



ICES
VIŠJA STROKOVNA ŠOLA

Diplomsko delo višješolskega strokovnega študija

Program: Strojništvo

Modul: Orodjarstvo

**IZDELAVA ORODJA S POSTOPKOM
ADITIVNIH TEHNOLOGIJ, S Poudarkom
NA KONSTRUKCIJI KOMPLEKSNIH
HLADILNIH KANALOV**

Mentor: mag. Slavko Božič, univ. dipl. inž. stroj.

Somentor: Samo Trček, mag. inž. str.

Lektorica: mag. Petra Vnuk, prof. slov.

Kandidat: Bernard Novak

Ljubljana, junij 2023

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju mag. Slavku Božiču in somentorju mag. Samu Trčku, ki sta me vodila in svetovala skozi pisanje diplomskega dela

Zahvaljujem se tudi lektorici mag. Petri Vnuk, ki je mojo diplomsko nalogo jezikovno in slovnično pregledala.

Posebna zahvala je namenjena moji bodoči ženi Antoniji, ki me je spodbujala in podpirala pri študiju in pisanju diplomskega dela.

IZJAVA

Študent Bernard Novak izjavljam, da sem avtor tega diplomskega dela, ki sem ga napisal pod mentorstvom mag. Slavka Božiča in somentorstvom Sama Trčka, mag. inž. str..

Skladno s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorski in sorodnih pravicah dovoljujem objavo tega diplomskega dela na spletni strani šole.

Dne: _____

Podpis: _____

POVZETEK

Diplomska naloga obravnava temo izdelave orodij z uporabo aditivnih tehnologij, pri čemer je osrednji poudarek na konstrukciji kompleksnih hladilnih kanalov. Aditivne tehnologije, kot so 3D tiskanje, stereolitografija in selektivno lasersko sintranje, omogočajo izdelavo predmetov s kompleksnimi geometrijskimi strukturami, kar prinaša veliko prednosti pri izdelavi orodij.

V diplomski nalogi se preučujejo različni postopki in materiali, ki se uporabljajo pri izdelavi orodij z aditivnimi tehnologijami. Poseben poudarek je namenjen konstrukciji kompleksnih hladilnih kanalov, ki igrajo ključno vlogo pri učinkovitem hlajenju med obdelavo materialov. Raziskava vključuje pregled obstoječih metod in pristopov za konstrukcijo hladilnih kanalov ter analizo njihove učinkovitosti in kakovosti.

Z uporabo ustrezne literature, analize rezultatov praktičnih študij primerov in izvedbe eksperimentov bomo pridobili vpogled v najnovejše tehnike, materiale in metode za izdelavo orodij z aditivnimi tehnologijami ter njihovo uporabo pri konstrukciji kompleksnih hladilnih kanalov. S pridobljenimi rezultati bomo prispevali k razvoju naprednih in inovativnih rešitev v industriji orodjarstva.

KLJUČNE BESEDE

- 3D tiskanje
- aditivne tehnologije
- kompleksni hladilni kanali
- izdelava orodij

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the topic of manufacturing tools using additive technologies, with the central focus being on the construction of complex cooling channels. Additive technologies such as 3D printing, stereolithography and selective laser sintering enable the production of objects with complex geometric structures, which brings many advantages in tool manufacturing.

The diploma thesis examines various procedures and materials used in the production of tools with additive technologies. Special emphasis is placed on the construction of complex cooling channels, which play a key role in effective cooling during material processing. The research includes an overview of existing methods and approaches for the construction of cooling channels and an analysis of their effectiveness.

By using relevant literature, analyzing the results of practical case studies and performing experiments, we will gain insight into the latest techniques, materials and methods for the production of tools with additive technologies and their use in the construction of complex cooling channels. With the obtained results, we will contribute to the development of advanced and innovative solutions in the toolmaking industry.

KEYWORDS

- 3D printing
- additive technologies
- complex cooling channels
- tool making

KAZALO

1	UVOD	1
1.1	Predstavitev problema.....	1
1.2	Cilji naloge	1
1.3	Predpostavke in omejitve	1
1.4	Metode dela	2
2	ADITIVNA PROIZVODNJA	2
2.1	Osnovna načela aditivne proizvodnje	4
2.2	Standardizacija delitve in poimenovanje aditivnih tehnologij.....	6
2.3	Natančnost in dimenzijske spremembe pri 3d tisku	10
2.4	Materiali pri aditivnih tehnologijah	13
2.4.1	Fotopolimerne smole.....	13
2.5	STL datoteka.....	14
2.6	SLS – selektivno lasersko sintranje.....	16
2.7	Polyjet tehnologija	18
2.8	SLA – stereolitografija	21
3	PRAKTIČNI PRIMER – IZDELAVA KONIČNEGA SVEDRA S HLADILNIM KANALOM.....	24
3.1	Izdelava cad modela svedra.....	24
3.2	izdelava cad modela hladilnih kanalov	30
3.4	priprava za tisk.....	34
3.5	izdelava končnega svedra.....	36
3.6	obdelava po tiskanju	37
4.	ZAKLJUČEK	38
5.	LITERATURA IN VIRI	40

KAZALO SLIK

Slika 1: Osnovne operacije proizvodnje.....	5
Slika 2: Postopek polimerizacije	7
Slika 3: Delitev aditivnih tehnologij	9
Slika 4: Prikaz krivljenja.....	12
Slika 5: Prikaz natančnosti modela v odvisnosti od števila trikotnikov.....	15
Slika 6: Model v rezalniku.....	16
Slika 7: Shematski prikaz SLS procesa	17
Slika 8: Prikaz Polyjet postopka.....	19
Slika 9: SLA tiskalnik.....	21
Slika 10: Prikaz dvobarvnega izdelka	23
Slika 11: Prikaz 2D geometrije svedra.....	25
Slika 12: Prikaz dimenzij načrta.....	26
Slika 13: Prikaz 3D modela	27
Slika 14: Uporaba funkcije Chamfer	28
Slika 15: Izgled modela po uporabi Sweep funkcije.....	29
Slika 16: Končna oblika svedra.....	30
Slika 17: Model hladilnega kanala	31
Slika 18: Modeli v Tinkercadu.....	32
Slika 19: Prikaz pozicioniranja in združevanja modelov	33
Slika 20: Prikaz modela pripravljenega za tisk.....	34
Slika 21: Parametri tiskanja	35
Slika 22: Pregled modela pred tiskom	36
Slika 23: SLA tiskalnik.....	37

KAZALO TABEL

Tabela 1: Prednosti in pomanjkljivosti SLS postopka.....	18
Tabela 2: Prednosti in pomanjkljivosti Polyjet postopka.....	20
Tabela 2: Prednosti in pomanjkljivosti SLA postopka.....	23

KRATICE IN AKRONIMI

3D: tridimenzionalno
RP: rapid prototyping
RT: rapid tooling
RM: rapid manufacturing
SLA: stereolitografija
SLS: selektivno lasersko sintranje
DED: neposredna uporaba energije
FDM: fused deposition modeling
MJF: multi jet fusion

1 UVOD

1.1 PREDSTAVITEV PROBLEMA

V sodobni industriji se aditivne tehnologije, znane tudi kot 3D tiskanje, vse bolj uveljavljajo kot inovativno orodje za izdelavo kompleksnih in funkcionalnih izdelkov. Med številnimi uporabami aditivnih tehnologij najbolj izstopa njihova vloga pri izdelavi orodij. Izdelava orodij je ključna faza pri proizvodnji številnih izdelkov, saj določa njihovo natančnost, kakovost in učinkovitost. Vendar pa tradicionalni postopki izdelave orodij, kot so oblikovanje in obdelava kovin, pogosto omejujejo oblikovalske možnosti. V tem kontekstu aditivne tehnologije ponujajo inovativen pristop, ki omogoča konstrukcijo in izdelavo orodij s kompleksnimi geometrijami ter vgrajenimi funkcionalnimi elementi, kot so hladilni kanali. Le-ti so ključni elementi pri orodjih, saj omogočajo učinkovito odvajanje toplote med procesom obdelave, kar vodi k boljši kakovosti izdelkov, daljši življenjski dobi orodij in povečani produktivnosti. Konstrukcija kompleksnih hladilnih kanalov pa je pogosto izziv, saj tradicionalne metode izdelave omejujejo oblikovalsko svobodo in otežujejo doseganje optimalnih oblik in dimenzij. 3D tisk je vedno bolj časovno in stroškovno potraten. Zaradi tega se 3D tisk ne uporablja v serijski proizvodnji.

1.2 CILJI NALOGE

Cilj te diplomske naloge je raziskati in preučiti možnosti izdelave orodij z uporabo aditivnih tehnologij s posebnim poudarkom na konstrukciji kompleksnih hladilnih kanalov. Praktični del diplomske naloge bo vključeval izdelavo konjičnega svedra z vgrajenimi hladilnimi kanali z uporabo postopka stereolitografije. Omejili se bomo na izdelavo orodij z aditivnimi tehnologijami s poudarkom na konstrukciji kompleksnih hladilnih kanalov.

1.3 PREDPOSTAVKE IN OMEJITVE

Predpostavljamo, da aditivne tehnologije omogočajo izdelavo orodij z večjo kompleksnostjo in natančnostjo hladilnih kanalov v primerjavi s tradicionalnimi metodami izdelave. Dodatno tudi predvidevamo, da učinkovito hlajenje orodja s kompleksnimi hladilnimi kanali pozitivno vpliva na kakovost izdelkov, produktivnost in življenjsko dobo orodij ter da so aditivne tehnologije že uveljavljene v industriji orodjarstva ter se redno uporabljajo pri izdelavi orodij z dodatnimi funkcionalnostmi. Zaradi omejenega časa in finančnih sredstev ne bomo izdelali fizičnega orodja, ampak se bomo osredotočili na načrtovanje in izdelavo prototipa orodja. Glavna omejitev bo izbira materiala. Tiskanje s kovinskim prahom je bolj kompleksno in cenovno dražje. Kot primerno nadomestilo bomo uporabili smolo, ki je cenovno

dostopna in so na voljo enostavnejši in manjši tiskalniki. Posledično lahko sklepamo na slabšo funkcionalnost končnega izdelka, saj bo le-ta izdelan za namen prikaza prototipa kompleksnih hladilnih kanalov.

1.4 METODE DELA

Opravili bomo obsežen pregled literature o aditivnih tehnologijah, njihovi uporabi v orodjarstvu ter konstrukciji kompleksnih hladilnih kanalov. Na podlagi pridobljenega znanja iz literature bomo načrtovali prototip orodja z vgrajenimi kompleksnimi hladilnimi kanali. Za izdelavo prototipa orodja bomo uporabili ustrezno aditivno tehnologijo, ki je primerna za izdelavo kompleksnih geometrij. Z analitično metodo bomo analizirali vplive različnih parametrov na izdelani model in z opisno metodo opisali opazne spremembe na modelu prototipa.

2 ADITIVNA PROIZVODNJA

Aditivna proizvodnja, znana kot »3D tiskanje«, je pridobila velik pomen v industriji od svojega opredelitve leta 2009 s strani mednarodnega odbora ASTM International committee f42.

V literaturi se pogosto srečujemo s termini aditivni procesi, aditivni postopki, plastna proizvodnja in z drugimi. Aditivna proizvodnja predstavlja odgovor na nenehno dinamiko sodobne industrije in je interdisciplinarne narave.

Le s pomočjo aditivnih proizvodnih procesov je mogoče doseči takšen napredek, ki omogoča in spodbuja inovativnost, kreativnost ter preseganje omejitev pri razvoju in proizvodnji novih izdelkov. Zato je izobraževanje bodočih strokovnjakov na tem področju ključnega pomena, saj bo le tako zagotovljeno ustvarjanje inovacij, ki bodo oblikovale prihodnost industrije (Godec, 2015).

Razvoj trdnih predmetov s fotopolimerno in lasersko tehnologijo sega v zgodnja šestdeseta leta prejšnjega stoletja, ko je inštitut »Battelle Memorial« izvedel prvi poskus na tem področju. Ta pionirski poskus je vključeval strjevanje smole s pomočjo dveh laserskih žarkov različnih valovnih dolžin na sredini posode s fotosenzibilno smolo. Pri poizkusu so želeli polimerizirati material v točki, kjer sta se žarka križala. Pomembno je poudariti, da so bili ti poskusi še vedno v razvojni fazi in niso privedli do širokega komercialnega uspeha v tistem času.

Fotopolimerna smola, ki je bila uporabljena v tem procesu, je bila izum podjetja DuPont in sega v petdeseta leta prejšnjega stoletja. Ta inovativna snov je omogočila postopno strjevanje in trditev materiala pod vplivom svetlobe.

Od takrat dalje so se aditivne tehnologije zelo razvile in postale pomembno orodje v industriji za izdelavo kompleksnih in natančnih predmetov. Fotopolimerne in laserske tehnologije so se izkazale za izjemno uporabne pri ustvarjanju trdnih predmetov s plastenjem materiala z omogočanjem natančnega nadzorovanja oblikovanja in visoke stopnje podrobnosti.

V nadaljnjem razvoju in raziskavah na področju aditivnih tehnologij se je osredotočanje na fotopolimerne materiale in lasersko tehnologijo poglobilo, kar je privedlo do naprednejših postopkov in boljših rezultatov. Danes aditivne tehnologije omogočajo izdelavo različnih izdelkov in komponent na podlagi digitalnih modelov, kar prispeva k inovacijam in izboljšanju proizvodnih procesov v številnih industrijah (Wohlers & Garnett, 2014).

Leta 1967 je Wyn K. Swainson prijavil patent z naslovom »Metoda izdelave 3D figure s holografijo«, v katerem je predstavil inovativen pristop uporabe dvojnega laserskega postopka za izdelavo tridimenzionalnih figur. Ta tehnologija je bila razvita v petdesetih letih prejšnjega stoletja in predstavljala pomemben korak naprej v svetu holografije. Konec sedemdesetih let 20. stoletja je podjetje Dynell Electronics Corp. pridobilo več patentov za polprevodniško fotografijo, ki je vključevala napredne tehnike izrezovanja prerezov z računalniškim vodenjem. Ti pristopi so uporabljali rezkalnike ali laserje ter shranjevali podatke v register, kar je omogočalo ustvarjanje zapletenih tridimenzionalnih predmetov.

Ta izum je predstavljal pomemben mejnik v razvoju aditivnih tehnologij, saj je omogočil izdelavo tridimenzionalnih predmetov z visoko natančnostjo in s kompleksnimi detajli. Ta tehnološki napredek je odprl številne možnosti v industriji, vključno z izdelavo orodij z aditivnimi tehnologijami in s konstrukcijo kompleksnih hladilnih kanalov (Wholers, 2005).

