



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE INŽENÝRSKÝCH ÚLOH A INFORMATIKY

INSTITUTE OF COMPUTER AIDED ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE

TECHNOLOGIE PRO 3D TISK PROTOTYPŮ VE STAVEBNICTVÍ

TECHNOLOGY FOR 3D PRINTING OF PROTOTYPES IN CONSTRUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Čechal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Dr. Techn. Ing Jan Podroužek

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3656 Městské inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program
Studijní obor	3647R025 Městské inženýrství
Pracoviště	Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Petr Čechal
Název	Technologie pro 3D tisk prototypů ve stavebnictví
Vedoucí práce	Dr. Ing. Jan Podroužek
Datum zadání	30. 11. 2017
Datum odevzdání	25. 5. 2018

V Brně dne 30. 11. 2017

doc. Ing. Aleš Krejčí, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Gibson, Ian, David Rosen, and Brent Stucker. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. Springer, 2014.

Lipson, Hod, and Melba Kurman. Fabricated: The new world of 3D printing. John Wiley & Sons, 2013.

Bendsoe, Martin Philip, and Ole Sigmund. Topology optimization: theory, methods, and applications. Springer Science & Business Media, 2013.

Zásady pro vypracování

Student zpracuje zadané téma – Technologie pro 3D tisk prototypů ve stavebnictví, včetně 3D skenování a optimalizace topologie – v rozsahu zhruba 40 stran. Při práci na tématu bude vycházet ze současného stavu vědy a poznání v dané oblasti a bude využívat stávající infrastrukturu centra ADMAS – velkoformátovou 3D tiskárnu a 3D skener.

Struktura bakalářské práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora „Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací“ a Směrnice děkana „Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT“ (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora „Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací“ a Směrnice děkana „Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT“ (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Dr. Ing. Jan Podroužek

Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá technologií pro 3D tisk prototypů ve stavebnictví. Teoretická část je především zaměřena na 3D technologie ve stavebnictví. Je zde vysvětlen systém a princip fungování 3D technologií jako je například d-shape, contour crafting a concrete printing. Řeší také možnosti využití 3D tisku v konceptu smart city nebo průmysl 4.0. Zde přispívá svými vlastnostmi jako je rychlost, nízké náklady nebo vysoká variabilita tvaru konstrukce. Poslední část teoretické části obsahuje největší stavby vytvořené těmito technologiemi, například Levis Grand hotel na Filipínách. V praktické části byl demonstrován 3D tisk podle projektu Terraperform. Terraperform je španělská firma, která se specializuje na tisk z přírodních zdrojů. K tisku využívá systém robotické ruky. Podle tohoto projektu byla sestavena tisková hlava z PVC potrubí a prakticky zkoušena vytlačováním vrstev z cemento hliněné směsi. Byly zhotoveny dvě zkušební tělesa. Na těchto zkušebních tělesech bylo testován vznik trhlin, hustota nebo doba tuhnutí.

ABSTRACT

Bachelor thesis deals with technology for 3D prototype printing in construction. The theoretical part is mainly focused on 3D technology in construction. It explains the system and the principle of functioning of 3D technologies such as d-shape, contour crafting and concrete printing. It also solves the possibilities of using 3D printing in the concept of smart city or industry 4.0. Here it contributes with its features like speed, low costs, or high form variability. Last part of the theoretical part contains the largest buildings created by these technologies, for example Levis Grand hotel in the Philippines. In the practical part there is demonstrated 3d printing according to project terraperform. Terraperform is a Spanish company, which focus on printing from natural sources. The robotic hand system is used for printing. According to this project printing head was compiled from PVC pipes and practically tested by extruding layers of cement clay mixture. Two test figures were prepared. These two tests figures were tested on formation of the rifts, density or setting time.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, 3D technologie, 3D materiály, additivní výroba, Smart City, průmysl 4.0, tisková hlava

KEYWORDS

3D printing, 3D technology, 3D materials, additive manufacturing, smart city, industry 4.0, printing head

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

ČECHAL, P. *Technologie pro 3D tisk prototypů ve stavebnictví*. Brno, 2018. 50 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky. Vedoucí práce Dr. Ing. Jan Podroužek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

.....
Petr Čechal

PODĚKOVÁNÍ

Prvně bych chtěl poděkovat především svému vedoucímu práce Dr. techn. Ing Janu Podroužkovi za všechny cenné rady a čas strávený konzultacemi se mnou. Dále bych chtěl poděkovat rodině za podporu a fotodokumentaci při provádění praktické část.

OBSAH

ÚVOD	11
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY 3D TISKU	12
1.1 Historie 3D tisku.....	12
1.2 Budoucnost 3D tisku	12
1.3 Průmysl 4.0	13
1.4 Smart city koncept	14
1.5 Materiály	16
1.5.1 Materiály pro 3D tisk.....	16
1.5.2 Materiály pro 3D tisk ve stavebnictví.....	16
1.6 Technologie 3D tisku	16
1.6.1 POLYJET	16
1.6.2 FDM	17
1.6.3 SLS	17
1.6.4 LOM	18
1.6.5 DMLS	19
1.6.6 BJ.....	19
1.6.7 MJP.....	19
2 3D TISK VE STAVEBNICTVÍ.....	21
2.1 Rozdělení technologií ve stavebnictví	21
2.2 Systém Concrete printing	21
2.3 Systém Contour Crafting	24
2.4 D-shape	29
2.5 Srovnání technik d-shape, contour crafting a contour printing.....	30
2.6 Stavby vytvořené 3D tiskem	32
2.6.1 Betonový hrad.....	32
2.6.2 Levis grand hotel na Filipínách	33
2.6.3 Šanghajská firma WinSun	33
3 APLIKAČNÍ PŘÍKLAD – TISK Z CEMENTO HLINĚNÉ KAŠE	35
3.1 První návrh a výroba přizpůsobené tiskové hlavy	35
3.2 Finální verze tiskové hlavy	35
3.3 Příprava cemento hliněné kaše	36

3.4 První zkouška tiskové hlavy.....	38
3.5 Druhá zkouška tiskové hlavy.....	39
3.6 Vyhodnocení zkoušek.....	41
3.6.1 První zkouška	41
3.6.2 Druhá zkouška	42
ZÁVĚR.....	44
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	45
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	47
SEZNAM OBRÁZKŮ	48
SEZNAM TABULEK.....	50

ÚVOD

Bakalářská práce je zaměřená na problematiku, která od svého vzniku – zhruba před 30 lety – prochází velmi dynamickým rozvojem. 3D tisk se postupně stává součástí téměř všech oblastí lidské činnosti. Tato technologie je využívána například ve strojírenství, leteckém průmyslu, lékařství, výrobě spotřebního zboží, ale i uměleckých předmětů nebo zbraní a samozřejmě i ve stavebnictví.

Ve stavebnictví je 3D tisk relativně ve svých počátcích. Už jsou však známy případy využití 3D tisku k vytvoření celého objektu pomocí 3D technologií, jako jsou systémy D-shape, Contour crafting a Concrete printing. Pomocí systému Concrete printing byl postaven Levis Grand hotel na Filipínách, jehož obytná plocha je 130 m². Jedna z největších firem v této oblasti je šanghajská firma WinSun, která během poslední doby postavila v Číně několik obchodních center, divadel nebo operních domů. Velký přínos má také pro koncept Smart City.

V první – teoretické části práce – bylo cílem popsat a zmapovat nejznámější systémy 3D tisku, jejich historii i zvažovanou budoucnost. Práce poskytuje přehled o nejznámějších technologiích používaných ve stavebnictví i ukázky některých výše zmíněných reálných staveb.

V aplikační části bakalářské práce je řešena realizace samotného 3D tisku pomocí vlastnoručně vyrobené tiskové hlavy, a to včetně demonstrace tisku na zkušebních tělesech. Výsledkem zkoušky jsou dvě zkušební tělesa, – jedno ve tvaru „stěny“ a druhé ve tvaru „bazénu“. Jsou na nich řešeny vlastnosti, jako jsou například hustota použité směsi, tvarovatelnost, vznik trhlin.

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY 3D TISKU

1.1 Historie 3D tisku

Jedna z nejstarších technologií 3D tisku se poprvé objevila kolem osmdesátých let minulého století. Tato technologie se nazývá rapid prototyping. Název vycházel z toho, že tyto procesy byly původně koncipovány jako rychlá a nákladově efektivní metoda pro vytváření průmyslových produktů. První patentovanou přihlášku pro technologii rapid prototyping podal v květnu 1980 dr. Kodama v Japonsku. Další patent patřil Charlesi Hullovi, který představil v roce 1983 přístroj založený na technologii stereolitografii (SLA). Hull o pár let později založil společnost 3D systems Corporation [1].

V průběhu následujících let se objevily i další technologie, například Ballistic Particle (BPM), původně patentovaná Williamem Mastersem, Solid Grounding (SGM), původně patentovaná Itzhakem Pomerantzem, Laminated Object Manufacturing (LOM), původně patentovaná Michaelem Feyginem, trojrozměrný tisk (3DP), původně patentovaný Emanueleem Sachsem [1].

Na počátku roku 2000 na trh přicházelo stále velké množství nových technologií, které se zaměřovaly především na průmyslové aplikace. A přestože převažovaly procesy pro prototypové aplikace, vývoj a výzkum se ubíral směrem k technologiím pro přímé výrobní aplikace a specifické nástroje. Tím vznikla nová terminologie Rapid casting (RC), Rapid Tooling (RT), Rapid Manufacturing (RM) a Additive Manufacturing (AM) [1].

V následujících letech průběžně docházelo k rozvoji dalších technologií, které se využívají v nejrůznějších oborech, jako jsou například strojírenství, stavebnictví nebo třeba i zdravotnictví [1].

1.2 Budoucnost 3D tisku

Velké množství firem přehodnocuje a digitalizuje své výrobní procesy a jejich velká část začíná sledovat technologie 3D tisku. Jaké jsou ale možnosti 3D tisku v dalších letech? Jakým směrem se tato technologie bude vyvíjet [2]?

Německá společnost Siemens předpovídá, že 3D tisk bude do roku 2022 asi o 400 % rychlejší a o 50 % levnější. V tuto chvíli využívá 3D tisk pro výrobu svých komponentů 29 % výrobců, ale kolem roku 2023 by mohlo dojít k nárůstu až na 93 % [2].

