

POPÍLEK DO BETONU VYHOVUJÍCÍ ČSN EN 206-1 FLY ASH FOR CONCRETE MEETING THE DEMANDS OF THE CZECH STANDARD ČSN EN 206-1

MILAN MYŠKA

Průvodním jevem průmyslového rozvoje bývalého Československa a extenzivní spotřeby elektřiny bylo spalování různých druhů fosilních paliv, popř. odpadů při výrobě elektrické energie a tepla. Kromě řady ekologických aspektů, které jsou dnes odstraňovány, s tím souvisel i vznik velkého množství popílku. Statisticky nelichotivě hovoří o Československu jako o zemi s největší produkcí popílku v přepočtu na jednotku plochy i na počet obyvatel.

An accompanying phenomenon of in development of the former Czechoslovakia and its extensive electric energy consumption was burning various types of fossil fuels, or wastes produced in electric energy and heat manufacture. It was connected with production of large amounts of fly ash, in addition to other ecological aspects which are currently being removed. Statistics show former Czechoslovakia critically as a country with the highest fly ash production per area unit and population.

Jednou ze zavedených možností racionálního způsobu užití části produkce elektrárenského popílku a vlastně i likvidace odpadu stále ještě velkého produkovaného objemu, je jeho zpracování pro zlepšení určitých základních vlastností betonu nebo k docílení jeho některých speciálních vlastností. Popílek jako velmi jemná složka může v prvé řadě přispět k optimalizaci granulometrie použitého kameniva ve skladbě betonu jako příměs druhu I a v případě pucolánových vlastností může za definovaných podmínek nahradit i určitý podíl cementu jako příměs druhu II.

Popílek jako aktivní příměs pro výrobu betonu (příměs druhu II) je ve smyslu § 10 zákona č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů a § 5 nař. vl. č. 178/1997 Sb. ve znění nař. vl. č. 81/1999 Sb. stanoveným výrobkem, a proto podléhá výrobové certifikaci.

Bezpečnost popílku z hlediska obsahu přírodních radionuklidů musí současně odpovídat tab. 2, příl. č. 11 vyhl. SÚJB č. 184/1997 Sb. o požadavcích na zajištění radiační ochrany. Z těchto legislativních opatření vyplývá závazná povinnost výrobce popílku pečovat o kvalitu výrobku včetně systému jakosti a kontroly výroby a pro zpracovatele popílku používat jen takové popílky, které splňují uvedenou legislativní povinnost ve vazbě na příslušnou normu výrobku a účel použití.

Z pohledu nové betonářské normy ČSN EN 206-1 Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda se jedná o prokázání shody vlastností popílku především jako příměsi druhu II s požadavky specifikovanými v ČSN EN 450 Popílek do betonu – Definice, požadavky a kontrola jakosti nebo v případě jeho použití jako příměsi druhu I (jako kameniva – fileru) s požadavky v připravované prEN 12620:2000 Kamenivo do betonu, kdy je třeba, aby i pro tento účel byla s ohledem na konkrétní dávky popílku respektována kritéria pro jeho jakost podle ČSN EN 450.

KVALITA POPÍLKU PODLE ČSN EN 450

Tato EN nahradila v roce 1996 českou normu ČSN 72 2064 Popílek jako aktivní složka do betonu, Materiálový list z roku 1985 a v současné době je jediným určeným dokumentem, podle kterého lze prokázat vhodnost popílku jako pucolánové příměsi druhu II pro výrobu betonu a konstrukci vyhovujících nové betonářské normě ČSN EN 206-1. Norma stanovuje požadavky pro chemické a fyzikální vlastnosti popílku včetně postupů kontroly jakosti a kritérií shody. Popílek je zde definován jako jemný prášek z kulovitých sklovitých částic mající pucolánové vlastnosti, sestávající převážně z SiO_2 a Al_2O_3 a obsahující nejméně 25 % aktivního SiO_2 .

