

Využití konvertorové strusky a odpadních slévárenských písků jako náhrady přírodního kameniva ve vysokopevnostním betonu

Utilization of converter slag and waste foundry sands as a substitute for natural aggregate in high-strength concrete

Ing. Piotr Zubek^{1,2}; prof. Ing. Vojtěch Václavík, Ph.D.²; Ing. Jiří Šafrata, Ph.D.³

¹ TRINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s., Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Trinec, Česká republika

² VŠB – TUO, Hornicko-geologická fakulta, 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava-Poruba, Česká republika

³ BETOTECH, s.r.o., Místecká 1121, 703 83 Ostrava – Vítkovice, Česká republika

Tento článek se zabývá využitím vedlejších produktů z Trineckých železáren, konkrétně ocelářské strusky a odpadních slévárenských písků (OSP), jako náhrady přírodního kameniva při výrobě vysokopevnostních betonů. Cílem výzkumu bylo navrhnout a ověřit dvě směsi betonu, z nichž v první (Směs 1) bylo 100 % přírodního kameniva nahrazeno ocelářskou struskou a v druhé (Směs 2) bylo veškeré přírodní kamenivo nahrazeno kombinací ocelářské strusky s OSP ve stejném objemovém poměru. Výsledky ukázaly, že Směs 1 dosáhla pevnostní třídy C 70/85 a byla klasifikována jako vysokopevnostní beton. Směs 2, i přes snahu optimalizovat její složení, dosáhla pouze pevnostní třídy C 35/40, což není dostatečné pro zařazení mezi vysokopevnostní betony.

Během výzkumu bylo zjištěno, že přítomnost OSP v betonu vedla k nežádoucím reakcím způsobeným obsahem hliníku v OSP. Tyto reakce měly za následek expanzi směsi a vznik mikrotřelin v raných stádiích tuhnutí betonu. Tento efekt byl potvrzen během smršťovacích zkoušek. Zkoušky mrazuvzdornosti prokázaly, že ani jedna ze směrů nedosáhla minimálních požadavků pro mrazuvzdornost, což ukazuje na potřebu další optimalizace. Výsledky zkoušek poukazují na potenciální možnost využití průmyslových odpadů ve stavebnictví a na potřebu dalších kroků ke zvýšení udržitelnosti a odolnosti betonu.

Klíčová slova: vedlejší produkty, ocelářská struska, odpadní slévárenské písky, vysokopevnostní beton, průmyslové odpady, udržitelnost

This paper explores the utilization of by-products from Trinecké železářny, specifically converter slag and waste foundry sands (WFS), as a substitute for natural aggregates in high-strength concrete mixtures. The research aimed to design and verify two concrete mixtures: the first (Mixture 1) used 100% basic oxygen furnace slag as a natural aggregate replacement, while the second (Mixture 2) combined basic oxygen slag and WFS in equal proportions. The results demonstrated that Mixture 1 achieved strength class C 70/85 and could be classified as high-strength concrete. In contrast, Mixture 2, despite optimization efforts, only reached strength class C 35/40, which is insufficient for high-strength classification.

The study found that the presence of WFS in the concrete mixture led to undesirable reactions due to its aluminum content, resulting in expansion and micro-cracking during the early curing phase. This effect was confirmed through shrinkage tests. Frost resistance tests indicated that neither mixture met the minimum requirements for frost resistance, highlighting the need for further optimization. A potential solution could involve the use of shrinkage-reducing admixtures, though their effectiveness would require experimental validation. The findings of this study underscore the potential for using industrial waste in construction and the need for further measures to enhance the sustainability and durability of concrete mixtures.

Key words: by-products, steel slag, waste foundry sands, high-strength concrete, industrial waste, sustainability

Úvod

Využití konvertorové strusky jako částečné i plné náhrady přírodního kameniva v betonu je v rámci výzkumu a vývoje v Trineckých železárnách a. s. již úspěšně ověřeno. Přínosem uplatnění strusek jako kameniva není pouze šetření přírodních zdrojů kameniva a snížení nákladů na výrobu betonu, ale také solidifikace vedlejšího produktu

z výroby oceli, který často nespĺňuje kritéria pro využívání odpadů k zasypávání dle Tabulky č. 5.2 ve Vyhlášce č. 273/2021 Sb.

Dceřiná společnost Trineckých železáren, a. s. – Slévárny Trinec, a. s. je producentem odpadních slévárenských písků (OSP), pro které hledá uplatnění.

