

Utjecaj parametara ispisa (ispunjenosti) na žilavost epruveta izrađenih FDM tehnologijom

Trivić, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:056303>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-08**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
Stručni studij Strojarstva

Filip Trivić

**UTJECAJ PARAMETARA ISPISA
(ISPUNJENOSTI) NA ŽILAVOST
EPRUVETA IZRAĐENIH FDM
TEHNOLOGIJOM**

**The effect of print parameters (infill) on
the toughness of specimens produced
by FDM technology**

Završni rad

Nikola Šimunić, mag.ing.mech.

Karlovac, 2018.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
Stručni studij Strojarstva

Filip Trivić

**UTJECAJ PARAMETARA ISPISA
(ISPUNJENOSTI) NA ŽILAVOST
EPRUVETA IZRAĐENIH FDM
TEHNOLOGIJOM**

**The effect of print parameters (infill) on
the toughness of specimens produced
by FDM technology**

Završni rad

Nikola Šimunić, mag.ing.mech.

Karlovac, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se obitelji i prijateljima na potpori tijekom studiranja, te mentoru Nikoli Šimuniću mag.ing.str. na stručnoj pomoći i savjetima koji su pomogli pri izradi ovog završnog rada.

Filip Trivić



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni studij: Strojarsva

Usmjerenje: Proizvodno Strojarsvo

Karlovac, 07.12.2017.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: **Filip Trivić**

Matični broj: 0110612003

Naslov: **UTJECAJ PARAMETARA ISPISA (ISPUNJENOSTI) NA ŽILAVOST EPRUVETA IZRAĐENIH FDM TEHNOLOGIJOM**

Opis zadatka:

Dati aktualni pregled postupaka u području aditivne proizvodnje sa posebnim osvrtom na FDM (Fused Deposition Modeling) postupak.

Na uređaju za aditivnu proizvodnju (FDM) promjenom parametra ispunjenosti („infill“) izraditi epruvete iz PLA materijala. Epruvete ispitati na žilavost. Rezultate prikazati grafički i tablično te po potrebi komentirati. Na temelju dobivenih rezultata iznijeti zaključke i preporuke.

Koristiti odgovarajuću dostupnu literaturu, priručnike i podatke.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

07.12.2017.

12.03.2018.

20.03.2018.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

pred. Nikola Šimunić, mag.ing.stroj.

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. ADITIVNA TEHNOLOGIJA	4
2.1. FDM postupak.....	4
2.2. 3D Tisak	7
2.3. Stereolitografija (SLA tehnologija)	9
2.4. Proizvodnja laminiranih objekata (LOM).....	12
2.5. 3D tisak mlazom fotopolimera.....	14
2.6. Selektivno lasersko sinteriranje modela (SLS)	17
3. FDM POSTUPAK.....	20
3.1. Bitni parametri u FDM postupku	22
3.2. Materijali u FDM postupku.....	24
4. EKSPERIMENTALNI DIO	27
4.1. Epruvete	27
4.2. Mjerenje žilavosti.....	32
5. ANALIZA REZULTATA	33
6. ZAKLJUČAK.....	35
PRILOZI.....	36
7. LITERATURA	37

POPIS SLIKA

Slika 1. Faze aditivne proizvodnje. [1]	1
Slika 2. Princip aditivnih postupaka proizvodnje prototipova: a - prikaz slaganja slojeva, b - 3D tvorevina. [2]	2
Slika 3. FDM postupak. [3].....	5
Slika 4. Prikaz nanošenja materijala sloj po sloj. [4]	5
Slika 5. Postupak 3D tiskanja. [5]	7
Slika 6. Primjeri modela izrađenih 3D tiskom. [6]	7
Slika 7. Zcorp Z-Printer 450. [7].....	8
Slika 8. Prikaz procesa izrade SLA tehnologijom. [8].....	9
Slika 9. Formlabs SLA printer sa UV laserom. [9].....	10
Slika 10. Primjer modela izrađenog SLA tehnologijom. [10].....	11
Slika 11. Princip izrade LOM tehnologijom. [11]	12
Slika 12. Model bloka motora nastao LOM tehnologijom. [12].....	13
Slika 13. PolyJet postupak. [13].....	14
Slika 14. PolyJet printer. [14].....	15
Slika 15. Primjer modela izrađenog PolyJet tehnologijom. [15]	16
Slika 16. Prikaz SLS postupka. [16]	17
Slika 17. Norge SLS printer. [17]	18
Slika 18. Primjeri modela izrađenih SLS tehnologijom. [18].....	19
Slika 19. Stratasys FDM 1600 printer. [19]	20
Slika 20. Shema FDM tehnologije. [20]	21
Slika 21. Razlika između debljine sloja i kako ona utječe na gotovi model. [21]	22
Slika 22. Prikaz kako smjer djelovanja sile utječe na izdržljivost izratka. [22].....	23
Slika 23. ABS materijal u raznim bojama. [23]	24
Slika 24. PLA filament. [24]	25
Slika 25. Model izrađen od polikarbonata. [25].....	25
Slika 26. PC-ABS filament. [26].....	26
Slika 27. Orijentacija epruvete na radnom stolu prikazana u Slic3r programu.....	27
Slika 28. Epruveta sa 20% ispunjenosti prikazana u Slic3r programu.....	28
Slika 29. "Rectilinear" uzorak unutrašnje ispunjenosti. [27]	28
Slika 30. 2D prikaz slojeva u Slic3r programu.	29
Slika 31. OpenBeam 3D printer. [28]	30
Slika 32. Simplify3D. [29]	31
Slika 33. Charpy-evo klatno u laboratoriju Veleučilišta u Karlovcu. [30]	32

POPIS TABLICA

Tablica 1. Rezultati ispitivanja za epruvete s 20% ispunjenosti	33
Tablica 2. Rezultati ispitivanja za epruvete s 40% ispunjenosti	33
Tablica 3. Rezultati ispitivanja za epruvete s 60% ispunjenosti	33
Tablica 4. Rezultati ispitivanja za epruvete s 80% ispunjenosti	34
Tablica 5. Rezultati ispitivanja za epruvete s 100% ispunjenosti	34

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Udarni rad loma	J	Žilavost
Srednja vrijednost	J	Srednja vrijednost žilavosti ispitivanih epruveta
Standardna devijacija	J	Standardno odstupanje epruveta

SAŽETAK

Aditivna tehnologija svakim danom sve više napreduje, te se pod ovim pojmom podrazumijevaju različiti postupci izrade prototipova i malih serija komada. Svi postupci dijele zajednički proces u kojemu se stvara model sloj po sloj iz računalno izrađenog CAD 3D modela.

Postoje mnoge vrste aditivne tehnologije, no u ovom završnom radu su opisani samo najpopularniji postupci s naglaskom na FDM postupak pomoću kojega su izrađene epruvete za ispitivanje. Svi postupci imaju prednosti i nedostatke, koji ovise o kompliciranosti izrade modela, kvaliteti dobivenog vanjskog izgleda, mehaničkim svojstvima i sl.

U sklopu ovog završnog rada provedeno je ispitivanje udarnog rada loma na epruvetama izrađenim FDM postupkom. Epruvete su izrađene s točno određenim parametrima te s različitim postotkom ispunjenosti koji se kretao od 20 do 100%. Rezultati mjerenja prikazani su u tablicama, te je napravljena njihova analiza.

Ključne riječi:

- Aditivna tehnologija
- PLA materijal
- FDM postupak
- Udarni rad loma

SUMMARY

Additive technology is progressing every day, and under this concept are involved various prototype and small series production processes. All procedures share a common process in which a layered model is created from a computer generated CAD 3D model.

There are many types of additive technology, but in this final assignment only the most popular procedures are described, with an emphasis on the FDM process by which test specimens were made. All processes have advantages and disadvantages, which depend on the complexity of model making, the quality of the exterior appearance, the mechanical properties, and the like.

Within this final assignment, an impact test was carried out on the specimens made with the FDM process. The specimens were made with the exact parameters and with different percentages of infill ranging from 20 to 100%. The measurement results are presented in the tables, and their analysis was performed.

Key words:

