

# Utjecaj stanja površine na trajnost alata za izradu protetskih nadomjestaka

---

Ćavar, Iva

Master's thesis / Diplomski rad

2023

*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:235:793588>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-17**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Iva Čavar**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl, dipl. ing.

Student:

Iva Čavar

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu na pruženoj pomoći i savjetima tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Također se zahvaljujem tvrtki Neo Dens d.o.o. na doniranim alatima za ispitivanje, a posebno gospodinu Marku Živku na pomoći i susretljivosti.

Posebna zahvala ide mojim roditeljima i sestrama na bezuvjetnoj podršci, ljubavi i razumijevanju tijekom studija.

Iva Čavar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu               |        |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum                               | Prilog |
| Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1        |        |
| Ur.broj: 15 - 23 -                  |        |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Iva Ćavar**

JMBAG: 0035219098

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj stanja površine na trajnost alata za izradu protetskih nadomjestaka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The influence of the surface on the durability of tools for the production of prosthetic restorations**

Opis zadatka:

U izradi protetskih nadomjestaka, uz 3D printanje, najviše se koriste klasični obradni centri i vrlo precizne glodalice. Pri tome se koriste alati različitih proizvođača izrađeni od brzoreznog čelika, ili s različitim prevlakama na reznim površinama.

U uvodnom dijelu rada potrebno je opisati postupak izrade protetskih nadomjestaka obradom odvajanja čestica te navesti zahtjeve koji se postavljaju na alate koji se pritom koriste.

U eksperimentalnom dijelu rada treba ispitati i usporediti trajnost alata istih dimenzija i namjene, ali s različitim površinskim prevlakama. Pri tome je potrebno na jednom alatu nanijeti TiN prevlaku koristeći PACVD postupak, a ostali alati trebaju biti komercijalno dostupni. Svi ispitivani alati moraju biti korišteni za izradu protetskih nadomjestaka u realnim uvjetima, isto vrijeme i pod istim parametrima strojne obrade. Nakon provedenog korištenja, a time i trošenja alata, potrebno je usporediti i karakterizirati stanje njihovih reznih površina.

Na temelju dobivenih rezultata potrebno je donijeti zaključke o utjecaju površine alata i prevlaka na njihovu trajnost.

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

Zadatak zadan:

4. svibnja 2023.

Datum predaje rada:

6. srpnja 2023.

Predviđeni datumi obrane:

17. – 21. srpnja 2023.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zdravko Schauerl

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

**SADRŽAJ**

|  |      |
|--|------|
| SADRŽAJ .....  | I    |
| POPIS SLIKA .....  | III  |
| POPIS TABLICA .....  | V    |
| POPIS OZNAKA .....   | VI   |
| POPIS KRATICA .....  | VII  |
| SAŽETAK .....  | VIII |
| SUMMARY .....  | IX   |
| <br>   |      |
| 1. UVOD .....  | 1    |
| 2. PROTETSKI NADOMJESCI .....  | 2    |
| 2.1. Povijest protetskih nadomjestaka .....  | 2    |
| 2.2. Podjela protetskih nadomjestaka .....   | 4    |
| 2.2.1. Mobilni protetski nadomjesci .....  | 4    |
| 2.2.2. Fiksni (nepomični) protetski nadomjesci .....                                 | 4    |
| 2.3. Materijali za izradu protetskih nadomjestaka.....                               | 6    |
| 3. CAD/CAM SUSTAVI ZA IZRADU PROTETSKIH NADOMJESTAKA .....                           | 8    |
| 3.1. Povijesni razvoj CAD/CAM tehnologije .....                                      | 9    |
| 3.2. Komponente CAD/CAM sustava .....  | 10   |
| 3.3. Blokovi materijala za obradu u CAD/CAM sustavu .....                            | 11   |
| 3.3.1. Cirkonij-oksida keramika .....  | 13   |
| 3.4. Prednosti i nedostaci CAD/CAM tehnologije za izradu protetskih nadomjestaka.... | 15   |
| 4. STROJNO GLODANJE ZA IZRADU PROTETSKIH NADOMJESTAKA .....                          | 16   |
| 4.1. Suho i mokro glodanje .....   | 16   |
| 4.2. Podjela glodalica prema broju okretnih osi.....                                 | 17   |
| 4.2.1. Troosne glodalice.....  | 18   |
| 4.2.2. Četveroosne glodalice .....   | 18   |
| 4.2.3. Petoosne glodalice .....  | 19   |
| 4.3. Rezni alat glodalice.....   | 19   |
| 4.3.1. Klasifikacija dentalnih reznih alata.....                                     | 20   |
| 4.3.2. Podjela dentalnih svrdla .....  | 20   |
| 4.3.3. Volfram karbidna svrdla.....  | 21   |

---

|   |    |
|---|----|
| 4.3.4. Svrkla s dijamantnom prevlakom .....                             | 22 |
| 4.4. PACVD postupak prevlačenja alata .....                             | 23 |
| 4.5. Zahtjevi na alat glodalice za izradu protetskih nadomjestaka ..... | 25 |
| 5. EKSPERIMENTALNI DIO .....  | 26 |
| 5.1. Provođenje ispitivanja .....                                       | 26 |
| 5.2. Alati za ispitivanje .....   | 26 |
| 5.3. Opis PACVD postupka prevlačenja svrdla .....                       | 28 |
| 5.4. Postupak glodanja zubnih krunica .....                             | 30 |
| 5.5. EDS analiza kemijskog sastava .....                                | 31 |
| 5.6. Karakterizacija debljine prevlake alata .....                      | 38 |
| 5.7. SEM analiza površine potrošenih i nepotrošenih alata .....         | 40 |
| 5.8. Osvrt na rezultate ispitivanja .....                               | 45 |
| 5.8.1. Osvrt na EDS analizu kemijskog sastava .....                     | 45 |
| 5.8.2. Osvrt na karakterizaciju debljine prevlake .....                 | 45 |
| 5.8.3. Osvrt na SEM analizu stanja površine alata .....                 | 46 |
| 6. ZAKLJUČAK .....  | 47 |
| 7. LITERATURA .....   | 48 |

**POPIS SLIKA**

|   |    |
|---|----|
| Slika 1. Dentalni protetski nadomjesci u prošlosti [5] .....  | 3  |
| Slika 2. CAD/CAM sustav [14] .....  | 8  |
| Slika 3. Postupak izrade protetskih nadomjestaka konvencionalnom metodom i CAD/CAM tehnologijom prve generacije [15] .....  | 9  |
| Slika 4. Četvrta generacija CAD/CAM sustava za izradu protetskih nadomjestaka [15] .....  | 10 |
| Slika 5. Blok od cirkonij-oksidge keramike [17] .....   | 14 |
| Slika 6. Postupak suhog glodanja [21] .....   | 17 |
| Slika 7. Postupak mokrog glodanja [22].....   | 17 |
| Slika 8. Smjerovi kretanja komponenata glodalice [24].....  | 18 |
| Slika 9. Dijelovi reznog alata za izradu protetskih nadomjestaka [27] .....   | 19 |
| Slika 10. Raznolika svrdla glodalice za izradu protetskih nadomjestaka [30] .....   | 22 |
| Slika 11. Shematski prikaz PACVD uređaja [31] .....   | 23 |
| Slika 12. Mehanizmi trošenja oštrice reznog alata [34] .....  | 25 |
| Slika 13. Rezni alati glodalice na kojima su provedena ispitivanja ( 1- alat od tvrdog metala bez prevlake na površini, 2- alat s dijamantnom prevlakom, 3- alat s titanij-nitrid prevlakom)..... | 27 |
| Slika 14. Tehnički crtež alata za glodanje [35].....  | 27 |
| Slika 15. Uređaj za PACVD postupak prevlačenja.....   | 29 |
| Slika 16. Alat prije (a) i nakon (b) postupka prevlačenja.....  | 29 |
| Slika 17. Glodalica XTCERA X-MILL500.....   | 30 |
| Slika 18. Alat u procesu glodanja zubnih krunica od cirkonijevog oksida .....   | 31 |
| Slika 19. Pila Mecatome T260.....   | 32 |
| Slika 20. Uzorci pripremljeni za EDS analizu zaliveni u polimernu masu .....  | 32 |
| Slika 21. Lokacija EDS analize alata tvrdog metala .....  | 33 |
| Slika 22. EDS analiza alata tvrdog metala.....  | 33 |
| Slika 23. Lokacije EDS analize svrdla s dijamantnom prevlakom .....   | 34 |
| Slika 24. EDS analiza prevlake (lokacija 1) svrdla s dijamantnom prevlakom.....   | 34 |
| Slika 25. EDS analiza svrdla s dijamantnom prevlakom (lokacija 2) .....   | 35 |
| Slika 26. Lokacije EDS analize svrdla s titanij-nitrid prevlakom.....   | 36 |
| Slika 27. EDS analiza prevlake (lokacija 1) svrdla s titanij-nitrid prevlakom.....  | 36 |
| Slika 28. EDS analiza svrdla s titanij-nitrid prevlakom (lokacija 2).....   | 37 |
| Slika 29. Karakterizacija debljine prevlake na skenirajućem elektronskom mikroskopu .....   | 38 |



|   |    |
|---|----|
| Slika 30. SEM prikaz debljine prevlake alata s dijamantnom prevlakom.....   | 39 |
| Slika 31. SEM prikaz debljine prevlake alata s titanij-nitrid prevlakom.....  | 39 |
| Slika 32. Uzorci na kojima je provedena SEM analiza površine .....  | 40 |
| Slika 33. SEM analiza stanja površine alata tvrdog metala pri uvećanju 100 puta u nepotrošenom stanju (a) i potrošenom stanju (b).....              | 41 |
| Slika 34. SEM analiza stanja površine alata tvrdog metala pri uvećanju 700 puta u nepotrošenom stanju (a) i potrošenom stanju (b).....              | 41 |
| Slika 35. SEM analiza stanja površine alata s dijamantnom prevlakom pri uvećanju 100 puta u nepotrošenom stanju (a) i potrošenom stanju (b).....    | 42 |
| Slika 36. SEM analiza stanja površine alata s dijamantnom prevlakom pri uvećanju 700 puta u nepotrošenom stanju (a) i potrošenom stanju (b).....    | 42 |
| Slika 37. SEM analiza stanja površine alata s titanij-nitrid prevlakom pri uvećanju 100 puta u nepotrošenom stanju (a) i potrošenom stanju (b)..... | 43 |
| Slika 38. SEM analiza stanja površine alata s titanij-nitrid prevlakom pri uvećanju 700 puta u nepotrošenom stanju (a) i potrošenom stanju (b)..... | 43 |
| Slika 39. SEM analiza detalja površine alata s titanij-nitrid prevlakom uvećan 13330 puta ...   | 44 |

**POPIS TABLICA**

---

|   |    |
|---|----|
| Tablica 1. Mehanička svojstva cirkonijevog dioksida (ZrO <sub>2</sub> ) [17].....                 | 13 |
| Tablica 2. Dimenzijske veličine alata.....  | 28 |
| Tablica 3. Parametri PACVD postupka prevlačenja .....   | 28 |
| Tablica 4. Kvantitativni prikaz EDS analize svrdla tvrdog metala .....                            | 33 |
| Tablica 5. Kvantitativni prikaz EDS analize svrdla s dijamantnom prevlakom (lokacija 2) ...       | 35 |
| Tablica 6. Kvantitativni prikaz EDS analize svrdla s titanij-nitrid prevlakom (lokacija 1) .....  | 37 |
| Tablica 7.. Kvantitativni prikaz EDS analize svrdla s titanij-nitrid prevlakom (lokacija 2) ..... | 37 |

**POPIS OZNAKA**

---

| <b>Oznaka</b> | <b>Jedinica</b> | <b>Opis</b>           |
|---------------|-----------------|-----------------------|
| <i>D2</i>     | mm              | Promjer držača svrdla |
| <i>L2</i>     | mm              | Ukupna duljina svrdla |
| <i>L3</i>     | mm              | Duljina vrata svrdla  |
| <i>L1</i>     | mm              | Duljina glave svrdla  |
| <i>D1</i>     | mm              | Promjer glave svrdla  |

---

**POPIS KRATICA**

| <b>Oznaka</b>    | <b>Opis</b>  |
|------------------|--|
| CAD/CAM          | Računalno potpomognuto konstruiranje/računalno potpomognuta proizvodnja (engl. <i>Computer aided design/computer aided manufacture</i> ) |
| CVD              | Postupak kemijskog prevlačenja u parnoj fazi (engl. <i>Chemical vapour deposition</i> )  |
| PACVD            | Postupak kemijskog prevlačenja u parnoj fazi potpomognut plazmom (engl. <i>Plasma assisted chemical vapor deposition</i> )               |
| PVD              | Postupak fizikalnog prevlačenja u parnoj fazi (engl. <i>Physical vapour deposition</i> )   |
| TiN              | Titanij-nitrid   |
| ZrO <sub>2</sub> | Cirkonijev dioksid   |
| EDS              | Energetski disperzivni spektrometar (engl. <i>Energy Dispersive Spectrometry</i> )   |
| STL              | Triangulizacijska datoteka (engl. <i>Standard Tessellation Language</i> )  |

**SAŽETAK**

U ovom diplomskom radu prikazana je usporedba stanja površine triju reznih alata glodalice za izradu dentalnih protetskih nadomjestaka.

U teorijskom dijelu rada predstavljena je povijest protetskih nadomjestaka, njihova podjela te materijali od kojih su izrađeni. Nadalje, vrlo detaljno je opisan CAD/CAM sustav za izradu dentalnih protetskih nadomjestaka uz naglasak na povijesni razvoj i komponente sustava, materijale koji se obrađuju te prednosti i nedostatke sustava. Posebno je prikazan postupak strojnog glodanja za izradu protetskih nadomjestaka pri čemu je naglasak postavljen na alat glodalice, njegovu klasifikaciju, materijale od kojih je izrađen te zahtjeve na svojstva samog alata.

U eksperimentalnom dijelu rada provedena je SEM analiza površine na nepotrošenim i potrošenim svrdlima koja su sudjelovala u izradi pedeset zubnih krunica iz blokova cirkonijevog dioksida u predsinteriranom stanju. Alati su podvrgnuti jednakim parametrima i uvjetima glodanja zubnih krunica. Svi alati imaju jednaku geometriju i broj reznih oštrica, a temeljna razlika im je u kemijskom sastavu. Osnovni materijal svih reznih alata je volframov karbid visokolegiran kobaltom. Jedan ispitivani alat je tvrdi metal bez ikakvih prevlaka, drugi alat je prevučen dijamantnom prevlakom dok je treći alat prevučen titanij-nitrid prevlakom. Prevlačenje alata TiN prevlakom provedeno je u sklopu diplomskog rada PACVD postupkom.

**Ključne riječi:** protetski nadomjesci, dentalni materijali, CAD/CAM, glodanje, svrdla

---

**SUMMARY**

This Master's thesis compares the different surface properties of three dental milling cutters used in the production of dental prostheses.

In the theoretical section of this thesis, the history of dental prostheses is given, along with their classification and types of materials used for their manufacture. Furthermore, the CAD/CAM system used for creating dental prostheses is thoroughly described, with an emphasis on its historical development and system elements, as well as its advantages and disadvantages and the materials it can process. The process of machine milling in the manufacture of dental prostheses is described in detail, with the focus on the milling tool, its classification, the materials from which it is made and its property requirements.

In the experimental part of this thesis, an SEM analysis of the intact and worn surfaces of dental drills used in the fabrication of fifty dental crowns from pre-sintered zirconia blocks was performed. All three tools were subjected to the same conditions and the same parameters during the process of milling dental crowns. All tools have the same geometry and the same number of cutting blades, their fundamental difference lies in their chemical composition. The base material of all cutting tools is tungsten carbide highly alloyed with cobalt. One of the three tools is a hard metal without any coatings, while the other two are coated with diamond and titanium-nitride coating. As a part of this thesis, the PACVD process was used to coat the TiN-coated tool.

**Key words:** prosthetic replacements, dental materials, CAD/CAM, milling, burs

## 1. UVOD

Protetski nadomjesci služe za nadomještanje izgubljenih ljudskih zubi te osiguravanje odgovarajućih estetskih, oralnih, okulzivnih i brojnih drugih funkcija kod čovjeka. Povijest protetskih nadomjestaka seže daleko u prošlost, a razvoj i poboljšanje protetskih nadomjestaka te postupaka njihove izrade dovelo je do napretka u području stomatologije i dentalne protetike. Iako su se u prošlosti protetski nadomjesci izrađivali od prirodnih materijala, konvencionalnom metodom lijevanja u kalupe, današnja tehnologija dovela je do razvoja puno boljeg i preciznijeg sustava za izradu protetskih nadomjestaka. CAD/CAM sustav (engl. *computer aided design/computer aided manufacture*) ima značajnu ulogu u izradi protetskih nadomjestaka u stomatologiji. Ova tehnologija kombinira računalni dizajn i računalno vođenu obradu kako bi se precizno i efikasno izradili protetski nadomjesci kao što su zubne krunice, mostovi, proteze ili implantatne nadogradnje. Sustav se sastoji od 3 temeljne komponente među koje ubrajamo skener, računalni program (softver) i CAM jedinica sustava. CAM jedinica je dio sustava koji služi za izravno pretvaranje informacije u proizvod. Protetski nadomjesci mogu se izrađivati putem 3D printera kao aditivne metode ili subtraktivnom metodom glodanja. Češće se koristi postupak glodanja, s obzirom da je moguće izraditi protetske nadomjeske vrlo visoke kvalitete i preciznosti koji mogu biti trajno postavljeni u ljudskoj čeljusti. Postoji jako puno različitih glodalica za izradu protetskih nadomjestaka, a njihova najčešće podjela je prema postupku glodanja te prema broju okretnih osi alata i dijela koji se obrađuje. Alat glodalice za izradu protetskih nadomjestaka je svrdlo koje može biti izrađeno od različitih materijala koji moraju udovoljiti zahtjeve poput visoke tvrdoće, otpornost na trošenje, visoke duktilnosti i žilavosti. Svrdla su konstruirana tako da oblikuju i obrađuju stomatološke materijale poput keramike, cirkonija ili kompozitnih blokova kako bi se stvorile prilagođene stomatološke restauracije. Zbog poboljšavanja mehaničkih, kemijskih, fizikalnih i drugih svojstava, osnovni materijal svrdla najčešće se prevlači određenim prevlakama kako bi se produžio funkcionalni vijek trajanja alata. Prevlake koje su karakteristične za poboljšanje svojstava ovih alata su: dijamantna prevlaka, titanij-nitrid prevlaka, titanij-karbon-nitrid prevlaka, aluminijska oksidna prevlaka i dr. Odabir odgovarajuće prevlake ovisi o materijalu koji se obrađuje, brzini rezanja, uvjetima obrade i drugim faktorima. Također, ove prevlake mogu se kombinirati kako bi se postigle optimalne karakteristike alata za specifične primjene.

