Ispitivanje trošenja spiralnih svrdla prevučenih prevlakom PACVD TiN

Huđ, Ivan

Undergraduate thesis / Završni 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:235:328215

Rights / Prava: Attribution 4.0 International/Imenovanje 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-20**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Huđ

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

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

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr.sc. Darku Landeku za njegov predan rad i pomoć prilikom izrade ovog završnog rada.

Ivan Huđ

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 / 23 – 6 / 1**	
Ur.broj: **15 - 1703 - 23 -**	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Hud** JMBAG: **0035212606**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje trošenja spiralnih svrdla prevučenih prevlakom PACVD TiN**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Wear testing of PACVD TiN coated drill bits**

Opis zadatka:

Otpornost na trošenje spiralnih svrdla od brzoreznog čelika može se povećati nanošenjem tvrdih prevlaka kemijskim (CVD, PACVD) ili fizikalnim (PVD) taloženjem iz parne faze. U radu treba opisati konstrukcijske karakteristike spiralnih svrdla, uvjete trošenja i naprezanja rezne oštrice te zahtjeve na svojstva brzoreznog čelika i tvrdih prevlaka za obradu metala. Prema literaturi usporediti vrste i svojstva prevlaka TiN, TiAlN i TiCN nanesenih postupcima CVD, PVD i PACVD.

U eksperimentalnom dijelu radu treba provesti prevlačenje spiralnih svrdla od brzoreznog čelika prevlakom PACVD TiN, ispitati debljinu i prionjivost prevlake te usporediti trošenje i zagrijavanje prevučenih i neprevučenih svrdla tijekom 120 s bušenja provrta u aluminijevom disku.

Na temelju rezultata ispitivanja odrediti povećanje trajnosti prevučenih svrdla u odnosu na neprevučena i predložiti optimalni postupak toplinske obrade brzoreznog čelika i PACVD prevlačenja.

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

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:
30. 11. 2022.	**1. rok:** 20. 2. 2023. **2. rok (izvanredni):** 10. 7. 2023. **3. rok:** 18. 9. 2023.	**1. rok:** 27. 2. – 3. 3. 2023. **2. rok (izvanredni):** 14. 7. 2023. **3. rok:** 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:
Prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA II
POPIS TABLICA III
POPIS OZNAKA IV
SAŽETAK V
SUMMARY VI
1. UVOD 1
2. BRZOREZNI ČELICI 2
2.1. Kemijski sastav i podjela brzoreznih čelika 2
2.2. Toplinska obrada brzoreznih čelika 4
3. BUŠENJE 6
3.1. Općenito o bušenju 6
3.2. Parametri bušenja 7
4. PREVLAČENJE SVRDLA IZ PARNE FAZE 8
4.1. Podjela postupaka prevlačenja 8
4.2. Podjela postupaka prevlačenja prema mehanizmu prevlačenja 9
4.3. PVD postupak 10
4.4. CVD postupak 11
4.5. PACVD postupak 13
4.6. Prevlake dobivene PACVD postupkom 16
5. PREVLAČENJE SVRDLA I PLAN ISPITIVANJA 22
5.1. Plan pokusa i materijal ispitnih uzoraka 22
5.2. PACVD prevlačenje svrdla 23
5.3. Ispitivanje trošenja svrdala 25
6. REZULTATI KARAKTERIZACIJE ISPITNIH UZORAKA 27
6.1. Ispitivanje kemijskog sastava svrdla 27
6.2. Ispitivanje tvrdoće 29
6.3. Određivanje debljine prevlake 32
6.4. Određivanje prionjivosti prevlake 34
6.5. Analiza mikrostrukture neprevučenih i prevučenih svrdla 35
7. REZULTATI TROŠENJA SPIRALNIH SVRDLA 36
7.1. Izgled rezne oštrice svrdla prije ispitivanja trošenja 36
7.2. Trošenje oštrice svrdla nakon 30 sekundi bušenja 37
7.3. Izgled provrta u aluminijskom disku 42
7.4. Mjerenje dubine provrta 43
7.5. Snimanje temperature svrdla 44
8. ZAKLJUČAK 48
LITERATURA 49

POPIS SLIKA

Slika 1. Toplinska obrada brzoreznih čelika 5
Slika 2. Svrdlo u zahvatu 6
Slika 3. Sile koje se javljaju kod bušenja, brzine i kutovi rezne oštrice 7
Slika 4. Podjela postupaka prevlačenja 9
Slika 5. Shema uređaja za PVD postupak [7] 11
Slika 6. Shema uređaja za CVD postupak [7] 12
Slika 7. PACVD uređaj [8] 13
Slika 8. Shema uređaja za PACVD postupak [3] 14
Slika 9. TiN prevlaka na ureznicima navoja [12] 16
Slika 10. TiCN prevlaka na razvrtalu [14] 17
Slika 11. TiAlN prevlaka na prstastom glodalu [17] 18
Slika 12. TiBN prevlaka [19] 19
Slika 13. DLC prevlaka na glodalima za zupčanike [21] 20
Slika 14. Odmašćivanje svrdla u ultrazvučnoj kupci 23
Slika 15. Postavljanje svrdla na napravu za prevlačenje u vakuumskoj komori PACVD ... 23
Slika 16. Oznake svrdla 25
Slika 17. Bušilica – glodalica PROXXON BFW 40/E s koordinatnim stolom [22] 26
Slika 18. Termografska kamera NFRATEC VarioCAM HD 800 26
Slika 19. Bušenje rupe u aluminijevom disku 26
Slika 20. Ispitivanje kemijskog sastava svrdla XRF uređajem 27
Slika 21. Ispitivanje mikrotvrdoće svrdla: a) tvrdomjer Wilson-Wolpert Tukon 2100B, b) priprema svrdla za ispitivanje tvrdoće 29
Slika 22. Prikaz metalografski pripremljenih uzoraka 30
Slika 23. Prikaz metalografski pripremljenog uzorka s presjekom svrdla S0-1, S1-1 i S2-1 32
Slika 24. Debljina prevlake PACVD TiN na uzorku S1-1 32
Slika 25. Debljina prevlake PVD TiN na uzorku S2-1 33
Slika 26. Usporedba prionjivosti a) PACVD TiN, b) PVD TiN 34
Slika 27. Mirkostruktura neprevučenog svrdla 35
Slika 28. Usporedba mikrostrukture jezgre svrdla prevučenog: a) PACVD TiN prevlakom, ... 35
Slika 29. Označavanje rupa na aluminijskim diskovima nakon zadanog vremenskog intervala bušenja 37
Slika 30. Mjerenje dubine provrta 43
Slika 31. Dubina provrta S0-S2-1 za određene intervale bušenja 43
Slika 32. Dubina provrta S1-2, S1-3 i S2-1 za određene intervale bušenja 44
Slika 33. Ovisnost temperature na vrhu svrdla i intervala bušenja za svrdla S0, S1-1 i S2-1 44
Slika 34. Termografska snimka procesa bušenja i položaj mjernih točaka P1 i P2 45
Slika 35. Termogram- ovisnosti temperature vrha svrdla (krivulja P1) i aluminjevog diska (krivulja P2) o vremenu bušenja tijekom intervala bušenja od 90 s do 120 s za svrdlo s prevlakom: a) PACVD TiN, S1-3, b) PVD TiN, S2-1 47

POPIS TABLICA

Tablica 1. Primjeri primjene brzoreznih čelika [1] 3
Tablica 2. Usporedba PVD, CVD i PACVD postupka [14] 15
Tablica 3. Parametri prevlačenja spiralnih svrdla PACVD postupkom 24
Tablica 4. Kemijski sastav neprevučenog svrdla S0 određen XRF analizom 27
Tablica 5. Kemijski sastav svrdla S2-1 prevučenog prevlakom PVD TiN određen XRF analizom 28
Tablica 6. Tvrdoća drške neprevučenog svrdla S0 29
Tablica 7. Tvrdoća drške svrdla prevučenog prevlakom PACVD TiN (uzorak S1-1) 29
Tablica 8. Tvrdoća drške svrdla prevučenog prevlakom PVD TiN (uzorak S2-1) 30
Tablica 9. Tvrdoća jezgre neprevučenog svrdla S0 30
Tablica 10. Tvrdoća jezgre prevučenog svrdla PACVD TiN S1-1 31
Tablica 11. Tvrdoća jezgre prevučenog svrdla PVD TiN S2-1 31
Tablica 12. Tvrdoća aluminijskog diska 31
Tablica 13. Početno stanje svrdla 36
Tablica 14. Izgled svrdla nakon 30 sekundi bušenja 38
Tablica 15. Izgled svrdla nakon 60 sekundi bušenja 39
Tablica 16. Izgled svrdla nakon 90 sekundi bušenja 40
Tablica 17. Izgled svrdla nakon 120 sekundi bušenja 41
Tablica 18. Izgled rupe u aluminijevom disku nakon 120 sekundi bušenja 42

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
D	mm	promjer svrdla
d	μm	debljina prevlake
d_p	mm	dubina provrta
f	mm/okr.	posmak po okretaju
F	N	sila na dinamometru
F_c	N	obodna sila
F_f	N	posmična sila
F_p	N	poprečna sila
n	min^{-1}	brzina rotacije svrdla
p	mbar	tlak u vakuumskoj komori
P	W	snaga plazme
P_1	-	mjerna točka na vrhu svrdla
P_2	-	mjerna točka na aluminijskom disku
S0	-	neprevučeno svrdlo
S1-1	-	svrdlo prevučeno PACVD TiN
S1-2	-	svrdlo prevučeno PACVD TiN
S1-3	-	svrdlo prevučeno PACVD TiN
S2-1	-	svrdlo prevučeno PVD TiN
U	V	napon generatora plazme
v_c	m/s	obodna brzina svrdla
v_f	mm/s	posmična brzina svrdla
α_0	°	prednji kut rezne oštrice
β_0	°	kut klina
γ_0	°	stražnji kut rezne oštrice
ϑ	°C	temperatura
μ	-	koeficijent trenja

SAŽETAK

Kada se ispituje trošenje svrdla postoji niz modela trošenja koji se uglavnom primjenjuju kod obrade metalnih materijala. Prilikom rada svrdla su izložena visokim mehaničkim i toplinskim naprezanjima te se prevlačenjem svrdla povećava otpornost trošenju. Najčešće prevlake koje se koriste kod prevlačenja svrdla su PACVD TiN i PVD TiN.

U teorijskom dijelu ovog rada opisani su brzorezni čelici od kojih izrađuju svrdla, njihova mikrostruktura, toplinska obrada te postupci prevlačenja iz parne faze. Opisana je geometrija oštrice spiralnog svrdla i sile rezanja kod bušenja te procesi trošenja svrdla.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je prevlačenje svrdla od brzoreznog čelika prevlakom PACVD TiN. Na prevučenim svrdlima ispitana je mikrostruktura, tvrdoća, debljina i prionjivost prevlake.

Provedeno je niz bušenja u aluminijevom disku s neprevučenim svrdlom, svrdlom s prevlakom PACVD TiN i komercijalno dobavljivim svrdlom s prevlakom PVD TiN. Tijekom bušenja u ukupnom trajanju od 120 s, svjetlosnom mikroskopijom dokumentirano je trošenje svrdla svakih 30 s. Termografskom kamerom je mjerena temperatura oštrice svrdla i aluminijskog diska. Obje vrste prevučenih svrdla pokazala su manje trošenje oštrice od neprevučenih svrdla. Svrdlo s PACVD TiN prevlakom više se ugrijavalo pri bušenju u odnosu na neprevučeno i svrdlo s PVD TiN prevlakom.

Ključne riječi: svrdlo, prevlaka PACVD TiN, prevlaka PVD TiN, trošenje svrdla

SUMMARY

When testing the wear of drill bits, there is a number of wear models that are mainly used in the processing of metal materials. During operation, the drill bits are exposed to high mechanical and thermal stresses, and by coating the drill bit, the resistance to wear increases. The most common coatings used when coating drills are PACVD TiN and PVD TiN.

In the theoretical part of this paper, the high-speed steel which the drills are made of, their microstructure, heat treatment and vapor phase coating procedures are described. The geometry of the spiral drill blade and the cutting force during drilling are described, as well as the wear processes of the drill bit.

In the experimental part, high-speed steel drills were coated with PACVD TiN coating. The microstructure, hardness, thickness and adhesion of the coating were tested on the coated drill bits.

A series of drills were performed on an aluminum disc with an uncoated drill bit, a PACVD TiN coated drill bit, and a commercially available PVD TiN coated drill bit. During drilling for a total duration of 120 s, the wear of the drill bit was documented with light microscopy every 30 s. The temperature of the drill blade and the aluminum disc was measured with a thermographic camera. Both types of coated drills showed less blade wear than uncoated drills. The drill bit with PACVD TiN coating heated up more when drilling compared to the uncoated drill bit and drill bit with PVD TiN coating.

Key words: drill bit, PACVD TiN coating, PVD TiN coating, drill bit wear

1. UVOD

Svrdla su rezni alati kojima se bušenjem izrađuju prolazne i neprolazne rupe s promjerom u grubljoj toleranciji. Točnost i preciznost izrade promjera ovisi o dubini promjera, konstrukciji i alatnom materijalu svrdla, svojstvima materijala obratka, trošenju rezne oštrice, vibracijama vretena bušilice, zagrijavanju i podmazivanju svrdla, naljepljivanju odvojenih čestica i parametrima bušenja. Razvoj metalnih materijala usmjeren prema primjeni materijala povišene čvrstoće i duktilnosti postavlja zahtjeve za većom otpornošću na trošenje i popuštanje te žilavosti materijala za izradu svrdla. U radu će se opisati i ispitivati otpornost na trošenje spiralnih svrdla za bušenje metalnih materijala. Uobičajeni alatni materijali koji se primjenjuju za izradu spiralnih svrdla su konvencionalno proizvedeni alatni čelik za hladni rad i brzorezni čelik. Alatni čelici za hladni rad primjenjuju se za svrdla koja će u radu biti izložena temperaturama do 200 °C, dok se svrdla od brzoreznog čelika u radu mogu zagrijavati do 600 °C. Svrdlo je u radu izloženo složenim pojedinačnom i međusobnom djelovanju mehaničkih, toplinskih, korozijskih i triboloških procesa čiji učinci ovise o materijalu svrdla, obrađivanom materijalu, konstrukciji i karakteristikama svrdla, parametrima obrade te okolišu u kojem se ono koristi. Prilikom zahvata svrdla i obratka dolazi do mehaničkih naprezanja i trošenja rezne oštrice svrdla.

Otpornost na trošenje spiralnih svrdla za bušenje metala može se povećati nanošenjem tvrdih prevlaka iz parne faze postupcima fizikalnog naparivanja (PVD) i plazmom potpomognutim kemijskim prevlačenjem iz parne faze, PACVD (eng. *Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition*). Postupak PACVD je primjenjiv na različitim kvalitetama čelika pa je tako primjenjiv na brzoreznim čelicima, alatnim čelicima za hladni i alatnim čelicima za topli rad.

