

Efektivní využití odpadního skla v cementovém kompozitu

Zdeněk Prošek, Pavel Tesárek

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, ČR

e-mail: zdenek.prosek@fsv.cvut.cz

Souhrn

Studie hodnotí využití jemně mletého odpadního skla jako příměsi pro částečnou náhradu cementu v kompozitech. Zkoumán byl vliv 10–50% objemového podílu skla na pevnost a mikrostrukturu směsí. Náhrada do 20 % nevede k výraznému snížení pevnosti a podporuje pucolánové reakce. Vyšší podíly snižují tuhost. SEM analýza potvrdila dobrou integraci skla a vznik C-S-H gelu.

Klíčová slova: *nepovinná (11 bodů, kurzíva), mohou být i v angličtině*

Úvod

Výroba portlandského cementu je spojena s vysokou energetickou náročností a emisemi CO₂, které představují přibližně 5–7 % celosvětových antropogenních emisí skleníkových plynů [1]. V souvislosti s rostoucími požadavky na udržitelnost stavebnictví se proto intenzivně hledají alternativní suroviny, jež by mohly částečně nahradit cement či přírodní kamenivo v kompozitech. Jednou z nejperspektivnějších cest je využití odpadního skla, které je vzhledem ke své nebiodegradabilitě environmentálně problematickým materiálem a jeho ukládání na skládky vede k dlouhodobým ekologickým zátěžím [2]. V České republice vzniká každoročně přibližně 160 tisíc tun skleněného odpadu, převážně z obalového skla, z čehož je asi 75 % recyklováno, zbytek však končí na skládkách [3]. Celosvětově dosahuje produkce odpadního skla více než 36 milionů tun ročně a do roku 2030 se očekává nárůst nad 50 milionů tun, přičemž významným zdrojem se postupně stává i sklo z vyřazovaných fotovoltaických panelů [4].

Finálně mleté sklo obsahuje vysoký podíl amorfního SiO₂, díky čemuž vykazuje pucolánový potenciál. V alkalickém prostředí cementové matrice dochází k jeho postupnému rozpouštění a reakci s Ca(OH)₂ za vzniku sekundárního C-S-H gelu, který přispívá k zahuštění mikrostruktury a zlepšení dlouhodobé pevnosti i trvanlivosti kompozitů [5]. Optimální dávkování skelného prášku se podle řady studií pohybuje v intervalu od 10 do 20 % hmotnostního podílu cementu, kdy lze dosáhnout zlepšení mechanických vlastností nebo alespoň jejich zachování při snížené spotřebě pojiva [6]. Vyšší podíly (30–50 %) již obvykle vedou k poklesu pevností, neboť sklo plní funkci spíše plniva, doprovázený zhoršenou soudržností a vyšší pórovitostí [7].

Kritickým faktorem je kvalita rozhraní mezi částicemi skla a cementovou matricí, tzv. interfacial transition zone (ITZ). Tato oblast se vyznačuje vyšší pórovitostí, akumulací portlanditu a mikrotrhlinami, což snižuje mechanické vlastnosti kompozitu [8]. Neošetřené sklo má navíc hladký a hydrofobní povrch, který omezuje vazbu na hydratační produkty cementu a prohlubuje oslabení ITZ [9]. Jednou z možností, jak tyto negativní jevy částečně omezit, je využití vhodných povrchových úprav, které dokáží ITZ zjemnit a zvýšit vazbu mezi skleněnými částicemi a cementovou matricí [10].

Materiály a vzorky

Pro ověření vlivu jemně mletého odpadního skla na mechanické vlastnosti cementových kompozitů byly připraveny směsi s částečnou náhradou portlandského cementu CEM I 42,5R. Skleněný prášek pocházel z obalového skla, byl očištěn od nečistot a rozemlet v kulovém mlýně na jemnost pod 75 µm. Cement byl nahrazován v rozsahu od 10 do 50 % hmotnostního podílu. Referenční směs neobsahovala žádné sklo. Složení jednotlivých testovaných směsí lze vidět na Tab. 1.