2.1 OSNOVNA NAČELA ADITIVNE PROIZVODNJE

Danes na trgu vedno bolj zahtevajo razvojne in proizvodne procese, ki izpolnjujejo stroge zahteve. Poleg izboljšanja kakovosti izdelkov in prilagodljivosti v razvoju in proizvodnji se zahteva tudi zmanjšanje stroškov ter predvsem skrajšanje časov razvoja in proizvodnje. V določenih segmentih trga se pojavlja nov trend, ki opušča masovno proizvodnjo v prid majhnim serijam in pogosto tudi individualni proizvodnji, ki je prilagojena posameznikovim potrebam.

Za izpolnitev teh tržnih zahtev so bili razviti sodobni postopki aditivne proizvodnje, ki se uporabljajo že od sredine 80. let. Glavna značilnost teh postopkov je, da se material dodaja, običajno plast za plastjo, dokler ni izdelek popolnoma izdelan. To omogoča ustvarjanje kompleksnih geometrij izdelkov, ki jih je z drugimi tradicionalnimi proizvodnimi postopki težko ali celo nemogoče doseči. Poleg tega se pri aditivnih postopkih izdelki izdelujejo neposredno iz 3D računalniškega modela, brez potrebe po dodatnih orodjih ali pripomočkih.

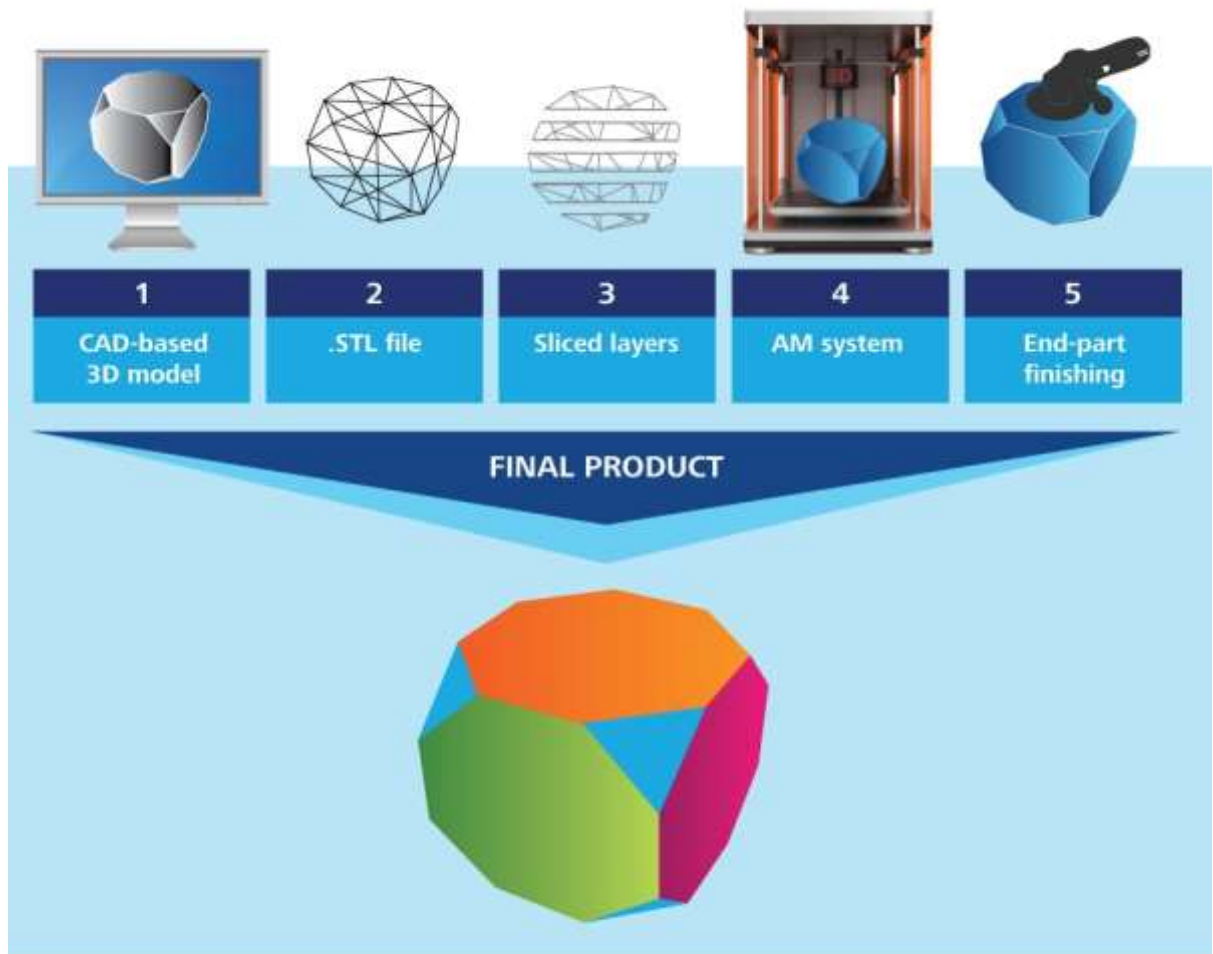
Zgodovinsko gledano so aditivni postopki doživeli več stopenj razvoja in uporabe, kar je privedlo do spremembe tudi v terminologiji. Sprva so bili ti postopki predvsem namenjeni hitremu prototipiranju (RP). Čeprav čas izdelave izdelka ni vedno zares hiter, saj je odvisen od velikosti izdelka in debeline plasti, a v primerjavi s konvencionalnim prototipiranjem ali proizvodnjo zagotovo predstavlja časovno prednost.

Naslednji korak v razvoju aditivnih postopkov je bila hitra proizvodnja celotnih orodij in modelov ali ključnih elementov (Rapid Tooling – RT). Gre za uporabo aditivnih postopkov za izdelavo polimernih, keramičnih ali kovinskih orodij in modelov, ki omogočajo zmanjšanje časa izdelave najbolj zahtevnih delov orodij in modelov. Pri brizganju polimerov RT postopki omogočajo tudi izdelavo optimiziranih kanalov za temperiranje, ki sledijo obliki votline kalupa (konformno hlajenje), kar lahko pripomore k zmanjšanju časa brizganja in izboljšanju kakovosti izdelkov.

Nadaljnji razvoj materialov, ki se uporabljajo v aditivnih postopkih, je omogočil neposredno proizvodnjo majhnih serij ali posameznih končnih izdelkov (Rapid Manufacturing – RM). Ti postopki omogočajo proizvodnjo brez potrebe po dodatnih orodjih, zato so v primeru posamezne ali majhne serije proizvodnje pogosto edina smiselna rešitev.

Aditivne postopke lahko razdelimo glede na štiri glavne dejavnike: vrsto materiala, vir energije, postopek tvorbe plasti in obliko končnega izdelka. Ti dejavniki vplivajo na kakovost površinske obdelave, dimenzionalno natančnost, mehanske lastnosti ter čas in stroške celotne proizvodnje (Godec, 2015).

Figure 2. Additive manufacturing (AM) process flow



Graphic: Deloitte University Press | DUPress.com

Slika 1: Osnovne operacije proizvodnje
(Vir: Deloitte University Press, 2023)

Zaporedje osnovnih operacij aditivnih tehnologij je večinoma enako, ne glede na to, kateri postopek uporabljamo. Osnovne proizvodne operacije so prikazane na Slika 1. in vključujejo:

1. CAD model,
2. prenos v .STL datoteko,
3. rezanje 3D modela v plasti,
4. izdelavo izdelka s pomočjo AM sistema (additive manufacturing system),
5. naknadno obdelavo.

Pri visoko natančnih postopkih, kot je stereolitografija (SLA) ali digitalna svetlobna polimerizacija (DLP), se pogosto uporabljajo tanjši sloji z debelino med 25 in 100 mikrometrov. Ta tehnologija omogoča izdelavo podrobnih in gladkih površin.

Pri tehnologijah, kot je selektivno lasersko sintranje (SLS) ali selektivno lasersko taljenje (SLM), se uporabljajo nekoliko debelejši sloji, običajno med 50 in 200 mikrometri. Ti postopki pogosto uporabljajo praškaste materiale, ki se plast za plastjo sintrijo ali talijo s pomočjo laserskega žarka (Godec, 2015).

2.2 STANDARDIZACIJA DELITVE IN POIMENOVANJE ADITIVNIH TEHNOLOGIJ

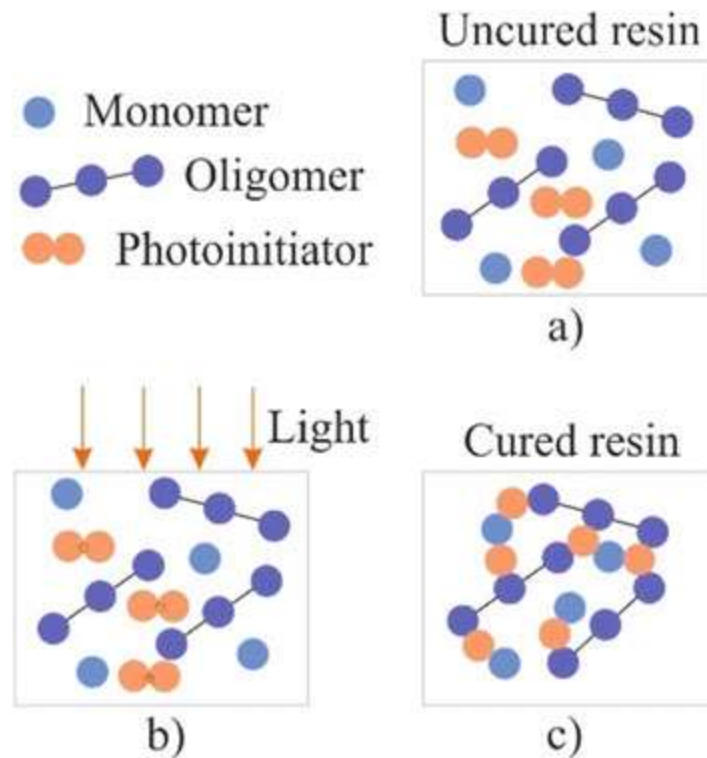
Aditivne tehnologije so torej vse tehnologije, ki uporabljajo princip dodajanja materiala po plasteh. Terminologija, ki se uporablja za aditivne tehnologije, je definirana s standardom ISO/ASTM 52900:2015(E): Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology (naslednik standardov ASTM F2792-10 in ASTM F2792-12a). Slovenski naslov standarda je Aditivna proizvodnja – Splošna načela – Terminologija (ISO/ASTM 52900:2015), oznaka pa SIST EN ISO 52900:2017 (Gibson, 2010).

V standardu so aditivne tehnologije razdeljene na 7 podsklopov: fotopolimerizacija v kadi, ekstrudiranje materiala, brizganje materiala, brizganje veziva, spajanje prahov, lasersko navarjanje in laminiranje pol.

Fotopolimerizacija v kadi (ang. Vat Photopolymerisation) je aditivni postopek, kjer se fotopolimer v kadi selektivno utrdi s pomočjo svetlobno spodbujene polimerizacije in se deli na tri postopke:

- Stereolitografija (SLA, ang. Stereolithography), kjer se fotopolimer utrjuje z laserskim žarkom. Postopek je primeren za obdelavo polimerov.
- Digitalno svetlobno procesiranje (DLP, ang. Digital Light Processing), kjer se fotopolimer utrjuje s pomočjo svetlobnega projektorja. Postopek je primeren za obdelavo polimerov.
- Kontinuirano digitalno svetlobno procesiranje (CDLP, ang. Continuous Digital Light Processing), kjer se fotopolimer utrjuje s pomočjo LED svetlobnega.

Polimerizacija je kemijska reakcija, pri kateri se manjše molekule, imenovane monomeri, povezujejo v dolge verige ali mreže, imenovane polimeri. Ta proces se zgodi s tvorbo kovalentnih kemijskih vezi med monomeri kot na Slika 2.



Slika 2: Postopek polimerizacije
(Vir: Godec, 2015)

Ekstrudiranje materiala (ang. *Material Extrusion*) je postopek dodajanja materiala, kjer se le-ta ekstrudira in ciljno nanaša skozi ogrevano šobo. Vključuje samo en postopek:

- Ciljno nalaganje materiala (FDM, ang. *Fused Deposition Modeling*). Postopek je primeren za obdelavo polimerov in kompozitov.

Brizganje materiala (ang. *Material Jetting*) je dodajalni postopek, kjer se selektivno nalaga kapljice osnovnega materiala. Deli se na štiri postopke:

- Brizganje materiala (MJ, ang. *Material Jetting*), kjer se material utrjuje z UV svetlobo. Postopek je primeren za obdelavo voskov.
- Brizganje fotopolimera po plasteh (PJ, ang. *PolyJetting*), kjer se material utrjuje z UV svetlobo. Postopek je primeren za obdelavo fotopolimerov.
- Brizganje nanodelcev (NPJ, ang. *NanoParticle Jetting*), kjer se material utrjuje s povišanjem temperature. Postopek je primeren za obdelavo kovin.
- Kapljično nanašanje materiala (DOD, ang. *Drop On Demand* ali WDM, ang. *Wax Deposition Modelling*), kjer se termoplastični vosek po kapljičnem nanašanju ohladi in strdi. Postopek je primeren za obdelavo termoplastičnih voskov.

Brizganje veziva (ang. *Binder Jetting*) je proces, kjer selektivno nanešeno tekoče vezivo spoji material v obliki prahu in vključuje samo en postopek:

- Brizganje veziva (BJ, ang. *Binder Jetting*), kjer se na sloj osnovnega materiala nanaša (brizga) vezivo, ki potem poveže delce v končno obliko sloja. Postopek je primeren za obdelavo kovinskih materialov, prahov in drobnozrnatih materialov (gips, pesek).

Spajanje prahov (ang. *Powder Bed Fusion*) je proces, kjer s pomočjo termične energije selektivno talimo območja prašnega sloja. Proces je razdeljen na štiri postopke:

- Multi Jet Fusion (MJF, ang. *Multi Jet Fusion*), kjer se material utruje s pomočjo agenta za spajanje in povišano temperaturo. Postopek je bil razvit v podjetju HP in je primeren za obdelavo polimerov.
- Selektivno lasersko sintranje (SLS, ang. *Selective Laser Sintering*), kjer se material sintra s pomočjo laserskega žarka. Postopek je primeren za obdelavo polimerov.
- Selektivno lasersko pretaljevanje (DMLS, ang. *Direct Metal Laser Sintering* ali SLM, ang. *Selective Laser Melting*), kjer se material pretaljuje s pomočjo laserskega žarka, podobno kot pri SLS. Postopek je primeren za obdelavo kovin.
- Taljenje z elektronskim snopom (EBM, ang. *Electron Beam Melting*), kjer se material tali s pomočjo elektronskega snopa. Postopek je primeren za obdelavo kovin.

