

Personalizirani nakit za zube "grillz"

Miučin, Marin

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:159896>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-28**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marin Miućin

Zagreb, 2024/2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Tanja Jurčević Lulić, dipl. ing.

Student:

Marin Miučin

Zagreb, 2024/2025.

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

Zahvaljujem se mentorici dr. sc. Tanji Jurčević Lulić na pomoći tijekom izrade ovog rada.

Također se zahvaljujem svojoj obitelji, djevojci i prijateljima na podršci, pomoći i strpljenju tijekom studija.

Marin Miučin



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski



| | |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu | |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: 602 - 04 / 25 - 06 / 1 | |
| Ur.broj: 15 - 25 - | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marin Miučin** JMBAG: **0035230309**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Personalizirani nakit za zube „grillz“**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Personalized dental jewelry „grillz“**

Opis zadatka:

Krajem 20. stoljeća pojavila se moda nošenja nakita za zube „grillz“ postavljenog na prednje zube, uglavnom izrađenog od plemenitih metala bez ili s ukrasima od dragog ili poludragog kamenja. Cilj rada je istražiti dizajn i način pričvršćenja nakita „grillz“ na zube.

U radu je potrebno:

- opisati najčešće korištene materijale za izradu nakita „grillz“ te načine pričvršćenja,
- izraditi 3D model zubi gornje i donje čeljusti,
- oblikovati personalizirani nakit za zube „grillz“ korištenjem CAD softvera,
- postaviti kriterije stabilnosti koji se temelje na prilagođenom matematičkom modelu *robotskog hvatanja*.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.
2. rok: 10. i 11. 7. 2025.
3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

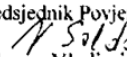
Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. – 28. 2. 2025.
2. rok: 15. 7. – 18. 7. 2025.
3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Tanja Jūrčević Lulić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| 1. Uvod | 1 |
| 1. 1. Povijest | 1 |
| 2. Izbor materijala..... | 3 |
| 2. 1. Plemeniti metali..... | 4 |
| 2. 2. Osnovni metali | 5 |
| 2. 3. Nehrđajući čelik | 5 |
| 2. 4. Titan i njegove legure..... | 6 |
| 2. 5. Keramika | 7 |
| 2. 6. Polimerni materijal | 8 |
| 3. Načini pričvršćivanja | 9 |
| 3. 1. Pričvršćivanje oblikom..... | 9 |
| 3. 2. Zubne kopče | 9 |
| 3. 3. Adhezivni sustavi | 10 |
| 3. 4. Privremeni cementi | 11 |
| 4. Izrada modela..... | 12 |
| 4. 1. Intraoralni skener..... | 12 |
| 4. 2. Priprema modela | 13 |
| 4. 3. Izrada površina u SolidWorksu | 15 |
| 4. 4. Oblikovanje unutarnjeg dijela „grillza“ | 17 |
| 4. 4. 1. Prva iteracija modela..... | 17 |
| 4. 4. 2. Druga iteracija modela | 17 |
| 4. 4. 3. Treća iteracija modela | 18 |
| 4. 5. Oblikovanje „grillza“ | 18 |
| 5. Kriteriji stabilnosti koji se temelje na prilagođenom matematičkom modelu robotskog hvatanja..... | 20 |
| 5. 1. Stabilnost ovisno o rotaciji i translaciji | 21 |
| 5. 2. Stabilnost u odnosu na robusnost | 23 |
| 5. 3. Robusne mape | 25 |
| 6. Aditivna proizvodnja | 28 |
| 6. 1. Faze procesa aditivne proizvodnje | 30 |
| 6. 2. Aditivna proizvodnja korištena za izradu „grillza“ | 30 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 32 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1.1. Graf zanimanja za "grillze" prema Google Trends Data [1]..... | 2 |
| Slika 2.1. Koraci pri odabiru materijala [3] | 3 |
| Slika 2.2. Primjer "grillza" izrađen od platine [5]..... | 4 |
| Slika 2.3. Primjer "grillza" izrađen od zlata [6]..... | 5 |
| Slika 2.4. Primjer „grillza“ izrađen od titana [9] | 7 |
| Slika 3.1. Primjer prihvata zubne kopče [13]..... | 10 |
| Slika 3.2. Zračni mjehurići [11] | 11 |
| Slika 4.1. Omnicam CEREC AC Sirona [16] | 12 |
| Slika 4.2. Model donjih zubi | 13 |
| Slika 4.3. Model gornjih zubi..... | 13 |
| Slika 4.4. Osnovni elementi <i>mesh</i> modela [17]..... | 14 |
| Slika 4.5. Uređeni model donjih zubi..... | 15 |
| Slika 4.6. Uređeni model gornjih zubi | 15 |
| Slika 4.7. Izgled <i>mesh</i> modela donjih zubi..... | 16 |
| Slika 4.8. Pojednostavljeni površinski model donjih zubi | 16 |
| Slika 4.9. Prvi izrađeni model „grillza“ postavljen na zube | 17 |
| Slika 4.10. Drugi izrađeni model "grillza" postavljen na zube | 18 |
| Slika 4.11. Dizajn izrađen odstranjivanjem materijala | 19 |
| Slika 4.12. Dizajn izrađen dodavanjem materijala..... | 19 |
| Slika 4.13. Dizajn izrađen oblicima | 19 |
| Slika 5.1. Robotska hvataljka s dva prsta [19] | 20 |
| Slika 5.2 Struktura .stl datoteke [19]..... | 21 |
| Slika 5.3. Kontakt kirurga i vodilice [23]..... | 23 |
| Slika 5.4. Kontakt vodilice i kosti [23] | 24 |
| Slika 5.5. Tlocrt s 12 kontaktnih točaka [23] | 25 |
| Slika 5.6. Robusna mapa u xz ravnini [23] | 26 |
| Slika 5.7. Dijagram ovisnosti koeficijenta kontakta i broja kontaktnih točaka [23] | 27 |
| Slika 6.1. Dijelovi FDM printera [25]..... | 30 |
| Slika 6.2. Elego Neptune 4 Plus [26] | 31 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 2.1. Mehanička svojstva čistog i legiranog zlata [3] | 4 |
| Tablica 2.2. Sastav nehrđajućeg čelika [6]..... | 6 |
| Tablica 2.3. Mehanička svojstva titana i ostalih materijala [3]..... | 6 |
| Tablica 2.4. Usporedba mehaničkih svojstava raznih materijala [9] | 8 |
| Tablica 5.1. Usporedba koeficijenata [18] | 26 |
| Tablica 6.1. Materijali i tehnologije korišteni u aditivnoj proizvodnji [19]..... | 29 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Opis | Jedinica |
|-------------------------|---|-----------------|
| \mathbf{C}_w | Matrica translacijske krutosti | - |
| \mathbf{f}_a | Vektor sile kirurga | - |
| \mathbf{f}_c | Vektor sile u kontaktnim točkama | - |
| \mathbf{K} | Prostorna simetrična matrica krutosti | - |
| \mathbf{K}_v | Matrica rotacijske krutosti | - |
| \mathbf{L}_a | Vektor površine | - |
| M_R | Rotacijski parametar stabilnosti | - |
| M_T | Translacijski parametar stabilnosti | - |
| \mathbf{n}_i | Jedinični vektor normale | - |
| \mathbf{p}_i | Vektor položaja kontaktnih točaka | - |
| S | Površina | mm ² |
| \mathbf{q}_i | Vektor položaja točke | - |
| \mathbf{w}_i | Vektor u točki kontakta (engl. <i>wrench vector</i>) | - |
| \mathbf{W} | Matrica vektora sila | - |
| α_i | Težinski faktor | - |
| ρ_i | Udaljenost odabrane točke do osi rotacije | - |
| σ_i | Translacijski parametri krutosti | - |
| $\boldsymbol{\omega}_i$ | Svojstveni vektor matrice \mathbf{K}_v | - |
| $\boldsymbol{\mu}_i$ | Rotacijski parametri krutosti | - |
| η_c | Koeficijent kontakta s površinom | - |
| η_g | Koeficijent vodilice | - |

SAŽETAK

U završnom radu istražuje se proces stvaranja 3D modela personaliziranog nakita za zube „grillz“, uključujući prikupljanje podataka i modeliranje do završnog oblikovanja i pripreme za proizvodnju. Također su istraženi materijali koji se često koriste za izradu nakita u usnoj šupljini te mogući načini pričvršćivanja koji bi se mogli primjenjivati. Zbog potrebe za savršenim pristajanjem obrađeni su i članci o stabilnosti u ovisnosti o robusnosti i rotacijskim i translacijskim parametrima. Naglasak je na tehničkim aspektima koji omogućuju stvaranje stabilnih, oblikom prilagođenih i estetski privlačnih dodataka u svijetu koji sve više cijeni personalizaciju i inovaciju.

Ključne riječi: „grillz“, materijali, načini pričvršćivanja, stabilnost

SUMMARY

The final paper explores the process of making a 3D model of personalized teeth jewelry „grillz“, including data gathering, modeling, final design and manufacturing. It also explores materials commonly used for creating oral jewelry and types of attachment methods that could be applied. Due to the need for a perfect fit, articles about stability in relation to robustness and stability based on rotational and translational parameters were reviewed. The emphasis is on technical aspects that enable the creation of stable, shape-adapted and aesthetically pleasing accessories in a world that appreciates personalization and innovation.

Key words: „grillz“, materials, attachment methods, stability

1. Uvod

Razvoj 3D tehnologije i modeliranja posljednjih godina donio je nove mogućnosti u polju industrije te također u polju dizajna uključujući dentalnu estetiku. Jedan od primjera primjene ove tehnologije je nakit za zube „grillz“ koji je spoj estetike, funkcionalnosti i individualnosti, što predstavlja odličan primjer kako inovacije mogu zadovoljiti estetske, ali i funkcionalne potrebe korisnika.

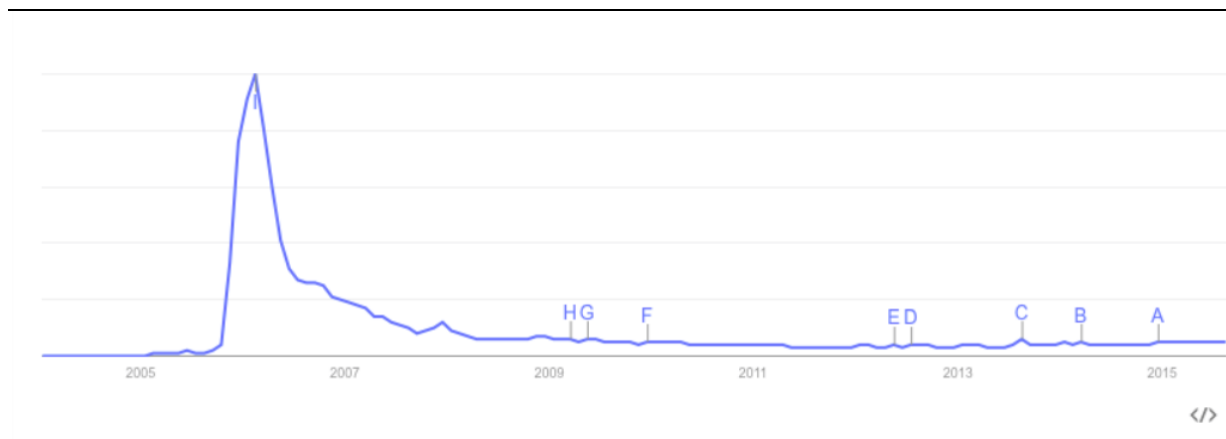
Estetika igra ključnu ulogu u današnjem svijetu, zbog društvenih mreža i medija predstavlja dodatno sredstvo komunikacije, statusa i samoizražavanja. „Grillz“ nije samo nakit za zube, već spaja luksuz i osobni stil tako što često uključuje razne oblike, uzorke i materijale poput zlata, srebra ili dragog kamenja.

