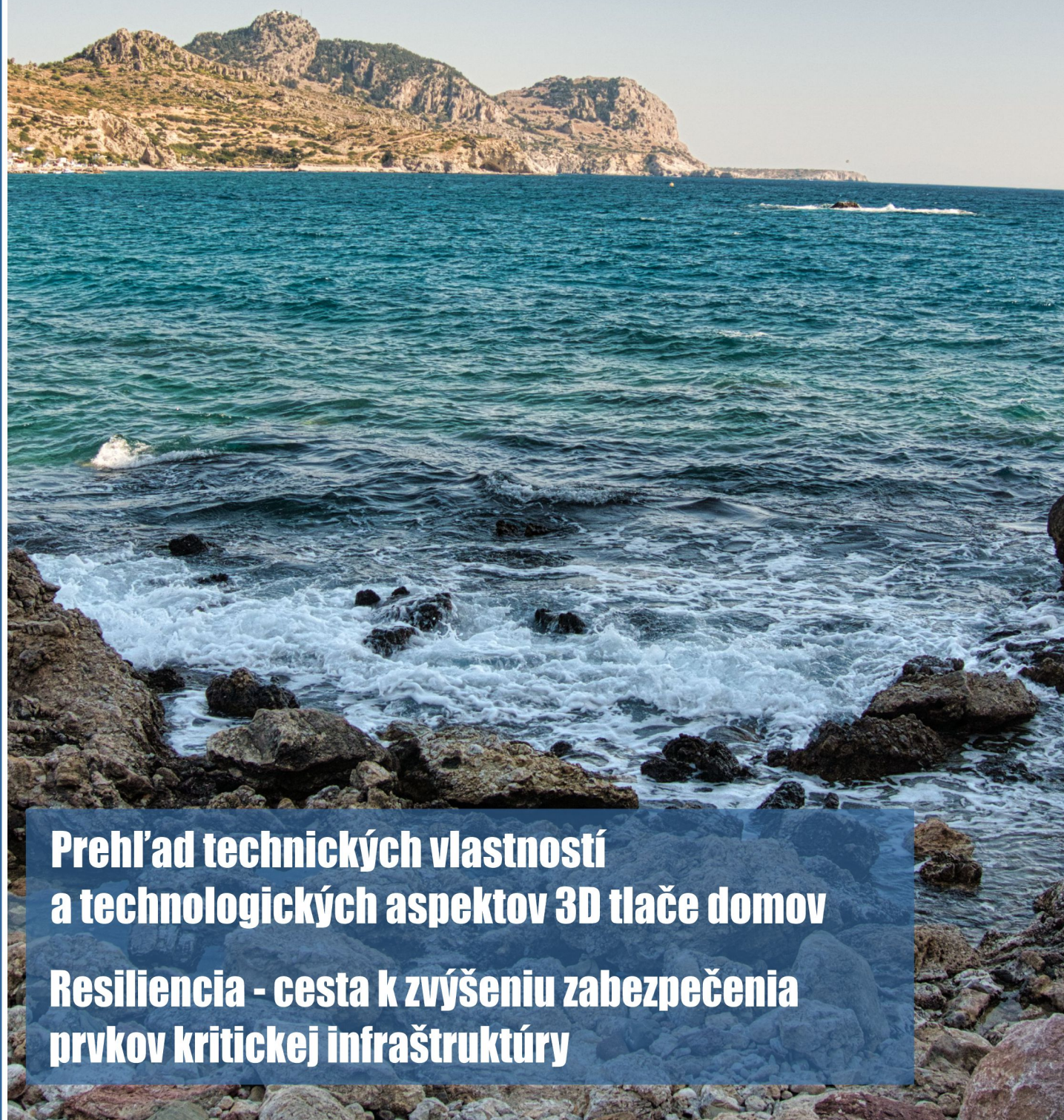


Mladá veda

Young Science



**Prehľad technických vlastností
a technologických aspektov 3D tlače domov**

**Resiliencia - cesta k zvýšeniu zabezpečenia
prvkov kritickej infraštruktúry**

Mladá veda

Young Science

MEDZINÁRODNÝ VEDECKÝ ČASOPIS MLADÁ VEDA / YOUNG SCIENCE

Číslo 2, ročník 7., vydané v decembri 2019

ISSN 1339-3189

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

Fotografia na obálke: Stredozemné more. © Branislav A. Švorc, foto.branisko.at

REDAKČNÁ RADA

doc. Ing. Peter Adamišín, 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 (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.

PREHĽAD TECHNICKÝCH VLASTNOSTÍ A TECHNOLOGICKÝCH ASPEKTOV 3D TLAČE DOMOV

OVERVIEW OF TECHNICAL CHARACTERISTICS AND TECHNOLOGICAL ASPECTS
OF HOUSES MADE WITH 3D PRINTING TECHNOLOGY

Adam Uhlík, Mário Buch¹

Autori pôsobia ako interní doktorandi na Katedre Materiálového inžinierstva Stavebnej fakulty Slovenskej Technickej Univerzity v Bratislave. Vo svojich vedecko-výskumných prácach sa venujú predovšetkým technológii 3D tlači domov a konštrukcií a vyvíjajú a skúmajú svoj vlastný materiál pre takúto 3D technológiu. Autori sa tejto problematike venovali už počas svojho inžinierskeho štúdia pre potreby ich diplomových prác.

The 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. The authors worked with this issue already during their engineering studies for the needs of their diploma theses.

Abstract

This article deals with modern 3D printing technology of houses and structures in building industry. Considering in the current knowledge of the technical properties of those printed structures and the properties. The materials used for printing need to satisfy properties as pumpability, extrudability and buildability. The acquired technical knowledge is then compared with the properties of current conventional structures which are masonry or concrete structures. In the next part of article are analyzed the most important technological aspects during the construction process, such as the print path, duration and time of the layering cycle and the methods of depositing the individual layers. Last part of article describing advantages and disadvantages in terms of economic, technical and material demands in comparison with classical construction procedures.

