

Mladá veda

Young Science

**Vzt'ah výkonovej motivácie
a aktívneho učenia sa študentov
Osobní vzťah ty & já a budúcnosť spoločnosti
Džungl'a v teórii "business intelligence"**

Mladá veda

Young Science

MEDZINÁRODNÝ VEDECKÝ ČASOPIS MLADÁ VEDA / YOUNG SCIENCE

Číslo 1, ročník 8., vydané v júni 2020

ISSN 1339-3189

Kontakt: info@mladaveda.sk, tel.: +421 908 546 716, www.mladaveda.sk

Fotografia na obálke: Starý židovský cintorín, Veľký Šariš. © Branislav A. Švorc, foto.branisko.at

REDAKČNÁ RADA

doc. Ing. Peter Adamišin, PhD. (Katedra environmentálneho manažmentu, Prešovská univerzita, Prešov)

doc. Dr. Pavel Chromý, PhD. (Katedra sociálnej geografie a regionálneho rozvoje, Univerzita Karlova, Praha)

prof. Dr. Paul Robert Magocsi (Chair of Ukrainian Studies, University of Toronto; Royal Society of Canada)

Ing. Lucia Mikušová, PhD. (Ústav biochémie, výživy a ochrany zdravia, Slovenská technická univerzita, Bratislava)

doc. Ing. Peter Skok, CSc. (Ekomos s. r. o., Prešov)

prof. Ing. Róbert Štefko, Ph.D. (Katedra marketingu a medzinárodného obchodu, Prešovská univerzita, Prešov)

prof. PhDr. Peter Švorc, CSc., predseda (Inštitút histórie, Prešovská univerzita, Prešov)

doc. Ing. Petr Tománek, CSc. (Katedra verejnej ekonomiky, Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Ostrava)

REDAKCIA

PhDr. Magdaléna Keresztesová, PhD. (Fakulta stredoeurópskych štúdií UKF, Nitra)

Mgr. Martin Hajduk, PhD. (Inštitút histórie, Prešovská univerzita, Prešov)

RNDr. Richard Nikischer, Ph.D. (Ministerstvo pro místní rozvoj ČR, Praha)

Mgr. Branislav A. Švorc, PhD., šéfredaktor (Vydavateľstvo UNIVERSUM, Prešov)

PhDr. Veronika Trstianska, PhD. (Ústav stredoeurópskych jazykov a kultúr FSŠ UKF, Nitra)

Mgr. Veronika Zuskáčová (Geografický ústav, Masarykova univerzita, Brno)

VYDAVATEĽ

Vydavateľstvo UNIVERSUM, spol. s r. o.

www.universum-eu.sk

Javorinská 26, 080 01 Prešov

Slovenská republika

© Mladá veda / Young Science. Akékoľvek šírenie a rozmnožovanie textu, fotografií, údajov a iných informácií je možné len s písomným povolením redakcie.

MODIFIKOVANIE CEMENTOVÝCH KOMPOZITOV PRE 3D TLAČ BUDOV

MODIFICATION OF CEMENT COMPOSITES FOR 3D PRINTING OF BUILDINGS

Mário Buch, Adam Uhlík¹

Autori článku sú internými doktorandami na Katedre materiálového inžinierstva Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave. Vedecký výskum smerujú najmä do oblasti 3D tlače konštrukcií a domov a vyvíjajú svoj vlastný materiál, ktorý by sa používal na túto technológiu. Autori sa problematike 3D tlače venovali už počas svojho inžinierskeho štúdia pre potreby ich diplomových prác.

Authors of this article are working as internal PhD. students at the Department of Materials Engineering of the Faculty of Civil Engineering of the Slovak Technical University in Bratislava. In their research work they are primarily focusing on 3D printing technology of houses, structures, and trying to develop and research their own material suitable for construction by 3D construction technology. Authors worked with this issue already during their engineering studies for the needs of their diploma theses.

Abstract

The main point of this article was to analyze the state of 3D printing of buildings, the current development of materials used for 3D printing, their properties, composition and verification of properties by experimental observation and their processability using various additives to the reference mortar. The article consists of various standard tests of the material, their preparation and subsequent tabular and graphical processing of the results.

Key words: 3D printing, technology, material, composite, cement blend, additive, modified blend, reference mortar

Abstrakt

Cieľom tohto článku bol súčasný vývoj materiálov používaných na 3D tlač, ich vlastnosti, zloženie a overovanie vlastností experimentálnym pozorovaním a ich spracovateľnosti použitím rôznych prísad do referenčnej malty. Článok pozostáva z rôznych normových skúšok daného materiálu, ich vyhotovenie a následné tabuľkové a grafické spracovanie dosiahnutých výsledkov.

Kľúčové slová: 3D tlač, technológia, materiál, kompozit, cementová zmes, prísada, modifikovaná zmes, referenčná malta

¹ Adresa pracoviska: Ing. Mário Buch, Ing. Adam Uhlík, Katedra materiálového inžinierstva, Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava
E-mail: adamuhliknm@gmail.com, mario.buch.mb@gmail.com

Úvod

Hlavným cieľom stavebníctva je výstavba, vykonávanie a riadenie stavebnej a obchodnej činnosti. Taktiež sa stavebníctvom vykonáva predaj a výroba stavebných materiálov, ale aj samotná príprava stavebnej činnosti. Moderné bývanie je pre ľudí čoraz zaujímavejšie a životná úroveň obyvateľstva sa postupne zvyšuje, preto je dopyt čím ďalej, tým väčší. Aktuálne je k dispozícii množstvo moderných technológií a stavebných materiálov na vyššej úrovni, ktoré sa využívajú a ich samotná aplikácia je oveľa jednoduchšia ako predtým. Produktivita a rýchlosť výstavby je kľúčovým faktorom v oblasti stavebníctva a taktiež automatizácia pomocou strojov je viac ako istá. Pomocou 3D tlače vieme úplne automatizovať stavebný proces nosnej konštrukcie. Technológia výstavby a určenie vhodného materiálu sú 2 hlavné faktory. Materiál musí spĺňať určité požiadavky, vlastnosti a to je priamo to, na čo sa táto práca zameriava, je to výber vhodných surovín a návrh zloženia cementových kompozitov s danými vlastnosťami (BUCH, 2019).