- Additive technology
- PLA material
- FDM process
- Impact test

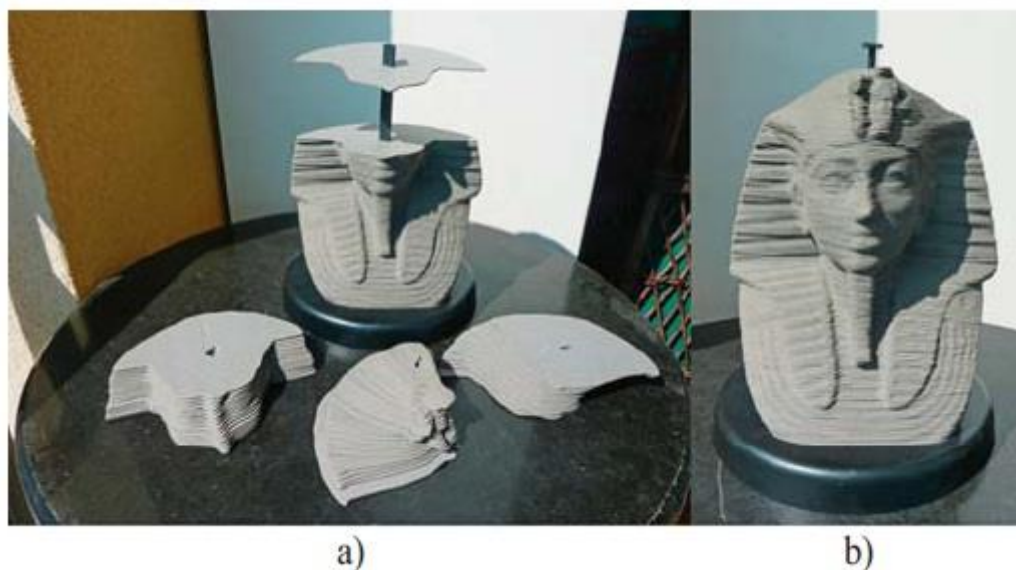
1. UVOD

Aditivna proizvodnja (eng. Additive Manufacturing) je dio proizvodnoga strojarstva koji se bavi izradbom predmeta nanošenjem čestica u tankim slojevima. Proizvodni proces započinje konstruiranjem trodimenzionalnoga modela računalnim CAD programima za modeliranje ili digitaliziranjem prostornoga oblika već postojećega objekta trodimenzionalnim skenerima. U slučaju CAD postupka, CAD model se pohranjuje u STL formatu. Slijedeći korak je pretvaranje modela u niz horizontalnih poprečnih presjeka koji se strojem za proizvodnju tvorevina otiskuju sloj po sloj do konačnog proizvoda. Broj slojeva raste što je veća rezolucija printera. Nakon rezanja potrebno je postaviti parametre izrade poput debljine ispisa, brzine, temperature ispisa, potrebe za potpornom strukturom i sl. Nakon što se postave parametri, počinje izrada modela. Kada je model gotov, slijedi vađenje iz radne površine stroja te obrada modela. Nakon obrade model je gotov i spreman za upotrebu. Aditivnim se postupcima mogu jednako uspješno izraditi prototipovi, kalupi i alati velike preciznosti te funkcionalni dijelovi spremni za upotrebu. No brzina izradbe, izbor materijala i dimenzije modela zasad su ograničeni.



Slika 1. Faze aditivne proizvodnje. [1]

Prva industrijska upotreba AM postupaka zabilježena je 1987. godine. Radi se o postupku stereolitografije proizvođača 3D Systems u kojem se tanak sloj kapljevitog polimera očvršćuje UV laserom. Godine 1988. tvrtke 3D Systems i Ciba-Geigy proizvele su prvu generaciju akrilnih smola koje se primjenjuju u stereolitografiji. Postupak 3D tiskanja razvijen je 1989. godine u SAD-u, na MIT-u. Tvrtka 3D Systems, osam godina nakon izrade prvih strojeva za stereolitografiju, načinila je stroj za 3D tiskanje (Actua 2100) koji se zasniva na nanošenju voska sloj po sloj primjenom inkjet postupka. Iste godine tvrtka Z Corp predstavlja svoj 3D pisac Z402, koji radi prototipove od škroba, gipsa u obliku praha i kapljevitih veziva. Godine 1991. pojavili su se i drugi AM postupci, uključujući FDM tvrtke Stratasys i LOM tvrtke Helisys. U FDM-u prototip nastaje ekstrudiranjem slojeva plastomernih materijala, dok LOM lijepi i reže slojeve papira ili folije. Tvrtka DTM (danas je u sklopu 3D Systems) stavlja 1992. na tržište strojeve koji srašćuju polimerne prahove toplinom lasera – SLS postupak. Slijedi proizvodnja različitih materijala i strojeva raznih tvrtki.



Slika 2. Princip aditivnih postupaka proizvodnje prototipova: a - prikaz slaganja slojeva, b - 3D tvorevina. [2]

Glavna prednost aditivnih postupaka je izrada modela u jednom koraku, bez izrade kalupa, daljnje obrade, transporta između radnih mjesta i sl. Glavni je nedostatak ograničenje na određene materijale, ali kako se aditivni postupci svakodnevno sve više razvijaju, današnji se prototipovi mogu upotrijebiti i kao gotove tvorevine. Brza izrada prototipa pomoću 3D printera smanjuje vrijeme razvoja proizvoda dopuštajući korekcije na proizvodu u ranoj fazi njegovog razvoja. Trodimenzionalni ispis modela, posebice ispis u boji, daje inženjerima jasan uvid u tijek postupka dizajniranja, mogućnost isticanja raznih parametara, mogućnost lakog i ranog uočavanja mogućih grešaka i njihovog brzog ispravljanja. Greške se mogu ispravljati dok još nisu financijski neprihvatljive.

Aditivna tehnologija nalazi danas primjenu u mnogim djelatnostima, poput:

- industrija – brza izrada prototipova, izrada alata, proizvodnja, prilagodba i individualizacija proizvoda
- medicina i stomatologija – izrada modela dijelova tijela temeljem CT/RTG snimke, priprema za operacije, protetske zahvate, izrada stomatološkog otiska iz CT snimke čeljusti, fiksiranje udova
- biologija i kemija – stvaranje bakterijskih kultura
- arhitektura – izrada modela građevina i naselja
- dizajn i umjetnost – 3D reprodukcija kipova, ispis matematičkih funkcija
- edukacija

2. ADITIVNA TEHNOLOGIJA

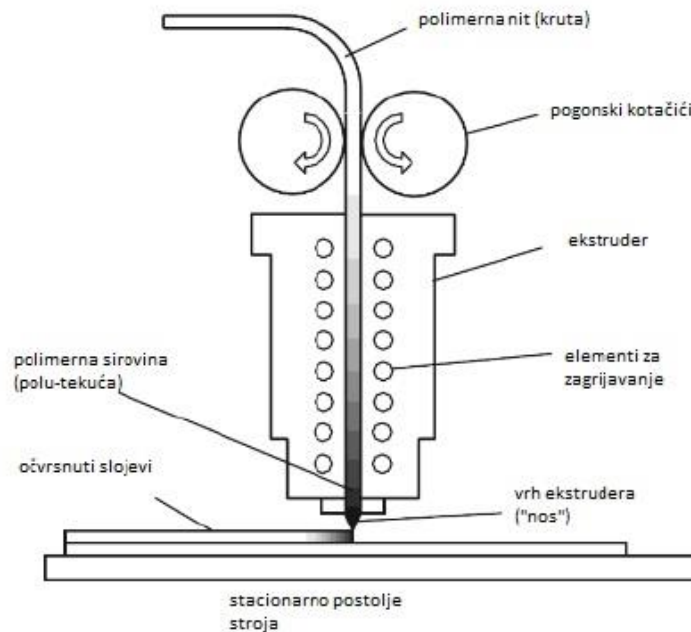
AM postupci izrade tvorevina mogu se općenito podijeliti na postupke koji upotrebljavaju materijal u čvrstom stanju (npr. žica, papir, folija, laminat), kapljevinu i prah. Neki od važnijih postupaka kod kojih se rabi čvrsti materijal su taložno očvršćivanje (eng. Fused Deposition Modeling, FDM) i proizvodnja laminiranih objekata (eng. Laminated Object Manufacturing, LOM), postupci koji upotrebljavaju kapljevite materijale su stereolitografija (eng. Stereolithography, SLA), očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (eng. Digital Light Processing) i PolyJet, dok su postupci koji rabe prah npr. selektivno lasersko srašćivanje (eng. Selective Laser Sintering, SLS) i 3D tiskanje (eng. 3D Printing, 3DP).

2.1. FDM postupak

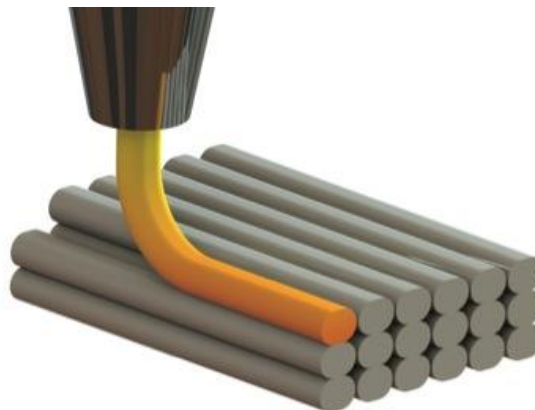
Taložno očvršćivanje (eng. FDM - Fused Deposition Modeling) je postupak aditivne tehnologije koji za izradu modela nanosi otopljeni materijal sloj po sloj. Kod ovog postupka se za materijal koristi plastična masa. Ova tehnologija spada u skupinu jednostavnijih postupaka, te ovi strojevi mogu biti dosta primitivni u odnosu na ostale postupke. U kvaliteti ispisa modela, bitnu ulogu igra kvaliteta stroja. Epruvete, čiju ćemo žilavost ispitivati dalje u tekstu su izrađene ovom tehnologijom.

Postupak izrade započinje izradom CAD modela koji se kasnije ubaci u računalni program čija je zadaća generiranje G-koda koji stroju određuje parametre modela, temperaturu mlaznice te brzinu ispisa. Materijal koji se koristi za izradu modela je u obliku dugačke žice, koja se nalazi u spremniku unutar stroja ili na vanjskom dijelu stroja. Pomoću pogonskih kotačića uvlači se žica u ekstruder. Kotačići reguliraju i brzinu ulaska polimerne niti u ekstruder. U ekstruderu se zagrijava polimerna nit do tekućeg stanja te se kroz vrh ekstrudera nanosi u slojevima na podlogu ili na ranije nanesen sloj. Ekstruder se kreće relativno u odnosu na podlogu (radni stol), tako da se materijal u polutekućem stanju nanosi na izradak u svrhu dobivanja željenog modela. Nakon izrade prvog sloja podloga se pomiče za visinu idućeg sloja po z-osi. Na prvi sloj se nanosi drugi i postupak se ponavlja dok se ne završi sa zadnjim slojem.

Uređaji mogu biti sa i bez grijane komore. Uređaji s grijanom komorom su skuplji i imaju veću preciznost. Uređaje bez grijane komore dijelimo na one sa i bez grijane podloge. Grijana podloga je bitna jer pri sobnoj temperaturi vjerojatno ne bi mogli ostvariti dobar kontakt prvog sloja. Postupak je moguće izvesti s dva ili više ekstrudera gdje svaki nanosi materijal zasebno (različite boje, debljine i sl.).



