

# Ispitivanje trošenja spiralnih svrdla s tvrdim PACVD prevlakama pri bušenju austenitnog nehrđajućeg čelika

---

Fresl, Ivan

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:464166>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Darko Landek, dipl. ing.

Student:

Ivan Fresl

Zagreb, 2025. godina.

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

Ivan Fresl

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr. sc. Darku Landeku na stručnom znanju i pomoći pri izradi završnog rada.

Ivan Fresl



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Fresl** JMBAG: **0035226416**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje trošenja spiralnih svrdla s tvrdim PACVD prevlakama pri bušenju austenitnog nehrđajućeg čelika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Wear testing of twist drills with hard PACVD coatings when drilling austenitic stainless steel**

Opis zadatka:

Otpornost na trošenje spiralnih svrdla za bušenje metala može se povećati nanošenjem tvrdih prevlaka iz parne faze. U radu treba opisati konstrukcijske karakteristike spiralnih svrdla za bušenje metala, uvjete trošenja i naprežanja pri radu svrdla, zahtjeve na svojstva alatnih čelika za izradu svrdla te navesti vrste i svojstva tvrdih prevlaka na spiralnim svrdlima.

U eksperimentalnom dijelu radu treba usporediti trošenje i zagrijavanje spiralnih svrdla od brzoreznog čelika bez prevlake i s PACVD prevlakom TiN, TiCN i TiBN pri bušenju provrta u ploči od austenitnog nehrđajućeg čelika. Na prevučeni svrdlima odrediti debljinu i adhezivnost prevlake. Na temelju rezultata ispitivanja odrediti povećanje trajnosti prevučeni svrdla u odnosu na ne prevučeno i predložiti optimalnu prevlaku.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

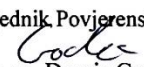
Zadatak zadao:  
  
Prof. dr. sc. Darko Landek

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.

Predsjednik Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Damir Godec

***Sažetak***

U teorijskom dijelu ovog rada biti će opisane vrste nehrđajućih čelika i njihova svojstva, svojstva i toplinska obrada brzoreznih čelika, postupci prevlačenja i vrste prevlaka te njihova svojstva i primjena, rezna geometrija svrdla i mehanizmi trošenja rezne oštrice alata. U eksperimentalnom dijelu će se provesti analiza trošenja, analiza zagrijavanja te analiza debljine i adhezivnosti različitih prevlaka pri bušenju nehrđajućeg austenitnog čelika.

Ključne riječi: svrdlo, bušenje, abrazijsko trošenje, adhezijsko trošenje, prevlačenje površine, nehrđajući čelik, brzorezni čelik

***Summary***

Theoretical part of this paper will describe different types of stainless steels and their properties, properties and heat treatment of high-speed steels, surface coating processes and types of coatings, as well as their properties and applications, cutting geometry of drill bits, and wear mechanisms of the cutting edge. In the experimental part, an analysis of wear, heating, and the thickness and adhesion of different coatings during the drilling of austenitic stainless steel will be conducted.

**Keywords:** drill bit, drilling, abrasive wear, adhesive wear, surface coating, stainless steel, high-speed steel

## SADRŽAJ

0	UVOD.....	1
1	NEHRĐAJUĆI ČELICI .....	3
1.1	<i>Austenitni nehrđajući čelici</i> .....	3
1.2	<i>Feritni nehrđajući čelici</i> .....	4
1.3	<i>Austenitno-feritni nehrđajući čelici</i> .....	6
1.4	<i>Martenzitni nehrđajući čelici</i> .....	6
1.5	<i>Precipitacijski očvrtnuti nehrđajući čelici</i> .....	7
1.5.1	<i>Martenzitni precipitacijski očvrtnuti čelici</i> .....	8
1.5.2	<i>Semiaustenitni precipitacijski očvrtnuti čelici</i> .....	8
1.5.3	<i>Austenitni precipitacijski očvrtnuti čelici</i> .....	9
2	POSTUPCI PREVLAČENJA SVRDLA .....	10
2.1	<i>Brzorezni čelici</i> .....	11
2.1.1	<i>Toplinska obrada brzoreznih čelika</i> .....	11
2.2	<i>Prevlačenje postupkom PVD</i> .....	12
2.3	<i>Prevlačenje postupkom CVD</i> .....	14
2.4	<i>PACVD (engl. Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition)</i> .....	15
2.5	<i>Dupleks postupak</i> .....	16
2.6	<i>Neoksidne keramičke prevlake</i> .....	18
3	BUŠENJE .....	20
3.1	<i>Spiralo svrdlo</i> .....	20
3.1.1	<i>Brzina i posmak bušenja</i> .....	22
3.1.2	<i>Sile i momenti rezanja</i> .....	23
3.2	<i>Trošenje svrdla</i> .....	25
3.3	<i>Mehanizmi trošenja svrdla</i> .....	25
3.3.1	<i>Abrazijsko trošenje</i> .....	26
3.3.2	<i>Adhezijsko trošenje</i> .....	26
3.3.3	<i>Delaminacijsko trošenje</i> .....	26
3.3.4	<i>Trošenje uslijed kemijske nestabilnosti</i> .....	26
4	PLAN ISPITIVANJA .....	28
5	REZULTATI ISPITIVANJA .....	31
5.1	<i>Izgled oštice svrdla prije i nakon bušenja</i> .....	31
5.2	<i>Vizualna analiza trošenja svrdla</i> .....	33
5.3	<i>Zagrijavanje svrdla tijekom bušenja</i> .....	34
5.4	<i>Izgled i promjer rupe u čeliku nakon 30s bušenja</i> .....	36
5.5	<i>Određivanje debljine i adhezivnosti prevlake</i> .....	38
5.6	<i>Adhezivnost prevlaka</i> .....	41
6	ZAKLJUČAK.....	42



---

**POPIS SLIKA**

<i>Slika 1: Mikrostruktura austenitnog čelika [1].....</i>	<i>4</i>
<i>Slika 2: Mikrostruktura feritnog čelika [1].....</i>	<i>5</i>
<i>Slika 3: Mikrostruktura martenzitnog čelika [1].....</i>	<i>7</i>
<i>Slika 4: Vrste i broj slojeva tankih tvrdih prevlaka [2].....</i>	<i>10</i>
<i>Slika 5: Toplinska obrada brzoreznih čelika [3].....</i>	<i>12</i>
<i>Slika 6: Tehnike PVD postupka: a) Toplinsko isparivanje, b) oprušivanje, c) ioniranje [4].....</i>	<i>13</i>
<i>Slika 7: Shematski prikaz CVD postupka [2].....</i>	<i>15</i>
<i>Slika 8: Shematski prikaz PACVD postupka [2].....</i>	<i>16</i>
<i>Slika 9: Raspored tvrdoće kod dupleks postupka nitriranja i prevlačenja [2].....</i>	<i>16</i>
<i>Slika 10: Utjecaj prevlake na broj ciklusa [2].....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 11: Spiralno svrdlo [9].....</i>	<i>21</i>
<i>Slika 12: Geometrija rezne oštrice svrdla [10].....</i>	<i>22</i>
<i>Slika 13: Kut uspona spiralnog utora [11].....</i>	<i>22</i>
<i>Slika 14: Gibanja svrdla [10].....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 15: Sile rezanja [10].....</i>	<i>24</i>
<i>Slika 16: Postava uređaja za ispitivanje trošenja svrdla.....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 17: Postavljanje svrdla na katodi PACVD peći.....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 18: Mjerenje temperature: a) mjerenje temperature termalnom kamerom, b) ovisnost temperature o vremenu.....</i>	<i>35</i>
<i>Slika 19: Odstupanje od referentne vrijednosti.....</i>	<i>37</i>
<i>Slika 20: Debljina prevlake TiN prevučene PVD postupkom.....</i>	<i>38</i>
<i>Slika 21: Debljina prevlake TiN prevučene PACVD postupkom.....</i>	<i>39</i>
<i>Slika 22: Debljina prevlake TiN/TiBN prevučene PACVD postupkom.....</i>	<i>39</i>
<i>Slika 23: Debljina prevlake TiN/TiCN prevučene PACVD postupkom.....</i>	<i>40</i>

---

**POPIS TABLICA**

<i>Tablica 1: Usporedba PVD, CVD i PACVD postupaka [2] .....</i>	<i>17</i>
<i>Tablica 2: Usporedba neoksidnih keramičkih prevlaka [2].....</i>	<i>19</i>
<i>Tablica 3: Ovisnost materijala i kuteva svrdla [10] .....</i>	<i>21</i>
<i>Tablica 4: Oznake svrdla i primijenjene prevlake.....</i>	<i>29</i>
<i>Tablica 5: Parametri PACVD prevlačenja svrdla TiN prevlakom .....</i>	<i>29</i>
<i>Tablica 6: Parametri PACVD prevlačenja TiN/TiCN i TiN/TiBN prevlakama .....</i>	<i>30</i>
<i>Tablica 7: Izgled svrdla prije bušenja.....</i>	<i>31</i>
<i>Tablica 8: Trošenje svrdla nakon 30s bušenja.....</i>	<i>32</i>
<i>Tablica 8: Trošenje svrdla nakon 30s bušenja (nastavak) .....</i>	<i>33</i>
<i>Tablica 9: Izgled površine čelika nakon 30s bušenja .....</i>	<i>36</i>
<i>Tablica 10: Promjer rupa.....</i>	<i>37</i>
<i>Tablica 11: Prosječna debljina prevlaka .....</i>	<i>40</i>
<i>Tablica 12: Izgled rubnog sloja ispitivanih svrdla .....</i>	<i>41</i>

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$2\varphi$	$^{\circ}$	Kut vrha svrdla
$\omega$	$^{\circ}$	Kut uspona spiralnog utora
$v_f$	$mm/min$	Brzina translacije alata
$f$	$mm$	Posmak
$n$	$min^{-1}$	Broj okretaja
$v_c$	$mm/min$	Brzina rotacije
$D$	$mm$	Promjer svrdla
$F_c$	$N$	Glavna sila rezanja
$F_f$	$N$	Posmična sila rezanja
$F_p$	$N$	Natražna sila rezanja
$F_{cp}$	$N$	Glavna sila rezanja poprečne oštrice
$F_{fp}$	$N$	Posmična sila rezanja poprečne oštrice
$M_u$	$Nm$	Ukupni moment bušenja
$M_{Fc}$	$Nm$	Moment vrtnje glavne rezne oštrice
$M_{Fcp}$	$Nm$	Moment vrtnje pomoćne oštrice
$M_{Ft}$	$Nm$	Moment trenja fasete

## 0 UVOD

Bušenje je jedan od najzastupljenijih postupaka strojne obrade. Koristi se u gotovo svim granama industrije, od proizvodnje automobila, zrakoplovne industrije, do građevine, prehrambene industrije, proizvodnje alata i drugim. Sve izvedbe alata za bušenje (bušilica) od baterijskih ručnih bušilica do najskupljih industrijskih bušilica, susreću se sa sličnim problemima, od kojih je najčešći i najistaknutiji trošenje svrdla. Svrđlo je pri bušenju izloženo visokim mehaničkim naprezanjima, povišenim temperaturama i naglim promjenama temperature, korozivnim medijima i abrazivnim česticama. Kombinacija ovih faktora izaziva povećano trošenje koje znatno utječe na dugotrajnost svrdla i njegovu rezu sposobnost. Posljedice trošenja svrdla su smanjena preciznost bušenja i time lošija kvaliteta površine što na kraju utječe na cijeli proizvodni proces. Kako bi se trošenje smanjilo i time produžio radni vijek alata potrebno je odabrati odgovarajući materijal svrdla, toplinski ga obraditi kaljenjem i popuštanjem i odabrati odgovarajuće parametre rezanja. Za dodatno povišenje otpornosti na trošenje preporučuje se prevlačenje reznog dijela svrdla tvrdim prevlakama postupcima taloženja iz parne faze.

U radu će se provesti ispitivanje trošenja spiralnih svrdla prevučениh prevlakama TiN, TiCN i TiB postupkom plazmom potpomognutog kemijskog prevlačenja iz parne faze (PACVD) te prevlakom TiN nanesenom postupkom fizikalnog prevlačenja (PVD) pri bušenju austenitnog nehrđajućeg čelika.

