

Razvoj ušne proteze prilagođene pacijentu s pomoću aditivne proizvodnje

Janječić, Veronika

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:053142>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-06**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Veronika Janječić

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

prof. dr. sc. Damir Godec, dipl. ing.

Student:

Veronika Janječić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Godec Damiru na susretljivosti i ukazanoj pomoći. Posebno se zahvaljujem Čusek Igoru, djelatniku tvrtke Teximp, na pomoći, suradnji i prenesenim znanjima tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Najviše se zahvaljujem svojoj obitelji, a posebno tati koji je s maksimalnim strpljenjem isprobavao svaki neuspjeli pokušaj izrade uzoraka.

Također se zahvaljujem prijateljima i kolegama s faksa na svakoj otkrivenoj skripti, zajedničkom kukanju i međusobnoj pomoći tijekom studiranja.

Veronika Janječić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-14/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **VERONIKA JANJEČIĆ** Mat. br.: 0035211726

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Razvoj ušne proteze prilagođene pacijentu s pomoću aditivne proizvodnje**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Development of the patient-tailored ear prosthesis with additive manufacturing**

Opis zadatka:

Medicina je područje u kojem primjena aditivne proizvodnje bilježi porast u primjeni. Prednost aditivne proizvodnje pri tome je prije svega u mogućnosti izrade vrlo kompleksnih, individualiziranih (prilagođenih) proizvoda po mjeri pacijenta, a sve bez značajnog produljenja u vremenu razvoja i proizvodnje, te bez značajnog povećanja troškova proizvodnje. Jedno od područja medicine s intenzivnom primjenom aditivne proizvodnje je proizvodnja medicinskih uređaja (implantata, proteza, ortoza, kirurških pomagala, ...), dok se intenzivno istražuju mogućnosti i bio-ispisa s pomoću aditivnih tehnologija (izrada bio-tkiva).

U okviru diplomskog rada potrebno je:

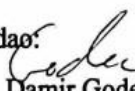
- 1) Načiniti pregled mogućnosti izrade medicinskih proteza prilagođenih pacijentu s posebnim osvrtom na proteze uha pacijenta.
- 2) Načiniti pregled mogućnosti izrade uha pacijenta s pomoću bio-ispisa primjenom aditivnih tehnologija. Sistematizirati dostupne materijale i tehnologije.
- 3) Načiniti pregled aditivnih tehnologija koje omogućuju izradu proteza uha kao i tehnologija koje omogućuju bio-ispis tkiva koje odgovara tkivu uha.
- 4) Na konkretnom primjeru razviti protezu uha prilagođenu pacijentu te definirati sve potrebne korake unutar procesa razvoja i proizvodnje.
- 5) Donijeti zaključke o dobivenim rezultatima.

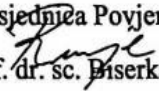
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
29. rujna 2022.

Rok predaje rada:
1. prosinca 2022.

Predviđeni datum obrane:
12. prosinca do 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Damir Godec

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA.....	III
POPIS OZNAKA.....	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY.....	VIII
1. UVOD	1
2. ADITIVNA PROIZVODNJA.....	2
2.1. Povijesni razvoj aditivne tehnologije	3
2.2. Faze izrade proizvoda.....	5
2.3. Podjela aditivnih tehnologija.....	7
2.3.1. Taložno očvršćivanje (FDM)	7
2.3.2. Laminiranje (LOM).....	9
2.3.3. Stereolitografija (SLA).....	10
2.3.4. Očvršćivanja digitalno obrađenim signalom (DLP).....	11
2.3.5. Polyjet.....	12
2.3.6. Selektivno lasersko očvršćivanje (SLS).....	13
2.3.7. 3D tiskanje (3DP).....	14
3. PRIMJENA ADITIVNE PROIZVODNJE	15
3.1. PRIMJENA ADITIVNE PROIZVODNJE U MEDICINI.....	16
3.1.1. Praktični modeli	18
3.1.2. Implantati	19
3.1.3. Kalupi i alati	20
3.1.4. Medicinska pomagala (proteze)	21
3.1.5. Biomedicina	22
3.2. Aditivna proizvodnja kod ušnih korekcija	24
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	27
4.1. 3D skeniranje.....	28
4.2. Stvaranje STL datoteke i modeliranje uzorka	33
4.3. Izrada uzorka FDM metodom	39

4.4. Modeliranje kalupa.....	43
4.5. Izrada kalupa FDM metodom	44
4.6. Lijevanje silikona u kalup	47
5. ZAKLJUČAK	49
6. LITERATURA.....	50

POPIS SLIKA

Slika 1. Sistematizacija AM procesa [2]	2
Slika 2. Faze izrade AM postupcima [2].....	5
Slika 3. Primjer konverzije iz CAD modela (lijevo) u STL datoteku (desno) [1]	6
Slika 4. FDM postupak [5].....	8
Slika 5. Primjer izrade FDM postupkom; tijekom izrade s potpornom strukturom (lijevo) i nakon izrade kada je uklonjena potporna struktura (desno) [1]	8
Slika 6. LOM postupak [1].....	9
Slika 7. SLA postupak [6].....	10
Slika 8. DLP postupak [1].....	11
Slika 9. Polyjet postupak [6]	12
Slika 10. SLS postupak [1].....	13
Slika 11. 3DP postupak [1]	14
Slika 12. Područja primjene aditivne proizvodnje [7].....	15
Slika 13. Usporedba angiograma (A) i aditivno proizvedenog modela (B) [9]	18
Slika 14. Strelica na slikama prikazuje anomaliju srčanih zaliska: TEE snimak (A); intraoperativno vidljiv zalistak (B); 3D rekonstrukcija srca (C); stereolitografski model (D) [10]	19
Slika 15. Zubna proteza - implantat [11].....	20
Slika 16. Keramički kalup i odljevak [12]	20
Slika 17. Medicinski alati izrađeni od FlexSLw smolom pomoću stereolitografije [13]	21
Slika 18. Proteza izrađena od 316L nehrđajućeg čelika (lijevo) i legure kroma i kobalta (desno) [14]	22
Slika 19. Koraci konstruiranja skele: a) blok skela, b) dimenzije diska, c) preklapanje skela i diska, d) finalna struktura [15]	23
Slika 20. Očrtane konture (lijevo), dijelovi rebra (sredina), složena kontura uha (desno) [16]	24
Slika 21. Primjena praktičnih modela kod operacije uha [17]	25
Slika 22. Razlika zrcalnog modela dobivenog AM postupkom (lijevo) i gipsanog (desno) [18]	26
Slika 23. Model uške od epoksi smole [19]	26
Slika 24. iReal 2E skener [20].....	29
Slika 25. Vidljiva razlika između lijevog i desnog uha.....	30

Slika 26. 3D skeniranje	31
Slika 27. Dobiveni sken glave.....	32
Slika 28. Zrcaljeno lijevo uho	33
Slika 29. Preklapanje desne uške i zrcaljene lijeve.....	34
Slika 30. Desna uška sa izrezanim komadićem.....	34
Slika 31. Prednja i stražnja strana glinenog uzorka	35
Slika 32. Uzorak broj 2	36
Slika 33. Uzorak broj 2 montiran na uho	36
Slika 34. 3D skeniranje uzorka broj 3	37
Slika 35. Zasebna tri skena uzorka.....	37
Slika 36. Preklopljena tri skenirana uzorka.....	38
Slika 37. Izvorna (lijevo) i uređena STL datoteka (desno)	38
Slika 38. Prusa i3 MK3S+ [21]	39
Slika 39. Poprečni presjek uzorka za ispis	40
Slika 40. Parametri obrade uzorka	41
Slika 41. Dobiveni ispisani uzorak (gore) u sporedbi sa uzorkom od gline (dolje).....	42
Slika 42. Pripajanje uzorka na uho.....	42
Slika 43. Modelirani kalup	43
Slika 44. Poprečni presjek kalupa za ispis	44
Slika 45. Kalup kvalitete obrade 0,07 mm	45
Slika 46. Kalup kvalitete obrade 0,05 mm	45
Slika 47. Ispisani kalup	46
Slika 48. Silikon korišten za lijevanje	47
Slika 49. Izliven komad (lijevo) i pričvršćen na uho (desno)	48

POPIS OZNAKA

Kratica	Značenje
AM	Aditivna proizvodnja (e. Additive Manufacturing)
LAM	Laserska aditivna proizvodnja (e. Laser Additive Manufacturing)
RM	Brza izrada (e. Rapid Manufacturing)
RP	Brza izrada prototipova (e. Rapid Prototyping)
RT	Brza izrada alata (e. Rapid Tooling)
DLP	Očvrščivanje digitalno obrađenim signalom (e. Direct Light Processing)
FDM	Taložno očvrščivanje (e. Fused Deposition Modeling)
LOM	Laminiranje (e. Laminated Object Manufacturing)
SGC	Tonografija (e. Solid Ground Curing)
SL/SLA	Stereolitografija (e. Stereolithography)
SLM	Selektivno lasersko srašćivanje metala (e. Selectiv Laser Melting)
SLS	Selektivno lasersko srašćivanje (e. Selective Laser Sintering)
3DP	3D tiskanje (e. 3D Printing)
ABS	Akilonitril butadien stiren
ATZ	Aluminij kaljeni cirkonij
HA	Hidroksiapatit
PA	Poliamid
PC	Polikarbonat
PCL	Poliaprolakton
PDLLA	Poli (DL-mliječna kiselina)

PEEK	Polietilenketon
PLA	Polimljična kiselina
PLGA	Polilaktična-ko-glikolna kiselina
PMMA	Poli(metil-metakrilat)
PP	Polipropilen
PS	Polistiren
PVC	Polivinil klorid
PVS	Polivinil siloksan
TCP	Trikalcij – fosfat
3D	Trodimenzionalno
AMF	Format datoteke aditivne proizvodnje (e. Additive Manufacturing File Format)
CAD	Oblikovanje s pomočjo računalna (e. Computer Aided Design)
STL	STL datoteka (e. Standard Tessellation Language)
CT	Računalna tomografija (e. Computed tomography)
MR	Magnetska rezonanca (e. Magnetic Resonance)
TEE	Transesozofagealna ehokardiografija (e. Transesophageal Echocardiography)

SAŽETAK

Ovim radom prikazana je mogućnost izrade proteze nadomjeska uha primjenom aditivne proizvodnje. Model nadomjeska uha dobiven je 3D skeniranjem suprotne uške, preslikavanja na suprotnu stranu i modeliranja unutar *Geomagic Design* programa. Prvotno su tehnologijom očvršćivanja taloženjem (FDM) izrađena dva prototipa od polimljične kiseline (PLA). Prema drugom prototipu modeliran je kalup te izrađen istom tehnologijom i materijalom. Za potrebe diplomskog rada u kalup je izliven silikon za kalupe i dobiven primjer moguće izrade proteze uha ovim postupkom.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja, medicina, proteza uha

SUMMARY

This paper presents the possibility of making an ear replacement prosthesis using additive manufacturing. The ear prosthesis model was obtained by 3D scanning of the opposite ear, mapping to the opposite side and modeling within the *Geomagic Design* program. Initially, two prototypes were made from polylactic acid (PLA) using fused deposition modeling (FDM). According to the second prototype, the mold was modeled and made with the same technology and material. For the purposes of the graduation thesis, silicone for molds was poured into the mold and an example of the possible production of an ear prosthesis using this process was obtained.

Key words: additive manufacturing, medicine, prosthetic ear

1. UVOD

Od same pojave aditivnih tehnologija u industriji, kasnih 80-ih, njihov razvoj i primjena šire se brzim tempom. U počecima je primjena bila u strojogradnji, no s vremenom sve više počinje njihova primjena i u drugim granama kao što su autoindustrija, zrakoplovna industrija, elektronika, medicina i razne druge.

Kada je 2006. godine prvi put primijenjena brza proizvodnja zubnih implantata i proteza, u medicini se narednih godina bilježio veliki utjecaj aditivnih tehnologija. Počinju se razvijati uređaji koji imaju mogućnost ispisa medicinskih materijala pa čak i bioispisa – materijala koji zamjenjuju strukturu koštanog tkiva.

U ovom radu bit će prikazana moguća primjena aditivne proizvodnje u izradi proteza za uho. Proteza za uho služi kako bi se zaštili slušni kanali i samog osjećaja nelagode izazvanog raznim nečistoćama u uhu. Primjenom aditivne tehnologije proces izrade se uvelike ubrzava i nisu potrebni dodatni operativni zahvati. Proteze uha rade se na način da se prvotno dobije model prema kojem će se modelirati i izrađivati kalup. Ti modeli mogu se dobiti računalnom tomografijom (CT), magnetskom rezonancom (MR) ili 3D skeniranjem. Za ovaj rad korišten je najmanje štetan način, a to je 3D skeniranje, kojim se osoba ne podvrgava nikakvom zračenju.

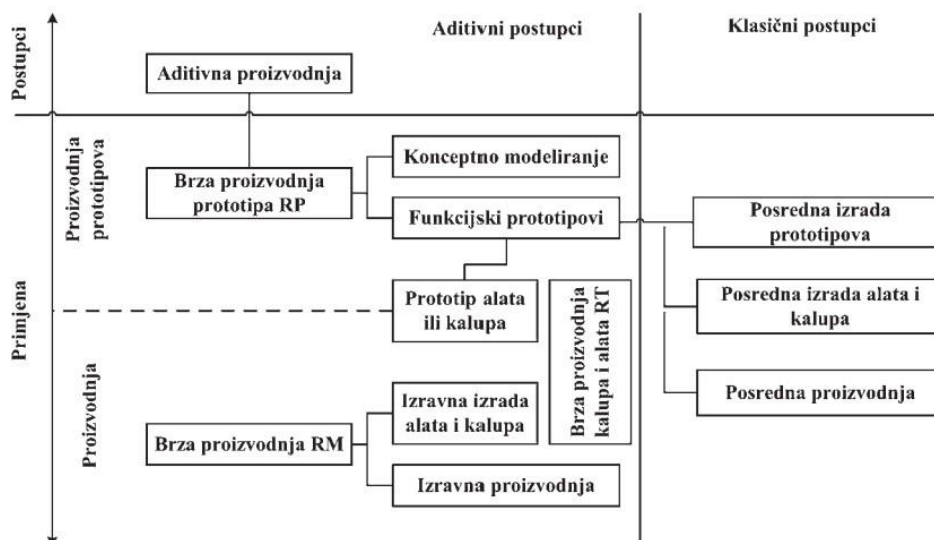
Dobiveni model izrađen je tehnologijom očvršćivanja taloženjem (FDM) koja omogućuje isprobavanje i korištenje prototipa odmah nakon ispisa. Ukoliko i prototipovi ne odgovaraju iz prve, unutar *Geomagic Design* programa se vrlo lako naprave preinake te se ponovno puštaju u ispis. Prema zadovoljavajućem prototipu, modeliran je kalup te također izrađen FDM tehnologijom u samo nekoliko sati. Kasnije se u kalup lijeva silikon koji je nakon sušenja spreman za primjenu kao proteza za uho.

Aditivni postupci današnjici omogućuju brzo i često jeftinije izrađivanje prototipova ili gotovih proizvoda od konvencionalnih metoda. Posebni utjecaj imaju u medicini gdje je za pacijente svaka minuta značajna, a aditivnim postupcima je vrijeme čekanja znatno smanjeno.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

Aditivna proizvodnja (e. *Additive Manufacturing, AM*) je proizvodni proces koji se temelji na slojevitoj izradi trodimenzionalnih dijelova relativno komplicirane geometrije izravno iz računalnog 3D modela. Sinonim koji se u današnjici češće koristi je 3D ispis. Sistematizacija aditivnih postupaka prikazana je na slici 1. Aditivna proizvodnja može podijeliti na postupke:

- brze izrade prototipova (e. *Rapid prototyping, RP*) – relativno brza izrada/ proizvodnja 3D prototipova izravno na temelju CAD modela
- brzu proizvodnju (e. *Rapid manufacturing, RM*) – izravna proizvodnja konačnog proizvoda primjenom AM procesa, koja obuhvaća i brzu proizvodnju kalupa i alata (e. *Rapid tooling, RT*) – relativno brza proizvodnja čitavih ili dijelova alata/ kalupa [1].



Slika 1. Sistematizacija AM procesa [2]

Prednost aditivne proizvodnje u odnosu na druge postupke prerade materijala je što ne zahtjeva posebno dizajnirane alate za obradu, izradu kalupa, specifičnu opremu za rad itd. Tijekom procesa razvoja proizvoda moguće je provjeriti uporabna svojstva proizvoda, potencijalni problemi se mogu riješiti u ranim fazama razvoja proizvoda ili alata/ kalupa te otklanjati greške, omogućeno je više iteracija tijekom razvoja što uvelike utječe na vrijeme ciklusa, a samim time su izbjegnuti neplanirani troškovi. Nedostatak je što svojstva proizvoda kao što su; mehanička svojstva, kvaliteta površine, atmosferska postojanost, nisu postigla razinu koja se dobiva drugim postupcima izrade.