Popílek ve smyslu této normy je produktem spalování práškového antracitu, černého či hnědého uhlí a je zachycován v elektrostatických nebo mechanic-

kých odlučovačích z plynů topenišť jako velmi jemně zrnitý prášek. Zrnitost popílku je závislá na použitých odlučovačích. Z mechanických odlučovačů je popílek obvykle hrubší – obsahuje více než 20 hm. % zrn větších než 0,09 mm (sypaná hmotnost 900 až 1200 kgm^{-3}), z elektrostatických odlučovačů – obsahuje méně než 20 hm. % zrn větších než 0,09 mm (sypaná hmotnost asi 800 kgm^{-3}). Popílek je ve své podstatě odpad a jako každý odpad může vykazovat proměnlivé chemické, mineralogické i granulometrické složení podle druhu spalovaného uhlí, lokality (typ kotlů a technické řešení spalování) a způsobu odlučování. Popílek z černého uhlí má obvykle menší variabilitu vlastností a je tedy kvalitativně vhodnější příměsí do betonu než popílek z hnědého uhlí. V ČR ovšem vzniká až 80 % elektrárenského popílku z hnědého uhlí.

Vždy je třeba zohlednit skutečnost, že i když popílek normativně vyhovuje výše citovanému předpisu, projevuje se při jeho zpracování určitá variabilita jeho vlastností v různých dodávkách. Také nestejná pucolánová aktivita popílku ve vazbě na mineralogické skladby cementů od různých výrobců obvykle ovlivní obsah skutečně potřebného množství záměsové vody a tedy reologické vlastnosti připravovaného betonu.

V tab. 1 jsou přehledně seřazeny všechny charakteristické požadavky na popílek ve smyslu jeho použití jako příměsi druhu II podle ČSN EN 450. Rovněž jsou uvedena hlavní kritéria pro použití popílku jako fileru – příměsi druhu I podle prEN 12620. Pro srovnání jsou zařazeny i technické požadavky na popílek pro výrobu popílkových směsí dle nedávno přijaté ČSN 72 2072-3 Popílek pro stavební účely – Část 3: Popílek pro výrobu popílkových směsí, která nahradila předchozí normu ČSN 72 2065 Popílek jako neaktivní složka do betonu, Materiálový list z roku 1985. Podle uvedené nové národní normy ovšem nelze obecně prokázat vhodnost popílku jako složky betonu vyhovujícího ČSN EN 206-1.

Vlastnost dle způsobu užití popílku	Jednotka	Pucolánová příměs druhu II ČSN EN 450	Filer jako kamenivo, příměs druhu I prEN 12620	Pro výrobu popílkových směsí ČSN 72 2072-3
Ztráta žháním	% hm.	max. 5,0 ¹⁾	–	max. 8,0
Obsah SO ₃	% hm.	max. 3,0	max 0,8	max. 3,0
Obsah celkové síry	% hm.	–	1,0	–
Obsah chloridů v přepočtu na Cl ⁻	% hm.	max. 0,10	0,03/0,06/0,15 ⁶⁾	max. 0,1
Obsah volného CaO	% hm.	max. 1,0 ²⁾	–	–
Obsah celkového CaO	% hm.	–	–	max. 2,5
Jemnost, zbytek na síti 0,045 mm	% hm.	max. 40 ³⁾	–	–
Sítový rozbor, zbytek na síti:				⁷⁾
1 mm				10 – 30
0,2 mm	%	–	–	35 – 60
0,063 mm				5 – 25
Sítový rozbor, propad na síti:				
2 mm			100	
0,125 mm	%	–	85 – 100	–
0,063 mm			70 – 100	
Obsah aktivního SiO ₂	% hm.	min. 25	–	–
Obsah SiO ₂	% hm.	–	–	min. 40 ⁷⁾
Obsah Fe ₂ O ₃	% hm.	–	–	7,0
Obsah alkálií, přepočet na Na ₂ O	% hm.	–	–	1,5 ⁷⁾
Objemová stálost (roztlačnost)	mm	max. 10 ²⁾	–	vyhovuje
Index účinnosti po 28 (90) dnech	%	min. 75 popř. 85	–	–
Měrná hmotnost (tolerance)	kgm ⁻³	max. ± 150 ⁴⁾	–	min. 2.000 ⁷⁾
Měrný povrch	m ² kg ⁻¹	–	–	300 ⁷⁾
Zkrácení počátku tuhnutí	minuta	–	–	max. o 15 ⁷⁾
Prodloužení doby tuhnutí	minuta	–	–	max. o 240 ⁷⁾
Hmotnostní aktivita Ra ²²⁶	Bqkg ⁻¹	max. 200 ⁵⁾	–	max. 200 ⁵⁾