# TEORIJSKI DIO

# 1 NEHRĐAJUĆI ČELICI

Nehrđajućim čelicima se smatraju oni čelici otporni ne kemijsku i elektrokemijsku koroziju, za njih se kaže da su korozijski postojani. Korozijska postojanost je svojstvo materijala da se suprotstavi odnosno uspori negativno djelovanje korozijskog medija. Čimbenici koji uzrokuju koroziju mogu biti unutarnji (zaostala naprezanja, kemijski sastav, mikrostruktura materijala) ili vanjski (vrsta medija, naprezanje, promjene temperature i tlaka). Osnovni legirni element u svakom nehrđajućem čeliku je krom, da bi se čelik smatrao nehrđajućim udio kroma u čeliku mora biti minimalno 10,5%. Udio ugljika u nehrđajućim čelicima mora biti nizak jer u suprotnom zajedno s kromom stvara karbide pa preostali krom nije dovoljan za pasivaciju (formiranje pasivnog sloja na površini čelika) te čelik više nije korozijski postojan. Osim kroma nehrđajućim čelicima se dodaju i drugi legirni elementi kao: nikal, mangan, vanadij, titanij, molibden i drugi ovisno o tome koja su željena svojstva čelika. Nehrđajući čelici se dijele u slijedeće osnovne skupine: austenitni, feritni, feritno-austenitni (dupleks čelici), martenzitni i precipitacijski očvrnuti čelici.

## 1.1 Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici najzastupljeniji su tip nehrđajućeg čelika. Karakterizira ih vrlo visok udio kroma (16-25 %Cr) koji im omogućava iznimno dobru korozijsku postojanost. Uz odličnu korozijsku postojanost posjeduju dobra mehanička svojstva duktilnosti i žilavosti. Zbog alfagenog djelovanja kroma koje potiče feritnu mikrostrukturu za dobivanje austenitne mikrostrukture (slika 1) potreban je što veći udio nikla. Njegovo gamageno djelovanje mora prevladati alfageno djelovanje kroma, kako bi se na sobnoj temperaturi osigurala austenitna mikrostruktura. Ovi čelici također sadrže do 2 % mangana koji je gamageni element i uz nikal potiče nastanak austenitne mikrostrukture. U slučaju duljeg zadržavanja austenitne mikrostrukture nehrđajućeg čelika na temperaturi između 425°C do 870 °C na granicama zrna dolazi do formiranja karbida tipa  $M_{23}C_6$ . Taj se efekt naziva senzibilizacija. Formiranje karbida po granicama zrna smanjuje udio kroma u području oko granica zrna. ako se udjel kroma u unutrašnjosti austenitnog zrna snizi ispod 12 % može doći do pojave interkristalne korozije. Senzibilizacija također smanjuje otpornost na druge tipove korozije kao što su rupičasta, napetosna i korozija u procjepu te loše djeluje na mehanička svojstva čelika. Kako bi se

spriječila senzibilizacija maseni udio ugljika u austenitnom nehrđajućem čeliku mora biti što niži (0.03-0.08% C) te se čeliku dodaju stabilizatori (Ti i/ili Nb) s jačim afinitetom prema ugljiku od kroma. U slučaju pojave senzibilizacije austenitni čelik se treba kratkotrajno žariti na visokoj temperaturi te nakon naglo hladiti ili dugo žariti na nižoj temperaturi kako bi se poništio efekt senzibilizacije. [1]



**Slika 1: Mikrostruktura austenitnog čelika [1]**

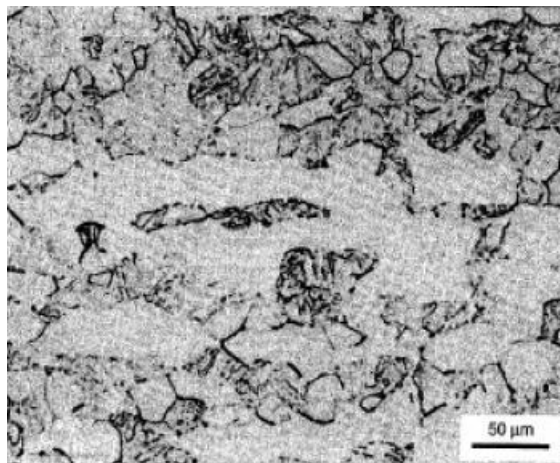
Karakteristike austenitnih čelika:

- Nisu magnetični
- Visoka žilavost čak i pri niskim temperaturama
- Vrlo visoka otpornost na koroziju
- Dobra otpornost na puzanje pri povišenim temperaturama
- Lako se oblikuju u hladnom stanju
- Osjetljivi su na senzibilizaciju
- Skloni su formiranju martenzita

## 1.2 Feritni nehrđajući čelici

Feritna mikrostruktura (slika 2) je postojana na gotovo svim temperaturama do tališta te se ovi čelici ne mogu zakaliti. Glavni legirni element u feritnim nehrđajućim čelicima je krom u udjelu od 10,5 – 18 %. Osim kroma koriste se i drugi legirni elementi

kao što su: molibden, niobij, vanadij, titanij i drugi. Maseni udio ugljika u feritnim nehrđajućim čelicima je uglavnom manji od 0,1 %. Karakterizira ih vrlo visoka otpornost na rupičastu i napetosnu koroziju. Zbog nešto lošijih mehaničkih svojstava koriste se uglavnom kada je otpornost na koroziju glavni zahtjev. Imaju relativno lošu zavarljivost, pogotovo ako imaju veći udio kroma. Za razliku od austenitnih čelika feromagnetični su. Ne primjenjuju se na temperaturama višim od 400°C zbog formiranja krhkih faza. Pri duljem držanju na temperaturama od 425 °C do 550 °C dolazi do nastajanja  $\alpha'$  faze. Faza  $\alpha'$  kao i  $\alpha$  faza ima BCC kristalnu rešetku no s potpuno drugačiji kemijski sastavom (bogata je kromom, oko 80% kroma), nemagnetična je i vrlo sitna. Prisutnost  $\alpha'$  faze izaziva povećanje tvrdoće i vlačne čvrstoće no uz značajno smanjenje istežljivosti, žilavosti i korozijske postojanosti. Pad žilavosti i istežljivosti je najviše izražen na temperaturi od 475°C pa se taj efekt naziva „krhkost 475°C“. Povećanjem udjela legiranih elemenata kao: Cr, Mo, V, Ti, Nb, C i N raste i količina  $\alpha'$  faze. U slučaju pojave krhkosti 475°C odnosno  $\alpha'$  faze čelik se žari na temperaturi između 550 °C do 600 °C kako bi se vratila početna svojstva. [1]



Slika 2: Mikrostruktura feritnog čelika [1]

Karakteristike feritnih čelika jesu sljedeće:

- Magnetični su
- Imaju bolju obradivost od austenitnih čelika
- Dobra otpornost na napetosnu koroziju
- Slaba zavarljivost i mogućnost nastanka krhke faze



- Niska postojanost prema kloridnim otopinama, nisu za primjenu u moru
- Postojani su prema oksidirajućim kiselinama i plinovima koji sadrže sumpor
- Imaju relativno nisku tvrdoću
- Jeftiniji su od ostalih nehrđajućih čelika
- Nisu pogodni za korištenje pri visokim temperaturama

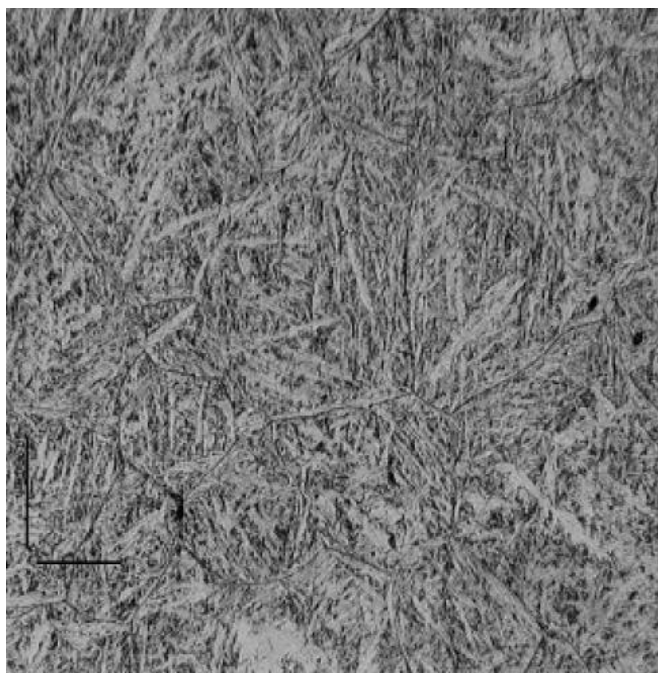
### 1.3 Austenitno-feritni nehrđajućí čelici

Mikrostruktura ovih čelika nije monofazna već dvofazna austenitno-feritna struktura sa određenim omjerom austenita i ferita. Taj omjer najčešće iznosi oko 50:50 a ovisi o toplinskoj obradi i kemijskom sastavu. Otpornost na koroziju im je slična kao kod austenitnih nehrđajućih čelika. Austenitno – feritni čelici pokazuju veću vlačnu čvrstoću i granicu razvlačenja od austenitnih čelika a žilavost je između austenitnih i feritnih čelika. Osnovni legirni elementi su krom i nikal. Osim njih dodaju se molibden, dušik, bakar, silicij i drugi. Kao i kod feritnih nehrđajućih čelika moguće je stvaranja  $\alpha'$  faze koja ima isti efekt kao i kod feritnih čelika. Također je moguće stvaranje kompleksne, kubične, intermetalne (Fe-Ni-Cr-Mo) Chi Faze ( $\chi$ ) pri vrlo visokim temperaturama od 730 °C do 1010 °C. [1]

### 1.4 Martenzitni nehrđajućí čelici

Glavno svojstvo martenzitnih nehrđajućih čelika ja kombinacija dobre korozijske postojanosti, odličnih mehaničkih svojstava, otpornosti na mehanički i toplinski umor te odlična otpornost na trošenje zbog visoke tvrdoće. U odnosu na druge nehrđajuće čelike imaju veći maseni udio ugljika (0,15 – 1%C) i nešto niži udio kroma od austenitnih čelika (13 – 18 %Cr). Martenzitni alatni čelici sa većim udjelom ugljika sadrže karbide koji pridonose tvrdoći i znatno poboljšavaju otpornost na trošenje. S druge strane, ovi čelici imaju lošiju otpornost na koroziju, lošiju zavarljivost (zbog visokog udjela ugljika) te nižu žilavost. Konstrukcijski martenzitni čelici sadrže veći udio kroma a znatno manji udio ugljika. Dodatni krom će povećati otpornost na koroziju, a manjak ugljika će poboljšati zavarljivost i žilavost. Kao i drugi nehrđajućí čelici mogu

se legirati s drugim elementima kao: molibden, vanadij, titanij i ostali. Za razliku od drugih nehrđajućih čelika ti legirni elementi se mogu djelomično otopiti u metalnoj osnovi ili sa ugljikom tvoriti karbide. [1] na donjoj slici prikazana je mikrostruktura martenzitnih nehrđajućih čelika.



**Slika 3: Mikrostruktura martenzitnog čelika [1]**

### **1.5 Precipitacijski očvrnuti nehrđajući čelici**

Osnovne karakteristike precipitacijski očvrnutih nehrđajućih čelika su visoka vlačna čvrstoća i visoka granica razvlačenja, postižu se precipitacijskim očvrnućem odnosno izlučivanjem precipitata (sitnih tvrdih čestica) u matrici. Matrica može biti austenitna ili martenzitna te se svi precipitacijski očvrnuti čelici mogu podijeliti u tri skupine: austenitni, martenzitni i semiaustenitni. Kao i kod drugih nehrđajućih čelika osnovni legirni elementi su krom i nikal. Također se legiraju sa drugim elementima : Cu, Al, Ti, Nb, V, Mo koji pri toplinskoj obradi stvaraju intermetalne spojeve, karbide i nitride.