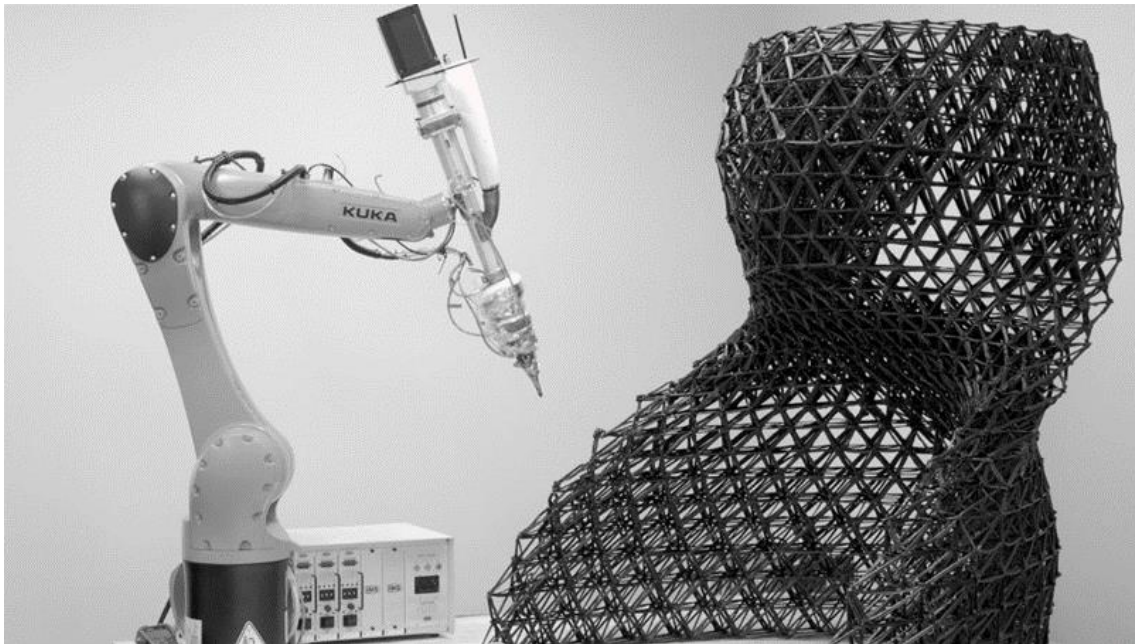
V dlouhodobém měřítku dojde především ke zkrácení doby výrobního procesu. Prototypy se budou vyrábět v řádech dnů, ne týdnů. Díky tomu se nebude muset uskláňovat tolik zboží a dojde ke snížení nákladů na výrobu [2].

Odhadují se změny v digitálních strategiích společností. Místo centralizovaných řešení s rozloženou výrobou budou moci společnosti vyrábět produkty blíže zákazníkům. Tím se dodavatelé dostanou do přímého styku s digitálním světem a vše bude efektivnější a transparentnější [2].

Technologie 3D tisku budou objevovat další odvětví, kde budou moci vyrábět kvalitní produkty za nižší cenu. Lze vyrobit jakoukoliv součástku od raketových motorů až po turbíny pomocí 3D tisku. Díky novým materiálům a novým technologiím lze hmotnost letadel a jejich hlavních komponentů snížit a přitom se zvýší jejich výkonnost [2].

Řada odborníků vidí budoucnost 3D tisku ve formě měkké robotiky. Tiskárny budou tisknout syntetické svaly k nerozeznání od originálu. S materiály podobnými lidské tkáni

bude možné kopírovat biologické systémy. Konečný výrobek bude možné použít k transplantacím nebo v ortopedické obuvi atd. Dojde k proměně 3D tiskáren na robotické systémy. Tyto technologie se spojí v jednu a tiskárny s umělou inteligencí budou tisknout své vlastní vylepšené verze [2].



Obr. 1 Tisknoucí robotická ruka KUKA [2]

1.3 Průmysl 4.0

Ve světě nyní probíhá 4. průmyslová revoluce. Průmyslové závody zavádějí do svých výrobních procesů stále větší množství digitálních technologií a chytrých prvků, které mění celé fungování firem. Výrobní linky, logistika i produkty samotné dokážou mezi sebou komunikovat a významně tak celý proces zrychlit [3].

Vznik této iniciativy pochází z Německa. Hlavní firmou, která začala využívat tyto technologie je dnes již nadnárodní firma Siemens provozující závody tzv. digital enterprises. Jde o propojený systém, který umožňuje komunikaci mezi technologiemi od první logistiky až po distribuci konečného produktu [3].

Digitalizace přináší ale i nové možnosti při samotném navrhování produktů. Designeři by měli být schopni produkt navrhnout a otestovat bez pomoci výroby prototypu a omezit tak náklady, které jsou s jeho vývojem spojeny. Často by to znamenalo značné zlevnění celého procesu [3].

Průmyslová revoluce 4.0 se rozrůstá i dalšími způsoby, například využitím 3D tisku. 3D tisk se zdokonaluje jak v technologiích, tak ve způsobu využívání materiálu. V budoucnu budou 3D tiskárny nezbytným vybavením většiny výrobních nebo opravárenských firem. Jejich uplatnění může být především v oblasti rychlé a snadné výroby náhradních dílů nebo jakýchkoliv komponentů. Například bude možné vyrábět náhradní díly k vašemu automobilu přímo v místě vašeho bydliště [3].



Obr. 2 Princip průmyslu 4.0 [3]

1.4 Smart city koncept

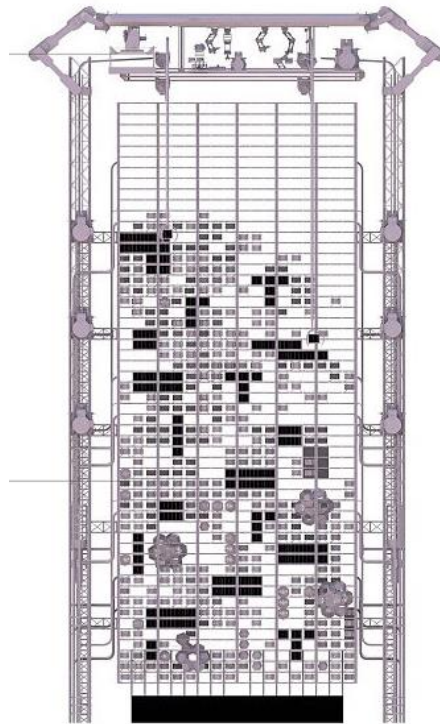
Smart cities je velmi široký a rozsáhlý koncept rozvoje měst. Cílí na několik základních odvětví jako třeba energetika, životní prostředí, infrastruktura nebo management. Celá snaha tohoto konceptu by měla směřovat k hledání nevhodnější alternativy v oblasti efektivní a chytré správy města v rámci udržitelného rozvoje [4].

Součástí tohoto konceptu je také 3D tisk, který má velký potenciál tento koncept vylepšit v mnoha ohledech. Výhody pro smart cities jsou například variabilita konstrukcí, kvalitní a rychlá výstavba, inteligentní budovy a možnost využití recyklovaných materiálů [5].

Jedním z prvních projektů 3D tisku, který můžeme zařadit do konceptu Smart cities, je Vending Machine. Jde o ocelovou konstrukci, na které je umístěna 3D tiskárna, ta je pomocí jeřábu a mechanických ramen snadno přesunutelná a může tak v jakémkoliv místě vytvořit bytovou jednotku podle přání daného majitele. Projekt vytvořil architekt Haseef Rafieje a nazval ho termínem prodejní automat, který představuje stroj postupně plnící potřeby podle poptávky [5].



Obr. 3 Koncept smart city [4]



Obr. 4 Struktura panelového domu Vending Machine [5]

1.5 Materiály

1.5.1 Materiály pro 3D tisk

V této kapitole zmíním pouze některé materiály, které jsou využívány pro 3D tisk modelů, prototypů a malých součástek.

PLA – jeden z nejvhodnějších materiálů pro tisk z důvodu kvality a vysoké přesnosti. Jeho nevýhodou je měknutí při teplotách nad 60 °C, kdy může docházet k deformaci modelu [6].

ABS – Výhodou oproti PLA je, že má vyšší teplotu měknutí. Proto ho využíváme především pro výrobky, které budou vystaveny teplotám 60–105 °C. Nevýhodou je zmenšující se objem modelu při chladnutí [6].

HIPS – Tento materiál se hodí pro tisk podpurných konstrukcí. Je však nutné, aby tiskárna měla dvě tiskové hlavy. Jedna hlava tiskne podpurnou konstrukci a druhá tiskne vlastní model. Po procesu tisku dochází k odstranění podpurné konstrukce pomocí Limonetu nebo Acetonu [6].

FLEX – Jde o velmi pružný materiál, který je vhodný k využití všude tam, kde modely mají představovat modely z gumy. Využívá se například k tisku gumového těsnění nebo podrážky boty [6].

PETG – Stejný materiál, ze kterého se vyrábí plastové PET lahve. Výhodou toho materiálu je odolnost vůči rozpouštědlům a kyselinám. Můžeme ho využít i jako obaly k potravinám [6].

LAYWOOD – Modely z tohoto materiálu imitují dřevo, proto se hodí pro architektonické typy výrobků. Materiál obsahuje větší částice a díky tomu může dojít k ucpání trysky [6].

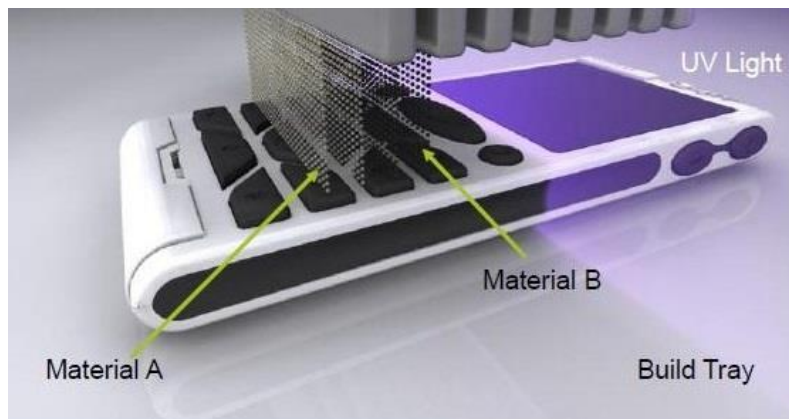
1.5.2 Materiály pro 3D tisk ve stavebnictví

Mezi hlavní materiály, které využíváme pro 3D tisk ve stavebnictví, patří keramika, beton, materiály na bázi cementu, hlíny nebo různé přírodní materiály, například piliny. Konkrétní volba materiálu je závislá na tom, co od finálního produktu očekáváme [7].

