

Vlastnosti čerstvých malt obsahujících fluidní popílek pro 3D tisk

Michal KOVÁŘÍK^a, Rostislav ŠULC^a, Martina ŠÍDLOVÁ^b, Klára PULCOVÁ^b

^a České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra technologie staveb, Thákurova 7, 166 29, Praha 6;

^b Vysoká škola chemicko-technologická, Fakulta chemické technologie, Ústav skla a keramiky, Technická 5, 166 28 Praha 6 – Dejvice

e-mail: michal.kovarik@fsv.cvut.cz, rostislav.sulc@fsv.cvut.cz,
martina.sidlova@vscht.cz, klara.pulcova@vscht.cz

Souhrn

Článek se zabývá využitím sulfáto-vápenatého pojiva Sorfix, jež obsahuje fluidní popílek, pro návrh směsi pro 3D tisk vytlačováním malty. V úvodu shrnuje základní požadavky na malty pro 3D tisk a představuje různé směry vývoje materiálů. V experimentální části jsou definovány chemické a fyzikální vlastnosti použitého sulfáto-vápenatého pojiva Sorfix zahrnující oxidické složení, měrnou hmotnost, měrný povrch, střední velikost částic a fázové složení. Dále jsou představeny dvě směsi pro 3D tisk SFX 450 a SFX 550, kde je pojivem Sorfix. Na čerstvých maltách, vyrobených z SFX 450 a SFX 550, byl ověřen vývoj zpracovatelnosti zkouškou rozlivu na střešacím stolku v čase 15, 30, 45 a 60 minut od smísení složek. Dále byla ve stejných časových úsecích ověřena strukturace směsi zkouškou penetrace na Vicatově přístroji v provedení s jehlou a válečkem. Změna fázového složení čerstvé malty byla sledována na práškovém difraktometru. Bylo experimentálně prokázáno, že ekologické bezcementové sulfáto-vápenaté pojivo Sorfix obsahující fluidní popílek lze s úspěšností použít pro výrobu směsí pro 3D tisk vytlačováním malty se zpracovatelností po dobu 55 minut, umožňujících tisknout objekty výšky až 850 mm z vrstev o výšce 8mm a šířce 25 – 32 mm. Dále bylo ověřeno, že 3D tiskové malty s obsahem Sorfixu jsou z hlediska chování při tisku srovnatelné s komerčně dostupnými materiály na cementové bázi. Experimentálně byla ověřena také vhodnost zkoušky rozlivem pro ověření zpracovatelnosti malty v daném časovém úseku. Zkouška penetrací válečku pro stanovení normální konzistence cementové kaše na Vicatově přístroji prokázala schopnost ověření strukturace a tím i vystavitelnosti materiálu.

Klíčová slova: 3D tisk, malty, SCM, fluidní popílek, SORFIX

Úvod

3D tisk je druh digitální fabrikace, zajišťující převod digitálních 3D modelů do fyzické podoby skrze aditivní výrobní proces. Je založen na vrstvení materiálu dle skriptu pomocí robotického výrobního zařízení, tj. 3D tiskárny. První koncept aplikace technologie ve stavebnictví navrhl Pegna¹, první funkční technologii, založenou na vytlačování cementové malty, představil pod názvem Contour Crafting Khoshnevis². Po roce 2015 nastává v této oblasti prudký nárůst počtu výzkumných projektů, kde většina se zaměřuje na technologii vytlačováním malt a betonů, kdy se ustálil název technologie 3D tisk z betonu (3DCP)³. Protože výrobní proces probíhá v na sebe vertikálně kladených vrstvách, materiál musí v čerstvém stavu splnit řadu požadavků.