Tab. 1 – Složení testovaných směsí

Ozn.	Cement CEM I 42,5R [g]	Skelný prášek [g]	Voda [g]	w/c [-]
REF	300	0	105	0,35
S10	270	30	105	0,39
S20	240	60	105	0,44
S30	210	90	105	0,50
S40	180	120	105	0,58
S50	150	150	105	0,70

Vzorky byly odlévány do forem o rozměrech 40 × 40 × 160 mm, po 24 hodinách odformovány a následně uloženy do vodní lázně při teplotě 22 ± 1 °C po dobu 90 dní. Všechny směsi byly připraveny se stejným poměrem vody ku pojivu ($w/b = 0,35$). Z tohoto důvodu se s rostoucím obsahem skelného prášku měnil poměr voda ku cementu (w/c), který byl u referenční směsi 0,35 a postupně stoupal až na 0,70 u směsi S50. Přesto si všechny čerstvé směsi zachovaly srovnatelnou zpracovatelnost, což bylo ověřeno zkouškou rozliti (205 ± 10 mm).

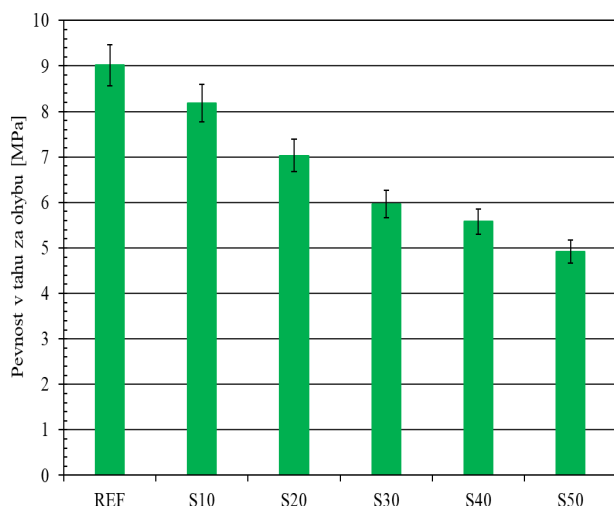
Experimentální metody

Pevnost v tahu za ohybu byla stanovena tříbodovou zkouškou podle EN 196-1. Vzorečky o rozměrech 40 × 40 × 160 mm byly uloženy na rozpětí 100 mm a zatěžovány konstantní rychlostí posuvu $0,1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ až do porušení. Z maximální síly byla vypočítána pevnost v tahu za ohybu. Pevnost v tlaku byla určena na polovinách vzorků získaných po zkoušce tahu za ohybu (40 × 40 × ~80 mm). Zatěžování probíhalo v uniaxiálním tlaku rychlostí $0,3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Každá směs byla testována na minimálně šesti vzorcích a výsledky jsou uváděny jako průměrná hodnota s odpovídající směrodatnou odchylkou.