Výhody použitia 3D tlače

3D tlač betónu šetrí veľa času. Používanie týchto technológií potenciálne znižuje 2-týždňovú prácu len na 3 - 4 dni, prípadne aj na kratší čas. Okrem toho sa tým znižuje riziko zranenia pri práci a taktiež je stavenisko veľmi tiché.

K hlavným výhodám možno zaradiť:

- Zníženie spotreby materiálov
- Zvýšenie schopnosti navrhovať väčšie množstvo prispôbovaných domov a budov
- Úspora 30% - 60% v stavebnom odpade
- Zníženie výrobného času o 50% -70%
- Zníženie nákladov na stavebnú prácu o 50% -80%

Projektanti týchto stavieb sa vyhnú niektorým z obmedzení súčasných stavebných metód. Napríklad 3D tlač umožňuje väčšiu tvarovú variabilnosť, návrhy stavieb už nebudú obmedzené prevažne na obdĺžnikové tvary. Schopnosť používať oblé tvary dodá konštrukcii väčšiu odolnosť a stabilitu, ktorá bude prínosom aj pre trvanlivosť stavieb.

Okrem toho, že nepravidelná konštrukcia bude pevnejšia, bude potrebovať minimum materiálu na vytvorenie tvarov s konzistentnou krivkou. Ďalšou výhodou je, že konštrukcia môže byť navrhnutá a vytlačená s dutými komponentmi pre jednoduché vloženie prvkov, akými sú napr. elektrické inštalácie. To znižuje dopad na životné prostredie, pretože sa produkuje menej odpadu.

Nevýhody použitia 3D tlače

Stále však existujú isté výhrady k 3D tlačiarňam. Problémovú oblasť predstavujú zatiaľ napr. mostové konštrukcie a výškové budovy. Hlavné ťažkosti vyplývajú zo skutočnosti, že proces vytvárania stavieb pomocou 3D tlačiarne nie je v súčasnosti uznávaný ako stavebná metóda mnohými kódexmi a normalizačnými orgánmi. Keďže tlačené konštrukcie nie sú tradičné, výpočty odolnosti a odolnosti v čase sú ťažko realizovateľné, preto sa musia už od začiatku testovať.

Taktiež do toho zapadá aj menší dopyt po práci a vplyv na výstavbu z hľadiska ľudského faktoru. Pokles dopytu zaznamenávajú aj výrobcovia konvenčných výrobkov ako aj tí, ktorí

prenajímajú stavebné stroje. Vzhľadom na postup prác sa zmení typ požadovaných zručností a pracovných síl. V súčasnosti sú typy materiálov, ktoré sú k dispozícii, iba v dost' obmedzenom množstve na použitie v týchto tlačiarňach. Mnohé tlačiarne môžu byť navyše obmedzené na jeden typ materiálu. Preprava tlačiarň na určené miesta by mohla byť problematická, pretože by mohol byť problém zaistiť bezpečné uloženie tlačiarne na mieste.

Stavebné riziká môžu byť vyššie, pretože akékoľvek chyby v digitálnom modeli by mohli viesť k problémom na mieste, ktoré budú vyžadovať špeciálne zaobchádzanie alebo prepracovanie. Tlačiarne nemusia byť nevyhnutne rýchlejšie ako tradičné konštrukcie. Na výrobu prvkov na mieste môže byť potrebný dlhší čas (WHIRLWIND TEAM, 2016).

Vývoj materiálov pre 3D tlač

Príklady 3D tlačových projektov budov a použitých materiálov nie sú podrobne popísané, ale umožňujú analyzovať požadované vlastnosti maltových zmesí, ktoré môžu byť použité v 3D tlačiarňach na tlač stavebných objektov.

Pre výskum 3D tlače sa najčastejšie používajú materiály na báze cementu. Samozrejme, materiál použitý na 3D tlač musí byť kompatibilný s 3D tlačiarňou. V zložení moderného betónu sú prítomné prísady a prímеси spolu s kamenivom, cementom a vodou, ktoré sa pridávajú na zlepšenie vybraných vlastností mált. Prísady môžu významne modifikovať vlastnosti čerstvej alebo zatvrdnutej malty. Pri navrhovaní zmesí mált vhodných na 3D tlač je potrebné dbať na to, aby malta spĺňala požiadavky na jej vlastnosti v čerstvom a zatvrdnutom stave. Pri navrhovaní zloženia malty je potrebné brať do úvahy nutnosť vytlačania, čo ovplyvňuje spracovateľnosť a čas potrebný na spracovanie. Kľúčové vlastnosti tvrdeného betónu sú pevnosť v tlaku a pevnosť v ťahu pri ohybe.

K najčastejšie používaným prímесiam do betónu patria: mletá granulovaná vysokopecná troska, popolček, kremičitý úlet a mleté horniny (kamenné múčky): vápencové a kremenné múčky, ktoré sa pridávajú ako chemicky neaktívne (inertné) zložky (Matec web conferences 2018)

Popolček - jeho široké použitie je dané jeho vysokou jemnosťou, chemickým a fázovým zložením, ako aj puzolánovou aktivitou. Popolček zlepšuje spracovateľnosť maltových zmesí a výrazne spomaľuje proces tuhnutia mált. Zmrašťovanie betónu klesá v pomere k množstvu cementu nahradeného popolčekom. Popolček s vysokým obsahom nespáleného uhlia znižuje však účinnosť chemických prísad, najmä prevzdušňovanie. Elektrárenský popolček zlepšuje spracovateľnosť zmesí, čo zlepšuje ich čerpaceľnosť.

Mletá zrnitá vysokopecná troska sa získava rýchlym ochladzovaním kvapalnej trosky, ktorá vzniká ako vedľajší produkt pri výrobe surového železa vo vysokej peci. Potom sa rozomelie s činidlami uľahčujúcimi mletie ktoré sa pridávajú v pomere do 1% z objemu celej zmesi. Organické zložky nesmú prekročiť 0,2% hmotnosti trosky. Troska je celkovo aktívnejšia a účinnejšia ako popolček.

Kremičitý úlet je vedľajším produktom pri výrobe kremíka alebo jeho zliatin. Kremičitý úlet uzatvára mikroštruktúru betónu vyplnením priestoru medzi zrnami cementu. Použitie kremičitého úletu v množstve 2-3% (ako prímеси), má priaznivý účinok na zlepšenie spracovateľnosti zmesi spolu s dobrou viskozitou. Kremičitý úlet v dôsledku vysokej jemnosti viaže veľké množstvo vody, čo stabilizuje zmes a zabraňuje odlučovaniu vody pri zhutňovaní.

