

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Klemenčič, A., 2016. Tiskanje konstrukcijskih sklopov; iluzija ali stvarnost?. Diplomski nalogi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Korelc, J., somentorica Zupan, N.): 67 str.

Datum arhiviranja: 14-09-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Klemenčič, A., 2016. Tiskanje konstrukcijskih sklopov; iluzija ali stvarnost?. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Korelc, J., co-supervisor Zupan, N.): 67 pp.

Archiving Date: 14-09-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*

Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

ANDREJ KLEMENČIČ

**TISKANJE KONSTRUKCIJSKIH SKLOPOV; ILUZIJA
ALI STVARNOST?**

Diplomska naloga št.: 3495/KS

**PRINTING OF CONSTRUCTION COMPONENTS;
ILLUSION OR REALITY?**

Graduation thesis No.: 3495/KS

Mentor:

prof. dr. Jože Korelc

Somentorica:

Nina Zupan

Ljubljana, 08. 09. 2016

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Spodaj podpisani študent Andrej Klemenčič, vpisna številka 26104509, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Tiskanje konstrukcijskih sklopov; iluzija ali stvarnost?

IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*
 - a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;**
 - b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to treba, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;
5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V: Novem mestu
Datum: 31.08.2016

Podpis študenta:

ZAHVALA

Za vso pomoč in podporo pri izdelavi diplomskega dela se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Jožetu Korelcu in somentorici Nini Zupan, mag. inž. grad. Zahvalil bi se rad tudi sodelavcem in vodstvu podjetja Tisk Šepic, d. o. o., ki so bili zelo razumevajoči, kadar sem študij postavil pred službo.

Prav posebno pa se želim zahvaliti svoji družini za brezpogojno podporo in razumevanje ter se jim opravičujem za vse izgubljene trenutke, ki jih zaradi študijskih obveznosti nismo preživeli skupaj.

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.078:655.3.066.51(043.2)
Avtor:	Andrej Klemenčič
Mentor:	prof. dr. Jože Korelc
Somentor:	Nina Zupan, mag. inž. grad.
Naslov:	Tiskanje konstrukcijskih sklopov; iluzija ali stvarnost?
Tip dokumenta:	diplomsko delo
Obseg in oprema:	67 str., 67 sl., 4 pregl.
Ključne besede:	3D-tisk, topološka optimizacija, materialna optimizacija, svobodna oblika konstrukcijskih sklopov

Izvleček

Diplomsko delo obravnava možnosti tiskanja nosilnih gradbenih konstrukcij z uporabo 3D-tiska. V ta namen so na začetku predstavljene prednosti tehnologije in njeni pozitivni vplivi tako na področju varovanja okolja, kot tudi na finančnem področju. Sledi klasifikacija različnih tehnologij in njihova kratka predstavitev. Poudarek je bil narejen tudi na vpliv orientacije vlaken s tehnologijo modeliranja s spajanjem slojev (FDM) natisnjenih vzorcev na njihovo natezno in upogibno nosilnost ter odpornost na utrujanje. V nadaljevanju so predstavljeni dosežki 3D-tiska na področju gradbeništva, podrobneje pa je predstavljeno področje tiskanja kovinskih konstrukcij oziroma konstrukcijskih sklopov. Na primeru mostu v Amsterdamu, ki bo v celoti izdelan s tehnologijo 3D-tiska, je predstavljena možnost gradnje polno nosilnih gradbenih konstrukcij in njenih prednosti pred trenutno uporabljanimi tehnikami gradnje. S topološko optimizacijo vozlišča palične konstrukcije smo pokazali, da uporaba 3D-tiska tudi v gradbeništvu omogoča nov pristop k projektiranju konstrukcij. Zaradi sposobnosti tiska poljubnih oblik, brez dodatnih stroškov, lahko gradimo lažje konstrukcije, material pa uporabimo samo na mestih, kjer je to nujno potrebno. V delu je poleg topološke optimizacije predstavljena tudi optimizacija strukture materiala, ki z uporabo 3D-tiska dobiva nov pomen. Na ta način je možno razviti nove materiale, ki bodo bolj nosilni, hkrati pa tudi lažji od sedaj poznanih. Tiskanje gradbenih konstrukcij ni iluzija in samo vprašanje časa je, kdaj in do kakšne mere bo 3D-tisk nadomestil utečene tehnike gradnje objektov.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	624.078:655.3.066.51(043.2)
Author:	Andrej Klemenčič
Supervisor:	prof. dr. Jože Korelc, Prof. Ph.D.
Cosupervisor:	Nina Zupan, mag. inž. grad.
Title	Printing of construction components; illusion or reality?
Document type:	Graduation Thesis – University Studies
Scope and tools:	67 p., 67 fig., 4 tab.
Keywords:	3D-printing, topological optimization, material optimization, free form of construction components

Abstract

The thesis deals with possibilities of printing of load bearing constructions with the use of a 3D printer. Therefore in the introduction, advantages and positive impacts of this technology both in the field of environmental protection, as well as in the financial sector are presented, followed by classification and short presentation of different technologies. The focus is also made on the significance of how fibers orientation in the FDM printed specimens effects on tensile, flexural and fatigue strengths. Furthermore, achievements of 3D printing in construction are presented, and, in detail, the field of metal construction printing and construction components, respectively. Additionally, a bridge in Amsterdam is presented as an example of 3D printer capability to build load bearing constructions. It also shows us advantages that 3D printing has over traditionally used construction techniques. With topological optimization of truss nodes, it is shown that use of 3D printing technology in construction enables a new approach to construction designing; we can build lighter constructions and use the construction material only in places where it is crucial. This is due to the unique ability to print any form, without additional expenses. Besides topological optimization, the thesis also includes material optimization, which gets a whole new meaning using 3D printing technology. It is possible to develop new materials which are stronger, yet lighter this way. 3D Printing of building construction is not an illusion, it is only a question of when and to what extent will this technology replace the well-established techniques of building construction.

KAZALO VSEBINE

IZJAVE	III
ZAHVALA	IV
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	V
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	VI
1 UVOD	1
2 O 3D-TISKU	2
2.1 Prednosti 3D-tiska	3
2.1.1 Poraba materiala	3
2.1.2 Krajši čas izdelave tudi zahtevnejših izdelkov	3
2.1.3 Poenostavljeno in skrajšano izdelovanje prototipov	5
2.1.4 Izdelava pramodelov	5
2.1.5 Prilagajanje posameznikom in proizvodnja nizkih naklad	6
2.1.6 Sprememba trgovinskega poslovanja in vpliv na trajnostni razvoj	6
2.2 Pomanjkljivosti 3D-tiska	9
3 TEHNOLOGIJE 3D-TISKA	11
3.1 Ekstrudiranje materialov	12
3.1.1 Modeliranje s spajanjem slojev – FDM	14
3.1.1.1 Prednosti in slabosti FDM tehnologije	16
3.1.1.2 Materiali za FDM tehnologijo	17
3.1.1.3 Mehanske lastnosti konstrukcij izdelanih z FDM tehnologijo	19
3.1.2 Izdelovanje kontur ali sten – CC	23
3.2 Fotopolimerizacija	26
3.2.1 Stereolitografija	27
3.3 Kapljično nanašanje ali brizganje materiala	27
3.4 Kapljično nanašanje ali brizganje veziva	28
3.5 Lasersko navarjanje	31
3.6 Laminacija pol	32
3.7 Spajanje praškastega materiala	33
3.7.1 Selektivno lasersko sintranje	34
3.7.2 Neposredno lasersko sintranje kovine	35

3.7.3	Selektivno lasersko taljenje	35
3.7.4	Taljenje z elektronskim snopom	35
3.8	Uporaba posameznih tehnologij v gradbeništvu	36
4	SPLOŠNO O 3D-TISKU V GRADBENIŠTVU	38
4.1	Fasada.....	38
4.2	Masivne nosilne gradbene konstrukcije na osnovi cc in d-shape tehnologije.....	40
4.2.1	Contour crafting	40
4.2.2	D-Shape.....	43
5	3D-TISK KOVINSKIH KONSTRUKCIJ	45
5.1	Jekleni most v Amsterdamu	45
5.1.1	Kovinski konstrukcijski sklopi.....	49
5.1.1.1	Optimizacija nosilca	49
5.1.1.2	Optimizacija vozlišča.....	52
6	ZAKLJUČEK	60
7	VIRI.....	62

KAZALO SLIK

Slika 1: Primerjava med tiskalnikom dokumentov in 3D-tiskalnikom [2].....	2
Slika 2: Prikaz izdelave predmeta z odvzemanjem materiala (levo) in z dodajanjem materiala v slojih oziroma s 3D-tiskom (desno) [6].....	3
Slika 3: Razlika med večkoračno tehniko (zgoraj) in 3D-tiskom (spodaj) [9].....	4
Slika 4: Eksponat z dvojno steno organske oblike (desno) in delujoč ležaj (levo) [1].....	4
Slika 5: Primer funkcionalnega (levo) [52] in konceptualnega prototipa (desno) [53].....	5
Slika 6: Primer pramodela – voščenega prototipa (levo) in končnega srebrnega izdelka (desno) [1]	5
Slika 7: Primer personalizirane električne kitare (levo) [54] in očal (desno) [8].....	6
Slika 8: Shematični prikaz tradicionalne (levo) in lokalne proizvodnje (desno) [1]	7
Slika 9: Prva naprava za recikliranje termoplastičnih materialov [4]	7
Slika 10: Življenjski cikel ponovno uporabljenih izdelkov [11]	8
Slika 11: Prvi samoreplicirajoči 3D-tiskalnik, ki lahko natisne približno polovico svojih delov [10].	9
Slika 12: Pištola je sestavljena iz 16 delov, od katerih je 15 natisnjenih, 16. del pa je kovinska udarna igla [7].....	10
Slika 13: Rastrski (levo) in vektorski (desno) način tiskanja predmeta [1].....	11
Slika 14: Različni tipi ekstrudirnih glav: ekstrudiranje termoplastov (levo), ekstrudiranje živil in biokemijskih substanc (sredina), ekstrudiranje termoplastov z granulatno ali praškasto obliko osnovnega materiala, ekstrudiranje betona (desno) [13].....	13
Slika 15: Dejanska oblika prereza niti in zračnih vrzeli med njimi [14]	14
Slika 16: Prikaz delovanja FDM tehnologije z dvema ekstrudirnima glavama [12].....	15
Slika 17: Prikaz gostote zapolnitve prereza z metodo FDM [1].....	15
Slika 18: Prikaz vzorca zapolnitve prereza z metodo FDM [1].....	16
Slika 19: Pojav stopničenja pri FDM tehnologiji [1].....	17
Slika 20: Pojav vihanja vogalov zaradi prehitrega ohlajanja prvega sloja pri ABS materialu [18]	18
Slika 21: Nagib vlaken; 0° (zgoraj), 90° (v sredini) in 45° (spodaj) [15].....	20
Slika 22: Natezni diagram vzorcev z različno orientacijo vlaken [15].....	20
Slika 23: Pojavljanje praznin pri tisku vzorca pod 0° pri zaokrožitvi [15].	21

Slika 24: Praznine oziroma slaba sprejemnostjo med steno in notranjostjo vzorca pod kotom 0° [15].	22
Slika 25: Odpornost različnih vzorcev na utrujanje [15]	23
Slika 26: Prikaz 3D-tiska z metodo Contour Crafting [28]	24
Slika 27: Svobodna oblika z metodo CC natisnjenih objektov, računalniški model (levo), pretvorba v vzorec tiska (sredina levo), računalniška simulacija končnega izdelka (sredina desno) in končni izdelek (desno) [29]	25
Slika 28: Ekstrudirna glava s tremi šobami (levo) in z eno šobo (levo) [29]	25
Slika 29: Postopek fotopolimerizacije v kadi [32]	26
Slika 30: Tiskalnik za tisk 3D-predmetov z metodo kapljičnega nanašanja materiala [34]	28
Slika 31: Tiskalnik za tisk 3D-predmetov z metodo kapljičnega nanašanja veziva [34]	29
Slika 32: Selektivno izbrana mesta nanašanja veziva [1]	29
Slika 33: Postopek infiltracije [1]	30
Slika 34: S pomočjo 3DP natisnjen metalni material ima visoko nosilnost in strukturo, ki omogoča veliko duktilnost in žilavost [35]	31
Slika 35: Postopek tiskanja s tehnologijo DED [36]	32
Slika 36: Postopek tiskanja s tehnologijo LOM [37]	33
Slika 37: Shema tiskanja s tehnologijo SLS [38]	34
Slika 38: Shema tiskanja s tehnologijo DMLS [40]	35
Slika 39: Shema tiskanja s tehnologijo EBM [41]	36
Slika 40: Fasada, ki bo po končanem predsedovanju delno reciklirana, delno ponovno uporabljena [27]	39
Slika 41: Spodnji del fasade, natisnjen iz bio plastike z metodo FDM [27]	39
Slika 42: Prikaz značilne diagonalne zapolnitve sten [45]	41
Slika 43: Na sliki so vidni posamezni konstrukcijski sklopi, ki so bili naknadno sestavljeni v celoto [47]	41
Slika 44: 3D-natisnjena vila [48]	42
Slika 45: Material pred (levo) in po (desno) sintranju (osnovni material je temnejše barve)[50]	43
Slika 46: S tehnologijo D-SHAPE natisnjena skulptura [50]	44
Slika 47: Umestitev novega mostu v okolico [19]	45
Slika 48: Različne variante končnega izdelka mostu [19]	46

Slika 49: Robota ločeno tiskata vsak svojo polovico [19].....	47
Slika 50: Tiskalnik za tisk v vseh smereh ne potrebuje dodatnih podpor [21]	48
Slika 51: Testni most ima več kot 90 % nosilnosti tradicionalno grajenega mostu [24]	48
Slika 52: Optimiziran nosilec s tradicionalno izvedbo (zgoraj) in optimizacija 3D-tiskanega nosilca (spodaj) [25].....	49
Slika 53: Postopek iteracijskega optimiziranja nosilca [25].....	50
Slika 54: Prikaz poteka optimizacije [42]	51
Slika 55: Optimizacija parametrov zaradi omejene možnosti izdelave [42].....	51
Slika 56: Imitacija ulične razsvetljave v Hagu [26]	52
Slika 57: Detajl jeklenega vozlišča s tradicionalnim pristopom [25]	53
Slika 58: 3D-vozlišče 1.0: vhodni podatki (levo), optimizirana oblik (sredina), napetosti po von Misesu (desno) [25]	54
Slika 59: Z rdečo barvo označene podpore (levo) so vključene v končni izdelek (desno) [25].	54
Slika 60: Vijačenje kablov znotraj osnovnega volumna vozlišča [26].....	55
Slika 61: Iteracijski postopek optimizacije detajla 3D-vozlišča 2.0 [25]	56
Slika 62: Prikaz glavnih vidikov, na katere moramo biti pozorni pri izdelavi vozlišča [25]. ...	56
Slika 63: Prikaz previsnih struktur, označenih z rdečo barvo [25]	57
Slika 64: Rezultat topološke optimizacije (levo), prilagojen detajl za tisk (desno) [25]	58
Slika 65: Primerjava detajlov: tradicionalni (levo), optimiziran na podlagi tradicionalnega (sredina) in poljubna oblika (desno) [25].	58
Slika 66: Potek napetosti znotraj posameznih detajlov [26].....	59
Slika 67: Osne sile v konstrukciji: standardni postopek (levo), po opravljeni optimizaciji (desno) [26]	59

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Razvrstitev različnih tehnologij 3D-tiska po skupinah [3c].....	12
Preglednica 2: Mehanske lastnosti najpogosteje uporabljenih materialov z metodo FDM [56].	17
Preglednica 3: Rezultati testa upogibne nosilnosti [15]	22
Preglednica 4: Pregled uporabnosti posameznih tehnologij v gradbeništvu	37

1 UVOD

Trg zahteva hiter razvoj novih, drugačnih izdelkov, z višjo stopnjo funkcionalnosti ali oblikovalskim presežkom, ki bodo potrošnika spodbudili k nakupu. Vse večje so tudi težnje po majhni količini kompleksnejših in tudi posameznemu uporabniku prilagojenih izdelkov [1]. Nič drugače ni v gradbeništvu, kjer je potreba po unikatnih izdelkih večja kot v drugih panogah, saj je večina stavb unikatnih in zgrajenih po željah uporabnikov.

Stavbe že dolgo niso več samo preprosta zavetišča, ki ljudi ščitijo pred zunanjimi vplivi. Investitorji želijo s svojimi objekti doseči določeno stopnjo drugačnosti iz različnih vidikov. Podjetja želijo s svojimi vedno izzivalnejšimi oblikami stavb opozoriti nase in pritegniti nove stranke, arhitekti vedno znova iščejo bolj funkcionalne in drznejše oblike, gradbeniki boljše konstrukcijske sklope in njihovo lažjo izvedbo ... Vse to privede do potrebe po nepravilnih in zahtevnih geometrijskih oblikah, tako celotnih objektov kot tudi posameznih sklopov. Take oblike pa je težje narediti s klasičnimi metodami gradnje. S 3D-tiskom pa praktično ni omejitev glede oblike, saj je tiskalniku vseeno, ali so linije ravne ali poljubnih oblik.

Kljub temu da neprestano stremimo k novejšemu in sodobnejšemu, pa se po drugi strani vedno bolj zavedamo tudi naše kulturne dediščine in z njo povezanih zgradb, ki so jih postavljali naši predniki. Zaradi neprecenljivosti teh objektov jih moramo vzdrževati in obnavljati, da jih zaščitimo pred propadom. Zob časa pa je na teh spomenikih naše preteklosti pustil sledi, deformacije in nepravilnosti. Da bi adaptirani deli čim bolj spominjali na original, se moramo tem nepravilnim poškodbam čim bolj približati. To bi veliko lažje dosegli z uporabo 3D-tiskalnika kot z znanimi tradicionalnimi metodami.

Namen diplomskega dela je raziskati področja v gradbeništvu, kjer bi lahko z uporabo različnih tehnik 3D-tiska dosegali boljše rezultate, hitrejšo ter cenejšo izvedbo in seveda tudi nove, do danes še neizvedljive rešitve. Izvesti želimo tudi pregled tehnologij 3D-tiska in materialov, ki se pri tej tehnologiji uporabljajo, tako tradicionalnih (beton, kovina) kot tudi sodobnejših (steklo, polimeri).

2 O 3D-TISKU

V želji po konstantnem izboljševanju in nadgrajevanju izdelkov se mora temu prilagoditi tudi tehnologija izdelave. Izdelava mora biti kakovostna, okolju prijazna, hitra in čim cenejša.

Do končnega 3D-prototipa ali izdelka lahko pridemo na več načinov, in sicer z uporabo različnih proizvodnih tehnologij, ki so razvrščene v štiri osnovne skupine:

- odzematne tehnologije (subtractive technologies);
- dodajalne tehnologije (additive technologies);
- preoblikovalne tehnologije (formative technologies);
- sestavljene ali hibridne tehnologije (hybrid technologies) [1].

V preteklosti sta prevladovali odzematna in preoblikovalna tehnologija, v zadnjem času pa se vse bolj uveljavlja dodajalna oziroma aditivna. Značilnost te tehnologije je, da se trirazsežne trdne končne izdelke skoraj katere koli oblike gradi s postopkom dodajanja oz. nanašanja osnovnega materiala v plasteh. Za ta način ustvarjanja končnega produkta se je v širši praksi uveljavilo ime 3D-tisk, v strokovnih krogih pa izraz slojevite tehnologije. Podobno kot 2D tudi 3D-tiskalniki reproducirajo končni izdelek, le da 2D-tiskalniki nadzorovano nanašajo barvo na površino (najpogosteje je to papir ali folija), medtem ko 3D-tiskalniki nanašajo osnovni material v 3D-prostoru. Na sliki 1 sta prikazana oba tipa tiskalnika [1].



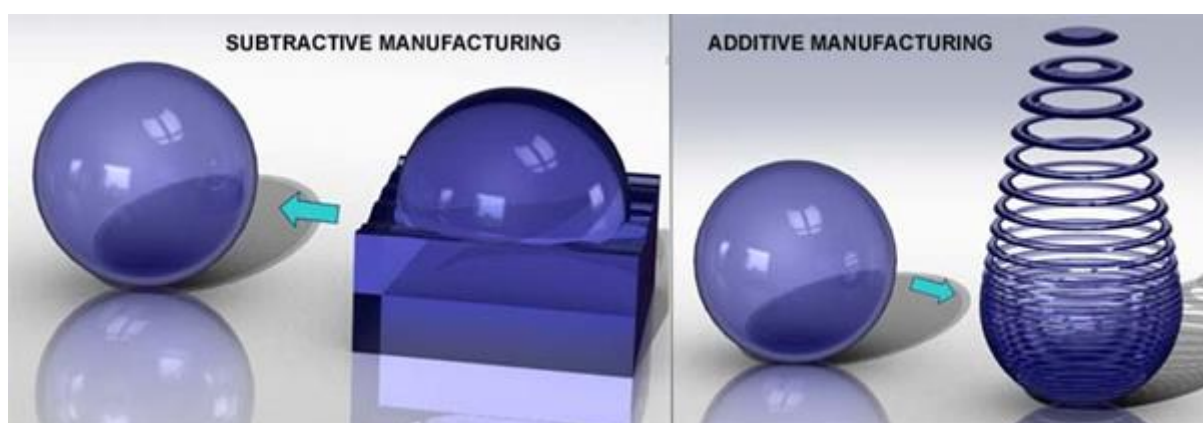
Slika 1: Primerjava med tiskalnikom dokumentov in 3D-tiskalnikom [2]

Tri-dimenzionalni tisk (3D-tisk) je proces izdelave prostorskih trdnih predmetov, objektov na podlagi digitalnih načrtov. Je ena izmed sodobnejših tehnologij, ki se je v zadnjih letih poslužujemo predvsem na področju razvoja in raziskav, predstavitvenih oblik in konceptnega oblikovanja, arhitekture, urbanizma, konstruiranja, kulturne dediščine in medicine. 3D-tisk je v zadnjem času postal razpoložljiva možnost tudi slehernemu potrošniku in ustvarjalcu, saj so cene naprav padle, vse več pa je tudi 3D-tiskalnikov, ki jih lahko uporabljamo kar doma [2].

2.1 Prednosti 3D-tiska

2.1.1 Poraba materiala

Kljub temu, da s tehnikama odvzemanja in dodajanja lahko pridemo do enakega končnega izdelka, pa med njima obstaja bistvena razlika. Pri odvzemalnih postopkih nadzorovano odstranjujemo material, medtem ko pri tehnikah 3D-tiska dodajamo material v plasteh. Razlika med postopkoma je prikazana na sliki 2, iz katere je razvidno, da je tehnologija dodajanja prijaznejša okolju, saj pri njej porabimo samo toliko materiala, kot ga potrebujemo za izdelavo izdelka. Ne samo, da je manjša poraba materiala za izdelavo posameznega izdelka, prihranek materiala se kaže tudi v dejstvu, da zaradi tehnologije 3D-tiska ne izdelujemo izdelkov na zalogo, ampak jih lahko sproti natisnemo na zahtevo kupca in tako ne more priti do prevelike naklade, ki ne bi našla kupca in tako končala kot odpadni material.



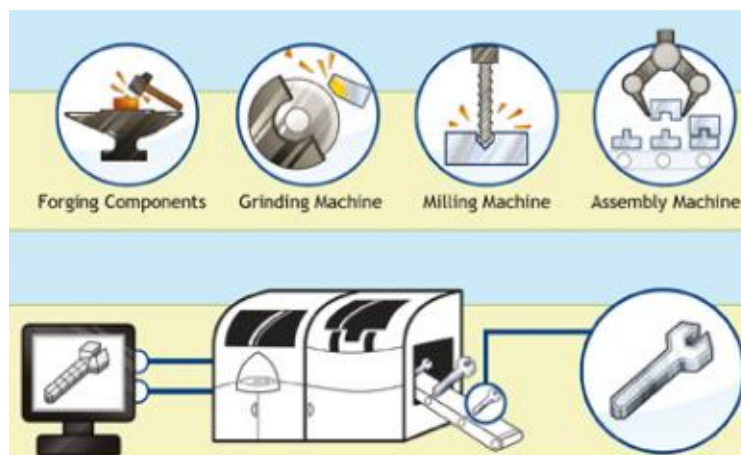
Slika 2: Prikaz izdelave predmeta z odvzemanjem materiala (levo) in z dodajanjem materiala v slojih oziroma s 3D-tiskom (desno) [6]

2.1.2 Krajši čas izdelave tudi zahtevnejših izdelkov

Izdelava trdnih prostih oblik poudarja možnost izdelave kompleksnih oblik predmetov (organske, ugnezdene, previsne strukture), ki jih s klasičnimi postopki izdelovanja, kot so odvzemalne tehnologije, ne moremo izdelati. Pojem proste oblike opredeljuje proces

izdelave, ki ni odvisen od kompleksnosti oblike predmeta. To je bistvena razlika glede na konvencionalne odzematne (CNC) proizvodne tehnologije, pri katerih se s kompleksnostjo oblike podaljša čas, hkrati pa se povečajo tudi stroški izdelave [1].