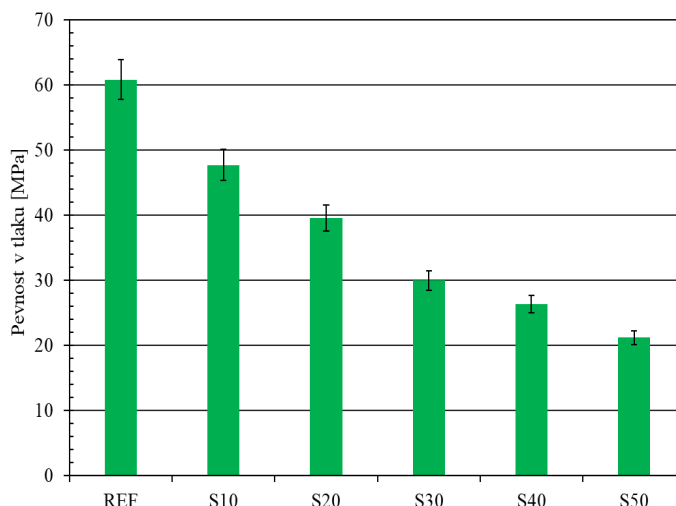
Mikrostruktura byla hodnocena pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM) ve spojení s energo-disperzní spektroskopií (EDS). Vzorky byly po mechanických zkouškách zalité do epoxidové pryskyřice, postupně vybroušené a vyleštěné až do zrcadlového povrchu. Poté byly opatřeny vodivou vrstvou platiny. SEM analýzy (ZEISS Merlin, Schottky katoda) umožnily sledovat morfologii ITZ a rozhraní mezi skleněnými částicemi a cementovou maticí. Pomocí EDS (Oxford Instruments) byly prováděny lineární skeny přes oblast ITZ, jejichž cílem bylo zaznamenat profil poměru Ca/Si a prostorové rozložení hlavních prvků.

Výsledky a diskuse

Výsledky zkoušek pevnosti v tahu za ohybu (Obr. 1) a v tlaku (Obr. 2) ukázaly, že přídavek skelného prášku měl na mechanické vlastnosti cementových kompozitů rozdílný vliv v závislosti na jeho množství. Směsi s nižší náhradou (S10 a S20) vykázaly hodnoty srovnatelné s referenční směsí, přičemž u 20% náhrady byl patrný pouze mírný pokles pevnosti. To potvrzuje, že jemně mleté sklo může působit pucolánově a přispívat k tvorbě sekundárního C-S-H gelu, což částečně kompenzuje snížení množství cementu. Při vyšších podílech skla (S30-S50) došlo k výraznějšímu snížení pevnosti. Tento trend lze přičíst převaze funkce plniva nad pucolánovou reaktivitou a nárůstu poměru w/c , který podporuje tvorbu poréznější mikrostruktury. U směsi S50 se pevnost v tlaku snížila přibližně o polovinu oproti referenčnímu vzorku, což je v souladu s poznatky z literatury [7]. Výsledky tak ukazují, že optimální oblast náhrady cementu skelným práškem se pohybuje do 20 % hmotnostního podílu. Tento rozsah poskytuje přijatelné mechanické vlastnosti při současném environmentálním přínosu v podobě snížení spotřeby cementu.

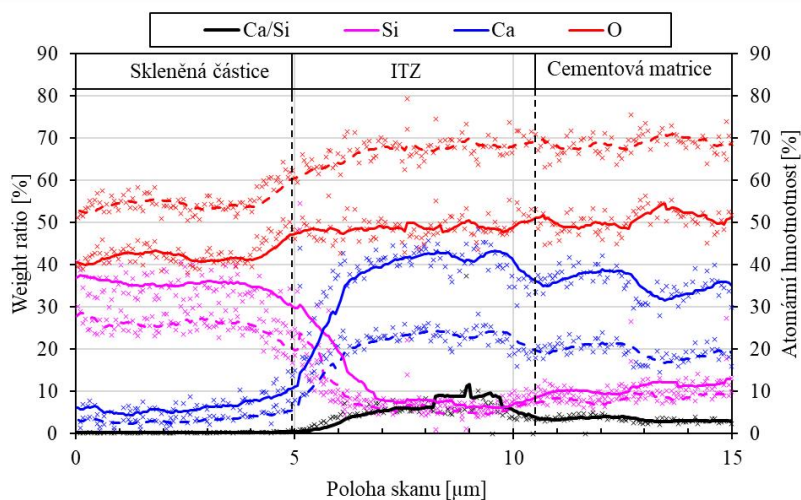
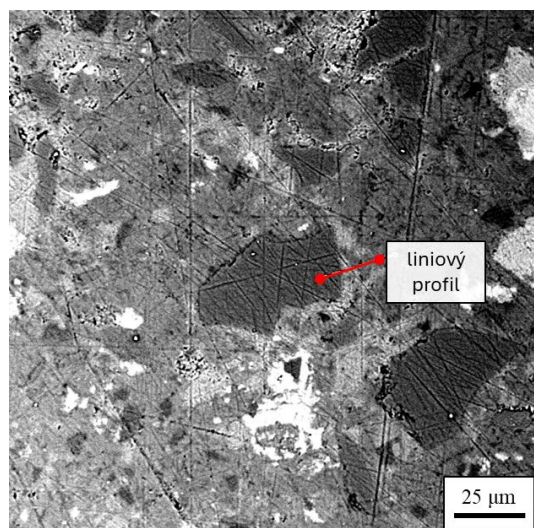