Karbidi i nitridi (precipitati) izlučuju se u martenzitnoj ili austenitnoj matrici. Precipitati otežavaju gibanje dislokacija i time povisuju vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja i tvrdoću. [1]

### ***1.5.1 Martenzitni precipitacijski očvrnuti čelici***

Hlađenje austenita provodi se s temperature homogenizacije do sobne temperature. Kako bi se postigla potpuna martenzitna pretvorba temperature  $M_S$  i  $M_F$  moraju biti više od temperature okoliša  $T_O$ . Ako je temperatura  $M_F$  veća od temperature okoliša treba primijeniti duboko hlađenje za potpunu pretvorbu zaostalog austenita u martenzit. Prisutnost ferita u mikrostrukturi nije poželjna jer smanjuje čvrstoću i duktilnost čelika. Udio ferita moguće je smanjiti homogenizacijom. potpune pretvorbe austenita u martenzit provodi se postupak dozrijevanja pri kojem se u metalnu osnovu izlučuju precipitati koji povećavaju čvrstoću. Konačna čvrstoća će ovisiti o trajanju dozrijevanja i temperaturi. Neke od faza koje se mogu izlučiti kod dozrijevanja martenzitnih precipitacijski očvrnutih čelika jesu slijedeće:

- bakrom bogata faza
- alfa primarna faza bogata kromom
- Lavesova faza
- gama primarna faza
- različiti karbidi
- beta Ni-Al faza

### ***1.5.2 Semiaustenitni precipitacijski očvrnuti čelici***

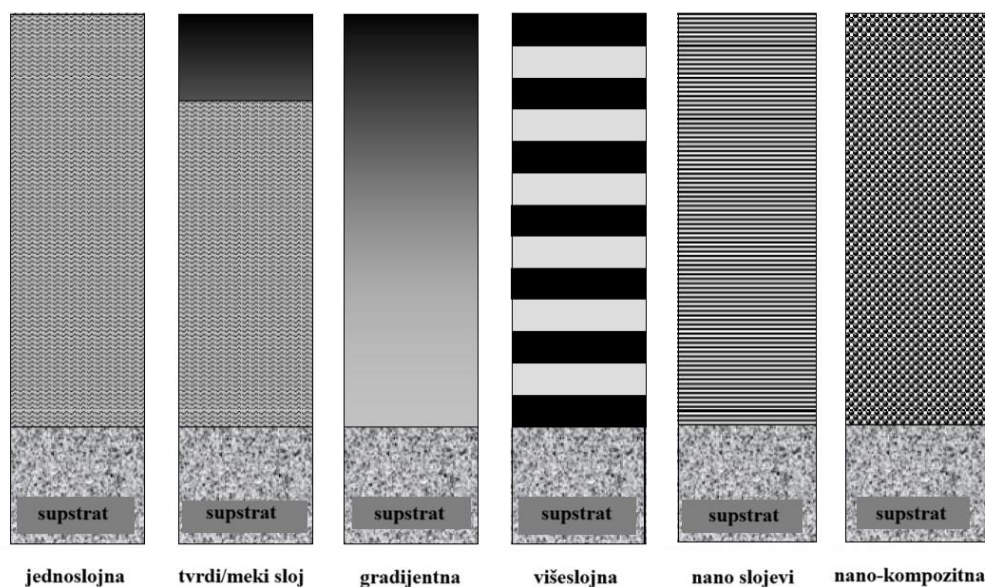
Ovi čelici primarno kristaliziraju u 100% ferit, hlađenjem do sobne temperature većina ferita transformira se u austenit. Pri tome 5 % do 15 % ferita ostane prisutno i na sobnoj temperaturi. Za razliku od martenzitnih PH čelika austenitna faza je na sobnoj temperaturi stabilna, u ovom stanju je čelik duktilan i mekan te pogodan za strojnu obradu, hladno oblikovanje i zavarivanje. Za postizanje martenzitne faze čelik treba duboko hladiti na temperaturama do  $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Martenzitna pretvorba se također može postići hladnom deformacijom (hladnim valjanjem), ali ovaj je postupak pogodan samo za limove. Nakon martenzitne pretvorbe slijedi dozrijevanje na temperaturi od  $480\text{ }^{\circ}\text{C}$  kako bi se izlučili precipitati koji su uglavnom nitridi. [1]

### *1.5.3 Austenitni precipitacijski očvrsnuti čelici*

Usporedno sa martenzitnim i semi-austenitnim PH čelicima imaju znatno nižu vlačnu čvrstoću i granicu razvlačenja. Primarno kristaliziraju kao 100%-tni austenit te zadržavaju austenitnu mikrostrukturu sve do sobne temperature. Imaju vrlo širok temperaturni raspon u kojem se mogu primjenjivati i vrlo su korozijski postojani. Najčešće se isporučuju u žarenom stanju u kojem su relativno mekani i vrlo lako obradivi. Postupak žarenja se odvija na temperaturi od 900 do 980°C u trajanju od 1 sat do 2 sata nakon čega se čelik gasi u vodi ili ulju. Dozrijevanje austenitnih PH čelika je dugotrajno (16 do 20 sati) i odvija se na višim temperaturama u odnosu na druge PH čelike (675 do 760 °C). Precipitati nastali dozrijevanjem su najčešće gama primarne faze, odnosno intermetalni spojevi tipa Ni<sub>3</sub>Ti. [1]

## 2 POSTUPCI PREVLAČENJA SVRDLA

Prevlačenje površine je postupak kojim se nakon završne strojne i toplinske obrade dijelovi prevlače tankim slojem neoksidnih keramičkih spojeva (TiN, TiC, TiCN), oksidnih keramičkih spojeva ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), slojevima dijamanta ili slojevima spojeva sličnim dijamantu. Prevlake se također dijele prema broju i vrsti slojeva, po broju mogu biti jednoslojne, višeslojne ili gradijentne a po vrsti ih se dijeli na homogene (npr. TiN/TiCN) i heterogene ( $\text{B}_4\text{C}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Broj, vrsta i raspored slojeva ovisiti će o primjeni prevlake (slika 4). Prevlake se najčešće strojni dijelovi i alati koji su skloni trošenju, prevlaka osigurava mnogo višu tvrdoću površine od osnovnog materijala što znatno smanjuje trošenje te produžuje životni vijek komada. Uz povećanje tvrdoće, prevlake poboljšavaju otpornost na koroziju, smanjuju koeficijent trenja i daju estetski dobar izgled površine. Razlikujemo dvije osnovne vrste postupaka prevlačenja, postupak kemijskog prevlačenja u parnoj fazi (CVD) koji se izvodi na temperaturama od  $800^\circ\text{C}$  do  $1000^\circ\text{C}$  te postupak fizikalnog prevlačenja u parnoj fazi (PVD) koji se izvodi na nešto nižoj temperaturi od  $200^\circ\text{C}$  do  $500^\circ\text{C}$ . [2]



Slika 4: Vrste i broj slojeva tankih tvrdih prevlaka [2]

## 2.1 Brzorezni čelici

Brzorezni čelici su vrsta alatnih čelika namijenjenih za rad pri vrlo visokim brzinama rezanja. Temperature alata pri takvim brzinama rezanja mogu dostići i do 600°C. Jedno od značajnih posebnih svojstava brzoreznog čelika je otpornost na povišene i visoke temperature odnosno otpornost na popuštanje pri povišenim temperaturama. Brzorezni čelici sadrže vrlo visok udio ugljika (0,7 do 1,3 %C) te se karakteristično legiraju elementima koji su jaki karbidotvorici kao što su: krom, vanadij, molibden i volfram. Mikrostruktura brzoreznih čelika sastoji se od metalne osnove i karbida koji karbidi daju čeliku vrlo visoku otpornost na trošenje te otpornost na visokotemperaturno popuštanje. Najčešći karbidi koji se javljaju su  $Me_{23}C_6$ ,  $Me_6C$ ,  $MeC$  i slično. [3]

Prema kemijskom sastavu brzorezni čelici se mogu podijeliti u nekoliko skupina [3]:

- čelici sa 18% volframa
- čelici sa 12 % volframa
- čelici sa 10 % volframa
- volfram-molibdenski čelici
- molibdenski čelici

### 2.1.1 Toplinska obrada brzoreznih čelika

Toplinska obrada brzoreznih čelika (slika 5) je vrlo zahtjevna i osjetljiva. Prvi korak je žarenje za redukciju zaostalih naprezanja pri temperaturi od 650°C popraćeno sporim hlađenjem. Ako je čelik potrebno strojno obrađivati ta obrada se mora odraditi nakon ovog koraka jer je zbog niske tvrdoće obradivost najbolja. Nakon žarenja i eventualne strojne obrade čelik se kali. Prvi korak je zagrijavanje na temperaturu od 1200-1300°C, svega nekoliko desetaka stupnjeva ispod solidusa koje se provodi sa 3 predgrijavanja (550 °C, 800 °C, 1000 °C) prije postizanja optimalne temperature austenitizacije. Nakon dostizanja temperature austenitizacije čelik se gasi u ulju, struji plinova ili solnoj kupci do sobne temperature gdje se postiže mikrostruktura od martenzita, zaostalog austenita i neotopljenih karbida (sekundarnog karbida „K''“ i eutektičkog karbida „K<sub>e</sub>“). Potrebno

je visokotemperaturno popuštanje na temperaturi između 550 i 600°C odmah nakon gašenja pri kojem se iz zaostalog austenita izdvaja ugljik te nastaju karbidi popuštanja. Nakon ponovnog hlađenja do sobne temperature iz zaostalog austenita se izdvaja sekundarni martenzit te dolazi do sekundarnog otvrdnuća. Takvo popuštanje se provodi 2 do 3 puta zbog maksimiziranja efekta sekundarnog otvrdnuća. [3]



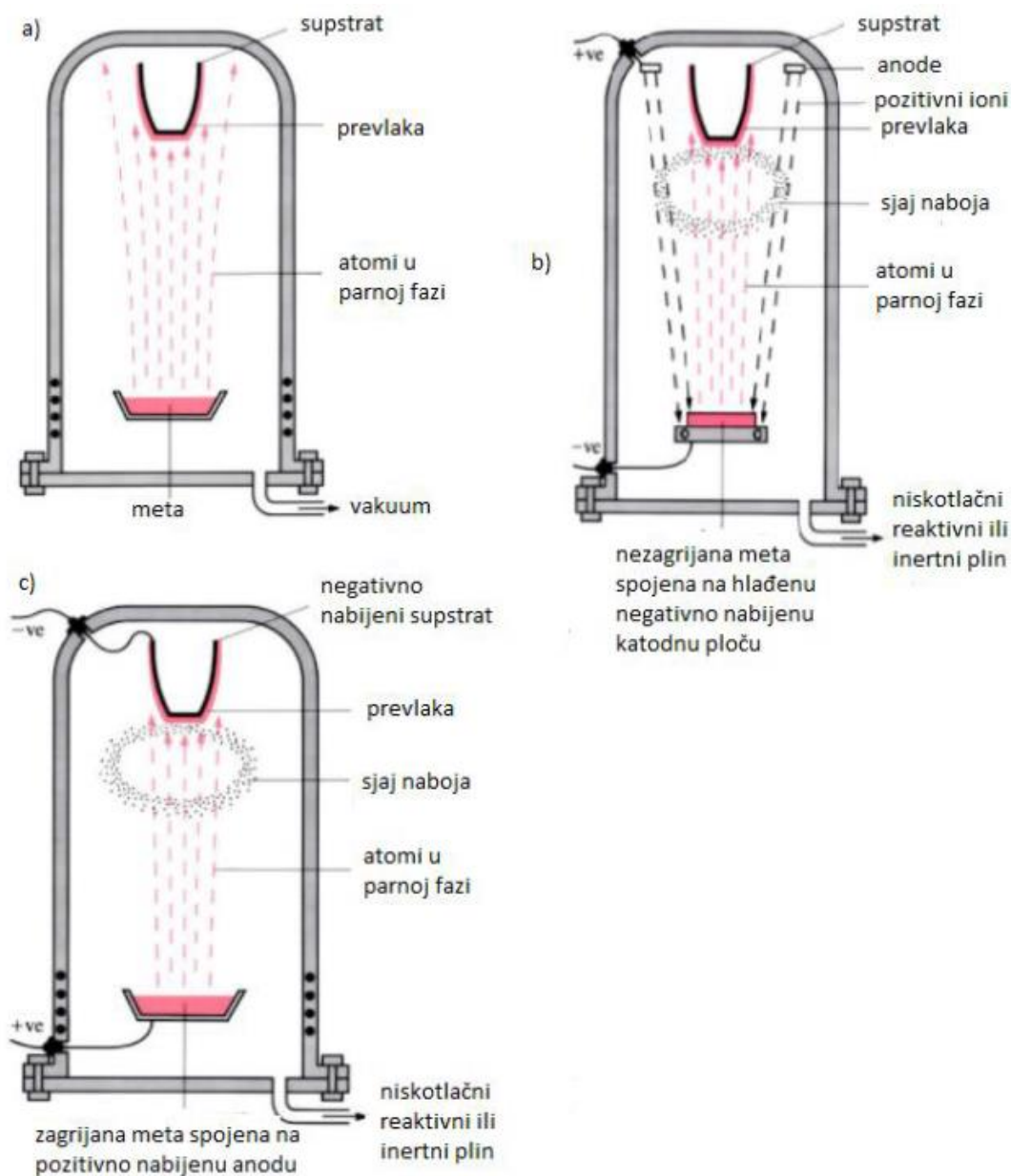
**Slika 5: Toplinska obrada brzoreznih čelika [3]**

## 2.2 Prevlačenje postupkom PVD

Prevlačenje PVD je fizikalni postupak nanošenja tanke prevlake iz parne faze na osnovni materijal. Prvi korak kod PVD postupka je prijelaz čestica prevlake iz čvrstog ili tekućeg u parno stanje, postiže se jednom od slijedećih metoda: toplinsko isparavanje, isparavanje snopom elektrona, isparavanje elektronskim lukom, isparavanje laserskim zrakama i katodno otprašivanje. Nakon što je postignuta parna faza čestice se transportiraju od izvora na površinu materijala, pri transportu čestica tlak u komori mora biti vrlo nizak (vakuum). Posljednji korak je kondenzacija pare na površinu obratka odnosno stvaranje prevlake. Slojevi nanoseni ovim postupkom mogu biti od čistih metala, metalnih legura ili keramike,

Uobičajena debljina sloja je od 1 do 5  $\mu\text{m}$  no na osnovni materijal (supstrat) moguće je nanijeti nekoliko slojeva pa će ukupna debljina višeslojne prevlake najčešće biti do 15  $\mu\text{m}$ .

