

Otpornost na abrazijsko trošenje 3D tiskanog PLA polimera

Lemezina, Ante

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:427613>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ante Lemezina

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Krešimir Grilec, dipl. ing.

Student:

Ante Lemezina

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se profesoru Krešimiru Grilecu na pruženoj pomoći prilikom pisanja rada.

Također se zahvaljujem asistentima Draženu Mezdiću i Ivani Bunjan na pruženoj pomoći pri ispitivanjima.

Ante Lemezina



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ante Lemezina** Mat. br.: 0035211859

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Otpornost na abrazijsko trošenje 3D tiskanog PLA polimera**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Abrasion resistance of 3D printing PLA polymer**

Opis zadatka:

PLA (polilaktična kiselina, polilaktid) je biorazgradivi poliestar koji se dobiva iz obnovljivih izvora, kao što su kukuruzni škrob, šećerna trska ili krumpirov škrob. Često se primjenjuje kod aditivne proizvodnje i to uglavnom kod postupka taložnog očvršćivanja (FDM) te je uz akrilonitril butadien stiren (ABS) primarni materijal za ovaj postupak.

U ovom radu je potrebno:

- 1) Navesti primjenu PLA polimera.
- 2) Opisati postupak taložnog očvršćivanja (FDM).
- 3) Izraditi uzorke 3D tiskanog PLA polimera s različitim smjerovima taloženja.
- 4) Ispitati otpornost na abrazijsko trošenje 3D tiskanih uzoraka.
- 5) Analizirati rezultate te dati zaključak.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.

Zadatak zadao:

K. Grilec

Prof.dr.sc. Krešimir Grilec

Datum predaje rada:

1. rok: 21. veljače 2020.

2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.

3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24.2. – 28.2.2020.

2. rok (izvanredni): 3.7.2020.

3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Predsjednik Povjerenstva:

Branko Bauer

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA I OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1 UVOD.....	1
2 PRIMJENA PLA POLIMERA.....	2
2.1 Primjena u medicini	2
2.2 Šavovi i stentovi.....	3
2.3 Dostava lijeka.....	4
2.4 Ortopedija.....	5
2.5 Ambalaža	6
3 POSTUPAK TALOŽNOG OČVRŠĆAVANJA FDM	7
3.1 Aditivna proizvodnja.....	7
3.2 Taložno očvršćivanje (e. <i>Fused Deposition Modeling</i> – FDM).....	9
3.2.1 Modeli i figurice	11
3.2.2 Standardni 3D tisak.....	12
3.2.3 Funkcionalni 3D tisak	13
3.2.4 Fleksibilno 3D tiskanje	15
4 ABRAZIJSKO TROŠENJE	16
4.1 “Čista” abrazija	19
4.2 Selektivna abrazija	19
4.3 “Nulta” abrazija.....	20
4.4 Trošenje polimera	22
5 EKSPERIMENTALNI DIO	24
5.1 Abrazijsko trošenje[18].....	24
5.2 Ispitivanje „suhi pijesak/gumeni kotač“ (ASTM G 65 – suhi uvjeti ispitivanja) [18].....	24
5.3 Izrada epruveta	26

5.4	Analiza podataka.....	37
6	ZAKLJUČAK.....	38
	LITERATURA.....	39

POPIS SLIKA

Slika 1 Biorazgradivi polimeri u ljudskom organizmu [3]	3
Slika 2 PLA stent [5]	4
Slika 3 Kirurški konac napravljen od PLA kompozita [6]	4
Slika 4 Kapsula s lijekom [7]	5
Slika 5 (a) Pločica i vijak napravljeni od PLA, (b) pločica i vijak pričvršćeni za gornju vilicu, (c) rendgenski snimak odmah nakon operacije i (d) nakon 6 tjedana. [2]	6
Slika 6 Razgradnja boce od PLA u 80 dana [8]	6
Slika 7 Dodavanje materijala sloj po sloj [12]	7
Slika 8 Podjela aditivnih postupaka [11]	9
Slika 9 Shematski prikaz opreme za taložno srašćivanje (FDM) [13]	10
Slika 10 Gustoća ispune u obliku saća [15]	11
Slika 11 Linije lijevo, cik-cak desno[14]	12
Slika 12 Trokuti lijevo, trokuti-šesterokuti desno[14]	13
Slika 13 Kubični lijevo, oktaedar desno[14]	14
Slika 14 Kubična četvrtina lijevo i „gyroid“[14]	14
Slika 15 Križni lijevo, koncentrični desno[14]	15
Slika 16 Jedinični događaj abrazije [16]	16
Slika 17 Abrazija u dodiru dva tijela (a) i tri tijela (b) [16]	17
Slika 18 a) mikrobrazdanje, b) mikrorezanje, c) mikronaprsnuća, d) mikroumor	18
Slika 19 “Čista” abrazija	19
Slika 20 Selektivna abrazija	20
Slika 21 “Nulta” abrazija	21
Slika 22 Površina PLA polimera prije (lijevo) i poslije (desno) provedenog ispitivanja taber abrazije [17]	22
Slika 23 Mehanizam "pijanog prijenosa"	23
Slika 24 Shema tribosustava abrazijskog trošenja[18]	24
Slika 25 Skica uređaja "suhi pijesak/gumeni kotač" [18]	24
Slika 26 Slika uređaja "suhi pijesak/gumeni kotač" i uzorka u držaču	25
Slika 27 Vaga na kojoj su provedena vaganja	26
Slika 28 Uzorci tiskanja, lijevo linije, u sredini „gyroid“ i desno mreža[19]	26
Slika 29 Creality CR-10 [20]	27

Slika 30 CAD model	28
Slika 31 Simulacija tiskanja	28
Slika 32 uzorak 1 prije testiranja.....	29
Slika 33 Uzorci nakon prvog trošenja	29
Slika 34 Uzorci nakon drugog ispitivanja	30
Slika 35 CAD model	31
Slika 36 Simulacija tiskanja	31
Slika 37 Uzorci serije 2	32
Slika 38 Uzorci serija 2 nakon prvog trošenja	32
Slika 39 Uzorci serije 2 nakon drugog trošenja	32
Slika 40 CAD model	33
Slika 41 Simulacija tiskanja	34
Slika 42 Uzorci serije 3	34
Slika 43 Uzorci serije 3 nakon prvog trošenja	34
Slika 44 Uzorci serije 3 nakon drugog trošenja	35
Slika 45 Usporedba gubitaka mase različitih uzoraka	37

POPIS TABLICA

Tablica 1 Mjerenje mase i gubitka mase uzorka 1	30
Tablica 2 Mjerenje mase i gubitka mase uzorka 2	33
Tablica 3 Mjerenje mase i gubitka mase uzorka 3	35
Tablica 4 Gubitci mase nakon 100 okretaja	36
Tablica 5 Gubitci mase nakon 500 okretaja	36

POPIS KRATICA I OZNAKA

Oznaka	Opis
AM	aditivna proizvodnja (<i>Additive Manufacturing</i>)
FDM	postupak taložnog očvršćivanja
PGA	poliglikolid
PLA	polilaktična kiselina, polilaktid
PLGA	kopolimer PLA i PLG
PLLA	polilaktična L kiselina

SAŽETAK

Tema završnog rada je usporedba otpornosti na abrazijsko trošenje 3D tiskanog PLA polimera. Usporedba se provodi između 3 serije uzoraka od kojih je svaka tiskana u drugom smjeru. U teorijskom djelu rada opisana je primjena PLA polimera, postupak taložnog očvršćivanja, smjerovi tiskanja i abrazijsko trošenje. U eksperimentalnom dijelu je provedeno ispitivanje otpornosti na abraziju metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“. Ispitivanja su provedena po normi ASTM G 65 za suhi test.

Ključne riječi: 3D, PLA polimer, abrazija, taložno očvršćivanje, „suhi pijesak/gumeni kotač“

SUMMARY

The thesis deals with abrasion resistance of 3D printing PLA polymer. The comparison is made between 3 series of samples printed in a different direction. The theoretical part of the paper describes the application of PLA polymers, the process of fused deposition modeling, printing directions and abrasion wear. Abrasion resistance test were performed according to the ASTM G65 standard (dry sand/rubber wheel).

Key words: 3D, PLA polymer, abrasion, fused deposition modeling, "dry sand / rubber wheel"

1 UVOD

PLA (polilaktična kiselina, polilaktid) je biorazgradivi poliester koji se dobiva iz obnovljivih izvora kao što su kukuruzni škrob, šećerna trska ili krumpirov škrob. Polilaktična kiselina ili PLA je sintetski, alifatski poliester dobiven od mliječne kiseline te je najviše istraživani i korišten biorazgradivi i obnovljivi alifatski poliester. Također je moguće dobivanje PLA kao produkt metabolizma nekih životinja.[1],[2]

Wallace Carothers je 1932. godine prvi uspio sintetizirati PLA dok je radio za tvrtku DuPont. PLA je bilo moguće proizvesti zagrijavanjem laktične kiseline pod vakuumom i izvlačeći kondenziranu vodu. Glavni problem te metode je bila mala molekularna masa te se molekularna masa uspjela povećati polimerizacijom otvaranjem prstena laktida. I danas je polimerizacija otvaranjem prstena laktida jedna od najkorištenijih metoda polimerizacije, a uz nju se još primjenjuju kondenzacija laktične kiseline i azeotropna dehidracija i kondenzacija.[2] Velika prednost PLA polimera je obradivost no to zahtjeva posebnu pripremu granulata to jest potrebno ga je osušiti inače može doći do degradacije polimera.

PLA se može obraditi:

- Injekcijskim prešanjem
- Sušenjem
- Puhanjem
- Ekstruzijom
- Toplinskim oblikovanjem.

Glavna tržišta ovog relativno mladog i neistraženog polimera su Europa i Japan. Njegova glavna namjena je za ambalažu, ali se većina istraživanja još uvijek provodi. PLA ima dobre preduvjete da postane jedan od vodećih polimera jer ima dobru kombinaciju svojstava. Najveći nedostatak je relativno mala čvrstoća. Izvor sirovine je veliki problem PLA polimera jer iako ima velike izvore sirovine još uvijek je ta sirovina skuplja od nafte. Mora se naći jeftiniji izvor sirovine da bi konkurirao polipropilenu, polistirenu i polietilenu.[1]

PLA spada u sintetske biopolimere te je njihova glavna prednost to što im se karakteristike mogu krojiti to jest mogu se odrediti prije same proizvodnje. Tvrdost kao bitno svojstvo svih materijala je također bitna i kod polimera. Otpornost na abraziju uvelike ovisi o tvrdoći te će se o tome detaljnije govoriti u sljedećim poglavljima.

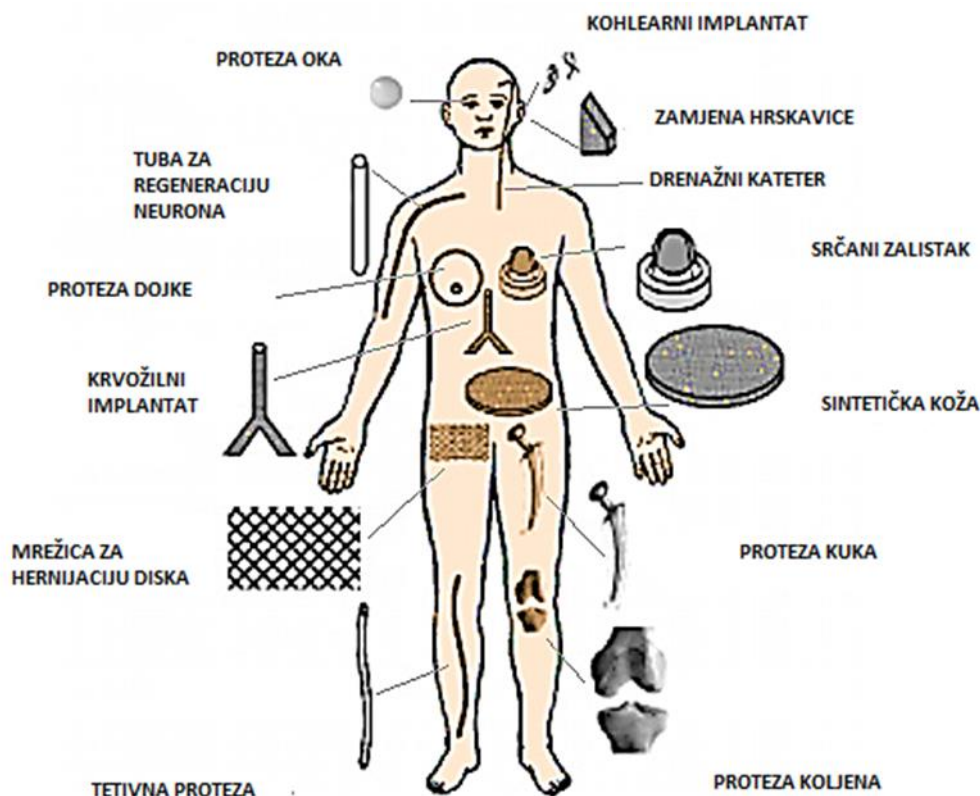
2 PRIMJENA PLA POLIMERA

PLA polimer zbog svoje kombinacije mehaničkih i fizikalnih svojstava je pogodan materijal za proizvodnju ambalaže, pogodan je u tekstilnoj industriji i pogodan je za korištenje u poljoprivredi. Zahvaljujući svojoj biokompatibilnosti i biorazgradivosti čest je materijal i u medicini.[3]

Medicina, ambalaža i tekstilna industrija su područja u kojima je PLA najviše zastupljen. Primjena polimera u tim industrijama i istraživanja pokazuju u kojem smjeru treba ići proizvodnja i uporaba polimera. [2]