Izrada personaliziranih „grillza“ započinje digitalizacijom zubne anatomije pomoću precizne intraoralne snimke zubi koja omogućuje trodimenzionalnu sliku vanjskog obrisa zubi. Trodimenzionalni oblik se nadalje koristi za ubacivanje u specijalizirani softver poput SolidWorksa koji služi za oblikovanje „grillza“.

Cilj rada je modelirati i osigurati pristajanje „grillza“ na zube. Potrebno je istražiti načine pričvršćivanja i razne materijale koji se mogu koristiti za njihovu izradu te postaviti kriterije stabilnosti koji se temelje na prilagođenom matematičkom modelu robotskog hvatanja.

1. 1. Povijest

Prvi primjerci zubnog nakita datiraju sve do 2500 godina pr. Kr. kada su nađena dva zlatna zuba u Gizi [1]. Drugi primjer pojave zubnog nakita su Etruščani iz Italije oko 630. godine pr. Kr [2]. Žene su nosile zlatne dekorativne zube ili zube izrađene od slonovače kako bi pokazale bogatstvo. Do ponovnog zanimanja za „grillze“ došlo je kasnih 80-ih godina 20. stoljeća kada ih je popularizirao reper Slick Rick te su tada bili korišteni prvenstveno u hip-hop kulturi kao simboli bogatstva i statusa. Na Slici 1.1. koja je bazirana na Google Trends Data može se vidjeti da je do najvećeg interesa došlo nakon 2005. zbog pjesme repera Nelly-a naziva „Grillz“. U današnje vrijeme „grillzi“ nisu više rezervirani isključivo za sudionike hip-hop kulture već se pojavljuju na različitim poznatim osobama, sportašima i pjevačima [1].

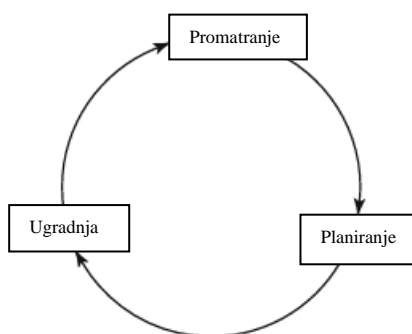


Slika 1.1. Graf zanimanja za "grillze" prema Google Trends Data [1]

2. Izbor materijala

Pri izboru materijala potrebno je odrediti specifične zahtjeve materijala zbog toga što zahtjevi za svojstva materijala variraju ovisno o industriji u kojoj se koriste. Dok su primjerice u avionskoj industriji važnija dobra mehanička svojstva i mala gustoća, biomedicina zahtjeva druga svojstva. U usnoj šupljini materijal je izložen različitim silama, bakterijama, fluidima, promjenama u kiselosti i lužnosti što znatno utječe na degradaciju materijala [3]. Iako se od odabranog materijala za potrebe ovog rada traži primarno estetska funkcija, postoje i slijedeća propisana svojstva koje materijal mora ispuniti kako bi se mogao koristiti u dentalnoj medicini. Materijal ne smije proizvoditi štetne toksične i alergijske reakcije na pacijenta, mora biti otporan na koroziju i fizičke promjene u oralnim tekućinama; fizikalna i mehanička svojstva, poput toplinske vodljivosti, koeficijenta termičke ekspanzije i čvrstoće, moraju zadovoljiti minimalne vrijednosti; tehnička stručnost potrebna za upotrebu i izradu trebala bi biti izvediva za prosječnog stomatologa i tehničara te metali, legure i ostali materijali za izradu bi trebali biti jeftini i lako dostupni čak i u vrijeme hitnoća [4].

Prilikom izbora materijala koriste se tri koraka za odabir: planiranje, ugradnja i promatranje koji su prikazani na Slici 2.1. Promatranje donosi postojeće probleme u materijalu te izazove koji se trebaju riješiti. U fazi planiranja testiraju se svojstva i karakteristike novog materijala koji će potencijalno riješiti postojeće probleme, nakon čega se u fazi ugradnje uzimaju u obzir varijacije u uvjetima u kojima će se materijal koristiti i karakteristike materijala. Ovaj proces naziva se stomatologija utemeljena na dokazima. American Dental Association definira stomatologiju utemeljenu na dokazima kao pristup dentalnoj medicini temeljen na znanstvenim dokazima, kliničkom iskustvu stomatologa te pacijentovim odabirom načina liječenja [4].



Slika 2.1. Koraci pri odabiru materijala [3]

2. 1. Plemeniti metali

Najčešći izbor materijala za nakit za zube su plemeniti metali zbog svojeg luksuznog izgleda, trajnosti i otpornosti na koroziju, a posebice bi se mogli izdvojiti zlato i platina.

Zlato postoji u nijansama žute, bijele i ljubičaste boje te mu je finoća u granicama od 14 karatnog do 24 karatnog zlata, koji se odnosi samo na postotak zlata u leguri. Čisto zlato karakterizira mekoća, kovnost i duktilnost, koja je najveća među metalima, ali i niska čvrstoća. Pomoću Tablice 2.1. može se usporediti tvrdoća, vlačna čvrstoća i duktilnost ovisno o udjelu zlata u leguri. Viši udio zlata rezultira čistijim izgledom, ali se žrtvuje tvrdoća te je sklono deformacijama i ogrebotinama, dok niži udio zlata, iako se žrtvuje boja zbog prisustva drugih elemenata, ima bolja mehanička svojstva zbog čega je zlato potrebno legirati s drugim metalima poput bakra, srebra, platine, itd. čime postaje popularan izbor u izradi nakita poput „grillza“ [4].

Tablica 2.1. Mehanička svojstva čistog i legiranog zlata [4]

| Materijal | Gustoća (g/cm ³) | Tvrdoća (VHN/BHN) (kg/mm ²) | Vlačna čvrstoća (MPa) | Produljenje (%) |
|---|------------------------------|---|-----------------------|-----------------|
| Lijeivano 24-karatno zlato | 19.3 | 28 (VHN) | 105 | 30 |
| Lijeivano 22-karatno zlato | - | 60 (VHN) | 240 | 22 |
| Kovano zlato | - | 85(BHN) | 395 | 30 |
| Lijeivana legura na bazi zlata (70% Au) | 15.6 | 135/195(VHN) | 425/525 | 30/12 |
| Kondenzirana zlatna folija | 19.1 | 60(VHN) | 250 | 12.8 |

Iako se platina može koristiti kao legirani element sa zlatom, primjenjuje se i zasebno u stomatologiji zbog visoke tvrdoće, duktilnosti, kovnosti, prirodnog sjaja i otpornosti na oralne uvjete. Na Slici 2.2. mogu se vidjeti „grillzi“ koji su izrađeni od platine, dok se na Slici 2.3. može vidjeti drugačiji oblik modela „grillza“ izrađen od zlata.



Slika 2.2. Primjer "grillza" izrađen od platine [5]



Slika 2.3. Primjer "grillza" izrađen od zlata [6]

2. 2. Osnovni metali

U osnovne metale ubrajamo metale koji se koriste za legiranje plemenitih metala poput srebra, bakra i nikla. Srebro i bakar kao najpoznatiji predstavnici ove grupe metala se ne koriste kao zaseban materijal u stomatologiji već isključivo kao legura zlata i ostalim metalima, poput paladija. Njihovo prisustvo u leguri zlata poboljšava mehanička svojstva, poput tvrdoće i modula elastičnosti [4].

2. 3. Nehrđajući čelik

Nehrđajući čelik predstavlja odličnu zamjenu za srebro, zbog sličnih mehaničkih i estetskih svojstava, dok mu je cijena niža. Svojstva nehrđajućeg čelika ovise o kemijskom sastavu i procesima proizvodnje. Najviše prisutni nehrđajući čelik je 316L, iako zbog neprestanog razvijanje novih materijala postoje materijali koji su čvršći i više otporni na koroziju. Nehrđajući čelik 316L ima austenitnu kristalnu strukturu koja mu omogućuje nemagnetična svojstva. Sastoji od legure kroma, koja tvori sloj kromovog oksida što mu omogućuje otpornost na koroziju, od dušika koji iako se dodaje u malim količinama ($< 0.10\%$) povećava mehaničku čvrstoću te od molibdena koji je zaslužan za otpornost na rupičastu koroziju. Oznaka L u imenu znači da je smanjen udio ugljika u odnosu na nehrđajući čelik 316, što ga čini manje osjetljivim na koroziju zbog manje mogućnosti pojave kromovih karbida koji nakon formiranja mogu ostaviti susjedna područja sa smanjenim razinama kroma te tako povećati šansu pojave korozije. Rex 734 i 22-13-5 su neki od novije razvijenih nehrđajućih čelika koji imaju poboljšana mehanička svojstva i otpornost na koroziju, dok je BioDur 108 razvijen zbog alergijskih reakcija na nikal koji se zamjenjuje dodatkom mangana i dušika. Iako je rečeno da je nehrđajući čelik otporan na koroziju, nije pogodan za dugotrajnu primjenu u tijelu zbog neprestanog djelovanja tjelesnih tekućina [7].

U Tablici 2.2. se može vidjeti sastav svih prethodno navedenih nehrđajućih čelika te udio raznih elemenata koji ih čine.

| Legura | Cr | Ni | Mn | Mo | C | N | Nb | V | Si | Cu | P | S |
|---|-----------|-----------|--------|---------|--------|-----------|----------|---------|-------|-------|--------|--------|
| 316L ASTM F138, ISO 5832-1 | 17–19 | 13–15 | <2 max | 2.25–3 | <0.030 | <0.10 | – | – | <0.75 | <0.5 | <0.025 | <0.010 |
| 22-13-5 ASTM F1314 | 20.5–23.5 | 11.5–13.5 | 4–6 | 2–3 | <0.030 | 0.2–0.4 | 0.1–0.3 | 0.1–0.3 | <0.75 | <0.5 | <0.025 | <0.010 |
| Rex 734, Ortron 90 ASTM F1586 ISO 5832-9 | 19.5–22 | 9–11 | 2–4.25 | 2–3 | <0.08 | 0.25–0.5 | 0.25–0.8 | – | <0.75 | <0.25 | <0.25 | <0.010 |
| BioDur® 108 ASTM F 2229 | 19–23 | <0.050 | 21–24 | 0.5–1.5 | <0.08 | 0.85–1.10 | – | – | <0.75 | <0.25 | <0.03 | <0.010 |

Tablica 2.2. Sastav nehrđajućeg čelika [7]

2. 4. Titan i njegove legure

Titan je jedini čisti metal koji se koristi u stomatologiji (oznaka CP (komercijalno čisti) 1-4 ovisno o sadržaju kisika i željeza), no može se također legirati s drugim metalima kako bi se dodatno poboljšala svojstva. Karakteriziraju ga biokompatibilnost, dobra mehanička svojstva, otpornost na koroziju te otpornost na trošenje. Ima sposobnost stvoriti stabilan sloj titanovog oksida na površini koji osigurava biokompatibilnost s okolnim tkivom, što mu omogućuje bolje prilagođavanje biološkom okolišu i uzrokuje manje nuspojave. Iako titan i njegove legure predstavljaju izvrstan odabir za implantate u ljudskom tijelu, zbog svoje sive boje može biti estetski problem ukoliko bi se upotrebljavao za izradu „grillza“. Titan se također koristi u legiranom obliku, a najviše se u medicini koristi Ti-6Al-4V. Ta legura se sastoji od 90% titana, 6% aluminijsa i 4% vanadijsa, što povećava čvrstoću i otpornost na koroziju bez žrtvovanja gustoće i biokompatibilnosti [8]. Pomoću Tablice 2.3. mogu se usporediti svojstva titana i njegove legure s ostalim materijalima poput nehrđajućeg čelika i zlata. Na Slici 2.4. prikazani su „grillzi“ izrađeni od titana.