2.1. Povijesni razvoj aditivne tehnologije

Prva industrijska primjena ove tehnologije realizirana je 1987. godine, u sklopu tvrtke 3D Systems (SAD), gdje je predstavljen uređaj za postupak stereolitografije (e. *Stereolithography, SL/SLA*). Postupak je omogućivao očvršćivanje kapljevitoz fotopolimera osjetljivog na djelovanje ultraljubičastog zračenja u tankim slojevima s pomoću lasera. [3]

Godine 1988., 3D Systems zajedno s partnerom Ciba–Geigy razvijaju i komercijaliziraju prvu generaciju akrilnih smola korištenih za proces stereolitografije. Po uzoru na SAD, kroz 1988. i 1989. godinu, u Japanu unutar tvrtke NTT Dana CMET, razvija se postupak stereolitografije gdje se po prvi puta koriste epoksidne smole. [3]

Početak 90-ih uz SLA tehnologiju, komercijalizirane su tri nove tehnologije: postupak očvršćivanja taloženjem (*Fused deposition modeling, FDM*), tonografija (e. *Solid Ground Curing, SGC*) i laminiranje (e. *Laminated object manufacturing, LOM*). FDM se temelji na ekstrudiranju i taloženju rastaljenog plastomernog materijala, SGC koristi kapljevite polimere osjetljive na UV zračenje, dok LOM postupak povezuje i razrezuje materijale s pomoću računalno upravljane laserske zrake. Također se javlja i novi postupak selektivnog laserskog srašćivanja (e. *Selective Laser Sintering, SLS*) gdje se praškasti materijal spaja djelovanjem topline lasera. [3]

U SAD-u se 1996. godine, unutar firme Z Corporation, razvio pisač za konceptijsko modeliranje koji se temeljio na MIT postupku 3D tiskanja prototipova od škroba, gipsa u obliku praška te kapljevitoz veziva. Iste godine tvrtka Schroff Development počinje s prodajom sustava za laminiranje papira te se unutar BPM Technology komercijalizira korištenje taloženja voštanih materijala pomoću inkjet glave pisača – balističko oblikovanje. [3]

Ideja o 3D ispisu metalnih materijala javila se tijekom 1997. godine u sklopu AeroMeta razvitkom procesa laserske aditivne proizvodnje (e. *Laser Additive Manufacturing, LAM*) koji se temeljio na sljepljivanju titanskih legura s pomoću visoko naponskog lasera. Proizvodili su dijelove za zrakoplovnu industriju dok tvrtka nije zatvorena osam godina kasnije. U travnju 1999. godine proizveden je ProMetal RTS-300, stroj koji je temeljen na MIT postupku s inkjet glavom za 3D ispis metala, unutar Extrude Hone (SAD). Te godine Fockele&Schwartz (Njemačka) predstavlja svoj prvi sustav temeljen na selektivnom laserskom taljenju metalnog praža (e. *Selective Laser Melting, SLM*). [3]

Kako su se AM postupci komercijalizirali na tržište, narednih godina radilo se na stvaranju novih materijala te izradi strojeva za određene tehnologije. Početkom 2000-tih godina razvili su se strojevi za ispis voska, izrađen je prvi komercijalni printer u boji, razvijena je stereolitografska tehnologija korištenja ne tekućih foto osjetljivih materijala koji koriste materijale kao što su keramika, metali i različite vrste kompozitnih materijala u obliku paste.

Ovaj kratki povijesni osvrt na same početke uvođenja aditivnih tehnologija pokazuje koliko se brzo razvijala tijekom godina te je u siječnju 2009. godine osnovana međunarodna komisija ASTM Committee F42 za aditivnu tehnologiju. Osnovana je između tadašnjih 70 članica diljem svijeta i stvorena kako bi se postavili standardi za kontrolu, procese, materijale, konstrukciju (uključujući i oblike formata datoteka) te terminologiju. Te se godine, prema normi *ASTM F42*, službeno se uvažava naziv aditivna proizvodnja (Additive Manufacturing) i njena definicija glasi: „Aditivna proizvodnja je proces spajanja materijala za izradu modela izravno iz 3D modela, obično tehnikom sloj po sloj, za razliku od suptraktivne proizvodnje i formativne proizvodne metodologije.“ [4]

U rujnu 2011. godine, ASTM F42 i ISO/TC 261 potpisuju sporazum o suradnji dviju organizacija i zajedničkom sudjelovanju u razvoju međunarodnih normi na globalnom tržištu u području aditivne proizvodnje. Time je postavljena standardizacija AM procesa u tri razine; generalni AM standardi (koncepti, zahtjevi i primjene), kategorija AM standarda (kategorija materijala i procesa) te specifični AM standardi (pojednosti o materijalima, procesima i primjeni). [4]

2.2. Faze izrade proizvoda

Faze izrade proizvoda su uvijek iste (slika 2), neovisno o primijenjenom postupku [1]:

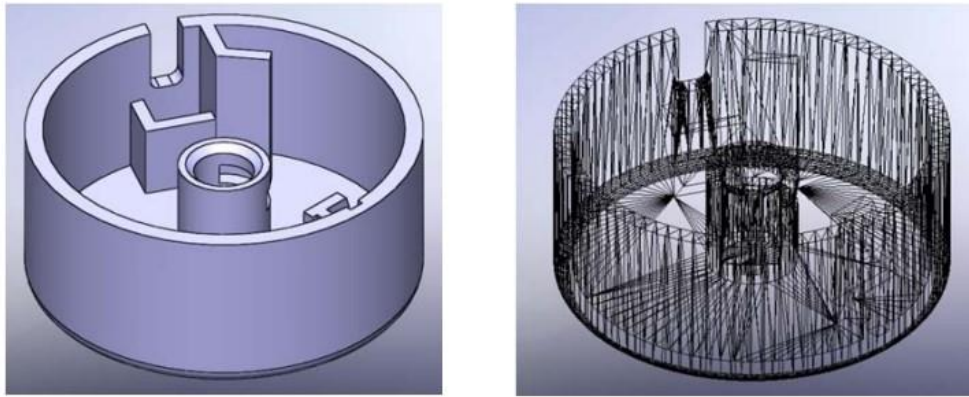
- generiranje CAD model (konstruiranje, skeniranje..)
- konverzija CAD modela u STL datoteku i rezanje u slojeve
- transfer STL datoteke za uređaj za AM
- podešavanje parametara AM uređaja
- izrada/proizvodnja prototipa/proizvoda
- uklanjanje prototipa/proizvoda iz AM uređaja
- dodatna obrada (ukoliko je potrebna)
- primjena prototipa/proizvoda.



Slika 2. Faze izrade AM postupcima [2]

Trodimenzionalni geometrijski model može se dobiti skeniranjem određenog objekta ili konstruiranjem u nekom od CAD programa. Svaki se taj generirani model može spremi u datoteke različitih formata, ali od samih početaka uvažava se STL datoteka (e. *Standard Tessellation Language*), gdje je model mreža povezanih trokuta, vidljivo na slici 3.

Čest je slučaj da modeli ne ispadnu željene točnosti ili kvalitete. kada STL datoteka nema dobru razlučivost – što je veći broj trokuta, to je bolja razlučivost i točnost modela. Kako je STL datoteka koja ne sadržava podatke o boji, materijalu ili orijentaciji nije u potpunosti zadovoljavajući oblik spremanja datoteke.



Slika 3. Primjer konverzije iz CAD modela (lijevo) u STL datoteku (desno) [1]

Godine 2009. uvodi se AMF datoteka (e. *Additive Manufacturing File Format*) koja modele predstavlja kao objekte raspoređene u grupu volumena koji se ne sijeku definirani mrežom trokuta te čini osnovu za rezanje u slojeve. Za razliku od STL, AMF datoteka sadrži podatke o boji i materijalu svakog volumena ili trokuta zasebno. Nakon prebacivanja STL datoteke na AM stroj, podešavaju se parametri kao što su debljina sloja, orijentacija proizvoda o kojoj ovise kvaliteta površine i anizotropija svojstava, dimenzijska točnost, baza, potporna struktura te zračnost između pomičnih dijelova, a isto tako vrlo važno čvrstoća i brzina izrade prototipa/proizvoda. Prototipove je moguće ispisati, ovisno koja se tehnologija koristi, kao vektorske procese, rasterske procese ili procese s maskom. Na kraju izrade, proizvod je potrebno ukloniti iz stroja, ali treba paziti da je temperatura radnog prostora stroja dovoljno niska za sigurno rukovanje. Nekada je potrebna naknadna obrada u slučaju da se potporna struktura zalijepi na dio proizvoda ili je potrebno obraditi površinu do određene kvalitete.

2.3. Podjela aditivnih tehnologija

Tehnologije aditivne proizvodnje mogu se podijeliti na postupke koji upotrebljavaju materijal u čvrstom stanju (žice, folije, papir), kapljevinu ili prah. Materijal u čvrstom stanju primjenjuje se kod *taložnog očvršćivanja* (e. *Fused Deposition Modeling, FDM*) i *proizvodnje laminiranih objekata* (e. *Laminated Object Manufacturing, LOM*). Kapljevinu se primjenjuje kod *stereolitografije* (e. *Stereolithography, SLA*), *očvršćivanja digitalno obrađenim signalom* (e. *Digital Light Processing, DLP*) te kod *Polyjet-a*, a postupci koji koriste prah su *selektivno lasersko očvršćivanje* (e. *Selective Laser Sintering, SLS*) i *3D tiskanje* (e. *3D Printing, 3DP*).

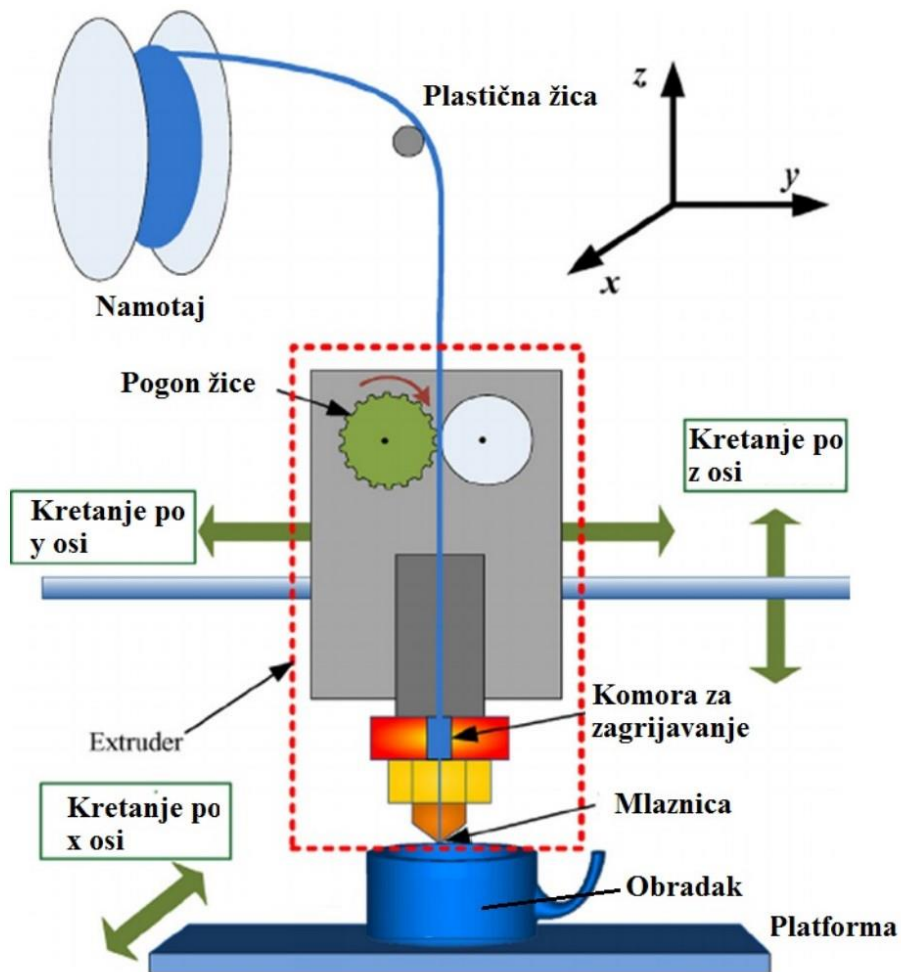
Najčešće se pri aditivnim postupcima upotrebljavaju polimerni materijali kao što su akrilonitril/butadien/stiren (ABS), poliamid (PA), polikarbonat (PC), poli(metil-metakrilat) (PMMA), poli(vinil-klorid) (PVC), poliuretani, epoksidne smole, ali i čelik, aluminij, titan i druge lake legure. Za izbor materijala najvažniji su čimbenici: mehanička svojstva i pogodnost za korištenje kao završne tvorevine, jednostavnost završne obrade, niža cijena materijala i olakšano rukovanje te skladištenje materijala. [2]

2.3.1. Taložno očvršćivanje (FDM)

FDM postupak temelji se na ekstrudiranju materijala namotanog na kolut koji se pomoću mehanizma za dobavu (pogona žice), preko komore za zagrijavanje dovodi do mlaznice gdje se taloži rastaljeni materijal na radnu platformu (slika 4). Točnost koja se postiže ovim postupkom je debljina sloja do 0,1 mm što odgovara najmanjem promjeru mlaznice.

Karakteristike FDM postupka [1]:

- materijali: vosak, PA, PLA, ABS, PS, PVC, keramika, metali, kompoziti..
- točnost izrade tj. debljina sloja je minimalna 0,1 mm
- uređaji za ovaj postupak su jednostavni za uporabu te je lako održavanje, također su jedni od jeftinijih na tržištu i nije potrebno veliko investiranje
- taloženje materijala moguće samo u X-Y ravnini
- ovisno o geometriji proizvoda potrebna je potporna struktura
- postoji mogućnost odvajanja obratka od radne podloge
- zbog lošije točnosti izrade, vidljiv je stepeničasti efekt na vanjskim konturama te je kvaliteta površine niža od postupaka koji koriste materijale u obliku kapljevine.



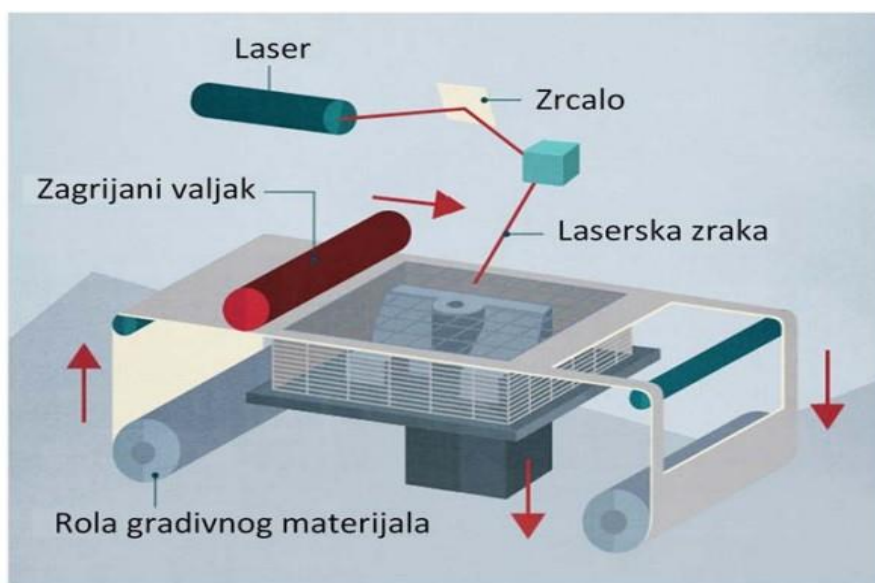
Slika 4. FDM postupak [5]



Slika 5. Primjer izrade FDM postupkom; tijekom izrade s potpornom strukturom (lijevo) i nakon izrade kada je uklonjena potporna struktura (desno) [1]

2.3.2. Laminiranje (LOM)

Kada je postavljen prvi sloj materijala preko radne platforme, s pomoću CO₂ lasera izrezuje se površina koja odgovara najdonjem sloju budućeg proizvoda. Zatim se platforma pomiče prema dolje (u smjeru Z osi) za debljinu slijedećeg sloja. Neiskorišteni materijal se s pomoću valjaka prevlači preko radne podloge te laser izrezuje površinu koja će odgovarati idućem sloju. Nakon izrezivanja zagrijani valjak prelazi preko podloge kako bi se ostvarilo sljepljivanje dva sloja. Ponovno se platforma pomiče prema dolje, prevlači se novi sloj materijala, izrezuje i sljepljuje sve dok proizvod nije gotov (slika 6).



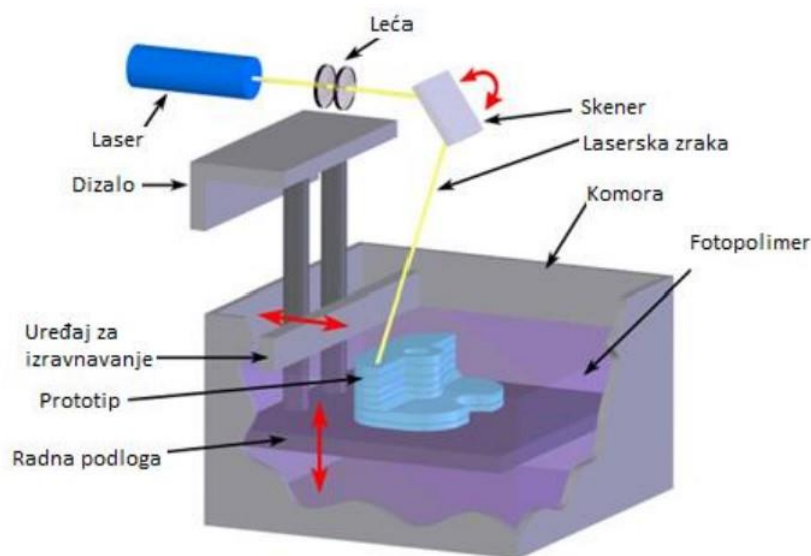
Slika 6. LOM postupak [1]

Karakteristike LOM postupka [1]:

- materijali: PVC, poliester, papir, metalna folija, keramika (kompoziti)
- točnost do 0,05 mm
- prednost ekonomičnog postupka zbog velike brzine izrade i određenog gradivnog materijala (npr. papir)
- nije potrebna potporna struktura
- visoka točnost laminiranih dijelova
- neotrovni materijali
- nedostatak su loša mehanička svojstva i nehomogenost proizvoda
- veliki postotak neiskorištenog materijala, a nije ga moguće reciklirati
- mogu se javiti oštećenja proizvoda pri uklanjanju viška materijala.