Horninové múčky vo všeobecnosti zlepšujú spracovateľnosť mált. Najpriaznivejšie účinky sa získajú použitím práškových zmesí, ktoré sú získané z nízkokryštalických vápencových hornín. Bentonit ako ílovitá hornina zlepšuje tixotropné vlastnosti maltových zmesí.

Syntetické živice vykazujú významnú adhéziu s kamenivom a vytvrdnutou maltou. Správne zvolené zloženie živice zlepšuje spracovateľnosť malty, ako aj mechanickú pevnosť a fyzikálne vlastnosti.

Úlohou prímiesí je zlepšenie jednej alebo viacerých vlastností malty alebo tvrdného betónu. Počas miešania sa pridávajú v množstve až do 5% hmotnosti cementu. Pri navrhovaní mált pre 3D tlač je dôležité overiť vplyv prímiesí na vlastnosti mált, ktoré sa môžu použitím prímiesí zlepšiť ale aj zhoršiť.

Superplastifikátory sú prísady, ktoré dávajú negatívny náboj cementovým zrnám, čo vedie k dispergácii zŕn cementu v dôsledku elektrostatických síl, k uvoľneniu vodnej vrstvy medzi zrnami cementu a v konečnom dôsledku k zlepšuje spracovateľnosť zmesi. Znižuje sa vnútorné trenie zmesi a povrchové napätie vody. Proces zmáčanie kameniva a spojiva je jednoduchší a zmesi malty sa tak stávajú viac plastickými.

Výber správneho superplastifikátora závisí od vlastností cementu a tiež od prísad a od kameniva (do určitej miery). Náročnosť pri výbere vyplýva z rozdielov medzi vlastnosťami spojiva a superplastifikátora. Tieto prísady sú určené na zvýšenie dynamiky zvyšovania pevnosti malty v čase. Proces začiatočného zvýšenia pevnosti sa urýchli, bez negatívnych účinkov na konečnú pevnosť malty. Pri tlačení po sebe nasledujúcich vrstiev konštrukcie je veľmi dôležitá počiatočná pevnosť malty, aby sa zabránilo delaminácii a dezintegrácii tlačených štruktúr.

Pri technológii 3D tlače sa používajú rôzne typy prísad na ovplyvnenie dynamiky tuhnutia a tvrdnutia zmesí. Pri procese tlače trvá doprava zmesi relatívne dlhú dobu a je potrebné dosiahnuť správne spojenie medzi jednotlivými vrstvami malty. Spomalenie tuhnutia spôsobí, že prepravovaná zmes si udrží svoju tekutosť dlhší čas, čo má pozitívny vplyv na procesy čerpania a tlače. Betón s prísadou indikuje nižšiu počiatočnú pevnosť a zvyčajne pomalšie tvrdnutie. Prísady modifikujúce viskozitu sú určené na zvýšenie viskozity mált, bez podstatných zmien konzistencie. Zvyčajne sa používajú na elimináciu segregácie, najmä v samozhutňovacích zmesiach. Tieto prísady môžu mať uplatnenie aj pri 3D tlači, pretože pri čerpaní zmesi do tlačiarne dochádza k zvýšeniu viskozity a vyžaduje sa vyšší čerpací tlak.

Osobitná pozornosť by sa mala venovať parametrom akými sú: tekutosť zmesi, vytlačateľnosť, stabilita tlačeného tvaru, doba viazania (prepojenia vrstiev), pevnosť a zmrašťovanie betónu. Správna tekutosť zmesi umožňuje čerpanie z dávkovacích a miešacích systémov uložených priamo na stavbe. Regulácia reológie zmesi a jej prietok v čerstvom stave sú zabezpečené vďaka širokej možnosti výberu veľkosti zŕn plniva.

Je potrebné poznamenať, že príliš veľa častíc malej frakcie má za následok (zvýšenie intermolekulárneho trenia) čo môže zvýšiť viskozitu zmesi a negatívne ovplyvní jej tekutosť. Extrudovateľnosť je schopnosť zmesi sa vytláčať cez trysky v tlačovej hlave. Spracovateľnosť a konzistencia zmesi má zásadný vplyv na vytlačateľnosť.

Aby sa dosiahla dobrá vytlačateľnosť zmesi, mal by byť betón navrhnutý v súlade s princípmi navrhovania samozhutňovacieho betónu a striekaného betónu. Schopnosť zachovať

tlačený tvar je ďalším dôležitým parametrom, ktorý by mala spĺňať čerpaná zmes použitá na 3D tlač (D'OHERTY, 2018).

Tlačené vrstvy materiálu by mali udržiavať svoj tvar tvorený tryskami, pod tlakom nasledujúcich vrstiev aplikovaných tlačiarňou. Rozhodujúcim parametrom sú počiatočné pevnosti zatuhnutej zmesi. Stabilita tvaru je zabezpečená zvýšeným množstvom jemného kameniva a piesku. Prísady modifikujúce viskozitu môžu redukovať vytlačateľnosť a zlepšiť stabilitu tlačenej zmesi.

Hoci táto technológia je v experimentálnej fáze, 3D tlač z maltových zmesí môže spôsobiť revolúciu a zvýšiť potenciál stavebníctva (MATEC WEB CONFERENCES, 2018).

Experimentálna časť práce vykonávaná v laboratórnych podmienkach

Cieľom výskumu bol návrh vhodnej zmesi – cementového kompozitu, použiteľnej pre technológiu 3D tlače. Pridaním rôznych prísad do tejto zmesi sme sa snažili docieľiť to, aby výsledný produkt spĺňal základné požiadavky pre 3D tlač. Materiál musí byť v stave, kedy je možné nanášať na seba jednotlivé vrstvy za určitý časový interval, aby došlo k lepidlosti (adhézii) vrstiev, aby bola zmes dobre pohyblivá pri mechanickej aktivácii a bola dostatočne pevná na to, aby sa po uložení do konštrukcie nedeformovala.

Pri experimentoch sa overoval vplyv prísad na báze škrobu (prísada Casucol) a celulózy (prísada Walocel) na reologické vlastnosti, adhéziu a zmrašťovanie cementových kompozitov a to z pohľadu požiadaviek na vlastnosti materiálov pre 3D tlač. Súčasne sa overoval vplyv uvedených prísad na pevnosť cementových kompozitov.

