

# Hrapavost prototipova izrađenih FDM postupkom

---

Jedvajić, Dino

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

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:128:506677>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-31**



**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 REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
*Stručni studij Strojарstva*

Dino Jedvajić

**HRAPAVOST PROTOTIPOVA  
IZRAĐENIH FDM POSTUPKOM**

**Surface roughness of prototypes  
made by FDM technology**

Završni rad

Karlovac, 2016.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
*Stručni studij Strojарstva*

Dino Jedvajić

**HRAPAVOST PROTOTIPOVA  
IZRAĐENIH FDM POSTUPKOM**

**Surface roughness of prototypes  
made by FDM technology**

Završni rad

Nikola Šimunić, mag.ing.mech.

Karlovac, 2016.

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

Zahvaljujem se svojoj 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.

Dino Jedvajić



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni studij: Strojarsva

Usmjerenje: Proizvodno Strojarsvo

Karlovac, 03.10.2016

### ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: **Dino Jedvajić**

Matični broj: 0110611030

Naslov: **Hrapavost prototipova izrađenih FDM postupkom**

Opis zadatka:

Dati aktualni pregled postupaka u području aditivne proizvodnje sa posebnim osvrtom na FDM (Fused Deposition Modeling) postupak. Iznijeti teoretsku podlogu o hrapavosti i načinu mjerenja. Za različite debljine slojeva ispisa na epruvetama proizvedenim FDM postupkom mjeriti hrapavost. Rezultate mjerenja obraditi, prikazati grafički i tablično te iznijeti zaključke i objasniti utjecaj slojevitosti izrade na hrapavost prototipova.

Koristiti odgovarajuću dostupnu literaturu, priručnike i podatke.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

03.10.2016

21.10.2016

28.10.2016

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

Nikola Šimunić, mag.ing.stroj.

Marijan Brozović, dipl.ing.

## SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| SADRŽAJ .....                                    | I  |
| POPIS SLIKA .....                                | II |
| POPIS TABLICA.....                               | IV |
| SAŽETAK.....                                     | V  |
| SUMMARY .....                                    | VI |
| 1. UVOD.....                                     | 1  |
| 2. POSTUPCI ADITIVNE TEHNOLOGIJE .....           | 4  |
| 2.1 FDM postupak.....                            | 4  |
| 2.2 3D Tisak.....                                | 10 |
| 2.3 Stereolitografija (SLA tehnologija).....     | 13 |
| 2.4 Proizvodnja laminiranih objekata (LOM).....  | 17 |
| 2.5 3D tisak mlazom fotopolimera.....            | 19 |
| 2.6 Selektivno lasersko sinteriranje modela..... | 22 |
| 3. POVRŠINSKA HRAPAVOST .....                    | 25 |
| 4. EKSPERIMENTALNI DIO .....                     | 27 |
| 4.1 Epruvete.....                                | 27 |
| 4.1 Mjerenje hrapavosti.....                     | 28 |
| 5. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA.....              | 33 |
| 6. ZAKLJUČAK.....                                | 35 |
| 7. LITERATURA.....                               | 36 |

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 1. Faze aditivne proizvodnje. [1] .....  | 1  |
| Slika 2. Usporedba izrade modela pomoću oblikovanja odvajanjem čestica i aditivnih postupaka. [2] .....  | 2  |
| Slika 3. FDM postupak. [3] .....   | 5  |
| Slika 4. Prikaz nanošenja materijala sloj na sloj. [4] .....   | 5  |
| Slika 5. MakerBot Replicator (suvremeni stroj za FDM postupak). [5] .....                                | 6  |
| Slika 6. PLA filament. [6] .....   | 7  |
| Slika 7. Jednostavan FDM stroj, najčešće upotrebljavan za hobi. [7] .....                                | 8  |
| Slika 8. Maketa auta izrađena FDM postupkom. [8] .....   | 8  |
| Slika 9. Greške kod FDM postupka. [9] .....  | 10 |
| Slika 10. Princip 3D tiska. [10] .....   | 10 |
| Slika 11. PromoJET, inkjet 3D printer. [11] .....  | 12 |
| Slika 12. Primjer izradaka pomoću 3D tiska. [12] .....   | 12 |
| Slika 13. Prikaz procesa SLA tehnologije. [13] .....   | 13 |
| Slika 14. SLA 3D printer, tvrtke SHINING 3D. [14] .....  | 14 |
| Slika 15. Model dobiven SLA tehnologijom, na slici se vidi još neodvojena potporna struktura. [15] ..... | 15 |
| Slika 16. Primjer izrade više izradaka odjednom, pomoću SLA postupka. [13] .....                         | 16 |
| Slika 17. Princip izrade laminiranjem. [17] .....  | 17 |
| Slika 18. Model nastao LOM tehnologijom. [18] .....  | 18 |
| Slika 19. PolyJet postupak. [19] .....   | 19 |
| Slika 20. PolyJet printer. [20] .....  | 20 |
| Slika 21. Blok motora izrađen na PolyJet printeru. [20] .....  | 21 |
| Slika 22. Prikaz SLS postupka. [22] .....  | 22 |
| Slika 23. SLS 3D printer tvrtke Concept Laser. [23] .....  | 23 |
| Slika 24. Primjer modela izrađenih SLS postupkom. [24] .....   | 24 |
| Slika 25. Profil površine. [25] .....  | 25 |
| Slika 26. Srednje aritmetičko odstupanje profila Ra. [26] .....  | 26 |
| Slika 27. Način određivanja srednje visine neravnine Rz. [26] .....                                      | 26 |
| Slika 28. Epruveta .....   | 27 |

|  |    |
|--|----|
| Slika 29. OpenBeam 3D printer .....  | 28 |
| Slika 30. Prikaz kalibracije mjernog uređaja pomoću odgovarajućeg etalona. ....  | 29 |
| Slika 31. Mjerenje hrapavosti epruvete. ....                                     | 29 |
| Slika 32. Prikaz rezultata mjerenja.....   | 30 |
| Slika 33. Graf ovisnosti srednjeg aritmetičkog odstupanja o debljini sloja. .... | 33 |
| Slika 34. Graf ovisnosti srednje visine neravnina o debljini sloja. ....         | 33 |



## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Rezultati mjerenja za debljinu sloja 0,1 i 0,2mm

Tablica 2. Rezultati mjerenja za debljinu sloja 0,3mm

## SAŽETAK

Aditivna proizvodnja svakim danom sve više napreduje, pod tim pojmom postoje različiti postupci izrade prototipova i malih serija. Svim postupcima je zajedničko stvaranje modela sloj po sloj iz računalno izrađenog CAD modela.

Postoje mnogi postupci aditivne proizvodnje, u ovom završnom radu opisani su samo neki s naglaskom na FDM postupak. Svaki postupak ima svoje prednosti i nedostatke, ovisno o kompliciranosti izrade modela, kvaliteti dobivenog vanjskog izgleda, mehaničkim svojstvima i sl.

U okviru ovog završnog rada provedeno je mjerenje hrapavosti na epruvetama izrađenim FDM postupkom. Epruvete su izrađene različitom debljinom ispisa. Rezultati mjerenja prikazani su tablično i u dijagramu, te je napravljena njihova analiza.

Ključne riječi:

- Aditivna tehnologija
- 3D printanje
- FDM postupak
- Hrapavost površine

## **SUMMARY**

Additive technology is advancing every day and this term encompasses various procedure of making prototypes and small series. All this procedures have in common making of models layer by layer from computer generated CAD model.

There are many additive technology procedures and in this final paper I described only some with focus on FDM method. Every method has it's advantages and it's disadvantages based on the complexity od model production, quality of outer appearance, mechanical properties etc.

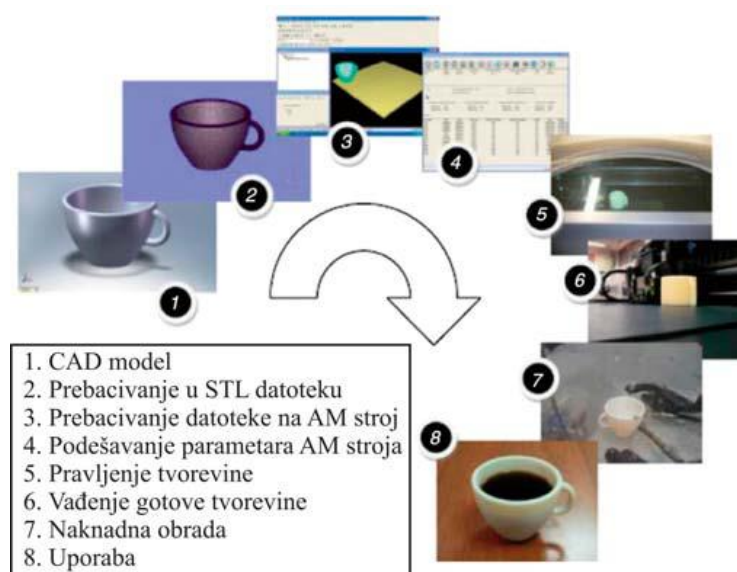
Within this final paper the measuring of surface roughness on test bars was preformed by applying FDM procedure. Test bars wew made by different print thickness. The results of measurment are shown in tables and diagrams and their analysis were made.

Key words:

- Additive technology
- 3D printing
- FDM technology
- Surface roughness

## 1. UVOD

Aditivna proizvodnja (Additive Manufacturing) je grana proizvodnog strojarstva koja se bavi izradom predmeta nanošenjem čestica u takim slojevima. Sam proces proizvodnje započinje konstruiranjem trodimenzionalnog modela računalnim CAD programima za modeliranje trodimenzionalnog modela ili digitaliziranjem prostornog oblika već postojećeg objekta trodimenzionalnim skenerima. CAD model se pohranjuje u STL formatu. Sljedeći korak je rezanje modela na slojeve, strojevi za aditivnu proizvodnju rade na principu slaganja sloj po sloj. Broj slojeva ovisi o rezoluciji printera. Nakon rezanja potrebno je podesiti parametre izrade kao što su debljina ispisa, brzina, temperatura ispisa, potreba za potpurnom strukturom i sl. Nakon što se podese parametri, izrada modela može početi. Kada je model gotov, slijedi vađenje iz radne površine stroja, obrada modela. Nakon obrade model je gotov i spreman je za upotrebu.