Slika 3. FDM postupak. [3]



Slika 4. Prikaz nanošenja materijala sloj po sloj. [4]

Prednosti FDM postupka:

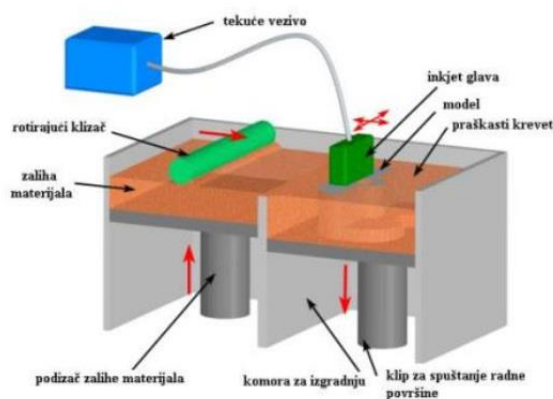
- Proizvodnja funkcionalnih dijelova
- Minimalni otpad
- Lakoća izmjene materijala
- Brza izrada
- Niska početna ulaganja
- Niska cijena materijala i potrošnih dijelova
- Mogućnost izrade modela iz dva različita materijala odnosno dvije različite boje
- Izrađene modele je moguće naknadno obrađivati (bojanje, brušenje i sl.)
- Nije potrebno hlađenje modela
- Moguća je izrada više modela odjednom, tj. koliko ih stane na radnu podlogu
- Ne upotrebljavaju se štetni materijali, te stoga nije potreban poseban prostor

Nedostaci FDM postupka:

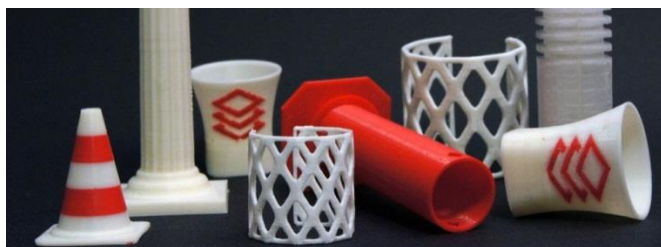
- Nepredvidljivo skupljanje materijala
- Ograničena točnost izrade modela
- Nužna primjena potporne strukture kod složenijih oblika
- Oscilacije u temperaturi mogu izazvati raslojavanje prototipa
- Niža čvrstoća prototipa u smjeru okomitom na smjer izrade
- Nemogućnost izrade oštih rubova zbog kružnog oblika mlaznice
- Ovisnost mehaničkih svojstava o položaju modela na radnoj podlozi, posebice u smjeru z-osi

2.2. 3D Tisak

Trodimenzionalni tisak nastao je na MIT (eng. Massachusetts Institute of Tehnology). Postupak se bazira na inkjet mlaznicama, pomoću kojih se nanosi tekuće vezivo na praškasti polimerni materijal koji se povezuje. Postupak je brz i precizan način za izradu modela ili izgradnju kalupa i jezgre za lijevanje.



Slika 5. Postupak 3D tiskanja. [5]



Slika 6. Primjeri modela izradenih 3D tiskom. [6]

Proces započinje kao i kod ostalih postupaka, tj. CAD modelom koji se ubaci u računalni program uređaja. Programski paket uređaja izrezuje na stotine digitalnih poprečnih presjeka modela, te nakon toga počinje zagrijavanje komore stroja, nakon čega se komora ispunjava slojem polimernog praha. Prah služi kao temelj kasnijem modelu te se zbog njega gotov model lakše vadi. Nakon nanošenja početnog polimernog praha gotova je priprema stroja. Pomoću klizača koji putuje uzduž komore nanosi se novi sloj polimernog praha. Nakon toga glava prolazi komorom i nanosi vezivo. Klizač s glavom kreće se po x-y osi dok se stol spušta za visinu po z osi.

Nakon očvrnuća prvog sloja u zadanom obliku, višak praha služi kao potporna konstrukcija koja se kasnije reciklira. Zatim se stol pomiče u smjeru z-osi za debljinu sloja. Nakon izrade, izradak se ostavlja neko vrijeme u grijanoj komori kako bi poprimio željena mehanička svojstva. Višak praha otklanja se komprimiranim zrakom. Mehanička svojstva mogu se poboljšati naknadom obradom kemikalijama te ih se može i obojiti raznim bojilima.

Prednosti 3D printera:

- Točnost
- Brzina izrade
- Prikaz u bojama
- Materijali nisu štetni za zdravlje
- Nema gubitaka materijala za izradu potporne strukture
- Modeli su vrlo kvalitetnog izgleda
- Mehanički izdržljivi modeli, ovisno o daljnoj obradi

Nedostaci inkjet 3D printera:

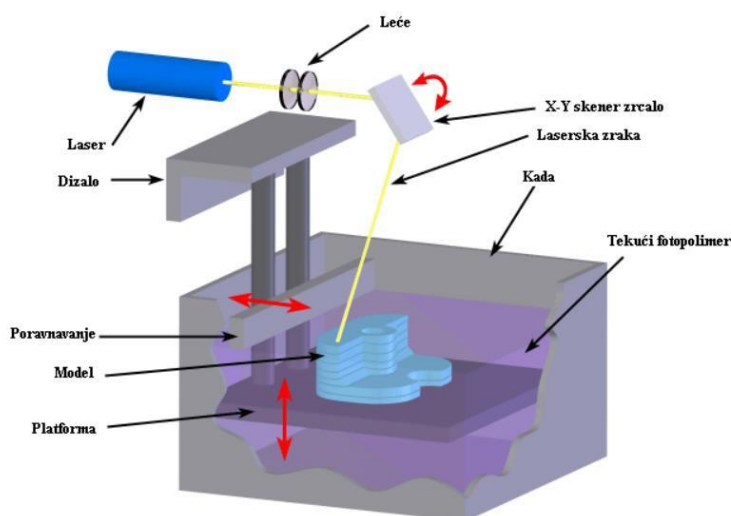
- Mali izbor materijala
- Dimenzijska točnost postaje lošija kod većih izrada
- Dugotrajno čišćenje praškastog materijala



Slika 7. Zcorp Z-Printer 450. [7]

2.3. Stereolitografija (SLA tehnologija)

SLA je postupak kojim se tekuća baza pomoću niskonaponskog lasera gradi u krutu i čvrstu bazu direktno iz CAD modela, pobuđujući foto-osjetljivu smolu i tako ostvarujući polimerizaciju. RP stereolitografija je tehnologija razvijena 80-ih godina u Americi (Florida). Preteča je svim ostalim tehnologijama koje se baziraju na principu tekućih sirovina i do danas ostaje jedna od najrasprostranjenijih RP tehnologija na svijetu.



Slika 8. Prikaz procesa izrade SLA tehnologijom. [8]

Proces započinje izradom i doradom 3D CAD datoteke. Datoteka se digitalno „izrezuje“ u seriju paralelno horizontalnih presjeka koji se predaju stroju za izradu jedan po jedan. Laser projicira te presjeke na sirovinu baziranu na tekućini te se na taj način sirovina očvršćuje.

Svaki izrađeni sloj se pomiče prema dolje po z-osi sukladno konstrukcijskim uputama. Pomaknuta vrijednost je rezolucija ili debljina sloja prema kojoj se može klasificirati točnost, odnosno preciznost stroja. Što je manja vrijednost pomaka po z-osi, dobivaju se čišći prijelazi i potrebna je manja naknadna strojna obrada dijela.

Nakon odrađivanja jednog prolaza, postupak se ponavlja sve dok se datoteka u potpunosti ne izvrši.

Pri završetku izrade modela, laser se gasi te se postolja uzdiže i ostatak sirovine se odvaja od osnovnog predmeta (cijedenjem, ručno ili strojno). Potom se stavlja u UV peć radi dodatnog, odnosno završnog sraščivanja.

Materijali koji se koriste prilikom ovog procesa su uglavnom standardizirani, ali u posljednje vrijeme se ekstenzivno radi na njihovom proširivanju i dodavanju drugih radi prepoznavanja RP tehnologije u serijskoj proizvodnji.

Trenutno najkorišteniji materijali su bazirani na akrilatu, ali postoje i materijali bazirani na epoksi smolama. Smole ili sirovine bazirane na tekućini se mogu modificirati u svrhu poboljšavanja i unaprjeđenja mehaničkih svojstava.