Tablica 2.3. Mehanička svojstva titana i ostalih materijala [4]

| Materijal | Modul elastičnosti (GPa) | Maksimalna vlačna čvrstoća (MPa) | Granica tečenja (MPa) |
|---------------|--------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| 316L SS | 200 | 965 | 69 |
| Co-Cr-Mo | 240 | 700 | 450 |
| Tip IV zlata | 90 | 770 | >340 |
| CP grade 1 Ti | 102 | 240 | 170 |
| CP grade 4Ti | 104 | 550 | 483 |
| Ti-6Al-4V | 113 | 930 | 860 |



Slika 2.4. Primjer „grillza“ izrađen od titana [9]

2. 5. Keramika

Keramika se smatra najboljim izborom ukoliko je potrebno uskladiti estetiku ljudskog zuba. Keramika se koristi za izradu ispuna, ljuskica, krunica te mosnih konstrukcija. Odlikuju ju svojstva poput visoke tvrdoće, izvrsne otpornosti na koroziju i uvjete koji se nalaze u usnoj šupljini te estetske karakteristike, zbog koje se boja „grillza“ može podudarati s prirodnom boju zubi ukoliko se želi postići minimalistički izgled. Postoje također i mane, zbog njene krhkosti nije pogodna za oblikovanje manjih debljina, ima nisku vlačnu čvrstoću te svojstva joj ovise o mikrostrukturi i procesu proizvodnje. Zbog svoje cijene, koja ovisi o metalu i načinu proizvodnje, keramika još uvijek ima ograničenu upotrebu, no ukoliko bi se odabrao keramički materijal za izradu „grillza“, vijek trajanja bi bio vrlo dug i mogli bi se koristiti u ustima na duže vrijeme. Najčešći predstavnici keramike koja se koristi u medicini su aluminijev oksid (Al_2O_3) i zirkonijev dioksid (ZrO_2) koje karakterizira vrlo visoka tvrdoća i otpornost na koroziju i trošenje [10]. Pomoću Tablice 2.4. mogu se usporediti mehanička svojstva keramike i ranije navedenih materijala te tkiva s kojima bi ti materijali došli u dodir ukoliko se koriste u dodiru s zubima.

Tablica 2.4. Usporedba mehaničkih svojstava raznih materijala [11]

| Materijal | Razina ili stanje | Granica tečenja (MPa) | Produljenje (%) | Modul elastičnosti (GPa) | Vlačna čvrstoća (MPa) | Gustoća (g/cm ³) |
|--------------------|----------------------|------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------------|------------------------------|
| CP titan | 1 | 170 | 24 | 102 | 240 | 4.5 |
| | 2 | 275 | 20 | 102 | 345 | 4.5 |
| | 3 | 380 | 18 | 102 | 450 | 4.5 |
| | 4 | 483 | 15 | 104 | 550 | 4.5 |
| Ti-6Al-4V | | 860 | 10 | 113 | 930 | 4.4 |
| Ti-6Al-4V ELI | | 795 | 10 | 113 | 860 | 4.4 |
| Co-Cr-Mo | Lijev | 450 | 8 | 240 | 700 | 8.0 |
| Nehrđajući čelik | Otvrđen | 190 | 40 | 200 | 490 | 8.0 |
| | Hladno obrađen | 690 | 12 | 200 | 860 | 8.0 |
| Aluminijev oksid | Polikristalni | 400 (500/savijanje) | 0.1 | 380 | 220 | 3.96 |
| Zirkonijev dioksid | Stabiliziran itrijem | 1200 (savijanje) | 0.1 | 200 | 350 | 6.0 |
| Kortikalna kost | | N/A | 1 | 18 | 140 | 0.7 |
| Dentin | | N/A | 0 | 18.3 | 52 | 2.2 |
| Enamel | | N/A | 0 | 84 | 10 | 3.0 |

2. 6. Polimerni materijal

U svrhu ovog rada, materijal od kojeg će biti izrađeni „grillzi“ je polimerni materijal, točnije PLA (polilaktična kiselina) o kojem će riječ biti nešto kasnije. Polimeri mogu biti zanimljiv izbor zbog toga što imaju malu masu, u usporedbi s metalima što smanjuje opterećenje na zube, mogu biti obojeni kako bi se dobila boja jednaka zubima ili bilo koja boja po želji korisnika te biokompatibilni su sa zubima i usnom šupljinom [4]. Budući da se u ovom radu izrađuju „grillzi“ na temelju 3D modela zubi, polimerni materijal je idealan zbog lakoće prilagođavanja i niske cijene u usporedbi s drugim navedenim materijalima. Oni predstavljaju dobro rješenje za kratkotrajno korištenje, no ukoliko bi se koristili na duži vremenski period, postoji mogućnost promjene boje tijekom vremena te su ograničeni svojim mehaničkim svojstvima i otpornošću na kemijske reakcije s kojima bi se susreli u usnoj šupljini.

3. Načini pričvršćivanja

Ovisno o završnom obliku modela, vremenu nošenja i željama korisnika, postoji više načina za pričvršćivanje „grillza“. Budući da se mogu poistovjetiti s ostalim usnim nakitom poput krunica, ljuskica ili bravica za zube, mogu se primijeniti i neke metode koje se koriste za pričvršćivanje tih proizvoda. Mogu se podijeliti na uklonjive, odnosno „grillze“ koji se nose na kraće vrijeme, i trajno pričvršćene. Uklonjivi „grillzi“, kao što im ime govori, nisu trajno pričvršćeni već mogu biti postavljeni i uklonjeni prema želji, najčešće se proizvode prema otisku zuba korisnika kako bi se olakšalo postavljanje. Neke pozitivne značajke su da je olakšana higijena zubi i smanjena mogućnost oštećenja zubi korisnika. Trajni „grillzi“ koriste cimente ili ljepila kako bi se povezali na zube i time osigurali stabilnost, ali pri tome se povećava rizik od nastajanja infekcija, karijesa i potencijalnog oštećenja zubi. U nastavku će biti navedeni i objašnjeni neki primjeri pričvršćivanja „grillza“ na zube.

3. 1. Pričvršćivanje oblikom

„Grillzi“ se izrađuju prema točnom obliku zubi korisnika, primjerice pomoću 3D skena ili uzimanja zubnog otiska i izrade gipsanog modela te se pomoću uzetih podataka mogu oblikovati u odabranom programskom paketu za modeliranje. Pričvršćivanje je moguće zbog precizno izrađene geometrije „grillza“ koji savršeno nasjedaju na zube korisnika te omogućuju prijanjanje materijala na zube. Prednost ove metode je jednostavnost postavljanja i uklanjanja nakita sa zubi za što pritom nisu potrebni dodatni materijali za pričvršćivanje.

3. 2. Zubne kopče

Jedan od načina pričvršćivanja je pomoću zubnih kopči. To su uglavnom personalizirano izrađene kopče po mjeri zubi korisnika. Pozicioniraju se na unutarnjoj strani zuba, kako ne bi narušile estetsku funkciju, ali svejedno omogućile povezivanje nakita i zuba, ili na bočnoj strani pritom se oslanjajući na prirodne udubine između zuba (ponekad je potrebno i ukloniti dio zuba kako bi se stvorile udubine). Predstavljaju još jedan način pričvršćivanja koji pruža jednostavnost postavljanja i uklanjanja nakita, nisu potrebni dodatni materijali za pričvršćivanje poput cementa, no zahtijevaju preciznu izradu prema obliku zubi. Najčešće su izrađene od legura metala koje su fleksibilne i biokompatibilne [12]. Na Slici 3.1. može se vidjeti jedan primjer zubne kopče. Ukoliko bi se upotrebljavao ovakav način pričvršćivanja, oblik modela „grillza“ bi bio nešto

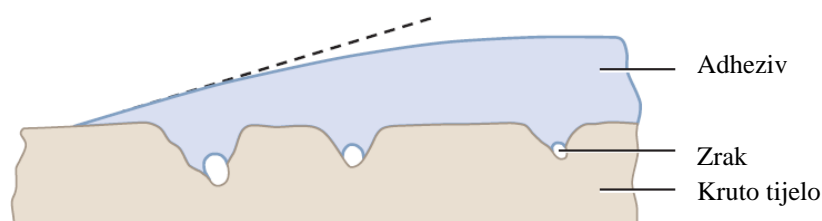
drugačiji nego što je u ovome radu zbog toga što nije potrebno da budu prihvaćeni na cijeloj površini zuba već bi bili samo oslonjeni na zubnu kopču.



Slika 3.1. Primjer prihvata zubne kopče [13]

3. 3. Adhezivni sustavi

Adhezivni sustavi služe za spajanje različitih materijala privlačenjem atoma i molekula, stoga se primjenjuju u stomatologiji za primjerice cementiranje proteza, ljuskica te ortodontskih aparata. Oni zahtijevaju jetkanje, što je zapravo priprema zubi prije nanošenja samog adheziva, tako što se stvara mikro porozna površina na zubnoj caklini [14]. Adhezivni sustavi se mogu podijeliti na jetkajuće/ispirujuće, samojetkajuće te staklenoionomerne adhezijske sustave ovisno o koracima koji se primjenjuju. Jetkajuće/ ispirajući adhezijski sustavi zahtijevaju zasebne faze jetkanja i ispiranja prije nanošenja primera i ljepila dok samojetkajući sustavi sadrže kisele monomere koji simultano kondicioniraju i infiltriraju zubni supstrat [11]. Staklenoionomerni adhezijski sustavi sastoje se od smole i staklenoionomernog cementa, a priprema zubi zahtjeva obradu slabom poliakrilnom kiselinom što pojačava vezanje elemenata [15]. U slučaju izrade „grillza“ za trajno nošenje, adhezivni sustavi bili bi potencijalno rješenje, no budući da su „grillzi“ nakit koji je primarno namijenjen kratkotrajnom nošenju, adhezivni sustavi ne predstavljaju najbolji način pričvršćivanja. Stavljanje adhezivnih sustava također može biti zahtjevan postupak zbog mogućnosti stvaranja mjehurića zraka na površini koja je u dodiru s adhezivnom (Slika 3.2.), stoga bi taj postupak trebali provoditi stomatolozi [11]. Zbog potrebe za jetkanjem zubi kiselinom i korištenja trajnih cementa čime se mogu nepovratno oštetiti zubi, unatoč svojim prednostima poput osiguravanja čvrste veze između „grillza“ i zuba te omogućavanja povezivanja bez vidljivih elemenata pričvršćivanja što bi osiguralo estetiku, nisu poželjni za pričvršćivanje u ovom radu.