2.1 Primjena u medicini

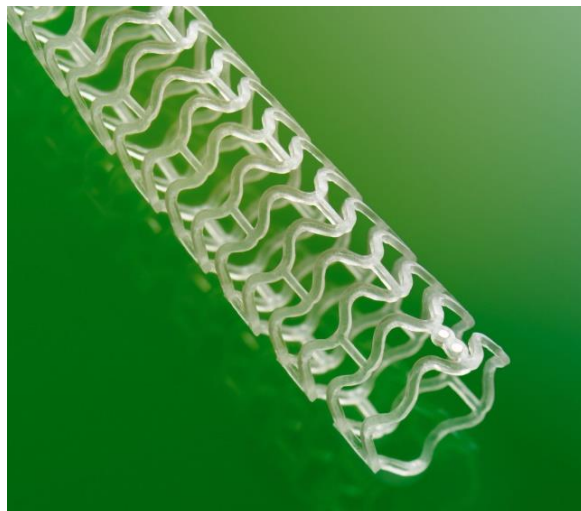
Svojstva PLA polimera kao što su biorazgradivost, biokompatibilnost, termoplastična obradivost i ekološka prihvatljivost i sposobnost razgradnje u određenom vremenskom okviru od par mjeseci do par godina, glavni su razlozi primjene ovog polimera u medicini. Sposobnost prilagođavanja mehaničkih svojstava, kemijskih svojstava i razgradnja su isto bitne karakteristike za primjenu u medicini. PLA se primjenjuje za stentove, kirurški konac, pločice i vijke za fiksaciju kosti, implantate kralježnice, umetke mekog tkiva, tkivno inženjerstvo i kao sustav za dobavu lijekova. U svim tim područjima polimer je izložen drugačijim mehaničkim opterećenjima i atmosferi te treba izdržati propisani period.[2]



Slika 1 Biorazgradivi polimeri u ljudskom organizmu [3]

2.2 Šavovi i stentovi

PLA i njegovi kopolimeri primjenjuju se u medicini u postupcima zacjeljivanja rana kao kirurški konci i kao fiksatori te kao stentovi za srce. Glavna karakteristika polimera u ovom području je njegova postepena razgradnja koje je uvjetovana opterećenjima koja djeluju na njega. Velika mana korištenja polimera u te svrhe je što uslijed razgradnje opada i čvrstoća polimera te može doći do pucanja šava prije nego što je rana dovoljno zarasla. Stentovi napravljeni od PLA polimera su prilikom umetanja u krvožilni sustav izloženi velikim opterećenjima i tlakovima te nakon pozicioniranja opasnost predstavlja veliki broj zaostalih viskoplastičnih naprezanja. Zbog niskog cikličkog naprezanja javlja se umor materijala te pri projektiranju treba obratiti pažnju na umor materijala. PLLA ili polilaktična L kiselina se češće upotrebljava za stentove upravo zbog mogućnosti boljeg projektiranja mehaničkih svojstava. [2]



Slika 2 PLA stent [5]

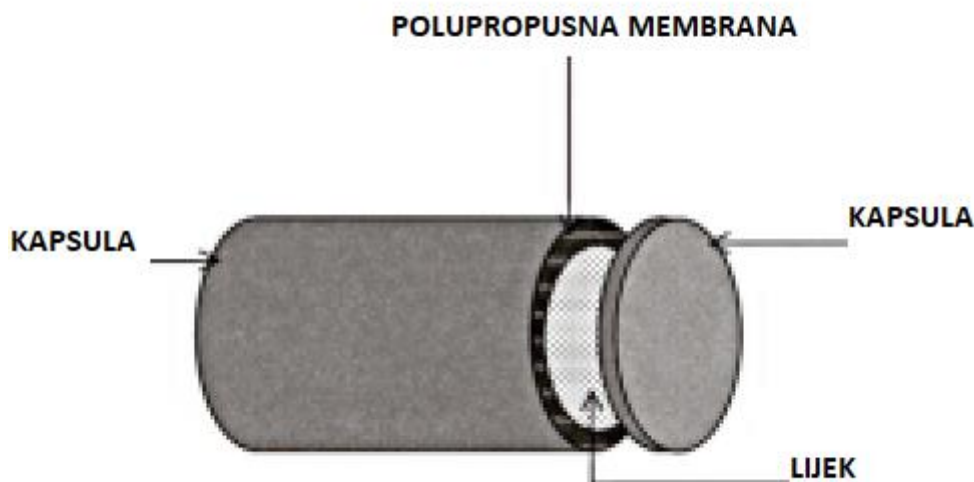


Slika 3 Kirurški konac napravljen od PLA kompozita [6]

2.3 Dostava lijeka

Kontrolirana dostava lijeka direktno u organizam je jedna od najčešćih primjena PLA polimera, a čija je zadaća dostaviti lijek na točno određeno mjesto u organizmu. Kontroliranom brzinom i količinom otpuštanja te liječenjem ciljanog područja postiže se veća učinkovitost lijeka. Ovim načinom se vrši dostava mnogih lijekova kao što su antibiotici, kemoterapija, steroidi, hormoni. PLA, PGA i njihov kopolimer PLGA su najčešće upotrebljavani polimeri koji se koriste za

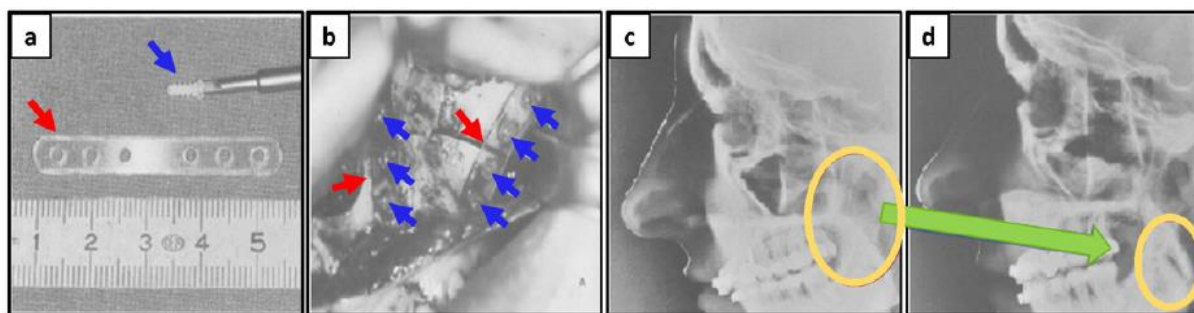
dostavu lijeka zbog njihove biorazgradivosti, biokompatibilnosti i jednostavne prerade.[4] Otpuštanje lijeka odvija se na tri načina: erozijom, difuzijom i oticanjem. Najčešći sustav za dostavu lijeka je da se napravi kapsula od PLA i unutar te kapsule se umetne lijek. [2]



Slika 4 Kapsula s lijekom [7]

2.4 Ortopedija

Uloga polimera kao ortopedskih implantata sve je više zastupljena te se nameće kao jeftiniji i bolji proizvod nego metalni implantati, ali uvelike ovisi o mehaničkim opterećenjima na mjestu gdje se ugrađuje. Najpoželjnije svojstvo PLA implantata je razgradivost, jer na mjestu zacjeljivanja kosti dolazi do razgradnje implantata te kost postepeno preuzima opterećenje što na kraju rezultira bržim oporavkom. Razgradnja polimera u organizmu ne zahtjeva operativni zahvat kojim bi se izvadio implantat te je to još jedna od prednosti nad metalnim implantatima. Kroz povijest PLA polimer se koristio za proizvodnju biorazgradivih vijaka, igala za fiksaciju i šavova za fiksaciju. Takvi implantati se najčešće koriste za područja gdje nisu velika opterećenja.[2]



Slika 5 (a) Pločica i vijak napravljeni od PLA, (b) pločica i vijak pričvršćeni za gornju vilicu, (c) rendgenski snimak odmah nakon operacije i (d) nakon 6 tjedana. [2]

2.5 Ambalaža

PLA je pogodan za ambalažu jer se može proizvoditi ekstrudiranjem, injekcijskim prešanjem, puhanjem. Može poslužiti i kao dobra matrica u razgradivim kompozitima. Upotreba biopolimera u proizvodnji ambalaže za hranu u sve je većem razvoju upravo zbog razgradivosti jer ambalažu koja je onečišćena hranom je teško i skupo reciklirati. PLA polimer ima ograničenu uporabu u industriji hrane upravo zbog duktilnosti, temperaturne otpornosti i propusnosti.



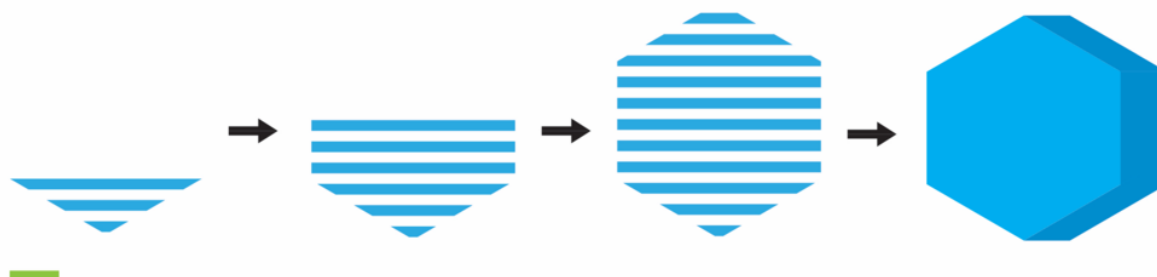
Slika 6 Razgradnja boce od PLA u 80 dana [8]

3 POSTUPAK TALOŽNOG OČVRŠĆAVANJA FDM

FDM ili postupak taložnog očvršćivanja spada pod aditivne tehnologije. Aditivne tehnologije se primjenjuju u svim segmentima od razvoja proizvoda do pojedinačnih proizvoda zahtjevnih geometrija koji se slojevito ispisuju. Glavno načelo aditivne proizvodnje je da se iz 3D računalnog modela sloj po sloj ispisuje tvorevina koja bi drugima postupcima proizvodnje bila znatno skuplja ili nemoguća za proizvesti. Razvoj materijala je dodatno omogućio da ispisani proizvodi ne trebaju daljnju obradu te se znatno poboljšava uporabljivost aditivnih tehnologija. FDM spada pod postupke aditivne proizvodnje koji se temelje na ekstrudiranju jer za nanošenje materijala rabe mlaznice koje su slične glavama ekstrudera dok se pomacima upravlja putem računala. [9]

3.1 Aditivna proizvodnja

Aditivna proizvodnja služi za izradu modela komplicirane geometrije, prototipova, dijelova kalupa i alata. Najčešće se temelje na dodavanju materijala sloj po sloj (Slika 7 Dodavanje materijala sloj po sloj [12]). Glavna prednost aditivne proizvodnje je direktna proizvodnja izravno iz 3D CAD modela bez planiranja procesa, izrade kalupa. [10] No svojstva tvorevina (mehanička svojstva, dimenzijska stabilnost, izgled površine, postojanost na atmosferilije itd.) još se dosta razlikuju od tvorevina načinjenih nekim klasičnim postupcima prerade polimera (npr. injekcijskim prešanjem ili ekstrudiranjem). Glavni nedostatak je, trenutačno, ograničenje samo na određene materijale. No kako se sami aditivni postupci sve više nastoje poboljšati, današnji se prototipovi mogu upotrijebiti kao funkcionalne gotove tvorevine. [11]



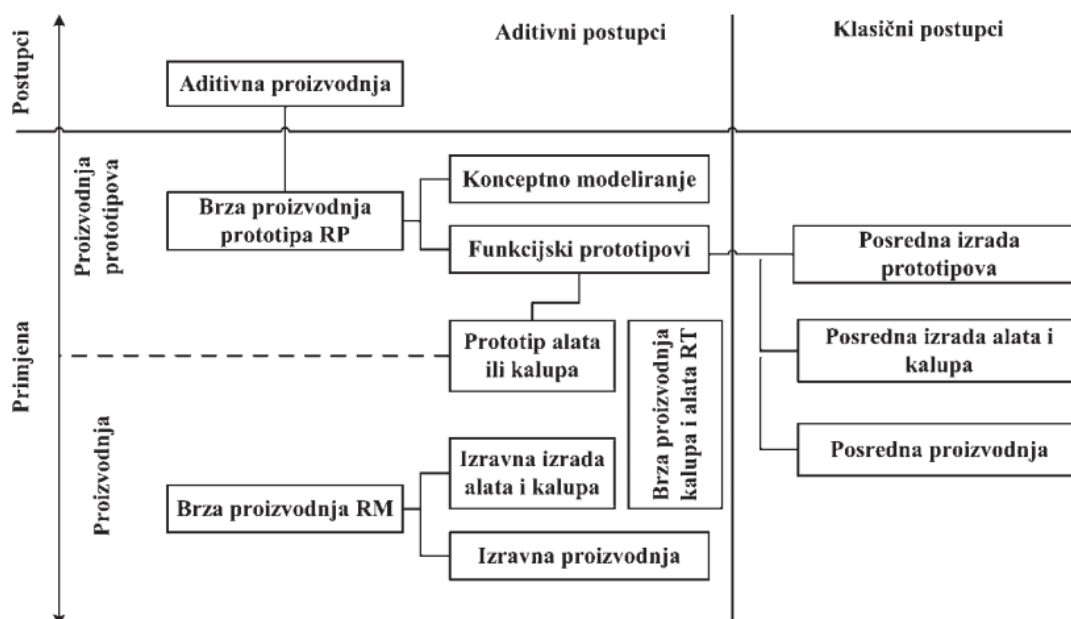
Slika 7 Dodavanje materijala sloj po sloj [12]

Suvremeni zahtjevi tržišta postavljaju ljestvicu razvoja i proizvodnje na sve višu razinu. Tu aditivna proizvodnja dolazi do izražaja. Kod konvencionalnih postupaka točnost je veća nego kod aditivnih postupaka, ali je velika razlika kod troškova. Stoga dolazimo do optimalnog područja primjene aditivne proizvodnje. Aditivna proizvodnja se primjenjuje kod kompleksnih proizvoda zato jer tada troškovi konvencionalnih postupaka rastu višestruko.[9] Aditivna proizvodnja se primjenjuje u mnogim područjima kao što su računalnoj industriji, automobilska industrija, strojogradnja, medicina i ostalo.