## 2. PROTETSKI NADOMJESCI

Protetski nadomjesci pripadaju grani stomatologije koja podrazumijeva proučavanje i praksu nadomještanja zubi te okolnih tkiva zbog uspostavljanja oralnih funkcija. Navedena grana stomatologije naziva se stomatološka protetika koja se može podijeliti u dvije skupine s obzirom na mobilnost protetskih nadomjestaka. Prvoj skupini pripada mobilna protetika koja se bavi izradom pomičnih dentalnih nadomjestaka koji mogu biti djelomični ili potpuni. Mobilna protetika bavi se nadomještanjem zubi i potpornih struktura pomičnim protetskim nadomjescima koje pacijent može jednostavno vaditi iz usta. Fiksna protetika spada u dio stomatološke protetike koja se bavi izradom nepomičnih protetskih nadomjestaka poput mostova i krunica. Kod fiksne protetike kada je dentalni nadomjestak jednom postavljen, on se više ne može skinuti. Gubitak zubi je problem koji se javlja kod ljudi u svim životnim razdobljima, stoga je potreba za protetskim nadomjescima uvijek prisutna. Glavni zadatak protetskih nadomjestaka je nadoknada izgubljenih zubi kod ljudi te uspostavljanje potrebnih funkcija stomatognatnog sustava koje su prethodno bile narušene. Primjenom dentalnih nadomjestaka poboljšava se estetika pacijenta te dolazi do rehabilitacije brojnih funkcija kao što su žvačne, fizionomske, okluzijske i druge [1,2].

### 2.1. Povijest protetskih nadomjestaka

Protetski nadomjesci imaju povijest dugu nekoliko stoljeća počevši od ranih civilizacija prije više od 2000 godina. Prilično složene djelomične protetske nadomjeske izrađivali su Etrušćani davne 700. godine prije Krista. Neki dentalni nadomjesci su bili mobilni, dok su neki bili fiksno povezani s drugim zubima ljudske čeljusti. Prvi zubni implantati izrađivali su se od izrezbarenih školjki ili kamenja te od kostiju i zlata. 1930.ih godina, arheološka iskapanja u Hondurasu otkrila su da je civilizacija Maja imala najraniji poznati primjer protetskog nadomjeska kada je pronađen fragment mandibule s implantatima. Primjerak se sastojao od 3 komada školjki izrezbarenih u obliku zuba koji je bio postavljen u čašice triju donjih sjekutića koji nedostaju. U srednjem vijeku protetski nadomjesci su najčešće bili autogeni ili ksenogeni, međutim postojala je velika opasnost od zaraznih bolesti pa čak i smrti uporabom te vrste protetskih nadomjestaka. Moderna povijest dentalnih implantata započinje tijekom Drugog svjetskog rata kada je tijekom služenja u vojsci dr. Norman Goldberg razmišljao o nadoknadi zuba pomoću metala koji su koristili kao proteze za ostale dijelove tijela. Nakon toga, 1948. godine u suradnji



s dr. Aaronom Gershkoffom proizveo prvu uspješnu subperiostalnu implantaciju. Ovaj uspjeh doveo je do temelja i začetka implantološke stomatologije. Jedan od najvažnijih razvoja u dentalnoj implantologiji dogodio se 1957. godine kada je švedski ortopedski kirurg Per-Ingvar Brånemark proučavao zacjeljivanje i regeneraciju kostiju te otkrio da kost može rasti u blizini titanija. Prvi dentalni protetski nadomjestak od titanija postavljen je 1965. godine. Sredinom 20. stoljeća, razvijeni su napredniji materijali za izradu protetskih nadomjestaka. Metal-keramičke krunice i mostovi postaju popularni jer kombiniraju estetski privlačan keramički vanjski sloj s čvrstoćom metalne unutrašnjosti. Danas, protetski nadomjesci su izrađeni od raznih materijala kao što su keramika, cirkonij, metali i polimerni materijali. Napredak tehnologije i materijala nastavlja unaprjeđivati kvalitetu i trajnost protetskih nadomjestaka, pružajući pacijentima funkcionalnost, estetiku i udobnost [3,4].

Na slici 1 prikazani su dentalni protetski nadomjesci u prošlosti.



**Slika 1. Dentalni protetski nadomjesci u prošlosti [5]**

## 2.2. Podjela protetskih nadomjestaka

Postoje različiti kriteriji prema kojima se protetski nadomjesci mogu podijeliti. Najvažnija podjela je prema načinu pričvršćenja na pomične, odnosno mobilne protetske nadomjeske te na nepomične ili fiksne protetske nadomjeske. Osim tog kriterija, mogu se podijeliti i po vrsti opterećenja, broju preostalih zubi, vrsti materijala od kojih su izrađeni, te predviđenoj trajnosti samog protetskog nadomjeska [1].

### 2.2.1. Mobilni protetski nadomjesci

Mobilnim protetskim nadomjescima nadoknađuju se izgubljeni zubi i dio resorbiranog alveolarnog grebena. S obzirom na broj preostalih zubi mogu se podijeliti na parcijalne (djelomične) i potpune protetske nadomjeske. Djelomični mobilni protetski nadomjesci služe za nadoknadu nekoliko zubi u čeljusti, dok potpuni nadomjesci zamjenjuju sve zube u ljudskoj čeljusti. Za razliku od nepomičnih protetskih nadomjestaka, mobilne nadomjeske pacijent može samostalno vaditi iz usta ponajprije zbog održavanja higijene. Ova vrsta nadomjestaka se najčešće izrađuje kada dolazi do gubitka većeg broja zubi kod pacijenta [6].

Prednosti mobilnih protetskih nadomjestaka u odnosu na fiksne su [7]:

- Mogu se primijeniti u gotovo svim slučajevima bezubosti pacijenta
- Cjenovno su povoljniji od nepomičnih protetskih nadomjestaka
- Jednostavnije su za održavanje (čišćenje i reparaciju)
- Za izradu nije potrebna redukcija zuba

### 2.2.2. Fiksni (nepomični) protetski nadomjesci

Fiksni protetski nadomjesci spadaju u fiksnu protetiku koja se bavi trajnim i nepomičnim nadomještanjem zubi koji nedostaju. U fiksne protetske nadomjeske ubrajamo krunice, intrakoronarne nadomjeske (inleje), estetske ljuste, mostove i nadogradnju.

**Krunice** su ekstrakoronarni fiksirani nadomjesci koji obuhvaćaju krunski dio zuba. Veličina i oblik krunice jednaki su kao i kod prirodnog zuba. Zubne krunice svrstavaju se u dvije grupe s obzirom na prekrivanje površine krune zuba. Dije se na potpune krunice kojima se prekriva cijela kruna zuba i na djelomične krunice koje prekrivaju samo dio zubne krune. Osim toga mogu se podijeliti i prema materijalu od kojega su izrađene na metalne krunice, akrilatne, keramičke i kompozitne krunice. Keramička krunica najčešće se izrađuje na podlozi koja se

sastoji od tanke metalne jezgre plemenitog metala. Zadaća zubnih krunica je uspostavljanje prirodnog izgleda te osposobljavanje funkcije žvakanja, poboljšavanje govora...

**Intrakoronarni nadomjesci ili inleji** koriste se za popunjavanje zubnih šupljina. To su protetski nadomjesci koji se izrađuju prema anatomskom otisku kliničke krune. Ukoliko nadoknađuju do 3 plohe zuba nazivaju se inleji, a kada se radi o nadoknađivanju šire okluzalne plohe te većim oštećenjima nazivaju se onleji. Navedeni protetski nadomjesci mogu biti izrađeni od različitih vrsta materijala, ali najčešće su to dentalni keramički materijali i legure zlata.

**Estetske ljuske** predstavljaju najmanje invazivane protetske nadomjeske koji su danas jako aktualni kod rješavanja estetskih problema u prednjem dijelu čeljusti. Estetskim ljuskama moguće je ispraviti nepravilnosti u boji i obliku zuba kako bi se poboljšala estetika zuba ili kako bi se površina zuba zaštitila od oštećenja. Najčešće se izrađuju od tankog sloja keramike koji se odgovarajućim estetskim cementom vežu za vestibularnu plohu zuba.

**Most** pripada skupini fiksnih protetskih nadomjestaka, a služi za ispunjavanje praznine u slučaju kada pacijentu nedostaje jedan ili nekoliko zubi. Mostovi su trajno vezani za nosače koji mogu biti prirodni i zdravi zubi ili implantati u slučaju kada pacijentu nedostaje više zubi u nizu. Osim estetske i funkcionalne prednosti, most održava pravilan zagriz, žvakanje i govor. Mostovi kao i krunice mogu biti izrađeni od metala i keramike.

**Nadogradnja** također spada u fiksne protetske nadomjeske koji su izrađeni na endodontski liječenim zubima. Sastoji se od dva dijela s obzirom na položaj korijena zuba. Prvi dio je intraradikularni koji se sidri u korijenu, a drugi dio je ekstraradikularni koji nadomješta tvrda zubna tkiva te formira bataljak za krunicu. Nadogradnja kao protetski nadomjestak uvijek dolazi u kombinaciji s krunicom i najčešće se koristi u slučaju znatnog gubitka tvrdih zubnih tkiva [8].

### 2.3. Materijali za izradu protetskih nadomjestaka

Postoji jako puno materijala koji služe za izradu protetskih nadomjestaka. Dentalni materijali moraju zadovoljavati brojna mehanička, kemijska, fizikalna, tehnološka i druga svojstva. Među mehaničkim svojstvima dentalnih materijala uz čvrstoću, elastičnost, trošenje i deformaciju, ističe se svojstvo tvrdoće zbog otpornosti površine protetskog nadomjeska na prodiranje nekog drugog tijela koje je znatno tvrđe. Optička svojstva materijala su također vrlo bitna zbog postizanja što boljeg estetskog izgleda protetskih nadomjestaka. S obzirom da su unosom hrane i pića dentalni materijali podvrgnuti promjenama temperature, svakako je bitno odrediti odgovarajuća toplinska svojstva dentalnih materijala. Protetski nadomjesci u ustima često podliježu korozivnim promjenama i toksičnom djelovanju. Zbog svih navedenih svojstava protetski nadomjesci izrađuju se od brojnih materijala među koje ubrajamo metale, nemetale, keramiku, polimere... Za izradu fiksnih protetskih nadomjestaka koriste se brojne legure koje se mogu podijeliti prema udjelu plemenitih metala.

Plemenite legure mogu se podijeliti na:

- Legure s visokim udjelom zlata
- Legure sa sniženim udjelom zlata
- Srebro-paladijeve legure
- Paladijeve legure

U neplemenite legure ubrajaju se:

- Nikal-kromove legure
- Kobalt-kromove legure
- Legure željeza
- Titanijeve legure

Za izradu baza djelomičnih protetskih nadomjestaka kao što su krunice, mostovi i nadogradnje najčešće se primjenjuju neplemenite metalne legure. Za izradu protetskih nadomjestaka često se koriste i polimerni materijali zbog svojih povoljnih svojstava. U fiksnoj protetici polimerni materijali koriste se za izradu privremenih krunica i mostova. Mobilni protetski nadomjesci, djelomični i potpuni najčešće se izrađuju od poli (metil-metakrilata), polimernog materijala koji ima vrlo dobra i prihvatljiva klinička svojstva. Keramika je jedan od najvažnijih dentalnih materijala koji pruža jedinstvenu kombinaciju potrebnih svojstava. Dijeli se prema sastavu na keramiku za pečenje na slitinu odnosno metal-keramiku i na potpunu keramiku koja podrazumijeva aluminijoksidnu, staklokeramiku i cirkonijevu keramiku. Još jedna vrsta podjele

keramike je s obzirom na namjenu. Dije se na one koji služe za izradu potpuno keramičkih krunica, metal-keramičkih krunica, materijale za izradu glazura i korektura te na one kojima se postiže posebna estetika. Dentalna keramika predstavlja najvažniji estetski gradivni materijal protetskih nadomjestaka. Keramika se također može podijeliti i prema temperaturi pečenja. Keramika koja ima nisku temperaturu pečenja ( od 850 °C do 1100 °C) koristi se za izradu fiksnih protetskih nadomjestaka kao što su krunice, mostovi i fasete. Keramika koja podliježe srednje visokoj temperaturi pečenja (od 1100 °C do 1300 °C) koristi se za posebne oblike međučlanova te za izradu inleja. Keramika koja ima visoku temperaturu pečenja (od 1300 °C do 1400 °C) koristi se za protetske nadomjeske te umjetne zube mobilnih proteza. Dentalna keramika je značajno evoluirala u posljednjih 10 godina zbog otkrića i razvoja novih mikrostrukture te CAD/CAM tehnologije [9,10].

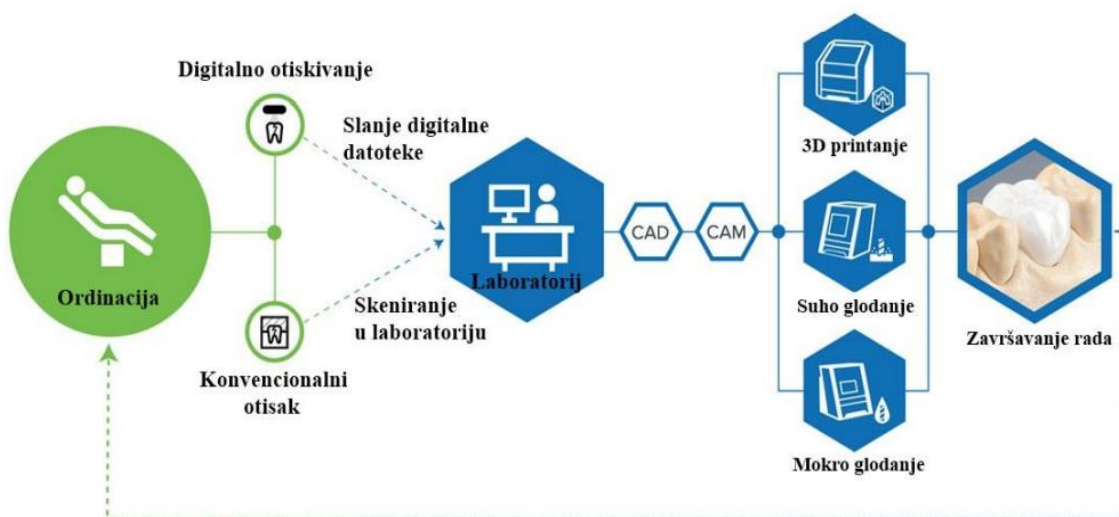
### 3. CAD/CAM SUSTAVI ZA IZRADU PROTETSKIH NADOMJESTAKA

CAD/CAM sustav, odnosno računalno potpomognuto oblikovanje i strojna izrada protetskih nadomjestaka je sustav izrade nadomjestaka koji se sastoji od tri glavne komponente:

- Skener koji konvertira geometrijski oblik u digitalnu informaciju koju može obraditi računalo
- Računalni program (CAD jedinica) koji služi za obradu podataka i pružanje informacija o proizvodu
- CAM jedinica (glodalica) ili 3D-printer koji služe za pretvaranje informacija u proizvod

Cilj ove tehnologije je skratiti vrijeme izrade protetskih nadomjestaka te smanjiti pogreške koje mogu biti uzrokovane tijekom različitih faza laboratorijske izrade. Primjena CAD/CAM tehnologije dovela je do značajnog poboljšanja kvalitete i estetike protetskih nadomjestaka. Ova tehnologija u početku se koristila samo za izradu inleja, pojedinačnih krunica i onleja, dok su se u posljednjem desetljeću mogućnosti primjene značajno proširile. Sa svakom iteracijom, mogućnosti ovih sustava se proširuju, a tehnika poboljšava [11, 12, 13].

Na slici 2 prikazane su komponente CAD/CAM sustava.

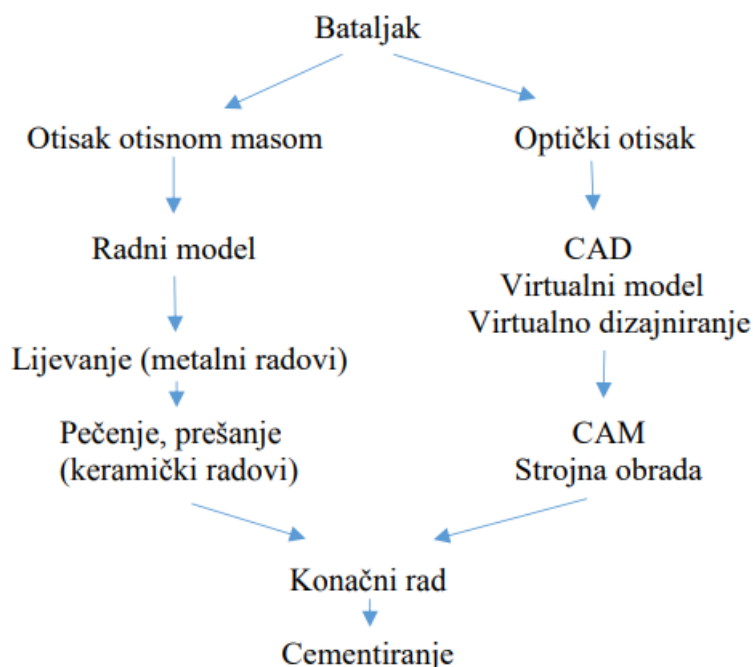


Slika 2. CAD/CAM sustav [14]

### 3.1. Povijesni razvoj CAD/CAM tehnologije

U dentalnoj medicini razvoj CAD/CAM tehnologije započeo je 70-ih godina 20. stoljeća kada je doktor Francois Duret uočio kako se digitalna tehnologija koja se u to vrijeme koristila u drugim industrijama može primijeniti i u stomatologiji za izradu protetskih nadomjestaka. Sve do tada su se koristile konvencionalne metode za izradu protetskih nadomjestaka. Konvencionalnim metodama izrada protetskih nadomjestaka sastojala se od uzimanja otiska pomoću određene otisne mase, radnog modela, lijevanja i pečenja keramičkih radova.

Na slici 3 prikazan je pregled postupka izrade protetskih nadomjestaka konvencionalnom metodom i prvom generacijom CAD/CAM tehnologije.