Musí vykazovat dostatečnou tekutost, aby mohl být snadno čerpán hadicí do výtlačné trysky, aby následně mohl být vytlačen z trysky ve formě filamentu, musí vykazovat dostatečnou vytlačitelnost⁴. Během fáze čerpání a vytlačování vykazuje visko-plastické chování. Klíčové veličiny ovlivňující tyto vlastnosti jsou mez kluzu τ_c a viskozita μ . V nejkratším možném okamžiku po vytlačení musí materiál vykazovat vystavitelnost⁴, aby mohl vytvářet tvarově i staticky stabilní struktury z na sebe uložených vrstev, aniž by se zhroutily nebo vykazovaly nadměrné deformace^{5, 6}. Jak popsali Roussel⁷, vlivem v čase postupující hydratace a flokulace po vytlačení materiálu dochází vlivem odeznění smykového namáhání

k relaxaci a tvorbě pevné vnitřní struktury materiálu, vyjádřitelné stupněm strukturace A_{thix} . Během strukturace narůstá modul pružnosti ve smyku G spolu s mezí kluzu τ_c , naopak klesá viskozita μ , materiál se stává pevnějším a tužším.

Při návrhu materiálu splňujícího takto protichůdné požadavky je využíváno tixotropie, které je dosaženo optimalizací zrnitostní křivky s využitím jemných příměsí, přísadkami ve formě superplastifikátorů (SP) a modifikátorů viskozity (VMA)^{8, 9}. V literatuře je popsána řada metod pro měření reologie 3D tiskových malt v čerstvém stavu¹⁰.

Novátorská technologie 3D tisku z betonu přináší značný výzkumný potenciál a příležitost z hlediska trvalé udržitelnosti. V porovnání s konvenčními stavebními technologiemi umožňuje 3DCP snížit množství materiálu díky synergii digitální výroby a pokročilých konstrukčních přístupů, jako je topologická optimalizace¹¹. S cílem minimalizovat uhlíkovou stopu materiálů jsou vyvíjeny receptury, snižující obsah uhlíkově velmi nepříznivě působícího cementu ve směsích jeho náhradou různými příměsemi (SCM). Bylo prokázáno, že příměsi jako popílek, vápenec, mikrosilika nebo struska zlepšují reologii 3D tiskových směsí¹². S cílem najít plnou alternativu k cementovým směsím byly vedle toho vyvinuty materiály a technologie pro 3D tisk z geopolymérů¹³. Byly také zkoumány způsoby, jak pro výrobu 3D tiskových materiálů využít odpadů ve formě příměsí stavebního recyklátu¹⁴, recyklovaného skla¹⁵ nebo hlušiny¹⁶. Dalším takovým odpadem, který by mohl být využit pro 3D tisk je fluidní popílek produkovaný uhelnými elektrárnami. Ten, na rozdíl od klasického vysokoteplotního popílku používaného ve stavebnictví vzniká ve fluidních kotlích za současného odsiřování spalin¹⁷. Fluidní popílek tak obsahuje produkty z odsiřování, a to vápno a anhydrit¹⁸. Tento popílek tak nelze využít stejným způsobem jako klasický vysokoteplotní, a proto se hledají nové cesty pro jeho využití¹⁹⁻²¹.

Cílem této práce bylo připravit čerstvé malty pro 3D tisk technologií vytlačování malty ze sulfáto-vápenatého pojiva Sorfix²² a následně studovat jejich chování z pohledu fyzikálních vlastností těchto malt v závislosti na chemických vlastnostech vstupních složek. Součástí práce bylo srovnání těchto vlastností s komerčně dostupným materiálem.

Experimentální část

Chemické a fyzikální vlastnosti použitého sulfáto-vápenatého pojiva Sorfix zahrnující oxidické složení, měrnou hmotnost, měrný povrch, střední velikost částic a fázové složení jsou uvedeny v tabulce 1. Pojivo Sorfix je uváděno na trh společností ČEZ Energetické produkty, s.r.o. Toto pojivo obsahuje fluidní popílek a má podle informací výrobce unikátní složení chráněné čtyřmi patenty²³⁻²⁶. Vlastnosti pojiva specifikuje výrobce v technickém listu²². Prvkové složení vstupních surovin bylo stanoveno pomocí plně automatického sekvenčního XRF spektrometru Performix (Thermo ARL, Švýcarsko), vyhodnocení proběhlo pomocí softwaru UNIQUANT s chybou měření pod 1 hm. %. Pro kvantitativní stanovení fázového složení sulfáto-vápenatého pojiva byl použit přístroj X'Pert PRO. Pro kvantifikaci jednotlivých fází byl k pojivu Sorfix přidán vnitřní standard (10 hm. % ZnO). Pro stanovení distribuce velikosti částic byl použit laserový analyzátor Bettersizer ST (Dandong Bettersize Instruments Ltd., Čína). Měrná hmotnost byla stanovena pomocí heliového pyknometru BELPYCNO (Microtracs MRB, Japonsko) a měrný povrch pomocí Blainova přístroje JIP-TECH (MATEST S.p.A., Itálie), obojí podle normy EN 196-6. Ztráta žiháním (LOI) byla provedena při teplotě 950 ± 5 °C do konstantní hmotnosti vzorku.