U radu će se ispitivati otpornost na trošenje neprevučenih svrdala od brzoreznog čelika te svrdala prevučenih prevlakom TiN, nanesenom PACVD postupkom tijekom bušenja provrta u aluminijevoj ploči.

2. BRZOREZNI ČELICI

2.1. Kemijski sastav i podjela brzoreznih čelika

Brzorezni čelici su alatni čelici predviđeni za rad u uvjetima povišene i visoke temperature oštrice tj. za rezanje velikim brzinama. Najčešće su svrdla od brzoreznog čelika u radu izložena lokalnom zagrijavanju do ≈600 °C, trošenju te udarnom djelovanju tvrdih faza iz mikrostrukture obratka na reznu oštricu alata. Kemijski sastav ove skupine čelika karakterizira povišeni udio ugljika (0,7-1,3%) i legiranje jakim karbidotvorcima poput kroma, volframa, vanadija i molibdena. Povišeni udio ugljika utječe na stvaranje karbida koji su postojani i pri povišenim temperaturama. Poput svih alatnih čelika brzorezne čelike karakterizira višefazna mikrostruktura sastavljena od metalne osnove i karbida. Kompleksna legiranost brzoreznih čelika uzrokom je pojave različitih vrsta karbida.

Najčešće se javljaju karbidi tipa M_6C (npr. Fe_3W_3C, Fe_4W_2C), $M_{23}C_6$ (npr. $Cr_{23}C_6$), MC (npr. VC, V_4C_3), M_2C (npr. W_2C, Mo_2C). Navedeni sastav i postignuta mikrostruktura brzoreznih čelika dovodi do postizanja izvrsne otpornosti na trošenje i popuštanje pri radnim temperaturama od 500 do 600 °C. Međutim, visoki udjeli karbida u mikrostrukturi uzrokuju izrazito nisku žilavost. Budući da brzorezni čelici podrazumijevaju izrazito visok stupanj legiranosti predstavljaju najskuplju skupinu alatnih čelika. Visok udio legirajućih elemenata osigurava brzoreznim čelicima ledeburitnu mikrostrukturu koju karakterizira povećana krhkost.

Prema kemijskom sastavu brzorezni čelici se mogu podijeliti u sljedeće skupine: [1]

- čelici s 18% volframa (npr. S 18-0-1, S 18-1-2-10),
- čelici s 12% volframa (npr. S 12-1-4, S 12-1-2-5),
- čelici s 10% volframa (npr. S 10-4-3-10),
- W-Mo čelici (npr. S 6-5-2, S 6-5-2-5),
- Mo-čelici (npr. S 2-9-1),

Tablica 1. Primjeri primjene brzoreznih čelika [1]

Oznaka čelika VDEh	**Primjeri primjene**
S18-0-1 (0,75% C)	Zbog svoje opće neosjetljivosti pri toplinskoj obradbi često se primjenjuje za: spiralna svrdla, narezna svrdla, glodala, igle za provlačenje, alate s finom oštricom, tokarske i blanjačke noževe, razvrtala.
S18-1-2-5 (0,80% C)	Tokarski i blanjački noževi za grubu obradu, alati za obradu austenitnih čelika i vatrootpornih čelika.
S18-1-2-10 (0,75% C)	Sve vrste alata za grubu obradu odvajanjem čestica, alati koje je teško intenzivno hladiti ili podmazivati, rezni alati za austenitne i vatrootporne čelike, tvrdi ili žilavi lijev, čelični lijev i neželjezne metale.
S12-1-2-5 (0,80% C)	Alat za grubu obradu, za ljevove i vatrootporne čelike.
S12-1-4 (1,25% C)	Alati za finu obradu, glodala, profilirani rezni alati, razvrtala, alati za rad na automatima, odrezni noževi.
S12-1-2 (0,95% C)	Rezni alati za obradu materijala srednje čvrstoće, tokarski noževi, glodala, profilna glodala, razvrtala, kružne i tračne pile za metal i drvo, spiralna svrdla.
S12-1-4-5 (1,35% C)	Tokarski noževi za finu obradu i za obradu na automatima, alat za narezivanje, alat za rad uz nedovoljno hlađenje.
S10-4-3-10 (1,30% C)	Tokarski noževi i glodala za fini i za grubi rad, alat za drvo, profilirani alat, alat za rad na automatima.
S6-5-2 (0,90% C)	Spiralna svrdla, glodala, razvrtala, alat za navoje, igle za provlačenje, segmenti kružnih pila, udarno opterećen alat, tračne pile za metal, kalupi za hladno oblikovanje lima, štance za toplo opsijecanje (otkovaka).
S6-5-2-5 (0,80%C)	Rezni alati za najteže uvjete grube obrade, udarno opterećeni alati, alati za obradu drva, spiralna svrdla za teški rad.
S2-9-1 (0,80% C)	Narezna i spiralna svrdla, glodala, razvrtala, igle za provlačenje (vrlo osjetljiv na toplinsku obradbu).

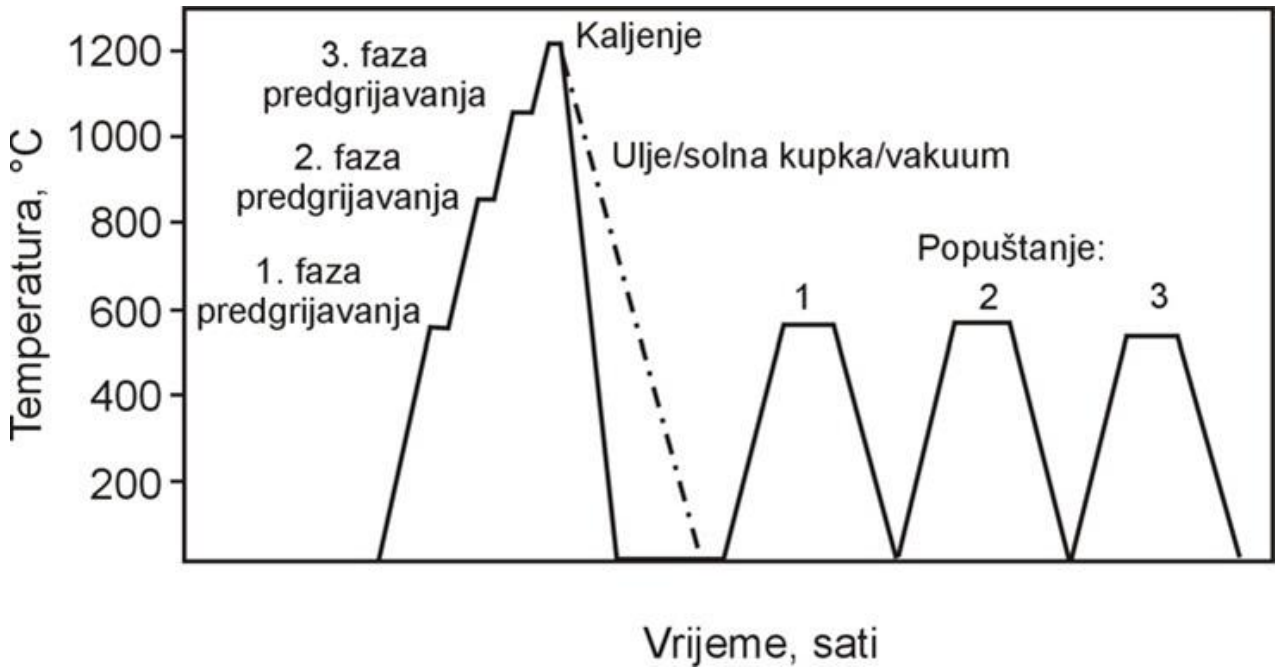
2.2. Toplinska obrada brzoreznih čelika

Brzorezni čelici se uobičajeno isporučuju u meko žarenom stanju (tvrdoće od 240 do 300 HB). Budući da pripadaju grupi ledeburitnih (podeutektičkih) čelika temperatura austenitizacije ove skupine čelika je izrazito visoka (od 1200 do 1300 °C), tj. svega 20 °C ispod solidus temperature. Pri tim temperaturama austenit otapa dovoljno ugljika (od 0,5 do 0,6%) što je glavni preduvjet za postizanje visoke tvrdoće martenzita nakon kaljenja. Radi postizanja dovoljnog sadržaja ugljika u austenitu na temperaturi austenitizacije treba se raspasti i oko 2/3 volumena svih karbida (nalaze se u obliku karbidne mreže) te njihove sastavne dijelove otopiti u austenitu. Otapanje karbida je difuzijski proces ovisan o temperaturi i vremenu držanja na toj temperaturi (austenitizacije). Kod nedovoljnog vremena austenitizacije ne postiže se dovoljna koncentracija ugljika u austenitu.

Nasuprot tome, predugo držanje na visokim temperaturama uzrokovat će porast austenitnog zrna. Stoga je nužno za svaki brzorezni čelik utvrditi optimalne parametre austenitizacije. Radi visokog sadržaja legirajućih elemenata brzorezni čelici imaju slabu toplinsku vodljivost te su vrlo osjetljivi na zagrijavanje. Toplinska obradba brzoreznih čelika je izrazito kompleksna tako da se često provodi predgrijavanje u tri stupnja (550, 850 i 1050 °C) radi osjetljivosti čelika na nagle promjene temperature.

Visoki udio legirajućih elemenata u brzoreznim čelicima utječe na njihovu visoku prokaljivost pa se za gašenje smiju koristiti blaža sredstva poput ulja, termalne kupke (tzv. “martempering“ postupak) ili struje plinova (npr. u vakuumskoj peći). Gašenjem do sobne temperature ne postiže se temperatura završetka martenzitne pretvorbe (Mf) pa se mikrostruktura zakaljenog brzoreznog čelika sastoji od martenzita, zaostalog austenita i neotopljenih karbida (K`` - sekundarni karbidi, Ke – eutektički karbidi).

Nakon popuštanja (s temperature od 540 do 590 °C) iz zaostalog austenita se izdvaja ugljik te nastaju karbidi popuštanja (Kp). Nastankom karbida popuštanja smanjuje se koncentracija ugljika u zaostalom austenitu pa dolazi do porasta temperatura Ms i Mf. Naknadnim hlađenjem do sobne temperature iz zaostalog austenita izdvaja se sekundarni martenzit. Sekundarni martenzit dovodi do pojave sekundarnog otvrdnuća (sekundarna tvrdoća) tako da nakon popuštanja tvrdoća može narasti na ~66 HRC. Uglavnom se provodi višekratno popuštanje (2 do 3 puta) zbog pojačavanja učinka sekundarnog otvrdnjavanja (slika 1.) [1].

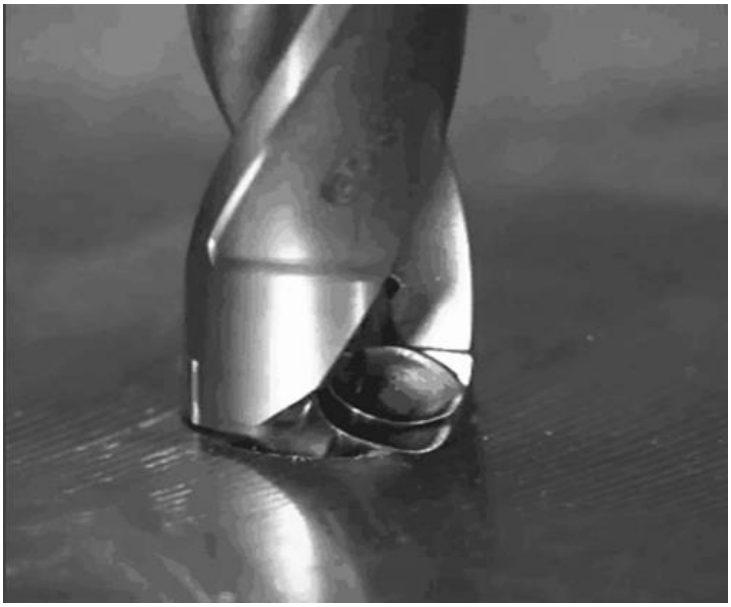


Slika 1. Toplinska obrada brzoreznih čelika

3. BUŠENJE

3.1. Općenito o bušenju

Bušenje je postupak obrade odvajanjem čestica (rezanjem) koji se upotrebljava za bušenje provrta manjih promjera (5-10 mm) ili proširivanje provrta većih promjera. Izvodi se na alatnim strojevima, pretežno bušilicama, pri čemu je glavno gibanje kružno kontinuirano, a posmično gibanje pravolinijsko kontinuirano i izvodi se istodobno kad i glavno gibanje. Ako se obrada izvodi na bušilicama sva gibanja izvodi alat.[2]



Slika 2. Svrdlo u zahvatu

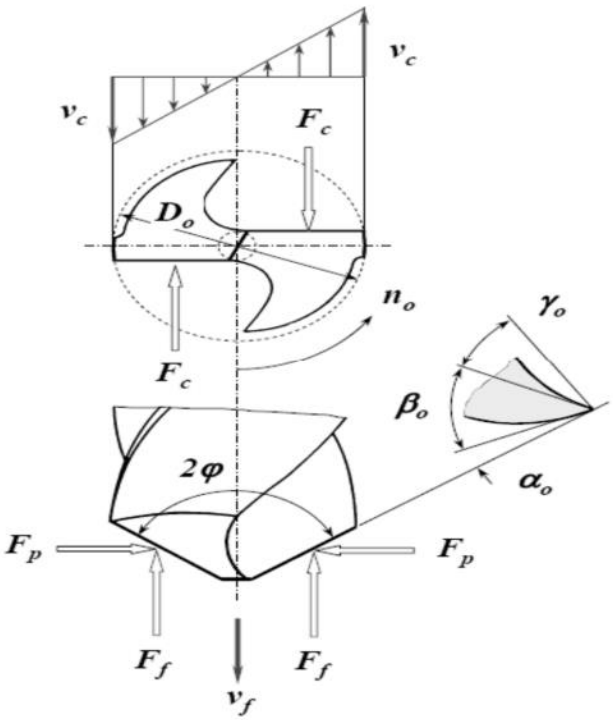
Alat za bušenje je svrdlo, definirane geometrije reznog dijela, s dvije glavne rezne oštrice i jednom poprečnom oštricom koja otežava obradu. Svrdla se dijele na: spiralna svrdla, svrdla za središnje uvrte te posebna svrdla za duboko bušenje.

