzistence a pevnosti** : Pokud výsledky zkoušek odpovídají specifikaci, je návrh ukončen (konečné složení), pokud ne, provádí se opravy složení.

Tato metoda návrhu vysokopevnostního betonu se zabývá pouze kvantitativním zastoupením složek, neřeší vůbec jejich kvalitativní výběr. Metoda je vhodná pro případy, kdy chceme z dostupných složek vytvořit co nejlepší kompozit, jehož skutečné vlastnosti (hlavně pevnost) zjistíme až na základě zkoušek. Pokud není dosaženo požadovaných vlastností, je potřeba najít příčinu (nejslabší článek) a tu se pokusit odstranit - nejčastěji použitím vhodnějších a kvalitnějších složek. Pro návrh betonové směsi touto metodou jsou v [1] uvedeny podrobnosti a vyhotoveny formuláře, zpřehledňující celý postup návrhu.

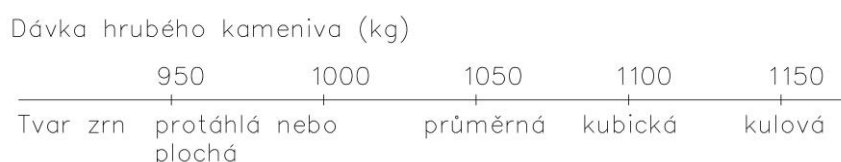
Jiná, avšak obdobná metoda návrhu HSC je založena na metodě absolutního objemu. Její postup je uveden zde :

1. **specifikace betonu**
2. **kvalitativní výběr složek**
3. **vodní součinitel**
4. **stanovení dávky vody** : nalezení optimální kombinace záměsové vody a dávky superplastifikátoru pomocí nalezení bodu nasycení konkrétního superplastifikátoru (obr.5)
5. **stanovení dávky superplastifikátoru** : odvozena od dávky v bodě nasycení, doladěna experimentálně
6. **hmotnost hrubého kameniva** : na základě tvaru zrn (obr. 6)

7. **stanovení dávky pojiva :** na základě vodního součinitele a dávky vody, z toho dopočítat množství cementu a příměsí
8. **dopočet dávky drobného kameniva :** pomocí rovnice absolutních objemů, při odhadu obsahu vzduchu okolo 1,5%
9. **zkoušky konzistence a pevnosti :** Pokud výsledky zkoušek odpovídají specifikaci, je návrh ukončen (konečné složení), pokud ne, provádí se opravy složení.



Obr. 5 Odvození minimální dávky vody



Obr. 6 Odvození obsahu hrubého kameniva

4 Příprava, zpracování a ošetřování HSC

Důležitou roli při přípravě vysokopevnostního a ultravysokopevnostního betonu hraje kromě složení čerstvého betonu také způsob její přípravy, zpracování a ošetřování. Sebelépe koncipovaný návrh složení je zbytečný, pokud není dostatečná pozornost věnována dávkování složek, míchání, ukládání, hutnění směsi a ošetřování čerstvého betonu.

Procesy dávkování a míchání složek jsou vzájemně úzce spjaté, neboť míchání většinou vyplňuje časové prodlevy právě mezi dávkováním jednotlivých komponentů. Klíčem k úspěšné výrobě vysokopevnostního betonu je dávkování složek ve správném pořadí a ve správném čase. Některé odborné publikace doporučují, aby byla nejprve v menší míchačce připravena maltovinová směs, obsahující cement, vodu, aktivní příměsí, potřebné přísady a část mikrokameniva. Takto připravená pasta se následně vlila do větší míchačky, obsahující mírně zvlhčené kamenivo, ve které je proces míchání betonu dokončen. Ve stavební praxi je takové řešení neaplikovatelné. Proto se doporučuje např. následující postup dávkování :

1. **kamenivo** - V případě kameniva rozděleného na jednotlivé frakce dávkujeme od nejhrubší frakce k nejjemnější (s výjimkou mikrokameniva).
2. **cement**
3. **míchání** - Nejprve mícháme suché kamenivo s cementem za účelem vytvoření dostatečně homogenního materiálu.
4. **jemnozrnné příměsi + cca 2/3 množství vody**
5. **míchání**
6. **superplastifikátor + zbylé množství vody** - Superplastifikátor s vodou je přidáván za soustavného míchání. V případě, že používáme mikrosiliku v kapalné formě, můžeme ji přidávat ve stejné fázi jako superplastifikátor.
7. **míchání**
8. **vláknitá výztuž** - Vlákenná výztuž se přidává za soustavného míchání. Míchání musí trvat dostatečně dlouho, aby došlo k rovnoměrnému rozprostření drátků v betonové matici, neboť na variabilitě drátků závisí variabilita výsledné pevnosti.