Ze sulfáto-vápenatého pojiva (SFX) byly na základě předchozího výzkumu²⁷ připraveny dvě směsi s označením SFX 450 a SFX 550. Tyto směsi obsahovaly spolu se sulfáto-vápenatým pojivem i písek (vše výrobce Sklopisek Střeleč, Česká republika), mletý vápenec (KRVAP, Česká republika), superplastifikátor na bázi polykarboxylátů (SP), přísadu pro udržení viskozity (VMA) a polypropylénová vlákna délky 6 mm (PP). Směs SFX450 obsahovala navíc mletý křemen. Směsi byly připravovány na laboratorní míchačce ToniMIX (Toni Technik, DE). Složení směsí SFX450 a SFX550 spolu s množstvím přidané záměsové vody obsahuje tabulka 2. Suché směsi SFX450 a SFX550 byly připraveny smícháním daných poměrů složek pojiva Sorfix, vápence a kameniva. Čerstvé maltové směsi byly připraveny tak, že do mísicí nádoby byla umístěna záměsová voda spolu s SP a následně byla k vodě přidávána předem připravená daná suchá směs SFX 450 nebo SFX 550 za plynulého otáčení metly míchačky po dobu max. 4 minut. Poté byla přidána dávka VMA. Následovalo míchání další 2 minuty. Připravená kaše se po

smísení nechala 5 minut relaxovat v nádobě a následně byla podrobena jednotlivým fyzikálně-chemickým zkouškám. Jako referenční směs byl použit vícesložkový jemnozrnný kompozit na bázi cementu, dodávaný pod názvem Premix UHPC na trh společností PREMIX servis, spol. s r.o., Česká republika, jehož vlastnosti jsou specifikovány na webu výrobce²⁸. Malta z této směsi byla připravena zamícháním suché směsi do vody se SP, v poměru 130 ml vody na 1 kg suché směsi a množstvím SP 0,5 % po dobu 4 minut na laboratorní míchačce ToniMIX (Toni Technik, DE). Následně byla do směsi přidána složka VMA v množství 0,2 % a zamíchána po dobu 2 minut. Připravená kaše se po smísení nechala 5 minut relaxovat v nádobě a následně byla podrobena jednotlivým zkouškám.

Tabulka 1: Chemické a fyzikální vlastnosti sulfáto-vápenatého pojiva Sorfix, šarže 02/2022; oxidické složení (hm. %) s chybou < 1 hm. %, ztráta žíháním LOI (hm. %), měrná hmotnost, měrný povrch (m²/kg), střední velikost částic (μm) a fázové složení (hm. %).

XRF	SFX	XRD	SFX
SiO ₂	32,06	amorfní fáze	60
Al ₂ O ₃	24,67	anhydrit	15
Fe ₂ O ₃	4,94	vápno	14
CaO	21,38	křemen	9
TiO ₂	1,83	magnetit	1
SO ₃	7,84	hematit	1
Others	1,97		
LOI	5,30		
Měrná hmotnost [kg/m ³]	2675		
Měrný povrch [m ² /kg]	882		
Střední velikost částic d50 [μm]	20,15		

Tabulka 2: Složení směsí (hm. %)

Směs	SFX	písek	mletý křemen	vápenec	SP	VMA	PP	Voda
SFX 450	37,1	33,0	8,2	4,1	0,7	0,2	0,2	16,5
SFX 550	42,8	31,1	0	3,9	0,5	0,2	0,2	21,4

Vlastnosti čerstvé směsi nutné pro fungování na dané tiskové technologii s délkou tisku 60 minut z jedné dávky materiálu byly ověřeny reologických zkouškami. Za účelem stanovení a porovnání vývoje konzistence malt a tím i jejich zpracovatelnosti po dobu 60 minut byly po 15, 30, 45 a 60 minutách provedeny zkoušky rozlivu ve smyslu normy ČSN EN 1015-3 (cit.²⁹).