Bušenje karakterizira:

- promjenjiva brzina rezanja duž glavne oštrice
- promjenjivi kutovi rezanja duž glavne oštrice
- otežano odvođenje odvojene čestice i dovod SHIP-a
- mala krutost sustava

3.2. Parametri bušenja

Osnovni parametri kod bušenja su brzina rezanja, posmična brzina, broj okretaja svrdla, promjer svrdla i dubina bušenja. Brzina rezanja v_c je obodna brzina na svrdlu, tj. brzina s kojom alat obrađuje obradak. Brzina rezanja ovisi o alatu kojim se buši, o potrebnom stanju površine nakon bušenja, o hlađenju za vrijeme bušenja, o snazi stroja te o posmaku. Brzine rezanja se mogu naći u obliku dijagrama, tablica, a ima i programskih podrška koje same računaju potrebne parametre. Posmična brzina v_f je relativna brzina gibanja alata prema obratku, a kod bušenja uvijek je u pravcu osi rotacije. To je brzina ulaza alata u materijal. Posmak po okretaju f (mm/okr) određuje se kao aksijalni pomak alata tijekom jednog okretaja. Koristi se za računanje dubine penetracije, te za definiranje posmaka bušenja. Kut 2φ je nazivni kut rezne oštrice i obično iznosi 118°. Sile koje se javljaju na svrdlu su obodna sila F_c, posmična sila F_f koja djeluje suprotno od posmične brzine v_f te poprečne sile F_p. Svrdlo ima dvije rezne oštrice a svaka rezna oštrica se opisuje trima kutovima. To su prednji kut alata γ_0, kut klina β_0 i stražnji kut alata α_0. Zbroj ova tri kuta nam daje 180°.



Slika 3. Sile koje se javljaju kod bušenja, brzine i kutovi rezne oštrice

4. PREVLAČENJE SVRDLA IZ PARNE FAZE

4.1. Podjela postupaka prevlačenja

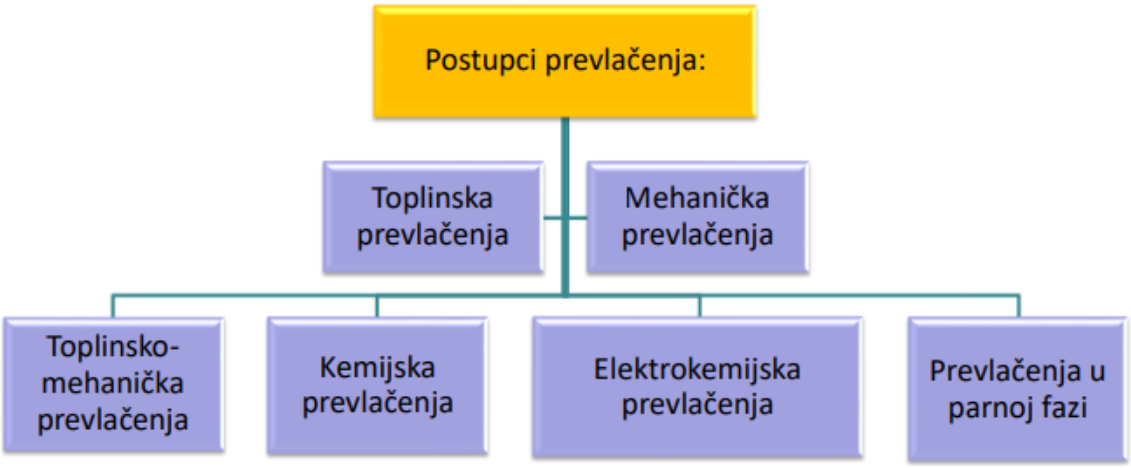
Prevlaka označava sloj materijala koji je prirodnim ili umjetnim putem stvoren na površini, ili je nanesen nekim postupkom na strukturno različiti osnovni materijal u svrhu ispunjavanja odgovarajućih tehnoloških i dekorativnih svojstava. Svrha je zaštitnih prevlaka i premaza da dovoljno dugo štite konstrukcijski materijal na koji su nanesene od štetnih utjecaja okoline, to jest od trošenja korozijom, abrazijom, erozijom ili kavitacijom, od pojava zamora, pukotina, loma i puzanja, bubrenja, razaranja biološkim čimbenicima, oštećivanja svjetlošću ili toplinskim zračenjem itd.

Zaštitna funkcija prevlaka i premaza ostvaruje se prvenstveno odvajanjem materijala podloge od okoline, pa one same moraju biti dovoljno postojane i trajne u uvjetima korištenja. Stoga je najvažnije tehničko svojstvo prevlaka i premaza njihova trajnost, to jest vijek trajanja. Za takozvanu trajnu zaštitu u tijeku korištenja traženi vijek trajanja se mijenja do 10 godina. Samo za takozvanu privremenu zaštitu, to jest za međuoperacijsko, prijevozno, skladišno i sezonsko konzerviranje, trajnost prevlake je od 0,5 do 2 godine[2].

Mnogim prevlakama osnovna svrha nije zaštita materijala, već poboljšanje estetskog izgleda (dekorativne prevlake) ili promjena električnih, toplinskih, optičkih i drugih svojstava površine konstrukcije (funkcionalne prevlake). Neke se prevlake i premazi primjenjuju u svrhu popravka istrošenih ili neispravnih dijelova povećanjem dimenzija do propisanih vrijednosti (reparaturne prevlake). Treba naglasiti da je i za te prevlake vrlo značajna njihova trajnost, pa prema tome i zaštitna uloga, jer bi bez nje svi ostali korisni učinci nanošenja prevlaka i premaza bili kratkog vijeka [2].

4.2. Podjela postupaka prevlačenja prema mehanizmu prevlačenja

Prevlačenje se također dijeli na različite postupke prema mehanizmu prevlačenja koji mogu biti toplinski, kemijski, mehanički ili kombinacija ovih mehanizama (slika 4.) [3, 4]:



Slika 4. Podjela postupaka prevlačenja

• toplinska prevlačenja – primjenom topline tali se metalni materijal koji zatim na površini materijala koji se obrađuje kristalizira, pod ove postupke spadaju navarivanje i uranjanje u rastaljeni materijal

• mehanička prevlačenja – deformacijski se spajaju različiti metalni materijali različitih svojstava, najčešće različitih otpornosti na kemijsko djelovanje, pod ove postupke spadaju valjanje i eksplozijsko spajanje

• toplinsko-mehanička prevlačenja – toplinskom energijom se tali dodatni materijal koji je zatim mehanički usmjeren na površinu obratka gdje čestice dodatnog materijala kristaliziraju, pod ove postupke spadaju naštrcavanje plamenom, naštrcavanje električnim lukom, naštrcavanje plazmom, naštrcavanje detonacijskim pištoljem i naštrcavanje velikim brzinama izgaranja

• kemijska prevlačenja – služe za poboljšavanje otpornosti prema kemijskom djelovanju i korozijskom djelovanju, pod ove postupke spadaju bestrujno niklanje, fosfatiranje, kromiranje i sol-gel postupci

• elektrokemijska prevlačenja – služe za poboljšavanje otpornosti prema kemijskom i korozijskom djelovanju, pod ove postupke spadaju kromiranje, niklanje i galvaniziranje

• prevlačenja u parnoj fazi – kod ovih postupaka dodatni materijal koji se nanosi na materijal koji se obrađuje prije samog nanošenja prolazi kroz parnu fazu, pod ove postupke spadaju postupci kemijskog taloženja iz parne faze (engl. *chemical vapour deposition* -skraćeno CVD), fizikalnog taloženja iz parne faze (engl. *physical vapour deposition* -skraćeno PVD) i postupci plazmom aktiviranog kemijskog taloženja iz parne faze (engl. *plasma activated chemical vapour deposition* -skraćeno PACVD).

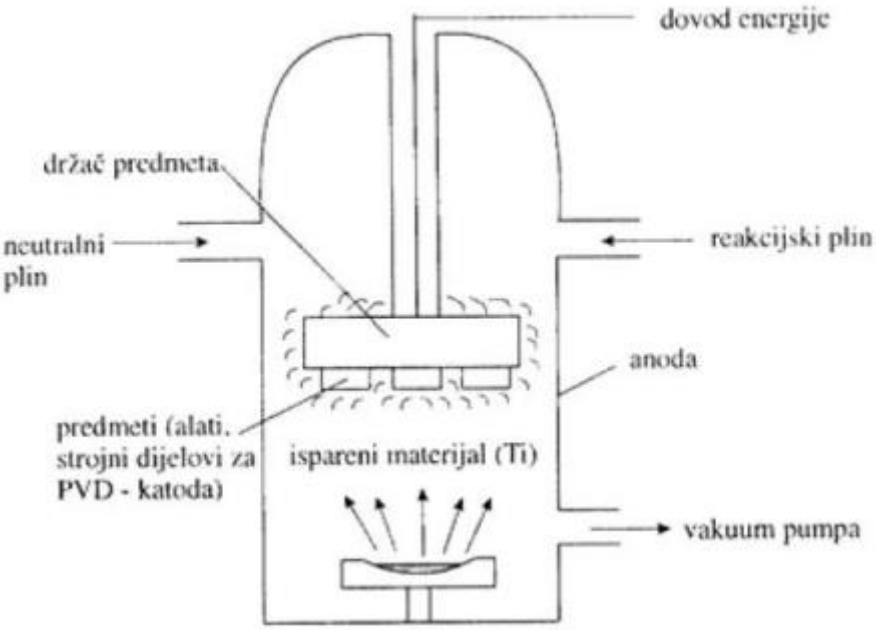
4.3. PVD postupak

PVD (engl., *PVD – Physical Vapour Deposition*) je tzv. fizikalni postupak nanošenja prevlaka iz parne faze. To znači da se deponirani materijal, dobiven na fizikalni način, iz čvrste faze prenosi (naparivanjem ili naprašivanjem) u parnu fazu, od izvora kroz vakuum ili plazmu na osnovni materijal, gdje se naknadno parna faza kondenzira u obliku tankog filma. Ovim se postupkom mogu postići tanke prevlake od gotovo svih elemenata.

Debljina PVD prevlaka je najčešće od 2 μm do 5 μm za jednoslojne te do 15 μm za višeslojne prevlake. Brzina depozicije kod nanošenja PVD prevlaka je 3-18 μm/h. Alati (iz brzoreznih čelika) s PVD prevlakama (TiN) za tribološke primjene koriste se od 1980-ih godina. S PVD prevlakama povećava se otpornost na trošenje, kemijska postojanost u agresivnim uvjetima primjene, smanjuje se koeficijent trenja, povećava se toplinska otpornost i poboljšava izgled proizvoda (dekorativnost). Danas se u industriji alata ne radi bez nanošenja prevlaka jer su troškovi zbog zastoja, kojima je uzrok istrošenost alata, veći od troškova nanošenja prevlaka.

Bitne pretpostavke za dobivanje tankih slojeva PVD postupcima su dovoljno dobra prionjivost između sloja prevlake i osnovnog materijala te kompaktna morfologija sloja (kompaktni fini kristalni stupnjeviti rast kristala u slojevima). Temperature odvijanja PVD postupka su one kod kojih nema faznih transformacija (od 150 do 500 °C) što je i omogućilo brz razvoj ovog postupka. Bitna pozitivna značajka svih PVD postupaka je da nema neke najniže temperature odvijanja procesa, nego je optimalna temperatura osnovnog materijala i maksimalna temperatura kod koje se ne mijenjaju svojstva čvrstoće osnovnog materijala. Na slici 5. prikazan je uređaj za PVD prevlačenje. Kod svih PVD postupaka nanošenje tankih slojeva odvija se u tri faze [5]:

- 1. faza: isparavanje- čestice s izvora prelaze iz čvrstog u plinovito stanje
- 2. faza: transport- automarni transport s izvora na supstrat
- 3. faza: izdvajanje- čestice prelaze iz plinovitog u čvrsto stanje na supstrat



Slika 5. Shema uređaja za PVD postupak [7]

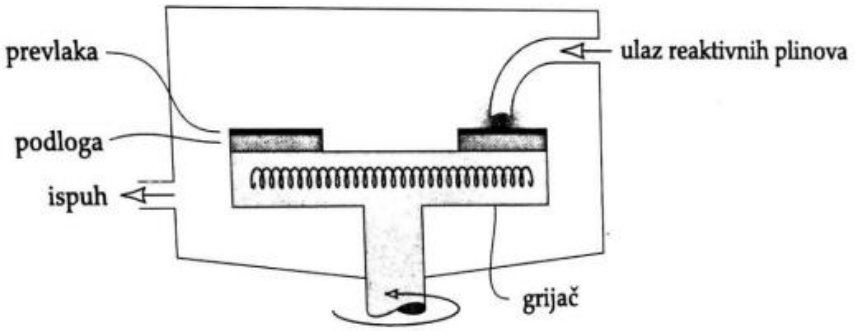
4.4. CVD postupak

CVD (engl., Chemical Vapour Deposition) je postupak nanošenja slojeva u parnoj fazi kemijskim putem, a uključuje interakciju između smjese plinova u aktiviranom okolišu (toplina, svjetlo, plazma) i površine zagrijanog osnovnog materijala. Princip postupka CVD temelji se na kemijskom raspadu nekih od korištenih plinskih konstituenata i kemijskim reakcijama jednog ili više plinovitih spojeva drugim parnim i plinovitim fazama za dobivanje gustoga,

krutoga i stabilnog sloja ili prevlake na zagrijanom supstratu [5]. Ovim postupkom smanjuje se trošenje na osnovi snižene adhezije i abrazije. Smanjena adhezija utječe na sniženje trenja i opasnosti od hladnog navarivanja, a samim time u odnosu na neprevučene alate omogućuje veću brzinu rezanja, višu trajnost te viši stupanj deformacije kod oblikovanja.

Za postupak CVD prikladni su praktično svi čelici, no prednost će imati čelici kojima je uobičajena temperatura austenitizacije od 900 do 1000°C i koji su kaljivi ohlađivanjem na zraku, kada i nije bezuvjetno nužno nakon CVD-a i popuštanja još ponavljati kaljenje i popuštanje.

S obzirom na veliki broj tvari - sudionika u procesima, treba računati i na male sekundarne reakcije, za koje iskustvo pokazuje da ponajprije ovise o temperaturama isparavanja halogenida (CI, Br) pa tako npr. željezni klorid sprečava taloženje TiC. Zato se smjesi plinova dodaju neki CN-spojevi (tzv. nitrili) koji nadomještaju Fe-kloride. Na međuplohi sloj/metal stvara se, u fazi nukleacije sloja, vrlo sitno zrno, no pri rastu sloja ono štapićasto raste. Ugljik difundira u sloj iz čelične podloge u fazi rasta sloja. Sve je ovo uzrokom da se u međuplohi TiC/podloga stvara perlitno-bainitna struktura (no ispod nje, stvara se nužno, zbog odlaska ugljika), nekoliko mikro mm debeo razugljičeni sloj. Debljina CVD slojeva u pravilu je oko 10 μm, a samo iznimno do 30 μm [7]. Na slici 6. prikazana je shema vakuumske komore za CVD postupak prevlačenja.