Key words: 3D printing, technology, analysis, construction, properties, aspects

¹ Adresa pracoviska: Ing. Adam Uhlík, Ing. Mário Buch, 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

Abstrakt

Článok sa zaoberá modernou technológiou 3D tlače domov a konštrukcií v stavebníctve. Prehľadom súčasného poznania technických vlastností takýchto tlačенých konštrukcií a vlastnosťami používaných materiálov ako sú čerpatelnosť, vytlačateľnosť a staviteľnosť. Nadobudnuté technické poznatky sú následne porovnávané s vlastnosťami súčasných bežných konštrukcií ako sú murované alebo betónové konštrukcie. V ďalšej časti článku sú analyzované najdôležitejšie technologické aspekty počas procesu výstavby ako sú dráha tlače, doba a čas cyklu vrstvenia a spôsoby ukladanie jednotlivých vrstiev. V závere príspevku sú popísané výhody a nevýhody z hľadiska ekonomickej, technickej a materiálovej náročnosti v porovnaní s klasickými postupmi výstavby.

Kľúčové slová: 3D tlač, technológia, analýza, konštrukcia, vlastnosti, aspekty

Úvod

Technológia 3D tlače je jednou z najdiskutovanejších v našej dobe. Skupina odborníkov ju dokonca označila za začiatok tretej priemyselnej revolúcie (Gregulić 2018). 3D tlač, známa tiež ako aditívna výroba, je počítačovo riadená technológia, ktorá využíva proces vytvárania trojrozmerných objektov na báze postupného vrstvenia. Málokto však vie, že sa 3D tlač sa využíva už aj v stavebníctve. 3D tlačové systémy vyvinuté pre stavebný priemysel sa označujú ako „stavebné 3D tlačiarne“. 3D tlač vytvára objekty po vrstvách, to znamená, že tvary môžu byť zhotovené rýchlo bez foriem a neprodukuje sa žiadny odpad. Vývoj 3D tlače v stavebníctve zaznamenal v posledných rokoch veľký pokrok. V stavebníctve možno 3D tlač použiť na vytvorenie stavebných komponentov alebo na „tlač“ celých budov. Na rozdiel od konvenčného prístupu odlievania betónu do debnenia, 3D betónová tlač (ďalej len „3DBT“), kombinuje digitálnu technológiu a nové pohľady na stavbu z materiálovej technológie, aby bola umožnená stavba voľnej konštrukcie bez použitia drahého debnenia. Aj keď je táto technológia stále iba v počiatočnom štádiu, jej potenciálne prínosy, ako napríklad rýchlejšia výstavba, nízke náklady na pracovnú silu a menej produkovaného odpadu, z nej robia jednu z najslubnejších stavebných technológií v budúcnosti.

Technické vlastnosti konštrukcií (materiálov) realizovaných technológiou 3DBT

Najdôležitejším aspektom pri 3DBT je dosiahnutie takého zloženia betónovej zmesi, ktoré by bolo schopné zabezpečiť maximálnu staviteľnosť a po naliatí betónu a maximalizovať tekutosť betónovej zmesi tak, aby sa zabezpečilo, že prechod zmesi cez trysku bude mať plynulý priebeh (Wolfs, a Zeeshan, 2019). V základe je dôležité, aby zmes mala vrstvy, ktoré udržia svoj tvar, ale nadobudnú dostatočnú adhezivitu, aby sa dokázali spojiť s novými vrstvami. Na dosiahnutie vhodných vlastností, musí mať vyrábaná betónová zmes adekvátne množstvo chemických prísad, ako sú napríklad superplastifikátory, ktoré sú používané na redukciu vody v betónovej zmesi. Tuhnutie tlačového materiálu v 3DBT je špecifikované ako relatívne pomalý chemický proces, kde dochádza k exotermickej hydratačnej reakcií medzi cementovými materiálmi a vodou. Reakcia procesu začína v tom momente, kedy sa zmiešava betónová zmes a voda v zmiešavacom čerpadle tlačiarne. Pevnosť a tuhosť v čase je dôležitou rozsiahlou charakterizáciou vývoja, ale aj funkcia niekoľkých parametrov procesu tlače v systéme. Tlačový materiál, v našom prípade betónový materiál, má celý rad špecifických

vlastností, ktoré sú odlišné od iných materiálov. Tieto vlastnosti sú: zmrašťovanie, tečenie, pevnosť závislá od veku, atď. Veľkosť tlače je veľmi dôležitá pre spôsob akým sa má tlačový proces vykonávať, závislá je však aj kvalita konečného výsledku. Počas tlače by sa malo dbať za zvýšenie zaťaženia na nevytvrdených vrstvách, pretože to ovplyvňuje stabilitu tlačenej objektu. To súvisí s časom tlače, časom nastavenia a časovým intervalom vrstvy.

Betónové materiály pre 3DBT a ich vlastnosti

Betónový materiál je navrhnutý tak, aby prekonal množstvo obmedzení súvisiacich s náročným procesom 3DBT, a to nasledovne (Suvash, Jen Tan a Gibson, 2018) :

- optimálna viskozita čerstvého betónu je potrebná na jeho dobré vytláčanie cez tlačovú hlavu a vytváranie potrebných vrstiev
- vyžaduje sa vysoká pevnosť na kompenzáciu potenciálnej slabosti spojovacích bodov medzi susednými vrstvami.
- maximálna veľkosť kameniva musí byť kompatibilná s rozmerom vytlačacou hlavou,



Obr.1– Príklad materiálu a vytlačenej konštrukcie pomocou 3D betónovej tlače

Zdroj: 3DPRINT, 2016

Aby sa efektívne využili funkčné/mechanické vlastnosti 3D tlačných betónových výrobkov, vyžaduje vrstvenie betónových prvkov aby čerstvý tlačný materiál mal určité špecifické reologické vlastnosti:

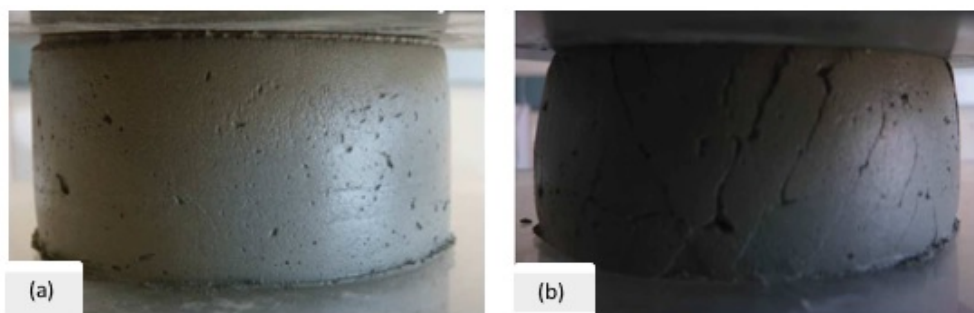
- Čerpaťnosť (Pumpability): kapacita, ktorá sa má spracovať a presunúť na tlačovú hlavu do trysky cez čerpací systém počas daného časového intervalu.
- Vytlačateľnosť (Extrudability): schopnosť, aby bol materiál správne vytlačený cez tlačiarenskou hlavu s rovnomerným-kontinuálnym tokom materiálu.
- Staviteľnosť (Buildability): schopnosti vrstiev, ktoré sú na seba natláčané, aby mali postačujúce vlastnosti na udržanie hmotnosti nasledujúcich vrstiev, ktoré sa ukladajú jedna na druhú v procese tlače.

Mechanické vlastnosti konštrukcii v 3DBT

Dobrá pevnosť konštrukcie ako jedna z mechanických vlastností je základná požiadavka pri každej stavbe (Unčík, Rouseková, Bajza, Juriček, Goča a Kňaze 2010), pri 3DBT je dôležitá

taktiež pevnosť medzi vrstvami. Výsledky výskumu extrudovaného betónového materiálu naznačujú zníženú pórovitosť, čo vedie napríklad k zvýšeniu pevnosti a tuhosti.

Pevnosť konštrukcii v 3DBT: aj keď je pomer vody a cementu (vodný súčiniteľ) dominantný pri pevnosti betónu, taktiež prevzdušňovanie materiálu výrazne ovplyvňuje pevnosť a to tak, že ju znižuje. V 3DBT, po vytlačení vrstvy, musí materiál dosiahnuť dostatočnú pevnosť, aby niesol zaťaženie nasledujúcich vrstiev (Suvash, Jen Tan a Gibson, 2018).



Obr.2– Skúšobná zostava pre meranie pevnosti materiálov,
a) dobrá pevnosť, b) horšia pevnosť- strata tvaru a výskyt trhlín
Zdroj: SUVASH P., M. JEN TAN a I. GIBSON, 2018

Pevnosť medzivrstvy v 3D tlačenej konštrukcii: Podľa (Sibel 2018) prepojenie medzi rôzne starými betónovými vrstvami musí zaistiť dostatočne vysokú šmykovú pevnosť a pevnosť v tlaku, ako hlavnú požiadavku na odolávanie pôsobeniu tiaže na konštrukciu. So zvýšeným časom medzi tlačou vrstiev sa predpokladá, že chemická väzba medzi vrstvami sa znižuje keď spodná vrstva tuhne a vytvrdzuje sa. Pre lepšiu príľnavosť betónu vo vrstve by preto mal byť čas tlače kratší.

Vlastnosti čerstvého a vytvrdeného stavu konštrukcie tlačenej 3D betónovej tlačí

Požiadavky na kvalitu vytlačenej konštrukcie by mali spĺňať určité parametre a dosahovať potrebnú kvalitu, preto treba brať špeciálny ohľad na stav konštrukcie počas celej doby tlače.



Obr.3– Príklad čerstvých ešte nezatvrdnutých vrstiev na vrchu a spodných už zatvrdnutých vrstiev
Zdroj: ALTER J., 2015

Čerstvý stav konštrukcie: Dizajn 3D konštrukcie má svoje základy v mokrých zmiešaných betónoch, používaných pri tlačení. Buswell a Lean De Silva (2018) vo svojej publikácii upozorňujú, že betón po čerpaní musí udržať svoj tvar s malou alebo žiadnou deformáciou po vytlačení. Pri spojení kvalitatívnych ukazovateľov čerpatel'nosti, extrudovateľnosti a stavateľnosti, s reologickými a fyzikálnymi vlastnosťami mált sa treba zamerať na:

Otvorený čas a jeho vplyv na čerpanie a vytlačanie: Čerpatel'nosť opisuje ľahkosť, s akou sa čerstvá zmes prepravuje z čerpadla do extrúžnej trysky. Jedným z problémov je segregácia častíc v hadici, ktorá môže viesť k upchatiu spôsobenému zložením zmesi alebo nedostatočným miešaním pred čerpaním. 3D betónová tlač je obzvlášť citlivá na pauzy v procese budovania, pretože konštrukcie sú vytvárané postupným vrstvením materiálov, ktoré sa musia spojiť, aby vytvorili homogénnu zložku, čím je väčší potenciál vytvárať studené spoje medzi vrstvami ako v konvenčnejších metódach liatia (Yin, Qu, Zhang a Lim, 2018). Otvorený čas súvisí s „operačným oknom“, kde sa musí vytláčať určený objem materiálu. Tvar výtlačných trysiek sa mení, ale väčšina z nich je buď kruhová alebo pravouhlá. „Extrudovateľnosť“ je definovaná ako schopnosť extrudovať zmes tryskou bez výraznej deformácie prierezu a s prijateľným stupňom deštrukcie vytlačeného vlákna kompozitu. Neexistujú žiadne formálne referenčné testy na vyhodnotenie vytlačateľnosti a v súčasnosti sa to hodnotí vizuálnou kontrolou.