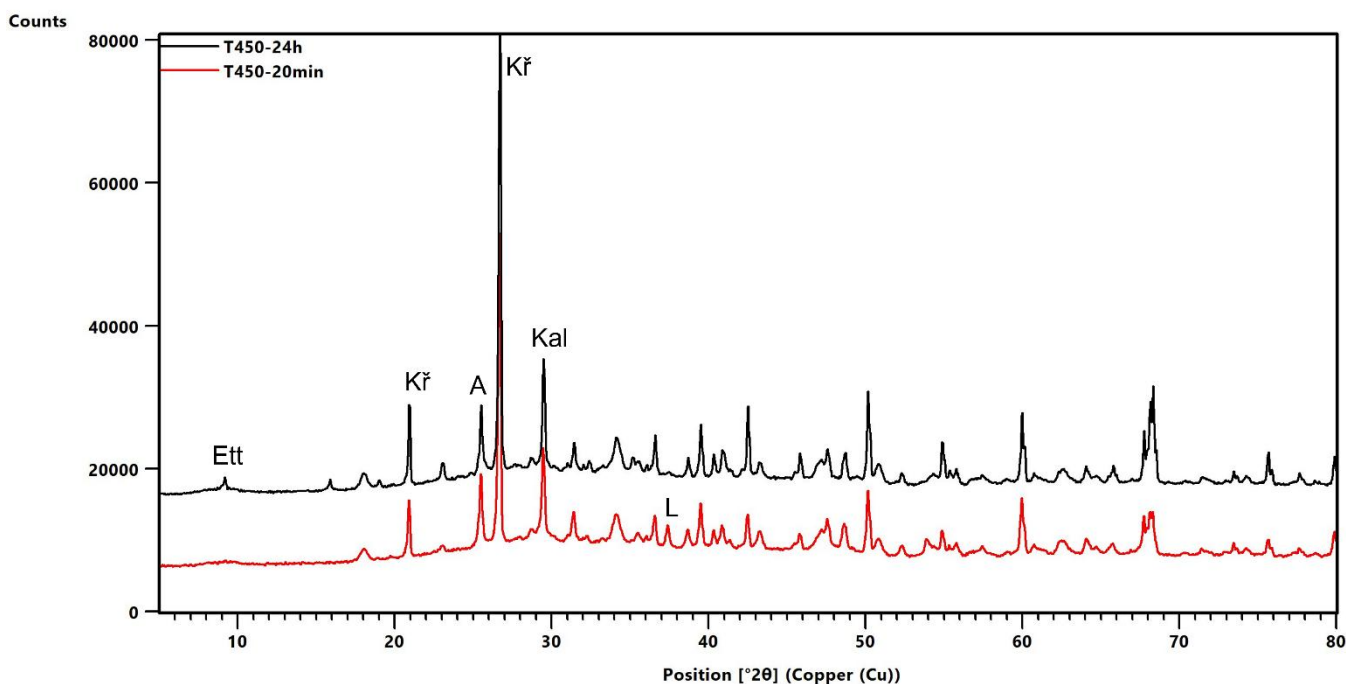
Na čerstvých maltách byly dále provedeny zkoušky penetrace na Vicatově přístroji ve smyslu normy ČSN EN 480-2 (cit.³⁰), upravené pro potřeby dané technologie 3D tisku, kdy byla měřena penetrace po 15, 30, 45 a 60 minutách. Zkouška byla prováděna kromě penetrace normové jehly také ověřovací penetrací válečkem Ø 10 mm pro stanovení normální konzistence cementové kaše ve smyslu normy ČSN EN 196-3 (cit.³¹).

