

3D TISK – OD VIRTUALNEGA MODELA DO FIZIČNEGA IZDELKA

Področje: Tehnika

Raziskovalna naloga

Raziskovalec: Ambrož Bevc

9. b razred

Mentorica: Dominika Švajger

Somentor: Matjaž Lušin

Ljubljana, 2025

Osnovna šola Ketteja in Murna

ZAHVALA

Raziskovalne naloge ne bi mogel napisati v takšni obliki brez oseb, ki so mi pisanje in testiranje omogočile in tudi olajšale.

- + Posebna zahvala moji mentorici učiteljici Dominiki Švajger za pomoč in dostopnost bodisi med urami bodisi med vikendi. Zahvaljujem se ji tudi za urejanje formalnih zadev in za sprejemanje mojih idej o širjenju tega raziskovalnega dela.
- + Posebna zahvala gre tudi Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani, asistentu Vidu Gostiši in preostalim profesorjem ter študentom za gostoljubnost in čas, ki so mi ga namenili za individualno predstavitev tiskanja kovin, plastik in smol (in tudi tiskalnika MultiJet tehnologije). Zahvaljujem se jim tudi za vse dodatne izdelke, namenjene za raziskovalno nalogo.
- + Zahvaljujem se tudi somentorju učitelju Matjažu Lušinu za pomoč in konkretne debate o vsebini te raziskovalne naloge.
- + Zahvaljujem se učiteljici Damjani Sokler za slovnični in jezikovni pregled raziskovalnega dela

POVZETEK

V letošnji raziskovalni nalogi je raziskovalec v sodelovanju s Fakulteto za strojništvo pisal o vrstah 3D tiska. Gre za tiskanje z *usedanjem taljenega materiala* (FDM tehnologija), z *UV občutljivo smolo* (SLA tehnologija) ali pa celo s taljenjem slojev kovinskega prahu v fizične izdelke s *pomočjo laserja* (SLM tehnologija). V teoretičnem delu je večinoma pisal o FDM tehnologiji, saj je najbolj razširjena in preprosta za uporabo.

Del teoretičnega dela je posvetil tudi izbiri filamentov, ki jih uporabljajo FDM tiskalniki. Pri FDM tisku lahko uporabimo več vrst sintetičnih polimerov, v oblikah termoplastik, s katerimi lahko spremenimo mehanske in kemijske lastnosti končnega izdelka, glede na njihov namen. Najpopularnejša je PLA plastika, saj je preprosta za uporabo in cenejša.

V praktičnem delu je testiral trdnost natisnjenih ploščic, natisnjenih v horizontalni in vertikalni poziciji. S tem je ugotovil mehansko trdnost omenjenega materiala glede na položaj tiska. Ugotovil je tudi, da so izdelki z večjo površino naloženega materiala močnejši pri raztežku. Ugotavljal je tudi, kakšen vpliv imajo druge nastavitve na tiskan izdelek (npr. višina slojev).

Poleg ugotovitve mehanske trdnosti sem pod mikroskopom tudi analiziral več različnih začetnih slojev in ugotovil, da je dober prvi sloj ključnega pomena za uspešnost, izgled in dimenzionalno pravilnost tiskanega modela.

STVARNO KAZALO

ZAHVALA	2
POVZETEK	3
STVARNO KAZALO	4
1. UVOD	5
2. HIPOTEZE	6
3. TEORETIČNI DEL	7
3. 1. Vrste 3D tiska.....	7
3. 1. 1. FDM tehnologija (Ciljno nalaganje).....	7
3.1.2. SLA tehnologija (Stereolitografija).....	19
3.1.3. SLM tehnologija (Selektivno lasersko taljenje).....	21
3.2. Vrste materialov za FDM tiskalnike (filamenti).....	23
3. 3. Postopek izdelave izdelkov.....	25
4. PRAKTIČNI DEL	28
4.1. Testiranje mehanske napetosti izdelkov.....	28
4.2. Prvi sloj.....	32
ZAKLJUČEK	35
RAZPRAVA	36
VIRI	37
VIRI SLIK, SHEM IN POSNETKOV ZASLONA	38
PRILOGA	39

1. UVOD

Gotovo ste že slišali za 3D tisk. Ta hitro razvijajoča se alternativna tehnologija predstavlja nov pogled v domačo in tudi industrijsko izdelavo fizičnih izdelkov. Ko dobite idejo za nov izdelek ali projekt, se na začetniškem nivoju marsikdo sreča z zapleteno in pa tudi drago obdelavo klasičnih materialov (npr. lesa, kovine ...). S 3D tiskom lahko svoje ideje iz dvodimenzionalnega ekrana prenesemo v fizično, tridimenzionalno obliko že po nekaj korakih. Poleg tega pa še prihranimo na materialu, saj je količina odpadnega materiala minimalna. Polagamo ga tja, kjer ga zares potrebujemo, za razliko od klasičnih obdelav drugih materialov. Edino, kar nas omejuje, je naša domiselnost.

Tiskamo lahko na različne načine, z najbolj prepoznavnim FDM tiskanjem, ki plastični filament segreje in nanaša, lahko uporabimo tudi smolnate (SLA) tiskalnice, ki s pomočjo UV žarkov strdijo smolo in ustvarijo spektakularne miniaturne figure, ali pa uporabimo industrijske tiskalnice, ki s pomočjo laserja sintrajo sloje prahu kovinskih zlitin ter s tem ustvarijo kovinske izdelke (SLS tehnologija). Izbira je velika, vendar kako (sploh) delujejo in zakaj so uporabni?

Razlaga osnovnih strokovnih izrazov, povezanih s tematiko naloge:

- **Ekstruder:** To je del FDM tiskalnika, ki potiska filament skozi segreto šobo in nato na tiskalno površino.
- **Slicer** (izgovorjeno kot 'slajsr'): računalniški program, na katerem nastavimo podrobne nastavitve za tiskanje izdelka. Slicer tako spremeni izdelek v kodni zapis, katerega razume tiskalnik.
- **gcode:** format datotek, katere razume in se po njih ravna 3D tiskalnik. Večinoma ta format zapolnjujejo koraki za posamezen motor. Enak format uporabljajo tudi ostali CNC stroji.
- **Mikrometer** (kratica ' μm '): Merilna enota, enaka kot 0.001 mm. V nalogi bo uporabljena ta enota, saj so 3D tiskalniki precizni stroji. Natančni so tudi pod 10 μm . Anomalije na taki velikosti so lahko moteče ali pa celo usodne za uspeh tiskanja, tako da take 'malenkosti' vsekakor niso zanemarljive.
- Nekaj izrazov bo razloženih še v besedilu.

V raziskovalni nalogi ni klasične priloge. Letos sem se odločil, da jo priložim v obliki virtualne datoteke (npr. videoposnetki ter nastavitve tiskanja). V prilogi, ki je v obliki sklopa organskih datotek, si lahko ogledate dodatke glede na del raziskovalne naloge (teoretični in praktični del). Poleg omenjenih datotek pa si lahko ogledate tudi datoteko z naslovom 'Galerija', v kateri so slike in videoposnetki 3D natisnjenih izdelkov.

2. HIPOTEZE

Pred raziskovanjem sem postavil sledeče hipoteze:

1. Vertikalno natisnjeni izdelki z višjimi sloji so močnejši od ostalih.
2. Spoji med sloji so najšibkejši del natisnjenega modela.

3. Izdelki z večjim številom sten so odpornejši na lome pri raztegovanju.
4. Prvi sloj je ključnega pomena za uspeh tiskanega modela.

3. TEORETIČNI DEL

3. 1. Vrste 3D tiska

Predmete se lahko 3D natisne na različne načine – bodisi s strjevanjem, nalaganjem ali pa taljenjem materiala v plasti in s tem v fizičen model. Raziskovalna naloga bo usmerjena v FDM tehnologijo, saj je ta najbolj prepoznavna, najdostopnejša in najlažja za vstop v svet 3D tiska.

Lahko bi rekli, da je 3D tisk v bistvu t. i. '2.5D tisk', saj natisnemo več dvodimenzionalnih slojev, ki skupaj tvorijo trodimenzionalen izdelek. Če bi želeli dobesedno tiskati trodimenzionalno, bi se, npr. pri FDM tiskalnikih, šoba morala premikati v vse tri dimenzije, tudi v višino.

3. 1. 1. FDM tehnologija (Ciljno nalaganje)

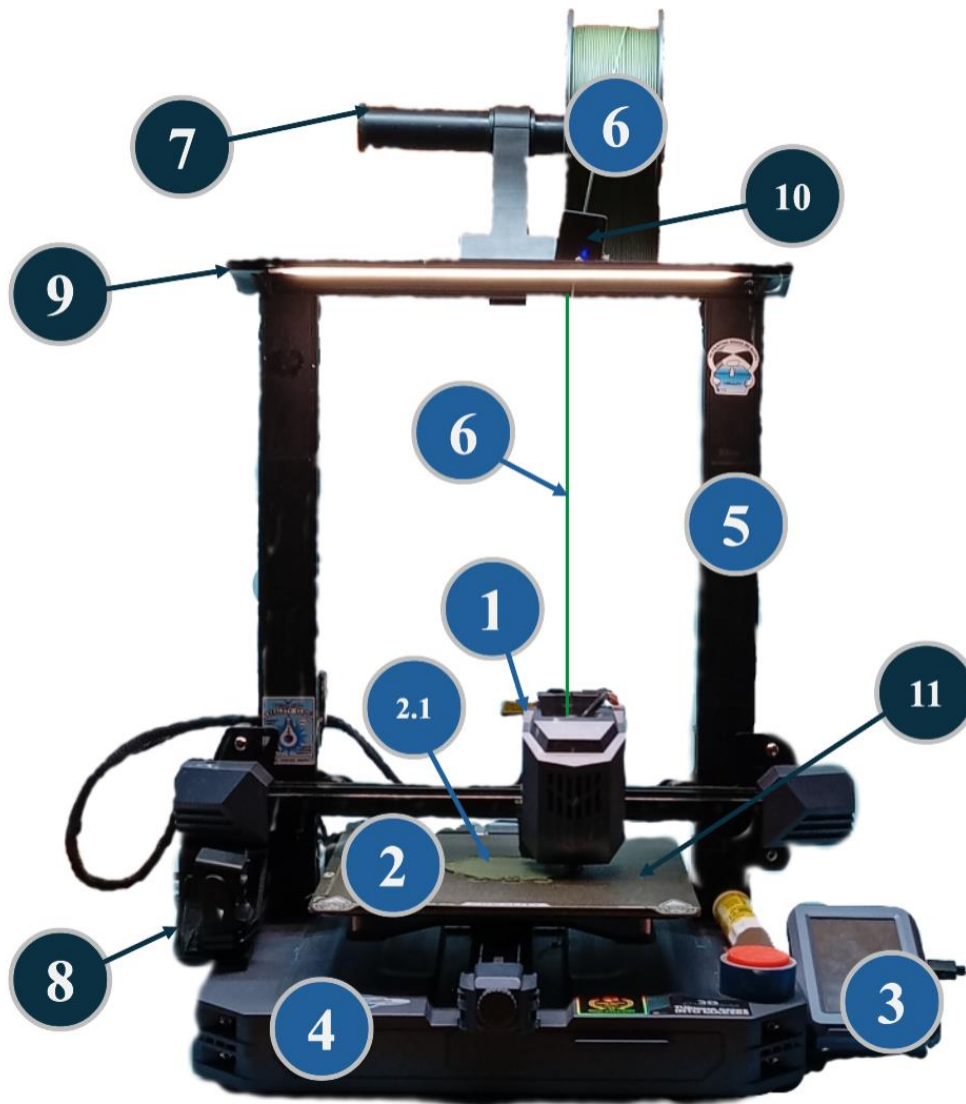
FDM tehnologija (angleško 'Fused deposition modeling', znano tudi pod kratico FFF) je najpreprostejša in najcenejša tehnologija 3D tiska. Deluje na principu taljenja in nanašanja polimerov v plasteh, in to približno med 50 in 350 μm visokih slojih (odvisno od tiskalnika).

Ključni sestavni deli tovrstnih tiskalnikov so:

- talilna enota in šoba,
- ekstruder (enota za nanašanje materiala),
- postelja/površina za tiskanje,
- zračno hlajenje položenega materiala,
- sistem za premikanje osi širine, višine in globine,
- ekran,
- napajalnik, matična plošča,
- okvir.

