

# Trošenje spiralnih svrdla prevučениh prevlakom TiN pri bušenju aluminijeve metalne pjene

---

**Drakšić, Silvio**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:763976>

*Rights / Prava:* [Attribution 3.0 Unported/Imenovanje 3.0](#)

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

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Silvio Drakšić**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Silvio Drakšić

Zagreb, 2023.

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

Veliku zahvalnost dugujem mentoru prof. dr. sc. Darku Landeku za pomoć, strpljenje i savjete pružene tijekom izrade ovog rada. Posebno zahvaljujem i svojoj obitelji, kolegama i prijateljima na potpori i podršci tijekom ovih godina.

Silvio Drakšić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija



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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Silvio Drakšić** JMBAG: 0035209822

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Trošenje spiralnih svrdla prevučениh prevlakom TiN pri bušenju aluminijske metalne pjene**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Wear of spiral drills coated with TiN coating when drilling aluminum metal foam**

Opis zadatka:

Otpornost na trošenje spiralnih svrdla od brzoreznog čelika može se povećati nanošenjem tvrdih prevlaka fizikalnim ili kemijskim taloženjem iz parne faze. U radu treba opisati konstrukcijske karakteristike spiralnih svrdla, procese trošenja rezne oštrice pri bušenju aluminijske metalne pjene i zahtjeve na svojstva spiralnih svrdla izrađenih od brzoreznog čelika s tvrdim prevlakama nanesenim postupcima 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 prevučениh i ne prevučениh svrdla tijekom bušenja provrta uzorku izrađenom od aluminijske metalne pjene. Na temelju rezultata ispitivanja odrediti povećanje trajnosti prevučениh svrdla u odnosu na ne prevučena i predložiti optimalni postupak prethodne toplinske obrade brzoreznog čelika i PACVD prevlačenja.

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

Zadatak zadan:

4. svibnja 2023.

Datum predaje rada:

6. srpnja 2023.

Predviđeni datumi obrane:

17. – 21. srpnja 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. ALUMINIJEVE PJENE.....	2
2.1. Mehanička svojstva aluminijevih pjena.....	3
2.1.1. Vlačna čvrstoća.....	3
2.1.2. Tlačna čvrstoća.....	4
2.1.3. Krutost.....	6
2.1.4. Vatrootpornost.....	6
2.1.5. Toplinska vodljivost.....	7
2.2. Upotreba aluminijevih pjena.....	7
3. BRZOREZNI ČELICI.....	9
3.1. Kemijski sastav brzoreznih čelika.....	9
3.2. Toplinska obrada brzoreznih čelika.....	12
4. BUŠENJE.....	14
4.1. Bušenje spiralnim svrdlima.....	14
4.2. Trošenje i zatupljenje svrdla.....	18
4.2.1. Mehanizmi trošenja.....	18
4.2.2. Oblici trošenja svrdla.....	21
5. POSTUPCI MODIFICIRANJA I PREVLAČENJA POVRŠINE SVRDLA.....	23
5.1. Nitiranje.....	23
5.2. PVD postupak.....	25
5.3. PACVD postupak.....	26
6. KARAKTERIZACIJA POVRŠINSKOG SLOJA.....	28
6.1. Ispitivanje tvrdoće.....	28
6.1.1. Rockwell C metoda.....	28

---

6.1.2. Metoda Vickers.....	30
6.2. Određivanje debljine prevlake kalotestom.....	31
7. PRIPREMA I PROVEDBA POKUSA .....	35
7.1. Toplinska obrada svrdla .....	35
7.2. Priprema uzoraka.....	38
7.3. Priprema pokusa bušenja.....	41
7.4. Plan provedbe pokusa.....	47
8. REZULTATI I DISKUSIJA.....	48
8.1. Trošenje oštrice svrdla .....	48
8.2. Dubina i zagrijavanje provrta.....	52
9. ZAKLJUČAK.....	58
10. LITERATURA: .....	59

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Prikaz strukture kosti (a) i metalne pjene (b) [1] .....	2
Slika 2. Prikaz rasta broja objavljenih akademskih članaka o aluminijskim pjenama [2] .....	3
Slika 3. Dijagram naprezanje istežanje metalnih pjena [3].....	4
Slika 4. Dijagram naprezanje-deformacija tlačno opterećenih metalnih pjena: a) Cymat; b) Alporas [5] .....	5
Slika 5. Krivulje naprezanje-deformacija kod tlačnog opterećivanja aluminijskih pjena [5] ...	5
Slika 6. Ovisnost modula elastičnosti i gustoće metalnih pjena [5] .....	6
Slika 7. Trup vlaka ojačan aluminijskom pjenom [6].....	7
Slika 8. Izmjjenjivač topline s aluminijskom pjenom [5].....	8
Slika 9. Usporedba svojstava alatnih materijala za rezne alate [10].....	11
Slika 10. Dijagram postupka toplinske obrade brzoreznih čelika [11].....	13
Slika 11. Spiralno svrdlo [13] .....	15
Slika 12. Podjela svrdla po izboru drške [13].....	15
Slika 13. Standardizirane geometrije vrha svrdla prema DIN 1412:2001-03 [14] .....	16
Slika 14. Svrdla s različitim kutom zavojnice utora .....	17
Slika 15. Ovisnost mehanizama trošenja o brzini rezanja [16].....	19
Slika 16. Taylorova metoda prikaza trošenja alata [18] .....	21
Slika 17. Oblici istrošenja svrdla [13].....	22
Slika 18. Shema uređaja za nitriranje u plazmi [23].....	24
Slika 19. Shema uređaja za PVD postupak [24].....	25
Slika 20. Shema PACVD postupka prevlačenja [25] .....	26
Slika 21. Postupak mjerenja tvrdoće prema metodi Rockwell C.....	29
Slika 22. Mjerenje tvrdoće po Vickersu .....	30
Slika 23. Kalotester [26] .....	32
Slika 24. Mjerenje debljine prevlake kalotestom [21] .....	32
Slika 25. Svrdla u polaznom stanju prije pokusa trošenja .....	36
Slika 26. Mjesta bušenja provrta na uzorcima .....	40
Slika 27. Uzorci predviđeni za ispitivanje svrdla .....	41
Slika 28. Slika strukture aluminijske pjene snimljena mikroskopom uz povećanje 20:1, s lijeve strane prikazan je uzorak A, s desne strane uzorak C .....	41
Slika 29. Uređaj za mjerenje posmaka i sila kod bušenja.....	42



---

Slika 30. Tahometar korišten za mjerenje brzine okretaja kod bušenja .....	43
Slika 31. Prikaza pomaka u programu “Tracker” za izradu jednog od provrta .....	44
Slika 32. Oprema korištena u pokusima bušenja .....	46
Slika 33. Shematski prikaz plana provođenja pokusa.....	47
Slika 34. Dubina provrta izmjerena nakon 30 sekundi bušenja.....	52
Slika 35. Najveći porast temperature u blizini provrta na ispitivanim uzorcima od aluminija	53
Slika 36. Promjene aksijalne sile svrdla P0 kod bušenja uzoraka .....	55
Slika 37. Promjene aksijalne sile svrdla P1 kod bušenja uzoraka .....	55
Slika 38. Promjene aksijalne sile svrdla P2 kod bušenja uzoraka .....	55
Slika 39. Promjene aksijalne sile svrdla P3 kod bušenja uzoraka .....	56
Slika 40. Promjene aksijalne sile svrdla P4 kod bušenja uzoraka .....	56

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Primjeri primjene brzoreznih čelika.....	10
Tablica 2. Oznake prevučenih svrdla u pokusu trošenja i tvrdoće u polaznom stanju .....	35
Tablica 3. Parametri postupka nitriranja u plazmi .....	36
Tablica 4. Parametri PACVD TiN prevlačenja.....	37
Tablica 5. Parametri PACVD TiN/TiCN prevlačenja .....	37
Tablica 6. Masa i dimenzije ispitnih uzoraka .....	38
Tablica 7. Izmjerene tvrdoće ispitnih uzoraka .....	39
Tablica 8. Oštrice svrdla prije bušenja uzorka A od aluminijeve pjene .....	45
Tablica 9. Ulazne i izlazne veličine u procesu bušenja .....	47
Tablica 10. Izgled vrha svrdla nakon bušenja uzorka A .....	49
Tablica 11. Izgled vrha svrdla nakon bušenja uzorka C .....	50
Tablica 12. Izgled vrha svrdla nakon bušenja uzorka D .....	51
Tablica 13. Dubina i promjer provrta nakon 30 sekundi bušenja aluminijeve pjene i aluminijeve legure.....	54

**POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA**

Oznaka	Jedinica	Značenje
$d$	mm	Nazivni promjer svrdla
$F$	N	Ukupna sila ispitivanja
$F_0$	N	Sila predopterećenja
$F_1$	N	Sila opterećenja
$HRC$	HRC	Tvrdoća po Rockwellu metoda C
$l_1$	mm	Duljina svrdla
$n$	okr/min	Broj okretaja
$NHD$	mm	Dubina nitriranja
$p$	bar	Tlak
$P$	W	Snaga
$R_{et}$	Mpa	Granica stlačivanja
$t$	s	Vrijeme
$t_N$	s	Vrijeme nitriranja
$U$	V	Napon
$\varepsilon$	%	Deformacija
$\sigma$	MPa	Naprezanje
$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	Gustoća
$\lambda$	W/mK	Koeficijent toplinske vodljivost
$\omega$	°	Kut spiralnog žlijeba
$2\varphi$	°	Kut vrha svrdla

## **SAŽETAK**

U radu je provedeno ispitivanje otpornosti na trošenje komercijalno dobavljivog neprevučenog svrdla od brzoreznog čelika, u uspoređi sa svrdlima prevučenim PVD TiN prevlakom, nitriranom površinom u plazmi te dvaju svrdla prevučenih PACVD prevlakama pri suhom bušenju aluminijske pjene. Prevlačenje PACVD provedeno je prevlakama TiN/TiCN i TiN. Ispitivanje trošenja svrdla provedeno je bušenjem provrta u dva uzorka od aluminijske pjene i jednom uzorku punog presjeka od legure 6082 T6. Uz konstantnu brzinu vrtnje svrdla, mjerena je temperatura, sila, posmak i dubina provrta. Svrdla su nakon bušenja analizirana svjetlosnim mikroskopom. Svrdlo prevučeno PACVD TiN/TiCN prevlakom izbušilo je najveći volumen provrta, a nešto manji izbušilo je svrdlo prevučeno PACVD TiN prevlakom na sva tri uzorka. Neprevučeno svrdlo izbušilo je najmanji volumen provrta uz veće zagrijavanje od ostalih svrdla kod bušenja aluminijske legure punog presjeka.

**Ključne riječi:** aluminijska pjena, spiralno svrdlo, bušenje, otpornost na trošenje, PACVD TiN, PACVD TiN/TiCN, PVD TiN

**SUMMARY**

In this study, an investigation of wear resistance was conducted on a commercially available uncoated high-speed steel drill bit, compared to drill bits coated with PVD TiN coating, plasma-nitrided surface, and two drill bits coated with PACVD coatings during dry drilling of aluminum foam. PACVD coating was performed with TiN/TiCN and TiN coatings. The drill wear test was conducted by drilling holes in two samples of aluminum foam and one sample of solid cross-section of 6082 T6 alloy. While maintaining a constant drill rotation speed, temperature, force, feed rate, and drilling depth were measured. The drilled drill bits were analyzed using a light microscope. The PACVD TiN/TiCN coated drill bit produced the largest hole volume, while slightly smaller hole volumes were obtained with the PACVD TiN-coated drill bit on all three samples. The uncoated drill bit drilled the smallest hole volume and experienced higher heating compared to the other drill bits when drilling the solid cross-section of the aluminum alloy.

**Key words:** Aluminium foam, drill bit, drilling, wear resistance, PACVD TiN, PACVD TiN/TiCN, PVD TiN

## 1. UVOD

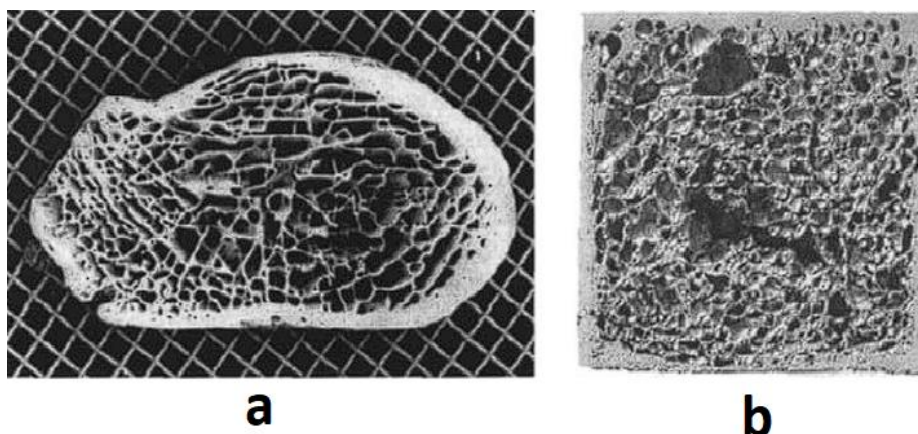
Metalne pjene materijali su koji pronalaze tehničku primjenu oponašanjem ćelijskih struktura koje se nalaze u prirodi. Metalne pjene objedinjuju laganu strukturu s mogućnošću dobre apsorpcije energije. Lagana struktura proizlazi iz visoke poroznosti koja iznosi od 40 do 90 % koja uz oblik i veličinu ćelije te vrstu osnovnog materijala određuje svojstva. Metalne pjene mogu se proizvesti iz gotovo svih vrsta metala koji postoje u obliku praha, a najzastupljenije metalne pjene na bazi su aluminijska, nikla, magnezijeva, čelika i sl.

Dok je za obradu materijala punog presjeka trošenje alata dobro istraženo, za obradu aluminijske pjena trošenje alata još nije dovoljno poznato. Razlozi se nalaze u relativno ograničenoj primjeni aluminijske pjena koje su se pojavile na tržištu zadnjih 30-ak godina.

U radu će se ispitivati trošenje spiralnih svrdla prevučeni PACVD i PVD postupkom te svrdla nitriranih u plazmi u odnosu na neprevučeno svrdlo. Uz konstantnu brzinu vrtnje i posmak pratit će se promjene u sili, temperaturi, kvaliteti izrađenog provrta te će se površina svrdla nakon bušenja analizirati svjetlosnim mikroskopom.

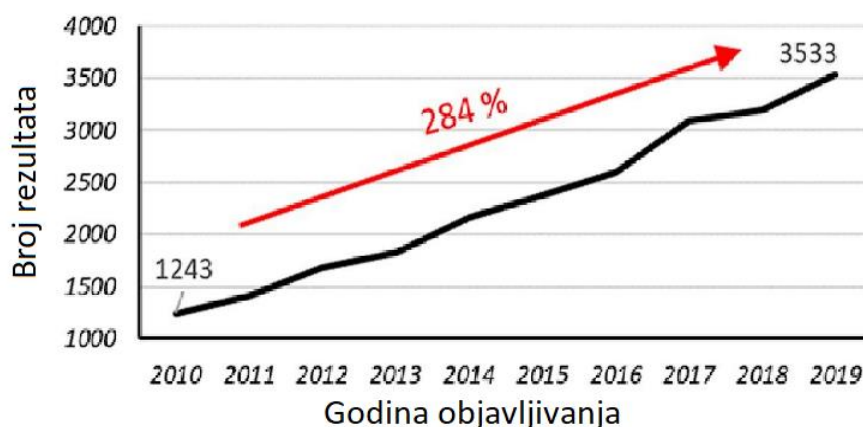
## 2. ALUMINIJEVE PJENE

Formacije i strukture koje se nalaze u prirodi oduvijek su inspirirale čovjeka. Evolucija, “domišljata” po potrebi, riješila je mnoštvo problema koji su se nametnuli raznim preprekama u okolini. Jedno od rješenja prirode su i materijali s ćelijskom strukturom, kao npr. kost, drvo, materijali čija svojstva su optimalno prilagođena okolnim uvjetima. Na slici 1. prikazan je presjek strukture kosti i metalne pjene.