Deformácia pri vlastnej hmotnosti: Metóda vytlačania vrstiev často používa určitú kontrolovanú deformáciu vrstiev, čo napomáha priľnavosti k predchádzajúcej vrstve. Relatívne nízka medza sklzu potrebná na čerpanie je rovnako potrebná ako požiadavky na to, aby potlačené vrstvy udržali svoju geometriu a tvar na mieste. Obzvlášť ovplyvnené sú vysoké štruktúry, ktoré musia byť vyrobené vo vertikálnej polohe kde je zaujímavé sledovať jej mechanické správanie v počiatočnom štádiu (Buswell a Lean De Silva 2018). Boli navrhnuté dva spôsoby na zmiernenie problémov s rýchlosťou stavania: dynamické nastavenie výšky trysky počas tlače a starostlivé riadenie rýchlosti nahromadenia, ktoré môže zahŕňať prídanie urýchľovačov vstrekaných pred vytláčaním, aby sa urýchlilo vytvrdzovanie nižších vrstiev tak, aby boli schopné udržať postupne sa zvyšujúce zaťaženie.



Obr.4– Zrútenie vytlačenej konštrukcie v dôsledku nedostatočného zatvrdnutia spodných vrstiev
Zdroj: BUSWELL R.A. a W.R. LEAN DE SILVA, 2018

Zatvrdnutý stav konštrukcie: Materiál po vytlačení môže byť rovnako silný ako klasický liaty materiál a je dokonca tiež možné dosiahnuť väčšiu hustotu materiálu. V súčasnosti je kľúčovým faktorom výskumu preukázanie a správne nastavenie všetkých technologických aspektov a vlastností materiálov ako sú:

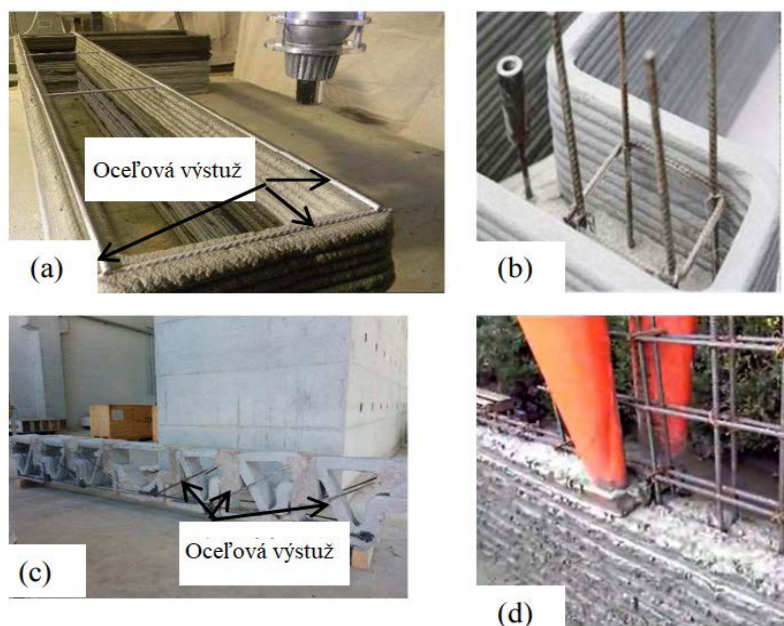
Adhézia (priľnavosť) vrstvy: Tento problém vzniká vytváraním studených spojov medzi vrstvami, kde je čas cyklu príliš dlhý. Taktiež sa ukázalo, že veľkosť častíc piesku, taktiež ovplyvňuje adhéziu vrstiev v zmesiach (Yin, Qu, Zhang a Lim, 2018). Výskum skenovacím elektrónovým mikroskopom zistil, že medzivrstvová adhézia-priľnavosť môže byť; slabo viazaná, dočasne slabo viazané alebo silne viazané. Studené spoje môžu byť dočasné, pretože medzivrstvová adhézna pevnosť sa zvyšuje s postupujúcou hydratáciou cementu.

Objemová hustota a nedostatočné plnenie: Proces plnenia môže vytvoriť medzery v konštrukciách, čím sa znižuje efektívna hustota a potenciálne sa znižuje pevnosť (Buswell a Lean De Silva 2018). Tvorba dutín je závislá na zložení zmesi a stabilite reologických vlastností počas tlače, pretože to ovplyvňuje charakteristický tvar materiálu pri vytlačovaní. Deformácia tlačeneho materiálu hrá úlohu pri tlačení materiálu do týchto dutín, aby sa minimalizoval ich výskyt.

Zmršťovanie a trvanlivosť: Dôležitou výhodou 3DBT je odstránenie debnenia, čím sa odstraňuje bariéra medzi vytvrdzovaním betónu a okolitým prostredím. Vytlačené konštrukcie majú často väčšiu exponovanú povrchovú plochu ako pri odlievaní a v kombinácii s nízkymi pomermi voda/cement, ktoré sa zvyčajne používajú v 3D tlačenej malte, sa zvyšuje pravdepodobnosť vzniku trhlín v dôsledku autogénneho zmršťovania. Feng, Meng, Chen a Ye (2015) hovoria, že návrhy zmesí preto musia minimalizovať zmeny rozmerov v dôsledku suchého a autogénneho zmršťovania a počas vytvrdzovania sa musí konštrukciám venovať väčšia pozornosť. V súčasných technológiách 3DBT sa používajú jemné plnivá s maximálnou veľkosťou častíc do 2 mm. Jemnejšie častice majú vyššiu spotrebu vody v dôsledku väčšieho pomeru povrchu k hmotnosti, takže to môže viesť k vyššiemu zmršťovaniu pri sušení. V 3D tlačenej zmesiach je obsah kameniva výrazne nižší, asi 50% z objemu betónu, zatiaľ čo kombinácia jemného a hrubého kameniva v normálnom betóne môže predstavovať asi 70% objemu (Suvash, Jen Tan a Gibson 2018).

Výstuž používaná v konštrukcií

Kvôli potrebám lepšej konštrukčnej výkonnosti a konštrukčnej spoľahlivosti je vo všeobecnosti potrebné, aby betónové konštrukcie doplnila výstuž. Je to však náročná úloha umiestniť a nainštalovať výstuž v automatizovanom procese 3D tlače keďže tlačíme po vrstvách. Suvash, Jen Tan a Gibson (2018) v ich štúdiu ukázali, že štruktúrna kapacita a ťažnosť sa môžu výrazne zlepšiť pri stĺpcoch a nosníkoch, keď sa zosilňujú pomocou vystuženého polyméru. Veľá úžitku v štruktúrnom výkone by sa dosiahlo, ak by sa vyvinul hybridný tlačový systém, ktorý dokáže tlačiť betón spolu s takýmto vystužením v rôznych usporiadaniach. Manuálne umiestnenie takejto výstuže je možné a bolo uskutočnené, ako je znázornené na obrázkoch č.5.