Slika 3.2. Zračni mjehurići [11]

3. 4. Privremeni cementi

Naziv privremeni cement se odnosi na cimente koji ostaju u ustima najviše šest tjedana. Cementi su jedni od najčešće korištenih materijala za privremeno pričvršćivanje primjerice krunica i mostova te bi također bili prigodni za potrebe pričvršćivanja „grillza“. Neke od prednosti privremenih cementa su što osiguravaju stabilnu vezu, ali također omogućuju lako uklanjanje bez oštećivanja zubi, biokompatibilni su te lako odstranjivi. Jedno od najčešćih cementa na bazi kiseline za privremeno pričvršćivanje je cink-oksadni eugenolni cement (ZOE). Karakterizira ga lakoća korištenja, antibakterijska svojstva, niska čvrstoća i promjenjivost mehaničkih svojstava ovisno o temperaturi. Mogu se koristiti i kompozitni privremeni cementi koji zbog njihove neutralne boje omogućuju odlično cementiranje estetskih nadomjestaka [15].

4. Izrada modela

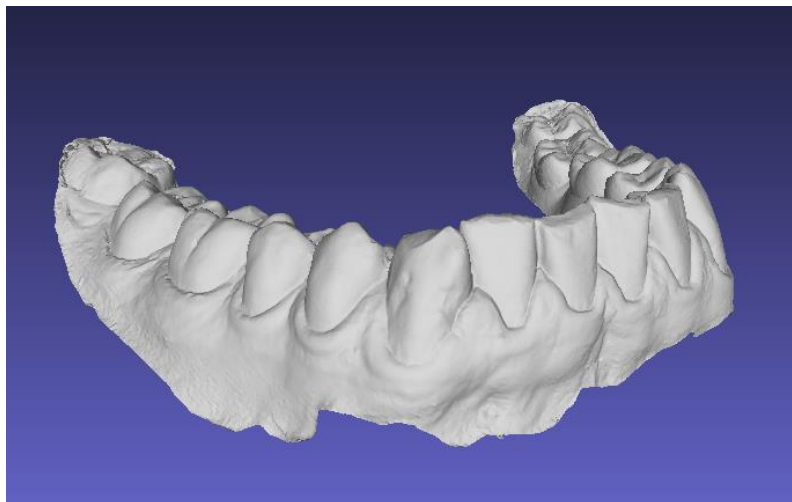
4. 1. Intraoralni skener

Prvi korak u izradi personaliziranih „grillza“ je izrada trodimenzionalnog modela zubi pomoću intraoralnog skenera. Intraoralni skener je ručni uređaj pomoću kojega je moguće dobiti trodimenzionalni model korisnikovih zubi u digitalnom obliku. Digitalizacija u stomatologiji, omogućavajući korištenje CAD (računalom potpomognuto oblikovanje) i CAM (računalom potpomognuta proizvodnja) sustava, najveća je promjena stomatološkog područja zadnjih godina. Neke od prednosti upotrebe intraoralnog skenera su: omogućavanje izrade digitalnog otiska odnosno trodimenzionalni prikaz zubi, prijenos snimke putem interneta, veća preciznost izrade, skraćivanje vremena izrade protetičkog rada, omogućavanje ponavljanje skeniranja isključivo dijelova koji nisu jasni ukoliko je potrebno te nezauzimanje fizičkog prostora poput modela izrađenih od gipsa. Koristi se u izradi protetskih radova, za implantološke postupke, izradu zaštitnih udlaga te u estetskoj stomatologiji. Snimljeni podatci konvertiraju se u stereolitografski (STL) format kako bi se mogli koristiti u svim CAD/CAM sustavima [15]. Za potrebe ovog rada korišten je skener Omnicam CEREC AC Sirona koji se sastoji od ručnog skenera i ekrana za prikaz skeniranih zubi. Skener je prikazan na Slici 4.1.

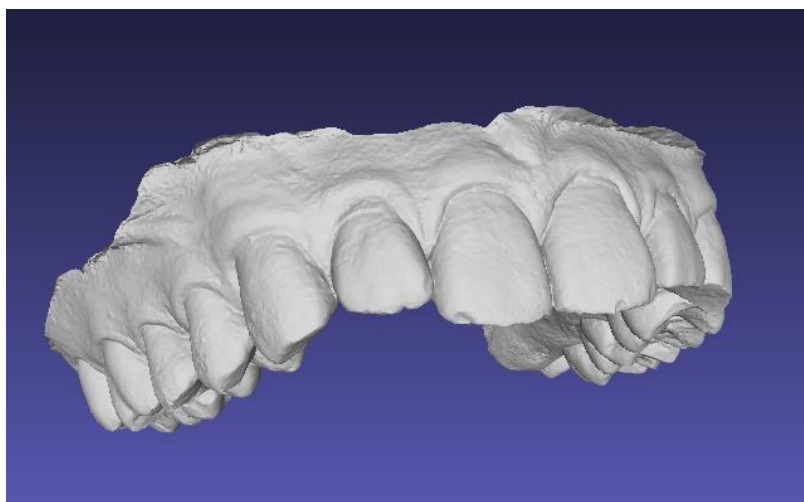


Slika 4.1. Omnicam CEREC AC Sirona [16]

Izrađena su dva trodimenzionalna modela, koji su prikazani na Slici 4.2. i Slici 4.3., gornjih i donjih zubi u svega nekoliko minuta, koji će se kasnije koristiti u obliku *mesh* modela.



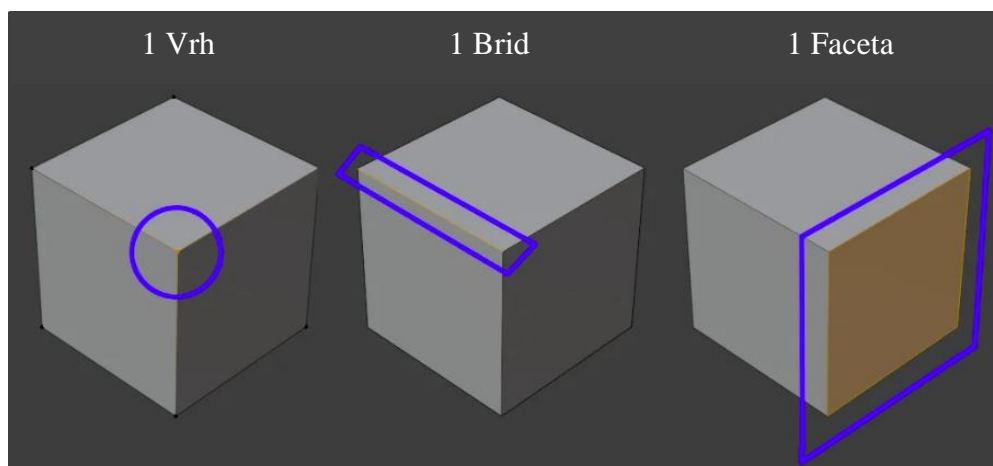
Slika 4.2. Model donjih zubi



Slika 4.3. Model gornjih zubi

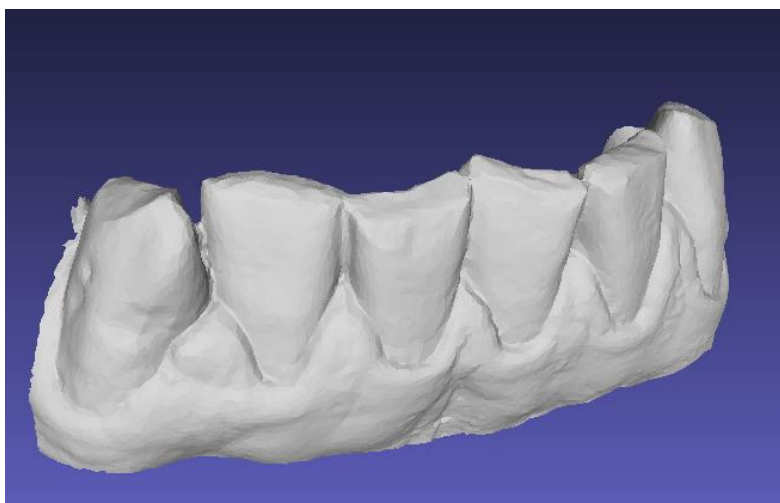
4. 2. Priprema modela

Mesh model koji je dobiven intraoralnim skenerom vrlo je detaljan te sadrži velik broj faceta. *Mesh* modeli su zapravo pojednostavljeni modeli koji se koriste za prikazivanje i analizu trodimenzionalnih objekata, a sastoje se od 3 osnovna elementa, vrhova, bridova i faceta koji su prikazani na Slici 4.4.



Slika 4.4. Osnovni elementi *mesh* modela [17]

Dobiveni model donjih zubi sastoji se od 688 tisuća faceta, dok se model gornji zubi sastoji od 818 tisuće. Iako programski paket SolidWorks omogućuje rad s *mesh* modelima, mnogo bolje radi s manjim brojem faceta (do 500 tisuća faceta [18]), površinama ili volumenskim modelima, stoga će se prije ubacivanja modela u program SolidWorks smanjiti broj faceta oba modela. Za smanjenje ukupnog broja faceta koristiti će se program MeshLab. MeshLab je besplatni program koji je najčešći izbor za smanjivanje faceta u *mesh* modelima zbog svoje jednostavnosti korištenja. Model se ubacuje u program, nakon čega se prilagođava za rad. Budući da će „grillzi“ biti izrađeni samo na šest zubi, četiri sjekutića te dva očnjaka, ostali zubi mogu se ukloniti pomoću funkcije *Delete Selected Vertices* kako bi se dobilo više faceta na konačnom modelu. Nakon što su se uklonili nepotrebni zubi, pomoću funkcije *Simplification: quadric edge collapse decimation* može se napisati točan broj faceta koji će sadržavati konačni model, to će u ovom slučaju biti 20 tisuća. Nakon što je program smanjio ukupni broj faceta, ako model ima otvorene površine, koristi se funkcija *Close Holes* kako bi se zatvorile sve manje rupe koje bi mogle postojati na modelu. Nakon provedenih navedenih funkcija, model se može *exportati*. Navedeni postupak ponavlja se ponovno i za gornji model zubi. Na Slici 4.5. je prikazan model donjih, a na Slici 4.6. je prikazan model gornjih zubi nakon što su obavljene navedene funkcije.