Slika 1. Prikaz strukture kosti (a) i metalne pjene (b) [1]

Iako su se prvi patenti pojavili oko 50-ih godina 20. stoljeća, metalne pjene privukle su veću pozornost tek 90-ih intenziviranjem istraživanja te pronalaskom tehničke primjene u automobilske industriji. Na slici 2. prikazan je broj znanstvenih radova o metalnim pjenama u zadnjih 10 godina. Ispitivanja metalnih pjena predstavljaju, zbog svoje kompleksnosti, pravi izazov za inženjere. Kod jednakih načina ispitivanja, rezultati ispitivanja metalnih pjena često variraju i za nekoliko desetaka posto. To dovodi do smanjenog povjerenja u metalne pjene u primjeni. Razlog rasipanja i nepodudarnosti rezultata ispitivanja posljedica je vrlo nepredvidivih struktura metalne pjene i ovisnosti strukture pjene o kemijskom sastavu i parametrima postupka proizvodnje. Kako bi rezultati ispitivanja bili ponovljivi, potrebno je provesti veći broj ponavljanja i statističku analizu rezultata.



Slika 2. Prikaz rasta broja objavljenih akademskih članaka o aluminijskim pjena [2]

## 2.1. Mehanička svojstva aluminijskih pjena

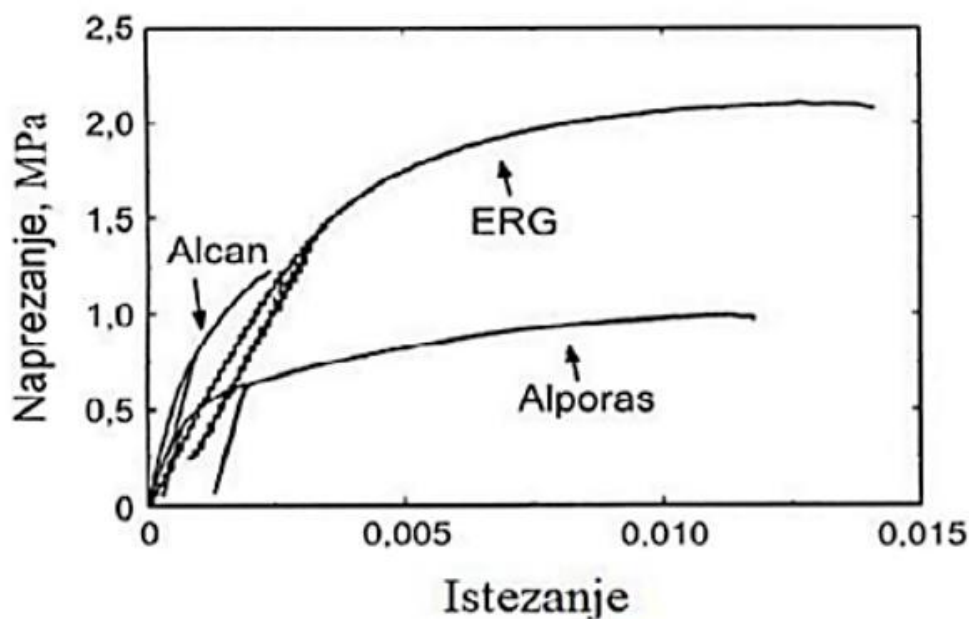
Aluminijska pjena visoko je porozni metalni materijal sa ćelijastom strukturom. U aluminijskoj pjenu pore najčešće zauzimaju više od 70% ukupnog volumena. Mehanička i fizička svojstva ovise o gustoći koja se obično kreće u rasponu od 0,4 do 1,2 g/cm<sup>3</sup>. Osnovna svojstva metalnih pjena predstavljaju niska gustoća, dobra izolacijska svojstva, relativno dobra krutost (posebice kod primjene u sendvič konstrukcija) te dobra apsorpcija energije udara.

### 2.1.1. Vlačna čvrstoća

Kod statičkog vlačnog ispitivanja metalnih pjena koriste se cilindrični, pravokutni ili uzorci u obliku kosti. Promjer cilindričnih uzoraka te debljina uzoraka koji imaju oblik kosti predstavljaju glavne dimenzije epruvete. Produljenje uzorka tijekom razvlačenja mjeri se ekstenzometrom pričvršćenim za sam uzorak. Ispitivanje se izvodi pod dva kuta - paralelno te okomito s obzirom na os ćelija. Brzina opterećivanja iznosi 0,01 mm/s. Iz nagiba krivulje naprezanje-istezanje određuje se modul elastičnosti, a pomoću vrijednosti istezanja određuje se Poissonov koeficijent. Dijagram naprezanje-istezanje na slici 3. prikazuje rezultate statičkog vlačnog ispitivanja aluminijskih pjena proizvedenih različitim postupcima [3]. „ALPORAS“ je komercijalan naziv za jedan od najzastupljenijih postupaka proizvodnje aluminijske pjene sa zatvorenim ćelijama proces lijevanja. Aluminijske pjene proizvedene tim postupkom koriste



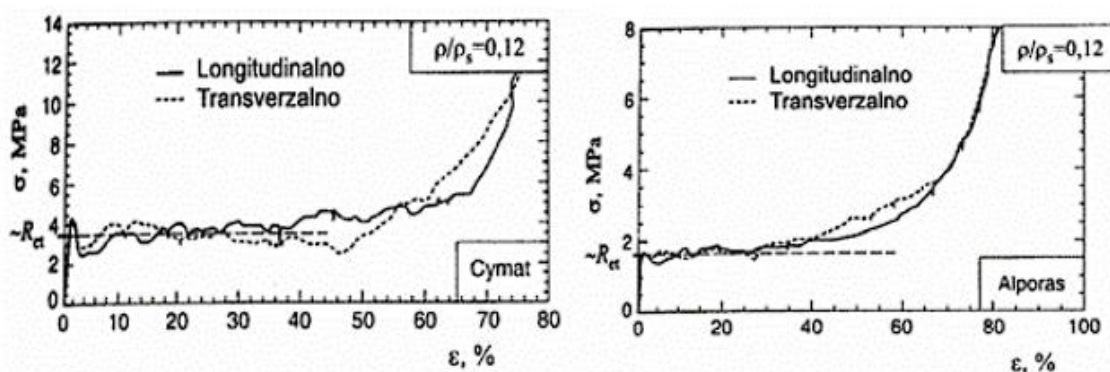
se za apsorpciju energije udara te apsorpciju zvuka [4]. „ERG“ i „Alcan“ komercijalni su nazivi za postupke proizvodnje aluminijskih pjena otvorenih ćelija.



Slika 3. Dijagram naprezanje-istezanje metalnih pjena [3]

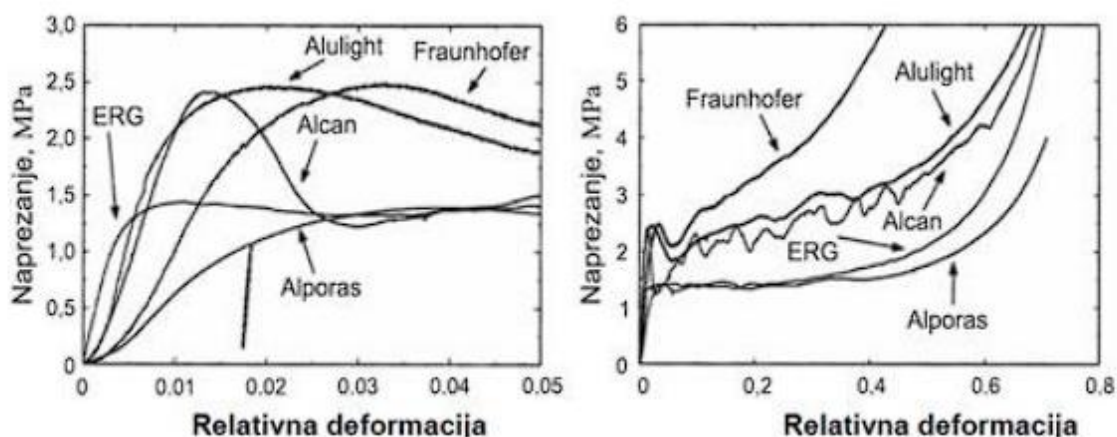
### 2.1.2. Tlačna čvrstoća

Kada se usporedi tlačno i vlačno ponašanje metalnih pjena, rezultati pokazuju da je modul elastičnosti u uvjetima tlačnog opterećenja za 10 % manji nego kod vlačnog opterećenja. Kod pojedinih ćelija dolazi do pojave tečenja već kod manjih opterećenja, dok kod nekih kod znatno većeg. Pojedine ćelije teku već kod malih opterećenja dok neke tek pri većim opterećenjima a svi ti podaci mogu se odrediti sa slike 4 koja prikazuje dijagrame naprezanje-deformacija dobivene tlačnim opterećenjem metalnih pjena izrađenih s dva različita postupka.



Slika 4. Dijagram naprežanje-deformacija tlačno opterećenih metalnih pjena: a) Cymat; b) Alporas [5]

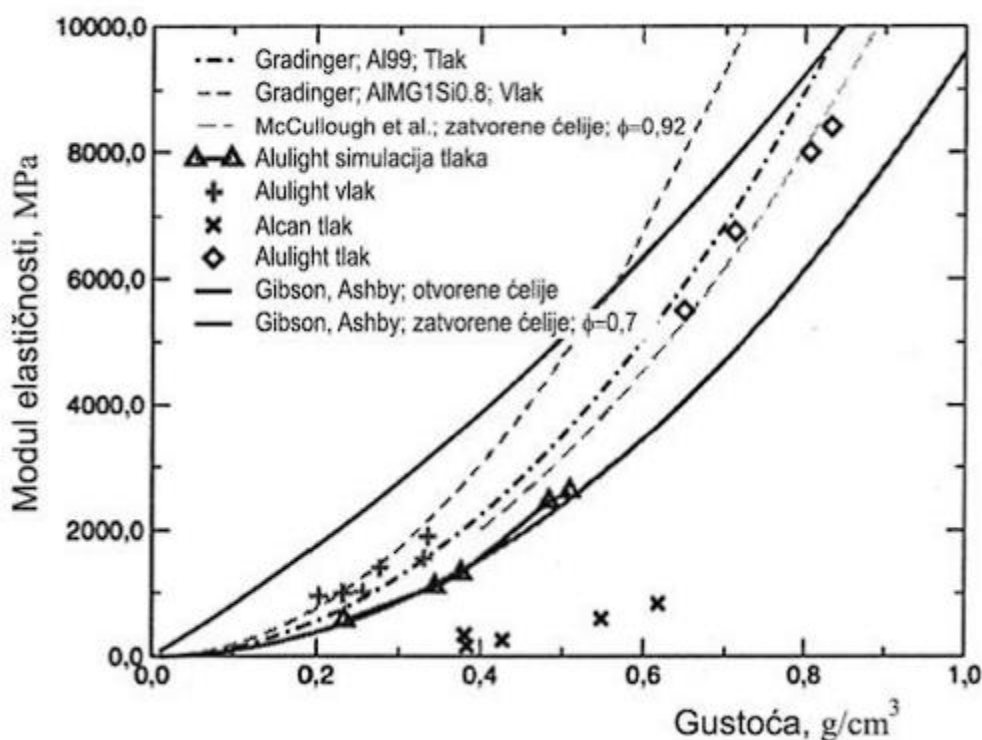
Kod metalnih pjena sa zatvorenim ćelijama do zgušnjavanja i potpunog stlačivanja pjene dolazi pri naprežanju većem od granice stlačivanja i deformaciji potpunog zgušnjavanja. Metalne pjene otvorenih ćelija imaju jednostavnije ponašanje te se kod njih vrlo jasno vidi granica stlačivanja  $R_{ct}$  pri kojoj pjene počinju teći. Metalne pjene koje su najzastupljenije u ispitivanjima su niklove i aluminijske izrađene nekim od postupaka poznatih kao „IFAM“, „ERG“, „Alporas“ i „Cymat“. Na rezultate ispitivanja značajno utječu dimenzije uzorka te su zato određeni omjeri visine i debljine kao i omjer dimenzija uzorka i veličine ćelija. Omjer visine i debljine mora biti veći od 1,5. Zadovoljavanjem navedenih uvjeta izbjegava se dobivanje pogrešnog rezultata zbog utjecaja veličine uzorka [5]. Slika 5. prikazuje krivulje naprežanje-deformacija aluminijskih pjena pod djelovanjem tlačnog opterećenja



Slika 5. Krivulje naprežanje-deformacija kod tlačnog opterećenja aluminijskih pjena [5]

### 2.1.3. Krutost

Veliku ulogu kod svojstava krutosti i čvrstoće ima gustoća materijala. U Gibson-Ashby-evom modelu, uvedena je poveznica između morfologije materijala i mehaničkih svojstava [5]. Pokazalo se da za metalne pjene poveznica postoji isključivo za pjene otvorenih ćelija. Modul elastičnosti razlikuje se kod aluminijevih pjena pri tlačnom i vlačnom opterećenju. Niže vrijednosti krutosti mogu se pripisati metalnim pjenama koje imaju ćelije zatvorenog tipa. Slika 6. prikazuje ovisnost modula elastičnosti i gustoće različitih metalnih pjena.



Slika 6. Ovisnost modula elastičnosti i gustoće metalnih pjena [5]

### 2.1.4. Vatrootpornost

Aluminijeve pjene sa zatvorenim ćelijama poznate su po velikoj vatrootpornosti do koje dolazi zbog formiranja teško taljivog Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sloja. Međutim, metalne pjene mogu i izgubiti nosivost kao rezultat strukturnog i toplinskog stradavanja pri visokim temperaturama. Najotpornije niklove pjene izdržavaju temperature koje mogu sezati do 600 °C i više [5].

### 2.1.5. Toplinska vodljivost

Metalne pjene otvorenog tipa ćelija imaju veliki koeficijent toplinske vodljivosti ( $\lambda$ ) te se koriste kod izmjenjivača topline. Zatvorene ćelije su velika suprotnost otvorenim ćelijama kada se radi o toplinskoj vodljivosti zbog niže vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti  $\lambda$  (0,2 - 11 W/mK) te se one koriste kao toplinski izolatori. [5]

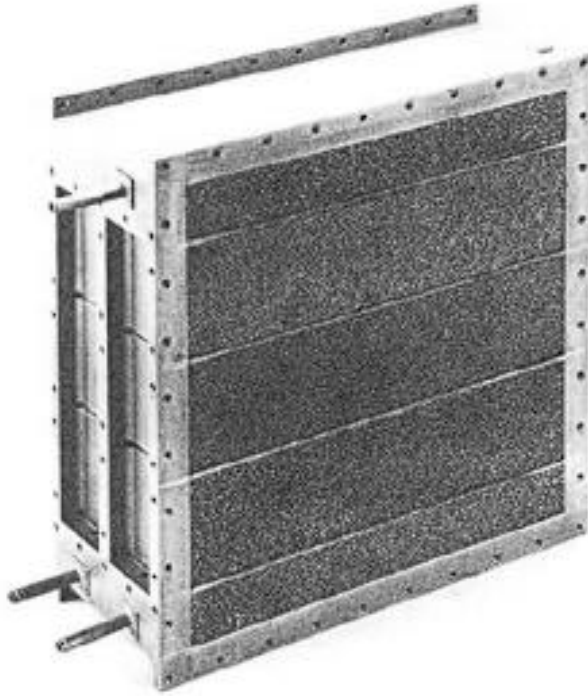
## 2.2. Upotreba aluminijevih pjena

Aluminijeve pjene uporabu najviše pronalaze u transportnoj industriji - automobilskoj, svemirskoj, željezničkoj. Lagane konstrukcije pronalaze namjenu u svemirskoj industriji, a pjenasti aluminijski paneli zatvorenih ćelija mogu se koristiti za upravljanje toplinom. Upravljanje energijom i naprezanjima te sposobnost mehaničkog prigušivanja ključne su u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji. Aluminijeva pjena vrlo dobro funkcionira kao zvučni izolator. Aluminijeva pjena pokazuje obilježja da postane jedan od trendova u razvoju pasivnih sigurnosnih sustava automobila. [2]



Slika 7. Trup vlaka ojačan aluminijevom pjenom [6]

Aluminijeve pjene primjenu mogu pronaći i u građevinarstvu. Zbog svojih toplinskih svojstava mogu se koristiti kao izmjenjivači topline.