1.6 Technologie 3D tisku

1.6.1 POLYJET

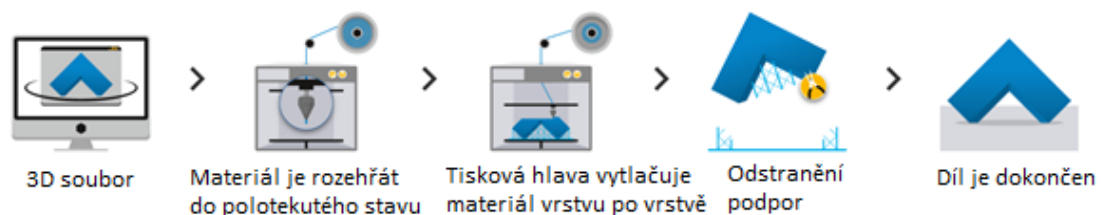
V roce 2000 představila izraelská firma Objet technologii 3D tisku polyjet. Jednalo se o jednu z prvních technologií 3D tisku, která byla schopna vyrobit složité modely ve vysoké kvalitě a z různých materiálů. Tento systém funguje na bázi tryskání fotopolymerních materiálů v ultratenkých vrstvách o tloušťce 16 µm. Modelovací materiál je v tekuté formě vytlačován pomocí trysek na pracovní plochu, kde se provádí vytvrzování pomocí UV záření. Proces tisku řídí software Objet studio. Na podobném principu funguje polyjet matrix technologie. Tento tisk umožňuje tzv. dvoukomponentní tisk, kdy lze tisknout ze dvou různých materiálů v jednom tiskovém procesu. Výsledkem je potom produkt, který je jak pevný, tak zároveň i pružný [8].



Obr. 5 Technologie PolyJet Matrix [8]

1.6.2 FDM

FDM neboli fused deposition modeling vytváří modely pomocí tiskové struny, která prochází tiskovou hlavou. V ní dochází k tavení tiskového materiálu, který je nanášen na stavební podložku. V místech, kde je potřeba, vytváří 3D tiskárna tzv. podpurné struktury z materiálu rozpustného ve vodě.



Obr. 6 Proces FDM [9]

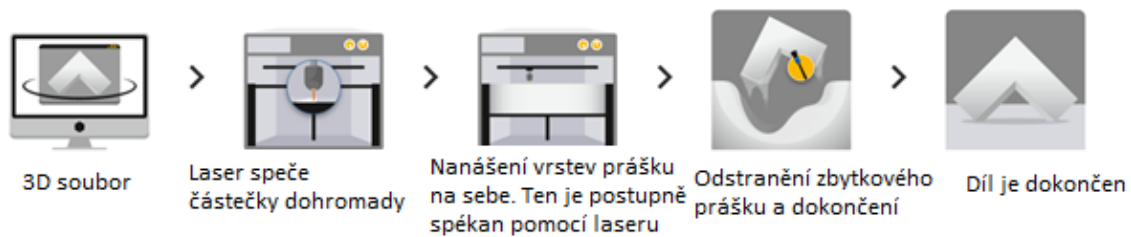
Výhoda FDM spočívá hlavně v použití odolných materiálů, dlouhodobé stabilitě mechanických vlastností a kvalitě dílů. Termoplastické materiály využívané FDM technologií jsou vhodné pro malosériovou výrobu nebo pro detailní funkční prototypy [9].

Technické specifikace pro FDM technologii. Standardní doba výroby závisí na složitosti modelu. Přesnost $\pm 0,15\%$ (se spodním limitem $\pm 0,2$ mm). Minimální tloušťka stěny 1 mm. Tloušťka vrstvy 0,18–0,25 mm [9].

Materiály vhodné pro FDM technologii jsou například PC (polykarbonát), ABS (akrylonitrilbutadienstyren), PC-ISO (polykarbonát ISO), PC-ABS (polykarbonátový ABS), Ultem 9085 [9].

1.6.3 SLS

Selective Laser Sintering je jedna z nejstarších, ale také velmi efektivních metod vynalezenou v polovině osmdesátých let doktorem Carlem Deckardem. Při procesu 3D tisku dochází ke spékání jemných zrn tiskového materiálu do požadovaného tvaru pomocí vysoce výkonného laserového paprsku. Zde můžeme vidět schéma postupu tisku [10].

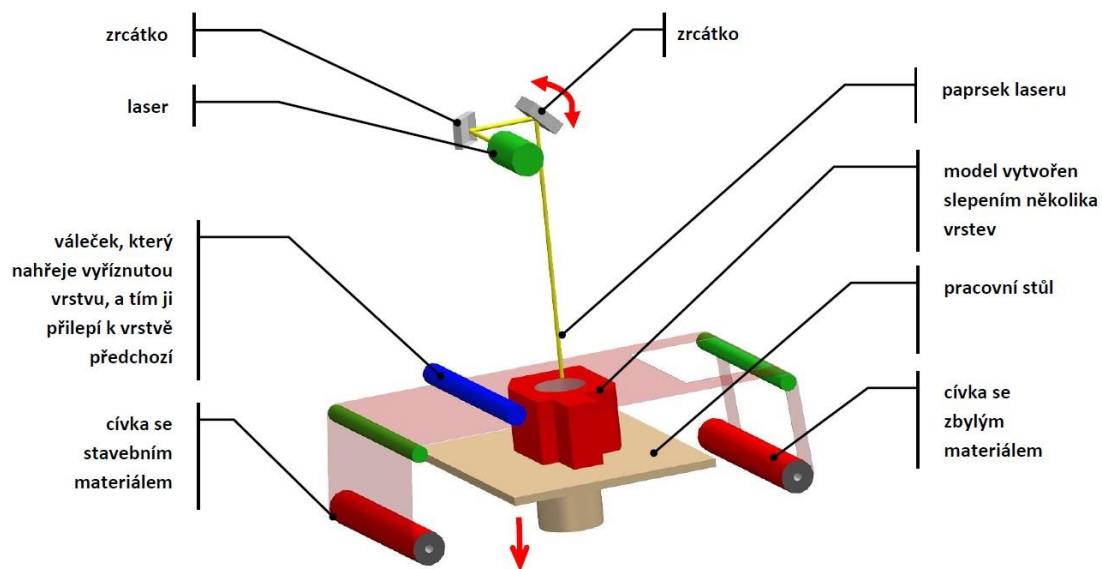


Obr. 7 Proces tisku SLS [10]

Hlavní výhodou této technologie spočívá v možnosti použít široké spektrum komerčních materiálů dodávaných v práškové formě, například plasty, kovy, či dokonce sklo. U této technologie není nutná tvorba přídatného podpůrného materiálu ani při složitých objektech, protože tištěný objekt je při tisku obklopen neroztavitelným materiálem. Hlavní nevýhody tohoto procesu jsou bezesporu vysoká energetická náročnost, vysoká cena zařízení, které je zpravidla vybaveno karbon dioxidovým zdrojem paprsku. Další nevýhodou je nemožnost tisku uzavřených dutin [10].

1.6.4 LOM

LOM neboli laminated object manufacturing je technologie, která pochází z Izraele, patent byl podán v roce 1996. Princip tiskárny je založen na lepení vrstev na sebe. Každá vrstva je vyříznuta buď z plastu, nebo papíru a poté přilepena na předchozí plochu. Fólie s materiálem se převíjí z jedné cívky na druhou. Převíjení probíhá přes pracovní plochu, kde se vždy zastaví. Hlavními výhodami tohoto tisku jsou vysoce kvalitní povrch modelu a také nejlevnější materiál. Nevýhodami jsou velké množství odpadu kvůli velkému množství odřezků a mechanické odstraňování podpůrného materiálu [11].



Obr. 8 Tiskárna na principu LOM [11]

1.6.5 DMLS

Direct metal laser sintering neboli DMLS je technologie 3D tisku objevená roku 1987. Je založena na tisku kovových komponentů, které se po tisku mohou dále obrábět a zpracovávat. Tisk je založen na podobném principu jako SLS technologie, práškový materiál je opět zpevňován po tenkých vrstvách pomocí laseru. Velký rozdíl oproti SLS technologii je ve výkonu laseru. SLS technologie taví pouze plastové materiály, DMLS technologie taví kovové materiály, například nerezovou ocel, inconel nebo bronz [11].

Hlavní výhodou této technologie je výroba složitých tvarů bez použití podpory. Další výhodou je kvalitní povrch modelu s vysokým rozlišením. Nevýhodou představuje hlavně vysoká pořizovací cena, ta se pohybuje kolem 10 milionů korun [11].

1.6.6 BJ

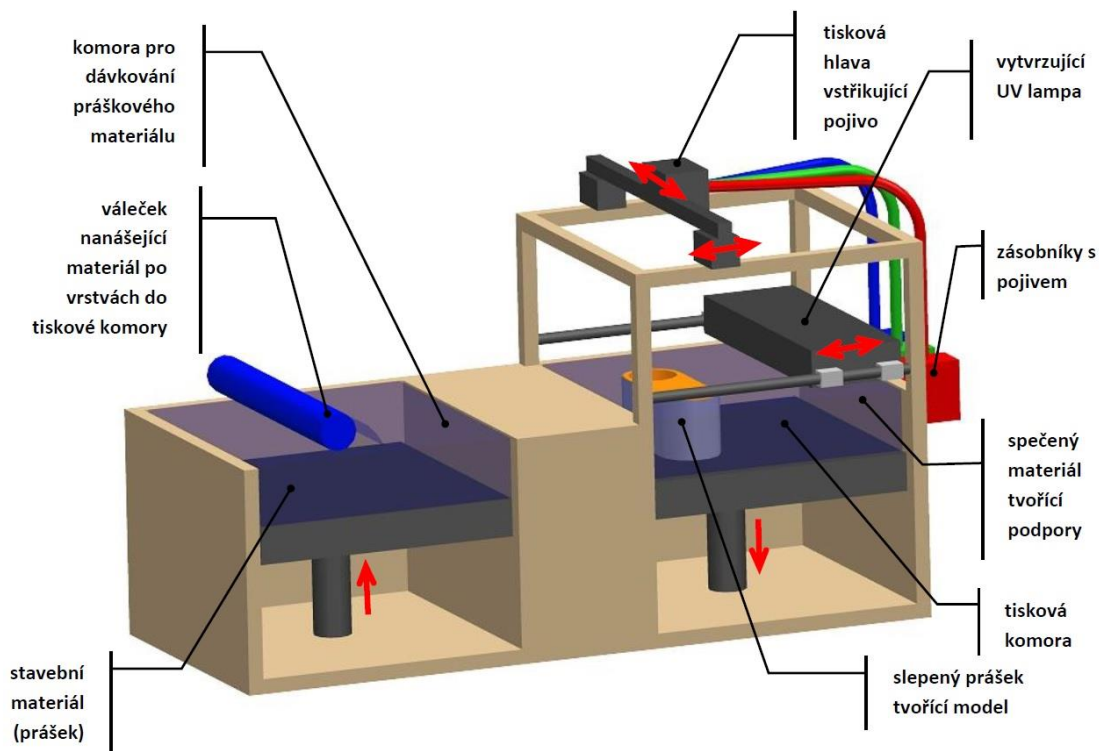
Binder Jetting, technologie byla patentována firmou 3D Systems roku 1993. Její princip je založen na vytvrzování materiálu chemicky, a to pomocí pojiva. Na pracovní plochu se nanese tenká vrstva prášku o tloušťce asi 0,09 mm. Pomocí tiskové hlavy vstříkujeme pojivo na tenké vrstvy materiálu. Konečný model je tak tvořen slepováním jednotlivých částic prášku. Vhodné materiály pro tuto technologii jsou například keramika, hliník nebo nerezová ocel [11].