Poleg osnovnih delov mnogi proizvajalci nudijo tudi dodatno opremo, na primer (ogrevana) komora, LED svetilka, naprave za kalibracijo tiskalne površine, LIDAR tehnologija (namenjena kalibraciji), enota za uporabo več materialov hkrati, avtomatsko nategovanje jermenov, kamera za zaznavanje anomalij in time-lapse fotografij, odstranljiva tiskalna površina itd.

Z razvojem tiskalnikov se višajo tudi standardi, tako da bi lahko nekatere izmed teh dodatkov uvrstili že med ključne sestavne dele, npr. naprava za kalibracijo postelje in odstranljiva tiskalna površina.



Slika 1: Prikaz delov tiskalnika (tiskalnik CR-10 SE, blagovne znamke Creaform)

Legenda:

Glavni deli (svetlomodra oznaka):

1. Glava tiskalnika (enota za taljenje filameta, lahko tudi ekstruder)
2. Površina za tiskanje
 - 2.1. Izdelek v izdelavi
3. Ekran
4. Osnova tiskalnika (matična plošča, napajalnik, sistem za premikanje osi globine, utež)
5. Ohišje (sistem za premikanje osi širine in višine)
6. Filament
7. Stojalo za filament

Dodatna oprema

(temnomodra oznaka):

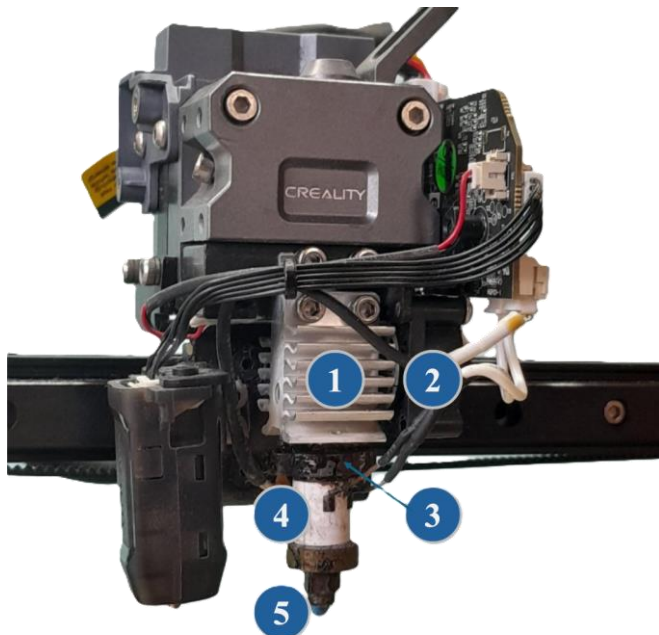
8. Kamera za zaznavanje anomalij
9. Led svetilka
10. Senzor za zaznavanje filameta
11. Magnetna/odstranljiva PEI površina

Za razumevanje delovanja celotnega tiskalnika je treba razumeti princip delovanja omenjenih ključnih delov, ki sodelujejo med seboj pri tisku izdelkov.

Za opis delovanja omenjenih komponent bo uporabljen tiskalnik CR-10 SE (Creality).

Delovanje talilne enote za nalaganje filamenta

Šoba, ki se nahaja v glavi tiskalnika, topi polimere in jih skozi šobo nalaga na tiskalno površino.



Legenda:

1. Hladilno rebro
2. Ventilator za hlajenje hladilnega rebra
3. Izolator
4. Keramični grelec
5. Šoba

Grelec (4) se segreje nad tališče oz. stekleni prehod polimera ($\approx 200 - 250^{\circ}\text{C}$), filament je potisnjen skozi **šobo (5)** in nanešen na izdelek/površino za tiskanje. **Izolator (3)**, **ventilator (2)** in **hladilno rebro (1)** preprečujejo širjenje vročine na ostale komponente.

Slika 2: Pogled pod pokrov glave tiskalnika – oznaka sestavnih delov talilne enote

Pri hitrejšem tiskanju se pojavijo anomalije 'ghostanja'. To je anomalija, pri kateri se nek vzorec v dimenzijah X in Y rahlo ponovi. To se zgodi, ko se glava prehitro premakne oziroma pospeši. Pospešek povzroči miniaturne vibracije/nihanje šobe, kar za seboj pusti rahlo nepravilnost na zunanjih stenah izdelka. S sodobnejšimi tiskalniki se to anomalijo reši s kompenzacijo vibracij. V postopku omenjene kalibracije se glava tiskalnika prične tresti na določenih frekvencah, program si zabeleži rezultate in jih nato pri tiskanju uporabi za kompenzacijo predvidenih vibracij ob tiskanju.

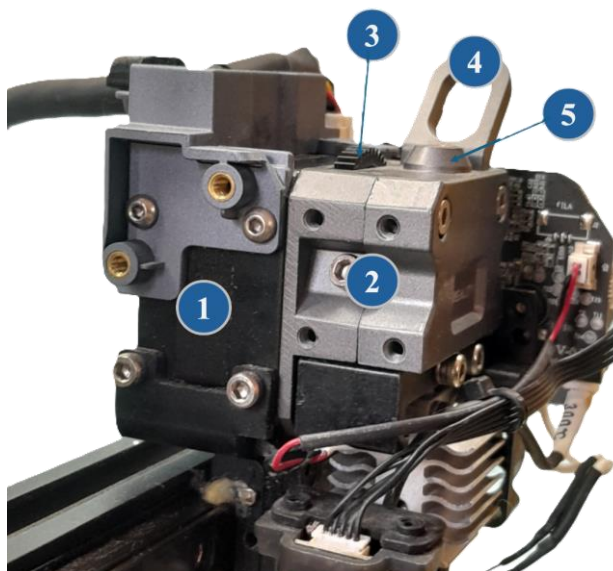
Delovanje ekstruderja

Ekstruder je sklop zobnikov in koračnega motorja, ki potiska filament skozi šobo. Poznamo dve vrsti montaže ekstruderja – montiran je lahko v glavi tiskalnika (neposredno poriva material skozi grelec in šobo) ali pa posredno montažo, pri kateri je ekstruder montiran na ohišju tiskalnika (material poriva do glave preko PTFE/teflonske cevke).

Primerjava obeh vrst montaže ekstruderja:

Direktna montaža	Indirektna montaža
+ Tiskanje fleksibilnejših polimerov	+ Lažja glava (večji pospeški)
+ Večja natančnost	+ Višje hitrosti tiskanja
+ Boljša odzivnost	- Težave s tiskanjem fleksibilnih materialov
- Večja masa glave (manjši pospeški)	- Težave s trenjem v teflonski cevi
	- Nenatančno iztiskanje materiala

Ekstruder deluje s pomočjo koračnega motorja, ki obrača zobnike, ti pa zgrabijo material in ga potiskajo naprej proti šobi. Filament je plastika v obliki žice, ki je v premeru široka 1.75 mm. Filament je s pomočjo ekstruderja iztisnjen skozi šobo, ki jo lahko zamenjamo. Standardna velikost šobe je 0.4 mm (zamenjamo jo lahko tudi za 0.2, 0.6 in 0.8 mm široke šobe, odvisno od proizvajalca).



Legenda:

- | | |
|----|---|
| 1. | Koračni motor |
| 2. | Ekstruder |
| 3. | Ročno premikanje zobnikov |
| 4. | Ročica za sprostitvev oprijema zobnikov |
| 5. | Vhod filameta |

Koračni motor (1) premika zobnike v *ekstruderju (2)*, ki potiskajo filament iz *vhoda (5)* do talilne enote. S pomočjo *ročice za sprostitvev oprijema zobnikov (4)* lahko brez težav zamenjamo filament. S pomočjo *kolesca za ročno premikanje zobnikov (3)* lahko potisnemo filament skozi talilno enoto in vizualiziramo delovanje *ekstruderja (2)*.

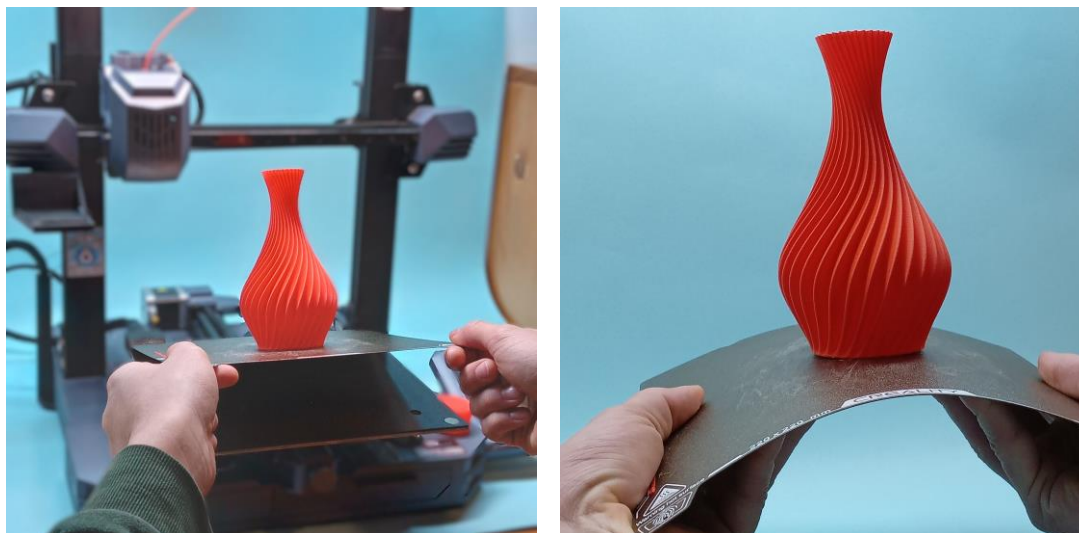
Slika 3: Pogled pod pokrov glave tiskalnika – oznaka sestavnih delov direktne montaže ekstruderja

Postelja/površina za tiskanje

Postelja tiskalnika ima ključno vlogo, saj se na njej tvorijo izdelki. Sestavljena je iz površine, na kateri se izdelek tiska, in grelca, ki segreva to površino. Nekateri občutljivi filamenti (ASA, ABS, PET-G ...) potrebujejo segreto površino, da se med postopkom nalaganja zaradi izgube toplote ne skrčijo in odlepijo od površine.

Tiskane površine so tiste, na katere se neposredno odlaga material in skrbijo, da se material primerno odloži in se tudi primerno sprime s podlago. Izdelki se najpogosteje tiskajo na steklu ali pa na PEI površini (vključena površina v tiskalnik CR-10 SE, na obeh sledečih slikah).

PEI površina je tanka plošča, prekrita s plastjo polieterimida. Omenjen polimer je trpežna amorfna termoplastika z odličnimi adhezivnimi lastnostmi (prijemanje položene plastike na površino), zaradi česar je precej priljubljena pri površinah FDM tiskalnikov. Trenutno sta na trgu na voljo dve varianti PEI površine - gladka in s hrapavo teksturo. Med obema ploščama ni večjih razlik, razen te, da imajo izdelki, tiskani na gladki površini, gladko dno, medtem ko imajo izdelki, tiskani na hrapavi podlagi, malce močnejšo adhezijo in hrapavo teksturo dna.



Slika 4 in 5 : Standardna odstranljiva tiskalna PEI površina na tiskalniku CR-10 SE

3D model: Spiral vase; **Modelar:** Yllonnce; **Naloženo iz:** Thingiverse.com; **Natisnjeno na tiskalniku:** CR-10 SE

S pomočjo magnetne podlage zlahka ločimo površino od mize (slika zgoraj levo). Zaradi upogljivosti površine je odstranjevanje izdelkov precej preprosto (slika zgoraj desno).

Zračno hlajenje položenega materiala

Staljeni polimeri so v slojih naloženi na tiskalno površino in nato drug na drugega, dokler izdelek ni zaključen. Segreti so na cca. 200-280°C (odvisno od vrste filamentov) in že v stanju, v katerem se jim poveča viskoznost oziroma so že nad tališčem.

Ob postopku tiskanja je položen material potrebno ohladiti, da bo ob nalaganju naslednjega sloja že čvrst in trden.

Hlajenje dosežemo z direktno inštalacijo centrifugalnega ventilatorja v glavo, z izhodiščnim delom, usmerjenim v okolico šobe. Izhodni del je po navadi zavrt okoli šobe za enakomernejše hlajenje izdelka (tiskalnik CR-10 SE ima izhodiščno šobo v obliki črke U). Poleg omenjene vrste hlajenja materiala pa se lahko uporabljajo tudi ventilatorji, ki niso nameščeni v glavi, ampak na okvirju ali komori tiskalnika (t. i. pomožni ventilatorji).

Naloga hlajenja ni samo v tem, da ohladi material za naslednji sloj, temveč ima tudi ključno vlogo pri optimizaciji tiskanja previsov in mostov.