Pred ostalimi tehnikami 3D-tisk prednjači tudi zaradi zmanjšanja celotnega števila korakov in različnih postopkov, ki so potrebni za izdelavo končnega izdelka, to pa nas privede do poenostavitve procesa in zmanjšanja možnosti pojavljanja napak in nepravilnosti. Ne glede na zahtevnost izdelka in kompleksnost oblike predmet izdelamo v enem samem koraku. Pri ostalih tehnikah se moramo pri kompleksnejših produktih posluževati več različnih postopkov ali celo orodij (slika 3). To posledično pomeni daljši čas izdelave in pogosto je zaradi večkoračne izdelave tudi težko predvideti natančen čas izdelave, kar ne velja za 3D-tisk.



Slika 3: Razlika med večkoračno tehniko (zgoraj) in 3D-tiskom (spodaj) [9]

Na sliki 4 sta dva primera, ki sta bila natisnjena s 3D-tiskalnikom. Desno je prikazan eksponat z dvojno steno povsem organske oblike, na sliki levo pa ležaj, sestavljen iz več elementov, natisnjenih sočasno. Iz tiskalnika pride že sestavljen predmet. Končni tiskani izdelek je popolnoma funkcionalen [51].



Slika 4: Eksponat z dvojno steno organske oblike (desno) in delujoč ležaj (levo) [1]

2.1.3 Poenostavljeno in skrajšano izdelovanje prototipov

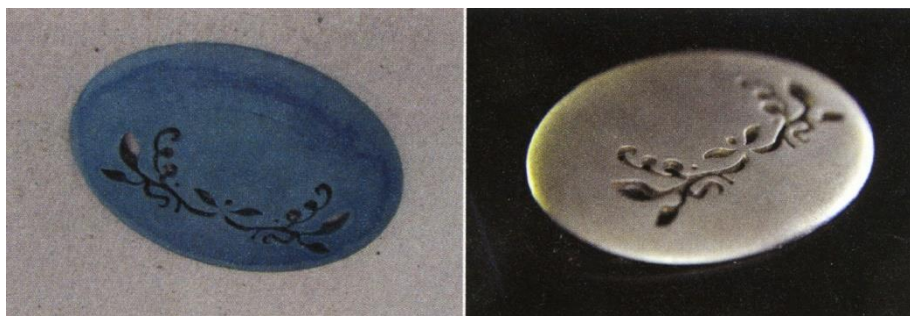
Prednost 3D-tiska lahko najdemo tudi pri izdelavi prototipov. Poznamo dve vrsti prototipov, in sicer konceptualne in funkcionalne (slika 5). Pri prvih gre predvsem za predstavitev in ugotavljanje skladnosti oblike in velikosti, lahko celo barve. Funkcionalni prototipi pa so namenjeni preverjanju končne funkcionalnosti posameznega izdelka. Obe vrsti po navadi uporabljamo pred serijsko proizvodnjo zaradi lažje komunikacije s stranko in hitrejše realizacije končnih izdelkov. V preteklosti so bili za izdelavo prototipov potrebni izkušeni mojstri, izdelava pa je bila dolgotrajna in cenovno neugodna. V takih primerih imajo tehnologije 3D-tiska veliko prednost, saj lahko konceptualne ali funkcionalne prototipe izdelamo z veliko nižjimi stroški že v nekaj urah [1].



Slika 5: Primer funkcionalnega (levo) [52] in konceptualnega prototipa (desno) [53]

2.1.4 Izdelava pramodelov

Poleg prototipov pa 3D-tisk pred tradicionalnimi tehnikami prednjači tudi pri izdelavi pramodelov. Pramodeli, na podlagi katerih se izdelajo kalupi za serijske proizvodnje izdelkov, se po navadi izdelujejo ročno, kar je časovno zelo potratno in cenovno neugodno. Z uporabo 3D-tiska lahko ta postopek skrajšamo do 70 odstotkov, hkrati pa so lahko tiskani kalupi izdelani z večjo natančnostjo in kompleksnejših oblik, kot jih omogoča konvencionalni način, zato so tudi oblike končnih izdelkov zelo raznolike (slika 6) [1].



Slika 6: Primer pramodela – voščenega prototipa (levo) in končnega srebrnega izdelka (desno) [1]

2.1.5 Prilagajanje posameznikom in proizvodnja nizkih naklad

Poleg prototipov in pramodelov pa se s tehnikami 3D-tiska tiskajo tudi končni izdelki in polizdelki. Bistvena prednost je, da lahko s 3D-tiskom natisnemo izdelke, ki jih s tradicionalnimi odzematnimi tehnikami ne moremo. 3D-tisk tradicionalne proizvodnje še ne bo izpodrinil, ker je trenutno še prepočasen, uporablja pa se za izdelavo specifičnih končnih izdelkov, ki so za odzematne CNC-tehnologije prezahtevni ali pa bi bila njihova izdelava predraga zaradi nizkih naklad. Takšni primeri so personalizirani (slika 7), prilagojeni izdelki, narejeni po željah uporabnika, izdelki organskih oblik ali uklešččenih struktur in izdelki z nizko specifično težo [1].



Slika 7: Primer personalizirane električne kitare (levo) [54] in očal (desno) [8]

2.1.6 Sprememba trgovinskega poslovanja in vpliv na trajnostni razvoj

Vse več je ugotovitev, da bo imel 3D-tisk pomemben pozitiven prispevek k trajnostnemu razvoju. Temu v prid govorijo številna dejstva.

V bližnji prihodnosti si bomo ljudje lahko sami natisnili uporabne izdelke, napoveduje pa se tudi sprememba v klasični trgovinski prodaji. V sedanjem sistemu trgovanja morajo trgovine hraniti izdelke v skladiščih in pozorno spremljati njihovo fluktuacijo. Širjenje 3D-tiska danes že ponuja dobre pogoje ponudnikom tiskarskih storitev, ki s 3D-tiskalniki na osnovi različnih tehnologij omogočajo tisk raznovrstnih izdelkov po želji. S tem se odpravi potreba po transportu in ogromnih prostorih, namenjenih skladiščenju. 3D-tisk naj bi vodil v večjo lokalizacijo, lokalno produkcijo, multinacionalke pa ne bodo imele več take prevlade in vpliva kot danes. Strokovnjaki napovedujejo, da bo 3D-tisk na proizvodnjo vplival podobno, kot je internet na komunikacijo. Na sliki 8 je prikazana razlika med trenutno proizvodnjo in proizvodnjo, ki naj bi jo povzročil razvoj 3D-tehnologije [1].



Slika 8: Shematični prikaz tradicionalne (levo) in lokalne proizvodnje (desno) [1]

Pri vseh tehnologijah odvzemanja, ki se danes še vedno množično uporabljajo, se tvori ogromno odpadnega materiala. Ravno v tem pogledu pa dodajalne metode odigrajo ključno vlogo, saj pri njihovi tehnologiji izdelave ne nastaja oz. nastaja zelo malo odpada vhodnih surovin. Posebno pri tehnikah 3D-tiska, ki se nanašajo na kovine, je poraba vhodnega materiala zmanjšana za okoli 40 % v primerjavi z odvzemalnimi tehnikami. Poleg tega pa je mogoče ponovno uporabiti med 95 in 98 % odpadnega materiala (nevezan kovinski prah), ki nastane pri 3D-tisku kovin [1] in [11].

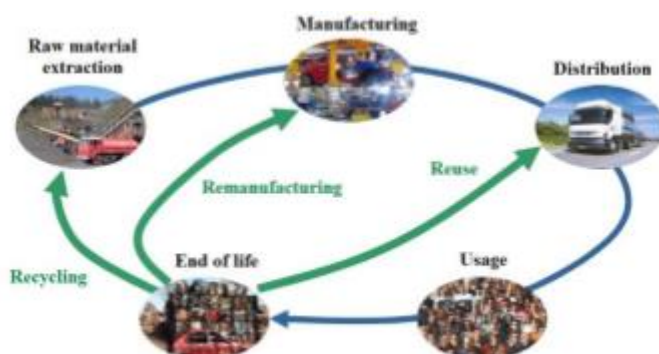
Na trgu so se začele pojavljati tudi prve naprave za recikliranje termoplastov ter pretvorbo v obliko filamenta za nadaljnjo uporabo (slika 9) in logično sosledje kaže na uporabo 3D-tiskalnikov, ki bodo za vhodni material uporabljali ravno te reciklirane materiale. Ta način nam tako omogoča polizdelke ali izdelke, ki niso več v uporabi, reciklirati in natisniti nove [1].



Slika 9: Prva naprava za recikliranje termoplastičnih materialov [4]

Z uporabo 3D-tiska se ponovno vračamo v čase, ko je bilo popravljanje izdelkov zelo aktualno. Danes je pogosto bolj ekonomično kupiti nov izdelek, kot pa popraviti starega. To pa ponovno privede do velikih količin odpadnega materiala, ki škodljivo vpliva na razmere na našem planetu.

Še višjo stopnjo v skrbi za trajnostni razvoj in varovanje narave pa predstavlja ponovna uporaba izdelka. Ne samo, da lahko s 3D-tiskalnikom iz še nikoli uporabljenih surovin natisnemo nov izdelek, z aditivno tehnologijo lahko tudi iz izdelkov, ki jim je potekel rok trajanja (poškodovani ali neuporabni izdelki oziroma samo posamezni deli), natisnemo »nov« proizvod. Tukaj ne govorimo o recikliranju osnovnega izdelka in vračanje na nivo surovin, ampak že obstoječi predmet nadgradimo ali popravimo. Izognemo se vsem korakom, ki so potrebni, da iz odpadnega materiala dobimo novo surovino. Na ta način lahko ponovno dobimo končni izdelek, ki ima popolnoma enake lastnosti in funkcije kot njegov predhodnik, lahko pa izdelamo tudi popolnoma nov produkt z drugačnimi lastnostmi od originala. Na sliki 10 je prikazan življenjski cikel ponovno uporabljenih izdelkov.



Slika 10: Življenjski cikel ponovno uporabljenih izdelkov [11]

Od začetka nastanka industrije pa do danes so tehnologije proizvodnih postopkov izrazito napredovale. Obstoječi produkti so se izpopolnili, uveljavile so se nove tehnologije in obseg industrijske proizvodnje se je znatno povečal. Vse to pa pomeni potrebo po večjih količinah surovin in energije. Svetovne potrebe industrije po energiji so ocenjene na 22 % celotne porabe energije, medtem ko delež globalnih emisij CO₂ industrije predstavlja 20 %. Tudi zaradi teh dveh razlogov so v želji trajnostnega razvoja nujne spremembe. Zaradi manjše porabe energije in vhodnega materiala strokovnjaki 3D-tisk interpretirajo kot tretjo industrijsko revolucijo [5].

Poleg sposobnosti 3D-tiskalnikov, da natisnejo poljubne trdne tridimenzionalne oblike drugih izdelkov, se je razvoj 3D-tiska usmeril tudi v reprodukcijo tiskalnika samega. Na sliki 11 je

prikazan prvi samoreplicirajoči tiskalnik, ki lahko natisne dobro polovico svojih delov. Taki tiskalniki spadajo v skupino RepRap, ki je okrajšava za replicating rapid prototyper, projekt pa je bil na Univerzi Cornell zasnovan ravno z namenom izdelave samoreplicirajočih tiskalnikov.



Slika 11: Prvi samoreplicirajoči 3D-tiskalnik, ki lahko natisne približno polovico svojih delov [10].

Z nadaljnjim razvojem takih tiskalnikov se sposobnost odstotka reprodukcije samih sebe povečuje, najverjetneje bo dosegla 100-odstotno sposobnost reprodukcije. Konec lanskega leta je skupnost RepRap objavila novico, da so uspeli izdelati 3D-tiskalnik, ki je sposoben replicirati kar 73 % samega sebe, kar pomeni velik prihranek pri stroških, saj uporabnik nakupno ceno plača samo prvič, nato pa sam natisne poljubne izdelke, rezervne dele za tiskalnik ali celo celoten tiskalnik. To praktično pomeni neomejeno življenjsko dobo tiskalnika[5].

2.2 Pomanjkljivosti 3D-tiska

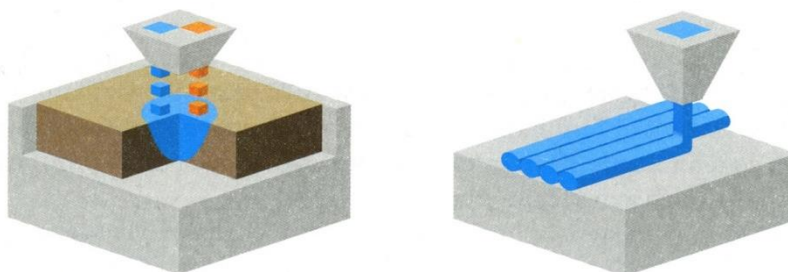
Kljub ogromnemu številu prednosti, ki ga ponuja 3D-tisk, pa je potrebno omeniti tudi slabosti, ki jih prinaša. Prva se nanaša na intelektualno lastnino in avtorske pravice doma odtisnjenih izdelkov. Podobno se je v preteklosti dogajalo v glasbeni industriji, ko se je pojavilo množično nedovoljeno kopiranje. Še večjo težavo kot nedovoljeno kopiranje pa predstavlja možnost doma natisnjenega orožja. Že leta 2013 je 25-letni Američan izdelal pištolo (slika 12), ki je prikazana na spodnji sliki, načrte za njeno izdelavo pa objavil na spletu. Še preden je moral avtor umakniti načrte s spleta, si jih je v dveh dneh naložilo več kot 100.000 ljudi [7].



Slika 12: Pištola je sestavljena iz 16 delov, od katerih je 15 natisnjenih, 16. del pa je kovinska udarna igla [7]

3 TEHNOLOGIJE 3D-TISKA

Tehnologije 3D-tiska lahko klasificiramo na več načinov. Glede na osnovno tehnologijo izdelave jih lahko razvrstimo na laserske tehnologije, ekstrudiranje materialov itd. Če upoštevamo način utrjevanja osnovnega materiala, poznamo točkovno utrjevanje in sočasno utrjevanje celotne površine. Seveda pa jih lahko razvrstimo tudi glede na začetno stanje uporabljenega osnovnega materiala. Pri izdelavi končnega predmeta lahko tako uporabljamo trdne, tekoče in praškaste materiale. Ne nazadnje pa lahko tehnologije delimo tudi na rastrske in vektorske (slika 13). Pri prvih se material nanaša prekinjeno, pri drugih pa neprekinjeno oz. zvezno.



Slika 13: Rastrski (levo) in vektorski (desno) način tiskanja predmeta [1]

S poenotenjem terminologije in delitve tehnologij je velik korak k napredku naredila organizacija ASTM International. Leta 2012 je postavila standard ASTM F2792-10 – Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. Tehnologije 3D-tiska razvršča v sedem generičnih skupin oziroma proizvodnih procesov:

- ekstrudiranje materiala (material extrusion) – glava tiskalnika skozi šobo običajno ekstrudira poltekoči material in na ta način gradi predmet po slojih;
- fotopolimerizacija v kadi (vat photopolimerization) – v kadi se tekoči polimer selektivno utrjuje pod vplivom svetlobnega vira;
- kapljično nanašanje oziroma brizganje materiala (material jetting) – tehnologija uporablja material v tekočem stanju, ki ga selektivno kapljično nanaša oziroma brizga; najpogosteje uporabljena materiala sta vosek ali tekoči fotopolimer;
- kapljično nanašanje oziroma brizganje veziva (binder jetting) – vezivo v tekoči obliki se natančno nanaša na prašne delce osnovnega materiala in jih na ta način poveže med seboj;
- spajanje slojev praškastega materiala (powder bed fusion) – s pomočjo toplotne energije se selektivno spajajo delci osnovnega praškastega materiala;

- lasersko navarjanje (direct energy deposition) – laserski žarek stali praškasti kovinski material in na tak način gradi končni izdelek (za toplotne vire energije lahko uporabimo laser, elektronske žarke, plazmo itd.);
- laminacija pol (sheet lamination) – s postopkom medsebojnega lepljenja in laminiranja osnovnega materiala v obliki pol gradimo končni izdelek.

Zaradi hitrega razvoja novih tehnologij in posledično nastajanja novih terminov, namerava organizacija ASTM posodabljeni standard vsako tretje leto [1].

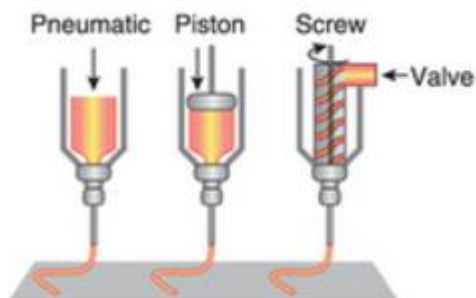
Preglednica 1 [3] prikazuje združevanje posameznih tehnik z namenom boljše povezljivosti navedene generične skupine.

OSNOVNI PROCES GRADNJE	GENERIČNA SKUPINA PO STANDARDIH ASTM F2792-10	TEHNOLOGIJA	OSNOVNI MATERIAL	VIR ENERGIJE	PREDNOSTI/SLABOSTI	
ekstrudiranje materialov	Material Extrusion ekstrudiranje materiala	Fused Deposition Modeling (FDM) modelliranje s spajanjem slojev	termoplasti keramična mešanica kovinska pasta	toplotna energija	- poceni naprave za ekstrudiranje - možnost tiskanja različnih materialov - slaba površina natisnjega elementa - natančnost izdelave	
		Contour Crafting (CC) ekstrudiranje betona				
proces fotopolimerizacije	Vat Photopolymerization polimerizacija v kadi	Stereolithography (SLA) stereolitografija	fotopolimeri keramike	UV laser	- velika hitrost tiska - dobra ločljivost - visoka cena materiala in pripomočkov - potrebna uporaba podpor	
	Material Jetting kapljično nanašanje ali briganje materiala	Polyjet/Inkjet Printing kapljično nanašanje	fotopolimeri vosek	toplotna energija	- možnost tiskanja različnih materialov - kvalitetna izredba površine tiskanca - slabe mehanske lastnosti materiala	
lepljenje, sintranje ali taljenje praškastega materiala	Binder Jetting kapljično nanašanje ali briganje lepila	Indirect Inkjet Printing (Binder 3DP) tridimenzionalni tisk (zaščiten kratka)	polimeri v prahu keramika v prahu kovina v prahu	toplotna energija	- možnost tiska predmetov v barvah - manjša natančnost - slaba kakovost površine	
	Direct Energy Deposition (DED) lasersko navarjanje	Laser Engineered Net Shaping (LENS) nanašanje materiala z usmerjenjem energije Electronic Beam Welding (EBW) varjenje z elektronskim snopom	kovina v prahu	laserski snop	- popravilo poškodovanih delov - potrebne dodatne naprave	
	Powder bed Fusion spajanje praškastega materiala	Powder bed Fusion spajanje praškastega materiala	Selective Laser Sintering (SLS) selektivno lasersko sintranje	polimeri	laserski snop	- visoka natančnost - velik izbor materialov - trajnost končnih izdelkov - sintranje potrebuje ogromno energije
			Direct Metal Laser Sintering (DMLS) neposredno lasersko sintranje kovine	kovina v prahu keramika v prahu		
			Selective Laser Melting (SLM) selektivno lasersko taljenje			
Electron Beam Melting (EBM) taljenje z elektronskim snopom		elektronski snop				
nalaganje, lepljenje ali laminiranje materiala	Sheet Lamination laminacija pol	Laminated Object Manufacturing (LOM) nalaganje krojenih plasti	karamični trakovi kovinske folije	laserski snop	- visoka kvaliteta površine - poceni material in postopek tiskanja - slaba obstojnost	

Preglednica 1: Razvrstitev različnih tehnologij 3D-tiska po skupinah [3c]

3.1 Ekstrudiranje materialov

Trenutno najbolj razširjena tehnologija 3D-tiskanja je tehnologija ekstrudiranja materiala. Ekstrudiramo lahko zelo veliko različnih materialov od keramike, polimerov, živil, kovine do betona. Ti materiali vstopajo v ekstrudirno glavo v različnih oblikah, zato se med seboj razlikujejo tudi glave (slika 14).



Slika 14: Različni tipi ekstrudirnih glav: ekstrudiranje termoplastov (levo), ekstrudiranje živil in biokemijskih substanc (sredina), ekstrudiranje termoplastov z granulatno ali praškasto obliko osnovnega materiala, ekstrudiranje betona (desno) [13]

Osnovni material mora biti na izhodu iz ekstrudirne glave v poltekočem stanju, da ga lahko šoba tiskarske glave v plasteh nadzorovano nanaša na že strjen material. Naneseni material se mora nato strditi preden se nanj nanese naslednji sloj. V večini primerov poltekočo obliko osnovnega materiala dosegamo s segrevanjem, obstajajo pa tudi načini, pri katerih se uporablja kemična sprememba, ki po ekstrudiranju omogoči prehod materiala v trdno obliko. Ta način najpogosteje uporabljamo pri biokemičnih aplikacijah.

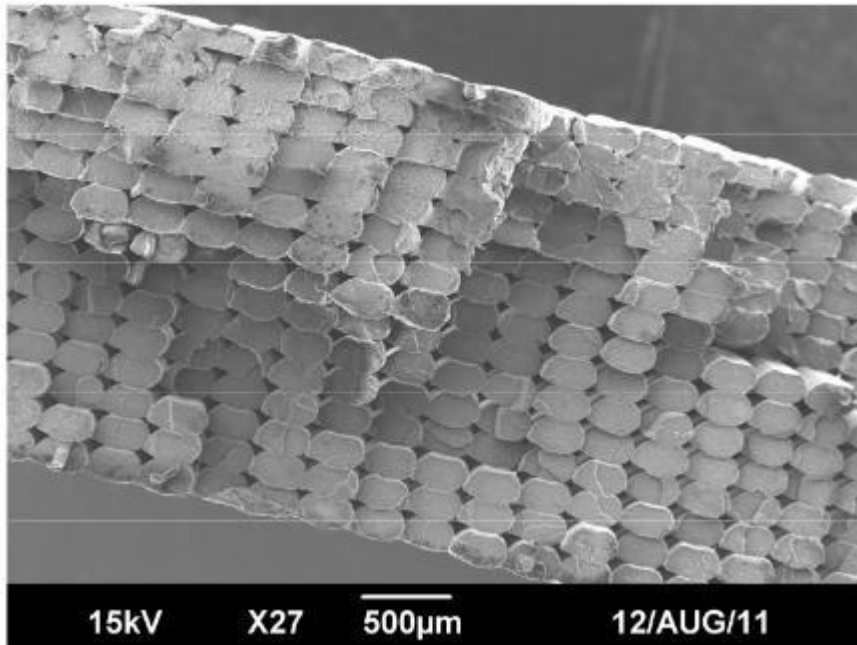
Za vse načine ekstrudiranja obstajajo ključne skupne lastnosti:

- material se dovaja v ekstrudirno glavo;
- material v poltekoči obliki;
- ekstrudiranje s pomočjo šobe;
- upravljanje ekstrudirne glave in nanašanje materiala v slojih s pomočjo računalnika;
- ekstrudirni material se v slojih nanaša na predhodno strjen material;
- uporaba podpornega materiala pri zahtevnejših oblikah [1].

Velikost in oblika ekstrudiranega filamenta sta odvisni od šobe ekstrudirne glave. Manjši premer šobe omogoča večjo natančnost pri tisku, vendar hkrati počasnejši tok materiala. Raziskave kažejo, da je tehnika ekstrudiranja materialov primerna za tisk elementov, katerih stene so vsaj dvakrat večje in debelejšje od premera šobe za ekstrudiranje [1].

Pri ekstrudiranju je zelo pomembno razmerje W/H (Width/Height), ki predstavlja razmerje med širino in višino ekstrudirane niti. Šoba ekstrudira posamezno nit, ki je okrogle oblike, torej je njeno razmerje $W/H = 1$, vendar se zaradi sile težnosti nit splošči, preden se uspe strditi, saj je spodaj in ob strani omejena s predhodnimi nitmi, zgoraj pa z ekstrudirno šobo (slika 15). Ta učinek ugodno vpliva, saj tako dobimo manjše zračne vrzeli med posameznimi nitmi. Z vidika nosilnosti bi bilo popolno, če bi lahko preprečili nastanek zračnih vrzeli, po drugi strani

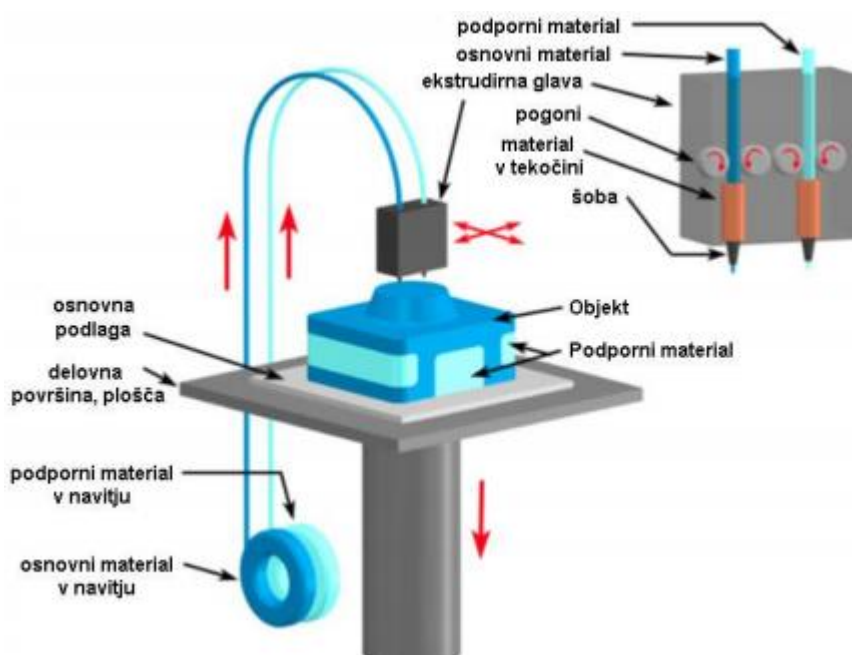
pa imajo ti nezapolnjeni prostori pozitivne učinke pri toplotni izolativnosti na ta način natisnjenega elementa.