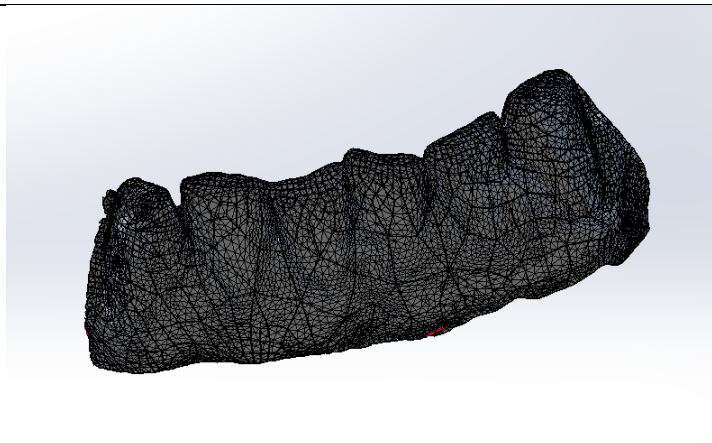
Slika 4.5. Uređeni model donjih zubi



Slika 4.6. Uređeni model gornjih zubi

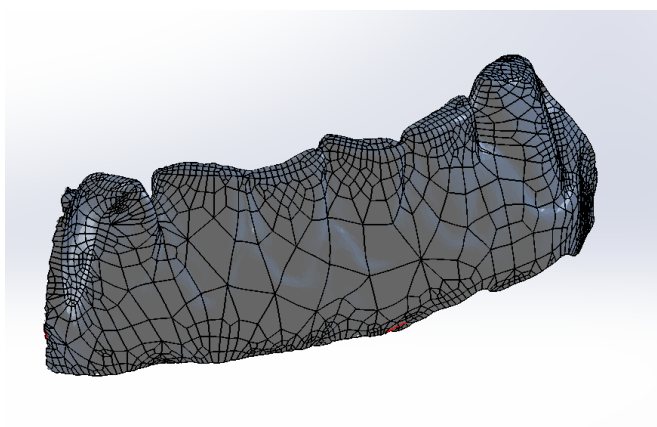
4. 3. Izrada površina u SolidWorksu

Prije ubacivanja modela u SolidWorks, potrebno je uključiti opciju *ScanTo3D* koja omogućava rad s *mesh* modelima i površinama. Dobiveni model se ubacuje u SolidWorks koji ga očitava kao *mesh* model. Navedeni postupak biti će opisan za izradu modela donjih zubi, no isti postupak je proveden i za izradu oblika gornjih zubi. Koristeći *Mesh Prep Wizard* dodatno se uređuje model, pomoću jedne od funkcija može se lokalno smanjiti broj faceta koji nije ključan za izradu konačnog modela te se mogu zagladiti površine. Na Slici 4.7. vidi se izgled konačnog *mesh* modela koji će se koristiti za daljnje oblikovanje.



Slika 4.7. Izgled *mesh* modela donjih zubi

Nakon funkcije *Mesh Prep Wizard* koristi se funkcija *Surface Wizard* koja omogućava stvaranje površina pomoću kojih se može mnogo bolje raditi u SolidWorksu. Tijekom odabira postotka površina koje će se generirati, važno je ne izbrisati površine koje su ključne za izradu dijela „grillza“ koji će pristajati na zube jer tu geometriju nije moguće ručno rekonstruirati. Nakon što su generirane površine, potrebno je ispuniti obrisane površine. Tijekom automatskog generiranja površina, zbog pojednostavljenja modela, SolidWorks je detektirao da se neke površine međusobno preklapaju te ih je obrisao. Nastale rupe u površinama je potrebno ispuniti, to se može učiniti kombinacijom funkcija *Boundary Surface*, *Filled Surface* i crtanja *Sketcha* u 3D obliku. Nakon što su nastale rupe ispunjene, koristi se funkcija *Knit Surface* kako bi se novoizrađene površine povezale s početnom te se stvorio konačni površinski model koji je prikazan na Slici 4.8.



Slika 4.8. Pojednostavljeni površinski model donjih zubi

4. 4. Oblikovanje unutarnjeg dijela „grillza“

Jedan od načina pričvršćenja je oblikom, odnosno trenjem, stoga je vrlo važno da unutarnji oblik „grillza“ savršeno odgovara obliku zubi. Osiguravanje unutarnjeg oblika da odgovara obliku zubi moguće je korištenjem funkcije *Surface Cut* koja koristi dobivenu površinu kako bi se odrezalo nacrtano volumensko tijelo, čime će se osigurati savršeno prijanjanje na zube. Nakon što je odrezana strana koja će nasjesti na zube, nacrtan je *Sketch* koji prati konturu oblika pomoću funkcije *Spline*. Nakon što je nacrtan željeni oblik, koristi se funkcija *Extrude Cut* kojom se odreže prostor izvan konture oblika, čime se dolazi do 3D modela „grillza“ koji je spreman za izradu željenog dizajna modela.

4. 4. 1. Prva iteracija modela

Prije izrade dizajna, najvažnije je da „grillz“ savršeno pristaje na zube, zbog čega su izrađeni fizički modeli kako bi se testiralo pristajanje na zube. Nakon printanja te postavljanja na zube, izrađeni model nije ergonomski odgovarao zubima, prekrivao je premalu površinu zubi i debljina stijenke je bila pretanka, zbog čega su nastale pukotine prilikom printanja. Na Slici 4.9. može se vidjeti izgled prvog izrađenog prototipa postavljenog na model gornjih, odnosno donjih zubi.



Slika 4.9. Prvi izrađeni model „grillza“ postavljen na zube

4. 4. 2. Druga iteracija modela

Greške napravljene u prvom modelu su uklonjene, povećana je debljina stijenke zbog čega pri printanju nije došlo do pukotina i produljen je oblik modela „grillza“ tako da prekriva veću površinu zubi. Unutarnji dio „grillza“ ponovno nije odgovarao prednjim gornjim sjekutićima zbog

čega nisu pristajali na zube na način kako je potrebno. Na Slici 4.10. se može vidjeti sklopljeni model drugog, ispravljenog modela „grillza“ zajedno s modelima zubi.



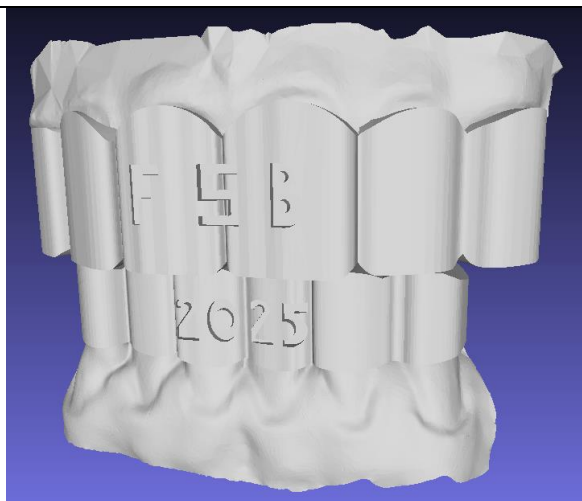
Slika 4.10. Drugi izrađeni model "grillza" postavljen na zube

4. 4. 3. Treća iteracija modela

Prilikom treće iteracije modela, zadržana je debljina stijenke od druge iteracije. Kako bi se riješio problem s pristajanjem na prednje gornje sjekutiće, odrezan je ručno unutarnji dio „grillza“ koji pristaje na njih. Završni isprintani model osigurao je savršeno pristajanje na zube, odnosno bilo ga je udobno nositi, nakon čega je moguće prijeći na završni korak, što je oblikovanje „grillza“ prema želji.

4. 5. Oblikovanje „grillza“

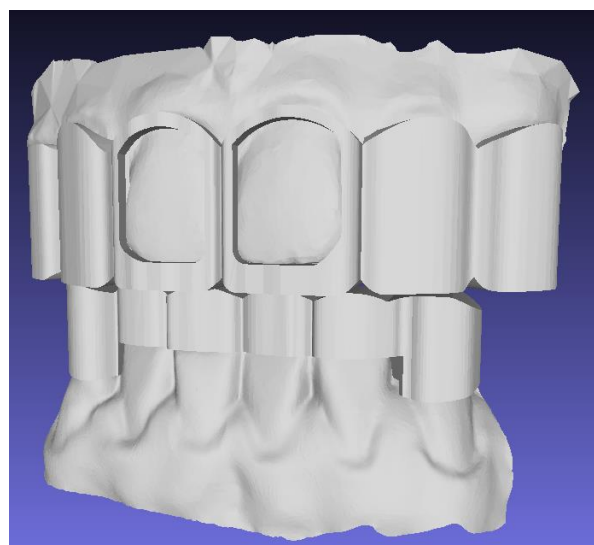
Jedan od ciljeva oblikovanja bio je oponašati prirodne zube oblikom, no isto tako ih izravnati radi estetike. Dijelovi „grillza“ koji se nalaze na vanjskoj površini zuba su produljeni kako bi prekrivali cijelu površinu zuba, a dijelovi bliži gingivi su zaobljeni kako bi napravili estetski idealne zube. Drugi korak u oblikovanju bio je napraviti zaobljenja na dijelu koji je bliže vrhu zuba kako bi se dobio dojam odvojenosti zubi. Neki od alata koji su korišteni za modeliranje opisanog postupka su *3D Sketch*, *Extrude Boss Base* i *Extrude Cut*. Postoji mnogo načina za izradu dizajna „grillza“, poput ugrađivanja dijamanata, šupljim modelima, raznim oblicima, a budući da se ovaj rad fokusira više na postupak izrade, a manje na dizajn „grillza“, napravljena su 3 jednostavna dizajna modela, koji su prikazani na Slici 4.11., Slici 4.12. i Slici 4.13. Ovi modeli su izrađeni kako bi prikazali mogućnosti 3D printanja. Prema modelima može se vidjeti da se jednostavnim dodavanjem ili odstranjivanjem materijala mogu dobiti različiti dizajni „grillza“ u samo nekoliko koraka.



Slika 4.11. Dizajn izrađen odstranjivanjem materijala



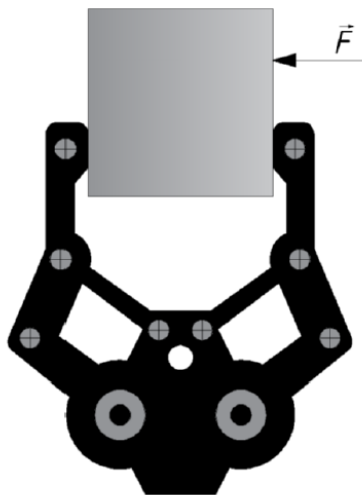
Slika 4.12. Dizajn izrađen dodavanjem materijala



Slika 4.13. Dizajn izrađen oblicima

5. Kriteriji stabilnosti koji se temelje na prilagođenom matematičkom modelu robotskog hvatanja

U domeni robotike matematički modeli se koriste za procjenu hvata robotskih hvataljki. Cilj je zapravo osigurati hvat zatvorene forme s objektom u zahvatu tako da se najlakše odupire vanjskoj sili. Na Slici 5.1. je prikazana robotska hvataljka s dva prsta koja se odupire sili sa slike [19].

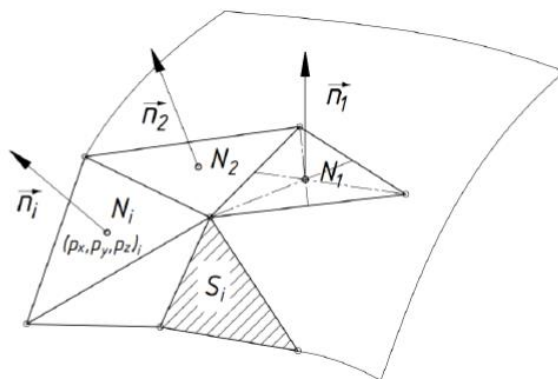


Slika 5.1. Robotska hvataljka s dva prsta [19]

Stabilnost je svojstvo „grillza“ da kod pričvršćivanja oblikom nakon postavljanja na zube ne dolazi do pomaka ni rotacije. Za predikciju stabilnosti „grillza“ može se primijeniti matematički model stabilnosti koji se koristi u ortopedskoj kirurgiji kod postavljanja kirurških vodilica na tkivo pacijenta. Matematički model analizira kontaktnu površinu kosti i vodilice za bušenje kosti pomoću izračunatih parametara stabilnosti.