Previsi

Previs je vsaka stranska površina 3D modela, ki je med 90 in 0 stopinj (glede na prvi sloj). Ventilator mora ohladiti novo odloženi material, da ne pride to anomalij, kot na primer posedanje materiala (slika 6). V primerih, kjer so previsi preveliki za uspešno tvorbo previsa, lahko k izdelku vstavimo podpore, ki jih po tiskanju odstranimo (slika 7).



Slika 6: 75° previs na vrhu tiskanega modela (levi izdelek je bil natisnjen brez podpor, desni pa z njimi)

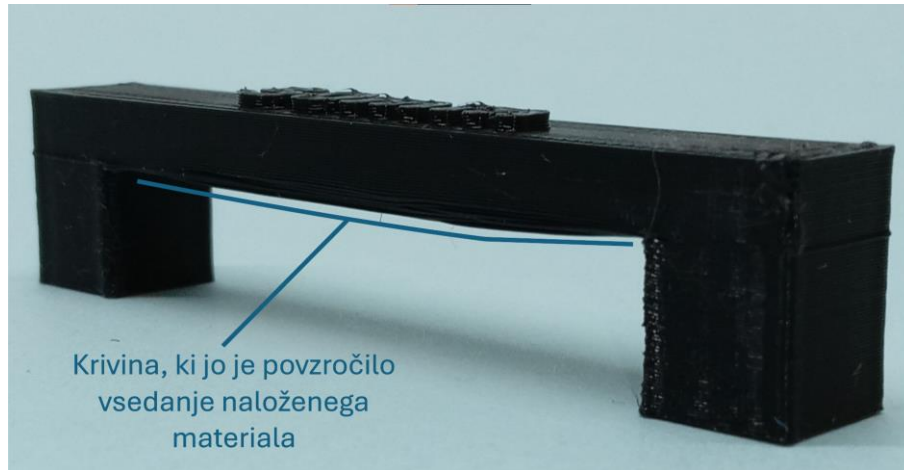


Slika 7: Model, natisnjen s t.i. 'organskimi' podporami

3D model: Overhang Angle Test Object (30-75°); **Modelar:** zumili; **Naloženo iz:** Thingiverse.com; **Natisnjeno na tiskalniku:** CR-10 SE (s 100 % delovanjem ventilatorja in višine slojev 250 µm)

Mostovi

Mostovi so predeli 3D modela, ki so popolnoma ravni in v ravni liniji povezujejo dva predela modela. Tiskalnik take predele tiska s pravilnim razmerjem med hlajenjem, iztiskanjem materiala in hitrostjo. S tovrstno kombinacijo je tiskalnik zmožen tiskati mostove, vendar s povešanjem materiala. Razdalja mostu je premo sorazmerna s povešanjem materiala. Če optimalen most ni mogoč ali pa je razdalja med dvema predeloma mostu prevelika, lahko še vedno uporabimo podpore.

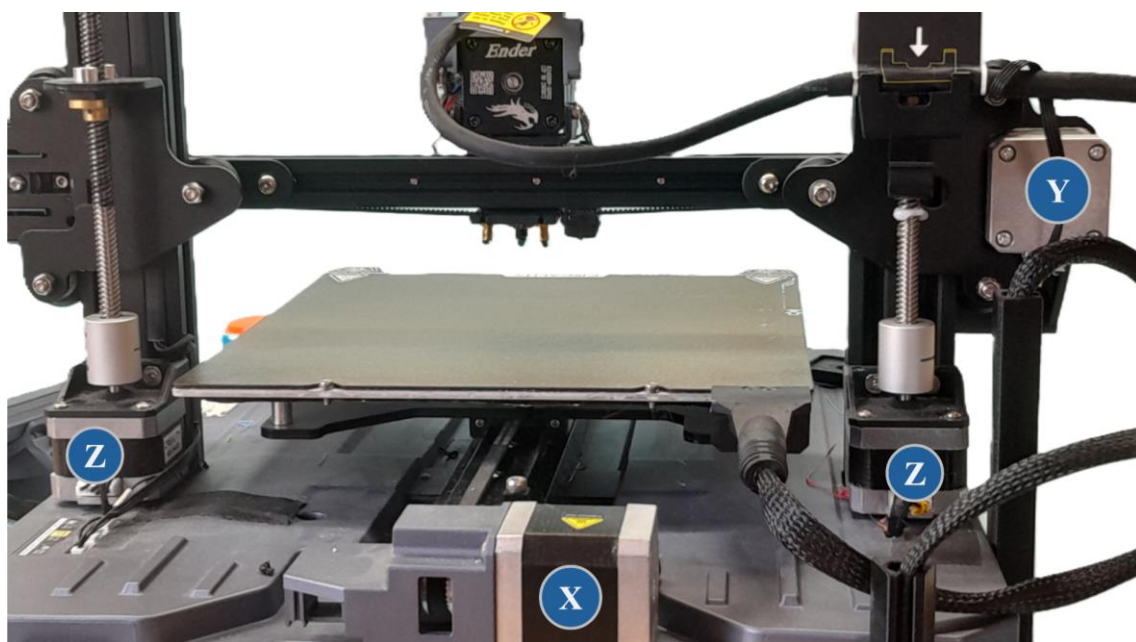


Slika 8: Prikaz natisnjene 50-milimetrskega mostu
Natisnjeno na tiskalniku: CR-10 SE (s 100 % delovanjem ventilatorja in višine slojev 200 μm)

Sistem za premikanje osi širine, višine in globine

3D tiskalniki imajo za vse svoje premikajoče osi koračne motorje, ki natančno premikajo določene osi.

Koračni motorji so v tiskalnikih uporabljeni zaradi svoje natančnosti. Delujejo na osnovi izmeničnega napajanja večih tuljav okoli gredi. S pomočjo izmeničnega napajanja vsake druge tuljave omogočimo, da se med njimi spreminjajo elektromagnetna polja. Z vsako izmenjavo polja se gred zavrti za en korak. Z določanjem, koliko korakov/izmenjav polj bo izvedel koračni motor, lahko zelo točno določimo, za koliko se bo gred zavrtela in s tem premaknila glavo ali površino tiskalnika.



Slika 9: Pogled tiskalnika od zadaj - označba koračnih motorjev za premikanje vseh treh osi

Legenda:

X: Koračni motor za premikanje postelje (os globine/X)

Y: Koračni motor za premikane glave (os širine/Y)

Z: Koračna motorja za dvigovanje/spuščanje glave in koračnega motorja (os višine/Z)

Koračna motorja za premikanje glave (2) in postelje (1) sta s svojimi premikajočimi se komponentami povezana z jermenom. Tir (po katerem se giblje glava) dvigujeta/spuščata dva koračna motorja (3) preko navojnega vretena.

Vse tri osi premikanja omogočajo premikanje glave kjerkoli po prostornini tiskanja (opisani tiskalnik ima maksimalni tiskani prostor v dimenzijah 220x220x265 mm).

Ekran

Ekran je pomemben del tiskalnika, saj preko njega nadzorujemo delovanje tiskalnika. Preko ekrana lahko sproti spreminjamo tudi nastavitve tiskanja, kot na primer temperaturo šobe in površine tiskanja, hitrost, hitrost ventilatorja za hlajenje odloženega materiala itd. Preko ekrana je možen tudi zagon kalibracijskih postopkov in ima tudi svoje integrirano vezje za delovanje.

Klasični LCD-zaslone se pri novejših tiskalnikih počasi umikajo uporabi, saj proizvajalci vedno bolj predpostavljajo nadzor nad tiskalniki preko vmesnika na neki drugi napravi. Oddaljeni nadzor omogočajo vgrajene spletne kamere in Wi-Fi moduli.

Napajalnik in matična plošča

Napajalniki so na tovrstnih napravah nameščeni zaradi splošnega pomena napajanja tiskalnika z električno energijo.

Matična plošča je na tiskalnikih integrirano vezje, ki nadzoruje vse premike koračnih motorjev, splošno delovanje LCD-zaslona, shranjevanje 3D-modelov direktno na tiskalnik itd.

Napajalnik in matična plošča imata vsak svojo zračno hladilno enoto.

Okvir

Tiskalnice lahko delimo glede na obliko in način mehanizacije. CR 10 SE, ki je bil uporabljen kot primer, je t. i. 'bed *slinger*' oziroma CoreXZ, vendar so lahko tiskalniki tudi v CoreXY (znani pod vzdevkom 'bed *droper*'), CoreXYZ in Delta konfiguracijah. Pri 'Core' konfiguracijah ime določimo s tem, da povemo, v katere smeri/dimenzije se premika glava. Poleg sledečih konfiguracij pa so v uporabi tudi nekateri posebni tiskalniki, kot na primer tiskalniki, ki pod kotom 45-60° tiskajo na tekoči trak (npr. CR-30, firme Creality).

Pri tiskanju so pomembni pospeški tiskalnika, saj zmanjšajo čas tiskanja. Največje pospeške dosežemo z upoštevanjem 2. Newtonovega zakona ($a = F \cdot m$). Če upoštevamo, da imajo vsi tiskalniki enake motorje za premikanje (torej enako silo oz. F), bo najhitrejši tiskalnik tisti, ki bo premikal najmanjšo maso. To so CoreXY in Delta tiskalniki, saj premikajo le glavo, za razliko od npr. CoreXY tiskalnikov, ki premikajo celotno mizo za tiskanje in tiskani 3D model.

Core XZ:

Konfiguracija tiskalnikov, pri katerih se glava premika v smeri X in Z dimenzije. Postelja premika celoten tiskan model v Y dimenziji.

Prostornina tiskanja je kockasta.



Slika 10: Primer CoreXZ tiskalnika (Creality CR 10 SE, uporabljen za tiskanje izdelkov za to raziskovalno delo)

Core XY:

Konfiguracija tiskalnikov, pri katerih se glava premika v dveh dimenzijah, X in Y. Miza premika izdelek v dimenzijo Z. Kockasta prostornina tiskanja. Konfiguracija je tudi znana kot t. i. 'bed droper'.



Slika 11: Primer CoreXY tiskalnika (Creality K1)

Core XYZ:

Konfiguracija tiskalnikov, pri katerih je površina za tiskanje stacionarna. Glava tiskalnika se premika v X, Y in Z dimenzijo. Kockasta prostornina tiskanja.



Slika 12: Primer CoreXYZ tiskalnika (Sovol SV08)

Delta: Konfiguracija tiskalnikov, pri katerih je postelja stacionarna. Glava se premika v X, Y in Z dimenzijo s pomočjo treh hidravličnih rok. Prostornina tiskanja je ovalna.



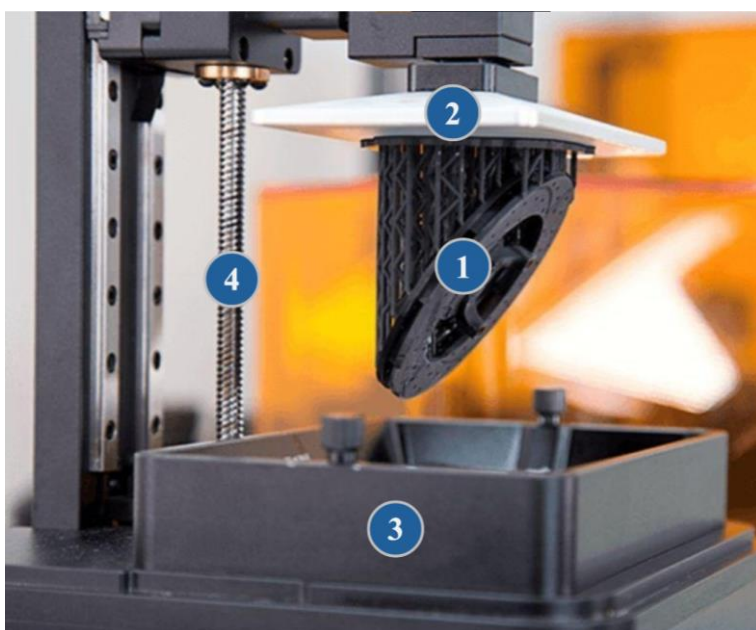
Slika 13: Primer delta tiskalnika (Flsun Super Racer)

Opomba: Vsi omenjeni tiskalniki so v enaki cenovni skupini med 450-600 evrov.

3.1.2. SLA tehnologija (Stereolitografija)

Stereolitografija je vrsta 3D tiska, pri katerem za material uporabljamo UV občutljivo smolo, ki jo po slojih strdimo v 3D modele. Tovrstna tehnologija je zmožna natančnega tiska manjših, manj masivnih 3D modelov (višina slojev v povprečju tudi manj kot 80 mikronov, dimenzionalna toleranca je ≥ 10 mikronov) in je prav zato na nivoju hobija najbolj uporabljena za izdelovanje figuric za namizne igre in podobnih miniaturnih izdelkov z veliko detajli.