Slika 1. Faze aditivne proizvodnje. [1]

Povijest aditivne proizvodnje seže u osamdesete godine prošlog stoljeća i tada se koristila samo za izradu prototipova. U tom periodu pojavile su se osnovne vrste aditivne tehnologije kao što su stereolitografija i foto-osjetljivi tekući polimeri. Prvi susret aditivne proizvodnje s industrijom dogodio se 1987. godine kad je proizvođač 3D Systems, bazirajući se na postupku stereolitografije očvrsnuo tanak sloj kapljevito polimera pomoću UV lasera. Postupak 3D printanja razvijen je na MIT-u 1989. godine. A ranije spomenuta tvrtka 3D Systems je razvila prvi stroj za 3D printanje, koji je radio na principu nanošenja voska sloj po sloj primjenom inkjet postupka.

Predmeti izrađeni postupkom aditivne tehnologije, odnosno dodavanjem materijala sloj po sloj štede materijal u usporedbi s klasičnim postupcima izrade, koji se temelje na oduzimanju materijala, kao što su tokarenje, glodanje i slično. Aditivna izrada omogućuje izradu predmeta koje nije moguće ostvariti klasičnim postupcima obrade. Ograničenje klasičnih postupaka, kao što je naprimjer obrada odvajanjem čestica, je to da rez ovisi o geometriji reznog alata.



**Slika 2. Usporedba izrade modela pomoću oblikovanja odvajanjem čestica i aditivnih postupaka. [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 samo na određene materijale, no kako se aditivni postupci svakim danom sve više i više razvijaju, današnji se prototipovi mogu upotrijebiti 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, a naročito 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.

Uz dio nabrojanih prednosti i pojedinih nedostataka aditivna tehnologija nalazi danas primjenu u mnogim djelatnostima, kao što su;

- 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. POSTUPCI ADITIVNE TEHNOLOGIJE

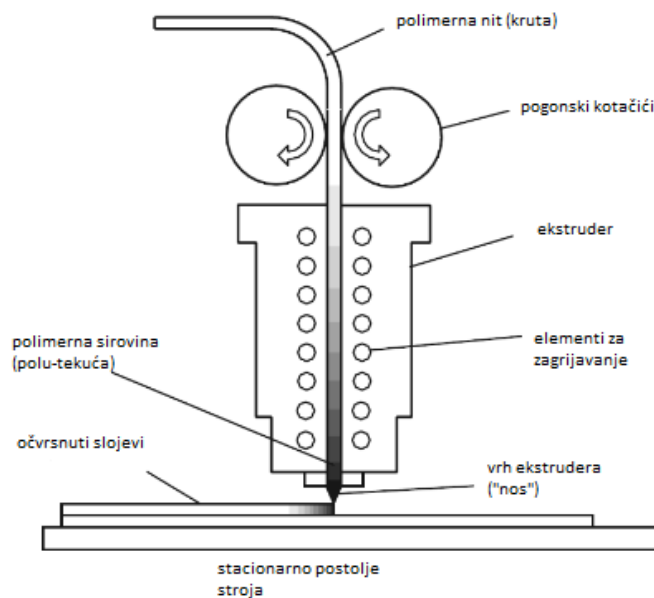
Postupci aditivne tehnologije mogu se podijeliti prema četiri glavna čimbenika; vrsti materijala za potrebnog model, izvoru energije, postupku oblikovanja sloja i obliku gotovog modela. Postupke aditivne tehnologije još možemo podijeliti na materijale koji se upotrebljavaju u izradi modela, a to su materijali u čvrstom stanju (žica, papir, folija, itd.) te kapljevinu i prah.

### 2.1 FDM postupak

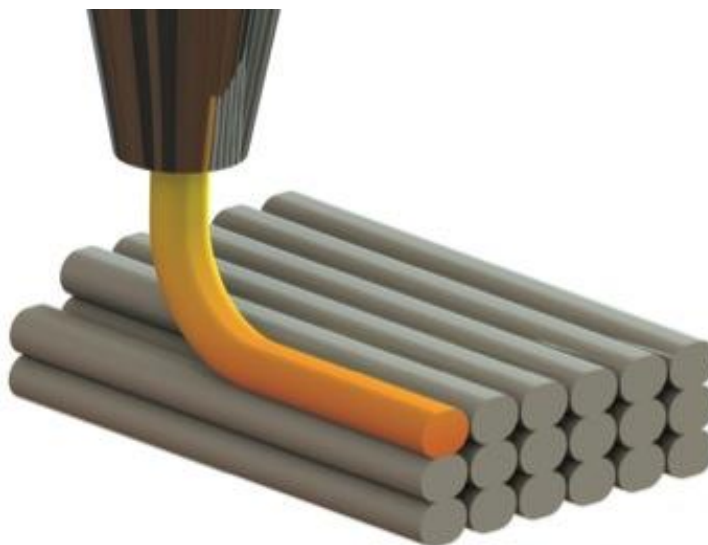
Taložno očvršćivanje-FDM (Fused Deposition Modeling) je postupak aditivne tehnologije koji za izradu modela nanosi otopljeni materijal sloj po sloj. Materijal koji se koristi kod ovog postupka je plastična masa. Ova tehnologija spada u skupinu jednostavnijih postupaka, te strojevi mogu biti dosta primitivni u odnosu na ostale postupke. Kvaliteta stroja igra veliku ulogu u kvaliteti ispisa odnosno modela. Etaloni čiju ćemo hrapavost ispitivati dalje u tekstu su izrađeni upravo ovom tehnologijom.

Postupak izrade modela FDM tehnologijom započinje izradom CAD modela koji se kasnije ubaci u računalni software čija je zadaća generacija 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 nanosen 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 pomiće za visinu idućeg sloja po z-osi. Na prvi sloj se nanosi drugi i tako se postupak 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, dok uređaje bez grijane komore još dijelimo na one sa i bez grijane podloge. Grijana podnoga 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.).



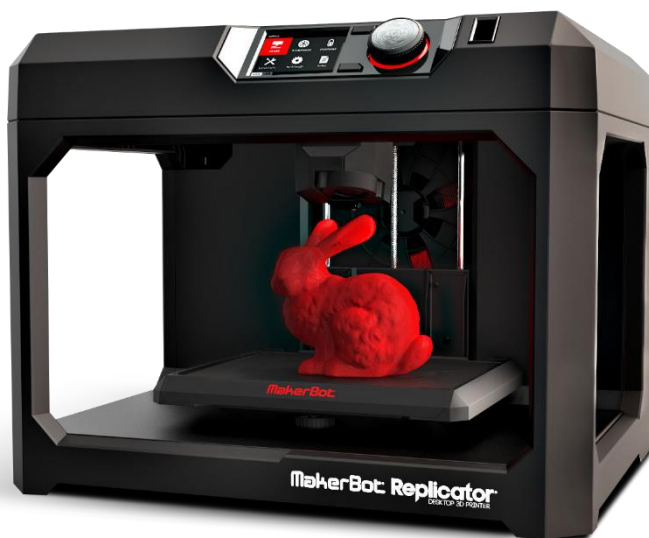
**Slika 3. FDM postupak. [3]**



**Slika 4. Prikaz nanošenja materijala sloj na sloj. [4]**



Kvaliteta, hrapavost i mehanička svojstva ovise o parametrima ispisa poput visine sloja, unutrašnje ispune modela, broj horizontalnih slojeva modela i svojstvima samog materijala. Tako će model ispisan manjom visinom sloja imati manju hrapavost nego model ispisa većom visinom sloja, što ćemo kasnije u mjerenjima hrapavosti i dokazati. Unutrašnja ispuna i broj horizontalnih slojeva modela značajno utječu na mehanička svojstva.



**Slika 5. MakerBot Replicator (suvremeni stroj za FDM postupak). [5]**

Materijali koji se primjenjuju u FDM postupku:

ABS (akrilonitril-butadien stirel) je morfni 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 tvrđim 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.

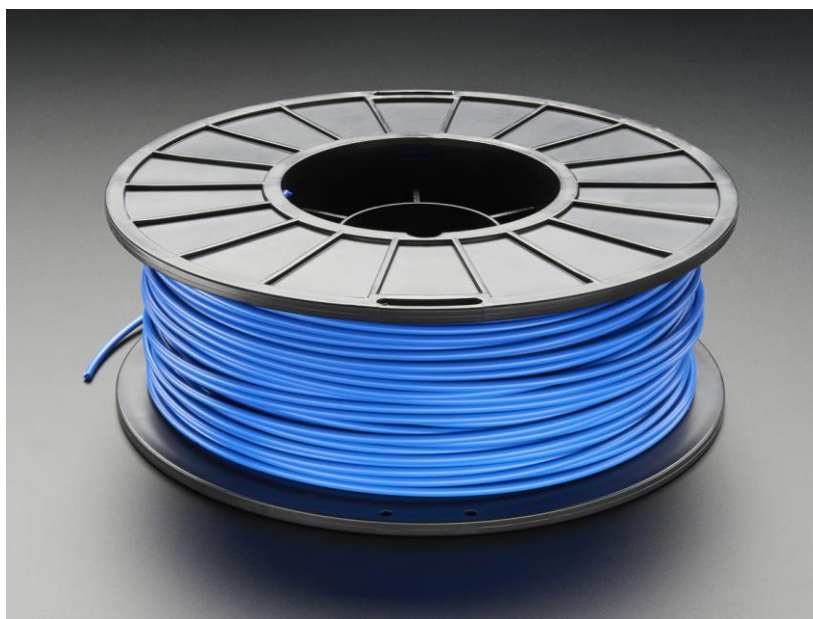
PLA (polilaktidna kiselina) je biorazgradivi termoplastični poliester koji nastaje iz obnovljivih izvora kao što su kukuruzni škrob (u SAD-u), krumpir u Aziji. To je jedini materijal za aditivnu proizvodnju, a da se ne koristi i u postupku brizganja polimernih materijala.