Zloženie zmesi použitej na experimenty

V prvom kroku sa navrhla cementová malta, od ktorej sa očakávali vhodné pevnostné a ďalšie fyzikálne parametre. Táto malta bola ďalej modifikovaná uvedenými prísadami v rôznych dávkach a kombináciou prísad. Čistá cementová malta slúžila tiež ako referenčná malta, s ktorou sa porovnávali vlastnosti modifikovaných mált. (BUCH, 2019).

Referenčná malta mala nasledovné zloženie: cement – 240 g, piesok – 720 g, voda – 168 ml. Pridaním rôznych prísad do zmesi cementového kompozitu sme sa snažili docieľiť to, aby výsledný produkt spĺňal základné požiadavky pre 3D tlač.

Na základe experimentálnych meraní sa ukázali ako optimálne dávky prísady Walocel 0,15 % a Casucol 0,05 %.

Vykonané skúšky



Obr. 1 - Meranie priemeru rozliatia, Zdroj: BUCH, 2019

Obr. 2 - Hydraulický lis, Zdroj: BUCH, 2019

Obr. 3 - Graff - Kaufmannov prístroj, Zdroj: BUCH, 2019

Obr. 4 - Skúška odtrhu (odtrhový prístroj), Zdroj: BUCH, 2019

Vlastnosti mált sa posudzovali na základe výsledkov týchto skúšok:

- Skúška spracovateľnosti,
- Skúška pre pevnosť v tlaku pomocou hydraulického skúšobného lisu,
- Skúška objemových zmien cementového kompozitu,
- Odtrhová skúška – Skúška prepojenia dvoch vrstiev.

Po namiešaní sa vykonávala na každej zmesi osobitná skúška spracovateľnosti na Haegermannovom rozlievacom stolíku (Obr. 1), kde sa stanovil priemer rozliatia mált. Meranie bolo vykonávané v časových intervaloch 5, 20, 40 a 60 min. od zamiešania mált.

Následne sa stanovila objemová hmotnosť čerstvej malty pomocou odmernej nádoby známeho objemu. Hmotnosť prázdnej nádoby a nádoby naplnenej maltou sa stanovila na laboratórnych váhach. Objemová hmotnosť sa vypočítala ako pomer rozdielu hmotností plnej a prázdnej nádoby a známeho objemu nádoby.

Z každej malty sa vyrobili skúšobné vzorky tvaru valca s priemerom a výškou 30 mm. Vzorky sa vyrábali v kovových formách, zhutňovali sa na vibračnom stolíku. Vzorky boli ošetrované 28 dní vo vlhkom prostredí (Obr. 5) a po 28 dňoch sa stanovila pevnosť v tlaku v hydraulickom lise. Pevnosť sa vypočítala ako pomer maximálnej tlakovej sily a prierezovej plochy vzoriek.

Súčasne s pevnosťou sa stanovila aj objemová hmotnosť mált. Vzorky sa pred skúškou pevnosti odvážili a zmerali sa rozmery. Objemová hmotnosť sa stanovila ako pomer hmotnosti vzoriek a ich objemu.



Obr. 5 - Hotové vzorky zmesi po odformovaní uložené vo vlhkom prostredí
Zdroj: BUCH, 2019

Objemové zmeny cementových mált počas tuhnutia a tvrdnutia sa zisťovali skúškou zmrašťovania Grafkaufmannovým prístrojom. Z vybraných mált sa vyrobili trámčové vzorky (40x40x160 mm) so zabudovanými meracími kontaktmi. Prvé meranie dĺžky sa urobilo po 24 h (po odformovaní). Vzorky boli uložené v prostredí s relatívnou vlhkosťou vzduchu 50 až 60 % (Obr. 6). Ďalšie merania sa realizovali po 3, 6, 21, 29 a 42 dňoch. Zmrašťovanie sa vyhodnocovalo ako úbytok dĺžky v promile vzhľadom na pôvodnú dĺžku trámčov po odformovaní. Pri každom meraní dĺžky sa stanovila aj hmotnosť vzoriek a vyhodnocovali sa úbytky hmotnosti pri vysychaní.



Obr. 6 - Uloženie meraných vzoriek z referenčnej zmesi a z modifikovanej zmesi
Zdroj: BUCH, 2019

Adhézia, prepojenie dvoch vrstiev sa zisťovala pri rôznych časoch nanášania hornej vrstvy. Časový interval medzi nanášaním spodnej a hornej vrstvy bol 0, 30, 60, 90 a 120 min. Spodná vrstva bola nanesená na pevný, betónový podklad.

Na obr. 7 je možné vidieť vzorky po vykonanej odtrhovej skúške s oddelením hornej a spodnej vrstvy.