Vysvětlivky k tabulce z odkazů a poznámek uvedených norem:

- ¹⁾ Na národní úrovni je dovoleno používat popílky se ztrátou žháním až do 7 % hmotnosti.
- ²⁾ Popílek s obsahem volného oxidu vápenatého více než 1,0 % hmotnosti, ale méně než 2,5 % hmotnosti, je přijatelný za předpokladu, že vyhoví požadavkům na objemovou stálost.
- ³⁾ Jemnost mletí popílku nesmí kolísat o více než ±10 % z průměrné hodnoty, která je stanovena za předem dané časové období výrobcem.
- ⁴⁾ Tolerance od průměrné hodnoty uváděné výrobcem.
- ⁵⁾ Limit hodnoty stanoven Vyhláškou SÚJB č. 184/1997 Sb.
- ⁶⁾ Maximální hodnoty pro předpjatý, železový a prostý beton vodou rozpustných Cl⁻ k hmotnosti celkového kameniva.
- ⁷⁾ Směrná hodnota podle ČSN 72 2072-3

Tab. 1 Základní požadavky na popílek do betonu a pro výrobu popílkových směsí

Tab. 1 Basic demands on fly ash for concrete and production of fly ash mixes

POPÍLEK Z POHLEDU PŘEDCHOZÍCH BETONÁŘSKÝCH Norem A NOVÉ ČSN EN 206-1

Doposud bylo podle předchozích norem pro výrobu betonu ČSN 73 2400 Provádění a kontrola betonových konstrukcí nebo ČSN P ENV 206 Beton. Vlastnosti, výroba, ukládání a kritéria hodnocení umožněno používání popílku jako příměsí do betonu nebo jeho složky za předpokladu, že vyhovoval národním

normám nebo předpisům. V České republice se jednalo především o dvě normy z řady ČSN 72 2060:1985 Popílky pro stavební účely, a to ČSN 72 2064 a ČSN 72 2065. Tyto již zrušené dokumenty specifikovaly základní technické požadavky na popílek jako aktivní a neaktivní složky betonu v limitních hodnotách chemického složení, fyzikálních vlastností a obsahu přírodních radionuklidů. Pokud popílek vyhovoval všem stanoveným kritériím, byl předpoklad, že při vhodné volbě dávky nebudou negativně ovlivněny stavebně důležité charakteristiky betonu, železobetonových konstrukcí a ani jejich trvanlivost. Norma ČSN 73 2400 stanovovala další upřesňující podmínky použití popílku prověřením jeho

vlivů v konkrétních podmínkách výroby a dopravy formou průkazní zkoušky betonové směsi a betonu s pozdějším doplněním podmiňujících kritérií ve Změně 4 z roku 1992 (požadavky například na max. dávku popílku 100 kg pro m³ betonu, max. hodnotu vodního součinitele 0,65 a jiné). Norma ČSN P ENV 206 podrobněji specifikovala, že popílek nesmí obsahovat škodlivé látky v množství, které by mohlo nepříznivě ovlivnit trvanlivost betonu nebo bylo příčinou koroze výztuže. Popílek s prokázanou pucolanitou (dříve byl častěji užíván termín latentně hydraulická aktivita) mohl být podle ČSN 73 2400 použit i jako částečná náhrada cementu, a to opět pouze podle výsledků průkazních zkoušek.