Zamjena oštećenog dijela tijela može biti zahtjevna i teška operacija, zbog čega se posljednjih godina radi na 3D predoperacijskom planiranju. Ono podrazumijeva 3D rekonstrukciju pacijentove anatomije koju je potrebno zamijeniti pomoću podataka koji su prikupljeni magnetskom rezonancom ili kompjuterskom tomografijom. Novije razvijena tehnika je takozvana PSSG, što bi predstavljalo *patient-specific surgical guide*, odnosno vodilice za bušenje kostiju koje su posebno izrađene za pacijenta. Pomoću njih se postiže točnost i ubrzava se vrijeme operacije. Kako bi vodilica omogućila navedene prednosti, potrebno je zadovoljiti slijedeće uvjete: vodilica mora postići stabilno prijanjanje u kirurškom polju, mora biti postavljena u jedinstvenu poziciju te kirurg mora biti u mogućnosti odrediti točnu planiranu poziciju tijekom operacije [20]. U izradi vodilica koriste se 3D modeli u STL formatu čija je struktura prikazana na Slici 5.2. STL datoteka zamjenjuje površinu krutog tijela trokutima prikazanim na Slici 5.2. koji se sastoje od vrhova i

normale koja služi za određivanje vanjskog i unutarnjeg dijela površine. Takav format se često koristi u današnjoj aditivnoj proizvodnji te za provođenje računalnih simulacija [21].



Slika 5.2 Struktura .stl datoteke [19]

5. 1. Stabilnost ovisno o rotaciji i translaciji

Članak [20] istražuje razvoj vodilica koje se ocjenjuju preko rotacijskih i translacijskih parametara prema kojima se odabire najbolja opcija. Razmatrajući rotacijsku i translacijsku komponentu vodilice odvojeno, moguće je u svakoj poziciji računati za najnepovoljniji slučaj. Cilj modela je ostvariti kontakt, s trenjem ili bez njega, na više pozicija koje su odabrane tako da je sposoban oduprijeti se vanjskoj sili. Gustoća *mesh* modela utječe na rezultate analize stabilnosti, stoga se uračuna težinski faktor α_i , koji je definiran za svaku površinu trokuta S , čime se eliminira utjecaj gustoće STL mreže. Potrebno je provesti analizu kontaktne površine. Jednadžba (1) prikazuje vektor \mathbf{w}_i (engl. *wrench* vector) za svaku od N različitih kontaktnih točaka, koristeći koordinate točaka \mathbf{p}_i i vanjski jedinični vektor normale \mathbf{n}_i te faktor težine:

$$\mathbf{w}_i = \alpha_i \left[\mathbf{p}_i \times \mathbf{n}_i \right], \text{ gdje } \alpha_i = \sqrt{S_i} \quad (1)$$

Vektori sila se mogu obuhvatiti u jednoj matrici za svaku od N kontaktnih točaka:

$$\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1 \quad \mathbf{w}_2 \quad \dots \quad \mathbf{w}_N] \quad (2)$$

Koristeći vektore sila, može se kreirati prostorna simetrična matrica krutosti dimenzija 6×6 :

$$\mathbf{K} = \mathbf{W}\mathbf{W}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^T & \mathbf{D} \end{bmatrix} \quad (3)$$

u kojoj A, B i D su sub-matrice veličine 3×3 . Koristeći te sub-matrice mogu se kreirati dvije nove matrice:

$$\mathbf{C}_w = \mathbf{A}^{-1} \quad (4)$$

$$\mathbf{K}_v = \mathbf{D} - \mathbf{B}^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \quad (5)$$

Vlastite vrijednosti navedenih matrica su invarijante [16]. Matrica \mathbf{C}_w predstavlja translacijsku krutost kontakta, stoga svojstvene vrijednosti σ_1, σ_2 i σ_3 matrice \mathbf{C}_w^{-1} su translacijski parametri krutosti, koji su pokazatelji translacijske stabilnosti analizirane kontaktne površine.

Slično tome matrica \mathbf{K}_v predstavlja rotacijsku krutost kontakta, te će njene vrijednosti μ_1, μ_2 i μ_3 biti parametri za rotacijsku stabilnost (rotacijski parametri krutosti).

Definirani su ekvivalentni rotacijski parametri koji povezuju rotacijsku krutost s definiranim točkama [22]:

$$\mu_{eq,i} = \frac{\mu_i}{\rho^2 + (\boldsymbol{\omega}_i \cdot \mathbf{v}_i)^2}, \quad (6)$$

gdje $\boldsymbol{\omega}_i$ predstavlja svojevrsni vektor matrice \mathbf{K}_v , a ρ je udaljenost odabrane točke do osi rotacije koja je paralelna sa $\boldsymbol{\omega}_i$ i prolazi kroz točku \mathbf{q}_i :

$$\mathbf{q}_i = \frac{\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{v}_i}{\|\boldsymbol{\omega}_i\|^2}, \quad (7)$$

\mathbf{v}_i se izračuna pomoću izraza:

$$\mathbf{v}_i = -\mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \boldsymbol{\omega}_i \quad (8)$$

Također su definirani parametri translacijske (M_T) i rotacijske (M_R) stabilnosti

$$M_T = \sqrt{\frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} + \frac{1}{\sigma_3}} \quad (9)$$

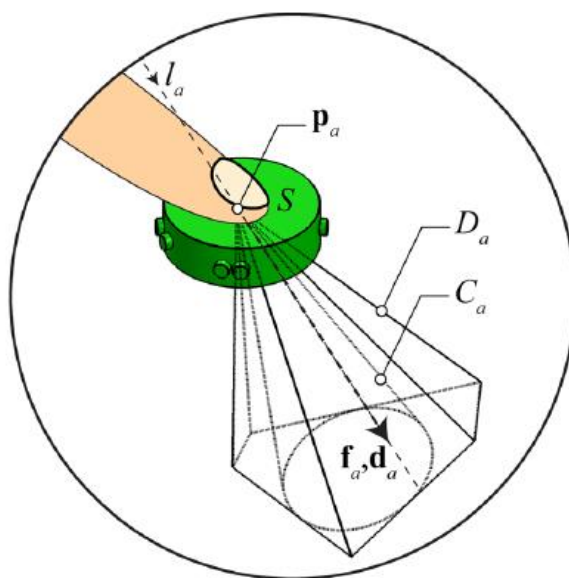
$$M_R = \sqrt{\frac{1}{\mu_{eq,1}} + \frac{1}{\mu_{eq,2}} + \frac{1}{\mu_{eq,3}}} \quad (10)$$

koji će biti potrebni kako bi se odredili rezultati za procjenu stabilnosti „grillza“. Stabilnost je definirana kao svojstvo „grillza“ da tijekom pričvršćivanja na zube onemogući pomak i rotaciju na površini zuba. Nakon računanja parametara iz jednadžbi (9) i (10), mogu se usporediti rezultati kako bi se procijenila translacijska i rotacijska stabilnost „grillza“ u dodiru sa zubima te što je rezultat bliže nuli, to je „grillz“ stabilniji [20].

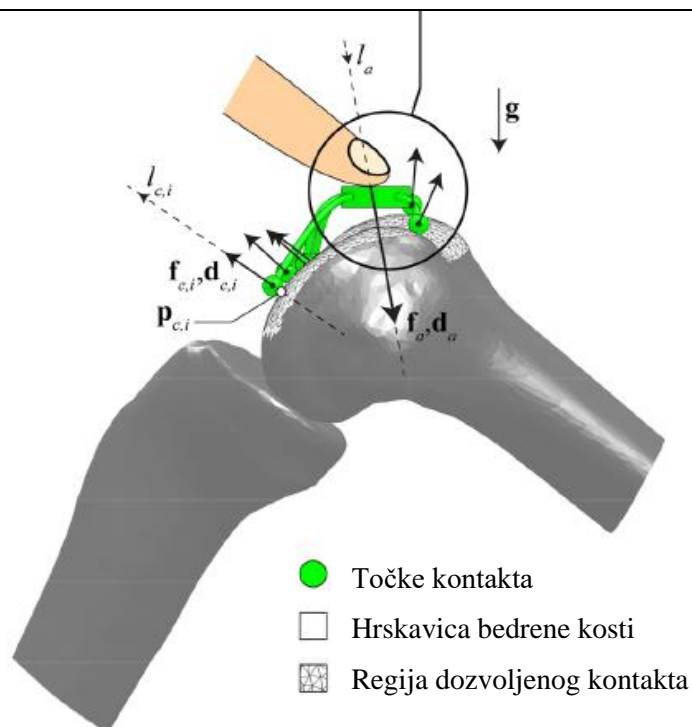
5. 2. Stabilnost u odnosu na robusnost

Članak [23] istražuje važnost robusnosti kirurške vodilice prilikom izvedbe operacije. Za vodilicu se smatra da se nalazi u statičkom području ako na nju utječe sila kirurga \mathbf{f}_a , zbog čega je vodilica imobilizirana primijenjenom silom i geometrijom kosti. Ako se proizvoljno odabere kontaktna točka \mathbf{p}_a na površini vodilice S , potrebno je da vektor \mathbf{d}_a , bude unutar konveksnog stošca D_a , što rezultira silom u kontaktnim točkama \mathbf{f}_c koje su okomite na površinu kosti. Slika 5.3. prikazuje silu \mathbf{f}_a kojom kirurg djeluje na površinu vodilice S , dok Slika 5.4. prikazuje kontaktne točke dodira nogu vodilice s kosti pacijenta i odgovarajuće sile \mathbf{f}_c .

Kirurški primijenjena sila \mathbf{f}_a na površini vodilice S



Slika 5.3. Kontakt kirurga i vodilice [23]



Slika 5.4. Kontakt vodilice i kosti [23]

Model analizira robusnost nasjedanja vodilice na površinu kosti pomoću određivanja dovoljnog broja kontaktnih točaka koje osiguravaju da se za vrijeme upotrebe vodilica ne pomakne. Stabilnost vodilice se ocjenjuje pomoću dva koeficijenta: koeficijent kontakta s površinom (η_c) i koeficijenta vodilice (η_g). Uzimaju se u obzir samo kontaktne točke koje utječu na robusnost vodilice. Kreirani su koeficijenti učinkovitosti obzirom na vektore površine \mathbf{L}_a , koji glase :

$$\eta_c = \frac{\mu(\mathbf{L}_a)}{\mu(\mathbf{L}_{a,\text{full}})} \quad (11)$$

$$\eta_g = \frac{\mu(\mathbf{L}_{as})}{\mu(\mathbf{L}_{a,\text{full}})} \quad (12)$$

Maksimalan iznos koeficijenta η_c je 1, dok maksimalan iznos koeficijenta η_g je η_c . Oznaka $\mu(L)$ označava prostor kolika je varijacija u vektoru linije l_a , koja se određuje aproksimacijom. Količina proizvoljno odabranih linije $h_{a,\text{full}}$ i h_a unutar stošca nam govore o sadržaju linearnog prostora.