Izgradnjo SLA tiskalnikov lahko delimo na dva dela, na zunanji in notranji del. Zunanji del je tisti, ki ga uporabnik največkrat uporablja in je po navadi zgornja polovica tiskalnika. Notranji del opravlja procese za izdelavo izdelka, se pravi, da proizvaja in usmerja svetlobo, ki strjuje smolo (poleg tega pa vsebuje tudi glavno matično ploščo, sistem za zračno hlajenje in zaslon).



Legenda zunanjega dela:

1. Tiskani predmet (predmet na sliki je že dokončan)
2. Tiskana površina
3. Korito s smolo s trozornim dnom)
4. Dvižni mehanizem

**Ni vključen pokrov, ki je položen čez zgornji del naprave ob tiskanju. Pokrov zadržuje strupene hlape in nezaželen vdor UV svetlobe iz okolice.*

Slika 14: Označen zunanji del SLA tiskalnika

Poznamo več vrst SLA

tiska:

Laserski SLA: Laser je usmerjen v zrcalo, ki se nagiba tako, da laserski žarek posredno posveti na določene dele izpostavljene smole, ki se nato strdi in ustvari novi sloj (podobno kot pri SLM tiskanju, gl. sledeče poglavje).

Selektivna izpostavljenost svetlobe s pomočjo projektorja (DLP-SLA): Pri tej vrsti je projektor pozicioniran pod podlago, na kateri je smola, in sveti na določene predele dna korita. Smola, ki je v stiku z osvetljenim območjem, se strdi in tvori nov sloj.

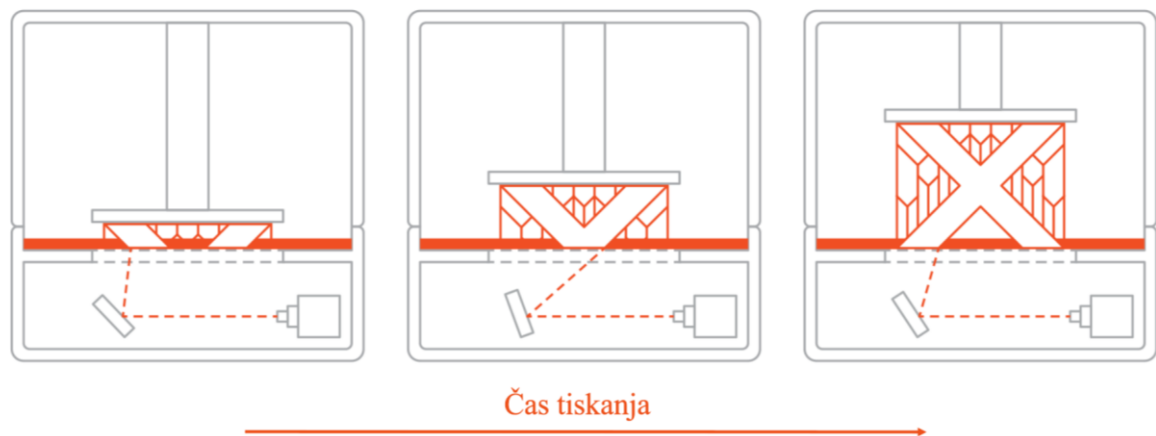
Selektivna izpostavljenost svetlobi, maskirano s LCD zaslonom (MSLA): Pod površino je modul z LCD zaslonom, za maskiranje specifičnih svetlobnih vzorcev, ki ponovijo omenjen proces. Glavni vir UV svetlobe je zaslon z več svetlečimi diodami.

Shema I : Shema vrst SLA tehnologije (Prirejeno po: wikipedia.org.)



Postopek tiskanja slojev je, da tiskalnik spusti površino za tiskanje na določeno razdaljo med njo in dnom posode, v kateri je smola. Smola v prostoru med omenjenima komponentama se strdi s pomočjo proizvedene svetlobe. Ko se smola med tem prostorom strdi v sloj, se površina, vključno z ustvarjenimi sloji, ponovno dvigne za ločitev izdelka od dna in izgradnje novega sloja.

Shema II: Postopek tiskanja v SLA tiskalnikih, predstavljeno z elementi laserske SLA tehnologije (Prirejeno po: core77.com.)



Izdelki, natisnjeni iz smole, zahtevajo še dodatno obdelavo, da bo izdelek dokončan. To je odstranjevanje podpor, pranje izdelkov (odstranjevanje odvečne smole iz površine izdelka) in dodatno utrjevanje (dodatni postopek izpostavljanja celotnega izdelka UV svetlobi za izboljšano strukturno trdnost).

Pomembno je še omeniti, da je postopek tiskanja v bistvu kemična reakcija, ki proizvaja pline, ki so strupeni za zdravje. Med pripravo SLA tiskalnikov in rokovanjem s smolami

moramo uporabljati zaščitno masko, rokavice in tudi očala, če smo izpostavljeni direktni UV svetlobi.

3.1.3. SLM tehnologija (Selektivno lasersko taljenje)

Selektivna laserska tehnologija je lahko tudi postopek tiskanja izdelkov iz kovin, kot je SLM. Postopek poteka s taljenjem materialov, ki so v obliki *finega* prahu (velikost prašnih delcev med 55 μm in 10 μm - povprečno zrno peska, ki se ga lahko najde na obali, je veliko okoli 220 μm) in to za boljšo kvaliteto in dimenzijsko natančnost izdelkov.

Tovrstna tehnologija je izključno na nivoju industrijske proizvodnje. Uporablja se v specifičnih aplikacijah: v letalski, avtomobilski, vesoljski, medicinski, energijski itd. Večinoma se uporablja za izdelavo prototipov in specifičnih izdelkov zahtevnejših oblik. Tovrstno tiskanje ni primerno za proizvodnjo, saj je drago (okoli 70 evrov na uro s tiskanjem aluminija, z osnovnimi nastavitvami) in zamudno.

SLM tiskalnik je sestavljen iz zunanje enote in komore. V zunanji enoti sta najpomembnejša *laser* in *motorizirano zrcalo (obe komponenti nista vidni)*. V komori so tri korita (gl. spodaj): *korito z zalogo prahu (1)*, *korito, v katerem se tiska izdelek (2)* in *korito z odvečnim prahom(3)*. *Roka (4)*, ki nanaša material, ima nastavljivo višino (zaradi višine slojev) in se pomika od desne do leve strani komore in je širša od korit, da je zmožna enakomernega nanosa novih plasti. Nad koriti je *prezračevalna šoba (5)*, ki v komoro dodaja dušik, da izpodrine kisik in da ne pride do vžiga nastalih plinov.

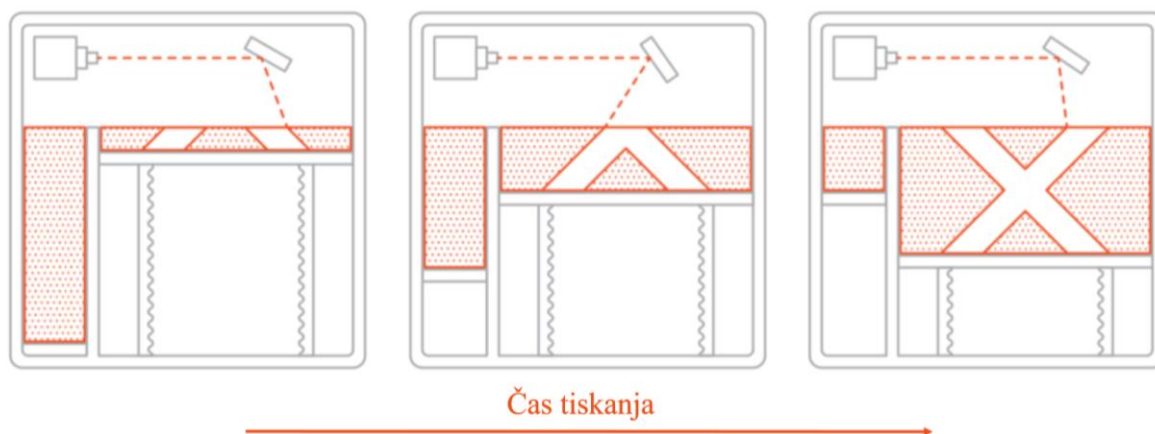


Slika 15: Izgled komore SLM tiskalnika (po končanem tiskanju in z odvzeto zalogo materiala in površino za tiskanje)

Postopek tiskanja je sledeč: Laser neposredno sveti v ogledalce, katero se lahko nadzorovano in natančno obrača v vse svoje 3 osi. S tem preusmeri žarek na sloj, ki je v postopku tiskanja. Material se nalaga po slojih in je prenešen iz zaloge (gl. levi del posamezne skice) s pomočjo t. i. rezila ali ščetke v enakomerno debel sloj preko cele površine prejšnjega sloja (odvečni prah se presipa v korito z odvečnim materialom, ki ni skiciran). Laser posredno preko ogledala stali vzorec, ki predstavlja določen sloj izdelka.

Postopek se ponavlja, dokler izdelek ni dokončan. Komora, v kateri se izvaja proces, je neprestano ventilirana z dušikom, da ne pride do morebitnega vžiga zaradi nastalih plinov ob taljenju kovin. Delež odvečnega prahu je okoli 15 % glede na uporabljen prah in po koncu tiskanja ni več primeren za reciklažo.

Shema III: Shema delovanja SLM tehnologije (Prirejeno po: www.core77.com.)



Med tiskanjem je precej prisotno krčevanje staljenega prahu (zaradi spremembe agregatnega stanja pri ohlajanju), kar povzroča strukturno in dimenzijsko škodo na izdelku – intenzivnost je odvisna od uporabljenega materiala. Tem anomalijam se lahko izognemo s tem, da uporabimo način tiskanja s t. i. šahovnico. To je izmenično taljenje posameznih manjših območij posebej, da se naravno skrčijo. Prostor med 'kvadrati' je nato staljen in tako zapolnjen. Nato sledi nov sloj.

Ob koncu tiskanja je izdelek potreben čiščenja in odstranjevanja neobdelanega materiala. Postopek je lahko nevaren zdravju, saj lahko prašni delci materiala napolnijo zrak in tako z vdihom preidejo v dihalni sistem. Za rokovanje s temi materiali so obvezna oprema rokavice, maska in zaščitna očala.

Čiščenje poteka z odstranjevanjem celotne površine izven tiskalnika. Ob tem postopku se neprestano sesa prah, ki je odkrit iz okolice izdelka. Posesan prah gre v posebni sod za ponovno uporabo. Površina za tiskanje je vključno z izdelkom vzeta izven tiskalnika na žago, ki loči izdelek od površine za tiskanje. Model je po navadi natisnjen na vrhu podpornih struktur in da se ne veže s površino. S tem dosežemo, da ob žaganju ločimo izdelek od teh podpor (in površine), da se izognemo poškodbi površine za tiskanje.

Končni rezultat je močan, težek in odporen 3D model, ki ga ne bi mogli izdelati s klasičnimi obdelovalnimi načini. Najboljši primer takega izdelka je šoba z vgrajenim hlajenjem – z navadno proizvodnjo ne moremo izdelati tovrstne šobe, ki je prepletena s posamično cevko, po kateri lahko teče hladilna tekočina. SLM tiskalnik je zmožen tiskati izdelke iz aluminija, nerjavečega jekla, titana ipd.

3.2. Vrste materialov za FDM tiskalnike (filamenti)

FDM 3D tiskalniki tiskajo s številnimi različnimi filamenti, ki so naviti na kolute in imajo obliko plastične 'žice', premera 1.75 (pri novejših tiskalnikih) ali 2.85 mm. Materiali se med seboj razlikujejo v mehanskih in kemijskih lastnostih, zato je treba njihove lastnosti imeti v mislih, ko jih začnemo uporabljati pri tiskanju izdelka.

Vsi filamenti so termoplastike (ali termoplasti) – od t.i. termosetov se razlikujejo po tem, da jih lahko po obdelavi ponovno pretvorimo v začetno stanje, kar je pomembno pri recikliranju (na primer epoksi smole ne moremo ponovno spraviti v tekoče stanje, saj je termoset).

Termoplastike lahko delimo na dve veji – na amorfne ter **delnokristalne**.