Výhodou této technologie je velký výběr materiálů, možnost výroby barevných modelů a vysoká rychlost tisku. Hlavní nevýhodou jsou dodatečné úpravy povrchu za účelem zlepšení mechanických vlastností [11].

1.6.7 MJP

Multi Jet Printing technologie byla patentována firmou 3D Systems roku 1991. Rozdíl mezi MJP technologií a ostatními technologiemi je v tom, že tato technologie dokáže vytvořit různobarevný model a model různé tuhosti [11].

Princip je podobný BJ, na nanesenou vrstvu je pomocí tiskové hlavy nanášeno pojivo, jež je s práškem okamžitě zatvrzováno pomocí UV světla. Jakmile je vrstva vytvrzena, dochází k nanášení další vrstvy a proces se opakuje. Vytisknutý model je obalen v podpurném materiálu, nejčastěji vosku. Podpurného materiálu se zbavíme vložením modelu do vyhřáté pece a podpěry zmizí. Výhodou této technologie je především kvalitní a přesný povrch, rychlý tisk a dobré mechanické vlastnosti [11].



Obr. 9 Tiskárna na MJP principu [11]

2 3D TISK VE STAVEBNICTVÍ

2.1 Rozdělení technologií ve stavebnictví

Rozdělení technologií podle místa výroby:

1) „In situ“ – Na místě

Stacionární roboti – obdoba rámových jeřábů. Jde například o technologie d-shape, contour crafting.

2) Výroba komponentů a prefabrikátů budov 3D tiskem ve specializovaných závodech

Mobilní roboti – například projekt minibuilders IAAC v Barceloně.

3) Robotické ukládání prefabrikovaných částí do již hotové stavby

Tato technologie 3D tisk výhodně doplňuje například při osazování tahově namáhaných konstrukcí, které jdou problematicky tisknout. Patří sem například technologie Contour Crafting [12].

Rozdělení 3D tisku ve stavebnictví podle způsobu tisku:

1) Celoplošný 3D tisk

Tisk probíhá ve dvoufázově provedených vrstvách. V první fázi dochází k nanášení vrstvy plniva – například pískové matrice. Tato vrstva je nanesená na celé ploše půdorysu na zemní podklad nebo na již vytvořené konstrukce. Vrstva má tloušťku cca 10 mm. Polohu budoucí konstrukce určuje robot pomocí souřadnic. Písková matrice po dobu tuhnutí vytváří statickou podporu nadřazených vrstev a díky tomu umožňuje velkou tvarovou flexibilitu. Po vytvrdnutí je pískový materiál nezasažený pojivem mechanicky odstraněn. Na tomto principu funguje například technologie D-shape [12].

2) Liniový tisk

Liniový tisk probíhá oproti celoplošnému tisku v jednofázových vrstvách. Vzniká nanášením směsi pojiva s plnivem tryskou v horizontálních liniích tloušťky cca 10 mm. Nanáší se svisle nebo pouze v malých sklonech od svislice. Podklad tvoří zemní podklad nebo již hotové konstrukce. Patří sem například technologie Contour Crafting [12].

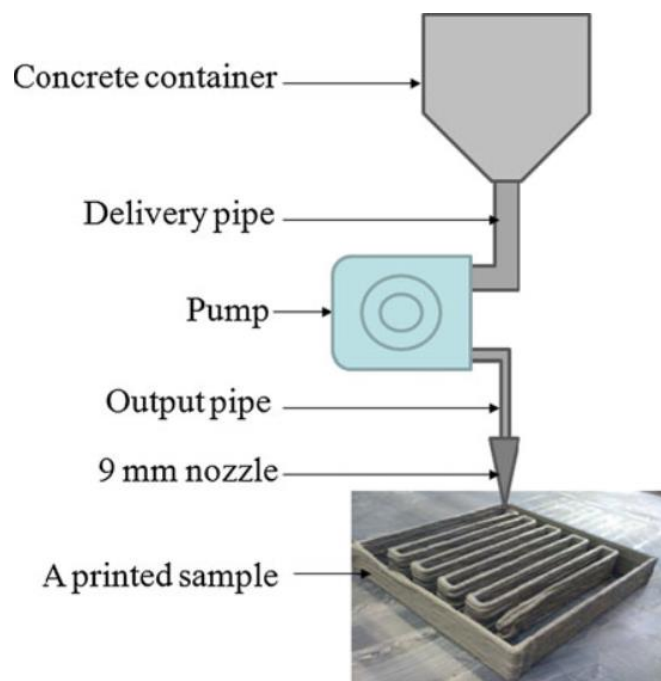
2.2 Systém Concrete printing

Prototypový stroj pro tisk z betonu byl sestaven v délce 5,4 m, šířce 9,4 m, výšce 5,4 m (viz obr. 10). Systém se skládá z tiskové hlavy, která je digitálně řízena CNC strojem pro pohyb ve směrech X, Y a Z pomocí tří řetězových trubkových ocelových nosníků. Na horní část tiskové hlavy je umístěna nádoba s materiálem a je připojena k čerpadlu pro dopravu materiálu do tiskové trysky, která je aktivována CNC strojem. Tiskový proces probíhá ve třech etapách: příprava dat, příprava betonu a tisk komponentů. Ve fázi přípravy dat je součástí navržena jako 3D CAD model, poté převedena do formátu STL a nakonec určujeme tloušťku vrstvy [13].



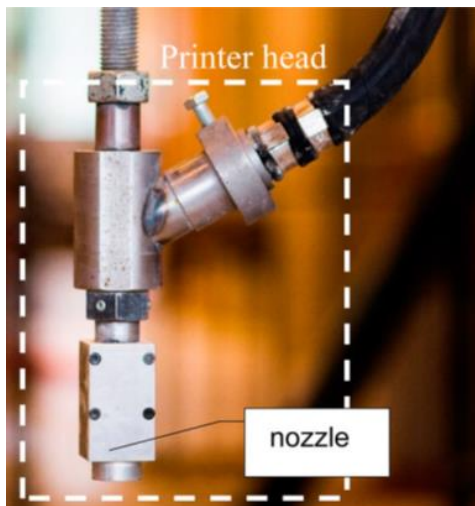
Obr. 10 Systém concrete printing [13]

Tisková cesta pro každou vrstvu je potom generována, aby se vytvořil soubor G-kódu pro tisk. Betonová příprava zahrnuje míchání a vkládání směsi do kontejneru. Jakmile je čerstvý beton vložen do kontejneru, může být hladce veden přes systém čerpadel do trysky pro vytisknutí samozhutnitelných betonových vláken, která mohou vytvářet konstrukční prvky vrstvy po vrstvě. Schéma na obr. 11 znázorňuje zaváděcí systém procesu tisku betonu [13].



Obr. 11 Průběh tisku betonu [13]

Pod tlakem čerpadla je beton tlačěn směrem k hlavě tiskárny (obr. 12). Tato komponenta se skládá z několika částí, které umožňují tisknout na požadované místo, požadovanou rychlostí a pod požadovaným úhlem. Koncovou částí hlavy tiskárny je tryska, dutý ocelový prvek s určeným průřezem, ze kterého je z tiskárny vypouštěno betonové vlákno a je uloženo na tiskovém povrchu [14].

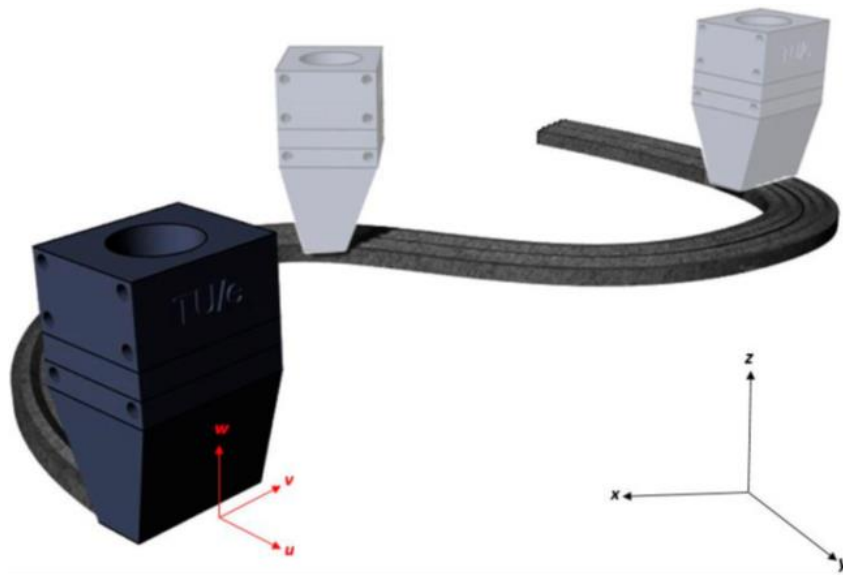


Obr. 12 Tisková hlava s tryskou [14]

Bylo vyzkoušeno několik otvorů trysek. Zpočátku se použil otvor o průměru $\varnothing 25$ mm (491 mm^2). Výsledné kulaté vlákno bylo však obtížné navršovat na sebe. Poté byl použit čtvercový průřez 25×25 mm (625 mm^2). To zvyšuje schopnost konstrukce, ale také vyžaduje, aby byl pohyb hlavy tiskárny naprogramován tak, aby orientace trysky vždy zůstala tečná k dráze nástroje (obr. 14). V opačném případě nastane zkroucení vlákna (obr. 13) – i když to může být také přijato jako přirozená vlastnost tištěného betonu. V současné době se používá otvor o rozměru 40×10 mm (400 mm^2) [14].