AM postupci mogu se podijeliti prema četiri glavna čimbenika: vrsti materijala za potrebnu tvorevinu, izvoru energije, postupku oblikovanja sloja i obliku gotove tvorevine. U aditivnim postupcima razlikuju se tri koraka: rezanje modela u slojeve, slaganje i kombiniranje slojeva. 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 (e. *Fused Deposition Modeling*, FDM) i proizvodnja laminiranih objekata (e. *Laminated Object Manufacturing*, LOM), postupci koji upotrebljavaju kapljevite materijale su stereolitografija (e. *Stereolithography*, SLA), očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (e. *Digital Light Processing*) i *PolyJet*, dok su postupci koji rabe prah npr. selektivno lasersko srašćivanje (e. *Selective Laser Sintering*, SLS) i 3D tiskanje (e. *3D Printing*, 3DP). Pri aditivnim se postupcima najčešće upotrebljavaju polimerni materijali, kao akrilonitril/ butadien/stiren (ABS), poliamid (PA), polikarbonat (PC), poli(metil-metakrilat) (PMMA), poli(vinil-klorid) (PVC), poliuretani, epoksidne smole, ali i čelik, aluminij, titan i druge lake legure. Za izbor materijala najvažniji su čimbenici: mehanička svojstva i pogodnost za korištenje kao završne tvorevine, jednostavnost završne obrade, niža cijena materijala i olakšano rukovanje te skladištenje materijala.[11]

U svim postupcima proizvodnje tvorevina faze izrade su iste i sastoje se od:

- izrade CAD modela
- pretvaranja CAD modela u STL datoteku
- prebacivanja STL datoteke na AM stroj
- podešavanja parametara AM stroja
- pravljenja prototipa
- vađenja prototipa
- naknadne obrada, ako je potrebna
- uporaba

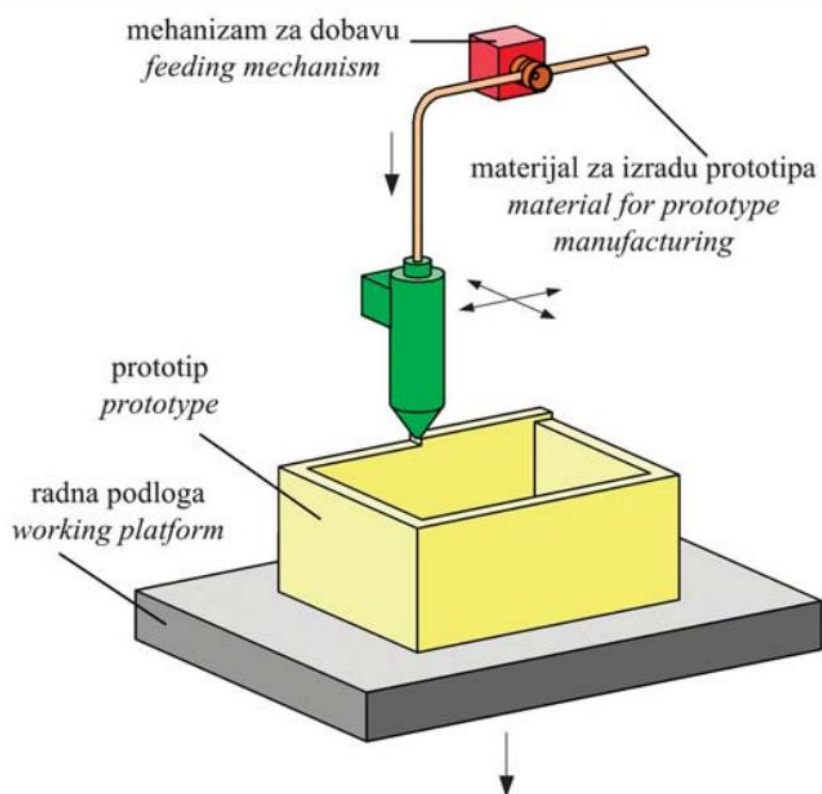


Slika 8 Podjela aditivnih postupaka [11]

3.2 Taložno očvršćivanje (e. *Fused Deposition Modeling* – FDM)

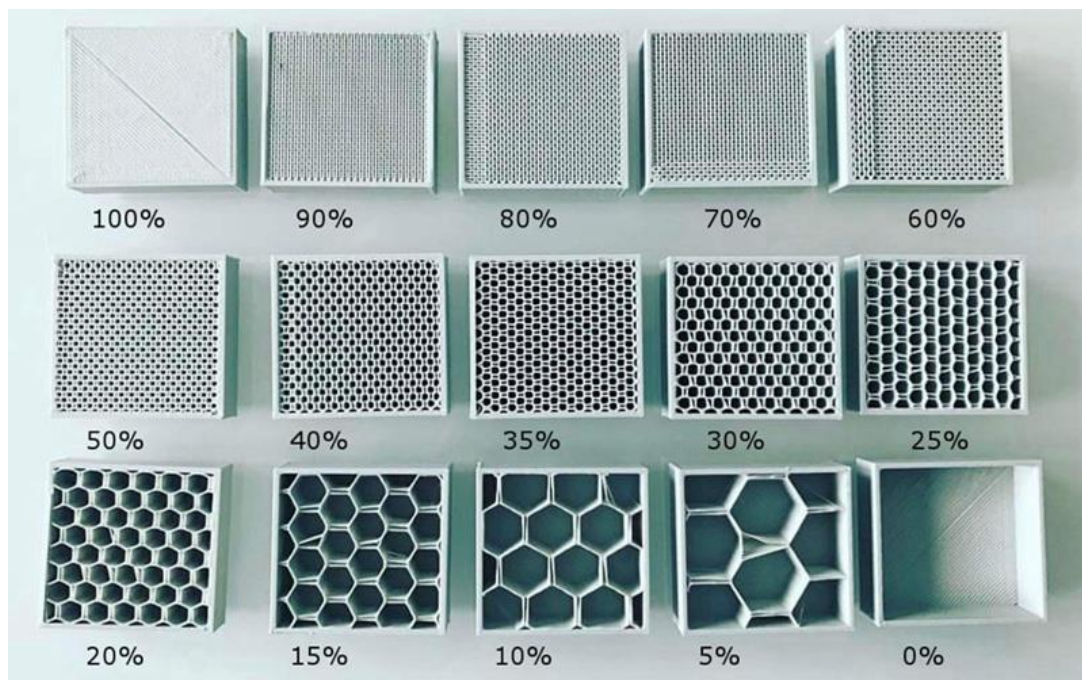
U ovom postupku se za izradu proizvoda koristi rastaljen, najčešće polimerni materijal. Uređaji za FDM rade na načelima troosnoga NC obradnog centra. Kroz mlaznicu, upravljanu s pomoću računala u sve tri osi, prolazi polimerni materijal u obliku žice, koji se u mlaznici zagrijava i tali. Materijal kaplje na radnu podlogu te se pri sobnoj temperaturi brzo očvršćuje. Stoga je osnovni zahtjev FDM procesa održavanje temperature kapljevitoz materijala malo iznad temperature očvršćivanja. Tijekom proizvodnje materijal se ekstrudira i polaže na željena mjesta u finim slojevima. Za izradu proizvoda kompliciranije geometrije može se upotrijebiti i podupor. Tada je riječ o modificiranju postupka uporabom dvostruke glave ekstrudera. Pri tome jedna mlaznica nosi gradivni materijal, a druga vosak za podupiranje. U tom se slučaju između podupora i proizvoda postavlja sloj za razdvajanje, tako da se nakon izrade proizvoda podupor može bez teškoća odvojiti. Kvaliteta površine proizvoda usporediva je s površinom nakon SLS postupka, no proizvodi su porozniji. Naknadnim postupkom prodiranja punila u proizvode moguće im je povišiti gustoću. Prednosti FDM postupka očituje se u tome što nije potreban laser, manja je potrošnja energije, nema zahtjeva za hlađenje i ventilaciju, jednostavna je uporaba, relativno mala investicija, niski su troškovi održavanja, male izmjere uređaja (nema zahtjeva za odvojen radni prostor), nema vitoperenja proizvoda. Osnovni nedostaci FDM

postupka ponajprije se odnose na funkcionalnost proizvoda, koja je ograničena izborom materijala, vrlo je često nužna izrada podupora, potrebna je naknadna obrada proizvoda, vidljive su linije između slojeva, čvrstoća proizvoda snižena je u smjeru okomitom na smjer izrade slojeva, oscilacije temperature tijekom postupka mogu dovesti do delaminiranja proizvoda.[9]



Slika 9 Shematski prikaz opreme za taložno sraščivanje (FDM) [13]

Gotovi proizvod proizveden taložnim očvrščivanjem se sastoji od ljuske i ispune. Ljuska (*shell*) obavija ispunu (*infill*) kojom određujemo trajanje procesa, cijenu i čvrstoću konačnog proizvoda. O oblicima ispune proizvoda ovise mehanička svojstva, masa, vrijeme izrade proizvoda. Ispuna se definira gustoćom koja ide od 0%, što znači da se ispod ljuske ne nalazi ništa, do 100% gdje je potpuno ispunjena ispunja. [14]



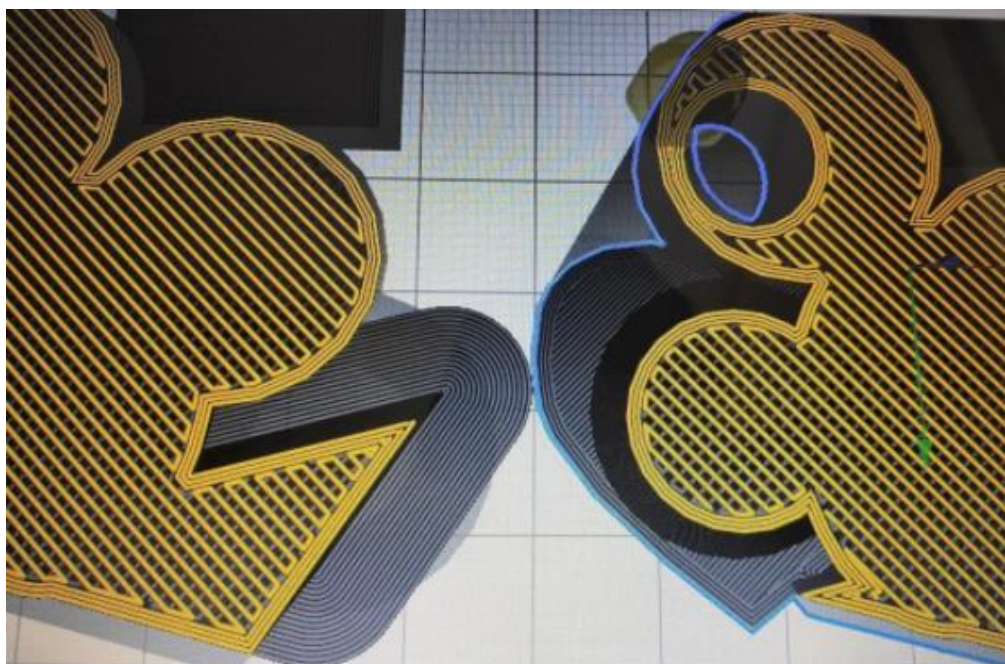
Slika 10 Gustoća ispune u obliku saća [15]

U posljednjoj verziji 4.5 Ultimaker Cura paketa nalazi se 13 tipova ispune. Tipovi ispune su grupirani po tome za što ih je najbolje upotrebljavati:

- Modeli i figurice (niska čvrstoća): linije, cik-cak
- Standardni 3D tisak (srednja čvrstoća): mreža, trokuti, trokuti-šesterokuti
- Funkcionalni 3D tisak (visoka čvrstoća): kubični, oktaedar, kubična četvrtina, gyroid
- Fleksibilni 3D tisak: koncentrični, križni, križni 3D

3.2.1 Modeli i figurice

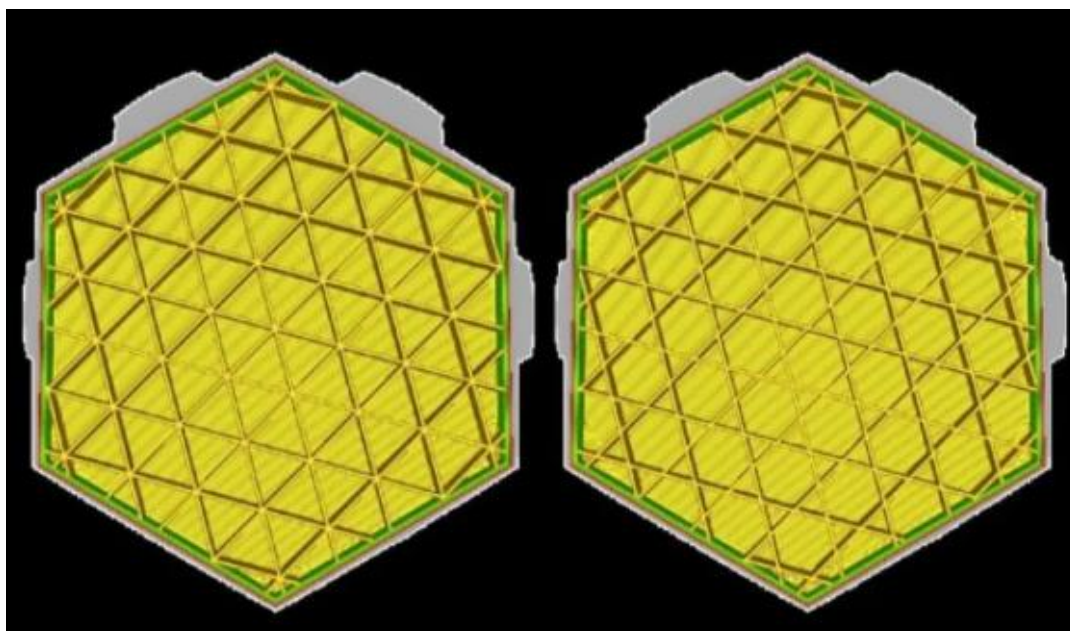
Za modele i figurice koristi se gustoća u rasponu od 0-15% jer na krajnji proizvod djeluju niska naprezanja. Linije i cik-cak linije uz nisku gustoću rezultiraju brзом i jeftinom izradom. Oba uzorka tvore 2D mrežu. Razlika je u tome što se linije rade iz više linija po sloju dok cik-cak se radi iz jedne linije.