Podle ČSN P ENV 206, v které byl systém návrhu skladby betonu založen na splnění různých kritérií, jako je například maximální vodní součinitel a minimální množství cementu pro splnění podmínky trvanlivosti betonu s ohledem k agresivitě prostředí, bylo možno s pucolánovými vlastnostmi popílku uvažovat za podmínky, že národní normy a předpisy upravují, jakým způsobem lze změnit stanovená limitní kritéria skladby betonu pro splnění podmínky trvanlivosti betonu. Takový obecný postup v našich předpisech ale nebyl dosud k dispozici. Nová norma ČSN EN 206-1 podmiňuje použití všech složek pro beton předpokladem, že jejich vhodnost je prokázána pro specifikované použití, to znamená, že existuje příslušná evropská norma pro uvažovanou složku betonu. Tato podmínka se vztahuje i na příměsí do betonu, kde popílek, pokud vyhoví ČSN EN 450, je deklarován jako příměs druhu II s obecně prokázanou vhodností. Tato obecná vhodnost ještě ale neznamená možnost jeho použití v jakémkoli případě a pro každé složení betonu. Zůstává požadavek, že konkrétní použití popílku a jeho množství musí být ověřeno při průkazních zkouškách, neboť kromě pevnosti může nepřiměřená dávka popílku ovlivnit i jiné vlastnosti betonu s ohledem na požadavek jeho trvanlivosti. Obecná metodika těchto průkazních zkoušek je popsána v Příloze A nové normy, a např. pro stavby pozemních komunikací je konkretizována v Kap. 18 TKP MDS ČR. V nové ČSN EN 206-1 byl dán důraz na řešení trvanlivosti betonu s ohledem na podmínky prostředí, ve kterém bude uložen. Byla přepracována klasifikace vlivu

prostředí na beton včetně jeho označování a doplněno řešením této problematiky určitými parametry betonu, a to maximálním vodním součinitelem, minimálním obsahem cementu a případně pevnostní třídou betonu. V případě působení střídavého mrazu a rozmrazování též stupněm provzdušnění. Doporučené mezní hodnoty pro jednotlivé stupně vlivu prostředí při použití portlandského cementu (CEM I) a pro životnost 50 let jsou uvedeny v Tabulce F.1 informativní Přílohy F (autorem upravené znění je v tab. 2).

Nově zaváděným prvkem v ČSN EN 206-1 je možnost pro popílek vyhovující ČSN EN 450 použití koncepce *k-hodnoty*. Zavedení tohoto parametru umožňuje

vzít v úvahu pro výpočet vodního součinitele (hmotnostní poměr voda/cement) upravený vztah ve formě $\text{voda}/(\text{cement} + k \times \text{příměs})$, respektive umožňuje redukci doporučeného minimálního obsahu cementu stanovenou v informativní Příloze F nové normy. Tím se vytváří určitý regulovaný prostor pro úpravu mezních hodnot v návrhu skladby betonu (např. uvedené min. dávky cementu) ve vztahu k jednotlivým stupňům agresivity prostředí při zachování požadavku na trvanlivost betonu. Je potřeba zdůraznit, že parametry *k-hodnoty* v nové normě jsou prokázány jen při současném použití portlandského cementu (CEM I) podle ČSN EN 197-1. Použití koncepce *k-hodnoty* s jinými druhy cementů se přitom ale nevylučuje za podmínky, že byla prokázána jejich vhodnost. V současné době se diskutuje v rámci normalizační komise SK1-TNK 36 rozšíření citované Přílohy F ve formě Národní přílohy nebo dodatku, kterou by bylo umožněno za definovaných podmínek použití i portlandských směsných cementů (CEM II/A-S a CEM II/B-S) podle ČSN EN 197-1. Tím by byla splněna jedna z požadovaných obecných podmínek prokázání jejich vhodnosti pro výrobu betonu dle ČSN EN 206-1 z hle-

diska jeho trvanlivosti. K další diskusi ale zůstane otevřená otázka použití *k-hodnoty* a případného prokázání jejích parametrů ve vazbě na tyto cementy. V připravované změně se její souběžné použití s jinými druhy cementu než CEM I nedovoluje, a to z důvodu nedostatečných zkušeností.

Koncepce *k-hodnoty* v normě ČSN EN 206-1 byla metodicky zpracována jak pro sledovaný popílek podle ČSN EN 450, tak i pro křemičitý úlet podle prEN 13263:1998 a současně je zde uveden návod pro stanovení této hodnoty i pro jiné typy příměsí. Skutečná hodnota *k* pro úpravu mezních hodnot bude potom záviset na konkrétním typu příměsí a použitém cementu. Maximální množství popílku jako příměsí druhu II, které lze v současné době uvažovat u koncepcí *k-hodnoty* s cementem druhu CEM I, musí vyhovovat hmotnostnímu poměru: $\text{popílek}/\text{cement} = 0,33$. To znamená, že při doporučených mezních hodnotách minimálního obsahu cementu pro jednotlivé stupně vlivu prostředí v rozmezí od 260 do 340 kg/m³ se jedná o dávky popílku 85 až 112 kg/m³ betonu. Jestliže bude do betonu přidáno na základě výsledků průkazní zkoušky větší množství