2.3.3. Stereolitografija (SLA)

Unutar komore ispunjene kapljevitim fotopolimerom nalazi se radna podloga koja ostvaruje pomak u negativnom smjeru Z osi. Radna podloga uronjena je u fotopolimer do one razine koja odgovara debljini sloja te se pomoću uređaja za niveliranje poravnava kako bi se na cijeloj površini podloge nalazila jednaka debljina materijala. Preko lasera i skenera, zraka obasjava kapljeviti materijal u konturama proizvoda, čime se ostvaruje prvi sloj proizvoda. Potom se radna podloga spušta po Z osi za debljinu idućeg sloja, koji se poravnava uređajem za niveliranje, a zatim obasjava zrakom koja ga očvršćuje. Ovaj se postupak ponavlja sve do dobivenog gotovog proizvoda (slika 7).



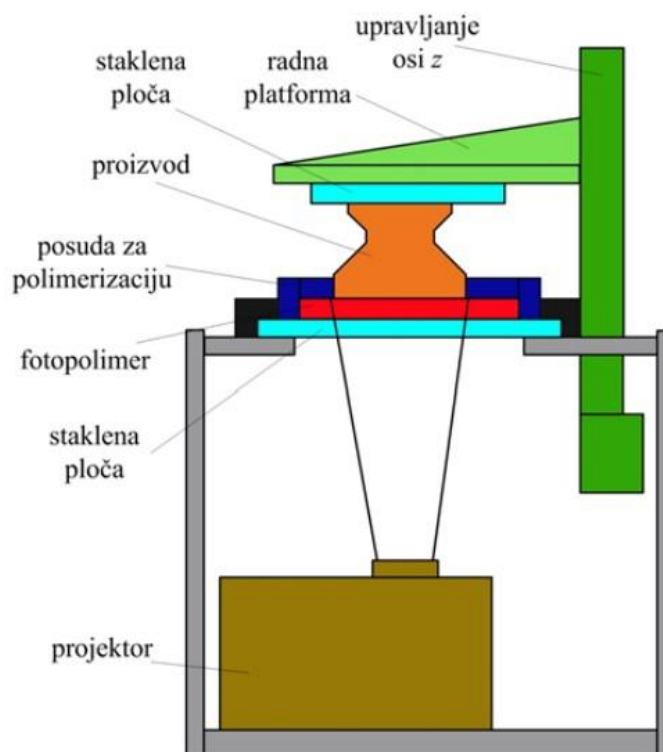
Slika 7. SLA postupak [6]

Karakteristike SLA postupka [1]:

- materijali: epoksidi, akrilati, vinili (smole)
- debljina sloja minimalnih 0,05 mm
- visoka kvaliteta površine i razlučivost detalja te visoka točnost
- moguće višebojno i višekomponentno tiskanje
- hrapavost površine do 1 mikrometra
- izrada moguća samo u x-y ravnini
- potrebna potporna struktura
- materijali osjetljivi na laser su otrovni
- spor proces, a zahtjeva visoke troškove materijala i održavanja.

2.3.4. Očvršćivanje digitalno obrađenim signalom (DLP)

DLP postupak, kao i SLA, koristi fotopolimer koji pod djelovanjem zrake projektora očvrstne. Sloj materijala prekiva staklenu ploču preko koje, s donje strane, svjetlost projektora dolazi do materijala. Kada je sloj očvrstnut, radna platforma se pomiče u pozitivnom smjeru z osi za debljinu sloja (slika 8). Na taj način dobivaju se proizvodi koji su okrenuti naopako.



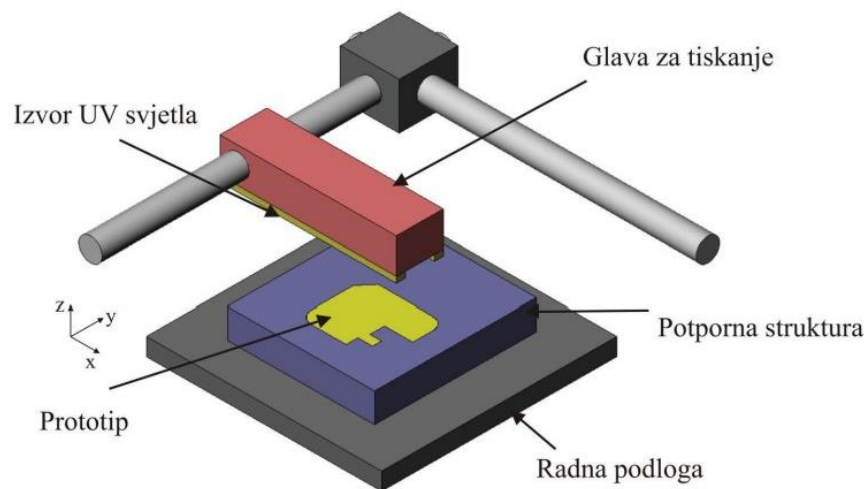
Slika 8. DLP postupak [1]

Karakteristike DLP postupka [1]:

- materijali: akrilne smole u obliku kapljevine
- debljina sloja do 0,02 mm
- postupak moguć samo u x-y ravnini
- mogućnost dobivanja više proizvoda odjednom
- potrebna minimalna potporna struktura
- izrada mirko i velikih dijelova
- za razliku od SLA nije potrebno poravnanje materijala.

2.3.5. Polyjet

Kapljeviti materijal nanosi se zajedno s potpornom strukturom na radnu podlogu pomoću mlaznice. Nanosom materijala, pod utjecajem UV zraka dolazi do očvršćivanja materijala, a završetkom zračenja podloga se pomiče u negativnom smjeru z osi (dolje) za debljinu idućeg sloja te se postupak ponavlja kao i kod dosadašnjih postupaka.



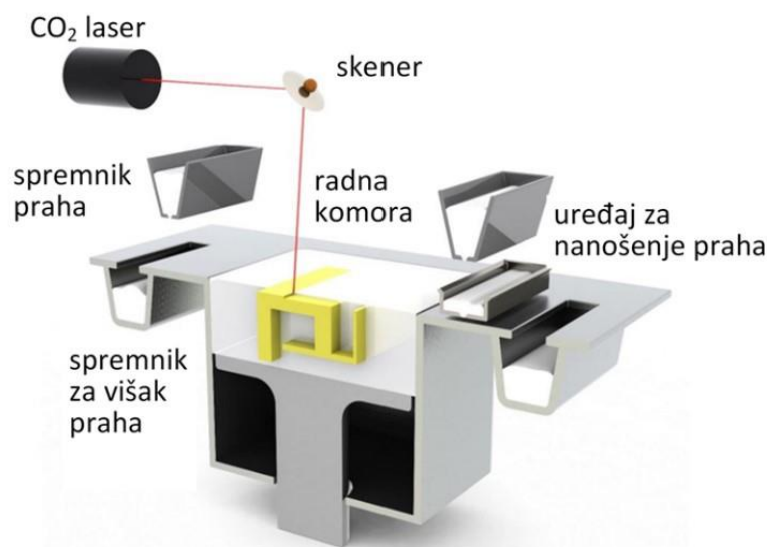
Slika 9. Polyjet postupak [6]

Karakteristike polyjet postupka [1]:

- materijali: foto-osjetljive akrilne smole u kapljevitom stanju
- debljina sloja do 0,014 mm, što ga čini najtočnijim postupkom
- moguća izrada proizvoda samo u x-y ravnini
- moguća je izrada više proizvoda istovremeno
- potrebna je potporna struktura
- kombinacija 3D tiskanja i mikro glodanja
- skupi materijali
- višebojna izrada modela (puna skala boje).

2.3.6. *Selektivno lasersko očvršćivanje (SLS)*

SLS postupak temelji se srašćivanju praškastih materijala pomoću CO₂ lasera. Uređaj za nanošenje praha postavlja sloj materijala na radnu podlogu koja se nalazi u temperiranoj komori ispunjenoj inertnim plinom. Taj se sloj praškastog materijala skenira laserom čineći konturu površine tog sloja i dolazi do međusobnog srašćivanja čestica materijala. Radna podloga se spušta u negativnom smjeru osi z čime se prevlači novi sloj praha preko prethodno otisnute površine i ponovno očvršćuje djelovanjem laserske zrake.



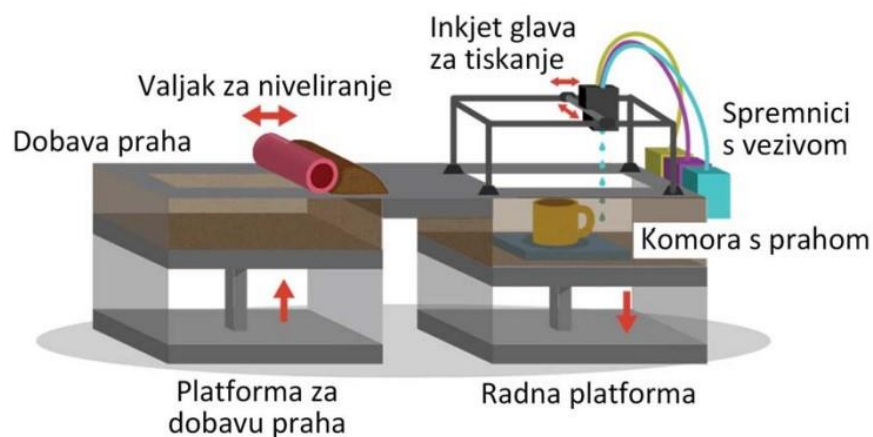
Slika 10. SLS postupak [1]

Karakteristike SLS postupka [1]:

- materijali: svi materijali koje je moguće sinterirati (polimeri, metali, keramika)
- debljina sloja najčešće 0,1 mm
- uglavnom nije potrebna potporna struktura
- moguća je primjena čitavog radnog volumena komore (z os)
- višak materijala se može ponovno koristiti
- nedostatak je niska kvaliteta površine, visoka hrapavost
- veliki proizvodi se mogu hladiti čak duže od samog vremena izrade
- porozni proizvodi.

2.3.7. 3D tiskanje (3DP)

3D tiskanje je postupak koji koristi praškaste materijale, ali oni se, za razliku od SLS postupka, povezuju pomoću kapljeviteg veziva. Na radnu podlogu, koja se nalazi unutar komore, nanosi se sloj praškastog materijala te ink-jet glava raspršuje vezivo u površini donjeg presjeka, nakon čega se radna podloga spušta prema dolje i na nju se ponovno nanosi sloj praškastog materijala.



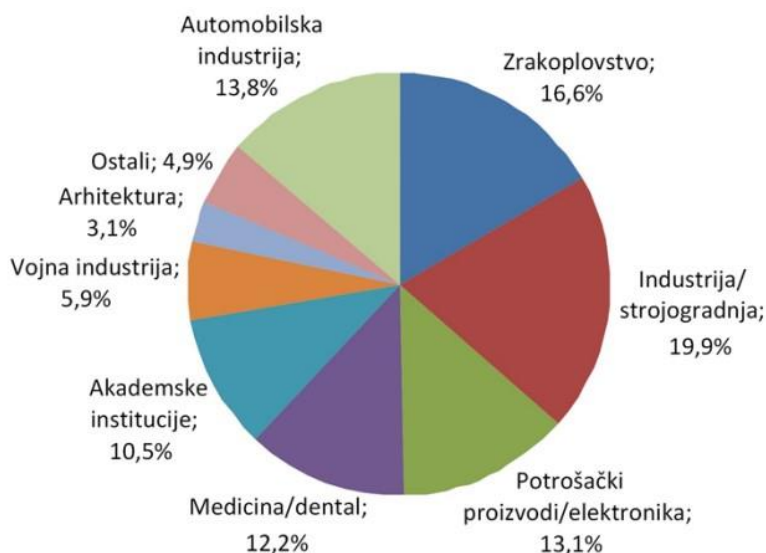
Slika 11. 3DP postupak [1]

Karakteristike 3DP postupka [1]:

- materijali: polimeri, metali, gips, pijesak, celuloza, šećer
- debljina sloja do 0,1 mm
- mogućnost izrade proizvoda u boji
- nije potrebna potporna struktura
- neiskorišteni materijal se može ponovno upotrijebiti
- velika brzina izrade, mala potrošnja energije
- u odnosu na SLS postupak, niske cijene uređaja i materijala
- nedostatak je niska kvaliteta površine, visoka hrapavost
- potrebno je naknadno obrađivati jer su dijelovi vrlo krhki
- dimenzijske tolerancije lošije u odnosu na SLS.

3. PRIMJENA ADITIVNE PROIZVODNJE

Aditivna proizvodnja dijelova, alata ili gotovih proizvoda najviše se primjenjuje u samoj strojogradnji, za kojom slijede zrakoplovstvo, automobilska industrija, elektronika, a na petom mjestu po zastupljenosti nalazi se primjena u medicini (slika 12).



Slika 12. Područja primjene aditivne proizvodnje [7]

Kao najzastupljenija grana u kojoj se koriste AM postupci, industrija pronalazi svrhu u izradi raznih dijelova strojeva, izrada alata od metalnih materijala, komplicirane geometrije kao što su ležajevi sa zračnosti ili zupčanici te kalupi. Moguća izrada velikih dijelova koji bi tradicionalnim metodama rezultirali visokim udjelom gubitka materijala, što isto tako dovodi do visokih troškova.

U zrakoplovnoj industriji aditivna proizvodnja koristi se za izradu proizvoda kompleksne geometrije u što kraćem vremenu, nije potrebno čekati zamjenske dijelove kao što su funkcijski dijelovi motora, rashladnog sustava, nosača itd.

Autoindustrija uglavnom koristi primjenu aditivne tehnologije kao i u dosadašnjim granama, za izradu rezervnih dijelova automobila, kotača, turbina, nosača motora, interijera i mnoge druge. Zanimljivost na području primjene aditivne proizvodnje u autoindustriji je izrada automobila tvrtke BMW koji se sastoji od više od 10 000 dijelova proizvedenih 3DP tehnologijom. Ovaj način izrade omogućio im je stvaranje komponenata koje ne bi mogli postići konvencionalnim metodama.

3.1. PRIMJENA ADITIVNE PROIZVODNJE U MEDICINI

Na pogled su neki ljudi slični jedni drugima, razlikuju se u svakom detalju na svome tijelu. Jedinstvenost pojedinca dovela je doktore i suradnike u položaj razmišljanja kako što lakše i što brže pomoći pacijentu s nekom vrstom bolesti. Jedan od načina je primjena aditivnih postupaka kojima se brzo i s dobrom preciznošću izrađuju personalizirane i prilagođene medicinske aplikacije.

Primjena aditivne proizvodnje u medicini može se podijeliti na 5 osnovnih primjena:

- praktični modeli
- implantati
- kalupi i alati (instrumenti i dijelovi za medicinske uređaje)
- medicinska pomagala (potporne vodilice, udlage, proteze)
- biomedicina.

Koja god da se primjena aditivne tehnologije u medicini koristi, postupak nastajanja prototipova ili proizvoda je isti. Prema određenom pacijentu potrebno je izraditi model dijela tijela istim procesom opisanim u poglavlju 2.2 *Faze izrade proizvoda*.

U medicinskom slučaju ne konstruiraju se CAD modeli, već se pacijent podvrgne računalnoj tomografiji (e. *Computed Tomography, CT*), magnetskoj rezonanci (e. *Magnetic Resonance, MR*) ili 3D skeniranju (e. *3D Scan*). CT-om i MR-om, bilo u klinikama ili bolnicama, dobivaju se snimke kosti i organa. Razlikuju se po tome što se za CT čovjek podvrgava ionizirajućem zračenju, dok se kod MR slika dobiva s pomoću elektromagnetskog zračenja. Ukoliko se radi o dobivanju snimaka vanjskih dijelova tijela, štetno zračenje se može izbjeći 3D skeniranjem. 3D skeneri rade na načelu mjerenja udaljenosti laserskih zraka od uređaja do predmeta, čiji se podaci prikupljaju i prevode u program koji daje sliku predmeta. U programima se dobivena slika pohranjuje kao STL datoteka, koja se zatim prebacuje na AM uređaj i izrađuje model.

Iako se u medicini mogu pronaći primjene gotovo svih tehnologija, najzastupljenije su selektivno lasersko očvršćivanje (SLS), taložno očvršćivanje materijala (FDM), stereolitografija (SLA) i 3D tiskanje (3DP). Također se koriste raznovrsni materijali, sve od voska pa do metala, a u tablici 1 nalaze se najčešće primjenjivani materijali za navedene tehnologije izrade i namjenu.