Slika 8. Izmjenjivač topline s aluminijevom pjenom [5]

## 3. BRZOREZNI ČELICI

### 3.1. Kemijski sastav brzoreznih čelika

Brzorezni čelici alatni su čelici predviđeni za rad u uvjetima povišene i visoke temperature, pogodni za rezanje velikim brzinama. Kemijski sastav ove skupine čelika karakterizira raspon ugljika od 0,7%-1,3% i legiranje jakim karbidotvorcima poput kroma, volframa, vanadija i molibdena. 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.

U sastav brzoreznog čelika uvijek je uključeno najmanje 5 komponenata bez obzira na prateće elemente kao Mn, Si itd. Kao i kod drugih čelika najvažniji element s aspekata kaljivosti je ugljik. Ugljik je u različitim stupnjevima proizvodnog postupka u različitim udjelima raspodijeljen između matrice i karbidne faze. U žarenom stanju veći dio ugljika nalazi se u karbidima, od kojih se veći dio otapa pri austenitizaciji te ulazi u austenit. Istraživanja pokazuju da je djelovanje ugljika najbolje kada njegov udio stehiometrijski odgovara karbidima u kaljenoj i popuštenoj mikrostrukturi [7].

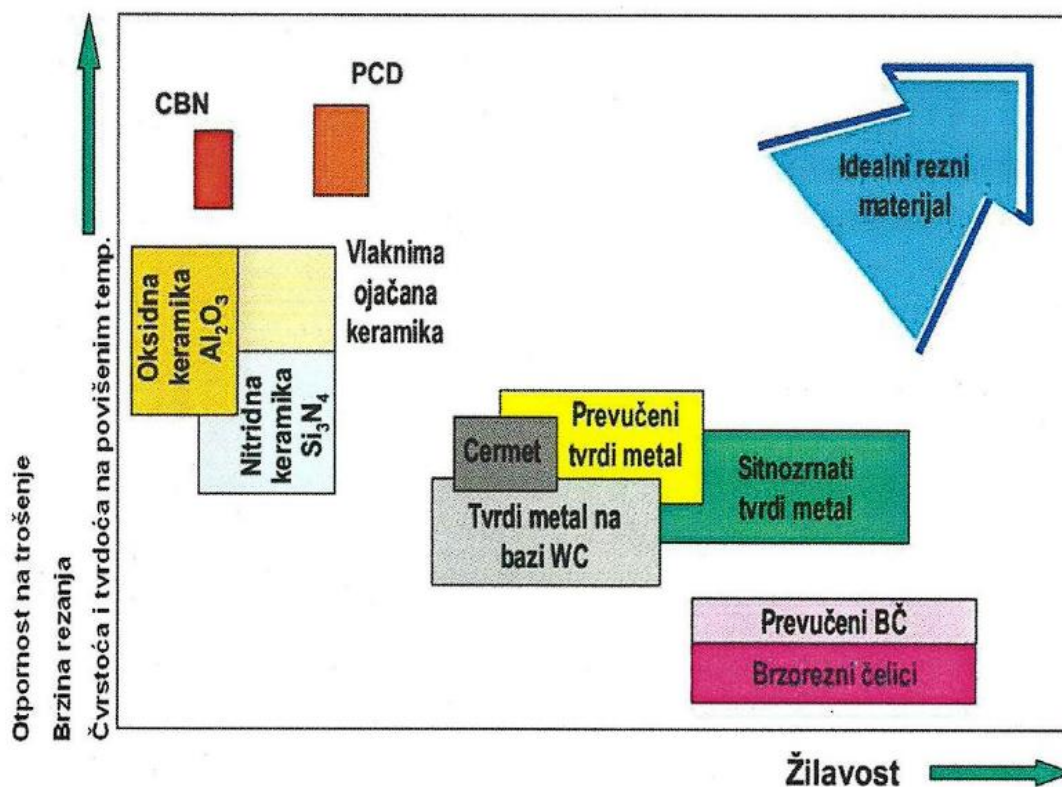
Kod brzoreznih čelika ugljik ima vrlo važan utjecaj na stvaranje dovoljne količine i vrste karbida koji ne ulaze u čvrstu otopinu tijekom toplinske obrade, a potrebni su radi postizanja visoke otpornosti čelika na trošenje. To su prvenstveno eutektički karbidi tipa MC i MC (K<sup>e</sup>). Vanadij je najjači karbidotvorni element u brzoreznim čelicima koji stvara vanadij karbid tipa MC iz taline prije ferita. Karbidi tipa M<sub>6</sub>C nastaju u eutektičkoj i eutektoidnoj pretvorbi.

Od legiranih elemenata krom povećava prokaljivost, a povećani udio kroma (iznad 4%) povećava udio zaostalog austenita [8]. Molibden, volfram i vanadij, otopljeni u matrici povećavaju tvrdoću nakon popuštanja zbog precipitacije karbida popuštanja. Također, povećavaju otpornost prema popuštanju i tvrdoću u toplom stanju te otpornost prema trošenju jer se tvrda karbidna faza ne otapa pri austenitizaciji. Kobalt u brzoreznim čelicima ima posebno djelovanje jer ne stvara karbide već se otapa u feritnoj matrici čime povoljno utječe na tvrdoću u toplom stanju te na otpornost prema popuštanju. [9] U tablici 1. navedeni su konvencionalno proizvedeni brzorezni čelici.

Tablica 1. Primjeri primjene brzoreznih čelika

Oznaka čelika	Primjeri primjene
S18-0-1 (0,75% C)	Zbog 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, štanice 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).

Navedeni sastav i postignuta mikrostruktura brzoreznih čelika dovodi do postizanja dobre otpornosti na trošenje i popuštanje pri radnim temperaturama od 500°C do 600 °C. Najčešće su svrdla od brzoreznog čelika u radu izložena lokalnom zagrijavanju do  $\approx 600$  °C. Ovakvi ekstremni uvjeti zahtijevaju od brzoreznog čelika dobra mehanička, tribološka i toplinska svojstva koja se mogu postići izborom odgovarajućeg brzoreznog čelika i odgovarajućim toplinskim obradama. Na slici 9. uspoređena su svojstva alatnih materijala za rezne alate.



Slika 9. Usporedba svojstava alatnih materijala za rezne alate [10]

U odnosu na ostale materijale za rezne alate (rezna keramika, tvrdi metali i sl.) brzorezni čelici imaju nižu otpornost na trošenje te značajno sniženje tvrdoće pri porastu temperature rezne oštrice iznad 600 °C. Kod reznih alata otpornost na trošenje glavno je zahtijevano svojstvo te se poboljšanju tog svojstva posvećuje najviše istraživanja. Ovisno o alatu odnosno o vrsti strojne obrade (tokarenje, glodanje, bušenje, blanjanje, razvrtanje....) mehanizmi trošenja bit će različiti.

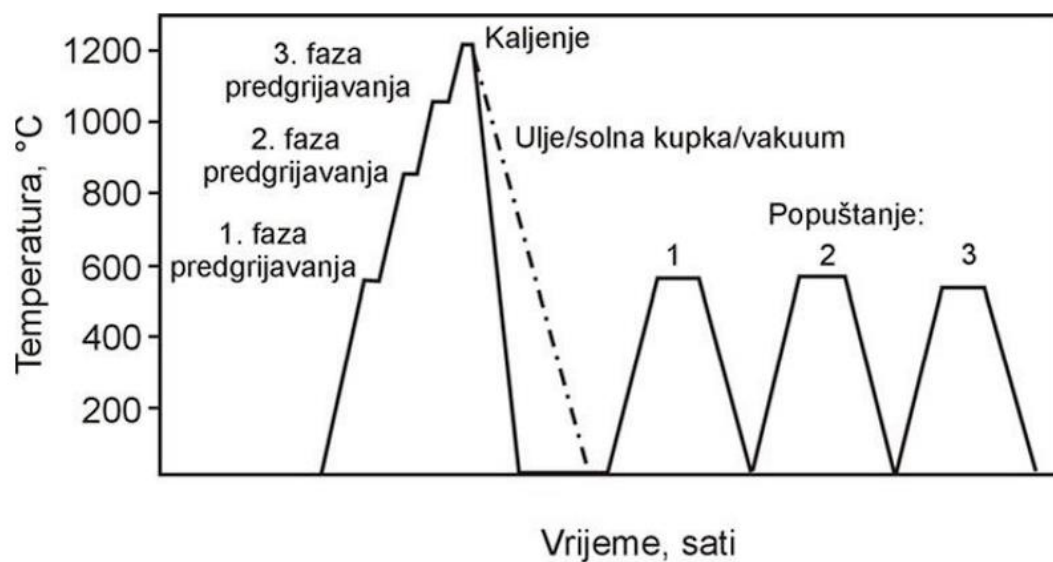


### 3.2. Toplinska obrada brzoreznih čelika

Pravilna toplinska obrada materijala za alat jednako je važna kao i sam odabir materijala alata. Čest je slučaj da alati izrađeni od najkvalitetnijih alatnih materijala ne ispunjavaju zahtjeve zbog lošeg provođenja ili odabira toplinske obrade. Cilj toplinske obrade brzoreznih čelika transformiranje je mekožarene strukture koja se sastoji većinom od ferita i karbida u zakaljenu i popuštenu martenzitnu strukturu koja sadrži karbide koji osiguravaju potrebna svojstva reznih alata.

Brzorezni čelici zbog vrlo visoke legiranosti imaju nizak koeficijent toplinske vodljivosti. Temperature austenitizacije iznimno su visoke, a brzorezni čelici prolaze kroz proces austenitizacije gotovo isključivo u solnim kupkama. Pri uronjavanju hladnog alata u solnu kupku može doći do intenzivnog toplinskog udara. To je razlog koji dovodi do obaveznog predgrijavanja brzoreznih čelika, u dva ili čak tri stupnja, i to pri 550°C, 850°C i 1050°C. Tijekom drugog stupnja predgrijavanja (850°C) materijal dijelom poprima austenitnu strukturu, tako da se daljnje zagrijavanje provodi brže, a sljedeće držanje kraće je nego pri slučaju prvog i drugog stupnja predgrijavanja.

Brzorezni čelici uobičajeno se isporučuju u meko žarenom stanju (tvrdoće od 240 HB do 300 HB). Temperatura austenitizacije ove skupine ledeburitnih (podeutektskih) čelika izrazito je visoka (od 1200 do 1300 °C), svega 20 °C ispod solidus temperature. Kako bi se postigao dovoljan sadržaj 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 difuzijski je proces ovisan o temperaturi i vremenu držanja. Kod nedovoljnog vremena austenitizacije ne postiže se dovoljna koncentracija ugljika u austenitu. Predugo držanje na visokim temperaturama uzrokuje nepoželjan porast austenitnog zrna. Stoga je nužno za svaki brzorezni čelik utvrditi optimalne parametre austenitizacije, gašenja i popuštanja. Slika 10 prikazuje navedene režime toplinske obrade brzoreznih čelika.



Slika 10. Dijagram postupka toplinske obrade brzoreznih čelika [11]

## 4. BUŠENJE

### 4.1. Bušenje spiralnim svrdlima

Bušenje je postupak obrade odvajanjem čestica kod kojeg glavno (rotacijsko) te posmično (translacijsko) gibanje vrši alat. Kod bušenja, alat kružnim kretanjem pod pritiskom prodire u materijal obratka te odvaja sloj materijala određene debljine kako bi se postigao željeni promjer. Alat za obradu bušenjem je svrdlo, a moguće vrste provrta su prolazni te neprolazni. Prednost bušenja nad ostalim tehnikama obrade kojima je moguće stvoriti provrt (primjerice štancanje, tokarenje, probijanje, lijevanje,...) leži u činjenici da ga je moguće primijeniti za gotovo sve materijal, raznovrsne geometrije obradaka te za razne veličine serija. Razvoj industrije obrade odvajanjem čestica doveden je do mjere da gotovo i ne postoje ograničenja kod obrade raznovrsnih materijala te zahtjevnih geometrija obradaka.

Bušenje karakteriziraju [12]:

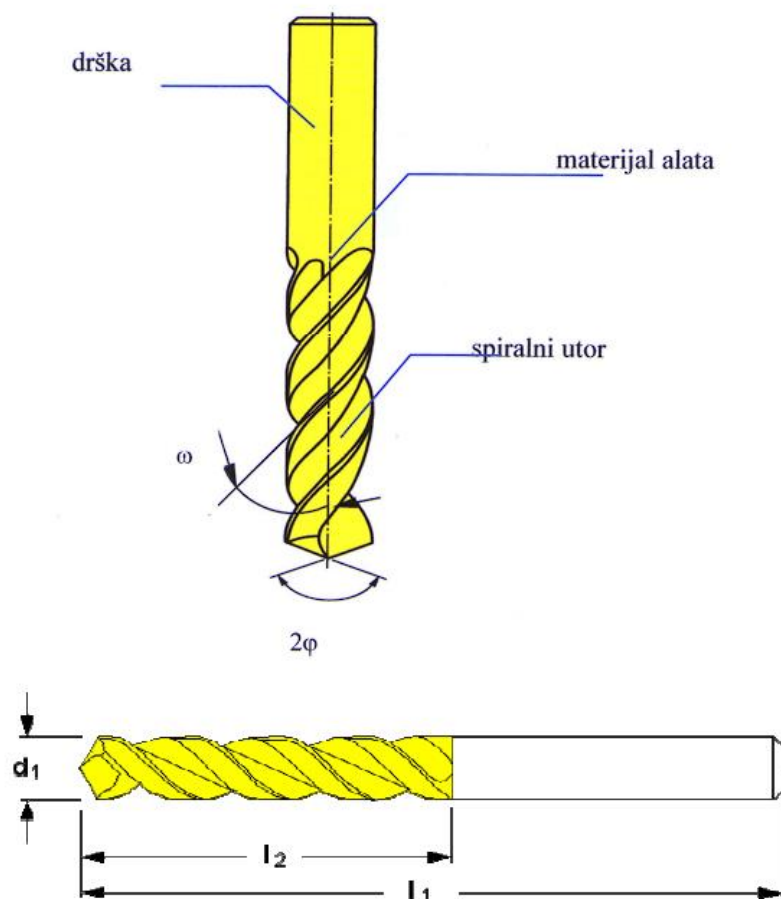
- promjenjiva brzina rezanja duž glavne oštrice
- promjenjivi kutovi rezanja duž glavne oštrice
- otežano odvođenje odvojene čestice i dovod SHIP-a
- mala krutost sustava

Svrdlo je alat 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. Na slici 11 prikazana je konstrukcija i dimenzije spiralnog svrdla.