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.

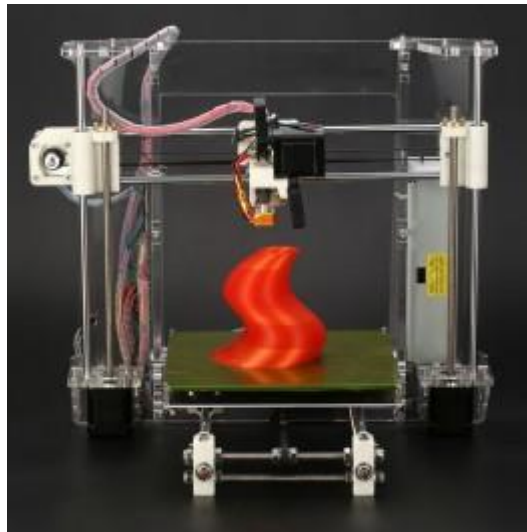
Polikarbonat je sam po sebi jedan od najprozirnijih polimera. Istovremeno, PC se može miješati u različite boje, od prozirnih nijansi do mat neprozirnih boja. Estetika polikarbonata je na najvišem nivou u spektru inženjerskih polimera.

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.

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 6. PLA filament. [6]**



Slika 7. Jednostavan FDM stroj, najčešće upotrebljavan za hobi. [7]



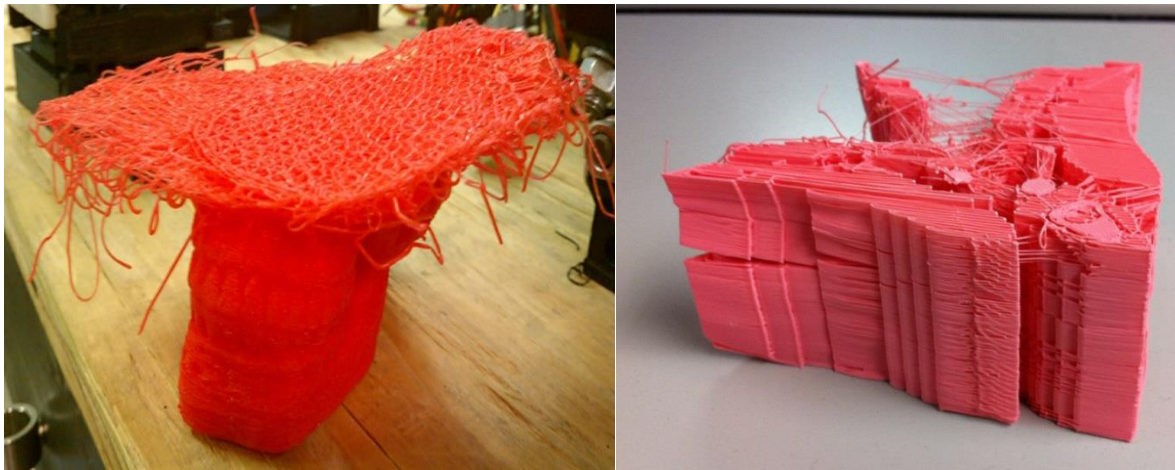
Slika 8. Maketa auta izrađena FDM postupkom. [8]

**Prednosti FDM postupka:**

- Proizvodnja funkcionalnih dijelova
- Minimalni otpad
- Lakoća izmjene materijala
- Brza izrada
- Malo početno ulaganje
- 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, odnosno koliko ih stane na radnu podlogu
- Nije potreban poseban prostor jer se ne upotrebljavaju štetni materijali

**Nedostaci FDM postupka:**

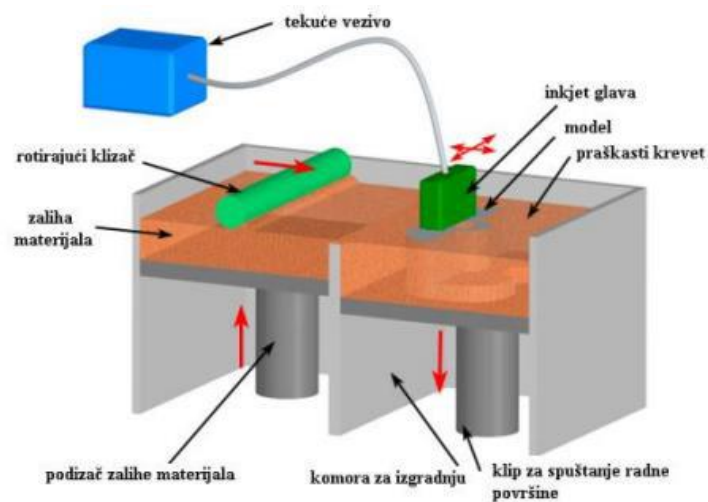
- Nepredvidljivo skupljanje materijala
- Ograničena točnost izrade modela
- Nužna primjena potporne strukture kod složenijih oblika
- Oscilacije temperature mogu izazvati raslojavanje prototipa
- Niža čvrstoća prototipa u smjeru okomitom na smjer izrade
- Nemogućnost izrade oštih rubova zbog kružnog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



Slika 9. Greške kod FDM postupka. [9]

## 2.2 3D Tisak

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



Slika 10. Princip 3D tiska. [10]

Proces započinje kao i u ostalim postupcima, CAD modelom koji se ubaci u računalni program uređaja. Programski paket uređaja izrezuje na stotine digitalnih poprečnih presjeka modela. Nakon toga započinje zagrijavanje komore stroja, nakon čega se komora ispunjava slojem polimernog praha. Koji služi kao "temelj" kasnijem modelu, na prahu se model izrađuje te se zbog njega lakše gotov model 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 inkjet 3D printera:

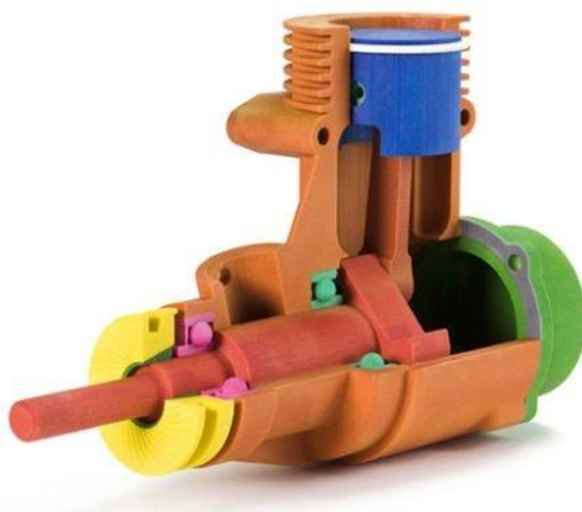
- Točnost
- Brzina izrade
- Prikaz u bojama
- Materijali nisu štetni za zdravlje
- Nema gubitaka materijala za izradu potporne strukture
- Modeli su vrlo kvalitetnog izgleda
- Mehanički izdržljivi modeli, ovisno o daljnoj obradi

Nedostaci inkjet 3D printera:

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



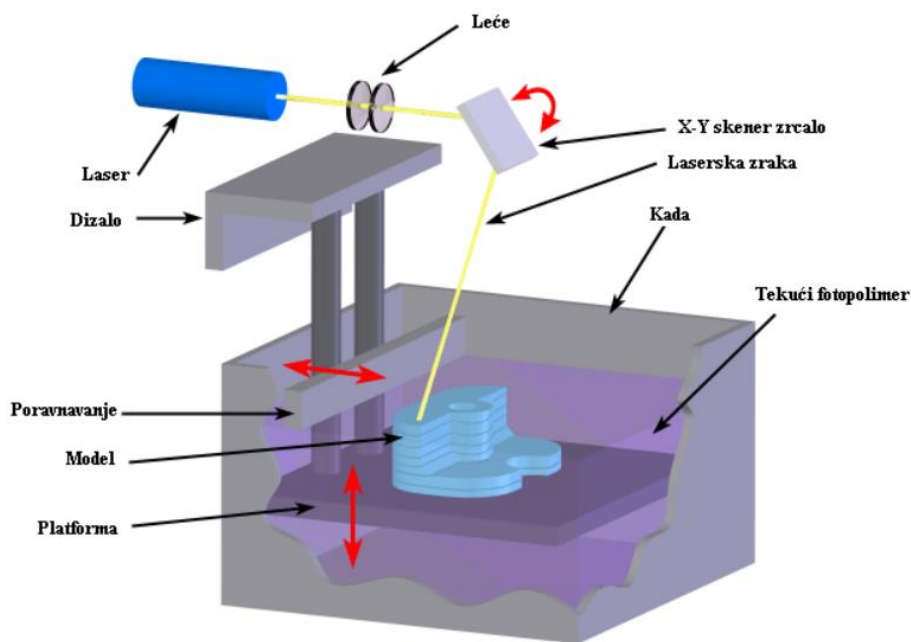
Slika 11. PromoJET, inkjet 3D printer. [11]



Slika 12. Primjer izradaka pomoću 3D tiska. [12]

## 2.3 Stereolitografija (SLA tehnologija)

Stereolitografija je prvi proces koji je korišten u brzom izradi prototipova. Na tržištu se pojavio 1987. godine kao proizvod tvrtke 3D Systems. Stereolitografija je jedna od najfinijih tehnika aditivne tehnologije. Model se izrađuje pomoću tekućeg fotopolimera kojeg skrućuje laserska zraka. Fotopolimer je materijal koji mijenja svoju strukturu pod UV svjetlošću, kada prelazi iz tekućeg u kruto stanje. Značajna prednost ove tehnologije je ta da modeli koliko god bili komplicirani mogu se proizvesti za jedan dan. Odlikuju ih dobra mehanička svojstva, te se tako mogu kasnije obrađivati pa čak i koristiti za izradu kalupa za lijevanje metala ili drugih materijala. Stereolitografija se koristi u medicini kod teških defekata nakon operacije tumora, u izradi implantanata i slično. Točnost dimenzija stereolitografskih modela izrazito je visoka, s odstupanjem  $\pm 0,5$  mm.