$$\mu(\mathbf{L}_{a,\text{full}}) = h_{a,\text{full}} \quad (13)$$

$$\mu(\mathbf{L}_a) = h_a \quad (14)$$

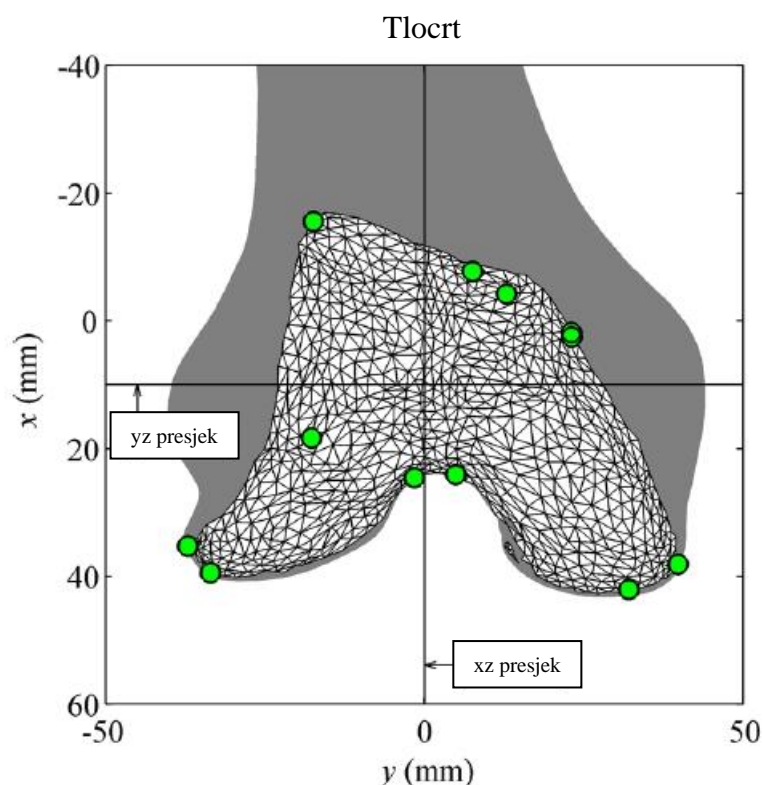
$$\mu(\mathbf{L}_{as}) = h_{as} \quad (15)$$

Povećanje količine projiciranih linija točnost koeficijenta raste, dok se greška u koeficijentima može odrediti pomoću

$$\delta\eta_c, \delta\eta_g \approx \frac{1}{\sqrt{\mu(L_{a,\text{full}})}} \quad (16)$$

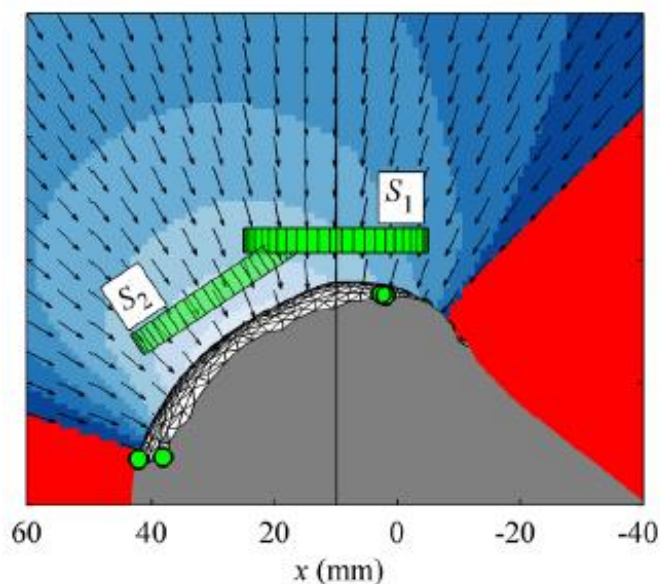
5.3. Robusne mape

Ovaj model generira vizualne mape robusnosti i predlaže točke na anatomskoj površini koje osiguravaju bolju robusnost. Robusne mape su grafički prikazi koji prikazuju dopuštene varijacije linije primjene \mathbf{l}_a za odabrane kontaktne točke P_c , što zapravo omogućuje nalaženje robusne lokacije za površinu S . U robusnim mapama se umjesto korištenja konveksnog stošca D_a , koristi pojednostavljeni kružni stožac C_a . Optimizacija započinje proizvoljnim odabirom broja kontakata, nakon čega se radi takozvana *brute-force* pretraga. Ona podrazumijeva računanje koeficijenta kontakta s površinom (η_c) za svaku moguću kontaktnu točku, te se za najveći koeficijent izabire odgovarajuća lokacija. Na Slici 5.5. je prikazan femur s 12 kontaktnih točaka iz tlocrta dok je na Slici 5.6. prikazana robusna mapa u presjeku u xz ravnini s prikazanim površinama S_1 i S_2 .



Slika 5.5. Tlocrt s 12 kontaktnih točaka [23]

Presjek u ravnini xz



Slika 5.6. Robusna mapa u xz ravnini [23]

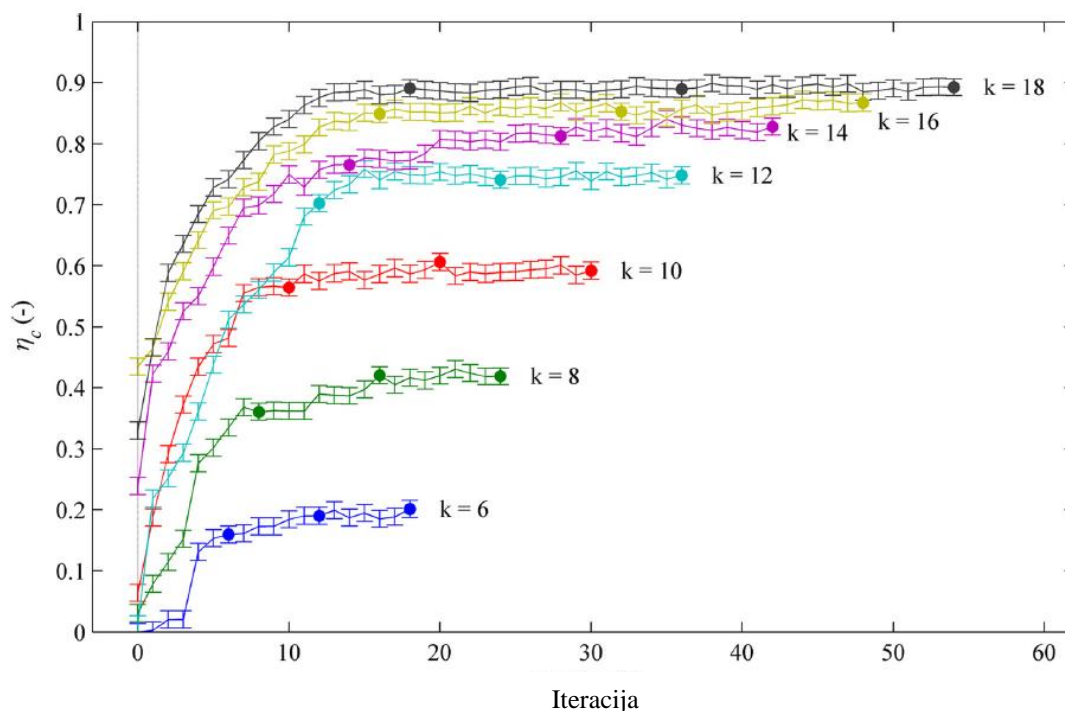
Robusne mape se kod kontaktnih vodilica u ortopedskoj kirurgiji koriste za definiranje površine S_2 , kao alternativne u odnosu na početno određenu površinu S_1 . Površina S_2 se dobiva translacijom i rotacijom površine S_1 u xz ravnini. U Tablici 5.1. mogu se vidjeti usporedbe koeficijenata s obzirom na broj kontaktnih točaka te odabranu površinu, pomoću koje se može utvrditi da više kontaktnih točaka te bolji izbor površine mogu povećati iznose koeficijente.

| Kontakt | k | η_c^* | S_1 | | S_2 | |
|-----------------|-----|-----------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|
| | | | η_g | R (deg) | η_g | R (deg) |
| Osnovni skup | 138 | 1 | 0.16 ± 0.02 | 30 | 0.19 ± 0.02 | 44 |
| Optimizirani-6 | 6 | 0.18 ± 0.02 | 0.03 ± 0.02 | 1 | 0.07 ± 0.02 | 10 |
| Optimizirani-12 | 12 | 0.74 ± 0.02 | 0.14 ± 0.02 | 24 | 0.17 ± 0.02 | 43 |
| Optimizirani-18 | 18 | 0.88 ± 0.02 | 0.15 ± 0.02 | 28 | 0.18 ± 0.02 | 43 |

Tablica 5.1. Usporedba koeficijenata [23]

Dok se u članku [20] obuhvaća translacijski i rotacijski parametar stabilnosti koji je ovisan o svim kontaktima koje vodilica ima s površinom, u članku [23] su obuhvaćene sve dimenzije vodilice koje imaju kontakt s površinom P_c , površina S na koju kirurg pritišće i sve linije primjene sile koje su unutar D_a . Na Slici 5.7. može se vidjeti ovisnost broja točaka o koeficijentu kontakta, pri čemu se može zaključiti da već s 12 kontaktnih točaka se može dobiti prihvatljiva vrijednost koeficijenta.

Iako je minimalno potrebno 6 kontaktnih točaka, iz Slike 5.7. može se vidjeti kako bi to rezultiralo lošim koeficijentom η_c , a ako se odabere 18 kontaktnih točaka, iako bi se koeficijent kontakta povećao u odnosu na koeficijent s 12 kontaktnih točaka, kompleksnost izrade vodilice bi porasla. [23]



Slika 5.7. Dijagram ovisnosti koeficijenta kontakta i broja kontaktnih točaka [23]

Članci obrađeni u poglavlju 5 mogu se primijeniti prilikom izrade „grillza“ zbog njihove potrebe za prilagodbom na anatomiju čovjeka, odnosno zube, kod vodilica i kod „grillza“ jednako je bitno da savršeno pristaju na potrebnu površinu. Jednostavniji pristup je određivanje parametara translacijske i rotacijske stabilnosti te je to predložen model za analizu stabilnosti „grillza“ koji je učvršćen oblikom. U ovom radu se koristi tehnologija 3D printanja i pričvršćivanje oblikom što čini stabilnost jednu od najvažnijih stavaka koje treba uzeti u obzir prilikom oblikovanja „grillza“. Iako se radovi na robotskom hvatanju primjenjuju primarno u industriji, metode poput analize sila, trenja i stabilnosti također se mogu primijeniti u izradi „grillza“.

6. Aditivna proizvodnja

Aditivna proizvodnja (engl. *Additive Manufacturing* (AM)) je vrsta proizvodnje koja se počela razvijati 80-ih godina prošlog stoljeća. Aditivna proizvodnja koristi digitalni model kako bi izgradila proizvod dodavanjem materijala sloj po sloj (CAD-to-proizvod) čime se eliminira potreba za alatima. Zbog eliminacije potrebe za alatom, aditivna proizvodnja omogućava personalizirano i funkcionalno konstruiranje. Također ju karakteriziraju manja onečišćenja jer se većinski ne koriste otrovni materijali te potpuna iskoristivost materijala, odnosno nulti otpad materijala. Budući da se koriste 3D modeli omogućava brzu izradu prototipova (*Rapid prototyping*) koji pomažu u jednostavnijoj precipitaciji modela, moguće su iteracije tijekom razvoja proizvoda i moguća je unaprijed provjera potencijalnih kritičnih točaka pomoću programskih paketa za analizu modela [24]. U Tablici 6.1. prikazani su materijali i tehnologije koje se koriste pri aditivnoj proizvodnji.