<http://www.mladaveda.sk>

Dosiahnuté výsledky

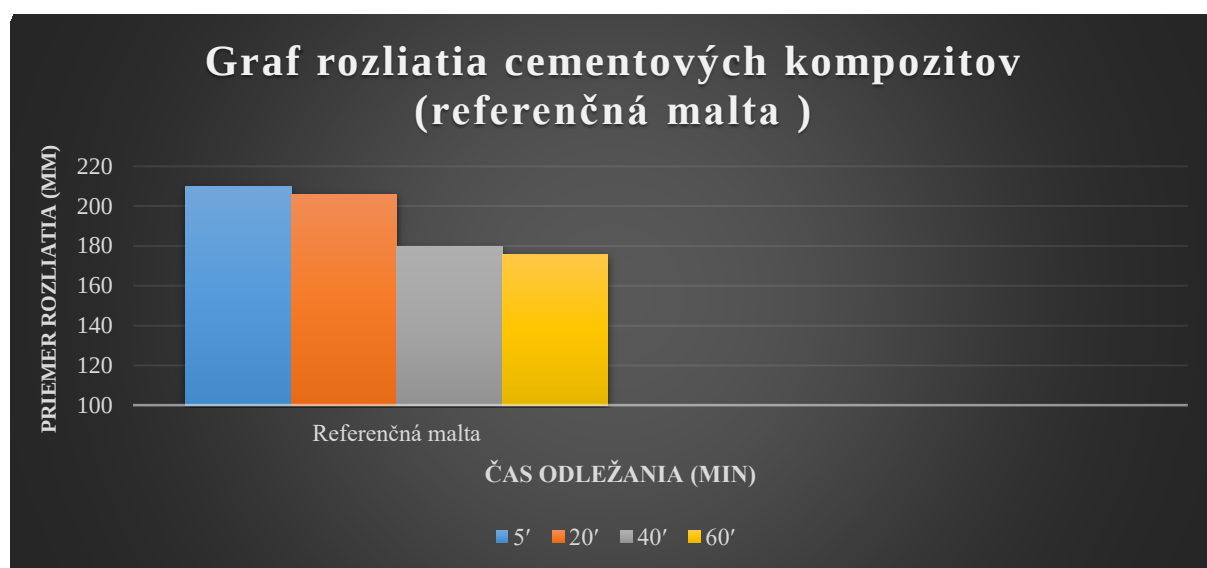
Vlastnosti čerstvých kompozitov

Konzistencia čerstvej referenčnej malty (priemer rozliatia) a tiež zmena konzistencie s časom odležania sa uvádza v tabuľke 1. Referenčná malta dosiahla objemovú hmotnosť 2140 kg/m^3 .

Referenčná malta	Čas odležania (min)			
	5	20	40	60
	Priemer rozliatia (mm)			
	210	206	180	176

Tabuľka 1 – Zmena konzistencie referenčnej malty v čase

Zdroj: BUCH, 2019



Graf 1 – Závislosť zmeny konzistencie referenčnej malty v čase

Zdroj: BUCH, 2019

Konzistencia (priemer rozliatia) a zmena konzistencie v čase modifikovanej malty sa uvádza v tabuľke 2. Táto malta mala nižší priemer rozliatia, cca 150 mm, ktorý si udržiavala počas 60 min. odležania. Objemová hmotnosť tejto zmesi bola 1630 kg/m^3 . Táto malta sa považovala z hľadiska reologických vlastností za optimálnu a ďalej sa na nej stanovilo zmrašťovanie, adhézia dvoch vrstiev a pevnostné parametre.

Dávka prísady (%)	Čas odležania (min)			
	5	20	40	60
	Priemer rozliatia (mm)			
(walocel) 0,15%	149,5	151	152	148
(casucol) 0,1%				

Tabuľka 2 – Vplyv kombinácie prísad na priemer rozliatia

Zdroj: BUCH, 2019



Graf 2 – Závislosť zmeny konzistencie od dávky kombinácie prísad
Zdroj: BUCH, 2019

Vlastnosti zatvrdnutých kompozitov

Skúška pevnosti v tlaku referenčnej malty a zvolenej modifikovanej malty

Použitie prísad zásadne ovplyvňovali aj vlastnosti zatvrdnutých mált. Dá sa konštatovať, že vplyv na pevnosti korešponduje s mierou prevzdušnenia čerstvých mált, ktoré bolo dôsledkom použitých prísad. Referenčné malty dosiahli pevnosť v tlaku po 28 dňoch cca 22 MPa. Pri aplikácii prísad vo všetkých prípadoch pevnosti v tlaku klesali. Skúška pevnosti v tlaku modifikovanej malty s kombináciou prísad Walocel (0,15%) a Casucol (0,05%) bola vykonaná po 7, 14 a 28. dňoch tvrdnutia.

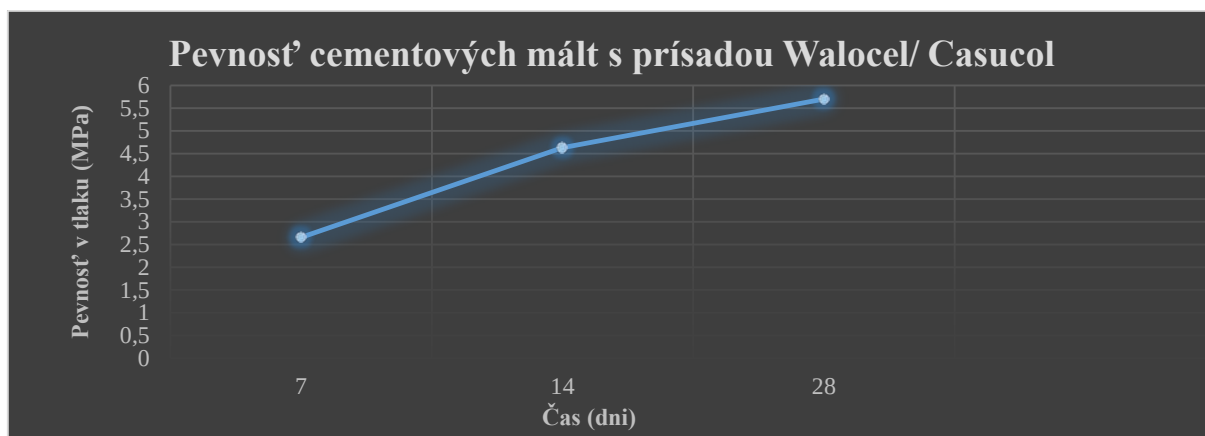
Druh vzorky	Vzorka číslo	Objemová hmotnosť (kg/m ³)		Pevnosť v tlaku (MPa)	
Referenčná malta	1.	2190	2195	19,81	21,79
	2.	2200		24,4	
	3.	2195		21,15	

Tabuľka 3 – Pevnosť v tlaku referenčnej malty po 28. dňoch tvrdnutia
Zdroj: BUCH, 2019

Deň	Vzorka číslo	Objemová hmotnosť (kg/m ³)		Pevnosť v tlaku (MPa)	
7	1.	1550	1567	3,16	2,66
	2.	1560		2,68	
	3.	1590		2,15	
14	1.	1640	1623	4,36	4,64
	2.	1630		4,38	
	3.	1600		5,17	
28	1.	1730	1697	5,41	5,70
	2.	1660		4,61	
	3.	1700		7,09	

Tabuľka 4 – Objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku modifikovanej cementovej malty po 7, 14 a 28 dňoch