Slika 6. Shema uređaja za CVD postupak [7]

4.5. PACVD postupak

Slika 7. PACVD uređaj [8]

Vakuumska komora peći i osnovni sklopovi postrojenja za PACVD (engl. *plasma-assisted chemical vapour deposition*) postupak prikazani su na slici 8. U vakuumsku komoru se uvode pare prekursora (Ti_4Cl, B_3Cl) i plinovi (N_2, H_2, Ar, CH_4) iz kojih u kemijskim reakcijama, potaknuti djelovanjem električne plazme i topline nastaju mikrokapljice prevlake (npr. TiN, TiCN, TiBN). Mikrokapljice materijala prevlake talože se na vanjske i unutrašnje površine obratka, površinu držača obratka i unutrašnje stjenke vakuumske komore. Za razliku od PVD prevlačenja u PACVD postupku nema potrebe za rotacijom obratka niti postizanjem direktne vidljivosti od sapnica za ubacivanje para prekursora do površine obratka. Ovo omogućuje prevlačenje velikih alata i dijelova kao i prevlačenje provrta i neprolaznih rupa. Ostale prednosti PACVD postupka su niža temperatura prevlačenja u odnosu na CVD postupak, prevlake nanose na temperaturama od 400°C do 600°C te viši tlak u vakuumskoj komori u odnosu na PVD postupak (tlak u komori za PACVD postupak iznosi od 1 do 500 Pa). Zbog nižih temperatura moguće je prevlačiti materijale čije prevlačenje nije moguće CVD postupcima bez lošeg utjecaja na površinu. PACVD postupkom dobivaju se bolja mehanička i tribološka svojstva zbog homogenosti strukture i smanjenja nečistoća što se postiže bombardiranjem energetskim česticama. Bolja je i prionjivost prevlake, dobiva se sitnozrnata struktura, smanjen je iznos zaostalih tlačnih naprezanja te je manja površinska hrapavost. U prevlaci mogu ostati zarobljeni plinovi koji utječu na stabilnost prevlake [3,9].

PACVD postupci variraju u ovisnost o tipu plazme koja se koristi, a to su:

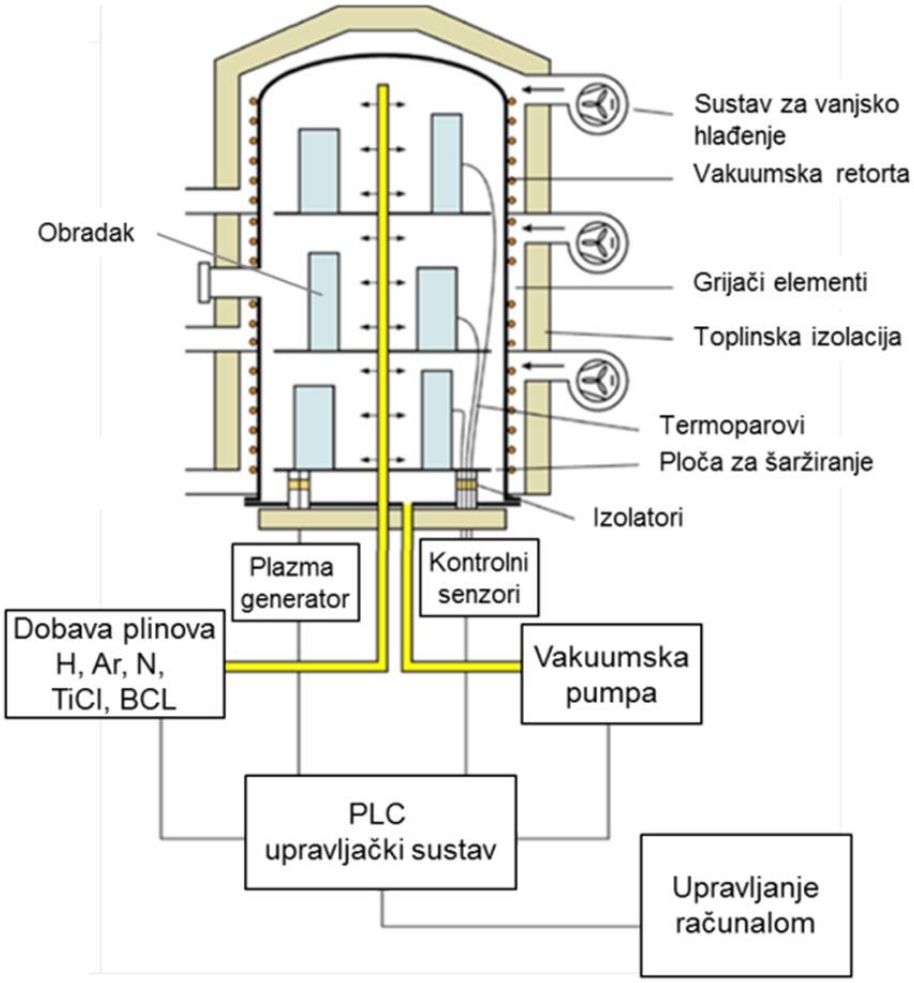
• plazma istosmjerne struje

• plazma izmjenične struje

• radiofrekventna plazma

• mikrovalna plazma

• impulsna plazma



Slika 8. Shema uređaja za PACVD postupak [3]

Uobičajeni parametri PACVD postupka i prevlake koje se njime nanose jesu slijedeći [3]:

• temperatura prevlačenja: 300 °C ili 400 do 600 °C,

• tlak: 3 Pa do 10 Pa ili 10 Pa do 1000 Pa,

• napajanje generatora plazme: istosmjerna ili izmjenična struja različitih frekvencija,

• debljina sloja prevlake: 1 μm do10 μm,

• vrste prevlaka: TiN, TiBN, TiC, TiCN, TiAlN, Al_2O_3 , DLC,

• reakcijski plinovi: N_2, H_2, Ar, CH_4 , $TiCl_4$, $AlCl_3$, CO_2

• prekursori: $TiCl_4$, $AlCl_3$, CO_2

U donjoj tablici 2 uspoređene su glavne karakteristike PVD, CVD i PACVD postupka i njihova primjena. Za prevlačenje reznih alata od brzoreznih čelika najprikladniji je PACVD postupak zato što je taj postupak kombinacija prednosti PVD i CVD postupaka. PACVD postupak ima nisku temperaturu postupka od 480 do 580 °C te tako omogućuje obradu kaljenih alata koji su izrađeni na konačnu mjeru (nema promjene u dimenzijama). Tako niske temperature postupka omogućuju da se materijal dodatno ne popusti jer je popuštanje provedeno na višoj temperaturi od temperature prevlačenja. Neke od prednosti su i to što nije potrebna rotacije šarže (komadi koji se prevlače mogu biti komplicirane geometrije, veliki i teški), niži su troškovi od ostalih postupaka jer nije potreban visoki vakuum pa pumpa radi kratko vrijeme itd.

Tablica 2. Usporedba PVD, CVD i PACVD postupka [8]

	PVD	CVD	PA CVD
Temperatura (°C)	200 - 500	800 - 1000	470 - 580
Kaljenje poslije prevlačenja	ne	potrebno	ne
„line of sight" postupak	da	ne	ne
Pomicanje šarže	potrebno	ne	ne
Površina	glatka	gruba	vrlo glatka
Poliranje poslije prevlačenja	ovisno	potrebno	ne
Duplex proces	moguće	ne	moguće
Prionjivost na tvrde metale	vrlo dobra	vrlo dobra	prosječno
Troškovi održavanja	vrlo visoki	niski	niski
Troškovi pogona	visoki	niski	niski
Troškovi ulaganja	visoki	niski	prosječni
Uglavnom primjenjivo na...	reznim alatima, TC	dijelovima gdje su prihvatljive deformacije	veliki alati i kalupi

4.6. Prevlake dobivene PACVD postupkom

Titan nitrid

Titan nitrid jedna je od prvih prevlaka uspješno dobivenih PACVD postupkom. Prevlaka posjeduje dobra fizička i mehanička svojstva, uključujući visoku tvrdoću, otpornost na trošenje, te kemijsku inertnost. TiN prevlaka također može smanjiti trenje između alata i uzorka, smanjuje zagrijavanje površine i povećava vijek alata. TiN se može prevlačiti već na 400°C pomoću PACVD, ali snižavanjem temperature, veći je sadržaj klora ako se koristi TiCl4 kao prekursor. Visok udio Cl utječe na otpornost na koroziju. Korištenjem vodika može se smanjiti koncentracija Cl na 1% na 200°C [10].

Alatna primjena prevlake TiN (slika 9.):

- osnovna prevlaka za rezne alate
- alati za bušenje i hladno oblikovanje
- prevlake za materijale s niskom tvrdoćom

Karakteristike prevlake TiN [10]:

- mikrotvrdoća 2500 HV 0,025
- debljina sloja 1 do 6 μm
- koeficijent trenja $\mu = 0,4$
- temperatura prevlačenja $\vartheta = 150$ do 600 °C
- radna temperatura $\vartheta = 500$ °C
- zlatna boja prevlake

Slika 9. TiN prevlaka na ureznicima navoja [12]

Titan karbonitrid

Titan karbonitrid (TiCN) predstavlja još jedan spoj iz skupine neoksidne keramike koji se koristi u sličnim uvjetima kao i TiN, pa ima i slična svojstva kao što su visoko talište, visoka tvrdoća, a time i otpornost na abrazijsko trošenje, niski faktor trenja, dobra adhezivna svojstva i sl. Za razliku od TiN, tvrdoća TiCN je nešto viša, ali je oksidacijska otpornost samo do 350 °C, dok je kod TiN 500 °C. Specifičnost ovog sloja je u dodavanju dvaju reaktivnih plinova (dušik i neki od ugljikovodika – metan, etan ili eten). U dodiru s čelicima, faktor trenja je mnogo niži nego kod TiN, stoga, kod TiCN prevlaka prevladava adhezijsko trošenje, dok je kod TiN dominantno svojstvo otpornost na abrazijsko trošenje [13].

Alatna primjena primjena prevlake TiCN:

- alati opterećeni na visoka mehanička naprezanja (slika 10.)
- alati za oblikovanje, prešanje, rezanje i savijanje
- prevlačenje provrta

Karakteristike prevlake TiCN [12]:

- mikrotvrdoća 3000 HV 0,025
- debljina sloja 2 do 3 μm
- koeficijent trenja $\mu = 0,3$
- temperatura prevlačenja $\vartheta = 520$ °C
- radna temperatura $\vartheta = 450$ °C
- plavo-siva boja prevlake

Slika 10. TiCN prevlaka na razvrtalu [14]

Titan aluminij nitrid

U višekomponentnim prevlakama kao što je prevlaka TiAlN, aluminij je supstitucijski element za titan, pa se struktura prevlaka mijenja zbog varijacija u polumjerima atoma Ti i Al. Zbog izobličenja kristalne strukture prevlake TiAlN, zaostalo naprezanje prevlake veće je u usporedbi s prevlakom TiN. Kao rezultat i zbog učinka krute otopine, postoji mogućnost povećanja vrijednosti tvrdoće. S druge strane, tribološka svojstva prevlake će se promijeniti deformacijom mikrostrukture prevlake.

Nanostruktura prevlake TiAlN tvori gusti, zaštitni sloj aluminijevog okisda (Al_2O_3) za zaštitu prevlake i njegove podloge, tj. osnovnog materijala. Osim toga, sloj Al_2O_3 pruža dobru toplinsku zaštitu protiv oksidacije ostatka TiAlN prevlake na visokim temperaturama [15].

TiAlN se obično oblaže na alatima za rezanje velike brzine koji se koriste na CNC strojevima za obradu materijala veće žilavosti i pri teškim uvjetima rezanja (slika 11.). TiAlN je posebno prikladan za monolitna glodala od tvrdog metala, svrdla, umetke alata za rezanje i noževe za oblikovanje [16].

Slika 11. TiAlN prevlaka na prstastom glodalu [17]

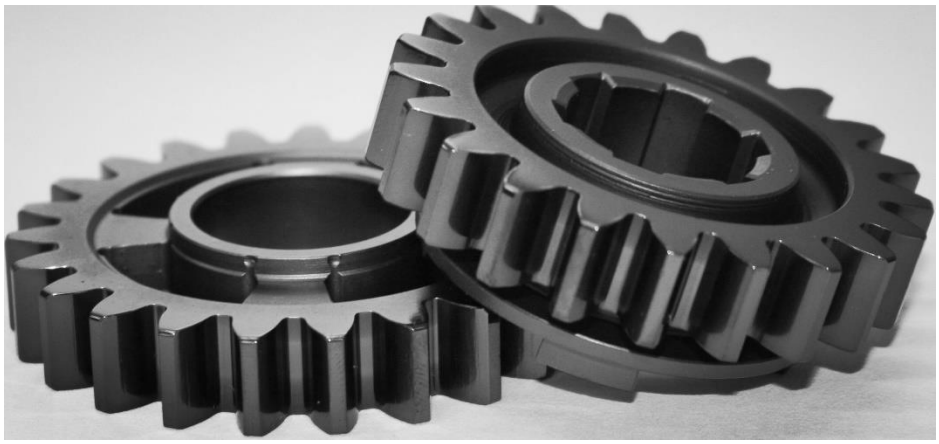
Titan bor nitrid

U posljednjih nekoliko godina otkriveno je da nanokompozitne prevlake TiBN imaju visoku tvrdoću s visokom žilavošću, nisko trenje i veliku kemijsku otpornost, što ih čini potencijalnim kandidatima za prevlake za zaštitu od trošenja za razne industrijske primjene, posebice za rezne alate. TiBN prevlake imaju prednost u odnosu na druge prevlake kada govorimo o strojnoj obradi lijevanog aluminija, ali i ljevova od drugih lakih metala. TiBN prevlake su višefazni materijali koji imaju kompleksne fazne dijagrame. Kontrola poželjnih faza tijekom nanošenja TiBN prevlaka je ključna za pripremu prevlaka sa željenim svojstvima. Na primjer, utvrđeno je da nanotvrdoća TiBN prevlaka (od 24 do 34,5 GPa) jako ovisi o dvofaznoj strukturi TiN/(amorfnog) BN. Za postizanje nanotvrdoće od 40GPa za TiBN koji je metastabilna čvrsta otopina B u plošno centriranom kubičnom TiN-u, proces moramo provoditi na nešto nižem parcijalnom tlaku N_2. Daljnjim povećanjem parcijalnog tlaka N_2 nastaje nanokompozit TiN-BN koji ima nanotvrdoću oko 30 GPa. Kako se formiraju kubične BN (c-BN) i/ili heksagonalne BN (h-BN) faze, mogu se postići tvrde TiBN prevlake preferirane faze, koje su zaslužne za dobivanje željenih svojstava TiBN prevlaka [18].

Slika 12. TiBN prevlaka [19]

DLC prevlake

Amorfni hidrogenirani dijamantni ugljik (DLC-engl., *Diamant Like Carbon*) je prevlaka koja sadrži malu količinu titana koja je nanesena na osnovni metal magnetronskim raspršivanjem. Kako bi dijamantni sloj ugljika prionuo na metal, prvo se mora nanijeti neki od četiri vrste međuslojeva, tj. Ti, TiN, TiCN ili TiC. Prednost titana je da dobro prianja na metal, a DLC dobro prianja na TiC sloj. Ukupna debljina DLC sloja je oko 2,0 μm. DLC prevlake pokazale su izvrsna svojstva, tj. visoke vrijednosti mikrotvrdoće (više od 39 GPa), izvrsnu adheziju, koeficijente trenja i iznimno dugo vijek trajanja. Također su provedena tribološka istraživanja DLC prevlaka s drugim materijalima koji se troše. Rezultati su pokazali da DLC premazi imaju iznimno poboljšana svojstva zaštite od trošenja u usporedbi s npr. visokokvalitetnim prevlakama TiN ili TiC [20].