Slika 11 Linije lijevo, cik-cak desno[14]

3.2.2 Standardni 3D tisak

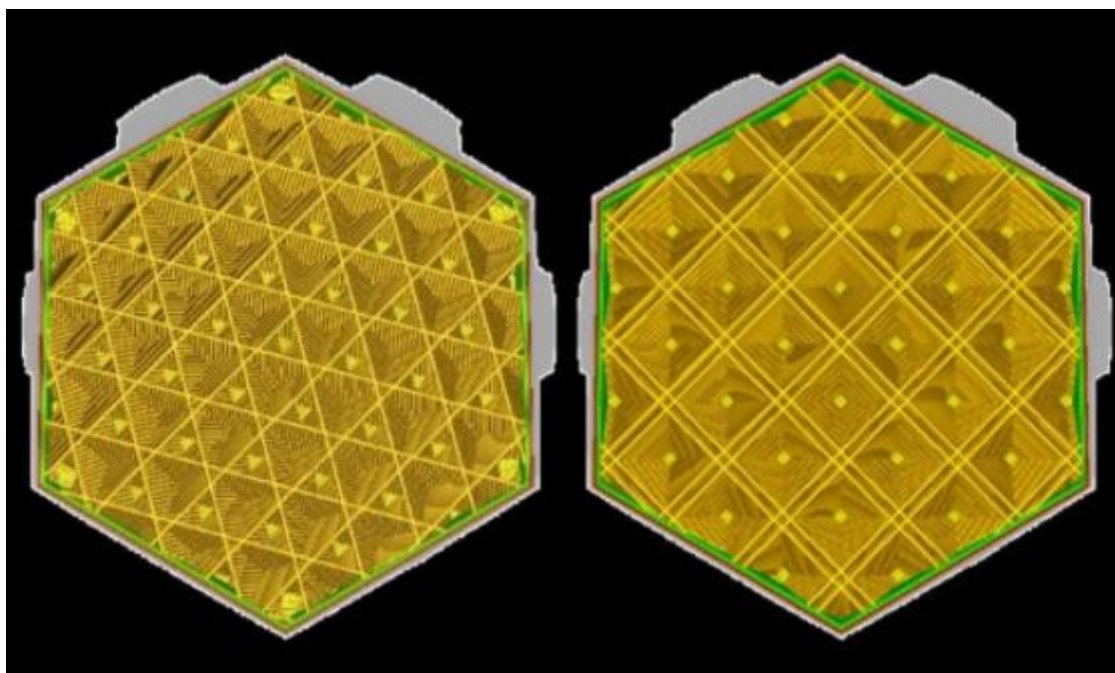
Koristi se kod dijelova koji su opterećeni srednjim napreznjima to jest napreznjima koje može podnijeti i sam materijal koji se koristi. Gustoća punjenja je 15-50%. Kod ovih uzoraka tiskanja vrijeme tiskanja se povećava za 25% u odnosu na uzorke linija. Najjednostavniji i najbrži uzorak je mreža. Trokuti su zahvalan uzorak kod četverostranih modela jer dobro povezuju stranice s malo materijala te je takav model dobro otporan na vlačna napreznja. Trokuti-šesterokuti su uzorak sastavljen od trokuta i šesterokuta koji s vrlo malo materijala naprave dovoljno čvrstu ispunu.[14]



Slika 12 Trokuti lijevo, trokuti-šesterokuti desno[14]

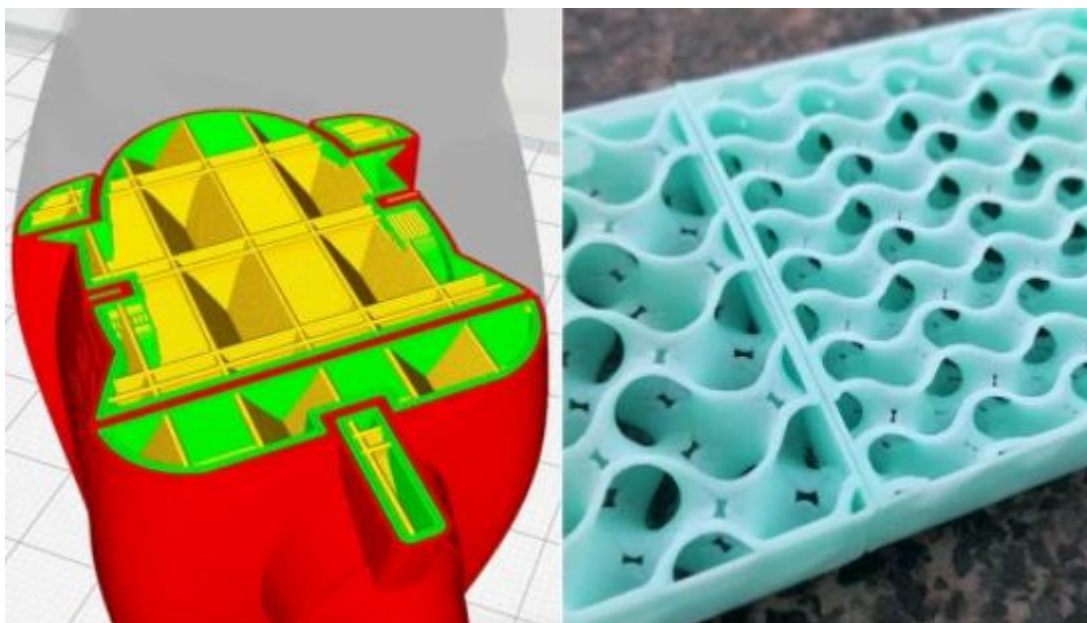
3.2.3 Funkcionalni 3D tisak

Funkcionalni 3D tisak koristi se kod predmeta koji su opterećeni u više smjerova te je gustoća ispune veća od 50%. Koristi se kubični uzorak koji se slažu gusto i pod kutom. Uzorak oktaedra je piramidalnog oblika. [14]



Slika 13 Kubični lijevo, oktaedar desno[14]

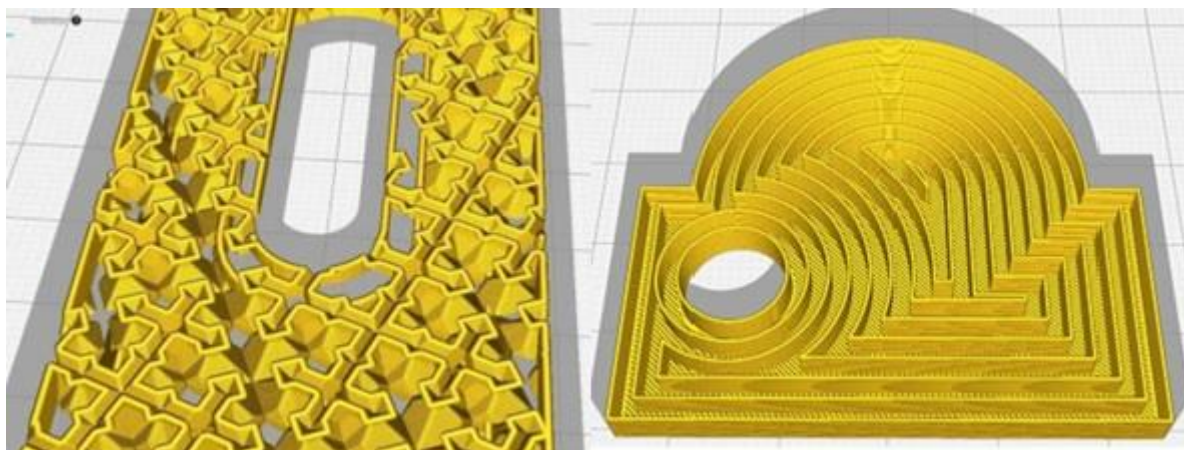
Tu spadaju još i oblici kubična četvrtina i „gyroid“ koji se pokazao otporan na naprezanja u više smjerova zbog oblika valova na koje podsjeća.



Slika 14 Kubična četvrtina lijevo i „gyroid“[14]

3.2.4 Fleksibilno 3D tiskanje

Gustoća punjenja je 0-100% ovisno o željenoj fleksibilnosti. Koriste se koncentrični i križni uzorci jer razmaci između stranica omogućuju savitljivost i fleksibilnost.



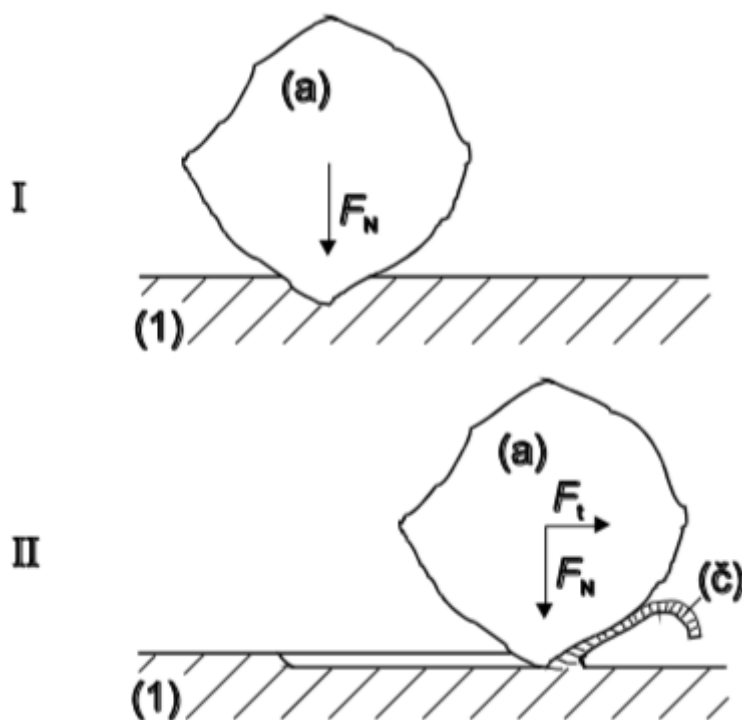
Slika 15 Križni lijevo, koncentrični desno[14]

Parametar o kojem uvelike ovisi čvrstoća modela je smjer tiskanja. Standardni smjer tiskanja je 45° tako da rade motori od x i y osi i time se dobije puno veća brzina tiskanja. Kombinacijom smjera tiskanja može se uvelike povećati čvrstoća proizvoda.[14]

4 ABRAZIJSKO TROŠENJE

Trenje predstavlja otpor gibanju do kojeg dolazi uvijek kada jedno kruto tijelo dodiruje drugo kruto tijelo. Trošenje predstavlja oštećenje površine ili odstranjenje materijala s jedne ili s obje strane dviju krutih površina koje su u dodiru tijekom gibanja. Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i česticama. Postoje četiri vrste trošenja: abrazijsko, adhezijsko, trošenje zbog umora materijala i tribokorozija.

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Može se opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice, s dvije faze jediničnog događaja (slika). [16]



Slika 16 Jedinični događaj abrazije [16]

Faza I – prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja F_N .

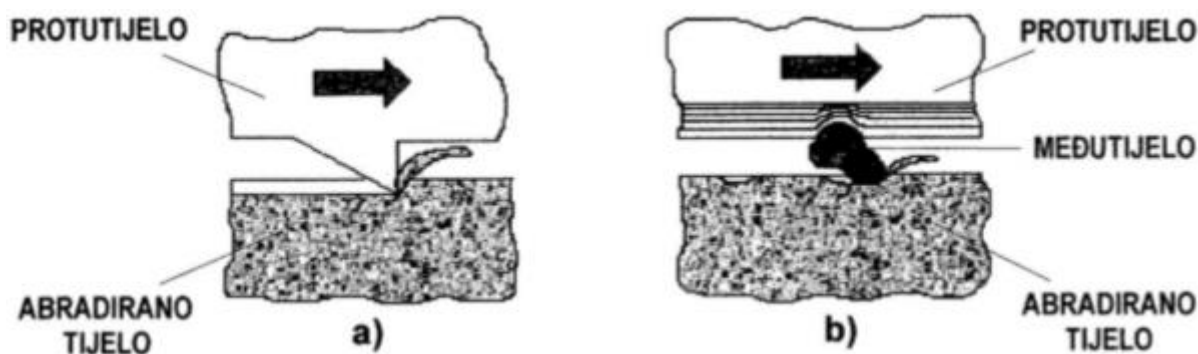
Faza II – istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja F_t .

Mehanizam abrazije moguće je analizirati s nekoliko različitih gledišta:

1) Ovisno o strukturi tribosustava u kome se zbiva abrazija mogu se pojaviti dva oblika abrazije, prikazana slikom:

a) Abrazija u dodiru dva tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i abrazijsko protutijelo)

b) Abrazija u dodiru tri tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i protutijelo), te međutijela (čestice) koje se gibaju slobodno između funkcionalnih dijelova i djeluju abrazijski. Odnosanje materijala u dodiru s tri tijela je znatno manje nego u slučaju abrazije dva tijela. Razlog tomu je što čestice abrazije samo oko 10 % vremena provode u odnosu materijala dok se ostatak vremena kotrljaju u slobodnom međuprostoru.