Tab. 2 Upravená informativní Tab. F.1 z přílohy F normy ČSN EN 206-1 (Doporučené mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu při zavedení koncepce *k-hodnoty*)

Tab. 2 Modified information Table F.1 from the Appendix F of the Czech Standards ČSN EN 206-1 (Suggested limit values for the composition and properties of concrete when introducing the concept of *k-value*)

	Bez X0	Koroze způsobená karbonatácí				Stupně vlivu prostředí			Koroze cykly mrazu				Chemicky agresivní prostředí	
		XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2
XA3 Maximální vodní součinitel 0,45	—	0,65	0,60	0,55	0,50	0,55	0,55	0,45	0,55	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50
Minimální pevnostní třída betonu C35/45	C12/15	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/40	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37
Minimální obsah cementu [kg/m ³] 360	—	260	280	280	300	300	300	320	300	300	320	340	300	320
Minimální obsah vzduchu [%]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4,0 ^{a)}	4,0 ^{a)}	4,0 ^{a)}	—	—
Maximální obsah popílku [kg/m ³]	—	85	92	92	99	99	99	105	99	99	105	112	99	—
Minimální obsah cementu CEM I 32,5 u <i>k-hodnoty</i> [kg/m ³]	—	248	264	264	280	280	280	296	280	280	296	312	280	—
Minimální obsah cementu CEM I 42,5 a vyšší třídy u <i>k-hodnoty</i> [kg/m ³]	—	236	248	248	260	260	260	272	260	260	272	284	260	—
Jiné požadavky	2.								kamenivo podle prEN 12620:2000 s dostatečnou mrazuvzdorností				síranovzdorný cement ^{b)}	

^{a)} Pokud není beton provzdušněn, mají se vlastnosti betonu zkoušet podle příslušné zkušební metody ve srovnání s betonem, u kterého byla prokázána odolnost proti

popílku, než je uvedený limit, pak se přebývající část ale nesmí brát v úvahu pro výpočet součinitele voda/(cement + $k \times$ popílek) ani pro stanovení minimálního obsahu cementu pro dané prostředí. Pro beton obsahující cement CEM I 32,5 je dovoleno použít hodnoty $k = 0,2$ a pro cementy CEM I 42,5 a vyšší hodnoty $k = 0,4$. Při úpravě skladby betonu zavedením k -hodnoty se musí respektovat podmínka, že doporučený minimální obsah cementu (pro příslušný stupeň vlivu prostředí v Příloze F nové normy), se může snížit maximálně o množství $k \times$ (minimální obsah cementu – 200) [kgm⁻³], avšak množství (cement + popílek) nesmí být menší, než je minimální obsah cementu požadovaný pro specifikované prostředí.

Například při použití maximální dávky popílku 99 kg/m³ s cementem CEM I 32,5 pro stupeň prostředí s minimálním doporučeným obsahem cementu 300 kg/m³, může být snížena dávka cementu o 20 kg/m³. V případě cementu CEM I 42,5 a třídy vyšší je to o dvojnásobek, tedy o 40 kg/m³. Koncept k -hodnoty se nedoporučuje použít pro beton obsahující kombinaci popílku se síranovzdorným cementem CEM I pro stupně vlivu prostředí XA2 a XA3 se síranovým působením. Takový cement je na našem trhu k dispozici podle specifikace podnikových norem jednotlivých výrobců, ale připravuje se norma ČSN 72 2123 Síranovzdorný cement – Složení, specifikace a kritéria shody, která obsahuje technické parametry podle návrhů příslušné EN. Návrh normy je toho času v prvním připomínkovém řízení.