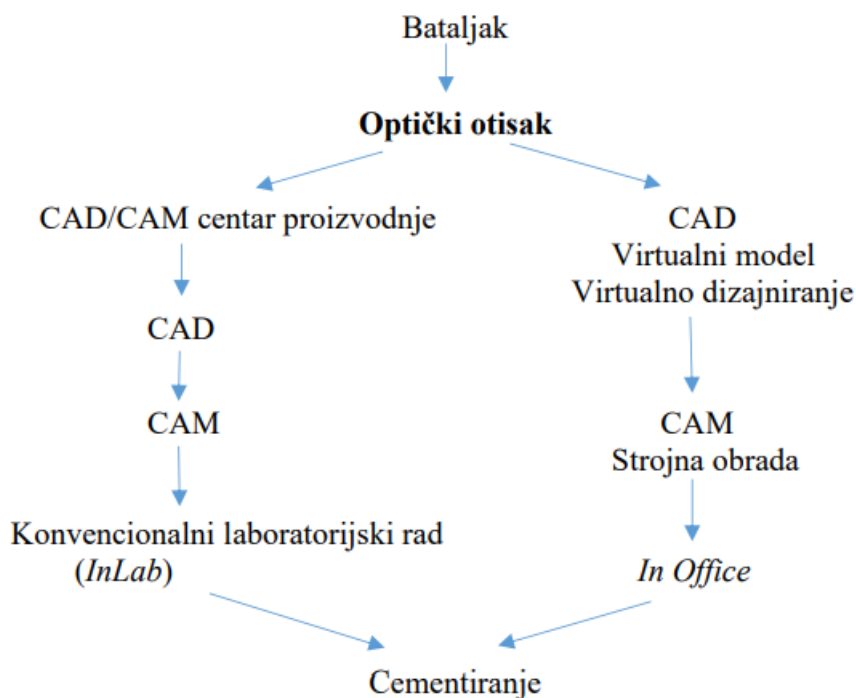


**Slika 3. Postupak izrade protetskih nadomjestaka konvencionalnom metodom i CAD/CAM tehnologijom prve generacije [15]**

Prvi CAD/CAM protetski nadomjestak izradio je Duret 1983. godine pomoću Sopa CAD/CAM sustava. Taj sustav temeljio se na uzimanju optičkog otiska, virtualnog dizajniranja i modeliranja pomoću računala te strojne obrade najčešće glodalicama. Sustav je također poslužio kao smjernica za razvijanje današnjih CAD/CAM sustava. Daljnji razvoj sustava temeljio se na primjeni novih materijala te izradi različitih vrsta protetskih nadomjestaka. Brzi razvoj tehnologije doveo je do razvoja nove četvrte generacije CAD/CAM sustava koja se danas

ističe visokom preciznošću i brzinom izrade protetskih nadomjestaka. Sustav se temelji na principu direktnog uzimanja otiska u ustima pomoću intraoralnih skenera [12,15].

Na slici 4 prikazana je četvrta generacija CAD/CAM sustava za izradu protetskih nadomjestaka.



Slika 4. Četvrta generacija CAD/CAM sustava za izradu protetskih nadomjestaka [15]

### 3.2. Komponente CAD/CAM sustava

**Skener** je uređaj pomoću kojega se u dentalnoj medicini prikupljaju podatci o površini čeljusti i prepariranim zubima u 3 dimenzije. Prikupljeni podatci se pomoću skenera konvertiraju u digitalni oblik. Razlikujemo dvije skupine skenera: optički skeneri i mehanički skeneri. Optički skener prikuplja podatke procesom triangulacije mjerne svjetlosne mreže koja se rasprostire na zubnoj površini pod određenim kutom. S obzirom da se razlikuje dubina mjerne svjetlosne mreže, skener skuplja podatke u 3 dimenzije. Mehanički skeneri rade na principu primjene kuglice od rubina. Radni model očitava se mehanički, kontinuirano liniju po liniju. Prednost ovih skenera je iznimna preciznost.

**Računalni program** predstavlja ključni dio CAD/CAM sustava, a služe za uspostavljanje djelomičnog ili potpunog digitalnog tijeka rada. Pomoću softvera snimljene slike pretvaraju se u digitalni model na temelju kojeg se može oblikovati protetski nadomjestak. Nakon izrade



digitalnog modela, softver šalje podatke u stroj za glodanje ili 3D printer gdje dolazi do izrade protetskog nadomjeska. Baza softvera sastoji se od podataka koji su pohranjeni u standardnom transformacijskom jeziku (STL datoteka).

**CAM jedinica** radi na principu pretvaranja digitalnog podatka u proizvod. Proizvodnja protetskih nadomjestaka izvodi se aditivnim postupkom (3D-printanje) ili subtraktivnom metodom (glodanje). CAM metoda koja se najčešće primjenjuje je glodanje tijekom kojeg se iz blokova različitih materijala obrađuje željeni protetski nadomjestak u skladu s prethodno dobivenim digitalnim podacima. Tehnologijom trodimenzionalnog printanja protetski nadomjestci izrađuju se unutar 3D-printera od kapljica tekućeg fotopolimera. Polimerizacijsko UV svjetlo stalno obasjava kapljice te slojevitom izradom nastaje protetski nadomjestak željenog oblika [11,16].

### 3.3. Blokovi materijala za obradu u CAD/CAM sustavu

Najčešći materijali koji se koriste za izradu strojno obradivih blokova od kojih se izrađuju protetski nadomjestci su metali, polimeri, različite vrste keramike i voskova. Biološki prihvatljive legure, koje su ujedno i neplemenite, a služe za izradu individualno oblikovanih protetskih nadomjestaka su legure kobalta. Blokovi koji se izrađuju od navedenih legura kobalta prvotno se proizvode u djelomično sinteriranom stanju, a potom se nakon strojne obrade (glodanja) gusto sinteriraju uz prisutnost plemenitog plina argona. Prilikom uporabe blokova od legura kobalta, završna obrada dobivenog protetskog nadomjeska radi se isključivo uporabom svrdla od tvrdog metala s visokim udjelom ugljika. Vrlo često se u dentalnoj medicini primjenjuje metal titanij koji ima vrlo poželjno svojstvo izvrsne biokompatibilnosti. Blokovi za strojnu obradu izrađuju se od čistog titanija i legura titanija od kojih je najznačajnija  $Ti_6Al_4V$ . Međutim, obrada plemenitih metala postupkom strojne obrade je dosta neekonomična s obzirom na vrlo visoku cijenu materijala i to da se tijekom samog postupka obrade gubi velika količina materijala. Polimerni blokovi koriste se za izradu privremenih protetskih nadomjestaka. Prednosti polimetilmetakritalnih blokova su prirodna fluorescencija, visoka homogenost materijala te dugotrajna stabilnost boje. Na tržištu postoje razne veličine i palete boja polimernih blokova za glodanje. Keramički blokovi dijele se na silikatne keramičke blokove i oksidne keramičke blokove. Među silikatnom keramikom izdvaja se glinična keramika, hibridna keramika i staklokeramika. Glinični keramički blokovi izdvajaju se od ostalih zbog mogućnosti postavljanja protetskog nadomjeska u usta pacijenta izravno nakon

glodanja provedenog u ordinaciji. Također površina protetskog nadomjeska izrađenog iz bloka glinične keramike lako se polira, a blokovi se javljaju na tržištu u različitim veličinama i bojama. Hibridna keramika ima svojstva najbližija prirodnim zubima zbog izrazitog propuštanja svjetla, a karakterizira je svojstvo visoke elastičnosti. Blokovi staklokeramike služe za izradu djelomičnih i potpunih krunica te inleja i onleja. Izdvajaju se zbog izvrsne mogućnosti poliranja površine, a izgledom su najbližiji caklini zbog niske abrazivnosti površine. Blokovi od oksidne keramike javljaju se u dva oblika: predsinterirani blokovi i gusto sinterirani blokovi. Predsinterirani blok potrebno je izglodati u dimenziji koja je 30% veća od stvarne veličine te nakon toga podvrgnuti postupku sinteriranja. Gusto sinterirani blokovi glodaju se u stvarnoj veličini protetskog nadomjeska s obzirom da su čestice u blokovima gusto zbijene. Od oksidne keramike najčešće se koriste aluminij-oksidna keramika i cirkonij-oksidna keramika. Aluminij-oksidna keramika sastoji se od dvije skupine koje se razlikuju po sastavu i gustoći. Prva skupina koja ima manje guste sastavnice zahtijeva dodatno ojačavanje pomoću pečenja na visokim temperaturama pri čemu dolazi do infiltracije lantanovim staklom. Druga skupina aluminij-oksidne keramike ne zahtijeva dodatno ojačavanje, s obzirom da su joj vrijednosti mehaničkih svojstava vrlo visoke. Najčešće se koristi za izradu prednjih krunica i krunica u lateralnom području [9,12].

### 3.3.1. Cirkonij-oksida keramika

Cirkonijev dioksid ( $ZrO_2$ ) ističe se svojim izvrsnim mehaničkim svojstvima. Vrijednosti mehaničkih svojstava znatno su više od svih ostalih keramika koje se primjenjuju za izradu protetskih nadomjestaka.

U tablici 1. prikazana su mehanička svojstva cirkonijevog dioksida ( $ZrO_2$ ).

**Tablica 1. Mehanička svojstva cirkonijevog dioksida ( $ZrO_2$ ) [17]**

| Svojstvo                                 | Vrijednost          |
|--|---------------------|
| Gustoća , $g/cm^3$                       | >6                  |
| Poroznost, %                             | <0.1                |
| Savojna čvrstoća, MPa                    | 900-1200            |
| Tlačna čvrstoća, MPa                     | 2000                |
| Youngov modul elastičnosti, GPa          | 210                 |
| Lomna žilavost , MPa/m                   | 7-10                |
| Koeficijent toplinskog širenja, $K^{-1}$ | $11 \times 10^{-6}$ |
| Toplinska vodljivost, W m/K              | 2                   |
| Tvrdoća, HV0.1                           | 1200                |

S obzirom da cirkonijev dioksid nema amorfni dio te da prilikom naprezanja pukotina ne napreduje, već se zatvara i zaustavlja, to ga čini izvrsnim dentalnim materijalom. Kod ostalih keramika, u slučaju nastajanja pukotine u materijalu zbog utjecaja vanjskih sila, pukotine se šire i dolazi do pucanja materijala. Cirkonijev dioksid ubraja se u polikristalni materijal, a u prirodi se nalazi kao mineral koji ima monoklinsku kristalnu strukturu. Tijekom porasta, odnosno smanjenja temperature dolazi do transformacije između kristalnih faza cirkonijevog dioksida. Zagrijavanjem na  $1170\text{ }^\circ\text{C}$  prelazi iz monoklinske faze u tetragonsku, a daljnjim porastom temperature na  $2370\text{ }^\circ\text{C}$  prelazi u kubnu fazu. S obzirom da je transformacija faza reverzibilan proces, postupkom hlađenja cirkonijev dioksid dovodi se ponovno u monoklinsku fazu. Najvažniji proces tijekom transformacije faza je promjena volumena kristalnih zrna cirkonijevog oksida. U dentalnom cirkonij-oksidoj keramici dodaje se itrijev oksid  $Y_2O_3$  koji sprječava prijelaz tetragonske faze u monoklinsku prilikom hlađenja. Pomoću itrijevog oksida postiže se tetragonska faza na sobnoj temperaturi. Mehanička svojstva i stabilnost faze ovise o

veličini kristalnih zrna. Cirkonij oksidna keramika prvo se počela primjenjivati za izradu umjetnih kukova zbog svoje izvrsne biokompatibilnosti i bijele boje. U dentalnoj medicini cirkonij-oksidna keramika koristi se za izradu krunica, mostova, inleja i onleja tehnologijom CAD/CAM. Glodanje cirkonij-oksidne keramike odvija se u predsinteriranoj fazi zbog mekoće materijala. Prednosti tog mekanog materijala su to što se može lakše glodati bez intenzivnog trošenja svrdla i mogućeg oštećenja materijala. Ukoliko se tijekom glodanja koristi sinterirani cirkonijev dioksid, završni protetski nadomjestak ima lošija mehanička svojstva od deklariranih. Zbog mogućnosti pucanja materijala, cirkonij-dioksid se obrađuje drukčije od metala, odnosno posebnom svrdlima na glodalici ili vodenim hlađenjem tijekom glodanja. Još jedan problem koji je prisutan kod cirkonij-oksidne keramike je pojava otkrhnuća koje se najčešće može doraditi poliranjem ili nadomještanjem s kompozitom. Unatoč određenim problemima koji se javljaju, cirkonij-oksidna keramika se vrlo često primjenjuje za izradu protetskih nadomjestaka. Iako se pojavljuju određena oštećenja ili puknuća, ona se vrlo jednostavno popravljaju izravno u ustima pacijenta pri čemu ne dolazi do narušavanja ni estetike ni funkcije. Cirkonijev oksid često se naziva *zlatnim standardom* u dentalnoj medicini [17].

Na slici 5 prikazan je blok cirkonij-oksidne keramike.



**Slika 5. Blok od cirkonij-oksidne keramike [17]**

---

### **3.4. Prednosti i nedostaci CAD/CAM tehnologije za izradu protetskih nadomjestaka**

Prednosti CAD/CAM sustava su [11]:

- Primjena novih materijala
- Smanjenje vremena izrade protetskog nadomjeska
- Smanjeni utjecaj ljudskog rada
- Bolja kontrola kvalitete
- Uzimanje digitalnog otiska je puno jednostavnije od otiska koji se uzima pomoću otisnog materijala
- Najnovija inovacija u CAD/CAM sustavu omogućuje promatranje i razvijanje okluzije u dinamičnom stanju

Nedostaci CAD/CAM sustava su [11]:

- Potrebno je dulje vrijeme učenja za primjenu CAD/CAM sustava
- Visoki kapitalni troškovi za primjenu ovih sustava
- Primjenom CAD/CAM sustava može biti izazovna subgingivalna marginacija s obzirom da o njoj ovisi digitalizacija samog sustava
- Kontinuirani napredak CAD/CAM sustava zahtijeva česte nadogradnje i ažuriranja sustava
- Usklađivanje boje pacijentovog zuba s blokovima materijala za izradu protetskog nadomjeska može biti izazovno

## 4. STROJNO GLODANJE ZA IZRADU PROTETSKIH NADOMJESTAKA

Tehnologija strojnog glodanja temeljna je suptraktivna metoda koja se primjenjuje za izradu protetskih nadomjestaka. Strojno glodanje je CAM jedinica CAD/CAM sustava, a uključuje izradu protetskog nadomjeska iz CAD modela u fizički proizvod koji se obrađuje te dodatno priprema za primjenu u pacijentovim ustima. Postupak glodanja podrazumijeva izradu željenog oblika protetskog nadomjeska uporabom alata za glodanje (svrdla) koji uklanja višak materijala iz čvrstih blokova postavljenih u glodalici. Blokovi mogu biti od različitih materijala, ovisno o primjeni. Glodalice se mogu podijeliti u dvije skupine prema načinu glodanja koje može biti suho i mokro. Način glodanja ovisi o vrsti materijala čvrstih blokova koji se obrađuju. Osim toga, glodalice se razlikuju i prema broju osi za glodanje. S obzirom na broj osi, postoje glodalice s tri, četiri ili pet osi koje se rotiraju unutar glodalice. Današnje glodalice za izradu protetskih nadomjestaka su numerički kontrolirane i predstavljaju ključni dio CAD/CAM sustava. S obzirom na koncept i mjesto izrade protetskog nadomjeska, glodalice mogu biti smještene unutar ordinacije pri čemu se protetski nadomjesci izrađuju izravno prilikom posjeta pacijenta. Drugi koncept izrade protetskih nadomjestaka je u zubotehničkim laboratorijima koji najčešće imaju nekoliko različitih glodalica. Posljednji koncept izrade je u proizvodnom centru, gdje se proizvodi veći broj protetskih nadomjestaka. Strojnim glodanjem moguće je izraditi protetske nadomjeske vrlo složenih geometrija i oblika [18,19].

### 4.1. Suho i mokro glodanje

Vrsta materijala koji se obrađuje strojnim glodanjem određuje hoće li postupak glodanja biti suh ili mokar. Određeni keramički materijali poput litijevog dislikata, glinične keramike, kompozita te metala poput kobalt-krom legura i titanija zahtijevaju postupak mokrog glodanja prilikom izrade protetskih nadomjestaka. Tehnika suhog glodanja primjenjuje se kada su čvrsti blokovi za izradu protetskih nadomjestaka izrađeni od cirkonijevog dioksida i polimetilmetakrilata. Tekućina koja se koristi pri mokrom glodanju ima nekoliko funkcija, a neke od njih su: hlađenje alata za glodanje, uklanjanje viška materijala s alata i blokova, odnošenje prašine koja nastaje glodanjem... Često se u tekućinu dodaju i određeni aditivi koji imaju ulogu maziva prilikom glodanja, a osnovna tekućina je najčešće destilirana voda. Mokre glodalice zahtijevaju povremeno čišćenje s obzirom da se višak materijala nakuplja unutar stroja. Kod suhog glodanja za uklanjanje otpadnog materijala te hlađenje alata koristi se zrak

koji se ispuhuje u mlazu usmjerenom na svrdlo glodalice. Čišćenje i održavanje glodalice za suho glodanje je također potrebno jer se pri suhom glodanju stvara značajnija količina prašine i strugotine. Većina glodalica konfigurirana je za rad na jedan način, međutim postoje glodalice koje mogu obavljati postupak i suhog i mokrog glodanja, ovisno o materijalu koji se strojno obrađuje [20].

Na slikama 6 i 7 prikazani su postupci suhog i mokrog glodanja.



Slika 6. Postupak suhog glodanja [21]

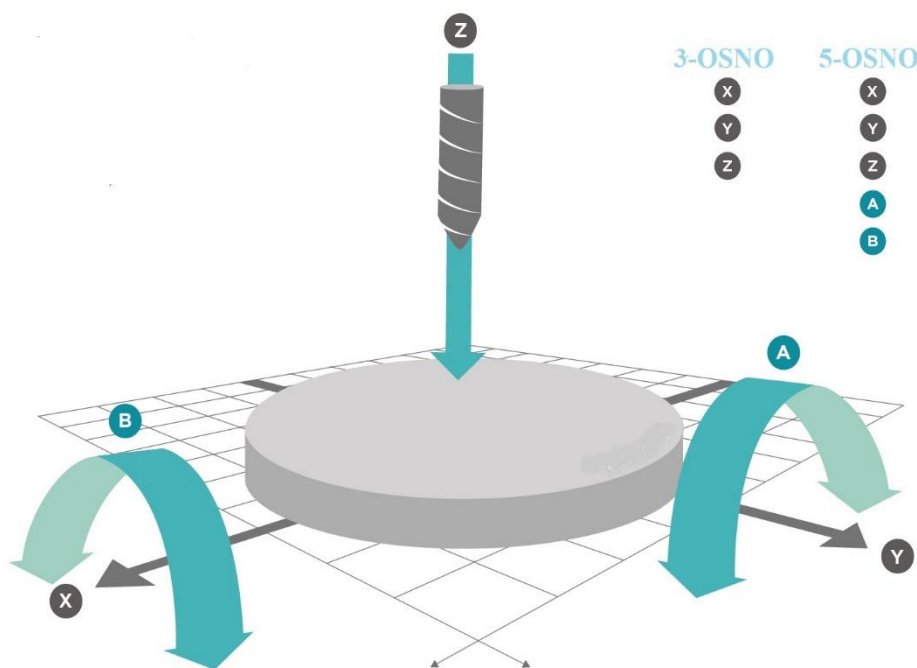


Slika 7. Postupak mokrog glodanja [22]

#### 4.2. Podjela glodalica prema broju okretnih osi

Glodalice za izradu protetskih nadomjestaka mogu bit 3-osne, 4-osne i 5-osne ovisno o mogućnostima rotacije bloka materijala koji se gloda te kretanju alata za glodanje. Uporaba višeosnih glodalica povećala je učinkovitost CAD/CAM tehnologije u stomatologiji. Primjenom višeosnih glodalica došlo je do poboljšanja točnosti i preciznosti prilikom izrade protetskih nadomjestaka, a jedna od najvažnijih prednosti je skraćenje vremena proizvodnje. Glavni dio glodalice je alat, odnosno svrdlo koji se kreće u prostornom koordinatnom sustavu opisanim međusobno okomitim pravcima  $x$ ,  $y$  i  $z$ . Rotacijske osi predstavljaju ravnine A i B unutar kojih se čvrsti blok pomjera s lijeva na desno, odnosno naprijed-nazad ovisno o zadanim parametrima glodanja. Os  $z$  je vertikalna os koja je paralelna s alatom za glodanje [19,23].