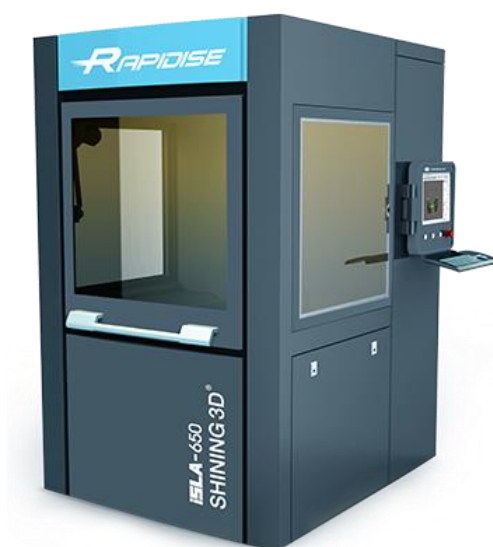
Slika 13. Prikaz procesa SLA tehnologije. [13]

Stereolitografija je tehnologija aditivne proizvodnje modela koja koristi podlogu sa tekućim fotopolimerom, takozvanom smolom i UV laser koji osvjetljava fotopolimer sloj po sloj, s pomoću kojeg tekući fotopolimer očvrstne. Izloženost UV snopu svjetlosti učvršćuje presjek koji je iscrtan na smoli i spaja ga s čvrstim slojem ispod njega.

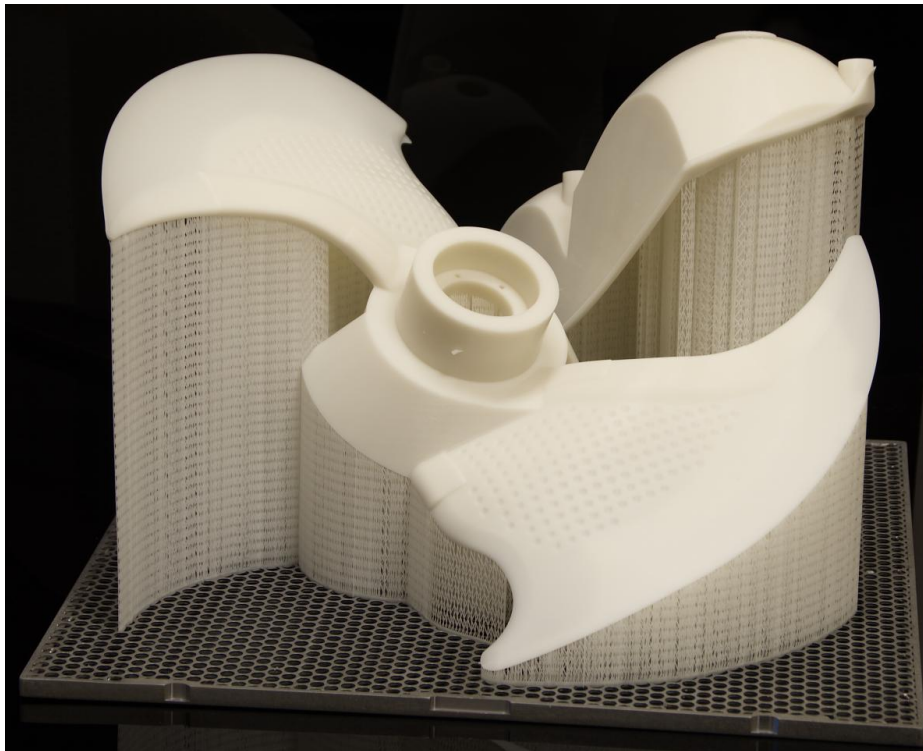


Nakon iscrtanog sloja, platforma se spusti dolje za visinu jednog sloja, obično 0,05mm do 0,15mm. Zatim smola ponovo prekrije model i ponovo se iscrtava presjek sloja. Pomak platforme je rezolucija ili debljina sloja prema kojoj se može klasificirati točnost, odnosno preciznost stroja. Što je manja vrijednost pomaka po z-osi, dobivaju se čišći prijelazi i potrebna je manja naknadna strojna obrada modela. U isto vrijeme manja vrijednost pomaka po z-osi produžuje i vrijeme izrade modela. Nakon završetka izrade modela laser se gasi te se postolje uzdiže i ostatak sirovine se odvaja od osnovnog modela, nakon odvajanja model se stavlja u UV peć radi dodatnog, odnosno završnog sraščivanja.

Materijali koji se koriste u ovom postupku su standardizirani, ali se radi na njihovom priširivanju. Trenutno najkorišteniji materijali su bazirani na akrilatu, ali koriste se još i materijali bazirani na epoksi smolama. Smole ili sirovine bazirane na tekućini mogu se modificirati u svrhu poboljšavanja i unaprijeđenja mehaničkih svojstava.



**Slika 14. SLA 3D printer, tvrtke SHINING 3D. [14]**



**Slika 15. Model dobiven SLA tehnologijom, na slici se vidi još neodvojena potporna struktura. [15]**

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, tolerancijski vrlo točne
- Mogućnost izrade oštih rubova
- Homogenost
- Brzina izrade
- Mogućost daljnje obrade izrađenih modela
- Moguća izrada više modela odjednom, odnosno koliko stane na platformu

Nedostaci SLA tehnologije:

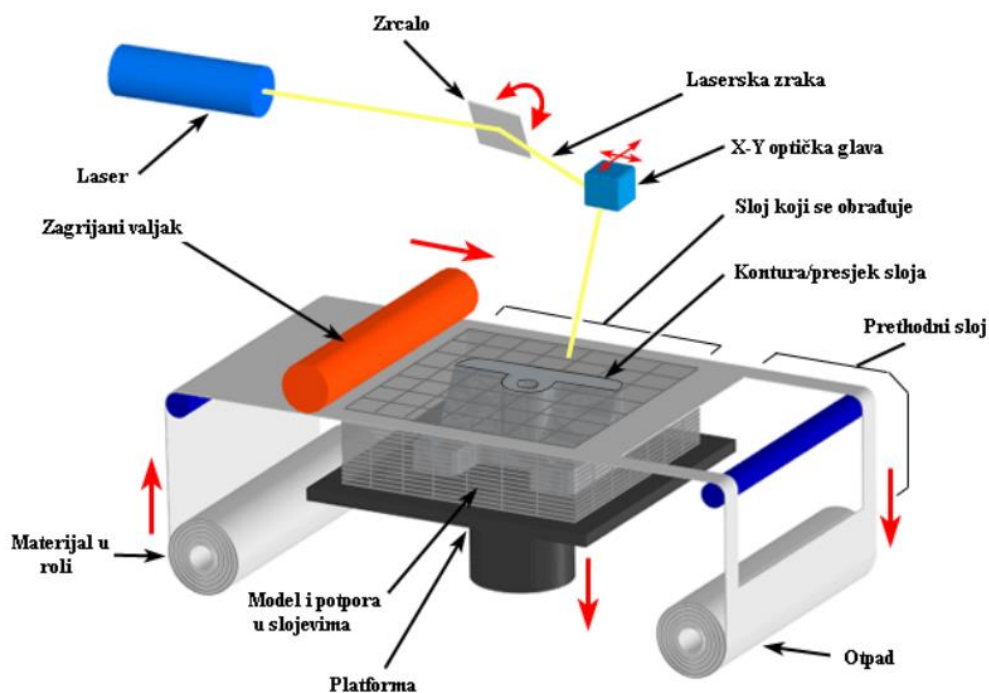
- Potreba naknadne obrade u UV peći radi očvrnuća
- Korištenje potporne strukture, koja je kasnije neupotrebljiva
- Visoka cijena materijala i njihovo pravilno skladištenje
- Izbor materijala se svodi na fotopolimere
- Kratak vijek trajanja lasera



Slika 16. Primjer izrade više izradaka odjednom, pomoću SLA postupka. [13]

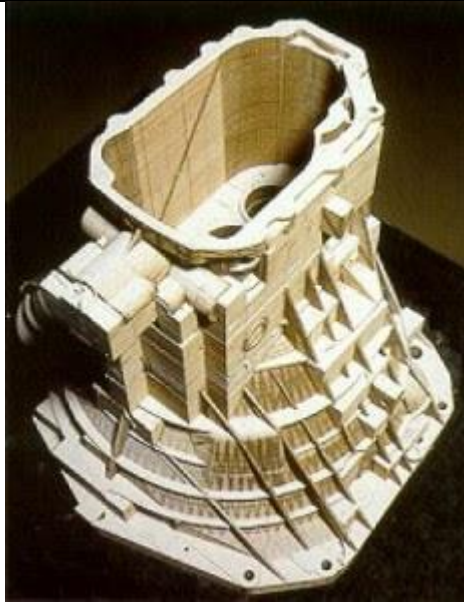
## 2.4 Proizvodnja laminiranih objekata (LOM)

Izrada modela laminiranjem jedna je od najstarijih ali i najbržih postupaka aditivne tehnologije. U ovom postupku 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 17. Princip izrade laminiranjem. [17]