Změna fázového složení čerstvé malty SFX 450 a SFX 550 byla sledována na práškovém difraktometru X'Pert PRO v Bragg-Brentanově parafokusující geometrii s použitím vlnové délky CoK_α záření ($\lambda = 1,7903 \text{ \AA}$, $U = 35 \text{ kV}$, $I = 40 \text{ mA}$). Data byla naskenována pomocí ultrarychlého 1D detektoru X'Celerator v úhlovém rozsahu 5 – 60° (2θ) s krokem měření 0,017° (2θ) a časem čítání 20,32 s krok⁻¹. Vyhodnocení dat bylo provedeno programem HighScore Plus 4.0. Čas měření od zamíchání byl 20 min a 24 hodin pro obě maltové směsi.

Reálné ověření nastavených parametrů směsi probíhalo na tiskové aparatuře, umožňující tisk technologií vytlačování malty. Vážení složek materiálu pro tisk bylo prováděno na váze CAS DB2. Míchání probíhalo s pomocí dvoumetrového míchadla Festool MX 1600/2 EQ DUO DOUBLE. Čerpání zajišťovalo ručně plněné peristaltické čerpadlo Sanax S8 s pomocí hadice DN25. Tisk probíhal na karteziánské 3D tiskárně (Experimentální prototyp) s tiskovým prostorem 1000x1000x1000 mm, řízené systémem Arduino za pomoci rozhraní Pronterface. Rychlost pohybu výtlačné trysky o kruhovém průřezu průměru $d=18\text{mm}$ byla 60 mm/s, vytlačování probíhalo rychlostí 0,35 – 0,45 l/min. Tiskové skripty ve formátu gcode byly generovány v prostředí Rhinoceros 7, s pluginem pro parametrické modelování Grasshopper a pluginem pro 3D tisk Silkworm. Byla tištěna různá zkušební tělesa s vrstvami výšky 8 mm a šířky 25 – 32mm.

Výsledky a diskuse

Fázové složení bylo sledováno ve dvou časech, a to po zamíchání (20 min) a po vytvrzení ve vlhkostní skříni (24 h). Obrázek 1 zobrazuje difraktogramy naměřené pro směs SFX 450, přičemž pro směs SFX 550 bylo dosaženo srovnatelných výsledků s tím rozdílem, že ve směsi SFX 550 byl detekován z pohledu krystalických fází vyšší obsah SiO_2 , což koresponduje se vstupním složením směsi. V souladu s prací Škvára a kol.²⁰ bylo zjištěno, že v zatvrdlém vzorku (24h) došlo ke vzniku nové krystalické fáze ettringitu. Současně došlo ke spotřebování vápna a částečně anhydritu při hydratačních reakcích. Naopak křemen a vápenec (kalcit) se hydratačních reakcí neúčastní.



Obrázek 1: Difraktogram směsi SFX 450 po 20 min a 24 h hydratace; Ett – ettringite, Kř – křemen, A – anhydrite, Kal – kalcit, L - vápno

Hodnoty rozlivu jsou shrnuty v tabulce 3. Nejnížší hodnoty rozlivu byly ve sledovaném intervalu zaznamenány pro komerční směs PREMIX (120 – 105 mm). Nejvyšší hodnoty byly naopak zaznamenány pro směs SFX 550 (170 – 165 mm), jež měla ve srovnání se směsí SFX 450 vyšší vodní součinitel. U směsí SFX 450 a PREMIX hodnoty rozlivu s rostoucím časem klesaly, naopak u směsi SFX 550 byl pokles hodnot rozlivu minimální, v intervalu 30 – 60 min od zamíchání pak byl nulový, což lze vysvětlit nízkou tixotropií této směsi.

Tabulka 3: Rozliv směsí ve smyslu normy ČSN EN 1015-3

Směs	t+15 min	t+30 min	t+45 min	t+60 min	pokles t+15 až t+60
	Rozliv (mm)				
SFX 450	155	145	135	130	16%
SFX 550	170	165	165	165	3%
PREMIX	120	110	110	105	13%

V rámci zkoušek bylo nutno ověřit, že směs dosahuje dostatečného stupně struktury, zajišťujícího vystavitelnost, nutnou pro stabilitu tištěných vrstev, zatížených nadlehlými vrstvami během 60 minut tisku. Struktura byla ověřována zkouškou penetrace do směsi na Vicatově přístroji.