Ovaj se postupak najčešće primjenjuje za masovnu proizvodnju manjih komada, njegova glavna prednost je što se odvija na relativno niskim temperaturama u usporedbi sa CVD postupkom što omogućava prevlačenje komada bez promjene tvrdoće i dimenzija supstrata. Glavni nedostatak ovog postupka je to što supstrat uvijek mora biti u liniji sa izvorom pare, takozvani „Line of sight“ postupak. U praksi to znači da je vrlo teško ili nemoguće prevući komade sa kompleksnom geometrijom jer nije moguće transportirati čestice na nedostupna mjesta. [2]. Na donjoj slici prikazane su tehnike postupka PVD.



Slika 6: Tehnike PVD postupka: a) Toplinsko isparivanje, b) oprašivanje, c) ioniranje [4]

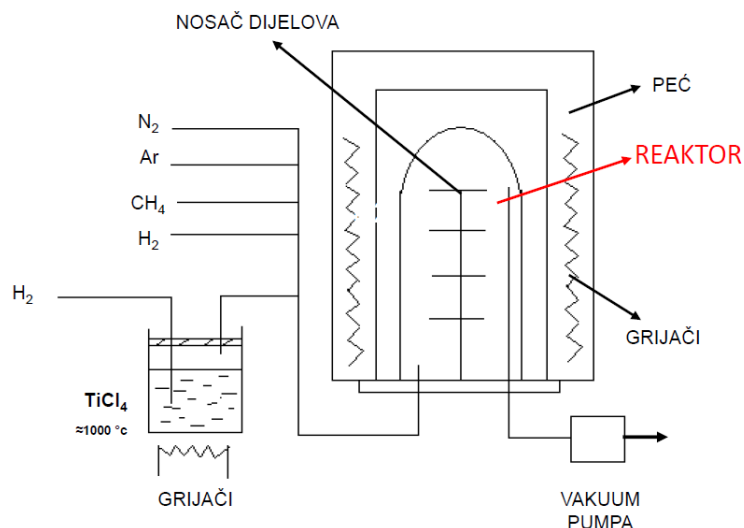


### 2.3 Prevlačenje postupkom CVD

CVD je kemijski postupak nanošenja prevlake iz parne faze gdje pri visokoj temperaturi dolazi do kemijske reakcije na površini supstrata. Materijal prevlake koji se nanosi na supstrat je u plinovitom stanju. Kao i kod PVD postupka nanošenjem prevlake se postiže visoka tvrdoća površine što povećava otpornost na trošenje. Postoji nekoliko tipova kemijskih reakcija koje se mogu koristiti u ovom postupku: piroliza (pirolitička dekompozicija), redukcija vodikom, redukcija metalnom parom, redukcija supstratom. Ovaj se postupak najčešće primjenjuje kod reznih alata, alata za oblikovanje metala, keramičkih materijala, strojnih dijelova. Glavna prednost CVD postupka je što zbog korištenja plina nije potrebno posebno pozicionirati dijelove u komori kao kod PVD postupka pa se mogu prevući dijelovi sa kompleksnom geometrijom jer plin lako dopijeva na teško dostupna mjesta. Još jedna od prednosti CVD postupka je širi izbor materijala koji se mogu prevući i dobra ekonomičnost u usporedbi sa PVD postupkom. Najveći nedostatak postupka je vrlo visoka temperatura procesa (600 – 1100°C) zbog koje može doći do promjena u mikrostrukтури supstrata, radi toga je nakon CVD postupka često potrebna dodatna toplinska obrada. Ovisno o primjeni, tlaku i izvoru topline koji se koristi za aktivaciju kemijske reakcije CVD postupak se može podijeliti u nekoliko varijanti procesa[2,5]:

- APCVD (engl. Atmospheric Pressure CVD)
- LPCVD (engl. Low Pressure CVD)
- MOCVD (engl. Metal Organic CVD)
- PACVD (engl. Plasma Assisted CVD)
- HDPCVD (engl. High Density Plasma CVD)
- LACVD (engl. Laser Assisted CVD)
- IICVD (engl. Ion Induced CVD)

Na donjoj slici prikazan je konvencionalni postupak CVD za nanošenje prevlake TiN.

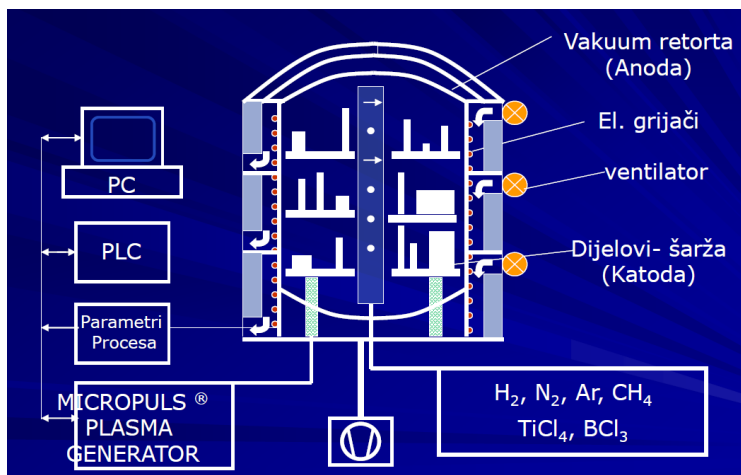


Slika 7: Shematski prikaz CVD postupka [2]

## 2.4 PACVD (engl. Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition)

Najkorišteniji modificirani CVD postupak je PACVD, bitna razlika ovog postupka je što se odvija na znatno nižoj temperaturi od standardnog CVD postupka ( $< 500^\circ\text{C}$ ) što znači da je moguće prevlačiti alatne čelike kojima je temperatura popuštanja oko  $550^\circ\text{C}$  bez promjene mikrostrukture odnosno bez dodatne naknadne toplinske obrade. Kod PACVD postupka potreban je vanjski izvor energije koji služi za ionizaciju molekula, odnosno za stvaranje plazme, kako bi plazma bila održiva komora treba biti pod vakuumom. Postoji nekoliko metoda ostvarivanja plazme, jedna od njih je zagrijavanje plina odnosno ionizacija molekula plina. Nedostatak ove metode je vrlo visoka temperatura koja je potrebna za ionizaciju molekula. Druga metoda proizvodnje plazme je pomoću električne energije, ovisno o izvoru energije ova metoda može se podijeliti na ostvarivanje plazme istosmjernim električnim poljem, ostvarivanje plazme mikrovalnim frekvencijama, ostvarivanje plazme radiofrekvencijama i ostvarivanje plazme električnim lukom. Prevlake nanosene ovim postupkom imaju bolja tribološka i mehanička svojstva, bolju prionjivost prevlake, homogenost prevlake je veća i udio nečistoća je manji. Najveći nedostatak ovog postupka je povećan udio vodika u prevlaci što je posljedica korištenja plazme, drugi nedostaci su postojanost zaostalih i tlačnih naprezanja u prevlaci i vrlo visoka cijena opreme. PACVD postupak ima vrlo široku primjenu, najčešće se koristi u mikroelektronici, biomedicini, kod prevlačenja kalupa i prevlačenja velikih alata. Nije pogodan za prevlačenje reznih alata manjih dimenzija jer

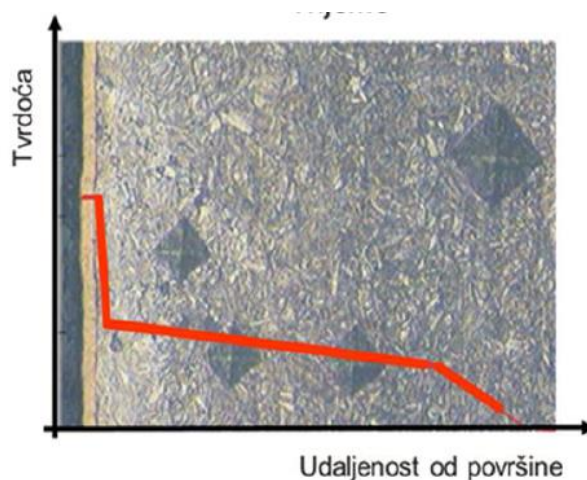
pri prevlačenju često dolazi do taloženja prevlake na vrh rezne oštrice koja se time zatupljuje. [2,5]. Na donjoj slici je shematski prikazana vakuumska peć i glavni dijelovi postrojenja za postupak PACVD.



Slika 8: Shematski prikaz PACVD postupka [2]

## 2.5 Dupleks postupak

Uobičajeni dupleks postupak koji se u uvjetima pojačanog trošenja svrdla od brzoreznog čelika preporučuje primijeniti sastoji se od nitriranja u plazmi i prevlačenja PACVD postupkom. Cilj dupleks postupka je dobiti potporni sloj za tvrdi prevlaku nitriranjem osnovnog materijala (slika 9). Bez potpornog sloja razlika u tvrdoći između osnovnog materijala i prevlake je prevelika te može doći do pucanja prevlake zbog plastične deformacije osnovnog materijala.



Slika 9: Raspored tvrdoće kod dupleks postupka nitriranja i prevlačenja [2]

U tablici 1 uspoređene su karakteristike PVD, CVD i PACVD postupaka.

**Tablica 1: Usporedba PVD, CVD i PACVD postupaka [2]**

	PVD	CVD	PACVD
Temperatura [°C]	200 - 500	800 - 1000	470 – 580
Kaljenje poslije prevlačenja	Ne	Potrebno	Ne
„Line of sight“ postupak	Da	Ne	Ne
Pomicanje sarže	Potrebno	Ne	Ne
Površina	Glatka	Gruba	Vrlo glatka
Poliranje nakon prevlačenja	Ovisi	Potrebno	Ne
Dupleks proces	Ne	Ne	Moguće
Prionjivost na tvrde metale	Vrlo dobra	Vrlo dobra	Prosječna
Troškovi održavanja	Vrlo Visoki	Niski	Niski
Troškovi pogona	Visoki	Niski	Niski
Troškovi ulaganja	Visoki	Niski	Prosječni
Primjena	Rezni alati	Dijelovi gdje su prihvatljive deformacije	Alati većih dimenzija i kalupi

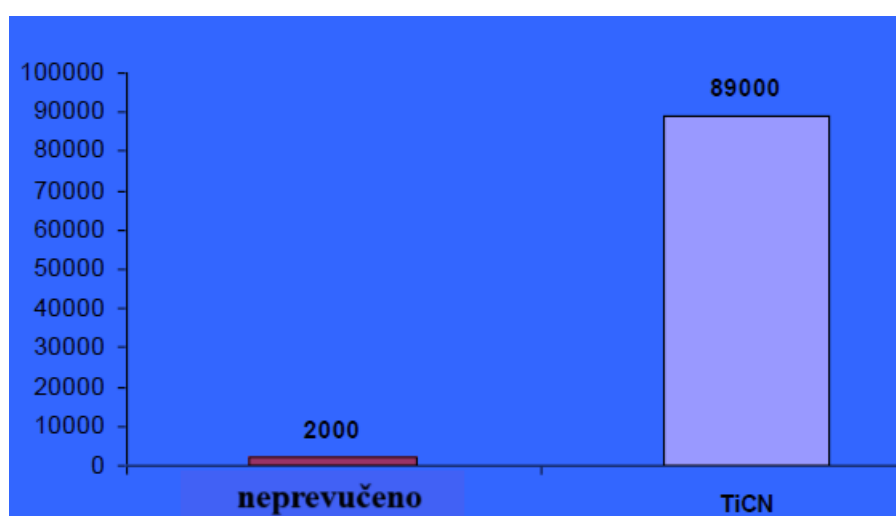
## 2.6 Neoksidne keramičke prevlake

Najviše korištena vrsta prevlaka za povećanje otpornosti na trošenje svrdla su neoksidne keramičke prevlake (TiN, TiCN, TiAlN i sl.). Počinju se koristiti u kasnim 1960.-im i njihova je upotreba imala revolucionaran učinak na produljenje životnog vijeka alata. U eksperimentalnom dijelu ovog rada raditi će se analiza trošenja svrdala prevučениh različitim neoksidnim keramičkim prevlakama. Prva prevlaka koja se počela koristiti za povećanje otpornosti na trošenje je TiN (titanij nitrid) prevlaka, TiN prevlaka ima univerzalno dobra svojstva pa i danas ima vrlo široku primjenu. Uglavnom se koristi kod manje zahtjevnih materijal i pri manjim brzinama obrade. Za tvrde i žilave materijale danas se često koristi TiCN (titanij karbo-nitrid) prevlaka zbog dosta više tvrdoće, no kao i kod TiN prevlake ne koristi se kod velikih brzina rezanja zbog relativno niske maksimalne radne temperature (do 500°C). TiAlN (titan aluminij-nitrid) prevlake predstavljaju velik napredak usporedno sa TiN i TiCN prevlakama, uz vrlo visoku tvrdoću (sličnu ili veću od TiCN prevlaka) imaju vrlo dobru otpornost na oksidaciju te imaju višu maksimalnu radnu temperaturu št i ima omogućuje rad pri većim brzinama rezanja. Slijedeći korak u razvoju prevlaka su TiBN (titan bor-nitrid) prevlake, posjeduju iznimno visoku tvrdoću, postoje na visokim temperaturama te imaju vrlo visoku otpornost na oksidaciju. Posebno svojstvo TiBN prevlaka je otpornost na tekući aluminij i druge lake metale što ih čini vrlo pogodnim za prevlačenje kalupa za lijevanje. [6,7,8] usporedba svojstava gore navedenih prevlaka prikazana je u tablici 2.