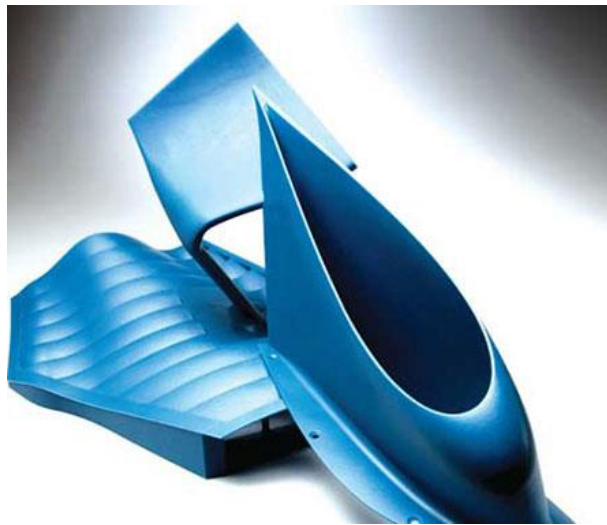
Slika 9. Formlabs SLA printer sa UV laserom. [9]

Prednosti SLA tehnologije:

- Spada u najpreciznije i najfunkcionalnije postupke suvremene 3D proizvodnje
- Mala debljina sloja (bolja kvaliteta izrade)
- Moguće vrlo male dimenzije izradaka
- Završne površine su glatke, te tolerancijski vrlo točne
- Mogućnost izrade oštrih rubova
- Homogenost strukture
- Brzina izrade
- Mogućost daljnje obrade izrađenih modela
- Moguća izrada više modela odjednom, odnosno koliko stane na platformu

Nedostaci SLA tehnologije:

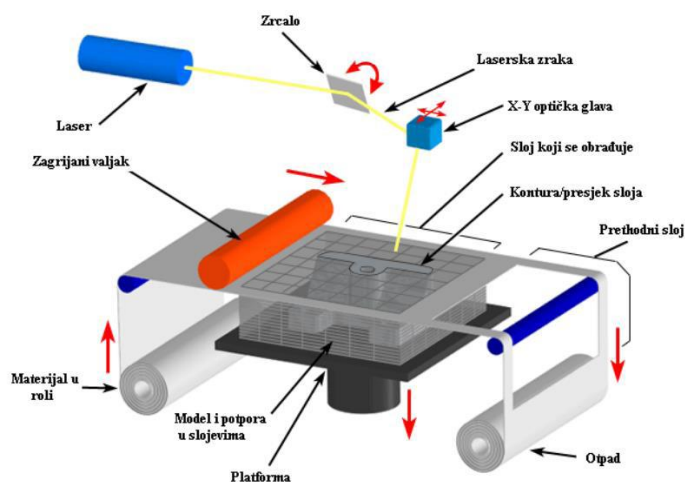
- Potreba naknadne obrade u UV peći radi očvrnuća
- Korištenje potporne strukture, koja je kasnije neupotrebljiva
- Visoka cijena materijala i njihovo pravilno skladištenje
- Izbor materijala se svodi na fotopolimere
- Kratak vijek trajanja lasera



Slika 10. Primjer modela izrađenog SLA tehnologijom. [10]

2.4. Proizvodnja laminiranih objekata (LOM)

Izrada modela laminacijom jedan je od najstarijih, ali i najbržih postupaka aditivne tehnologije. Za laminaciju se koriste papir, kompoziti ili polimerna folija koja je namotana na valjak. Materijal se odmotava s valjka te se reže u obliku poprečnih presjeka prema konturama modela u x-y ravnini. LOM je brza metoda izrade punih modela.



Slika 11. Princip izrade LOM tehnologijom. [11]

Pomoću valjka materijal se dovodi na radnu površinu. Folija s donje strane ima vezivno sredstvo pomoću kojeg se slojevi lijepe u čvrstu strukturu, a kod papira valjak nanosi vezivo (polimer i ljepilo) na donju stranu papira. Nakon što je materijal doveden s valjka nad platformu, laserska zraka pomoću optičkog sustava izrezuje konturu poprečnog presjeka i okolni materijal radi lakšeg odvajanja. Nakon izrezivanja, zagrijani valjak prelazi preko folije kako bi se osiguralo bolje povezivanje sloja. Nakon povezivanja nanešenog sloja, platforma se u smjeru z-osi pomiče prema dolje za debljinu sloja.



Slika 12. Model bloka motora nastao LOM tehnologijom. [12]

LOM tehnologiju karakterizira niska cijena zbog spremnog i gotovog sirovog materijala. Dimenzijska točnost ovog postupka je manja nego kod drugih postupaka. Također, zbog lošije dimenzijske točnosti, ograničeno je i korištenje ove metode. LOM tehnologija se upotrebljava u građevinarstvu i arhitekturi gdje je bitan prikaz predmeta koji ne zahtjeva veliku dimenzijsku točnost. Modeli izrađeni od papira imaju slične karakteristike kao i drvo pa se mogu lako obrađivati. Modele je također moguće i lakirati i bojati da bi se zaštitili od vlage.

Prednosti LOM postupka:

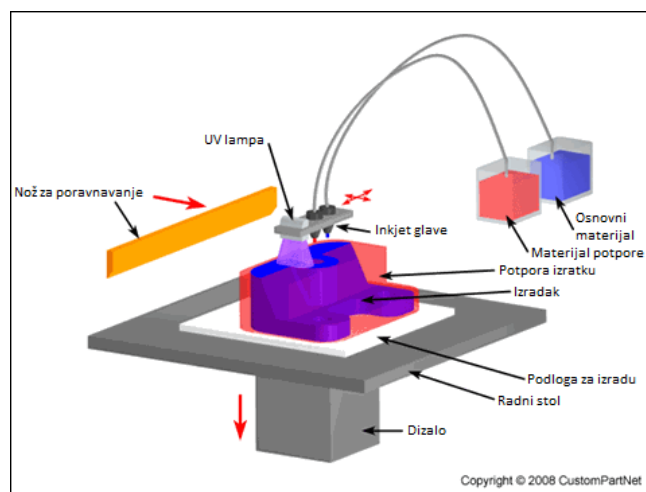
- Jednostavna izrada
- Prihvatljiva cijena uređaja i materijala
- Jeftino održavanje
- Nema potporne konstrukcije
- Niska zaostala naprezanja i deformiranje modela
- Brza izrada velikih modela

Nedostci LOM postupka:

- Mehanička i toplinska svojstva su nehomogena zbog korištenja ljepila između slojeva
- Mali izbor materijala
- Ograničena primjena
- Nije moguća izrada šupljih modela
- Nije moguća izrada modela komplicirane geometrije

2.5. 3D tisak mlazom fotopolimera

3D tisak mlazom fotopolimera (PolyJet postupak) nastao je 2000. godine kao kombinacija stereolitografije i 3D tiskanja. Materijal je tekući fotopolimer koji se polimerizira pomoću UV lampe. Fotopolimer se nanosi pomoću inkjet mlaznica.



Slika 13. PolyJet postupak. [13]

Sloj fotosjetljivog polimernog materijala nanosi se pomoću inkjet mlaznica na radnu površinu. Sloj se nanosi pomoću dvije glave koje sadrže velik broj mlaznica koje u jednom koraku istovremeno raspršuju potporni materijal i osnovni materijal za izgradnju modela. U istom koraku UV lampa obavlja polimerizaciju nanešenog sloja. Nakon nanešenog sloja i polimerizacije, radni stol se spušta po z-osi za debljinu jednog sloja. Sloj je oko 5 puta tanji nego kod stereolitografije.

Ovo je postupak kod kojeg je moguće istovremeno nanositi mlaz različitih materijala. Nanošenjem različitih materijala dobiva se mogućnost da model bude različitih mehaničkih i fizičkih svojstava. Moguće je i mješanje više materijala u svrhu dobivanja kompozita. Površina modela izrađenih ovom tehnologijom je vrlo kvalitetna. Potpunu konstrukciju odnosno pomoćni materijal potrebno je skidati nakon izrade. Ovisno o tvrtci koja proizvodi stroj, pomoćni materijal može biti topiv u vodi ili može biti u obliku voska. Vosak se tali u posebnoj peći.



Slika 14. PolyJet printer. [14]

Prednosti PolyJet postupka:

- Brzina postupka
- Visoka kvaliteta površine
- Izrada finih detalja
- Lako micanje potpornog materijala
- Izbor dostupnih materijala
- Mogućnost kombiniranja više materijala odjednom
- Mogućnost daljnje obrade odvajanjem čestica

Nedostaci PolyJet postupka:

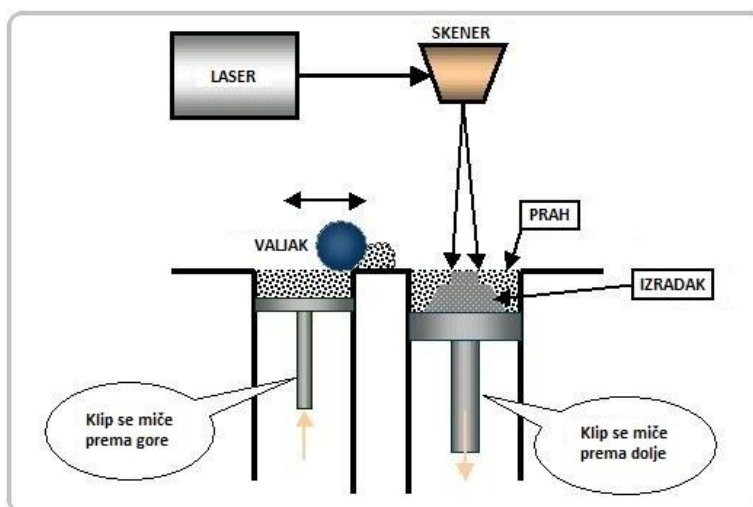
- Visoki troškovi uređaja
- Potreba za potpornom konstrukcijom
- Potrebna peć za otapanje voštane potporne konstrukcije



Slika 15. Primjer modela izrađenog PolyJet tehnologijom. [15]

2.6. Selektivno lasersko sinteriranje modela (SLS)

Selektivno lasersko sinteriranje modela (SLS) je metoda aditivne tehnologije kojom se proizvode uglavnom metalni dijelovi, no moguće je koristiti skoro sve materijale u praškastom obliku. Postupak se temelji na sinteriranju praškastog materijala. Sinteriranje je postupak očvrnuća praškastog materijala pomoću temperature i tlaka bez taljenja materijala.



Slika 16. Prikaz SLS postupka. [16]

Rotirajući valjak na radnu podlogu nanosi predhodno zagrijani sloj praškastog materijala, kojeg zatim obasja zraka numerički upravljano CO_2 lasera. Sloj praškastog materijala nanosi se iz zagrijane komore, a komora je zagrijana na temperaturu neposredno ispod tališta praškastog materijala.