Delnokristalne plastike so lahko v trdnem in tekočem stanju. Ko so v trdnem, so *večinoma* prosojne ali povsem neprosojne. Predpostavljena je kemijska odpornost, kot na primer na sevanje UV žarkov. Po prehitrem ohlajanju se omenjen polimer tudi skrči, kar pomeni, da pri tiskanju ne smemo uporabljati ventilatorjev za hlajenje naloženega materiala.

Amorfne termoplastike so *večinoma* uporabljene pri 3D tisku zaradi preprostejše obdelave, z manjšimi temperaturami tiskanja in skrčki. Zaradi svoje neurejene molekulske strukture, amorfne termoplasti nimajo jasno določene temperature tališča. Območje, kjer se polimeri pričnejo taliti, dosežemo z presežkom steklenega prehoda. Ko ga dosežemo, postane filament mehkejši ter primeren za nalaganje.

Na trgu so na voljo številni sintetični polimeri, primerni za FDM 3D tisk. Ti materiali predstavljajo *osnovni nabor* filamentov za tiskanje:

- **PLA** (*polimlečna kislina*),
- **ABS** (*akrilonitril butadien stiren*),
- **PET-g** (*polietilen tereftalat glikol*),
- **TPU** (*termoplastični poliuretan*),
- **ASA** (*akrilonitril stiren akrilat*).

Nekatere materiale lahko zaradi dodajanja snovi, ki vplivajo na njihove estetske in druge lastnosti, delimo tudi na različne *vrste*:

- **Mat** filamenti
(*končni izdelek ima mat izgled z manj odseva*),
- **SILK** filamenti
(*predvsem konfiguracija PLA plastik za poseben svilnat odsev na končnem izdelku*),
- **Plus** filamenti
(*filamenti z dodanimi snovmi, ki naredijo tiskanje izdelka lažje, lahko pa imajo tudi pozitiven vpliv na trdnost materiala*),
- Filamenti s **karbonskimi ali steklenimi vlakni**, s kratico CF in GF
(*dodajanje deleža majhnih delcev omenjenih vlaken, kar ojača izdelek*).
- **Litofan** filamenti
(*konfiguracija filamentov za tiskanje prosojnih slik za ustvarjanje osvetljenih podob*).

Zaradi omejene dolžine raziskovalne naloge posameznih vrst filamentov ne bom mogel opisati podrobno. Omenjeni filamenti se pri splošnem tiskanju razlikujejo glede na višino tališča oz. višino steklenega prehoda, temperaturo postelje za primerno adhezijo, moč (odpornost na udarce, lomljenje in pritisk/raztezek) itd.

PLA filament je material, primeren za vse uporabnike zaradi nižje cene in obdelovalne temperature. PLA ne zahteva visokega temperaturnega obdelovanja in je biorazgradljiv. Tovrstna plastika zaradi minimalnega krčenja ob ohlادitvi ne zahteva segrete površine za tiskanje. Je dovolj močna za splošno uporabo v nezahtevne namene (okrasje, splošna uporaba na domu).

ABS plastika je bila v razvoju 3D tiskanja široko uporabljena, vendar je zaradi izboljšane PLA plastike postala manj uporabljena. ABS zahteva višje temperature za obdelavo in se skrči tudi ob manjših temperaturnih spremembah. Proizvaja tudi zdravju škodljive hlapne, neprimerne za vdihavanje.

PET-g je polimer, ki se uporablja za tiskanje malce močnejših izdelkov. Tovrstni material ponuja primerno razmerje med odpornostjo na udarce in enostavnostjo tiskanja. Ima tudi zmerno temperaturno in kemično odpornost. V osnovi je najbolj prozoren polimer med omenjenimi filamentmi saj se ne kristalizira. Izdelan je z modifikacijo PET plastike (uporablja se za izdelavo plastenk), ki zaradi višjih temperatur in počasnega tiskanja ni popolnoma primerna za obdelavo. PET plastiki je dodana enota etilenglikola, ki omenjenemu polimeru onemogoči kristalizacijo in mu zniža obdelovalno temperaturo.

TPU je poseben material z gumijastimi lastnostmi, s katerim lahko natisnemo zelo odporne izdelke, saj zaradi svoje gumijaste narave dobro prenaša raztezanje, (predvsem) udarce in pritisk. Pri tiskanju tvori izredno močne spoje med sloji, kar mu omogoča takšno izredno odpornost. TPU je temperaturno in kemično bolj odporen kot PLA plastika. Zaradi svoje višje viskoznosti je z njim pri tiskanju težje ravnati, saj se ne more hitro in zanesljivo ustaviti ob iztiskanju, kar povzroča ustvarjanje drobnih nitk po celotnem izdelku. TPU je izredno higroskopen in ga je treba primerno shranjevati in dehidrirati pred tiskanjem. Zaradi higroskopskega vsrka vodo, ki se ob tiskanju spremeni v paro, in med postopkom nanašanja proizvaja mehurčke v iztisnjem materialu. Ta pojav poveča nastajanje nitk in grobih površin ter oslabi odpornost končnega izdelka.

ASA je material, ki je specifično namenjen za zunanjo uporabo. Ima močno odpornost na zunanje/kemijske dejavnike – predvsem na UV sevanje. ASA se težko tiska, saj zahteva kontrolirano ozračje, visoko temperaturo šobe ($\approx 245^{\circ}\text{C}$) in površine ($\approx 110^{\circ}\text{C}$). Poleg tega, zaradi svoje delnokristalne zgradbe, zahteva tudi močno adhezijo, saj se izredno občutljiva na temperaturne spremembe v okoliškem zraku, tudi v

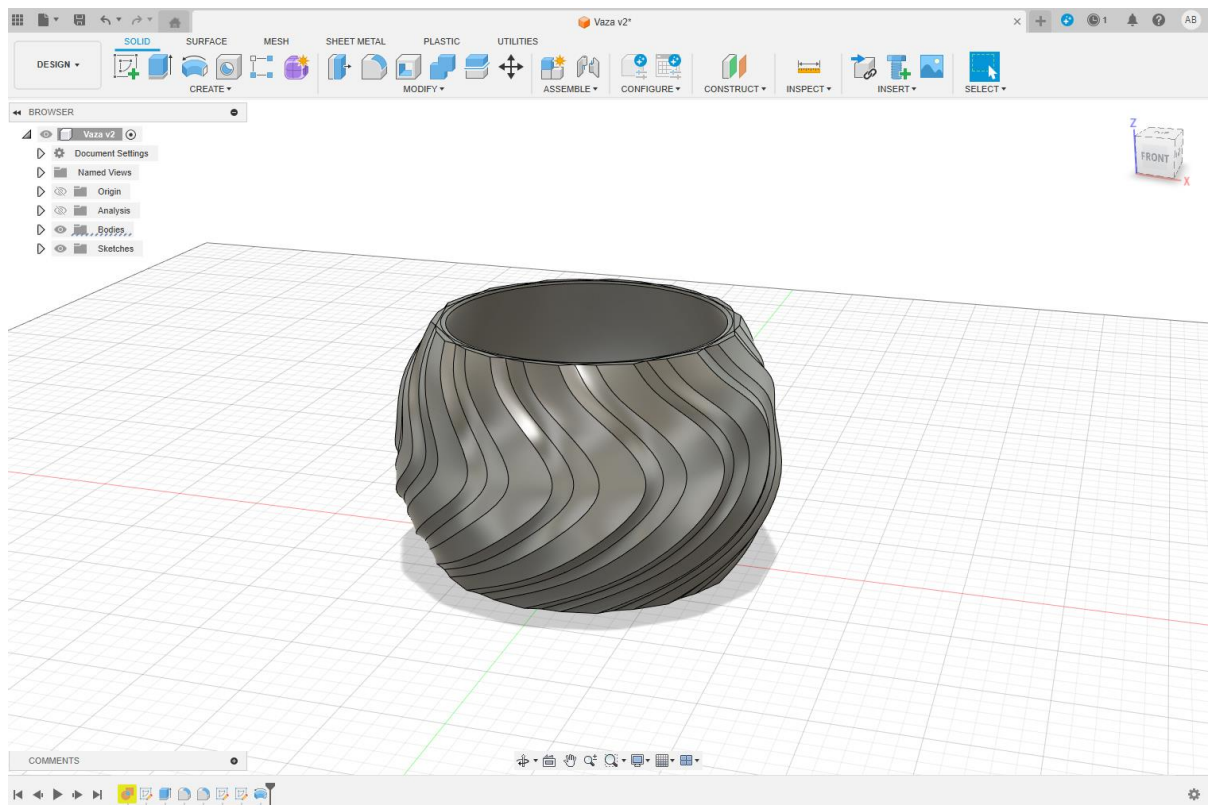
kontroliranem ozračju. Ob tiskanju tudi sprošča strupene kemične hlape, škodljive zdravju.

Komora je v sklopu dodatne opreme za nekatere 3D tiskalnike in omogoča tiskanje omenjenih občutljivih materialov, npr. ASA. Poleg temperature zadržuje tudi strupene hlape in do neke jakosti tudi proizveden zvok.

3. 3. Postopek izdelave izdelkov

Tiskanje izdelkov poteka v treh korakih. Če nek izdelek želimo natisniti, ga moramo sprva zmodelirati ali pa naložiti s spleta, nato ga odpreti v 'Slicerju' (t.j. program, ki uredi 3D model v format, katerega razume 3D tiskalnik) in ga izvozimo v tiskalnik, ki ga natisne. Po končanem tiskanju ločimo izdelek od mize in odstranimo odpadni material (na primer podpore).

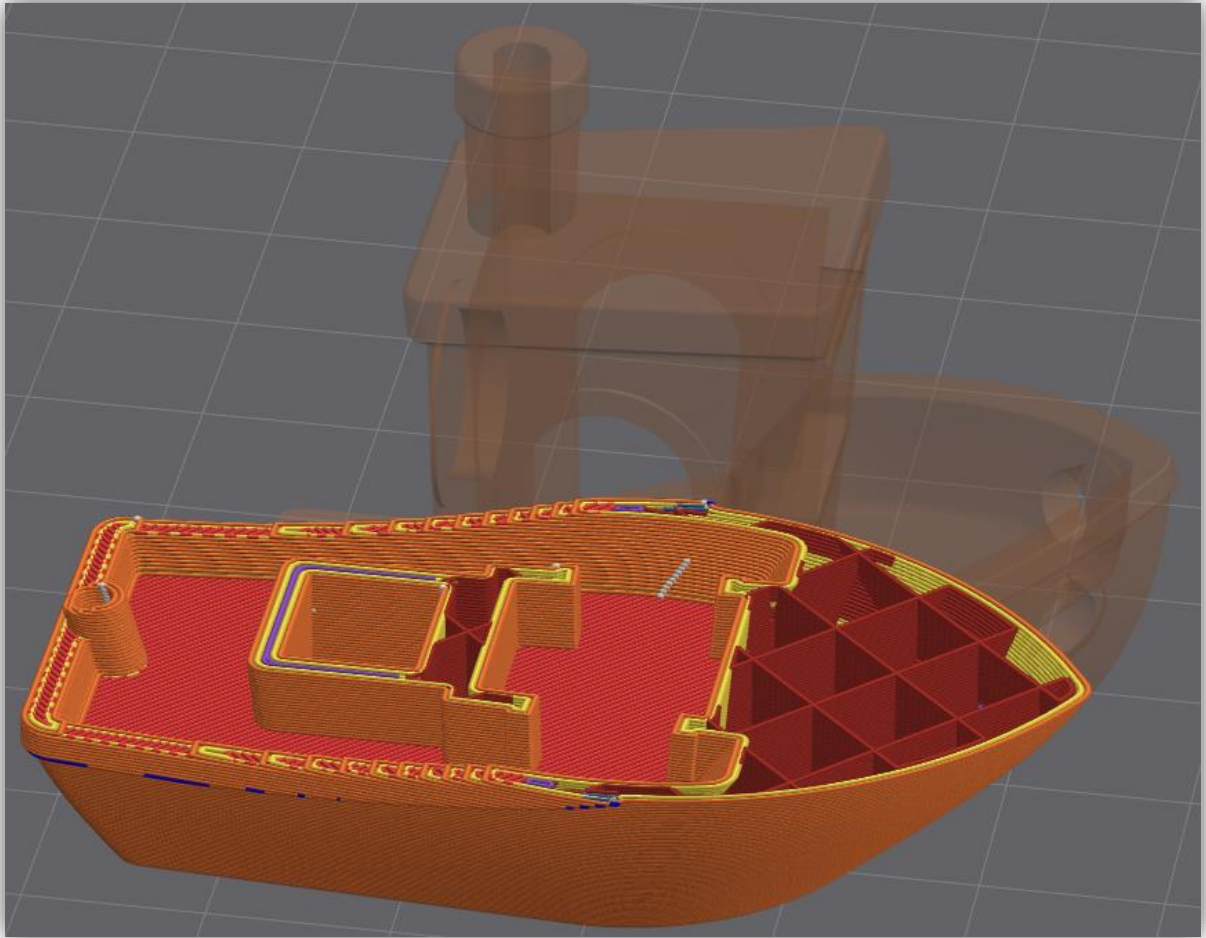
Izdelek sprva zmodeliramo v programu CAD (program za načrtovanje izdelkov s pomočjo računalnika).