Spotřeba slévárenských písků v ČR činí přibližně 800 000 tun ročně. Recyklováno je pouze necelých 10 %. V praxi

se lze setkat s využitím OSP do směsí s vodním sklem, bentonitových směsí, cementových směsí. Ve světě je také časté použití k překryvání a neutralizaci materiálů na skládkách komunálních odpadů, k produkci cementu, jako plnivo v asfaltových směsích a jako ostřivo v cihlářském průmyslu.[1] Odpadní písky se dále využívají jako přísada do půdy nebo v tzv. bezpůdných substrátech pro pěstování rostlin. Agentura pro ochranu životního prostředí ve Spojených státech amerických podporuje jejich využití v zemědělství, protože bylo prokázáno nízké environmentální riziko a zlepšení fyzikálních vlastností půdy. [2] OSP mohou obsahovat kontaminanty jako těžké kovy či fenoly, proto je důležité před jejich využitím provést vhodné testy kvality, aby bylo zajištěno, že splňují ekologické a zdravotní normy.[3] Podmínkou pro jednotlivá uplatnění odpadních slévárenských písků je dané aplikaci vyhovující chemické složení a stabilní kvalita.

Na základě možnosti využití zkušeností získaných výzkumem a vývojem v Třineckých železárnách, a. s. v oblasti náhrady přírodního kameniva vedlejšími produkty z metalurgických procesů bylo navrženo ověřit možnost přidavku odpadních slévárenských písků do betonových směsí. Vzhledem k jemné granulometrii slévárenských písků bylo navrženo vytvořit recepturu betonu s vysokým obsahem

cementu, který bude možno klasifikovat jako vysokopevnostní beton. Přínosem velmi jemné frakce písků v maltách a betonech je plnění funkce mikrokameniva (zrna velikosti max. 125 μm), které se podílí na tvorbě cementového tmelu, což zvyšuje nepropustnost pro vodu a odolnost vůči chemické korozi.

Stanovení vlastností použitých druhotných surovin

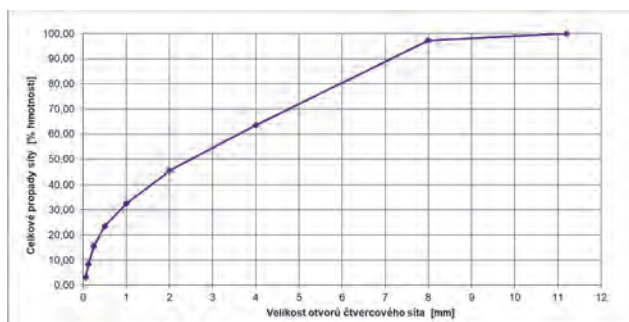
Pro experimentální výzkum byla použita konvertorová ocelárenská struska (LKS) fr. 0/8 mm a odpadní slévárenský písek (OSP) fr. 0/4 mm ze společnosti Třinecké železářny, a.s. U vzorku LKS a OSP byly provedeny testy stanovení zrnitosti dle ČSN EN 933-1 a stanovení objemové hmotnosti a nasákavosti dle ČSN EN 1097-6. Stanovení objemové hmotnosti a nasákavosti bylo provedeno pyknometrickou metodou, výsledky jsou obsahem tab. 1.

Dále byla provedena zrnitostní analýza OSP fr. 0/4 mm a LKS fr. 0/8 mm. Výsledky této analýzy jsou vyjádřeny pomocí křivky zrnitosti obou použitých druhotných surovin z TŽ, a. s. na obr. 1 a 2.

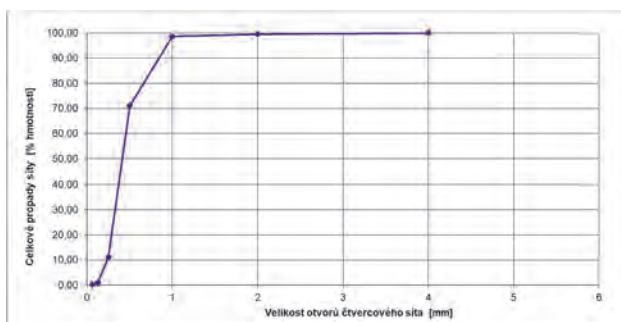
Tab. 1 Objemová hmotnost a nasákavost LKS fr. 0/8 mm a OSP fr. 0/4 mm

Tab. 1 Bulk density and water absorption of basic oxygen furnace slag fraction 0/8 mm and OSP fraction 0/4 mm

Parametr		LKS fr. 0/8 mm	OSP fr. 0/4 mm
ρ_a	zdánlivá objemová hmotnost zrn	3,720	2,852
ρ_{rd}	objemová hmotnost zrn po vysušení v sušárně	3,298	2,788
ρ_{ssd}	objemová hmotnost zrn vodou nasycených a povrchově osušených	3,411	2,810
WA ₂₄	nasákavost	3,44	0,80
ρ_p	objemová hmotnost zrn kameniva předem vysušeného	3,67	2,839



Obr. 1 Křivka zrnitosti ocelárenské strusky (LKS) fr. 0/8 mm
Fig. 1 Grain size distribution curve of basic oxygen furnace slag fraction 0/8 mm



Obr. 2 Křivka zrnitosti odpadního slévárenského písku (OSP) fr. 0/4 mm
Fig. 2 Grain size distribution curve of basic oxygen furnace slag fraction 0/4