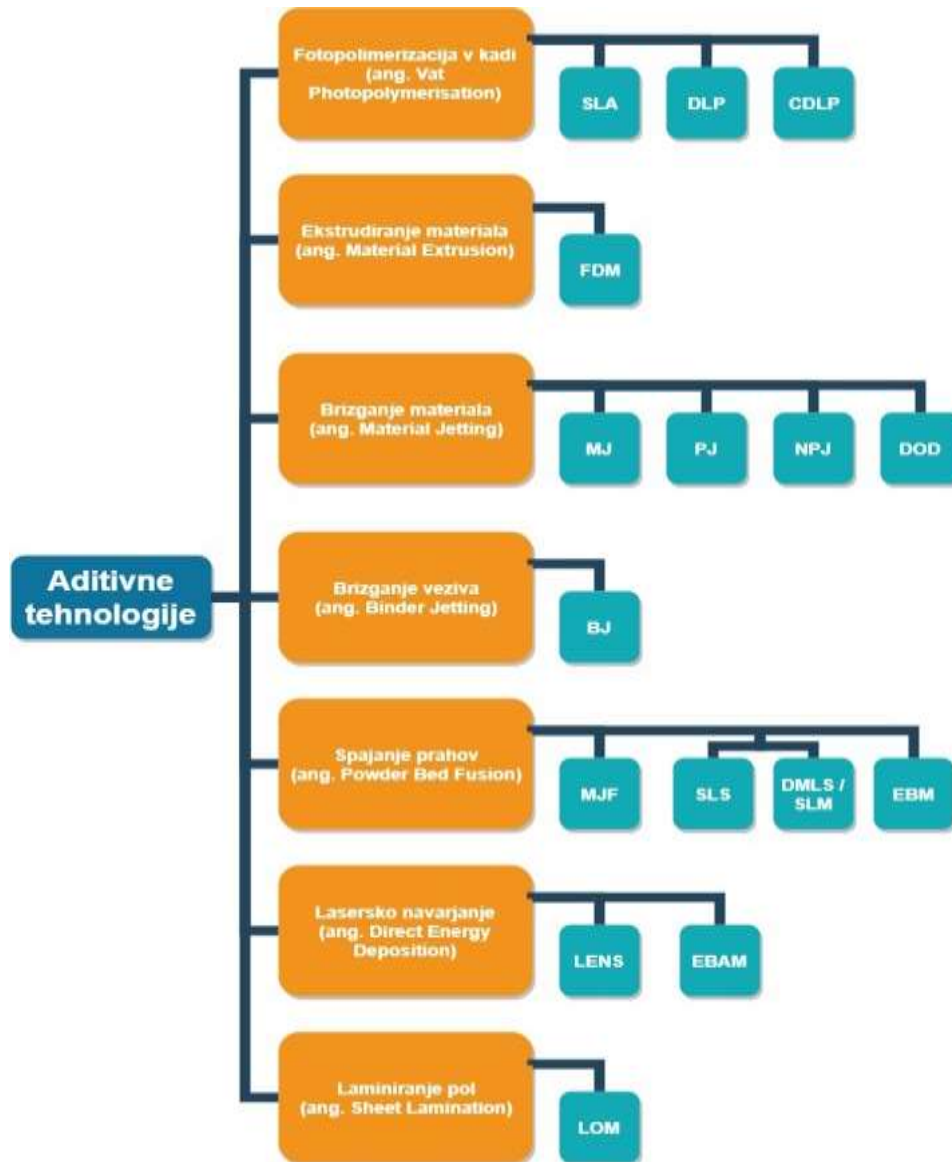
Lasersko navarjanje (ang. *Direct Energy Deposition*) je aditivni postopek, kjer se uporablja usmerjena energija za taljenje materialov med nanašanjem. Proces je razdeljen na dva postopka:

- Lasersko navarjanje (LENS, ang. *Laser Engineered Net Shaping*), kjer material nanaša z usmerjanjem energije. Postopek je primeren tako za izdelavo kot tudi za popravljanje kovinskih izdelkov.
- Taljenje z elektronskim snopom (EBAM, ang. *Electron Beam Additive Manufacturing*), ki deluje na osnovi spajanja praškastega materiala s pomočjo elektronskega snopa ob prisotnosti vakuuma. Postopek je primeren za obdelavo kovin.

Laminiranje pol (ang. *Sheet lamination*) je postopek dodajanja materiala, kjer se posamezne sloje (pole) materiala s pomočjo veziva oblikuje v končni izdelek. Vključuje samo en postopek:

- Nalaganje krojenih plasti (LOM, ang. *Laminated Object Manufacturing*) je postopek, kjer se izdelek gradi z lepljenjem zaporednih slojev in je primeren za obdelavo kompozitov in papirja (Vir: ISO/ASTM 52900:2015 Additive Manufacturing, b. l.).

Razdelitev aditivnih tehnologij po standardu ISO/ASTM 52900:2015 shematsko prikazuje Slika 3. Zajeti so najbolj razširjeni postopki aditivnih tehnologij, zaradi hitrega razvoja na tem področju pa ni možno popisati vseh obstoječih postopkov.



Slika 3: Delitev aditivnih tehnologij

(Vir: ISO/ASTM 52900:2015 Additive Manufacturing, b. l.)

3D tisk, sopomenka slojeviti tehnologiji se pogosto uporablja za izdelavo kompleksnih notranjih oblik z namenom izdelave kompleksnih hladilnih kanalov ali pa redukcijo mase (s pomočjo volumna). Dokončani slojeviti modeli so lahko široko uporabljeni v avtomobilizmu, gradbeništvu, medicini in elektroniki.

Pri 3D tiskanju se pogosto uporablja postopek zapolnitve, imenovan »infill«. Ta postopek se uporablja za zapolnitev notranjosti 3D tiskanega modela z vzorcem ali s strukturo, ki pomaga ohranjati trdnost izdelka. Zapolnitev je lahko v obliki mreže, šesterokotne ali pravokotne mreže, spirale ali drugih vzorcev, odvisno od programske opreme in nastavitvev, ki se uporabljajo pri 3D tiskanju.

Cilj zapolnitve je zagotoviti potrebno trdnost in stabilnost izdelka, pri čemer se hkrati zmanjša poraba materiala in čas tiskanja. Zapolnitev omogoča, da je notranjost izdelka lahka, medtem ko je zunanji del še vedno trden in stabilen.

Poleg tega lahko pri zapolnjevanju notranjosti izdelka prilagodimo gostoto vzorca ali strukture, kar omogoča nadzor nad trdnostjo in težo izdelka. Zapolnitev z večjo gostoto bo povečala trdnost, vendar bo hkrati povečala tudi težo izdelka. Nasprotno pa zapolnitev z manjšo gostoto zmanjša težo, a lahko vpliva na trdnost izdelka.

Pri določanju ustrezne zapolnitve je treba upoštevati tudi namen in uporabo končnega izdelka. Na primer, če je izdelek del funkcionalnega prototipa ali končnega izdelka, ki mora prenesti določene obremenitve, je treba uporabiti ustrezno zapolnitev, ki zagotavlja potrebno trdnost (Muck & Križanovski, 2015).

2.3 NATANČNOST IN DIMENZIJSKE SPREMEMBE PRI 3D TISKU

Natančnost 3D tiska se nanaša na sposobnost tiskalnika, da ustvari izdelek z želenimi dimenzijami in podrobnostmi, ki ustrezajo načrtu. Merjenje natančnosti običajno vključuje primerjavo dejanskih dimenzij in oblik s pričakovanimi vrednostmi ter oceno morebitnih odstopanj. Natančnost je pomembna zlasti pri izdelavi funkcionalnih delov, prototipov in drugih aplikacij, kjer so zahtevane tesne tolerančne meje.

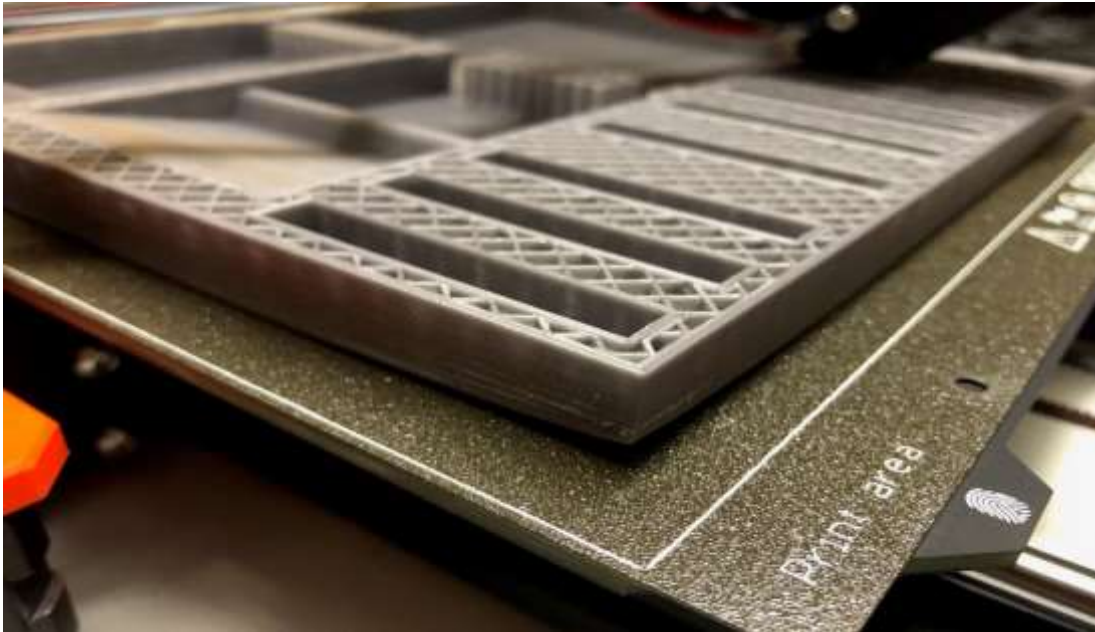
Dejavniki, ki vplivajo na natančnost 3D tiska:

- **Nastavitve tiskalnika:** Natančnost 3D tiska je odvisna od nastavitvev tiskalnika, kot so hitrost tiskanja, debelina plasti, temperatura tiskalne glave, pretok materiala in podobno. Pravilna prilagoditev teh parametrov lahko izboljša natančnost tiska.
- **Kalibracija tiskalnika:** Pomembno je, da je tiskalnik pravilno kalibriran, da doseže natančne premike tiskalne glave in dosledno nalaganje materiala. Slabo kalibriran tiskalnik lahko povzroči odstopanja in neenakomerno polnjenje.

- **Materiali:** Različni materiali imajo lahko različne lastnosti krčenja med hlajenjem, kar lahko vpliva na natančnost dimenzij izdelka. Tudi mehanske lastnosti materiala, kot je togost, lahko vplivajo na natančnost.
- **Podpora:** Uporaba podpornih struktur pri tiskanju kompleksnih geometrij lahko vpliva na natančnost. Slaba podpora ali težave pri njihovem odstranjevanju lahko povzročijo deformacije ali poškodbe izdelka (Muck & Križanovski, 2015).

Vendar pa v 3D tiskanju obstaja več negativnih pojavov, ki so splošno priznani in preučevani v literaturi. Nekateri od teh pojavov vključujejo:

- **Krivljenje (warping):** To je pojav, pri katerem se robovi tiskanega predmeta dvignejo ali ukrivijo med postopkom tiskanja. Vzroki za krivljenje so lahko neenakomerno hlajenje, notranje napetosti v materialu ali slaba adhezija med plastmi. Prikazano je na Slika 4.
- **Skrčenje (shrinkage):** Skrčenje je pojav, pri katerem se tiskani predmet krči med ohlajanjem. To lahko povzroči deformacije ali dimenzijske spremembe, ki ne ustrezajo načrtu.
- **Premaknjene plasti:** Pri 3D tiskanju lahko pride do premikov ali napačnega poravnavanja plasti, kar lahko povzroči manjšo natančnost in kakovost tiska. To je lahko posledica vibracij tiskalnika, nestabilnosti gradbenega prostora ali drugih zunanjih dejavnikov.
- **Neenakomerna kakovost površine:** Površina tiskanega predmeta morda ni popolnoma gladka ali enakomerna. To je lahko posledica sledi tiskalne glave, neustreznega polnjenja materiala ali drugih parametrov tiskanja.
- **Poroznost:** V nekaterih primerih se lahko pojavijo majhne pore ali zračni mehurčki v tiskanem predmetu. To je lahko posledica nezadostnega izločanja zraka med tiskanjem ali reakcij med materialom in tiskalnikom (Muck & Križanovski, 2015).



Slika 4: Prikaz krivljenja

(Vir: Avoiding Warping: Effective Strategies For Reducing Warping In 3D Printing, 2023)

Višina sloja pri 3D tisku neposredno vpliva na natančnost končnega izdelka. Nižja višina sloja omogoča večjo natančnost, saj omogoča bolj gladke in podrobne površine ter natančnejše detajle. To je posledica tega, da se izdelek tiska s tankimi plastmi materiala, kar omogoča bolj natančno reprodukcijo oblike in dimenzij.

V nasprotju s tem pri večji višini sloja se lahko pojavijo vidni slojni vzorci, ki lahko zmanjšajo natančnost in estetski videz izdelka. To je lahko še posebej izrazito pri gladkih površinah ali oblikah z majhnimi detajli. Geometrijske in dimenzijske napake se lahko pojavijo zaradi manjše natančnosti, ki jo omogoča večja višina sloja.

Pri izbiri optimalne višine sloja je pomembno upoštevati specifične zahteve in pričakovanja glede končnega izdelka. V nekaterih primerih, kjer je natančnost ključna, je smiselno uporabiti tanjše sloje, medtem ko lahko pri izdelkih, kjer je manj pomembna natančnost in gre bolj za grobo obliko, uporabimo večje višine sloja.

Na koncu je pomembno najti ravnotežje med hitrostjo tiskanja, želeno natančnostjo in specifičnimi zahtevami projekta. Pri tem je treba upoštevati tudi druge dejavnike, kot so vrsta uporabljenega materiala, vrsta tiskalnika in druge tehnične omejitve, ki lahko vplivajo na natančnost 3D tiska (Godec, 2015).