Slika 13. DLC prevlaka na glodalima za zupčanike [21]

EKSPERIMENTALNI DIO

5. PREVLAČENJE SVRDLA I PLAN ISPITIVANJA

5.1. Plan pokusa i materijal ispitnih uzoraka

Pokusima u radu će se ispitivati tri skupine sastavljene od nekoliko spiralnih svrdala promjera 4 mm: neprevučeno svrdlo (S0), prevučeno PACVD TiN prevlakom (S1-1 do S1-3), i komercijalno dobavljivo svrdlo marke Parkside prevučeno prevlakom PVD TiN(S2-1). Polazni materijal svrdla S0 i S1 je isti brzorezni čelik, jer su obje skupine svrdla izabrana iz iste šarže, odnosno nabavljena su 4 neprevučena svrdla, od kojih su tri prevučena PACVD prevlakom TiN.

Prevlačenje svrdla provest će se u PACVD uređaju u Laboratoriju za inženjerstvo površina na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu..

U prvom dijelu ispitivanja, na neprevučenim i prevučenim svrdlima provest će se ispitivanje kemijskog sastava XRF metodom i ispitivanje tvrdoće metodom Vickers. Također će se ispitati tvrdoća aluminijskih diskova metodom Vickers. Na prevučenim svrdlima (S1 i S2) provest će se određivanje prionjivosti prevlake prema normi VDI 3198 i debljine prevlake svjetlosnom mikroskopijom.

U drugom dijelu ispitivanja provest će se bušenje provrta promjera 4 mm u disku od čistog aluminija u četiri intervala po 30 s, odnosno u ukupnom trajanju od 120 s.

5.2. PACVD prevlačenje svrdla

Prije prevlačenja svrdla su odmašćena u ultrazvučnoj kupci u 95 %-tnom etilnom alkoholu u trajanju od 180 sekundi (slika 14.).

Slika 14. Odmašćivanje svrdla u ultrazvučnoj kupci

Nakon čišćenja slijedilo je PACVD prevlačenje u vakuumskoj peći Rübig P70/90 (slika 15.).

Slika 15. Postavljanje svrdla na napravu za prevlačenje u vakuumskoj komori PACVD

Postupak PACVD prevlačenja se sastoji od slijedeće četiri faze: grijanja, ionskog otprašivanja, prevlačenja i hlađenja. Svaki od ovih faza ima svoje parametre temperature, tlaka, vremena, protoka reakcijskih plinova, napona i snage plazme. Parametri prevlačenja svake od faza prevlačenja PACVD TiN prikazani su u donjoj tablici.

Tablica 3. Parametri prevlačenja spiralnih svrdla PACVD postupkom

Parametar	Faza			
	Grijanje	Ionsko otprašivanje	Prevlačenje TiN	Hlađenje
Temperatura ϑ, [°C]	510	520	520	180
Vrijeme t, [h]	3	2	6	4
Tlak u vakuumskoj komori, p, [mbar]	2	2	2	2
Protok H_2, [l/h]	20	200	250	0
Protok N_2, [l/h]	0	20	45	50
Protok Ar, [l/h]	0	10	10	0
Protok TiCl4, [l/h]	0	0	7,5	0
Napon generatora plazme U, [V]	0	365	450	0
Snaga plazme P, [W]	0	2000	3000	0

Ispitni uzorci spiralnih svrdla promjera 4 mm za pokuse trošenja podijeljeni i označeni su prema vrsti prevlake (slika 16.):

- S0 - neprevučeno svrdlo
- S1-1, S1-2, S1-3 – svrdla s prevlakom PACVD TiN
- S2-1 – komercijalno svrdlo s prevlakom PVD TiN

Slika 16. Oznake svrdla

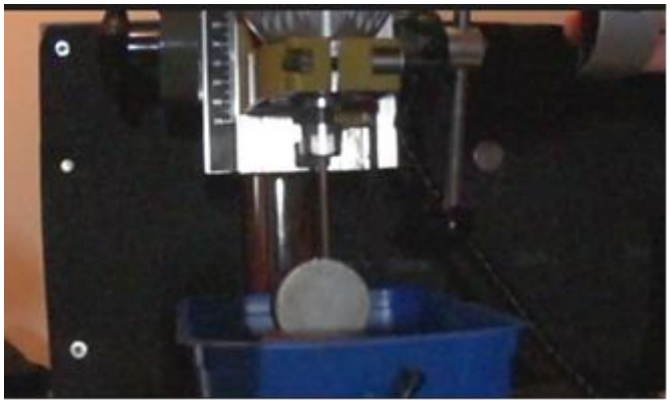
5.3. Ispitivanje trošenja svrdala

Bušenje će biti izvedeno na bušilici PROXXON BFW 40/E (slika 17.) koja ima iznimno miran rad i preciznu glavu te nam može pružiti odlične uvjete bušenja. Bušenje će se izvoditi bez upotrebe sredstva za hlađenje uz snagu bušilice od 250 W. Tijekom bušenja prati se temperatura svrdla termografskom kamerom INFRATEC VarioCAM HD 800 (slika 18.).

U pokusima bušenja aluminijskog diska bušenje se zaustavlja nakon svakih 30 s kako bi se provelo mjerenje dubine izbušene rupe i fotografiranje rezne oštrice svrdla. Na slici 19. prikazan je početak bušenja rupe u aluminijskom disku. Disk je pričvršćen škripcem na koordinatni stol bušilice BFW 40/E, a sila bušenja se ostvaruje spuštanjem vertikalnog klizača bušilice potezanjem poluge dinamometrom s konstantnom silom od 5 ± 1 N. Brzina rotacije svrdla iznosila je 1000 o/min.

Slika 17. Bušilica – glodalica PROXXON BFW 40/E s koordinatnim stolom [22]

Slika 18. Termografska kamera NFRATEC VarioCAM HD 800



Slika 19. Bušenje rupe u aluminijevom disku

6. REZULTATI KARAKTERIZACIJE ISPITNIH UZORAKA

6.1. Ispitivanje kemijskog sastava svrdla

Analiza kemijskog sastava osnovnog materijala svrdala obavljena je u Laboratoriju za površinsku zaštitu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Korišten je uređaj za XRD (engl., *X-ray fluorescent*) analizu Olympus Innov-X (slika 20.). Rezultati XRF analize kemijskog sastava prikazani su u tablicama 4 i 5.

Slika 20. Ispitivanje kemijskog sastava svrdla XRF uređajem

Tablica 4. Kemijski sastav neprevučenog svrdla S0 određen XRF analizom

Neprevučeno svrdlo S0		
Element	Postotak [%]	Pogreška
P	0,009	± 0,002
V	0,556	± 0,04
Cr	6,046	± 0,08
Mn	0,499	± 0,05
Fe	90,72	± 0,31
Mo	1,168	± 0,02
W	0,998	± 0,05

Tablica 5. Kemijski sastav svrdla S2-1 prevučenog prevlakom PVD TiN određen XRF analizom

Prevučeno svrdlo S2-1		
Element	Postotak [%]	Pogreška
P	0,03	± 0,002
V	2,2	± 0,07
Cr	4,08	± 0,07
Mn	0,35	± 0,04
Fe	81,85	± 0,3
Mo	5,17	± 0,03
W	5,05	± 0,11
Ti	0,23	± 0,06
Co	0,91	± 0,08
Cu	0,13	± 0,02

Iz rezultata XRF analize zaključuje se da kemijski sastav prevučenog svrdla S2-1 odgovara brzoreznom W-Mo čeliku oznake S6-5-2-5, u čiju skupinu spadaju spiralna svrdla za teški rad. Neprevučeno svrdlo ima veoma mali postotak legirnih elemenata tipičnih za brzorezne čelike a to su volfram i molibden. No, i taj mali postotak je je sličan kod ova dva legirna elementa pa se može zaključiti da je i to W-Mo brzorezni čelik.

6.2. Ispitivanje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće svrdla provedeno je metodom Vickers na tvrdomjeru Wilson-Wolpert Tukon 2100B (slika 21.) Rezultati ispitivanja tvrdoće na dršci ispitnih uzoraka svrdla navedeni su u tablicama 6 do 8.

Slika 21. Ispitivanje mikrotvrdoće svrdla: a) tvrdomjer Wilson-Wolpert Tukon 2100B, b) priprema svrdla za ispitivanje tvrdoće

Tablica 6. Tvrdoća drške neprevučenog svrdla S0

Redni broj ispitivanja	Tvrdoća, HV1
1.	378
2.	388
3.	388
4.	373
5.	378
Srednja vrijednost:	**381 ± 60 HV 1**

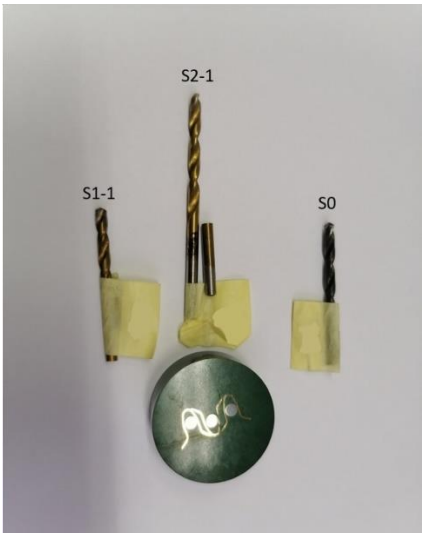
Tablica 7. Tvrdoća drške svrdla prevučenog prevlakom PACVD TiN (uzorak S1-1)

Redni broj ispitivanja	Tvrdoća, HV1
1.	1196
2.	1297
3.	1223
4.	1131
5.	1219
Srednja vrijednost:	**1213 ± 60 HV 1**

Tablica 8. Tvrdoća drške svrdla prevučenog prevlakom PVD TiN (uzorak S2-1)

Redni broj ispitivanja	Tvrdoća, HV1
1.	694
2.	773
3.	725
4.	685
5.	683
Srednja vrijednost:	**712 ± 60 HV 1**

Tvrdoća u jezgri svrdla izmjerena je na metalografski pripremljenim uzorcima (slika 22.) koji su prerezani u blizini vrha svrdla. Rezultati ispitivanja tvrdoće jezgre neprevučenih i prevučenih svrdla navedeni su u tablicama 9 do 11.



Slika 22. Prikaz metalografski pripremljenih uzoraka

Tablica 9. Tvrdoća jezgre neprevučenog svrdla S0

Redni broj ispitivanja	Tvrdoća, HV1
1.	378
2.	388
3.	388
4.	373
5.	378
Srednja vrijednost:	**381 ± 60 HV 1**

Tablica 10. Tvrdoća jezgre prevučenog svrdla PACVD TiN S1-1

Redni broj ispitivanja	Tvrdoća, HV0,5
1.	235
2.	250
3.	240
4.	236
5.	230
Srednja vrijednost:	**238 ± 60 HV 0,5**

Tablica 11. Tvrdoća jezgre prevučenog svrdla PVD TiN S2-1

Redni broj ispitivanja	Tvrdoća, HV0,5
1.	781
2.	834
3.	823
4.	813
5.	761
Srednja vrijednost:	**802 ± 60 HV 0,5**

Tvrdoća aluminijskog diska (obradka) navedena je u tablici 12. Iz srednje vrijednosti tvrdoće zaključuje se da je obradak u odžarenom stanju s tvrdoćom koja odgovara tehničkom aluminiju.

Tablica 12. Tvrdoća aluminijskog diska

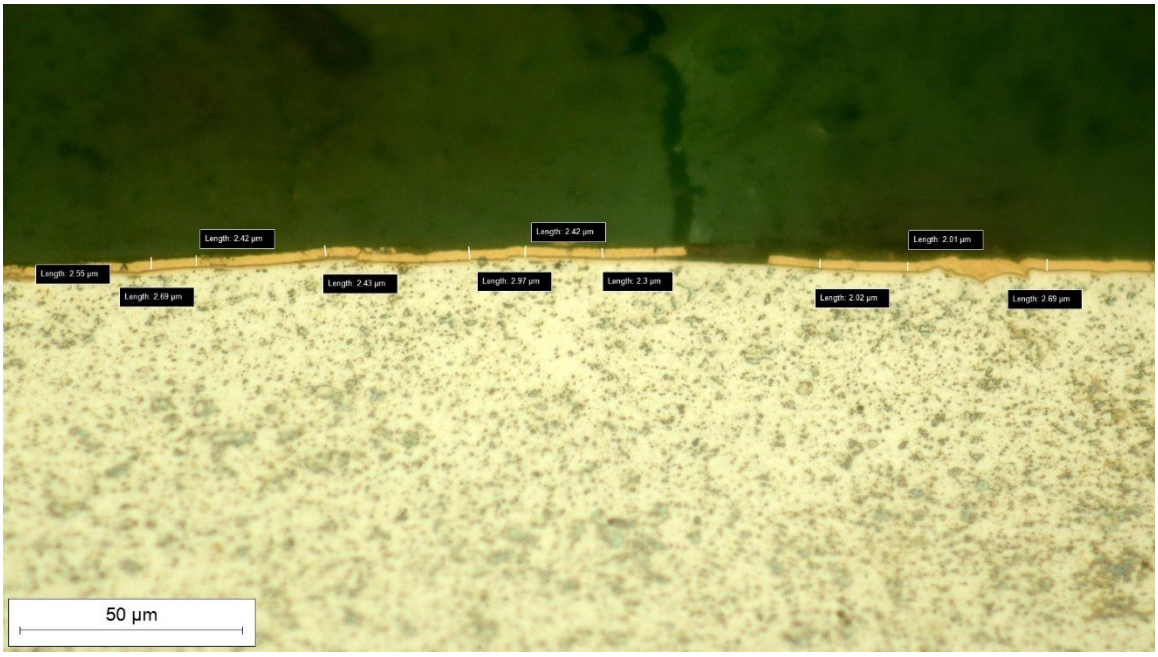
Redni broj ispitivanja	Tvrdoća, HV1
1.	28
2.	28
3.	26
4.	25
5.	26
Srednja vrijednost:	**26,6 HV 0,5**

6.3. Određivanje debljine prevlake

Uzorci su najprije metalografski pripremljeni, drške svrdala su odrezane i utopljene u polimernu kalotu koja je poliranjem i nagrizanjem pripremljena za analizu mikrostrukture pod svjetlosnim mikroskopom (slika 23.). Površina je nagrizana 10 sekundi pomoću 3% otopine NITAL.