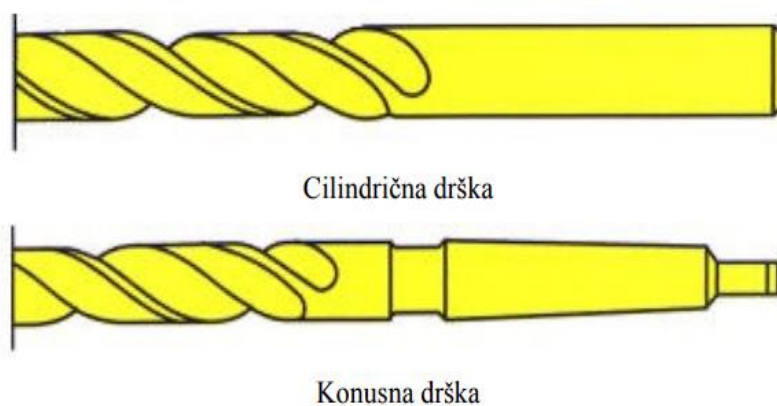
Dijelovi spiralnog svrdla jesu:

- radna dužina svrdla  $l_1$  koja sadrži spiralne utore, a uključuje rezni i kalibrirajući dio svrdla
- rezni dio koji je izbrušen u konus  $2\varphi$
- usmjeravajući dio koji osigurava usmjeravanje svrdla u procesu rezanja
- drška, dio svrdla koji služi za pričvršćenje svrdla i prijenos okretnog momenta na svrdlo

Osnovne dvije izvedbe svrdla prema obliku drške prikazane su na slici 12.



Slika 11. Spiralno svrdlo [13]



Slika 12. Podjela svrdla po izboru drške [13]

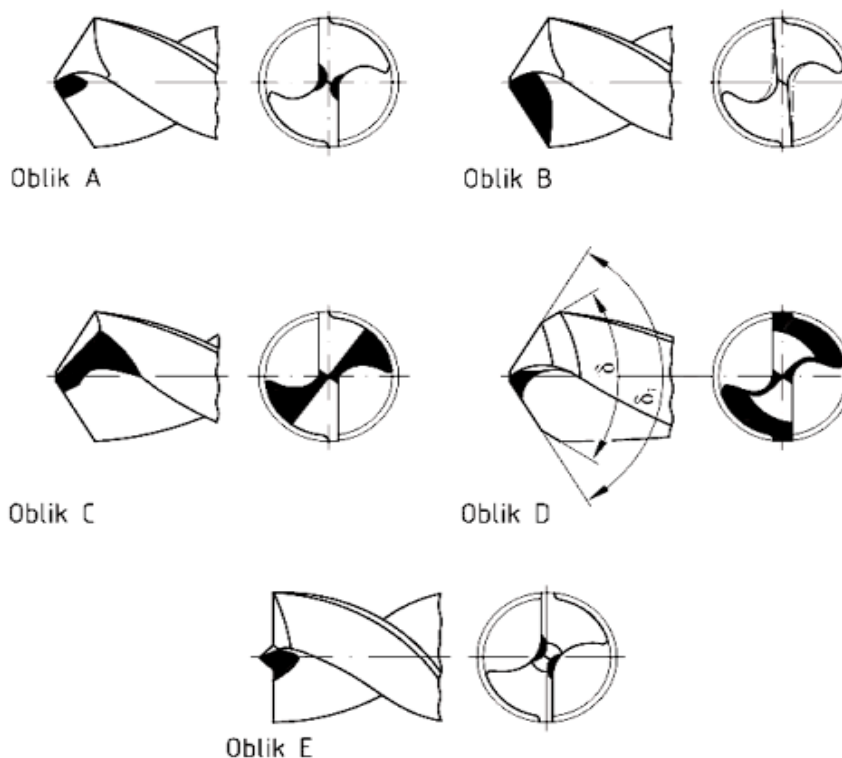
Osnovni elementi spiralnog svrdla jesu sljedeći:

- prednja površina - zavojna površina utora po kojoj klizi odvojena čestica

- stražnja površina - površina okrenuta prema površini rezanja
  - glavna rezna oštrica – linija koja se obrazuje presijecanjem prednje i stražnje površine alata.
- Spiralno svrdlo ima dvije glavne rezne oštrice, jedna drugoj prethodi za  $180^\circ$
- rub-uski pojas na cilindričnoj površini svrdla, raspoređena uzduž zavojnog utora, a služi za usmjeravanje svrdla pri bušenju
  - poprečna oštrica – linija koja se dobije kod presijecanja dvaju stražnjih površina

Kut vrha svrdla  $2\phi$  kut je koji zatvaraju dvije glavne rezne oštrice. Pri odabiru kuta svrdla primarno se uzima u obzir materijal obratka. Kut svrdla ima velik utjecaj na prednji geometrijski kut  $\gamma$ , stražnji geometrijski kut  $\alpha$ , kao i na otpornost jezgre svrdla. S povećanjem kuta svrdla  $2\phi$  dolazi i do povećanja otpora rezanja, a proporcionalno se povećavaju naprezanje svrdla na uvijanje i izvijanje. Kod tvrdih materijala kut iznosi:  $2\phi = 120^\circ - 140^\circ$ , a kod mekših materijala (primjerice Al i Cu legure) kut iznosi  $2\phi = 80-110^\circ$ .

Različite rezultate prilikom bušenja dobiva se promjenom geometrije oštrice. Podjela svrdla prema geometriji oštrice prikazana je na slici 13.



Slika 13. Standardizirane geometrije vrha svrdla prema DIN 1412:2001-03 [14]

Prema geometriji oštrice svrdla imaju različite rezultate djelovanja na obradak tijekom bušenja:

- svrdla oblika A i C neznatno povećavaju silu rezanja,
- svrdlo oblika B omogućuje stabilizaciju glavne oštrice,
- svrdlo oblika D ima jednostruko lomljenu oštricu što ima za cilj smanjenje presjeka strugotine te se smanjuje mehaničko i toplinsko opterećenje oštrice,
- svrdlo oblika E ima zašiljeni vrh što mu omogućuje centriranje rupe, odnosno olakšan ulaz svrdla u materijal (manje vibracije) čime je vođenje svrdla bolje, a kvaliteta površine veća. [13]

Kut zavojnice utora  $\omega$  kut je između osi svrdla i razvijenog brida utora. Ovaj kut određuje veličinu prednjeg geometrijskog kuta  $\gamma$ . Povećanjem kuta zavojnice  $\omega$  povećava se kut  $\gamma$ , a ujedno se popravljaju uvjeti rezanja, smanjuje moment uvijanja i otpori rezanja. Istovremeno se smanjuje krutost svrdla i trajnost oštrice, pogotovo za svrdla manjeg promjera. Na slici 14 prikazana su tri svrdla različitih kutova zavojnice utora.



Slika 14. Svrdla s različitim kutom zavojnice utora

## 4.2. Trošenje i zatupljenje svrdla

### 4.2.1. Mehanizmi trošenja

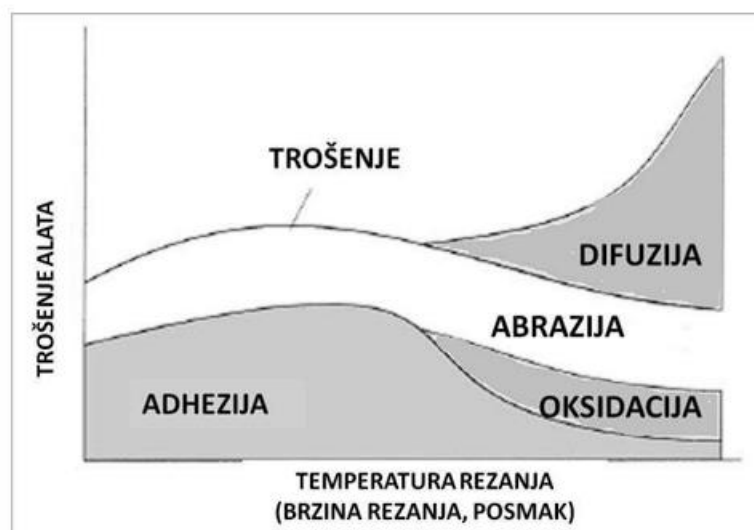
U procesu obrade materijala odvajanjem čestica dolazi do trošenja alata koje snažno utječe na mehanizme stvaranja strugotine u funkcionalnom i ekonomskom smislu. Zbog toga je od izuzetnog značaja da se razumiju mehanizmi i procesi koji djeluju između obratka, strugotine i alata. Vrlo složeni proces stvaranja strugotine provodi se pod velikim opterećenjima, brzinama rezanja i trenjima, koja uzrokuju visoka naprezanja i deformacije. Zbog toga dolazi do razvoja velikih sila rezanja te generiranja velikih toplina. Sve ovo dovodi do velikog ubrzanja fizikalnih i kemijskih procesa vezanih uz trošenje alata. Proces trošenja predmet je brojnih istraživanja zadnjih stotinjak godina, ali do danas nije dovoljno razjašnjen. Sve površine alata koje su u dodiru sa strugotinom i obratkom se troše. S povećanjem trošenja alata smanjuje se točnost obrade. Plastična deformacija i trenje u zoni obrade generiraju velike količine energije, koja podiže temperaturu alata i time smanjuje otpornost alata na trošenje. Ovaj problem vrlo je značajan jer se s trošenjem alata mijenjaju njegove dimenzije i sama geometrija. Tupi alat podiže sile rezanja, sile rezanja povećavaju deformaciju radnog obratka, a može doći i do stvaranja vibracija koje mogu smanjiti kvalitetu obrađene površine. Povećanje potrebne snage rezanja uzrokuje povećanje topline, koja povećava brzinu trošenja alata. Promjena dimenzija alata utječe na promjenu dimenzija radnog predmeta. U procesu bušenja rezni dio svrdla nakon nekog vremena provedenog u obradi se troši. Pod pojmom trošenja reznog dijela svrdla podrazumijeva se nastupanje takvih mehaničkih oštećenja pod kojima se više ne mogu ispuniti svi prvotni uvjeti rezanja i zahtjevi za održavanjem kvalitete obrađene površine, održavanja zadanih dimenzija i tolerancija te općenito stabilnosti reznog alata i krutosti sustava jer dolazi do zatupljenja rezne oštrice. Na slici 15 prikazana je ovisnost mehanizama trošenja o temperaturi i brzini rezanja.

Mehanizmi trošenja alata klasificiraju se u četiri osnovne grupe [15]:

1. Adhezijsko trošenje, koje uzrokuje međusobno «zavarivanje» vrhova površina koje su u dodiru (klizanju).
2. Abrazijsko trošenje, koje je uzrokovano skidanjem strugotine (čestica) ili «oranjem»
3. Difuzijsko trošenje, između materijala strugotine i materijala alata na nivou atoma dolazi do difuzije atoma iz jedne površine u drugu.

4. Korozijsko trošenje, koje uzrokuju elektrokemijski mehanizmi, koji djeluju na površinama dodira.

Budući da različiti mehanizmi trošenja mogu djelovati istovremeno, identifikacija dominantnog mehanizma nije jednostavna te ovisi o subjektivnoj interpretaciji.



Slika 15. Ovisnost mehanizama trošenja o brzini rezanja [16]

### Adhezijsko trošenje

Kod adhezijskog trošenja alata, zbog djelovanja visokih pritisaka, površina alata i strugotine su toliko blizu jedna drugoj da nastaju snažne molekularne veze. Do adhezijskog trošenja dolazi pri nižim temperaturama, a karakterizira ga mehaničko “ljepljenje” odnosno zavarivanje malih komada netom prije odvojenih čestica, tvoreći tako naljepak na reznoj oštrici. Nakon određenog perioda dolazi do otkidanja naljepka, a s tim i do mogućeg otkidanja dijela rezne oštrice, odnosno alata. Na proces adhezije znatno utječe i stanje hrapavosti površine, pri čemu porastom hrapavosti raste i mogućnost nastanka adhezije. Kod fine obrade, adhezijsko trošenje može dovesti do narušavanja geometrije obratka. Kod postupka bušenja, gdje se brzina rezanja mijenja duž rezne oštrice, stvaranje naljepka ne može se spriječiti neovisno o materijalu alata. Iskustvo je pokazalo da se porastom brzine rezanja preko 70 m/min znatno smanjuje mogućnost nastanka naljepka pri obradi čeličnih materijala. Prilikom porasta brzina rezanja kakve se danas koriste u suvremenoj proizvodnji dolazi do pojave kombiniranih trošenja, najčešće abrazije i adhezije. Porastom brzine rezanja raste i temperatura koja često dosegne i do 1200 °C, a djelovanjem adhezijskog trošenja dolazi do kontaktnog zavarivanja rezne oštrice i odvojene



čestice rezultirajući plastičnom deformacijom alata. Prilikom plastične deformacije, karbidna zrna unutar reznog materijala razdvajaju se od matrice i tvore čestice koje abrazivno djeluju na površine obratka i alata. [17]

### **Abrazijsko trošenje**

Abrazijsko trošenje karakterističan je proces trošenja koji je gotovo uvijek prisutan kod obrade odvajanjem čestica. Zbog vrlo tvrdih čestica koje se nalaze gotovo u svakoj mikrostrukturi materijala obratka dolazi do «oranja» površine alata. Uzrok tome kod čelika su martenzit i cementit, dok su kod drugih materijala to razne vrlo tvrde čestice. Navedeno trošenje neizbježno je i javlja se uvijek kod konvencionalnih postupaka obrade odvajanjem čestica zbog kontakta alata i obratka. Intenzivnije djelovanje abrazije nastaje zbog nedovoljnog podmazivanja između površina alata i obratka, neodgovarajućeg medija za podmazivanje ili neadekvatne hrapavosti površina, što može biti utjecaj drugih mehanizama trošenja. Moguća je i pojava abrazijskog trošenja između tri tijela, koje se javlja klizanjem površina alata i obratka gdje se između njih pojavljuju još i čestice trećeg tijela koje uzrokuju nastajanje malih ogrebotina u smjeru glavnog gibanja. [17]

### **Difuzijsko trošenje**

Difuzijsko trošenje toplinski je aktiviran proces, uzrokovan kemijskim opterećenjima koja rastu s porastom temperature te afinitetom materijala alata prema materijalu obratka. Najčešće se pronalazi kod alata od keramike i tvrdog metala. Zbog vrlo visokih pritisaka i temperatura dolazi do mikroprijenosa na atomskom nivou. Veličina difuzije atoma raste eksponencijalno s povećanjem temperature. Također se smatra glavnim uzročnikom kraterskog trošenja prisutnog na prednjoj površini alata. Difuzijsko trošenje se najbolje suzbija korištenjem različitih vrsta prevlaka, poglavito aluminijsko-oksidsnom prevlakom  $Al_2O_3$ . [17]

### **Korozijsko trošenje**

Na povišenim temperaturama dolazi do intenzivnog stvaranja mikrogalvanskih elemenata. Karbidi predstavljaju mikro-katode, dok je kobalt mikro-anoda te dolazi do oksidacije materijala alata. Oksidi koji nastaju vrlo se lako odstrane s površine alata što uzrokuje trošenje alata.