Slika 15: Dejanska oblika prereza niti in zračnih vrzeli med njimi [14]

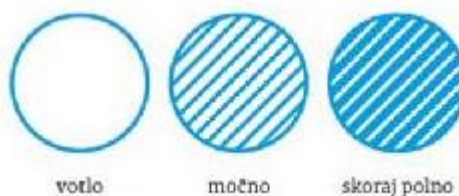
3.1.1 Modeliranje s spajanjem slojev – FDM

Prva med tehnologijami ekstrudiranja je bila razvita tehnologija s spajanjem slojev – FDM (Fused deposition modeling). Za tisk predmetov se uporabljajo različni termoplastični materiali, zato se pogosto uporablja tudi izraz ekstrudiranje termoplastov. Ekstrudirna glava v ravnini X-Y opiše površino enega sloja 3D-predmeta, nato pa se delovna plošča, na kateri nastaja predmet, spusti za debelino plasti v Z smeri. Glava nato ponovno v ravnini X-Y opiše naslednji sloj in tako nastaja 3D-predmet. Pri tem se posamezna natisnjena nit v poltekoči obliki sprime z že strjenim predhodno natisnjenim predmetom. Podpore poltekočemu materialu predstavlja že strjen material tiskanega predmeta predhodnih slojev, razen v primerih zahtevnejših previsnih struktur, ko moramo poleg osnovnega predmeta tiskati tudi podporne strukture. Glede na to, ali ima tiskalnik eno ali dve ekstrudirni glavi, se razlikuje tehnologija izdelave podpornih struktur. Tiskalnik z eno samo glavo je prisiljen za podpore uporabljati isti material kot za sam predmet. Tiskalnik z dvema glavama (slika 16) pa lahko za podporno strukturo uporabi drugačen material. Tak material ima praviloma slabše mehanske lastnosti od osnovnega materiala zaradi lažjega odstranjevanja, iz istega razloga pa ima lahko nižjo temperaturo taljenja. Za odstranjevanje podpor se uporablja fizično lomljenje ali topljenje podpor v ustrezni raztopini. Pri obeh metodah moramo paziti, da ne pride do poškodb osnovnega predmeta.



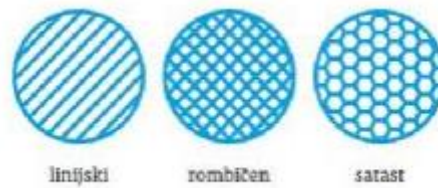
Slika 16: Prikaz delovanja FDM tehnologije z dvema ekstrudirnima glavama [12]

Med vsemi tehnologijami ekstrudiranja materiala dosegamo z ekstrudiranjem termoplastov najvišjo trdnost in žilavost natisnjenih predmetov, je pa hitrost tiskanja termoplastov veliko počasnejša. Posebnost tehnologije FDM je, da omogoča nalaganje materiala z različno gostoto na predhodno določena mesta. S to metodo lahko vplivamo na razmerje med zahtevano trdnostjo prereza in porabo materiala. Privarčujemo lahko pri porabi materiala, času izdelave, predmet z manj gosto notranjostjo pa je posledično tudi lažji. V primerih, ko je zahtevana visoka nosilnost in žilavost, pa notranjost elementa gosto zapolnimo, tako kot prikazuje slika 17.



Slika 17: Prikaz gostote zapolnitve prereza z metodo FDM [1]

Na gostoto zapolnitve in mehanske karakteristike prereza lahko vplivamo tudi z vzorcem zapolnitve. Na sliki 18 so prikazani različni tipi zapolnitve.



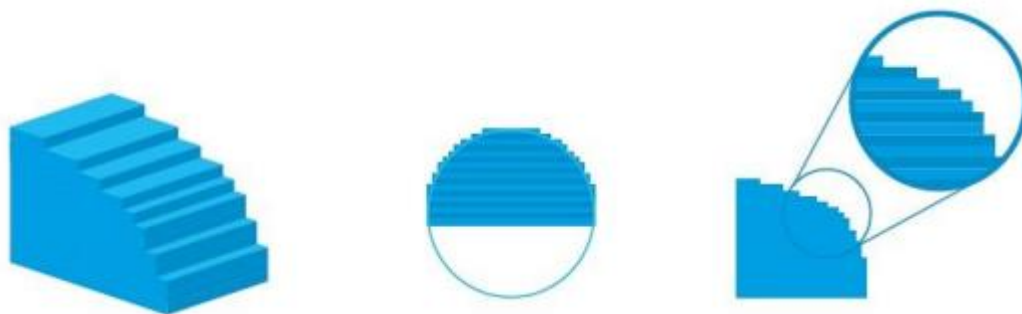
Slika 18: Prikaz vzorca zaplnitve prereza z metodo FDM [1]

S tehnologijo FDM natisnjeni predmeti ne potrebujejo naknadne obdelave, saj je njihova funkcionalnost dosežena takoj po končanem tisku in odstranitvi morebitnih podpor. Pri določenih izdelkih se pojavijo zahteve po specifičnem videzu ali obdelanosti površine, takrat lahko z metodo FDM natisnjene izdelke obdelamo ročno ali strojno. Pri ročni obdelavi lahko z uporabo acetona dosežemo gladko površino z visoko sijočim videzom, kadar pa želimo doseči matiran videz, si pomagamo s sodo bikarbono. S strojno obdelavo lahko s postopkom peskanja dobimo površino visoke gladkosti. Z lepljenjem izdelamo velike predmete, kadar jih zaradi omejitve velikosti tiskalnika ne moremo natisniti v enem kosu. Z galvanizacijo na površino nanesemo kovinski sloj in tako končni izdelek dobi videz kovinskega izdelka. Nanašamo lahko krom, nikelj, baker, srebro, zlato itd. S tem postopkom predmetu povečamo trdnost in odpornost proti obrabi, hkrati pa se izboljšajo tudi mehanske karakteristike končnega izdelka. Površino predmetov lahko tudi poljubno barvamo, a jo moramo pred tem pripraviti s posebni sredstvi (prajmerji) [1].

3.1.1.1 Prednosti in slabosti FDM tehnologije

Prednosti tehnologije modeliranja s spajanjem slojev se kažejo predvsem v možnosti izdelave konceptualnih, funkcionalnih prototipov in vedno bolj tudi končnih izdelkov. FDM je ena redkih tehnologij, ki omogoča vnaprej določeno gostoto zaplnitve notranjosti predmeta, čedalje širši pa je tudi nabor materialov z različnimi specifičnimi lastnostmi. Filamente je preprosto zamenjati, preprosto pa je tudi odstranjevanje podpor, naknadno obdelovanje izdelka in vzdrževanje naprave.

Slabost FDM tehnike je natančnost izdelave in nizka hitrost izdelave končnega izdelka. Prehodi med posameznimi sloji so preveč opazni (slika 19), pojavlja pa se tudi delno krčenje predmeta zaradi hitrega segrevanja in ohlajanja [1].



Slika 19: Pojav stopničenja pri FDM tehnologiji [1]

3.1.1.2 Materiali za FDM tehnologijo

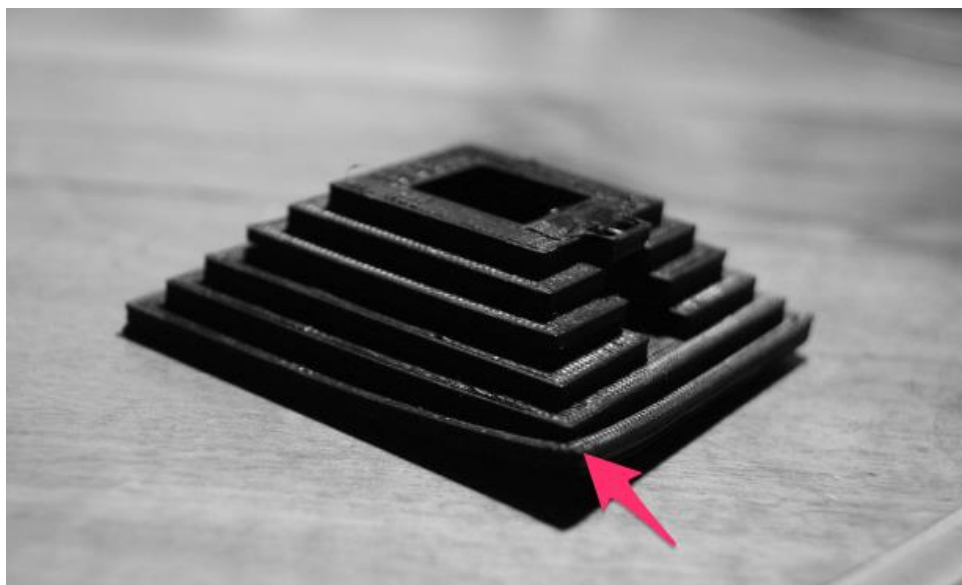
V preglednici 2 so predstavljene mehanske lastnosti najpogosteje uporabljenih materialov pri tiskanju z metodo FDM. ABS je material ki se najpogosteje uporablja za plastičnih izdelkov in polizdelkov ter igrač. Najbolj znane igrače narejene iz ABS materiala so lego kocke. PLA je biopolimer, narejen iz okolju prijaznih sestavin. PA (poliamid oziroma najlon) je cenovno zelo ugoden. PC (polikarbonat) je inženirski polimer, ki ga odlikuje dobra temperaturna odpornost, stabilnost in trajnost, z njim pa je mogoče izdelati zelo natančne produkte. Poznamo tudi mešance ABS in PC. Bolj kot prevladuje delež PC-ja v takem termoplastu, višja boljše natezne lastnosti ima. PC-ISO je visoko biokompatibilen in je certificiran za proizvodnjo medicinskih naprav in uporabo v farmacevtski in živilski embalaži. Material PPSF/PPSU odlikuje visoka odpornost na povišano temperaturo, medtem ko ima ASA Veliko UV odpornost. Materiali iz skupine ULTEM imajo visoko temperaturno odpornost in trdnost, odlikuje jih odpornost proti agresivnim kemikalijam, posebej proti kislinam. Najpogosteje so uporabljeni v avtomobilski, navtični, letalski in vesoljski tehnologiji [1].

MATERIAL	Meja elastičnosti [Mpa]	Natezna trdnost [Mpa]	Elastični modul [Mpa]	Deformacija ob poružitvi [%]	Upogibna trdnost [Mpa]	Upogibni elastični modul [Mpa]
ABS	31	33	2200	6	58	2100
PLA		48	1309	16	80	
Najlon	32	64	1282	30	67	1276
Polikarbonat	40	57	1944	4,8	89	2006
PC-ABS		41	1900	6	68	1900
PC-ISO		57	2000	4	90	2100
ULTEM1010	64	81	2770	3,3	144	2820
ULTEM9085	47	69	2150	5,8	112	2300
PPSF/PPSU		55	2100	3	110	2200
ASA	29	33	2010	9	60	1870

Preglednica 2: Mehanske lastnosti najpogosteje uporabljenih materialov z metodo FDM [56].

ABS in PLA

ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) in PLA (Polylactic Acid) sta trenutno najpogosteje uporabljana materiala pri tehnologiji FDM, saj imata dovolj nizko temperaturo mehčanja materiala, hkrati pa je ta dovolj visoka, da natisnjeni predmeti ohranijo trdno obliko v večini primerov uporabe. Priporočljiva temperatura tiska ABS materiala je med 220 in 235 °C, medtem ko se za podlago uporablja temperatura med 80 in 110 °C. Za PLA so primernejše nižje temperature ekstrudiranja, med 180 in 220 °C, ravno tako pa tudi nižje temperature posteljice, med 20 in 55 °C. PLA ima nižji koeficient toplotnega raztezka, kar ugodno vpliva na zmanjšanje deformacij v poltekočem stanju materiala med procesom ekstrudiranja. Pri ohlajanju in strjevanju slojev iz ABS materiala se pogosto srečujemo s pojavom zvijanja in odstopanja posameznih slojev. Na sliki 20 je prikazan pogost pojav, ko se prvi sloj ohlaja hitreje, kar povzroči upogibanje vogalov spodnjega dela izdelka navzgor [15].



Slika 20: Pojav vihanja vogalov zaradi prehitrega ohlajanja prvega sloja pri ABS materialu [18]

Na splošno ABS velja za upogiben in nosilen material z dolgo življenjsko dobo, ki je zelo dobro odporen na visoko temperaturo. Cenovno je med najugodnejšimi termoplasti in do nedavnega najbolj pogosto uporabljan material pri FDM tehnologiji, saj ga je zelo enostavno peskati in barvati. S peskanjem dosežemo sijočo površino, hkrati pa se izniči učinek stopničenja, ki je značilen na površinah ekstrudiranih predmetov. V primeru poškodovanih oziroma odlomljenih delov, jih z lahkoto zlepimo skupaj z uporabo ABS lepila. Najpogosteje je ABS na voljo v beli, črni, rdeči, modri, rumeni in zeleni barvi, ravno tako pa je na voljo transparentna različica. ABS ima tudi slabosti, med katerimi je najizrazitejša njegova sestava, saj je izdelan iz naftnih derivatov in ne iz biološko razgradljive plastike, ga pa zelo

enostavno recikliramo. ABS v fazi tiskanja sprošča hlape, zato je priporočljivo tiskalnik namestiti v dobro prezračevano okolico. Ko je ABS ohlajen, se ti hlapi ne sproščajo več v taki meri, ima pa izdelek svojevrsten vonj, ki je za občutljive ljudi lahko moteč. ABS je zelo občutljiv na sončno svetlobo, zato se pri dolgotrajni izpostavljenosti pojavi »razpadanje« materiala [16].

3.1.1.3 Mehanske lastnosti konstrukcij izdelanih z FDM tehnologijo

Na univerzi Michigan Technological University so testirali dve skupini vzorcev: ena je bila narejena iz ABS in druga iz PLA. Povprečna vrednost vzorcev iz PLA je dosegla natezno trdnost 28,5 MPa, iz ABS pa 56,6 MPa. Elastični modul vzorcev iz PLA je znašal 3368 MPa, iz ABS pa 1807 MPa. Na podlagi teh podatkov je razvidno, da na ta način natisnjeni izdelki niso samo na videz podobni izdelkom, narejenim po klasičnih metodah, ampak so tudi njihove mehanske karakteristike dovolj dobre za končne izdelke [17].

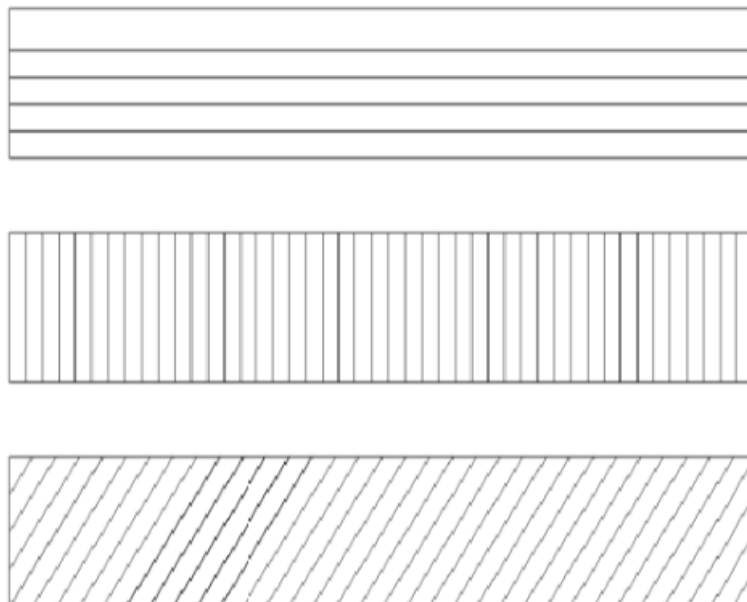
PLA je za razliko od ABS veliko bolj prijazna do okolja, saj je narejena na osnovi obnovljivih virov, kot so koruza, krompir in sladkorna pesa, zato se veliko uporablja v prehranski industriji in medicini. V specifičnih pogojih je do določene mere biološko razgradljiva. Ravno tako kot ABS, se tudi PLA pojavlja v različnih barvnih odtenkih. Potrebno pa je poudariti, da ti barvni pigmenti niso tako prijazni do okolja in neškodljivi do organizmov kot PLA sama. Zato se priporoča uporaba PLA brez škodljivih dodatkov.

PLA se ekstrudira pri nižjih temperaturah kot ABS, kar pa zahteva večji tlak na ekstrudirni šobi. Material je zelo lepljiv in se bolj expandira pri procesu ekstrudiranja, zato se pojavljajo težave z zamašitvijo šobe. Za tiskarsko mizo ni potrebno, da je ogrevana, je pa ogrevanje priporočljivo, da se prvi sloj počasneje ohlaja. Tudi območje, v katerem nastaja natisnjeni izdelek, ni nujno zaprto, saj PLA ne proizvaja neprijetnih hlapov, je pa zapiranje priporočljivo zaradi enakomernejšega ohlajanja in posledično boljše kakovosti tiska.

Izdelki iz PLA imajo večjo površinsko trdnost, so pa bolj dovzetni za porušitve pri upogibu. PLA je v primerjavi z ABS manj duktilen material. Veliko težavo pa predstavlja tudi povišana temperatura, saj se PLA izredno hitro zmehta, kar slabo vpliva na mehanske in fizikalne lastnosti materiala.

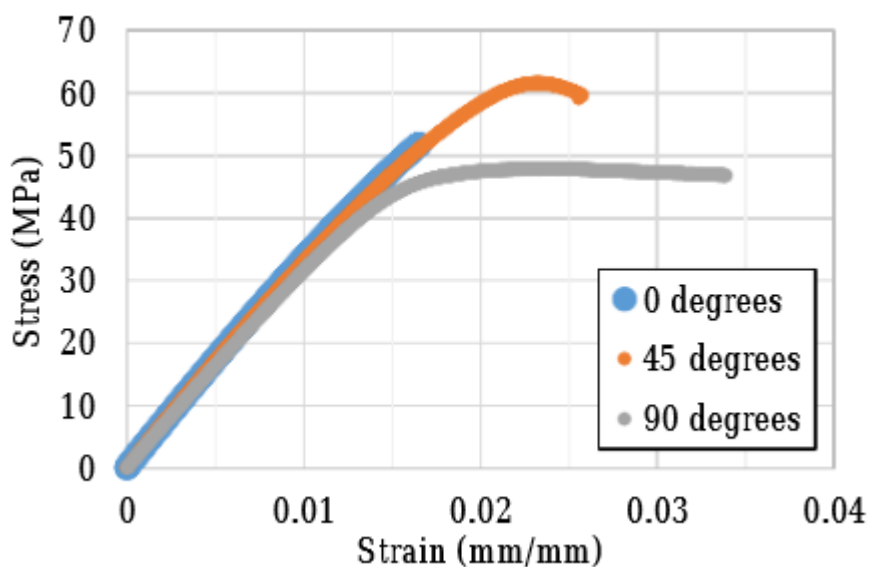
Na univerzi South Dakota State University je bila narejena študija vpliva orientacije vlaken na natezno in upogibno trdnost ter odpornost na utrujanje izdelkov iz PLA materiala. Vsi vzorci

so bili tiskani iz enakega materiala in pri istih pogojih, razlika je bila le v kotu vlaken, kot prikazuje slika 21. Uporabljena je bila 100-odstotna zapolnjenost [15].



Slika 21: Nagib vlaken; 0° (zgoraj), 90° (v sredini) in 45° (spodaj) [15]

Na sliki 22 je prikazan natezni diagram vseh treh vzorcev. Razvidno je, da največjo natezno trdnost doseže vzorec z vlakni pod kotom 45°, medtem ko se vzorec z vlakni pod kotom 90° obnaša najbolj duktilno.

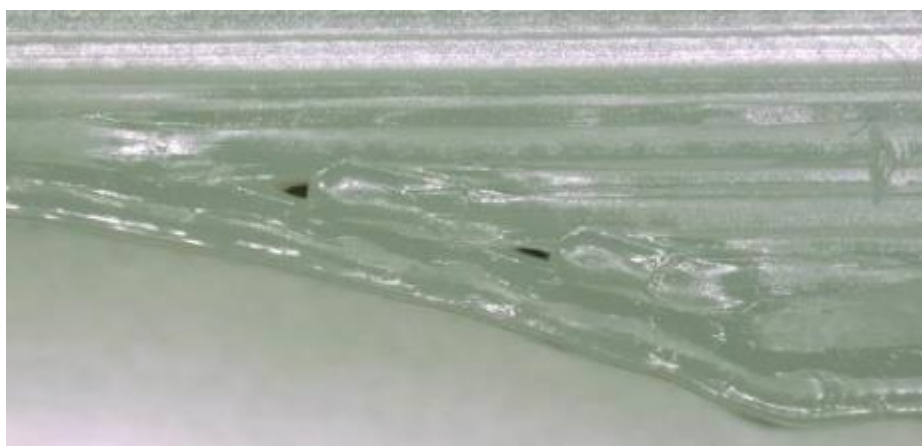


Slika 22: Natezni diagram vzorcev z različno orientacijo vlaken [15]

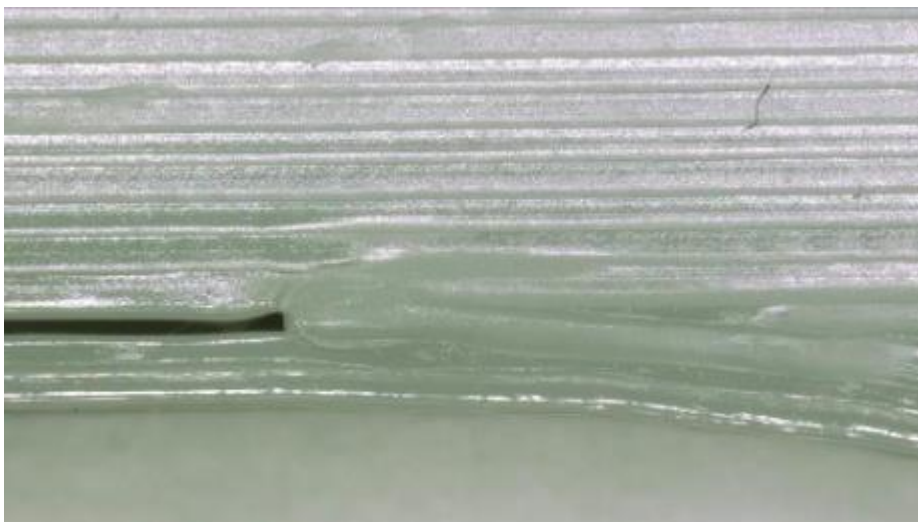
Pri vzorcu z vlakni pod kotom 0° opazimo zelo krhko porušitev.

Duktilnost je sposobnost materiala, da prenese plastično deformacijo, ne da bi se pretrgal. Rezultati testa so glede duktilnosti pričakovani in lahko razberemo, da pri vzorcu z vlakni pod kotom 0° nastopi krhka porušitev. Ko se poruši eno vlakno in se obremenitev prenese na druga vlakna, ki zaradi preobremenjenosti ravno tako hitro popustijo. V primeru vzorca z vlakni pod kotom 90° se graf odkloni prej kot pri vzorcu z 0° kotom, saj začnejo popuščati vezi med posameznimi vlakni in posledično se vzorec začne deformirati, nosilnost prereza pa je manjša. Postopoma začnejo popuščati tudi ostali stiki, dokler ne pride do duktilne porušitve. Rezultati testiranja nam povedo, da je nosilnost stikov slabša od nosilnosti vlaken, kar pomeni da sprijemnost med vlakni ni 100-odstotna.