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, ljepilo) na donju stranu papira. Nakon što je materijal doveden s role nad platformu, laserska zraka pomoću optičkog sustava izrezuje konturu poprečnog presjeka i okolni materijal radi lakšeg odvajanja. Nakon izrezivanja, zagrijani valjak prelazi reko 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 18. Model nastao LOM tehnologijom. [18]**

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

Prednosti LOM postupka:

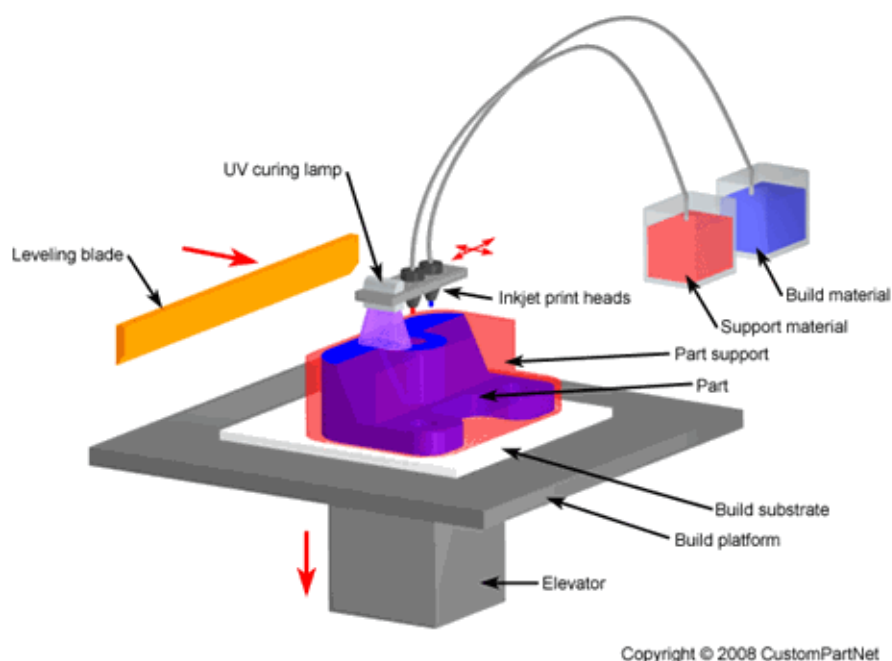
- Jednostavna izrada
- Prihvatljiva cijena uređaja i materijala
- Jeftino održavanje
- Nema potporne konstrukcije
- Niska zaostala naprezanja i deformiranje modela
- Brza izrada velikih modela

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.

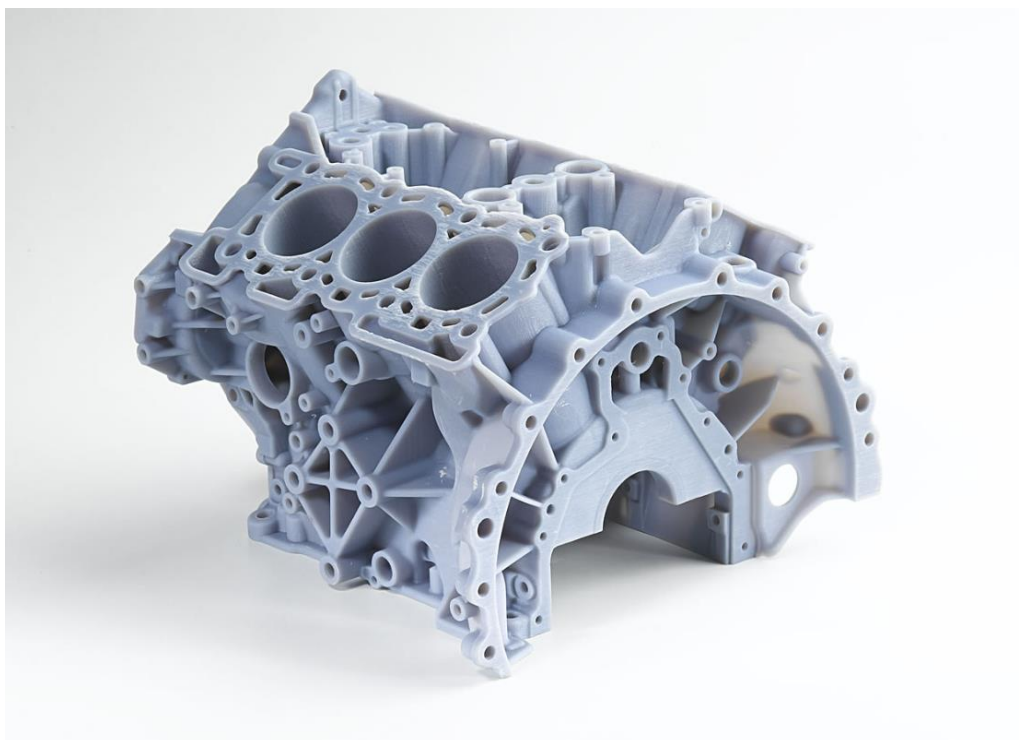


Slika 19. PolyJet postupak. [19]

Sloj fotoosjetljivog polimernog materijala nanosi se pomoću inkjet mlaznica na radnu površinu. Sloj se nanosi pomoću dvoje glave koje sadrže velik broj mlaznica koje u jednom koraku istovremeno raspršuju potporni materijal i materijal za izgradnju modela. U istom koraku UV lampa obavlja polimerizaciju nanešenog sloja. Nakon nanešenog sloja i polimerizacije, radna površina spušta se po z-osi za debljinu jednog sloja. Sloj je oko 5 puta tanji nego kod stereolitografije. Ovo je prvi 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, traženih mehaničkih svojstava. Površina modela izrađenih ovom tehnologijom spada među kvalitetnije. Potpornu konstrukciju odnosno pomoćni materijal potrebno je skidati nakon izrade, ovisno o firmi koja proizvodi stroj, pomoćni materijal može biti topiv u vodi ili može biti u obliku voska, taj vosak se tali u posebnoj peći.



Slika 20. PolyJet printer. [20]



**Slika 21. Blok motora izrađen na PolyJet printeru. [20]**

Prednosti PolyJet postupka:

- Brzina postupka
- Visoka kvaliteta površine
- Izrada finih detalja
- Lako riješiv potporni materijal
- Izbor dostupnih materijala
- Mogućnost kombinacije više materijala odjednom
- Mogućnost daljnje obrade odvajanjem čestica

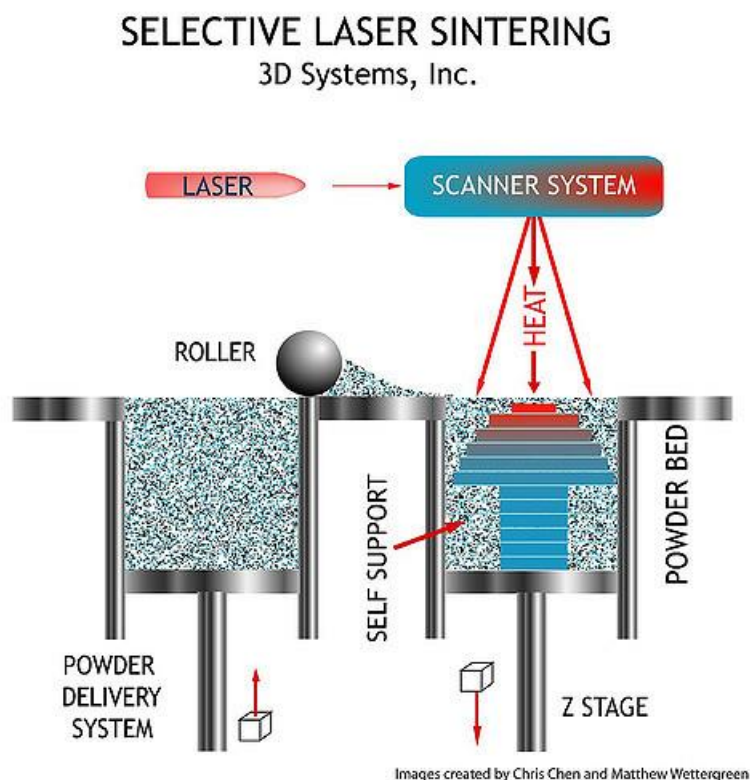
Nedostaci PolyJet postupka:

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



## 2.6 Selektivno lasersko sinteriranje modela

Selektivno lasersko sinteriranje modela (SLS) je metoda aditivne tehnologije koja proizvodi uglavnom metalne dijelove, 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.