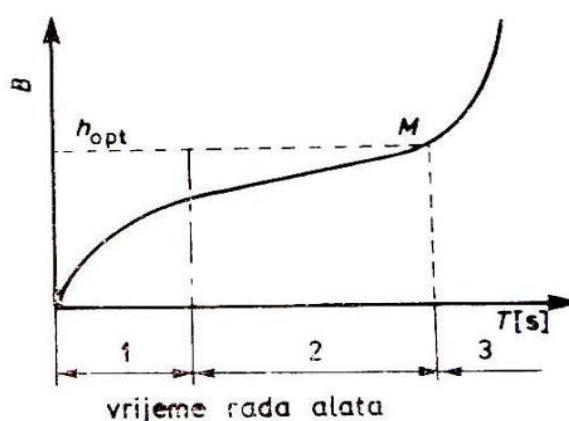
#### 4.2.2. Oblici trošenja svrdla

Trošenje svrdla pojavljuje se u dva osnovna oblika :

1. potpuno istrošenje (lom oštrice)
2. relativno istrošenje (učinak alata se toliko smanjio da nastupaju poteškoće u daljnjem radu)

U radnom vijeku svakog alata prisutne su tri faze (slika....) :

1. period uhodavanja alata (pojačano trošenje)
2. period normalnog rada alata (linearno trošenje)
3. period izrazitog trošenja (alat značajno gubi prvotne dimenzije)



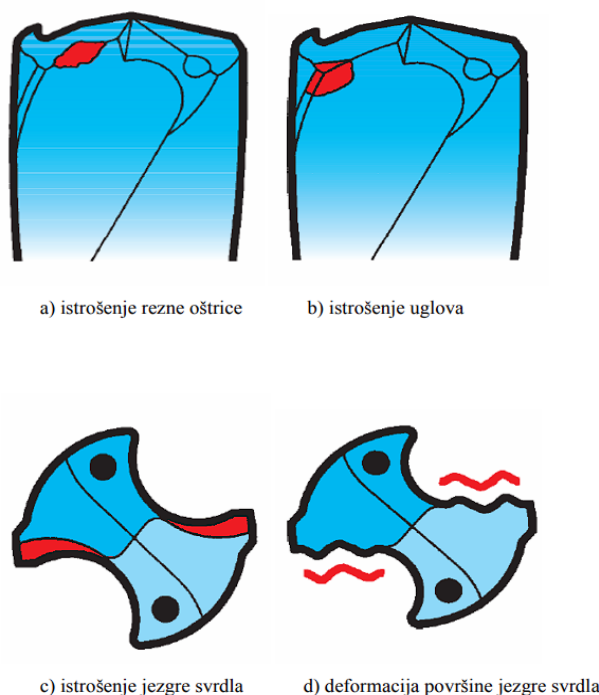
Slika 16. Taylorova metoda prikaza trošenja alata [18]

Potrebno je stoga odrediti slučaj kada je svrdlo u takvom stanju istrošenosti da je potrebno novo brušenje rezne oštrice ili eventualno zamjena novim svrdlom. Sama svrdla troše se kao rezultat trenja stražnje površine alata o površinu rezanja, zatim odvojene čestice o prednju površinu u pravcu ruba svrdla, te ruba alata o površinu provrta i gnječenja poprečne oštrice. Na slici 17 prikazani su oblici istrošenja oštrice svrdla. U ovisnosti od toga kakvo je zatupljenje svrdla nastupilo, dolazi do porasta momenta ili aksijalne sile, ili jednog i drugog zajedno. U slučaju trošenja ruba svrdla dolazi do naglog povećanja momenta, dok se sila posmaka neznatno povećava. U slučaju trošenja poprečne oštrice dolazi do naglog porasta posmične sile, a u manjem stupnju povećava se i moment. Kod trošenja na uglovima nastaje povećanje momenta i posmične sile. Trošenje stražnje površine svrdla neravnomjerno je, na obodnom dijelu najveće, a u blizini poprečne oštrice pada na najmanju vrijednost. Svakako najnepovoljniji oblik trošenja jest istrošenje uglova i ruba svrdla budući su brzine rezanja na

tim mjestima maksimalne. Duljina trošenja stražnje površine može se uzeti kao kriterij zatupljenja svrdla. Za manji posmak i istrošenje svrdla je manje.

Intenzitet trošenja oštrice alata moguće je pratiti na više načina :

1. vanjskim izgledom obratka
2. oštećenjem i lomom svrdla
3. naglim povećanjem sila rezanja
4. naglim porastom duljine istrošenja stražnje površine
5. naglim porastom temperature svrdla



Slika 17. Oblici istrošenja svrdla [13]

Uzroci trošenja rezne oštrice kod svrdla mogu biti sljedeći:

1. prevelika ili premala brzina rezanja
2. prevelik ili premalen posmak
3. premala krutost, nedovoljno stegnut obradak
4. nedovoljno dobro podmazivanje i hlađenje
5. velika dubina bušenja
6. ekscentričnost svrdla koja dovodi do rasta temperature

## 5. POSTUPCI MODIFICIRANJA I PREVLAČENJA POVRŠINE SVRDLA

Primjenom postupaka modificiranja i prevlačenja mogu se postići značajno drugačija svojstva površine obrađivanog materijala u odnosu na jezgru. Neka od željenih svojstava koje je cilj postići primjenom odgovarajućih postupaka su povišenje tvrdoće i otpornosti na trošenje, povećanje otpornosti na koroziju i smanjenje faktora trenja. Ostvarivanjem željenih svojstava značajno se može povećati vijek trajanja proizvoda. Kod postupaka modificiranja površinski sloj nastaje od polazne površine prema unutrašnjosti materijala, dok se kod prevlačenja površinski sloj stvara na polaznoj površini materijala [19]. Prilikom odabira postupaka ili površinske tehnologije neophodno je u potpunosti uzeti u obzir očekivane radne uvjete alata.

### 5.1. Nitriranje

Nitriranje je toplinsko-kemijski postupak modificiranja površine koji se temelji na difuziji dušika u površinski sloj obrađivanog predmeta. Toplinsko-kemijska obrada sastoji se od podvrgavanja obratka od željeznih materijala, čelika, ili željeznog lijeva, na temperaturama koje su obično između 500°C i 600°C, u sredstvu koje otpušta dušik. Temperatura nitriranja ispod je temperature  $A_1$ , pa stoga kod jezgre obrađivanog predmeta ne dolazi do mikrostrukturnih promjena, uz uvjet da je temperatura prethodno provedenog popuštanja ili žarenja bila viša od temperature nitriranja. Nitriranjem se postiže: visoka površinska tvrdoća, povećanje otpornosti na (osobito adhezijsko) trošenje, kontaktne pritiske, umor materijala, koroziju, trošenje i povećanje dinamičke izdržljivosti pri povišenim temperaturama te sniženje faktora trenja uz malo smanjenje žilavosti i povećanje hrapavosti površine te male ili nikakve deformacije [20].

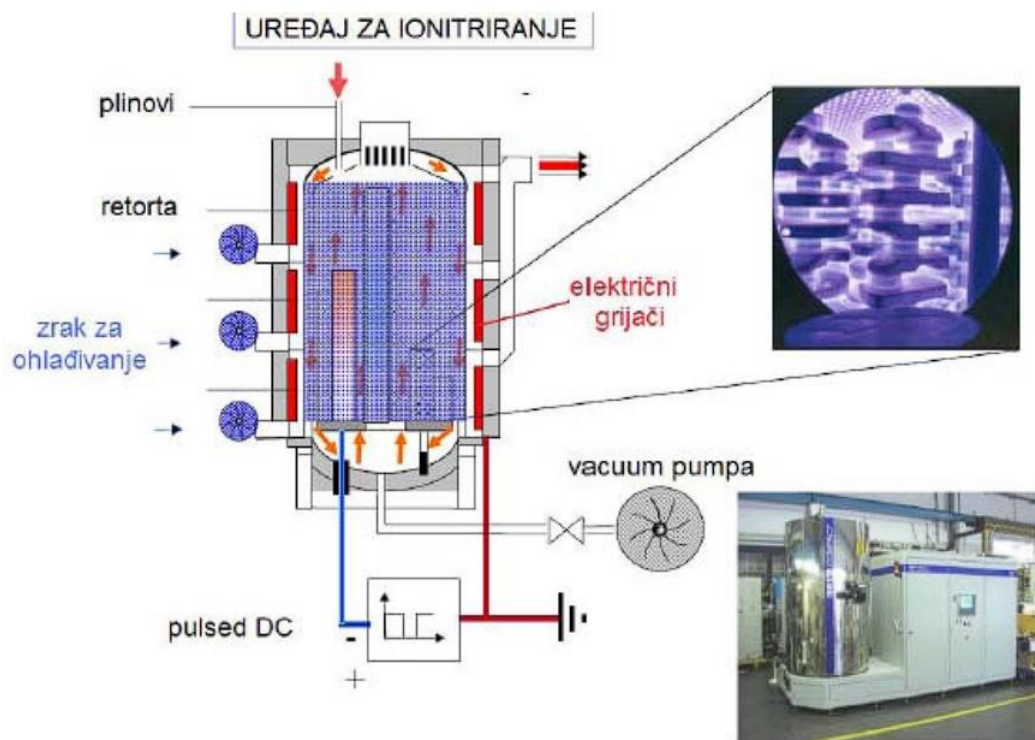
Čelici se prije nitriranja podvrgavaju postupku poboljšavanja, odnosno podvrgavaju kaljenju te naknadnom popuštanju (jednostrukom ili dvostrukom) pri višoj temperaturi od temperature nitriranja, kako bi se postigla sitnozrnata mikrostruktura koja olakšava primanje dušika i stvaranje finog nitriranog sloja na površini.

Nitrirati se može svaki, pa i nelegirani čelik ili željezni ljevovi, ali do značajnog povećanja tvrdoće dolazi samo kod čelika s odgovarajućim postotkom legiranih elemenata Al, Cr, V, W,

Mo koji djeluju povoljno na nitriranje budući da stvaraju nitride koji ostaju stabilni sve do temperature nitriranja.

Pojam nitriranja u plazmi označava selektivno dodavanje dušika željeznim materijalima u niskotlačnom okruženju putem niskoenergetske plazme. Dodavanje dušika odvija se putem ionizirane mješavine plinova koja se sastoji od dušika i vodika, ali često i drugih aditivnih plinova poput metana ili argona. Nitridni sloj vrlo je tvrd te pokazuje svojstvo otpornosti na adhezijsko te abrazijsko trošenje ( $HV > 1000$ ).

Brzorezni se čelik nitrira kroz  $t_N = 5..15$  minuta, a postiže se dubina nitriranja  $NHD = 0,025$  mm. Na slici 18 prikazana je shema uređaja za ionsko nitriranje.



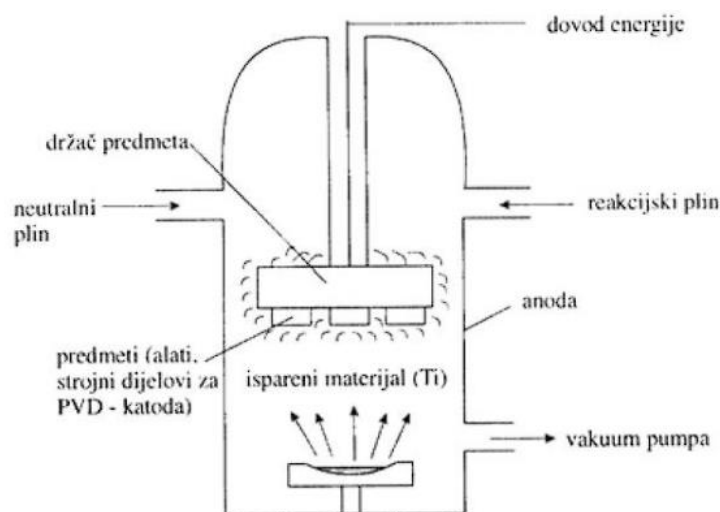
Slika 18. Shema uređaja za nitriranje u plazmi [21]

## 5.2. PVD postupak

Proces PVD (eng. Physical Vapor Deposition) provodi se pri nižim temperaturama (150-500°C), a karakterizira ga odsutnost faznih transformacija u čeliku. U PVD postupku, materijal prevlake doveden je u parnu fazu unutar vakuumske okruženja kroz procese kao što su isparavanje, sublimacija, bombardiranje ionima i sl. Nakon toga, para se usmjerava prema površini obratka gdje kondenzira te formira tanki filmski sloj. PVD proces omogućava stvaranje prevlaka kod gotovo svih elemenata [22].

PVD postupak osigurava vrlo čistu površinu prevlake zahvaljujući vakuumu i izostanku strujnih iskri, što rezultira visokom prionjivošću između prevlake i materijala podloge. Odsutnost nečistoća i čestica prašine također smanjuje poroznost prevlake. PVD tehnologija izuzetno je fleksibilna, omogućavajući nanošenje praktički svakog materijala koji ne podliježe disocijaciji, na podlogu od metala, keramike ili polimera. Jednostavnost i fleksibilnost uvelike utječu na široku primjenu PVD postupka u raznim industrijama poput strojarke, kemijske, nuklearne. Na slici 19 prikazana je shema uređaja za PVD postupak.

Jedna od karakteristika PVD prevlaka jednoličniji je prijelaz između prevlake i podloge u usporedbi s prevlakama dobivenim kroz CVD (eng. Chemical Vapor Deposition) postupak. Zahvaljujući nižim temperaturama u PVD postupku, difuzija elemenata iz prevlake u podlogu je smanjena. U određenim slučajevima, kontrolirana difuzija može poboljšati prionjivost prevlake, osiguravajući da kontakt faza nije krhka. PVD postupak također pruža veću fleksibilnost u reguliranju debljine svake prevlake. Uz to, proizvodnja PVD prevlaka obično je brža od CVD prevlaka zbog veće brzine taloženja [22]. Na slici 19 prikazana je shema uređaja za PVD postupak.

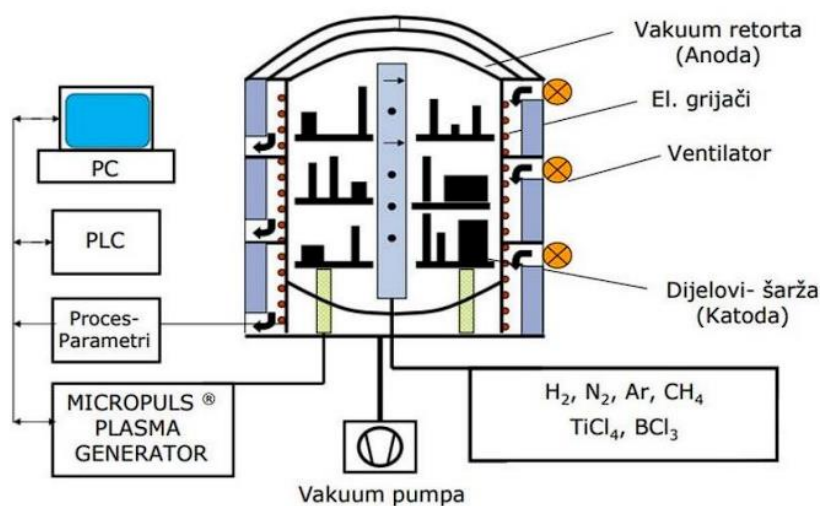


Slika 19. Shema uređaja za PVD postupak [23]

### 5.3. PACVD postupak

Plazmom potpomognuto prevlačenje iz parne faze PACVD postupak je pri kojem sastojci parne faze reagiraju i talože čvrsti film uz primjenu plazme. Za zagrijavanje osnovnog materijala specifično za ovaj postupak je uporaba plazme - električki provodljivog, disociranog visoko ioniziranog plina. PACVD tehnika omogućuje smanjenje temperature nanošenja premaza na podlogu. Plazma se može aktivirati na više načina, kao što su pulsiranje istosmjerne (DC) ili izmjenične struje (AC), primjena mikrovalova (MW) i sl.

Sustav za PACVD uključuje vakuumsku komoru s grijačima, vakuumske crpke, sustav za dobavu plinova poput dušika ( $N_2$ ), argona (Ar), vodika ( $H_2$ ), metana ( $CH_4$ ) i prekursora kao što su titan tetraklorid ( $TiCl_4$ ) i bor tetraklorid ( $BCl_3$ ), generator plazme te sustav za neutralizaciju nusprodukata prevlačenja i PLC regulacijski sustav. Dijelovi PACVD sustava prikazani su na slici 20.