TRVANLIVOST A VLASTNOSTI BETONU V SOUVISLOSTI S POUŽITÍM POPÍLKU

Vliv příměsi popílku na jednotlivé vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu byl v minulosti sledován z nejrůznějších hledisek při celé řadě velmi podrobných vyšetřování, kdy nejstarší se datují před více jak 50 lety [1]. Nejčastěji se v různých zprávách a textech o popílku konstatuje, že jeho přídavek v optimální dávce a vhodné kvalitě zlepšuje díky kulovitému tvaru částic zpracovatelnost čerstvého betonu, přispívá též k lepší soudržnosti čerstvého betonu a k jeho menší náchylnosti na rozmíšení při dopravě a zpracování. Při překročení

ověřené optimální dávky popílku byla často zaznamenána zvýšená spotřeba záměsové vody, neboť její část se spotřebuje k adsorpci na povrchu zrn popílku. Tato vynucená dávka vody vlivem vysokého podílu cementových zrn a popílku však obvykle vedla po určité době k tzv. bleedingu - odlučování vody vlivem následné sedimentace zrn v suspenzi a k uvolnění relativně čisté vody na povrch betonu. Tuto sedimentaci zrn způsobuje jednak flokulace zrn (zrna cementu a popílku se vlivem přitažlivých sil a polaroty vody spojují do větších celků a pak rychleji sedimentují) a jednak nadměrné množství vody v suspenzi (se zvyšujícím se vodním součinitelem vzrůstá míra bleedingu). Bez současného užití plastifikačních přísad do betonu mohou tak být podstatně ovlivněny konečné vlastnosti ztvrdlého betonu a jeho trvanlivost.

Popílek především ovlivňuje tvorbu strukturu a množství cementového kamene, který je nejslabším článkem betonu s ohledem na jeho trvanlivost. Dříve obvykle doporučovaná dávka popílku neměla překračovat podíl 10 hm. % cementu a rovněž se doporučovalo dávku upravit nejen podle množství cementu ale i s ohledem na velikost max. zrna použitého kameniva. Například za optimální množství všech tuhých částic ve skladbě betonu s velikostí do 0,25 mm (cement, jemné podíly zrn kameniva a příměsi) pro určité zrn kameniva např. $D_{\max} = 8$ mm se považovalo 525 kgm⁻³, pro $D_{\max} = 16$ mm to bylo 450 kgm⁻³ [2].

Dalším často uváděným poznatkem je, že popílek s pucolánovými vlastnostmi při současně částečné úspoře cementu zvyšuje dlouhodobé pevnosti betonu, jeho odolnost v chemicky agresivním prostředí a že nezhoršuje odolnost vůči mrazovým cyklům [1]. Jedním ze základních kritérií pro posouzení trvanlivosti betonu je jeho odolnost vůči průniku vody. Běžně se prokazuje v betonářské praxi zkouškou vodotěsnosti ztvrdlého betonu, resp. odolností proti průniku tlakové vody. Z hlediska pórové struktury betonu lze považovat za významnější hodnocení součinitelem vnitřní propustnosti. Vodonepropustnost betonu je závislá na objemu a distribuci makropórů a kapilár (na pórové struktuře) v cementovém kameni. Rozhodující pro průchod vody účinkem tlakového gradientu jsou otevřené kapiláry větší než

10⁻⁷ m, menší póry průchod vody neumožňují. Proto snížením množství makrokapilár lze docílit vyšší vodotěsnosti. To lze technologicky ovlivnit hutností a podílem cementového kamene, ke kterému může přispět právě limitovaná příměs vhodného popílku. Předpokladem je zajištění nízké hodnoty vodního součinitele, dokonalé zhutnění čerstvého betonu a jeho řádné ošetřování. Nelze ale opomenout i další možnosti jako je aplikace hydrofobních přísad a vhodných polymerů. Bylo též prokázáno, že vyšší těsnost povrchových vrstev betonu vlivem příměsi popílku, ale jen v jeho optimální dávce, příznivě ovlivňuje proces karbonatace ztvrdlého betonu a reverzibilní smrštění betonu [2]. Naopak četné experimentální sledování vlivu elektrérenského popílku jako příměsi druhu I (v částečné náhradě za drobné kamenivo) na propustnost povrchových vrstev ztvrdlého betonu neprokázalo utěsnění kapilárního systému ve struktuře betonu zrn jemného popílku. Vyšší dávky popílku vedly ke snížení odolnosti betonu vůči tlakové vodě [3].