Na slici 8 prikazane su osi i ravnine kretanja komponenata glodalice.



Slika 8. Smjerovi kretanja komponenata glodalice [24]

#### 4.2.1. Troosne glodalice

Glodalice koje imaju mogućnost kretanja u tri prostorne ravnine nazivaju se troosne glodalice. Točke kretanja alata za glodanje su jasno definirane vrijednostima  $x$ ,  $y$  i  $z$  te zahtijevaju jednostavniji matematički izračun. Prednosti ovih glodalica su kratka vremena glodanja i jednostavno upravljanje s obzirom na troosno kretanje. Zbog navedene jednostavnosti, troosne glodalice su najčešće cjenovno povoljnije od ostalih višeosnih glodalica. Nedostatak ovih glodalica je nemogućnost glodanja pomoćnih sekcija te nemogućnost konvergencije i divergencije osi [23].

#### 4.2.2. Četveroosne glodalice

Kod ovih glodalica moguća je izrada konstrukcija mosta s velikim razmjerima u vertikalnom pomaku. Komponenta čvrstog bloka može se okretati i svim smjerovima. Glavna prednost ovih glodalica je ušteda vremena i materijala tijekom samog postupka izrade protetskih nadomjestaka. Četveroosne glodalice mogu biti namijenjene za suho, mokro i kombinirano glodanje, a također se mogu podijeliti i s obzirom na način zamjene bloka materijala na ručne i automatizirane glodalice [23].



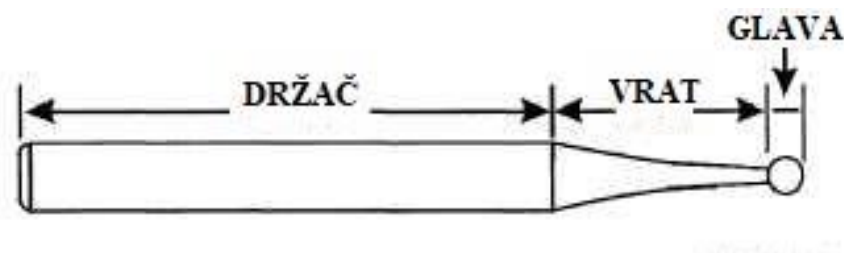
### 4.2.3. Petoosne glodalice

Kod 5-osnih glodalica, uz tri prostorne ravnine i rotacije držača bloka, postoji mogućnost rotacije alata za glodanje. Na taj način moguće je glodanje složenih geometrija substruktura kao što su fiksni protetski nadomjesci na konvergirajućim zubnim nosačima. Iako kvaliteta protetskog nadomjeska nije nužno povezana s brojem obradnih osi, petoosne glodalice svakako imaju prednost zbog svoje preciznosti i mogućnosti izrade kompleksnih oblika. Također, zbog najveće slobode kretanja ove glodalice omogućuju izradu točnih protetskih nadomjestaka u najkraćem mogućem vremenu. Primjenom ovih glodalica, smanjuju se šanse za stvaranje tzv. vrtložnih tragova, odnosno tragova koji se javljaju kao nuspojava oblika alata i visokih temperatura tijekom glodanja [23,25].

### 4.3. Rezni alat glodalice

Najvažniji dio glodalice je alat za glodanje ili svrdlo koje direktno sudjeluje u procesu izrade protetskog nadomjeska. Rezni alat pronalazi primjenu kod rezanja, brušenja, uklanjanja tvrdih i mekih naslaga pri izradi dentalnih nadomjestaka. Određeni čimbenici dizajna utječu na relativnu učinkovitost rezanja te na funkcionalni vijek samog svrdla. Rotirajući rezni alat prisutan je u nizu oblika, veličina i materijala od kojih se izrađuje. Također, razlikuju se svrdla s dvije ili više reznih oštrica s različitim oštrim vanjskim rubovima. Svako svrdlo se sastoji od tri osnovna dijela: glave, vrata i dodatnog dijela koji služi za pridržavanje. Glava se sastoji od reznih oštrica pomoću kojih se izrađuju i oblikuju protetski nadomjesci. Vrat je srednji dio koji je povezan s glavom alata te se na njega nastavlja držač koji čini najduži dio svrdla [26].

Na slici 9 prikazani su dijelovi stomatološkog reznog alata za glodanje.



Slika 9. Dijelovi reznog alata za izradu protetskih nadomjestaka [27]

Godine 1942. proizveden je dijamantni rezni instrument s brzinom vrtnje od 5000 okr/min, dok su 1947. godine čelična svrdla zamijenila svrdla od tvrdog metala s brzinom vrtnje od 12000 okr/min [26].

### **4.3.1. Klasifikacija dentalnih reznih alata**

Za proizvodnju svrdla koji se primjenjuju u stomatologiji postoji 20 međunarodnih normi. Mogu se podijeliti s obzirom na široki raspon materijala, oblika i reznih površina od kojih se sastoje. Norma BS EN ISO 6360 dijelovi 1, 2, 3, 4, 6 i 7 pruža opći sustav numeriranja za sve vrste dentalnih rotirajućih instrumenata. Danas se proizvodi više od 8000 različitih vrsta dentalnih svrdla kako za klinički, tako i za laboratorijski rad. Kako bi se olakšale djelatnosti u industriji te stručnjacima koji rade s dentalnim svrdlima, razvijene su norme zbog potrebe za sistematiziranjem i kategorizacijom toliko raznovrsnih alata. Norma za identifikaciju svrdla sastoji se od 15 brojeva koji precizno predstavljaju sve karakteristike jednog dentalnog svrdla [28].

Način numeriranja odvija se tako da:

- Prva tri broja označavaju materijal svrdla
- Četvrta i peta znamenka označavaju tip nosača svrdla
- Šesta znamenka predstavlja dužinu cijelog dentalnog svrdla
- Znamenke od 7 do 12 označavaju se oblik i karakteristike svrdla
- Znamenke od 13 do 15 označava se nominalna veličina obrađivanog dijela

Također postoji opcija dodavanja tri dodatna broja koja se odnose isključivo na dijamantne alate. [28]

### **4.3.2. Podjela dentalnih svrdla**

Prema vrsti materijala od kojeg su izrađeni :

- a) Svrdla od tvrdog metala
- b) Svrdla s dijamantnom prevlakom
- c) Keramička svrdla

Prema obliku glave reznog alata :

- a) Kuglasta svrdla
- b) Cilindrična svrdla
- c) Konusna svrdla
- d) Stožasta svrdla
- e) Torusna svrdla

Prema broju reznih oštrica na glavi alata:

- a) Svrkla s dvije rezne oštrice
- b) Svrkla sa šest do osam reznih oštrica
- c) Svrkla sa dvanaest reznih oštrica
- d) Svrkla s dvadeset i više reznih oštrica

Prema vrsti namjene za koju se koriste:

- a) Rezači
- b) Finireri
- c) Polireri

Dentalna svrdla mogu se podijeliti i prema veličini radijusa glave, međutim ova podjela je veoma opsežna. Postoji jako puno različitih veličina promjera svrdla u glodalicama za izradu protetskih nadomjestaka. Standardne veličine obično su promjera 1,8 mm za svrdla s cilindričnim vrhom, dok su veličine konusnih svrdla promjera 1 mm ili 1,3 mm [25,28,29].

#### **4.3.3. Volfram karbidna svrdla**

Volframov karbid ima jedinstvenu kombinaciju svojstava od kojih se posebno ističe iznimno visoka tvrdoća u kombinaciji s vrlo visokim modulom elastičnosti. Zbog svojih iznimnih svojstava najčešće se koristi pri izradi brzoreznih alata te alata koji se primjenjuju u naftnoj industriji i rudarstvu. Volfram karbidna svrdla često se primjenjuju u dentalnoj medicini za brušenje dentina, akrilata te zaglađivanje površinskih ploha zubi ili zubnih nadomjestaka. Ova glodala postoje u raznovrsnim oblicima te se koriste za različite namjene. U fiksnoj protetici najčešće se koriste kao alati na glodalicama za izradu protetskih nadomjestaka od metala, keramike ili akrilata. Volfram karbidna svrdla mogu se koristiti pri manjim i većim brzinama, međutim najbolju učinkovitost imaju pri visokim brzinama rezanja. S obzirom da imaju vrlo visoku tvrdoću i postojanost pri visokim temperaturama, volfram karbidna svrdla imaju dulji vijek trajanja od čeličnih svrdla koja su se koristila u prošlosti. Nedostatak ovih svrdla je to što ponekad u dentalnoj tehnologiji podliježu odlamanju rubova što dovodi do smanjenja njihove učinkovitosti. S ciljem produljenja funkcionalnog vijeka alata, volfram karbidna svrdla često se prevlače različitim prevlakama primjerice TiN, TiCN, TiAlN [28,29]...

#### 4.3.4. Svrkla s dijamantnom prevlakom

Dijamant je najtvrdi mineral u prirodi koji ima najvišu temperaturu tališta i toplinsku vodljivost. Zbog svoje visoke tvrdoće koristi se za izradu različitih alata, a najčešće se ugrađuje u rezne oštrice te vrhove bušilica reznih alata. Dodavanjem dijamanta povećava se sila rezanja i bušenja. U dentalnoj tehnologiji, dijamantna svrdla pronalaze primjenu u brušenju zubne cakline kao i u rezanju dentalne keramike. Dijamantno svrdlo najbližije današnjem proizvedeno je 1932. godine kada je razvijen proces povezivanja dijamantnih čestica s podlogom od nehrđajućeg čelika. Ova svrdla se izrađuju tako što se jedan ili više slojeva dijamantnog praha pričvršćuje na tijelo svrdla koje je najčešće izrađeno od visokočvrstih metala poput alatnih i nehrđajućih čelika. Metode povezivanja dijamantnih čestica s podlogom su raznolike, a najčešće se primjenjuje postupak galvanizacije i kemijsko nanošenje iz parne faze odnosno CVD (engl. *Chemical vapour deposition*) postupak. Rezna učinkovitost dijamantnih reznih alata ovisna je o metodi koja se primjenjuje za ugradnju dijamantnih čestica na svrdlo. Prednost ovih alata je visoka otpornost na trošenje, dulji vijek trajanja te mogućnost primjene i kod suhog glodanja [28,29].

Na slici 10 prikazana su svrdla glodalice različitih oblika i materijala.

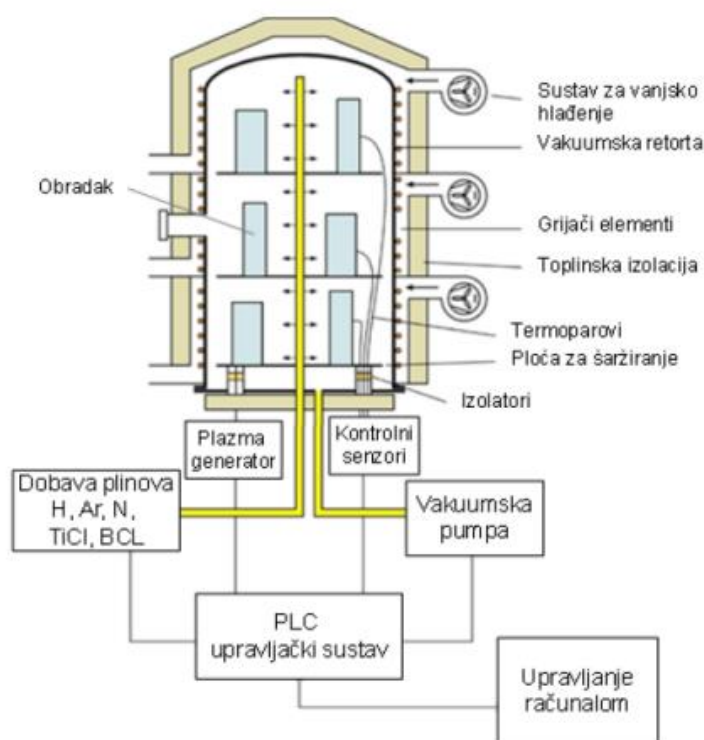


Slika 10. Raznolika svrdla glodalice za izradu protetskih nadomjestaka [30]

#### 4.4. PACVD postupak prevlačenja alata

PACVD (engl. *Plasma assisted chemical vapor deposition*) postupak je plazmom potpomognuti postupak kemijskog prevlačenja iz parne faze. Uz primjenu plazme, sastojci iz parne faze reagiraju pri čemu dolazi do taloženja čvrstog filma uz niže temperature i umjerene brzine. Plazma predstavlja disociran visokoioniziran plin koji se proizvodi uz pomoć električne energije, a primjenjuje se za aktiviranje kemijskih procesa te zagrijavanje osnovnog materijala. Prilikom udara elektrona, molekule plina plazme disociraju na neutralne, radikalne i ionske vrste koje su vrlo reaktivne. Tijekom samog sudara s elektronima dolazi do razgradnje plinskih reaktanata te njihove ionizacije pri čemu dolazi do stvaranja kemijski aktivnih iona i radikala. Upravo ti ioni i radikali sudjeluju u heterogenoj kemijskoj reakciji pri čemu dolazi do kemijske reakcije između kemijskih elemenata koji su prisutni u različitom agregatnom stanju. Tanki sloj prevlake taloži se prilikom reakcije između površine odnosno njezine neposredne blizine i iona. Temperature pri kojima dolazi do kemijske reakcije kreću se od 450 °C do 650 °C a ovise o materijalu prevlake te supstratu koji se prevlači. PACVD postupak odvija se uz prisutnost visokog napona i tlaka, a uređaj se sastoji od generatora plazme, vakuumske komore s grijačima, vakuumske pumpe, sustava za dovod plinova i prekursora te regulacijskog PLC sustava. Plinovi koji se dobavljaju mogu biti dušik, argon, vodik te metan.

Na slici 11 prikazano je shematski prikaz PACVD uređaja.



Slika 11. Shematski prikaz PACVD uređaja [31]

PACVD postupak sadrži prednosti dvaju postupaka prevlačenja (CVD i PVD postupak), s obzirom da se postupak odvija pri relativno niskim temperaturama u odnosu na CVD postupak i visokom tlaku što dovodi do manje osjetljivosti sustava i boljeg prijanjanja kvalitetnih prevlaka. Unatoč tome, nedostatak ovog postupka je to što se može pojaviti veći udio vodika u prevlaci koji nastaje kao posljedica korištenja plazme. Unutar plazme postoje sintetizirani polimeri koji imaju određene nedostatke, poput upijanja vlage i nestabilnost na postupak starenja, a sve je to posljedica prisutnosti slobodnih radikala koji se nalaze unutar polimera. Za PACVD postupak karakteristične su prevlake debljine od samo nekoliko mikrometara, a cilj nanošenja ovih prevlaka je smanjenje intenziteta abrazivnog i adhezivnog trošenja reznih alata. Osim toga nanošenjem ovih prevlaka moguće je smanjenje mehaničkih i toplinskih naprezanja koji se javljaju na alatu tijekom postupka obrade. Osnovni zahtjevi koji se postavljaju na prevlaku su: visoka prionjivost prevlake na osnovni materijal, dobra žilavost i kemijska postojanost te visoka tvrdoća odnosno izvrsna otpornost na trošenje. Postizanjem kombinacije ovih svojstava moguće je zadovoljavanje vrlo složenih zahtjeva na tržištu reznih alata. Titanij-nitrid i titanij-karbid prevlaka iskazale su se kao izrazito prikladne za primjenu na reznim alatima [31–33].

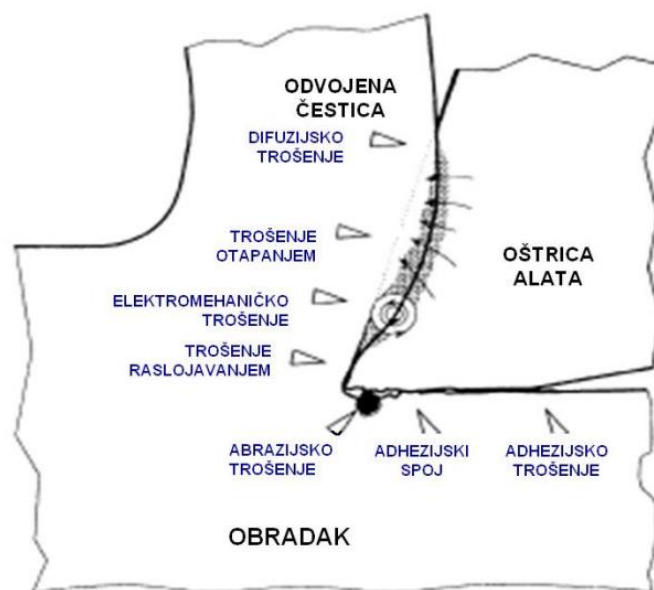
#### 4.5. Zahtjevi na alat glodalice za izradu protetskih nadomjestaka

Uvjeti u kojima se primjenjuju alati, odnosno svrdla za izradu protetskih nadomjestaka uzrokuju potrebu za odgovarajućim mehaničkim, fizikalnim i kemijskim svojstvima samih alata.

Među najvažnijim svojstvima koja se zahtijevaju od alata izdvajaju se [34]

- a) Tribološka svojstva:
  - Otpornost na abraziju
  - Otpornost na adheziju
  - Otpornost na tribokoroziju
- b) Mehanička svojstva
  - Visoka tvrdoća
  - Visoka duktilnost i žilavost
- c) Tehnološka svojstva:
  - Rezljivost
  - Oblikovljivost
- d) Toplinska svojstva
  - Oksidacijska postojanost
  - Zadržavanje visoke tvrdoće porastom temperature

Na slici 12 prikazani su mehanizmi trošenja oštrice reznog alata.