Návrh receptury betonové směsi

Použití OSP v betonu může za určitých okolností vést k riziku alkalicko-křemičité reakce (AKR), která způsobuje tzv. alkalicko-křemičité rozpínání. Tato reakce nastává, když alkalické hydroxidy z cementu reagují s reaktivními formami oxidu křemičitého, přítomnými v některých píscích, což vede ke vzniku expanzivního gelu. Tento gel může absorpcí vody způsobovat praskliny

a narušení struktury betonu. Mezi faktory ovlivňující riziko AKR u slévárenských písků patří zejména obsah oxidu křemičitého a dalších chemických sloučenin. Vysoký podíl oxidu křemičitého je spojen se zvýšeným rizikem výskytu jeho reaktivních forem jako opál nebo tridymit, které jsou reaktantem v AKR, což přímo ohrožuje integritu betonu. [3-5] Další problematickou složkou jsou alkalické oxidy (Na_2O , K_2O) v cementu, kdy cement s vyšším obsahem alkálií má větší tendenci k iniciaci AKR. Vliv na průběh

a rychlost AKR má také přítomnost vlhkosti, teplota prostředí, propustnost betonu a další.[6] Pro minimalizaci rizika pozdního narušení integrity betonu AKR byla do navržených receptur přidána mikrosilika (křemičitý prach). Použití mikrosiliky je účinnou metodou k prevenci AKR v betonu. Mikrosilika funguje jako pucolán, což znamená, že reaguje s hydroxidem vápenatým v betonové směsi, čímž vytváří stabilní kalcium-silikát-hydrát (C-S-H). Mikrosilika zabraňuje AKR v betonu snížením pH, které zabrání rozpouštění reaktivních křemičitanových složek písků, zvýšením hustoty a podporou tvorby C-S-H gelů, které blokují reaktivní složky a zabraňují tvorbě expanzivního gelu.[7]

Návrh receptury směsi vysokopevnostního betonu na bázi ocelářenské strusky a OSP byl zároveň proveden se zámě-

rem dosažení dostatečných pevností tvrdého betonu umožňujících jeho klasifikaci jako vysokopevnostní beton, tj. dosažení min. pevnostní třídy betonu C50/60. Pro návrh receptur vysokopevnostního betonu s min. pevnostní třídou C50/60 a 100% náhradou přírodního kameniva vedlejšími produkty (druhotnými surovinami) z Trineckých železáren, a.s. byla jako pojivo využita jemně mletá vysokopevnostní granulovaná struska Kotouč Štramberk a portlandský struskový cement CEM II/A-S 42,5R. Jako superplastifikační přísada byl zvolen produkt MasterEase 1030 a pro modifikaci viskozity betonu byl použit RheoMATRIX 100. Pro možnost určení vlivu OSP v receptuře betonové směsi byly navrženy 2 receptury – receptura vysokopevnostního betonu s OSP (tab. 3) a porovnávací receptura vysokopevnostního betonu bez OSP (tab. 2).

Tab. 2 Receptura Směsi 1 – porovnávací receptura HSC na bázi LKS fr. 0/8 mm

Tab. 2 Mix design of Mixture 1 – comparative HSC mix based on basic oxygen furnace slag fraction 0/8 mm

Složky	Dávka v kg na 1 m ³
Portlandský struskový cement CEM II/A-S 42,5R	505
Jemně mletá vysokopevnostní struska Kotouč Štramberk	202
Křemičitý úlet – mikrosilika	30
Ocelářská struska (LKS) fr. 0/8 mm TŽ, a.s.	1924
Odpadní slévárenský písek (OSP) fr. 0/4 mm TŽ, a.s.	-
Superplastifikátor – MasterEase 1030	14,14
Přísada modifikující viskozitu betonu – RheoMATRIX 100	0,13
Voda	205

Tab. 3 Receptura Směsi 2 – receptura HSC na bázi LKS fr. 0/8 mm a OSP fr. 0/4 mm

Tab. 3 Mix design of Mixture 2 – HSC mix based on basic oxygen furnace slag fraction 0/8 mm and WFS fraction 0/4 mm

Složky	Dávka v kg na 1 m ³
Portlandský struskový cement CEM II/A-S 42,5R	482
Jemně mletá vysokopevnostní struska Kotouč Štramberk	193
Křemičitý úlet – mikrosilika	29
Ocelářská struska (LKS) fr. 0/8 mm TŽ, a.s.	992
Odpadní slévárenský písek (OSP) fr. 0/4 mm TŽ, a.s.	768
Superplastifikátor – MasterEase 1030	17,13
Voda	203

Výroba zkušebních těles

Za účelem zjištění vlastností zatvrdlého vysokopevnostního betonu dle navržených receptur Směsí 1 a 2 (viz tab. 2 a 3) byla vyrobena zkušební tělesa pro zkoušky betonu. Celkem bylo zamícháno 240 dm³ betonové směsi a vyrobeno 94 ks zkušebních těles. Z toho 36 ks krychlí o hraně 100 mm, 24 ks válců průměru 100 mm a výšky 200 mm, 30 ks hranolů rozměrů 100×100×400 mm a 4 žlaby pro stanovení smrštění.