2.4 MATERIALI PRI ADITIVNIH TEHNOLOGIJAH

Današnje tehnologije aditivne proizvodnje omogočajo izdelavo delov iz več osnovnih skupin materialov:

- polimeri,
- kovine,
- drugi materiali – keramika, pesek.

Plastomeri so polimerni materiali, ki pri segrevanju na temperaturo zmežanja ali tališča ne spremenijo svoje kemijske strukture, ampak le agregatno stanje, kar pomeni, da jih je mogoče večkrat uporabiti. Plastomeri so najbolj primerni za funkcionalne aplikacije, ki vključujejo proizvodnjo funkcionalnih prototipov in funkcionalnih delov za končno uporabo. Imajo zelo dobre mehanske lastnosti, visoko odpornost na udarce, obrabo in kemične vplive. V novejšem času se lahko za aditivno izdelavo uporabljajo tudi kompozitni plastomeri, ki vsebujejo ojačitvena vlakna (npr. ogljikova vlakna, steklena vlakna itd.), ki bistveno izboljšajo lastnosti osnovnega materiala. Tako imenovani inženirski razred plastomernih materialov se danes zelo pogosto uporablja v industriji.

Tehnologiji SLS in MJF uporabljata material v obliki prahu, FDM pa material v obliki žice, navite na kolute. Načeloma tehnologije SLS in MJF proizvajajo dele z višjo stopnjo podrobnosti in s tanjšimi stenami, medtem ko ima FDM bistveno večji nabor razpoložljivih materialov, je bolj ekonomičen in lahko v nekaterih primerih izdela natančnejše in velike dele, kjer druge tehnologije izgubijo točnost in natančnost zaradi preostalih notranjih napetosti v izdelkih.

Tehnologija MJF je razmeroma nova, v zadnjem času se pojavlja možnost izdelave barvnih delov z nanosom barvnih veziv, vendar je ta aplikacija še v povojih, zaradi več tehnoloških izzivov, ki se odražajo v omejeni barvni paleti in šibkejši mehanski lastnosti izdelkov (IZIT, 2021).

2.4.1 FOTOPOLIMERNE SMOLE

Akrilatni fotopolimeri so prve in najbolj uporabljene smole, razvite za vatno polimerizacijo (VPP). Kasneje so se razvile vinil-etske in epoksidne smole. Vsi materiali v vatni polimerizaciji so podvrženi fotopolimerizaciji. Strategija 3D fotopolimerizacije temelji na uporabi monomerov/oligomerov v tekočem stanju, ki se lahko strdijo/fotopolimerizirajo ob izpostavljenosti svetlobnemu viru specifične valovne dolžine in tvorijo termostrjevanje. Za pretvorbo fotolitične energije v reaktivne vrste (radikali ali kationi), ki poganjajo verižno rast z radikalno ali s kationsko metodo, je potreben fotoiniciator (z relativno visokim absorpcijskim koeficientom). Akrilati uporabljajo proste radikale, epoksidi in vinil etri pa kationsko metodo za polimerizacijo.

Uporaba akrilatnih smol se je izkazala kot učinkovita pri 3D fotopolimerizaciji, a imajo nekatere pomanjkljivosti:

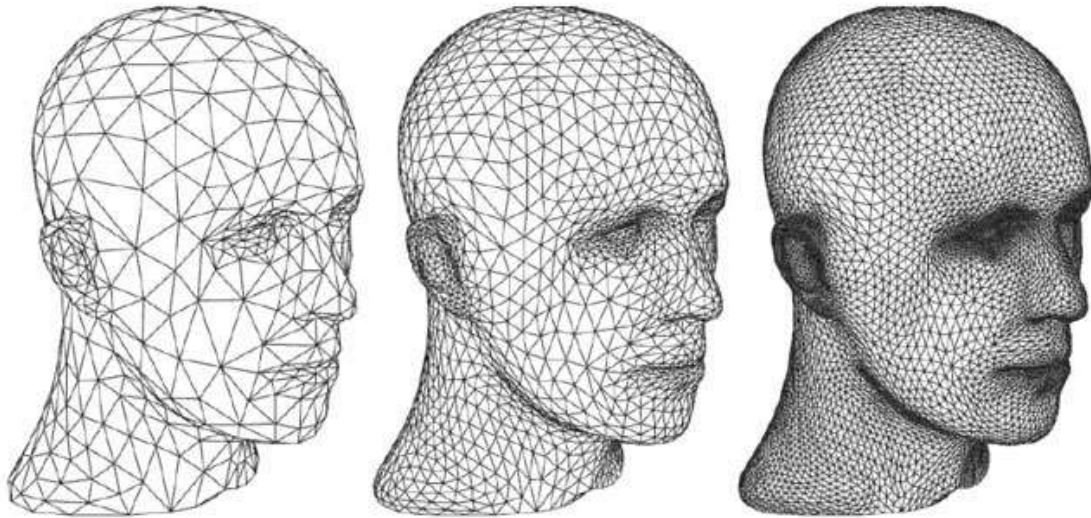
- Te smole se med polimerizacijo skrčijo. Čiste akrilatne smole se običajno gelirajo pri nizkih konverzijah, odvisno od funkcionalnosti uporabljenega monomera. Ta pojav običajno vodi v zelo omejen pretok preostalega nestrjenega smolnega materiala. Nadaljnja fotopolimerizacija nad to konverzijo bi privedla do povečanja stresnega skrčka pri vsaki novo oblikovani vezi. Količina skrčka se razlikuje glede na molekularno strukturo monomera/oligomera. Skrček in povezan stres lahko povzročita ukrivljanje in deformacijo med plast-po-plast VPP.
- Večina fotoobčutljivih smol na osnovi (met)akrilata vsebuje multifunkcionalne monomere, ki doživijo avtoakceleracijo v zgodnji fazi verižne rasti (prosti radikalna) polimerizacije zaradi omejene gibljivosti terminacijskih reakcij. Visoka kinetična verižna dolžina bi vodila v nastanek mrež z nizko enotnostjo in visoko lomljivostjo, kar je manj učinkovito pri razprševanju stresa, zato bi se lahko razpoke lažje širile.

Strategije za zmanjšanje skrčka so:

- Uporaba visokomolekularnih oligomernih akrilatov (z manjšo koncentracijo reaktivnih skupin) lahko zmanjša odstotek skrčka, vendar je potrebno segrevanje (med 3D postopkom), da se zmanjša viskoznost teh smol.
- Uporaba radikalnega mehanizma stopnjevanja koraka kot alternativa verižni rasti polimerizacije. Za zmanjšanje lomljivosti.
- Uporaba sredstev za prenos verige pri urejanju fotoobčutljivih smol je pokazala sposobnost prilagajanja gostote prečlenitve, povprečne kinetične verižne dolžine in porazdelitve prečlenitev poleg osi. Za zmanjšanje zaviranja kisika.
- Uporaba dodatkov – vendar bi pri smolah, ki vsebujejo tako (met)akrilate kot epoksidge, lahko prišlo do obarvanja strjenega materiala. Zanimanje za uporabo epoksidnih in vinil-etrskih monomerov izvira iz njihove nizke prostorninske skrčnosti (~3 %), ki se pojavi med fotopolimerizacijo (Godec, 2015).

2.5 STL DATOTEKA

STL datoteke predstavljajo površine modela z množico trikotnikov (trikotniško mrežo). Vsak trikotnik je določen s svojimi koordinatami treh vozlišč v 3D prostoru. Ti trikotniki skupaj tvorijo približno površino modela brez kakršne koli predstavitve barve, teksture ali drugih običajnih atributov modela. Te datoteke so običajno ustvarjene s programom za računalniško podprto načrtovanje (CAD) kot končni izdelek procesa 3D modeliranja. Format datoteke STL je standardni format, ki se pogosto uporablja za 3D-tiskanje in komunikacijo med računalnikom ter 3D tiskalnikom (Duhovnik, 2017).

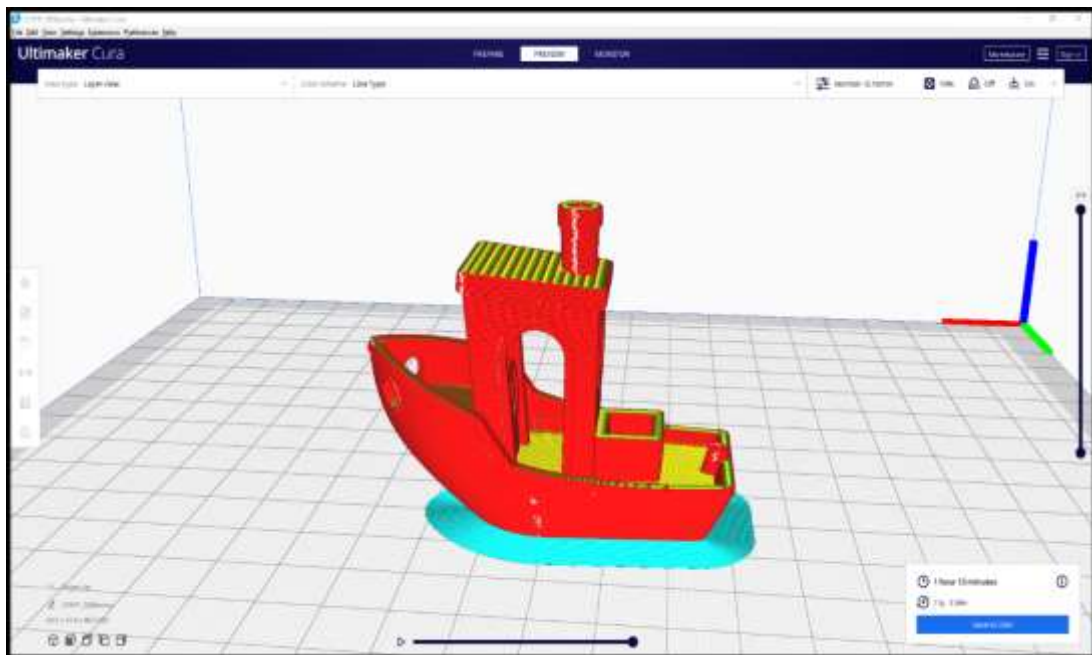


*Slika 5: Prikaz natančnosti modela v odvisnosti od števila trikotnikov
(Vir: Sculpteo, 2023)*

V začetku je bil format datoteke STL preprost in omejen, vendar je sčasoma pridobil široko podporo in se uporablja v različnih programskih paketih CAD. Danes je postal ključen pri hitri izdelavi prototipov, 3D-tiskanju ter računalniško podprti proizvodnji. S pomočjo formatov datotek STL je mogoče ustvariti natančne 3D modele, ki so pripravljene za tiskanje ali proizvodnjo. Na Slika 5 je prikazana natančnost tiskanja modela v odvisnosti od števila trikotnikov v mreži (Duhovnik, 2017).

Pri 3D-tiskanju je ključno odpreti datoteko STL v posebnem programu. Slicer je programska oprema, ki pretvori digitalne 3D modele v navodila za tiskanje, ki jih 3D tiskalnik uporabi za izdelavo predmeta. Delovanje rezalnika vključuje razrez datoteke STL na veliko vodoravnih plasti, odvisno od izbranih nastavitvev, in izračun količine materiala, ki ga bo tiskalnik iztisnil, ter časa, ki bo potreben za to nalogo. Vse te informacije se nato združijo v datoteko GCode, ki je jezik, razumljiv za 3D-tiskalnik. Nastavitve rezalnika pomembno vplivajo na kakovost tiska, zato je ključno uporabiti pravilno programsko opremo in nastavitve, da dosežemo najboljše rezultate tiska.

Ko je GCode prenesen na 3D-tiskalnik, se začne naslednja faza, ki vključuje sestavljanje posameznih dvodimenzionalnih plasti v tridimenzionalni predmet na tiskalniku. To se doseže z nanosom tanjših plasti polimernega materiala, kovine ali kompozitnih materialov in gradnjo modela po plasteh. Postopek se ponavlja, dokler ni končan celoten predmet, pri čemer se vsaka plast pravilno pritrdi na prejšnjo, kar ustvari trdno in natančno tridimenzionalno strukturo (Duhovnik, 2017).



Slika 6: Model v rezalniku
(Lastni vir)

2.6 SLS – SELEKTIVNO LASERSKO SINTRANJE

V procesu selektivnega laserskega sintranja (SLS) se uporablja raznolik izbor praškastih materialov, kot so keramika, kovina in polimeri. V tem poglavju se bomo osredotočili na postopek uporabe kovinskega prahu kot osnovnega materiala. Ta tehnika vključuje uporabo laserskega žarka, običajno CO₂ laserja, za sintranje praškastih materialov. S postopkom ponavljajočega se širjenja plasti, selektivnega segrevanja in vezanja vsake praškaste plasti se oblikuje tridimenzionalna struktura. Ta proces omogoča postopno oblikovanje plasti iz CAD podatkov (Lijie Grace Zhang, 2015).

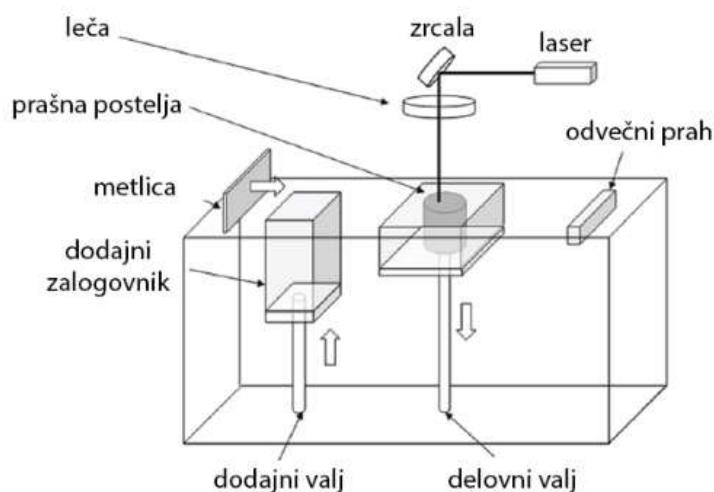
Sistem selektivnega laserskega sintranja (SLS) je sestavljen iz več osnovnih komponent, kar je prikazano na Sliki 3. Ta napredna tehnologija obdelave materialov vključuje več korakov, ki omogočajo izdelavo tridimenzionalnih objektov.