Vzorec z vlakni pod 45° ima v primerjavi z rezultati testa vzorca z vlakni pod kotom 0° tako večjo nosilnost, kot večjo duktilnost. Ti rezultati niso pričakovani in zahtevajo dodatno razlago. Večja nosilnost vzorca pod kotom 45° v primerjavi z vzorcem pod kotom 0° je posledica težav pri tisku vzorcev pod kotom 0° . Na sliki 23 je prikazano pojavljanje praznih prostorov v strukturi vzorca pod kotom 0° v območju zaokrožitve, ravno tako pa se praznine pojavijo na stiku med zunanjo steno in notranjostjo vzorca (slika 24) [15]. Podobni defekti se pri vzorcih tiskanih pod 90° ali 45° ne pojavijo. Pri razvoju tehnologij 3D-tiska se je potrebno zavedati napak, da lahko ovrednotimo dobljene rezultate in jih v bodoče odpraviti. Pomemben zaključek je tudi, da pri modeliranju konstrukcij izdelanih s tehnologijo 3D tiska odziv materiala in odziv konstrukcije ne moremo obravnavati ločeno, saj sam način printanja materiala vpliva tudi na mehanske lastnosti končne konstrukcije.



Slika 23: Pojavljanje praznin pri tisku vzorca pod 0° pri zaokrožitvi [15].



Slika 24: Praznine oziroma slaba sprijemnostjo med steno in notranjostjo vzorca pod kotom 0° [15].

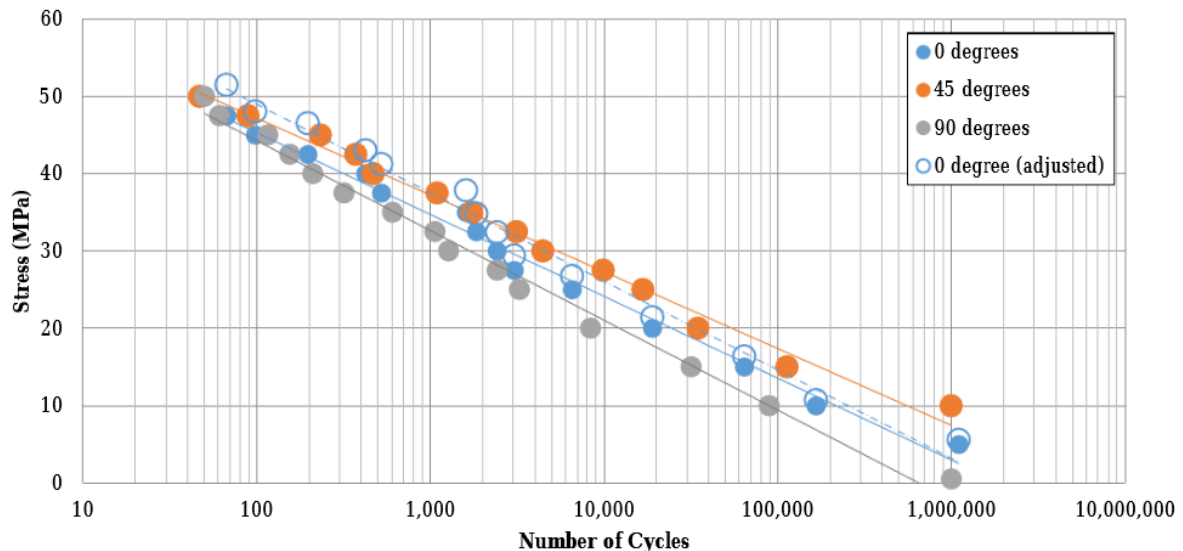
Do podobnih zaključkov pridemo tudi pri cikličnem obremenjevanju. Posledica slabe sprijemnosti med notranjostjo in steno vzorca ima za posledico uklon stene vzorca pri večkratni tlačni obremenitvi. Ta uklon stene se zgodi že po zelo majhnem ciklu zaporednih tlačnih obremenitev. Kljub uklonjeni steni vzorec še vedno prenaša tlačno obtežbo, kar pomeni, da stena ni nič pripomogla k tlačni nosilnosti. Na podoben način se pri jeklenih elementih pojavi delaminacija jekla, kadar imamo obtežbo pravokotno na vlakna.

Pri upogibni nosilnosti so se posamezni vzorci obnašali drugače kot pri natezni, kar je razvidno iz preglednice 3. V tem primeru najboljše rezultate dobimo pri vzorcu z vlakni pod kotom 0° . Kot smo ugotovili že pri natezni obremenitvi, so stiki med vlakni manj nosilni od samih vlaken. V primeru upogibne obremenitve vzorca z vlakni pod kotom 0° prevzamejo obremenitev vlakna, pri vzorcu z vlakni pod kotom 90° pa vezi med vlakni. Iz tega vidika je bilo upravičeno pričakovati slabše obnašanje vzorca z vlakni pod 90° kotom.

Raster Orientation (degrees)	Ultimate Stress (MPa)	Ultimate Strain (%)	Flexural Modulus of Elasticity (GPa)
0	102.203	0.106	3.187
45	90.649	0.078	2.985
90	86.136	0.045	3.000

Preglednica 3: Rezultati testa upogibne nosilnosti [15]

Iz slike 25 je razvidno, da se je najslabše na odpornost proti utrujanju odrezal vzorec z vlakni pod kotom 90°, najbolj pa vzorec z vlakni pod kotom 45° [15].



Slika 25: Odpornost različnih vzorcev na utrujanje [15]

3.1.2 Izdelovanje kontur ali sten – CC

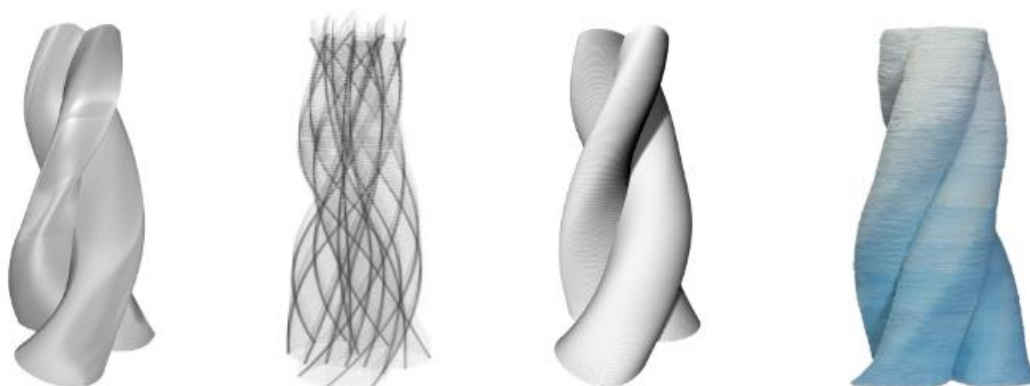
Contour Crafting (CC) ali metoda izdelovanja kontur oziroma sten spada med ekstrudirne metode in se od tehnologije FDM loči po tem, da vhodnega materiala v ekstrudirni glavi ni potrebno s termično obdelavo spremeniti iz trdnega v poltekoče stanje. Material, v večini primerov gre za beton oziroma njemu podobne materialne mešanice, se v ekstrudirno glavo že dovaja v poltekoči obliki. Tehnologijo je razvil Dr. Behrokh Khoshnevis z namenom 3D-tiskanja velikih betonskih objektov ali posameznih konstrukcijskih sklopov. Tehnologija za tisk uporablja velike tiskalnice (slika 26), ki jih je zaradi njihove razmeroma majhne teže lahko transportirati na gradbišče in neposredno natisniti končni objekt.



Slika 26: Prikaz 3D-tiska z metodo Contour Crafting [28]

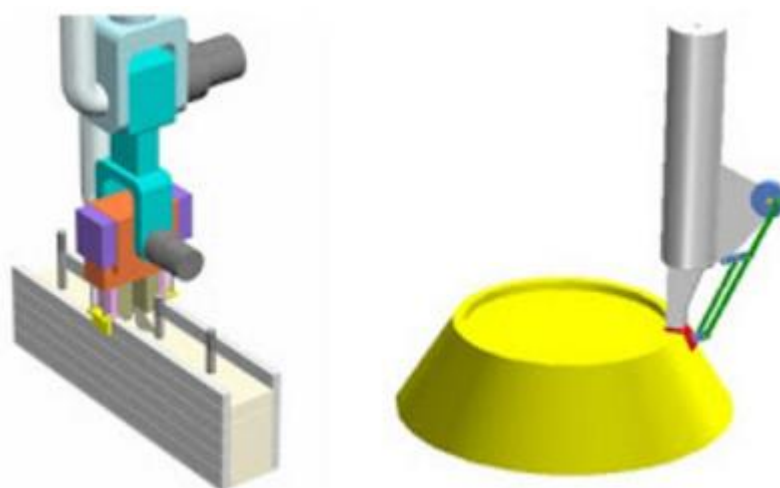
Avtomatizacija postopka gradnje stanovanjskih in inženirskih objektov močno zaostaja za ostalimi panogami. Razloge za to lahko najdemo predvsem v tem, da so gradbeni objekti zgrajeni v zelo majhnem številu ali so celo unikatni. V primerjavi z drugimi izdelki so gradbeni objekti relativno veliki. Avtomatizacija gradnje objektov je zato s finančnega vidika manj racionalna, kljub temu pa se je tudi na področju gradbeništva pojavila potreba po avtomatizaciji. Delovna sila je draga, pogosto pa zaradi pomanjkanja nadzora prihaja do neučinkovitosti same izvedbe in velikega števila človeških napak. Z računalniško krmiljenim avtomatiziranim sistemom, ki po slojih gradi končni objekt, se lahko izognemo večini naštetih težav.

Prednost tehnologije izdelave kontur pa se ne kaže samo v zmanjšanju človeških napak in zmanjšanju stroškov zaradi potrebe po manjšem številu delovne sile, ampak prinaša tudi nekatere druge prednosti. Najbolj izrazita razlika med tradicionalno gradnjo in gradnjo s pomočjo 3D-tiska je v svobodni obliki končnega izdelka (slika 27). Aditivna tehnologija ni pogojena z ravnimi linijami ali pravimi koti. Ne samo, da je z do sedaj uveljavljenimi metodami težko konstruirati opaž za svobodne oblike končnega izdelka, pri tehnologiji CC opaža sploh ne potrebujemo, kar pomeni še dodaten prihranek pri končni investiciji.



Slika 27: Svobodna oblika z metodo CC natisnjenih objektov, računalniški model (levo), pretvorba v vzorec tiska (sredina levo), računalniška simulacija končnega izdelka (sredina desno) in končni izdelek (desno) [29]

Poleg zgoraj omenjenega je tehnologija zasnovana tako, da natisne konstrukcijo velikih dimenzij v čim krajšem času. V ta namen se uporabljajo ekstrudirne glave z več šobami in gladilkami. Da zmanjšamo število obhodov glave, lahko uporabimo več šob in tako lahko natisnemo obe zunanji ploskvi stene in polnilo hkrati (slika 28). Da pa ima natisnjena konstrukcija estetsko gladko površino, lahko uporabimo tudi gladilke, ki v istem koraku odpravijo strukturo slojev. Na spodnji sliki sta prikazani dve vrsti ekstrudirnih glav. Na levi strani je ekstrudirna glava s tremi šobami in dvema gladilkama, na desni pa z eno šobo in dvema gladilkama, ki ju lahko nastavimo pod želenim kotom in tako dobimo poljuben nagib končne površine [30].



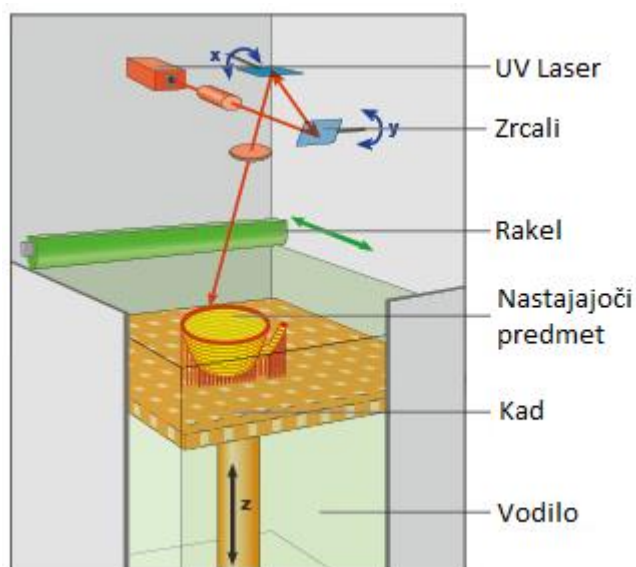
Slika 28: Ekstrudirna glava s tremi šobami (levo) in z eno šobo (levo) [29]

Tehnologija CC pa ima tudi veliko pozitivnih učinkov z vidika okoljevarstva in varovanja zdravja. Vsako leto se v razvitih državah med opravljanjem gradbenih del resno poškoduje ali celo umre več kot 400.000 delavcev. Veliko težavo za okolje predstavljajo tudi odpadki, ki nastanejo v fazi gradnje. Gradnja tipične enostanovanjske hiše proizvede med 3 do 7 ton

odpadkov. Generalno gledano se več kot 40 % vseh surovin porabi za potrebe procesa gradnje. Iz tega vidika je nujno potrebno zmanjšati porabo surovin in proizvodnjo odpadkov, kar pa nam lahko omogoči tehnologija 3D-tiska. Zaradi natančno vodene računalniške tehnologije je odpadnega materiala zanemarljivo malo. CC tehnologija ravno tako omogoča zmanjšanje količine odpadkov, hrupa, prahu in škodljivih emisij [31].

3.2 Fotopolimerizacija

Fotopolimerizacija v kadi za izgradnjo končnih izdelkov uporablja tekoče fotopolimere. Za utrjevanje materiala se uporablja laser ali kateri drug vir svetlobe. Najpogosteje fotopolimeri reagirajo na ultravijolični spekter, redko pa tudi na vidni spekter svetlobe. Kemijsko reakcijo, ki tekoče polimere spremeni v trdno obliko, imenujemo fotopolimerizacija. Tiskalnik je sestavljen iz vira svetlobe, ki preko zrcal usmerja žarek v tekoči polimer, ki se strjuje. Obstajata dve možnosti postavitve zrcal. Pri prvi uporabljamo dve zrcali; eno zrcalo uravnava odklon žarka v x smeri in drugo v y smeri, kot prikazuje slika 29. Pri drugem načinu pa isti rezultat dosežemo z enim samim zrcalom. Ko se pod vplivom žarkov strdi en sloj, se platforma, na kateri nastaja končni izdelek, spusti v smeri z za debelino enega sloja in postopek žarčenja se ponovi. Na tak način dobimo končni izdelek.



Slika 29: Postopek fotopolimerizacije v kadi [32]

Razvijata pa se še novejši tehnologiji fotopolimerizacije. Prva se od zgoraj opisane ne razlikuje veliko. Sistem je praktično enak, le da se med izvor svetlobe in zrcalo namesti maska, ki hkrati obseva celotno površino sloja tiskanega predmeta. Pri zadnji tehniki se uporablja dvofotonski način. Ta način odlikuje visoka ločljivost tiska. Bistvena razlika med tehnikami je ta, da je pri prvih dveh potrebno po vsakem strjenem sloju izdelek prekriti z

novim tekočim slojem, pri tretji tehniki pa se gradnja končnega predmeta vrši znotraj prostornine tekočega polimera v presečišču dveh snopov, kar omogoča veliko hitrejšo izdelavo [1].

3.2.1 Stereolitografija

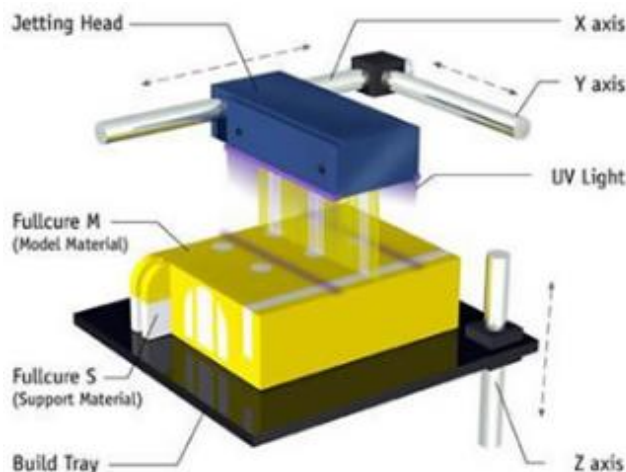
Stereolitografija (SLA ali LA) je bila razvita na osnovi fotopolimerizacije. Leta 1983 jo je razvil Charles Hull. Razvil je stereolitografske naprave, ki so registrirane kot blagovna znamka podjetja 3D Systems in z njihovo pomočjo se tiskajo predmeti po slojih (po navadi v debelinah med 0,05 in 0,15 mm) na osnovi UV-sevanja[1]. Ker tekoči polimer ne more nuditi podpore previsnim delom, je pri tej tehnologiji nujna uporaba podpornih struktur. Osnovne opore so namenjene začetku tiskanja, da se prvi sloj lahko veže. Podporne opore pa uporabljamo za tisk struktur, katerih kot je manjši od 150° ali večji od 30° glede na horizontalno linijo.

Po samem tisku predmeta pa postopek še ni zaključen. Ko se s strjene strukture odcedi tekoči polimer, je potrebno površino obdelati s kemičnimi sredstvi, ker pa predmet še ni dovolj strjen, ga je potrebno v UV peči osvetljevati do končne trdnosti. Nato sledi še odstranitev podpor in končna obdelava površine, da dobimo želen videz in obdelanost zaključnega sloja.

Z metodo stereolitografije lahko tiskamo predmete z veliko natančnostjo in hitrostjo, ponuja se nam velik nabor materialov, končna površina pa ni zahtevna za obdelavo. Izdelki imajo manjšo trajnost kot pri drugih tehnikah 3D-tiska. Slabosti SLA tehnologije se kažejo tudi pri onesnaževanju okolja, saj so fotopolimeri in sredstva za čiščenje končnega izdelka toksični. Poleg te slabosti je potrebno omeniti tudi potrebo po podporah v fazi tiska in podaljšanem času izdelave zaradi naknadnega čiščenja in utrjevanja izdelka.

3.3 Kapljično nanašanje ali brizganje materiala

Kapljično nanašanje materiala (Material Jetting) je praktično identična tehnologija, kot jo že leta poznamo v dvodimenzionalni obliki, bistvena razlika pa je v tem, da tukaj namesto črnila na papir nanašamo tekoči polimer na platformo in tako dobimo še tretjo dimenzijo. Enako kot pri tehnologiji SLA, se kapljice materiala strdijo pod vplivom UV žarkov (slika 30). Površino predmeta lahko naknadno barvamo ali drugače površinsko obdelamo.

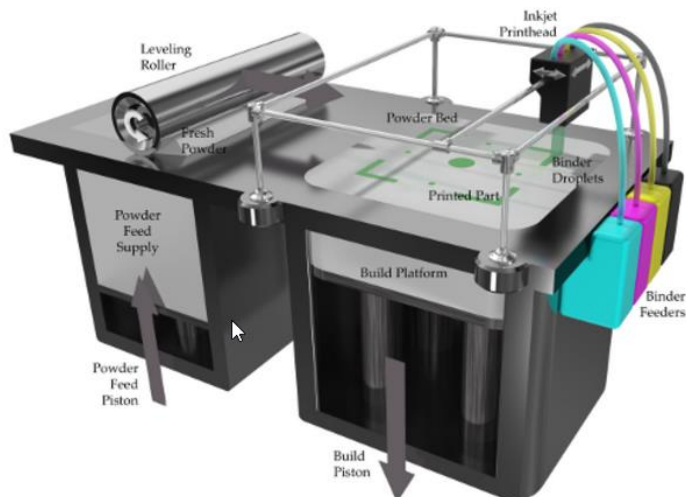


Slika 30: Tiskalnik za tisk 3D-predmetov z metodo kapljičnega nanašanja materiala [34]

Najpogosteje uporabljeni materiali so voski ali akrilatni fotopolimeri, kar pa posledično pomeni, da so zelo slabo odporni na povišano temperaturo. Cena izdelkov, narejenih s tehnologijo kapljičnega nanašanja, je visoka, za tisk previsnih oblik pa potrebujemo tudi dodatne podpore. Pomembna pozitivna lastnost kapljičnega nanašanja materiala je v tem, da je to edina do sedaj razvita metoda, ki omogoča sočasni tisk materialov z različnimi mehanskimi in fizikalnimi lastnostmi. Sam proces izdelave je hiter, natančen in kakovosten, po končanem tisku pa dodatno utrjevanje ni potrebno.

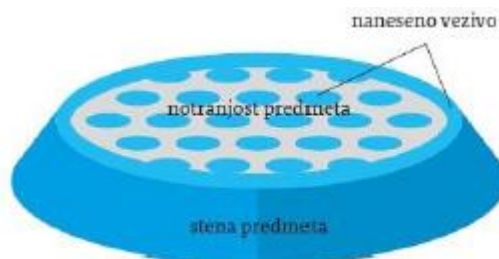
3.4 Kapljično nanašanje ali brizganje veziva

Tehnologijo imenujemo tudi tehnologija 3D-tiska (3DP), saj je nastala neposredno iz 2D-tiska. Podobno kot pri tehnologiji kapljičnega nanašanja materiala, se tudi pri tehnologiji kapljičnega nanašanja ali brizganja veziva (Binder Jetting) iz tiskarskih glav za klasični tisk selektivno nanaša lepilno vezivo na sloj materiala. Vsak sloj je torej natisnjen tako, da valj nanese nadzorovano debelino plasti materiala, nato pa računalniško vodena glava brizga kapljice veziva na materialni prah, ki se nato strdi. Ne samo, da se strdi trenutni sloj, vezivo ta sloj zveže tudi s predhodno strjenimi sloji. Na sliki 31 je prikazan 3DP tiskalnik.



Slika 31: Tiskalnik za tisk 3D-predmetov z metodo kapljičnega nanašanja veziva [34]

V želji po čim hitrejšem tisku se velikokrat poslužujemo selektivnega nanosa veziva. To pomeni, da nanašamo največjo koncentracijo veziva na stene oziroma zunanji rob izdelka, saj s tem dosežemo primerno ojačitev. V sami notranjosti predmeta pa vezivo nanašamo samo na določenih mestih in s tem dosežemo učinek »armature« (slika 32). Uporabljamo lahko zelo širok nabor materialov, kot so kovine, keramika, mavec in polimerni kompoziti [1]. Po končanem tisku odstranimo nestrjen prah in morebitne podpore, ki so lahko odstranljive.

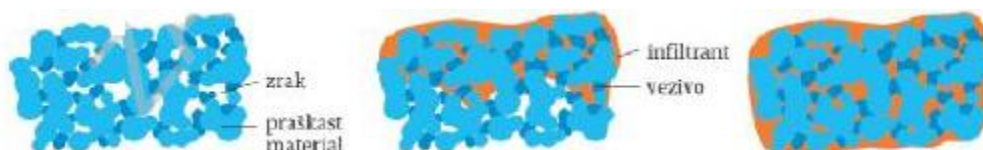


Slika 32: Selektivno izbrana mesta nanašanja veziva [1]

Tako kot smo pri tehnologiji FDM ugotovili, da ima orientacija vlaken velik vpliv na natezno in upogibno trdnost ter na odpornost proti utrujanju, ima tudi pri tehnologiji brizganja veziva orientacija tiska velik vpliv na trdnost predmeta neposredno po tisku. Sama orientacija vpliva še na učinek posedanja in s tem deformacijo oblike oziroma natančnost izdelave in na hitrost samega tiska.

Predmet takoj po tisku pustimo še nekaj časa na postelji, da se ohladi. Predmet je še zelo krhek, zato procesu 3DP vedno sledi infiltracija, s katero dosežemo končno trdnost in želeno kakovost natisnjene predmeta. Infiltrant v tekoči obliki z nizko viskoznostjo prodre v

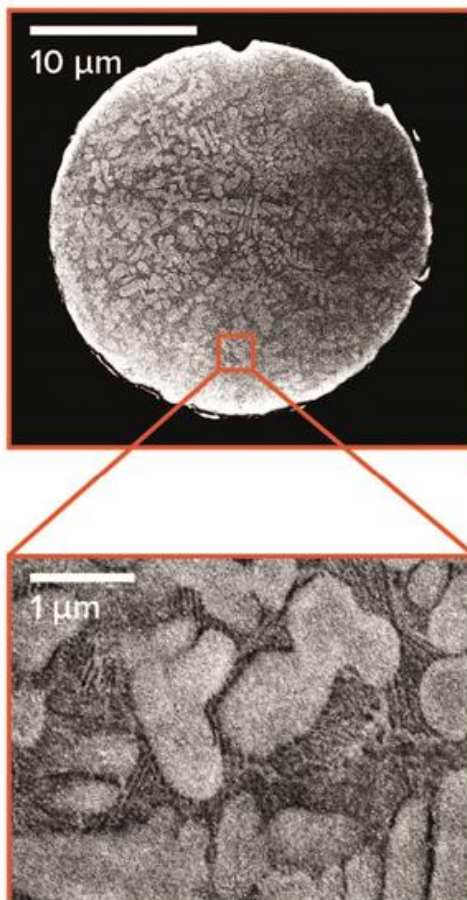
porozno strukturo natisnjene in ohlajene predmeta (slika 33), s tem pa dosežemo boljše trdnost predmeta in kakovost površine [1].



Slika 33: Postopek infiltracije [1].