Tabulka 4: Penetrace jehlou ve smyslu normy ČSN EN 480-2

Směs	t+15 min	t+30 min	t+45 min	t+60 min
	Penetrace (mm)			
SFX 450	40	40	40	40
SFX 550	40	40	40	40
PREMIX	40	40	40	40

Zkouška v čase 15, 30, 45 a 60 minut po smísení složek nezachytila u žádného zkoušeného materiálu odpor proti pronikání jehly, a tedy ani tuhnutí ve smyslu normy ČSN EN 480-2 (cit.³⁰). Dá se předpokládat, že důvodem je nízká hodnota odporu zkoušených směsí v prvních 60 minutách proti pronikání štíhlé jehly. Směsi přitom opticky i pohmatem vykazovaly značnou tuhost, což se dá v souladu se⁷ přisoudit nárůstu meze kluzu, snížení viskozity, a tedy nárůstu struktury materiálu vlivem relaxace silně tixotropní směsi. V delším časovém horizontu nebylo další měření relevantní z důvodu délky tiskového procesu 60 minut. Pro ověření struktury byla proto provedena ověřovací penetrace válečkem Ø 10 mm pro stanovení normální konzistence cementové kaše ve smyslu normy ČSN EN 196-3 (cit.³¹), tabulka 5. Výsledky i následný tisk ukázaly, že tato modifikace dané metody mnohem lépe ověřuje strukturu nutnou pro vystavitelnost směsi pro danou technologii 3D tisku. Lze konstatovat, že směs SFX 550 měla horší náběh struktury ve srovnání se směsí SFX 450 a PREMIX. Srovnatelných výsledků bylo dosaženo pro vzorky PREMIX a SFX 450, jež dosáhly již po 30 minutách nulové, resp. 2 mm penetrace válečku.

Tabulka 5: Penetrace válečkem Ø 10 mm ve smyslu ČSN EN 196-3

Směs	t+15 min	t+30 min	t+45 min	t+60 min
	Penetrace (mm)			
SFX 450	10	2	1	0
SFX 550	40	19	3	0
PREMIX	2	0	0	0

Srovnáním výsledků stanovení stupně struktury (penetrace válečkem/modifikovanou zkouškou s válečkem) s výsledky zkoušek rozlivu lze konstatovat, že u obou zkoušek bylo dosaženo srovnatelných výsledků. Směs PREMIX vykazovala nejrychlejší náběh struktury, současně ale vykazovala horší zpracovatelnost. Pomalejší náběh pevností směsí s obsahem Sorfixu oproti cementové směsi Premix lze vysvětlit odlišným způsobem hydratace pojiva, kdy u Sorfixu dochází k postupné reakci portlanditu se síranem vápenatým a s jílovitými částmi popílku za vzniku ettringitu, přičemž CSH gel se začíná tvořit až v pozdějších fázích^{20, 32, 33, 34}.

Na základě výše uvedených zkoušek byly připraveny směsi pro 3D tisk v množství 12 kg. V průběhu zkoušky čerpatelnosti a vytlačitelnosti z trysky vykazovaly posuzované směsi SFX450 a SFX550 skvělou čerpatelnost i vytlačitelnost. Po vyladění parametrů tiskového procesu, tj. rychlosti čerpání, rychlosti trysky a rychlosti vytlačování na daný materiál bylo ze směsi SFX450 vytištěno dle tiskového skriptu těleso o rozměrech 200x200x450 mm vrstvou 8x22 mm, obrázek 2a. Tištěné vrstvy dosahovaly vysoké kvality bez trhlin a deformací. Ze směsi SFX550 dle identického skriptu bylo vytištěno srovnatelné těleso, kde bylo z důvodu tekutější konzistence a horší vystavitelnosti nutno tisknout širší vrstvou 8x30mm, obrázek 2b. Kvalita tisku byla oproti SFX450 více ovlivněna deformací vrstev při vytlačování šnekem. Rozdíly ve vystavitelnosti i konzistenci lze přičíst vyššímu obsahu Sorfixu u směsi SFX550, kde musel být navíc zvýšen vodní součinitel a z receptury byla vyjmuta inertní křemenná moučka. Následně byla ověřena zpracovatelnost a vystavitelnost směsi SFX450 tiskem zakřiveného tělesa výšky 850 mm o délce tiskového procesu 55 minut. Směs vykazovala stabilní čerpatelnost i vytlačitelnost, doba zpracovatelnosti tedy dosáhla 55 minut, zároveň umožnila tisk do výšky 850 mm bez deformace nebo kolapsu, tedy vykazovala vysokou vystavitelnost, obrázek 3. Směs SFX450 lze tedy z hlediska tisku považovat za více použitelnou než SFX550.