Obr. 1: Pevnost v tahu za ohybu po 90 dnech



Obr. 2: Pevnost v tlaku po 90 dnech

SEM pozorování potvrdila přítomnost ITZ v okolí částic skla (Obr. 3). Tato oblast se vyznačovala vyšší pórovitostí a lokální akumulací portlanditu, což je v souladu s dříve popsány charakteristikami ITZ [8]. V některých případech byly patrné mikrotrhliny vznikající vlivem rozdílných modulů pružnosti mezi maticí a částicemi skla. EDS analýzy ukázaly, že v ITZ dochází ke zvýšenému poměru Ca/Si, což indikuje tvorbu méně hutného C-S-H gelu s horšími mechanickými vlastnostmi. Tento jev se projevil především u vyšších obsahů skla, kde byla ITZ výrazněji vyvinutá. Naopak u směsí s menším podílem skla byla pozorována kompaktnější struktura s menším rozdílem v chemickém složení mezi maticí a oblastí ITZ.



Obr. 3: SEM snímek se zakresleným liniovým profilem (vlevo) a průběh EDS analýzy hlavních prvků a poměru Ca/Si přes skleněnou částici, ITZ a cementovou matici (vpravo).

Povrchová úprava skla

Na základě výsledků základních směsí byla jako vhodná náhrada vybrána varianta s 10 a 20 % podílem skleněného prášku. Tento prášek byl následně podroben plazmové úpravě v kyslíkové atmosféře. Úprava probíhala v nízkotlakém zařízení s radiofrekvenčním výbojem, kde byl materiál rozprostřen v tenké vrstvě a vystaven účinku kyslíkové plazmy po dobu několika minut. Proces probíhal při laboratorní teplotě, aby nedošlo k tepelnému poškození částic.

Účelem úpravy bylo zvýšit povrchovou energii sklených zrn, změnit jejich hydrofobní charakter na hydrofilní a podpořit vznik vazeb hydratačních produktů přímo na povrchu. Tím došlo ke zjemnění a částečné redukci ITZ, která byla identifikována jako nejkritičtější oblast kompozitů se skleným plnivem. Mechanické zkoušky po 90 dnech zrání ukázaly, že u směsi s 10% náhradou cementu sklem vedla plazmová úprava k nárůstu pevnosti v tlaku o přibližně od 10 do 15 % oproti vzorkům s neošetřeným sklem. U směsi s 20% náhradou bylo dosaženo menšího, avšak stále patrného zvýšení pevnosti v tlaku.

Tyto výsledky potvrzují, že kyslíková plazmová úprava skleného prášku je účinným prostředkem pro omezení negativního vlivu ITZ a zlepšení 90denních mechanických vlastností cementových kompozitů s obsahem odpadního skla.

Závěr

Studie se zabývala využitím jemně mletého odpadního skla jako příměsi pro částečnou náhradu cementu v cementových kompozitech. Byly připraveny směsi s náhradou od 10 do 50 % a hodnoceny jejich mechanické vlastnosti a mikrostruktura.