Slika 12. Mehanizmi trošenja oštrice reznog alata [34]

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

U okviru ovog rada provedena je usporedba stanja površine triju reznih alata glodalice za izradu protetskih nadomjestaka prije i nakon postupka obrade odvajanjem čestica. Navedenim reznim alatima glodane su zubne krunice od cirkonijevog dioksida u predsinteriranom stanju. Svi alati imaju dvije rezne oštrice koje sudjeluju u postupku glodanja, a razlikuju se po različitim prevlakama na površini. Alat s dijamantnom prevlakom je dimenzijski drugačiji od ostala dva rezna alata. Tijekom postupka glodanja protetskih nadomjestaka alati su podvrgnuti identičnim parametrima obrade te je svaki alat obradio jednak broj zubnih krunica.

### 5.1. Provođenje ispitivanja

U svrhu ostvarenja cilja ovog diplomskog rada eksperimentalni dio uključuje:

- Prevlačenje alata PACVD postupkom
- Strojna obrada odvajanjem čestica zubnih krunica
- EDS analiza kemijskog sastava
- Karakterizacija debljine prevlake alata
- Analiza površine potrošenih i nepotrošenih uzoraka skenirajućim elektronskim mikroskopom

### 5.2. Alati za ispitivanje

Sva navedena ispitivanja provedena su na sljedećim alatima glodalice za izradu protetskih nadomjestaka:

- (a) Rezni alat glodalice od tvrdog metala bez prevlake na površini (1)
- (b) Rezni alat glodalice s dijamantnom prevlakom (2)
- (c) Rezni alat glodalice s titanij-nitrid prevlakom (3)

Svi potrebni uzorci za ispitivanje osigurani su od tvrtke Neo Dens d.o.o. u Zagrebu. Alat tvrdog metala bez prevlake te alat s dijamantnom prevlakom komercijalno su dostupni, dok je treći alat prevučen TiN prevlakom PACVD postupkom u sklopu diplomskog rada.

Na slici 12 prikazani su alati koji su korišteni za provedbu navedenih ispitivanja.

Zbog lakšeg daljnjeg navođenja u diplomskom radu, alati će umjesto punog naziva biti označivani navedenom broječanom oznakom kako je prikazano na slici 12 te kako je navedeno prethodno u tekstu.

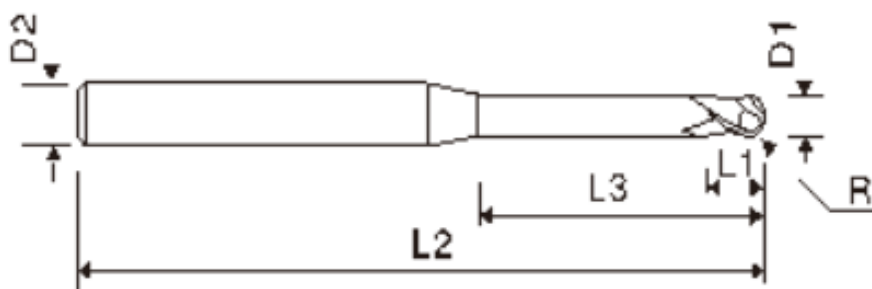




**Slika 13. Rezni alati glodalice na kojima su provedena ispitivanja ( 1- alat od tvrdog metala bez prevlake na površini, 2- alat s dijamantnom prevlakom, 3- alat s titanij-nitrid prevlakom)**

Alat od tvrdog metala i alat prevučen titanijevim nitridom su jednakih konstrukcijskih karakteristika i broja reznih oštrica, dok se alat prevučen dijamantnom prevlakom razlikuje prema dimenzijskim mjerama od prva dva alata, ali ne i prema broju reznih oštrica.

Na slici 14. prikazan je tehnički crtež alata s navedenim karakterističnim mjerama.



**Slika 14. Tehnički crtež alata za glodanje [35]**

U tablici 2 prikazane su dimenzije alata prema oznakama sa slike 13.

Tablica 2. Dimenzijske veličine alata

| alat  | D2 (mm) | L2 (mm) | L3 (mm) | L1 (mm) | DI (mm) |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 i 3 | 4       | 48,5    | 20      | 5       | 2       |
| 2     | 4       | 50      | 16,5    | 9       | 2       |

### 5.3. Opis PACVD postupka prevlačenja svrdla

PACVD postupak prevlačenja alata za glodanje proveden je u Laboratoriju za inženjerstvo površina na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Osnovni materijal alata je tvrdi metal, odnosno volframov karbid. Uzorci su prevučeni titanij-nitrid prevlakom debljine nekoliko mikrometara. Postupak se sastojao od grijanja, ionskog otprašivanja, prevlačenja i čišćenja uzoraka.

Parametri PACVD postupka prevlačenja svrdla TiN prevlakom prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Parametri PACVD postupka prevlačenja

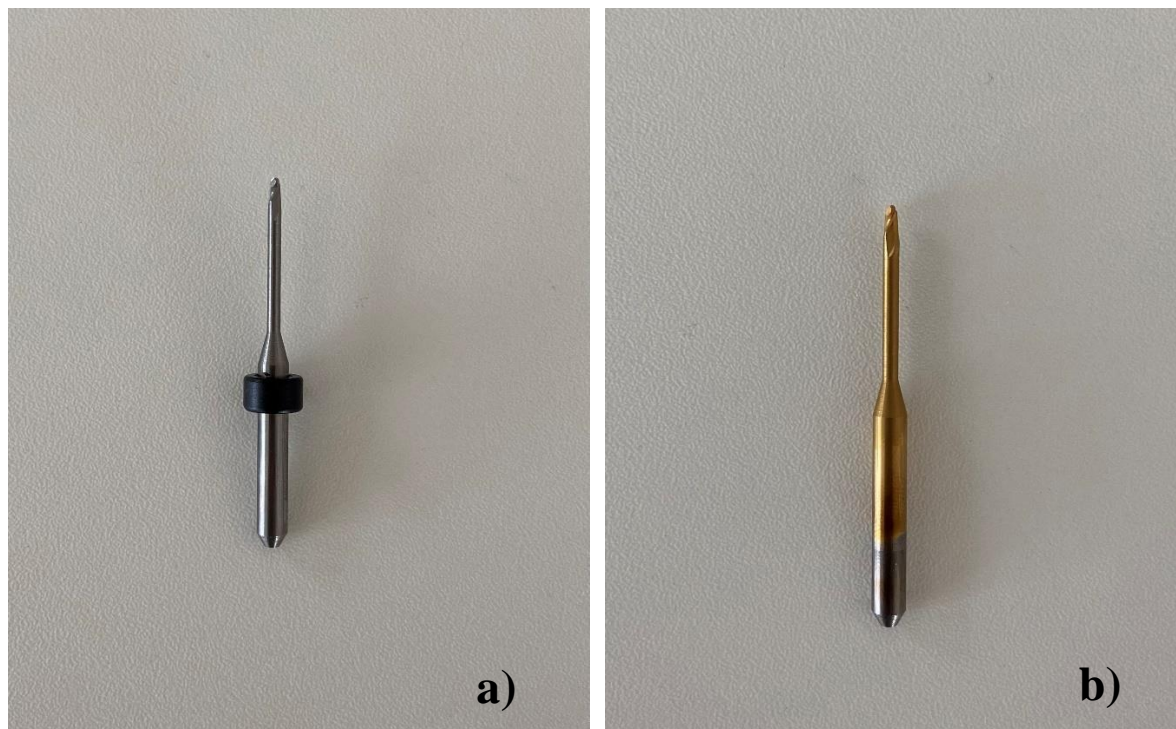
| radni parametar                | Grijanje | Ionsko<br>otprašivanje | Prevlačenje | Čišćenje |
|--------------------------------|----------|------------------------|-------------|----------|
| Temperatura, °C                | 525      | 520                    | 520         | 520      |
| Tlak u radnoj komori,<br>mbar  | 2        | 2                      | 2           | 2        |
| Vrijeme taloženja, h           | 2,5      | 1,25                   | 6           | 0,5      |
| Protok H <sub>2</sub> , l/h    | 20       | 200                    | 250         | 50       |
| Protok N <sub>2</sub> , l/h    | 0        | 20                     | 45          | 0        |
| Protok Ar, l/h                 | 0        | 10                     | 1,3         | 0        |
| Protok TiCl <sub>4</sub> , l/h | 0        | 0                      | 7,5         | 0        |
| Napon generatora<br>plazme, V  | 0        | 365                    | 400         | 0        |
| Snaga plazme, W                | 0        | 2500                   | 3000        | 0        |

Uređaj za prevlačenje prikazan je na slici 15, a proizveden je od njemačke tvrtke Rübige GmbH.



Slika 15. Uređaj za PACVD postupak prevlačenja

Na slici 16 prikazan je alat prije i nakon postupka prevlačenja.



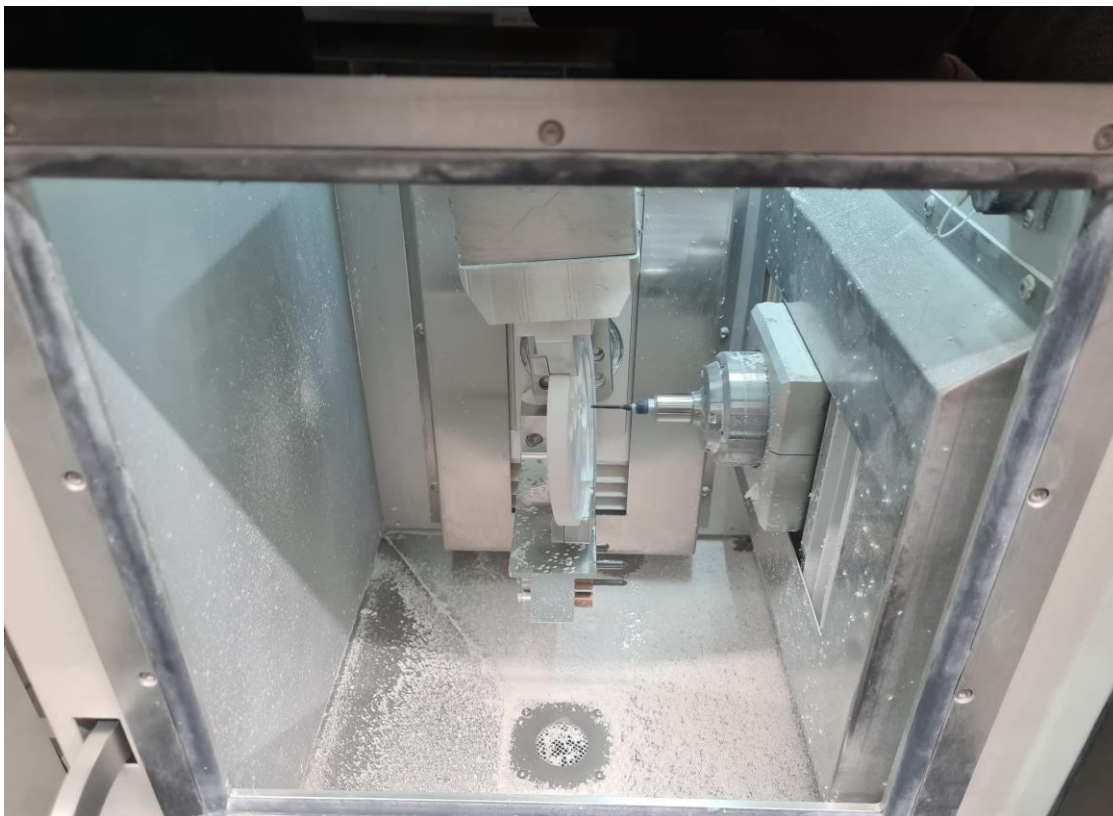
Slika 16. Alat prije (a) i nakon (b) postupka prevlačenja

#### 5.4. Postupak glodanja zubnih krunica

Postupak glodanja proveden je u tvrtki Neo Dens d.o.o. u Zagrebu na glodalici XTCERA X-MILL500 prikazanoj na slici 17. Glodalica ima 5 okretnih osi te pripada skupini petoosnih glodalica namijenjenih za suho glodanje. Svaki od alata izglodao je 50 zubnih krunica odnosno 50 blokova od cirkonijevog oksida. Tijekom glodanja posmak alata iznosio je 2500 mm/min, dok je brzina okretaja iznosila 22000 okr/min. Postupak glodanja jedne zubne krunice trajao je 8 min, a izravni proces glodanja bloka cirkonijevog oksida prikazan je na slici 18. Snaga kojom je alat obrađivao materijal iznosila je 1,8 kW, a napon napajanja sustava iznosio je 220 V.



Slika 17. Glodalica XTCERA X-MILL500



**Slika 18. Alat u procesu glodanja zubnih krunica od cirkonijevog oksida**

### **5.5. EDS analiza kemijskog sastava**

Mikroanaliza kemijskog sastava alata provedena je u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Analiza je provedena na SEM uređaju pomoću EDS (eng. Energy Dispersive Spectrometry) detektora koji su integralni dio samog SEM uređaja. EDS analizom određen je kemijski sastav osnovnog materijala alata te kemijski sastav prevlake uzoraka s dijamantnom i titanij-nitrid prevlakom. Uzorci na kojima je provedena EDS analiza su alati glodalice izrezani na rezalici Mecatome T260, prikazanoj na slici 19, u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Nakon izrezivanja uzoraka, uslijedila je daljnja metalografska priprema prema uobičajnoj proceduri: ulijevanje u polimernu masu, brušenje, poliranje te nagrizanje uzoraka. Pripremljeni uzorci smješteni su u komoru mikroskopa pri čemu se pravilnim pomicanjem fokusiranog snopa elektrona po površini uzoraka formira slika.

Pripremljeni uzorci na kojima je provedena EDS analiza prikazani su na slici 20.

Zbog ograničenja sustava, udio ugljika nije prikazan kvantitativno u tablici dok se njegova prisutnost jasno vidi iz grafičkog prikaza na slikama EDS analize.



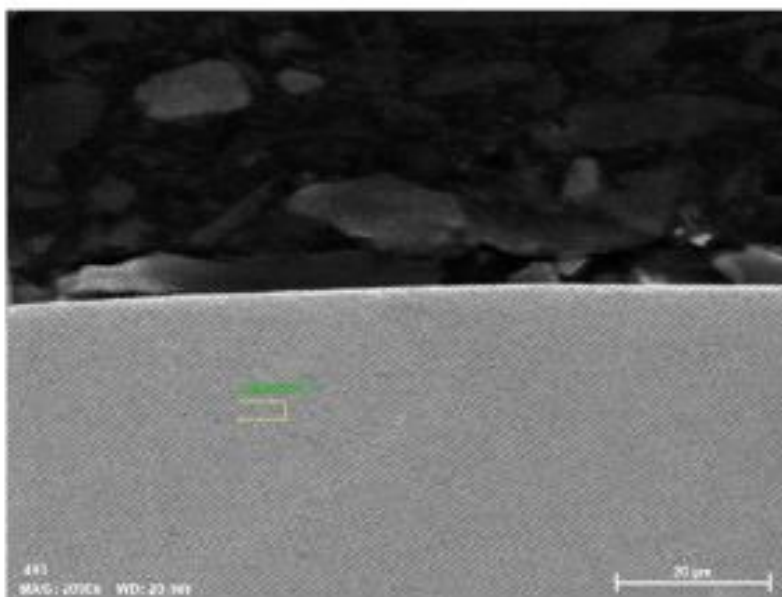


Slika 19. Pila Mecatome T260

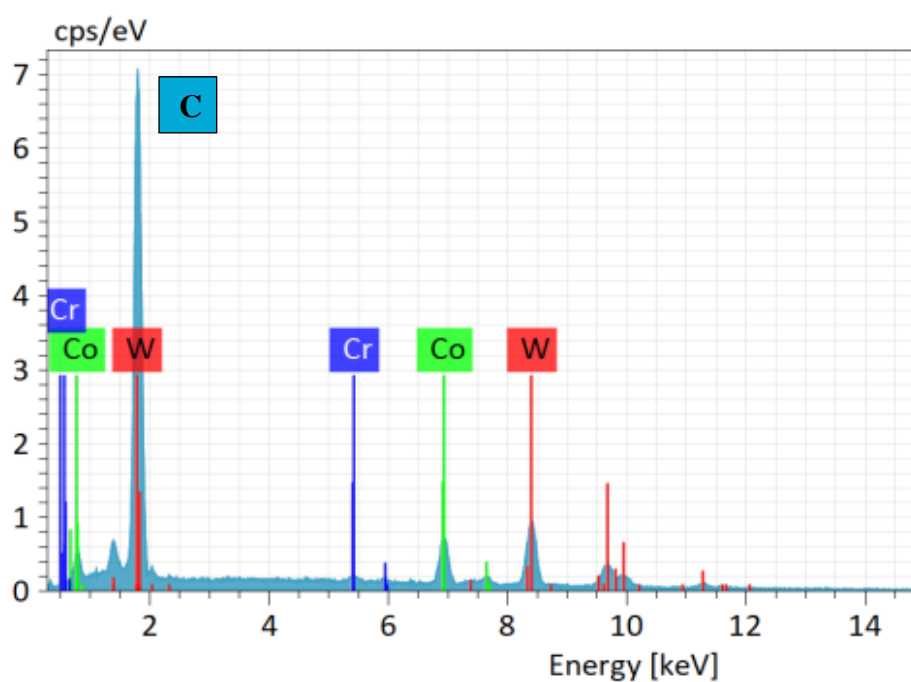


Slika 20. Uzorci pripremljeni za EDS analizu zaliveni u polimernu masu

Na slikama od 21 do 28 te u tablicama od 4 do 7 prikazani su rezultati EDS analize uzoraka.