Do srašćivanja praškastog materijala dolazi tako što numerički upravljani laser putuje kroz prostor koji je definiran CAD modelom. Nakon završetka jednog sloja, radna podloga se spušta u smjeru z-osi te se nanosi novi sloj pomoću valjka koji se opet osvjetljuje laserom.

Postupak se ponavlja sve do nanošenja i srašćivanja zadnjeg sloja. Zbog jednolikog nanošenja sloja praškastog materijala na radnu podlogu, nesinterirani prašak djeluje kao potporna struktura. Poslije toga je potrebno model ostaviti da se ohladi u radnoj komori prije izlaganja okolišnoj atmosferi.

Višak praha koji okružuje gotov model se usisava u pomoćne komore te se kasnije reciklira, a prah koji ostane u provrtima, udubljenjima i zazorima na izrađenom modelu se odstranjuje u komori za ispuhivanje. Većina modela izrađena SLS postupkom spremna je za uporabu već nakon čišćenja, ovisno o korištenom materijalu, dok neki materijali zahtjevaju dodatnu termičku obradu. Plinovi koji nastaju tijekom procesa se filtriraju prije izlaska u okolnu atmosferu tako da postupak nije opasan za okoliš.



Slika 17. Norge SLS printer. [17]

Prednosti SLS postupka:

- Brzina izrade (brži postupak od stereolitografije)
- Mala zaostala naprežanja
- Velik izbor materijala
- Izrada modela vrlo malih dimenzija
- Bolja mehanička svojstva modela od onih izrađenih stereolitografijom
- Moguće korištenje dijelova izrađenih ovom tehnologijom za funkcionalna ispitivanja
- Nije potrebna potporna struktura
- Neupotrebjeni prah može se koristiti za sljedeću izradu modela

Nedostaci SLS postupka:

- Lošija kvaliteta površine u odnosu na stereolitografiju
- Potrebna oprema za čišćenje viška materijala
- Stroj zauzima veliku površinu
- Velika početna ulaganja
- Vrijeme hlađenja izratka



Slika 18. Primjeri modela izrađenih SLS tehnologijom. [18]

3. FDM POSTUPAK

Povijest FDM tehnologije:

1989. godine tvrtka Stratasys unaprjeđuje prošlogodišnju tehnologiju Scotta Crampa koja je patentirana 1992. godine u Americi.

1992. godine, Stratasys lansira prvu seriju svojih 3D printera.

2002. godine, Stratasys lansira seriju „Dimension“ koja cilja na tržište dostupno svima.

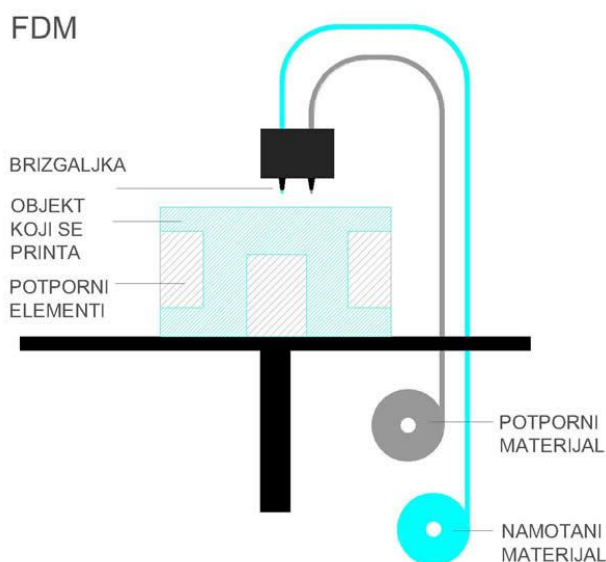
2007. godine, Stratasys postaje svjetski vodeća sila u brznoj proizvodnji prototipova (RP) sa 44% svih RP tehnologija u svijetu. Trenutno su vlasnici 180 patenata koji su u procesu odobravanja ili na čekanju.



Slika 19. Stratasys FDM 1600 printer. [19]

Postupak izrade započinje izradom CAD modela koji se kasnije ubaci u računalni program čija je zadaća generiranje G-koda koji stroju određuje parametre modela, temperaturu mlaznice te brzinu ispisa. Materijal koji se koristi za izradu modela je u obliku dugačke žice, koja se nalazi u spremniku unutar stroja ili na vanjskom dijelu stroja. Pomoću pogonskih kotačića uvlači se žica u ekstruder. Kotačići reguliraju i brzinu ulaska polimerne niti u ekstruder. U ekstruderu se zagrijava polimerna nit do tekućeg stanja te se kroz vrh ekstrudera nanosi u slojevima na podlogu ili na ranije nanesen sloj.

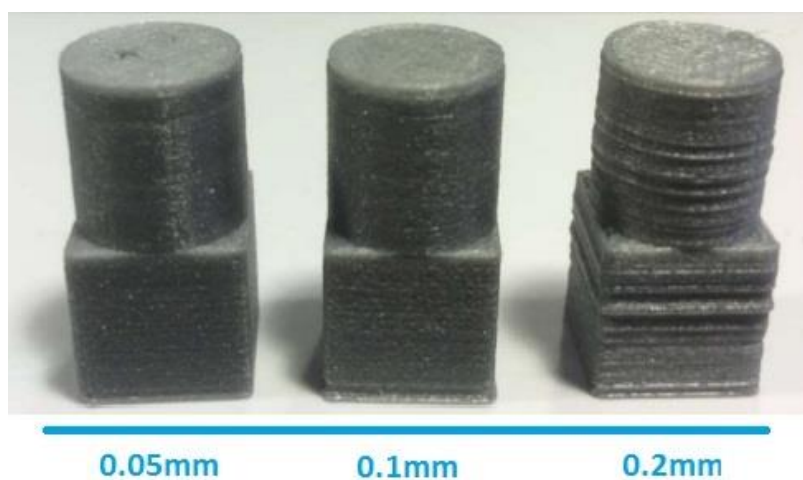
Ekstruder se kreće relativno u odnosu na podlogu (radni stol), tako da se materijal u polutekućem stanju nanosi na izradak u svrhu dobivanja željenog modela. Nakon izrade prvog sloja podloga se pomiče za visinu idućeg sloja po z-osi. Na prvi sloj se nanosi drugi i postupak se ponavlja dok se ne završi sa zadnjim slojem.



Slika 20. Shema FDM tehnologije. [20]

Pošto je proizvodnja takva, vanjski izgled i glatkoća površine ovisi o debljini sloja. Što je sloj tanji to je dulje vrijeme printanja, ali je i završna kvaliteta modela mnogo veća nego kada se koristi veća debljina sloja što ubrzava proces izrade. Tipične vrijednosti visine sloja su od 0,15 - 0,25 mm ali se koriste i slojevi raspona 0,05 - 0,5 mm ovisno o primjeni i promjeru mlaznice. Debljina sloja također utječe na troškove cijelog postupka, jer se veliki i grubi modeli mogu izraditi relativno brzo sa većim promjerom mlaznice što automatski određuje i veću debljinu sloja i tako smanjuje vrijeme izrade. Pri biranju parametara stroja pod kojima se smatra brzina, temperatura, akceleracije pojedinih osi, debljina sloja, postavke retrakcije materijala i ostalih, treba voditi računa o samom stroju.

Primjena FDM postupka izrade je počela dobivati sve širu upotrebu napretkom strojeva i materijala što se odražava u kvaliteti modela i njihovoj primjeni. Prije su modeli služili samo kao grubi prikaz nekog dijela prilikom dizajniranja te razrade nekog sklopa. Danas FDM tehnologija zastupa prvenstveno izradu prototipa visoke kvalitete, ali se sve više i više koristi kako bi se napravili strojevi sastavljeni od 3D isprintanih dijelova. Danas se nastoji izrađivati modele spremne za prodaju i upotrebu direktno iz 3D printera bez naknadne obrade.

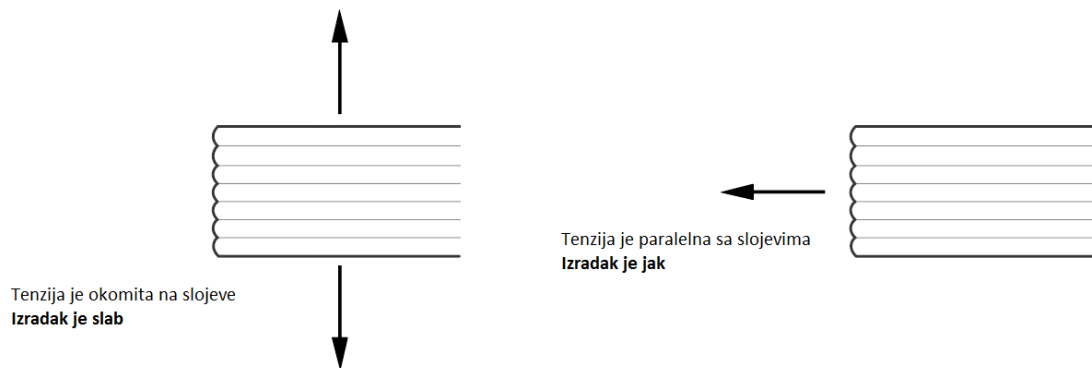


Slika 21. Razlika između debljine sloja i kako ona utječe na gotovi model. [21]

3.1. Bitni parametri u FDM postupku

Kvaliteta, hrapavost i mehanička svojstva ovise o parametrima ispisa poput visine sloja, unutrašnje ispune modela, broja horizontalnih slojeva modela i svojstvima samog materijala. Model ispisan manjom debljinom sloja će imati manju hrapavost nego model ispisa većom debljinom sloja. Unutrašnja ispuna i broj horizontalnih slojeva modela značajno utječu na mehanička svojstva. Vrlo je važno odabrati pravilnu orijentaciju modela tokom izrade jer pravilan raspored sila unutar modela osigurava model od pucanja tokom uporabe. U slučaju da se model neće koristiti pod nekim opterećenjem, orijentacija modela nije bitna. Bitno je najprije znati kako će se model koristiti nakon izrade, pod kakvim će opterećenjima biti i pod kojim temperaturama će se odvijati ta upotreba. Kao i kod svih vlaknastih materijala, modeli su najčvršći kada je sila usmjerena u istom pravcu sa vlaknima.