Tablica 1. Materijali AM procesa u medicini [8]

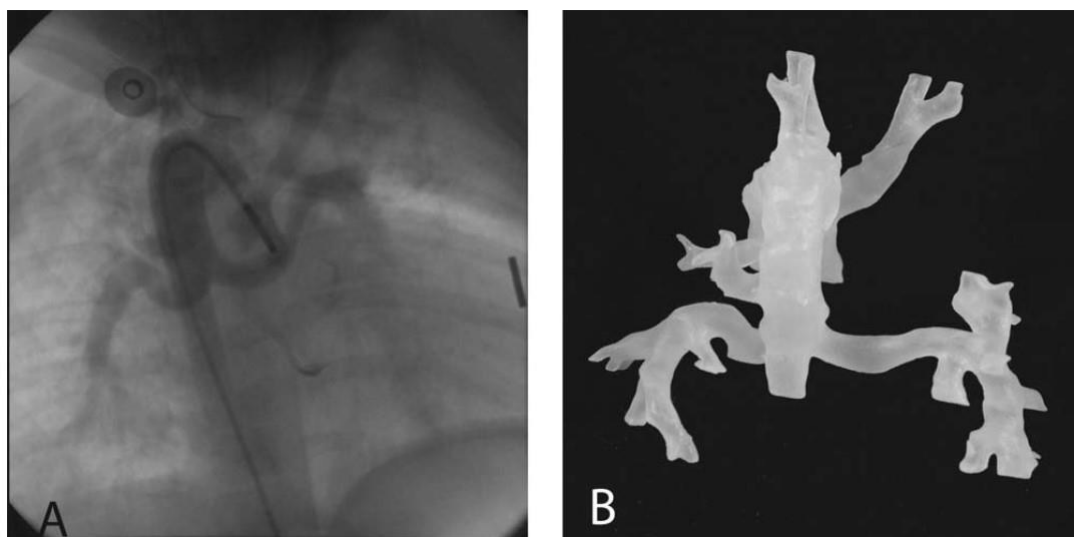
	SLS	FDM	SLA	3DP
Vizualni modeli	PA, PP	ABS, PLA	Fotopilimerne smole	ZP150, ZP151, PMMA
Implantati	Ti ₆ Al ₄ V/Ti64, Co-Cr-Mo, Al ₂ O ₃ -ZrO ₂	PEEK	Prozirna smola, ATZ	ZP150, TCP, legure na bazi nikla, titan
Alati	PA, Co-Cr, Ti	ABS, PLA	Fotopolimerna smola, prozirna smola	
Medicinska pomagala	PA	ABS, PLA, Nylon	Prozirna smola, epoksi smola	ZP151, nehrđajući čelik
Biomedicina	PA, PLGA	PCL, PLA, PLGA, TCP	PDLLA, HA	VisiJet PXL, kalcijev fosfat, barijev titanat

Od kojih su: poliamid (PA), polipropilen (PP), polilaktična-ko-glikolna kiselina (PLGA), akrilonitril butadien stiren (ABS), polimljična kiselina (PLA), polietilenketon (PEEK), poliaprolakton (PCL), trikalcij-fosfat (TCP), aluminij kaljeni cirkonij (ATZ), poli(DL-mliječna kiselina) (PDLLA), hidroksiapatit (HA), poli(metil-metakrilat) (PMMA).

3.1.1. Praktični modeli

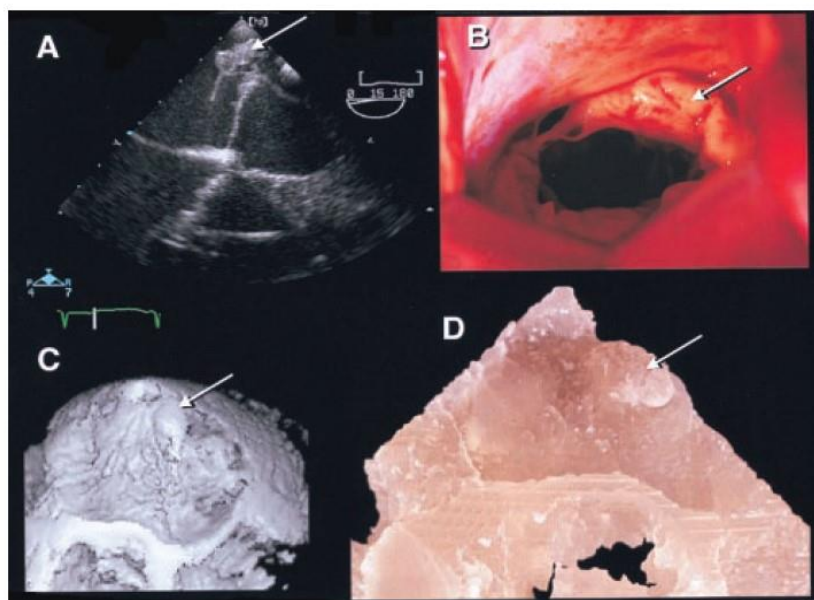
Najčešća primjena aditivnih tehnologija u medicini javlja se u izradi praktičnih modela kosti ili organa. Modeli se izrađuju u svrhe edukacije doktora i kirurga, pokazne modele ili modele koji se koriste prije operativnih zahvata. Takvi se modeli izrađuju kako bi mogla detektirati neka anomalija u organu ili kosti koju je teško predvidjeti, u svrhu probe ugrađivanja implantata i njegove kompatibilnosti s ostatkom tijela ili u svrhu navođenja kirurga tijekom operativnog zahvata.

Atrezija pluća srčana je bolest u kojoj se plućne arterije hipoplastične (vrlo sužene) ili ih uopće nema što onemogućava opskrbljivanje pluća krvlju i ona obolijevaju. Ova se bolest može javljati kod svih uzrasta i biti različitih stupnjeva razvijenosti te se kod nijednog pacijenta ne javlja u istom obliku. Operativni zahvatima povezuju se arterije s plućima, no kirurzima je teško detektirati položaj arterije zbog varijacija u anatomiji pacijenata. Na ovom primjeru [9] plućna atrezija proučavala se kod šest pacijenata i za potrebe operacije izrađivao se model aorte s pomoću aditivne proizvodnje. Pacijenti su bili podvrgnuti CT snimanju radi izrade angiografskih slika s pomoću kojih su dobivene STL datoteke za izradu modela. Nakon izrade modela bile su vidljive anomalije na aorti koje nisu bile vidljive preko angiografskih slika. Modeli su bili korišteni za predoperativno i intraoperativno planiranje te su kirurzi kasnije procijenili kako je model dao 96 % točne podatke o položaju aorta.



Slika 13. Usporedba angiograma (A) i aditivno proizvedenog modela (B) [9]

Mitralna stenoza je bolest uzrokovana sužavanjem mitralnog srčanog zaliska koji uzrokuje smanjenje protoka krvi kroz žile. Kako bi se dokazalo da aditivne tehnologije mogu pomoći kod detekcije sužavanja zaliska, prvotno su napravljeni modeli balona dimenzija, težine i volumena približnog srcu te testirale mogu li se iz 3D rekonstrukcije dobiti validni modeli. Nakon toga na pacijentima je napravljen transezofagealna ehokardiografija (TEE) – ultrazvuk srca kojim je dobiven 3D model te izrađen model srčanog zaliska. Ovim ispitivanjem dokazano je kako se primjenom stereolitografskog s poliakrilom mogu dobiti modeli koji odgovaraju stvarnim dimenzijama, obliku i volumenu srca. S pomoću njih moguće je točno detektirati anomalije i patologije zaliska te ova metoda izrade ima značajan utjecaj u dijagnosticiranju i liječenju složenih kardiovaskularnih poremećaja. [10]



Slika 14. Anomalije srčanih zaliska: TEE snimak (A); intraoperativno vidljiv zalistak (B); 3D rekonstrukcija srca (C); stereolitografski model (D) [10]

3.1.2. Implantati

Zubni implantati su komponente koje se pričvršćuju za kost čeljusti služeći kao krunica, most ili jedan zaseban zub. Implantati od titana i legure kobalta i kroma, koji su se ugrađivali [11] proizvedeni su SLM tehnologijom. Ovim procesom ispitivalo se smanjenje poroznosti, što dovodi do povećanja gustoće. Izrađeni modeli pokazali su odlična mehanička svojstva (tvrdoća, čvrstoća, krutost) te kemijska kao otpornost na koroziju.

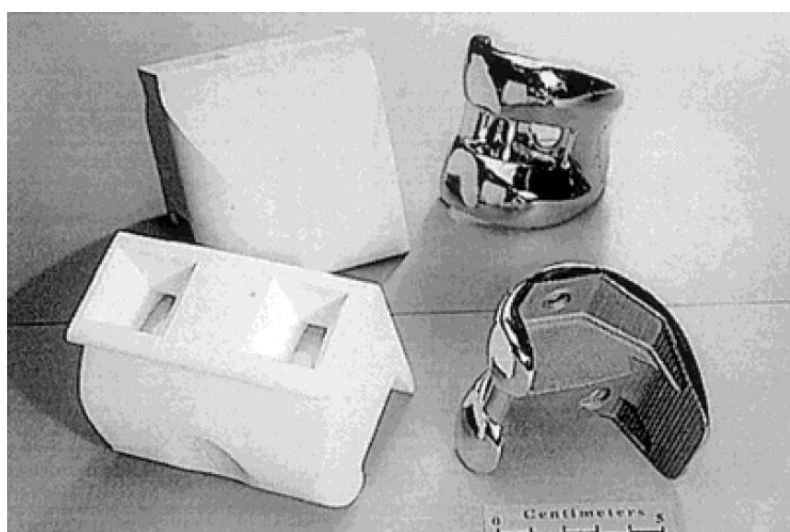
Miješani titan pokazuje veću sklonost na koroziju, tako da je tijekom procesa korišten čiti titan koji ima znatno manju osjetljivost na koroziju. Ispitivanje se pokazalo uspješnim i SLM tehnologija omogućuje učinkovitu proizvodnju dentalnih proizvoda i dobrim ekonomskim potencijalom.



Slika 15. Zubna proteza - implantat [11]

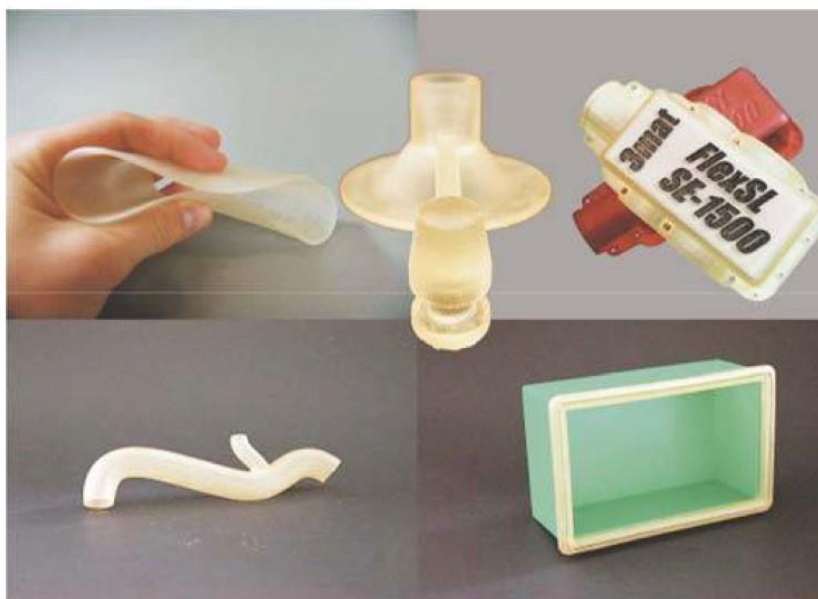
3.1.3. Kalupi i alati u medicini

Kalupi se proizvode u svrhu lijevanja predmeta zbog jednostavnije proizvodnje od strojne obrade. Kalupi za medicinske potrebe mogu biti proizvedeni aditivnom proizvodnjom, kao što je primjer izrade kalupa za protezu koljena. [12] Ovaj kalup izrađen je od keramike tehnologijom 3D ispisa u koji se kasnije lijevala legura kobalta i kroma. (slika 16)



Slika 16. Keramički kalup i odljevak [12]

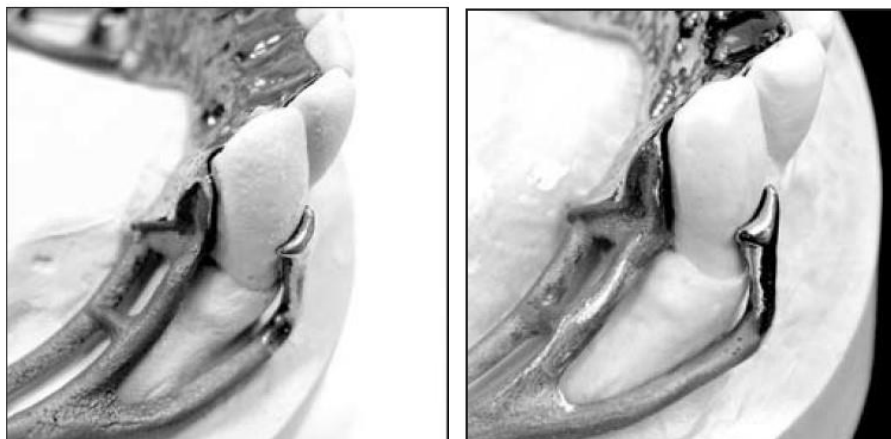
Medicinski alati najčešće su metalni (pile, kliješta, skalpeli), no oni se većinom izrađuju ili lijevanjem ili strojnom obradom. Dijelovi medicinskih uređaja variraju u materijalima, ali vrećice, tube, cijevi itd. izrađeni su od mekih i savitljivih materijala. Stereolitografija primjenjuje smole koje su otrovne pa se teži korištenjem smola koje imaju što niži stupanj toksičnosti. FlexSLw smola pokazuje prednosti u odnosu na druge prema mogućoj krutoj i mekoj izvedivosti, niskoj dinamičkoj viskoznosti te dobroj tecljivosti. [13]



Slika 17. Medicinski alati izrađeni od FlexSLw smolom pomoću stereolitografije [13]

3.1.4. Medicinska pomagala (proteze)

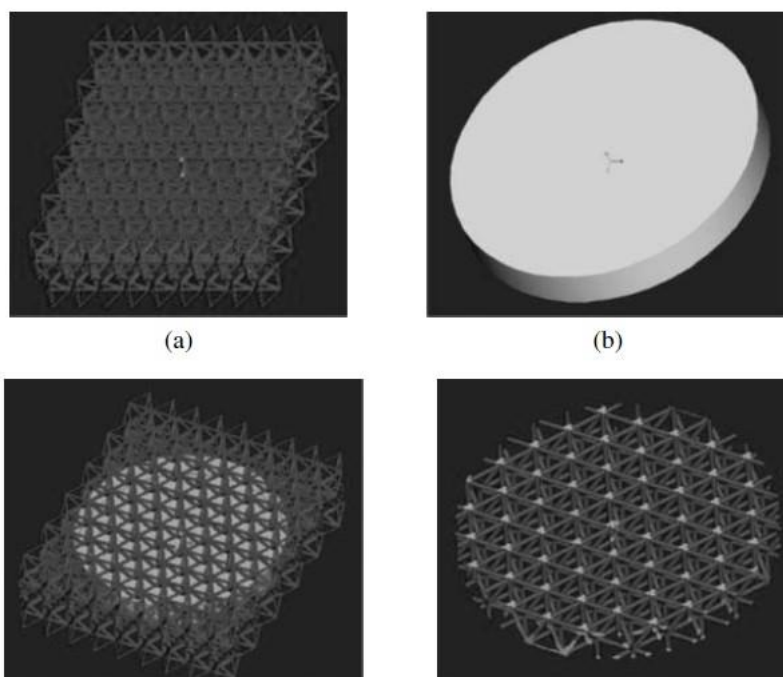
Aditivnom proizvodnjom izrađene su dvije zubne proteze s kopčama za držanje napravljenih zubi. Obje proteze rađene su istom tehnologijom selektivnog laserskog taljenja metala (e. *Selectiv Laser Melting, SLM*), zbog izrade složenih metalnih i legiranih proizvoda otpornih na trošenje i koroziju. Prvotno su s pomoću gipsanih dentalnih otisaka izrađeni kalupi prema kojima je bilo potrebno prilagoditi proteze. Prva proteza izrađena je od 316L nehrđajućeg čelika koja je nakon obrade imala odlične rezultate točnosti, no nakon nekoliko korištenja, koje uključuje vađenje i stavljanje proteze, pacijent je primijetio labavost proteze i njenih kopči. Rezultiralo je potrebom mijenjanja proteze zbog ispadanja same proteze i umjetnih zubi postavljenih među kopče. S druge strane proteza izrađena od legure kobalta i kroma, nakon poliranja i obrade, pokazala je odlične rezultate kompatibilnosti sa čeljusti pacijenta i nakon izvjesnog vremena. [14]



Slika 18. Proteza izrađena od 316L nehrđajućeg čelika (lijevo) i legure kroma i kobalta (desno) [14]

3.1.5. Biomedicina

Najčešći primjeri korištenja biomedicine su u razvijanju biološki razgradivih materijala u svrhu izrade nadomjestaka koštanih tkiva koji pomažu obnovi, održivosti ili poboljšanoj funkcionalnosti tkiva. U istraživanju [15] ispitane su tri tehnologije: 3D tiskanje, taložno očvršćivanje i selektivno lasersko očvršćivanje materijala kao što su PLGA, PCL, PEEK i PLLA. Kod PLGA pokazalo se kako su proizvedeni nadomjesci koštanih tkiva održivi, ali s vremenom dolazi do zamora materijala i neučinkovitosti. PCL pokazuje potpuno urastanje koštanog tkiva nakon nekoliko tjedana te da razgradnja ne utječe na svojstva materijala. Laserskim očvršćivanjem PLLA i PEEK materijala rezultiralo je visokom poroznošću i dobrom međusobnom povezanošću. Još jedno ispitivanje rađeno sa selektivnim očvršćivanjem poliamida (PA) od kojeg su izrađene strukture za obnovu koštanog tkiva. Proces izrade prikazan je na slici 19: prva faza je konstruiranje strukture koštanog tkiva, zatim slijedi oblik diska koji mora biti ugrađen između kosti, nakon toga preklapanje prve dvije strukture i zadnja faza je dobivanje CAD modela potrebne strukture za izradu laserskim očvršćivanjem.



Slika 19. Koraci konstruiranja nadomjeska koštanog tkiva: a) blok spojenih trokutastih struktura, b) dimenzije diska, c) preklapanje bloka i diska, d) finalna struktura [15]

3.2. Aditivna proizvodnja kod ušnih korekcija

Korekcije na ušima mogu se raditi bilo iz zdravstvenih ili estetskih razloga, no svakako je nedostatak vanjske uške razlog je za podvrgavanje istim. Rijetko se događa da je nedostatak uha prisutan s obje strane glave, tako da postojanje jedne uške uvelike olakšava proces. Ukoliko je drugo uho ispravno i bez ikakvih oštećenja, prema njemu se izrađuje model potreban za suprotnu stranu. Pacijent mora obaviti jednu od načina snimaka (CT, MR ili 3D skeniranje) kako bi se dobio zrcaljeni model potreban za nepostojeću stranu. Taj model može imati jednu od dvije namjene, ovisno o procesu kojem se pacijent podvrgava.