Srovnávacím testem tisku komerčně dostupné cementové směsi PREMIX bylo vytištěno dle stejného skriptu identické těleso, které bylo kvalitou tisku srovnatelné se směsí SFX450, obrázek 2c.



Obrázek 2: Výtisky z posuzovaných směsí: a) SFX450, b) SFX550, c) PREMIX

Obrázek 3: Výtisk ze směsi SFX450 výšky 850mm

Závěry

Bylo prokázáno, že ekologické bezcementové sulfáto-vápenaté pojivo Sorfix obsahující fluidní popílek lze s úspěšností použít jako pojivo ve směsích pro 3D tisk vytlačováním malty.

Zkouška na Vicatově přístroji ukázala, že pro ověření stupně strukturace u tixotropních směsí pro 3D tisk se jeví jako vhodný penetrační nástroj váleček \varnothing 10 mm pro stanovení normové konzistence cementové kaše namísto jehly pro zkoušku tuhnutí malty.

Výsledky ze zkoušky rozlivem jsou použitelné pro posouzení zpracovatelnosti malty pro 3D tisk a korelují s výsledky upraveného penetračního testu.

Směsi se Sorfixem vykazují pomalejší nárůst počáteční pevnosti oproti referenční cementové směsi z důvodu rozdílného chemismu Sorfixu a cementu.

Poděkování

Tento článek vznikl s podporou grantu Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS23/148/OHK1/3T/11 Zvýšení trvalé udržitelnosti zděných a betonových konstrukcí s využitím robotů.

Literatura

1. Pegna J.: Automation in Construction 5, 427 (1997). doi: 10.1016/S0926-5805(96)00166-5.
2. Khoshnevis B.: Automation in Construction 1, 5 (2004). doi: 10.1016/j.autcon.2003.08.012.
3. Leal Da Silva W. R.: <https://3dconcreteprinting.info>, staženo 10. 9. 2023
4. Le T. T. a 5 spoluautorů: Materials and Structures 8, 1221 (2012).
5. Rehman A. U., Kim J. H.: Materials 14 (2021). doi: 10.3390/ma14143800.
6. Van Overmeir A. L. a 4 spoluautoři: Construction and Building Materials 324 (2022). doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126411.
7. Roussel N.: Cement and Concrete Research 112, 76 (2018) <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.005>.
8. Marchon D. a 4 spoluautoři: Cement and Concrete Research 112, 96 (2018). doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.014.
9. Zhang Ch. a 6 spoluautorů: Cement and Concrete Composites 122 (2021). doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104155.
10. Jayathilakage R., Rajeev P., Sanjayan J.: Buildings. 8 (2022). doi: 10.3390/buildings12081190.
11. Vantuyghem G. a 3 spoluautoři: Automation in Construction 112 (2020). doi: 10.1016/j.autcon.2020.103084.
12. Teixeira J. a 5 spoluautorů: Sustainability 14, 3970 (2022). doi:10.3390/su14073970.
13. Lazorenko G., Kasprzhitskii A.: Additive Manufacturing, 55 (2022). doi:10.1016/j.addma.2022.102782.
14. Rahul A.V. a 3 spoluautoři: Cement and Concrete Composites, 125 (2022). doi:10.1016/j.cemconcomp.2021.104311.
15. Liu J. a 4 spoluautoři: Construction and Building Materials. 314 (2022) doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125561.
16. Ma G., Li Z., Wang L.: Construction and Building Materials 162, 613 (2018). doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.051.
17. Basu P.: Chemical Engineering Science 54, 5547 (1999). doi:10.1016/S0009-2509(99)00285-7.
18. Šídllová M. a 5 spoluautorů: Waste Forum. 276 (2019)
19. Ohenoja K. a 3 spoluautoři: Sustainability 12 (2020) 1. doi: 10.3390/su12072988.
20. Škvára F. a 3 spoluautoři: Cement and Concrete Composites 93, 118 (2018) doi:10.1016/j.cemconcomp.2018.06.020.
21. Šmilauer V. a 7 spoluautorů: International Conference - Building Materials, Products and Technologies, 29th September - 1st October 2021, Telč - Czech Republic (Výzkumný ústav stavebních hmot, ed.) str. 1205 (2021). doi: 10.1088/1757-899x/1205/1/012004.
22. <https://www.cezep.cz/cs/aktuality/ekologicke-pojivo-sorfix-141806>, staženo 23. 9. 2023
23. Škvára F., Šulc R., Snop R.: CZ 306 484 B6 (2017)
24. Šulc R., Škvára F., Snop R.: CZ 308 486 B6 (2020)
25. Šulc R., Škvára F., Snop R.: CZ 308 584 B6 (2020)
26. Škvára F., Šídllová M., Polonská A.: CZ 308 850 B6 (2021)
27. Kovářík M.: Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Praha 2023.
28. <https://valucem.cz/#technologie>, staženo 16. 9. 2023