Metoda 3DP ima zelo velik potencial, saj z njo lahko kreiramo materiale s kompleksno mikrostrukturo, ki do sedaj sploh še ne obstajajo. Take materiale bi s pridom uporabljali tudi v gradbeništvu. Na univerzi Missouri University of Science and Technology raziskovalci in profesorji razvijajo nove materiale s pomočjo tehnologije 3DP. Želja je »odkriti« kovinski material, ki bi bil lažji, hkrati pa bolj nosilen od trenutno poznanih materialov. Iz prahu kovinskih materialov s pomočjo aditivne tehnologije tiskajo nove strukture plast za plastjo. Končni namen pa je ustvariti kovino, ki bi imela za razliko od zdajšnje strukture kristalne mreže bolj homogeno strukturo. Na tak način dobljene materiale so poimenovali SAMs (Structural Amorphous Metals). Zaradi naključno porazdeljene strukture imajo taki materiali boljše odpornost proti porušitvi kot kovine, ki se porušijo vzdolž plasti kristalne mreže. So trši, bolj nosilni in imajo boljše odpornost proti lomu. Taki materiali pa naj bi bili tudi bolj odporni proti koroziji. Druga možnost optimizacije materiala pa so materiali, ki so jih poimenovali FGMs (Functionally Gradient Materials). Mehanske lastnosti FGM materialov se spreminjajo po prostoru in s tem prilagajajo obtežnemu stanju konstrukcije. To so lahko metalni kompoziti, ki so sestavljeni iz zelo težko združljivih kovin, kot so nerjaveče jeklo in titan ali baker in jeklo. Prednost takega material bi bila v izkoristku pozitivnih lastnosti vsake od materialnih komponent v odvisnosti od lege točke v prostoru. Na tak način bi na primer lahko dobili visoko nosilen in toplotno prevoden material. Če želimo združiti titan in baker, je potrebno uporabiti tudi druge kovine, za uspešno spajanje teh dveh materialov [35].

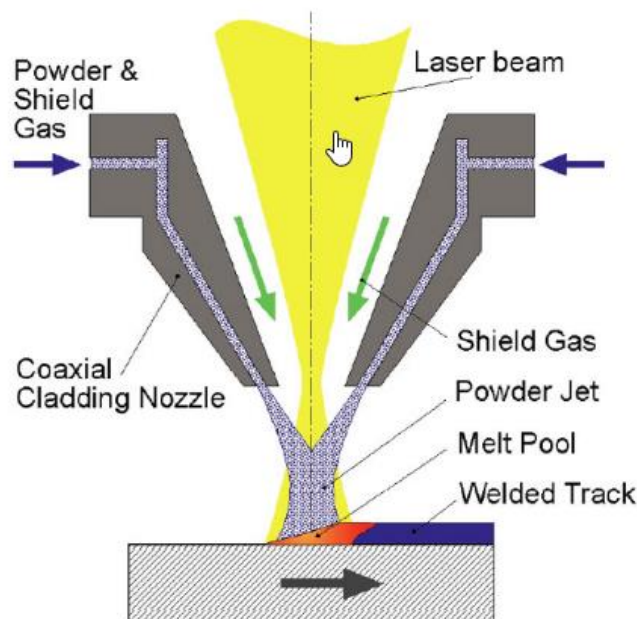
Podjetje NanoSteel je pred kratkim predstavilo dve vrsti kovinskega prahu BLDRmetal J-10 in BLDRmetal J-11, ki sta primerni za tisk konstrukcij v močno abrazivno obremenjenih okoljih. Na sliki 34 je prikazana povečana struktura natisnjene predmeta z uporabo omenjenega materiala [35].



Slika 34: S pomočjo 3DP natisnjen metalni material ima visoko nosilnost in strukturo, ki omogoča veliko duktilnost in žilavost [35]

3.5 Lasersko navarjanje

Lasersko navarjanje (DED – Direct Energy Deposition) je postopek, s katerim lahko tiskamo različne materiale, od polimerov do keramike, vendar pa se najpogosteje za osnovni material uporablja kovinski prah. Posebnost te metode je, da ni namenjena samo tiskanju novih predmetov, ampak je uporabna tudi za popravilo ali celo nadgradnjo končnih produktov. Tako lahko funkcionalni izdelek nadgradimo ali iz dveh ali več sestavimo novega. Tehnologija pa ni omejena samo na naknadno dodelavo DED natisnjenih predmetov, ampak je kompatibilna tudi s kovinskimi izdelki, ki so bili narejeni s poljubnimi metodami izdelave. Tako lahko osnovno obliko naredimo s hitrejšimi tradicionalnimi postopki (kadar gre za množično proizvodnjo), zahtevne detajle, ki pa so za tak postopek prezahtevni, pa z metodo DED navarimo naknadno. Tehnologija je zasnovana tako, da s pomočjo laserja, elektronskega snopa ali plazme točkovno stopi kovinski prah ali filament, ki prihaja iz šobe, hkrati pa delno stopi tudi površino predmeta, na katerega želimo navariti nov sloj (slika 35). Tako omogoči zelo kakovosten stik med že obstoječim in novo natisnjenim materialom [36].



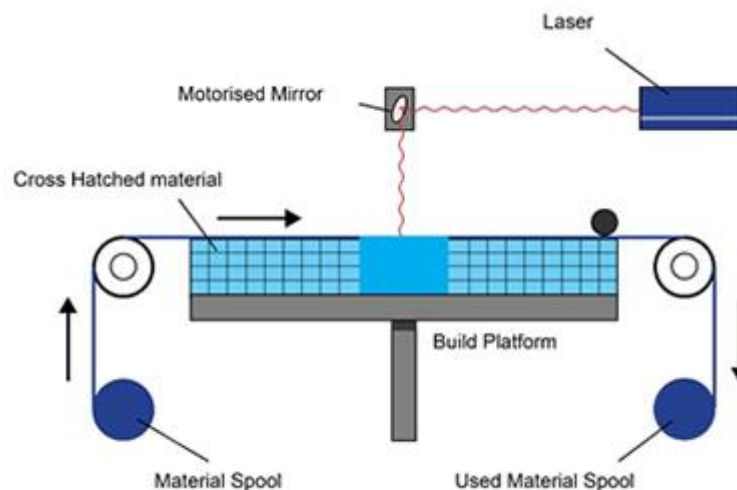
Slika 35: Postopek tiskanja s tehnologijo DED [36]

Zaradi omenjenih lastnosti laserskega navarjanja ima tehnologija veliko potenciala v sanacijah predmetov ne samo v letalstvu in avtomobilski industriji, kjer je bila tudi razvita, ampak tudi v gradbeništvu. S tehnologijo je mogoče popraviti posamezne nosilne in nenosilne kovinske konstrukcijske sklope, ne da bi bilo potrebno zamenjati celoten sklop. S postopki laserskega navarjanja lahko pri optimalnih pogojih uporabe dosežemo materiale polne gostote, torej brez poroznosti, ki pa imajo v primerjavi z litimi materiali izboljšane mehanske lastnosti. S to metodo bo natisnjen tudi most v Amsterdamu, ki ga obravnavam v kasnejšem poglavju. Slabost metode se kaže v slabem izkoristku praškastega materiala, saj se ga učinkovito vgradi le 30 do 40 %, ostalo pa se navari v okolico prostora. Z DED metodo nismo omejeni samo na dodajanje materiala, ampak omogoča tudi odzemanje. V primerih, ko v šobo ne dovajamo praškastega plina ali filameta kovine, govorimo o laserskem brušenju [1].

3.6 Laminacija pol

Proces laminacije pol obsega dva procesa: prvi je ultrazvočna dodajalna izdelava (UAM – Ultrasonic additive manufacturing), druga pa je tehnologija nalaganja krojenih plasti (LOM – Laminated object manufacturing). UAM uporablja kovinske pole oziroma trakove, ki jih spajamo skupaj z uporabo ultrazvočnega varjenja. Tehnologija zahteva še uporabo CNC tehnologije za izrez in odstranitev nevezanega materiala med samim postopkom varjenja. LOM tehnologija je podobno kot UAM, le da uporablja papir, ki je na eni strani premazan s termično topljivim premazom in se ne spaja z varjenjem, ampak z lepljenjem. Tehnologija LOM je zasnovana tako, da se najprej naredi podlaga, na katero se kasneje lepijo ostali sloji.

Nato tiskalnik napne sloj materiala, ki ga grelni valj pod tlakom nalepi na predhodni sloj (slika 36). Laser nato iz sloja materiala izreže konture in postopek se ponavlja do konca tiska. Po končanem tisku se odstrani odvečne strukture, zelo pogosto pa je potrebno končni produkt zaščititi z zaščitnim sredstvom, saj papir, iz katerega je predmet narejen, vpija vlago.



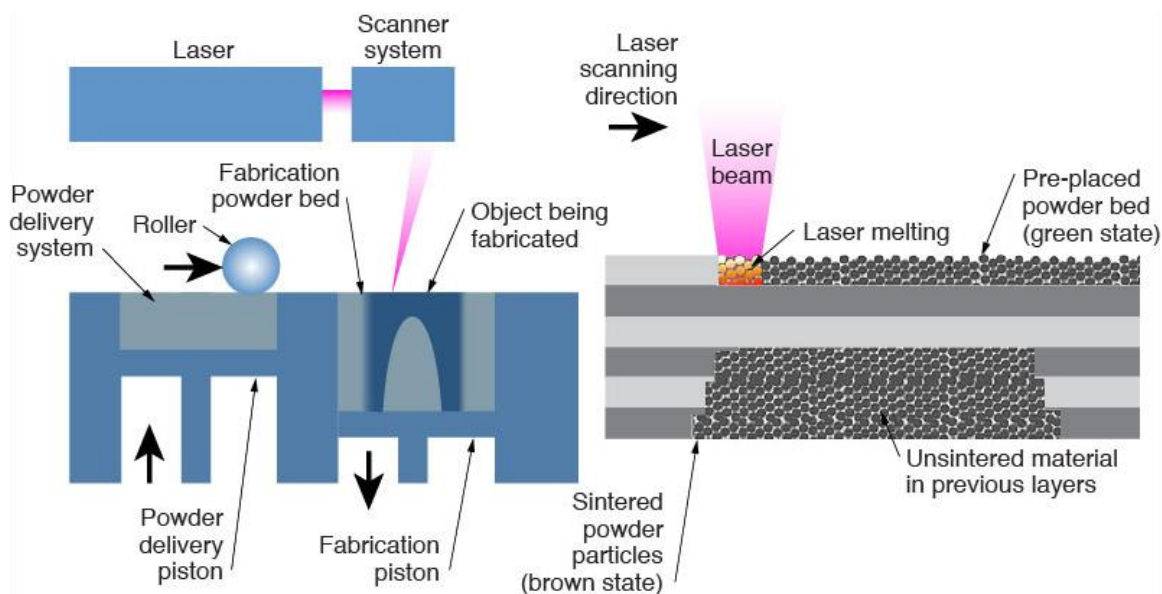
Slika 36: Postopek tiskanja s tehnologijo LOM [37]

3.7 Spajanje praškastega materiala

Vse metode iz skupine spajanja slojev praškastega materiala (PBF – Powder Bed Fusion) uporabljajo laserski ali elektronski snop za taljenje prahu in spajanje materiala. Skupno jim je tudi to, da za tisk ni potrebno uporabljati podpornih struktur, kar je zelo velika prednost pred tehnikami, ki podpore potrebujejo. To pomeni prihranek pri materialu in času izdelave oziroma naknadne obdelave zaradi odstranjevanja podpor. Zaradi sposobnosti tiska brez podpor lahko natisnemo poljubne oblike, ki jih s tradicionalnimi metodami nismo mogli narediti iz enega samega dela. Da smo dobili zahtevne izdelke, jih je bilo potrebno sestaviti iz različnih delov, te vezi pa so velikokrat najšibkejši člen končnega produkta. S temi metodami se na enostaven način izognemo spajanju več delov za dosego zahtevnega funkcionalnega izdelka. Bistvenih razlik med njimi ni, saj spadajo v isto generično skupino, se pa razlikujejo po vrsti materiala, ki ga lahko natisnejo, različnih mehanizmih nanašanja slojev prahu, načinu shranjevanja prahu itd. Sam način nastajanja novega produkta pa je praktično enak.

3.7.1 Selektivno lasersko sintranje

Tehnologija selektivnega laserskega sintranja uporablja laserski snop za strjevanje in vezanje majhnih zrn materiala, kot so plastika, keramika, stekla ali kovinska zmes. Material se s pomočjo valja po plasteh nanaša sloj za slojem, nato pa laser selektivno opiše obliko predmeta in na ta način sintra delce (slika 37). Po vsakem sintranem sloju se miza spusti za debelino sloja in postopek se ponavlja do izdelave končnega predmeta [38].



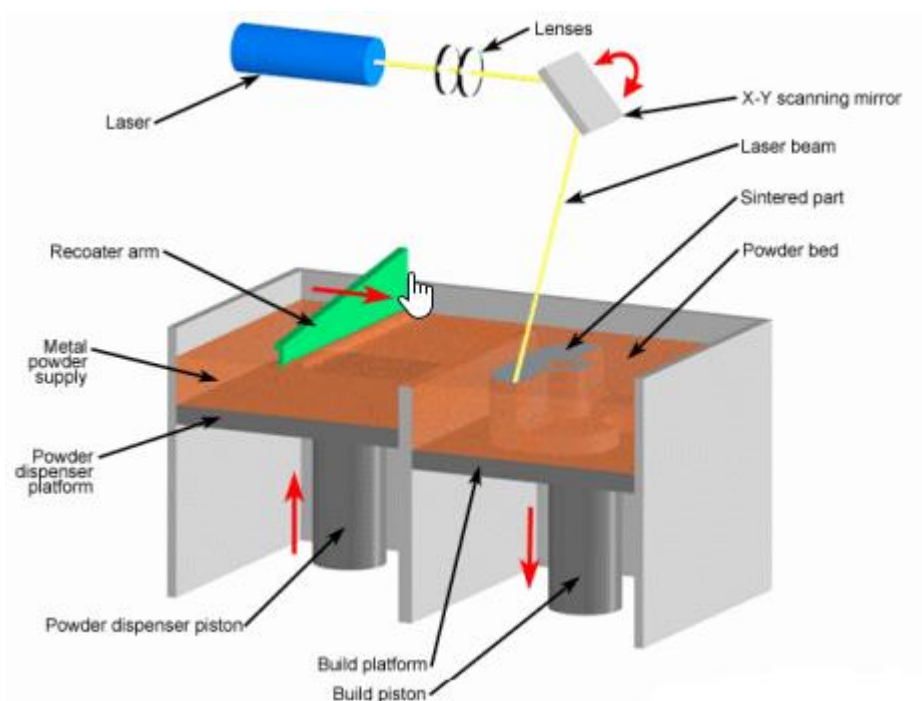
Slika 37: Shema tiskanja s tehnologijo SLS [38]

Sintranje ali zgoščevanje materiala pomeni gradnjo končnega izdelka s segrevanjem materiala nad temperaturo tališča. Sintranje predstavlja termodinamični proces, pri katerem sistem teži k stanju z minimalno prosto energijo. Na ta način zaradi skrčka, zmanjšanja koncentracije napak, notranjih napetosti in proste površine sistem preide v stabilnejše stanje. Kompaktno telo ima v primerjavi s prašnimi delci enakega volumna manj energije zaradi manjše specifične teže, zato je gonilna sila zgoščevanja zmanjšanje površinske proste energije [39].

Postopek SLS nam omogoča izdelavo končnih predmetov velike trajnosti, ki s časom ne postanejo krhki, kot pri nekaterih drugih metodah. Postopek tiska je hiter, končni izdelki pa so narejeni z veliko natančnostjo in ne potrebujejo naknadne dodelave. Potrebno je podariti, da je SLS metoda velik potrošnik energije [38].

3.7.2 Neposredno lasersko sintranje kovine

Neposredno lasersko sintranje kovine (DMLS – Direct Metal Laser Sintering) je praktično identična metoda kot SLS, vendar z eno razliko. Nabor materialov pri SLS metodi je drugačen kot pri DMLS, ki lahko za osnovni material uporabljajo izključno zlitine kovin. Zaradi tega se tudi pri tehniki nanašanja sloja prahu namesto valja uporablja rakel (slika 38) [40].



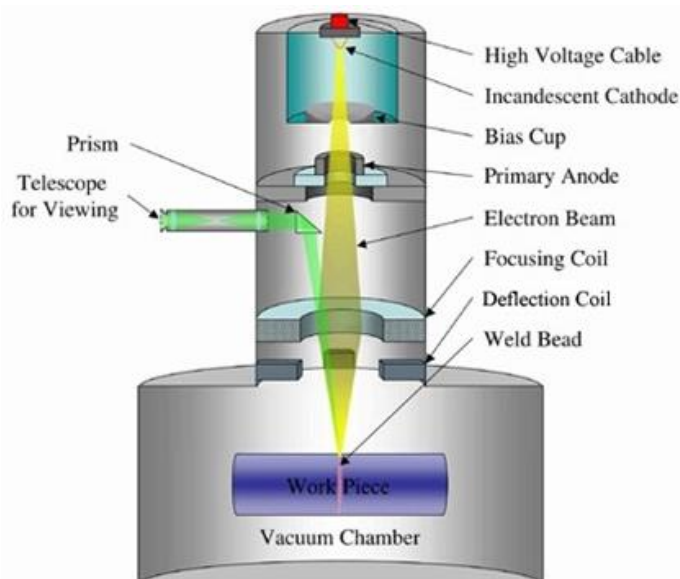
Slika 38: Shema tiskanja s tehnologijo DMLS [40].

3.7.3 Selektivno lasersko taljenje

Selektivno lasersko taljenje (SLM – Selective Laser Melting) se od DMLS razlikuje po tem, da naredi še korak naprej. Prašnih delcev ne sintra, ampak jih popolnoma stopi, ravno tako pa delno stali površino že strjene kovinske zlitine in tako dobimo homogeno strukturo.

3.7.4 Taljenje z elektronskim snopom

Pri tehniki taljenja z elektronskim snopom (EBM – Electron Beam Melting), kot že samo ime pove, za razliko od SLM uporabljamo elektronski namesto laserskega snopa. Ko elektroni z visoko hitrostjo trčijo ob kovino, se kinetična energija spremeni v toplotno in tako dvigne temperaturo zlitine nad tališče (slika 39). Končni izdelek se gradi v vakuumu z namenom ohranjanja energije, ki bi jo sicer elektroni izgubili, če bi se morali prebijati skozi zrak ali druge pline. S tem učinkom je učinkovitost izrabe energije EBM metode 95 % in pet do desetkrat višja od učinkovitosti izrabe energije tehnologije SLM [41].



Slika 39: Shema tiskanja s tehnologijo EBM [41]

3.8 Uporaba posameznih tehnologij v gradbeništvu

Kljub temu, da vse tehnologije 3D-tiska temeljijo na izgradnji končnega izdelka s tehniko dodajanja materiala v slojih, so med končnimi izdelki narejenimi z različnimi tehnikami bistvene razlike. Te razlike definirajo uporabnost posameznih tehnologij v različnih proizvodnih panogah. Gradbene konstrukcije se močno razlikujejo od končnih izdelkov drugih panog. Najbolj izstopajoča je velikost gradbenih konstrukcij. Tehnologije primerne za izdelavo majhnih in zelo natančnih produktov, so prepočasne, predrage in pogosto neprimerne za izdelavo tako velikih končnih izdelkov. Vse aditivne tehnologije odlikuje možnost izvedbe svobodnih oblik, vendar morajo gradbene konstrukcije poleg oblike izpolnjevati še pogoje nosilnosti, uporabnosti in trajnosti. Tako lahko ločimo med tehnologijami primernimi in neprimernimi za uporabo v gradbeni panogi. V preglednici 4 so predstavljene realne možnosti uporabe posamezne tehnologije v gradbeništvu.

Za uporabo v gradbeništvu so primerne tehnologije ekstrudiranja materialov, saj tehnika omogoča tiskanje razmeroma debelih slojev. To pomeni, da je čas tiskanja sprejemljiv oziroma je čas izdelave konstrukcije celo krajši, kot pri trenutno uporabljenih metodah gradnje. Zelo širok spekter materialov, ki jih je s tehnologijo mogoče tiskati, še povečuje pomembnost in uporabnost na področju tiskanja konstrukcijskih sklopov. Med tehnikami ekstrudiranja je v gradbeništvu najbolj izstopajoča tehnologija Contour crafting (CC), ki za osnovni material uporablja, danes poznanemu betonu podoben, material.

Velik potencial med aditivnimi tehnikami, ne samo v gradbeništvu, ima tehnologija kapljičnega nanašanja veziva, saj omogoča razvoj novih materialov s kompleksno mikrostrukturo, ki jih do sedaj še ne poznamo. Z uporabo takih materialov bi lahko natisnili konstrukcije, ki bi bile lažje, hkrati pa bolj nosilne od sedaj izvedljivih konstrukcij.

Naslednja skupina tehnologij, ki se že uveljavljajo v gradbeništvu, še posebej pri metalnih konstrukcijah, so tehnologije varjenja, sintranja in taljenja materiala. Jeklo in nekatere druge kovine oziroma kovinski kompoziti imajo specifične mehanske lastnosti, ki so izredno primerne za izdelavo gradbenih konstrukcij. Odlikujeta jih visoka nosilnost in duktilnost, ki sta zelo pomembni lastnosti pri projektiranju konstrukcij. S topološko optimizacijo in optimizacijo strukture materiala, ki sta eni izmed pglavitnih prednosti 3D-tiska, je mogoče s pomočjo omenjenih tehnologij izdelati trenutno neizvedljive konstrukcijske sklope.

OSNOVNI PROCES GRADNJE	GENERIČNA SKUPINA PO STANDARDIH ASTM F2792-10	TEHNOLOGIJA	PODROČJE UPORABE	STOPNJA UPORABNOSTI
ekstrudiranje materialov	Material Extrusion ekstrudiranje materiala	Fused Deposition Modeling (FDM) modeliranje s spajanjem slojev	izdelovanje maket, tiskanje konstrukcijskih sklopov (v diplomski nalogi je predstavljena fasada natisnjena s to tehniko)	visoka
		Contour Crafting (CC) ekstrudiranje betona	tiskanje masivnih nosilnih konstrukcijskih sklopov oziroma celotnih objektov	visoka
proces fotopolimerizacije	Vat Photopolymerization polimerizacija v kadi	Stereolithography (SLA) stereolitografija	zaradi omejenosti na velikost kadi v kateri nastaja končni izdelek, metoda najverjetneje v gradbeništvu nima svetle prihodnosti, izdelki imajo majhno trajnost, nizka hitrost tiskanja	nizka
	Material Jetting kapljično nanašanje ali briganje materiala	Polyet/Inkjet Printing kapljično nanašanje	tehnologija je bolj kot v gradbeništvu primerna v panogah, kjer je zahteva po manjših in izredno natančno izdelanih produktih	nizka
lepljenje, sintranje ali taljenje praškastega materiala	Binder Jetting kapljično nanašanje ali briganje lepila	Indirect Inkjet Printing (Binder 3DP) tridimenzionalni tisk (zaščiten kratka)	tehnologija omogoča razvoj materialov s kompleksno mikrostrukturo, ki do sedaj sploh še ne obstajajo	visoka
	Direct Energy Deposition (DED) lasersko navarjanje	Laser Engineered Net Shaping (LENS) nanašanje materiala z usmerjanjem energije Electronic Beam Welding (EBW) varjenje z elektronskim snopom	izdelava celotnih (najpogosteje kovinskih) konstrukcij (v nalogi predstavljen most v Amsterdamu), tehnologija ni primerna samo za tisk novih izdelkov, ampak tudi za popravilo poškodovanih ali nadgradnjo nefunkcionalnih konstrukcij	visoka
	Powder bed Fusion spajanje praškastega materiala	Selective Laser Sintering (SLS) selektivno lasersko sintranje	zaradi velike trajnosti končnih izdelkov je primerna za manjše konstrukcijske sklope, vendar je za gradbeništvo bolj primerna sorodna tehnologija DMLS, ki za osnovno material uporablja kovino	srednja
		Direct Metal Laser Sintering (DMLS) neposredno lasersko sintranje kovine	za izdelavo kovinskih konstrukcijskih detajlov izredno uporabna tehnologija (v nalogi je obravnavana izdelava vozlišča)	visoka
		Selective Laser Melting (SLM) selektivno lasersko taljenje	končni izdelek s tehnologijo SLM ima boljše mehanske lastnosti od izdelka narejenega s tehnologijo DMLS, je pa tehnologija DMLS cenejša, ker porabi manj energije	visoka
Electron Beam Melting (EBM) taljenje z elektronskim snopom	zaradi specifičnih pogojev izdelave (vakuum), raje uporabljamo tehnologije na osnovi laserja	nizka		
nalaganje, lepljenje ali laminiranje materiala	Sheet Lamination laminacija pol	Laminated Object Manufacturing (LOM) nalaganje krojenih plasti	končni produkti so slabo obstojni in imajo nizko trdnost, zaradi tega tehnologija za gradbeništvo ni zanimiva, oteženo odstranjevanje odpadnega materiala	nizka

Preglednica 4: Pregled uporabnosti posameznih tehnologij v gradbeništvu

4 SPLOŠNO O 3D-TISKU V GRADBENIŠTVU

V primerjavi z ostalimi področji, kot so medicina, letalstvo ali računalništvo, se gradbeništvo razvija razmeroma počasi. Velikokrat se ideje ne izvedejo zaradi omejenosti izvedbe. Osnovna načela gradnje objektov se skozi stoletja praktično niso spremenili. Rimljani so izumili beton že okoli leta 100 pred našim štetjem in več kot 2000 let kasneje še vedno bolj ali manj predstavlja enega glavnih materialov v gradbeništvu. V veliki večini primerov je tudi »oblikovan« ročno, kar pomeni, da so njegove oblike le redko zahtevnejše. Prevladujejo predvsem ravne linije. Seveda se ta pojav zrcali tudi pri drugih materialih in različnih tipih konstrukcij.