Kod poremećaja kao što je mikrotija, nerazvijenost vanjskog uha, vrlo se često koristi primjena aditivne tehnologije. To je urođena abnormalnost, gdje se vanjski dio uha deformirao, malen je ili ga uopće nema. Iz zdravstvenih razloga potrebno je obaviti operativni zahvat čiji proces počinje dobivanjem snimki suprotnog uha, s pomoću kojih se generira dvodimenzionalna slika ili trodimenzionalni model. U ovom koraku kirurzi se odlučuju hoće li izrađivati model uha. U slučaju da se ne odlučuju na izradu modela, daljnje operativne zahvate odrađuju s pomoću dvodimenzionalne slike s iscrtanim konturama i dimenzijama uha. Hrskavice koje se nalaze u ušima, dobivaju se iz 6., 7., i 8. rebra prema crtežu s konturama. Kasnije se te kosti oblikuju i spajaju tako da tvore oblik pravog uha, prikazano na slici 20. [16]



Slika 20. Ocrtane konture (lijevo), dijelovi rebra (sredina), složena kontura uha (desno) [16]

Odluče li se tijekom operacije na izradu modela, iz CT snimka se u programu modelira STL datoteka zrcaljenog suprotnog uha. Prema [17] model uha izrađen je od medicinske smole SLA postupkom, točnosti 0,1 mm. Na slici 21 lijevo je prikazan model u komadima uspoređeni sa dijelovima kostiju izvađenih iz rebara, a sa desne strane slike prikazan je cijeli isprintani komad zajedno sa složenim kostima u obliku uha. Model uvelike olakšava samu operaciju dijelova rebara i kasniju izradu oblika uha dobivenih kostiju.



Slika 21. Primjena praktičnih modela kod operacije uha [17]

Da bi se izbjegao operativni zahvat, uške se izrađuju u kalupima od silikona. Prvotno se pacijentu od postojećeg uha uzima uzorak na način da je ušni kanal začepljen vatom te se oko uha stavlja kalup u koji se lijeva gips. Nakon stvrdnjavanja gipsa, kalup se otvara i svaka polovica kalupa se skenira 3D skenerom kako bi se dobila STL datoteka. Razlog zbog kojeg se ne koristi gipsani kalup odmah za lijevanje je nečistoća i neravnine na površinama, postojanje sitnih rupica koje se unutar programa mogu popuniti i dobiti glatka i kompaktna površina. Dobivanjem uređene STL datoteke akrilni kalup izrađen je stereolitografijom, a u njega se kasnije lijevao polivinil siloksan (PVS) te nakon dobivene uške izrađen je kalup od silikona. [18]



Slika 22. Razlika zrcalnog modela dobivenog AM postupkom (lijevo) i gipsanog (desno) [18]

Kod još jednog primjera [19] istim fazama postupka izrađen je kalup za lijevanje. Prema dobivenom gipsanom kalupu i 3D skeniranju, metodom stereolitografije, izrađen je kalup uške od epoksidne smole. U taj kalup lijevan je vosak kako bi oblikovao model uške i isprobao odgovara li pacijentu. Zaključeno je kako se stereolitografijom mogu dobiti precizni kalupi za izradu prototipova uha.



Slika 23. Model uške od epoksidne smole [19]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu bit će prikazan proces izrade prototipa nadomjeska uha na konkretnom slučaju, gdje nedostaje gornji dio vanjskog desnog uha. Iako je okom i više nego vidljiv nedostatak, estetika je manje bitna. Gornji dio uha štiti slušne kanale od ulaska prašine, slijevanja tekućine i ostalih nečistoća koje mogu štetno utjecati na sluh i stvaraju osjećaj nelagode. U nastavku su opisani koraci i faze izrade silikonskog modela.

Priprema i izrada nadomjeska odvijala se u sljedećim koracima:

- 3D skeniranje
- stvaranje STL datoteke i modeliranje uzorka
- izrada uzorka FDM metodom
- konstruiranje kalupa prema odgovarajućem uzorku
- izrada kalupa FDM metodom
- lijevanje silikonskog modela uha
- primjena prototipa.

4.1. 3D skeniranje

3D skeniranje jedan je od načina dobivanja konstrukcijskog modela predmeta. Može se primjenjivati u svim područjima, od arhitekture pa sve do medicine. Sve se više koristi zbog jednostavnosti rukovanja, brzog procesa, velike točnosti i ekonomičnosti. Uređaji za skeniranje mogu se podijeliti u razne kategorije, ali u ovom radu u fokusu je podjela uređaja prema lokaciji mjernog instrumenta: iz zraka, s tla ili ručni. Zračni laseri koriste se za prikupljanje podataka mapiranja, potencijalnih lokacija za kopanje rudnika ili mjerenja količina dostupnih određenih resursa. Skeneri koji snimaju s tla služe za snimanje zgrada, zemljanih radova i raznih oblika reljefa. Ručni laseri rabe se za skeniranje manjih predmeta; strojni dijelovi, skulpture, ljudi itd.

Ručni laserski skeneri stvaraju 3D sliku kroz mehanizam triangulacije. Laserska točka ili crta projiciraju se na objekt iz ručnog uređaja i mjernog senzora koji mjeri udaljenost do površine. Podaci se prikupljaju u interni koordinatni sustav, stoga se za precizno prikupljanje podataka mora odrediti položaj skenera. Skener može odrediti položaj pomoću referentnih značajki na površini ili pomoću vanjskog načina praćenja. Vanjsko praćenje često ima oblik laserskog tragača (kako bi se osigurao položaj senzora) s integriranom kamerom (za određivanje orijentacije skenera) ili fotogrametrijskim rješenjem pomoću više kamera. Obje tehnike imaju tendenciju korištenja infracrvenih dioda, pričvršćenih na skener, koje emitiraju svjetlost. Dioda su kameri vidljive kroz filtre koji pružaju otpornost na ambijentalno osvjetljenje.

Prikupljeni podaci se bilježe kao oblak točaka unutar trodimenzionalnog prostora. Pretvaraju se u trianguliranu mrežu kako bi se kasnije moglo lakše prebaciti u CAD model. Ručni laserski skeneri mogu kombinirati te podatke s pasivnim sensorima vidljivog svjetla koji hvataju površinske teksture i boje za izgradnju ili povratno inženjerstvo punog 3D modela.

Ručni skener korišten u ovom radu je iReal 2E infracrveni ljudski 3D skener. [20] Izvor infracrvenog svjetla koristi se za skeniranje, dok LED svjetlo koristi za osvjetljenje površine skeniranja. Oba su izvora svjetla niske potrošnje energije, a LED svjetlo se tijekom procesa skeniranja može isključiti kako bi čovjeku sam proces bio ugodniji. Prednost ovog skenera je što može prikupljati podatke neovisno o boji, softver automatski izrađuje ukupnu ekspoziciju što je točnije moguće te skeniranje ne ometa ljudska kosa prilikom skeniranja glave. Također radi u bilo kojem uvjetu osvjetljenja, bilo u mraku, koristi se LED rasvjeta, a otporan je na utjecaj vanjskog svjetla.



Slika 24. iReal 2E skener [20]

Karakteristike 3D skenera:

- veliko širokokutno vidno polje (580 mm x 550 mm) omogućuje precizno skeniranje predmeta male, srednje i velike veličine
- dubina polja skeniranja odgovara 720 mm
- brzina prikupljanja podataka iznosi 1 500 000 točaka po sekundi
- skeniranje je moguće i bez upotrebe markera
- prikladan za skeniranje objekata sa kompleksnom geometrijom.

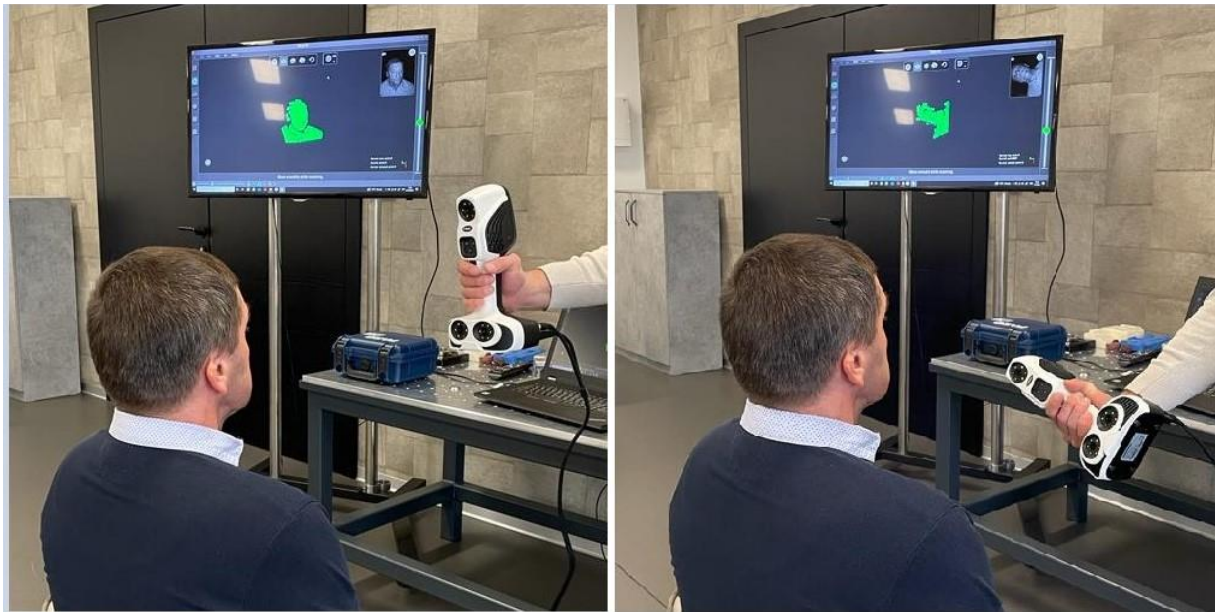
3D skeniranje započinje pripremanjem postolja skenera, ali za uporabu ovog skenera nisu potrebni markeri već samo djelovanje LED svjetla. Iako je ljudsko tijelo nemoguće zadržati na miru bez pomaka (npr. disanje), ovaj skener nije osjetljiv na takve pomake i s lakoćom prikuplja podatke o skeniranom dijelu tijela. Skeniranje je potrebno ponavljati nekoliko puta kako bi se osigurala potpuna slika jer laserske zrake nekada nisu u mogućnosti dohvatiti sve dijelove. Kod uha je problematika skeniranja stražnje strane uha jer je vrlo blizak s ostatkom glave gdje zrake ne mogu doći do površine. Ukoliko je iza uha i sama kosa, taj se postupak dodatno otežava jer skener zahvaća svaki detalj. Također je zahtjevnije dobiti skenove gornjeg prednjeg dijela uha zbog savijenog dijela u koji zrake također teško dolaze. Prednost je što skener u jednom postupku pamti koje su površine snimljene pa se teško dostupnim dijelovima mogu posebno posvetiti kasnije. Te će se snimke automatski generirati u jednu.



Slika 25. Vidljiva razlika između lijevog i desnog uha

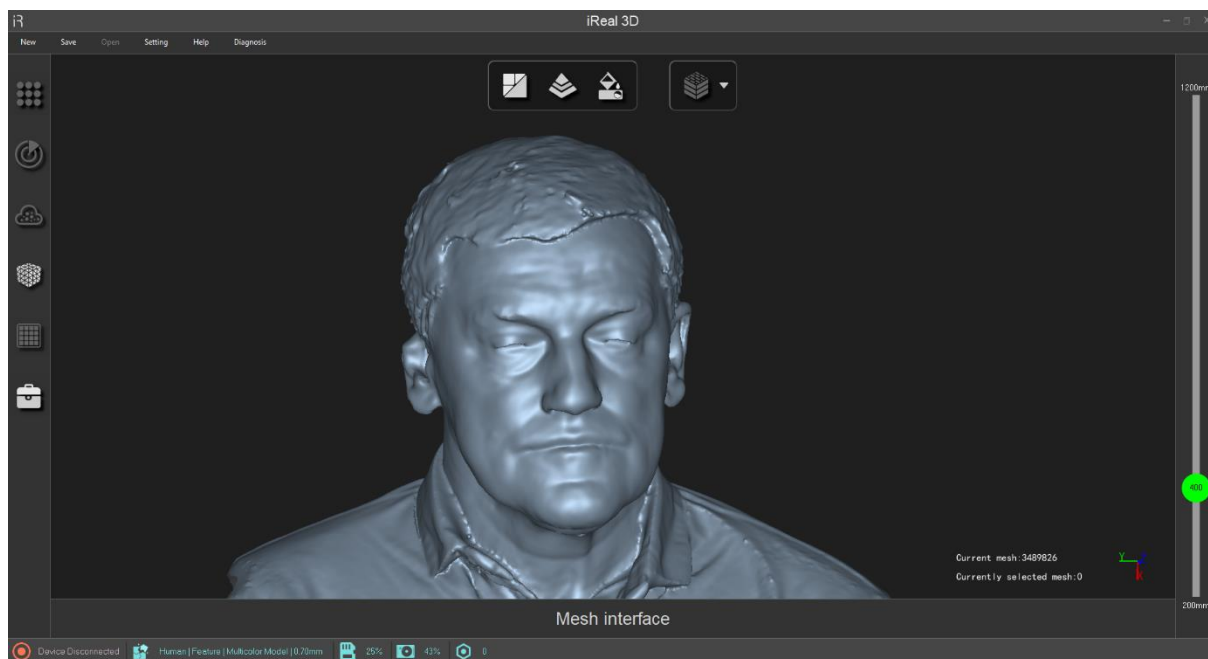
U radu je snimljena cijela glava (slika 26) u jednom skeniranju te se skeniranje ponavljalo tri puta kako bi se dobile što preciznije snimke. Teško dostupna mjesta skenirana su više puta, no do nekih dijelova laserske zrake nisu dolazile zbog blizine uha i glave. Ti dijelovi se automatski generiraju kao spojena struktura te ih je kasnije potrebno preraditi u programu. Ovdje taj slučaj nije stvarao problem jer se iz cijelog uha nakon zrcaljenja koristio samo dio.

Na slici niže vidljivo je kako se slika u programu generira micanjem skenera i prikupljanjem podataka. Držanjem skenera ravnim i kada gleda prema licu, u programu se u gornjem desnom kutu prikazuje slika koju skener trenutno vidi, a u sredini se nalazi oblak točaka koji tvori sliku. Pomicanjem i okretanjem skenera (na slici desno) vidljivo je kako se slika zakreće u istom smjeru i model ostaje isti, samo se pomiče u smjerovima kretanja skenera. Time se pokrivaju svi dijelovi glave i omogućuje zrakama doseg i teško dostupnih mjesta.



Slika 26. 3D skeniranje

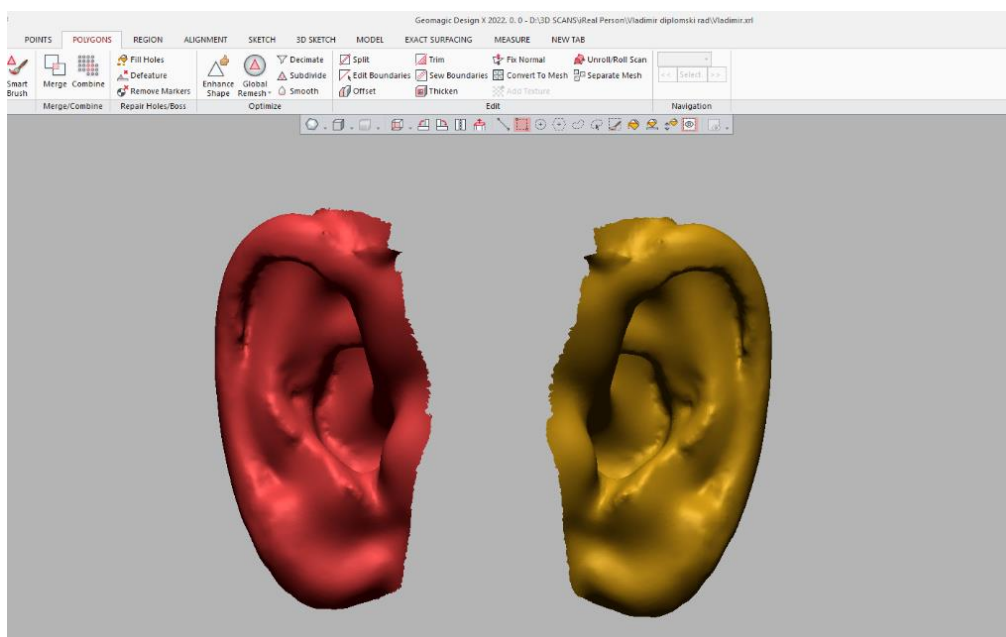
Na slici 27 može se vidjeti potpuna slika glave u kojoj se jasno razlikuju strukture kao što su nos, crte lica, oči, kosa te čak i tekstura majice. U potpunoj slici vidljiva je razlika desne i lijeve strane glave, a to je nesimetričnost ljudskog tijela zahvaljujući dobroj rezoluciji uređaja. Također se iz ove slike vidi razlika tj. nedostatak gornje desne uške.