Do míchacího bubnu bylo nadávkováno plnivo a mikrosilika a byla přidána polovina záměsové vody. Doba promíchání uvedených složek činila 120 s. Následovalo přidání požadovaného množství cementu a jemně mleté vysokopevnostní strusky a druhá polovina vody. Doba míchání činila

120 s. Dále byly přidány přísady v požadovaném množství a betonová směs byla míchána po dobu 300 s. Celková doba přípravy jedné záměsi činila 540 s.

Formy zkušebních těles byly plněny ve dvou vrstvách, přičemž jedna vrstva byla hutněna po dobu 8 s na vibračním stolku. Celková doba hutnění čerstvého betonu činila 16 s. Po zhutnění vrchní vrstvy byl přebytečný beton odstraněn zednickou lžící a povrch zahrazen hladítkem do vodorovna s povrchem formy. Upravený povrch zkušebních těles byl chráněn folií, aby bylo zabráněno odpařování vody z čerstvého betonu a nedošlo k nenarušení procesu hydratace cementu. Odbednění zkušebních těles bylo provedeno vždy druhý den a zkušební tělesa byla následně uložena do vodní lázně o teplotě 20 °C.

Zkoušky čerstvého betonu

Stanovení konzistence

Stanovení konzistence čerstvé betonové směsi, bylo provedeno zkouškou sednutí kužele dle ČSN EN 12350-2. Zkouška sednutí kužele byla provedena ihned po zamíchání betonové směsi. Výsledky jsou zpracovány v tab. 4.

Tab. 4 Naměřené hodnoty zkoušky sednutí kužele pro Směs 1 a 2
Tab. 4 Measured slump test values for Mixture 1 and 2

Receptura	Sednutí kužele ihned po zamíchání [mm]	Stupeň sednutí
Směs 1	280	S5
Směs 2	180	S4

Hodnota sednutí kužele pro Směs 1 (LKS) odpovídá stupni sednutí S5, tj. velmi tekuté směsi. Hodnota sednutí kužele pro Směs 2 (LKS + OSP) odpovídá stupni sednutí S4, tj. směsi tekuté.

Stanovení objemové hmotnosti a obsahu vzduchu v čerstvém betonu

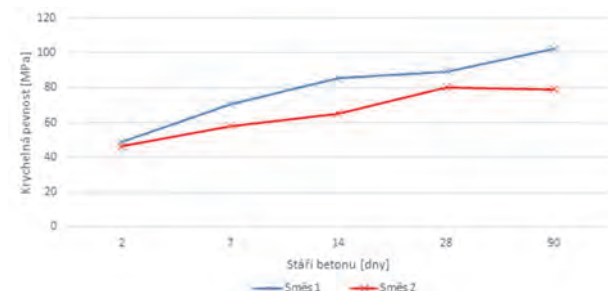
Zkouška objemové hmotnosti čerstvého betonu a obsahu vzduchu v čerstvém betonu byly provedeny podle ČSN EN 12350. Výsledky jsou prezentovány v tab. 5.

Tab. 5 Objemová hmotnost a obsah vzduchu v čerstvém betonu
Fig. 5 Bulk density and air content in fresh concrete

Receptura	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Obsah vzduchu [%]
Směs 1	2760	1,7
Směs 2	2590	2,0

Krychelná, hranolová a válcová pevnost zatvrdlého betonu

Krychelná pevnost zatvrdlého vysokopevnostního betonu byla testována po 2, 7, 14, 28 a 90 dnech, vždy na 1 sadě zkušebních těles (1 sada byla tvořena 3 zkušebními tělesy). Hranolová a válcová pevnost byla testována pouze po 28 a 90 dnech, rovněž na 1 sadě 3 zkušebních těles. Před vlastní zkouškou byly vždy zjištěny rozměry zkušebního tělesa, jeho hmotnost a vypočítaná objemová hmotnost. Naměřené hodnoty krychelných pevností jsou prezentovány na obr. 3, hodnoty hranolových a válcových pevností naměřené po 28 a 90 dnech tvrdnutí betonu jsou obsahem tab. 6.



Obr. 3 Krychelné pevnosti zkušebních těles betonu
Fig. 3 Cube compressive strength of concrete test specimens

Z grafického vyjádření krychelné pevnosti vysokopevnostního betonu na bázi vedlejších produktů z Třineckých železáren, a.s. je patrné, že Směs 2 (na bázi LKS a OSP) dosahuje nižších hodnot v porovnání se Směsí 1 (na bázi LKS). Byl pozorován velmi vysoký nárůst počátečních pevností, kdy po 2 dnech byly hodnoty krychelné pevnosti betonů vyrobených podle navržených receptur téměř vyrovnané. Výrazný rozdíl v krychelných pevnostech byl patrný po 7 dnech stáří betonu, kdy rozdíl mezi hodnotami krychelné pevnosti testovaných směsí činil 12,7 MPa (cca 18 %). Po 28 dnech dosáhla krychelná pevnost navržené směsi s OSP 80,3 MPa, což je o 9,1 MPa (cca 10 %) horší výsledek ve srovnání s referenční směsí bez OSP. Největší rozdíl v pevnostech srovnávaných betonů byl stanoven po 90 dnech, kdy je patrný výrazný nárůst krychlené pevnosti Směsi 1 zatímco u Směsi 2 s obsahem OSP již k dalšímu nárůstu nedošlo. Po 90 dnech tvrdnutí betonu byla pevnost bez OSP o 22 % vyšší