Tablica 6.1. Materijali i tehnologije korišteni u aditivnoj proizvodnji [24]

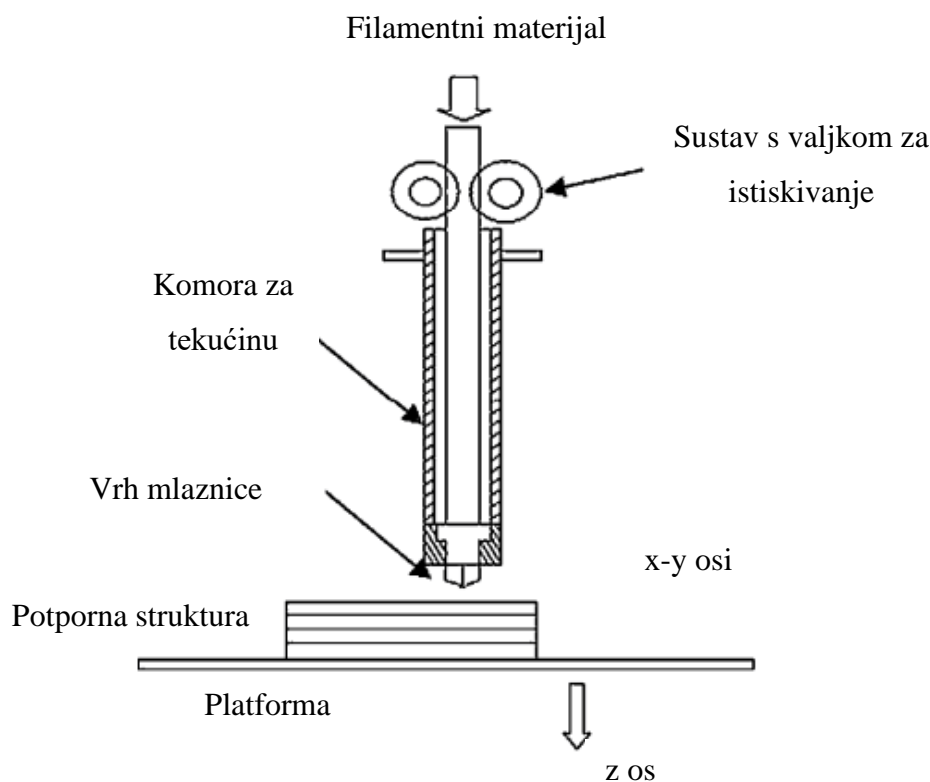
| Proces | Definicija | Materijal | Primjena |
|---------------------------------------|---|------------------------------|---|
| Posudna fotopolimerizacija | Tekući fotopolimer u posudi se selektivno očvršćuje fotopolimerizacijom aktiviranom svjetlom. | Fotopolimer i keramika | <ul style="list-style-type: none"> • Većina prototipova za prilagodbu, udobnost i funkcionalnost. • Potrošačke igračke i elektronika. • Neke smjernice, držači i montaže. |
| Mlazno nanošenje | Kapljice materijala se nanose selektivno. | Fotopolimer i vosak | <ul style="list-style-type: none"> • Odljevci i ne strukturalni metalni dijelovi. • Neki metalni dijelovi za krajnju upotrebu. • Marketing obojanih prototipova • Oprema. • Automobilski oblozi/kompleti za završnu obradu/kontrolne ploče. • Potrošačka elektronika. |
| Mlazno vezivanje | Tekući vezivni agens selektivno se nanosi kako bi povezao praškaste materijale. | Metal, polimer i keramika | <ul style="list-style-type: none"> • 3D objekti s niskim zahtjevima za strukturalna svojstva. • Alati. • Lagane i modularne strukture (šuplje sfere). |
| Ekstruzija | Materijal se selektivno izbacuje kroz mlaznicu ili otvor. | Polimer | <ul style="list-style-type: none"> • 3D objekti od polimera ili metala. • Alati. • Sekundarne/tercijarne strukture. • Ortopedski i stomatološki implantati. • Mehanički spojevi/pod sklopovi/kanali. |
| Fuzija praškastog sloja | Toplinska energija selektivno spaja dijelove praškaste mase. | Metal, polimer, keramika | <ul style="list-style-type: none"> • Veliki dijelovi. • Oprema. • Ne strukturalni dijelovi. |
| Laminacija ploča | Proces u kojem se ploče materijala spajaju kako bi se formirao objekt. | Hibridi, metalni i keramički | <ul style="list-style-type: none"> • Prepravljjanje članaka. • 3D objekti. • Dijelovi za krajnju uporabu s niskim zahtjevima za strukturalna svojstva. |
| Depozicija usmjerene energetske snage | Proces u kojem se koncentrirana toplinska energija koristi za spajanje materijala tijekom taljenja dok se materijal polaže. | Metal: prah i žica | |

6. 1. Faze procesa aditivne proizvodnje

Proces aditivne proizvodnje sadrži nekoliko koraka. Proces započinje izradom CAD modela te njegovom konverzijom u STL format. STL datoteka je prebačena u uređaj za AM, na kojem se podešavaju parametri te izrađuje prototip nanosom materijala sloj po sloj, koji se formiraju na različite načine ovisno o tehnologiji koja se koristi. Dobiveni proizvod se uklanja iz uređaja te provodi se dodatna obrada ukoliko je potrebna nakon koje je proizvod spreman za primjenu [25].

6. 2. Aditivna proizvodnja korištena za izradu „grillza“

Za potrebe ovog rada korištena je tehnologija ekstruzije materijala (engl. *Fused Deposition Modeling* (FDM)). Na Slici 6.1. su prikazani dijelovi potrebni za izradu modela pomoću FDM tehnologije. To je vrsta tehnologije koja koristi mlaznicu iz koje izlazi rastopljeni materijal za gradnju modela sloj po sloj u z osi dok mlaznica ima mogućnost kretanja u x,y osima.



Slika 6.1. Dijelovi FDM printera [25]

Za prototipove korišten je polimer PLA (polilaktična kiselina). PLA je plastični materijal koji se proizvodi iz prirodnih izvora (poput kukuruznog škroba ili šećerne trske). Jedan je od najčešće korištenih materijala u FDM tehnologiji aditivne proizvodnje zbog jednostavnosti printanja,

ekološke prihvatljivosti (biorazgradiv je i ne otpušta štetne plinove tijekom topljenja) i prihvatljivih mehaničkih svojstava i najvažnije niske cijene što ga čini idealnim za ovaj printanje modela za ovaj rad. Printer koji je korišten za printanje modela je Elego Neptune 4 Plus koji je prikazan na Slici 6.2.



Slika 6.2. Elego Neptune 4 Plus [26]

7. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je predočiti proces koji je potreban za izradu personaliziranog nakita za zube, odnosno „grillza“, počevši od prikupljanja podataka, odabira materijala i načina pričvršćivanja sve do proizvodnje.

Obrađeni su materijali koji se često koriste u dentalnoj medicini s naglaskom na njihove mehaničke i estetske karakteristike. Analizirani su razni načini pričvršćivanja, poput adhezivnih sustava, zubnih kopči i prilagodbe oblikom kako bi se osigurala stabilnost, udobnost i sigurnost nošenja. Proučen je i tehnički aspekt stabilnosti, koji je analiziran kroz kriterije robusnosti i translacijsko-rotacijske stabilnosti sukladno istraživanjima u ortopedskoj kirurgiji. Pokazana je također prednost napredne tehnologije 3D printanja te aditivne proizvodnje, kojom se omogućuje izrada personaliziranih estetskih dodataka koji osiguravaju udobnost i funkcionalnost. Ovaj rad može poslužiti za daljnji razvoj dentalnih dodataka koji se koriste kako u medicinske tako i u estetske svrhe. Kako bi se ostvarila veća dugotrajnost, udobnost i sigurnost proizvoda, posebnu pažnju treba posvetiti razvoju novih materijala, poboljšanju proizvodnog procesa te razvoju naprednijih metoda pričvršćivanja. U daljnjim istraživanjima bilo bi potrebno prilagođeni model stabilnosti koji se temelji na vodilicama u ortopedskoj kirurgiji implementirati u programski paket (npr. MATLAB) kako bi se mogli računati parametri translacijske i rotacijske stabilnosti i utvrditi koje točke na „grillzu“ bolje pridonose povećanju stabilnosti, kako bi se, za slučaj pričvršćivanja oblikom, u njima planiralo pričvršćenje „grillza“ na zube.

LITERATURA

- [1] https://www.huffpost.com/entry/a-brief-history-of-grillz_b_8055030 (13.02.2025.)
- [2] <https://journal.dentalanthropology.org/index.php/jda/article/view/243> (20.02.2025.)
- [3] Vjekoslav Jerolimov i suradnici, Osnove stomatoloških materijala, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Stomatološki fakultet, 2005.
- [4] Ronald L. Sakaguchi, John M. Powers, Craig's Restorative Dental Materials, Thirteenth edition, The University of Texas Health Science Center at Houston, 2012.
- [5] <https://zimmermann-dental.com/dental/grillz/> (20.02.2025.)
- [6] <https://spencer-road-dental.co.uk/treatment/custom-grillz-grills/> (20.02.2025.)
- [7] Buddy D. Ratner, Allan S. Hoffman, Frederick J. Schoen, Jack E. Lemons-Biomaterials Science, Third Edition_ An Introduction to Materials in Medicine-Academic Press 2012.
- [8] Ketij Mehulić i suradnici, Dentalni Materijal, Medicinska naklada, Zagreb, 2017.
- [9] <https://somethingaboutrocks.com/article/kanye-west-gets-850k-titanium-grills/> (20.02.2025.)
- [10] Fatima Zivic, Saverio Affatato, Miroslav Trajanovic, Matthias Schnabelrauch, Nenad Grujovic, Kwang Leong Choy. Biomaterials in clinical practice, 2018.
- [11] Kenneth J. Anusavice, Chiayi Shen, H. Ralph Rawls, Philips' Science of Dental Materials, 12th edition, 2013.
- [12] Ketij Mehulić i suradnici, Dentalna Medicina: Vodič za praktičare, Medicinska naklada, Zagreb, 2020.
- [13] <https://www.smlglobal.com/ball-clasp> (20.02.2025.)
- [14] Zrinka Tarle i suradnici, Restaurativna Dentalna Medicina, 2. izdanje, 2022.
- [15] Marko Jakovac, Josip Kranjčić i suradnici, Pretklinička i laboratorijska fiksna protetika, Stega tisak, Zagreb, 2020.
- [16] <https://shop-interdent.si/Intraoralni-skener/cerec-ac-omnicam/> (20.02.2025.)
- [17] <https://artgraphic3d.com/179-what-is-mesh-3d> (13.02.2025.)
- [18] https://forum.solidworks.com/thread/243724?utm_source=chatgpt.com (13.02.2025.)
- [19] Šimunić, Nikola, Numeričko i eksperimentalno modeliranje vodilica u dentalnoj implantologiji, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2023.

-
- [20] Van den Broeck, J.; Wirix-Speetjens, R.; Vander Sloten, J.: Preoperative analysis of the stability of fit of a patient-specific surgical guide. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, Vol.18 2015.
- [21] M. Szilvsi-Nagy, Gyula Mátyási, Analysis of STL files, *Mathematical and Computer Modelling*, October 2003.
- [22] Qiao Lin, Joel W. Burdick, and Elon Rimon, A Stiffness-Based Quality Measure for Compliant Grasps and Fixtures, *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION*, VOL. 16, 2000.
- [23] Mattheijer J, Herder JL, Tuijthof GJM, Valstar ER. Docking Robustness of Patient Specific Surgical Guides for Joint Replacement Surgery. *Journal of Mechanical Design*. 2015
- [24] Aditivna proizvodnja- ekonomski aspekti i budućnost AM, prezentacija, Damir Godec, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje
- [25] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*, 2nd ed., New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2015.
- [26] <https://www.3djake.hr/elegoo/neptune-4-plus> (20.02.2025.)