Slika 27. Dobiveni sken glave

4.2. Stvaranje STL datoteke i modeliranje uzorka

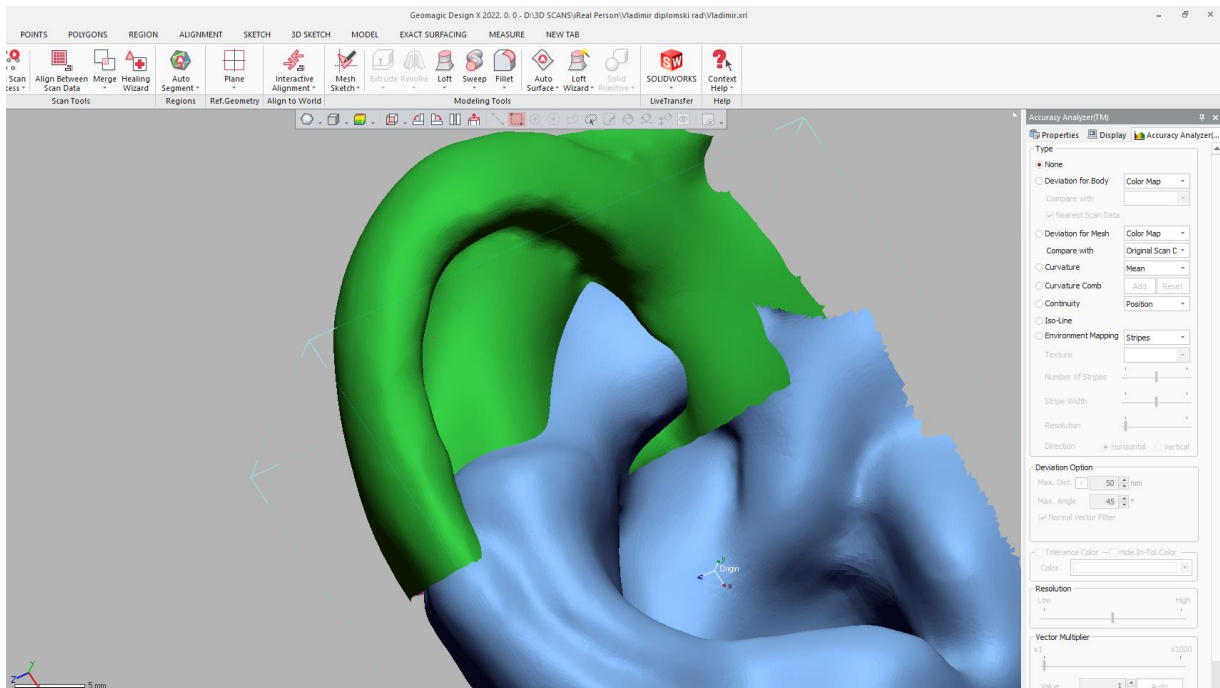
Skeniranjem se u programu generira skup oblaka točaka (e. point cloud) koji tvore mesh model. Mesh model je zapravo skup trianguliranih površina koje tvore STL datoteku potrebnu za rad na AM uređaju. STL datoteka dobivena u programi *iReal 3D*, direktno prilikom skeniranja, spremljena je na računalo kako bi se mogla otvoriti u drugom programu potrebnom za uređivanje modela. Ista datoteka otvorena je u programu *Geomagic Design* u kojem je izrezan model lijevog uha i zrcaljen (slika 28) kako bi se kasnije usporedio s desnim uhom.



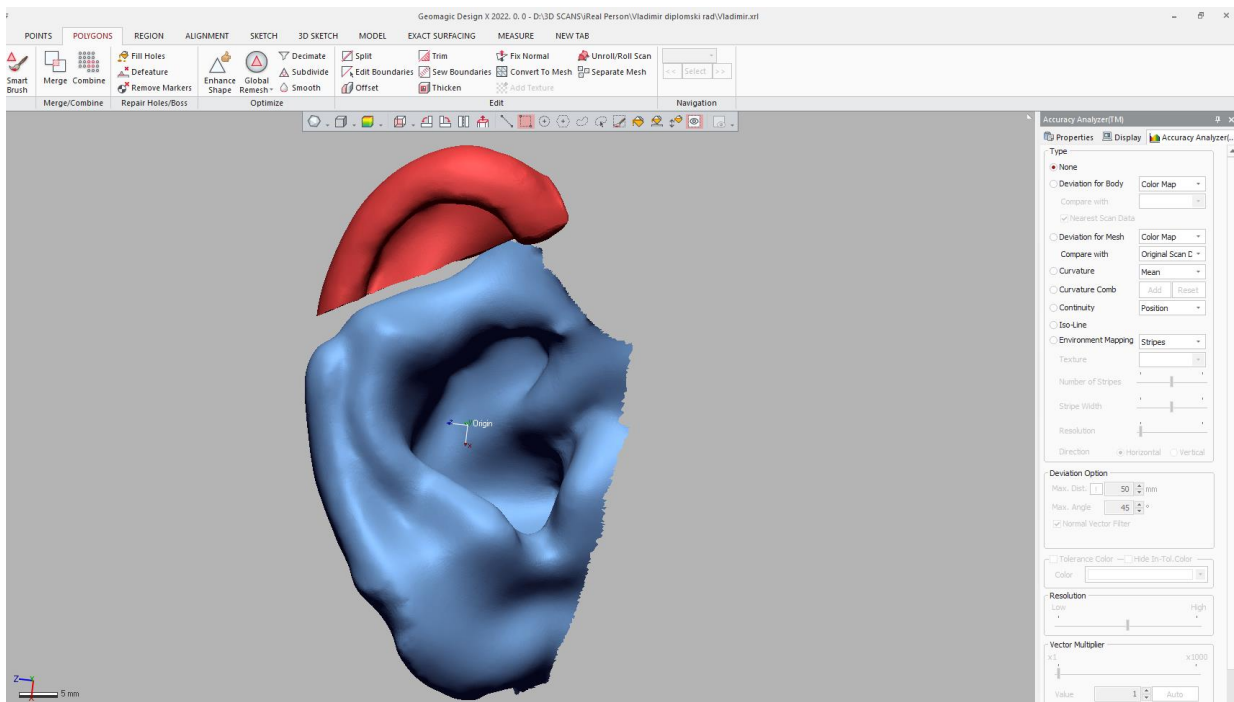
Slika 28. Zrcaljeno lijevo uho

Na slici 29 prikazano je preklapanje desnog i lijevog uha te je jasna razlika u nepodudaranju. Iako je površine uha teško spojiti jer nemaju nijednu zajedničku ravninu, približnim spajanjem vidljivo je koliko suprotne uške odskaču. Upravo time je zaključeno kako se iz jedne uške ne može načiniti ista takva da bi odgovarala nadomjesku na suprotnom uhu. Zbog toga se došlo na ideju da se iz lijeve uške izreže gornji komadić koji bi se drugim načinom mogao spojiti s desnom uškom. Slika 30 prikazuje odnos desnog uha sa izrezanom dijelom lijevog uha i koliki je prostor potrebno popuniti. Taj mali segment izrađen je FDM tehnologijom, od PLA filamenta s točnošću obrade 0,1 milimetar. Bilo je moguće odabrati i bolju kvalitetu obrade od 0,07 ili 0,05 mm, ali nije bilo potrebno jer nije krajnji proizvod i produžuje vrijeme izrade. Ukupno vrijeme izrade ovog segmenta bilo je pola sata na *Prusa i3* printeru.

Vrijeme se moglo skratiti korištenjem još niže kvalitete i smanjenjem broja slojeva, ali bi vidljivost u slojevima bila prevelika i zahtijevala bi više uređivanja u kasnijim fazama.



Slika 29. Preklapanje desne uške i zračljene lijeve



Slika 30. Desna uška s izrezanim komadićem

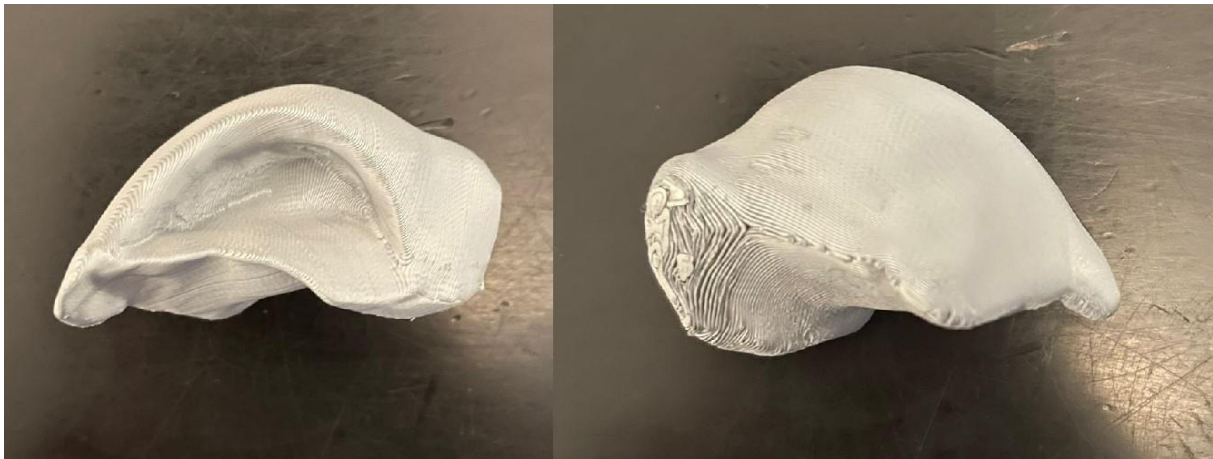
Dio rada u kojem je bilo potrebno osmisлити metodu kojom će se segment lijevog uha spojiti sa stvarnim uhom objašnjen je u nastavku. Za popunjavanje praznine između segmenta i uha odluka je pala na glinu koja se lako oblikuje i kasnije stvrdnjava te ju je moguće kasnije i brusiti. Na slici 31 prikazana je zadnja verzija izrađenog uzorka. Izazov rada s glinom jedino je predstavljalo njezino loše svojstvo lijepljenja. U slučaju kada se mora s jedne strane pridržavati segment i između njega dodavati glina, to predstavlja problem. Na kraju je postupak bio taj, da se na uho dodao komad gline, dobro utisnut na uho da se stvori kontura, te se na nju utisnuo segment i tako spojeno skinuo s uha i ostavljen na sušenje. Kako ni uho samo po sebi nije fiksno, već je fleksibilno i lako se može pomicati, utisnuti segment se pri prvom pokušaju podosta odmaknuo od konture što je rezultiralo lošim uzorkom i potrebom za ponovnim pokušajem.



Slika 31. Prednja i stražnja strana glinenog primjerka ušne proteze

Idući pokušaj izrade primjerka donio je više nade za uspješnost. Izrađeni primjerak od gline vrlo je loše kvalitete površine i pun je nepravilnosti, tako da ga je bilo potrebno usavršiti. Ideja je bila da se glineni primjerak skenira pomoću 3D skenera te da se u programu uredi kvaliteta površine, popune moguće rupe, zaglade grbavi dijelovi i prijelazi. Nakon toga iz STL datoteke ispisan je primjerak prikazan na slici 32 i to istom metodom i materijalom kao što je bio i prethodno izrađeni segment. Za ovaj primjerak ispis je trajao 45 minuta zbog njegove podosta velike debljine. Ovaj postupak bit će detaljnije objašnjen na završnom primjerku.

Isprobana kompatibilnost ovog primjerka prikazana je na slici 33, gdje se jasno vidi kako primjerak uopće ne sjeda na površinu uha i kako je preglomazan za nadomjestak. S prednje i stražnje strane je vidljiv višak materijala koji je bilo potrebno maknuti i popraviti konturu uha kako bi se primjerak što bolje prilagodio uhu.



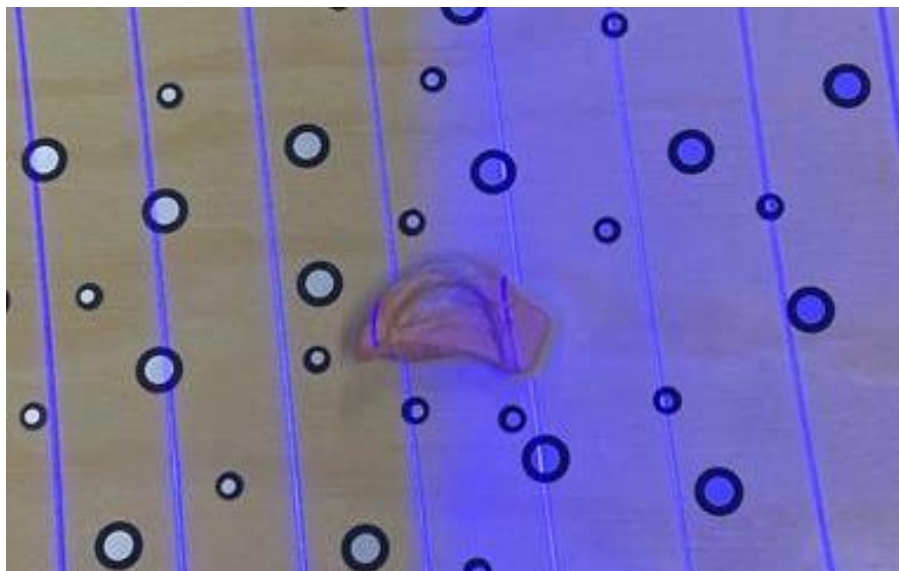
Slika 32. Primjerak broj 2



Slika 33. Primjerak broj 2 montiran na uho

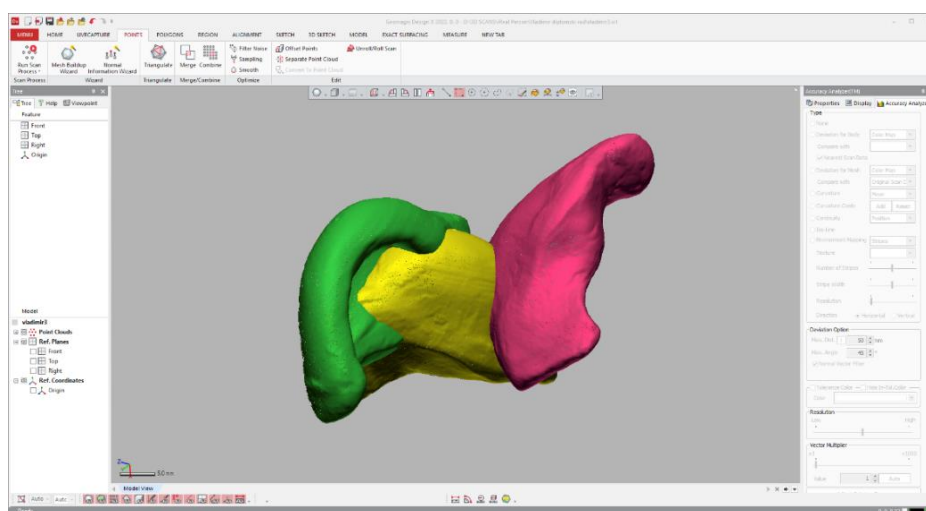
Idući, a ujedno i zadnji glineni primjerak, već prethodno prikazan na slikama bio je rađen po modelu primjerka broj 2. Kako se ne bi ponavljao proces ponovnog popunjavanja prostora između segmenta i uha, odlučeno je prepraviti postojeći uzorak broj 2. Turpijanjem i malim potrebama za nadomjestak gline, uz isprobavanje sjeda li lijepo na površinu uha, dobiven je finalni primjerak (primjerak broj 3) prema kojem se izrađivao kalup za lijevanje.

Primjerak broj 3 bilo je potrebno skenirati na način kao i prvotno skeniranje glave, prikazano na slici 34. Skener radi na isti način opisa u prethodnom koraku, a ovdje su vidljive zrake kojima se hvataju površine predmeta. Taj se proces radio kako, bi se u programu *Geomagic Design* dobila ugrađena i kvalitetna površina. Skeniranje je bilo potrebno odraditi barem iz tri položaja primjerka kako bi se dobilo što veće podudaranje skenova.

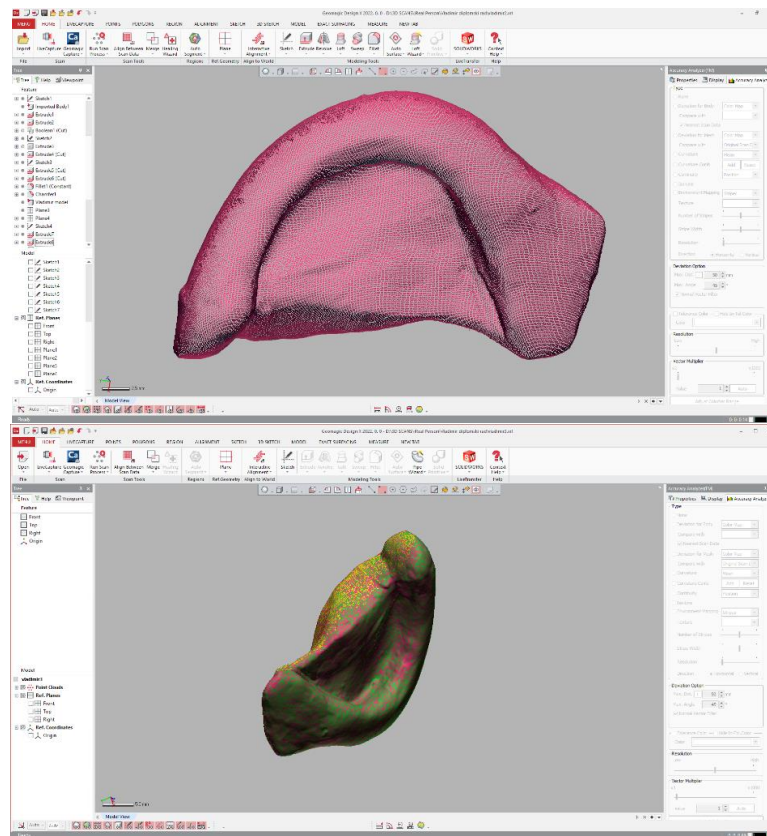


Slika 34. 3D skeniranje primjerka broj 3

Svaki položaj primjerka daje svoju zasebnu skupinu oblaka točaka i sam kao takav ne tvori nikakav model. U isti program potrebno je dodati sva tri skena zasebnih položaja i poravnati ih prema njihovom preklapanju, prikazano na slici 35. Naredbom *Combine* dobiva se skup oblaka točaka koji čine jednu cjelinu (slika 36).