Zdroj: BUCH, 2019



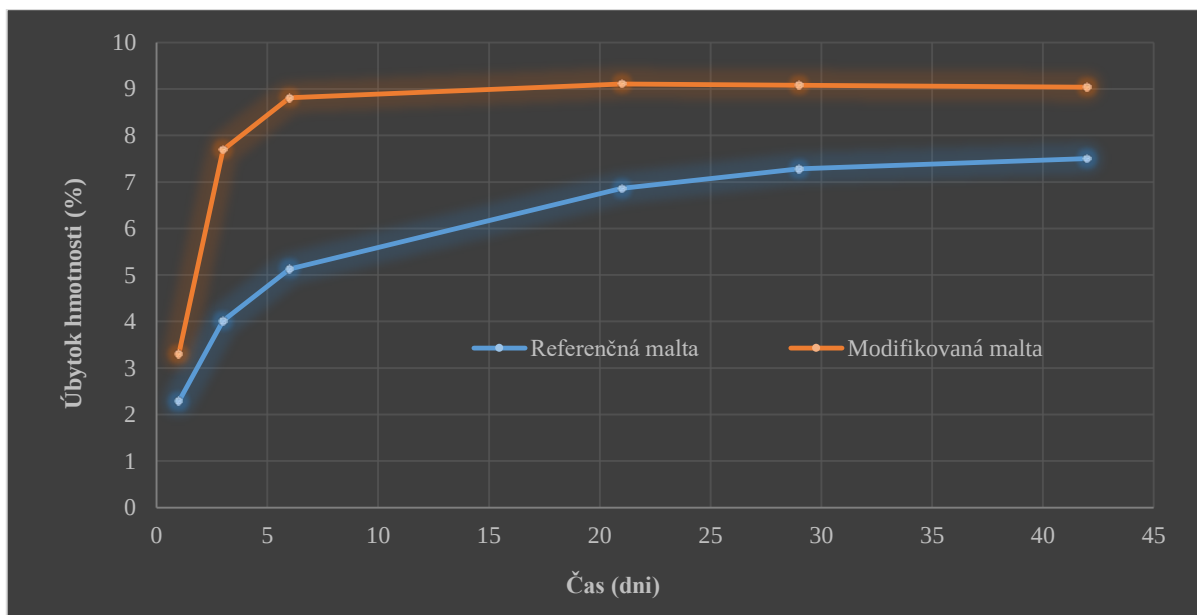
Graf 3 – Vývin pevnosti počas obdobia 28 dní

Zdroj: BUCH, 2019

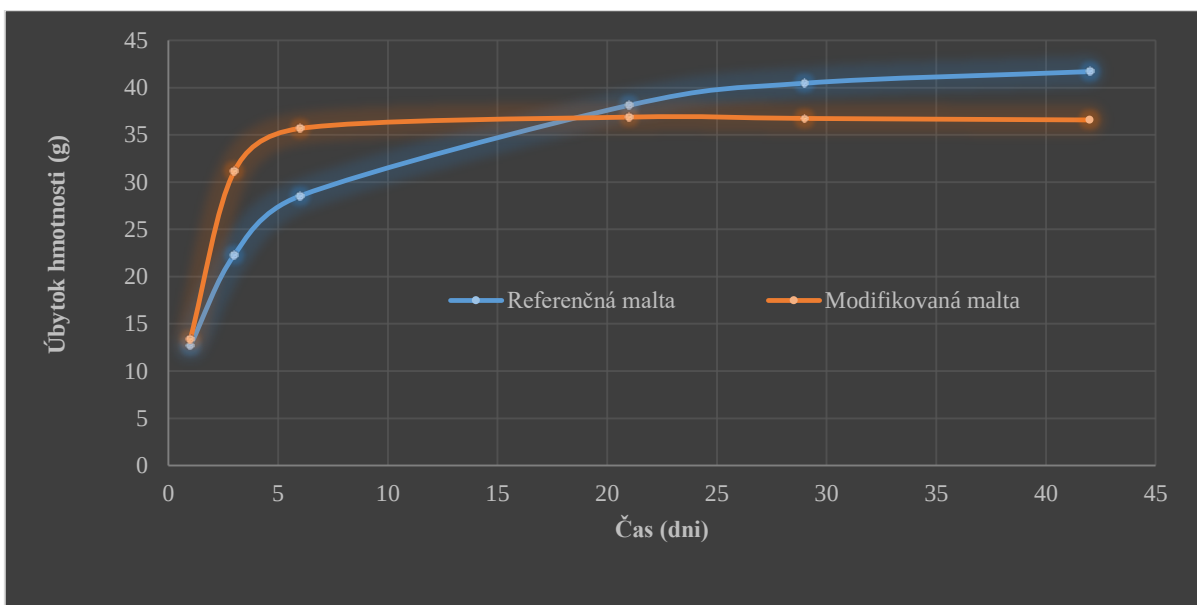
Zmrašťovanie cementových kompozitov

Pozitívny vplyv mala aplikácia kombinácie prísad na zmrašťovanie mált. Kým v prípade referenčných mált bez prísad sa dosiahlo zmrašťovanie po 42 dňoch cca 1 %, pri modifikovanej malte len 0,6 %. Veľmi zaujímavý je aj vývoj úbytku hmotnosti mált.

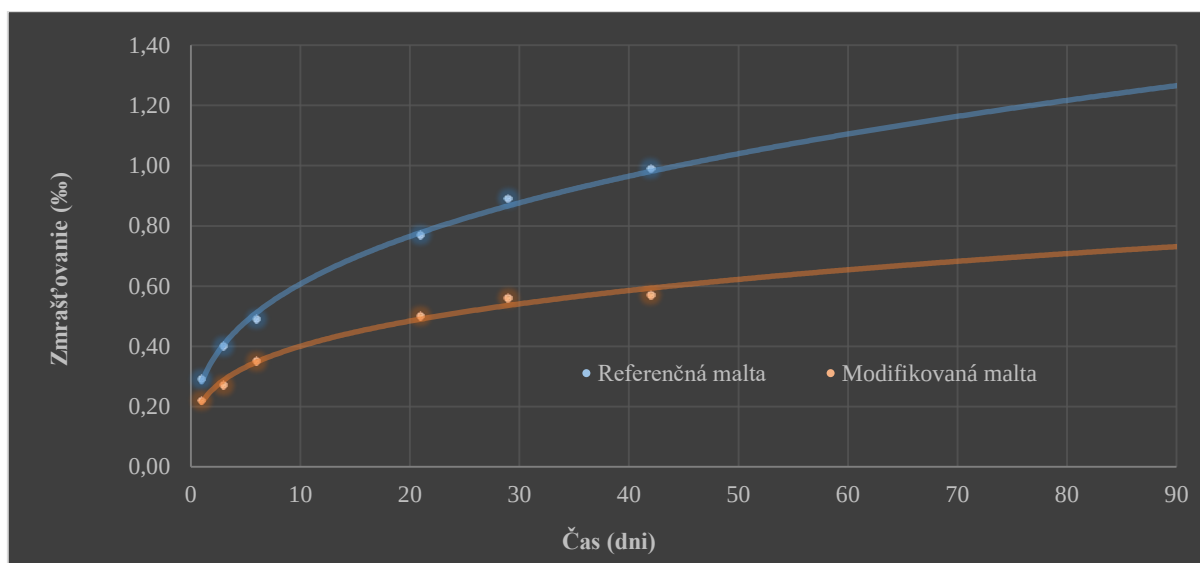
Celkové množstvo odparenej vody v (g) je pri obidvoch maltách porovnateľné, avšak v prípade modifikovaných mált sa zaznamenal podstatný úbytok hmotnosti v prvých siedmych dňoch a ďalej bol minimálny, pri referenčných maltách bola zmena hmotnosti vzoriek podstatne plynulejšia. To svedčí o podstatných rozdieloch v pórovej štruktúre mált.