Prvi korak v procesu SLS je nanašanje tankih plasti prahu, ki je običajno termoplastični material, na gradbeno ploščo. Nato sledi lasersko skeniranje, kjer natančen laserski žarek sledi vzorcem iz računalniškega modela in selektivno sintrira prah. Sintranje povzroči, da se delci prahu zlepijo skupaj in tvorijo trdno plast materiala.

Ta postopek se ponavlja, pri čemer se na prejšnjo plast nanaša nova plast prahu, ki se nato sintrira z uporabo laserskega žarka. Tako se postopoma gradi tridimenzionalni objekt iz zaporednih plasti materiala.

Vse to se izvaja v posebni komori, ki ima nadzorovano atmosfero z inertnim plinom, kot je na primer dušik. To je narejeno z namenom preprečevanja oksidacije materiala med postopkom. Oksidacija bi lahko povzročila slabšo kakovost končnega izdelka, zato je nadzor atmosfere ključnega pomena za doseg visokih standardov pri SLS postopku (Nesma T. Aboulkhair, 2019).

Visoki temperaturni gradienti med postopkom lahko povzročijo ukrivljenost izdelka in dodatne notranje napetosti. Tradicionalno so podporne strukture uporabljene za preprečevanje ukrivljenosti, vendar jih pri kompleksni geometriji ni vedno mogoče uporabiti. Nedavne raziskave so pokazale, da je mogoče popolnoma odstraniti ukrivljenost pri izdelkih iz aluminijeve litine brez uporabe podpornih struktur, če segrejemo prah v komori na temperaturo 250 °C. Slabosti in pomanjkljivosti so prikazane v Tabela 1.



*Slika 7: Shematski prikaz SLS procesa
(Lastni vir)*

Poleg tega je mogoče zmanjšati notranje napetosti s sekundarnimi toplotnimi procesi. V enem izmed preizkusov so tako uporabili prah jekla, ki je bil pomešan s prahom niklja in borovega fosfata. Ugotovili so, da toplotna obdelava, pri kateri so kose izpostavili temperaturam med 600 °C in 700 °C za eno uro, zmanjša notranje napetosti do 70 %. Z večkratnim skeniranjem površine ob nespremenjenih parametrih

je mogoče zmanjšati notranje napetosti do 55 %. Poleg tega ogrevanje prahu med postopkom na 160 °C zmanjša notranje napetosti za do 40 % (C. Y. Yap, 2015).

Prednosti	Pomanjkljivosti
<ul style="list-style-type: none"> • Uporaba večjega števila materialov, • razmeroma hiter postopek, • odvečni prah podpira izdelke, • neporabljeni material se lahko uporabi za druge izdelke. 	<ul style="list-style-type: none"> • Slaba kakovost površine izdelka, • v procesu utrjevanja površine možnost strjevanja neizkoriščenega praha, • pri uporabi določenih materialov je potrebna zaščitna atmosfera (strupeni plini, npr. pri PVC).

*Tabela 1: Prednosti in pomanjkljivosti SLS postopka
(Lastni vir)*

Tako lahko sklepamo, da se lahko pri primerjavi Selective Laser Sintering (SLS) in Selective Laser Melting (SLM) tehnologij opazi nekaj ključnih prednosti in slabosti. Ena od prednosti SLS tehnologije v primerjavi s SLM je nižja poraba energije, saj se pri SLS ne talijo delci prahu. Posledično se pojavijo manjše volumske in temperaturne spremembe, kar prispeva k manjšim dimenzijskim spremembam v končnem izdelku.

Hkrati pa lahko višja poroznost, dosežena pri sintranju z SLS, predstavlja tako prednost kot slabost. Višja poroznost lahko omogoča boljšo zračno ali tekočinsko prepustnost izdelka, kar je lahko koristno v določenih aplikacijah. Vendar pa se lahko višja poroznost šteje tudi kot slabost, saj lahko zmanjša mehanske lastnosti in trdnost izdelka.

2.7 POLYJET TEHNOLOGIJA

Tehnologija PolyJet (

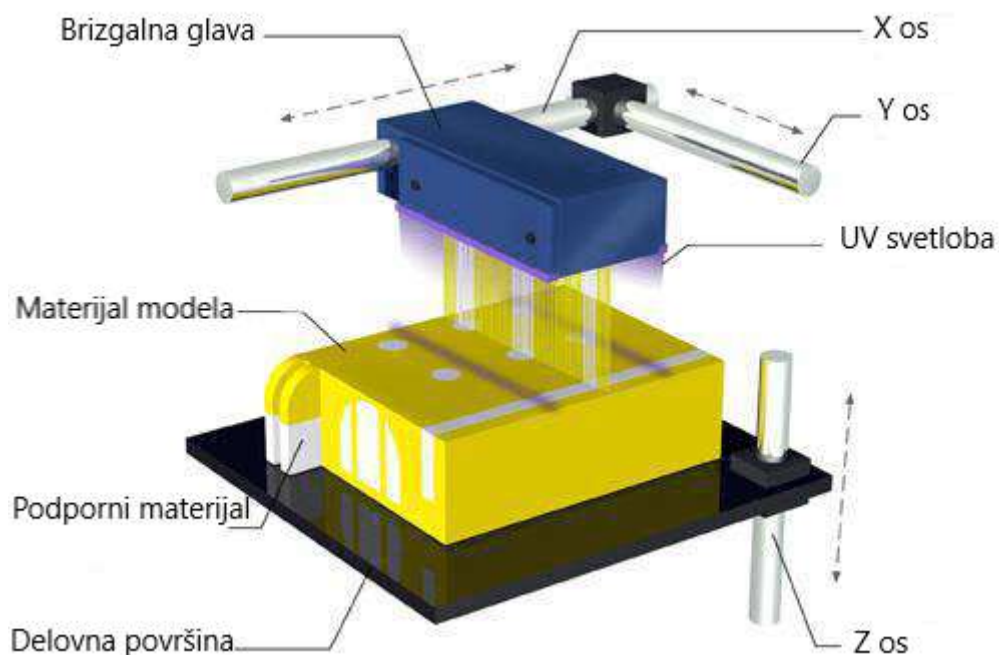
Slika 8) je bila razvita leta 2000 in združuje prednosti stereolitografije in 3D tiskanja.

Mreža šob drsi naprej in nazaj in nanese plast fotoobčutljivega polimera na delovno površino, debeline 16 µm, kar je 1/5 debeline stereolitografske plasti. Po končani eni plasti se delovna površina zniža za debelino druge delovne plasti. Tako kot pri stereolitografiji poteka utrjevanje polimera zaradi delovanja UV svetlobe. Vsak sloj se strdi takoj po tiskanju in tako ustvari popolnoma omrežen prototip (Pilipović, 2012).

Vsak sloj fotosenzitivnega polimera se strdi pod UV svetlobo takoj po nanosu, kar tvori popolnoma utrjen izdelek, brez potrebe po nadaljnjem utrjevanju. Tekoča smola se segreje na 30–70 °C, da doseže optimalno viskoznost za tiskanje. Uporabljata se dve različni snovi: ena za model in druga za podporno strukturo, tj. polovica šob nanaša material na model, druga polovica pa na podporno strukturo. Ko je prvi sloj

končan, se gradbena platforma spusti za debelino naslednjega sloja in tiskalna glava začne ustvarjati naslednji sloj. Po izdelavi izdelka se podporno ogrodje (gel material) enostavno odstrani z vodo pod tlakom 40 Psi, kar je približno 2.75 Bar, ali ročno, odvisno od oblike, tj. geometrije izdelka. V nekaterih situacijah se vosek uporablja kot podporna struktura pri tiskanju. Po končanem postopku tiskanja je model popolnoma obdan z voskom, kar omogoča ustvarjanje stabilne oblike. Kasneje pa se ta vosek odstrani s posebno pečjo. Proces vključuje segrevanje voska, ki se nato stali in odteče s površine modela. Tankostenski in majhni izdelki se čistijo pri nižjem tlaku, robustni pa pri visokem tlaku, kar skrajšuje čas čiščenja. Nizka debelina sloja zagotavlja izdelavo izdelka z zelo gladko površino, ki ne zahteva nadaljnje obdelave.

Končane izdelke je mogoče obdelati s curkom delcev, polirati, brusiti, barvati itn. Prototipi se lahko uporabljajo kot modeli za izdelavo silikonskih odlitkov za postopek infuzije smole s posebno komoro za zgorevanje (Godec, 2015).



Slika 8: Prikaz Polyjet postopka

(Vir: 3daddfab, 2023)

Zaradi zelo tankih slojev so izdelki narejeni s postopkom Polyjet zelo natančni in imajo zelo gladko površino. Podporna lastnost je izdelava majhnih modelov s ozkimi stenami, pri katerih ni potrebe po nadaljnem utrjevanju. Dovoljena je tudi možnost uporabe različnih materialov, ki zagotavljajo različne geometrijske, mehanske lastnosti in barvo. Velika prednost tehnologije PolyJet je, tako kot pri stereolitografiji,

izdelava prozornih izdelkov. Postopek se uporablja v avtomobilski, elektronski, igračarski, obutveni, potrošniških izdelkih ter nakitni industriji. Prednosti in pomanjkljivosti so prikazane v Tabela 2 (Pilipović, 2012).

Prednosti	Pomanjkljivosti
<ul style="list-style-type: none">• Dobra kakovost površine izdelka,• konstantnost dimenzij,• modeli se lahko kombinirajo z materiali,• hiter postopek.	<ul style="list-style-type: none">• Potreba po podporni konstrukciji,• za taljenje nosilca je potrebna peč konstrukcije.

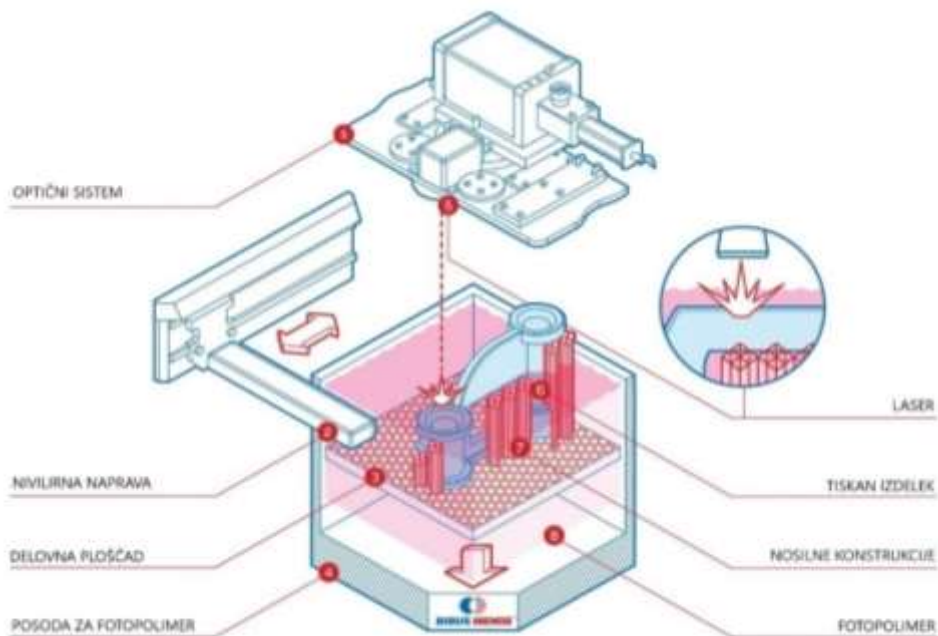
*Tabela 2: Prednosti in pomanjkljivosti Polyjet postopka
(Lastni vir)*

2.8 SLA – STEREOLOGRAFIJA

V poznih 70. in zgodnjih 80. letih se je začela pojavljati ideja hitre proizvodnje prototipov, ki temelji na selektivnem prepletanju fotopolimernega površinskega sloja in izdelavi tridimenzionalnih objektov s postopnim nanosom plasti. Postopek je bil poimenovan stereolitografija, leta 1987 pa so začeli proizvajati prve stereolitografske naprave, prve stroje na področju aditivne proizvodnje.

Princip stereolitografije je, da se fotopolimer strdi ob izpostavljenosti svetlobnemu viru. Gradbena ploščad je nameščena le eno plast debeline pod vrhom tekoče polimerne površine. Helijev kadmijev (He-Cd) ali argon (Ar) laser ustvari in usmerja UV svetlobo ter skenira polimerno plast nad strjevalno podlago. Ta korak se začne z dnom izdelka. Gradbena ploščad se nato spusti za debelino naslednje plasti. Metla se uporablja za preprečevanje zračnih mehurčkov v izdelku. Ker se izdelek izdeluje v tekočini, je treba z uporabo podporne strukture zagotoviti njegovo pozicijo, ki se odstrani po končanem postopku. Postopek se ponavlja do končne izdelave celotnega izdelka. Le-ta se odstrani iz tekočega polimera, odvečni polimer se opere v topilu, da se dobi tako imenovana zelena faza. Nadaljnje strjevanje traja vsaj eno uro. Ta korak je potreben, ker se lahko v plasti zadržuje nekaj tekočega fotopolimera (Gibson, 2010).

Postopek stereolitografije je prikazan na Sliki 9.



Slika 9: SLA tiskalnik
(Vir: Tehnologija SLA, b. I.)

V zadnjem času je proizvodnja večbarvnih izdelkov postala vse bolj zanimiva za več uporabnikov (npr. v medicini in farmaciji). Zato je bil razvit spremenjen postopek stereolitografije, ki omogoča proizvodnjo dvobarvnih izdelkov (Slika 10). Postopek je sestavljen iz dveh korakov. V prvem koraku se strdi prozoren fotopolimer, ki tvori zunanjo strukturo izdelka, v drugem koraku pa se uporablja fotopolimer, ki je mešan s pigmenti in tvori notranjost izdelka. Po prvem koraku se gradbena ploščad, na kateri se gradi izdelek, dvigne nad nivo fotopolimera in odstrani odvečni prozorni fotopolimer. Nato se v proizvodno komoro dovaja obarvani fotopolimer s pomočjo posebnega sistema. Laser izriše zahtevane konture na obarvanem fotopolimeru in po strjevanju se odstrani nestrjeni fotopolimer ter dovaja prozoren fotopolimer. Podlaga se spusti za debelino ene plasti v primerjavi s pozicijo na začetku prejšnjega koraka in postopek se ponovi.

Stereolitografija se uporablja v različnih vejah industrije, kjer so potrebni modeli za testiranje oblike in pozicioniranje, izdelava kalupov, hitro izdelavo orodij. Izdelki, pridobljeni s stereolitografijo, se uporabljajo kot prototipi, funkcionalni izdelki, modeli orodij za brizganje, investicijski liv in modele za peskano litje. V medicini imajo tako precej pomembno vlogo, saj se uporabljajo za izdelavo določenih delov kosti.