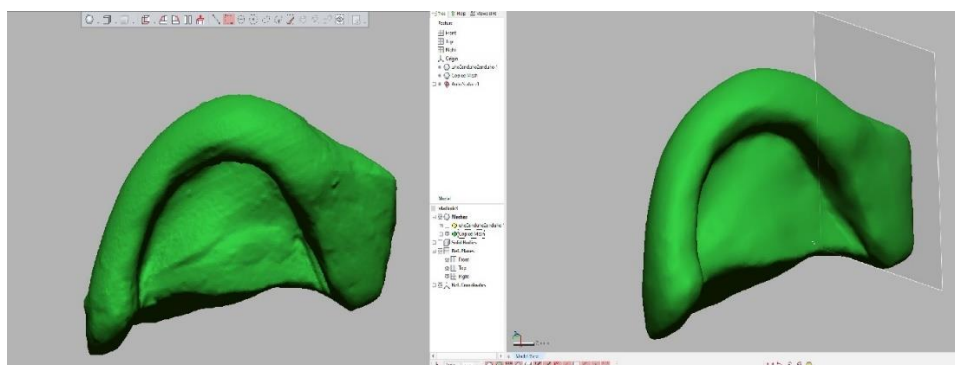


Slika 35. Zasebna tri skena primjerka



Slika 36. Preklapljena tri skeniranaprimjerka

Kako bi se dobio model za uređivanje, potrebno je skup oblaka točaka pretvoriti u STL datoteku. Nakon toga slijedi obrada STL datoteke. Rupe koje su se javila između segmenta i gline popunjene su u programu pomoću naredbe *Fill Holes* gdje se odabiru dvije nasuprotne strane praznine i povezuju tangencijalnim pravcima. Površine između njih se automatski generiraju kao da su dio modela. Zbog vidljivosti stepeničaste površine i grbavosti gline, koristila se naredba *Smart Brush* koja ima mogućnost zaglađivanja površina i uklanjanja grbavih dijelova te sitnih ulegnuća. Na slici 37 prikazana je usporedba modela prije i nakon uređivanja.



Slika 37. Izvorna (lijevo) i uređena STL datoteka (desno)

4.3. Izrada uzorka FDM metodom

Za aditivnu izradu finalnog primjerka koristio se Prusa i3MK3S+ (slika 38) koji ima sljedeće karakteristike [21]:

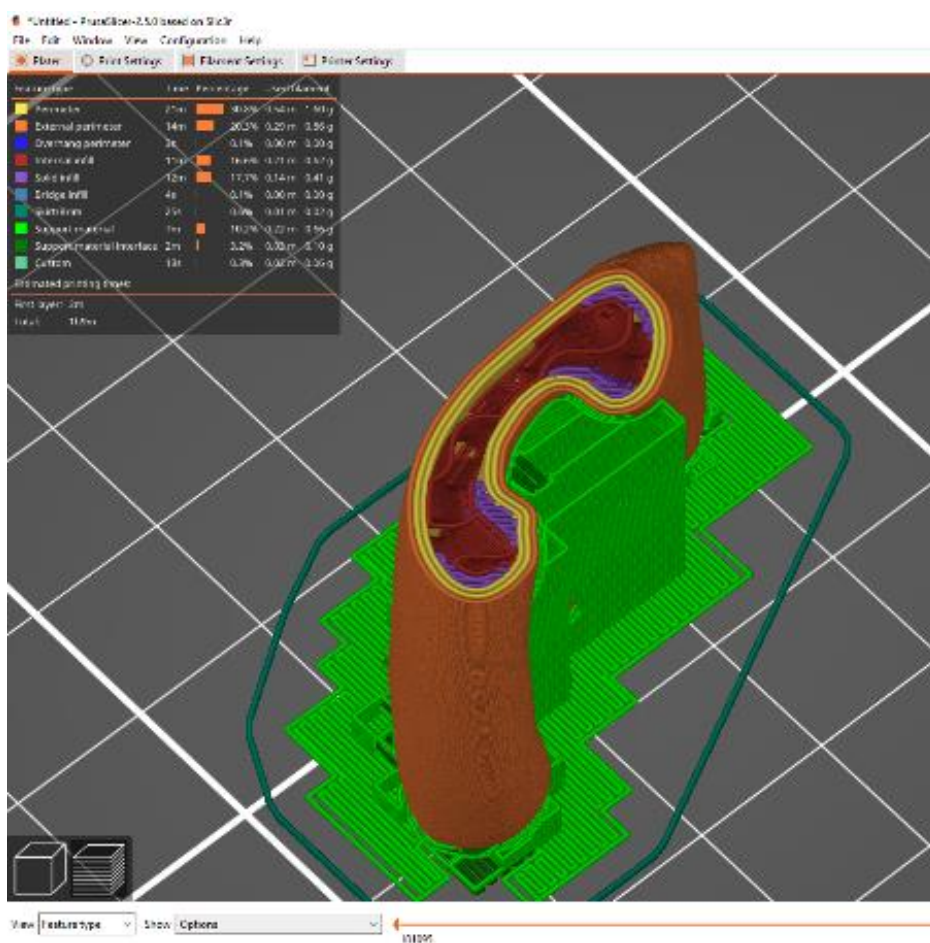
- sonda s visokokvalitetnim senzorom za automatski postupak ispisa podloge, to osigurava prvom sloju da se ne odvaja od podloge
- sadrži više vrsta ploča za ispit (glatku, s teksturom ili satensku) koje se jednostavno održavaju i lako uklanjaju. Ove ploče za ispis ne zahtijevaju posebnu pripremu površine
- visokokvalitetni ispis predmeta do 210 mm visine
- oporavak gubitka napajanja – u slučaju gubitka napajanja, pamti zadnje ispisane točke i podatke tijekom obrade, nakon ponovnog oporavka napajanja započinje ispis na posljednjoj poznatoj lokaciji
- ekstruder sa senzorima za filament otkiva je li filament umetnut
- podržava različit raspon materijala: PLA, PETG, ASA, PC, PP.



Slika 38. Prusa i3 MK3S+ [21]

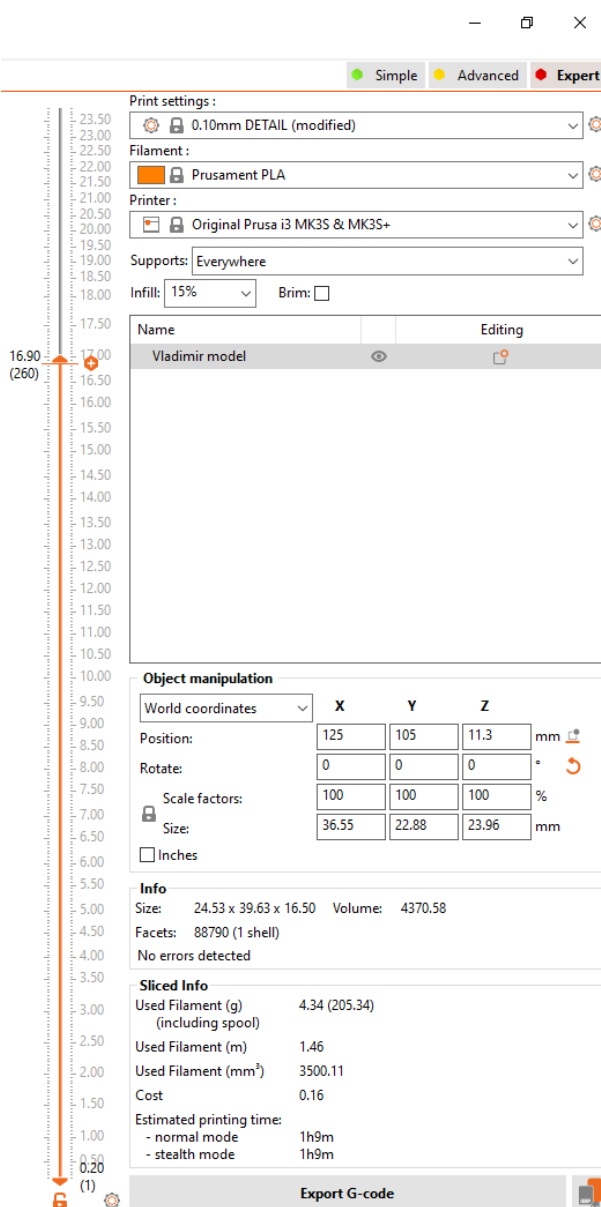
Nakon dobivene uređene STL datoteke potrebno je preko programa PrusaSlicer odrediti položaj modela i unijeti parametre obrade. Prvo se odabire materijal, koji je u ovom slučaju PLA, zatim se određuje orijentacija modela. Orijehtacija uvelike ima utjecaj na vrijeme izrade ispisa, jer je važna kako bi se postigla što brža obrada, uz što manje potporne strukture. Na slici 39 prikazan je model u presjeku pri obradi.

Prva slika prikazuje model gdje je vidljiva stepeničasta struktura i kvaliteta izrade modela. Boje predstavljaju zasebne parametre koji se mogu uređivati. Tamno zelena boja prikazuje konturu ispisa podloge koja spaja ispisnu ploču sa modelom. Svijetlo zelena boja prikazuje potpunu strukturu kojom se osigurava površina izrade kuta većeg od 45° . Narančasta boja prikazuje vanjsku konturu modela, a žuta unutarnju ojačanu strukturu i ona se može podešavati u koliko slojeva se želi ponavljati. Ljubičasta boja prikazuje potpunu unutarnju ispunu koja osigurava stabilnost ispisanog predmeta, dok crvena predstavlja djelomičnu unutarnju ispunu koja povezuje žute slojeve.



Slika 39. Poprečni presjek uzorka za ispis

Slika 40 prikazuje parametre obrade. Prvo se prikazuje kolika je točnost obrade i može se podešavati. Odabrana je debljina sloja 0,1 mm jer se radi samo o ispitnom uzorku, ne o gotovom proizvodu, a više kvalitete kao 0,07 i 0,05 mm značajno produžuju vrijeme obrade. Niže se odabire materijal i uređaj ispisa, jer je program univerzalan za Prusa pisače. Nadalje zahtijeva se podešavanje potporne strukture koja se može podešavati ovisno o želji, a ovdje je odabrana potporna struktura svugdje, gdje je potrebna da ne bi došlo do neispravnog ispisa. Unutarnje popunjavanje također se može prilagoditi uzorku, a ovdje je odabrano 15% ispune. Pozicija uzorka prikazuje se u odnosu na koordinatni sustav pisača, tj. položaj uzorka na ploči ispisa. U parametrima obrade još se mogu vidjeti dimenzije, volumen uzorka, količina iskorištenog filameta te brzina ispisa.



Slika 40. Parametri obrade uzroka



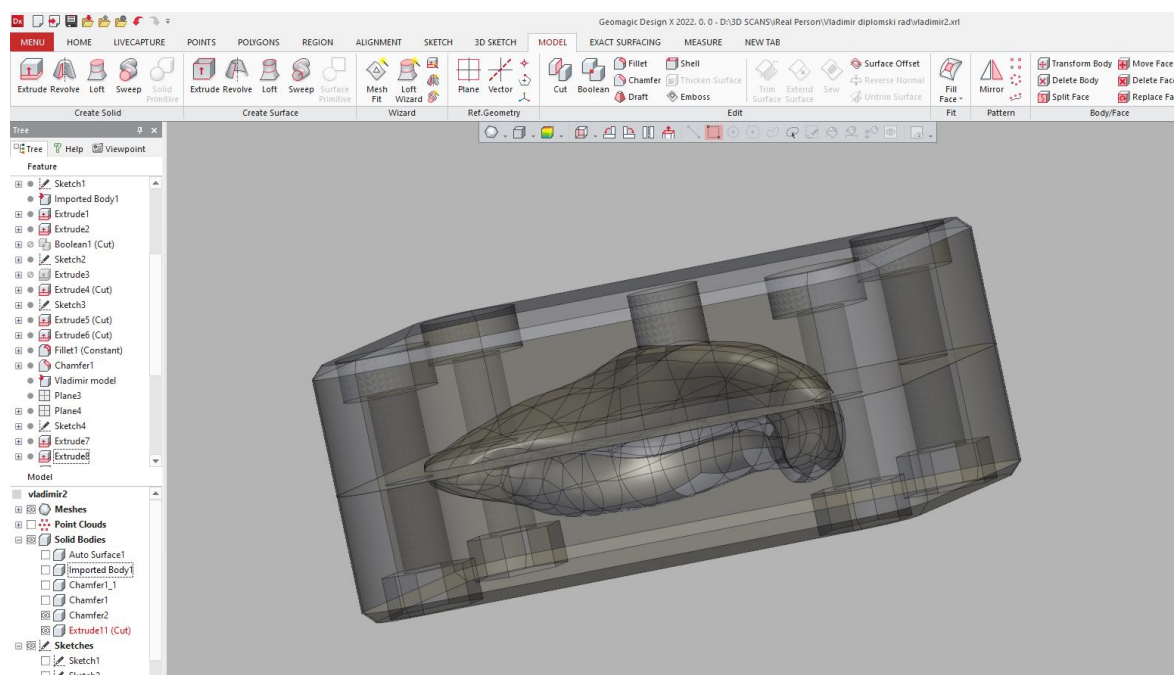
Slika 41. Dobiveni ispisani primjerak (gore) u usporedbi s primjerkom od gline (dolje)



Slika 42. Pripajanje primjerka na uho

4.4. Modeliranje kalupa

Nakon isprobavanja ispisanog uzorka i zadovoljavajućih rezultata, slijedi modeliranje kalupa za lijevanje (slika 43). Iz STL datoteke uzorka potrebno je dobiti solid model, ukoliko su sve konture zatvorene, automatski se stvara puni (solid) model kako bi se mogao modelirati kalup. *Autosurface* narednom generiraju se tijela od kojih je potrebno izraditi negativ obje strane kalupnih ploča. Odabirom sljubnice – linije koja dijeli kalup na gornji i donji, određuju se dimenzije kalupa. Kako je ovo vrlo maleni komadić, dimenzije kalupnih pločica su 40 x 50 x 11 mm.

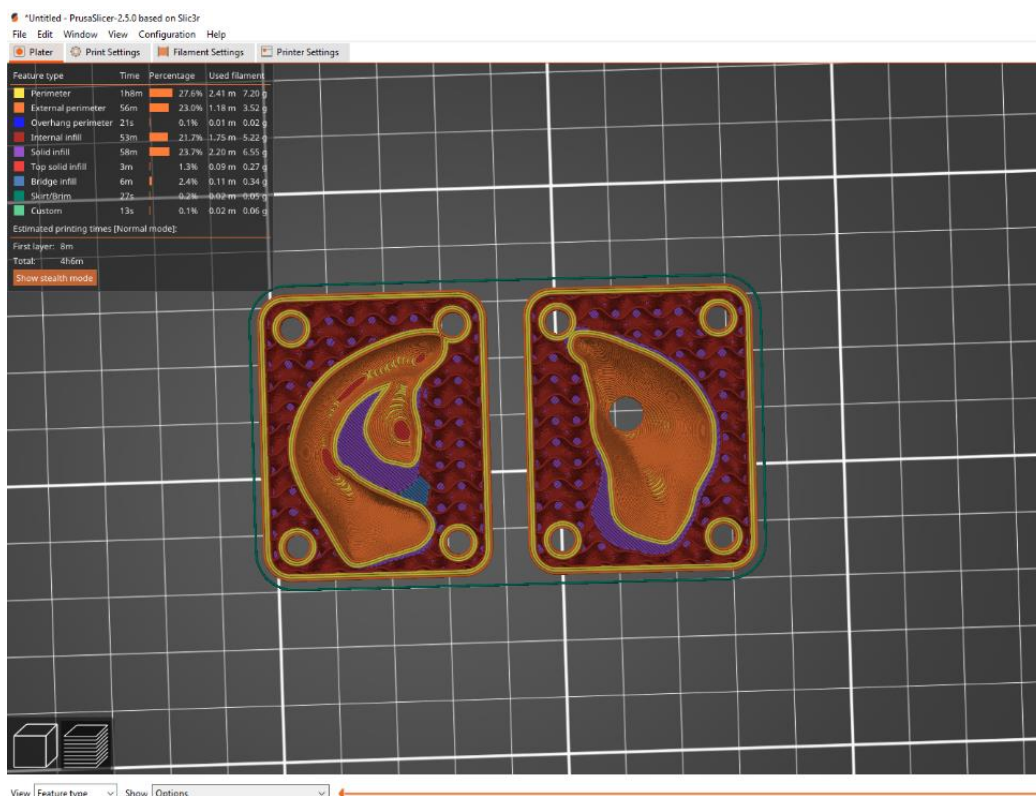


Slika 43. Modelirani kalup

Kako je kalup izrađen od dvije ploče, njihovo spajanje osigurano je imbus vijcima, u svakom uglu kalupa po jedan. Vijci su M4x20 mm, dovoljne duljine kako bi se spojile dvije kalupne ploče. Zbog njih bilo je potrebno proširiti same dimenzije kalupa da se ne bi preklapali provrti vijaka i šupljina za lijevanje. Također s gornje strane kalupa postavljen je otvor za lijevanje, koja odgovara stražnjoj strani (manje vidljivoj) uške kako prilikom njegovog lijevanja ne bi naštetio estetici.