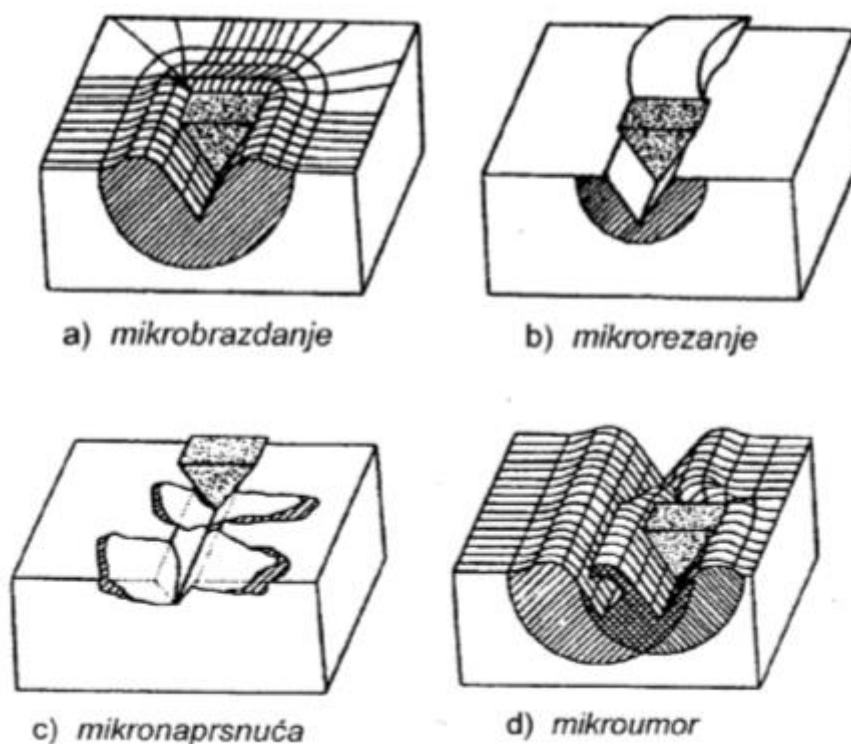
Slika 17 Abrazija u dodiru dva tijela (a) i tri tijela (b) [16]

2) Ovisno o međusobnom djelovanju između abrazijskih čestica i trošene površine razlikujemo (Slika 18 a) mikrobrazdanje, b) mikrorezanje, c) mikronaprsnuća, d) mikroumor):

a) Mikrobrazdanje – odnosanje materijala proporcionalno volumenu brazde nastale plastičnom deformacijom pri prolazu jedne abrazijske čestice, uz uvjet da se rubovi brazde odvoje od površine u obliku produkata trošenja. U idealnom slučaju mikrobrazdanja jedna abrazijska čestica neće proizvesti produkte trošenja nego će materijal biti potisnut u stranu u obliku bočnih “grebena”.

b) Mikrorezanje – odnosanje materijala jednako volumenu zareza nastalog prolaskom abrazivne čestice .

- c) Mikronaprsnuća – odnošenje materijala s krhke površine mehanizmom nastanka i širenja mikropukotina. Pri tome se s površine odnose veliki djelići materijala.
- d) Mikroumor – odnošenje materijala mehanizmom umora površine nastalim učestalim izmjeničnim opterećenjem. Materijal je izložen trenutnim deformacijama uslijed čega nastaju mikropukotine koje se zatim šire i koje u konačnici uzrokuju odvajanje dijelova materijala trošene površine. Mikroumor može nastati i kao posljedica višestrukog učestalog mehanizma mikrobrazdanja.



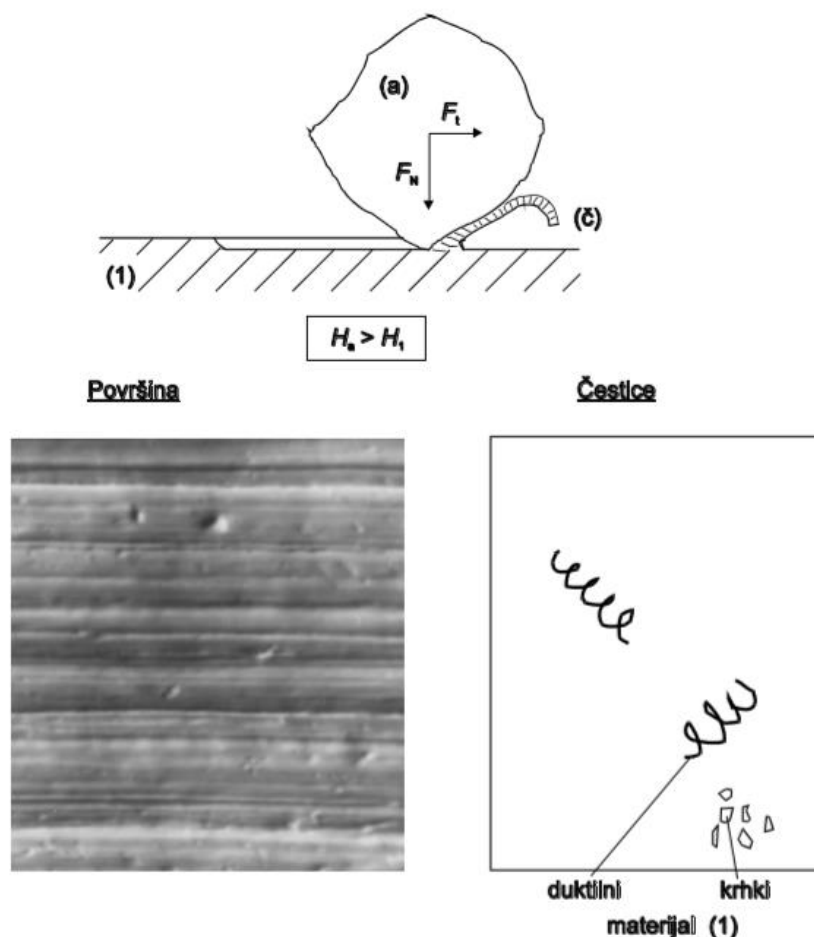
Slika 18 a) mikrobrazdanje, b) mikrorezanje, c) mikronaprsnuća, d) mikroumor

3) Ovisno o međusobnom odnosu tvrdoća abraziva i materijala moguća su tri praktična slučaja:

- a) “čista” abrazija
- b) selektivna abrazija
- c) “nulta” abrazija

4.1 “Čista” abrazija

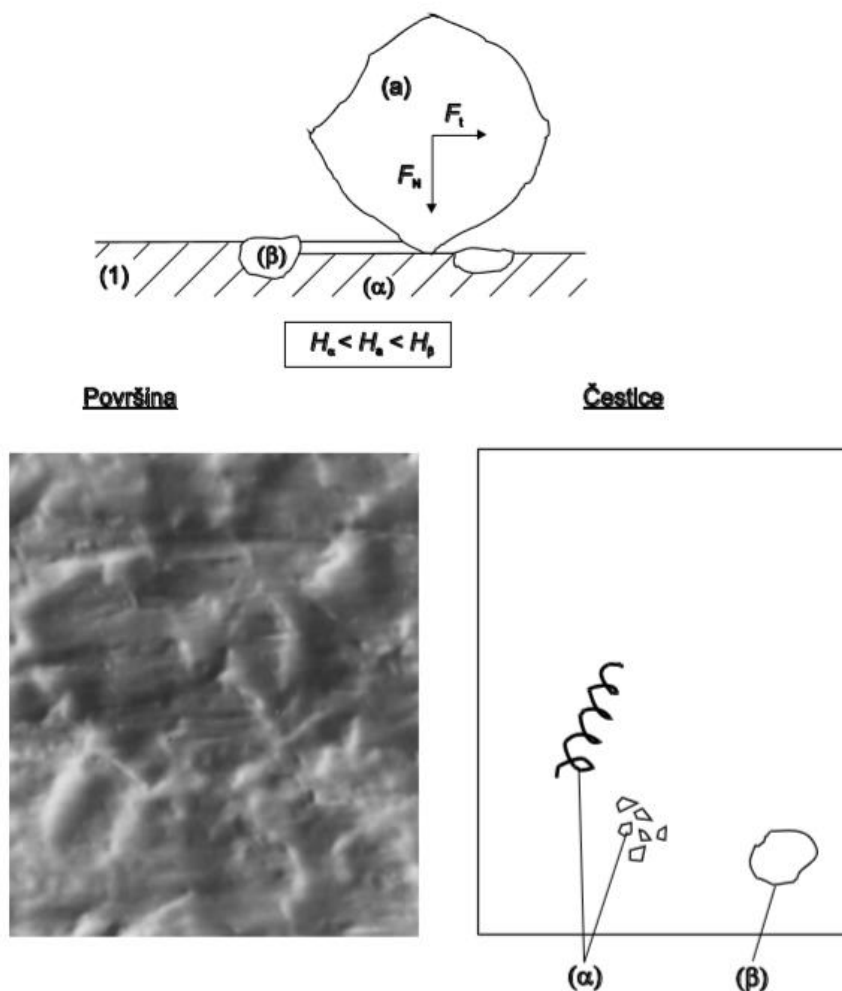
“Čista” abrazija djeluje kada je tvrdoća abraziva (a) veća od tvrdoće trošene podloge (1). Površina je izbrazdana, a čestice trošenja su oblika spiralne strugotine u slučaju kada je abradirani materijal duktilan, odnosno lomljene strugotine, kada je abradirani materijal krhak.



Slika 19 “Čista” abrazija

4.2 Selektivna abrazija

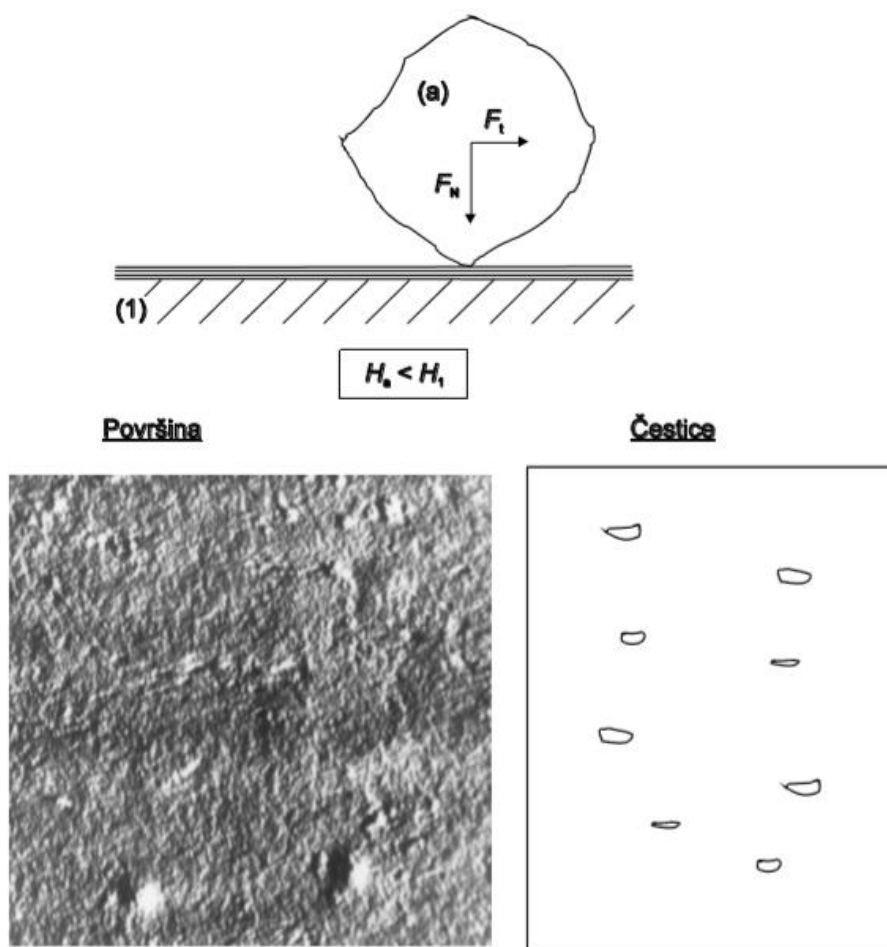
Selektivna abrazija djeluje kada u abradiranom materijalu postoji faza tvrđa od abraziva. Abraziv “reže” samo zahvaćeni sloj mekše faze. Površina je izbrazdana, s prekidima na mjestima gdje se na površini nalaze zrna ili trake tvrđe faze.



Slika 20 Selektivna abrazija

4.3 “Nulta” abrazija

“Nulta” abrazija nastaje kada je cijela abradirana površina tvrđa od abraziva. Površina ima polirani izgled, a čestice trošenja trebale bi biti sitne ljuskice koje potječu od vanjskoga graničnoga sloja. Nulta abrazija najčešće se javlja na površinskim slojevima dobivenim različitim postupcima oplemenjivanja površine (boriranje, vanadiranje, CVD, PVD, itd.).

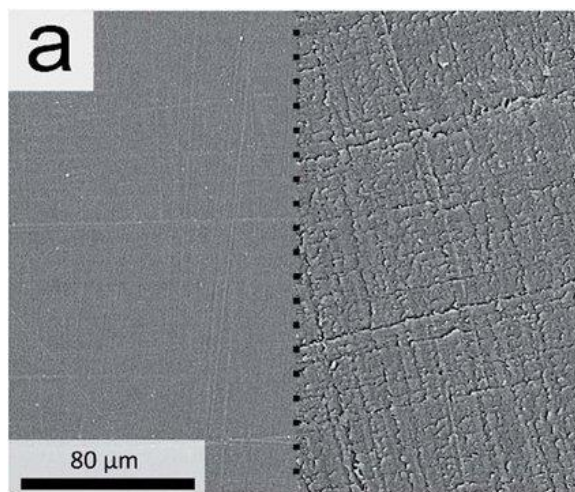


Slika 21 “Nulta” abrazija

Otpornost na abraziju se mjeri metodama kao što su:

- ispitivanje "suhi pijesak/gumeni kotač",
- taber abrazija,
- ispitivanje trošenja kuglicom,
- metoda sa slobodnom kuglom,
- metoda s učvršćenom kuglom.

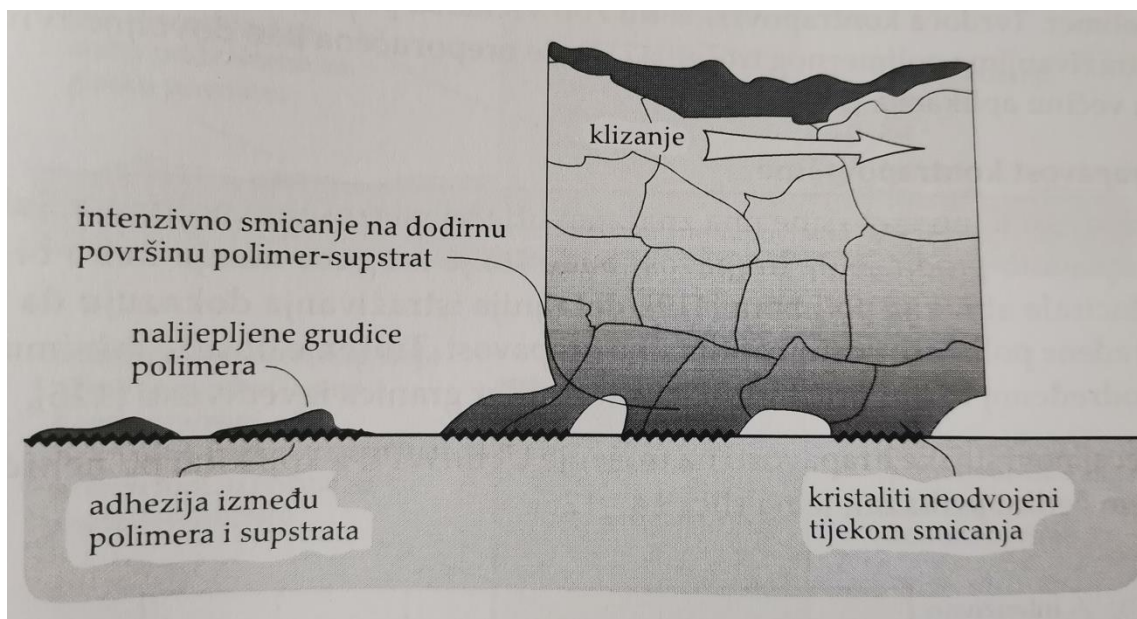
Na Slika 22 Površina PLA polimera prije (lijevo) i poslije (desno) provedenog ispitivanja taber abrazije [17] može se vidjeti površina PLA polimera nakon provedene taber abrazije u suhom okruženju. Uređaj sadržava dva abrazijska kotača koji se pokreću rotacijom uzorka. Mjeri se broj okretaja potrebnih za oštećenje površinskog sloja. Indeks trošenja je funkcija gubitka mase i broja okretaja.