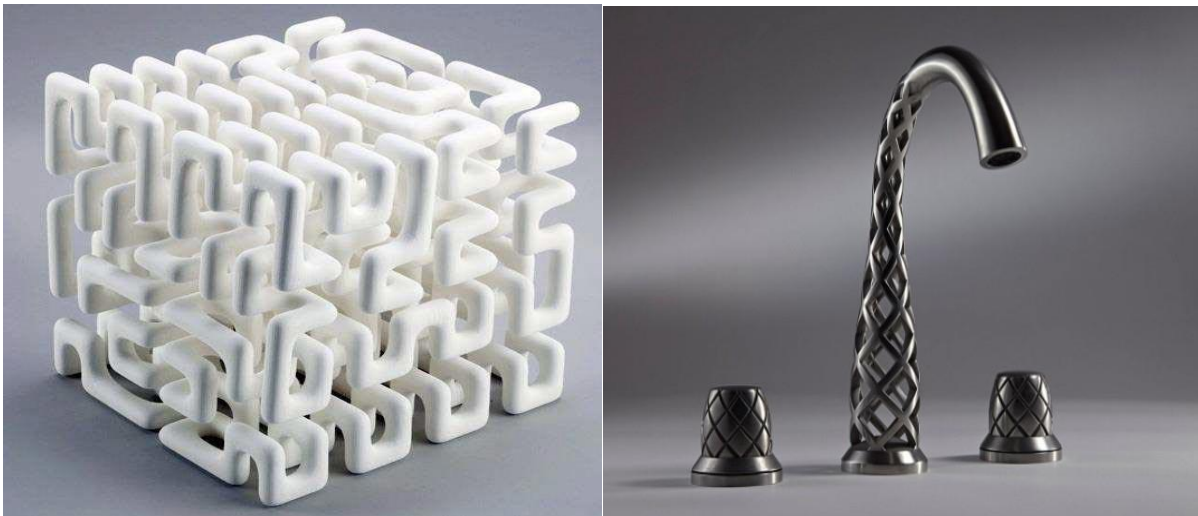
**Slika 22. Prikaz SLS postupka. [22]**

Pomoću rotirajućeg valjka se na radnu podlogu nanosi predhodno zagrijani sloj praškastog materijala, koji zatim obasja zraka numerički upravljano $\text{g}$   $\text{CO}_2$  lasera. Sloj praškastog materijala nanosi se iz zagrijane komore, 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 koja se kasnije usisa. Nakon toga potrebno je model ostaviti da se ohladi u radnoj komori prije izlaganja okolnoj atmosferi. Višak praha koji okružuje gotov model usisava se u pomoćne komore te se kasnije reciklira, a prah koji ostane u provrtima, udubljenjima i zazorima na izrađenom modelu odstranjuje se u komori za ispuhivanje. Većina modela izrađena SLS postupkom spremna je za uporabu već nakon čišćenja, ovisno o korištenom materijalu, dok neki materijali zahtijevaju dodatnu termičku obradu. Plinovi koji nastaju tijekom procesa se filtriraju prije izlaska u okolnu atmosferu tako da postupak nije opasan za okoliš.



**Slika 23. SLS 3D printer tvrtke Concept Laser. [23]**



**Slika 24. Primjer modela izrađenih SLS postupkom. [24]**

Prednosti SLS postupka:

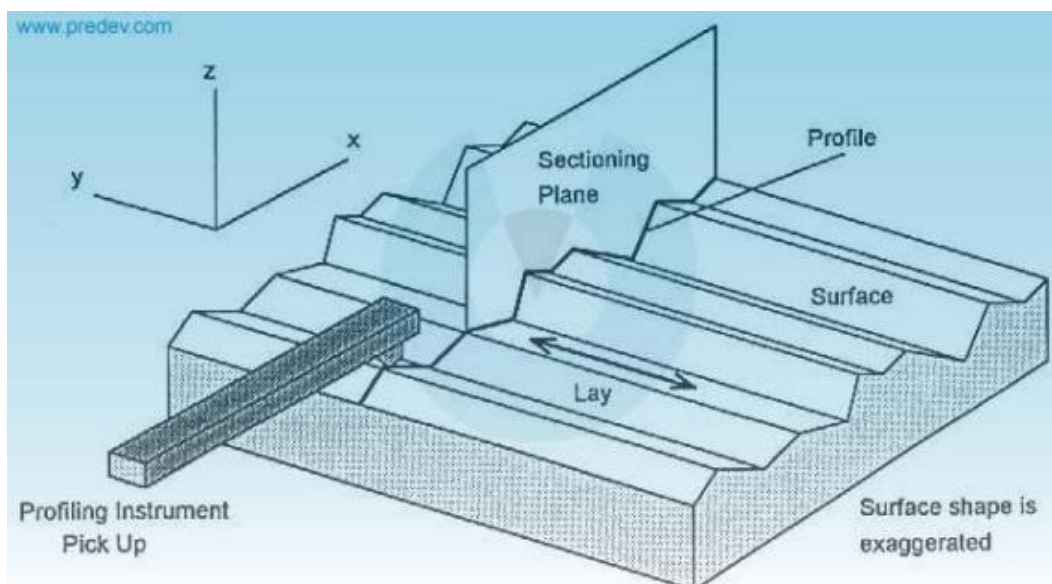
- Brzina izrade (brži postupak od stereolitografije)
- Mala zaostala naprezanja
- Velik izbor materijala
- Izrada modela vrlo malih dimenzija
- Bolja mehanička svojstva modela od onih izrađenih stereolitografijom
- Moguće korištenje dijelova izrađenih ovom tehnologijom za funkcionalna ispitivanja
- Nije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

Nedostaci SLS postupka:

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

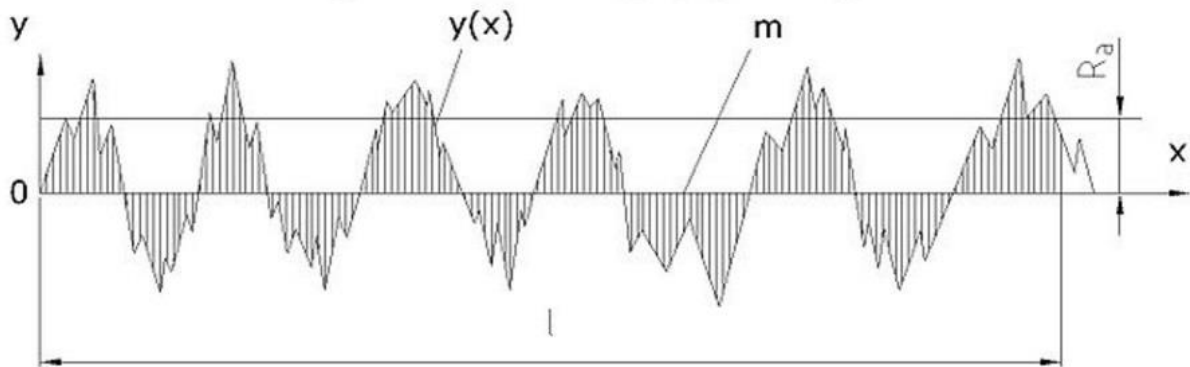
### 3. POVRŠINSKA HRAPAVOST

Površinska hrapavost je skup mikogeometrijskih nepravilnosti na površinama predmeta koje su uzrokovane postupkom obrade ili nekim drugim utjecajima. Hrapavost površine bitno utječe na radna svojstva strojnih dijelova, posebice na mjestima međusobnog spoja pojedinih elemenata. Strojni dijelovi s manjom hrapavošću imaju veću dinamičku čvrstoću, veću otpornost na koroziju, veću sposobnost naljezanja, bolje prenose toplinu i sl..



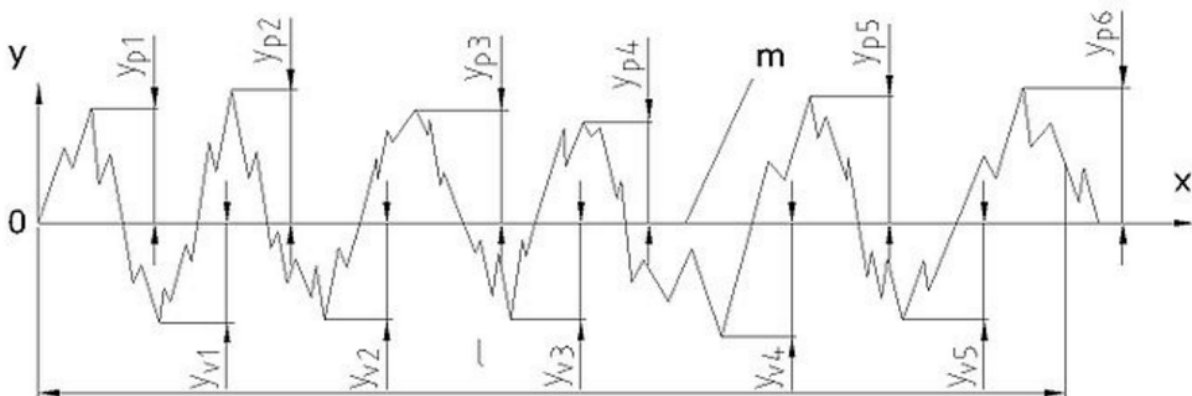
Slika 25. Profil površine. [25]

Za procjenjivanje hrapavosti površine u strojarskoj praksi najčešće se upotrebljava srednje aritmetičko odstupanje profila. Srednje aritmetičko odstupanje profila  $R_a$  je jednako srednjoj aritmetičkoj vrijednosti apsolutnih vrijednosti visine profila neravnina na mjerenoj duljini.



Slika 26. Srednje aritmetičko odstupanje profila  $R_a$ . [26]

Kao parametar hrapavosti često se upotrebljava srednja visina neravnina  $R_z$ , koja je jednaka zbroju aritmetičke sredine apsolutnih vrijednosti visine pet najviših vrhova i aritmetičke sredine apsolutnih vrijednosti pet najvećih dubina na mjenoj duljini.



Slika 27. Način određivanja srednje visine neravnine  $R_z$ . [26]

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu ovog završnog rada mjerio sam hrapavost epruveta izrađenih FDM postupkom. Epruvete su izrađene različitom rezolucijom odnosno različitom debljinom ispisa slojeva.