V stereolitografiji se uporabljajo različni materiali za izdelavo 3D objektov. Med najpogosteje uporabljenimi materiali so polimetilmetakrilat, epoksidna smola ter materiali s podobnimi lastnostmi kot polietilen, polipropilen, poliamid 66, akrilonitril/butadien/stiren, polikarbonat in polibutilen tereftalat. V nekaterih primerih se lahko uporabijo tudi nanokompoziti, kjer so fotopolimeri (akrilne ali epoksidne smole) napolnjeni z metalnim ali s keramičnim prahom ali delci.

Pri uporabi kompozitnih materialov iz kovine in keramike v postopku stereolitografije se izvedejo naslednji koraki. Najprej se izdelava 3D model z uporabo laserske svetlobe, ki strjuje fotopolimerne materiale. Nato sledi odstranjevanje polimerne vezave, kar se doseže s segrevanjem objekta na temperaturah med 400 in 500 °C. Ta korak omogoča, da se iz objekta odstrani večina polimernih ostankov. Končni korak je sintranje polnilnih delcev pri temperaturi približno 1200 °C ali višji. Sintranje omogoča, da se delci kovine ali keramike med seboj povežejo in tvorijo trdno in obstojno strukturo (Godec, 2015).

Večina fotopolimerov reagira na UV frekvenčno sevanje. Pri izpostavljenosti takšnim žarkom so fotopolimerni materiali izpostavljeni kemični reakciji, med katero se utrdi. Uporablja se lahko več vrst sevanja, kot so gama žarki, rentgenski žarki, elektronski žarek, UV in v nekaterih sistemih vidna svetloba. V sistemih SL je najpogosteje UV žarek (Gibson, 2010).



Slika 10: Prikaz dvobarvnega izdelka
(Godec, 2015)

Prednosti	Pomanjkljivosti
<ul style="list-style-type: none"> • Možnost dela 24 ur na dan, • visoka ločljivost in natančnost, • izdelava večbarvnih izdelkov, • ni geometrijskih omejitev, • popolnoma avtomatiziran proces, • visoka produktivnost. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visoki stroški materialov, • cenovno dražje vzdrževanje laserja, • potreba po podpori in posledično odstranitev, • potrebna naknadna obdelava izdelka, • deformacija polimera med strjevanjem, • nastanejo strupeni plini, • omejitev materiala samo na fotopolimere, • omejena uporaba izdelka.

Tabela 3: Prednosti in pomanjkljivosti SLA postopka
(Lastni vir)

3 PRAKTIČNI PRIMER – IZDELAVA KONIČNEGA SVEDRA S HLADILNIM KANALOM

V praktičnem delu diplomske naloge je bil izdelan konjični sveder z vgrajenimi hladilnimi kanali z uporabo postopka stereolitografije. Začetna faza praktičnega dela je vključevala izdelavo 3D-modela konjičnega svedra s kompleksno geometrijo in z vgrajenimi hladilnimi kanali. Za izdelavo 3D-modela je bil uporabljen računalniški program SolidWorks, ki omogoča natančno oblikovanje in konstrukcijo. Po končani konstrukciji 3D-modela je bil model pripravljen za izdelavo s pomočjo postopka stereolitografije. Ta tehnologija omogoča izdelavo visoko natančnih in podrobnih 3D modelov s pomočjo svetlobe, ki strjuje tekoči polimer.

Sveder je izdelan z namenom prikaza uporabnosti 3D tehnologije, predstavlja izjemno vizualen primer, ki prikazuje potencial, ki ga ima 3D tiskanje.

Namen izdelave takšnega predmeta je poudariti, kako 3D tehnologija omogoča inovativne in edinstvene oblikovalske možnosti ter kako lahko le-ta presega omejitve tradicionalnih proizvodnih procesov.

3.1 IZDELAVA CAD MODELA SVEDRA

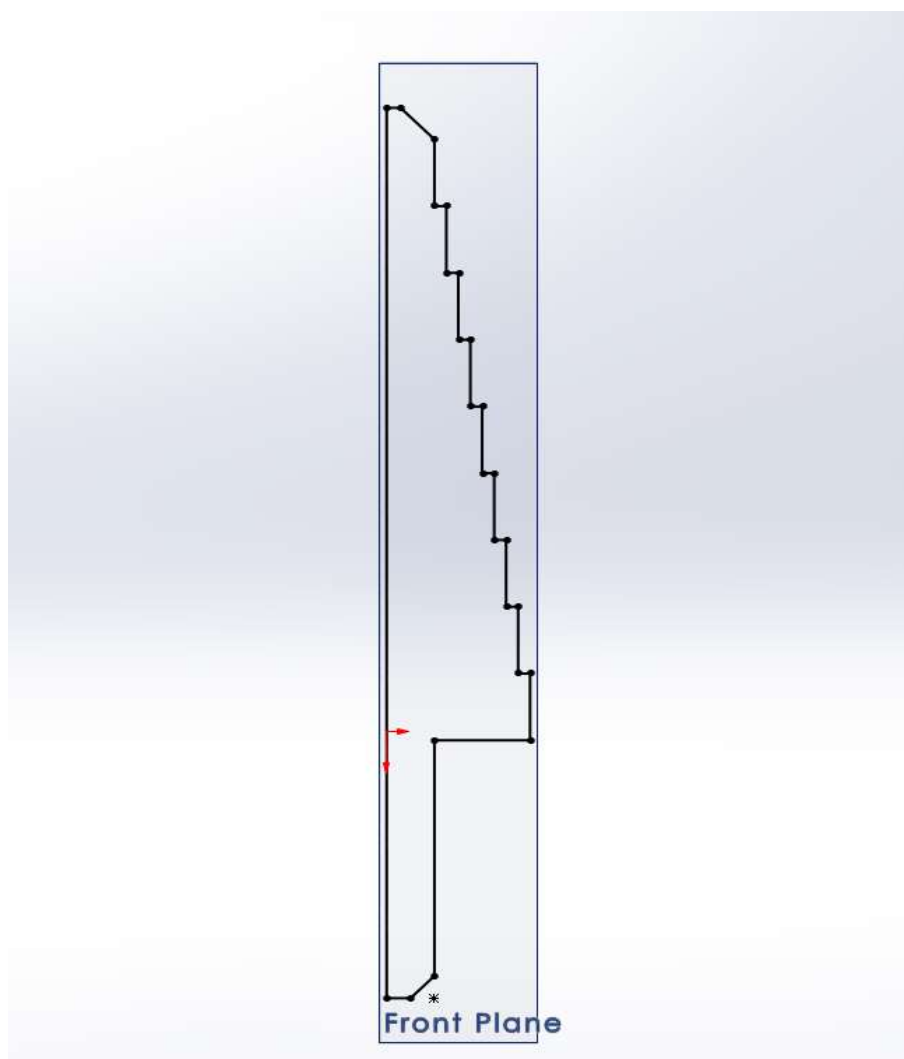
Pri oblikovanju svedra je pomembno, da upoštevamo geometrijo kot tudi dimenzije svedra. Za bolj realističen model lahko dodamo tudi podrobnosti, kot so gravure na površini svedra ali kovinski odboji. Pri delu s programom Solidworks je treba biti pozoren na pravilno izbiro orodij in funkcij, da lahko dosežemo želeni izdelek. Program Solidworks je odlično orodje za izdelavo tridimenzionalnih modelov in omogoča veliko kreativne svobode pri oblikovanju različnih izdelkov.

Po odprtju SolidWorks-a in ustvarjanju novega dokumenta imamo prazen zaslon, pripravljen za risanje. Nato izberemo ustrezno mersko enoto in standard, ki bosta določila enote in mere, uporabljene v risbi. Na primer če želimo risati v milimetrih, izberemo metrični sistem in enoto »mm«.

Naslednji korak je določitev ravnine načrta, na kateri bomo risali. V tem primeru lahko izberemo »Front Plane« (sprednja ravnina), ki je standardna ravnina za risanje v SolidWorks-u. Ta ravnina je usmerjena proti vam in je primerna za risanje prereza svedra.

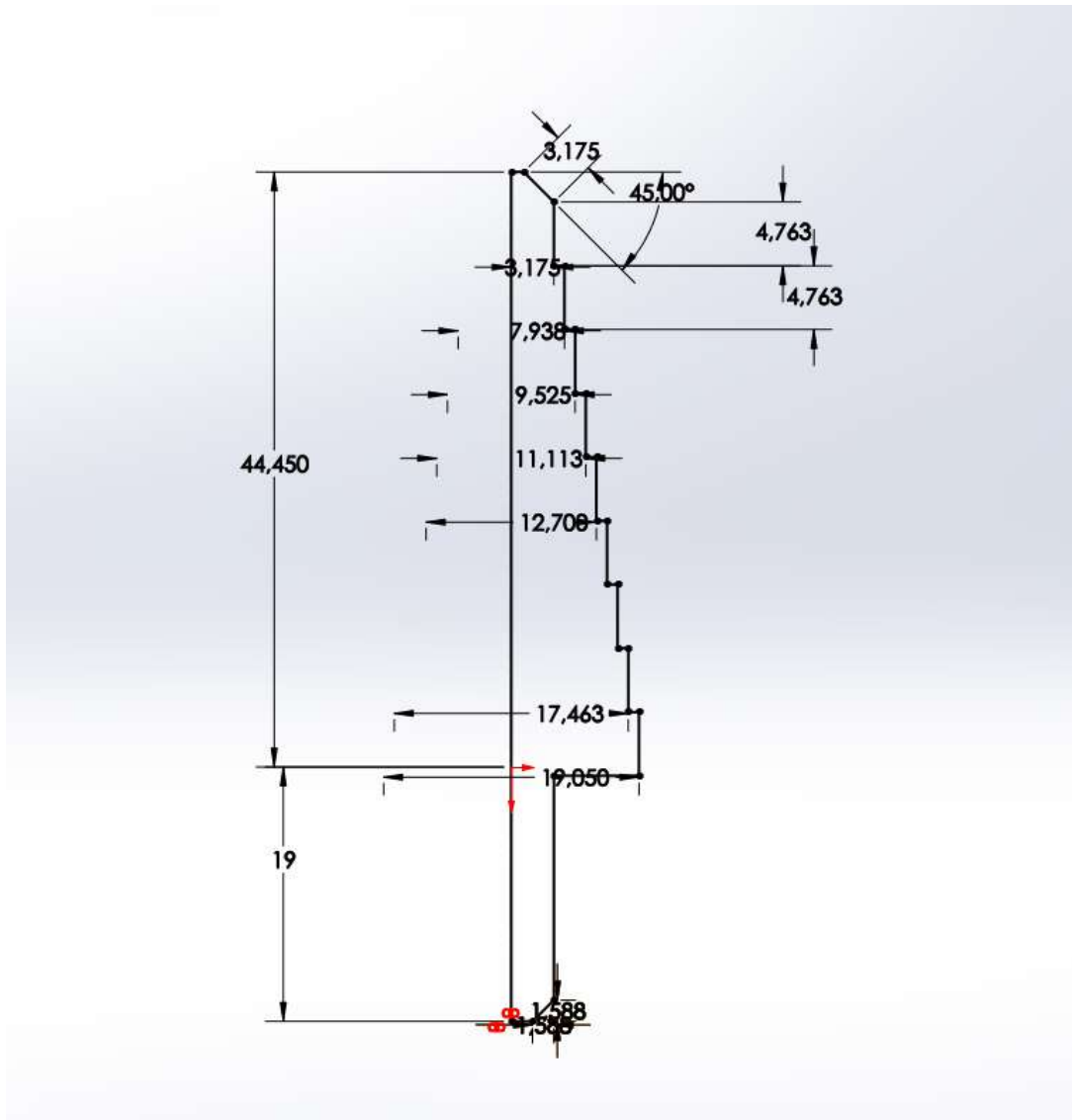
Uporabili smo orodje »Line« za risanje osnovnega prereza koničnega svedra. Narišemo ravno črto, ki predstavlja os svedra, nato pa dodamo zunanjo geometrijo, kot je na

Slika 11. Pri risanju geometrije svedra moramo biti pozorni na simetrijo in smiselnost oblike.



*Slika 11: Prikaz 2D geometrije svedra
(Lastni vir)*

Sledi dimenzioniranje, uporabimo orodje »Dimension« (razdalja/velikost), da določimo ustrezne dimenzije na risbi. Dimenzioniramo vse bistvene elemente, kot so premeri, dolžine in razdalje med elementi (Slika 12).



Slika 12: Prikaz dimenzij načrta
(Lastni vir)

V četrtem koraku smo uporabili funkcijo »Revolve« za ustvarjanje 3D modela svedra iz 2D prereza. Najprej smo izbrali os vrtenja, ki je ravna črta in predstavlja os, okrog katere bomo rotirali model. Nato smo izbrali 2D risbo prereza svedra, ki smo jo prej ustvarili. S pomočjo funkcije »Revolve« smo rotirali 2D risbo okoli osi vrtenja, da smo ustvarili sveder v 3D obliki. Pri tem smo uporabili ustrezne parametre, kot sta kot vrtenja in izbira polnjenja. Na koncu smo preverili, ali je ustvarjeni 3D model svedra pravilen in ustreza našim pričakovanjem.



*Slika 13: Prikaz 3D modela
(Lastni vir)*

Funkcija Chamfer se uporablja za ustvarjanje prehoda ali odstranjevanje materiala na robovih objekta. V našem primeru nam omogoča ustvarjanje bolj gladkega prehoda med dvema stopnjama in s tem izboljšuje estetski videz in funkcionalnost svedra. Uporaba funkcije Chamfer nam omogoča natančno nadzorovanje velikosti in oblike

prehoda na robovih ter prilagajanje oblike svedra glede na specifične zahteve in preference (

Slika 14).



*Slika 14: Uporaba funkcije Chamfer
(Lastni vir)*

Za nadaljnje oblikovanje svedra smo uporabili funkcijo »Helix« za ustvarjanje spiralne odprtine v koničnem svedru. Z izbrano funkcijo smo določili parametre, kot so premer, višina in število vrtljajev, ki ustrezajo željeni spiralni odprtini. Funkcija »Helix« nam

omogoča, da natančno določimo geometrijo spirale kot tudi smer in vrtenje spiralnega vzorca. S tem smo ustvarili spiralo, ki se lahko uporablja za izdelavo luknje v materialu. V naslednjem koraku smo uporabili funkcijo »Sweep« za ustvarjanje profila v svedru in premikanje istega vzdolž vodilne krivulje, ki smo jo ustvarili v predhodnem koraku. S funkcijo »Sweep« smo izbrali profil, ki predstavlja presečno obliko svedra, in vodilno krivuljo, ki določa pot, po kateri se bo profil premikal. S tem smo ustvarili odprtino v svedru s pomočjo rotacije profila po vodilni krivulji (Slika 15).