Obr. 13 Zkroucená betonová vlákna [14]



Obr. 14 Tečnost trysky vůči dráze [14]

Rychlost tisku je ovlivněna především viskozitou betonu, tlakem čerpadla a rychlostí tiskové hlavy. V současné době je nastavena rychlost lineárního tisku 100 mm/s a tlak čerpadla 1–3 MPa. Největší problém tisku nastává v rozích, tam se rychlost a frekvence snižuje v závislosti na poloměru křivky [14].

2.3 Systém Contour Crafting

Ačkoli automatizace pokročila ve výrobě, růst automatizace ve stavebnictví byl relativně pomalý. Konvenční metody automatizace výroby se nedají použít k výstavbě velkých staveb s vnitřními vlastnostmi. To může vysvětlit pomalý růst v automatizaci stavebnictví [15].

Poměrně novou vrstvenou technologií výroby je metoda CC (contour crafting), která má velký potenciál v automatizovaném vytváření celých konstrukcí i dílčích součástí. Pomocí tohoto procesu může být jediný dům nebo kolonie domů, každý případně s jiným designem, automaticky postavena v jediném chodu, přitom v každém domě bude kompletně uloženo i veškeré potrubí pro elektrické a klimatizační zařízení [15].

V současné době existují dvě kategorie automatizace, které zvažují především japonské stavební firmy. První používá roboty s jedním úkolem, které mohou na staveništích nahradit jednoduché práce. Jednoúčelové roboty lze rozdělit do čtyř různých typů:

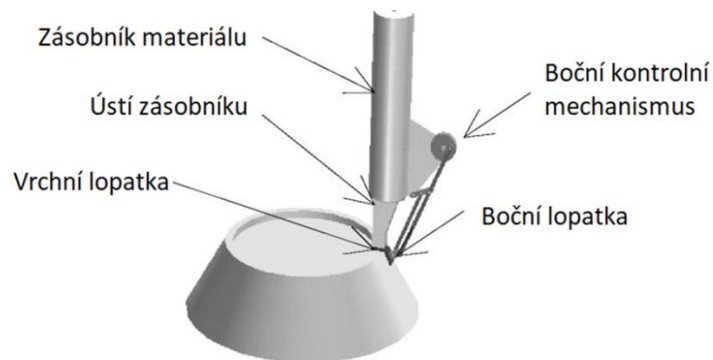
- Dokončování betonových podlah.
- Malování sprejováním.
- Ukládání dlaždic.
- Manipulace s materiálem.

Druhá kategorie se skládá z plně automatizovaných systémů, které mohou pomocí konstrukčních prvků postavit výškové nebo železobetonové budovy. Příkladem tohoto přístupu je Big-Canopy, který je prvním automatizovaným konstrukčním systémem na

světě. Vytváří přesně definovanou betonovou konstrukci a má čtyři nezávislé stožáry podporující horní jeřáb, který dodává komponenty pod ovládním jednoduchého joysticku. Všechny úkoly jsou naplánovány a řízeny centralizovaným systémem řízení informací [15].

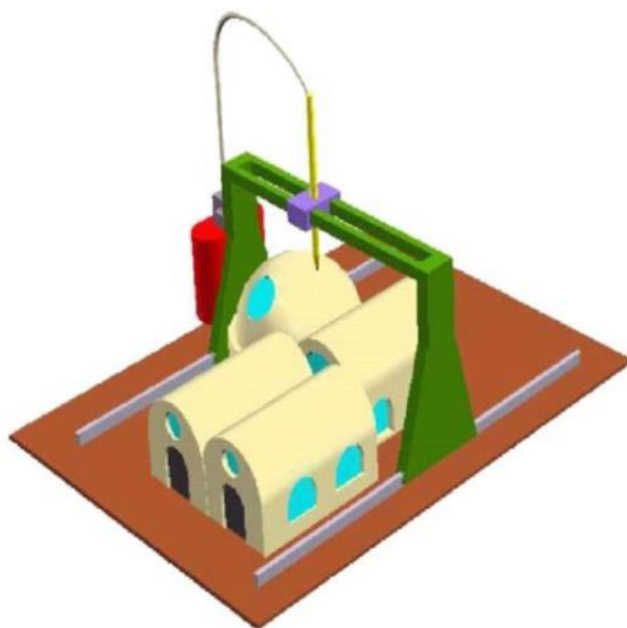
Contour crafting je metoda vrstvené výroby (LM), která využívá polymer, keramickou směs, cement a řadu dalších materiálů a směsí pro vytváření velkoobjemových objektů s hladkou povrchovou úpravou. Klíčovými výhodami je plynulá rychlost výroby a možnost propojení s dalšími robotickými metodami pro instalaci vnitřních komponent, jako jsou trubky, elektrické vodiče a výztužné moduly pro zlepšení mechanické funkčnosti [15].

Proces vytlačování vytváří hladký povrch předmětu tím, že omezuje vytlačovaný průtok ve svislém a vodorovném směru na povrch lopatek. Orientace boční lopatky je dynamicky řízena tak, aby odpovídala sklonu povrchových prvků. Boční lopatka umožňuje hrubší uložení materiálu při zachování hladké povrchové úpravy. Použití silných vrstev jinými procesy LM není možné, protože drsné povrchy s povrchem schodišťového pláště budou mít za následek zejména šikmé a zakřivené povrchy. Navíc ve většině procesů není hustá depozice fyzicky možná (např. adhezní kapalina nebo laser nemůžou pronikat příliš hluboko do prášku regulovatelným způsobem). Ukládání silných vrstev snižuje dobu výroby, což je nezbytné pro vytváření objektů velkého rozsahu. V CC je maximální výška vrstvy omezena výškou boční lopatky. Když se vytlačovací jednotka pohybuje podle předem stanoveného způsobu ukládání materiálu pro každou vrstvu, nejprve se vytvoří hladký vnější a horní povrch každého okraje vrstvy a následuje proces plnění, který vyplňuje vnitřní objem materiálem, a to buď nalitím, nebo vstřikováním [15].



Obr. 15 Vytlačovací agregát [15]

Využití systému CC při konstrukci stavby je znázorněno na obr. 16. Portálový systém nese trysku, která se pohybuje po dvou rovnoběžných drahách instalovaných na staveništi. Jediný dům nebo i více domů mohou být postaveny v jednom chodu. Zároveň může být každý dům jiné konstrukce. Výhodou systému je i návrh složitých konstrukcí, jako jsou kopule nebo klenby. Následuje několik zajímavých aspektů tohoto automatického konceptu konstrukce [16].



Obr. 16 Systém contour crafting [16]

1) Designová flexibilita

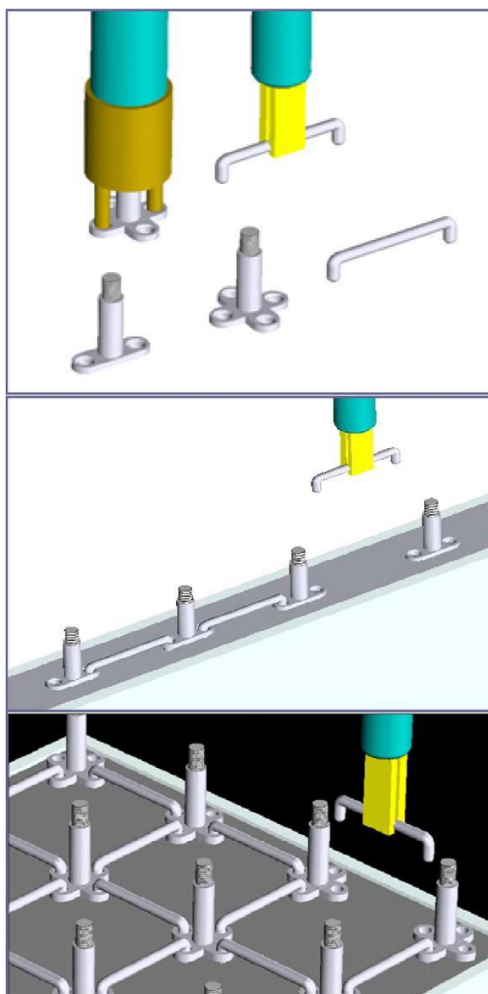
Tento proces umožňuje architektům navrhnout struktury s funkčními a exotickými architektonickými geometriemi, které je těžké realizovat při použití klasických výrobních technologií [16].

2) Různé materiály

V CC může používat širokou škálu materiálů, a to jako vnější povrchy i jako plnidla. Látky můžeme různě kombinovat a využívat jejich hlavní vlastnosti. Různé látky přivádíme do trysek a teprve tam dochází ke smíchání těsně před nanášením. Počítač může řídit celkové množství materiálu, ale také jeho množství v určitém místě. To umožňuje konstrukci struktur, které obsahují různá množství různých sloučenin v různých oblastech [16].

3) Automatizovaná výztuž

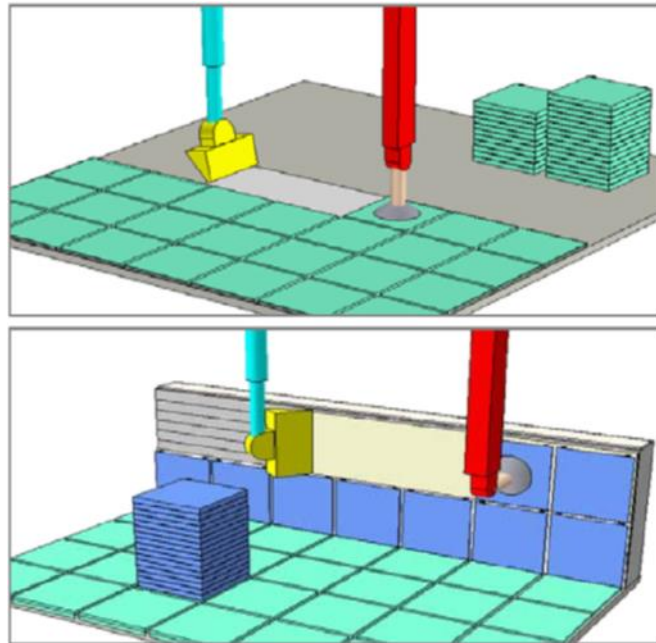
Může být navrženo robotické modulární zabudování ocelového pletiva do každé vrstvy, jak je znázorněno na obr. 17. Tři jednoduché modulární součásti zobrazené na tomto obrázku mohou být dodávány automatizovaným napájecím systémem, který je ukládá a sestaví mezi oběma okraji. Trojrozměrná síť může být podobně postavena pro sloupy. Beton se potom může nalít po zhotovení okrajů stěny nebo sloupku pomocí CC [16].