Slika 15: 3D modeliranje v CAD programu Fusion 360, Autodesk

Nato izdelek prenesemo (najpogosteje v formatu .stl, ki model razdeli na številne trikotnike) in vnesemo v 'slicer'. To je program, ki model spremeni v zaporedne korake, ki jih tiskalnik prepozna.

V slicerju lahko spremenimo tudi številne lastnosti tiskanega modela (število sten, vrsta in delež polnila, hitrost/pospeški tiskanja, nastavitvev podpor itd.). Poleg tega pa tudi preračuna čas tiskanja, ceno in dolžino porabljenega filameta ter težo končnega izdelka.



Slika 16: Povečan pogled zrezanega modela ladjice (model 'Benchy' je v dimezijah 48x60x31mm) glede na zgradbo (3D model je priložen v virtualni prilogi).

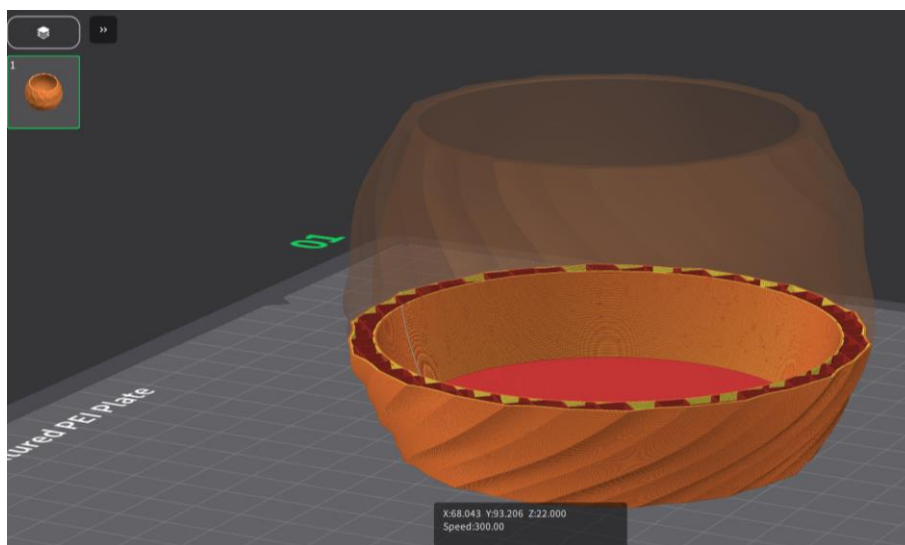
Slicer razreže model na več slojev in komponent:

- Zunanja stena (**oranžna**)
- Notranja stena (**rumena**)
- Polnilo (**temno rdeča**)
- Zgornja površina (**svetlejša rdeča**)
- Spodnja površina (**svetlo vijolično modra, ni vidna**)

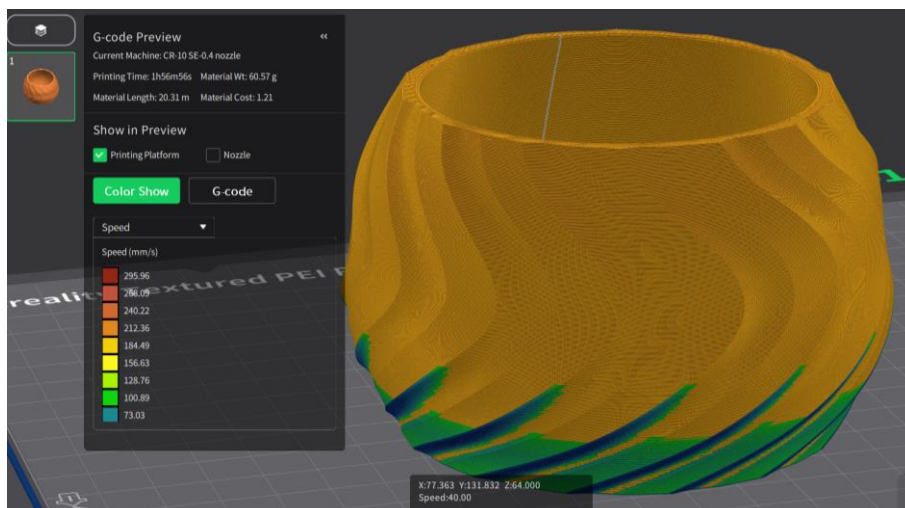
Nekateri osnovni deli se nato delijo še na več vrst (kot na primer, **skrajni previsi**, **mostovi**, **dodatna polnila** itd.). Točke, na katerih se šoba dvigne ali pomakne na nov sloj se imenuje 'prehod' ali 'šiv'. Označen je z belo točko.

Ko se nam zdi predogled primeren, lahko korake za tiskanje v formatu .gcode pošljemo na tiskalnik (bodisi lokalno, preko USB ključa ali podobnega, bodisi preko lokalne (LAN) povezave). Tiskalnik segreje površino in šobo, se po možnosti kalibrira in prične s tiskanjem izdelka.

Slicerji imajo tudi možnost za ogled/analizo tiska glede na sloje (saj izdelujejo kodni zapis, po katerem se bo natančno ravnal tiskalnik).



Slika 17: Predogled tiskanega izdelka v slicerju, glede na sestavne dele



Slika 18: Analiza tiskanega izdelka v slicerju glede na hitrost (mm/s, max. vrednost = rdeča, 295.96, min. vrednost = temnomodra, 50.75). Opomba: Hitrost na spodnjem delu lončka je nižja zaradi večjih previsov, kar omogoča materialu, da se hitreje ohladi.

Tiskalnik je v približno 90 minutah natisnil lonček, ki smo ga zmodelirali, slicali, pregledali in posredovali v tiskalnik. Izdelek trenutno služi kot stiliziran lonček za kaktus.

Fotografijo lončka lahko najdete v virtualni prilogi (mapa Teo. del → 3.3. Post. izdelave izdelkov → Lonček za kaktus).

4. PRAKTIČNI DEL

4.1. Testiranje mehanske napetosti izdelkov

S tem testom bom ugotavljal mehansko trdnost izdelkov, natisnjenih s PLA plastiko. Z mehansko trdnostjo lahko ugotovimo, koliko sile lahko nek izdelek prenese na določeno površino pred zlomom. S pridobljenimi podatki dobimo znanje, s katerim lažje razumemo in predvidimo točke, kjer se bo izdelek poškodoval oziroma zlomil.

Testiral bom natisnjene izdelke in jih nato primerjal. Izdelki bodo v obliki kratkih ploščic z dimenzijami *2x5x50 milimetrov*. Izdelke bom vertikalno raztegoval po dolžini, dokler se ne bodo zlomili oziroma ločili na dva dela. Predvidevam, da se bodo zlomili na najožjem delu, pravokotno preko dolžine. Ker bodo izdelki popolnoma solidni in napolnjeni z materialom, bo ta površina, po kateri poteka zlom, 10 kvadratnih milimetrov.

Enačba za izračun mehanske napetosti je torej sledeča:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Enačba prikazuje, koliko sile/rastezka (F) izdelek prenese na površino (A). Rezultati bodo izraženi v megapaskalih [MPa].

Za širjenje raziskave sem se odločil, da bom testiral več izdelkov z različno orientacijo in višino slojev. Geometrijsko obliko 3D modela bom za druge izdelke ohranil, vendar bom izvedel nekatere spremembe v 'slicerju' (gl. 3.3. Postopek izdelave izdelkov). Višina slojev in pozicija modela sta zanimiva faktorja, ki definitivno vplivata na trdnost končnega izdelka.

Testiral bom torej več izdelkov z različnimi postavitvami in višinami slojev.

Natisnil bom izdelke z višino slojev 100, 150, 200, 250 in 300 μm . Natisnjeni bodo 100% solidno in v vertikalni ter horizontalni orientaciji.

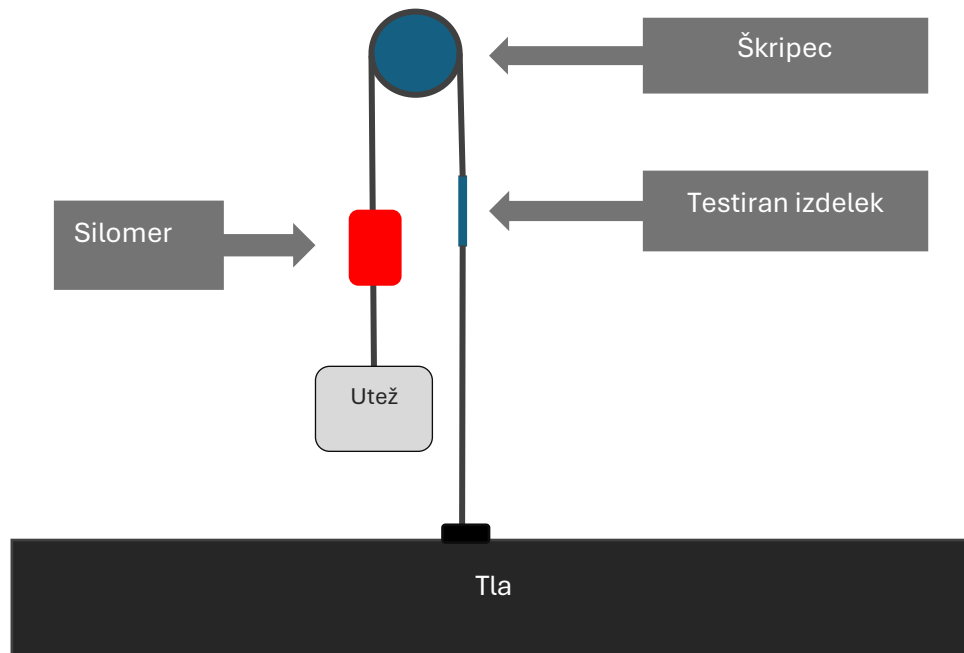
S tem želim ugotoviti, ali ima višina slojev vpliv na napetost izdelka. S tem tudi lahko ugotovim, če orientacija vpliva na mehansko trdnost izdelka.

Vse izdelke bom natisnil in testiral trikrat. Njihove vrednosti po testiranju bom nato zaokrožil na povprečje.

Vsi izdelki so bili natisnjeni iz PLA plastike lokalnega proizvajalca 3D Trček.

Vse ploščice bom testiral na domači improvizirani napravi (gl. naslednjo stran).

Shema IV: Prikaz naprave za merjenje mehanske napetosti/trdnosti



Po opravljenem poizkusu sem izračunal vrednosti za posamezne ploščice ter jih uredil v grafe. Omenjeno enačbo lahko sedaj dopolnimo s pridobljenimi podatki:

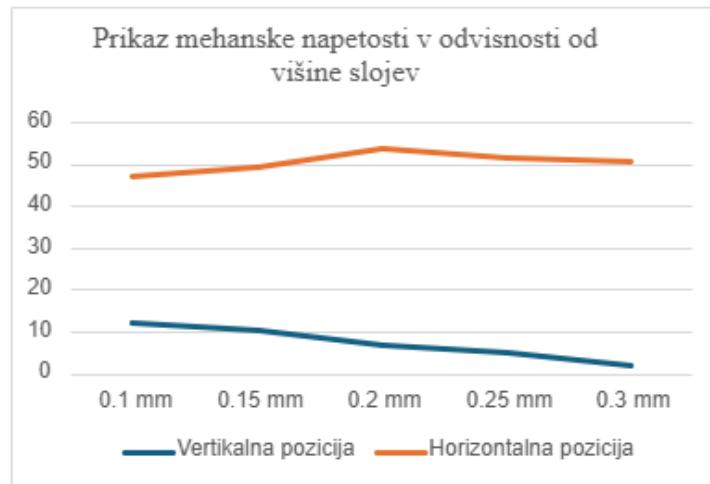
- **Sila F [N]:**
Izražena je s produktom prikazane sile [N] na silomeru (vrednosti se razlikujejo med posameznimi testiranimi modeli)
- **Površina A [kvadratni mm]:**
Kot je že bilo omenjeno v besedilu, bo površina zloma predvidoma 10 kvadratnih milimetrov.