Dobré zkušenosti jsou s použitím popílku pro betonování masivních konstrukcí, kde se používají buď cementy s nízkým hydratačním teplem, tj. směsné s min. množstvím slínku. Jinou možností je úprava vývoje nárůstu pevnosti a hydratačního tepla přídavkem popílku. Pro zajištění konečných vlastností se pak rovněž uplatňuje pucolánová vlastnost popílku. Negativním projevem při použití popílku může být jeho vliv na obsah chloridů, kdy v součtu s množstvím v ostatních složkách betonu může být překročen jejich celkový limit 0,4 hm. % cementu daný např. pro železobetonové konstrukce (od obsahu Cl⁻ 0,5 hm. % cementu již začíná bodová korozí výtuzné oceli). Rizikovým faktorem v použití případných nedostačně kontrolovaných dodávek popílku z hlediska trvanlivosti betonu může být obsah volného oxidu vápenatého, oxidu sírového a zvýšený podíl nespáleného zbytkového uhlíku (prokazovaný zvýšenou ztrátou žháním).

NOVÉ TRENDY FLUIDNÍHO SPALOVÁNÍ UHLÍ

Fluidní spalování uhlí spolu s odsiřováním je z historického hlediska poměrně novou technologií spalování, kdy se zdrobněné uhlí spaluje na fluidním roštu s přídavkem vápence jako sorbentu při relativně nižší teplotě 850 °C,

kteřá je optimální pro absorpci oxidu siřičitého aktivním CaO. Ten vzniká při této teplotě z vápence a ve stavu svého zrodu je vysoce aktivní [4]. Směsným reakčním produktem této fluidní technologie je fluidní popel a popílek jako tzv. tuhé zbytky fluidního spalování, tedy směs popele z paliva, síranu vápenatého v podobě anhydritu a oxidu vápenatého (volného vápna), popř. uhličitanu vápenatého z přebytkového vápence. Mezi klasickým, v betonářské praxi dosud používaným popílkem a nově produkovaným fluidním popelem a popílkem jsou rozdíly nejen v chemickém, ale i v mineralogickém složení. Zásadní neshody mezi oběma typy jsou především ve vyšším podílu oxidu sírového SO₂ v hodnotách až 20 hm. %, volného vysoce reaktivního CaO až 15 hm. % a překvapivě někdy i vyšší ztráty žháním až 15 hm. % u typu popílku z fluidního spalování [4, 5]. Zatímco tradiční vysokoteplotní elektrárenský popílek vykazuje zpravidla pouze pucolánovou aktivitu, fluidní a teplárenské popílky a popely tuhnou a tvrdnou nedefinovatelně již při pouhém smísení s vodou bez jakýchkoli dalších příměsí a přísad. Na pojivých vlastnostech fluidního popela a popílku se podílí zejména přítomný anhydrit (až 20 hm. %) a volné vápno, které je při dané teplotě měkce pálené a tudíž, jak již bylo uvedeno, je velmi reaktivní. Fluidní popel a popílek s uvedenými podstatnými rozdíly od běžného elektrárenského popílku nelze hodnotit podle ČSN EN 450, neboť nevyhovují již zásadní definici a charakteristice vzniku popílku určeného do betonu a současně nesplňují většinu předepsaných technických kritérií. Využití tohoto fluidního popela a popílku pro výrobu betonu podle ČSN EN 206-1 není proto přípustné.

POZITIVNÍ ZKUŠENOSTI S POUŽITÍM VHDNÉHO POPÍLKU DO BETONU PODLE ČSN EN 450

- Popílek ve formě fileru optimalizuje křivku zrnitosti kameniva, zvyšuje podíl jemných částic pro dobrou čerpatelnost čerstvého betonu, zlepšuje zpracovatelnost a soudržnost čerstvého betonu, zmenšuje náchylnost na rozmišení čerstvého betonu při dopravě a zpracování.
- Popílek s prokázanými pucolánovými vlastnostmi může v určitých případech

nahradit část dávky cementu bez ovlivnění konečných pevností betonu.

- Příměs popílku při betonáři masivních betonových konstrukcí příznivě ovlivňuje proces tuhnutí a tvrdnutí včetně vývoje hydratačního tepla.
- Popílek zvyšuje odolnost betonu v chemicky agresivním prostředí.
- Popílek nezhoršuje odolnost ztvrdlého betonu vůči cyklům rozmrazování a tání.
- Popílek příznivě ovlivňuje hutnost cementového tmelu a těsnost povrchových vrstev ztvrdlého betonu proti působení tlakové vody, zpomaluje proces karbonatace povrchu ztvrdlého betonu.
- Popílek omezuje proces reverzibilního smršťování betonu.