*Slika 15: Izgled modela po uporabi Sweep funkcije
(Lastni vir)*

V zadnjem koraku smo uporabili funkcijo »Fillet« za ustvarjanje zaobljenih robov na svedru. Z izbrano funkcijo smo označili robove, na katerih želimo ustvariti zaobljenje, in določili želeni polmer zaobljenja. Kar izboljša estetski videz svedra ter zmanjša koncentracijo napetosti na ostrem robu. Zaobljeni robovi lahko tudi olajšajo proces izdelave svedra in zmanjšajo verjetnost poškodb materiala med uporabo (Slika 16).



*Slika 16: Končna oblika svedra
(Lastni vir)*

3.2 IZDELAVA CAD MODELA HLADILNIH KANALOV

Za izdelavo hladilnih kanalov smo uporabljali funkcijo »Helix« za ustvarjanje spiralne oblike s enakimi parametri premera, višine in števila vrtljajev kot pri svedru. S funkcijo »Sweep« smo izbrali profil, ki predstavlja prereznik svedra, ter vodilno krivuljo, ki določa pot, po kateri se bo profil premikal.

Potem smo s pomočjo funkcije »Sweep« izbrali vodilno krivuljo, po kateri se bo izrisal profil hladilnega kanala. Dodatno smo določili parametre profila in izbrali okrogli profil določenega premera. Rezultat je prikazan na Slika 17.

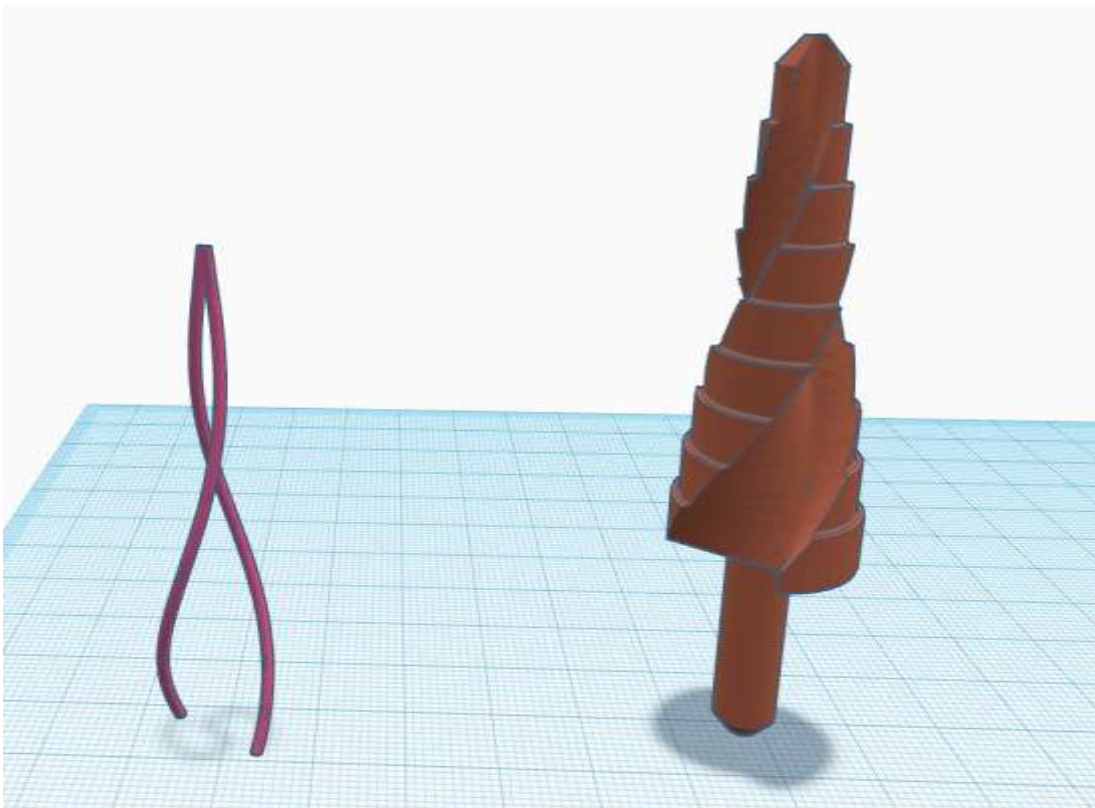


*Slika 17: Model hladilnega kanala
(Lastni vir)*

3.3 ZDRUŽEVANJE SVEDRA IN HLADILNIH KANALOV

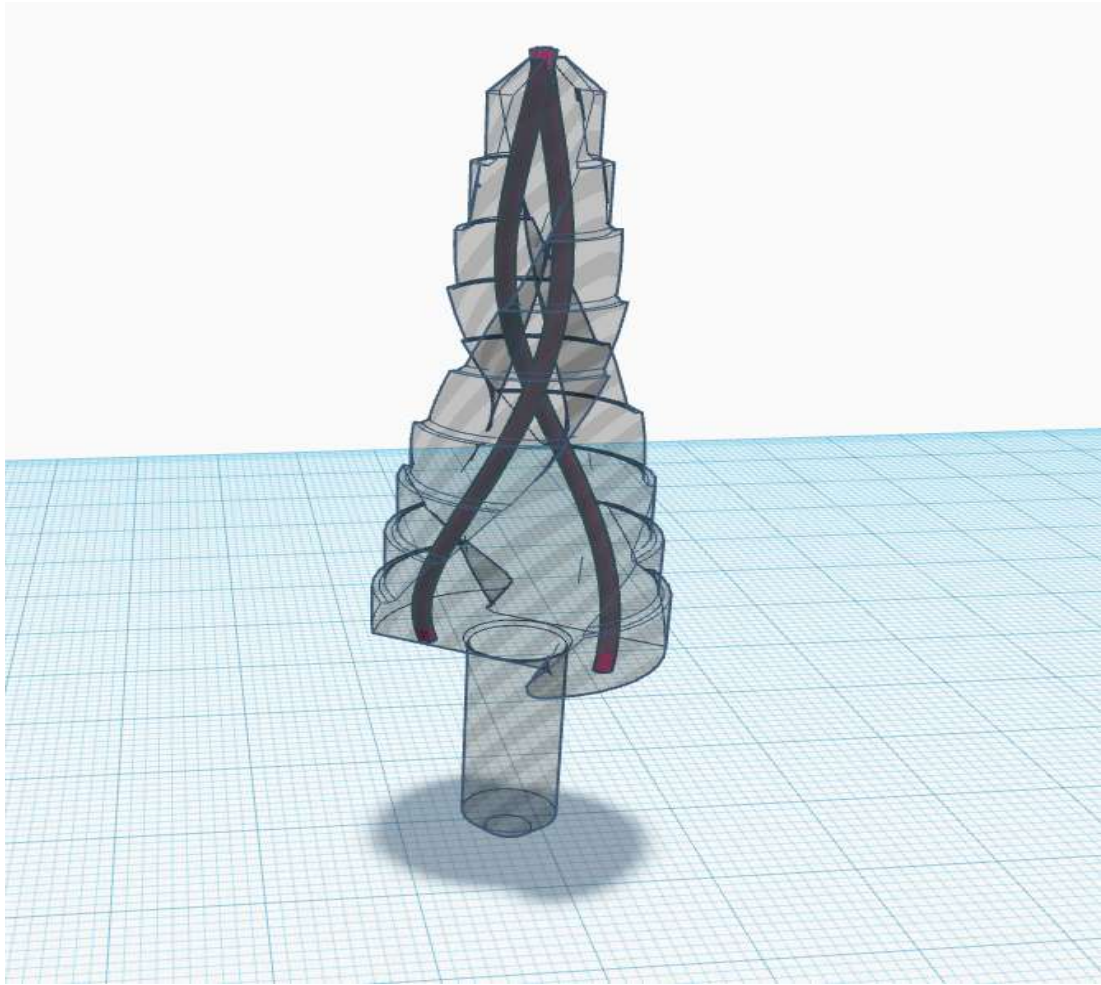
Tinkercad je spletna aplikacija, ki jo je razvilo podjetje Autodesk. Omogoča uporabnikom, da ustvarijo 3D modele s pomočjo preprostega vmesnika in intuitivnih orodij. Za uporabo Tinkercada ni potrebna namestitev posebnega programskega paketa, saj je dostopen preko spleta. Tinkercad ponuja široko paleto orodij za modeliranje, vključno z osnovnimi oblikovalskimi funkcijami, kot so premikanje, vrtenje, skaliranje, obrezovanje in združevanje oblik. Ena od najbolj uporabnih funkcij Tinkercada je možnost uvoza in izvoza modelov v različnih formatih, kot so STL, OBJ, SVG in druge.

V Tinkercadu smo uporabili postopek uvoza in združevanja objektov za izdelavo kompleksnejših modelov. Najprej smo izbrali možnost uvoza, kjer smo naložili obstoječe modele v formatih, kot je STL ali OBJ. Nato smo jih enostavno povlekli in spustili v delovno okolje Tinkercada (Slika 18).



*Slika 18: Modeli v Tinkercadu
(Lastni vir)*

Ko smo uvozili več objektov, smo dodatno uporabili tudi funkcijo »Align«, ki nam pomaga poravnati objekte med seboj. To nam omogoča natančno združevanje objektov, tako da so pravilno poravnani in povezani.



*Slika 19: Prikaz pozicioniranja in združevanja modelov
(Lastni vir)*

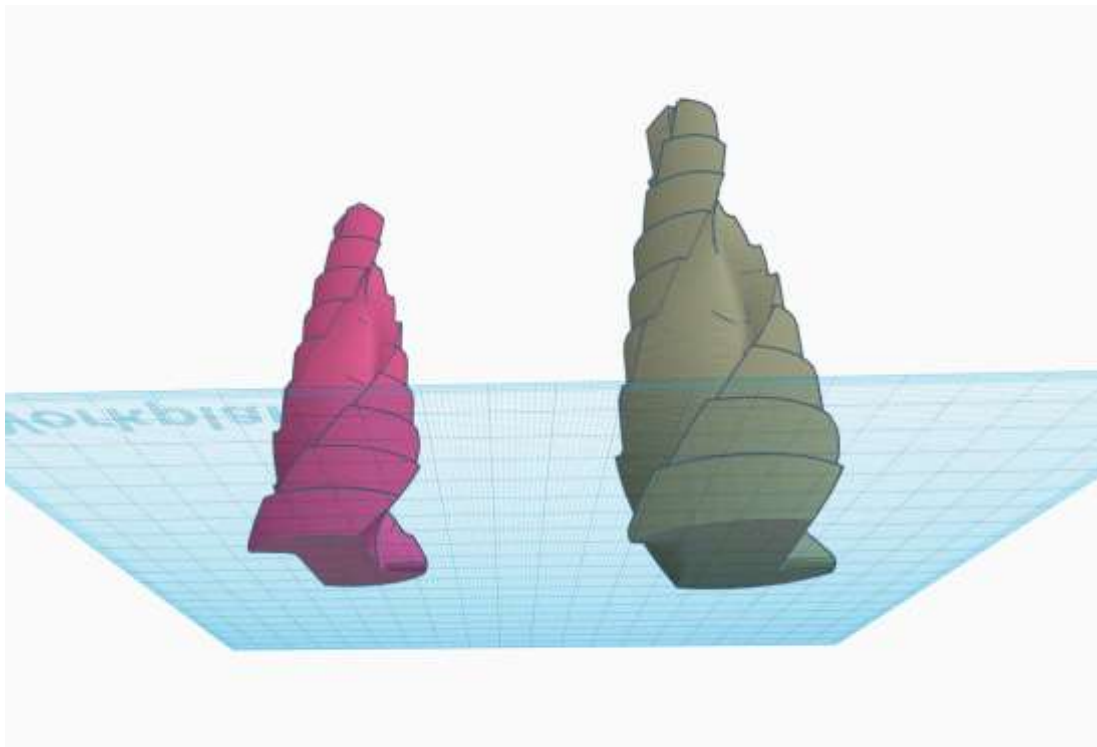
Uporabili smo funkcijo »Group«, ki nam omogoča združevanje več objektov v enega. Z izbiro več objektov hkrati in uporabo funkcije »Group« smo jih združili v en sam objekt, kar nam omogoča enostavno manipulacijo z združenim modelom.

Tinkercad smo uporabljali tudi za odstranitev vpenjalnega dela svedra iz več razlogov (Slika 20):

- Boljša adhezija: Ko se model tiska na ravno ploščo, ima večjo oprijemno površino, kar zagotavlja boljšo adhezijo in stabilnost med postopkom tiskanja. To zmanjšuje tveganje za premikanje ali deformacijo modela med tiskanjem.
- Manj podpornih struktur: Tiskanje na ravno ploho omogoča zmanjšanje ali celo odpravo potrebe po podpornih strukturah. Ker se model tiska na ravno podlago, ima večjo stabilnost med postopkom tiskanja in manjše tveganje za deformacijo. To omogoča tiskanje bolj zapletenih modelov brez potrebe po

podpornih strukturah, kar olajša postopek in zmanjšuje čas in trud za odstranjevanje podpor po tiskanju.

- Večja natančnost: S tiskanjem Sla na ravno površino se doseže večja natančnost pri izdelavi modela. Ploha deluje kot referenčna točka za tiskalnik, kar zagotavlja bolj natančno pozicioniranje in izdelavo bolj podrobnih in kompleksnih geometrij.