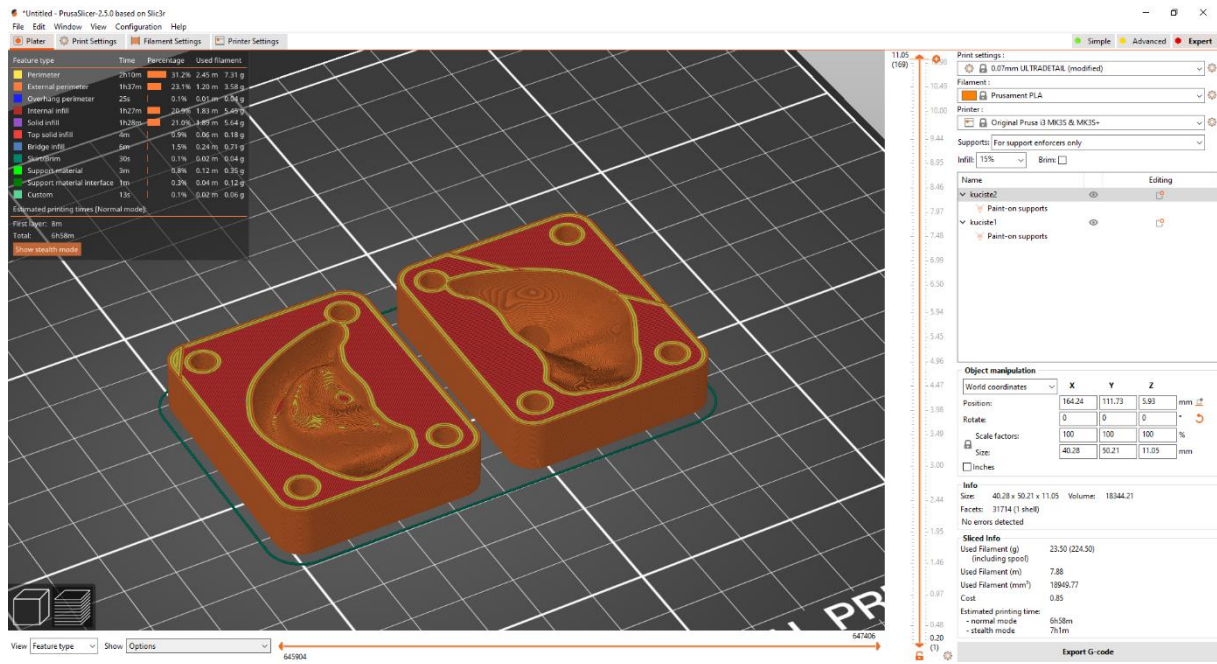
4.5. Izrada kalupa FDM metodom

Nakon modeliranja kalupa, potrebno je stvoriti STL datoteku koja se ubacuje u program za podešavanje parametara obrade. Isto kao i kod izrade uzorka, na brzinu ispisa mogu utjecati promjene raznih parametara. Na slici 44 prikazan je poprečni presjek kalupa, smješten na radnu ploču printera. Boje koje se javljaju i kod ovog primjera također imaju isto značenje; tamno zelena kontura ispisa podloge, narančasta vanjska kontura, žuta unutarnja kontura, ljubičasta potpuna ispuna kalupa i crvena djelomična ispuna kalupa.

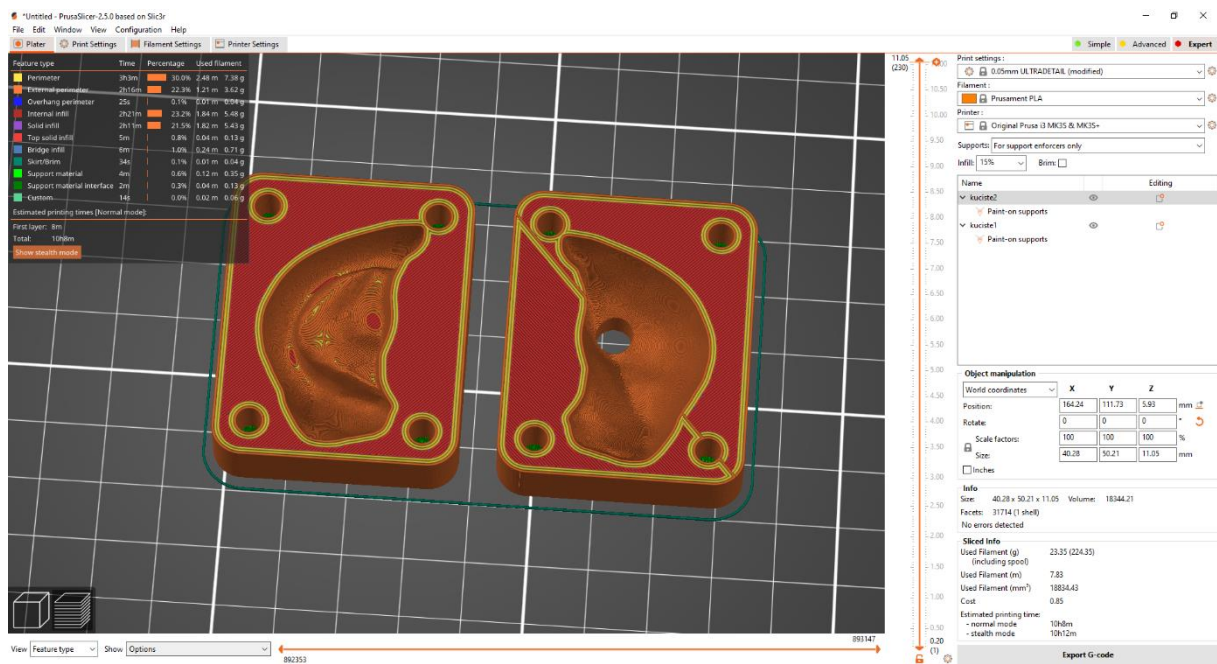


Slika 44. Poprečni presjek kalupa za ispis

Parametri tijekom izrade bili su sljedeći: debljina sloja 0,1 mm, materijal PLA, uređaj Prusa i3, potporne strukture nisu bile potrebne zbog zahvalne geometrije kalupa, a popunjavanje kontura svedeno je na minimum radi brže izrade. Podešavanjem parametara kao što je brzina izrade popunjavanja svedena je na mogući maksimum kako bi se uštedilo na vremenu, također je smanjena i količina unutarnjih kontura uz isti razlog. Ovim preinakama, brzina izrade smanjena je sa 4 h i 30 minuta na 3 h i 52 minute. Također, moglo se izrađivati i u kvaliteti s debljinom sloja od 0,07 mm (slika 45) i od 0,05 mm (slika 46), ali to uvelike produljuje vrijeme izrade i to na 6 h i 58 minuta i 10 h i 8 minuta.

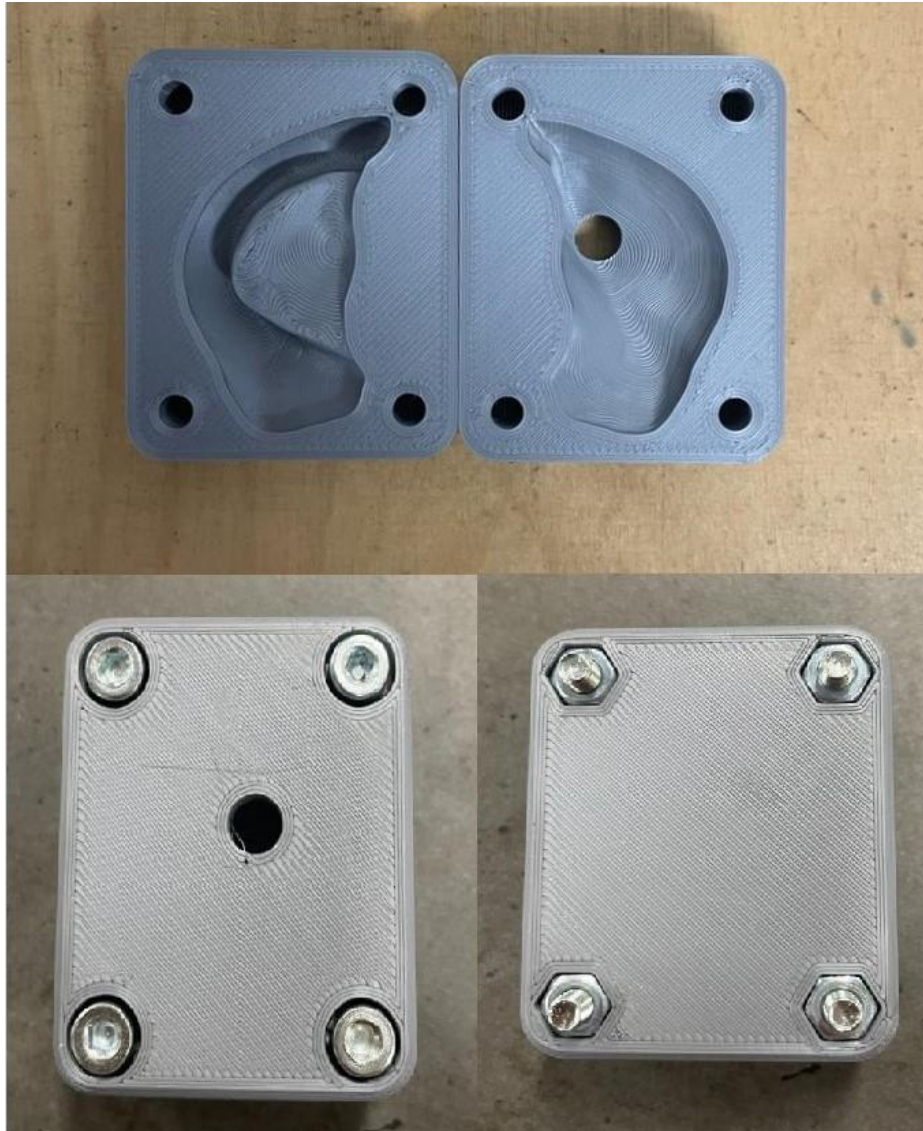


Slika 45. Kalup pri kvaliteti izrade s debljinom sloja 0,07 mm



Slika 46. Kalup pri kvaliteti izrade s debljinom sloja 0,05 mm

Slika 47 prikazuje dobivene polovice kalupa na gornjoj slici. Jasno se vide stepeničasti efekti kao što su bili prikazani i u programu za podešavanje parametara. Donje dvije slike prikazuju spojene polovice kalupa vijecima sa gornje i donje strane. Gornja strana ima otvor namijenjen na lijevanje silikona i s iste strane se postavljaju glave vijaka, dok se s donje strane vijci pričvršćuju maticama.



Slika 47. Ispisani kalup

4.6. Lijevanje silikona u kalup

Za potrebe diplomskog rada, umjesto pravog medicinskog silikona, korišten je silikon za izradu kalupa. Lako nabavljiv materijal u dućanima za hobije koji ima namjenu da služi ili kao kalup ili figura. Za potrebe figure, kao što je služio u ovom radu, vrijeme sušenja ovisi o debljini modela. Kako je ovaj kalup zatvoren i jedini izvor zraka je preko otvora za lijevanje, silikon bi se sušio više od tri dana. Stoga je u svaku polovicu kalupa prethodno namazan vazelin, kako bi se osiguralo da ne dođe do sljepljivanja kalupa i silikona, te dodavan sloj po sloj silikona radi bržeg sušenja. Proces sušenja svakako bi bio kraći da je kalup izrađen od materijala otpornog na visoke temperature. Time bi se kalup zajedno sa silikonom mogao staviti u peć pri visokoj temperaturi i osušiti u roku od nekoliko sati.



Slika 48. Silikon korišten za lijevanje

4.7. Primjena prototipa proteze uha

Korišteni silikon bijele je boje, koji sušenjem poprima boju kosti. U slučaju izrade prave proteze uha, bilo bi potrebno tražiti silikone u koji kože ili obojati prije primjene. Problem se javlja ljeti kada cjelokupna koža poprimi tamniju boju, a silikonska proteza ostaje iste boje. Taj bi se problem mogao riješiti ili premazivanjem proteze bojama ovisno o boji kože ili izradom tri ili više proteza različitih boja koje odgovaraju stupnju tamnjenja kože.

Pripajanje ovih proteza izvedivo je na dva načina; magnetima ili lijepljenjem. Magneti se operativnim zahvatom postavljaju ispod kože čovjeka na jednaka mjesta kao što je i ugrađen magnet u silikonsku protezu. Njihovim približavanjem, ostvaruje se privlačenje i osigurava čvrstu i nepomičnu protezu uha. Drugi način je primjena kirurškog ljepljiva koje radi na sličnom načelu kao i ljepljivo za protezu zubi. Kirurško ljepljivo koristi se i prilikom operativnih zahvata kao što je šivanje npr. izgubljenog prsta te se za dodatnu sigurnost i lijepi. Na tržištu je teško dostupno za vlastite potrebe i zahtijeva korištenje samo u medicinske svrhe, stoga u ovom radu nije primijenjeno, već je prototip spojen običnim kućnim ljepljivom koje se lako kasnije skida. Također ljepljivo se i u bolnicama rijetko nabavlja jer ima kratki rok uporabe, a primjenjuje su u malim količinama.



Slika 49. Odlivena proteza (lijevo) i pričvršćena na uho (desno)

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu cilj je bio napraviti prototip proteze uha. Osobi nedostaje gornji dio desnog uha te je zamišljeno da se s pomoću slike drugog uha načini nadomjestak. Cijeli proces započinje 3D skeniranjem kojim se generira slika unutar programa i tvori skup oblaka točaka. Iz tog oblaka točaka stvara se STL datoteka skeniranog lijevog uha. Unutar programa, izdvojen je gornji segment lijevog uha i zrcaljen kako bi odgovarao suprotnoj strani. Segment je izrađen FDM tehnologijom od PLA materijala i za nadopunu prostora između njega i uha koristila se glina. Iteracijama postupka nadopune dobio se završni uzorak kojeg je trebalo skenirati i unutar programa urediti da bude glatkih površina i bez nepravilnosti. Dobivanjem tog modela izradio se kalup u koji se lijevao prototip. Za prototip je odabran silikon za izradu kalupa koji ima slične karakteristike kao medicinski silikon.

Prema dobivenim rezultatima može se zaključiti kako je ovo moguća metoda primjene za izradu nadomjeska uha. Ono što bi bilo poželjno je izraditi kalup s većom točnošću ili primijeniti drugu tehnologiju, kao što je npr. često korištena SLA. Tako bi se izbjegao stepeničasti efekt na samom odljevku.

6. LITERATURA

- [1] Godec D.; Šercer M.: *Aditivna proizvodnja s polimerima*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb veljača 2018.
- [2] Pilipović A.: *Aditivna proizvodnja*, Iz svijeta plastike i gume, Polimeri 33(2012)3-4
- [3] Wohlers T.; Garnett T.; *History of additive manufacturing*; Wohlers report 2016, <https://wohlersassociates.com/wp-content/uploads/2022/08/history2016.pdf>
- [4] <https://www.iso.org/obp/ui>
- [5] Sredanović B.: *Aditivne tehnologije i tehnologije brze izrade prototipova*, Strojarski fakultet, Banja Luka 2016.
- [6] Radanić D.: *Utjecaj parametara niskobudžetnog 3D printanja na prionjivost modela na radnu podlogu*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2015.
- [7] T. Wohlers: *Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates, 2016.
- [8] Salmi M.: *Additive Manufacturing Processes in Medical Applications*, Materials, 14(1): 191, siječanj 2021.
- [9] Ngan E.M., Rebeyka I.M., Ross D.B., Hirji M., Wolfaardt J.F., Seelaus R., Grosvenor A., Noga M.L.: *The rapid prototyping of anatomic models in pulmonary atresia*, J Thorac Cardiovasc Surg, 132(2):264-269 (2006.)
- [10] Binder T.M., Moertl D., Mundigler G., Rehak G., Franke M., Delle-Karth G., Mohl W., Baumgartner H., Maurer G.: *Stereolitho-graphic biomodeling to create tangible hard copies of cardiac structures from echocardiographic data In vitro and in vivo validation*, J Am Coll Cardiol 35(1):230–237 (2000.)
- [11] Vandenbroucke B., Kruth J.-P.: *Selective laser melting biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts*, Rapid Prototyp, J 13(4):196–203 (2007)
- [12] Curodeau A., Sachs E., Caldarise S.: *Design and fabrication of cast orthopedic implants with freeform surface textures from 3-D printed ceramic shell*, J Biomed Mater Res 53:525–535 (2000.)

- [13] Bens A., Seitz H., Bermes G., Emons M., Pansky A., Roitzheim B., Tobiasch E., Tille C.: *Non-toxic flexible photopolymers for medical stereolithography technology*, Rapid Prototyp, J 13(1):38–47 (2007.)
- [14] Bibb R., Eggbeer D., Williams R.: *Rapid manufacture of removable partial denture frameworks*, Rapid Prototyp, J 12(2):95–99 (2006.)
- [15] Bidanda B., Bártolo P.: *Virtual Prototyping & Bio Manufacturing in Medical Applications*, 2008. Springer Science+Business Media, LLC
- [16] Bonilla A.: *Pediatric Microtia Reconstruction with Autologous Rib*, Facial Plastic Surgery Clinic; 26: 57-68., 2018.
- [17] Rodríguez-Aria J.P., Gutiérrez Venturini A., Pampín Martínez M.M., Gómez García E., Muñoz Caro J.M., San Basilio M., Martín Pérez M., Cebrián Carretero J.L.: *Microtia Ear Reconstruction with Patient-Specific 3D Models—A Segmentation Protocol*, J. Clin. Med. 2022., 11, 3591
- [18] Ciocca L., Scotti R.: *CAD-CAM generated ear cast by means of a laser scanner and rapid prototyping machine*, The journal of prosthetic dentistry, Vol 92, No. 6: 591-595, 2004.
- [19] Al Mardini M., Ercoli C., Graser G. N.: *A technique to produce a mirror-image wax pattern of an ear using rapid prototyping technology*, The journal of prosthetic dentistry, Vol 94, No. 2: 195-197, 2005.
- [20] <https://www.ireal3dscan.com/products/ireal-2e-3d-scanner/>
- [21] <https://www.prusa3d.com/category/original-prusa-i3-mk3s/>