Obr.5– Príklady rôznych typov výstuží a ich aplikácie do konštrukcií
Zdroj: SUVASH P., M. JEN TAN a I. GIBSON, vlastná úprava 2018

Porovnanie technických vlastností konštrukcií realizovaných technológiou 3DBT a súčasných bežných konštrukcií

Limitovaná vhodnosť materiálov pre použitie do 3DBT je jeden z najväčších rozdielov oproti klasickým stavebným technológiám. Pri 3DBT nepoužívame bežné materiály ako tehla, železobetón alebo tvárnice ale používame betónovú zmes - cementovú maltu s použitým rôznych chemických prísad na zlepšenie jej vlastností. Kvalita takejto betónovej zmesi závisí nielen od chemickej reakcie, ale aj od zhutnenia. Pri 3D technológii zhutnenie nie je možné preto je potreba prispôbiť vlastnosti vytlačeného materiálu aby sme predišli potrebe zhutnenia. Hlavný rozdiel pri 3D technológii je ukladanie čerstvých vrstiev na seba preto je priamo potrebná dobrá pevnosť medzivrstvy (Wu a Wang 2016). Takéto spojenie je závislé od dobrých vlastností čerstvých vrstiev a vlastností po zatvrdnutí. Dôležité je taktiež kontrolovať stupeň zatvrdnutia a pevnosti spodných už vytlačených vrstiev, pre ich schopnosť udržať nasledujúce tlačené vrstvy. Takáto vytlačená konštrukcia na rozdiel od klasickej napr. murovanej konštrukcie nie je schopná bez pridania dodatočnej výstuže držať dostatočnú pevnosť. Preto je pre zvýšenie pevnosti potrebná výstuž. Takýto proces však ešte nie je plne automatizovaný a je potrebná manuálna práca. Automatizácia ukladania výstuže umožní rýchlejšiu a efektívnejšiu tlač.

Technologické aspekty výstavby konštrukcií realizovaných technológiou 3DBT

V základe je 3D tlač obmedzená špecifickými geometrickými možnosťami a okrem toho, vlastnosti tlačenej výroby v čerstvom aj v zatvrdnutom stave závisia aj od parametrov procesu. Viac ako u iných techník 3D tlače tu dominujú geometrie lineárne umiestnených vrstiev (Lageman 2019). Smer vrstvy zavádza smerovú závislosť ale ak nie je vo vlastnostiach nastaveného produktu, tak ho určuje stratégia tlače. Ovplyvňuje napríklad výstavbu uhlov a rohov v konštrukciách, ktoré budú často v krivkách nástroja (s minimálnym polomerom). V 3D tlači vzájomne na seba závisia dizajn, materiál, proces a produkt. Gosselin, Duballet a Roux

(2016) vo svojej publikácii píše, že stratégia tlače nemôže byť zvolená nezávisle od konštrukčných, materiálových alebo (požadovaných) úvah o konečnom výrobku. Zváženie dôležitých obmedzení, je základným krokom počas celého procesu výstavby pomocou 3D tlače.

- Doba voľnobehu trysky nemôže byť príliš dlhá, inak môže betón stuhnúť a zablokovat' alebo upchať tlačiareň
- Spodná vrstva musí byť schopná niesť hornú vrstvu, preto časový interval medzi ukladaním nasledujúcich vrstiev nemôže byť kratší ako minimálny čas vytvrdzovania.
- Následné vrstvy musia byť schopné prilnúť, preto interval medzi nanesením nasledujúcich vrstiev by nemal prekročiť kritický limit.
- Tlačiarenské trysky nemôžu pri zrážke kolidovať s predtým nanesenou vrstvou alebo inými tryskami, pretože ak sa tak stane, pri pohybe medzi koncovými bodmi segmentov steny tryska nemusí byť ďalej schopná pohybu v priamke.

Dôležité technologické aspekty výstavby 3DBT

Pre dosiahnutie požadovaných konštrukčných vlastností a pevností musíme dodržať určité stavebné postupy a aspekty výstavby. Medzi tie najdôležitejšie patria:

Dráha tlače: Základným princípom pri vytváraní geometrie 3DBT je dráha tlače, ktorú kopíruje tlačová hlava. V žiadnej literatúre ani vedeckom článku nebol stanovený žiadny štandard pre označenie súradnicového systému. Pre takúto tlač uvádzajú sa iba smery I, II a III, kde I je rovnobežná so smerom tlačovej hlavy, II je horizontálna rovina, a je rovnobežná s vertikálnou a III je vertikálna a rovnobežná s horizontálnou (Gosselin, Duballet a Roux 2016). Základná stavebná sekcia pre 3D betónovú tlač je jeden vrstevnatý geometrický úsek v podstate s nekonečnou dĺžkou, ktorý sa dá nastaviť ako funkcia uvedených parametrov. Je zrejmé, že čím menší je vrstevnatý úsek, tým podrobnejší môže byť potlačený predmet.