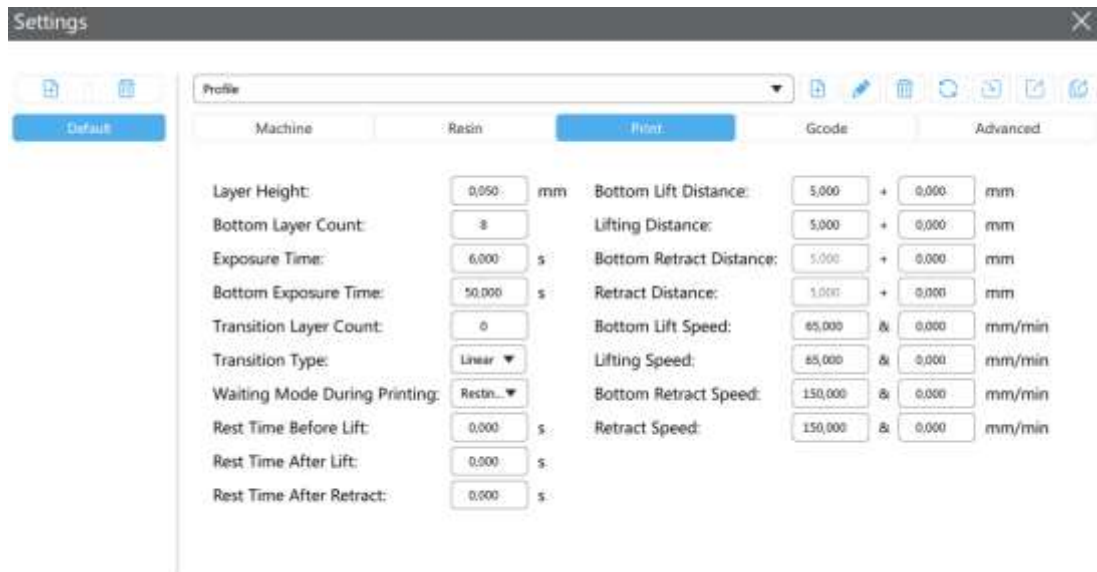


*Slika 20: Prikaz modela, pripravljenega za tisk
(Lastni vir)*

3.4 PRIPRAVA ZA TISK

Za pripravo izdelka za tisk se uporablja programska oprema, imenovana slicer. Eno izmed priljubljenih orodij je Chitubox. Slicerji so namenjeni pretvorbi 3D modelov v datoteke, ki jih lahko stroj razume in uporabi pri izdelavi končnega izdelka.

Chitubox je napreden in uporabniku prijazen program, ki omogoča enostavno pripravo modelov za uporabo v stereolitografiji. S pomočjo Chituboxa lahko uporabnik uvozi svoj 3D model, izbere ustrezne nastavitve za izdelavo (Slika 21), kot so hitrost tiskanja, ločljivost in debelina plasti, ter nato pretvori model v datoteko, ki je združljiva s tiskalnikom.

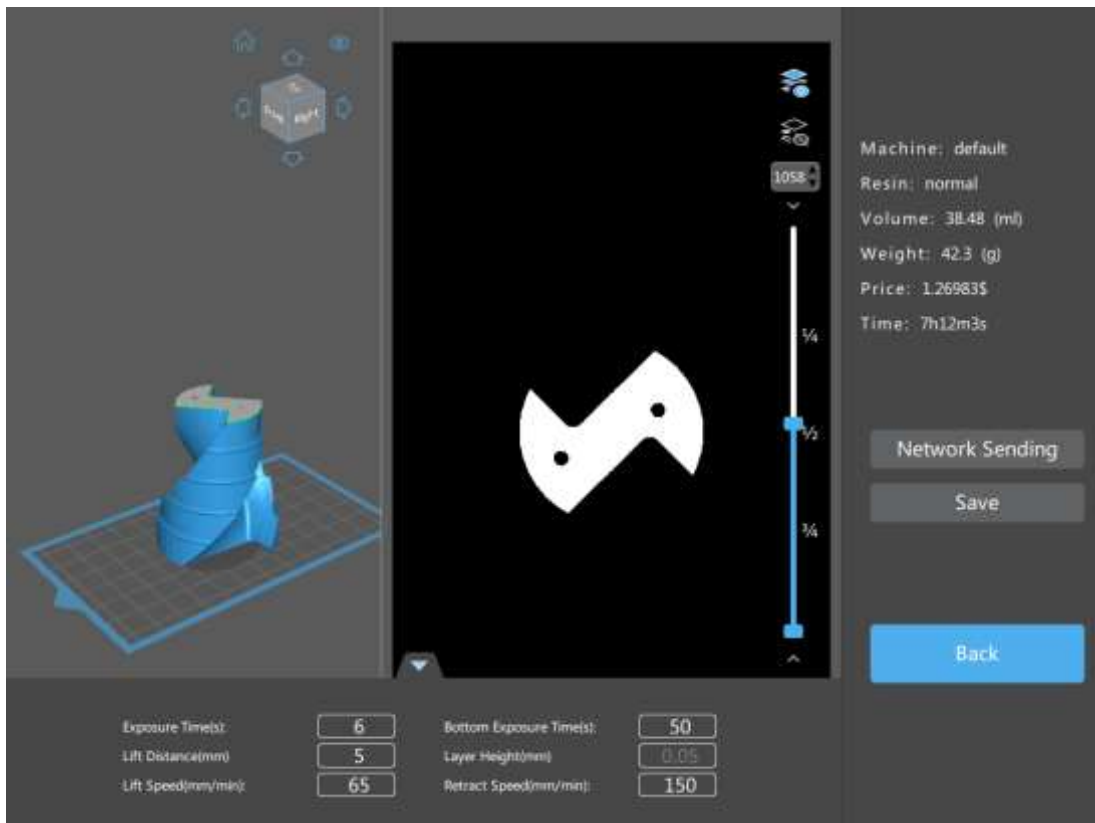


Slika 21: Parametri tiskanja
(Lastni vir)

Uporaba Chituboxa omogoča uporabnikom natančno nadzorovanje postopka izdelave, kar pripomore k dosegu želenih rezultatov. Program omogoča predogled plasti, kar omogoča, da se uporabnik prepriča o pravilni postavitvi modela in odkrije morebitne napake ali težave že pred tiskanjem (

Slika 22).

Chitubox se ponaša s številnimi funkcijami, ki olajšajo pripravo modelov, kot so podpora za različne vrste datotek, orodja za prilagajanje položaja in velikosti modela ter možnost dodajanja podpor za izdelavo kompleksnih geometrijskih oblik.



Slika 22: Pregled modela pred tiskom
(Lastni vir)

3.5 IZDELAVA KONČNEGA SVEDRA

Izdelek bo izdelan s pomočjo naprednega 3D tiskalnika, ki je podoben tiskalniku na Slika 23. S svojo napredno tehnologijo in z zmogljivimi funkcijami omogoča visoko kakovostne izdelke z izjemno natančnostjo in s podrobnostmi.

Ko je tiskalnik pripravljen, se začne sam postopek tiskanja. Tiskalna površina se skrbno pripravi, nato pa se s pomočjo visokotehnološkega sistema svetlobe plast za plastjo utrjuje izbrani material. Ta postopek zagotavlja izjemno natančnost in natančno reproducira vsako plast izdelka, kar vodi do visoke kakovosti končnega izdelka.



Slika 23: SLA tiskalnik
(Vir: Shop3D, 2023)

3.6 OBDELAVA PO TISKANJU

Po končanem tiskanju svedra s fotopolimerno smolo smo izvedli obdelavo izdelka. Ta postopek vključuje več korakov, ki jih je treba opraviti za doseg želenih končnih oblik in površinske kakovosti. Opis postopka obdelave izdelka po tiskanju s fotopolimerno smolo je naslednji:

1. Po končanem tiskanju odstranimo izdelek iz tiskalnika. Previdno ga odstranimo iz tiskalniške plošče ali platforme, pri tem pa pazimo, da ne poškodujemo občutljive površine izdelka.
2. Izdelek, ki je izpostavljen svetlobi med tiskanjem, lahko ima lepljivo površino. Za odstranitev nepolimerizirane smole s površine izdelka ga položimo v posodo z izopropilnim alkoholom ali drugim čistilnim sredstvom. Izdelek v čistilnem sredstvu nežno premikamo, da se smola raztopi in izpere s površine.
3. Po izpiranju izdelka v čistilnem sredstvu ga postavimo na stojalo ali podobno površino, da se odvečna tekočina odcedi. Pri tem pazimo, da se izdelek ne

dotika drugih površin ali predmetov, da se prepreči morebitno kontaminacijo ali poškodbe.

4. Izdelek postavimo na sončno svetlobo ali pod UV-lučko. Izpostavljenost svetlobi omogoča dokončno utrjevanje izdelka. Čas izpostavljenosti je odvisen od uporabljene fotopolimerne smole in priporočil proizvajalca. Med postopkom utrjevanja je pomembno, da izdelek postavimo na enakomerno svetlobo, da se doseže enakomerna polimerizacija po celotni površini.
5. Po končanem utrjevanju izdelka preverimo njegovo trdnost in kakovost. Preverimo, ali je izdelek dovolj utrjen in če je potrebno, ga lahko ponovno izpostavimo svetlobi za dodatno utrjevanje.
6. Po potrebi lahko izdelek dodatno obdelamo. To vključuje odstranjevanje podpornih struktur, brušenje ali poliranje površine za dosego želene končne teksture in oblike.
7. Na koncu preverimo končni izdelek in ga ocenimo glede na zahteve in specifikacije projekta. Če je potrebno, lahko nadaljujemo z nadaljnjo obdelavo ali uporabo izdelka v skladu z načrtovanim namenom.

Pri obdelavi izdelka po tiskanju s smolo je pomembno upoštevati varnostne ukrepe in priporočila proizvajalca glede uporabe in ravnanja s fotopolimerno smolo ter z drugimi kemikalijami, ki se uporabljajo pri čiščenju in obdelavi izdelka. Prav tako je priporočljivo upoštevati navodila za varno ravnanje z orodji in uporabo osebne zaščitne opreme, kot so rokavice in zaščitna očala.

Ko je izdelek izdelan v prozorni smoli, se v hladilne kanale vbrizga barva, da bodo bolj vidni.

4. ZAKLJUČEK

V sklopu diplomske naloge smo se osredotočili na raziskovanje in izvedbo inovativnih pristopov pri izdelavi orodij s pomočjo aditivnih tehnologij. Poseben poudarek smo namenili konstrukciji kompleksnih hladilnih kanalov, ki omogočajo učinkovito hlajenje med procesom oblikovanja.

V okviru našega dela smo izvedli praktičen eksperiment, kjer smo razvili in izdelali sveder s hladilnimi kanali. Cilj je bil oblikovati orodje, ki bi omogočalo učinkovito odvajanje toplote med vrtnanjem, s čimer bi se zmanjšala obraba in podaljšala življenjska doba svedra.

Za izdelavo smo uporabili aditivno tehnologijo, ki nam je omogočila natančno in kompleksno konstrukcijo hladilnih kanalov znotraj svedra. S tem smo dosegli boljše

hlajenje rezalnega dela svedra ter zmanjšali tveganje za pregrevanje in deformacije. Rezultati našega eksperimenta so pokazali, da je uporaba aditivnih tehnologij za izdelavo orodij s kompleksnimi hladilnimi kanali obetavna in lahko prispeva k izboljšanju učinkovitosti ter zmanjšanju stroškov v proizvodnem procesu.

Naša raziskava poudarja pomembnost uporabe aditivnih tehnologij pri izdelavi orodij z namenom optimizacije hlajenja in izboljšanja njihove funkcionalnosti. Hladilni kanali, ki jih lahko natančno oblikujemo s pomočjo aditivnih tehnologij, predstavljajo velik potencial za razvoj boljših in trajnejših orodij v različnih industrijah.

Ob zaključku lahko rečemo, da naše delo prispeva k napredku na področju izdelave orodij z aditivnimi tehnologijami in konstrukciji kompleksnih hladilnih kanalov. Nadaljnje raziskave in implementacija teh pristopov v industrijske procese bi lahko pripomoglo k izboljšanju učinkovitosti, trajnosti ter ekonomičnosti proizvodnje orodij.

5. LITERATURA IN VIRI

3daddfab. (2023). *The Objet Polyjet Process*. Pridobljeno 15. 2. 2023 z naslova <http://www.3daddfab.com/images/3D-Printing-Technology.jpg>.

Alabdullah, F. (2016). Fused Deposition Modeling (FDM) Mechanism. *International Journal of Scientific & Engineering Research*.

Amir Mostafaei, A. M. (2021). *Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges*.

Avoiding Warping: Effective Strategies For Reducing Warping In 3D Printing. (2023). Pridobljeno 18. 2. 2023 z naslova <https://www.openworldlearning.org/avoiding-warping-effective-strategies-for-reducing-warping-in-3d-printing/>

C. Y. Yap, C. K. (2015). *Review of selective laser melting: Materials and applications*.

Deloitte University Press. (2023). Pridobljeno 1. 6. 2023 z naslova DUPress.com.

ExOne. (b. l.). *What is Binder Jetting?* Pridobljeno 25. 2. 2023 z naslova <https://www.exone.com/en-US/Resources/case-studies/what-is-binder-jetting>.

Gibson I, R. D. (2010). *Additive Manufacturing Technologies*. New York: Springer Science.

Godec D, Š. M. (2015). *Aditivna proizvodnja*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje.

Markforged. (b. l.). Pridobljeno 15. 3. 2023 z naslova <https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-metals/metal-additive-manufacturing-introduction/types-of-3d-printing-metal>.

ISO. (2015). 52900.

ISO/ASTM 52900:2015 Additive Manufacturing. (b. l.).

IZIT. (2021). *Smernice za izbiro aditivnih tehnologij za izdelavo polimernih delov*. Pridobljeno 15. 4. 2023 z naslova <https://izit.hr/blog/smjernice-za-odabir-aditivne-tehnologije-za-izradu-polimernih-dijelova/>.

Duhovnik, J. I. D. (2017). *Modeliranje z značilkami na osnovi SolidWorks*. Fakulteta za strojništvo.

Lijie Grace Zhang, J. P. (2015). *3D Bioprinting and Nanotechnology in Tissue Engineering and Regenerative Medicine*.

Muck, T., & Križanovski, I. (2015). *3D tisk*. Ljubljana: Pasadena.

Nesma T. Aboulkhair, M. S. (2019). *3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting*.

Pilipović, A. (2012). *Vpliv proizvodnih parametrov na lastnosti prototipa polimera, doktorska disertacija.*

Spotlight. (b. l.). Pridobljeno 24. 4. 2023 z naslova <https://www.spotlightmetal.com/safety-in-laser-beam-melting-hazards-recommendations-for-action-a-875298/>.

Sculpteo. (2023). Pridobljeno 2. 6. 2023 z naslova 3D learning hub <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/create-3d-file/what-is-an-stl-file/>

Wald, R. M. (2017). *Laser Engineered Net Shaping Advances Additive Manufacturing and Repair. Welding Journal 86(1).* New York.

Wohlers, T. (2005). *Rapid prototyping, Tooling & Manufacturing State of the Industry.* INC: Wohlers Associates.

Wohlers, T., & Garnett, T. (2014). *History of additive manufacturing.* INC: Wohlers Associates.

Zhang, J. (2017).: *Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review. Journal of Materials Engineering and performance.*