Slika 22 Površina PLA polimera prije (lijevo) i poslije (desno) provedenog ispitivanja taber abrazije [17]

4.4 Trošenje polimera

Trošenje i trenje nemetalnih materijala ima temeljne sličnosti s metalima, postoje također značajne razlike u mehanizmu trošenja i razini trenja i trošenja. Većina polimernih materijala nema dobru otpornost na trošenje te se ona poboljšava mješanjem s drugim materijalom otpornijim na trošenje. Većina polimernih površina troši se u dodiru s tvrdom površinom. Osnovno svojstvo gotovo svih polimera je da stvaraju tanki film kada se klizu po tvrđoj površini, što znatno pridonosi dobrim tribološkim svojstvima polimera. Kod velike većine polimera i polimernih kompozita u slučaju klizanja po tvrđoj podlozi dolazi do takozvanog “pijanog prijenosa” kod kojeg su vidljive grudice polimera koje su se odvojile od vrhova neravnina i ostale zalijepljene za podlogu. Grudice imaju prosječni promjer oko 1μm.



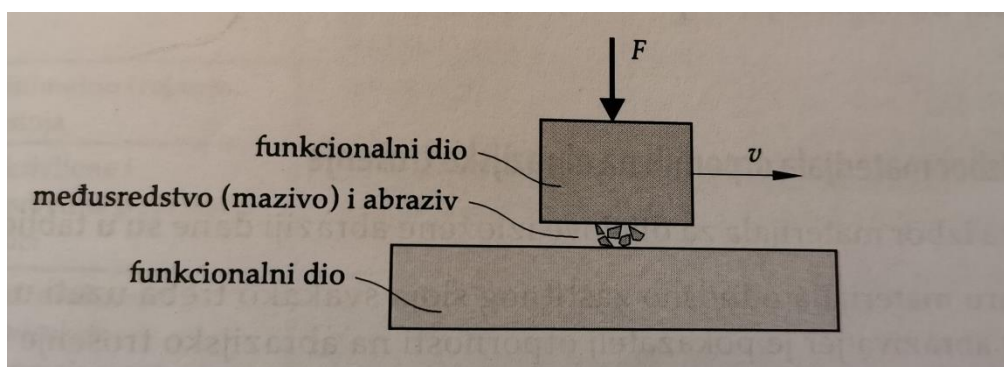
Slika 23 Mehanizam "pijanog prijenosa"

Kontrapovršina utječe na trošenje polimera ovisno o svojoj tvrdoći, hrapavosti i "energiji površine". Očekuje se da će kontrapovršina biti tvrđa pa se preporučuje kombinacija polimera i kaljenog čelika. Kontrapovršina mora biti dovoljno tvrda kako abrazivno djelovanje neke čestice, na primjer, zrnca pijeska, ne bi ohrapavjelo površinu te tako oštetilo polimer. Hrapavost kontrapovršine ima značajan utjecaj na trošenje polimera. Trošenje polimera u dodiru s vrlo hrapavom površinom može se usporediti s običnom abrazijom. Većina polimera počinje se taliti na relativno niskim temperaturama. To svojstvo u kombinaciji s niskom toplinskom vodljivošću polimera uzrokuje da u kliznom kontaktu temperatura vrlo brzo može prijeći talište i izazvati taljenje površine polimera. [18]

5 EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu će se proučavati otpornost na abraziju pločica proizvedenih FDM postupkom od PLA polimera. Istraživanje se provelo na 3 serija pločica od kojih je svaka serija proizvedena na drugačiji način. Materijal se nanosio u 3 oblika ispune: linije, mreža-(*grid*) i „gyroid“. Epruvete su proizvedene na kućnom 3-D printeru, a ispitivanja su provedena u Laboratoriju za tribologiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

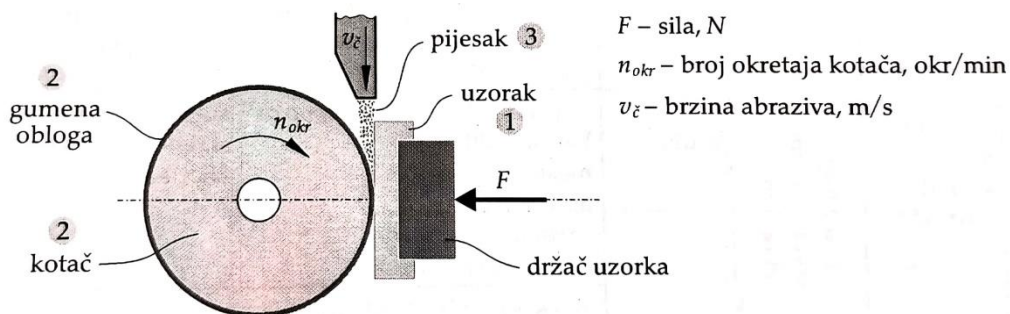
5.1 Abrazijsko trošenje[18]



Slika 24 Shema tribosustava abrazijskog trošenja[18]

Relativno gibanje se može opisati kao klizanje. Primjeri abrazijskog trošenja jesu: radni dijelovi poljoprivredne, građevinske i rudarske mehanizacije, stapne muljne pumpe, alati za obradu odvajanjem čestica.

5.2 Ispitivanje „suhi pijesak/gumeni kotač“ (ASTM G 65 – suhi uvjeti ispitivanja) [18]



Slika 25 Skica uređaja "suhi pijesak/gumeni kotač" [18]

Ispitivanje se sastoji od abradiranja uzorka (1) kvarcnim pijeskom (3). Epruveta se naslanja na kotač (2) obložen gumom, a opterećena je utezima preko koljenaste poluge. Sila F iznosi 130 N ili 45 N ovisno o varijanti postupka, a još je promjenjiv i ukupni broj okretaja kotača koji se registrira brojačem.



Slika 26 Slika uređaja "suhi pijesak/gumeni kotač" i uzorka u držaču

Vaganjem uzorka prije i poslije ispitivanja utvrđuje se gubitak mase koji se preračunava u gubitak volumena. Ta metoda omogućuje relativno rangiranje otpornosti na abrazijsko trošenje različitih materijala ako je prevladavajući mehanizam trošenja abrazija. Mjeri se gubitak mase i dubina traga trošenja analizom profila.



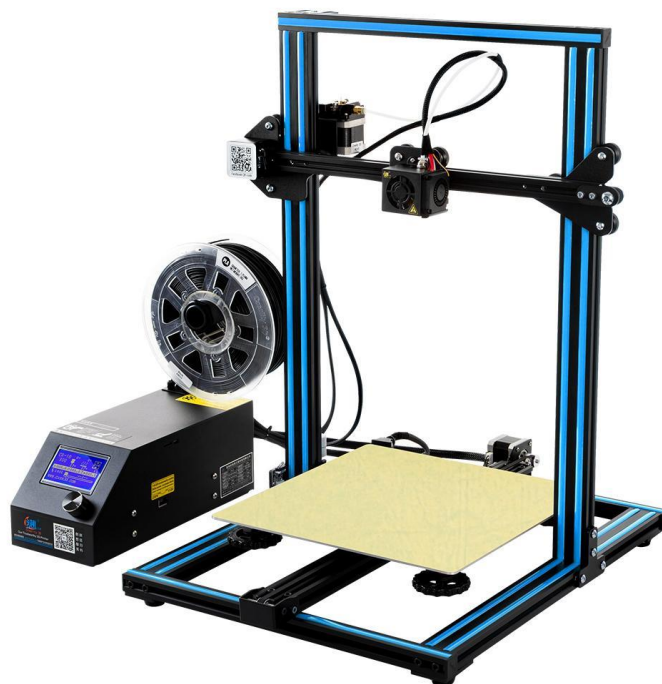
Slika 27 Vaga na kojoj su provedena vaganja

5.3 Izrada epruveta

Epruvete oblika kvadra dimenzija 70x25x17 mm konstruirane su u programskom paketu Siemens NX 10.0. Model epruvete generiran u obliku STL datoteke prenosi se u software Ultimaker Cura 4.1 u kojem su definirani parametri izrade te se generira datoteka modela za 3D tiskanje na uređaju Crealitiy CR-10.



Slika 28 Uzorci tiskanja, lijevo linije, u sredini „gyroid“ i desno mreža[19]



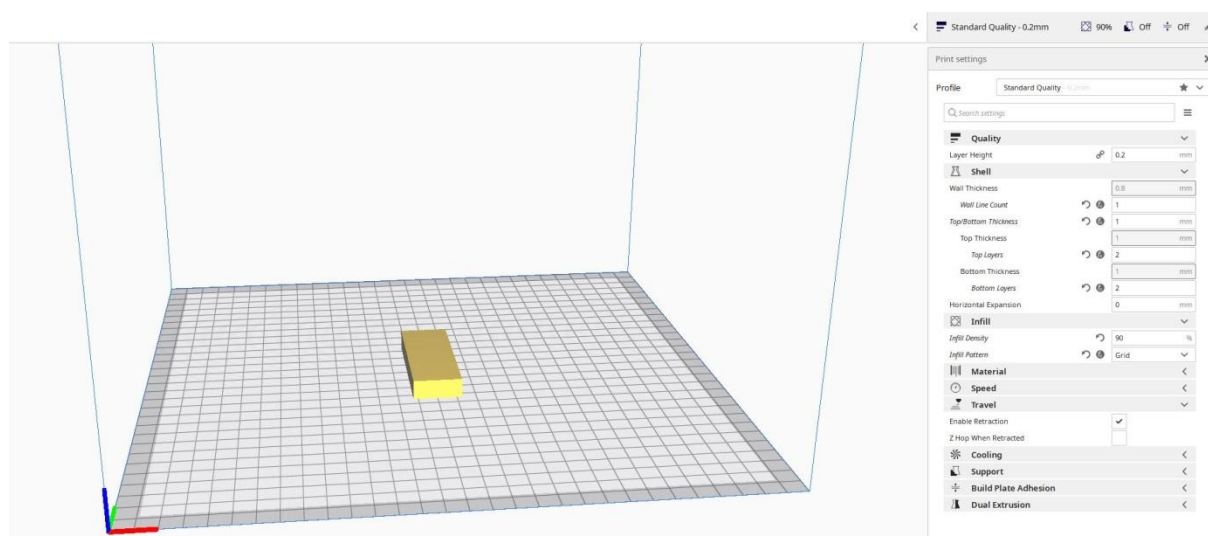
Slika 29 Creality CR-10 [20]

Kod uzorka 1 korišten je oblik ispune grid-oblik rešetke, kod uzorka 2 oblik ispune su linije a kod uzorka 3 oblik ispune je gyroid.

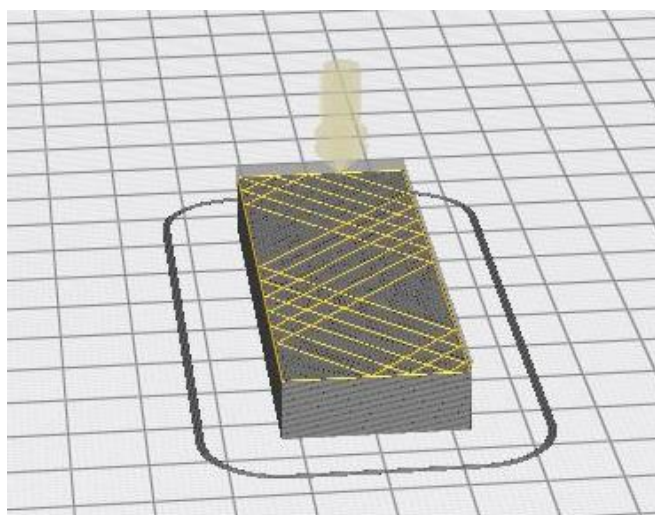
Uzorak 1 izrađen uzorkom rešetke-grid nosi naziv „bijeli“.