Zbog toga se pri FDM tehnologiji slojevi rade okomito jedan na drugi kako bi se postiglo što veća moguća kombinacija orijentacija vlakana tako da se opterećenje može podnesti u svim smjerovima djelovanja što je bolje moguće.



Slika 22. Prikaz kako smjer djelovanja sile utječe na izdržljivost izratka. [22]

3.2. Materijali u FDM postupku

ABS (akrilonitril-butadien stiren) je amorfni polimer koji nastaje polimerizacijom emulzije ili mase akrilonitrila i sitrena u prisustvu polibutadiena. Sadrži 15% do 35% akrilonitrila (C_3H_3N), 5% do 30% butadiena (C_4H_6) i 40% do 60 % stirena (C_8H_8). Najvažnija svojstva ABS-a su otpornost na udar i tvrdoća. Stiren monomer daje ABS-u dobru mogućnost prerade i površinski sjaj, akrilonitril mu daje krutost, toplinsku i kemijsku postojanost, dok butadien čini proizvod tvrdim i otpornijim čak i pri niskim temperaturama. Promjena u udjelima komponenata ABS-a i dodavanje pojedinih aditiva može dovesti do različitih tipova sa specifičnim svojstvima. ABS ima slabu otpornost na vremenske uvjete pa se stoga preporučuje samo za primjenu u interijeru.



Slika 23. ABS materijal u raznim bojama. [23]

PLA (polilaktidna kiselina) je biorazgradivi termoplastični poliester koji nastaje iz obnovljivih izvora kao što su kukuruzni škrob (SAD) i krumpir (Azija). To je jedini materijal za aditivnu proizvodnju, a da se ne koristi u postupku brizganja polimernih materijala.



Slika 24. PLA filament. [24]

PC (polikarbonat) nosi u sebi jedinstvenu kombinaciju tvrdoće, optičke transparentnosti, krutosti i čvrstoće. Polikarbonat je amorfan i proziran. Polikarbonatni materijali se proizvode uglavnom putem polikondenzacijske reakcije. Polikarbonat je sam po sebi jedan od najprozirnijih polimera. Istovremeno, PC se može miješati u različite boje, od prozirnih nijansi do mat neprozirnih boja. Polikarbonat posjeduje superiornu UV stabilnost i to se može još poboljšati dodavanjem UV stabilizatora. Drugi aditivi mogu biti pojačivači za toplinu ili aditivi koji poboljšavaju ESCR (pucanje pod pritiskom u okolini). PC se može puniti staklenim vlaknom kako bi se dodatno povećala krutost.



Slika 25. Model izrađen od polikarbonata. [25]

PC-ABS je mješavina polikarbonata (PC) i akrilonitril butadien stirena (ABS). Predstavlja jednu od najčešće korištenih termoplastika. Ta mješavina nudi najpoželjnija svojstva oba materijala; čvrstoću i postojanost pri visokim temperaturama PC-a, te savitljivost ABS-a. Ima izvrsna toplinska i mehanička svojstva i značajno je čvršći od ABS-a.



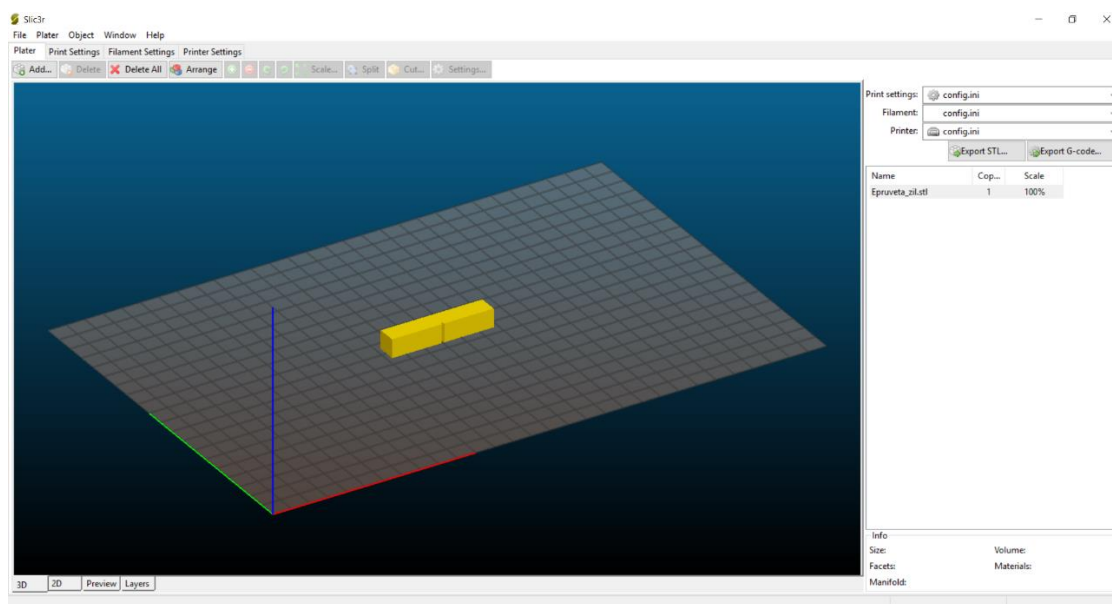
Slika 26. PC-ABS filament. [26]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu završnog rada mjerio sam žilavost epruveta izrađenih FDM tehnologijom na Charpy-evom batu.

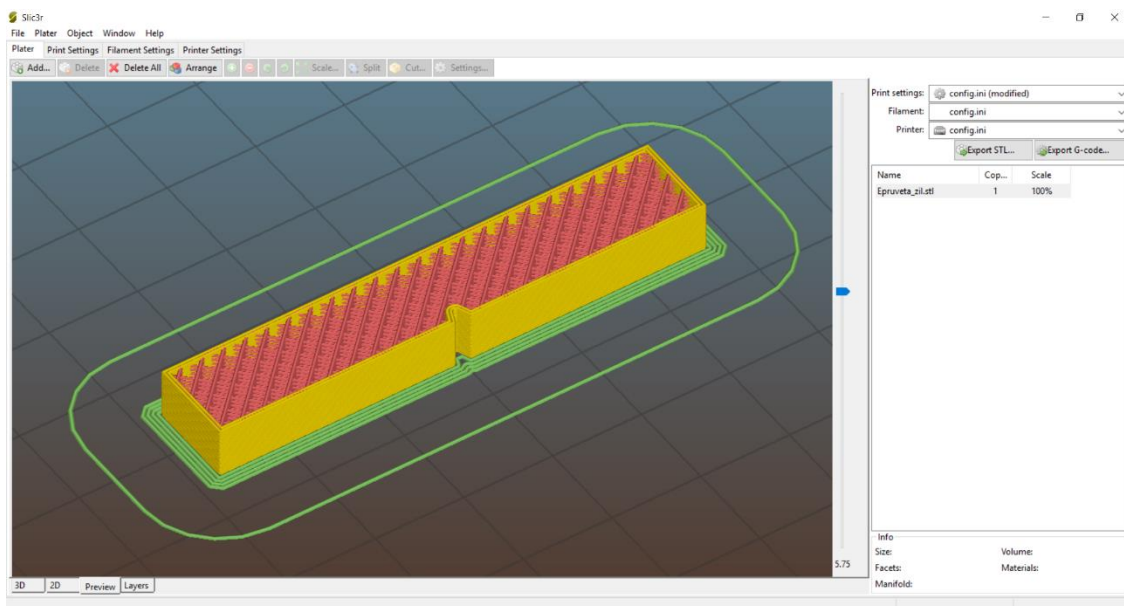
4.1. Epruvete

Epruvete su standardnih dimenzija 10 x 10 x 55 mm sa izrađenim „V“ utorom dubine 3 mm. Orijentacija izrade epruveta je vrlo bitna zato jer različiti načini orijentacije prilikom izrade će proizvesti epruvete različitih mehaničkih svojstava. U ovom slučaju, epruvete su izrađene tako da su bile polegnute na radnu ploču stroja.



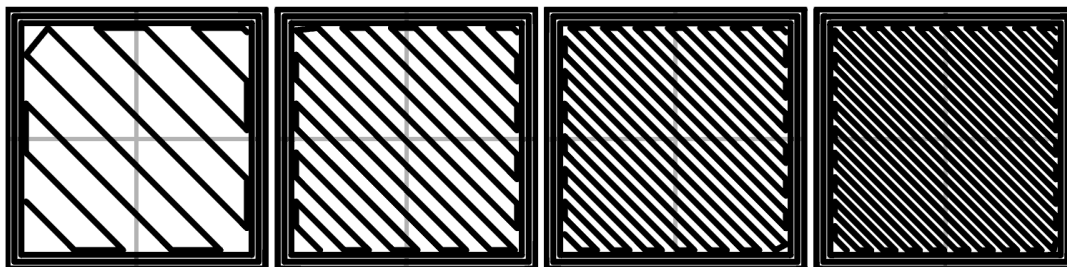
Slika 27. Orijentacija epruvete na radnom stolu prikazana u Slic3r programu.

Druga bitna stavka je unutrašnja ispunjenost epruvete (eng. „Infill“). To je količina materijala koji se polaže unutar samoga modela bez obzira na vanjske slojeve. Epruvete su izrađene sa postotkom ispunjenosti od 20, 40, 60, 80 i 100%. Ukupno je izrađeno 15 epruveta, tj. po 3 epruvete za svaki postotak ispunjenosti. Razlog tome je kako bi se dobila srednja vrijednost žilavosti uz koju smo dodali standardnu devijaciju kako bi osigurali što veću točnost mjerenja.