Na **Slika 10** ispod vidi se utjecaj prevlake na maksimalni broj ciklusa alata za odvajanje izrađevine iz kalupa, alat prevučен TiCN prevlakom može izdržati preko 40 puta više ciklusa od ne prevučенog alata.

Tablica 2: Usporedba neoksidnih keramičkih prevlaka [2]

Vrsta prevlake	Boja	Tvrdoća [HV 0,010]	Maksimalna radna temperatura [°C]	Posebna svojstva
TiN	Zlatna	2500	500	Univerzalna primjena
TiCN	Siva	3200	450	Veća tvrdoća od TiN
TiAlN	Tamno ljubičasta	3400	700	Visoka otpornost na koroziju
TiB <sub>2</sub>	Srebrna	5000	900	Vrlo visoka tvrdoća, otpornost na abraziju, otpornost na tekući aluminij (pogodno za kalupe)
TiBN	Brončana	4000	750	Bolja adhezivnost od TiB <sub>2</sub>



Slika 10: Utjecaj prevlake na broj ciklusa [2]

### 3 BUŠENJE

Bušenje je postupak obrade odvajanjem čestica gdje se kontinuiranim kružnim gibanjem i posmičnim pravolinijskim gibanjem buše ili proširuju provrti. Provrti mogu biti prolazni ili neprolazni. Alatni strojevi kojima se izvodi bušenje zovu se bušilice a rezni alat se zove svrdlo. Bušenje je jedan od najčešće korištenih postupaka strojne obrade, moguće ga je primijeniti na gotovo sve vrste materijala, uključujući metale, plastiku, drvo, keramiku i kompozitne materijale, također je primjenjivo za razne tipove geometrije obradka. Za razliku od nekih drugih postupaka obrade odvajanjem čestica kao na primjer glodanje ili tokarenje, bušenje je relativno jednostavno i široko dostupno te je njime moguće postići vrlo visoku kvalitetu površine.

#### 3.1 Spiralo svrdlo

Spiralno svrdlo (slika 11) je najčešće korišten tip svrdla zbog svoje univerzalne primjene i učinkovitosti. U većini slučajeva ima dvije glavne rezne oštrice koje obavljaju osnovnu funkciju rezanja materijala. Ovisno o primjeni, spiralna svrdla mogu biti izrađena s punom ili šupljom jezgrom. Šuplje svrdlo omogućuje dovođenje tekućine za hlađenje i podmazivanje, poznate pod nazivom SHIP (Sustav Hlađenja i Podmazivanja), što poboljšava kvalitetu obrade, smanjuje trenje i temperaturu te time produžuje životni vijek alata. Prilagodba parametara rezanja spiralnog svrdla ključna je za postizanje zahtjeva obrade. Parametri koji se koriste ponajviše ovise o materijalu koji se obrađuje, odnosno njegovim svojstvima od kojih je najbitnije svojstvo za odabir parametara tvrdoća. Svaki od parametara može biti prilagođen kako bi se postigla maksimalna učinkovitost i trajnost svrdla. Neki od važnih parametara spiralnog svrdla su: materijal svrdla, površinska obrada svrdla, kut vrha svrdla, broj reznih oštrica, kut žlijeba svrdla, prihvata svrdla i provrti za provođenje SHIP-a (ima li ih svrdlo ili ne).



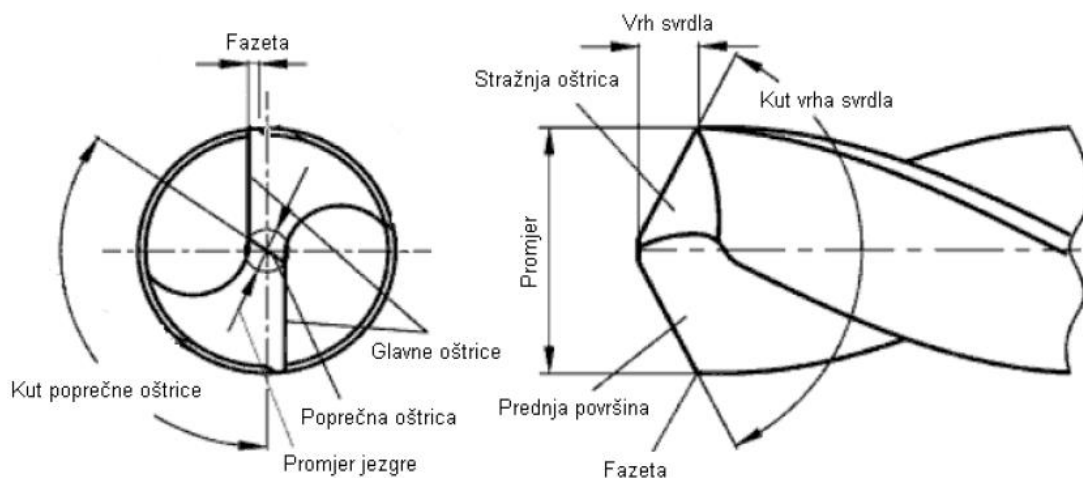
**Slika 11: Spiralno svrdlo [9]**

Kut vrha svrdla (slika 12) i kut uspona svrdla (slika 13) najviše će ovisiti o tvrdoći materijala koji se buši. Za mekše materijale kao što su aluminij, Al ili Cu legure ili plastika kut vrha svrdla će biti manji dok će kut uspona žlijeba svrdla biti veći, kod ovih materijala odvojena čestica je duga (tablica 3). Obrnuto će vrijediti za tvrde i krhke materijale gdje je odvojena čestica kratka pa će se zbog malog kuta uspona brzo izbaciti.

**Tablica 3: Ovisnost materijala i kuteva svrdla [10]**

Materijali	Kut vrha svrdla ( $2\varphi$ )	Kut uspona spiralnog utora ( $\omega$ )
Materijali normalne tvrdoće (meki čelici, Al-legure)	120°	30°
Tvrđi i krhki materijali (sivi lijev, Mg-legure, visokolegirani čelici)	140°	15°
Meki materijali (aluminij, bakar, njihove legure, plastični materijali)	80° - 90°	40°





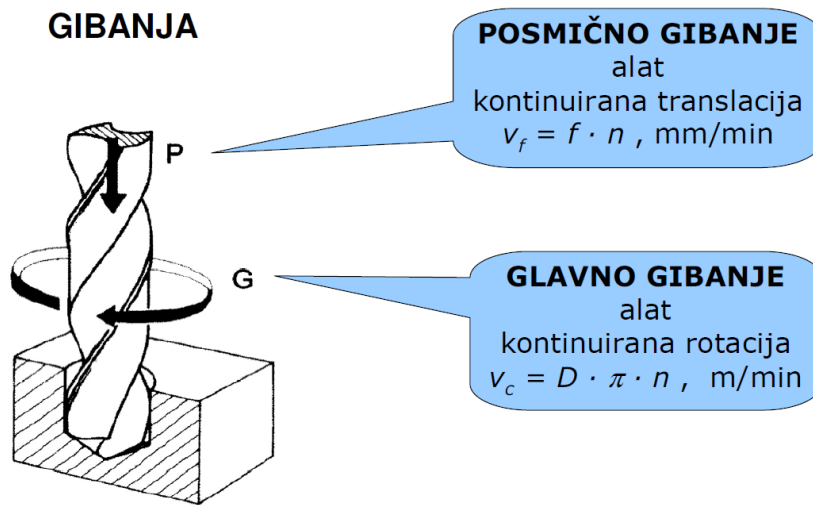
Slika 12: Geometrija rezne oštrice svrdla [10]



Slika 13: Kut uspona spiralnog utora [11]

### 3.1.1 Brzina i posmak bušenja

Najbitniji parametri kod bušenja provrta su posmak i brzina rezanja. Posmak je brzina gibanja svrdla prema obratku, odnosno to je pomoćno pravolinijsko gibanje alata (slika 14). Hrapavost obrađene površine i kvaliteta provrta su direktno povezani sa posmakom, što je posmak ( $f$ ) manji obrada će biti finija i obrnuto. Brzina rezanja je definirana kao brzina na obodu glavne oštrice svrdla koja je u kontaktu sa obratkom, ta brzina je ujedno i glavno kontinuirano kružno gibanje svrdla.



Slika 14: Gibanja svrdla [10]

### 3.1.2 Sile i momenti rezanja

U procesu bušenja kao i u svakom procesu obrade odvajanjem čestica dolazi do kontakta između alata i obratka pri čemu se javljaju sile i momenti. Sile rezanja će ovisiti o obliku svrdla i broju oštrica, za tipično spiralno svrdlo sa dvije glavne rezne oštrice i jednom poprečnom oštricom komponente sile rezanja su slijedeće:

Komponente sile rezanja na glavnoj reznoj oštrici [10]:

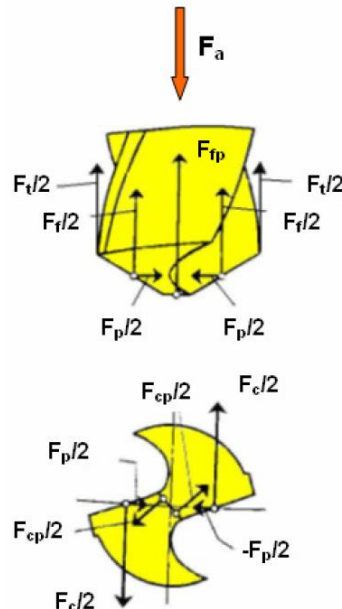
- Glavna sila rezanja,  $F_c$
- Posmična sila rezanja,  $F_f$
- Natražna sila rezanja,  $F_p$

Komponente sile rezanja na poprečnoj oštrici [10]:

- Glavna sila rezanja poprečne oštrice,  $F_{cp}$
- Posmična sila rezanja poprečne oštrice,  $F_{fp}$
- Sila trenja,  $F_t$

Aksijalna sila rezanja (slika 15) se računa pomoću izraza [10]:

$$F_a = F_f + F_{fp} + F_t \quad (1)$$



3.1.2.1

Slika 15: Sile rezanja [10]

U izrazu za aksijalnu silu rezanja vidljivo je da se ona računa pomoću posmične sile rezanja glavne oštrice, posmične sile rezanja poprečne oštrice i sile trenja. Čak 50% aksijalne sile rezanja se utroši na savladavanje posmične sile rezanja poprečne oštrice, 45% na savladavanje posmične sile rezanja glavne oštrice i 5% na trenje.

Ukupan moment bušenja  $M_u$  se računa pomoću izraza [10] :

$$M_u = M_{Fc} + M_{Fcp} + M_{Ft} \quad (2)$$

Čak 80% ukupnog momenta bušenja  $M_u$  troši se na savladavanje momenta vrtnje glavne rezne oštrice  $M_{Fc}$ , otprilike 10% na savladavanje momenta vrtnje pomoćne oštrice i 10% na moment trenja fasete.