Z izračunanimi vrednostmi dopolnimo prvotno enačbo in dobimo vrednost mehanske napetosti [MPa].

Najprej sem izvedel eksperiment z izdelki, ki so se tiskali vertikalno (stoječe), nato pa še z izdelki, natisnjenimi v horizontalni (ležeči) poziciji. Podatke sem pretvoril v omenjeno enoto ter jih uredil v graf (gl. naslednja stran)

Višina slojev izdelkov	Mehanska napetost (vertikalna poz. tisk.)	Mehanska napetost (horizontalna poz. tisk.)
0.1 mm	12,43908	47,063475
0.15 mm	10,45746	49,4424
0.2 mm	7,11225	54,2453
0.25 mm	5,08158	51,5025
0.3 mm	2,13615	50,742225

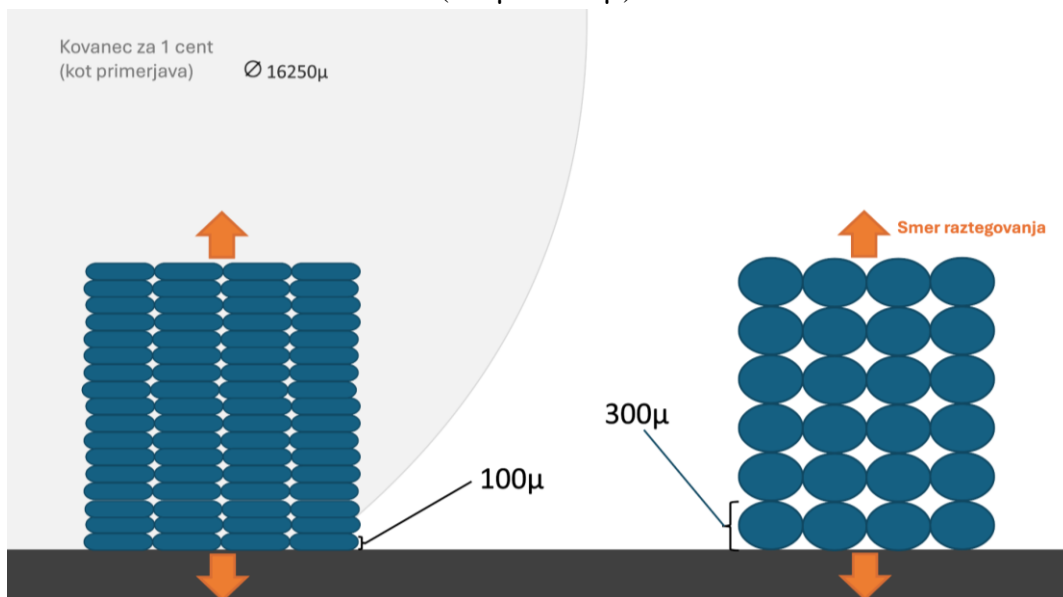
Razpredelnica 1: Prikaz mehanske napetosti [MPa] izdelkov glede na višino slojev



Graf 1: Prikaz mehanske napetosti [MPa] izdelkov glede na višino slojev

Iz grafa lahko razberemo, da je mehanska napetost izdelkov v obratnem sorazmerju z višino slojev - večji ko so sloji, bolj je izdelek krhek (to velja le za izdelke, natisnjene v *vertikalni poziciji*). Predvidevam, da imajo rezultati opravlja z stično površino med sloji (gl. shema spodaj).

Shema V: Prerez dveh vertikalno natisnjenih modelov z različnima višinama slojev (100 μ in 300 μ).

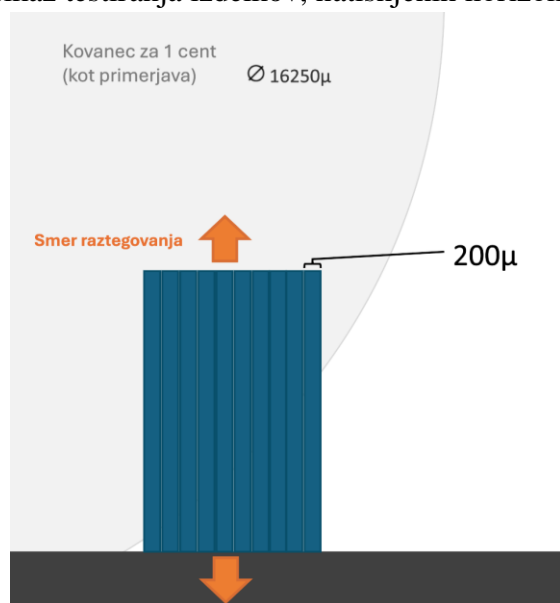


Ko tiskalnik tiska izdelke z nižjimi sloji, je šoba od prejšnjega natisnjene sloja manj oddaljena. Ko šoba odlaga material, ga še sproti potlači, da se razporedi na zaželeno širino (400-420 μ pri šobah z premerom 0.4 mm). Dodatna potlačitev omogoči, da se material razširi in s tem poveča stično površino s prejšnjim slojem. Ko pa tiskalnik tiska izdelek z višjimi sloji, je oddaljenost šobe večja. Nov material je iz šobe ekstrudiran in dobesedno le položen na prejšnji sloj. S tem ustvari veliko manjšo stično površino.

Stična površina med sloji igra pomembno vlogo pri meritvah mehanske napetosti *tiskanih* izdelkov. Če želimo, da ima *tiskan* izdelek večjo mehansko napetost, mu lahko povečamo določene parametre v slicerju - višino slojev, število sten, odstotek polnila itd. S tem povečamo stično površino med sloji.

Pri izdelkih, natisnjenih horizontalno, poizkušamo z raztegom zlomiti natisnjene linije po dolžini (to si lahko predstavljate v obliki špagetov - sedaj jih želimo razpoloviti z raztezanjem po dolžini). V tem primeru moč spojev med sloji ne igra vloge, saj sedaj testiramo le napetost linij.

Shema VI: Prikaz testiranja izdelkov, natisnjenih horizontalno (ležeče).



Na grafu z rezultati raziskav je razvidno, da je mehanska napetost omejenih izdelkov veliko večja od tistih, ki so bili natisnjeni vertikalno. Predvidevam, da so izdelki, natisnjeni horizontalno, šibkejši zaradi spojev med sloji, ki so mnogo šibkejši od samih natisnjenih linij.

Tiskanje z nižjimi sloji nam omogoča izdelavo izdelkov z bolj finimi detajli, vendar je precej zamudno (saj potrebuje tiskalnik ponoviti več slojev). Tiskanje z večjimi sloji nam omogoči hitrejši postopek izdelave, vendar se moramo odreči detajlom. Zaradi višjih slojev so izdelki lahko tudi bolj krhki.

Tiskanje izdelkov v ležečem položaju je po navadi tudi hitreje, saj omogoča, da glava doseže hitrejšo premikanje.

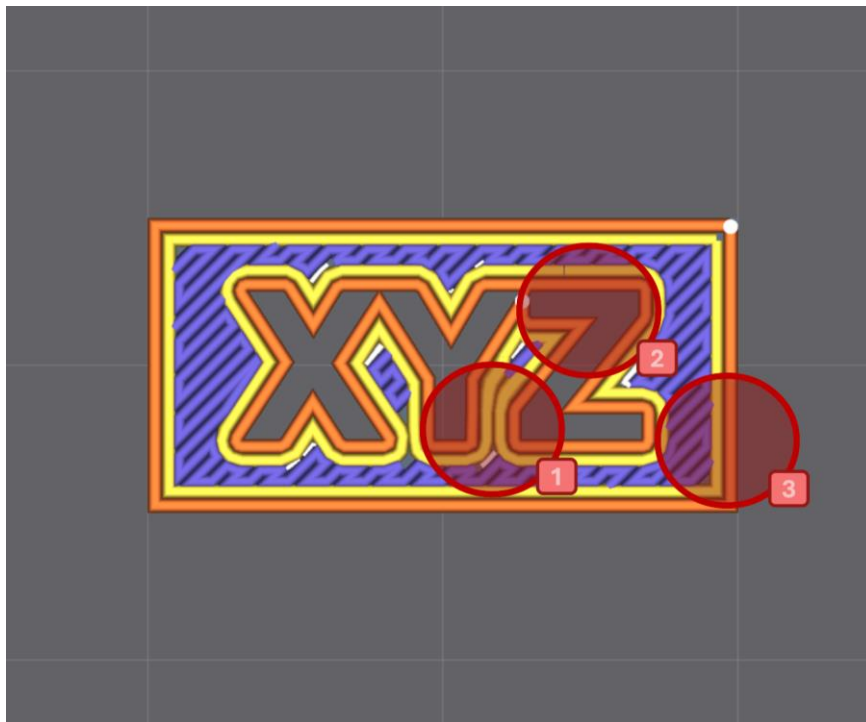
4.2. Prvi sloj

To je sloj, na katerem temelji celoten izdelek. Pravilno natisnjen sloj je izrednega pomena, saj to vpliva na uspešnost tiskanega modela. Prvi sloj mora imeti predvsem uspešno adhezijo/oprijem s podlago in tudi oddaljenost šobe od površine.

Primerno adhezijo materiala na tiskalno površino lahko zagotovimo z rednim čiščenjem podlage, da odstranimo prah in druge tujke. Če podlaga kljub čistoči še kar ni primerna za uspešno adhezijo, lahko uporabimo razne trike za oprijem izdelka na podlago - nanašanje trdnih lepil iz tube (bolj znano kot 'UHU lepila'), spreja za lase, kaptonskega lepilnega traku (ki zaradi zgradbe iz poliamida nudi dobro kemično adhezijo z nekaterimi plastikami) itd.

Ključnega pomena je tudi oddaljenost šobe od površine. Novejši tiskalniki lahko to kalibracijo izvedejo avtonomno. To je bilo treba izvesti ročno pri starejših tiskalnikih, kot na primer pri popularnem tiskalniku Ender 3, znamke Creality. Če šoba/postelja ni kalibrirana na optimalno oddaljenost, nastanejo anomalije, ki škodijo izdelku in tiskalniku.

Za praktičen prikaz, kako tovrstne anomalije izgledajo, sem natisnil tri ploščice (v dimenzijah 20mm x 200µm x 10mm), z v sredini izrezanim napisom 'XYZ'. Vse ploščice so bile natisnjene na standardni 0.4 mm šobi. Ploščice sem nato analiziral pod mikroskopom s 40-kratno povečavo.



Slika 19: Predogled poti tiskanja testnega modela za kalibracijo. Z rdečo so označena območja, ki so bila fotografirana pod mikroskopom. Na sivem ozadju predstavlja en kvadrataček 10 mm.

Z raziskavo območja 1 sem želel ugotoviti, kako se vzporedni sloji tvorijo med seboj, z raziskavo območja št. 2 sem želel ugotoviti točnost tiskanih detajlov, z raziskavo 3. območja pa sem ugotavljal dimenzijsko pravilnost prvega sloja.

Upoštevati moramo tudi dejstvo, da je idealna širina položenega materiala pri začetnem sloju okoli 400-420 μm , če ga izstisnemo iz 0.4mm/400 μm široke šobe, saj je material nato še rahlo potlačen, da se lažje sprime s površino za tiskanje.

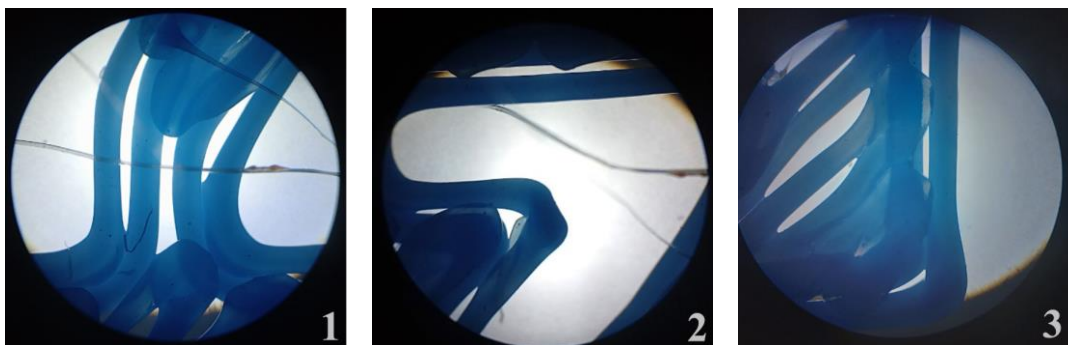


Slika 20: Posnetek zaslona s predogledom tiskanja testnega modela glede na širino slojev. Vključena je tudi legenda (gl. levi del posnetka zaslona). V večini je sloj širok okoli 420 μm .