Slika 20. Shema PACVD postupka prevlačenja [24]

Jedna od ključnih prednosti PACVD postupka mogućnost je nanošenja prevlaka na nižim temperaturama u usporedbi s CVD postupcima. Tipični primjeri prevlaka u PACVD postupku uključuju aluminij (koji se tali na višim temperaturama), organske polimere (koji isparavaju pri povišenim temperaturama) i metalne legure (čija se struktura može promijeniti na višim temperaturama). Temperatura tijekom PACVD procesa kreće se u rasponu od 250 do 800°C. Brzina nanošenja prevlake povećava se sa smanjenjem tlaka, pri čemu kinetika površine postaje ograničavajući faktor. Niska temperatura nanošenja prevlake pridonosi stvaranju sitnozrnate strukture prevlake.

Neke od najuobičajenijih prevlaka u uporabi PACVD postupka jesu:

- TiN - prepoznatljive zlatne boje, pokazuje dobru otpornost na trošenje, toplinsku stabilnost te nizak faktor trenja, može se koristiti i kao vezivni sloj zbog odlične prionjivosti na površinu metalnih materijala
- TiCN - prevlaka s prilagodljivom mikrostrukturom (sitnozrnata, stupičasta, mješovita) i mehaničkim svojstvima, pokazuje bolju žilavost te veću tvrdoću od TiN prevlake



## 6. KARAKTERIZACIJA POVRŠINSKOG SLOJA

### 6.1. Ispitivanje tvrdoće

Tvrdoću kao svojstvo materijala nije moguće jednoznačno definirati. Danas je u stručnoj literaturi usvojena definicija da tvrdoća predstavlja otpor materijala kao odgovor na prodiranje drugog tvrdog materijala. Tvrdoća je relativna veličina koja se ne nalazi u SI sustavu mjernih jedinica, a jedna je od najčešće mjerenih mehaničkih svojstava u strojarstvu. Pri odabiru odgovarajućeg materijala u eksploataciji u uvjetima gdje je prisutno trošenje, tvrdoća materijala predstavlja jedan od glavnih čimbenika u odabiru. Tvrdoća materijala povezana je s ostalim mehaničkim svojstvima poput žilavosti, čvrstoće, granice razvlačenja itd. Ispitivanje tvrdoće jedan je od najjednostavnijih i najbržih postupaka ispitivanja mehaničkih svojstava, a provodi se utiskivanjem specijalno i točno definiranim predmetom (tzv. indenter) u površinu materijala koji se ispituje. Dimenzije, oblik i materijal indentora razlikuju se ovisno o metodi ispitivanja. Mjerenjem dubine penetracije indentora, odnosno mjerenjem veličine otiska na površini, dolazi se do zaključka o određenoj skalarnoj vrijednosti tvrdoće za određeni materijal za tu metodu ispitivanja. Tvrdoća je primjer fizikalnog pojma koji se ne može kvantificirati bez referentne ljestvice za mjernu metodu jer tvrdoća nema određenu jedinicu koja je neovisna o metodi ispitivanja.

Najzastupljenije metode mjerenja tvrdoće metalnih materijala su sljedeće:

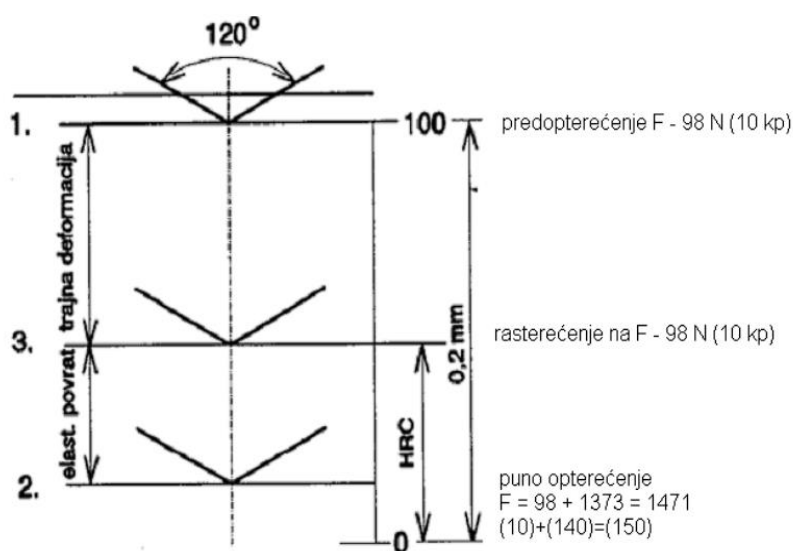
- Rockwell
- Vickers
- Brinell
- Knoop

#### 6.1.1. Rockwell C metoda

Rockwell metodu za ispitivanje tvrdoće patentirao je Stanley Rockwell 1914.god., dok su 1919. god. u patent dodane i varijante ispitivanja Rockwell tvrdoće. Od ukupno 15 patentiranih varijanti ispitivanja po Rockwellu, varijanta koja je najzastupljenija kod ove metode varijanta je Rockwell C - oznake *HRC* - "cone" - oznaka koja predstavlja indenter u obliku stošca. Dijamantni stožac za ovu varijantu karakterizira vršni kut od 120° i radijus zaobljenja 0,2 mm.

Specifičnost Rockwellove metode u odnosu na ostale leži u mjerenju dubine prodiranja penetratora, a ne veličini otiska. Zato se kod ove metode vrijednost tvrdoće očitava na skali tvrdomjera, nakon uklanjanja glavnog opterećenja. Određivanje Rockwellove tvrdoće ostavlja na površini ispitivanog dijela samo manje otiske, izvodi se jednostavno i brzo te se stoga primjenjuje za kontrolu kvalitete u serijskoj industrijskoj proizvodnji.

Opis postupka mjerenja: Penetrator se u početku opterećuje predopterećenjem  $F_0$  što rezultira određivanjem početne točke za mjerenje dubine prodiranja indentora. Potom slijedi zadavanje glavnog opterećenja  $F_1$  te rasterećivanja nazad do predopterećenja  $F_0$ . Postupak mjerenja tvrdoće prikazan je na slici 21. Uslijed povratka do preopterećenja dolazi do povrata indentora uslijed elastičnosti materijala. Dubina na kojoj se nalazi indentor nakon elastičnog povrata definira vrijednost tvrdoće materijala po Rockwellu.



Slika 21. Postupak mjerenja tvrdoće prema metodi Rockwell C

Opći izraz za određivanje tvrdoće prema metodi Rockwell C glasi:

$$HR = N - \frac{h}{s} \quad (1)$$

Gdje je:

$N$  – konstanta (određena brojem podjela skale)

$h$  - dubina utisnutog indentora pri vrijednosti predopterećenja nakon uklanjanja glavnog opterećenja

$s$  - konstanta (određena skalom Rockwell tvrdoće)

Prednosti metode Rockwell C:

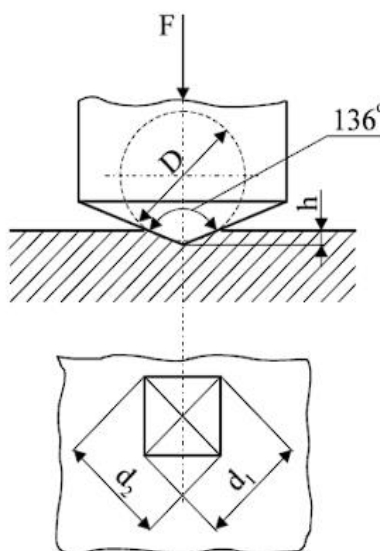
- mjerenje je brzo, tvrdoća se direktno očitava na skali tvrdomjera
- nije potrebna pretjerana priprema površine, dovoljno je grubo brušenje

Nedostaci metode Rockwell C:

- slaba selektivnost metode
- teoretsko mjerno područje Rockwell C metode nalazi se od 0 do 100 HRC, ali u praksi se koristi samo onaj dio područja od 20 do 70 HRC, metoda pronalazi funkciju najčešće u pogonima, gotovo isključivo na toplinski obrađenim čelicima
- nepreciznost mjerenja:  $\pm 2$  HRC

### 6.1.2. Metoda Vickers

Metoda ispitivanja tvrdoće prema Vickersu slična je metodi mjerenja tvrdoće prema Brinellu, a uspješna je u otklanjanju nekih nedostataka Brinellove metode. Odabirom odgovarajućeg oblika penetratora - četverostrane piramide s kutem između stranica od  $136^\circ$ , riješen je problem s primijenjenom silom utiskivanja, a odabirom dijamanta kao materijala penetratora omogućeno je ispitivanje i tvrdih materijala što nije moguće Brinellovom metodom. Shema metode prikazana je na slici 22.



Slika 22. Mjerenje tvrdoće po Vickersu

Po definiciji, tvrdoća po Vickersu izračunava se izrazom:

$$HV = \frac{F \times 0,102}{S} \quad (2)$$

pri čemu je  $F$  sila utiskivanja izražena u N, a  $S$  površina šuplje piramide otisnute u materijalu izražena u  $\text{mm}^2$ .

Proračunavanje tvrdoće kod Vickersa nije ovisno o veličini indentora, a indenter se može primijeniti za gotovo sve materijale, neovisno o njihovoj tvrdoći. Veličina uzorka ograničena je rasponom mjernog instrumenta.

Prednosti Vickersove metode:

- Jedina metoda ispitivanja koja pokriva kompletni raspon tvrdoće
- Široki raspon primjenjivih sila zadovoljava gotovo svako područje primjene
- Mogućnost uporabe uzorka nakon ispitivanja

Nedostaci Vickersove metode:

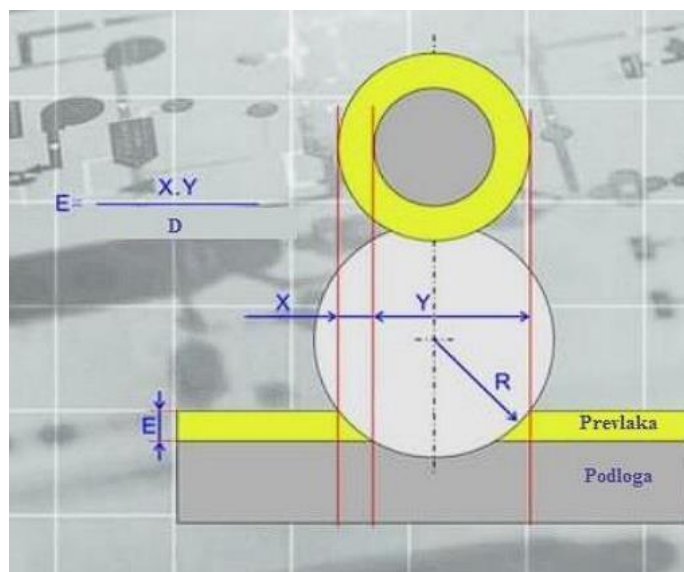
- Potreba za mjernim mikroskopom u svrhu mjerenja veličine otiska
- Relativno spora metoda mjerenja, sporija od popularne po Rockwellu
- Složenija priprema ispitne površine, površinu nije dovoljno grubo i fino brusiti, već mora biti i polirana.

## 6.2. Određivanje debljine prevlake kalotestom

Primjenom procesa prevlačenja na obratku se formira relativno tanak sloj prevlake. Debljinu nanosene prevlake može se izmjeriti kalotestom. Kalotester čini kugla određenog promjera koja pritiskom i rotacijom troši nanosenu prevlaku. Nakon određenog vremenskog perioda trošenja, proces se zaustavlja a na mjestu trošenja nastaje uzorak u obliku kalote. Poznavanjem dimenzije kugle te mjerenjem dimenzija nastale kalote, izračunava se debljina nanosene prevlake. Na slici 23 nalazi se uređaj za određivanje debljine prevlake – kalotester. Na slici 24 prikazane su mjere otiska potrebne za proračun debljine prevlake.



Slika 23. Kalotester [25]



Slika 24. Mjerenje debljine prevlake kalotestom [26]

Mikroskopom se mjeri nastala kalota te se po sljedećoj jednadžbi određuje debljina prevlake:

$$D = \frac{X \cdot Y}{2R} \quad (3)$$

Gdje je:

- $D$  - debljina prevlake,  $\mu\text{m}$
- $X, Y$  vrijednosti koje se izračunavaju na temelju izmjerenih promjera kugline kalote,  $\mu\text{m}$
- $R$  polumjer kuglice,  $\mu\text{m}$

# EKSPERIMENTALNI DIO

## 7. PRIPREMA I PROVEDBA POKUSA

### 7.1. Toplinska obrada svrdla

U eksperimentalnom dijelu rada ispitano je trošenje svrdla s različitim prevlaka pri suhom bušenju aluminijske pjene te punog aluminija. Testirano je pet različitih svrdla promjera 5 mm. Osnovni je materijal ispitanih svrdla brzorezni čelik. Svrkla su komercijalno dobavljiva, a prevlake PACVD TiN i PACVD TiN/TiCN su nanese su na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za inženjerstvo površina u postrojenju Rübiger PACVD P70/90. U istom postrojenju provedeno je i nitriranje svrdla u plazmi. Sve vrste prevlake svrdla te oznake koje će se koristiti za svrdla tijekom pokusa navedene su u tablici 2. Parametri postupaka prikazani su u tablicama 3, 4 i 5.

Tablica 2. Oznake prevučениh svrdla u pokusu trošenja i tvrdoće u polaznom stanju

Oznaka svrdla	Tvrdoća u polaznom stanju [HRC]	Toplinska obrada svrdla
P0	$59 \pm 2$	bez prevlake (kaljeno i popušteno)
P1	$56 \pm 2$	PVD TiN
P2	$59 \pm 2$	PACVD TiN
P3		nitrirano u plazmi (PN)
P4		PACVD TiN/TiCN

Na slici 25 prikazana su svrdla u polaznom stanju. U pokusima trošenja korištena su svrdla promjera 5 mm, dok su ostala svrdla ostavljena za buduća ispitivanja. Određivanje debljine prevlake i ispitivanje tvrdoće provedeno je na svrdlu promjera 8 mm.





Slika 25. Svrkla u polaznom stanju prije pokusa trošenja

U tablici 3 navedeni su parametri postupka nitriranja u plazmi. Nitriranje je provedeno u vakuumskoj peći Rübzig PACVD P70/90, u Laboratoriju za inženjerstvo površina na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Tablica 3. Parametri postupka nitriranja u plazmi

Parametri postupka	Vrijednost parametara
Temperatura čišćenja površine otprašivanjem iona	600 °C
Vrijeme čišćenja površine otprašivanjem iona	2 h
Temperatura nitriranja	600 °C
Trajanje nitriranja u plazmi	9 h
Sastav plinske smjese	63% H <sub>2</sub> , 32% N <sub>2</sub> , 5% Ar
Tlak u vakuumskoj komori	2 mbar (200 Pa)
Napon plazme	560 V
Snaga izvora plazme	1000 W

Prevlačenje postupkom PACVD također je provedeno u vakuumskoj peći Rubig PACVD P70/90. Parametri prevlačenja postupkom PACVD TiN navedeni su u tablici 4, a prevlačenje prevlakom PACVD TiN/TiCN navedeni su u tablici 5.