Tab. 6 Hranolové a válcové pevnosti zkušebních těles betonu
Tab. 6 Prism and cylindrical strengths of concrete test specimens

Receptura	Hranolová pevnost [MPa]		Válcová pevnost [MPa]	
	po 28 dnech	po 90 dnech	po 28 dnech	po 90 dnech
Směs 1	75,0	75,0	88,4	99,1
Směs 2	67,4	70,8	41,2	45,8

Z naměřených hodnot krychlených, hranolových a válcových pevností je možno stanovit poměr $f_{c, prism} / f_{c, cube}$ a poměr $f_{c, cylinder} / f_{c, cube}$. Výsledky jsou prezentovány v tab. 7.

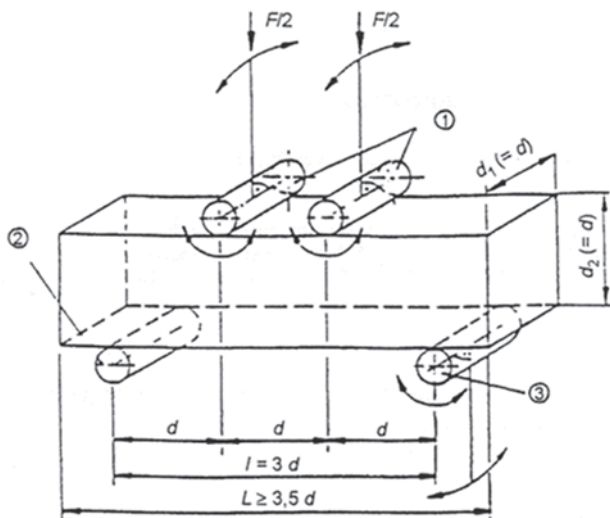
Tab. 7 Hodnoty poměrů pevností po 28 a 90 dnech
Tab. 7 Prismatic and cylindrical strengths of concrete test specimens

Receptura	Poměr $f_{c, prism} / f_{c, cube}$		Poměr $f_{c, cylinder} / f_{c, cube}$	
	po 28 dnech	po 90 dnech	po 28 dnech	po 90 dnech
Směs 1	0,84	0,73	0,99	0,97
Směs 2	0,84	0,89	0,51	0,59

Z tab. 7 je patrné, že hodnota poměru $f_{c, prism} / f_{c, cube}$ po 28 dnech je stejná pro Směs 1 a 2. Po 90 dnech je patrné snížení tohoto poměru u Směsi 1. Toto snížení je dáno vyšší hodnotou krychlené pevnosti po 90 dnech. Z tab. 7 je dále zřetelné, že hodnota poměru $f_{c, cylinder} / f_{c, cube}$ po 28 a 90 dnech je téměř totožná pro Směs 1 a 2. Při porovnání hodnot poměru $f_{c, cylinder} / f_{c, cube}$ mezi Směsí 1 a 2 je již patrný výrazný rozdíl. Tento rozdíl je způsoben nízkou hodnotou válcové pevnosti Směsi 2 po 28 a 90 dnech. Výrazné snížení hodnoty válcové pevnosti u Směsi 2 je způsobeno přidávkou OSP. OSP způsobuje expanzi betonu v čerstvém stavu spojenou se vznikem podélných trhlin ve struktuře betonu. Tyto trhliny vznikající během tuhnutí čerstvého betonu způsobují výrazný pokles zejména válcové pevnosti po 28 a 90 dnech.

Pevnost v tahu za ohybu

Zkouška pevnosti betonu v tahu za ohybu byla provedena v souladu s ČSN EN 12390-5. Pevnost v tahu za ohybu byla stanovena po 28 a 90 dnech stáří betonu, vždy na 1 sadě zkušebních těles vyrobených dle navržených receptur. Jako zkušební tělesa byly použity hranoly o rozměru 100×100×400 mm. Za účelem realizace zkoušky bylo vyrobeno 6 ks hranolů. Před vlastní zkouškou byly zjištěny rozměry tělesa, jeho hmotnost a objemová hmotnost. Schéma zatížení zkušebních hranolů při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu je uvedeno na obr. 4.



Obr. 4 Uspořádání zatěžování zkušebního tělesa dvěma břemeny
Fig. 4 Loading arrangement of the test specimen with two loads

Výsledky zkoušek pevnosti v tahu za ohybu vysokopevnostního betonu jsou prezentovány v tab. 8.