### 3.2 Trošenje svrdla

Trošenje alata je nepovratan proces tijekom kojeg alat postupno gubi predviđenu geometriju svoje rezne oštrice što izravno utječe na sposobnost rezanja i efikasnost obrade. Trošenje uzrokuje smanjenje performansi alata te značajno utječe na kvalitetu obrađene površine, produktivnost i ukupne troškove proizvodnje. Deformacija rezne oštrice uzrokuje povećanje trenja između reznog alata i materijala obratka što rezultira povišenjem temperature alata. Tupa oštrica također povećava sile rezanja. U praksi, alat ima dopušten stupanj trošenja, nakon čijeg prekoračenja više nije moguće postići traženi zahtjev kvalitete površine i alat je potrebno zamijeniti. Što su zahtjevi za kvalitetom površine veći, dopušteni stupanj trošenja alata je manji i alat će morati češće biti zamijenjen ili ponovno naoštren (ako je to moguće). Da bi se smanjilo trošenje alata i produžio njegov vijek trajanja, koriste se različite strategije. Odabir odgovarajućih materijala za izradu alata, odgovarajuća toplinska obrada i primjena tvrdih prevlaka može značajno povećati otpornost alata na trošenje. Korištenje rashladnih i podmazujućih sredstava također smanjuje trenje i temperaturu tijekom obrade, čime se usporava proces trošenja i produljuje životni vijek alata. Pravilno postavljanje parametara obrade kao što su brzina i sila rezanja može pomoći pri smanjenju trošenja alata. Redovito praćenje stanja alata, uključujući vizualne inspekcije i praćenje signala poput vibracija i zvuka, ključni su koraci u osiguravanju pravovremene zamjene alata prije pojave loma svrdla. [12]

### 3.3 Mehanizmi trošenja svrdla

Ovisno o radnim uvjetima u kojima se alat koristi (temperaturi, brzini vrtnje, silama rezanja), mehaničkim i kemijskim svojstvima materijala svrdla i materijala obratka, mogu se razlikovati najčešći mehanizmi trošenja:

- Abrazijsko trošenje
- Adhezijsko trošenje
- Trošenje raslojavanjem
- Trošenje uslijed kemijske nestabilnosti

### 3.3.1 *Abrazijsko trošenje*

Abrazijsko trošenje je uzrokovano djelovanjem sitnih tvrdih čestica iz osnovnog materijala, najčešće karbida ili oksida koji su znatno tvrdi od osnove samog materijala. Stupanj trošenja će ovisiti o razlici u tvrdoći između abrazivne čestice i površine samog reznog alata, ako je tvrdoća površine dovoljno visoka abrazijsko trošenje se može gotovo u potpunosti izbjeći. Korištenje tvrdih prevlaka tipa TiC je najefektivniji način povećavanja tvrdoće površine i time smanjivanja abrazijskog trošenja.

### 3.3.2 *Adhezijsko trošenje*

Do adhezijskog trošenja dolazi kada se odvojena čestica zavari na površinu alata te se uslijed smičnog naprezanja pri dodiru s obratkom opet odvaja, pri odvajanju čestice odvaja se i komadić sa površine alata i tako dolazi do trošenja. Kao i kod abrazijskog trošenja korištenje prevlaka na alatu može znatno smanjiti ovaj mehanizam trošenja.

### 3.3.3 *Delaminacijsko trošenje*

Delaminacijsko trošenje ili trošenje raslojavanjem nastaje uslijed plastične deformacije materijala pri čemu dolazi do stvaranja pukotina ispod površine, sa vremenom pukotine propagiraju prema površini materijala i dolazi do odvajanja malih čestica. [12]

### 3.3.4 *Trošenje uslijed kemijske nestabilnosti*

Oblik trošenja koji se javlja zbog visokih temperatura razvijenih između površina alata i obratka. U ovaj oblik trošenja spada difuzijsko trošenje, trošenje otapanjem i elektrokemijsko trošenje. **Difuzijsko trošenje** je gubitak materijala pri difuziji atoma materijala alata u materijal obratka. Da bi se pojavilo difuzijsko trošenje temperature alata moraju biti vrlo visoke te materijal obratka treba biti sklon otapanju određenih faza iz materijala alata. **Trošenje otapanjem** nastaje uslijed otapanja osnovnog materijala reznog alata pri vrlo visokim brzinama rezanja, odnosno visokoj temperaturi. **Elektrokemijsko trošenje** nastaje uslijed nastajanja elektromagnetskih sila između alata i odvojene čestice, odnosno pojavljuje se razlika električnog potencijala između njih i dolazi do protoka struje uslijed čega dolazi do prelaska iona sa materijala alata na materijal obratka. [12]

# EKSPERIMENTALNI DIO

## 4 PLAN ISPITIVANJA

Za ispitivanje će se koristiti nekoliko svrdala, sva svrdla su jednakog promjera 4 mm te su proizvedena od istog brzoreznog čelika. Svrđlo  $P_0$  je neprevučeno, svrdlo  $P_1$  je PVD postupkom prevučeno TiN (titanij nitrid) prevlakom, svrdlo  $P_2$  je PACVD postupkom prevučeno TiN prevlakom, svrdlo  $P_3$  je prevučeno PACVD postupkom sa TiN/TiBN (titanij n/Titan bor-nitrid) gradijentnom prevlakom, svrdlo  $P_4$  je prevučeno PACVD postupkom sa TiN/TiCN (titanij nitrid / titanij karbo-nitrid) višeslojnom prevlakom. Svrđlo  $P_1$  prevučeno PVD postupkom je kupljeno u takvom stanju dok su ostala svrdla prevučena u laboratoriju fakulteta PACVD postupkom. Postupak bušenja izvoditi će se na stupnoj bušilici sa konstantnom silom bušenja, za postizanje konstantne sile koristiti će se utezi. Materijal koji će se bušiti je nehrđajući austenitni čelik oznake AISI304 (X5CrNi18-10) u obliku lima debljine 3mm. Prije samog bušenja u limu su pred bušene rupe promjera 3 mm i dubine 2,5 mm (Slika 16). Svakim svrdlom će se bušiti 30 sekundi, za vrijeme bušenja će se termalnom kamerom mjeriti promjena temperature svrdla. Cijeli postupak će se snimati kako bi se naknadno mogla odrediti brzina bušenja svakog pojedinog svrdla. Svrđla i površina nehrđajućeg čelika analizirati će se pri velikom povećanju svjetlosnog mikroskopa kako bi se mogli odrediti mehanizmi i stupanj trošenja. Također će se analizirati debljina i adhezivnost prevlaka svih prevučenih svrdala.



Slika 16: Postava uređaja za ispitivanje trošenja svrdla

**Tablica 4: Oznake svrdla i primijenjene prevlake**

Oznaka svrdla	Prevlaka i postupak prevlačenja
P <sub>0</sub>	Ne prevučeno svrdlo
P <sub>1</sub>	TiN prevlaka, PVD postupak
P <sub>2</sub>	TiN prevlaka, PACVD postupak
P <sub>3</sub>	TiN/TiBN prevlaka, PACVD postupak
P <sub>4</sub>	TiN/TiCN prevlaka, PACVD postupak

PACVD prevlačenje provedeno je u vakuumskoj peći Rübiger PC 70/90 (slika 17). Parametri prevlačenja su navedeni u tablicama ispod.

**Tablica 5: Parametri PACVD prevlačenja svrdla TiN prevlakom**

Parametri postupka	Vrijednost parametra
Temperatura čišćenja površine otprašivanjem iona	420 °C
Vrijeme čišćenja površine otprašivanjem iona	2 h
Temperatura prevlačenja	520 °C
Trajanje prevlačenja	6 h
Protok plinske smjese	200 l/h H <sub>2</sub> , 20 l/h N <sub>2</sub> , 10 l/h Ar
Protok prekursora TiCl <sub>4</sub>	7,5 l/h
Tlak u vakuumskoj komori	2 mbar
Napon plazme	490 V
Snaga plazme	2800 W
Trajanje hlađenja komore do 20 °C	6 h



**Tablica 6: Parametri PACVD prevlačenja TiN/TiCN i TiN/TiBN prevlakama**

Parametar	Otprašivanje	PACVD TiN (vezivni sloj)	PACVD TiCN	PACVD TiBN
Napon, U	520	490	490	560
Snaga, W	900	1650	1400	1650
Vrijeme, h	1	1,5	6	10
Temperatura, °C	420	500	500	500
Tlak, mbar	2	2	2	2
N <sub>2</sub> , l/h	23	15	13	0
H <sub>2</sub> , l/h	140	140	140	140
Ar, l/h	10	10	10	7
CH <sub>4</sub> , l/h	0	0	4,5	0
Ti <sub>4</sub> Cl, l/h	0	3	3	3
BCl <sub>3</sub> , l/h	9	0	0	9

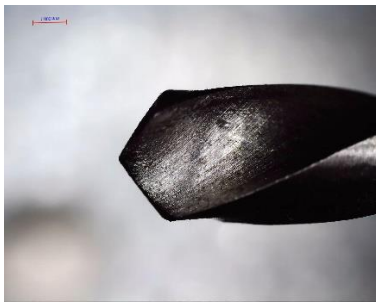




**Slika 17: Postavljanje svrdla na katodi PACVD peći**

## 5 REZULTATI ISPITIVANJA



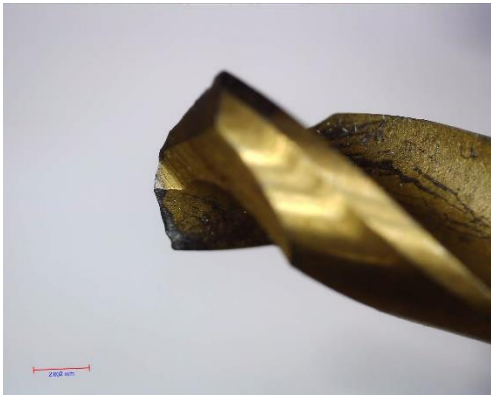



### 5.1 Izgled oštrice svrdla prije i nakon bušenja

Izgled oštrice je prije početka bušenja i nakon bušenja fotografiran svjetlosnim mikroskopom. U slijedećim tablicama su prikazane slike oštrice svrdla prije i poslije postupka bušenja.





**Tablica 7: Izgled svrdla prije bušenja**

Oznaka svrdla	Izgled oštrice	Oznaka svrdla	Izgled oštrice
P <sub>0</sub>		P <sub>3</sub>	
P <sub>1</sub>		P <sub>4</sub>	
P <sub>2</sub>			

Tablica 8: Trošenje svrdla nakon 30s bušenja

Oznaka svrdla	Izgled oštrice	
P <sub>0</sub>		
P <sub>1</sub>		
P <sub>2</sub>		

Tablica 9: Trošenje svrdla nakon 30s bušenja (nastavak)

Oznaka svrdla	Izgled oštrice	
P <sub>3</sub>		
P <sub>4</sub>		

## 5.2 Vizualna analiza trošenja svrdla

### *P<sub>0</sub> – Ne prevučeno svrdlo*

Na slikama ne prevučenog svrdla vidi se trošenje dvije glavne rezne oštrice (došlo je do zatupljenja), na prednjoj i stražnjoj površini se također vide jasni tragovi trošenja. Zbog relativno niske tvrdoće ne prevučenog svrdla može se pretpostaviti da je glavni mehanizam trošenja abrazija.

### *P<sub>1</sub> – TiN svrdlo prevučeno PVD postupkom*

Oštrica svrdla prevučenog TiN prevlakom nije toliko zatupljena i trošenje na prednjoj i stražnjoj površini je znatno manje nego kod ne prevučenog svrdla no na mjestima je došlo do loma vrha oštrice. Moguć razlog loma vrha su vibracije u sustavu ili nečistoće

u osnovnom materijalu svrdla. Na obje površini rezne oštrice se također vide nalijepljene čestice nehrđajućeg čelika. Prevladavajući mehanizmi trošenja su abrazija i adhezija te sam mehanički lom vrha oštrice.

### ***P<sub>2</sub> – TiN svrdlo prevučeno PACVD postupkom***

Trošenje nakon 30 sekundi bušenja je minimalno, vrh oštrice je vrlo oštar i gotovo se ne vidi razlika u odnosu na polazno stanje. Prednja i stražnja površina su također u vrlo dobro stanju s iznimkom prema obodu svrdla te samom vrhu gdje se vidi nedostatak zlatne TiN prevlake i početak trošenja osnovnog materijala. Glavni mehanizam trošenja je abrazija, adhezivno trošenje je vidljivo na stražnjoj površini rezne oštrice.

### ***P<sub>3</sub> – TiN/TiBN svrdlo prevučeno PACVD postupkom***

Slike nakon bušenja pokazuju gotovo vrlo nizak stupanj trošenja u odnosu na polazno stanje svrdla. Kao i kod prethodnog P<sub>2</sub> svrdla mogu se vidjeti tragovi trošenja prema obodu svrdla i lagano zatupljivanje samog vrha svrdla no vidljivo manje nego na prethodnom P<sub>2</sub> svrdlu. Glavni mehanizam trošenja je abrazija.