29. ČSN EN 1015-3 (722400): Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku) (březen 2000).
30. ČSN EN 480-2 (722325): Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Zkušební metody - Část 2: Stanovení doby tuhnutí (leden 2007).
31. ČSN EN 196-3: Metody zkoušení cementu - Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti (září 2017).
32. Bensted J.: Cement and Concrete Composites 25, 873 (2003)
33. Pajares I., Martinez-Ramirez S., Blanco-Varela M. T.: Cement and Concrete Composites 25, 861 (2003)
34. Kohler S , Heinz D., Urbonas L.: Cement and Concrete Research 36, 697 (2006)

Properties of fresh mortars containing FBC ash for 3D printing

Michal KOVÁŘÍK^a, Rostislav ŠULC^a, Martina ŠÍDLOVÁ^b, Klára PULCOVÁ^b

^a Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Construction Technology, Thákurova 7, 166 29, Praha 6

^b University of Chemistry and Technology, Faculty of Chemical Technology, Department of Glass and Ceramics, Technická 5, 166 28 Praha 6 – Dejvice

e-mail: michal.kovarik@fsv.cvut.cz, rostislav.sulc@fsv.cvut.cz, martina.sidlova@vscht.cz, klara.pulcova@vscht.cz

Summary

This paper deals with the use of Sorfix, a sulphate-calcium binder containing fluidized bed combustion ash, for the design of a mortar mix for extrusion-based 3D printing. In the introduction, it summarizes the basic requirements of mortars for 3D printing and introduces different directions of material development. In the experimental section, the chemical and physical properties of the Sorfix sulphate-calcium binder used are defined, including oxide composition, specific gravity, specific surface area, average particle size and phase composition. In addition, two Sorfix-based 3D printing mixtures, SFX 450 and SFX 550 are presented. The development of workability was verified on fresh mortars SFX 450 and SFX 550 by a flow test at 15, 30, 45 and 60 minutes after mixing the ingredients. Furthermore, the mix structuration was verified at the same time intervals by a penetration test using a needle and a consistency plunger Ø 10 mm on a Vicat apparatus. A change in phase composition of the fresh mortar was monitored on a powder diffractometer. It was experimentally demonstrated that Sorfix, an eco-friendly cement-free sulphate-lime binder containing fluidized bed combustion ash, can be successfully used to produce 3D printing mortar with a workability time of 55 minutes, allowing objects up to 850mm in height to be printed using layers 8mm high and 25-32mm wide. It was further verified that 3D printing mortars containing Sorfix are comparable to commercially available cement-based materials in terms of printing behaviour. The suitability of the flow test to define the workability of the mortar in a given time period was experimentally verified. The penetration test on a Vicat apparatus using a consistency plunger Ø 10 mm demonstrated the ability to verify the structuration and buildability of the material.

Keywords: 3D printing, concrete, mortars, SCM, CFBC fly ash, SORFIX