Tab. 8 Pevnosti v tahu za ohybu zkušebních těles betonu
Tab. 8 Flexural tensile strengths of concrete test specimens

Receptura	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	
	po 28 dnech	po 90 dnech
Směs 1	9,4	9,9
Směs 2	8,1	8,6

Tab. 9 Výsledky zkoušky mrazuvzdornosti zkušebních betonových trámčů
Tab. 9 Frost resistance test results of concrete beam specimens

Receptura	Typ trámčů	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Součinitel mrazuvzdornosti	Pevnost v tlaku na koncích trámčů [MPa]
Směs 1	komparační	9,4	0,638	84,2
	zmrazované	6,0		89,3
Směs 2	komparační	8,1	0,679	69,3
	zmrazované	5,5		69,7

Z uvedených výsledků součinitele mrazuvzdornosti je evidentní, že vysokopevnostní beton na bázi ocelářské strusky (Směs 1) a na bázi ocelářské strusky a OSP (Směs 2) není mrazuvzdorný pro 100 zmrazovacích cyklů, jelikož hodnota součinitele mrazuvzdornosti nedosahuje v ČSN 73 1322 uvedené limitní hodnoty 0,75. Vyšší

Z výsledků zkoušek je patrné, že pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech referenční směsi bez OSP je ve srovnání se směsí s OSP o 1,3 MPa (cca 14 %) vyšší. Stejný rozdíl pevností mezi směsmi byl zachován i po 90 dnech tvrdnutí betonu. Srovnáním hodnot válcových pevností v intervalu 28 a 90 dnů lze u Směsi 1 pozorovat patrný nárůst pevnosti v tahu za ohybu o 0,5 MPa (cca 5 %). U Směsi 2 je také patrný nárůst pevnosti v intervalu 28 a 90 dnů o 0,5 MPa (cca 6 %).

Mrazuvzdornost navržených betonů

Stanovení mrazuvzdornosti vysokopevnostního betonu připraveného na bázi ocelářské strusky (Směs 1) a ocelářské strusky v kombinaci s OSP (Směs 2) bylo provedeno v souladu s ČSN 73 1322 po 28 dnech stáří zkušebních těles. Pro realizaci této zkoušky byly vyrobeny 2 sady zkušebních hranolů o rozměru 100×100×400 mm od každé směsi. Sady vyrobených zkušebních těles pro zkoušku mrazuvzdornosti po 28 dnech byly uloženy po dobu 25 dnů ve vlhkém prostředí a 3 dny ve vodě. Jedna sada vždy sloužila jako komparační a nepodléhala zmrazovacím cyklům. Druhá sada byla zatížená 100 zmrazovacími cykly. Zmrazování a rozmrazování zkušebních těles se konalo ve zmrazovacích cyklech, při kterých byla teplota mrazicího prostředí v rozmezí -15 °C až 20 °C. Jeden zmrazovací cyklus se skládal ze 4 hodin zmrazování a dvou hodin rozmrazování. Při zmrazování se zkušební tělesa ukládala do prostoru, který měl předem požadovanou teplotu, při rozmrazování byla zkušební tělesa ukládána do vody o teplotě 20 °C. Zkušební hranoly byly před prvním vložením do mrazicího prostoru vytaženy z vody, povrchově osušeny, zváženy a hodnoty byly zapsány. Dále byly podrobeny 100 zmrazovacím cyklům.

V tab. 9 jsou prezentovány výsledky zkoušky mrazuvzdornosti. V případě referenční směsi bez OSP je patrný pokles pevnosti v tahu za ohybu po zmrazování o 3,7 MPa (cca 36 %), v případě směsi s OSP je pak pokles pevnosti v tahu za ohybu po zmrazování roven hodnotě 2,6 MPa (cca 32 %). Součinitel mrazuvzdornosti, který byl vypočítán, jako poměr hodnoty aritmetického průměru pevnosti zmrazovaných trámčů v tahu za ohybu k hodnotě aritmetického průměru pevnosti porovnávacích trámčů v tahu za ohybu dosahuje hodnoty 64 % pro referenční Směs 1 a 68 % pro Směs 2 obsahující OSP.

hodnota součinitele mrazuvzdornosti směsi s přídavkem OSP je pravděpodobně dána jejich jemnou granulometrií, kdy fungují jako tzv. mikro kamenivo (zrna do 125 μm) a zvyšují tak nepropustnost pro vodu, potažmo mrazuvzdornost a odolnost vůči chemické korozi.

Stanovení smrštění betonu

Stanovení smrštění betonu bylo provedeno korýtkovou metodou pro Směs 1 a 2, kdy pro výrobu zkušebních těles byly použity 2 ks žlabu rozměrů 100×60×1000 mm od firmy Schleibinger. Zkušební tělesa pro zkoušku smrštění

byla uložena po dobu 8 dnů ve vlhkém prostředí a od 8 dne do 98 dnů v laboratorním prostředí při teplotě 21,0 °C. Parametry vzorků betonu vyrobeného dle receptur Směsi 1 a 2 pro zkoušku smrštění betonu jsou prezentovány v tab. 10. Hodnoty smrštění betonu vyrobeného dle receptur Směsi 1 a Směsi 2 jsou zpracovány v tab. 11.