Obr.6 – Príklad procesu výstavby pomocou 3D stavebnej tlačiarne od firmy APIS CORE
Zdroj: APIS CORE, 2018

Doba/Čas cyklu vrstvenia: Proces vytlačania, ktorý umiestňuje tlačný materiál a vytvára konštrukcie vyžaduje, aby stále opakoval rovnakú trasu, ktorá sa opakuje v každej vrstve na vytvorenie vertikálnej výšky. Dĺžka dráhy vytlačania a rýchlosť, s ktorou sa materiál umiestňuje, sú kľúčové faktory, ktoré ovplyvňujú tak výrobný čas konštrukcie, ako aj čas potrebný na prekrytie vrstiev, ktoré ovplyvňujú pevnosť medzivrstvovej väzby a môžu podporovať spájanie za studena (Wolfs a Zeeshan 2019). Rýchlosti pre obdĺžnikové trysky

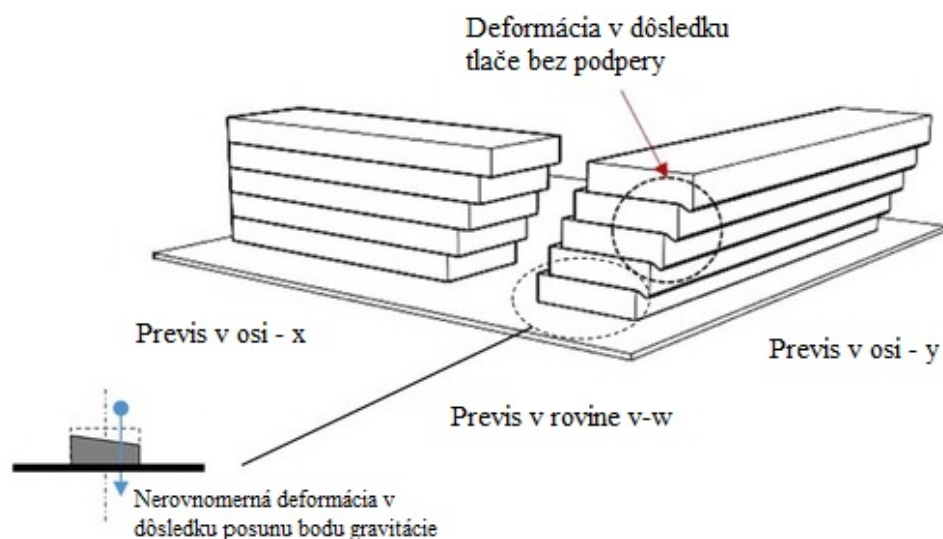
(40 mm x 10 mm) sú medzi 30 mm/s a 35 mm/s, zatiaľ čo rýchlosti uvádzané pre 9mm kruhovú trysku 50 mm/s až 66 mm/s na základe systému umiestnenia tlačiarne. Obmedzujúcim faktorom, ktorý ovplyvňuje rýchlosť tlače, je však rýchlosť, ktorou sa ukladajú vrstvy pri zmene smeru. Konštrukcia a vytvorenie dráhy nástroja je závislá od vlastností materiálu, charakteristík procesu a veľkosti, tvaru a vytvrdených vlastností vyrábaného komponentu / prvku.

Rohy v konštrukcií (tlačová plocha): Zmena odchýlky tlače od priamky, znamená že sa blížíme k rohom konštrukcie, vzniká rozdiel medzi rýchlosťou ukladania vnútorných vrstiev (v blízkosti rohového stredu) a vonkajšom, čo vedie k rozdielu v ukladaní materiálu. Ak sa tento rozdiel stane príliš veľkým, môže to viesť k roztrhnutiu vonkajšieho okraja vrstvy a šikmého prierezu v dôsledku rozdielu ukladania. Preto by mal byť zachovaný minimálny polomer zakrivenia, ktorého hodnota je však vysoko závislá na jednotlivých parametroch 3DBT, vrátane samotného úseku vrstvy (Alter 2015).



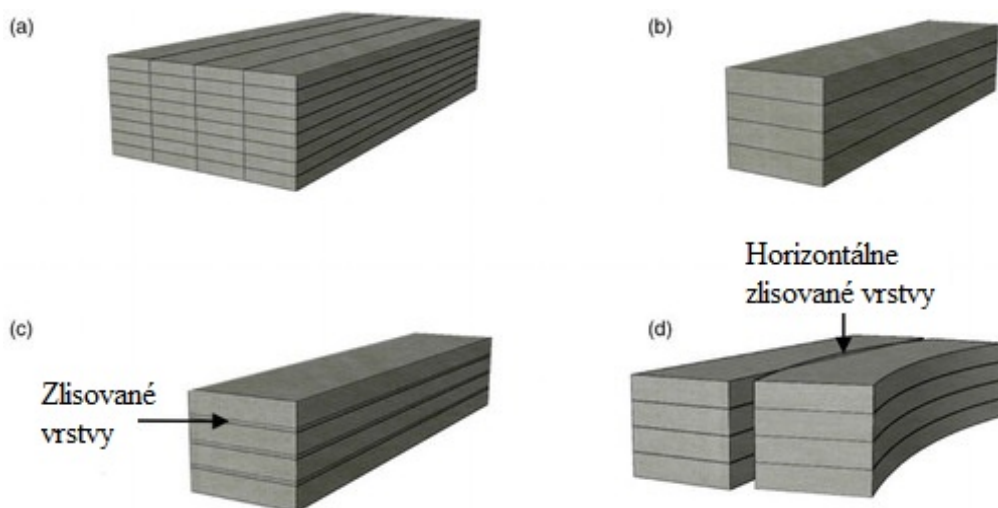
Obr.7– Rohy v 3D tlačenej konštrukcii
Zdroj: ALTER L., 2015

Vertikálne ukladanie vrstiev: Jednou z najzákladnejších metód vytvárania 3D objektov pomocou vytvárania kontúr je vertikálne vrstvenie. Dôležité je to, ako majú byť vrstvy naukladané na seba a to nám ovplyvňuje jednoduché rovné vrstvenie, ktoré je priamo ovplyvnené časom nastavenia, správnym prietokom betónu a počtom nestuhnutých vrstiev, ktoré sa nachádzajú pod súčasnou potlačenou vrstvou. Nedostatky, spôsobené z dôsledku nepresnosti tlačovej hlavy, nekonzistentnosti vlákna alebo dynamického ukladania vlákna, môžu viesť k predčasnemu zrúteniu konštrukcie prostredníctvom nestability počas tlače (Wolfs a Zeeshan 2019). Z toho vyplýva, že vrstvenie je skôr riadené účinnou tuhosťou kombinovaných vrstiev, ako ich pevnosťou. Stabilita je však daná materiálovými vlastnosťami, ale aj skutočnou 3D geometriou, ktorá dokáže výrazne zlepšiť vlastnosti oproti 2D situácii a to napríklad pri použití metódy vlnitej geometrie. Správne polozenie vrstvy môže znamenať že konštrukcia bude natoľko tuhá a pevná, aby sa zabezpečilo vrstvenie ďaleko za hranice praktických veľkostí tlačiarňí.