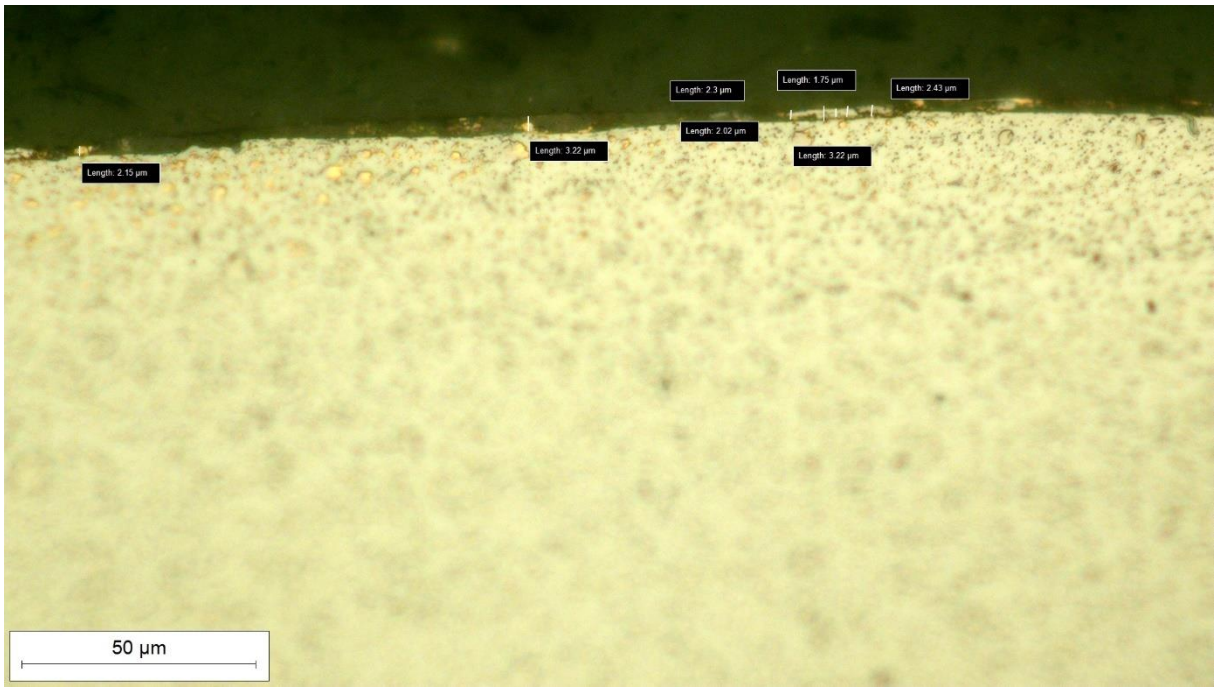
Slika 23. Prikaz metalografski pripremljenog uzorka s presjekom svrdla S0-1, S1-1 i S2-1

Površina uzoraka kvalitetno je ispolirana nakon čega je ista promatrana pomoću svjetlosnog mikroskopa Olympus GX51. Na uzorku S1-1 koji je prevučen PACVD TiN prevlakom pomoću mjerne skale odredili smo nekoliko dužina koje određuju debljinu prevlake te možemo zaključiti kako je debljina prevlake 2 do 3 µm.



Slika 24. Debljina prevlake PACVD TiN na uzorku S1-1

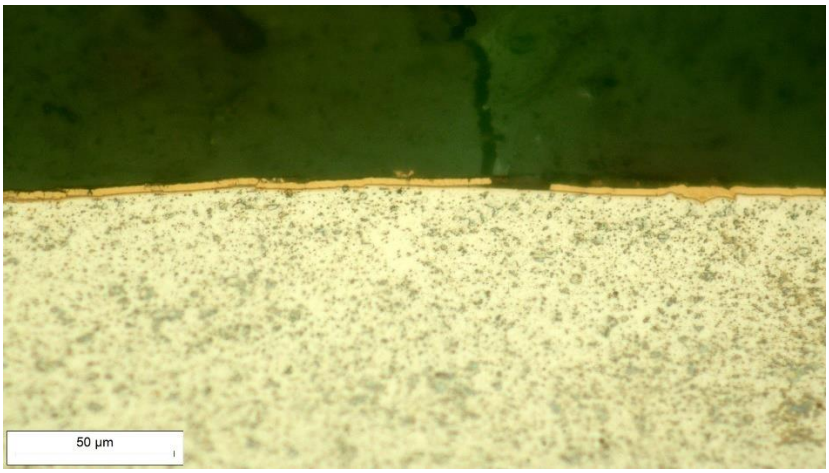
Isto kao i kod PACVD TiN prevlake, tako smo napravili na uzorku S2-1, tj. PVD TiN prevlaci i odredili debljinu prevlake koja iznosi 2 do 4 μm.



Slika 25. Debljina prevlake PVD TiN na uzorku S2-1

6.4. Određivanje prionjivosti prevlake

Analizirajući snimke elektronskog mikroskopa uočeno je otkrhnjivanje prevlake PVD TiN prilikom poliranja, jer je prevlaka nekoliko puta tvrđa od jezgre svrdla. Kod prevlake PACVD TiN nije uočeno značajnije okrhnjivanje prevlake iz čega se može zaključiti da PACVD TiN prevlaka ima bolju prionjivost od prevlake PVD TiN.



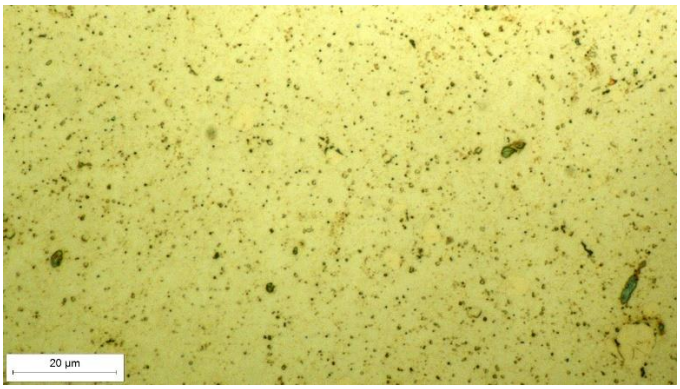
a)

b)

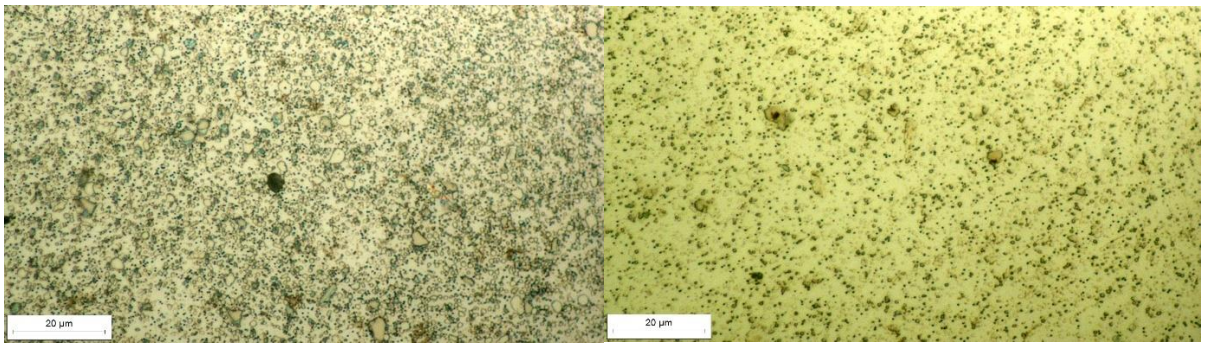
Slika 26. Usporedba prionjivosti a) PACVD TiN, b) PVD TiN

6.5. Analiza mikrostrukture neprevučenih i prevučenih svrdla

Nakon brušenja i poliranja pod svjetlosnim mikroskopom možemo primijetiti tipičnu kaljenu i popuštenu mikrostrukturu, sekundarne i eutektičke karbide te karbide popuštanja.



Slika 27. Mirkostruktura neprevučenog svrdla



a) b)

Slika 28. Usporedba mikrostrukture jezgre svrdla prevučenog: a) PACVD TiN prevlakom, b) PVD TiN prevlakom

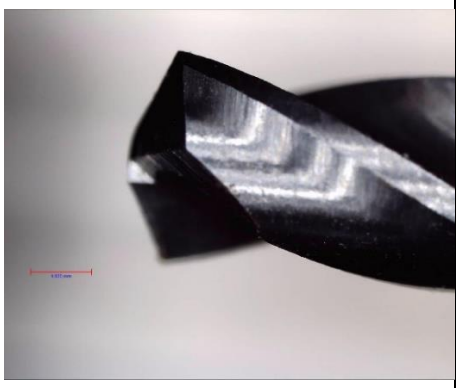
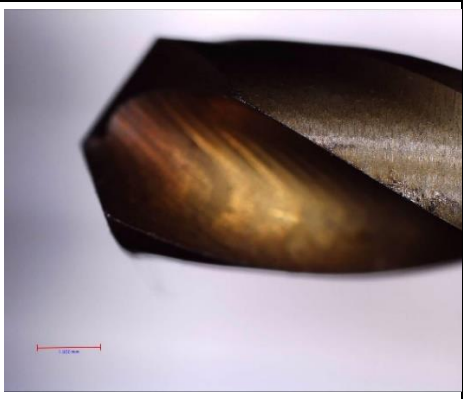
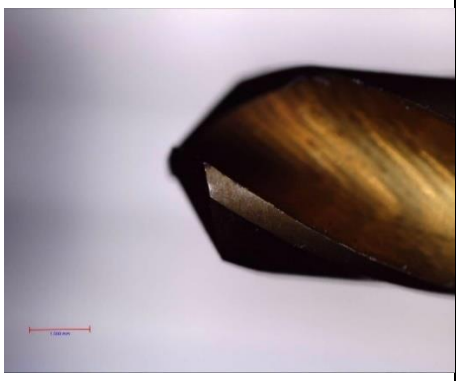
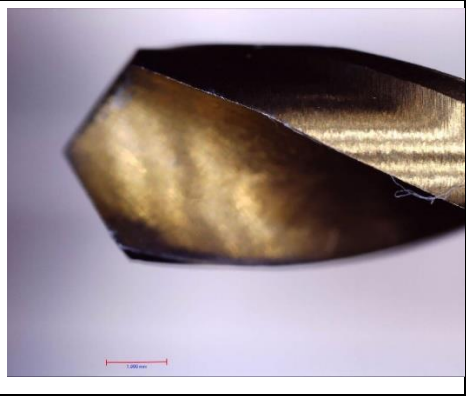
U mikrostrukturi jezgre svih analiziranih svrdla nalazi se popušteni martenzit, sekundarni karbidi i karbidi popuštanja.

7. REZULTATI TROŠENJA SPIRALNIH SVRDLA

7.1. Izgled rezne oštrice svrdla prije ispitivanja trošenja

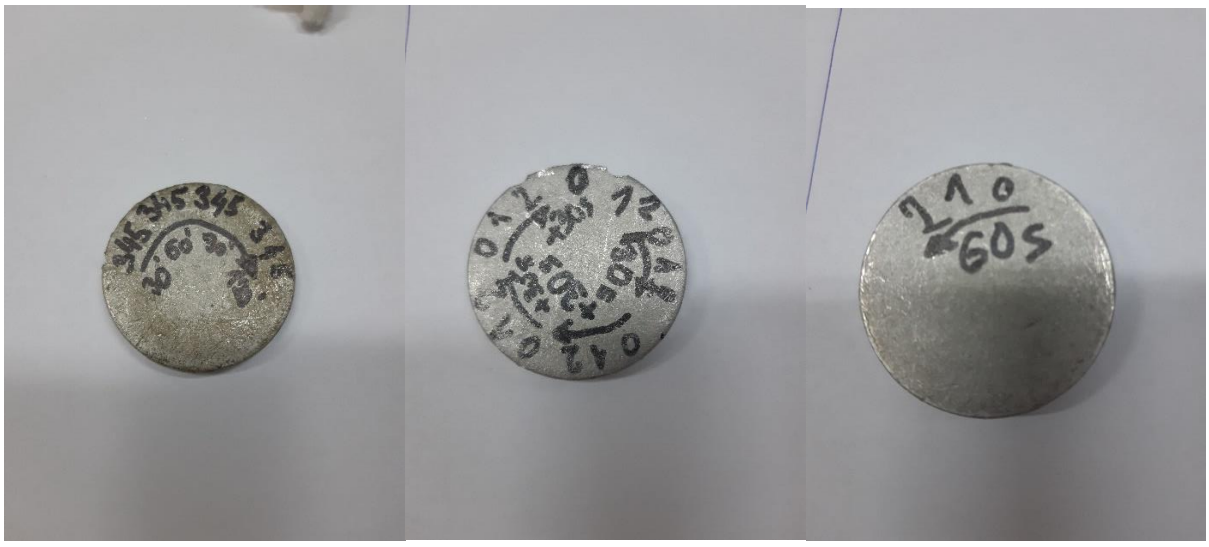
Oštrica svrdla snimljena je na svjetlosnom mikroskopu TOOLCRAFT uz analizu slike računalnim programom Micro Capture Plus. Izgled oštrica u početnom stanju prikazan je u tablici 13.

Tablica 13. Početno stanje svrdla

Oznaka svrdla	Izgled svrdla	Oznaka svrdla	Izgled svrdla
S0-1		S1-3	
S1-1		S2-1	
S1-2			

7.2. Trošenje oštrice svrdla nakon 30 sekundi bušenja

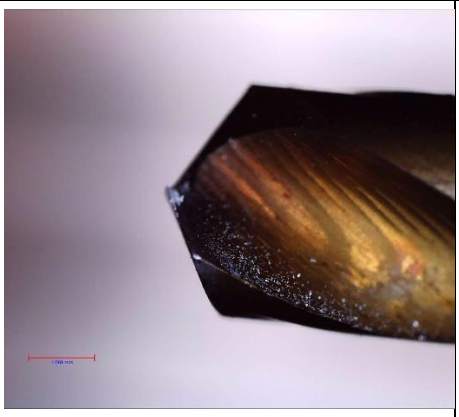
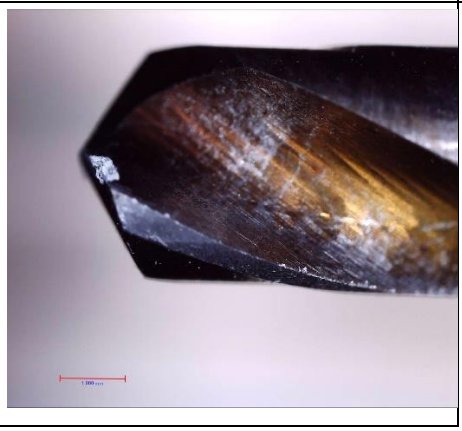
Ispitivanje trošenja bilo je započeto bušenjem prve serije provrta. Bušilo se u puno, materijal obratka je disk od tehničkog aluminija. Tako se u jednakim radnim uvjetima sa svakim svrdlom bušilo pet provrta, a svaki provrt se bušio u trajanju od 30 sekundi (osim zadnjeg koji se bušio 60 sekundi), nakon čega se vršila usporedba. Na diskovima se za svaki provrt označavalo kojim se svrdlom bušilo i u kojem vremenskom intervalu (slika 29.).