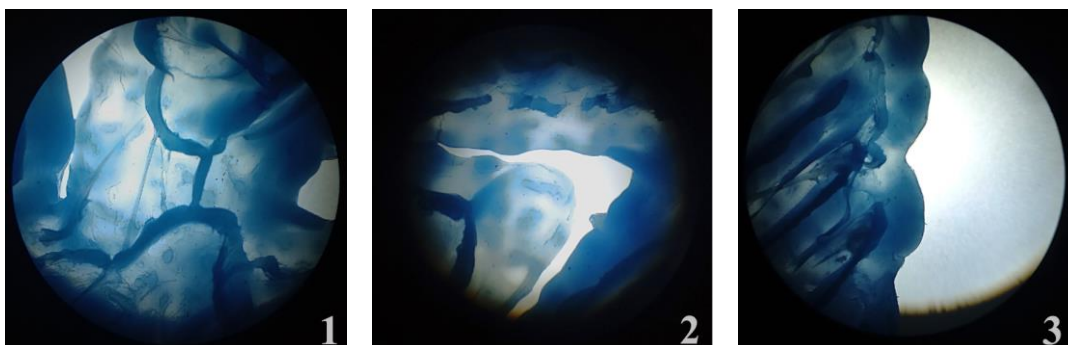
Slika 21, 22 in 23: Pogled testnega modela z optimalno oddaljenostjo šobe od površine za tiskanje pod mikroskopom s 40-kratno povečavo.

Na zgornjih slikah lahko opazimo, da je bil tiskalnik primerno kalibriran in da je bila šoba odmaknjena od površine za idealno razdaljo (200 μm ($\pm 5 \mu\text{m}$), kar je enako zastavljeni višini sloja). V tem primeru bi izdelek imel idealno adhezijo s površino za tiskanje. Na izdelku lahko opazimo tudi, da ni nobenih anomalij in da je sloj popolnoma zapolnjen z materialom. Spodnji del izdelka bo torej dimenzijsko in lepотно brezhiben.



Slika 24, 25 in 26: Pogled na testni model s preveliko oddaljenostjo šobe od površine za tiskanje pod mikroskopom s 40-kratno povečavo.

Na zgornjih slikah je razvidno, da je bila šoba od površine preveč oddaljena (oddaljenost od površine $250 \mu\text{m}$ ($\pm 15 \mu\text{m}$)). Zaradi oddaljenosti šobe material ni potlačen dodatnih nekaj mikrometrov in je odložen s širino manj kot zaželenih $420 \mu\text{m}$. Zaradi tega, ker material ni bil potlačen, primerna adhezija s podlago ni zagotovljena in se izdelek po vsej verjetnosti ne bo oprijel površine. Zaželeni izdelek se bo zelo verjetno ločil od površine že v prvih nekaj slojih.



Slika 27, 28 in 29: Pogled testnega modela s Premajhno oddaljenostjo šobe od površine za tiskanje pod mikroskopom s 40-kratno povečavo.

Iz zgornjih posnetkov testnega materiala je razvidno, da je bila šoba premalo oddaljena od površine za tiskanje (oddaljenost šobe od površine $120 \mu\text{m}$ ($\pm 20 \mu\text{m}$)). To pomeni, da bodo podrobnosti - kakršen je napis 'XYZ' - zaradi prevelike potlačitve netočne in deformirane. Tovrstni prvi sloji po navadi ustvarijo anomalijo t.i. 'Slonasti podplat' (ang. Elephant's foot), ko je nekaj prvih slojev širših kot običajno (prikazano na sliki skrajno desno). 'Slonast podplat' povzroča sprijemanje več predmetov ali predelov predmeta skupaj, če je njihova medsebojna razdalja premajhna.

ZAKLJUČEK

V raziskovalnem delu sem pisal in raziskoval o tematikah, ki pridejo prav ob uporabi tiskalnikov. Poizkušal sem odgovoriti na vprašanja, ki si jih zastavljamo kot uporabniki.

V praktičnem delu sem poizkušal predstaviti tri najpopularnejše vrste tiskalnikov – FDM, SLA in SLM tiskalniki. V teoretičnem in praktičnem delu sem se najbolj posvetil FDM tiskalnikom, ker so najbolj prepoznavni, najcenejši in najbolj preprosti za uporabo. Moj prvi tiskalnik deluje na principu FDM tiska.

Poleg FDM tiska sem tudi predstavil tiskanje s smolo in kovino. Čeprav izdelki SLA tiskalnikov zahtevajo še dodatno obdelavo s pranjem in strjevanjem, še vedno prikazujejo, česa je 3D tisk zmožen. Tiskajo lahko izredno natančno in z veliko detajli. Tiskajo lahko tudi prozorne izdelke in s posebnimi materiali, na primer keramiko.

SLS tiskanje se uporablja izven področja hobija in je usmerjeno bolj v industrijsko izdelavo prototipov, saj ima velik pomen v vesoljski, avtomobilski, letalski in v vojaški industriji. Inženirji tiskajo konkretne ter zahtevne izdelke z zahtevno geometrijo in iz različnih kovin – titana, aluminija, vrst zlitin itd.

V praktičnem delu sem predstavil testiranje mehanske vrednosti izdelkov in pomen prvega sloja.

Testiral sem mehansko napetost, da bi lahko odgovoril na aktualna vprašanja in dileme uporabnikov (npr. 'Kakšno število sten bi uporabil?' ali 'V kateri orientaciji bi natisnil izdelek?'). Odgovor sem našel v mehanski napetosti obeh orientacij – izdelki so za 660% močnejši v smeri slojev (to velja pri 0.2 mm visokih slojih).

Pri ogledu treh različnih prvih slojev pod mikroskopom sem ugotovil, da je lep in kalibriran prvi sloj prvi korak za uspešno izdelavo izdelka. Ugotovil sem tudi, da posamezni detajli na dnu ne bodo prepoznavni, če šoba ne bo oddaljena na optimalno razdaljo.

V nalogi sem se veliko naučil o tematikah in detajlih posameznih vrst tiskalnikov. Pisanje mi je pomagalo širiti obzorja znanja ter rešiti aktualne težave s tiskalnikom. Iskreno sem užival tudi v tematiki, saj se na to področje dobro spoznam in 3D tiskam praktično non-stop, odkar sem v roke dobil svoj prvi tiskalnik.

RAZPRAVA

Razpravo bom posvetil analizi hipotez. Za začetek jih bom ponovno omenil in jih posamezno obarval glede na to, ali so potrjene ali zavrjene. Nato bom svojo odločitev še utemeljiv.

1. Vertikalno natisnjeni izdelki z višjimi sloji so močnejši od ostalih
2. Spoji med sloji so najšibkejši del natisnjenega modela
3. Izdelki z večjim številom sten so bolj odporni na lome pri raztegovanju
4. Prvi sloj je ključnega pomena za uspeh tiskanega modela

Legenda:

Hipoteza je potrjena

Hipoteza ni potrjena

-
1. Hipoteza: Vertikalno natisnjeni izdelki z višjimi sloji so močnejši od ostalih

Pri izdelkih, natisnjenih vertikalno oziroma stoječe, imajo spoji med sloji ključen pomen. Če so spoji šibki, bo celoten izdelek krhek. Iz grafa rezultatov prvega eksperimenta (gl. 4.1. Testiranje mehanske napetosti izdelkov) lahko iz podatkov vertikalno natisnjenih izdelkov ugotovimo, da je končna mehanska napetost izdelka v obratnem sorazmerju z višino slojev. Rezultati so bili taki, ker imajo manjši sloji večjo stično površino, kot jo imajo višji sloji.

To hipotezo zavračam.

2. Hipoteza: Spoji med sloji so najšibkejši del natisnjenega modela

Kot sem že omenil pri analizi prejšnje hipoteze, so spoji med sloji zelo pomembni pri mehanski napetosti *vertikalno natisnjenih* izdelkov. Pomembno je imeti v mislih, da so izdelki najšibkejši v smeri z sloji. Spoji so tudi ključnega pomena, da se bo nov sloj primerno spajal z spodnjim in tako omogočal izgradnjo tiskanega modela.

To hipotezo potrjujem.

3. Hipoteza: Izdelki z večjim številom sten so bolj odporni na lome pri raztegovanju

Če tiskamo izdelek, ki ni popolnoma soliden in vsebuje le delež polnila, ima število sten vpliv na mehansko napetost izdelka. Število sten vpliva na mehansko napetost izdelka, saj z večjim številom sten povečamo stično površino med sloji.

To hipotezo potrjujem.

4. Hipoteza: Prvi sloj je ključnega pomena za uspeh tiskanega modela

Prvi sloj mora biti natisnjen idealno, da bo izdelek uspešno natisnjen in dimenzijsko pravilen. Z pravilnim odklikom šobe od površine tudi poskrbimo, da ta ne poškoduje tiskalne površine. To hipotezo potrjujem.

VIRI

Veliko večino raziskovalne naloge sem pisal iz praktičnih izkušenj (še posebej entuziastično za FDM tiskanje), saj me tematika zanima in uporabljam tiskalnik že dobro leto dni. V poletju 2024 sem se tudi udeležil poletne šole na Fakulteti za strojništvo na delavnici 3D tiska.

Konec januarja 2025 sem tudi s posebno prošnjo obiskal Fakulteto za strojništvo v Ljubljani in njihovo delavnico 'Peskovnik', v katerem sem pridobil zelo veliko dodatnega in praktičnega znanja na področjih vseh omenjenih vrst 3D tiska.

Kljub svojemu znanju sem nekaj podatkov izbral tudi s spletnih virov:

- Natančnost različnih vrst 3D tiska:
<https://www.voxelmatters.com/quick-guide-dimensional-accuracy-3d-printing/>
(Dostop: 13. 11. 2024, 16:30)
- PEI površina za tiskanje:
<https://p3d.mx/blogs/how-to-3d-print/what-is-pei-peo-pey-pex-pet-build-plates>
(Dostop: 20. 11. 2024, 16:58)
- Amorfnе in delnokristalne termoplastike:
<https://sl.wikipedia.org/wiki/Termoplast>
(Dostop: 31. 12. 2024, 20:54)
<https://www.simtec-silicone.com/blogs/what-are-amorphous-thermoplastics/>
(Dostop: 31. 12. 2024, 22:21)
<https://www.youtube.com/watch?v=b-kddJ2wPjA&t=168s>

Vse izdelke za prikaz in raziskave sem natisnil iz PLA materialov proizvajalca 3D Trček. Več o materialu lahko najdete na sledeči povezavi:

- <https://3dtrcek.com/sl/pla-filament>
(nabavljeno dne 8.10.2024)
- <https://3dtrcek.com/sl/high-speed-pla-matte-filament>
(nabavljeno dne 8.10.2024)

VIRI SLIK, SHEM IN POSNETKOV ZASLONA

V tej raziskovalni nalogi so imele slike velik pomen, saj se mi zdi, da sem z njimi najboljše usmeril vašo predstavo v pravo smer. Kljub temu, da so slike bile zajeten del raziskovalne naloge, sem jih skrbno obdelal in če se je dalo tudi sam fotografiral. Enako velja za posnetke zaslona. Sheme sem priredil po originalih, da bi bile prevedene ter grafično primernejša za to raziskovalno delo.

Viri slik:

- Slika od 1 do 9: Zasebni arhiv
- Slika 10: <https://store.creality.com/eu/products/cr-10-se-3d-printer> (11. 12. 2024, 16:30)
- Slika 11: <https://store.creality.com/products/k1-3d-printer> (11. 12. 2024, 16:43)
- Slika 12: <https://www.sovol3d.com/products/sovol-sv08-3d-printer> (11. 12. 2024, 16:49)
- Slika 13: <https://flsunnorthamerica.com/collections/3d-printers/products/flsun-v400-pre-sale> (11. 12. 2024, 16:55)
- Slika 14: <https://www.uidearp.com/news/What-is-SLA-3D-Printing-What-are-its-Applications-and-Benefits.html>
- Slika 15: Zasebni arhiv iz obiska FS
- Slika 16 (posnetek zaslona): Zasebni arhiv, posneto v aplikaciji Fusion 360
- Slika od 17 do 20 (posnetki zaslona): Zasebni arhiv, posneto v aplikaciji Creality Print
- Slika 21 do 29: Pogled pod mikroskopom, zasebni arhiv

Viri prirejenih shem:

- Shema I: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography>
- Shema II in III: <https://www.core77.com/posts/74401/design-rules-for-3d-printing>