Konkurenca na tržišču sili investitorje, projektante in izvajalce, da se velikokrat skoncentrirajo na ceno; zmaga najcenejša ponudba in premalo časa, denarja ali energije je posvečenega inovacijam. Da bi razvoj v celoti zaživel in bi bil napredek res hiter, se morajo inovativno razvijati vsi segmenti: materiali, tehnike izvedbe, projektiranje in ne nazadnje tudi želje investitorjev. Gibalo razvoja pa seveda predstavljajo zelo specifične želje ali zahteve za objekte ali posamezne konstrukcijske sklope, ki jih s klasičnimi metodami ne moremo zgraditi.

V nadaljevanju poglavja bo predstavljeno več primerov uporabe 3D tiska v gradbeništvu ter v poglavju 5 podrobneje tiskanje metalnih konstrukcij.

4.1 Fasada

Priložnost uporabe 3D-tiska se je ponudila na Nizozemskem. Nizozemski je pripadlo predsedovanje Svetu EU v prvi polovici leta 2016. Za potrebe predsedovanja je bilo potrebno zgraditi veliko novih funkcionalnih objektov, ki pa so morali zaradi medijske pozornosti imeti tudi veličasten videz. Težava pa nastane, ker je potreba po takih objektih po končanem predsedovanju manjša, kot je število vseh zgrajenih objektov v ta namen. Možnosti 3D-tiska so s pridom izkoristili lokalni arhitekti in inženirji, saj so v enem izmed objektov združili atraktiven videz fasade in možnost njene popolne reciklaže oziroma ponovne uporabe po končanem predsedovanju (slika 40) [27].



Slika 40: Fasada, ki bo po končanem predsedovanju delno reciklirana, delno ponovno uporabljena [27]

Fasada je sestavljena iz dveh delov (slika 41). Ker se stavba nahaja na območju, ki je zgodovinsko znano po ladjedelništvu, je zgornji del fasade zasnovan tako, da spominja na jadra. Narejena je iz platna, ki bo po končanem dogajanju uporabljeno na drugih projektih. Spodnji del predstavljajo fasadni skopi, v katere so vgrajene tudi klopi za sedenje in je v celoti natisnjen s FDM aditivno metodo 3D-tiska. Izdelan je iz bio plastike (PLA). Ne samo, da je material okolju prijazen, ker je narejen na osnovi rastlin, natančneje iz lanenega olja, mogoče ga je v celoti ponovno uporabiti za nov tiskan izdelek. Vsak od spodnjih delov je unikatni, da ga je mogoče umestiti v niše pod jadra. Tiskani vzorec je sestavljen iz velikih in majhnih ter okroglih in oglatih vzorcev, kar upodablja raznolikost članic Evropske unije. Za 3D-tiskalnik, ki lahko odtisne predmete velike 2 x 2 x 3,5 m, je izvedba takih konstrukcijskih sklopov nezahtevna in predstavlja nove možnosti pri konstruiranju fasadnih konstrukcij v bodoče [27].



Slika 41: Spodnji del fasade, natisnjen iz bio plastike z metodo FDM [27]

4.2 Masivne nosilne gradbene konstrukcije na osnovi cc in d-shape tehnologije

V strokovnih krogih pogosto prihaja do uporabe dveh izrazov za 3D-tisk glede na velikost končnega produkta. Ideja o drugačnem poimenovanju izhaja iz začetkov tiska večjih objektov. Ne samo začetni, tudi večina danes razvitih in uporabljenih tehnologij 3D-tiska nanaša sloje debeline manj kot milimeter. Za marsikateri izdelek in področje uporabe je taka tehnologija edina sprejemljiva in zelo primerna, če pa želimo tehnologijo 3D-tiska uporabiti za tisk stanovanjske hiše ali še večjega objekta, pa hitro ugotovimo, da je taka tehnologija neprimerna zaradi predolgega časa izdelave. Razmišljanje je šlo v smer, kolikokrat debelejši sloj lahko tiskalnik natisne, tolikokrat hitreje pridemo do končnega rezultata. Seveda je razumljivo, da je s tem povezana tudi manjša natančnost izdelave. Tako se je začel razvoj tehnologij za tisk velikih objektov. Za ta način 3D-tiska se je uveljavil izraz 3D-konstruiranje (3D Construction), za tiskanje s tanjšim slojem pa 3D-proizvajanje (3D-Fabrication) [43].

Trenutno najbolj razviti tehnologiji za tisk betonskih oziroma na osnovi kamenega agregata grajenih objektov sta Khoshnevisev Contour Crafting in Dinijev D-Shape.

4.2.1 Contour crafting

Tehnologijo Contour Craftinga je razvil dr. Khoshnevis. Podjetje Winsun pa je njegovo tehnologijo, kljub nestrinjanju dr. Khoshnevisa, priredilo in je trenutno najbolj aktivno podjetje na področju tiskanja stanovanjskih objektov. Medtem ko dr. Khoshnevis razvija tehnologijo do te mere, da se natisne objekt v celoti na samem gradbišču, se Winsun poslužuje tiska posameznih konstrukcijskih sklopov izven gradbišča in jih nato transportira in sestavi na samem mestu (slika_sestavljanje sten). Za tisk konstrukcije se uporablja material, ki je sestavljen iz gradbenih odpadkov, kot so drobljeni beton, steklena volna ali pesek, dodana pa so veziva na osnovi cementa. Stena je zasnovana z dvema zunanjsima slojema, notranjost pa ima značilno diagonalno strukturo (slika 42), ki jo je v betonske konstrukcije ravno tako vpeljal dr. Khoshnevisa. Taka struktura se pri gradnji z drugimi materiali (npr. palični jekleni nosilci) uporablja že dolgo časa, pri betonskih konstrukcijah pa je bila zaradi težav z opaženjem prezahtevna za izvedbo [44].



Slika 42: Prikaz značilne diagonalne zapolnitve sten [45]

Na gradbišču je nato potrebno v stene vstaviti še jekleno armaturo in toplotno izolacijo, nad odprtinami pa je potrebno namestiti preklade. Prednost tako zasnovanih sten je velika toplotna izolativnost in zmanjšanje onesnaževanja okolja, saj se gradbene odpadke porabi za samo izdelavo. Na sliki 43 so lepo vidni posamezni sklopi konstrukcije. [46].



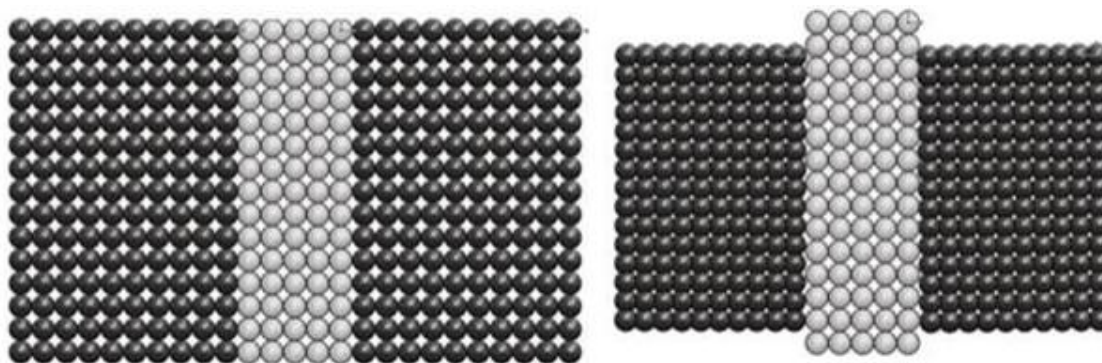
Slika 43: Na sliki so vidni posamezni konstrukcijski sklopi, ki so bili naknadno sestavljeni v celoto [47].

Po navedbah podjetja Winsun je mogoče s tako metodologijo gradnje prihraniti 60 % materiala v primerjavi s tradicionalno gradnjo stavb. Čas, potreben za gradnjo, pa se zmanjša za 70 %. Poleg tega pa je potrebno 80 % manj delovne sile. Podjetje je marca leta 2014 objavilo novico, da lahko v enem dnevu natisnejo 10 hiš površine 200 kvadratnih metrov. V začetku leta 2015 pa so predstavili prvo 5-nadstropno stanovanjsko stavbo in vilo, ki meri 1.100 kvadratnih metrov (slika 44) [48].



Slika 44: 3D-natisnjena vila [48].

Medtem, ko je podjetje Winsun za gradnjo stanovanjskih stavb uporabilo metodo CC, pa njen izumitelj razvija tehnologije za 3D-tisk za uporabo na višji ravni. V sodelovanju z agencijo NASA so razvili tehnologijo, imenovano SSS (Selective Separation Sintering). Tehnologija SSS je nadgradnja tehnologij, ki se že uporabljajo v 3D-tisku, vendar vsaka zaradi svojih pomanjkljivosti ni dovolj dobra za tako specifično uporabo kot je tisk bivalnih objektov na Luni ali Marsu. Tehnologije 3D-tiska, ki temeljijo na osnovi spajanja z lepilom, so neprimerne za materiale kot je na primer titan, saj ga kontaminirajo in posledično ne moremo dobiti kakovostnega končnega izdelka. Tehnologije, ki temeljijo na taljenju z elektronskim snopom, niso primerne za večino vrst keramike, saj keramika ni prevodna za elektrone, ki jih tehnologija uporablja za segrevanje materiala. Keramike, natisnjene s pomočjo laserskega žarka, so zelo občutljive na razpoke zaradi napetosti, ki nastanejo zaradi visoke temperature v fazi izdelave. Vse te pomanjkljivosti pa odpravlja SSS metoda. Zasnovana je tako, da uporablja dve vrsti praškastega materiala. Osnovni ali bazni praškasti material (B-powder), iz katerega je končni izdelek grajen, in ločevalni material (S-powder), ki ločuje osnovni izdelek od odvečnega baznega materiala (slika 45). Po samem postopku sintranja ostane ločevalni material nestrjen, kar omogoči enostavno ločevanje. Ločevalni prah se ne sintra, ker ima višjo tališno toploto od osnovnega materiala, tehnologija pa segreje prah samo preko praga tališča osnovnega materiala [50].



Slika 45: Material pred (levo) in po (desno) sintranju (osnovni material je temnejše barve)[50]

SSS metoda se odlikuje po tem, da je v primerjavi s podobnimi metodami hitrejša, cenejša in omogoča širši nabor materialov. Poleg tega je po tisku zelo enostavno ločiti posamezne natisnjene dele. Končni cilj metode SSS je tiskanje pristajalnih ploščadi, cest in ne nazadnje tudi bivalnih prostorov na Luni ali Marsu z uporabo materialov, ki jih najdemo na omenjenih planetih [50].

4.2.2 D-Shape

Medtem ko se je tehnologija Contour Crafting bolj osredotočila na to, kako z že znanim materialom natisniti gradbene konstrukcije čim hitreje in čim ceneje, se je tehnologija D-Shape poleg tega izziva lotila tudi izziva glede materiala. Seveda je bilo potrebno tudi za tehnologijo CC nekoliko prilagoditi recepturo betona, vendar se grajenje struktur iz betona uporablja že dolga leta. Predmeti iz kamna pa so bili vedno grajeni z odvzemalnimi metodami, medtem ko jih tehnologija D-Shape gradi z dodajalnimi.

Dinijevo izhodišče razvoja tehnologije je bilo zgraditi objekt poljubne oblike z uporabo materiala, ki bi ga lahko v čim večji meri sestavljale naravne komponente. Podobno kot je dr. Khoshnevis z agencijo NASA, je italijanski strokovnjak za robotiko v sodelovanju z Evropsko vesoljsko agencijo razvil tehnologijo, ki lahko natisne objekte ne samo na Zemlji, ampak tudi na drugih planetih z uporabo tamkajšnjega materiala. Transport vsakega dodatnega kilograma materiala na Luno predstavlja velik strošek (nekaj deset tisoč evrov), zato je razumljivo razviti tehnologijo tiska z uporabo materiala, ki je tam že prisoten. Material, ki ga je na pretek tako na Luni kot na Zemlji, je kamen oziroma pesek, na osnovi katerega temelji metoda D-Shape. Bistveni prednosti tehnologije sta v tem, da konstrukcijo poljubne oblike natisne v enem kosu brez potrebnega dodatnega postopka montaže, v fazi tiska pa previsnih delov konstrukcije ni potrebno podpirati. Na sliki 46 je z namenom predstavitve tehnologije

natisnjena skulptura svobodne oblike brez uporabe podpor na osnovi kamenega agregata [55].



Slika 46: S tehnologijo D-SHAPE natisnjena skulptura [50]

Tehnologija je trenutno razvita do te stopnje, da lahko natisne dvonadstropno hišo brez težav s tiskanjem stopnic, pregradnih sen, stebrov, kupol ali odprtin za vodovodno in električno napeljavo. Za gradnjo pa uporablja izključno pesek in anorgansko vezivo. Končni izdelek je na las podoben marmorju in ga je s prostim očesom težko razlikovati. Njegove mehanske lastnosti so primerljive z marmorjem, trajnost takega materiala pa je celo boljša od zidanih ali betoniranih konstrukcij [55].

Končno trdnost material doseže po 24-ih urah. Kar pa nima vpliva na postopek gradnje. Sloji debeline 5-10 mm se strdijo dovolj hitro, da je tiskanje zvezno in ni potrebnih nikakršnih prekinitev. Gradnja stanovanjskega objekta z metodo D-Shape traja približno četrtno časa, ki bi ga potrebovali z uveljavljenimi tehnikami, stroški za gradnjo pa bi bili od 30 do 50 odstotkov nižji. Trenutno največje dimenzije, ki jih je mogoče natisniti z Dinijevim tiskalnikom so 6x6x6 metrov [55].

V zadnjem času so v Angliji in na Bližnjem vzhodu s tehnologijo D-Shape natisnili koralne grebene v želji varovanja obale in oživljanja naravnega habitata morja. S peskom, ki so ga izkopal v morju in ga posušili na soncu, so natisnili skulpture podobne koralam in jih namestili na mesta, kjer so pesek izkopal. Taki koralni grebeni preprečujejo erozijo obale.

5 3D-TISK KOVINSKIH KONSTRUKCIJ

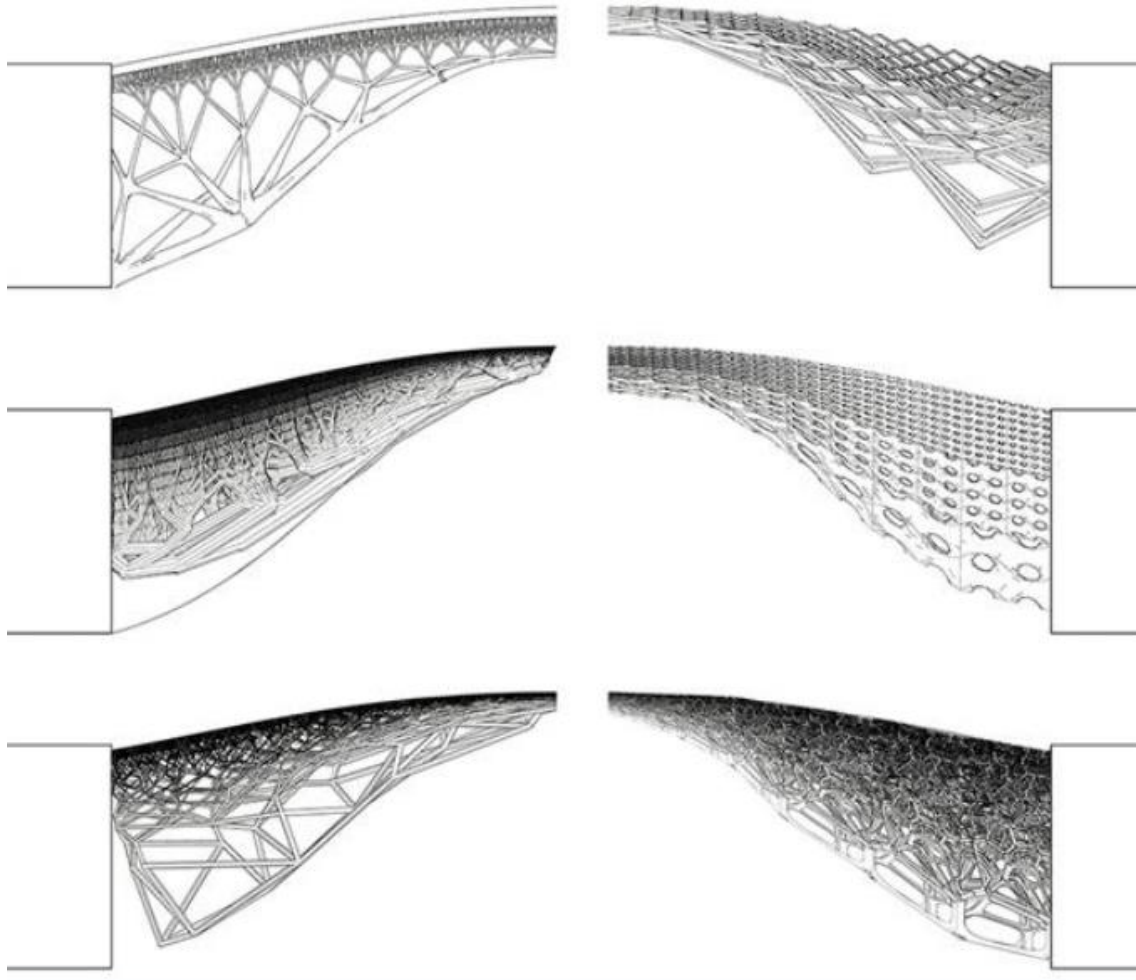
5.1 Jekleni most v Amsterdamu

Eden izmed primerov tiskanja metalnih konstrukcij je jekleni most v Amsterdamu. Mesto je znano po svoji arhitekturi iz 17. stoletja. Prepredeno je s kanali, po katerih se pretaka voda, ozke ulice na obeh bregovih kanala so zaprte za promet, dovoljeno je le za kolesarje in pešce. Pogled na te ulice spominja na pravljico okolje. V takem primerih je novogradnje nujno prilagoditi okolju. S projektom nizozemskega startupa MX3D se na najboljši možen način prepletata tehnologija prihodnosti in bogata kulturna dediščina tega mesta. Na sliki 47 je razvidna lokacija mostu preko kanala [19].



Slika 47: Umestitev novega mostu v okolico [19].

Na obliko mostu sta vplivala dva vidika. Prvi je most čim bolj umestiti v renesančno okolje mesta, drugi pa je pokazati, da s tehnologijo 3D-tiska praktično ni omejitev glede oblike mostu. V 17-tem stoletju so izučeni in izkušeni mojstri morali vse okraske (v takratnem času iz kamnitih blokov) izdelati ročno. Tudi danes bi izvedba takih ornamentov bistveno podražila izvedbo mostu. Podjetje želi pokazati, da s 3D-tehniko taki zahtevni detajli niso več tabu in da bistveno ne podražijo same gradnje. Na sliki 48 so prikazane različne opcije končnega izdelka, ki 3D-tiskalniku ne predstavljajo nikakršnih ovir.



Slika 48: Različne variante končnega izdelka mostu [19]

Zaradi ogromne količine turistov, pešcev in kolesarjev na ulici Red Light District, kjer bo postavljen most, bi bila gradnja mostu na mestu zelo otežena, zato so se v podjetju odločili most natisniti na gradbišču v starem zapuščenem ladijskem doku. Ideja je, da most ločeno začneta tiskati dva robota, vsak na svoji strani in nato na sredini spojita most, kot prikazuje slika 49. Tiskanje naj bi trajalo od tri do štiri mesece, nato pa bo most prestavljen na končno lokacijo. Obiskovalci bodo imeli v tem času vsak petek dostop do gradbišča, kjer si bodo lahko ogledali pionirski projekt tiskanja mostov v naravni velikosti in polni funkcionalnosti. Most naj bi bil predvidoma zgrajen v letu 2017 [19].



Slika 49: Robota ločeno tiskata vsak svojo polovico [19].

Približno osem metrov dolg in štiri metre širok most bo natisnjen iz jekla s pomočjo metode DED. Težava standardnih 3D-tiskalnikov je, da so dimenzije takih tiskalnikov večje od natisnjene izdelka, kar v danih okoliščinah ne bi bilo izvedljivo. V ta namen so v MX3D razvili »out of box« tehnologijo tiskanja, ki jim omogoča praktično neomejene dimenzije končnih produktov ne glede na velikost tiskalnika. Izhajali so iz robotov, ki se množično uporabljajo še posebej v avtomobilski industriji. Naredili pa so dve nadgradnji. Tri-osno tehniko vodenja robota so nadgradili v šest-osno, na konec roke pa so pritrdili napredno varilno glavo. S šest-osno tehniko lahko tiskalnik tiska v vseh smereh in ne tako kot večina standardnih tri-osnih tiskalnikov, ki so omejeni na tri dimenzije, to je naprej-nazaj, levo-desno in gor-dol (slika 50). Specializirana programska oprema, ki natančno krmili in usklajuje robota in varilno glavo, omogoča tisk kovine, plastike in smole. Tiskalnik za tisk poljubnih oblik, tudi previsnih, ne potrebuje dodatnih podpornih struktur. Nosilne in kompleksne strukture lahko natisne s cenovno dostopnimi in trajnimi materiali brez omejitve velikosti in oblike [20].



Slika 50: Tiskalnik za tisk v vseh smereh ne potrebuje dodatnih podpor [21]

Pred samo izvedbo mostu v Amsterdamu pa je podjetje natisnilo testni most (slika 51). Za tisk so uporabili jekleni kompozit, ki so ga razvili na Univerzi v Delft-u. Kompozit prihaja v varilno šobo v obliki filameta in se tam segreje na 1500 °C. Ta tehnologija omogoča, da je vsak sloj popolnoma spojen s predhodno že strjeno podlago. To spajanje dosežejo tako, da rahlo stopijo tudi zadnji natisnjen sloj in ne samo novega. Testi so pokazali, da ima na ta način natisnjen most vsaj 90 % nosilnosti mosta, ki bi bil narejen po standardnih postopkih [22] in [23].



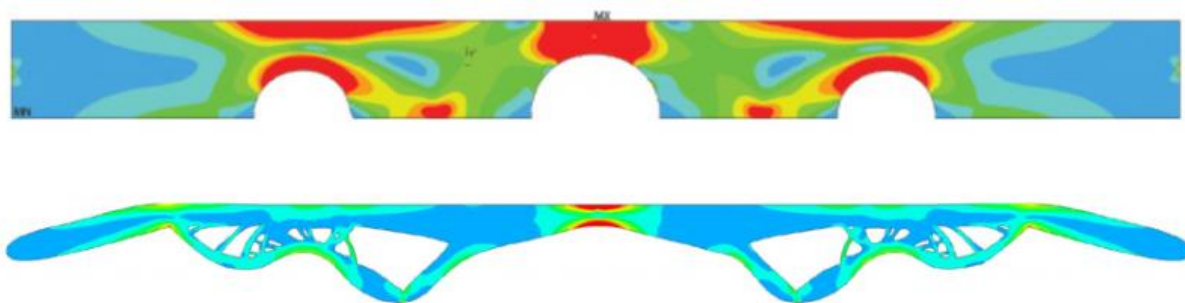
Slika 51: Testni most ima več kot 90 % nosilnosti tradicionalno grajenega mostu [24]

5.1.1 Kovinski konstrukcijski sklopi

Prednosti 3D-tiska pa ni smiselno iskati samo v tisku celotnih konstrukcij, ampak tudi pri posameznih konstrukcijskih sklopih oziroma detajlih. Ne samo, da lahko s tehniko 3D-tiska dosežemo detajle poljubnih oblik, lahko se tudi znebimo nekaterih težav, ki nastanejo zaradi tradicionalnih načinov izvedbe oziroma obdelave detajlov. Ena takih je npr. pojavljanje zaostalih napetosti in deformacij v neposredni bližini zvarov. Poleg omenjenih vidikov pa 3D-tisk pomeni nov pristop k optimiziranju konstrukcij. Ne samo iz konstrukcijskega vidika, 3D-tisk je zanimiv tudi iz vidika povečanja učinkovitosti zaradi zmanjšanja števila korakov izdelave konstrukcijskega sklopa, porabe materiala in potrebe po človeških virih. Svobodna oblika detajla pomeni skoraj neskončne možnosti optimiziranja posameznih detajlov, tako da porabimo čim manj material na mestih, ki so potrebna za nosilnost.