Graf 4 – Úbytok hmotnosti referenčných a modifikovaných mált s časom vysychania, vyjadrený v percentách
Zdroj: BUCH, 2019



Graf 5 – Úbytok hmotnosti referenčných a modifikovaných mált s časom vysychania, vyjadrený v gramoch
Zdroj: BUCH, 2019



Graf 6 – Zmrašťovanie referenčných a modifikovaných cementových mált
Zdroj: BUCH, 2019

Odrhová skúška cementových kompozitov – Skúška prepojenia dvoch vrstiev

Prísady zásadne zlepšili taktiež adhezivitu malty. Pevnosť v ťahu malty sa síce aplikáciou prísad výrazne znížila, z cca 2,5 MPa na 1 MPa, čo korešponduje s pevnosťou v tlaku. Avšak pevnosť spoja dvoch vrstiev bola vyššia ako samotná pevnosť v ťahu kompozitu. Pri odrhových skúškach dochádzalo k porušeniu vzoriek mimo spoja dvoch vrstiev. Dosiahnuté hodnoty sa v podstate nemenili bez ohľadu na časový odstup medzi nanášaním druhej vrstvy. V prípade referenčnej malty došlo k výraznému zníženiu pevnosti spoja dvoch vrstiev už pri intervale medzi nanášaním druhej vrstvy 30 min. Vo všetkých prípadoch došlo k porušeniu (odtrhnutiu) na rozhraní dvoch vrstiev.

Referenčná malta				
Čas nanesenia druhej vrstvy (min)	Sila (kN)	Pevnosť spoja (MPa)	Podiel z pevnosti v ťahu (%)	Popis porušenia
0	4,25	2,56	100,00	Porušenie v strede výšky, kolmo na pozdĺžnu os
30	0,50	0,30	11,75	Oddelenie dvoch vrstiev
60	0,45	0,27	10,58	Oddelenie dvoch vrstiev
90	0,40	0,24	9,40	Oddelenie dvoch vrstiev
120	0,45	0,27	10,58	Oddelenie dvoch vrstiev

Tabuľka 5 – Výsledok vykonananej odrhovej skúšky na referenčnej malte
Zdroj: BUCH, 2019

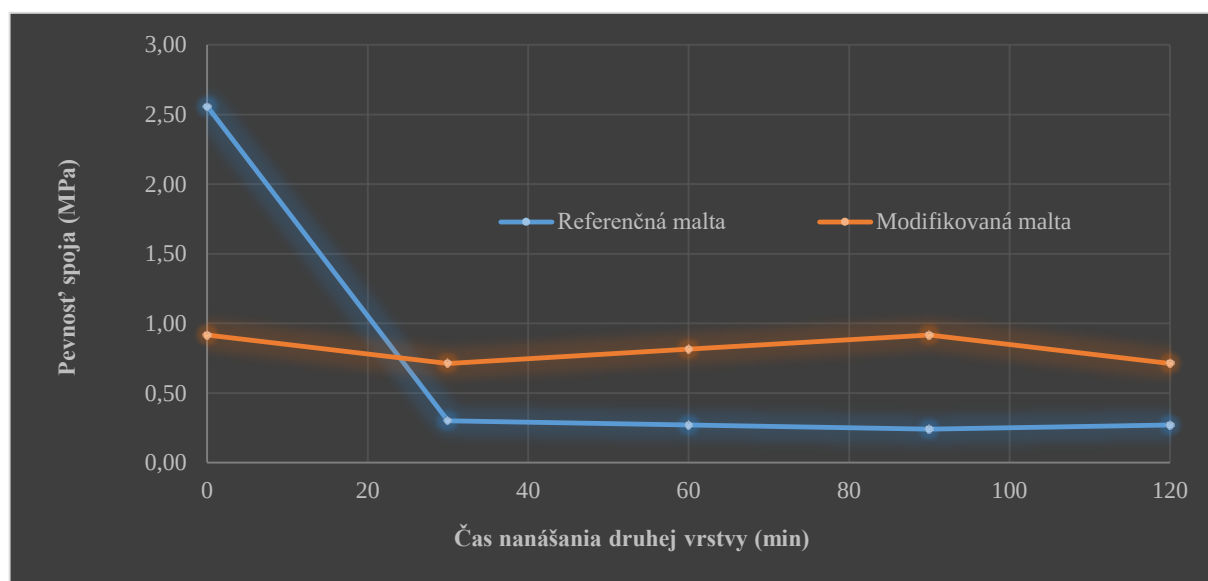
Odrhové skúšky boli vykonávané na modifikovanej cementovej zmesi po 28 dňoch od výrobenia. Tabuľky vyjadrujú dosiahnuté výsledky po vykonaní skúšky odrhu.