Výše uvedený postup dávkování je jen jednou z možných variant, navíc nespecifikuje časy dávkování a dobu míchání. A právě tyto parametry bývají často rozhodující pro dosažení požadovaných vlastností betonu.

Míchání je proces, na kterém závisí homogenita a kvalita vnitřní struktury betonu. Jednotlivé fáze míchání musí probíhat po správnou dobu. V případě krátkého míchání nedojde k dostatečnému promísení složek, ve směsi zůstávají shluky cementových zrn a v betonu pak hluchá nespojená místa. Pokud míchání probíhá příliš dlouho, může docházet ke vzniku poruch v zrnech kameniva otlučením o stěny míchačky a také k jisté separaci jemných a hrubých složek. Struktura betonu pak vykazuje značnou nehomogenitu. Ověřený sled dávkování, doba, intenzita a způsob míchání, to vše bývá duševním vlastnictvím výrobce.

Ukládání čerstvého betonu musí proběhnout v následujícím časovém intervalu, během něhož je zaručena požadovaná konzistence a zpracovatelnost. K hutnění lze použít běžné hutnicí prostředky, výhodnější je vytvoření samozhutnitelného betonu (SCC).

Způsob ošetřování je mírně odlišný od ošetřování běžného betonu. V běžném betonu je smršťování způsobeno převážně odpařováním vody, zatímco u HSC a UHSC s malými vodními součiniteli rozhoduje smršťování vlivem samovysychání a následkem teplotních gradientů. Při ošetřování vysokopevnostních betonů je proto potřeba potlačit především tyto mechanismy.

5 Závěr

Návrh složení čerstvého betonu hraje klíčovou roli při přípravě HSC a UHSC kompozitů. Oproti běžnému betonu je zapotřebí používat kvalitnější složky, vzájemně kompatibilní a stanovit přesný postup přípravy čerstvého betonu. Výběr složek musí probíhat po pečlivém uvážení, i za cenu vyšších pořizovacích nákladů. Nezastupitelnou roli ve složení směsi vysokopevnostního betonu hrají minerální příměsi, které do značné míry ovlivňují hydrataci. Vzhledem k nízkému vodnímu součiniteli je určujícím prvkem konzistence dávka superplastifikátorů. Doladování receptury je potřeba provádět experimentálně. Postupy dávkování i míchání směsi musí být optimálně vyladěny. Přesná receptura a ověřená technologie přípravy je však tak ceněným obchodním artiklem, že získat přesnou ověřenou recepturu z okolních zdrojů je prakticky nemožné.

V současné době probíhá na Stavební fakultě ČVUT v Praze experimentální vývoj vlastní receptury ultravysokopevnostního betonu (UHSC). Tento článek byl jakýmsi odrazovým můstkem, na jehož teoretických základech výzkum začínal. Navazující práce by již měly obsahovat první výsledky výzkumu.

Literatura :

- [1] *Aitcin P.-C.* : Vysokohodnotný beton, Informační centrum ČKAIT, Praha, 2005
- [2] *Bílek V., Brandštettr J., Karmazínová M., Krátký J., Lukáš J., Melcher J., Vymazal T.* : Složení a vlastností některých typů vysokohodnotných a samozhutnitelných betonů, Beton TKS 6/2003
- [3] *Sliwinski J., Tracz T., Ďuurica T.* : Navrhovanie zloženia vysokohodnotných betónov, Beton TKS 4/2008
- [4] *Hosam El-Din H. Seleem, Alaa M. Rashad, Basil A. El-Sabbagh* : Durability and strength evaluation of high-performance concrete in marine structures
- [5] *Rovnaník P., Rovnaníková P.* : Alternativní silikátové příměsi ve vztahu k obsahu hydroxidu vápenatého v betonu
- [6] *Tichý J., Šterba A., Trefil V., Žaloudek I.* : Ultravysokopevnostní beton v prefabrikaci, Beton TKS 5/2010
- [7] http://www.cideas.cz/free/okno/technicke_listy/2tlv/2231-2.pdf
- [8] *Švoboda L. a kolektiv* : Stavební hmoty, vydavatelství Java group, s.r.o., Bratislava, 2005

- [9] *Svoboda L.* : Granulometrie částicových plniv pro vytvrditelné kompozity, Chemagazín 4/2010
- [10] *Terzijski I.* : Technologické aspekty vývoje a aplikace vysokopevnostního betonu v podmínkách České republiky - část I. Úvod a složky vysokopevnostního betonu, Beton TKS 1/2011
- [11] *Terzijski I.* : Technologické aspekty vývoje a aplikace vysokopevnostního betonu v podmínkách České republiky - část II. Vlastnosti vysokopevnostního betonu a jejich zkoušení, Beton TKS 1/2011