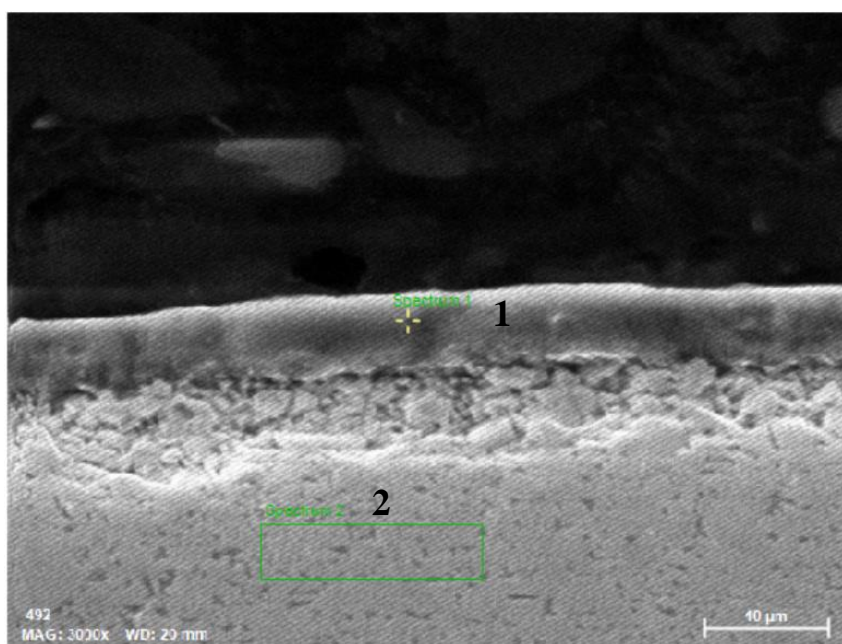
Slika 21. Lokacija EDS analize alata tvrdog metala



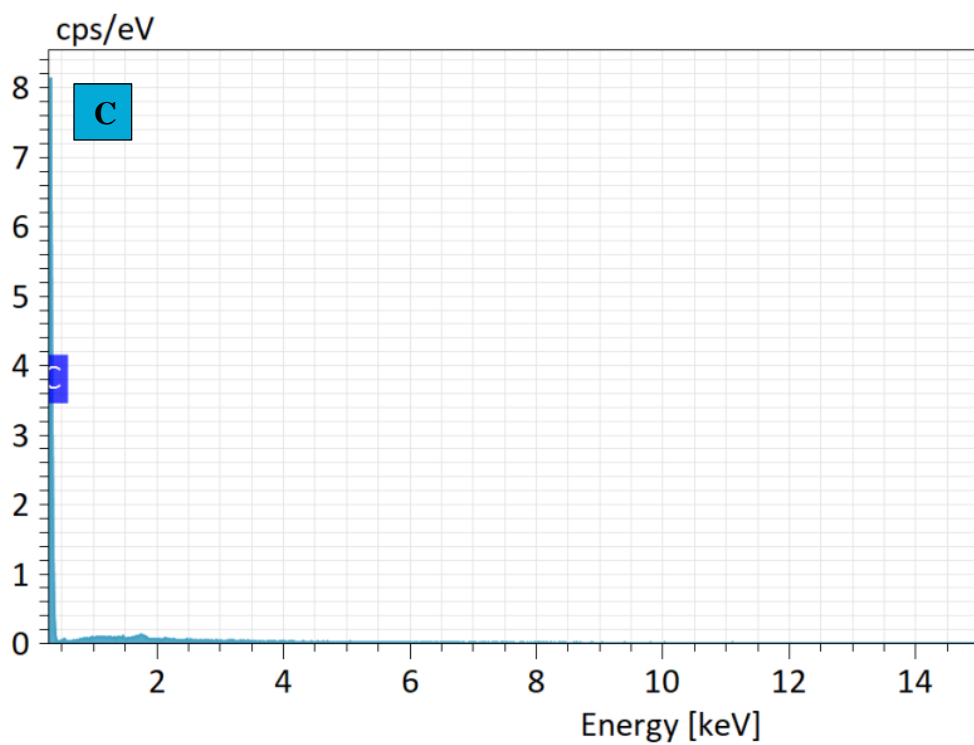
Slika 22. EDS analiza alata tvrdog metala

Tablica 4. Kvantitativni prikaz EDS analize svrdla tvrdog metala

| Element | W     | Co    | Cr   |
|---------|-------|-------|------|
| Udio, % | 85,91 | 13,20 | 0,89 |

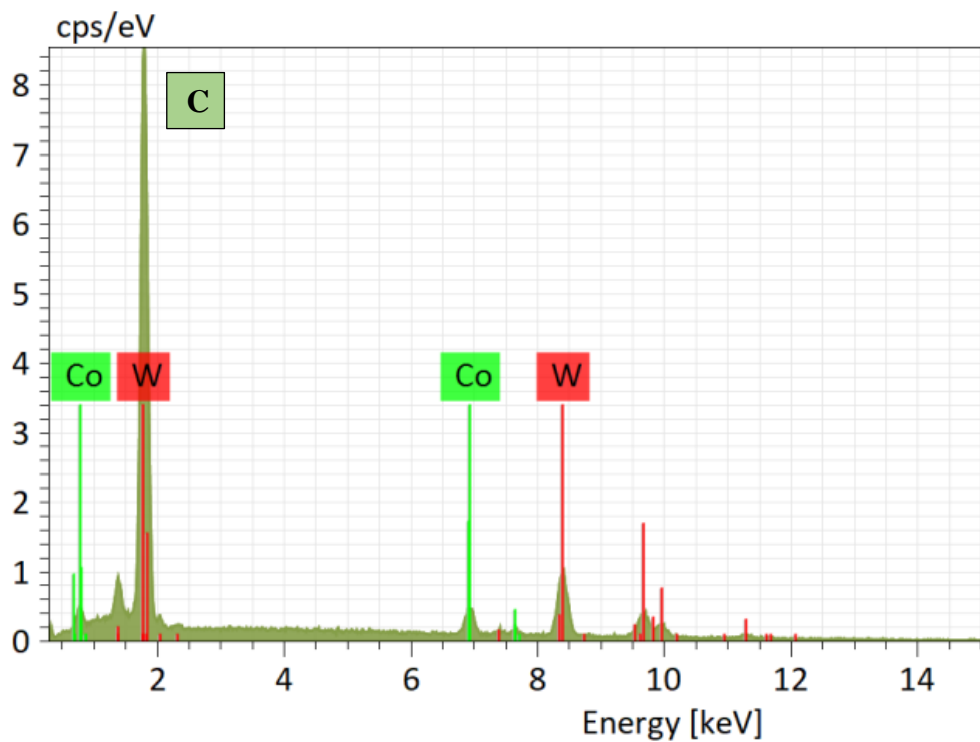


Slika 23. Lokacije EDS analize svrdla s dijamantnom prevlakom



Slika 24. EDS analiza prevlake (lokacija 1) svrdla s dijamantnom prevlakom

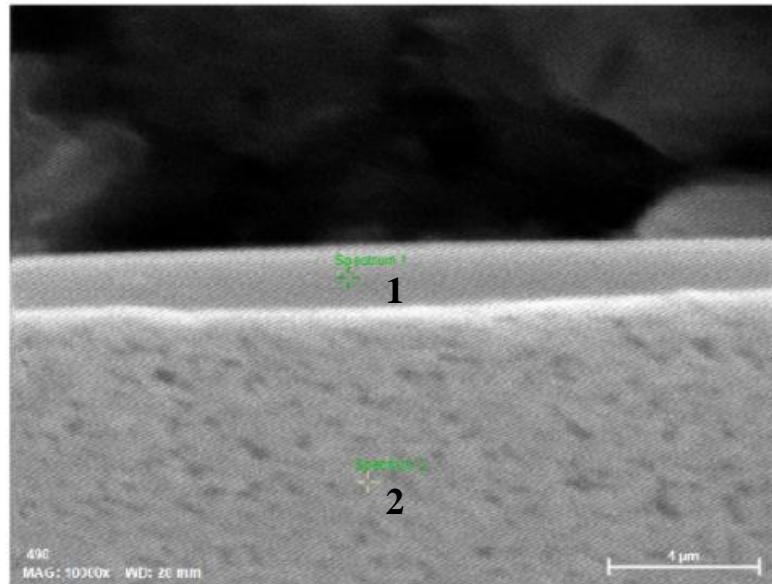




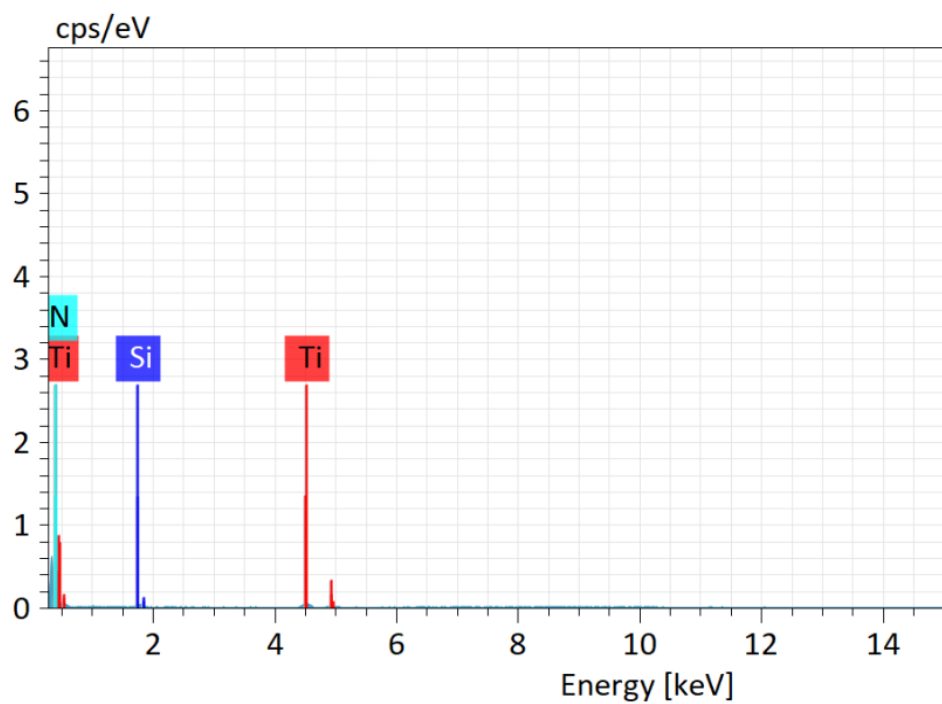
Slika 25. EDS analiza svrdla s dijamantnom prevlakom (lokacija 2)

Tablica 5. Kvantitativni prikaz EDS analize svrdla s dijamantnom prevlakom (lokacija 2)

| Element | W     | Co   | Cr   |
|---------|-------|------|------|
| Udio, % | 91,76 | 8,24 | 0,00 |



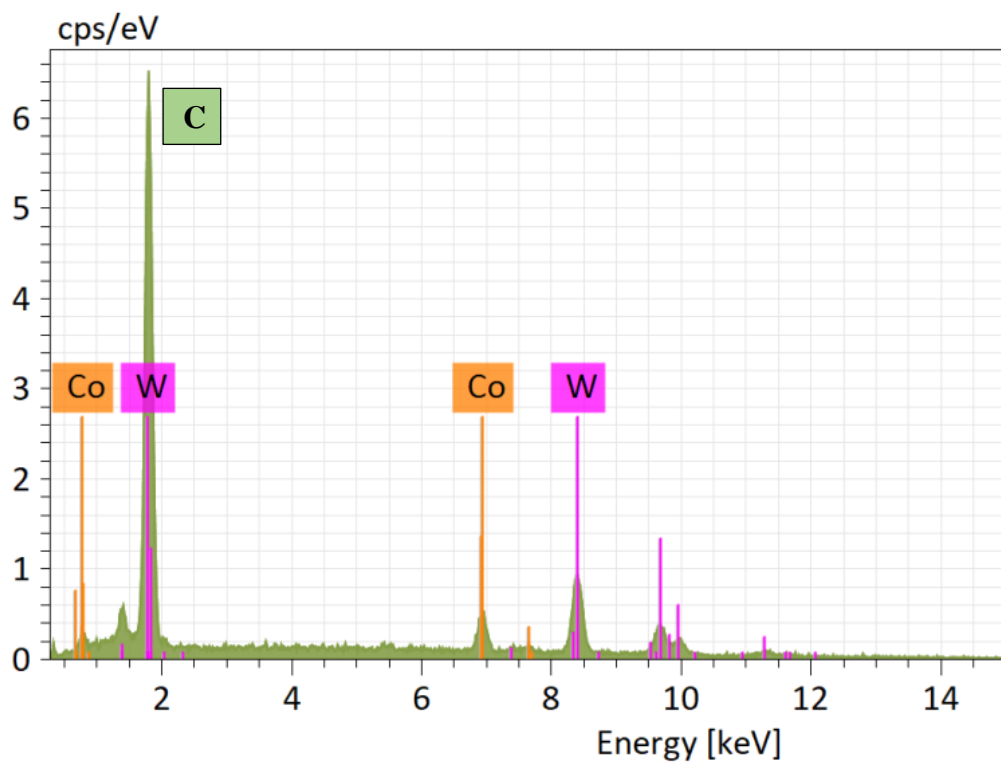
Slika 26. Lokacije EDS analize svrdla s titanij-nitrid prevlakom



Slika 27. EDS analiza prevlake (lokacija 1) svrdla s titanij-nitrid prevlakom

Tablica 6. Kvantitativni prikaz EDS analize svrdla s titanij-nitrid prevlakom (lokacija 1)

| Element | N     | Ti    | Si   |
|---------|-------|-------|------|
| Udio, % | 72,87 | 21,13 | 6,00 |



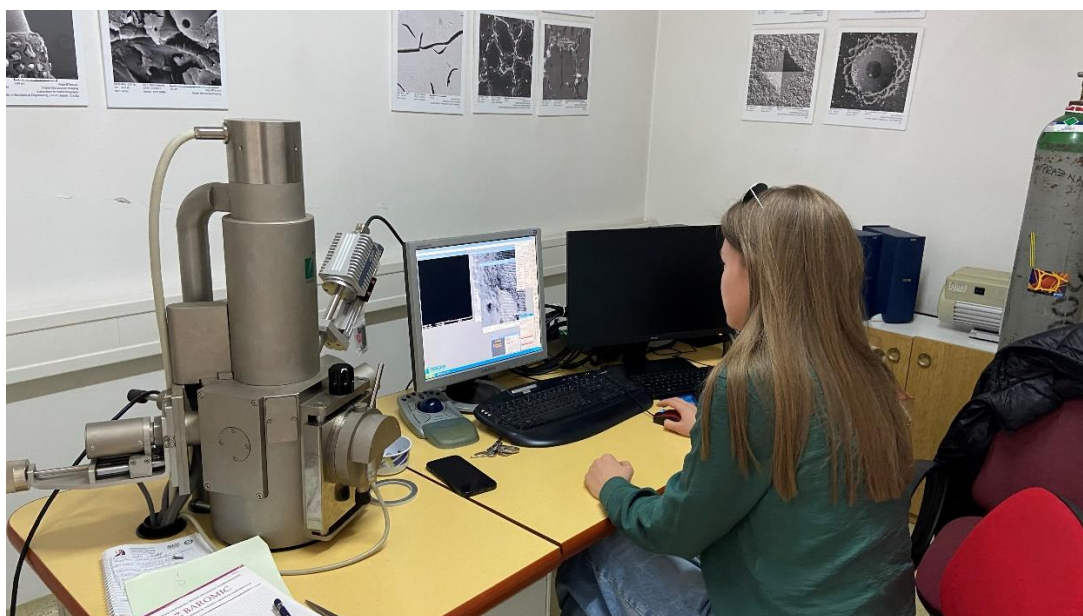
Slika 28. EDS analiza svrdla s titanij-nitrid prevlakom (lokacija 2)

Tablica 7. Kvantitativni prikaz EDS analize svrdla s titanij-nitrid prevlakom (lokacija 2)

| Element | W     | Co    | Cr   |
|---------|-------|-------|------|
| Udio, % | 89,98 | 10,02 | 0,00 |

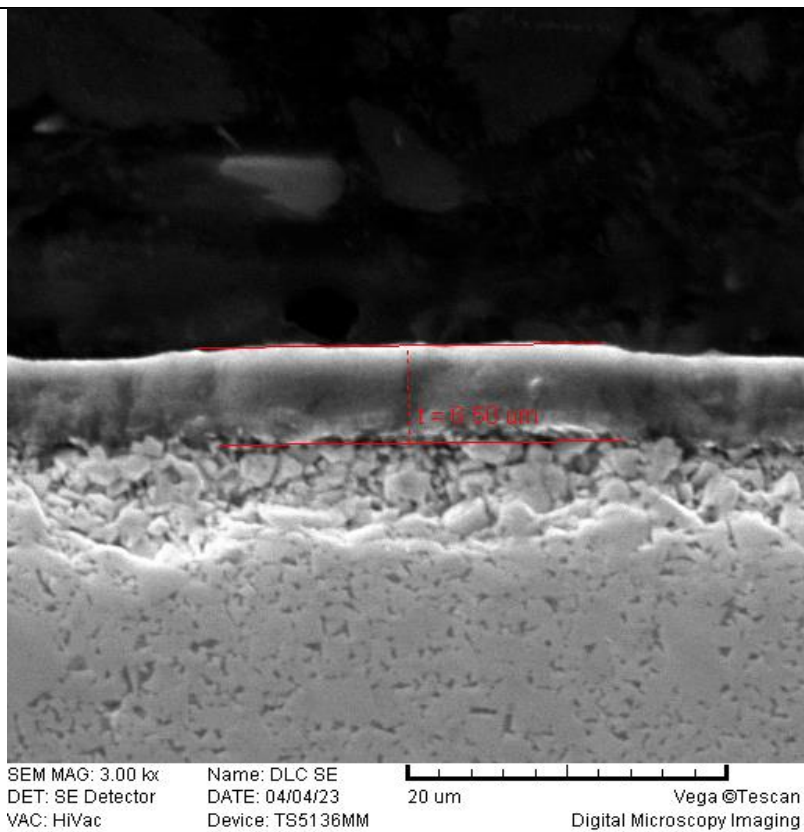
## 5.6. Karakterizacija debljine prevlake alata

Karakterizacija debljine prevlake provedena je na SEM uređaju VEGA TESCAN 5136MM u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Skenirajući elektronski mikroskop na kojemu je provedena analiza debljine prevlake prikazan je na slici 29. Prikazani mikroskop ima raspon povećanja 1:15 puta do 1:1 000 000 puta, dok mu je maksimalna nazivna razlučivost 3 nm. SEM uređaj sadrži SE, BSE i EDS detektore koji omogućuju analizu topografije uzoraka, elementnih kontrasta te mikroanalizu kemijskog sastava. Ispitni uzorci na kojima je provedena karakterizacija debljina prevlake su uzorci na kojima je provedena i EDS analiza te su prethodno prikazani na slici 20. Prema proceduri koja je ranije opisana, uzorci su metalografski pripremljeni zbog analize poprečnog presjeka prevlake uzoraka.