### 4.1 Epruvete

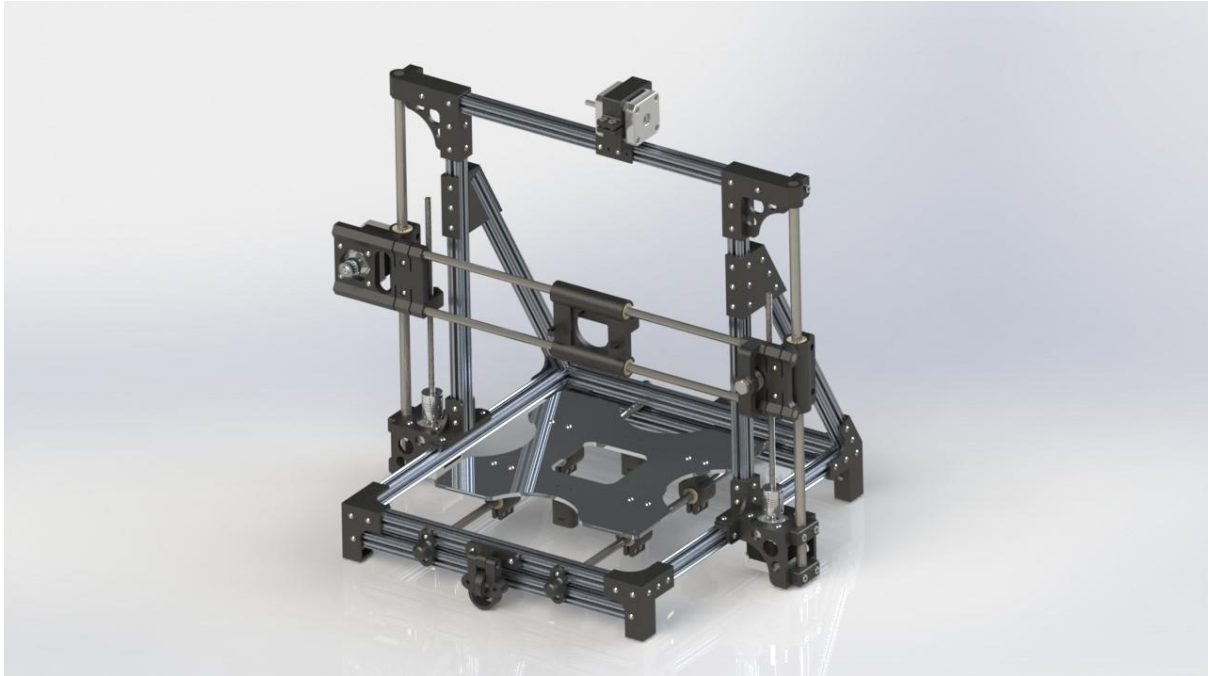
Epruvete na kojima sam radio ispitivanja hrapavosti izrađene su FDM postupkom. Kao što sam već opisao FDM postupak spada u postupke slojevite izrade modela. Epruvete su izrađene različitim debljinom sloja, o debljini sloja ovisi hrapavost ali i brzina ispisa epruvete ili nekog modela. Epruvete na kojima je provedeno ispitivanje hrapavosti dimenzije su 10x10x20mm.



Slika 28. Epruveta

Materijal od kojeg su izrađene epruvete je siva PLA polimerna žica. PLA polimer je biorazgradivi polimer koji se dobiva iz laktičke kiseline, moguće ga je koristiti više puta taljenjem i ponovnom izradom žice. Debljine slojeva epruveta na kojima sam mjerio

hrapavost su 0,1mm, 0,2mm i 0,3mm. Epruvete su izrađene na OpenBeam printeru. G kod je generiran pomoću "Slicer-a" .



**Slika 29. OpenBeam 3D printer**

Parametri printanja:

- Temperatura ekstrudera 210°C
- Staklena radna podloga zagrijana na 60°C
- Brzina ispisa  $v=35\text{mm/s}$
- Bez hlađenja epruvete

#### **4.1 Mjerenje hrapavosti**

Hrapavost sam mjerio pomoću uređaja Mitutoyo SJ-210. Uređaj ticalom prolazi po mjerenoj podlozi i bilježi neravnost podloge. Prije početka mjerenja potrebno je kalibrirati uređaj pomoću odgovarajućeg etalona poznate hrapavosti koji dolazi uz navedeni mjerni uređaj.



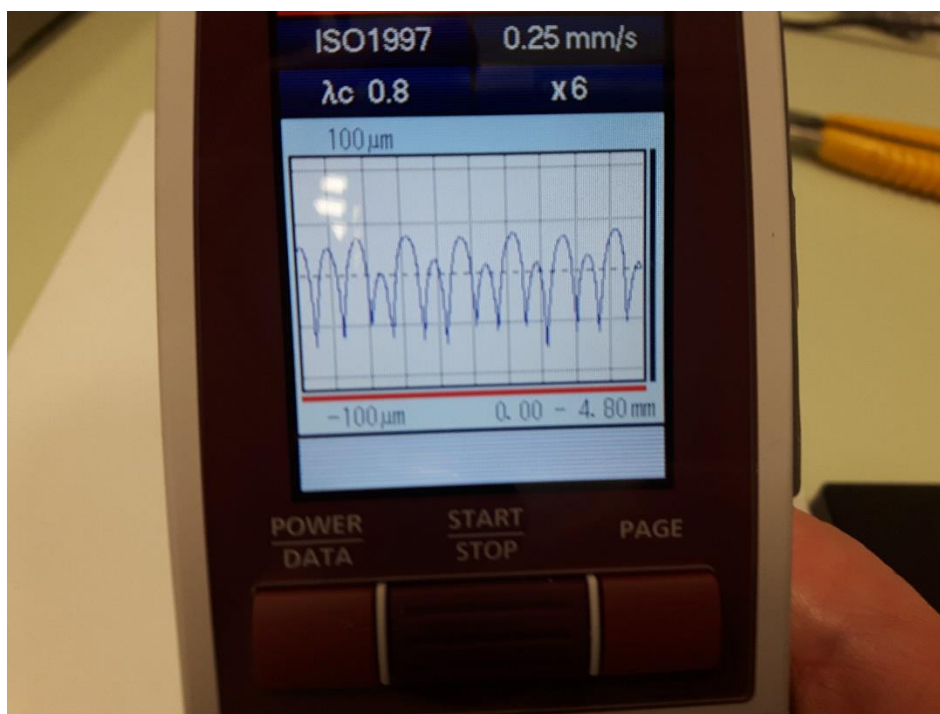
**Slika 30. Prikaz kalibracije mjernog uređaja pomoću odgovarajućeg etalona.**

Nakon kalibracije uređaja započeo sam s mjerenjem epruveta. Za mjerenja hrapavosti koristio sam 9 epruveta. 3 epruvete ispisane slojem 0,1mm, 3 epruvete ispisane slojem 0,2mm te 3 epruvete ispisane slojem 0,3mm. Mjerene su vrijednosti Ra i Rz. Mjerio sam sve 4 stranice na svakoj od epruveta te kasnije izračunao srednju vrijednost dobivenih rezultata i standardnu devijaciju.



**Slika 31. Mjerenje hrapavosti epruvete.**





Slika 32. Prikaz rezultata mjerenja.

Parametri uređaja za mjerenje hrapavosti:

- ISO1997
- Brzina mjerenja  $v=0,25\text{mm/s}$
- Dužina uzorkovanja  $\lambda_c=0,25\text{mm}$
- Broj dužine uzorkovanja  $N=6$

| Debljina sloja | Epruveta broj | Mjerenje | Ra [ $\mu\text{m}$ ] | Rz [ $\mu\text{m}$ ] |                  |
|----------------|---------------|----------|----------------------|----------------------|------------------|
| 0,1 mm         | 1             | 1        | 9,894                | 46,322               |                  |
|                |               | 2        | 8,834                | 42,673               |                  |
|                |               | 3        | 10,929               | 53,293               |                  |
|                |               | 4        | 9,19                 | 48,45                |                  |
|                | $R_{srednje}$ |          |                      | 9,71 $\pm$ 0,92      | 47,68 $\pm$ 4,43 |
|                | 2             | 1        | 13,601               | 61,219               |                  |
|                |               | 2        | 10,642               | 55,311               |                  |
|                |               | 3        | 9,579                | 50,208               |                  |
|                |               | 4        | 9,586                | 47,7                 |                  |
|                | $R_{srednje}$ |          |                      | 10,85 $\pm$ 1,89     | 53,6 $\pm$ 5,98  |
|                | 3             | 1        | 8,257                | 41,489               |                  |
|                |               | 2        | 10,115               | 50,471               |                  |
|                |               | 3        | 8,746                | 45,149               |                  |
|                |               | 4        | 9,408                | 47,052               |                  |
| $R_{srednje}$  |               |          | 9,13 $\pm$ 0,8       | 47,55 $\pm$ 3,74     |                  |
| $\bar{X}$      |               |          | 9,89 $\pm$ 0,87      | 49,61 $\pm$ 3,45     |                  |
| 0,2 mm         | 1             | 1        | 15,95                | 76,582               |                  |
|                |               | 2        | 17,113               | 80,92                |                  |
|                |               | 3        | 14,395               | 67,749               |                  |
|                |               | 4        | 18,457               | 77,404               |                  |
|                | $R_{srednje}$ |          |                      | 16,47 $\pm$ 1,72     | 75,66 $\pm$ 5,6  |
|                | 2             | 1        | 16,224               | 76,985               |                  |
|                |               | 2        | 14,24                | 64,324               |                  |
|                |               | 3        | 21,474               | 83,998               |                  |
|                |               | 4        | 16,261               | 76,582               |                  |
|                | $R_{srednje}$ |          |                      | 17,04 $\pm$ 3,09     | 75,47 $\pm$ 8,17 |
|                | 3             | 1        | 15,263               | 69,809               |                  |
|                |               | 2        | 16,411               | 77,115               |                  |
|                |               | 3        | 14,826               | 69,25                |                  |
|                |               | 4        | 17,378               | 73,495               |                  |
| $R_{srednje}$  |               |          | 15,96 $\pm$ 1,15     | 72,42 $\pm$ 3,65     |                  |
| $\bar{X}$      |               |          | 16,49 $\pm$ 0,54     | 74,51 $\pm$ 1,1      |                  |