Tablica 4. Parametri PACVD TiN prevlačenja

<b>Parametri postupka</b>	<b>Vrijednost parametara</b>
Temperatura čišćenja površine otprašivanjem iona	500 °C
Vrijeme čišćenja površine otprašivanjem iona	2 h
Temperatura prevlačenja	520 °C
Trajanje prevlačenja prevlakom TiN	6 h
Protok plinske smjese za prevlaku TiN	250 l/h H <sub>2</sub> , 50 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 (200 Pa)
Napon plazme	480 V
Snaga plazme	3000 W
Trajanje hlađenja komore do 20 °C	6 h

Tablica 5. Parametri PACVD TiN/TiCN prevlačenja

<b>Parametri postupka</b>	<b>Vrijednost parametara</b>
Temperatura čišćenja površine otprašivanjem iona	450 °C
Vrijeme čišćenja površine otprašivanjem iona	2 h
Temperatura prevlačenja	500 °C
Trajanje prevlačenja prevlakom TiN	2 h
Protok plinske smjese za prevlaku TiN	140 l/h H <sub>2</sub> , 15 l/h N <sub>2</sub> , 10 l/h Ar
Protok plinske smjese za prevlaku TiCN	140 l/h H <sub>2</sub> , 15 l/h N <sub>2</sub> , 10 l/h Ar; 4 l/h CH <sub>4</sub>
Protok prekursora TiCl <sub>4</sub>	3 l/h
Trajanje prevlačenja prevlakom TiCN	6 h
Tlak u vakuumskoj komori	2 mbar (200 Pa)
Napon plazme	490 V
Snaga plazme	1650 W
Trajanje hlađenja komore do 20 °C	6 h

## 7.2. Priprema uzoraka

U svrhu ispitivanja provodi se bušenje na tri različita uzorka aluminijske pjene. Dva uzorka (oznake A i C) su tijela valjkastog oblika načinjena od aluminijske pjene različite gustoće (poroznosti), materijala koji je još uvijek dijelom nepoznanica kod proučavanja trošenja alata, a treći ispitni uzorak (oznake D) je valjak načinjen od aluminijske legure 6082 T6. Uzorci aluminijske pjene su prije provedbe pokusa označeni te im je izmjerena masa, promjer i visina. Promjer i visina ispitnih uzoraka nisu ujednačeni cijelim obujmom te su stoga izmjereni tri puta kako bi se odredila srednja vrijednost.

Tablica 6. Masa i dimenzije ispitnih uzoraka

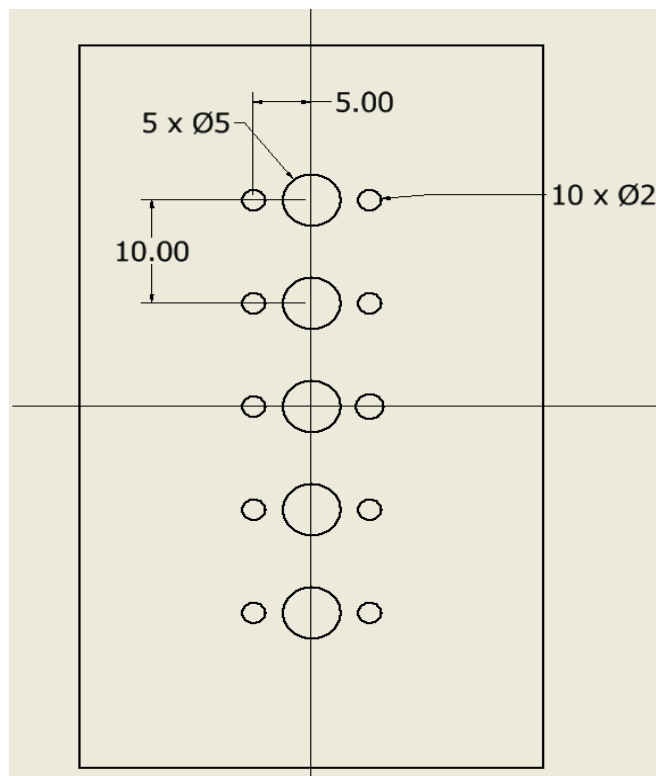
Oznaka uzorka	Masa [g]	Promjer [mm]	Visina, mm	Gustoća, g/cm <sup>3</sup>
A	42,1	40,85 40,73 40,78 $\bar{x} = 40,79$	75,01 73,42 75,84 $\bar{x} = 74,76$	0.4311
C	59,9	40,68 40,53 40,55 $\bar{x} = 40,59$	72,33 72,98 72,02 $\bar{x} = 72,44$	0.6391
D	146,7	32,88 32,90 32,88 $\bar{x} = 32,99$	63,92 65,72 65,18 $\bar{x} = 64,94$	2.660

Tvrdoće uzoraka ispitane su prijenosnim tvrdomjerom ATH 200 LEEB. Tvrdoća uzoraka ispitana je na dršci svrdla u polaznom stanju. Vrijednosti su prikazane u tablici 7.

Tablica 7. Izmjerene tvrdoće ispitnih uzoraka

Oznaka uzorka	Izmjerene vrijednosti [HB]	Srednja vrijednost [HB]
A	39 44 45 38 49	$43 \pm 5$
C	49 58 54 41 59	$87 \pm 7$
D	106 110 112 108 111	$109 \pm 3$

Nakon mjerenja aluminijskih uzoraka, označena su mjesta ispitivanja svrdla, te su uz mjesta bušenja načinjene sa svake strane dva dodatna provrta u svrhu mjerenja temperature termoelementima. Mjesta bušenja prikazana su na slici 26.

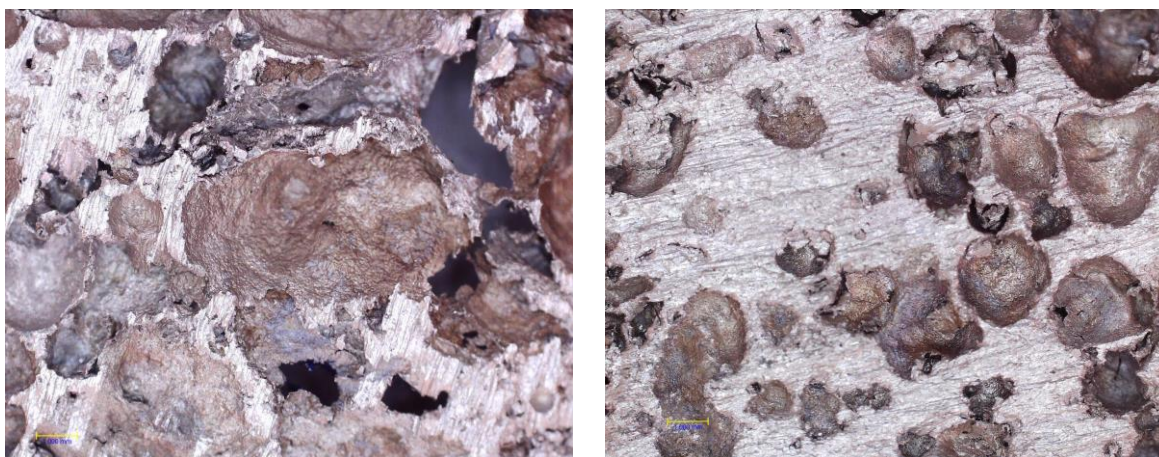


Slika 26. Mjesta bušenja provrta na uzorcima

Na slici 27. prikazani su uzorci aluminijske pjene i komad punog aluminija, s gornje strane jasno je uočljiva poroznost na uzorcima aluminijske pjene. Struktura aluminijske pjene bolje je vidljiva pomoću mikroskopa na slici 28.



Slika 27. Uzorci predviđeni za ispitivanje svrdla



Slika 28. Slika strukture aluminijske pjene snimljene mikroskopom uz povećanje 20:1, s lijeve strane prikazan je uzorak A, s desne strane uzorak C

### 7.3. Priprema pokusa bušenja

Svako svrdlo predviđeno je za izradu jednog provrta u svakom od uzoraka, a vrijeme koje je predviđeno za izradu jednog provrta iznosi 30 sekundi. Nakon bušenja provrti će biti

pregledani, ispitan promjer te dubina provrta, a svrdla će biti predmet vizualne inspekcije pod mikroskopom. Jedno svrdlo će tijekom ovog eksperimenta bušiti tri različita provrta. Uzorak A prvi je na redu za bušenje, zatim uzorak C te naposljetku uzorak D. Eventualna nastala oštećenja na svrdlu prilikom bušenja A ili primjerice C provrta, mogu utjecati na rezultate kod bušenja uzoraka koji su sljedeći na redu, dakle C nakon A, ili D nakon C. Bušenje se izvodi pomoću bušilice “Bosch PSB 8000 RCE”. Bušilica je spojena sa savitljivim vratilom kako bi se osigurala što ujednačenija sila pri bušenju uzoraka. Praćenje sile omogućeno je uređajem proizvođača “PHYWE”, prikazanim na slici 29.



Slika 29. Uređaj za mjerenje posmaka i sila kod bušenja

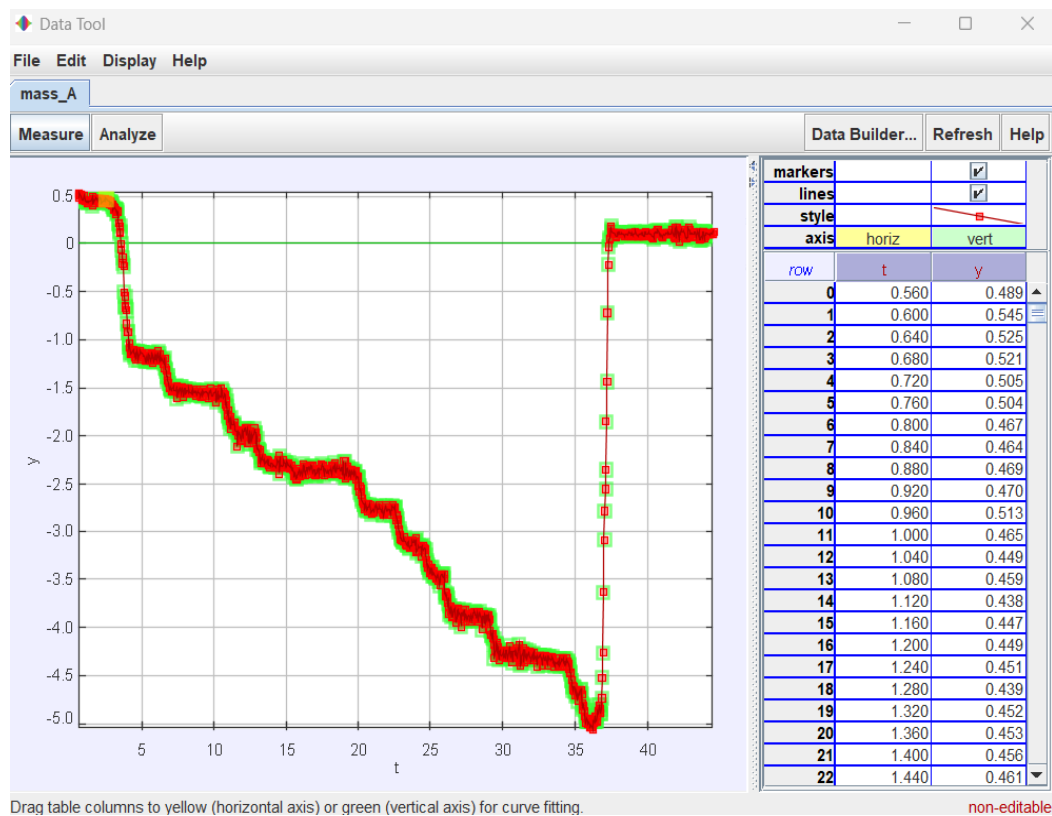
Bušenje se izvodi pri konstantnom broju okretaja. Bušilica nema mogućnost rada u zadanom stalnom broju okretaja, te je stoga broj okretaja izmjeren pri zadanoj brzini bušilice prije izvođenja pokusa tahometrom prikazanim na slici 30. Izmjereni broj okretaja iznosi 510 okretaja po minuti ( $\text{min}^{-1}$ ).



Slika 30. Tahometar korišten za mjerenje brzine okretaja kod bušenja

Svaki proces bušenja sniman je širokokutnom kamerom te je svaki snimak naknadno obrađen u računalnom programu "Tracker". "Tracker" omogućuje praćenje snimke sličicu po sličicu, te izračunavanje parametara poput pomaka po x i y osi, ubrzanja i sl. Na slici 31. prikazan je dijagram koji prikazuje pomak svrdla pri izradi jednog od provrta.





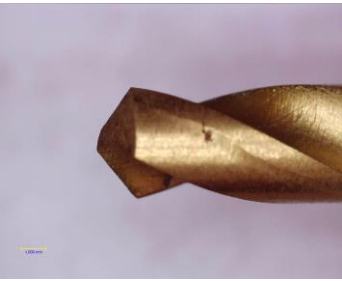









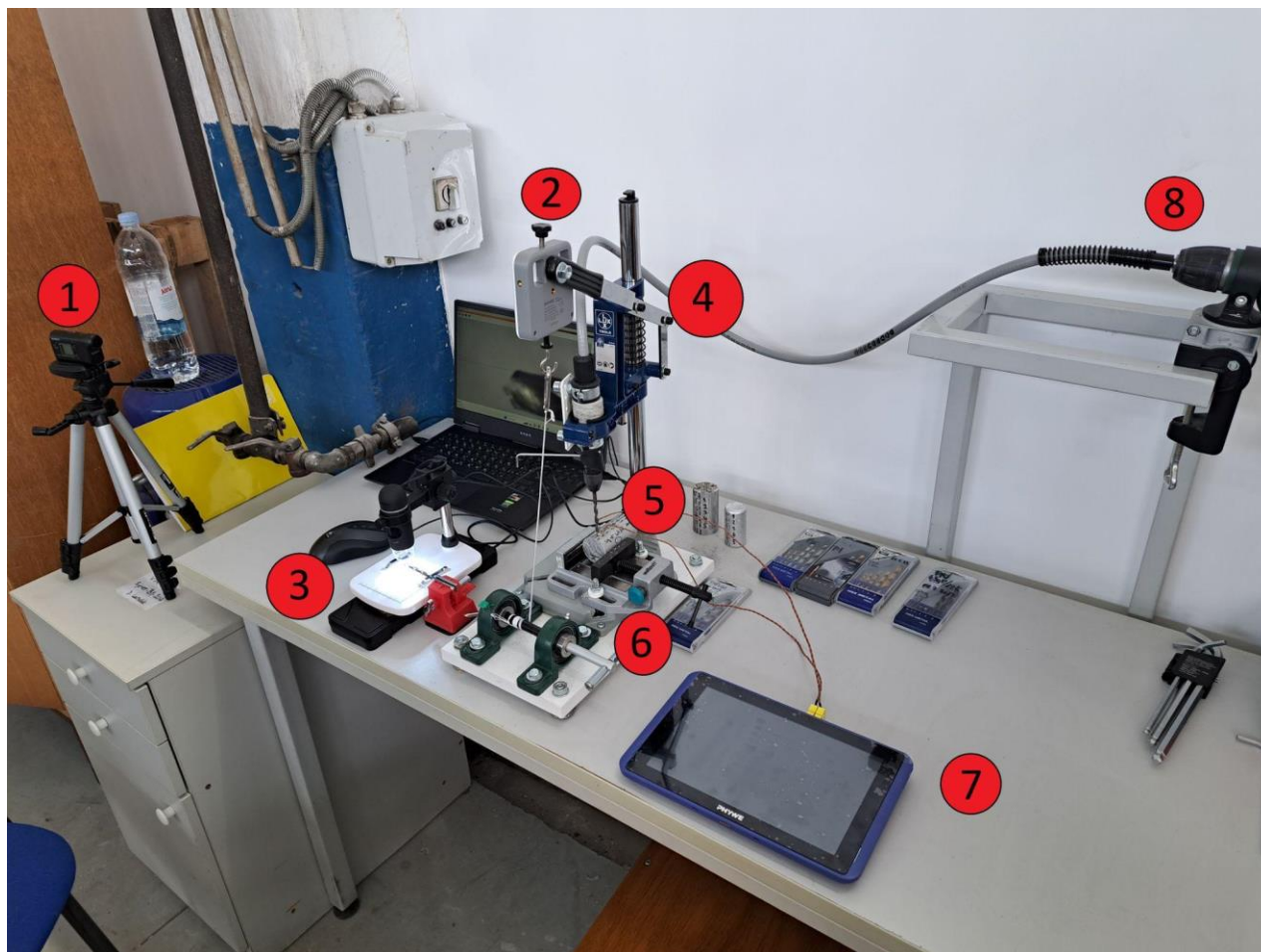
Slika 31. Prikaza pomaka u programu "Tracker" za izradu jednog od provrta

Izgled oštrice svrdla prije pokusa bušenja prikazan je u tablici 8. Oštrice svrdla snimljene su svjetlosnim mikroskopom Toolcraft uz povećanje 20:1.