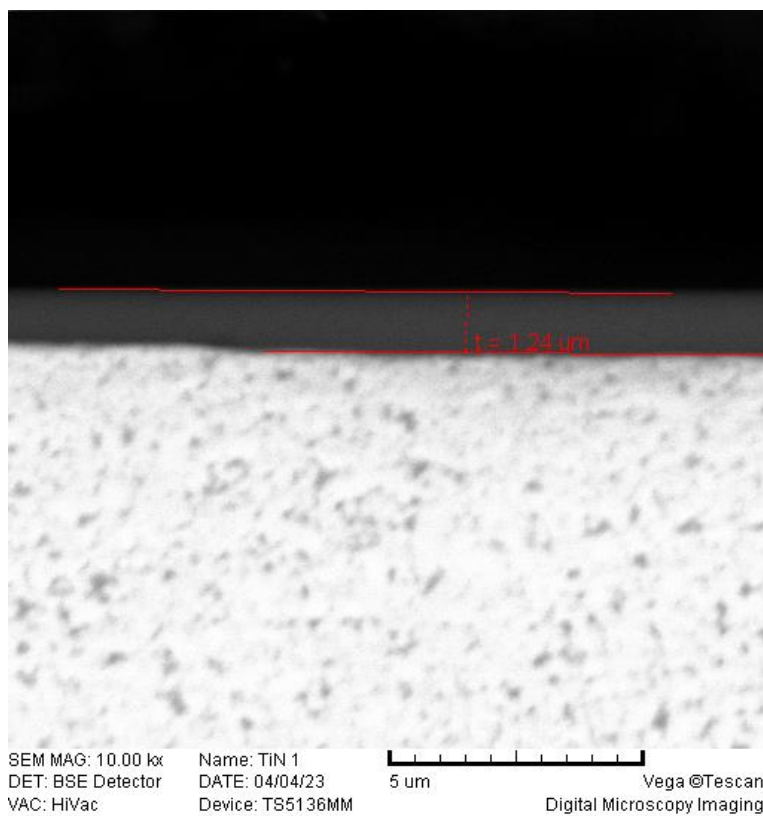


**Slika 29. Karakterizacija debljine prevlake na skenirajućem elektronskom mikroskopu**

Na slikama 30 i 31 prikazana je izmjerena debljina prevlake mjerena na poprečnom presjeku alata s dijamantnom i titanij-nitrid prevlakom.



**Slika 30. SEM prikaz debljine prevlake alata s dijamantnom prevlakom**

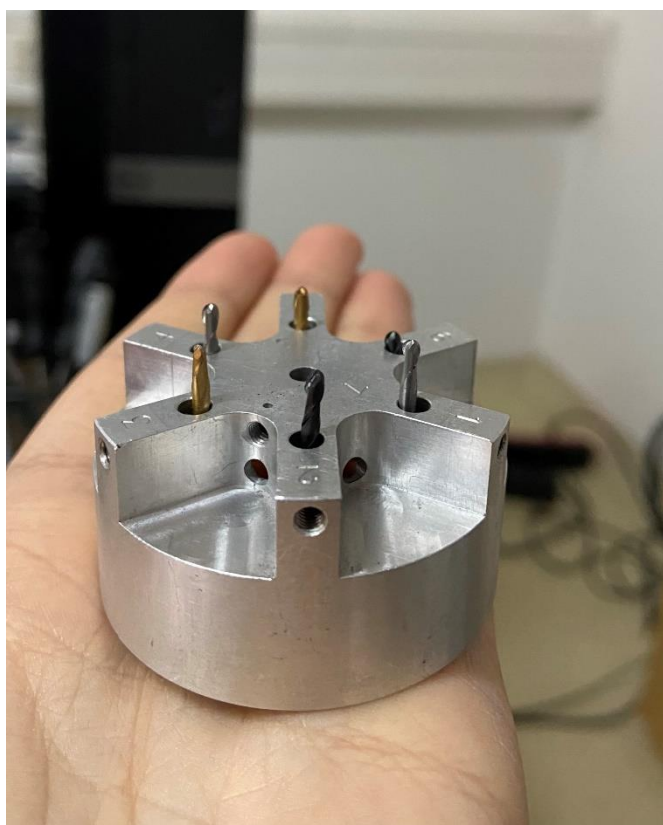


**Slika 31. SEM prikaz debljine prevlake alata s titanij-nitrid prevlakom**

### 5.7. SEM analiza površine potrošenih i nepotrošenih alata

Stanje površine potrošenih i nepotrošenih alata za glodanje zubnih krunica provedeno je skenirajućim elektronskim mikroskopom koji je prethodno opisan i prikazan u poglavlju 5.6. SEM analiza provedena je na 6 uzoraka od kojih su 3 uzorka potrošena glodanjem 50 zubnih krunica, dok su 3 uzorka nepotrošena odnosno nisu sudjelovala u postupku glodanja. Svaki od SEM analiziranih alata predstavlja različit materijal i to na način da su 2 uzorka od tvrdog metala bez prevlake (jedan potrošen, drugi nepotrošen), 2 uzorka s dijamantnom prevlakom (također jedan potrošen, drugi nepotrošen) te 2 uzorka s titanij-nitrid prevlakom od kojih je jedan potrošen, a drugi nepotrošen. Uzorci su izrezani na rezalici opisanoj u poglavlju 5.5 i prikazanoj na slici 19. Alati su analizirani u potrošenom i nepotrošenom stanju pri povećanju od 1:100 puta i 1:700 puta.

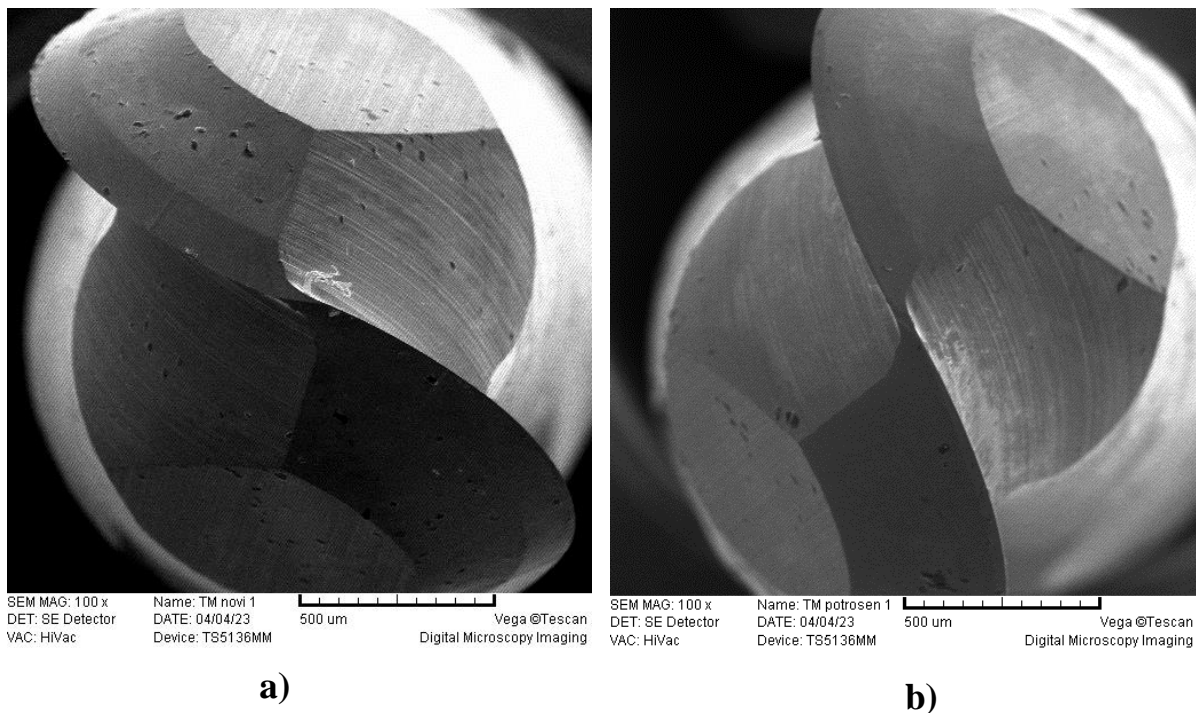
Uzorci na kojima je provedena SEM analiza površine prikazani su na slici 32.



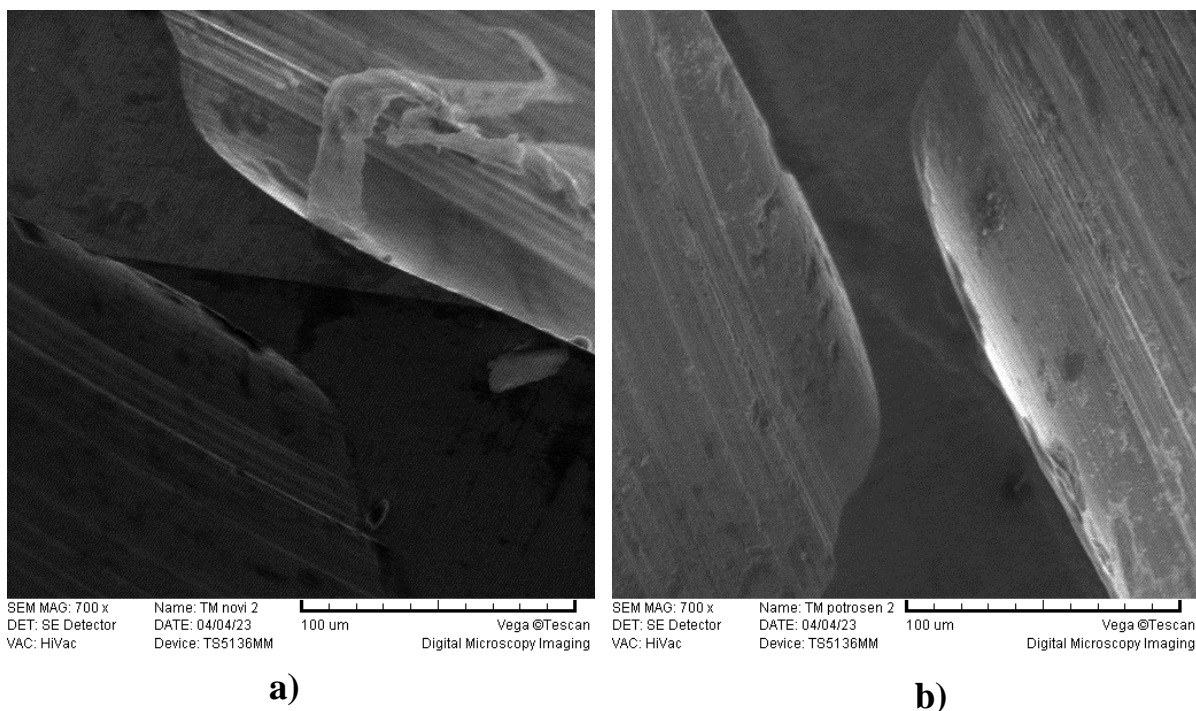
**Slika 32. Uzorci na kojima je provedena SEM analiza površine**

Na slikama od 33 do 38 prikazana su stanja površine alata analizirana skenirajućim elektronskim mikroskopom pri različitim povećanjima

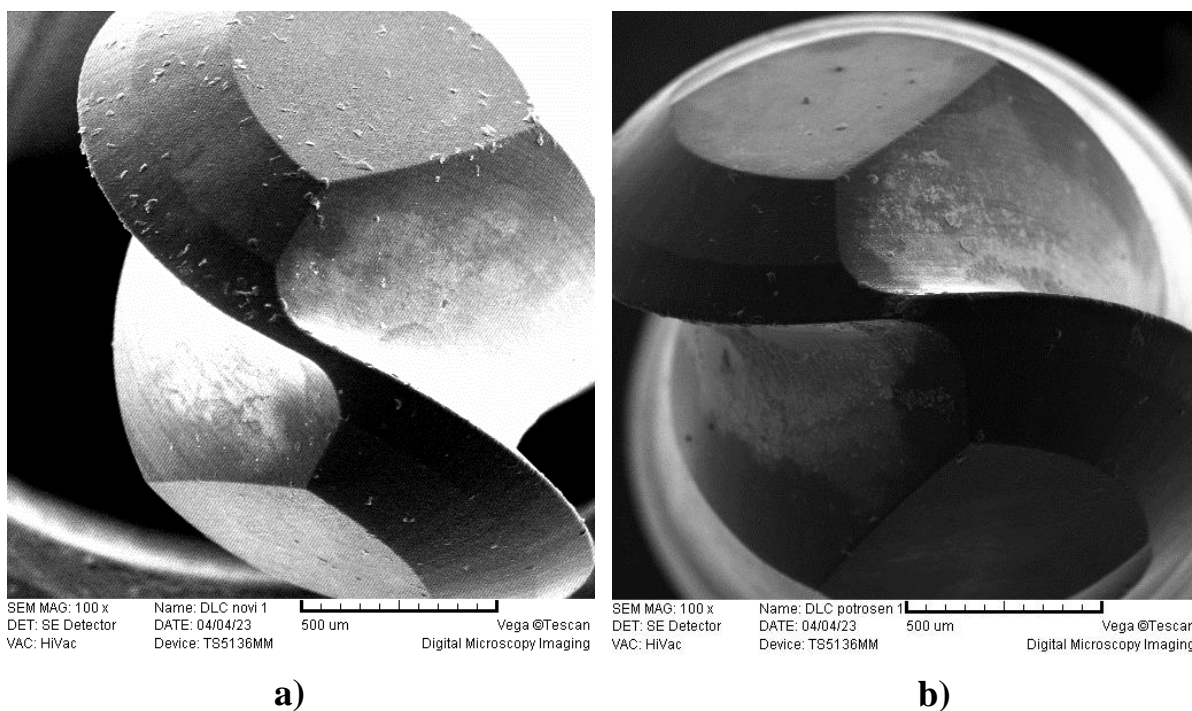




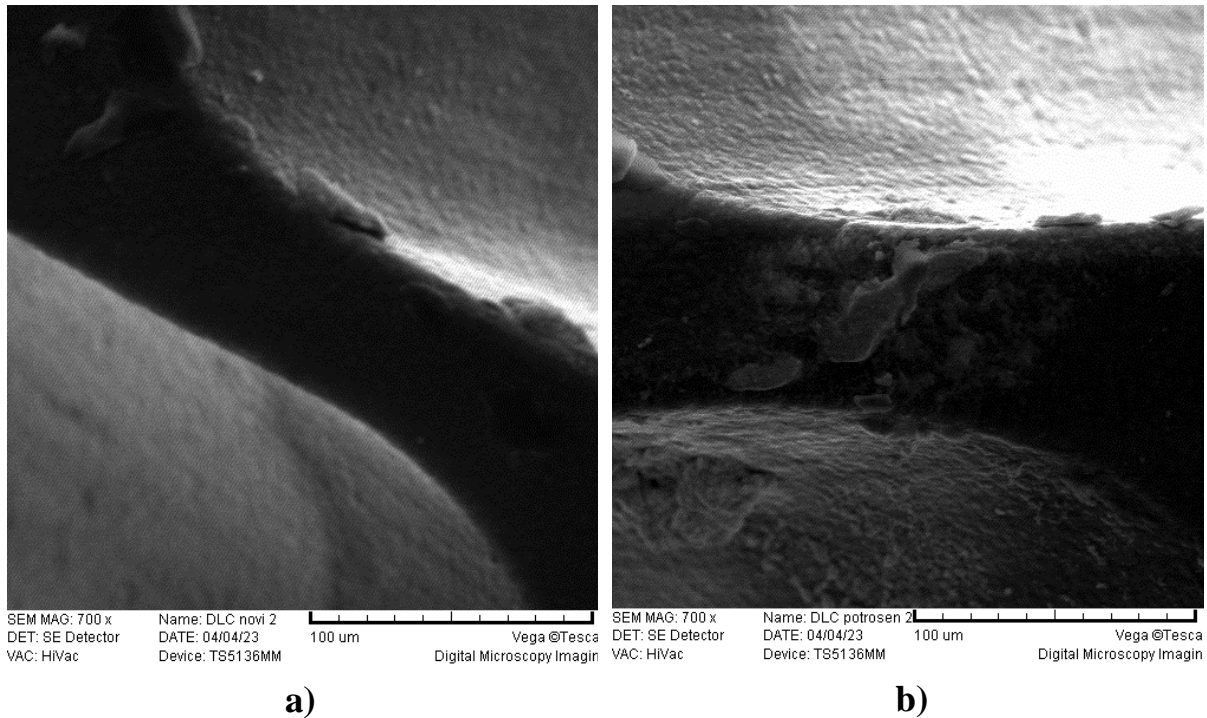
**Slika 33. SEM analiza stanja površine alata tvrdog metala pri uvećanju 100 puta u nepotrošenom stanju (a) i potrošenom stanju (b)**



**Slika 34. SEM analiza stanja površine alata tvrdog metala pri uvećanju 700 puta u nepotrošenom stanju (a) i potrošenom stanju (b)**

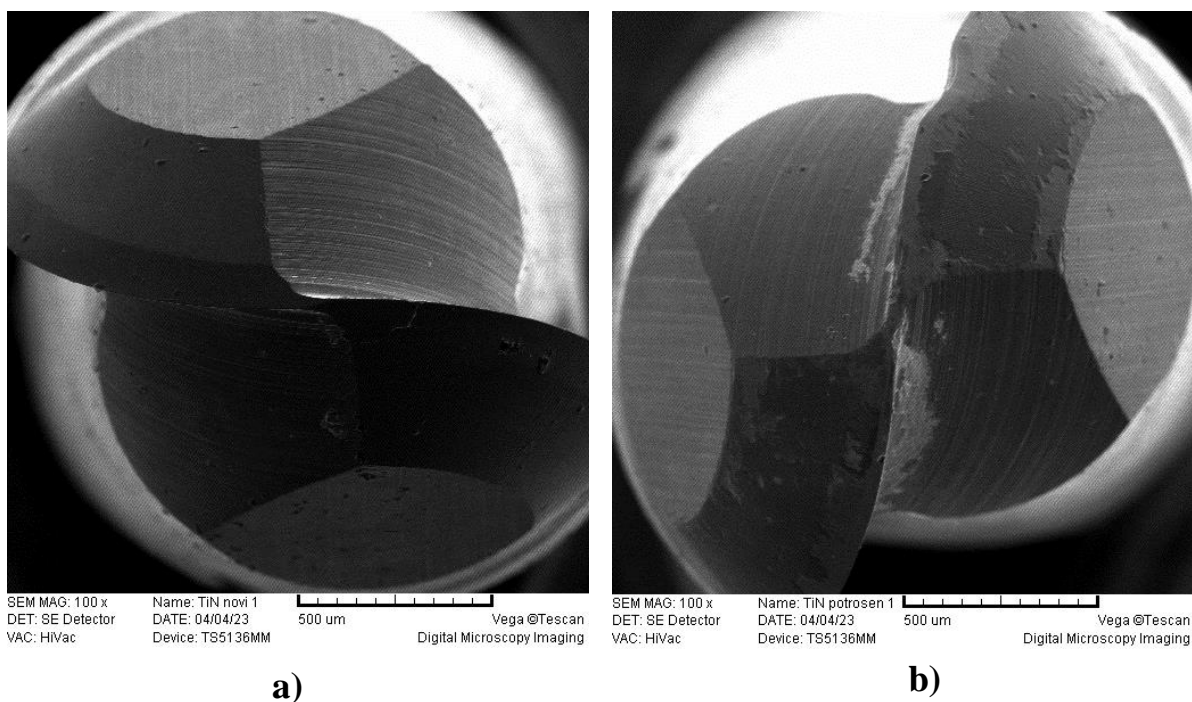


**Slika 35. SEM analiza stanja površine alata s dijamentnom prevlakom pri uvećanju 100 puta u nepotrošenom stanju (a) i potrošenom stanju (b)**