### ***P<sub>4</sub> – TiN/TiCN svrdlo prevučeno PACVD postupkom***

Slično kao i kod svrdla P<sub>1</sub> dolazi do loma uzduž vrha rezne oštrice, prednja i stražnja površina oštrice ne pokazuju visoki stupanj trošenja. Pretpostavka je su lom uzrokovale vibracije ili visoka tvrdoća površinskog sloja.

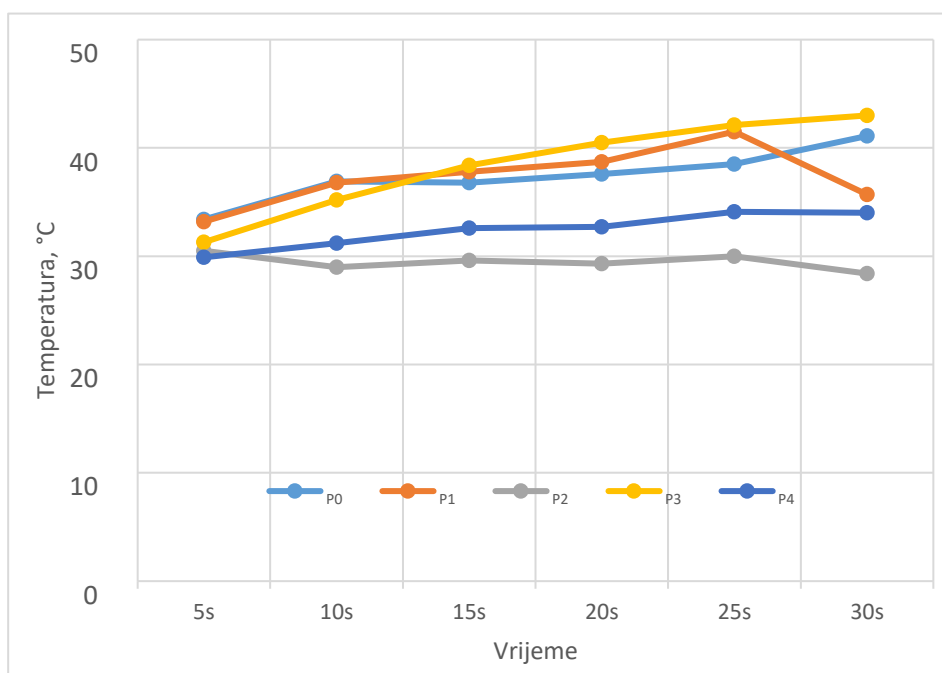
## **5.3 Zagrijavanje svrdla tijekom bušenja**

Tijekom procesa bušenja svakih 5 sekundi napravljena je slika termalnom kamerom (slika 18) kako bi se pratila promjena temperature svrdla u vremenu. Ukupno je za svako svrdlo analizirano 6 slika.

a)



b)



**Slika 18: Mjerenje temperature: a) mjerenje temperature termalnom kamerom, b) ovisnost temperature o vremenu**

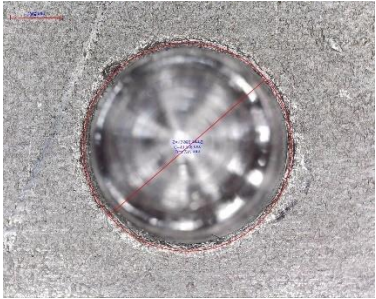
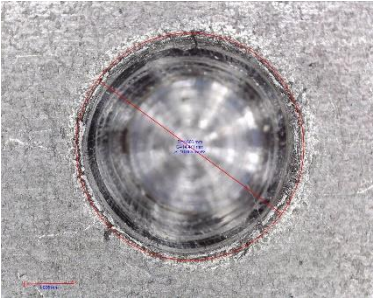
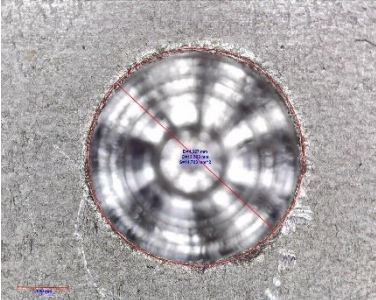
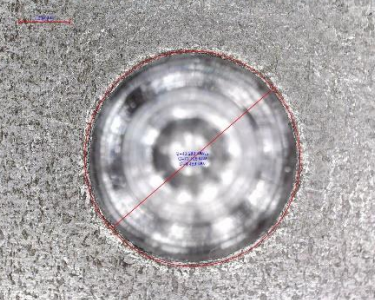
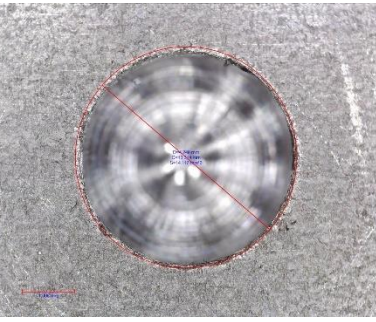
Najbolje rezultate je pokazalo svrdlo P<sub>2</sub> koje u 30 sekundi bušenja gotovo nije promijenilo temperaturu, vrlo slični rezultati su dobiveni za svrdlo P<sub>4</sub>. Ostala svrdla pokazuju nešto veću promjenu temperature. S obzirom da su sva svrdla izrađena od istog brzoreznog čelika i imaju jednaku toplinsku vodljivost očekivano je da će rezultati biti podjednaki. Razlike u temperaturama su ponajviše posljedica drugačijeg faktora trenja različitih prevlaka, odvojenih čestica osnovnog materijala ili materijala svrdla i

deformacija rezne oštrice. Zbog relativno kratkog vremena bušenja i mogućnosti pogreške teško je donijeti zaključke o utjecaju samih prevlaka na zagrijavanje svrdla.

#### 5.4 Izgled i promjer rupe u čeliku nakon 30s bušenja

Nakon bušenja, pod svjetlosnim mikroskopom su fotografirane rupe u čeliku (tablica 9). Pomoću pomičnog mjerila su izmjereni promjeri rupa navedeni su tablici 10.

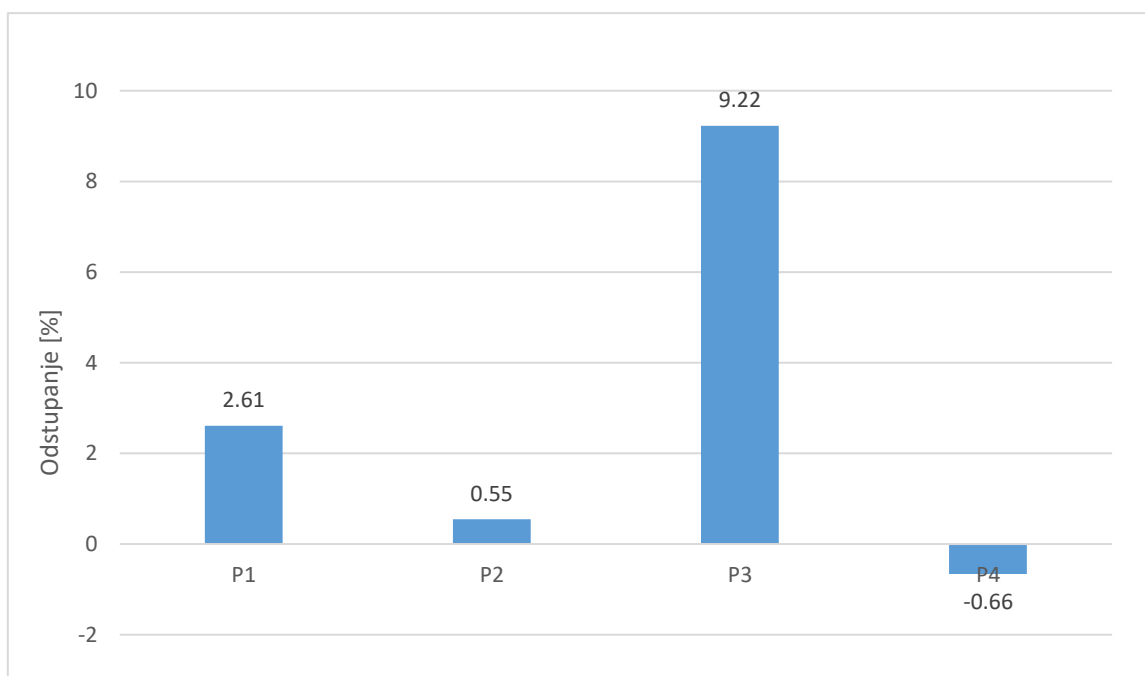
**Tablica 10: Izgled površine čelika nakon 30s bušenja**

Oznaka svrdla	Izgled površine	Oznaka svrdla	Izgled površine
P <sub>0</sub>		P <sub>3</sub>	
P <sub>1</sub>		P <sub>4</sub>	
P <sub>2</sub>			

**Tablica 11: Promjer rupa**

Oznaka svrdla	Promjer rupe [mm]
P <sub>0</sub>	4,217
P <sub>1</sub>	4,327
P <sub>2</sub>	4,240
P <sub>3</sub>	4,606
P <sub>4</sub>	4,189

Promjeri rupa dosta variraju ovisno od svrdla do svrdla, kako bi mogli vizualizirati utjecaj prevlaka na promjer rupe na grafu ispod prikazana su relativna odstupanje promjera rupe za svaku prevlaku. Kao referentnu vrijednost uzet će se promjer rupe ne prevučenog svrdla.

**Slika 19: Odstupanje od referentne vrijednosti**

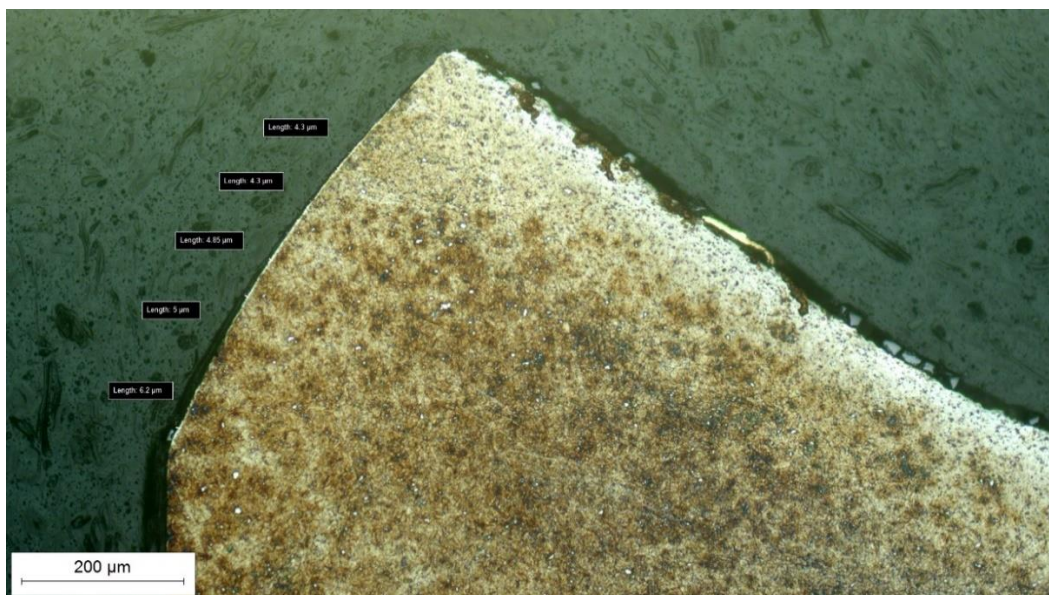


Razlike u promjeru rupe ukazuju na vibracije u sustavu, moguć izvor vibracija je trošenje svrdla odnosno odvojene čestice u tribosustavu ili nedostatak krutosti stupne bušilice.