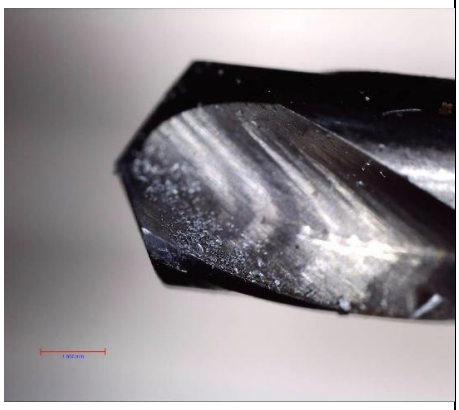
Slika 29. Označavanje rupa na aluminijskim diskovima nakon zadanog vremenskog intervala bušenja

Izgled oštrica svrdla nakon 30 s, 60 s, 90 s i 120 s bušenja prikazan je u nizu slijedećih tablica (Tablica 14. do Tablica 17.).

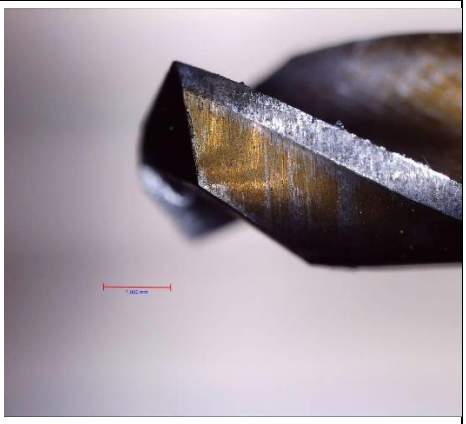
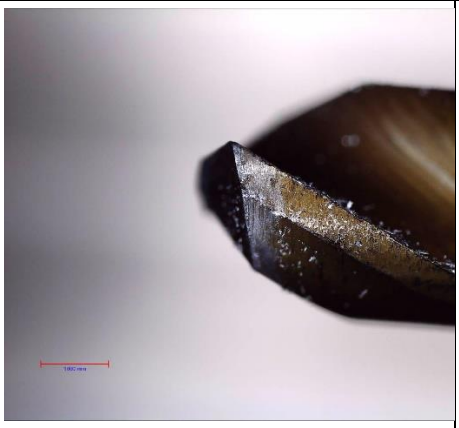
Tablica 14. Izgled svrdla nakon 30 sekundi bušenja

Oznaka svrdla	Izgled svrdla	Oznaka svrdla	Izgled svrdla
S0-1		S1-3	
S1-1		S2-1	
S1-2			

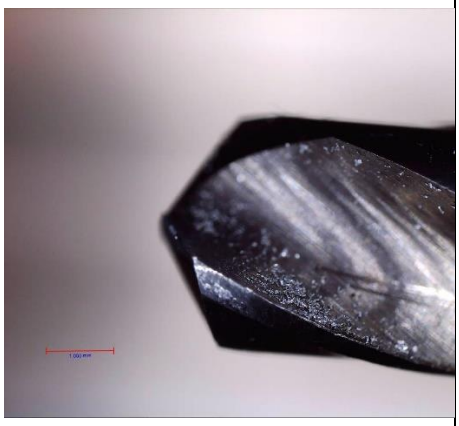
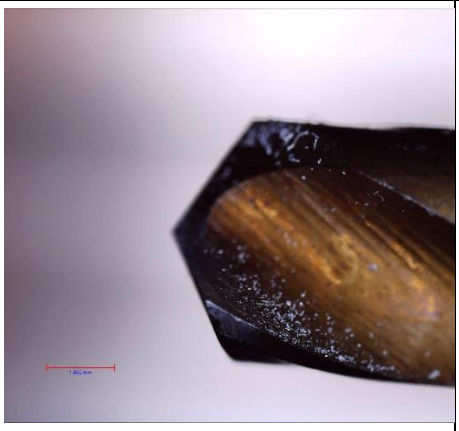
Tablica 15. Izgled svrdla nakon 60 sekundi bušenja

Oznaka svrdla	Izgled svrdla	Oznaka svrdla	Izgled svrdla
S0-1		S1-3	
S1-1		S2-1	
S1-2			

Tablica 16. Izgled svrdla nakon 90 sekundi bušenja

Oznaka svrdla	Izgled svrdla	Oznaka svrdla	Izgled svrdla
S0-1		S1-3	
S1-1		S2-1	
S1-2			

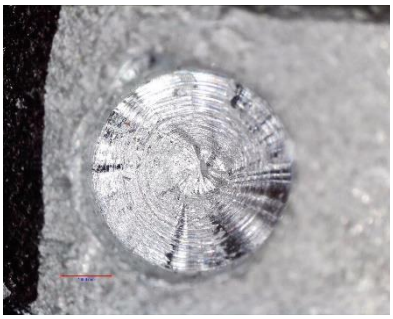
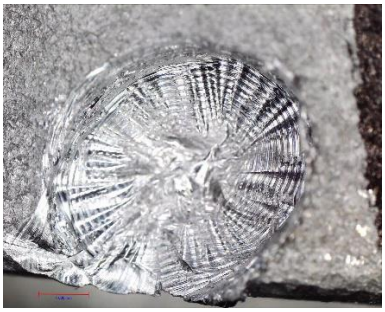
Tablica 17. Izgled svrdla nakon 120 sekundi bušenja

Oznaka svrdla	Izgled svrdla	Oznaka svrdla	Izgled svrdla
S0-1		S1-3	
S1-1		S2-1	
S1-2			

7.3. Izgled provrta u aluminijskom disku

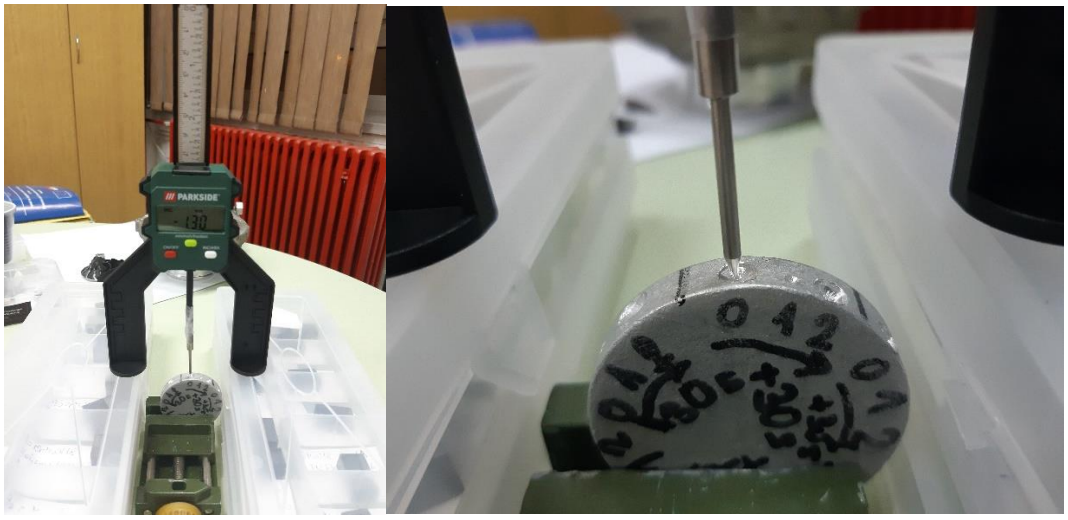
Izgled izbušene rupe u aluminijevom disku prikazan je u donjoj tablici (Tablica 18). Iz slika možemo zaključiti kako je svrdlo prevučeno PACVD TiN prevlakom klizalo po disku dok je neprevučeno svrdlo bušilo pravilne provrte. Razlog tome možemo pripisati „zatupljenju“ rezne oštrice svrdla tijekom nanošenja prevlake. Nakon nanošenja prevlake na vrhu rezne oštrice se stvori naslaga prevlake nešto veće debljine od prevlake na ostalim dijelovima svrdla. Nakon istrošenja naslage prevlake, rezna oštrica se ponovno „naoštri“ odnosno poprimi kut oštrice postignut brušenjem prije prevlačenja.

Tablica 18. Izgled rupe u aluminijevom disku nakon 120 sekundi bušenja

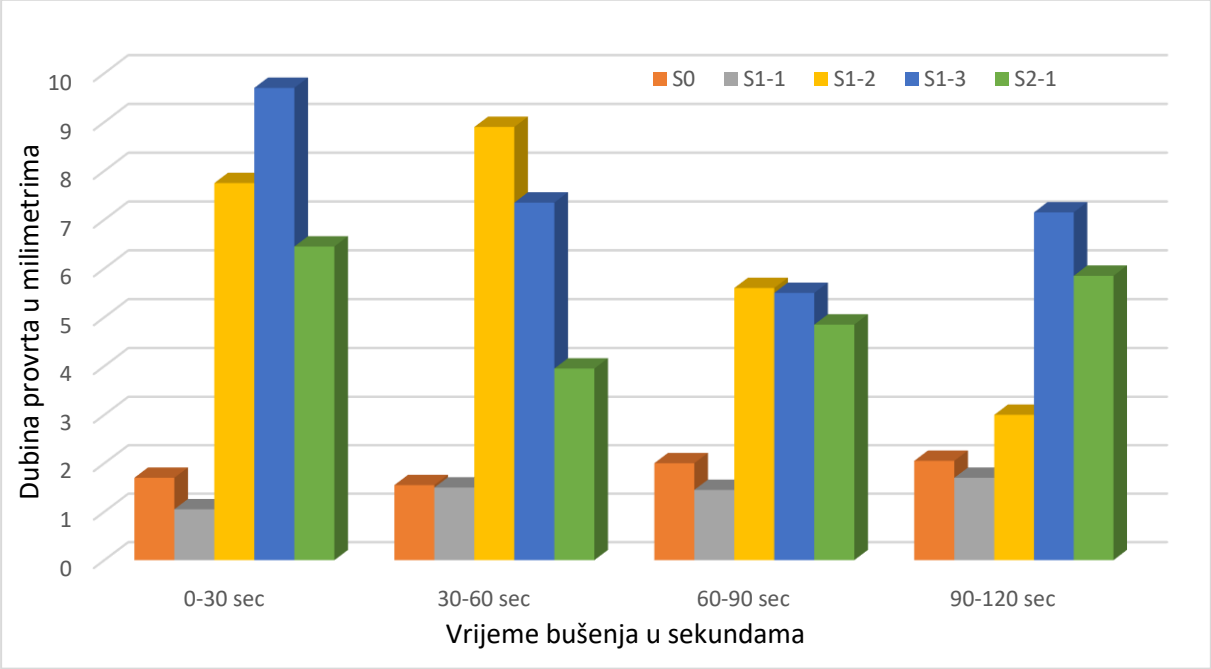
Oznaka svrdla	Nakon 30 sekundi	Nakon 60 sekundi	Nakon 120 sekundi
S0			
S1-1			

7.4. Mjerenje dubine provrta

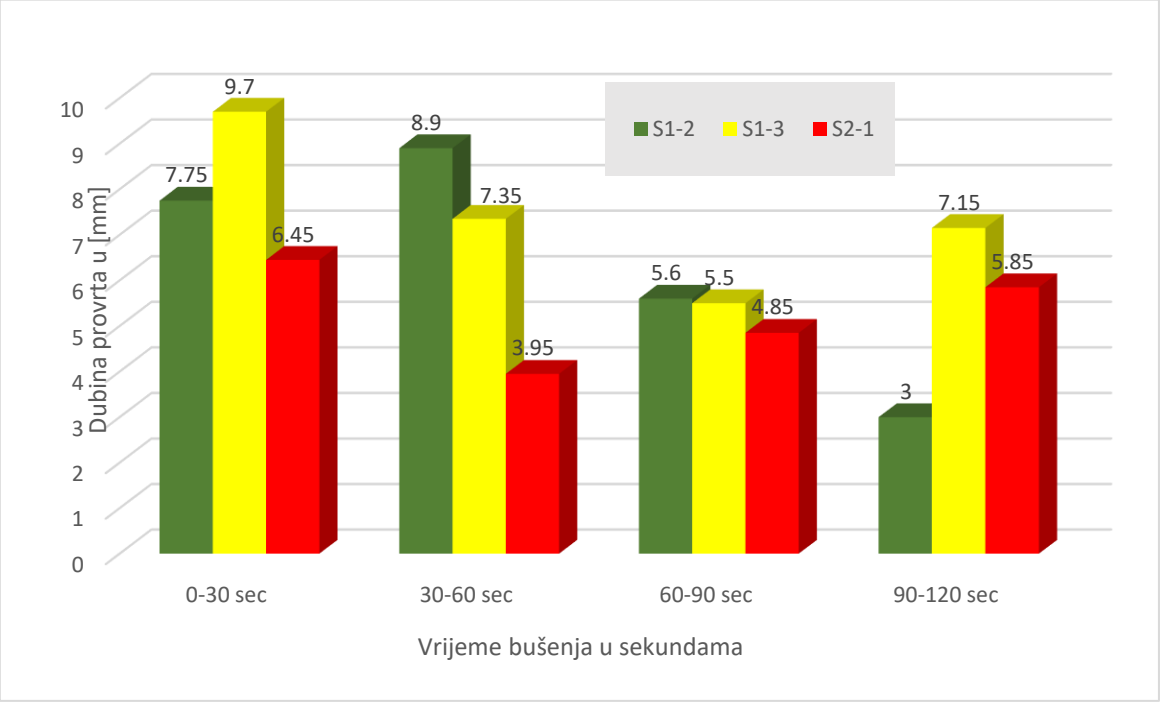
Mjerenje dubine provrta provedeno je dubinomjerom (Parkside) kako je prikazano na donjim slikama (slika 30.).