MOŽNÉ DŮSLEDKY A RIZIKA PŘI POUŽITÍ POPÍLKU NEVHDNÉHO PRO BETON NEBO VYŠŠÍ DÁVKY POPÍLKU

- Vysoký obsah oxidu vápenatého CaO v popílkem způsobuje objemové změny čerstvého a tuhajícího betonu, způsobuje vnitřní napětí s rozvojem trhlin v cementovém tmelu, snižuje pevnost ztvrdlého betonu zejména v tahu za ohybu, případně může způsobit destrukci struktury.
- Vysoký obsah oxidu sírového SO₂ (celkové síry) v popílkem způsobuje korozi ztvrdlého betonu a jeho objemové změny.
- Vysoký podíl spalitelných látek, především obsahu neshořelého zbytkového uhlíku v popílkem ovlivňuje obsah vzduchu v provzdušněném čerstvém betonu, narušuje proces tuhnutí a tvrdnutí čerstvého betonu, snižuje trvanlivost betonu, např. způsobuje odlupování povrchu ztvrdlého betonu.
- Vysoký obsah chloridů v popílkem může ovlivnit jeho celkové množství v betonu s rizikem koroze uložené výztužné oceli.
- Vysoká, nepřiměřená dávka popílku

ovlivňuje obsah skutečně potřebné záměsové vody, mění reologické vlastnosti čerstvého betonu, obvykle způsobuje tzv. bleeding – odlučování vody na povrchu uloženého betonu s rizikem následného snížení trvanlivosti ztvrdlého betonu (odolnosti vůči vodě a rozmrazovacím prostředkům, cyklům mrazu), zvyšuje propustnost struktury betonu při působení tlakové vody.

• Používat popílek není vhodné při betonáři za nízkých teplot.

ZÁKLADNÍ POŽADAVKY PRO POUŽÍVÁNÍ POPÍLKU DO BETONU PODLE ČSN EN 206-1 A KONTROLA JEHO VHDNOSTI PODLE TAB. 22 TĚTO NORMY

1. Do betonu podle ČSN EN 206-1 lze zásadně používat pouze popílek vyhovující ČSN EN 450 a případně podle prEN 12620:2000
2. Kvalita popílku musí být potvrzena buď přímo certifikátem shody nebo prohlášením o shodě s odkazem na příslušnou normu ČSN EN 450, případně prEN 12620:2000.
3. Výběru popílku, jeho kvalitě pro konkrétní druh betonu musí být věnována zvýšená pozornost.
4. U každé dodávky popílku před vložení je nutno zkontrolovat údaje v dodacím listu – zda souhlasí s objednávkou, zda je dodaný popílek z požadovaného zdroje a zda je přiložen některý z dokumentů v bodě 2.
5. Z každé dodávky popílku se doporučuje odebrat vzorek a uschovat jej pro případ dodatečného přezkoumání vlastností popílku.
6. U každé dodávky popílku, u které se předpokládá, že bude použita pro výrobu provzdušněného betonu, musí být provedena kontrolní zkouška ztráty žháním (pokud není k příslušné dodávce aktuálně doložena dodavatelem popílku).
7. Musí být vyžadovány a průběžně sledovány kontrolní zkoušky popílku prováděné jeho dodavatelem, se zohledněním kritérií ČSN EN 450, popř. prEN 12620, nebo je nutno zabezpečit sledování určitých kvalitativních vlastností popílku vlastními kontrolními zkouškami.

Literatura:

- [1] Bezděk, J., Arbes, J. - Popílkové betony, SNTL, Praha 1975
- [2] Pytlík, P., – Technologie betonu, VUTIUM, Brno 1997
- [3] Adámek, J., kol., - Vliv příměsí na vodonepropustnost betonu, Konference ČBZ Betonářské dny 2000, Pardubice 2000
- [4] Puchýř, M., - Technicko-marketingová studie, VÚM Praha, 2001
- [5] Experimentální zkoušky OL123, ČVUT v Praze, FSv. 2001

Ing. Milan Myška
Katedra stavebních hmot Fakulty stavební ČVUT
Thákurova 7, 166 29 Praha 6
tel.: 02 2435 4456
email: myska@sv.cvut.cz