Obr. 17 Výztuhy a montážní postupy pro stěny a sloupy [16]

4) Automatizované obkládání stěn a podlah

Automatizované pokládání podlah probíhá pomocí robotického dodávání a rozložení materiálu pro přilnutí dlaždic k podlahám nebo stěnám, jak je znázorněno na obr. 18. Další robotické rameno pak může vybrat dlaždici z odběrného místa a přesně je umístit na plochu ošetřenou adhezivním materiálem. Tato robotická ramena mohou být instalována na stejné konstrukci [16].



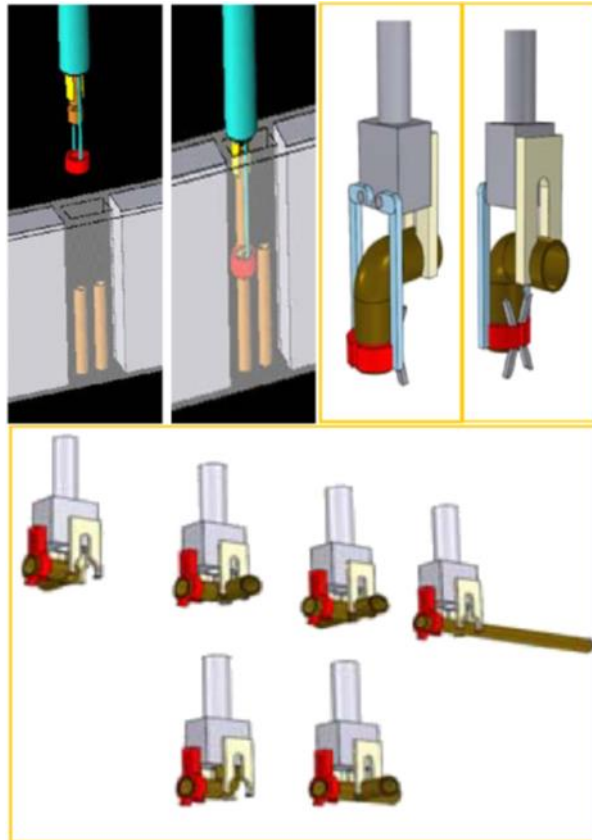
Obr. 18 Automatizované obkládání stěn a podlah [16]

5) Automatizované malování

Během konstrukce nebo po jejím dokončení může robotický manipulátor s postřikovým nátěrem připojeným ke hlavní konstrukci CC namalovat každou zeď podle požadovaných specifikací. Lakovací mechanismus může být rozprašovací tryska nebo hlavička inkoustové tiskárny (jako jsou tiskárny používané pro tisk velkých billboardů). Tento mechanismus umožňuje malování tapetového papíru nebo jiných požadovaných vzorků [16].

6) Automatizované instalatérské práce

Potrubí uvnitř zdí je tvořeno díky systému vrstva podle vrstvy na principu CC. To umožňuje automatickou konstrukci instalatérských a elektrických sítí. U potrubí je po zhotovení několika stěnových vrstev spojeno potrubí například z mědi nebo i jiných materiálů. Robotický systém znázorněný na levé horní straně obr. 19 dodává nový segment trubky a v případě měděných trubek má ohřívací prvek (znázorněný červeně) ve formě prstence. Vnitřní (nebo vnější) okraj každého segmentu potrubí je předem ošetřen vrstvou pájky. Ohřívací prstenec ohřívá oblast připojení, roztaví pájku a poté, co se provede vyrovnání, spojuje dva segmenty trubek. Potřebné součásti mohou být předem uspořádány v zásobníku pro snadné vyzvednutí robotickým montážním systémem. Pomocí těchto komponentů mohou být v konstrukci automaticky vloženy různé vodovodní sítě [16].



Obr. 19 Vodovodní moduly a úchytky [16]

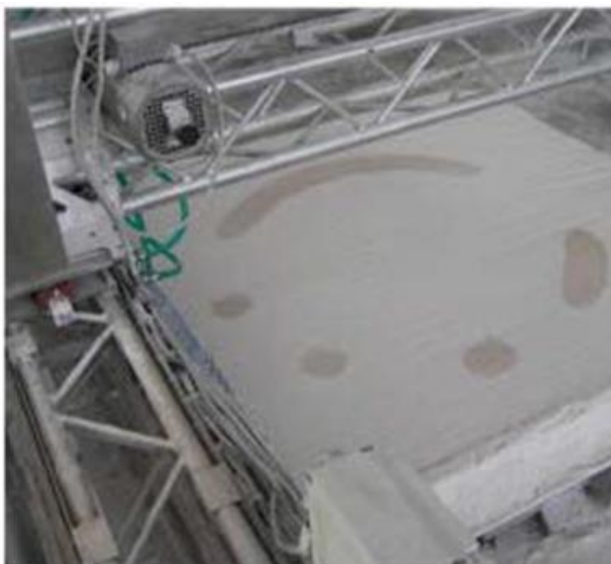
2.4 D-shape

Proces d-shape používá spíše vrstvy prášku a lepidla než cementovou pastu používanou v jiných metodách. Jedná se o proces ukládání prášku, kde je prášek vytvrzen pomocí pojidla, podobně jako obvyklé 3D procesy. Každá vrstva materiálu je položena na požadovanou tloušťku, zhutněna a potom je pomocí trysek připevněných na nosnou konstrukci portálu nanášeno pojivo na místa, kde má být objekt zpevněn. Tento automatizovaný stavební systém, který používá písek a pojivo k vytvoření téměř jakékoliv struktury, umožňuje postavit i budovy z pískovce [17].

Systém má mnoho výhod oproti tradičním procesům stejně jako konstrukční 3D procesy. Je schopen použít jakýkoliv písek a jemu podobný materiál. Produkuje málo odpadu, protože zbývající písek, který nezůstal na objektu, se může využít jinde. Používané materiály jsou přirozeně se vyskytující látky, a proto nevyžadují před výrobou téměř žádné zpracování. Konečný výrobek je velmi podobný přírodnímu kameni [17].



Obr. 20 Vrstva připravená na lepení [17]



Obr. 21 Průřez vytištěného modelu [17]

2.5 Srovnání technik d-shape, contour crafting a contour printing

3Dp techniky contour crafting, concrete printing a d-shape jsou podobné, protože všechny staví přidáváním materiálu. Avšak každý z procesů byl vyvinut z různých typů užívání a různých materiálů, což vedlo k tomu, že každá z nich měla zřetelné individuální výhody [17].

Jedním z hlavních rozdílů je montáž hlavy (součást, která skutečně připevňuje materiál k předmětu). Hlava je namontována na rámu robota nebo jeřábu. Contour crafting bylo vyvinuto jako montáž pomocí jeřábu pro aplikaci na místě. Jak D-shape i concrete printing jsou výrobně založené na portálovém zpracování, ale s vhodným množstvím úprav není žádný důvod, proč oba procesy nelze použít v jednom [17].

Dalším velkým rozdílem mezi těmito technikami je způsob, jakým řeší situace, kdy by na konstrukci měl existovat převis. Protože konstrukce 3Dp závisí na budování objektu

zdola nahoru, přesahy a převisy jsou zvláštní výzvou pro tyto techniky. Existují dva hlavní způsoby, jak metody 3Dp mohou řešit převisy. Prvním je vytvoření malého lešení v prázdném prostoru, které bude podporovat přesahující konstrukci a jež může být po zatuhnutí konstrukce odstraněno. Druhý způsob je používán pouze systémem D-Shape, protože se jedná o metodu založenou na zpevňování prášku v místě, kde má být konstrukce tuhá. Zbýlý nezpevněný materiál poskytuje podporu vyrobené konstrukci a po dokončení procesu je odstraněn [17].

Konečným důležitým rozdílem v technice je „rozlišení tisku“. To se týká množství materiálu stanoveného v každém průchodu zařízením. U concrete printing a d-shape je ukládání 4–6 mm materiálu pro každý průchod, contour crafting používá 13 mm. Hlavní porovnání se týká hloubky vrstev proti rychlosti stavění. Menší množství materiálu má za následek delší dobu potřebnou k dosažení požadované výšky, přičemž je třeba mít na paměti, že menší množství položeného materiálu znamená i jemnější kontrolu nad detailem a dokončením [17]. Na následujících obrázcích vidíme srovnání konečných výrobků:

- „a“ – představuje technologii D-shape.
- „b“ - znázorňuje contour crafting.
- „c“ - ukazuje concrete printing.

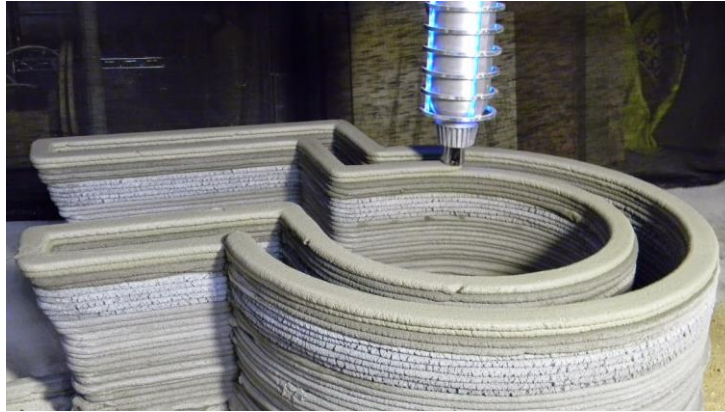


Obr. 22 D-shape, contour crafting, concrete printing [17]

2.6 Stavby vytvořené 3D tiskem

2.6.1 Betonový hrad

Betonový hrad byl vytištěn 24. srpna 2014 společností Total Kustom, firmu založil Andrey Rudenko. Hrad byl vytištěn po částech a poté poskládán, jednotlivé části byly tisknuty technologií concrete printing [18].