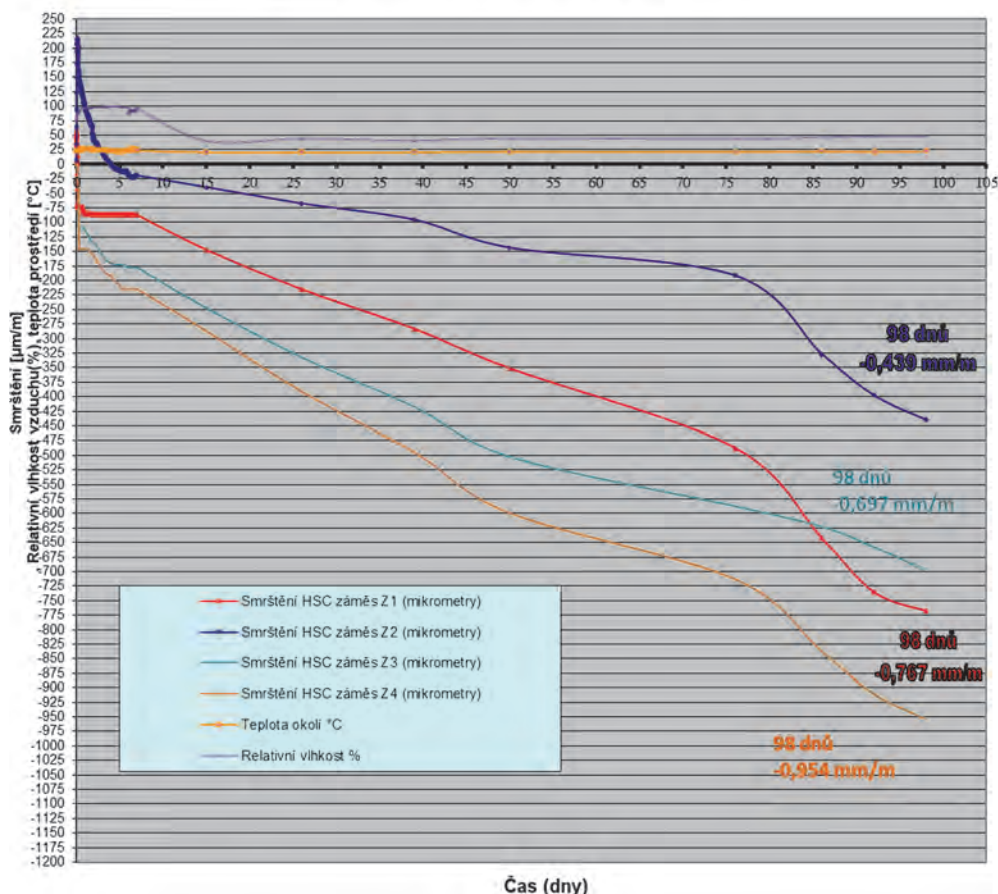
Tab. 10 Parametry vzorků betonu vyrobeného pro stanovení smrštění betonu
Tab. 10 Parameters of concrete samples prepared for determining concrete shrinkage

Receptura	Označení záměsi	Objem záměsi	Sednutí kužele	Objemová hmotnost	Obsah vzduchu	Pevnost v tlaku	
		[dm ³]	[mm]	[kg·m ⁻³]	[%]	7d	28d
Směs 1	3	40	280	2810	2,7	70,7	89,4
	4	40	290	2720	0,7		
Směs 2	1	40	140	2610	2,9	58,0	80,3
	2	40	170	2590	1,4		

Tab. 11 Hodnoty smrštění betonu po 28 a 90 dnech
Tab. 11 Concrete shrinkage values after 28 and 90 days

Receptura	Označení záměsi	Smrštění [mm·m ⁻¹]		Průměrné smrštění [mm·m ⁻¹]	
		28d	98d	28d	98d
Směs 1	3	0,345	0,697	0,376	0,826
	4	0,407	0,954		
Směs 2	1	0,226	0,767	0,149	0,604
	2	0,072	0,440		

Smrštění betonu HSC záměsi Z1,Z2,Z3,Z4



Obr. 5 Průběh expanze a smršťování betonu během 98 dnů
Fig. 5 Expansion and shrinkage behavior of concrete over 98 days

U receptury Směsi 2 (na bázi LKS a OSP) byl před smršťováním pozorován proces expanze. V případě záměsi Z1 proces zvyšování objemu trval 0,13 dne a max. hodnota prodloužení činila $0,056 \text{ mm}\cdot\text{m}^{-1}$, v případě záměsi Z2 rostl objem 4 dny a max. hodnota prodloužení činila $0,217 \text{ mm}\cdot\text{m}^{-1}$. Průměrná hodnota bobtnání činí $0,137 \text{ mm}\cdot\text{m}^{-1}$. Grafické znázornění délkových změn zkušebních těles během 98denní zkoušky je obsahem obr. 5.