5.1.1.1 Optimizacija nosilca

Zaradi omejenosti oziroma lažje izdelave s tradicionalnimi metodami, se posamezni konstrukcijski elementi obravnavajo kot predmeti pravilnih oblik. Pri računu dejansko konstrukcijo prevedemo na linijski ali ploskovni model. Temu načelu se bolj ali manj podredi tudi samo snovanje konstrukcije oziroma objekta. Težimo k stebrom ali nosilcem pravilnih oblik, ki se stikajo v čim lažje izvedljivih vozliščih. Zaradi tega pojava pogosto pride do križanja želja med arhitekturnim, statičnim in izvedbenim vidikom. S 3D-tiskom pa se napoveduje konec tem omejitvam oziramo težavam. Spodnja slika prikazuje razliko med nosilcem klasične izvedbe in poljubno oblikovanim nosilcem, ki ga lahko odtisnemo z metodo 3D-tiska. Rdeča barva prikazuje mesta z najvišjim nivojem napetosti, modra pa z najnižjim. Iz slike 52 lahko hitro razberemo, da v primeru 3D-tiska porabimo manj materiala, kar pomeni nižjo ceno in lastno težo konstrukcije, po drugi strani pa v nosilcu nastopa manj območij z visokim nivojem napetosti [25].



Slika 52: Optimiziran nosilec s tradicionalno izvedbo (zgoraj) in optimizacija 3D-tiskanega nosilca (spodaj) [25]

Pri optimizaciji oblike posameznih sklopov se je smiselno navezati na oblike, ki jih zasledimo v naravi. Skozi zgodovino so se ohranile anorganske strukture in tudi rastline, katerih oblika, struktura in materialne karakteristike so v optimalnem razmerju. Z vključevanjem računalniških programov v fazo optimizacije in njihovim naglim razvojem so se izboljšali tudi pristopi in tehnike optimiziranja.

Konstrukcije oziroma konstrukcijski sklopi, ki jih optimiziramo, morajo izpolnjevati pogoje nosilnosti, uporabnosti in trajnosti. Vpeljemo neznanke, kot so geometrijske in materialne karakteristike, robne pogoje, konstrukcijski sistem ... Potrebujemo kriterij za ovrednotenje različnih rešitev. Kriterij je lahko različen in ga zapišemo v matematični obliki z namensko, ciljno ali kriterijsko funkcijo, saj potrebujemo merljivi optimum. Z optimalnim dimenzioniranjem dobimo rešitev, ki mora zadoščati vsem trem pogojem, hkrati pa je v nekem pogledu najboljša. To je lahko npr. cena, čas gradnje, lastna teža ...

Zaradi nelinearnosti optimizacijskega problema najugodnejšo obliko konstrukcijskega sklopa iščemo z iteracijsko metodo. Slika 53 prikazuje primer postopka optimiziranja nosilca od začetne predpostavke do končnega rezultata. Predpostavimo določeno obliko in nato optimizacijski algoritem v vsakem naslednjem koraku išče boljše rešitev. S takim načinom lahko pridemo do organskih oblik z zelo kompleksno geometrijo. Da pa ima cel postopek računalniškega optimiziranja smisel, je potrebno razviti tudi tehnike gradnje, da bodo sposobne izvesti take oblike. Uporaba 3D-tiska pa ima prednost ravno v izdelavi poljubnih geometrijskih oblik.



Slika 53: Postopek iteracijskega optimiziranja nosilca [25]

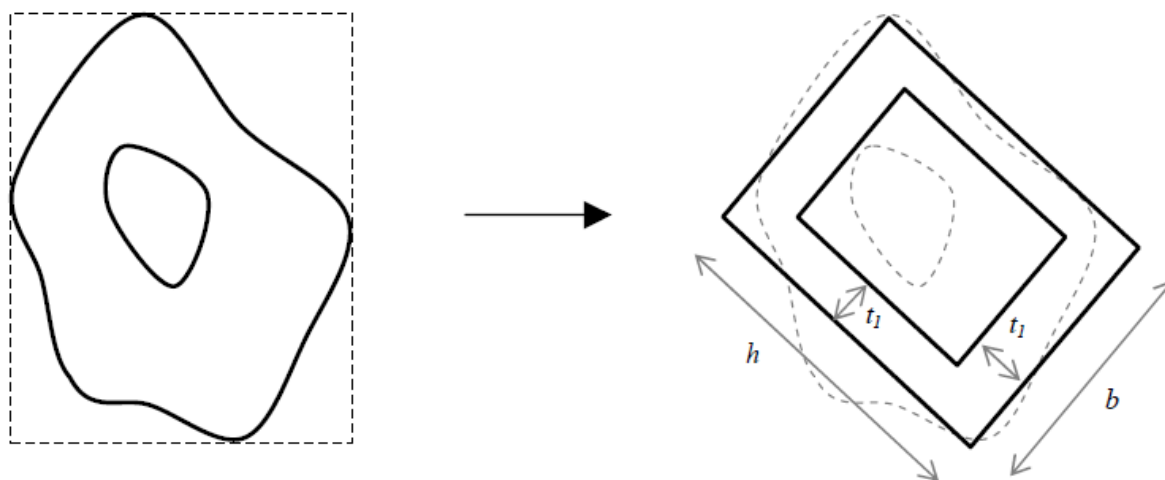
Topološka optimizacija oziroma optimizacija oblike že izvaja in ni nekaj novega, se pa zaradi možnosti tiska poljubnih oblik bistveno spremenijo kriteriji optimizacije. Glede na različne omejitve, med katerimi je tudi možnost izvedbe, se definira do katerega koraka je optimizacija še smiselna. V kolikor določene oblike nismo sposobni izvesti, je nesmiselno topološko optimizacijo izvajati do te stopnje.

Pri klasični optimizaciji konstrukcij, je postopku topološke optimizacije sledila še optimizacija parametrov (slika 54). Zaradi omejenosti oblik pri postopku doseganje tehnologije gradnje je bila optimizacija parametrov še toliko bolj nujna.



Slika 54: Prikaz poteka optimizacije [42]

Ravno pri jeklenih konstrukcijah je težava še bolj izrazita, saj je večina konstrukcij narejenih iz ravnih pločevin. S topološko optimizacijo dobljeno obliko je bilo potrebno poenostaviti in opisati z le nekaj parametri (slika 55). S tem smo omejili optimizacijo zaradi nezmožnosti končne izdelave [42]. Seveda s tem nismo dobili optimalne oblike v taki meri, kot si jo lahko privoščimo s svobodno obliko, ki jo ponuja 3D-tisk.



Slika 55: Optimizacija parametrov zaradi omejene možnosti izdelave [42]

Potrebno pa se je zavedati, da gradbene konstrukcije optimiziramo v nelinearnem območju. Končni rezultat je visoko nosilna konstrukcija, ki pa je lahko tudi zelo občutljiva glede stabilnosti zaradi nepopolnosti. Pri nosilnosti lahko tako pridobimo veliko, vendar je ta ugodni učinek lahko zaradi občutljivosti mejne obtežbe na imperfekcijo občutno zmanjšan.

5.1.1.2 Optimizacija vozlišča

Kljub temu, da je do zahtevnih oblik enostavneje priti z metodami 3D-tiska, se gradbeništvo veliko počasneje razvija v to smer, kot pa na primer medicina in letalska ter avtomobilska industrija. Seveda je možno razloge za to iskati v dimenzijah gradbenih objektov, vendar tudi pri izvedbi detajlov gradbeništvo ne sledi nekaterim drugim panogam. Iz podatka, da se trenutno v gradbeništvo in arhitekturi uporablja samo 3 % celotne proizvodnje tehnologije 3D-tiska, pa še to je velik del izdelava arhitekturnih maket za lažjo predstavitev končnega projekta, lahko razberemo, da je na tem področju potrebno vložiti še veliko energije v raziskave in razvoj. Na podlagi te ugotovitve so se v britanskem podjetju ARUP odločili narediti raziskavo optimizacije vozlišča jeklene palične konstrukcije, ki bi ga bilo v nasprotju s tradicionalnimi tehnikami izvedbe enostavno natisniti z dodajalnimi metodami [25].

Podjetje že od leta 2008 sodeluje pri dizajniranju kompleksnejših paličnih konstrukcij, ki služijo kot ulična razsvetljava. V svoji raziskavi so opravili optimizacijo na eni izmed svojih že obstoječih konstrukcij v Hagu (slika 56). Konstrukcija je zasnovana tako, da se notranji tlačno obremenjeni elementi med sabo ne stikajo, ampak so povezani samo z natezno obremenjenimi kabli, ki dajejo konstrukciji prostorsko dimenzijo. Tlačeni elementi so namenoma različnih oblik, da je sama konstrukcija videti bolj veličastno. Zaradi raznolikosti se pojavi ogromno različnih možnih kotov in položajev posameznih kablov. To pomeni, da je praktično vsako vozlišče drugačno [26].



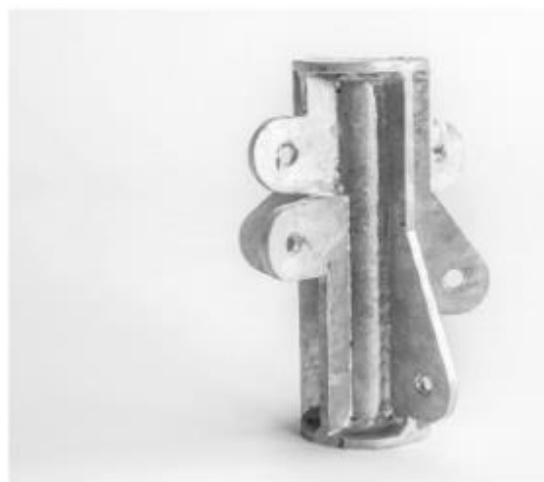
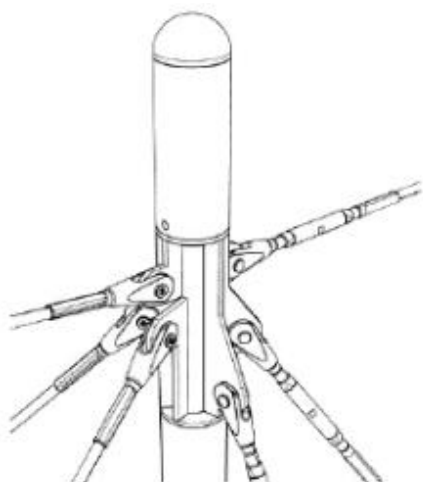
Slika 56: Imitacija ulične razsvetljave v Hagu [26]

Raziskava oblike vozišč je razdeljena na tri dele:

- tradicionalno vozlišče: vozlišče je zasnovano in izvedeno s tradicionalnimi metodami;
- 3D-vozlišče 1.0: s tehnologijo DMLS natisnjeno vozlišče, ki ima optimizirano obliko na podlagi zahtev, ki jih ima tradicionalno vozlišče;
- 3D-vozlišče 2.0: s tehnologijo DMLS natisnjeno vozlišče, ki ima svobodno optimizirano obliko [25].

Tradicionalno vozlišče

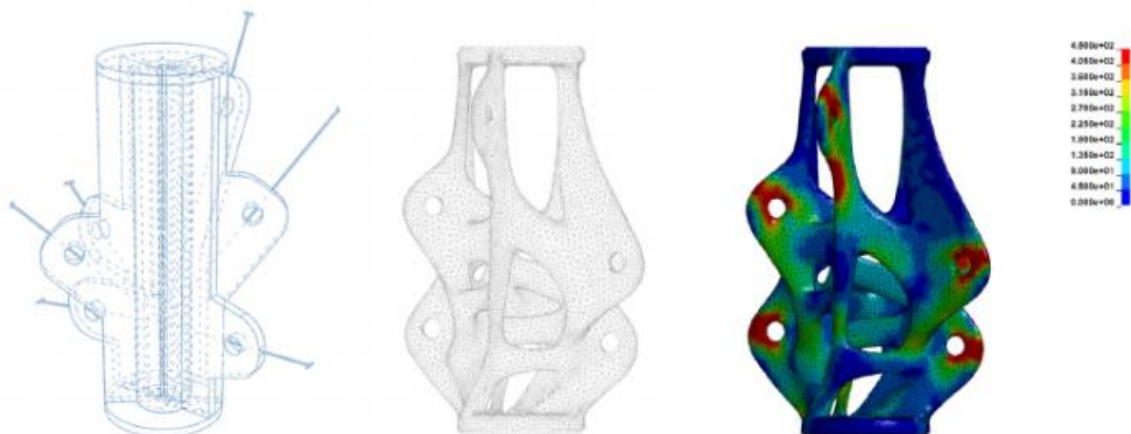
Konstrukcija je sestavljena iz 1200 rahlo različnih vozlišč. Vsa vozlišča so sestavljena iz šest do sedem unikatnih pločevin, ki so navarjene na centralno cev v različnih smereh (slika 57). Na koncu vsakega vozlišča, ki tehta približno 20 kilogramov, je nameščena lučka. Tradicionalna izvedba tako velikega števila različnih detajlov je zelo zahtevna in cenovno ter časovno neugodna.



Slika 57: Detajl jeklenega vozlišča s tradicionalnim pristopom [25]

3D-vozlišče 1.0

3D-vozlišče 1.0 je zasnovano na podlagi tradicionalnega vozlišča tako, da zadostuje vsem funkcionalnim pogojem. Izhodišče oblikovnega optimiziranja so bila prostornina materiala in robni pogoji kot pri tradicionalnem vozlišču. Kar pomeni, da je bila pritrnitev kabla na vozlišče na identičnem mestu kot pri originalu, enaka pa je bila tudi orientacija prijemašča. Optimizacija je nato potekala v smeri minimalne teže detajla na podlagi von Misesovega kriterija plastičnega tečenja tako, da se material ohrani samo na mestih, kjer je to potrebno. Slika 58 prikazuje postopek iterativnega optimiziranja od vhodnih nastavitvev (levo) do končne oblike (sredina) in izračun napetosti po von Misesu [25].



Slika 58: 3D-vozlišče 1.0: vhodni podatki (levo), optimizirana oblik (sredina), napetosti po von Misesu (desno) [25]

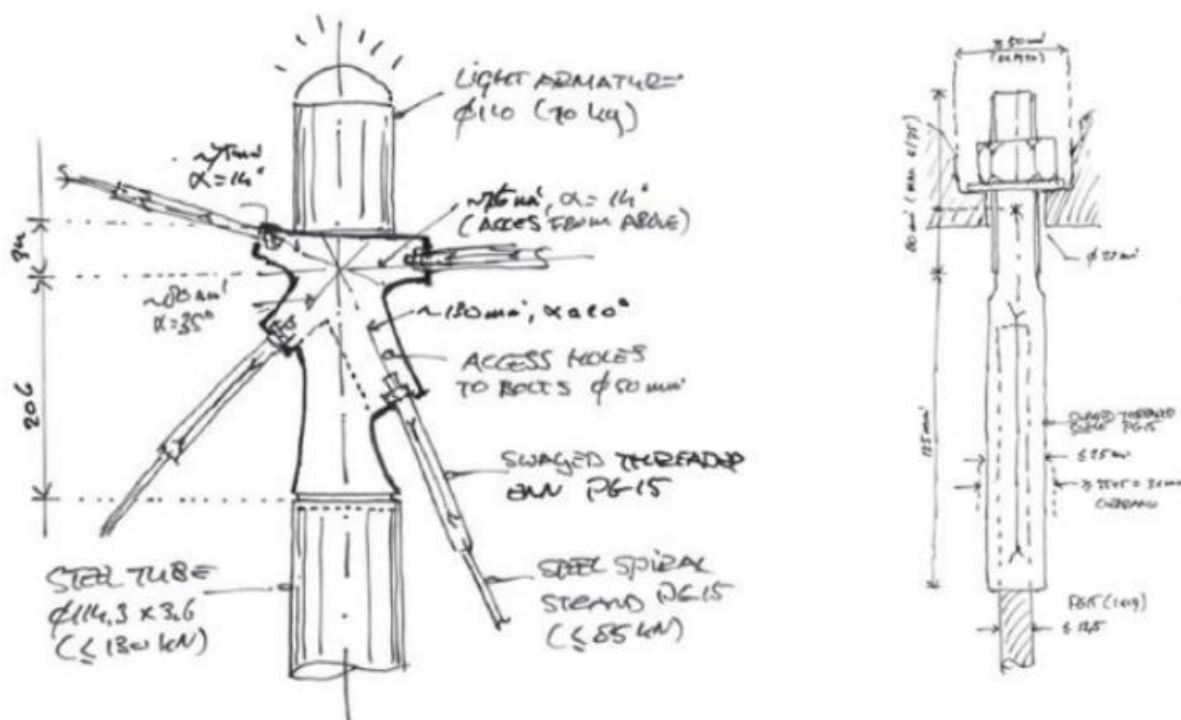
Iteracija optimiziranja se v nekem trenutku zaključi, ker so nadaljnji koraki izven dovoljenih meja. Te meje moramo poznati in jih prilagoditi, če je to mogoče. V primeru DMLS tehnologije tiskanja jeklenih konstrukcij lahko ta omejitev pomeni dodatne podpore pri samem tisku konstrukcije in ne zaradi prekoračenih zahtev v končni funkcionalni obliki detajla. V takih primerih lahko postopamo na dva načina. Prvi je ta, da v fazi tiska načrtno uporabimo podporne strukture, ki imajo samo začasno funkcijo in jih po tisku odstranimo. Drugi način, ki je bil uporabljen v tej raziskavi, pa je, da te potrebne podpore tam, kjer je mogoče, vključimo v končni izdelek in jih po tisku ne odstranjujemo, saj postanejo eno s samim izdelkom. V teh primerih dobimo nekoliko drugačno obliko, kot če podpore odstranjujemo, a geometrija sama sebi predstavlja podporno strukturo. Na sliki 59 je prikazano, kako so podporne strukture zajete v končni izdelek. Kljub temu je teža takega izdelka, ki izpolnjuje vse zahteve originalnega detajla, samo 14 kilogramov, kar pomeni 70 % teže vozlišča, izdelanega po tradicionalni metodi [25].



Slika 59: Z rdečo barvo označene podpore (levo) so vključene v končni izdelek (desno) [25].

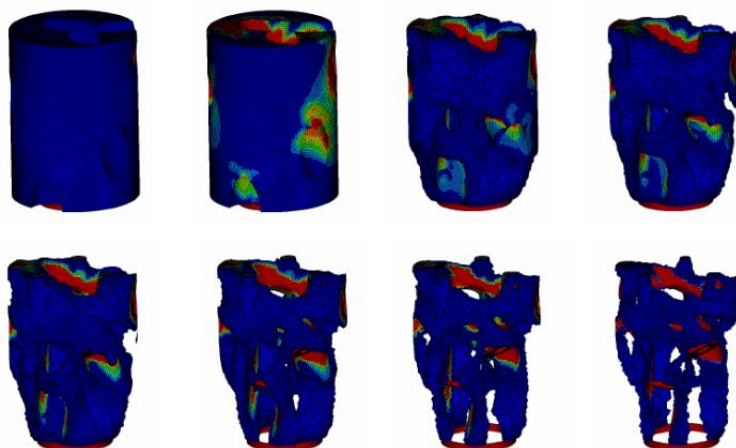
3D-vozlišče 2.0

3D-tehnologije tiska omogočajo popolnoma svobodno obliko, zato je smiselno, da se z optimizacijo ne ustavimo na tej točki, ampak poskusimo najti tisto najboljšo končno obliko detajla, ki izpolnjuje pogoje nosilnosti in uporabnosti. S pomočjo programa Rhino/Grasshopper je bil izdelan digitalni model. Za izhodišče je bila vzeta oblika 3D-vozlišča 1.0, prijemališča kablov na detajlu pa so bila določena tako, da so predvidene odprtine prereza 50 mm za pritrditev kabla. Definirane so bile točke, iz katerih prihajajo kabli do vozlišča in zgornji ter spodnji detajl vozlišča, namenjen pritrditvi tlačnega elementa. Ponovno je bil končni cilj čim nižja teža ob nespremenjeni funkcionalnosti detajla. Ker pa standardni način pritrditve kabla na vozlišče zahteva veliko prostora in s tem veliko oddaljenost stika od središča osi samega detajla, je bilo smiselno zasnovati način pritrditve kablov znotraj osnovnega volumna vozlišča, kot prikazuje slika 60 [26].



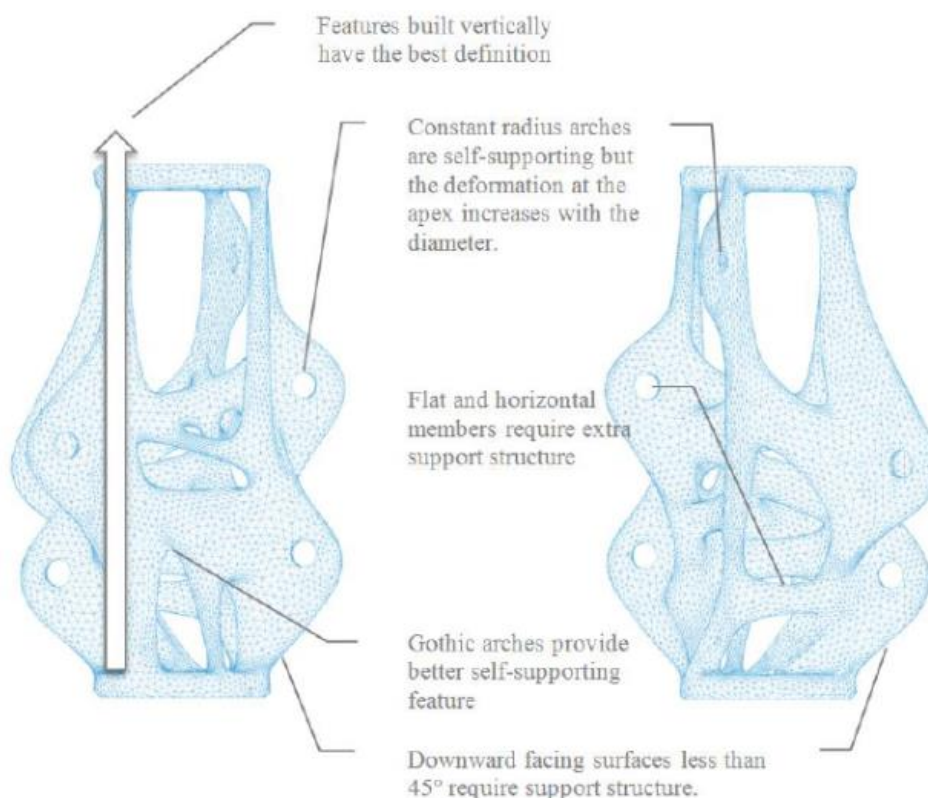
Slika 60: Vijačenje kablov znotraj osnovnega volumna vozlišča [26]

S postavljenim izhodiščem je bil postopek optimizacije oblike opravljen s programom OptiStruct (Altair Optistruct v11). Materialne karakteristike nerjavečega jekla so bile nastavljene na omejitev napetosti 400 MPa, kar pomeni 80 % maksimalne natezne trdnosti materiala. Ponovno je bil v analizi upoštevan von Misesov kriterij plastičnega tečenja. Na sliki 61 je prikazan iteracijski postopek optimiziranja. Začetno stanje je poln valj in z vsakim korakom se neobremenjena območja odstranijo, dokler ne pridemo do končne organske oblike.



Slika 61: Iteracijski postopek optimizacije detajla 3D-vozišče 2.0 [25]

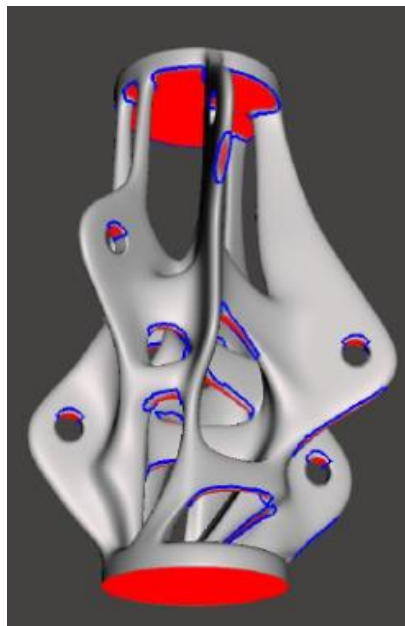
Rezultat topološke optimizacije je groba oblika, ki pa jo je potrebno še prilagoditi za postopek tiska. Z uporabo dodatne programske opreme prevedemo in prilagodimo obliko za končno izdelavo. Pri tehnologiji DMLS moramo biti pozorni na naslednje vidike izdelave (slika 62).



Slika 62: Prikaz glavnih vidikov, na katere moramo biti pozorni pri izdelavi vozlišča [25].