Obr.8 – Previsy pri vertikálnom ukladaní vrstiev
Zdroj: WOLFS R., A. ZEESHAN, vlastná úprava 2019

Horizontálne ukladanie vrstiev: Wolfs a Zeeshan (2019) sa vyjadrili, že geometria viac ako jednej hrúbky vrstvy môže byť vytvorená tlačéním vrstiev vedľa seba. Pri vodorovnom ukladaní vrstiev by malo byť zachované pravidlo, aby výška tlačovej hlavy nad povrchom tlče bola rovnaká, ako šírka sekcie trysky. To vedie k zabráňovaniu tlakovej interakcii a hladkému ukladaní tlačenej vrstvy medzi tlačovou hlavou a vrstvou. Prípadné mierne tlačenie tlačovej hlavy do vrstvy môže mať niekoľko účinkov, ktoré dokážu pozitívne ovplyvniť štruktúrne vlastnosti potlačeného výrobku. Generovaný tlak v tlačenej vrstve pod hlavou trysky tlačiarne by v podstate dokázal zlepšiť zhutnenie, ako aj príľnavosť rozhrania.



Obr.9– Znázornenie prepojení jednotlivých horizontálne vytlačených vrstiev
Zdroj: WOLFS R., A. ZEESHAN, vlastná úprava 2019

Parametre procesu tlače a reakčné podmienky tlače

Stavebný proces v 3DBT je taktiež ovplyvnený parametrami procesu tlače. Medzi hlavné parametre patria:

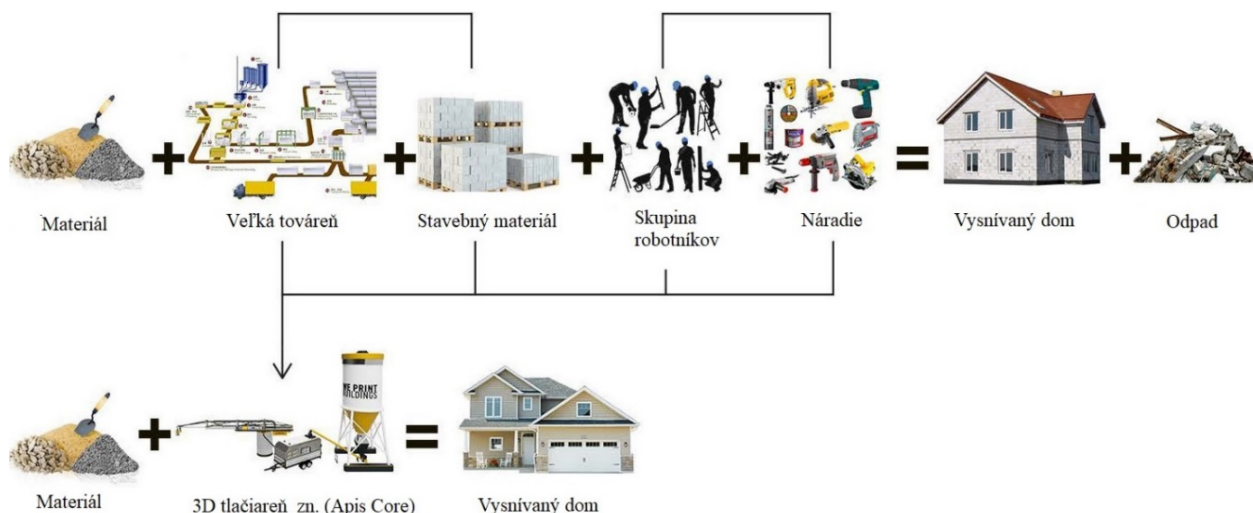
Vek betónu (čas medzi miešaním a tlačou): Proces miešania nie je nepretržitým stálym procesom, ale skôr krokovým procesom, pri ktorom mixér vyplňa zásobník nad čerpadlom a mieša ďalší materiál, keď hladina nádrže klesne pod určitú prahovú hodnotu. Vek betónu aj tlak v systéme sa teda líšia. V súčasnosti môžu tlačiarne ukladať nekonečne dlhé vrstvy materiálu. Aby sa však dosiahla primeraná všestrannosť, je nevyhnutné, aby sa prúd vrstvy mohol zastaviť a znovu spustiť, takže tlačaná čiara sa môže ukončiť a pokračovať na inom mieste (Yin, Qu, Zhang a Lim 2018).

Teplota miešania: Začiatková teplota systému a podmienky procesu sú veľmi dôležité aspekty, čo isté ako aj trenie v systéme, ktoré závisí od radu čiastkových parametrov, ako je tlak čerpadla, rozmery sekcií nasledujúcich častí, dĺžka hadice a krivky a uhly v systéme (Yin, Qu, Zhang a Lim 2018). Dôležité aspekty teploty sú tepelná vodivosť systému a samotná reakcia (exotermická).

Zmiešaný vnútorný tlak: Dôležité sú parametre podobné treniu: tlak čerpadla, rozmery sekcií nasledujúcich častí, dĺžka hadice a krivky a uhly v systéme. Betón bez spádu vyžaduje na pohyb v systéme obzvlášť vysoký tlak čerpadla.