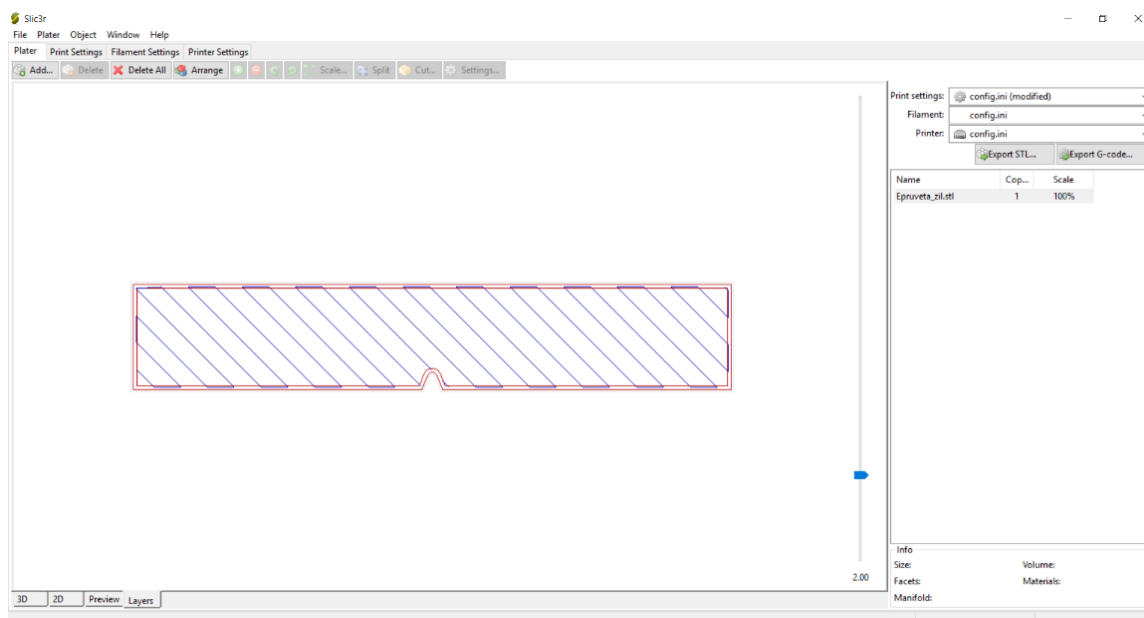
Slika 28. Epruveta sa 20% ispunjenosti prikazana u Slic3r programu.

Vrsta unutrašnje ispunjenosti, (eng. „infill pattern“) je treća stavka koju moramo razmotriti prilikom izrade epruveta. U našem slučaju, za izradu epruvete je odabran „Rectilinear“ uzorak, prikazan na slici dolje. Kod ove vrste uzorka, jedan sloj ima jedan smjer vlakana, a drugi sloj ima drugi smjer.



Slika 29. "Rectilinear" uzorak unutrašnje ispunjenosti. [27]

Prednosti su mu relativno brza izrada i pružanje čvrstoće u svim smjerovima opterećenja. Također, može se zakrenuti za koliko je stupnjeva potrebno kako bi se dobio smjer koji je najpovoljniji za određeno djelovanje sile.

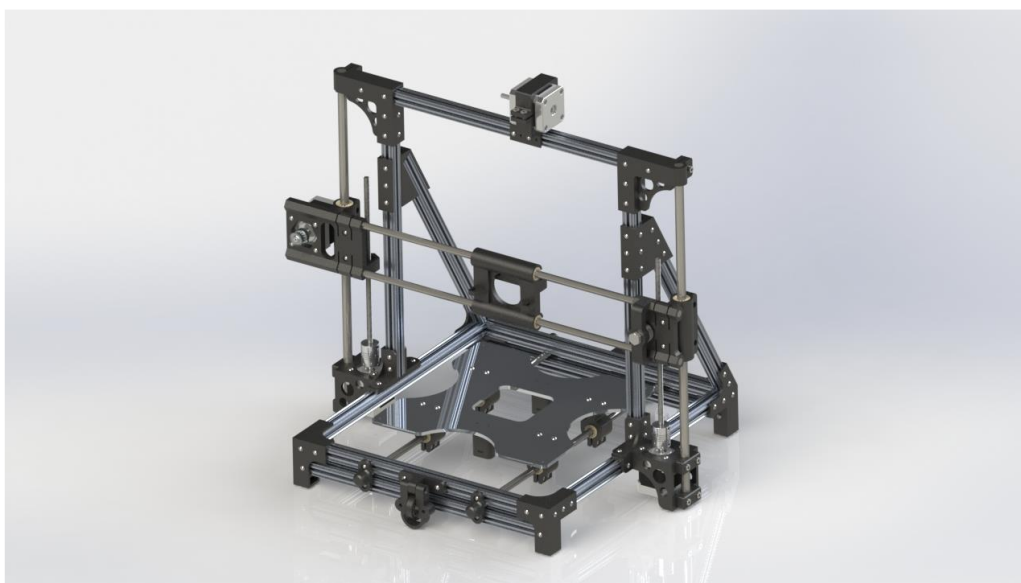


Slika 30. 2D prikaz slojeva u Slic3r programu.

Materijal od kojega su izrađene epruvete je PLA filament, za kojega je ranije rečeno da je polimer dobiven iz obnovljivih izvora poput kukuruza i škroba.

Uređaj na kojemu su izrađene epruvete je OpenBeam 3D printer. Ovo je uređaj koji je inspiriran modelom OpenBeam 1.4 koji je dostupan na internet stranicama specijaliziranim za međusobno dijeljenje CAD modela i nacрта. Sastoji se od aluminijskih kvadratnih profila, te vezivnih i pokretnih dijelova koji su izrađeni na 3D printeru.

Radni prostor je zamišljen na 20 cm³ što znači da radni hod svake osi iznosi 200 mm. Printer je izrađen po principu rada Kartezijevog sustava. Grijana radna ploča nalazi se na Y osi koja je pomična dok su X i Z osi stacionarne.



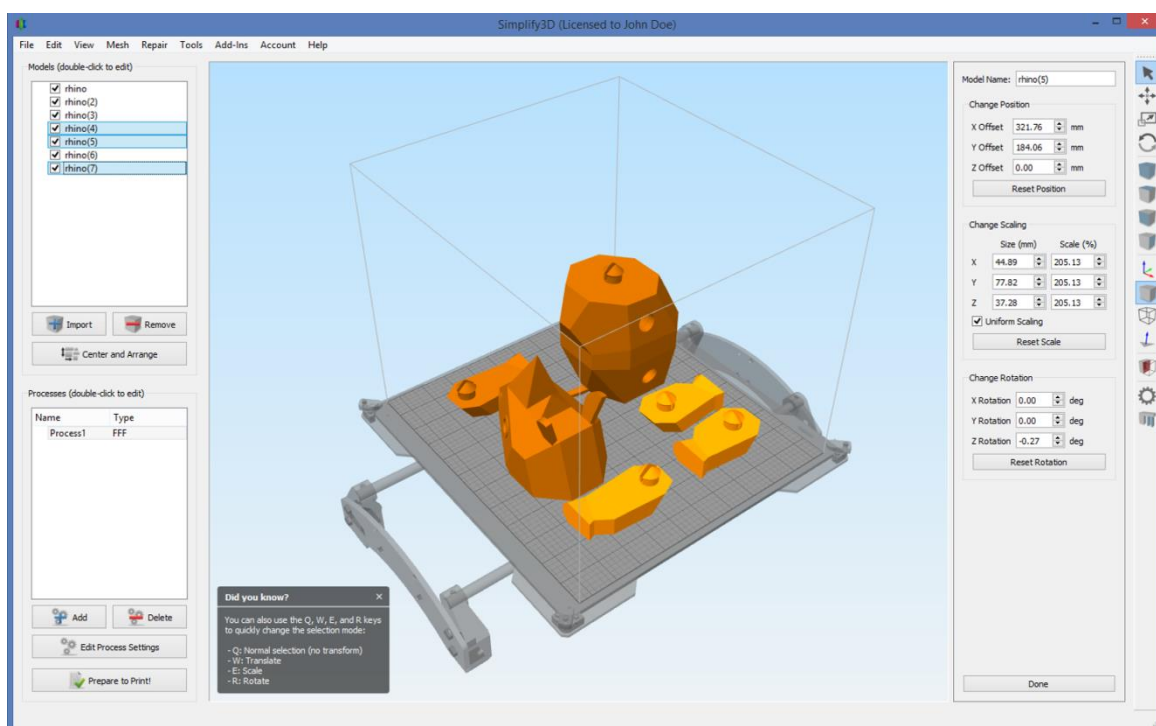
Slika 31. OpenBeam 3D printer. [28]

Parametri izrade epruveta:

- Temperatura mlaznice 210°C
- Temperatura radne ploče 60°C
- Brzina ispisa, $v = 35$ mm/s
- 2 vanjske konture
- Ispunjenost od 20, 40, 60, 80 i 100%
- 2 gornja i 2 donja puna sloja
- debljina sloja 0,25 mm

Kako bi printer mogao izraditi epruvete, potrebno je 3D model pretvoriti u G-kod. Slicer je naziv za program koji od 3D modela kreiranog u nekome od CAD programa, stvara G-kod, tj. naredbe za printer. 3D model se učita u slicer te se namjeste svi potrebni parametri poput temperature mlaznice, radne ploče, brzine, debljine sloja, itd.