Parametri izrade:

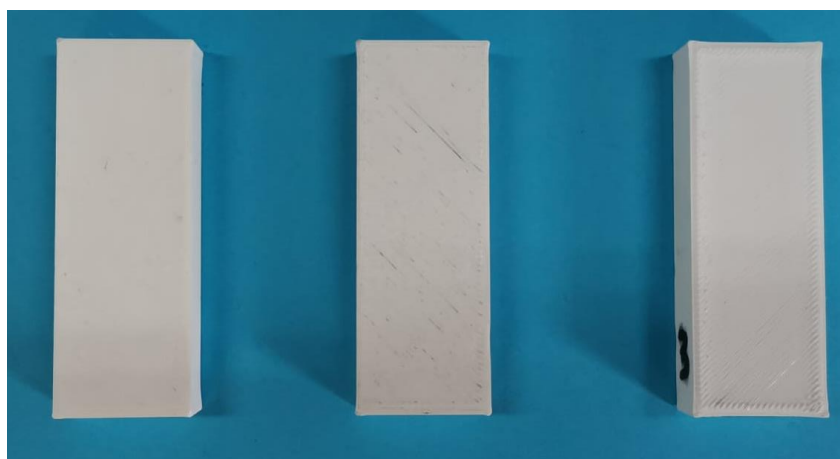
- debljina sloja: 0,2mm
- vanjska kontura: 2
- temperatura prerade PLA: 240°C
- temperatura podloge: 240°C
- gustoća ispune unutrašnjosti: 90%
- brzina izrade ispune: 150 mm/s
- brzina izrade početnog i završnog sloja: 40 mm/s



Slika 30 CAD model

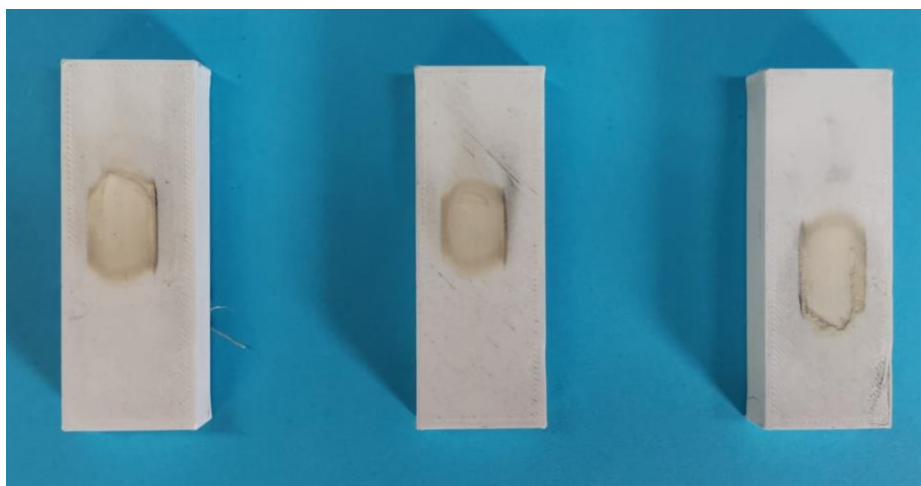


Slika 31 Simulacija tiskanja



Slika 32 uzorak 1 prije testiranja

Provedeno je ispitivanje "suhi pijesak/gumeni kotač" gdje je korišten abraziv SiO_2 granulacije 0,15-0,25mm. Sila pritiska je 130 N, a ukupni broj okretaja kotača iznosio je 100 okretaja.



Slika 33 Uzorci nakon prvog trošenja

Drugo ispitivanje "suhi pijesak/gumeni kotač" je provedeno pri istim parametrima samo se povećao broj okretaja na ukupno 500 okretaja.



Slika 34 Uzorci nakon drugog ispitivanja

Tablica 1 Mjerenje mase i gubitka mase uzorka 1

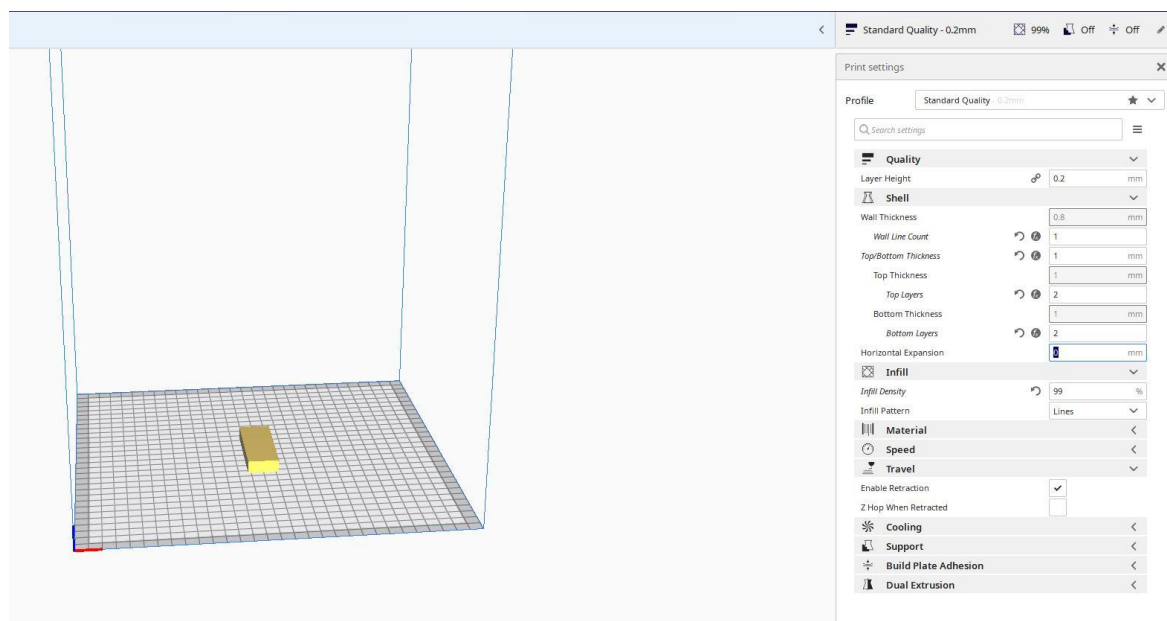
Uzorak 1	m_0, g	m_1, g	$\Delta m_1, g$	m_2, g	$\Delta m_2, g$
Bijeli 1	18,2005	18,1543	0,0462	18,1075	0,093
Bijeli 2	18,4662	18,4375	0,0287	18,3613	0,1049
Bijeli 3	18,3224	18,2770	0,0454	18,2530	0,0694

U tablici 1 su prikazani gubitci mase nakon 100 okretaja Δm_1 , i gubitci mase nakon 500 okretaja Δm_2 .

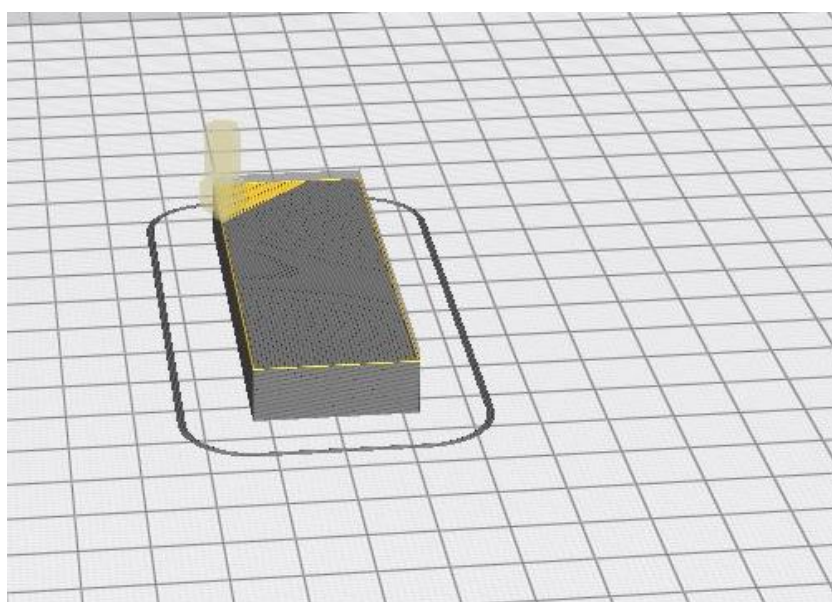
Uzorak serije 2 nosi naziv „crni“ te je rađen oblikom ispune linije.

Parametri izrade:

- debljina sloja: 0,2 mm
- vanjska kontura: 2
- temperatura prerade PLA: 240°C
- temperatura podloge: 240°C
- gustoća ispune unutrašnjosti: 99%
- brzina izrade ispune: 150 mm/s
- brzina izrade početnog i završnog sloja: 40 mm/s



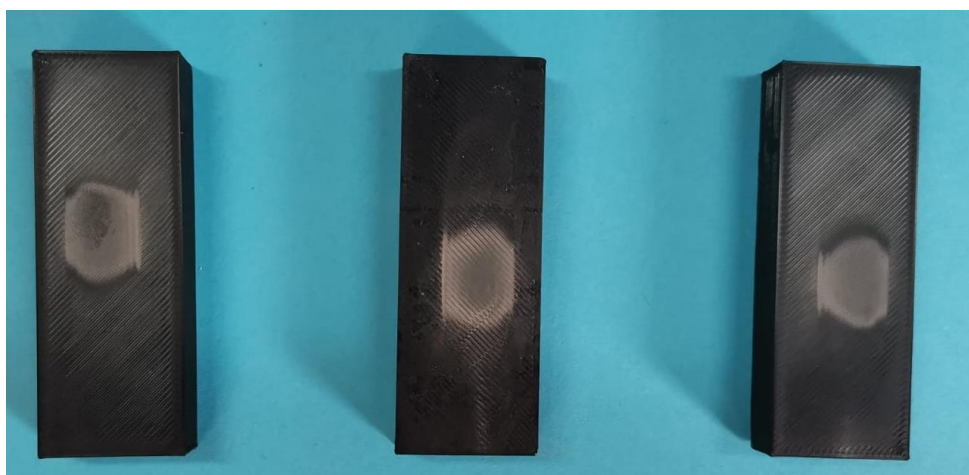
Slika 35 CAD model



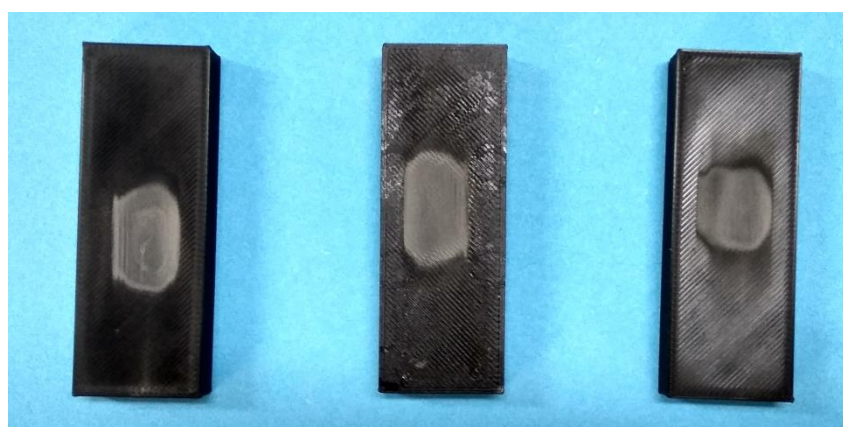
Slika 36 Simulacija tiskanja



Slika 37 Uzorci serije 2



Slika 38 Uzorci serija 2 nakon prvog trošenja



Slika 39 Uzorci serije 2 nakon drugog trošenja

Tablica 2 Mjerenje mase i gubitka mase uzorka 2

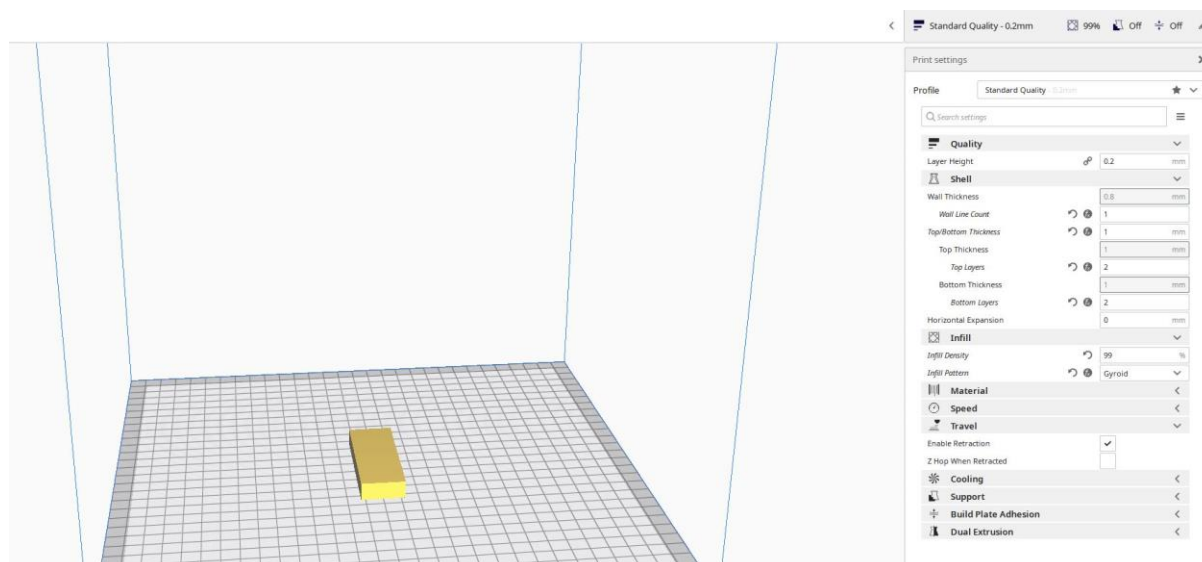
Uzorak 2	m_0, g	m_1, g	$\Delta m_1, g$	m_2, g	$\Delta m_2, g$
Crni 1	8,8261	8,8155	0,0106	8,7783	0,0478
Crni 2	8,7850	8,7765	0,0085	8,7764	0,0086
Crni 3	8,7842	8,7773	0,0069	8,7613	0,0229

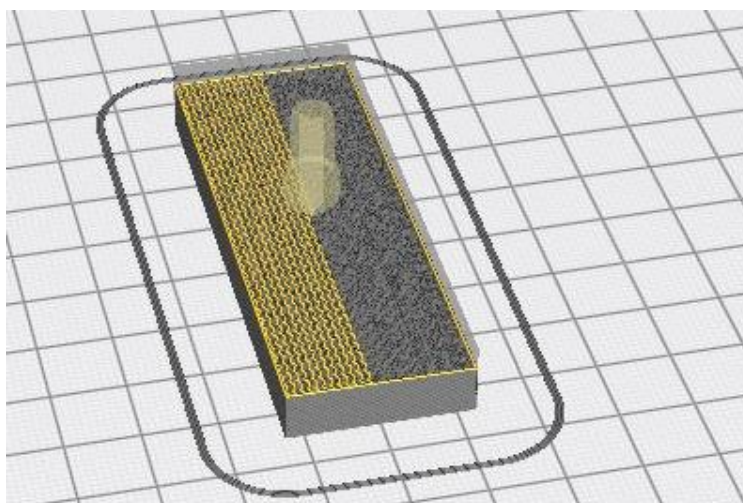
U tablici 2 su prikazani gubitci mase nakon 100 okretaja Δm_1 , i gubitci mase nakon 500 okretaja Δm_2 .