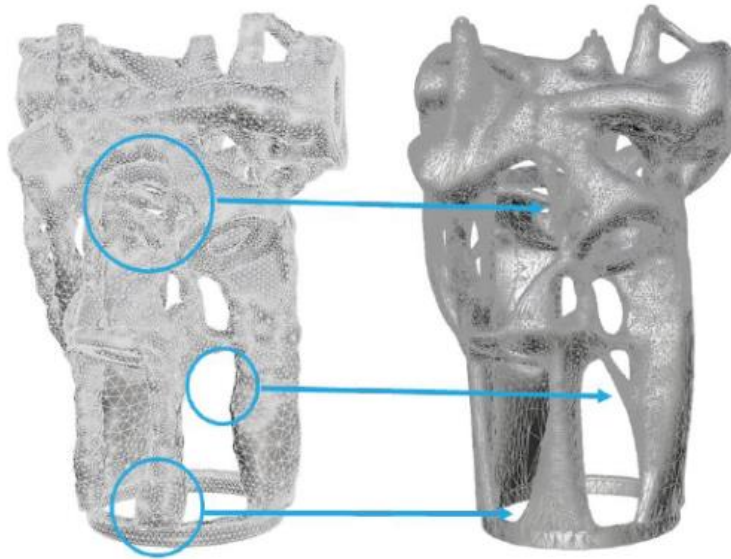
Pomembna je smer tiskanja končnega predmeta. V tem primeru je bila izračunana najboljša smer od spodnjega do zgornjega roba vozlišča. Previsni deli, ki imajo kot manjši od 45° glede

na vodoravno linijo, potrebujejo med samim tiskanjem podporne strukture. Ker pa so te podpore težko odstranljive, je priporočljivo obliko prilagoditi tako, da na mestih, kjer je to le mogoče, ne uporabimo podpor. Tako kot je že omenjeno (slika 59) postopamo tako, da podpore vključimo v sam izdelek. Vedno pa ni mogoče odpraviti vseh detajlov, ki potrebujejo podpiranje. Na sliki 63 so z rdečo barvo označena mesta, kjer se ni bilo mogoče izogniti podpiranju previsnih struktur med fazo tiska, razen na sredini zgornjega in spodnjega detajla [25].



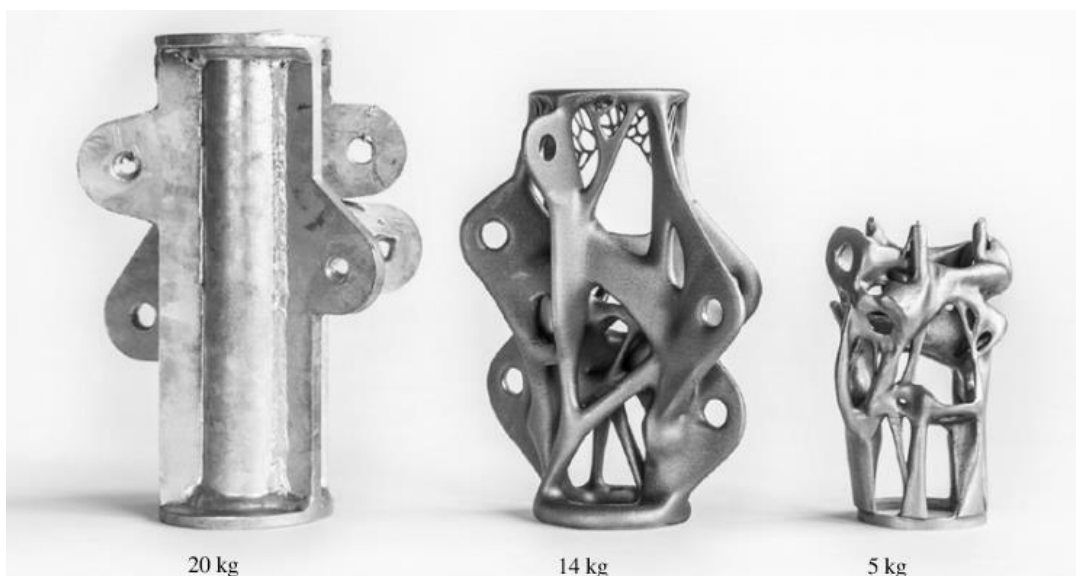
Slika 63: Prikaz previsnih struktur, označenih z rdečo barvo [25]

Pri prilagoditvi iz topološko optimizirane v obliko, primerno za tisk, je potrebno biti pazljiv, da s prilagajanjem ne vplivamo na poslabšanje funkcionalnosti izdelka. Na sliki 64 je prikazana razlika med topološko optimiziranim in za tisk prirejenim vozliščem.



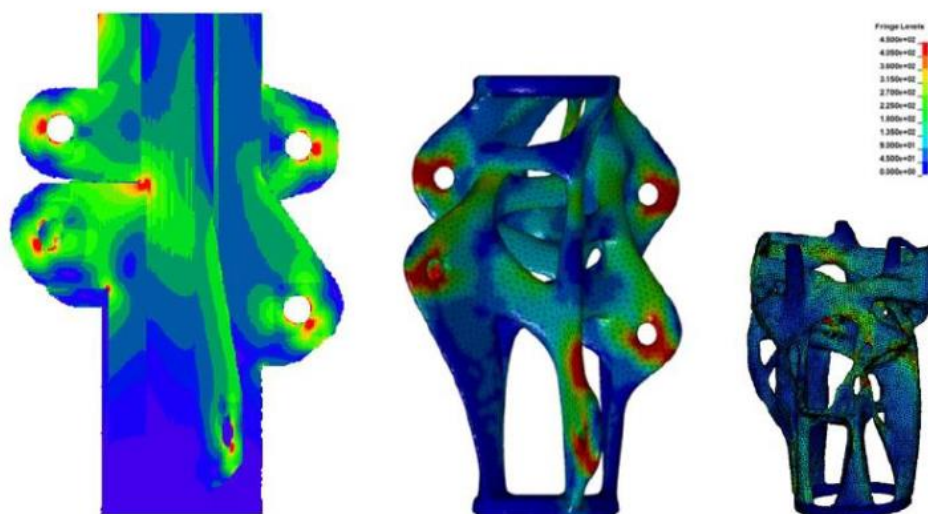
Slika 64: Rezultat topološke optimizacije (levo), prilagojen detajl za tisk (desno) [25]

Zaključki optimizacije vozlišča paličnega sistema ulične razsvetljave kažejo, da je mogoče popolnoma enako funkcionalnost vozlišča doseči z dovršenimi detajli, ki so mnogo lažji od standardnih detajlov, kot prikazuje slika 65.



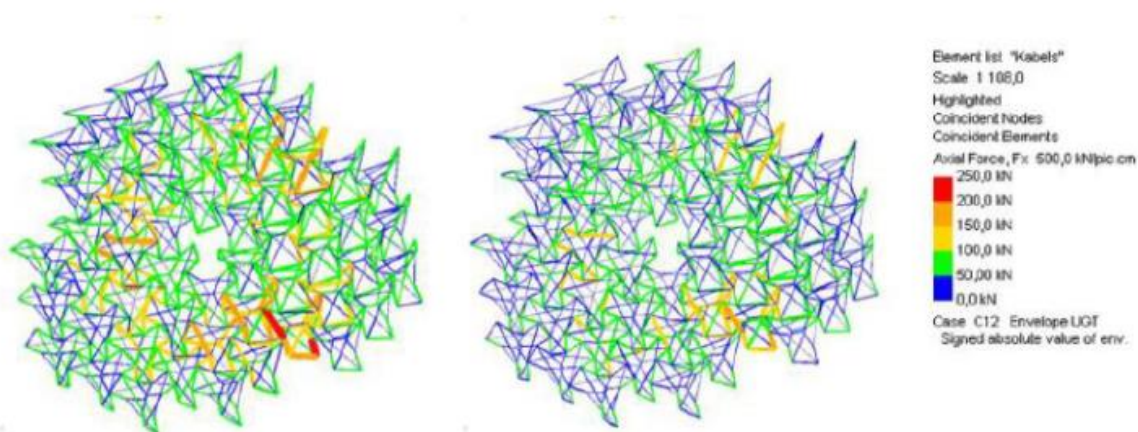
Slika 65: Primerjava detajlov: tradicionalni (levo), optimiziran na podlagi tradicionalnega (sredina) in poljubna oblika (desno) [25].

Ne samo, da se zmanjša teža posameznega detajla, tudi koncentracije napetosti znotraj vozlišča so po optimizaciji manjše, kot prikazuje slika 66.



Slika 66: Potek napetosti znotraj posameznih detajlov [26]

Tako se z možnostjo izvedbe poljubne oblike detajla in optimizacijo zmanjša teža posameznega detajla iz 20 kilogramov na 5 kilogramov, kar pomeni za 75 %. Ob upoštevanju, da je pri obravnavani konstrukciji 1200 vozlišč, dobimo samo z uporabo optimiziranih vozlišč konstrukcijo lažjo za 18 000 kilogramov. Ne samo, da je nižja lastna teža konstrukcije in s tem zmanjšanje napetosti v posameznih elementih, kot prikazuje slika 67, občutno se zniža tudi cena, saj porabimo veliko manj materiala. Kot je bilo že omenjeno – ne samo, da je zmanjšana potreba po materialu, tehnike 3D-tiska tudi pri sami izdelavi proizvedejo manj odpadnega materiala, kar pomeni dvakratni učinek.



Slika 67: Osne sile v konstrukciji: standardni postopek (levo), po opravljeni optimizaciji (desno) [26]

6 ZAKLJUČEK

V človeški naravi je vedno prisotna želja po nečem novem, boljšem, drugačnem oziroma celo unikatnem. Z omejenostjo materialov in tehnologij za izdelavo končnega izdelka lahko hitro naletimo na oviro, ko je doseganje teh želja oteženo. 3D-tisk je zagotovo tehnologija, ki odpira nove možnosti in tako postavlja temelje in smernice za nadaljnji razvoj različnih panog. 3D-tisk ni nova tehnologija, se pa je v zadnjih letih naglo razvijal in tako že postal v nekaterih panogah nepogrešljiv za izdelavo produktov. Zaradi njegovih prednosti ga že intenzivno uporabljajo v letalski industriji in medicini. V gradbeništvo pa se prebija nekoliko počasneje. Najverjetneje je razlog za to iskati v dimenzijah gradbenih konstrukcij. Z razvojem in pocenitvijo tiskalnikov in vhodnega materiala se 3D-tisk vedno bolj približuje tudi zasebnim uporabnikom.

Strokovnjaki napovedujejo, da bo 3D-tisk povzročil industrijsko in trgovinsko revolucijo, podobno kot je internet vplival na komunikacijo.

Pri gradnji objektov smo neprestano prisiljeni iskati cenejše, lažje in bolj kakovostne izvedbe. Velik potencial predstavlja tehnologija 3D-tiska. Utemeljitev te trditve je bila predmet tega diplomskega dela. Predstavljene so bile različne tehnologije 3D-tiska in njihove možnosti uporabe v gradbeništvo. Največji poudarek je bil narejen na tiskanju kovinskih konstrukcijskih sklopov. Na primeru jeklenega mostu je prikazana izvedba premostitvenega objekta s tehnologijo 3D-tiska. Utemeljena je tudi upravičenost izbire dodajalne tehnologije in njene prednosti pred klasičnimi metodami gradnje.

Na palični konstrukciji razsvetljave je ponazorjena svobodna oblika izdelave, ki je ena bistvenih odlik 3D-tiskanja. Ta svobodna oblika nima samo oblikovalskega učinka, poudarek je na topološki optimizaciji vozlišča za doseg maksimalne mejne nosilnosti pri minimalni porabi materiala. Na tak način lahko izdelamo vozlišče enake funkcionalnosti kot z uveljavljenimi tehnikami gradnje, ki pa ima kar 75 % nižjo težo. Pri 1200 vozliščih omenjene konstrukcije to znaša 18 ton. Taka izboljšava predstavlja pravo revolucijo v projektiranju in izvedbi gradbenih konstrukcij. Potrebno se je zavedati, da lahko pri nekaterih konstrukcijah lastna teža predstavlja tudi več kot 70 % celotne nosilnosti konstrukcije. Veliki lastni teži so podvržene predvsem betonske konstrukcije.

Tehnologije 3D-tiska še posebej pridejo do izraza pri manjših nakladah in unikatnih izdelkih, kar gradbene konstrukcije zagotovo so. Pri sami izdelavi končnega izdelka se z dodajalnimi metodami proizvede veliko manj odpadkov, manjša pa je tudi poraba energije, kar znatno

priporo k varovanju okolja. Potreba po človeški delovni sili se občutno zmanjša, s tem pa tudi število nepravilnosti, ki so posledica človeških napak.

Vse več je tudi raziskav, kako s pomočjo 3D-tiska natisniti objekte tudi izven meja našega planeta. S pomočjo vesoljskih agencij se razvijajo možnosti tiskanja pristajalnih ploščadi in bivanjskih objektov na Luni z uporabo tam prisotnega materiala. Raziskovalci so prepričani, da je samo še vprašanje časa, kdaj bo to tudi izvedljivo. Uporaba 3D-tiska v gradbeništvu ni samo iluzija, ampak odpira popolnoma nove možnosti gradnje.

7 VIRI

[1] Muck, T., Križanovskij, I. 2015. 3D-tisk. Ljubljana, Pasadena: 221 str.

[2] Kaj je 3D tiskanje in kako deluje 3D FDM tiskalnik za domačo rabo? 3D tisk. 2015.
<http://www.3dtisk.si/kaj-je-3d-tiskanje-in-kako-deluje-3d-tiskalnik-za-domaco-rabo/>
(Pridobljeno 14. 5. 2016.)

[3] Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., Zhang, S., Zavattieri, P. D. 2015. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*. 69: 65–89.
doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001

[4] Filabot: A Waste Plastic to Filament Recycling Machine. 3D Print Headquarters. 2015.
<http://3dprintheq.com/filabot-waste-plastic-to-filament-recycling-machine/>
(Pridobljeno 25. 5. 2016.)

[5] Gebler, M., Uiterkamp, A. J.M. S., Visser. C. 2014. A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy*, 74: 158–167.
doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.033

[6] Additive manufacturing vs subtractive manufacturing. HDimagelib. 2015.
<http://hdimagelib.com/additive+manufacturing+vs+subtractive+manufacturing>
(Pridobljeno 22. 5. 2016.)

[7] 3D-tiskanje napoveduje novo industrijsko revolucijo. RTV Slovenija. 2015.
<http://www.rtv slo.si/svet/3d-tiskanje-napoveduje-novo-industrijsko-revolucijo/355172>
(Pridobljeno 22. 5. 2016.)

[8] 3ders.org. 2015.
<http://www.3ders.org/articles/20151208-ic-berlin-launches-bold-3d-printed-i-see-exoskeleton-eyewear-collection.html> (Pridobljeno 17. 5. 2016.)

[9] Pinterest. 2015.
<https://www.pinterest.com/pin/541628292667667834/> (Pridobljeno 22. 5. 2016.)

[10] RepRap project. Wikipedia. 2016.

https://en.wikipedia.org/wiki/RepRap_project#/media/File:RepRap_%27Mendel%27.jpg

(Pridobljeno 12. 6.2016.)

[11] Le, V.-T., Paris, H., Mandil, G. 2015. Using additive and subtractive manufacturing technologies in a new remanufacturing strategy to produce new part from End-of-Life parts.

22. Congres Francais de Mecanique. 24. – 28. avgust 2015. Lyon.

<http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/57294/68452.pdf?sequence=1>

(Pridobljeno 12. 6. 2016.)

[12] Vrhnjak, S. 2015. 3D modeliranje in tisk namiznega stojala za mobilni telefon. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta: 40 str.

[13] Murphy, S.V., Atala, A. 2014. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nature biotechnology*. 32: 773–785.

doi:10.1038/nbt.2958

[14] Gorše, L., 2014. Uporaba 3D-tiska v gradbeništvu. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 71 str.

[15] Letcher, T., Waytashek, M. 2014. Material property testing of 3D-printed specimen in PLA on an entry-level 3D printer. Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress Exposition. 14.–20. november 2014. Montreal. (draft)

https://www.researchgate.net/publication/272623242_Material_Property_Testing_of_3D-Printed_Specimen_in_PLA_on_an_Entry-Level_3D_Printer (Pridobljeno 3. 7. 2016.)

[16] What Material Should I Use For 3D Printing?. 3dprintingforbeginners. 2013.

<http://3dprintingforbeginners.com/filamentprimer/> (Pridobljeno 3. 7. 2016.)

[17] Tymrak, B.M., Kreiger, M., Pearce, J.M. 2014. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*. 58: 242–246.

doi:10.1016/j.matdes.2014.02.038

[18] ABS/PLA: 3D Printer Filaments Explained & Compared. All3dp. 2016.

<https://all3dp.com/pla-abs-3d-printer-filaments-compared/> (Pridobljeno 7. 7. 2016.)

[19] Construction of world's first 3D printed metal bridge begins today in Red Light District of Amsterdam. 3ders. 2015.

<http://www.3ders.org/articles/20151016-worlds-first-3d-printed-metal-bridge-begins-red-light-district-of-amsterdam.html> (Pridobljeno 11. 6. 2016.)

[20] These Robots Will 3D Print a Steel Bridge Over a Canal in Amsterdam. Singularityhub. 2015.

<http://singularityhub.com/2015/06/21/these-robots-will-3d-print-a-steel-bridge-over-a-canal-in-amsterdam/> (Pridobljeno 11. 6. 2016.)

[21] Grace and robotic metal 3d printing – Joris Laarman's mx3d-metal. 3dprinterworld. 2014.

<http://www.3dprinterworld.com/article/grace-and-robotic-metal-3d-printing-joris-laarmans-mx3d-metal> (Pridobljeno 11. 6. 2016.)

[22] This Robot Can 3-D Print A Steel Bridge In Mid-Air. Fastcodesign. 2015.

<http://www.fastcodesign.com/3047350/this-robot-can-3-d-print-a-steel-bridge-in-mid-air> (Pridobljeno 11. 6. 2016.)

[23] Cross this bridge when you come to it. NRGMagazine. 2015.

<http://www.nrgm.nl/features/cross-this-bridge-when-you-come-to-it/> (Pridobljeno 12. 6. 2016.)

[24] MX3D teams with Heijmans to build world's first 3D printed steel bridge in central Amsterdam. 3ders. 2015.

<http://www.3ders.org/articles/20150612-mx3d-teams-with-heijmans-to-build-world-first-3d-printed-steel-bridge-in-central-amsterdam.html> (Pridobljeno 11. 6. 2016.)

[25] Galjaard, S. 2015. Topology Optimisation for Steel Structural Design with Additive Manufacturing.

https://www.researchgate.net/publication/283634763_Topology_Optimisation_for_Steel_Structural_Design_with_Additive_Manufacturing (Pridobljeno 19. 7. 2016.)

[26] Galjaard, S. 2015 Optimizing Structural Building Elements in Metal by using Additive Manufacturing. IASS Symposium. 17. – 20. avgust 2015. Amsterdam.

https://www.researchgate.net/publication/283634852_Optimizing_Structural_Building_Elements_in_Metal_by_using_Additive_Manufacturing (Pridobljeno 19. 7. 2016.)

[27] DUS Architects. 2016.

<http://www.dusarchitects.com/projects.php?categorieid=publicbuildings>

(Pridobljeno 19. 7. 2016.)

[28] 3D Print Homes International Launches Crowdfunding Campaign to 3D Print Houses for the World's Homeless. 3dprint.com. 2014.

<https://3dprint.com/23668/3d-print-homes-homeless/> (Pridobljeno 19. 7. 2016.)

[29] Freeform concrete innovation by bruil changing the face of architecture 4. Materia. 2016.

<http://materia.nl/article/freeform-concrete-innovation-by-bruil-changing-the-face-of-architecture/freeform-concrete-innovation-by-bruil-changing-the-face-of-architecture-4/>

(Pridobljeno 24. 7. 2016.)

[30] Contour crafting. Civilengg.seminar. 2016.

<http://civilenggseminar.blogspot.si/2016/06/contour-crafting.html> (Pridobljeno 24. 7. 2016.)

[31] Sharma, P. 2015. Automated construction by contour crafting. Journal of The International Association of Advanced Technology and Science.16: 3347–4482.

<http://www.jiaats.com/Journals-Pdf/June-2015/Jcme/Jcme-1.pdf> (Pridobljeno 2. 8. 2016.)

[32] VG-Kunst. 2015.

<http://www.vg-kunst.de/unternehmen/wissenswertes-download-portal/>

(Pridobljeno 25. 7. 2016.)

[33] Material Jetting. Dreams. 2015.

<http://www.me.vt.edu/dreams/material-jetting/> (Pridobljeno 2. 8. 2016.)

[34] Binder Jetting. Dreams. 2015.

<http://www.me.vt.edu/dreams/binder-jetting/> (Pridobljeno 2. 8. 2016.)

[35] Material advances in metal 3D printing. Make parts fast. 2015.

<http://www.makepartsfast.com/material-advances-in-metal-3d-printing/>

(Pridobljeno 2. 8. 2016.)

[36] The efesto 557 is an enormous metal printing phenomenon. 3dprinterworld. 2014.

<http://www.3dprinterworld.com/article/efesto-557-enormous-metal-printing-phenomenon>

(Pridobljeno 7. 8. 2016.)

- [37] About Additive Manufacturing. Loughbrough University. 2015.
<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/> (Pridobljeno 7. 8. 2016.)
- [38] Selective Laser Sintering. 3dsystems. 2015.
<http://www.3dsystems.com/resources/information-guides/selective-laser-sintering/sls>
(Pridobljeno 7. 8. 2016.)
- [39] Sintranje. Wikipedija. 2016.
<https://sl.wikipedia.org/wiki/Sintranje> (Pridobljeno 7. 8. 2016.)
- [40] Direct Metal Laser Sintering. Custompart.net. 2015.
<http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering> (Pridobljeno 1. 8. 2016.)
- [41] Hiemenez, J. 2007. Electron beam melting.
<http://www.asminternational.org/documents/10192/1882071/amp16503p045.pdf/d03429d3-895c-4403-8f84-ec33f3a9d172> (Pridobljeno 1. 7. 2016.)
- [42] Kocjan, M. 2008. Določevanje optimalne zasnove konstrukcijskih elementov. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 82 str.
- [43] The Difference Between 3D Fabrication and 3D Construction. Fabbaloo. 2015.
<http://www.fabbaloo.com/blog/2015/7/5/the-difference-between-3d-fabrication-and-3d-construction> (Pridobljeno 1. 7. 2016.)
- [44] Will 3D Printed Homes Be Viable? Fabbaloo. 2015.
<http://www.fabbaloo.com/blog/2015/3/1/will-3d-printed-homes-be-viable> (Pridobljeno 1. 7. 2016.)
- [45] 3D Printing in Shipbuilding. Waveform. 2015.
<http://blogs.ssi-corporate.com/waveform/2015/technology/3d-printing-in-shipbuilding/>
(Pridobljeno 22. 6. 2016.)
- [46] Exclusive: How Winsun Stole IP from Contour Crafting and Is "Faking" Their 3D Printed Homes & Apartments. 3Dprint.com. 2015.
<https://3dprint.com/57764/winsun-3d-print-fake/> (Pridobljeno 9. 8. 2016.)

[47] 3D house tech. Winsun. 2015.

<http://www.yhbm.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=68&id=65> (Pridobljeno 1. 8. 2016.)

[48] Shanghai-based WinSun 3D Prints 6-Story Apartment Building and an Incredible Home. 3Dprint.com. 2015.

<http://3dprint.com/38144/3d-printed-apartment-building/> (Pridobljeno 1. 8. 2016.)

[49] Zhang, J., Khoshnevis, B. 2015. Selective Separation Sintering (SSS) A New Layer Based Additive Manufacturing Approach for Metals and Ceramics. Sffsymposium.

<http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2015/2015-6-Zhang.pdf> (Pridobljeno 12. 6. 2016.)

[50] New 3D printing process could lead to construction on Mars and the Moon. USC News. 2016.

<https://news.usc.edu/97707/new-3-d-printing-process-could-lead-to-construction-on-mars-and-the-moon/> (Pridobljeno 12. 8. 2016.)

[51] Ekstrudamble.Me. 2013.

<http://www.extrudable.me/2013/12/17/highqualityultimaker2/> (Pridobljeno 17. 8. 2016.)

[52] Stratasys. 2016.

<http://blog.stratasys.com/2015/08/06/honda-3d-printed-prototypes/> (Pridobljeno 17. 8. 2016.)

[53] Explore 3Dprinted Architecture, 3D Printer and more. Pinterest.com. 2015.

<https://www.pinterest.com/pin/522487994247665941/> (Pridobljeno 17. 8. 2016.)

[54] 3D Printed Guitar. Reddit. 2014.

https://www.reddit.com/r/pics/comments/1x7bza/3d_printed_guitar/ (Pridobljeno 17. 8. 2016.)

[55] The descent into genius of Enrico Dini. 3D printer world. 2013.

<http://www.3dprinterworld.com/article/descent-into-genius-enrico-dini> (Pridobljeno 29. 7. 2016.)

[56] Stratasys: 3D Printing Solutions. 2016.

<http://www.stratasys.com/materials> (Pridobljeno 05.08.2016.)