Obr. 23 Tisk jednotlivých částí hradu [18]



Obr. 24 Tisk jednotlivých částí hradu [18]



Obr. 25 První hrad v Minnesotě vytisknutý 3D tiskárnou [18]

2.6.2 Levis grand hotel na Filipínách

Na tomto projektu se také podílel Andrey Rudenko se svým týmem. Hotelové apartmá mělo obytnou plochu asi 130 m². Dům má dva pokoje a obývací pokoj s vířivkou. Samotný tisk trval asi 100 hodin. Tento čas nezahrnuje zastávky k montáži elektroinstalací nebo přidávání výztuže. Celý projekt byl dokončen 15. prosince 2015 [18].



Obr. 26 Levis grand hotel [18]

2.6.3 Šanghajská firma WinSun

Jde o čínskou společnost, která drží stovky technologických patentů a během poslední doby postavila v Číně několik divadel, obchodních center nebo operních domů. Její hlavní díla jsou například pětipatrový činžovní dům nebo experiment, kdy za jeden den vytiskla 10 domů a postavila tak téměř malou vesnici [19].



Obr. 27 Činžovní dům v Číně [19]

3 APLIKAČNÍ PŘÍKLAD – TISK Z CEMENTO HLINĚNÉ KAŠE

3.1 První návrh a výroba přizpůsobené tiskové hlavy

Návrh tiskové hlavy byl vytvořen podle projektu TerraPerforma, který se zaměřuje na 3D tisk, především na výrobu z tradičních materiálů, jako je například hlína. Jako zařízení k 3D tisku využívají především systémy s robotickou rukou.

K vlastnímu návrhu tiskové hlavy bylo potřeba potrubí PVC DN 125, DN 110, redukce z DN 125 na DN 110, redukce z DN 110 na DN 50, PVC zátka a šroub $\varnothing 10 / 125$. Tisková hlava byla složena z PVC potrubí DN 125 o délce 65 cm, na které byla přidělána redukce z DN 125 na DN 110 a následně byla nastavena další redukce z DN 110 na DN 50. Ke spojování redukcí byla použita pasta WURTH. K pohodlnějšímu vytlačování materiálu z potrubí byl nakonec namontován šroub $\varnothing 10 / 125$, který slouží pro lepší úchop tiskové hlavy.



Obr. 28 PVC DN 125, 110, redukce DN 125 na 110, redukce DN 110 na 50 [20]



Obr. 29 První verze tiskové hlavy

3.2 Finální verze tiskové hlavy

Po první zkoušce tiskové hlavy byl koncový průměr tiskové hlavy zmenšen z průměru 50 mm na průměr 20 mm. Na redukci DN 50 byly aplikovány další redukce, nejdříve redukce z DN 50 na DN 40 a poté redukce z DN 40 na DN 20.



Obr. 30 Redukce z DN 40 na DN 20, Redukce z DN 50 na DN 40 [20]



Obr. 31 Finální verze tiskové hlavy

3.3 Příprava cemento hliněné kaše

K přípravě kaše bylo zapotřebí hlíny, cementu, vody, odměrky, zednická fanky a vrtačky na míchání.

Hlína byla odebraná v hloubce 10–20 cm pod úroveň terénu. Z hlediska stavebnictví ji řadíme do kategorie jemnozrné, velikost částic se pohybuje v rozmezí 0,002 až 0,06 mm. Podle půdních map České republiky hlína v místě odběru spadá do kategorie kambizemě. Kambizem je řazena mezi hnědé půdy a představuje největší podíl půdního typu u nás. Jejich barvu ovlivňují stupně prokrytalizování a různé hydratace, většinou je však barva hnědá, rezavohnědá až červená. Kambizemě obsahují oxidy železa a hliníku díky krystalové mřížce minerálu, ze které se tyto látky uvolňují a rozptýlí po povrchu půdních částic a strukturních agregátů.

Při prvním návrhu cemento hliněné kaše byl zvolen poměr 4,5:1,5:1,5 (hlína, cement, voda). Jak vidíme na obrázku, tato konzistence nebyla úplně vhodná pro zkoušení tiskové hlavy.



Obr. 32 Příprava cemento hliněné kaše



Obr. 33 První vzorek cemento hliněné kaše

V dalším pokusu už měla kaše vhodnou konzistenci. Kaše byla v poměru 4,5:1,5:1 (hlína, cement, voda). Celková hmotnost jedné dávky byla 7 kg, z toho bylo 4,5 kg hlíny, 1,5 kg cementu a 1 l vody.

Hustota směsi byla spočítaná na základě hodnot, které byly zváženy a změřeny před samotným tiskem. K dávkování byla použita zednická fanka, jejíž objem byl 0,917 dm³. V první tabulce vidíme výpočet základních hustot jednotlivých surovin a následná rovnice vyjadřuje konečnou hustotu cemento hliněné kaše.

Tabulka 1 Výpočet hustot

	kg	m ³	kg/m ³
VODA	1	0,001	1000,00
CEMENT	1,5	0,000917	1635,77
HLÍNA	4,5	0,002751	1635,77
	m	V	ρ

$$\rho_{\text{směsi}} = \frac{3 \cdot \rho_{\text{hlíny}} + 1 \cdot \rho_{\text{cementu}} + 1 \cdot \rho_{\text{vody}}}{3 + 1 + 1} \quad (1)$$

$$\rho_{\text{směsi}} = \frac{3 \cdot 1635 + 1 \cdot 1635 + 1 \cdot 1000}{3 + 1 + 1} = 1508 \text{ kg/m}^3 \quad (2)$$



Obr. 34 Vhodná konzistence cemento hliněné kaše

3.4 První zkouška tiskové hlavy

Po sestavení tiskové hlavy a připravení cemento hliněné kaše následovala první zkouška tiskové hlavy. Tiskovou hlavou byly tvořeny vrstvy o šířce zhruba 7–8 cm a délce 55 cm. Celková výška „stěny“ byla zhruba 19 cm a hmotnost 9,5 kg.



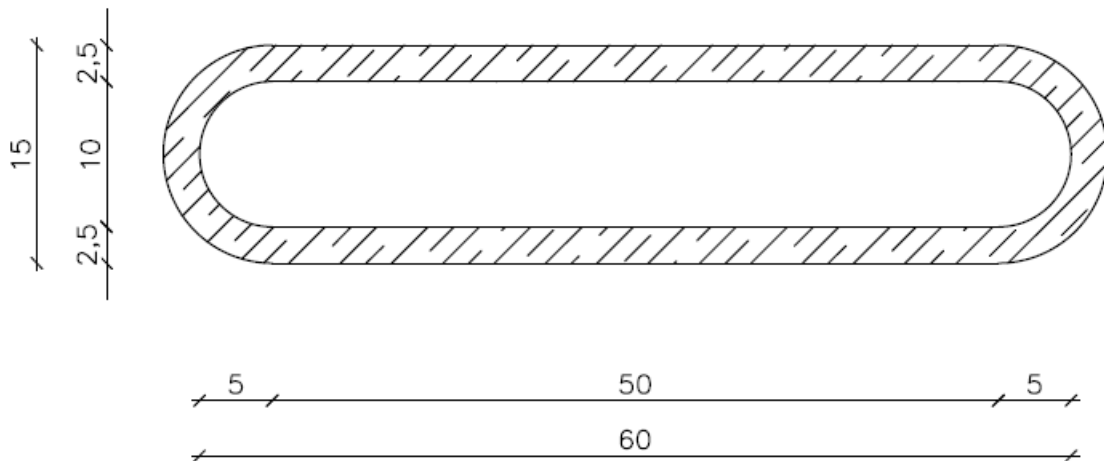
Obr. 35 Boční pohled na jednotlivé vrstvy



Obr. 36 Proces tisku a finální verze první zkoušky

3.5 Druhá zkouška tiskové hlavy

Před druhou zkouškou tiskové hlavy došlo k redukci průměru z DN 50 na průměr DN 20. Došlo k výraznému zmenšení šířky vrstvy z 7–8 cm na šířku asi 2,5 cm. Na obrázku vidíme půdorys vytvořeného tělesa.



Obr. 37 Půdorys vytvořeného tělesa

Zkušební těleso bylo vytvořeno celkem ze čtyř vrstev, jeho výška byla 9–10 cm a výška jedné vrstvy se pohybovala kolem 2 cm. Hmotnost celého tělesa byla 6,7 kg.



Obr. 38 První vrstva druhého tělesa



Obr. 39 Boční pohled na druhé zkušební těleso



Obr. 40 Dokončení druhého zkušebního tělesa

3.6 Vyhodnocení zkoušek

U každé zkoušky byli řešeny vlastnosti, jako jsou tvarování, tuhnutí a velikosti trhlin.

3.6.1 První zkouška

Na obrázku je vidět výsledek první zkoušky po sedmi dnech tuhnutí. Uprostřed zkušebního tělesa je vidět asi 0,5 cm široká trhlina, která vznikla pravděpodobně při manipulaci s tělesem, další menší praskliny vznikly pravděpodobně kvůli rychlému vysychání.

Tvarování samotného zkušebního tělesa ovlivnilo mnoho faktorů, například hustota a složení cemento hliněné kaše, koncový průměr tiskové hlavy a vyvíjení nestabilního tlaku na jednotlivé vrstvy. Důvodem vyvíjení nestabilního tlaku bylo využití lidské síly namísto automatizovaného systému, který zaručuje nesrovnatelnou kvalitu ve všech směrech.



Obr. 41 Výsledek první zkoušky po sedmi dnech

3.6.2 Druhá zkouška

Jeden z rozdílů mezi první a druhou zkouškou bylo kladení vrstev. Proces byl složitější, protože došlo ke zmenšení průměru tiskové hlavy o 3 cm. Při pokládání čtvrté vrstvy docházelo k přetížení první vrstvy a tím k jejímu rozšíření.



Obr. 42 Rozšíření první vrstvy zkušebního tělesa

Na obrázku je vidět zkušební těleso po sedmi dnech tuhnutí. Pravděpodobně díky rychlému vyschnutí vznikl velký počet trhlin, jejichž šířka se pohybuje mezi 0,1–0,5 cm. U tvarování tělesa byly stejné problémy jako u první zkoušky.



Obr. 43 Výsledek druhé zkoušky po sedmi dnech

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo uvést, charakterizovat a zhodnotit možnosti využití 3D tisku ve stavebnictví. Práce shrnuje celkový vývoj 3D tisku od prvopočátků až po současnost i nástin možné budoucnosti.