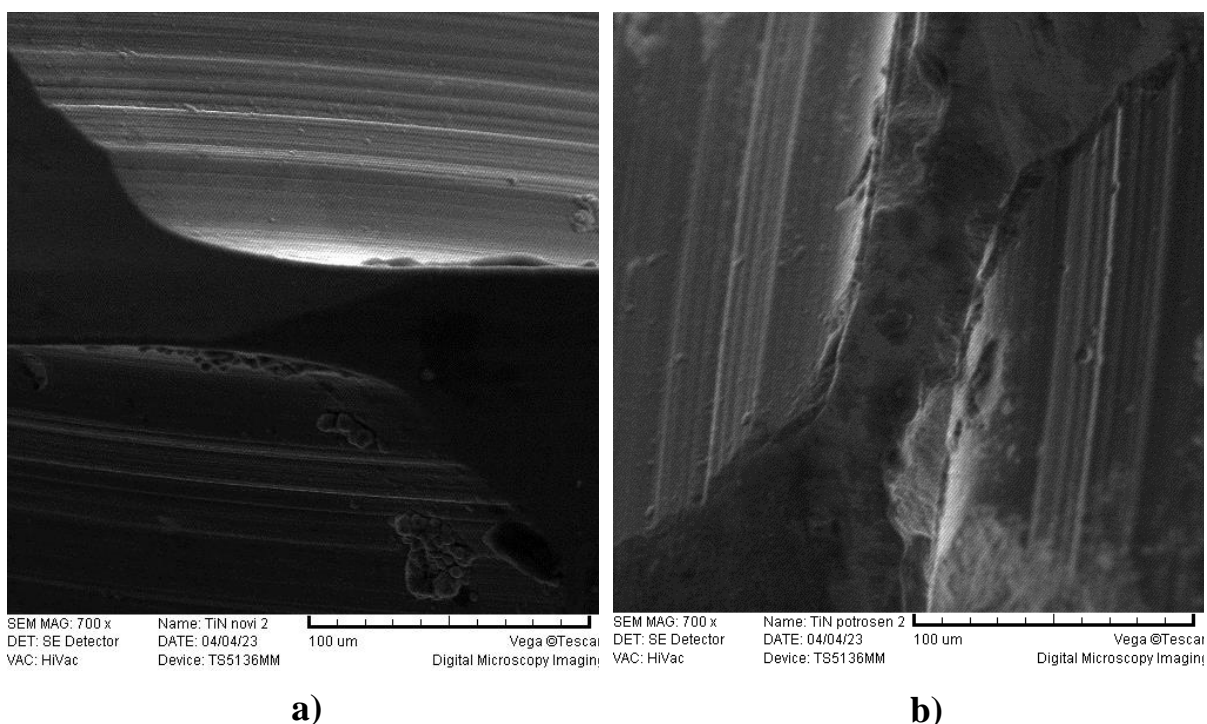


**Slika 36. SEM analiza stanja površine alata s dijamentnom prevlakom pri uvećanju 700 puta u nepotrošenom stanju (a) i potrošenom stanju (b)**



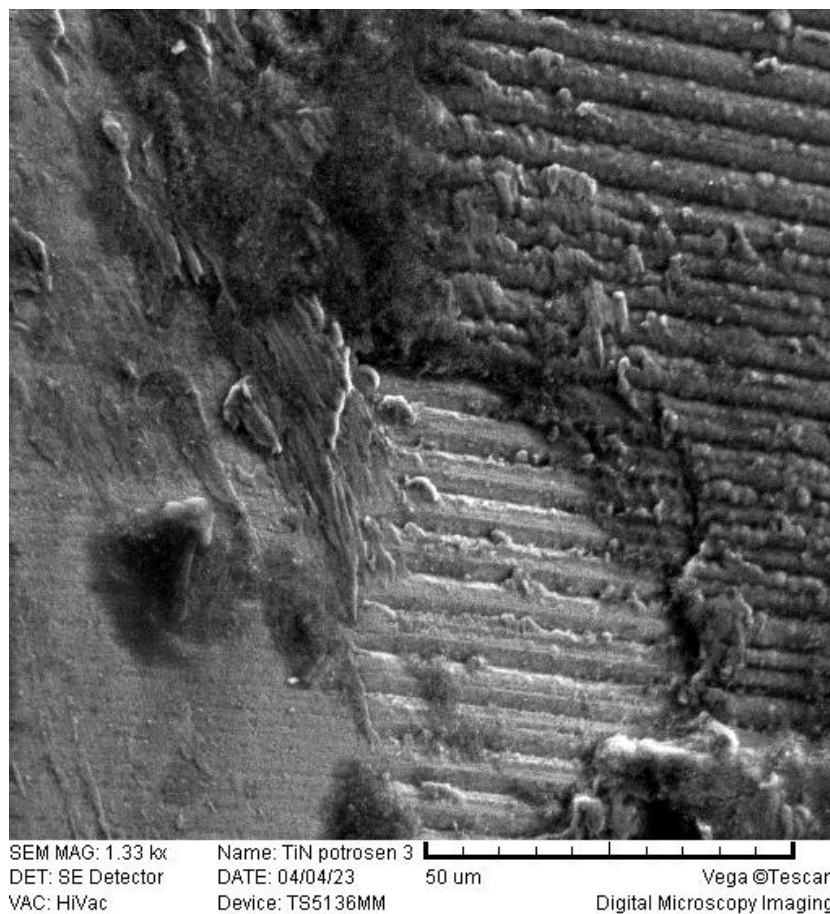


**Slika 37. SEM analiza stanja površine alata s titanij-nitrid prevlakom pri uvećanju 100 puta u nepotrošenom stanju (a) i potrošenom stanju (b)**



**Slika 38. SEM analiza stanja površine alata s titanij-nitrid prevlakom pri uvećanju 700 puta u nepotrošenom stanju (a) i potrošenom stanju (b)**

Na slici 39 prikazan je detalj potrošenog alata s titanij-nitrid prevlakom uvećan 1330 puta na SEM-u.



**Slika 39. SEM analiza detalja površine alata s titanij-nitrid prevlakom uvećan 13330 puta**

## 5.8. Osvrt na rezultate ispitivanja

### 5.8.1. Osvrt na EDS analizu kemijskog sastava

Glavni elementi osnovnog materijala analiziranih alata za izradu protetskih nadomjestaka su volfram, ugljik i kobalt. U kemijskom sastavu alata s prevlakama ističu se titanij, dušik i silicij kod alata s titanij-nitrid prevlakom te ugljik kod alata s dijamantnom prevlakom.

Alat tvrdog metala je volframov karbid koji je visokolegiran s kobaltom. S obzirom na ograničenje sustava te nemogućnost kvantitativne detekcije ugljika, udio volframa u kemijskom sastavu svrdla tvrdog metala iznosi 85,91 %, dok udio kobalta iznosi 13,2 %. Također se očituje i prisutnost kroma, a njegov udio iznosi 0,89 %.

EDS analizom kemijskog sastava prevlake svrdla s dijamantnom prevlakom uočena je samo prisutnost kemijskog elementa ugljika. Stoga se može zaključiti da se u prevlaci alata nalazi isključivo ugljik sa udjelom od 100 %. EDS analizom osnovnog materijala svrdla s dijamantnom prevlakom dobiven je udio volframa koji iznosi 91,76 % te udio kobalta koji iznosi 8,24 %.

Kod alata s titanij-nitrid prevlakom provedena je EDS analiza kemijskog sastava na dvije lokacije. Na analiziranom području prevlake alata uočena je prisutnost kemijskih elemenata titanija, dušika te silicija. Udio dušika zauzima najveći postotak sa udjelom od 72,87 %. Sljedeći je titanij koji zauzima udio od 21,13 %. Neuobičajena pojava u prevlaci ovog alata je prisutnost silicija koji može biti posljedica nečistoća na površini alata. Udio silicija u prevlaci alata iznosi 6 %. Drugo analizirano područje svrdla s titanij-nitrid prevlakom je područje osnovnog materijala u kojemu je uočena očekivana prisutnost kemijskih elemenata volframa i kobalta. Udio volframa iznosi 89,98 %, dok je udio kobalta 10,02 %.

### 5.8.2. Osvrt na karakterizaciju debljine prevlake

Analizom prevlake poprečnog presjeka alata za izradu protetskih nadomjestaka određena je debljina prevlake alata s dijamantnom prevlakom te alata s titanij-nitrid prevlakom. Analizirana debljina prevlake konvencionalno dostupnog alata s dijamantnom prevlakom je veća od debljine prevlake alata s titanij-nitrid prevlakom koja je postignuta PACVD postupkom u sklopu ovog diplomskog rada.

Debljina prevlake alata s dijamantnom prevlakom iznosi 6,5  $\mu\text{m}$ , dok debljina prevlake alata s titanij-nitrid prevlakom iznosi 1,24  $\mu\text{m}$ .

### 5.8.3. Osvrt na SEM analizu stanja površine alata

SEM analizom površina alata uočeni su tragovi trošenja različitih intenziteta na svim reznim alatima. Također je vidljiva prisutnost naljepaka na analiziranim oštricama alata.

SEM analizom površine alata tvrdog metala bez prevlake uočene su promjene potrošenog alata u odnosu na nepotrošeni alat. Na slici 34 b) pri povećanju od 700 puta jasno su vidljivi tragovi trošenja rezne oštrice alata.

Kod SEM analize površine rezne oštrice uzorka s dijamantnom prevlakom također su vidljivi tragovi trošenja, ali puno manjeg intenziteta nego kod ostalih alata. Na slici 36 b) pri povećanju od 700 puta vidljiva je prisutnost drugog materijala na vrhu rezne oštrice alata koji predstavlja naljepak nastao uslijed postupka glodanja.

SEM analizom alata s titanij-nitrid prevlakom uočene su značajne promjene potrošenog u odnosu na nepotrošeni alat. Na fotografiji 37 b) potrošenog alata pri povećanju od 100 puta jasno su vidljivi tragovi trošenja. Intenzivna pojava trošenja prevlake i trošenja osnovnog materijala vidljiva na potrošenom alatu s titanij-nitrid prevlakom pri povećanju od 700 puta na fotografiji 38 b). SEM analizom detalja na vrhu rezne oštrice ovog alata, pri povećanju od 1330 puta, prisutna su 3 različita materijala (slika 39). Vidljiva je površina osnovnog materijala ispod potrošene prevlake, a sa strana je vidljiv talog trećeg materijala.

---

## 6. ZAKLJUČAK

Temeljem analize površine alata za izradu protetskih nadomjestaka te ostalih provedenih ispitivanja može se zaključiti:

- Pri jednakim parametrima glodanja zubnih krunica došlo je do različitog intenziteta trošenja triju reznih alata glodalice
- Osnovni materijal svih alata za glodanje je volframov karbid s visokim udjelom kobalta
- Provedeni PACVD postupak prevlačenja alata titanij-nitrid prevlakom nije se iskazao optimalnim u poboljšanju otpornosti na trošenje reznog alata.
- Kako bi se poboljšala otpornost na trošenje alata potrebno je promijeniti parametre PACVD postupka prevlačenja ili vrstu prevlake
- Trošenje alata glodalice ovisi o debljini i vrsti prevlake
- Na analiziranoj površini svrdla tvrdog metala bez prevlake vidljivi su manje izražajni tragovi trošenja nego kod svrdla s titanij-nitrid prevlakom te izražajniji tragovi trošenja od svrdla s dijamantnom prevlakom
- Najbolju otpornost na trošenje pokazuje svrdlo s dijamantnom prevlakom kako je i očekivano s obzirom na vrlo visoku tvrdoću prevlake

## 7. LITERATURA

- [1] Suvin M. Biološki temelji protetike: totalna proteza, Školska knjiga, Zagreb, 1984.
- [2] Čolak K. Stavovi i znanja studenata dentalne medicine o stomatološkoj protetici, Diplomski rad, MEFST Repository
- [3] Gaviria L, Salcido JP, Guda T, Ong JL. Current trends in dental implants. J Korean Assoc Oral Maxillofac Surg, 2014
- [4] Corrado OJ. Dentures. BMJ : British Medical Journal, 1990
- [5] <https://acrewooddental.com/the-history-or-dental-implants> , posjećeno u svibnju 2023.
- [6] Tariba Knežević P, Simonić Kocijan S. Zubne proteze : izbor ovisan o stanju čeljusti, funkciji i troškovima, Narodni zdravstveni list. 2022. ;(746-747):14-16.
- [7] Orellana D, Beumer J, Chang T-L. Introduction to Removable Partial Dentures, 2019.
- [8] Herbert T. Shillingburg JrD. Fundamentals of fixed prosthodontics, 4. izd. 2012.
- [9] Anić I, Baučić I, Carek V, Čatović A, Čelić R, Galić N, et al. Osnove stomatoloških materijala. 2005;
- [10] da Silva LH, de Lima E, Miranda RB de P, Favero SS, Lohbauer U, Cesar PF. Dental ceramics: A review of new materials and processing methods. Braz Oral Res. 2017 Aug 1;31:133–46. doi: 10.1590/1807-3107BOR-2017.VOL31.0058
- [11] M. Patil SKAP and KM. Digitalization in Dentistry: CAD/CAM -A Review, Acta Scientific Dental Sciences, izd.2.1 01/2018.  
[https://www.researchgate.net/publication/344679568\\_Digitalization\\_in\\_Dentistry\\_CAD\\_CAM\\_-\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/344679568_Digitalization_in_Dentistry_CAD_CAM_-_A_Review)
- [12] Smale M, Jayne T. Dentalni materijali. Udžbenici Sveučilišta u Zagreb, Manualia Universitatis studiorum Zagrabiensis, 2017;(97):1–79. Dostupno na:  
<https://www.bib.irb.hr/880576>
- [13] Baroudi K, Ibraheem SN. Assessment of Chair-side Computer-Aided Design and Computer-Aided Manufacturing Restorations: A Review of the Literature. J Int Oral Health. 2015 Apr;7(4):96–104.
- [14] CAD/ CAM | Dental Milling Machines | DWX Series | DGSHAPE by Roland  
<https://www.rolanddg.com.au/products/dental/dwx-series>
- [15] Miyazaki T, Hotta Y. CAD/CAM systems available for the fabrication of crown and bridge restorations. Aust Dent J , 2011 Jun ; 56(SUPPL. 1):97–106.  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1834-7819.2010.01300.x> doi:  
10.1111/J.1834-7819.2010.01300.X

- [16] Alghazzawi TF. Advancements in CAD/CAM technology: Options for practical implementation. *J Prosthodont Res.* 2016 Apr 1;60(2):72–84. doi: 10.1016/J.JPOR.2016.01.003
- [17] Špehar D, Jakovac M. New Knowledge about Zirconium-Ceramic as a Structural Material in Fixed Prosthodontics. *Acta Stomatol Croat.* 2015 Jun 15;49(2):137–44. doi: 10.15644/asc49/2/7
- [18] Alghazzawi TF. Advancements in CAD/CAM technology: Options for practical implementation. *J Prosthodont Res.* 2016 Apr 1;60(2):72–84. doi: 10.1016/J.JPOR.2016.01.003
- [19] Iliescu AA, Perlea P, Iliescu MG, Gheorghiu IM. MILLING MACHINES TOOLS USED IN CAD-CAM TECHNOLOGY OF DENTAL PROSTHESES. *Romanian Journal of Oral Rehabilitation.* 2018 Dec;10(4).
- [20] Options in Dental Milling | June 2013 | Inside Dental Technology  
<https://www.aegisdentalnetwork.com/idt/2013/06/options-in-dental-milling>
- [21] Dental CAD/CAM: Choosing the right dental milling machine for your dental lab  
<https://maxxzone.net/tpost/u8i22hvhz1-digital-dentistry-choosing-the-cadcam-mi>
- [22] <https://www.hsdequipment.co.uk/product/vhf-s5-dry-and-wet-milling> , posjećeno u svibnju 2023.
- [23] Beuer F, Schweiger J, Edelhoff D. Digital dentistry: an overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. *British Dental Journal* 2008 204:9 [Internet]. 2008 May 10 ; 204(9):505–11.  
<https://www.nature.com/articles/sj.bdj.2008.350> doi: 10.1038/sj.bdj.2008.350
- [24] Subtractive Computer-Aided Manufacturing in Dental Milling | February 2014 | Inside Dental Technology , <https://www.aegisdentalnetwork.com/idt/2014/02/subtractive-computer-aided-manufacturing-in-dental-milling>
- [25] Turkyilmaz I, Wilkins GN, Varvara G. Tooth preparation, digital design and milling process considerations for CAD/CAM crowns: Understanding the transition from analog to digital workflow. *J Dent Sci*, 2021 Oct 1;16(4):1312. Dostupno na: /pmc/articles/PMC8403806/ doi: 10.1016/J.JDS.2021.04.005
- [26] Dental Burs in Restorative Dentistry and Endodontics-Past and Present: A Review- Web of Science Core Collection, <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000691548700038>
- [27] <https://medical.tpub.com/14274/css/Types-Use-And-Maintenance-Of-Miscellaneous-Equipment-171.htm> , posjećeno u svibnju 2023.

- 
- [28] Jackson MJ, Ahmed W, editors. Surface Engineered Surgical Tools and Medical Devices. Boston, MA: Springer US; 2007. doi: 10.1007/978-0-387-27028-9
- [29] Čatović A, Catic A. Klinička fiksna protetika I Krunice, Medicinska naklada, 2015.
- [30] <https://www.vhf.com/en/products/dental/dental-cutters/> , posjećeno u lipnju 2023.
- [31] Sakoman M. Razvoj PACVD prevlaka na nanostrukturiranim tvrdim metalima. 2020 Dec 4;
- [32] Heim D, Holler F, Mitterer C. Hard coatings produced by PACVD applied to aluminium die casting. Surf Coat Technol. 1999 Sep;116–119:530–6. doi: 10.1016/S0257-8972(99)00104-8
- [33] Stoiber M, Badisch E, Lugmair C, Mitterer C. Low-friction TiN coatings deposited by PACVD. Surf Coat Technol. 2003;163–164:451–6. doi: 10.1016/S0257-8972(02)00642-4
- [34] Šolić S. Utjecaj mikrostrukture brzoreznog čelika na tribološka svojstva reznih alata, Diplomski rad, FSB, Zagreb 2023. 2010;
- [35] <http://www.unt-tools.com/2-flute-ball-nose-35-helix-long-length.html> , posjećeno u lipnju 2023.