Závěr

Závěrem lze konstatovat, že výzkum zaměřený na využití vedlejších produktů z Trineckých železáren pro výrobu vysokopevnostních betonů přinesl zajímavé poznatky. Směs 1, obsahující ocelářenskou strusku, splnila požadavky na zařazení do pevnostní třídy C 70/85, což dokládá její vhodnost pro použití jako vysokopevnostní beton. Směs 2, která zahrnovala kombinaci ocelářské strusky a odpadních slévárenských písků (OSP), dosáhla pouze pevnostní třídy C 35/40, což ukazuje na nedostatečnou pevnost pro klasifikaci jako vysokopevnostní beton.

Výsledky výzkumu naznačují, že přídavek OSP s sebou přináší určitá rizika, jako je bobtnání a s tím související vznik mikrotrhlin během počátečního tuhnutí, což negativně ovlivňuje konečné mechanické vlastnosti betonu. Tento nežádoucí efekt je pravděpodobně způsoben reakcemi spojenými s obsahem hliníku, který může v přítomnosti vody a hydroxidu vápenatého reagovat za uvolňování vodíku, což vede ke vzniku plynů a následným mikrotrhlinám ve struktuře betonu. Tato skutečnost byla potvrzena během zkoušek smrštění, kde byla u směsi s OSP pozorována expanze v prvních hodinách zrání betonu.

Mrazuvzdornost obou směsí neodpovídala stanoveným požadavkům, což znamená, že je třeba hledat další způsoby

zlepšení odolnosti betonu vůči cyklickému zmrazování, například použitím vhodných přísad nebo optimalizací receptur.

Dalším směrem výzkumu by mohlo být experimentální ověření účinnosti protismršťovacích přísad, které by mohly přispět ke snížení smršťování a zlepšení celkové výkonnosti betonu na bázi OSP. Tyto kroky by mohly přispět k širšímu a efektivnějšímu využití průmyslových odpadů v oblasti stavebnictví, což by vedlo ke snížení environmentální zátěže a vyšší udržitelnosti stavebních materiálů.

Literatura

- [1] Odpady Online. Formovací směsi ze sléváren [online]. Dostupné z: <https://odpady-online.cz/formovaci-smesi-ze-slevaren/>
- [2] United States Environmental Protection Agency. Beneficial Uses of Spent Foundry Sands [online]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/smm/beneficial-uses-spent-foundry-sands>
- [3] FRONTIERS. Beneficial Use of Spent Foundry Sands [online]. Dostupné z: <https://www.frontiersin.org/journals/built-environment/articles/10.3389/fbuil.2024.1386511/full>
- [4] Springer. Study on Waste Foundry Sand in Construction [online]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-024-03638-5>
- [5] MDPI. Advances in the Utilization of Foundry Sands [online]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/13/6420>
- [6] University of Wisconsin. Beneficial User Guidelines for Foundry Sand [online]. Dostupné z: <https://mrc.wisc.edu/wp-content/uploads/2012/11/Bradshaw-No.-59-Part-4-Updated-Beneficial-User-Guidelines-Foundry-Sand2.pdf>
- [7] Understanding Cement. Alkali-Silica Reaction [online]. Dostupné z: <https://www.understanding-cement.com/alkali-silica.html>
- [8] iMaterialy.cz. Reakce hliníku a čerstvé cementové či anhydritové směsi [online]. Dostupné z: https://imaterialy.cz/rubriky/beton/reakce-hliniku-a-cerstve-cementove-ci-anhydritove-smesi_45268.html/

Země BASICu trvají na diskusi o evropském CBAM

Země BASIC (Brazílie, Jižní Afrika, Indie a Čína) trvají na diskusi o evropském mechanismu zavedení hraničních uhlíkových daní. První plenární zasedání klimatické konference OSN COP29 v Baku bylo přerušeno, protože tyto státy požadovaly, aby byla do programu zařazena „jednostranná opatření omezující obchod související se změnou klimatu“, jako je CBAM. Předsedající země však rozhodla, že se o tématu bude diskutovat neformálně. Spor zdůrazňuje napětí mezi zeměmi s rozdílnými klimatickými programy a omezeným časem na dohodu o klíčových otázkách. Mnoho rozvojových zemí, které jsou silně ovlivněny CBAM, také vyjádřily své obavy a kritiku.

V červenci tohoto roku skupina BASIC uvedla, že kroky podniknuté bohatými zeměmi k zavedení hraničních uhlíkových daní a dotací narušujících obchod jsou „diskriminační“. Velká část jejich vývozu směřuje do EU, což činí tyto ekonomiky zranitelnými. Jihoafrická republika tento mechanismus opakovaně označila za diskriminační, Indie zvažovala odvetná opatření a Čína vyvolala obavy ve WTO.

Vzhledem k budoucímu rozšíření a zpřísnění předpisů CBAM povede tento nástroj k restrukturalizaci globálních dodavatelských řetězců. Stane se tak, pokud obchodní partneři EU nebudou připraveni splnit přísnější klimatické ambice. Přístup na evropský trh pro společnosti ze třetích zemí se sníží, zatímco konkurence na trzích, které nemají vlastní mechanismy, poroste.

Zdroj S&P Global