CAD model se mora spremi u .STL formatu kojeg prepoznaju većina slicer programa. Neki od najpoznatijih slicer programa su Simplify3D, Slic3r i Cura.



Slika 32. Simplify3D. [29]

4.2. Mjerenje žilavosti

Žilavost smo ispitivali na uređaju koji se zove Charpy-evo klatno. Charpy-evo klatno je uređaj za ispitivanje udarnog loma materijala, što je mjera za žilavost materijala. Ovo je vrlo česta metoda ispitivanja materijala uz razaranje materijala. Oblik i dimenzije epruveta su propisane standardom, te mogu biti izrađene sa V ili U utorom. Kod ispitivanja je važno postaviti epruvetu točno nasuprot vrhu bata na klatnu. Ova metodu je razvio francuski znanstvenik Georges Charpy 1905. godine.

Ispitivanje udarnog rada loma se zasniva na mjerenju utrošene energije za lom epruvete. Razlika između početne potencijalne energije i potencijalne energije bata nakon udara predstavlja energiju utrošenu na razaranje epruvete što se očitava pomoću kalibriranog brojača.



Slika 33. Charpy-evo klatno u laboratoriju Veleučilišta u Karlovcu. [30]

5. ANALIZA REZULTATA

Nakon centriranja epruvete otpušta se bat koji udara u epruvetu na strani suprotnoj zarezu. Udarni bat lomi epruvetu u potpunosti ili samo djelomično na što se utroši kinetička energija bata. Zbog toga se bat u uzlaznom dijelu putanje podiže na visinu manju od početne, a na skali uređaja očitava se rad utrošen na lom epruvete. Postupak se ponavlja sve dok se ne ispituju sve epruvete na sobnoj temperaturi. U dolje priloženim tablicama se mogu vidjeti rezultati mjerenja epruveta.

Tablica 1. Rezultati ispitivanja za epruvete s 20% ispunjenosti

Vrijednost	Naziv epruvete		
	Epruveta 1.	Epruveta 2.	Epruveta 3.
Udarni rad loma (J)	2	2	2
Srednja vrijednost (J)	2		
Standardna devijacija	0		

Tablica 2. Rezultati ispitivanja za epruvete s 40% ispunjenosti

Vrijednost	Naziv epruvete		
	Epruveta 1.	Epruveta 2.	Epruveta 3.
Udarni rad loma (J)	2	2	2
Srednja vrijednost (J)	2		
Standardna devijacija	0		

Tablica 3. Rezultati ispitivanja za epruvete s 60% ispunjenosti

Vrijednost	Naziv epruvete		
	Epruveta 1.	Epruveta 2.	Epruveta 3.
Udarni rad loma (J)	2	2	2
Srednja vrijednost (J)	2		
Standardna devijacija	0		

Tablica 4. Rezultati ispitivanja za epruvete s 80% ispunjenosti

Vrijednost	Naziv epruvete		
	Epruveta 1.	Epruveta 2.	Epruveta 3.
Udarni rad loma (J)	2	2	2
Srednja vrijednost (J)	2		
Standardna devijacija	0		

Tablica 5. Rezultati ispitivanja za epruvete s 100% ispunjenosti

Vrijednost	Naziv epruvete		
	Epruveta 1.	Epruveta 2.	Epruveta 3.
Udarni rad loma (J)	2	2	2
Srednja vrijednost (J)	2		
Standardna devijacija	0		

Nakon vršenja ispitivanja i zapisivanja rezultata došao sam do slijedećih zaključaka.

Charpy-evo klatno je prelomilo svih 15 epruveta, te su sve epruvete pokazale jednu te istu vrijednost udarnog rada loma u vrijednosti od 2 Joulea. Prema tome, srednja vrijednost pojedinih tipova ispunjenosti epruveta iznosi 2 Joulea i shodno tome je standardna devijacija jednaka nuli. Pokazalo se da postotak ispunjenosti epruveta nije utjecao na povećanje ili smanjenje žilavosti prilikom ispitivanja.

Pošto se polimerni materijali, a pogotovo oni izrađeni aditivnom tehnologijom, rijetko podvrgavaju mehaničkim ispitivanjima poput ispitivanja žilavosti, prije eksperimenta nisam mogao imati neke referentne vrijednosti prema kojima bi mogao očekivati određene rezultate mjerenja. Razlike između izrađenih epruveta su premale da bi se mogle uočiti na uređaju kojim je mjereno.

Charpy-evo klatno na kojem je vršeno ispitivanje ima pretežak bat za ispitivanje ovakvih vrsta materijala te nema adekvatno podešenu skalu. Mnogo bolje bi rješenje bilo klatno s manjom masom bata, te s skalom koja ima manje i preciznije podjele.

6. ZAKLJUČAK

Aditivni postupci su relativno novi među postupcima izrade, no usprkos tome je razvijeno puno metoda i mogućnosti izrade prototipova i manjih serija. Kako svakodnevno napreduju materijali i tehnologija, također napreduje i tehnologija 3D printanja koja postaje dostupna sve većem broju tvornica. U zadnje vrijeme zbog sve povoljnijih cijena, ovakva tehnologija postaje dostupna i ljudima koji se bave ovakvom vrstom proizvodnje iz hobija.

Svakodnevno se proširuje i područje izrade proizvoda proizvedenih 3D printerima. Vjerojatno najznačajnije je u području medicine gdje ova tehnologija u posljednje vrijeme igra jako veliku ulogu.

U prošlosti je izrada prototipova predstavljala veliki problem. Pojedinačna izrada prototipova u svrhu ispitivanja i testiranja je bila skupa, zbog potrebe da se izrađuju kalupi i alati za izradu prototipova. Pojavom aditivnih tehnologija pojavila se brza izrada prototipova koja je značajno ubrzala proizvodnju i smanjila cijenu izrade. Tehnologije aditivne proizvodnje su zaživjele zbog mogućnosti reprogramiranja i prenamjene prototipa.

U ovom završnom radu sam izvršio ispitivanja udarnog rada loma epruveta izrađenih FDM postupkom na uređaju koji se zove Charpy-evo klatno. Zaključio sam da su razlike između žilavosti pojedinih epruveta premale da bi se u potpunosti točno uočile na našem uređaju. Razlog tome je bila prevelika masa bata i neadekvatno podjeljena skala.

Također sam zaključio da aditivna tehnologija može zamijeniti klasične postupke proizvodnje u malim serijama jer nema potrebe za izradom kalupa i posebnih alata.

Aditivna tehnologija će se u budućnosti zasigurno razvijati u različitim smjerovima, te tako doprinijeti razvoju novih vrsta tehnologija i boljoj kvaliteti života.

PRILOZI

I. CD-R disk

7. LITERATURA

- [1] hrcak.srce.hr/file/147943 (29.7.2017.)
- [2] hrcak.srce.hr/file/147943 (29.7.2017.)
- [3] Mautner, Viktor: FDM postupak brze izrade prototipova (završni rad)
- [4] <http://www.additive3d.com/extrusion-deposition-fused-deposition-modeling-fdm/> (29.7.2017.)
- [5] <http://3dprinting.com/what-is-3d-printing/> (29.7.2017.)
- [6] www.3dfarma.hr (29.7.2017.)
- [7] <http://cmk.vuka.hr/hr/povratno-inzinjerstvo/> (29.7.2017.)
- [8] <http://www.zare-prototyping.eu/en/stereolithography-sla> (29.7.2017.)
- [9] <https://all3dp.com/fdm-vs-sla/> (29.7.2017.)
- [10] <http://www.zare-prototyping.eu/en/stereolithography-sla> (29.7.2017.)
- [11] <http://www.makepartsfast.com/laminate-object-manufacturing-lom/> (29.7.2017.)
- [12] <http://www.cubictchnologies.com/Helisis.htm> (29.7.2017.)
- [13] <http://blog.nus.edu.sg/u0804594/common-rp-techniques/e-polyjet/> (29.7.2017.)
- [14] <http://proto3000.com/3d-printers.php> (29.7.2017.)
- [15] <http://proto3000.com/polyjet-3d-printing-services-rapid-prototyping.php> (29.7.2017.)
- [16] <http://www.mechanicalengineeringblog.com/1408-rapid-prototyping-history-prototyping-technologies/> (29.7.2017.)
- [17] <https://www.shapeways.com/blog/archives/17437-the-first-desktop-sls-3d-printer-now-on-kickstarter.html> (29.7.2017.)
- [18] <http://www.businesswire.com/news/home/20050606005686/en/3D-Systems-SLS-Technology-Featured-Extreme-Textiles> (29.7.2017.)
- [19] <http://haveblue.org/?p=381> (30.7.2017.)
- [20] <http://www.webgradnja.hr/clanci/3d-printanje/836/> (30.7.2017.)
- [21] <https://www.makexyz.com/printer-services/process/Compare-3D-printing-services> (30.7.2017.)
- [22] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-does-part-orientation-affect-3d-print> (30.7.2017.)
- [23] <http://elco.crsndoo.com/bfb/www.bitsfrombytes.com:8080/usd/store/abs-material-white> (30.7.2017.)

- [24] http://buy3dprinters.co.uk/shop/index.php?main_page=index&cPath=2_3 (30.7.2017.)
- [25] <https://www.rapidsol.org/polycarbonate.aspx> (30.7.2017.)
- [26] <http://www.dutchfilaments.com/pc-abs-filament/> (30.7.2017.)
- [27] <http://manual.slic3r.org/expert-mode/infill> (29.8.2017.)
- [28] Barešić, Vedran: Izrada FDM uređaja (završni rad)
- [29] <https://www.simplify3d.com/simplify3d-announces-version-3-0-of-universal-3d-printing-software/> (29.8.2017.)
- [30] <http://cmk.vuka.hr/hr/ispitivanje-materijala/> (29.8.2017.)