V teoretické části byly shrnuty možnosti použití 3D tisku v různých oblastech lidské činnosti, používané materiály a především technologie. Nejvíce byly řešeny systémy D-shape, Concrete Printing a Contour Crafting, jejich princip fungování, výhody a nevýhody, jaké hmoty využívají a další jejich vlastnosti. Dále byly popsány další možnosti využití 3D tisku v konceptu smart city nebo v projektu průmysl 4.0. Největší výhody v konceptu Smart City spočívají ve variabilitě konstrukcí, kvalitní a rychlé výstavbě nebo v možnosti využití recyklovaných materiálů. Je nepochybné, že 3D tisk bude i v budoucnu nezbytnou součástí v průmyslu 4.0. Důvodem je rychlá a snadná výroba náhradních dílů nebo jakýchkoliv komponentů.

Lze předpokládat, že v různých lidských oborech budou vznikat nové technologie, které budou umožňovat vyrábět kvalitní produkty za nižší cenu. Bude možné vyrobit jakoukoliv součástku od raketových motorů až po turbíny. Díky novým materiálům a technologiím se s velkou pravděpodobností bude např. snižovat hmotnost strojů a přitom se zvýší jejich výkonnost.

Praktická část byla zaměřena na probatorní 3D tisk. Na počátku byla vyrobena tisková hlava z PVC potrubí a PVC redukci. Konstrukce byla provedena na základě projektu Terraperform. Následně byla výše zmíněnou tiskovou hlavou zhotovena dvě zkušební tělesa z cemento hliněné kaše. Tato směs byla zvolena, protože hlína je materiál, který je dostupný téměř na každém místě světa a jde o materiál budoucnosti.

Na tělesech byly řešeny vlastnosti, jako jsou doba tuhnutí, tvarovatelnost, vznik trhlin. Praktická část by mohla být v budoucnu rozšířena o větší počet zkoušených vzorků, u kterých by mohlo dojít k postupnému zlepšování vlastností, jako jsou například lepší tvar tělesa, zkvalitnění materiálové směsi nebo zlepšení tiskové hlavy.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Kováčik, M.: *Historie 3D tisku* [online]. 2017, poslední revize 27.10.2017 [cit. 5. 4. 2018]. Dostupné z: <https://3dfactory.cz/2017/10/27/historie/>
- [2] Ondyman: *Budoucnost 3d tisku* [online]. 2018, poslední revize 17.03.2018 [cit. 3. 5. 2018]. Dostupné z: <http://imagazin.cz/budoucnost-3d-tisku/>
- [3] Business Media CZ: *Průmysl 4.0: Budoucnost je tady* [online]. 2015 [cit. 3. 5. 2018]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/prumysl-4-0-budoucnost-je-tady_33441.html
- [4] Sedlecký, J.: *Městský inženýr a městský architekt v roce 2017*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2017. ISBN 978-80-87438-88-6.
- [5] Shivali Best For Mailonline: *The strangest skyscraper concept yet? Bizarre 'Pod Vending Machine' dispenses 3D-printed custom houses for buyers* [online]. 2017, poslední revize 26.04.2017 [cit. 3. 5. 2018]. Dostupné z: <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-4447278/Student-designs-Pod-Vending-Machine-skyscraper-concept.html>
- [6] 3Dtiskarny: *3D tiskové materiály – jak fungují* [online]. 2017 [cit. 9. 5. 2018]. Dostupné z: <http://www.3dtiskarny.info/recenze/srovnani-3d-tiskovych-strun/>
- [7] Schwarzmann, M.: *Tisk bahnem* [online]. 2014, poslední revize 17.10.2014 [cit. 7. 3. 2018]. Dostupné z: <http://e-svet.e15.cz/technika/3d-tisk-bahnem-budoucnost-stavebnictvi-ve-slumech-a-v-africe-1129082>
- [8] Tecnotrade obráběcí stroje: *Polyjet technologie* [online]. 2017 [cit. 31. 3. 2018]. Dostupné z: <http://www.objet.cz/3D-tiskarny/technologie-polyjet>
- [9] Materialise: *Fused Deposition Modeling* [online]. 2017 [cit. 1. 4. 2018]. Dostupné z: <http://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/fused-deposition-modeling-fdm>
- [10] 4ISP: *SLS – Selective Laser Sintering* [online]. 2018 [cit. 2. 4. 2018]. Dostupné z: <https://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologieich-3d-tisku/>
- [11] DKMP: *Přehled technologií 3D tisku* [online]. 2018 [cit. 3. 4. 2018]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>
- [12] Kovařík, M., Svoboda P.: *3D tisk jako součást trendu zvyšování podílu robotizace ve stavebnictví* [online]. 2015, poslední revize 23.02.2015 [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <https://businessworld.cz/infrastruktura/3d-tisk-jako-soucast-trendu-zvysovani-podilu-robotizace-ve-stavebnictvi-12164>
- [13] Le, T. et al.: Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures* [online]. 2012, Vol. 45, No. 8, pp. 1221–1232 [cit. 13. 3. 2018]. Dostupné na www: <http://www.springerlink.com/index/10.1617/s11527-012-9828-z>. ISSN 1359-5997.
- [14] Bos, F. et al.: Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping* [online]. 2016, Vol. 11, No. 3, pp. 209-225 [cit. 13. 3. 2018]. Dostupné na www:

- <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17452759.2016.1209867>. ISSN 1745-2759.
- [15] Khoshnevis, B. et al.: Mega-scale fabrication by Contour Crafting. *International Journal of Industrial and Systems Engineering* [online]. 2006, Vol. 1, No. 3, pp. 301 [cit. 13. 3. 2018]. Dostupné na [www: http://www.inderscience.com/link.php?id=9791](http://www.inderscience.com/link.php?id=9791). ISSN 1748-5037.
- [16] Khoshnevis, B.: Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. *Automation in Construction* [online]. 2004, Vol. 13, No. 1, pp. 5-19 [cit. 13. 3. 2018]. Dostupné na [www: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580503000736](http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580503000736). ISSN 09265805.
- [17] Perkins, I., Skitmore, M.: Three-dimensional printing in the construction industry: A review. *International Journal of Construction Management* [online]. 2015, Vol. 15, No. 1, pp. 1-9 [cit. 13. 3. 2018]. Dostupné na [www: http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15623599.2015.1012136](http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15623599.2015.1012136). ISSN 1562-3599.
- [18] 3D Concrete House Printer: *3D Printed Hotel* [online]. 2014 [cit. 30. 3. 2018]. Dostupné z: <http://www.totalkustom.com/3d-printed-hotel-suite.html>
- [19] Vraná, M.: *V Číně postavili z 3D tiskárny luxusní vilu a už i pětipodlažní dům* [online]. 2015, poslední revize 12.03.2015 [cit. 30. 3. 2018]. Dostupné z: https://bydleni.idnes.cz/dum-z-3d-tiskarny-0kj-/architektura.aspx?c=A150310_133511_architektura_web
- [20] Topenilevne: *KGR redukce - DN 125/110* [online]. 2018 [cit. 14. 5. 2018]. Dostupné z: https://www.topenilevne.cz/osma-kgr-redukce-dn-125-110-p5830/?utm_source=Google+n%C3%A1kupy&utm_medium=ppc&utm_campaign=KGR+redukce++DN+125/110&gclid=EAlaIQobChMIL_HVr6mF2wIV8TLTCh32YgolEAQYASABEgJbEPD_BwE

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

3D – trojrozměrné zobrazení

PLA – polylactic acid

ABS – akrylonitrilbutadiestyren

HIPS – high impact polystyrene

PETG – polyethylentereftalát

FDM – fused deposition modeling

SLS – selective laser sintering

LOM – laminated object manufacturing

DMLS – direct metal laser sintering

BJ – binder jetting

MJP – multi jet printing

CC – contour crafting

DN – jmenovitá světlost potrubí

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Tisknoucí robotická ruka KUKA [2].....	13
Obr. 2 Princip průmyslu 4.0 [3].....	14
Obr. 3 Koncept smart city [4]	15
Obr. 4 Struktura panelového domu Vending Machine [5]	15
Obr. 5 Technologie PolyJet Matrix [8]	17
Obr. 6 Proces FDM [9].....	17
Obr. 7 Proces tisku SLS [10]	18
Obr. 8 Tiskárna na principu LOM [11]	18
Obr. 9 Tiskárna na MJP principu [11].....	20
Obr. 10 Systém concrete printing [13]	22
Obr. 11 Průběh tisku betonu [13]	22
Obr. 12 Tisková hlava s tryskou [14].....	23
Obr. 13 Zkroucená betonová vlákna [14].....	23
Obr. 14 Tečnost trysky vůči dráze [14]	24
Obr. 15 Vytlačovací agregát [15].....	25
Obr. 16 Systém contour crafting [16]	26
Obr. 17 Výztuhy a montážní postupy pro stěny a sloupy [16].....	27
Obr. 18 Automatizované obkládání stěn a podlah [16].....	28
Obr. 19 Vodovodní moduly a úchytky [16]	29
Obr. 20 Vrstva připravená na lepení [17].....	30
Obr. 21 Průřez vytištěného modelu [17].....	30
Obr. 22 D-shape, contour crafting, concrete printing [17]	31
Obr. 23 Tisk jednotlivých částí hradu [18].....	32
Obr. 24 Tisk jednotlivých částí hradu [18].....	32
Obr. 25 První hrad v Minnesotě vytisknutý 3d tiskárnou [18]	33
Obr. 26 Levis grand hotel [18]	33
Obr. 27 Činžovní dům v Číně [19].....	34
Obr. 28 PVC DN 125, 110, redukce DN 125 na 110, redukce DN 110 na 50 [20]	35
Obr. 29 První verze tiskové hlavy	35
Obr. 30 Redukce z DN 40 na DN 20, Redukce z DN 50 na DN 40 [20].....	36
Obr. 31 Finální verze tiskové hlavy.....	36

Obr. 32 Příprava cemento hliněné kaše.....	37
Obr. 33 První vzorek cemento hliněné kaše.....	37
Obr. 34 Vhodná konzistence cemento hliněné kaše.....	38
Obr. 35 Boční pohled na jednotlivé vrstvy.....	38
Obr. 36 Proces tisku a finální verze první zkoušky.....	39
Obr. 37 Půdorys vytvořeného tělesa.....	39
Obr. 38 První vrstva druhého tělesa.....	40
Obr. 39 Boční pohled na druhé zkušební těleso.....	40
Obr. 40 Dokončení druhého zkušebního tělesa.....	41
Obr. 41 Výsledek první zkoušky po sedmi dnech.....	42
Obr. 42 Rozšíření první vrstvy zkušebního tělesa.....	42
Obr. 43 Výsledek druhé zkoušky po sedmi dnech.....	43

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Výpočet hustot.....	37
-------------------------------	----