Výsledky ukázaly, že náhrada cementu sklem do 20 % hmotnostního podílu nevede k výraznému snížení mechanických vlastností. Směsi s vyšším podílem (30-50 %) vykázaly výrazný pokles pevností, což souvisí s funkcí skla jako plniva, zvýšeným poměrem w/c a vznikem poréznější struktury. Mikroskopická pozorování potvrdila vznik ITZ s vyšší pórovitostí a akumulací portlanditu, která představuje kritické místo kompozitu.

Na variantách s 10 a 20 % náhradou byla dále ověřena kyslíková plazmová úprava povrchu skleného prášku. Mechanické zkoušky po 90 dnech prokázaly, že tato úprava vedla k nárůstu pevnosti v tlaku o 10 až 15 % u směsi s 10% náhradou a k menšímu, ale stále patrnému zlepšení u 20% náhrady. Plazmová úprava tak prokázala schopnost částečně eliminovat negativní vliv ITZ a přispět k dosažení vyšších pevností.

Celkově lze konstatovat, že jemně mleté odpadní sklo je vhodnou příměsí cementových kompozitů do úrovně 20 % náhrady cementu. V kombinaci s povrchovou úpravou, zejména kyslíkovou plazmou, se navíc otevírá možnost dalšího zlepšení mechanických vlastností, což činí tuto technologii perspektivní nejen z hlediska environmentálního, ale i technického.

Poděkování

Příspěvek byl podpořený projektem TA ČR Prostředí pro život 3 č. SS03010302 “Vývoj efektivních nástrojů pro minimalizaci vzniku stavebního a demoličního odpadu, jeho monitoring a opětovné využití” a projektu HORIZON 2020+ č. 101058580 “Automated solutions for sustainable and circular construction and demolition waste management”.

Literatura

- [1] IPCC. Climate Change Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. ISBN 978-1-107-05821-7.
- [2] NEVILLE, Adam M. Properties of Concrete. 4th edition. London: Longman, 1995. ISBN 978-0582230705.
- [3] PROŠEK, Zdeněk, J. NĚMEČEK, M. ZÁLESKÁ, O. BABČENKO, K. BERANOVÁ, P. MACHEK, A. KROMKA a P. TESÁREK. Surface modification of waste glass powder by plasma treatment: impact on cement paste microstructure and strength development. *Construction and Building Materials*. 2025. **485**. ISSN 0950-0618.
- [4] IEA PVPS. End-of-life management of photovoltaic panels. Report of the International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. 2022.
- [5] ZHAO, Jiwei, Ying CHEN, Weidong GUO a Xiaoming ZHAO. Pozzolan reactivity of glass powder in cementitious composites. *Construction and Building Materials*. 2013, **43**, 355–360. ISSN 0950-0618.

- [6] SHAIKH, Faiz U.A. Mechanical properties of concrete containing recycled glass. *Construction and Building Materials*. 2011, **25**(2), 659–665. ISSN 0950-0618.
- [7] PROŠEK, Zdeněk, Pavel TESÁREK a Aleš PALIČKA. Effect of Si-based waste material on the final mechanical properties of cement pastes. In: *Proceedings of EAN 2023*. ISBN 978-80-214-6137-2.
- [8] PROŠEK, Zdeněk, Aleš PALIČKA a Pavel TESÁREK. Characterisation of the interfacial transition zone between the cement matrix and glass powder particles. In: *Proceedings of EAN 2024*. ISBN 978-80-214-6328-4.
- [9] KE, Yongjian a Xing SUN. Influence of waste glass powder on cement hydration and ITZ. *Cement and Concrete Research*. 2009, **39**(7), 563–568. ISSN 0008-8846.
- [10] MATOS, Ana M. a Jorge SOUSA-COUTINHO. Durability of mortar with waste glass powder. *Materials Research*. 2012, **15**(6), 1032–1039. ISSN 1516-1439.