Kod uzorka serije 3 oblik ispune je „gyroid“.

Parametri izrade:

- debljina sloja: 0,2mm
- vanjska kontura: 2
- temperatura prerade PLA: 240°C
- temperatura podloge: 240°C
- gustoća ispune unutrašnjosti: 99%
- brzina izrade ispune: 150 mm/s
- brzina izrade početnog i završnog sloja: 40 mm/s

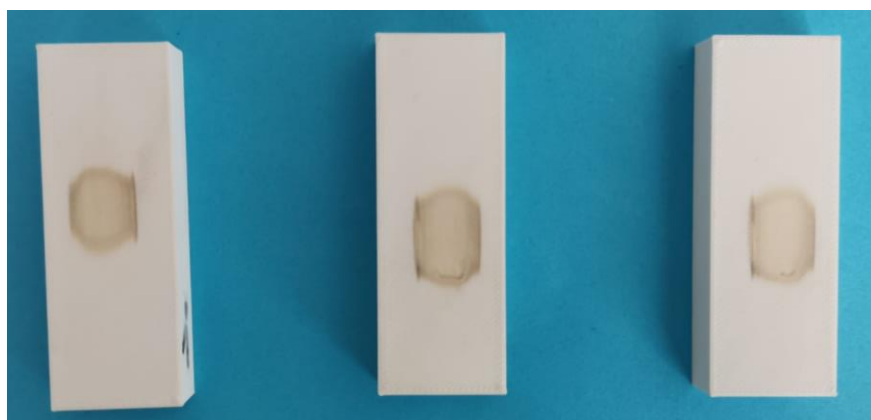
**Slika 40 CAD model**



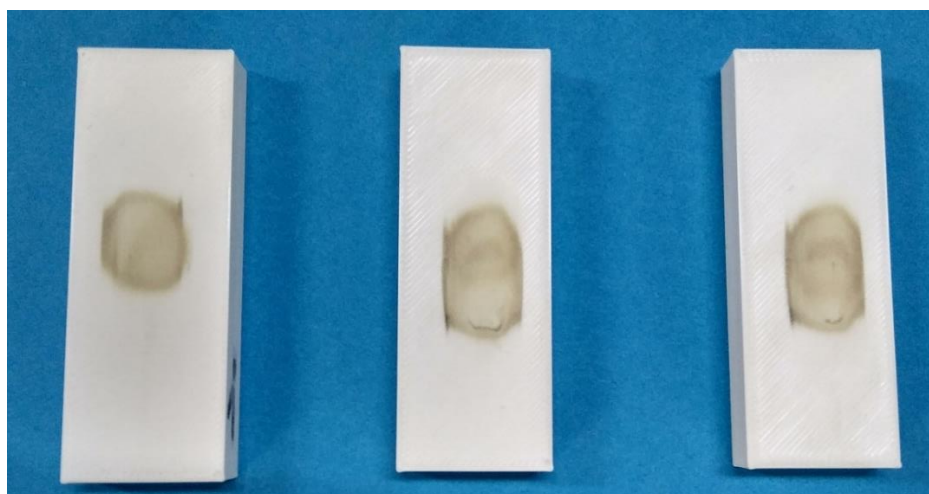
Slika 41 Simulacija tiskanja



Slika 42 Uzorci serije 3



Slika 43 Uzorci serije 3 nakon prvog trošenja



Slika 44 Uzorci serije 3 nakon drugog trošenja

Tablica 3 Mjerenje mase i gubitka mase uzorka 3

Uzorak 3	m_0, g	m_1, g	$\Delta m_1, g$	m_2, g	$\Delta m_2, g$
Bijeli 1*	9,2353	9,2220	0,0153	9,2210	0,0143
Bijeli 2*	9,2507	9,2313	0,0194	9,2259	0,0248
Bijeli 3*	9,2500	9,2334	0,0166	9,2244	0,0256

Radi lakšeg korištenja seriji 3 dani su nazivi epruveta sa zvjezdicom „*“.

U tablicama 4 i 5 su prikazani gubitci mase nakon 100 okretaja Δm_1 , i gubitci mase nakon 500 okretaja Δm_2 .

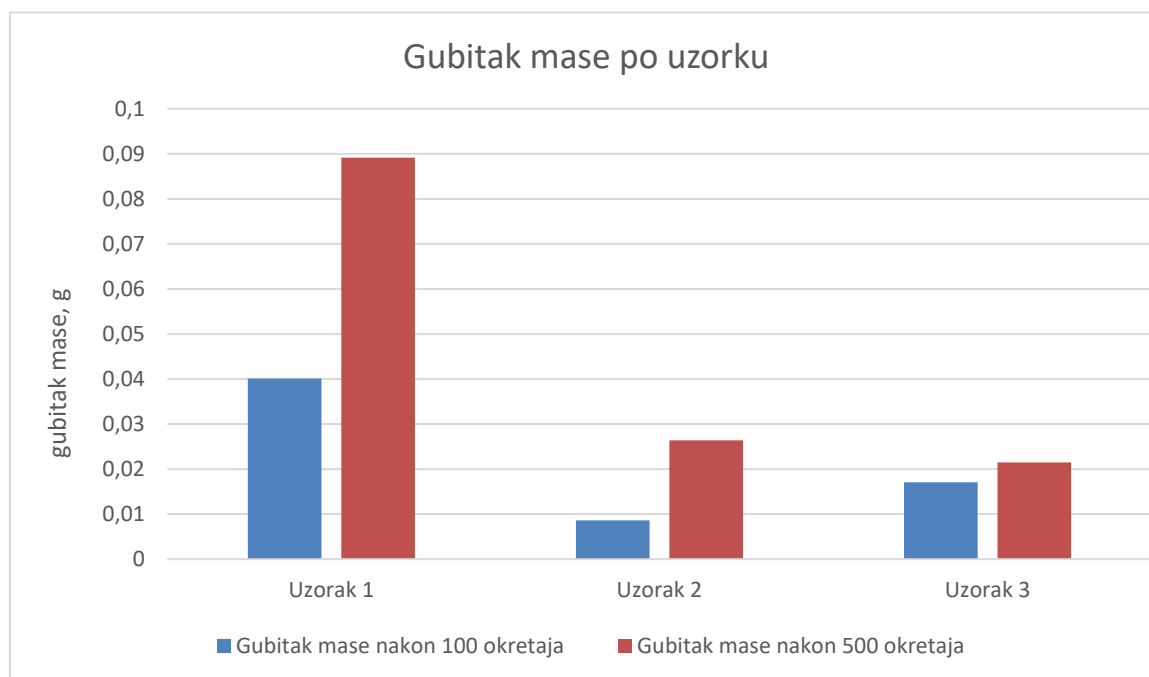
Tablica 4 Gubitci mase nakon 100 okretaja

Uzorci	$\Delta m_1, g$	Prosječni gubitak mase po uzorku $\Delta m, g$
Bijeli 1	0,0462	0,0401
Bijeli 2	0,0287	
Bijeli 3	0,0454	
Crni 1	0,0106	0,0086
Crni 2	0,0085	
Crni 3	0,0069	
Bijeli 1*	0,0153	0,0171
Bijeli 2*	0,0194	
Bijeli 3*	0,0166	

Tablica 5 Gubitci mase nakon 500 okretaja

Uzorci	$\Delta m_2, g$	Prosječni gubitak mase po uzorku $\Delta m, g$
Bijeli 1	0,093	0,0891
Bijeli 2	0,1049	
Bijeli 3	0,0694	
Crni 1	0,0478	0,0264
Crni 2	0,0086	
Crni 3	0,0229	
Bijeli 1*	0,0143	0,0215
Bijeli 2*	0,0248	
Bijeli 3*	0,0256	

5.4 Analiza podataka



Slika 45 Usporedba gubitaka mase različitih uzoraka

Usporedbom gubitaka mase vidljivo je da je nakon 100 okretaja najveći gubitak mase kod uzorka 1 (mrežasta ispuna) koji je izgubio 0,0401 g, zatim kod uzorka 3 („gyroid“ ispuna) koji je izgubio 0,0171 g, a najmanji gubitak mase je kod uzorka 2 (linijska ispuna) i iznosi 0,0086 g. Mjerenjem nakon 500 okretaja najveći gubitak je kod uzorka 1 i iznosi 0,0891 g, zatim kod uzorka 2 je gubitak 0,0264 i kod uzorka 3 je najmanji gubitak i iznosi 0,0215 g.

6 ZAKLJUČAK

U ovom radu obrađen je PLA polimer te njegova otpornosti na abraziju. 3D tiskane epruvete su ispitivane na abraziju testom „suhi pijesak/gumeni kotač“. Epruvete su tiskane u tri različita smjera to jest u tri različita oblika ispune. Kod svih uzoraka je uočen gubitak mase nakon 100 i nakon 500 okretaja gumenog kotača. Očekivano je gubitak mase veći nakon 500 okretaja. „Gyroid“ se kao oblik ispune pokazao najotporniji na abraziju dok je kod mreže kao oblika ispune uočen značajan gubitak mase. 3D tiskani PLA polimer nema značajniju primjenu kao polimer otporan na abraziju ali ovo istraživanje pokazuje da ako se primjene dobar smjer tiskanja da se značajno može poboljšati otpornost na abraziju.

LITERATURA

- [1] R Hagen: Polymer Science: A Comprehensive Reference, Volume 10, Berlin, 2012
- [2] Shady Farah, Daniel G. Anderson, Robert Langer: Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review, 2016
- [3] A. Cipurković, E. Horozić, N. Đonlagić, S. Marić, M. Saletović, Z. Ademović, “Biodegradable polymers: production...”, Technologica Acta,
- [4] J. de Oliveira, L.P.S. Vandenbergh*, S.F. Zawadzki, C. Rodrigues, J.C. de Carvalho, C.R. Soccol: Production and Application of Polylactides , Bioprocess engineering and biotechnology department, FEDERAL UNIVERSITY OF PARANÁ (UFPR), CURITIBA, PR, BRAZIL, 2017
- [5]<https://www.dicardiology.com/product/fda-approves-first-totally-bioresorbable-stent>
[26.6.20.]
- [6]https://www.google.com/search?q=pla+surgical+suture+made+of+PLA&tbm=isch&ved=2ahUKEwj-mKOFhZ_qAhUFP-wKHZj_CJAQ2-cCegQIABAA&oq=pla+surgical+suture+made+of+PLA&gs_lcp=CgNpbWcQA1C4hARY66cEYJWrBGgBcAB4AIABIQOIAcEQkgEJNi40LjEuMS4xmAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWc&sclient=img&ei=rq71Xv6JCYX-sAeY_6OACQ&bih=789&biw=1600#imgsrc=uRjWsouICGftRM [26.6.20.]
- [7]https://www.google.com/search?q=drug+delivery+system+PLA&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwionqaOn5_qAhXPIsKHbCLCfsQ_AUoAXoECA0QAw&biw=1600&bih=740#imgsrc=pLT9j5sYeay6jM [26.6.20.]
- [8]https://www.google.com/search?q=pla+implants&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjXvfX86Z_qAhWCvosKHd3IApoQ_AUoAXoECA4QAw&biw=1600&bih=789#imgsrc=LC_zUIQkyKWS_M [26.6.20.]
- [9] Godec D., Šercer M.: *Aditivna proizvodnja*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [10] Pilipović A.: *Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernog prototipa*, Doktorski rad, FSB Zagreb, 2012.
- [11] Pilipović, A.: *Aditivna proizvodnja*, Polimeri 33(2012)3-4, 134 – 135.

- [12] https://www.google.com/search?q=additive+manufacturing+layer+by+layer&tbm=isch&ved=2ahUKEwim4L6mnbjrAhXR4KQKHbHpBVQQ2-cCegQIABAA&oq=additive+manufacturing+lay&gs_lcp=CgNpbWcQARgAMgQIABATOGIABAIEB4QE1C3-AFY94YCYJKVAmgAcAB4AIABxgGIAZ4EkGEDMC40mAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWfAAQE&sclient=img&ei=bv9FX6bxDdHBkwWx05egBQ&bih=789&biw=1600#imgsrc=MFk6PZV_BhiAM [26.8.20.]
- [13] Godec D., Šercer M., Krsnik I.,: *Od ideje do gotovog proizvoda*, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [14] <https://all3dp.com/2/cura-infill-patterns-all-you-need-to-know/> [28.8.20.]
- [15] https://www.google.com/search?q=infill+density+3d+printer&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj90dK787_rAhXQrIsKHfjqAtkQ_AUoAXoECAwQAw&biw=1600&bih=740#imgsrc=vtBvLiO4ovJRtM [29.8.20.]
- [16] Grilec K., Jakovljević S.: Tribologija, autorizirana predavanja
- [17] Michael R. Snowdon, Feng Wu, Amar K. Mohanty , Manjusri Misra: Comparative study of the extrinsic properties of poly(lactic acid)-based biocomposites filled with talc versus sustainable biocarbon
- [18] Grilec, K., Jakovljević, S., Marić, G.: Tribologija u strojarstvu, Zagreb, 2017.
- [19] https://www.google.com/search?q=cura+infill+grid&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=csUEqVyKdsVdDM%252C9MuJ3s6gKSabkM%252C_&vet=1&usg=AI4_-kQovIePhcRcZtCmoeL-mPsgSzhlw&sa=X&ved=2ahUKEwjLqaC60LvrAhVno4sKHUuQDbAQ9QF6BAgJECg&biw=1600&bih=789#imgsrc=csUEqVyKdsVdDM&imgdii=BG_82r0_xCiAoM [27.8.20.]
- [20] https://www.google.com/search?q=creality+cr-10&sxsrf=ALeKk02i-FbUoaRnv5BDS9kpEjBl6lvgzQ:1599386033634&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiqz5KjodTrAhXLgVwKHWmKBC4Q_AUoAXoECAwQAw&biw=1600&bih=740#imgsrc=aiiUOkCIgII_GM [6.9.20.]