Porovnanie technologických aspektov 3DBT a súčasných bežných postupov výstavby

Hlavným rozdielom oproti klasickým stavebným postupom je automatizácia procesu 3DBT. To priamo súvisí s minimalizáciou výskytu chýb a niekoľkonásobné urýchlenie celého procesu, keďže proces sa môže vykonávať prakticky nonstop aj v zlých poveternostných podmienkach ako dážď, sneženie alebo silný vietor. Ďalšou výhodou je znížená potreba pracovníkov, čo má za následok úsporu mzdových nákladov celkovo lacnejšou výstavbou. 3D tlač taktiež znižuje riziko nebezpečenstva na stavbe, ako napríklad úplne odstránené práce vo výškach. Na tlač je potrebná iba základová doska, na ktorú sa rozloží tlačiareň, pripojí sa k domiešavaču a proces sa môže začať. Nemusí sa čakať na výrobu a dovoz ani vykládku materiálu. Materiály netreba už dodatočne spracovať, orezávať a sekať, takže nám nevzniká žiadny odpad. Pri automatizovanom procese tlače sa spotrebuje iba toľko materiálu, koľko budeme potrebovať. Jednou z najväčších výhod je úplné odstránenie potreby debnenia, čo je pri klasických postupoch veľmi zdĺhavý a finančne náročný proces. To dáva 3D tlač výhodu pri realizácii zložitejších typov konštrukcií. Takýto proces však vôbec nie je jednoduchý a na jeho obsluhu je potrebná vysoko kvalifikovaná pracovná sila. Pre 3DBT je momentálne problémom, že nevie vyriešiť všetky potreby vo výstavbe automatizovane, ako je napríklad ukladanie výstuže, montáž okien a dverí, alebo zastrešenie. Odstránenie závislosti od manuálnych potrieb je v súčasnosti hlavná ambícia tejto technológie.



Obr.10– Grafické znázornenie potreby procesov pri klasickom postupe výstavby a pri výstavbe pomocou 3DBT
Zdroj: CHENIUNTAI N., vlastná úprava 2018

Záver

Na základe spracovaného rozboru je možné konštatovať, že technológia 3D tlače v stavebníctve sa uberá dobrým smerom a má pred sebou sľubnú budúcnosť. Je však potreba zdokonaľiť niektoré technické parametre, ako aj potrebu zautomatizovať ďalšie procesy počas výstavby ako je ukladanie výstuže, okien, dverí alebo zastrešenie. Kvôli mnohým súvisiacim parametrom v 3DBT je potrebné preukázať dostatočnú konzistenciu kvality pre rôzne konštrukcie, vytlačené z rôznych materiálových typov za rôznych podmienok. Je pravdepodobné, že to bude najskôr vyžadovať zlepšenie existujúcich zariadení 3D betónovej tlače a rozvoj chápania parametrov, ktoré ovplyvňujú konečnú kvalitu. Avšak nadobudnuté informácie o technológii, materiáloch a procese výstavby, nám hovoria, že konštrukcie vytvorené technológiou 3D sú plne funkčné, ekonomicky výhodnejšie a spĺňajú potrebné pevnostné a technické vlastnosti. Vo vhodnom čase, 3D tlač začne konkurovať konvenčnej konštrukcii a prefabrikátu, a bude pravdepodobne využitá na výrobu väčších množstiev projektov, na budovanie rozsiahlejších štruktúr a na výrobu každodenných predmetov a objektov, ktoré sú viac špecifické a zložitejšie. 3D tlač je nepochybne technológiou, ktorá bude v budúcnosti veľmi dôležitá a to aj preto, že je rýchlejšia lacnejšia a šetrnejšia k životnému prostrediu.

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

Použitá literatúra

1. 3DPRINT, 2016. Chinese Construction Company 3D Prints an Entire Two-Story House On-Site in 45 days, [online]. [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://3dprint.com/138664/huashang-tengda-3d-print-house/>
2. ALTER, L., 2015. First 3D printed hotel suite built in the Phillipines [online]. [cit. 2019-11-09]. Dostupné z: <https://www.treehugger.com/modular-design/first-3d-printed-hotel-suite-built-phillipines.html>

3. APIS CORE, 2018, Apis Cor robotics in construction, [online]. [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://www.apis-cor.com/apiscor-and-gerdau>
4. BUSWELL, R.A. a W.R. LEAN DE SILVA, 2018. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research [online]. [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884617311924>
5. FENG, P., X. MENG, J. CHEN a L. YE, 2015. Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders, [online]. [cit. 2019-11-05]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181500690X?via%3Dihub>
6. GOSSELIN, C., R. DUBALLET a PH. ROUX, 2016. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete-a new processing route for architects and builders, [online]. [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127516303811>
7. GREGURIĆ, L, 2018. Concrete 3D printing – How it works and The applications, [online]. [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/concrete-3d-printing-how-to-do-it-and-application/>
8. CHENIUNTAI, N., 2018. What is construction 3D printing: perspectives and challenges [online]. [cit. 2019-11-21]. Dostupné z: https://medium.com/@Nik_chen/what-is-construction-3d-printing-perspectives-and-challenges-5b57170c2a29
9. LAGEMAN, T., 2019. Is the Revolution of 3D-Printed Building Getting Closer [online]. [cit. 2019-11-21]. Dostupné z: <https://www.citylab.com/design/2019/02/architecture-construction-3d-printing-technology-netherlands/582334/>
10. SIBEL, N., 2018. This 10 000USD 3D- Printed Concrete House Took Only 24 Hours to Build, [online]. [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://interestingengineering.com/this-10000-3d-printed-concrete-house-took-only-24-hours-to-build>
11. SUVASH, P., M. JEN TAN a I. GIBSON, 2018. A Review of 3D Concrete Printing Systems and Materials Properties: Current Status and Future Research Prospects, [online]. [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/RPJ-09-2016-0154>
12. UNČÍK, Stanislav, ROUSEKOVÁ, I. BAJZA, A. JURÍČEK, I. GOČA a P. KŇAZE, 2010. Transportbetón. Bratislava: Eurostav s.r.o. ISBN 978-80-89228-26-3.
13. WOLFS, R. a A. ZEESHAN, 2019. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing, [online]. [cit. 2019-11-19]. Dostupné z: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17452759.2016.1209867?fbclid=IwAR0-hDWpbn3jcnxjDuX6D277ILXHO6R3BiqOLXYziHV8p4ju_Z3ksLCYC3s
14. WU, P., J. a X. WANG, 2016. A critical review of the use of 3-D printing in construction industry [online]. [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580516300681?via%3Dihub>
15. YIN, H., M. QU, H. ZHANG a Y. LIM, 2018. 3D Printing and Buildings: A Technology Review and Future Outlook [online]. [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/24751448.2018.1420968>