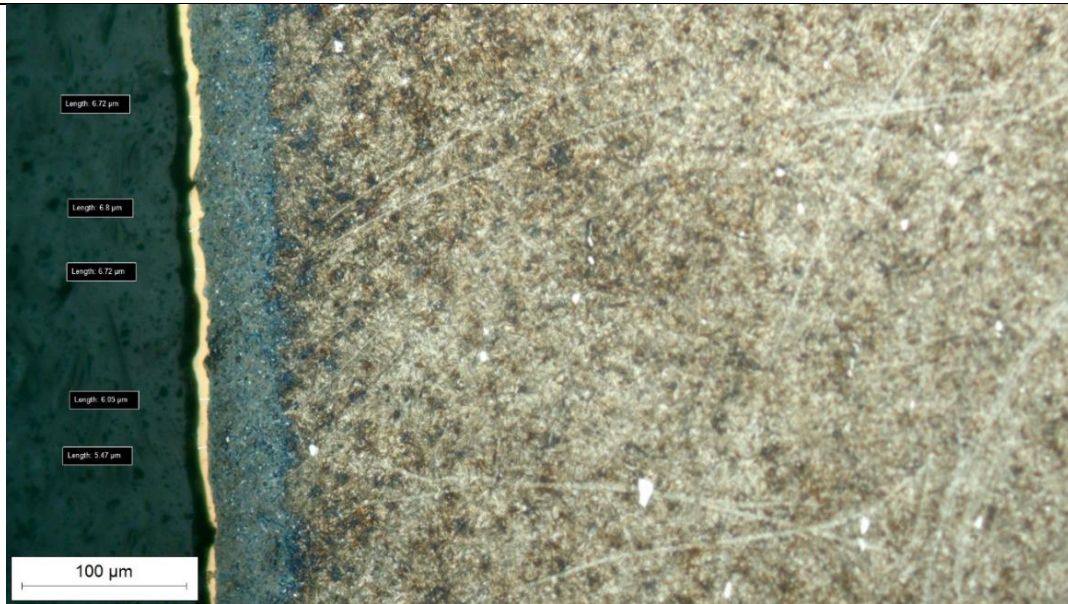
### 5.5 Određivanje debljine i adhezivnosti prevlake

Prije mjerenja debljine prevlake uzorci su metalurški pripremljeni. Odrezani su komadi svrdla i utopljeni u polimernu masu. Metalografski uzorak je poliran i površina uzorka je nagrižena otopinom 3 % NITAL-a.

Na donjim slikama prikazan je izgled prevlaka na ispitivanim svrdlima i određivanje debljine prevlake. Debljine prevlaka naveden su u tablici 11.



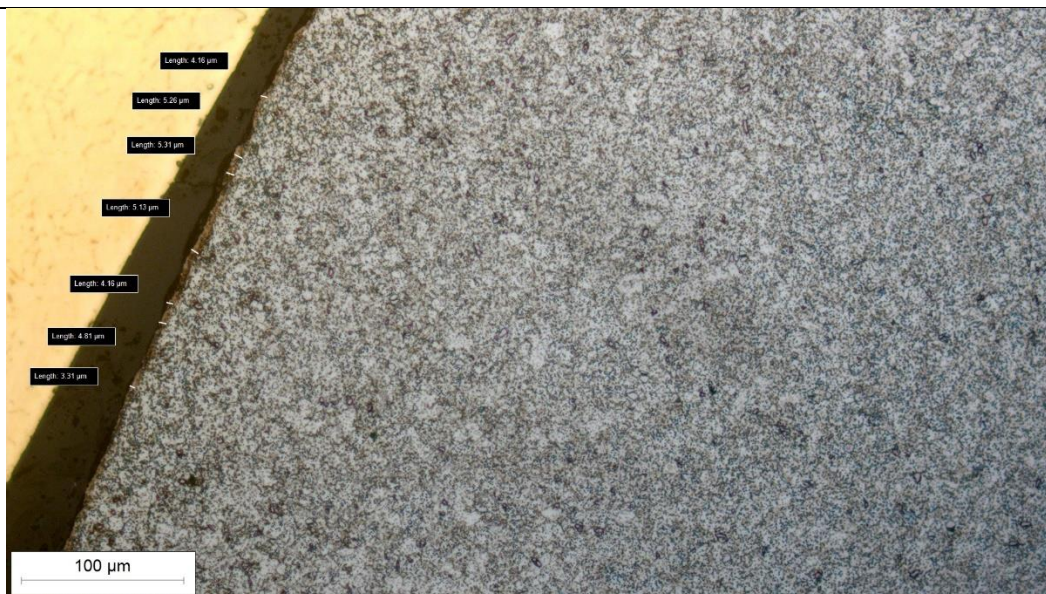
Slika 20: Debljina prevlake TiN prevučene PVD postupkom



**Slika 21: Debljina prevlake TiN prevučene PACVD postupkom**



**Slika 22: Debljina prevlake TiN/TiBN prevučene PACVD postupkom**



**Slika 23: Debljina prevlake TiN/TiCN prevučene PACVD postupkom**

**Tablica 12: Prosječna debljina prevlaka**

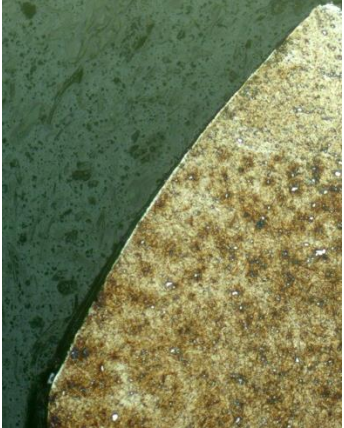
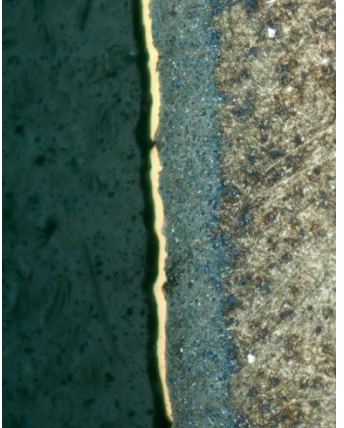

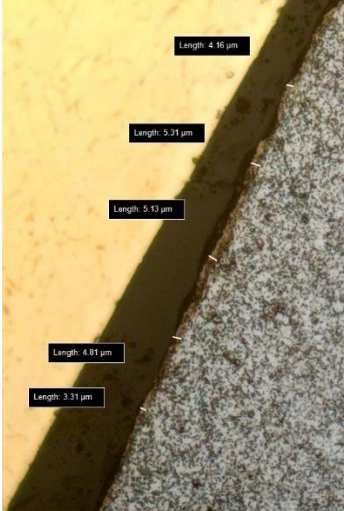
Oznaka svrdla	Prosječna debljina prevlake $\mu\text{m}$
P <sub>1</sub>	4,93
P <sub>2</sub>	6,35
P <sub>3</sub>	3,75
P <sub>4</sub>	4,59

S obzirom da su sva svrdla napravljena od istog brzoreznog čelika njihova mikrostruktura je gotovo jednaka i sastoji se od popuštenog martenzita, sekundarnih karbida i karbida popuštanja. Na *Slika 21* uz samu površinu uzorka svrdla vidi se promjena u mikrostrukturi debljine otprilike  $30\mu\text{m}$ . Pri postupku PACVD prevlačenja došlo je do difuzije dušika u površinu materijala te je površina nitrirana prije nanošenja prevlake. Slična se pojava vidi i na *Slika 22* no zona difuzije je znatno tanja.

## 5.6 Adhezivnost prevlaka

Adhezivnost ispitivanih prevlaka uočava se iz slika u tablici 12. Svrldo P<sub>1</sub> prevučeno PVD postupkom pokazuje najveći stupanj odvajanja prevlake što je vidljivo u tablici ispod. Sva svrdla prevučena PACVD postupkom pokazuju bolju adhezivnost od svrdla prevučenog PVD postupkom, no svrdlo P<sub>3</sub> pokazuje znatno bolje rezultate od ostalih.

**Tablica 13: Izgled rubnog sloja ispitivanih svrdla**

<i>Oznaka svrdla</i>	Rubni sloj	<i>Oznaka svrdla</i>	Rubni sloj
P <sub>1</sub>		P <sub>2</sub>	
P <sub>3</sub>		P <sub>4</sub>	

## 6 ZAKLJUČAK

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je ispitivanje otpornosti na trošenje: Ispitni uzorci su komercijalno dobavljiva svrdla od brzoreznog čelika promjera 4 mm. Svrdo P<sub>0</sub> je neprevučeno svrdlo, svrdlo P<sub>1</sub> prevučeno je TiN prevlakom i nabavljeno je u prevučenom stanju. Ostala svrdla nabavljena ne prevučena te su naknadno prevučena PACVD postupkom na Fakultetu strojarstva i brodogradnje slijedećim prevlakama: svrdlo P<sub>2</sub> je prevučeno TiN prevlakom, svrdlo P<sub>3</sub> je prevučeno gradijentnom TiN/TiBN prevlakom i svrdlo P<sub>4</sub> je prevučeno višeslojnom TiN/TiCN prevlakom.

Proveden je postupak bušenja austenitnog nehrđajućeg čelika X5CrNi18-10 u trajanju 30 sekundi pri konstantnoj brzini i sili bušenja. Cijeli postupak je sniman termalnom kamerom. Nakon bušenja provedena su slijedeća ispitivanja: izgled istrošenog svrdla i njima odgovarajuće rupe snimljene su svjetlosnim mikroskopom. Svjetlosnom mikroskopijom su određeni su mehanizmi trošenja, te debljina i adhezivnost prevlaka. Iz analize fotografija snimljenih termalnom kamerom izmjerena je promjena temperature oštrice svrdla ovisno o vremenubušnja.

Nakon analize svrdla svjetlosnom mikroskopijom i analize debljine i adhezivnosti prevlake svrdlo P<sub>3</sub> (TiN/TiBN) pokazuje značajno bolju otpornost na trošenje u odnosu na ostala svrdla. Kod njega nakon 30 sekundi bušenja nastaje minimalno trošenje reznih oštrica i zadržana je dobra prionjivost prevlake. Slijedeći najbolji rezultat pokazuje svrdlo P<sub>2</sub> (TiN), adhezivnost prevlake je dobra i stupanj trošenja je relativno nizak. Kod svrdla P<sub>1</sub> (TiN) i P<sub>3</sub> (TiN/TiCN) dolazi do loma vrha rezne oštrice, mogući uzrok loma su vibracije. Trošenje reznih površina kod oba svrdla je usporedivo trošenju svrdla P<sub>2</sub>. Svrdo P<sub>1</sub> prevučeno PVD postupkom pokazuje najlošiju adhezivnost prevlake što prati rezultate u literaturi. Adhezivnost svrdla P<sub>4</sub> je usporediva adhezivnosti svrdla P<sub>2</sub>. Ne prevučeno svrdlo pokazuje najveći stupanj trošenja reznih površina i najveći stupanj zatupljivanja rezne oštrice no ne dolazi do loma vrha oštrice. Ispitivanje zagrijavanja pokazuje najbolje rezultate za svrdlo P<sub>2</sub> a najgore za svrdlo P<sub>3</sub>, no razlike u zagrijavanju su minimalne i na osnovi njih nije moguće dobiti pouzdane zaključke.

Preporuka je u daljnjim ispitivanjima je koristiti duže vremenske intervale bušenja te korištenje stabilnijeg sustava za bušenje kako bi se eliminirao utjecaj vibracija.

---

**LITERATURA**

- [1] V. Rede, podloge za predavanje iz kolegija 'Posebni metalni materijali', dio Korozijski postojani čelici, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2024
- [2] D. Landek, podloge za predavanje iz kolegija 'Tribologija i inženjerstvo površina', dio Inženjerstvo površina, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2024.
- [3] D. Landek, podloge za predavanje iz kolegija 'Posebni metalni materijali', dio Alatni materijali, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2024.
- [4] URL:<https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/physical-vapour-deposition-pvd>, (pristupljeno - 28.01.2025.)
- [5] S. S. Eskildsen, C. Mathiasen, M. Foss: Plasma CVD: process capabilities and economic aspects, Surface and Coatings Technology 116-119, 16-24, Danish Technological Institute, Aarhus, 1999.
- [6] T.P. Mollart, J Haupt, R. Gilmore, W. Gissler, Tribological behaviour of homogeneous Ti-B-N, Ti-B-N-C and TiN/h-BN/TiB<sub>2</sub> multilayer coatings, Surface and Coatings Technology 86-87, 231-236, Institute for Advanced Materials, Ispra, 1996.
- [7] K.N. Strafford, Tribological properties of coatings, Surface and Coatings Technology 81, 106-117, Ian Wark Research Institute, University of South Australia, 1996.
- [8] Myung Jin Son, Sung Soo Kang, Eung-Ahn Lee, Kwang Ho Kim, Properties of TiBN coating on the tool steels by PECVD and its applications, Journal od Materials Processing Technology 130-131, 266-271, South Korea, 2002.
- [9] URL:[https://www.presto-tools.co.uk/ProductGrp/hss-quick-spiral-jobber-length-drills-din-338\\_1](https://www.presto-tools.co.uk/ProductGrp/hss-quick-spiral-jobber-length-drills-din-338_1) (pristupljeno - 20.01.2025.)
- [10] D. Ciglar, podloge za predavanje iz kolegija 'Alati i naprave', Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2024
- [11] URL:<https://www.vikingdrill.com/High-Helix-Flutes-Drill.php>, (pristupljeno - 05.02.2025)
- [12] S. Šolić, Utjecaj mikrostrukture brzoreznog čelika na tribološka svojstva reznih alata, Disertacija Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008.