Slika 30. Mjerenje dubine provrta



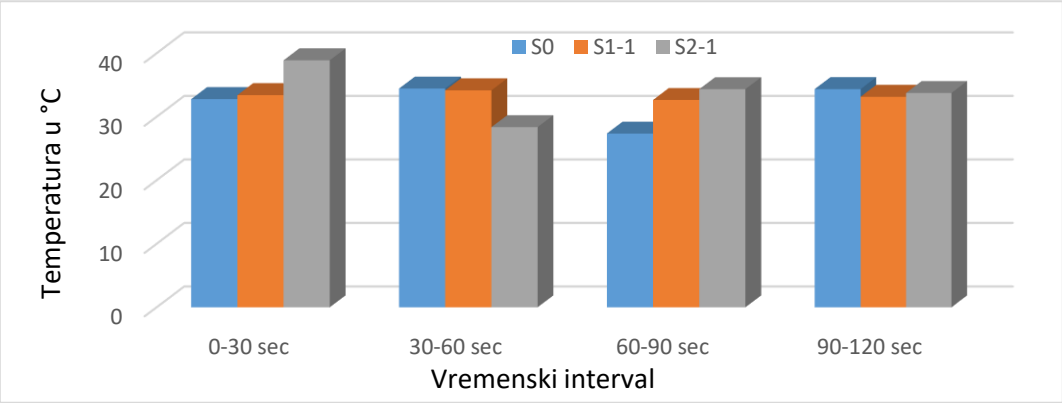
Slika 31. Dubina provrta S0-S2-1 za određene intervale bušenja



Slika 32. Dubina provrta S1-2, S1-3 i S2-1 za određene intervale bušenja

7.5. Snimanje temperature svrdla

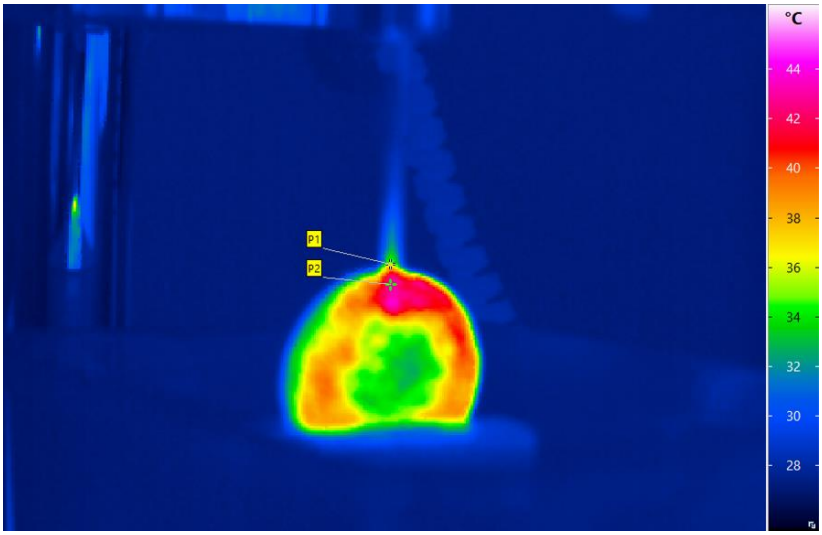
Tijekom bušenja termografskom kamerom sniman je sam proces bušenja te su pomoću programa IRBIS3 PLUS određena promjena temperature ovisna o vremenu bušenja na vrhu svrdla i na aluminijevom disku.



Slika 33. Ovisnost temperature na vrhu svrdla i intervala bušenja za svrdla S0, S1-1 i S2-1

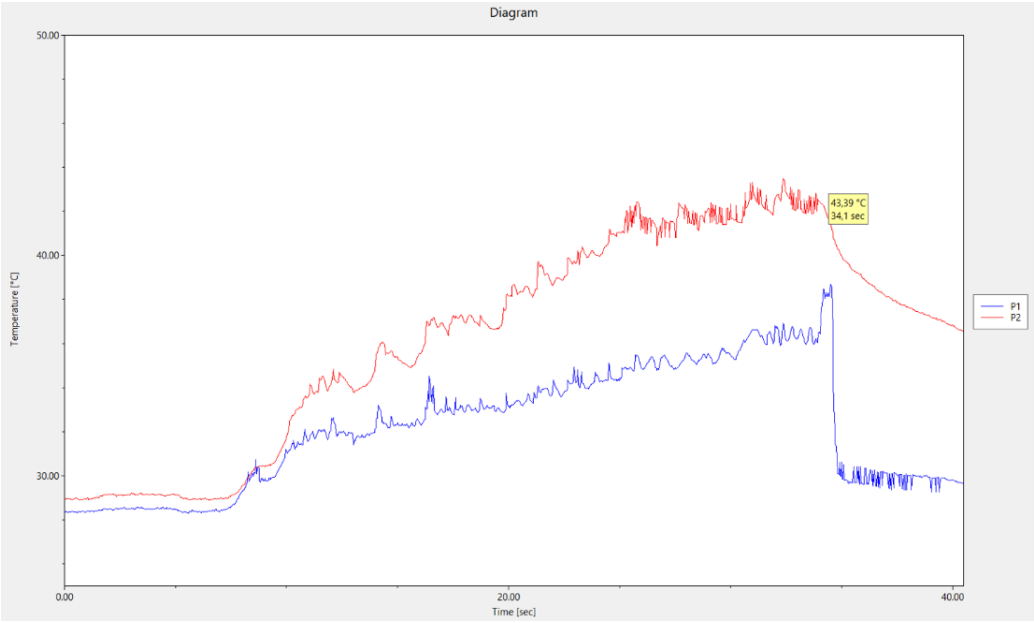
Iz dijagrama na gornjoj slici (slika 33.) se uočava kako se svrdlo prevučeno PACVD TiN prevlakom u sva četiri intervala podjednako zagrijalo dok se kod neprevučenog i svrdla prevučenog PVD TiN prevlakom primjećuje razlika temperature na vrhu svrdla po intervalima bušenja.

Slika 34. prikazuje mjerne točke P1 i P2. Točka P1 se nalazi na vrhu svrdla, a točka P2 se nalazi na aluminijskom disku. Može se primijetiti kako se disk zagrijao više nego svrdlo. Toplinska vodljivost aluminija je oko 12 puta veća od toplinske vodljivosti željeza te on brzo odvodi toplinu od mjesta bušenja. Svrdlo koje je izrađeno od brzoreznog čelika slabije toplinske vodljivosti od materijala diska te se njegov vrh i rezna oštrica sporije i manje zagrijavaju od diska.

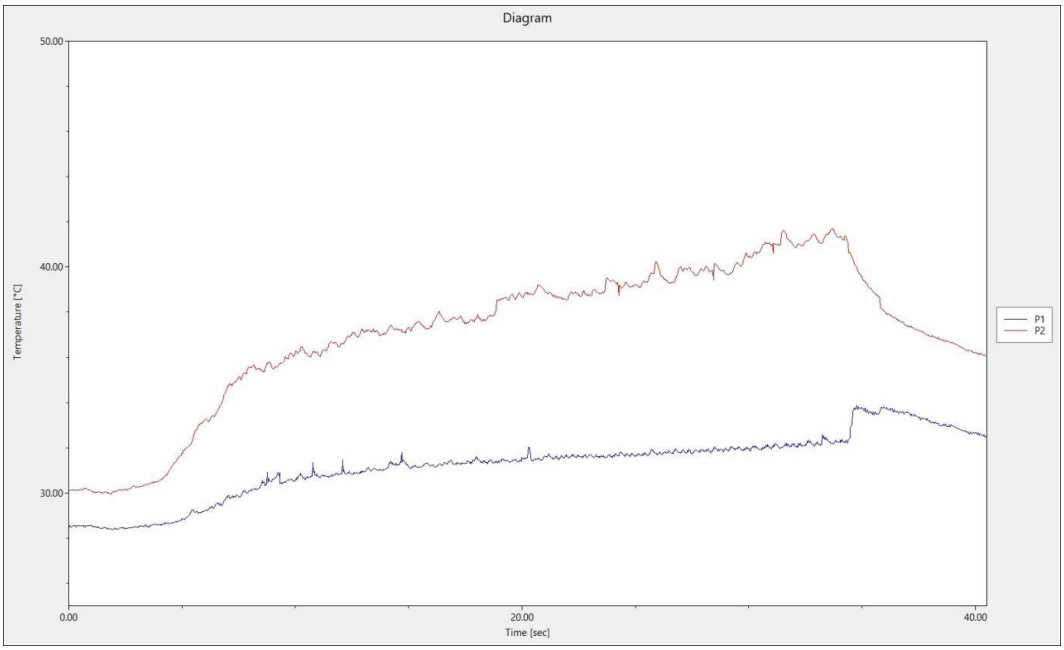


Slika 34. Termografska snimka procesa bušenja i položaj mjernih točaka P1 i P2

Na slici 35. prikazano je povećanje temperature vrha svrdla (mjerna točka P1) i aluminijevog diska (mjerna točka P2) tijekom bušenja u trajanju od 30 s, u intervalu bušenja od 90 s do 120 s.



a)



b)

Slika 35. Termogram- ovisnosti temperature vrha svrdla (krivulja P1) i aluminjevog diska (krivulja P2) o vremenu bušenja tijekom intervala bušenja od 90 s do 120 s za svrdlo s prevlakom: a) PACVD TiN, S1-3, b) PVD TiN, S2-1

Iz krivulje zagrijavanja aluminijskog diska (slika 35.) uočava se podjednaka brzina zagrijavanja diska, od 30 °C na početku bušenja do približno 41 °C na završetku bušenja, bez obzira da li je bušenje provedeno svrdlom s prevlakom PACVD TiN ili PVD TiN. Međutim, brzine zagrijavanja svrdla se značajno razlikuju ovisno o nanesenoj prevlaci. Svrdlo s prevlakom PACVD TiN (Slika 35.a) se brže zagrijava i po završetku bušenja postiže višu temperaturu rezne oštrice od svrdla s prevlakom PVD TiN (Slika 35.b). Ovo se može objasniti već spomenutom pojavom stvaranja deblje naslage prevlake na vrhu i na reznoj oštrici svrdla nakon PACVD prevlačenja. Zaobljenje vrha rezne oštrice PACVD TiN svrdla uzrokuje pojavu većeg trenja između svrdla i obratka, veći stupanj deformacije odvojene čestice i veću količinu topline dobivene pretvorbom mehaničke energije svrdla u toplinske gubitke procesom rezanja.

8. ZAKLJUČAK

U radu je provedeno ispitivanje otpornosti na trošenje na 3 skupine ispitnih uzoraka. Ispitni uzorci su komercijalno dobavljiva spiralna svrdla brzoreznog čelika promjera 4 mm koja su pripremljena u slijedećim stanjima: neprevučeno (S0) , prevučeno prevlakom PACVD TiN (S1) i prevučeno prevlakom PVD TiN (S2).

Nakon provedenih ispitivanja tvrdoće, mikrostrukture, kemijskog sastava i prionjivosti prevlaka, izvedeno je bušenje provrta u određenim intervalima u aluminijevom disku. Odabrana je konstantna sila bušenja od 5 N i konstantan broj okretaja od 1000 min-1.

Iz analize izgleda provrta svjetlosnom mikroskopijom može se zaključiti da su na početku bušenja svrdla prevučena PACVD TiN prevlakom bila „zatupljena“ zbog nanošenja debljeg sloja prevlake preko rezne oštrice. Nakon početnog trošenja PACVD TiN prevlake, daljnjim bušenjem dolazi se do osnovnog materijala koji je zbog nanesene prevlake ostao sačuvan i naoštren. Kod analize fotografija svrdla nakon određenih intervala bušenja može se primijetiti stvaranje naljepaka koji su utjecali na efikasnost bušenja u sljedećim intervalima. Tome se mogu pripisati i velike oscilacije u dubinama provrta s obzirom da su bušenja provedena s konstantnom silom bušenja. Prevučena svrdla su, gledajući prosječne vrijednosti dubina provrta, ostvarila bolje rezultate u odnosu na neprevučena svrdla. Uspoređujući pak prevučena svrdla, može se zaključiti da PACVD TiN prevlaka i PVD TiN prevlaka imaju slično trošenje i naljepak. Za smanjenje naslage PACVD prevlake na reznoj oštrici svrdla preporučuje se skraćenje trajanja prevlačenja koje će rezultirati smanjenjem debljine prevlake TiN i očuvanjem kutova rezne oštrice.

Kod praćenja zagrijavanja primijećeno je da se svrdlo s prevlakom PACVD TiN brže zagrijava i po završetku bušenja postiže višu temperaturu rezne oštrice od svrdla s prevlakom PVD TiN. Ovo se može objasniti već spomenutom pojavom stvaranja deblje naslage prevlake na vrhu i na reznoj oštrici svrdla nakon PACVD prevlačenja.

U daljnjim ispitivanjima preporučuje se ispitivanje svrdala na primjerima bušenja bakra i čelika, analiza trošenja oštrice svrdla stereomikroskopijom i karakterizacija nanesenih prevlaka skenirajućom elektronskom mikroskopijom.

LITERATURA

[1] S. Kožuh; Specijalni čelici, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu; Sisak, 2010.

[2] Toma Udiljak: Obrada odvajanjem – Predavanja, FSB, Zagreb, ak. god. 2014./2015.

[3] Maja Kliškić i Ladislav Vrsalović: Vježbe iz tehnologije površinske zaštite, Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu, 2005.

[4] Grilec K., Jakovljević S., Marić G., Tribologija u strojarstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.

[5] Željko Alar: Zavod za materijale – Predavanja Inženjerstvo materijala, FSB, Zagreb, ak. god. 2014./2015.

[6] M.Gojić; Površinska obradba materijala, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu; Sisak, 2010.

[7] D.Landek; Podloge za vježbu iz kolegija 'Proizvodne tehnologije', dio Toplinska obrada, 2013.

[8] B. Matijević; Iskustva primjene PACVD tehnologije u praksi, FSB, Zagreb, 24.4.2014.

[9] D. Landek, G. Baršić; Wear of spiral drills coated by hard PACVD coatings, International conference "Mechanical Technologies and Structural Materials" Split, 2021.

[10] Bunshah R. F., Deshpandey C.V., Invited Review, Plasma assisted vapor deposition processes and some applications, University of California, Los Angeles, 1986.

[11] G.E.Totten, H.Liang; Surface Modification and Mechanisms; Marcel Dekker, Inc., 2005

[12] URL: https://ae01.alicdn.com/kf/S389068e90f794b9da84d949063f44886h/Hohe-Qualit-t-HSS6542-Volle-CNC-Geschliffen-15-st-cke-Standard-Pitch-Maschine-Spiral-Tap-Schraube.jpg_Q90.jpg_.webp 15.2.2023.

[13] Filetin T.; Grilec T.; „Postupci modificiranja i prevlačenja površina", Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Fakultete strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2004.

[14] URL: https://www.eifeler-austria.com/en/pvd_coating/hard_coating_ticn/ 24.2.2023.

[15] B. Matijević: Iskustva u primjeni PACVD Tehnologije u praksi, Zbornik znanstveno stručnog skupa: Primjena novih inovativnih postupaka inženjerstva površina, HDTOIP, Slavonski Brod, 05. 05. 2016.

[16] Shum PW, Tam WC, Li KY, et al. Mechanical and tribological properties of titanium–aluminium–nitride films deposited by reactive close-field unbalanced magnetron sputtering 16.2.2023.

[17] URL:https://www.travers.com/product/niagara-4-flute-solid-carbide-tialn-coated-single-end-mills-75657 16.2.2023.

[18] C.X.Tian, et. all: Ternary and quarternary TiBN and TiBCN nanocomposite coatings deposited by arc ion plating, Surface and Coatings Technology, Volume 359, 15 February 2019, p. 445-450

[19] URL:https://www.ionbond.com/coating-services/cutting-tools/coating-portfolio/ionbondtm-cvd-08/ 19.2.2023.

[20] J. Deng, M. Braun: DLC multilayer coatings for wear protection, Diamond and Related Materials, Volume 4, Issue 7, 15 May 1995, p. 936-943

[21] URL: http://www.ifpsrl.it/dlctac.php 20.2.2023.

[22] https://www.proxxon.com/en/catalogues/micromot/croatian/ 20.2.2023.