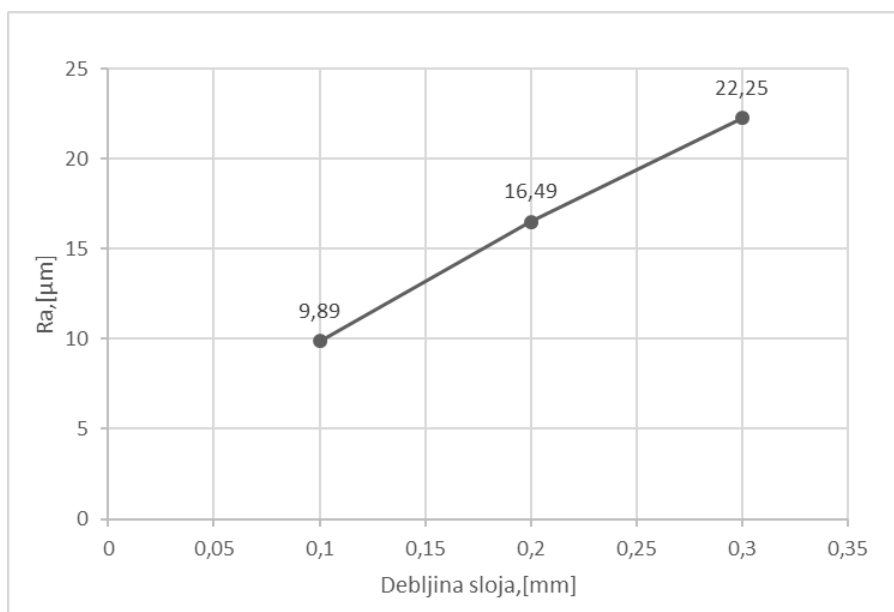
Tablica 1. Rezultati mjerenja za debljinu sloja 0,1 i 0,2mm

| Debljina sloja | Epruveta broj              | Mjerenje | Ra [ $\mu\text{m}$ ] | Rz [ $\mu\text{m}$ ] |             |
|----------------|----------------------------|----------|----------------------|----------------------|-------------|
| 0,3 mm         | 1                          | 1        | 22,891               | 99,797               |             |
|                |                            | 2        | 22,222               | 101,31               |             |
|                |                            | 3        | 20,628               | 94,057               |             |
|                |                            | 4        | 18,109               | 74,341               |             |
|                | <i>R<sub>srednje</sub></i> |          |                      | 20,96±2,12           | 92,37±12,42 |
|                | 2                          | 1        | 25,286               | 113,23               |             |
|                |                            | 2        | 20,507               | 89,577               |             |
|                |                            | 3        | 21,505               | 99,004               |             |
|                |                            | 4        | 23,19                | 102,23               |             |
|                | <i>R<sub>srednje</sub></i> |          |                      | 22,62±2,09           | 101±9,75    |
|                | 3                          | 1        | 23,379               | 99,645               |             |
|                |                            | 2        | 24,873               | 111,35               |             |
|                |                            | 3        | 22,278               | 101,93               |             |
|                |                            | 4        | 22,258               | 101,09               |             |
|                | <i>R<sub>srednje</sub></i> |          |                      | 23,19±1,23           | 103,5±5,31  |
| $\bar{X}$      |                            |          | 22,25±1,15           | 98,96±5,83           |             |

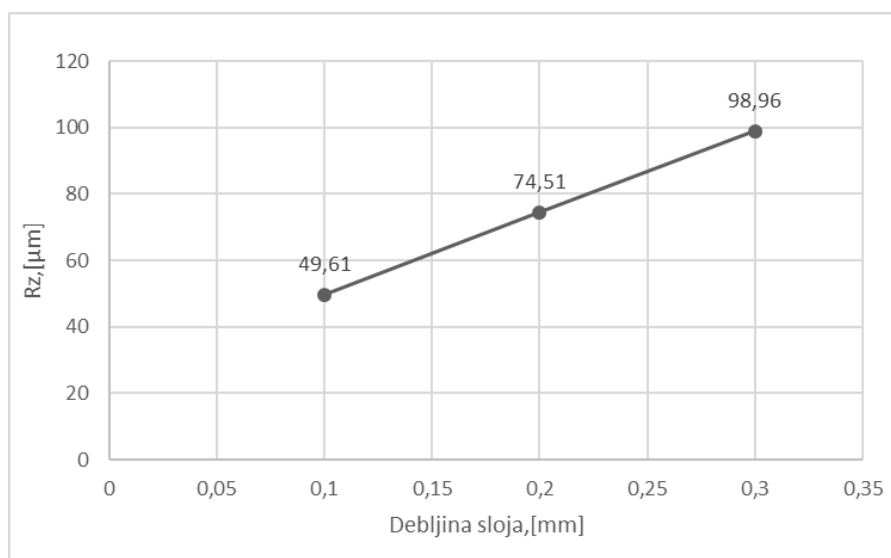
**Tablica 2. Rezultati mjerenja za debljinu sloja 0,3mm**

## 5. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

Nakon obavljenih ispitivanja hrapavosti epruveta napravio sam tablicu u koju sam unio rezultate iz kojih sam izračunao srednju vrijednost Ra i Rz parametre hrapavosti. S tim podacima napravio sam grafove iz kojih se vidi ovisnost hrapavosti o debljini sloja.



Slika 33. Graf ovisnosti srednjeg aritmetičkog odstupanja o debljini sloja.



Slika 34. Graf ovisnosti srednje visine neravnina o debljini sloja.

Iz grafova (slika 33 i 34) se vidi da parametri hrapavosti Ra i Rz gotovo pa linearno rastu s povećanjem debljine ispisa epruveta. Na samim epruvetama se golim okom vidjela razlika u hrapavosti što je i mjerenje pokazalo.

Debljina sloja ispisa FDM tehnologijom značajno ovisi o mehaničkim svojstvima, brzini ispisa pa i u temi ovog rada; hrapavosti samog modela. Kod izrade modela pravilan odabir parametara tiskanja, kao što je debljina ispisa može značajno ubrzati proizvodnju modela. Tako kod modela koji ne zahtjeva posebnu kvalitetu površine bolje odabrat deblji sloj ispisa zbog brže izrade pa i manje potrošnje energije. Usporedno, kod modela koji zahtjevaju "finiju" kvalitetu površine odabire se što manja debljina ispisa.

## 6. ZAKLJUČAK

Iako je aditivni postupak relativno nov među postupcima izrade, razvijeno je puno metoda i mogućnosti izrade prototipova, manjih serija i sl. Uz svakodnevni napredak materijala i tehnologija napreduje i tehnologija 3D printanja koja postaje dostupna sve većem broju tvornica pa i ljudima koji se bave ovakvom proizvodnjom iz hobija. Iz dana u dan se proširuje i područje izrade proizvoda proizvedenih 3D printerima, možda najznačajnije u području medicine gdje ova tehnologija u posljednje vrijeme igra veliku ulogu u liječenju i pomoći potrebitima.

U prošlosti, izrada prototipova predstavljala je veliki problem. Komadna izrada prototipova u svrhu ispitivanja i testiranja bila je skupa, jer bilo je potrebno izraditi kalup i alat za izradu prototipa. Pojavom aditivnih tehnologija pojavila se brza izrada prototipova koja je značajno ubrzala proizvodnju i smanjila cijenu izrade prototipova. Tehnologije aditivne proizvodnje zaživjele su zbog mogućnosti reprogramiranja i prenamjene prototipa. U ovom radu obradio sam područje hrapavosti materijala izrađenih FDM postupkom, te dokazao ovisnost hrapavosti o debljini ispisanog sloja. Također iz ovih ispitivanja, zaključio sam da aditivna proizvodnja može zamijeniti klasične postupke proizvodnje u malim serijama jer nema potrebe za izradom kalupa i posebnih alata, a posjeduje zadovoljavajuća mehanička svojstva.

Aditivne tehnologije će se u budućnosti sigurno razvijati u dobrome smjeru, te tako doprinijeti razvoju novih tehnologija pa i u nekim pogledima kvaliteti života.

## 7. LITERATURA

- [1] [hrcak.srce.hr/file/147943](http://hrcak.srce.hr/file/147943)
- [2] <http://additivemanufacturing.com/basics/>
- [3] Mautner, Viktor: FDM postupak brze izrade prototipova (završni rad)
- [4] <http://www.additive3d.com/extrusion-deposition-fused-deposition-modeling-fdm/>
- [5] <https://all3dp.com/first-look-makerbot-5/>
- [6] <https://www.adafruit.com/product/2147>
- [7] <https://3dprint.com/82272/what-3d-printing-works/>
- [8] <https://3dprint.com/2140/topolabs-fdm-3d-print-method/>
- [9] <http://www.cadjewelleryskills.com/tag/fdm-3d-printers/>
- [10] <http://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
- [11] <http://blog.toner-cartridge-depot.com/2008/06/16/promojet-solvent-inkjet-printer-decorate-your-stuff/>
- [12] <http://www.instructables.com/id/3D-Printing-1/>
- [13] <http://www.zare-prototyping.eu/en/stereolithography-sla>
- [14] [http://en.shining3d.com/3d\\_printing.html](http://en.shining3d.com/3d_printing.html)
- [15] <http://www.fraser-ais.com/node/101>
- [17] <http://www.makepartsfast.com/laminate-object-manufacturing-lom/>
- [18] <http://www.star-prototype.com/blog/top-7-methods-for-making-3d-rapid-prototypes/>
- [19] <http://blog.nus.edu.sg/u0804594/common-rp-techniques/e-polyjet/>
- [20] <http://www.purpleporcupine.com/services/polyjet-technology/>
- [22] <http://www.kemplon.com/is-3d-printing-the-future-of-manufacturing/>
- [23] <http://www.primante3d.com/tas/>
- [24] <http://ibdesigntech.com/3-5-rapid-prototyping-selective-laser-sintering-sls-4/>
- [25] [http://www.riteh.uniri.hr/zav\\_katd\\_sluz/zvd\\_kons\\_stroj/nas/LabVjebze\\_A/Download/Lab\\_vj\\_hrapavost\\_slike.pdf](http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_kons_stroj/nas/LabVjebze_A/Download/Lab_vj_hrapavost_slike.pdf)
- [26] <http://marjan.fesb.hr/~djelaska/documents/ES-skripta-760.pdf>