Modifikovaná malta				
Čas naniesenia druhej vrstvy (min)	Sila (kN)	Pevnosť v ťahu (MPa)	Podiel z pevnosti v ťahu (%)	Popis porušenia
0	1,8	0,92	100,00	Porušenie v strede výšky, kolmo na pozdĺžnu os
30	1,4	0,71	77,52	Porušenie v hornej vrstve, kolmo na pozdĺžnu os, nie na rozhraní
60	1,6	0,82	88,60	Porušenie v strede výšky, nie jednoznačne na rozhraní
90	1,8	0,92	100,00	Porušenie v strede výšky, nie jednoznačne na rozhraní
120	1,4	0,71	77,52	Porušenie v strede výšky, nie jednoznačne na rozhraní

Tabuľka 6 – Výsledok vykonanej odtrhovej skúšky na modifikovanej malte

Zdroj: BUCH, 2019

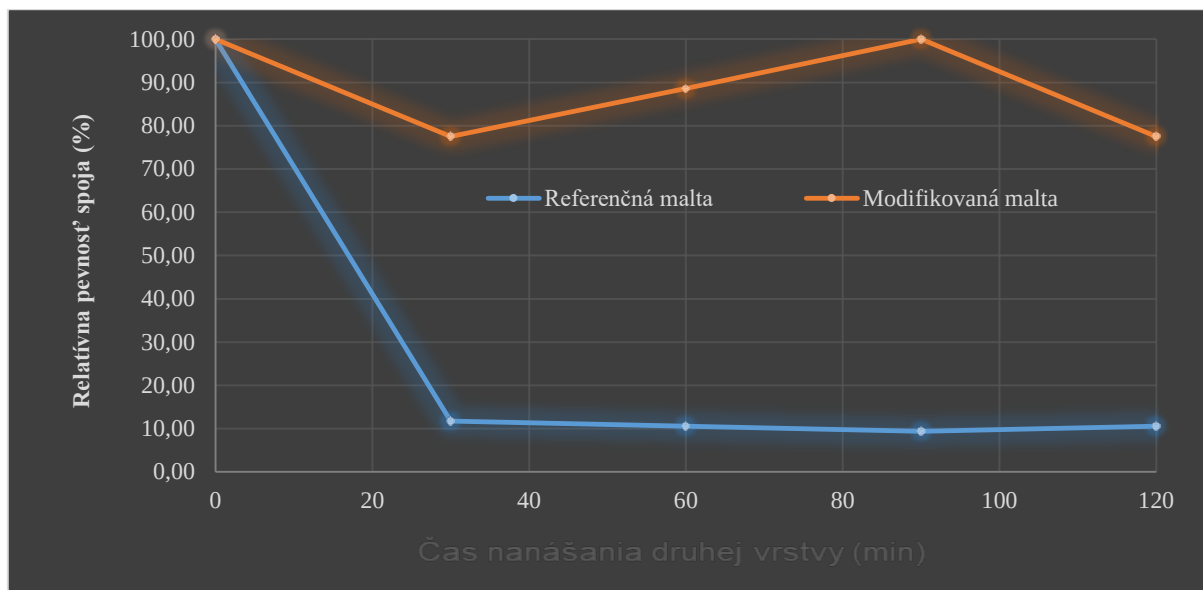
Vplyv času odležania na pevnosť spoja v MPa je vyjadrený v grafe 7.



Graf 7 – Vplyv času odležania na pevnosť spoja v MPa

Zdroj: BUCH, 2019

Vplyvu času odležania na relatívnu pevnosť spoja dvoch vrstiev v percentách je vyjadrený v grafe 8.



Graf 8 – Relatívna pevnosť spoja vyjadrená v %
Zdroj: BUCH, 2019

Záver

Na základe dosiahnutých výsledkov môžeme skonštatovať, že použité prísady výrazne modifikovali vlastnosti čerstvých aj zatvrdnutých cementových mált.

V práci boli preukázané tieto pozitívne vplyvy prísad:

- dosiahol sa výrazný pozitívny vplyv na zmenu konzistencie a pridaním prísad sa eliminovala strata spracovateľnosti v sledovanom čase (1h),
- použitie prísad viedlo taktiež k výraznému zvýšeniu adhézie cementových mált (lepivosti mált) a taktiež k podstatnému zredukovaniu zmrašťovania mált.

Negatívnym dôsledkom použitia prísad bolo:

- výrazné prevzdušnenie cementových mált,
- výrazné zníženie objemovej hmotnosti,
- značné zníženie pevnosti v tlaku a tiež pevnosti v ťahu cementových mált.

Tieto výsledky predstavujú dobrú východziu bázu pre ďalší návrh vhodných kompozitov pre 3D tlač. V ďalšom výskume by bolo vhodné sa zamerať na dosiahnutie vyšších pevností pri modifikácii cementových kompozitov a tiež možnosť regulovania tuhnutia a tvrdnutia týchto kompozitov po ich uložení v konštrukciách. Z hľadiska dosiahnutých pevností by bolo vhodné ďalej optimalizovať dávku použitých prísad tak, aby sa zachoval pozitívny vplyv na reológiu a priebeh tuhnutia ako aj zmrašťovanie cementových mált a súčasne sa redukoval pokles pevnosti (BUCH, 2019).

Tento článok odporúča na publikovanie vo vedeckom časopise Mladá veda:
prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.

Použitá literatúra

1. BUCH, Mário, Stanislav UNCIK, 2019. *Materiály pre 3D tlač domov – Diplomová práca* [online]. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave [cit. 25. mája 2020]. Dostupné z: <https://opac.crzp.sk/?fn=detailBiblioForm&sid=9F8942B94996237AA2FC14F666DC&seo=CRZP-detail-kniha>
2. D´OHERTY, Jamie, 2018. *3D Printing: The Future of Construction* [online]. South Carolina [cit. 5. mája 2020]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-construction-310120184/>
3. Matec web Conferences, 2018. [online]. European Commission, 2012. *Eurobarometer 73.3* [online]. Köln: GESIS Data Archive, [cit. 27. júna 2013]. Dostupné z: [http://netfo1.debis.org/dbksearch19/SDesc2.asp?no=5233&tab.\[cit.20.mája2020\].Dostupné](http://netfo1.debis.org/dbksearch19/SDesc2.asp?no=5233&tab.[cit.20.mája2020].Dostupné) z: https://www.researchgate.net/publication/328584503_Characteristic_of_materials_for_the_3D_printed_building_constructions_by_additive_printing/download
4. WHIRLWIND TEAM, 2016. *Impacts of 3d printing on the construction industry* [online]. [cit. 17. mája 2020]. Dostupné z: <https://www.whirlwindsteel.com/blog/impacts-of-3d-printing-on-the-construction-industry>