Tablica 8. Oštrice svrdla prije bušenja uzorka A od aluminijske pjene

Oznaka svrdla	Izgled oštrice svrdla	
P0		
P1		
P2		
P3		
P4		

Pokusi bušenja izvedeni su u improviziranim uvjetima zbog obnove zgrada fakulteta. Na slici 32. prikazani su svi najvažniji dijelovi obradnog sustava za provedbu pokusa.



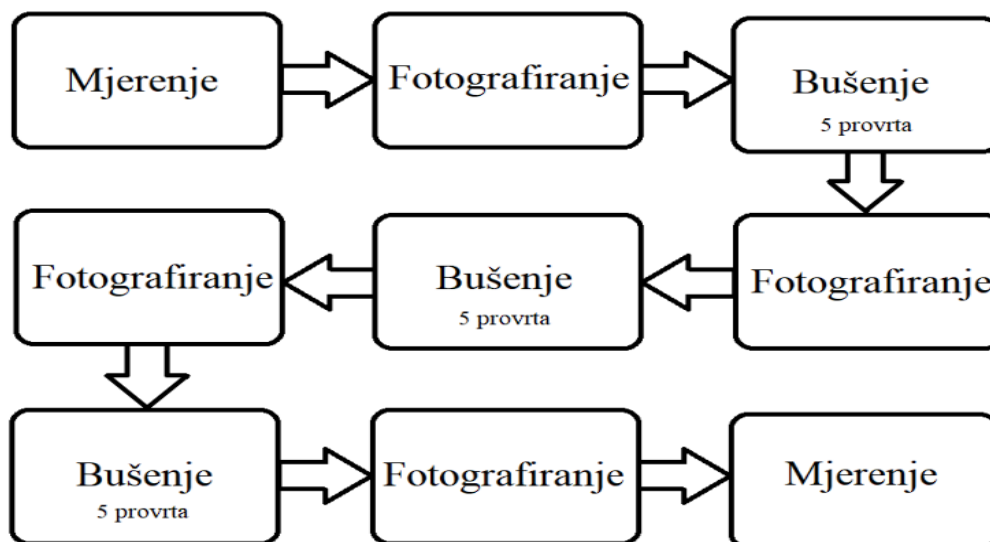
Slika 32. Oprema korištena u pokusima bušenja

Na gornjoj slici 32. dijelovi sustava za ispitivanje bušenja aluminijske pjene označeni su sljedećim oznakama:

1. Kamera za praćenje posmaka kod bušenja
2. Uređaj sa senzorima za silu te pomake po X, Y i Z osi
3. Mikroskop
4. Postolje s prihvatom za svrdlo i aluminijske uzorke
5. Mjesto zahvata svrdla i uzoraka
6. Vitlo za ostvarivanje posmaka
7. Centralni uređaj spojen sa senzorima za silu, pomake i mjerenje temperature
8. Bušilica spojena savitljivim vratilom

## 7.4. Plan provedbe pokusa

Sa završenim fotografiranjem svrdla u početnom stanju, gotova je priprema te kreće provođenje eksperimenta. Na slici 33. shematski je prikazan plan provedbe pokusa.



Slika 33. Shematski prikaz plana provođenja pokusa

U tablici 9. prikazane su ulazne i izlazne veličine procesa bušenja aluminijskih uzoraka.

Tablica 9. Ulazne i izlazne veličine u procesu bušenja

Ulazne veličine procesa bušenja	Izlazne veličine procesa bušenja
Nazivni promjer svrdla	Izgled oštrica svrdla
Vrsta prevlake na svrdlu	Promjena temperature obratka
Debljina prevlake	Promjer provrta
Vrsta materijala obratka (aluminij)	Dubina provrta
Broj okretaja svrdla	Broj provrta
Početna temperatura obratka (25 °C)	
Glavna sila bušenja	
Vrijeme bušenja	
Posmak	

## 8. REZULTATI I DISKUSIJA

Eksperiment započinje bušenjem uzorka A, numeričkim redom svrdlima od P0 do P5.

Svako svrdlo u zahvatu provodi 30 sekundi, a sensorima se prate aksijalna sila, posmak, temperatura. Nakon fotografiranja svrdla nakon bušenja uzorka A, proces bušenja ponavlja se kod uzoraka C i D.




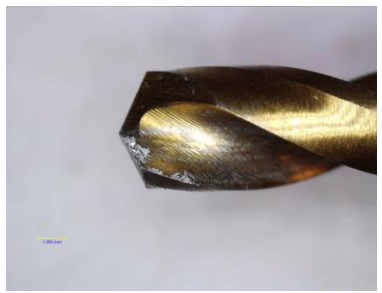






### 8.1. Trošenje oštrice svrdla

Nakon 30 sekundi bušenja uzorka A od aluminijske pjene izgled vrha svrdla prikazan je u tablici 10. Prikazan je izgled oštrice svrdla u tlocrtu i bokocrtu. Nakon prvog bušenja uzorka aluminijske pjene na svrdlima je vidljiva prisutnost naljepaka oko vrha svrdla na svim ispitivanim svrdlima. Najmanja količina naljepka vidljiva je na neprevučenom svrdlu dok je na ostalim svrdlima vidljiva podjednaka količina naljepka. Svrdla ne pokazuju vidljive tragove trošenja. Svrdla se nakon prvog bušenja čiste od naljepaka te pripremaju za idući uzorak.











U tablici 11. prikazan je izgled oštrice svrdla nakon bušenja 30 sekundi uzorka C od aluminijske pjene. Na oštricama svrdla vidljiva je veća količina naljepka. Na oštricama svrdla P1, P2, P3 uočava se početno trošenje bočne oštrice u kojem je djelomično skinuta prevlaka ali nije značajno promijenjen promjer svrdla. Nakon fotografiranja svrdla po drugi puta, nastavlja se s ponovnim čišćenjem svrdla te bušenjem zadnjeg uzorka koji je ujedno i najzahtjevniji za alat. Primijećeno je prilikom bušenja kako su svrdla nekoliko puta naišla na veće poroznosti te samo "propala" kroz materijal. Ova pojava jasno se odražava na ostvarene dubine provrta. Nakon fotografiranja svrdla po drugi puta, nastavlja se s ponovnim čišćenjem svrdla te bušenjem zadnjeg uzorka koji je ujedno i najzahtjevniji za alat.

U tablici 12. prikazan je izgled oštrice svrdla nakon bušenja 30 sekundi uzorka D od punog presjeka aluminijske legure 6082 T6. Rezultati bušenja punog aluminijskog uvelike se razlikuju od rezultata bušenja uzoraka aluminijske pjene. Svrdla P3 i P4 gotovo da nisu ni ostavila mjerljivi trag nakon bušenja, a svrdlo P2 ostvarilo je znatno bolje rezultate od ostala 2 svrdla koja su sudjelovala u eksperimentu. Neprevučeno svrdlo P0 ostvarilo je bolje ili slične rezultate kao još tri ostala konkurentna svrdla, a pri vrhu se očitavaju znakovi trošenja. Kod svrdla P1 i P2 veći komadi odvojene čestice još su uvijek naljepljeni na vrh svrdla.










Tablica 10. Izgled vrha svrdla nakon bušenja uzorka A

Oznaka svrdla	Izgled oštrice svrdla	
P0		
P1		
P2		
P3		
P4		

Tablica 11. Izgled vrha svrdla nakon bušenja uzorka C

Oznaka svrdla	Fotografija svrdla	
P0		
P1		
P2		
P3		
P4		

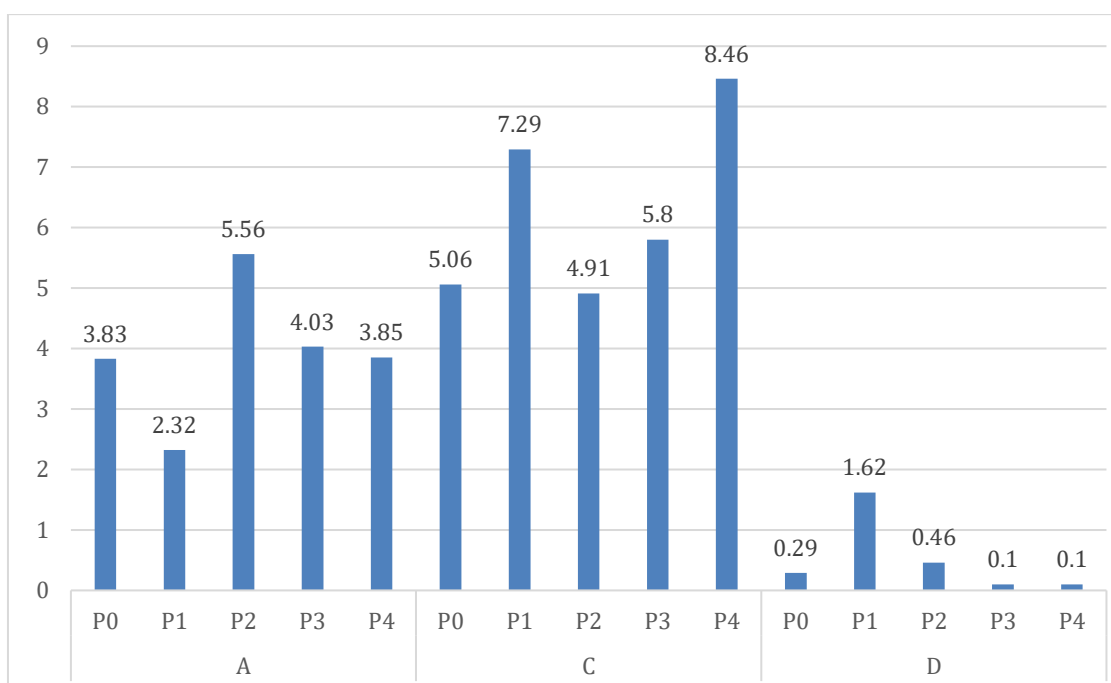
Tablica 12. Izgled vrha svrdla nakon bušenja uzorka D

Oznaka svrdla	Fotografija svrdla	
P0		
P1		
P2		
P3		
P4		



## 8.2. Dubina i zagrijavanje provrta

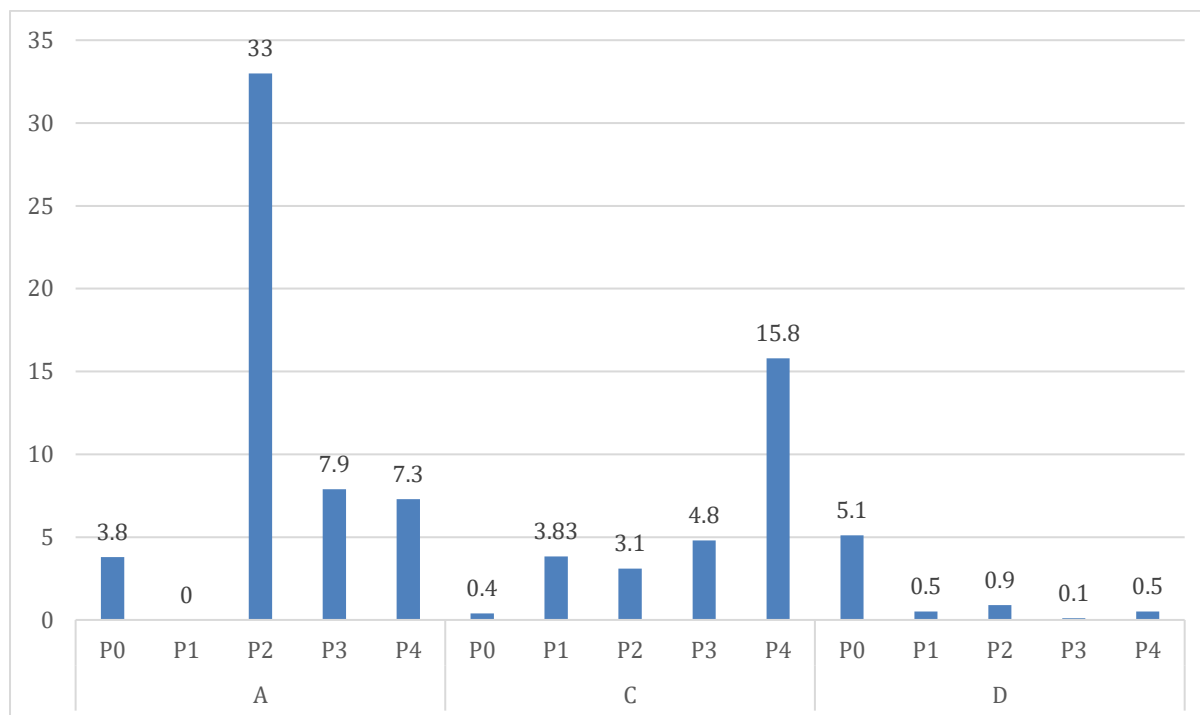
Na slici 34. vidljivi su rezultati mjerenja dubine provrta nakon 30 sekundi bušenja u svim ispitnim uzorcima A, C i D. Najveće postignute dubine zabilježene su upravo kod poroznijeg uzorka aluminijske pjene gdje se i bez povećanja može vidjeti kako je svrdlo nekoliko puta prošlo kroz područje pjene veće poroznosti. Dubine provrta veće od 4 mm u uzorku A ostvarene su sa svrdlima oznaka P2 i P3. U uzorku C sva svrdla su ostvarila dubine provrta veće od 4 mm. U punom materijalu obratka na uzorku D nakon 30 sekundi ostvarene su vrlo male dubine provrta, manje od 1 mm sa svim svrdlima osim sa svrdlom prevučenim u plazmi (P1). Kod bušenja u punom materijalu dominira adhezijsko trošenje oštrice svrdla i intenzivno stvaranje naljepka na svrdlu. Na oštrici svrdla nitriranog u plazmi proizvedena je tanka zona spojeva koja omogućava bušenje s manjim faktorom trenja i manje je sklona stvaranju naljepka.



Slika 34. Dubina provrta izmjerena nakon 30 sekundi bušenja

Na slici 35. nalaze se rezultati mjerenja porasta temperature pored provrta zabilježeni termoelementima tipa K. Najveće promjene u temperaturi zabilježene su kod zahvata kod kojih su zabilježene i veće postignute dubine provrta. Uočeno je da je kod komada punog aluminija neprevučeno svrdlo P0 zabilježilo relativno visoku razliku u temperaturi u usporedbi s drugim svrdlima. Prevučena svrdla P1 i P2 postigla su veću dubinu, a kod njih nije zabilježen takav

skok s temperaturom. Zbog izvlačenja termoelementa iz provrta, rezultati svrdla P1 kod uzorka A te P0 kod uzorka C nisu zabilježeni.



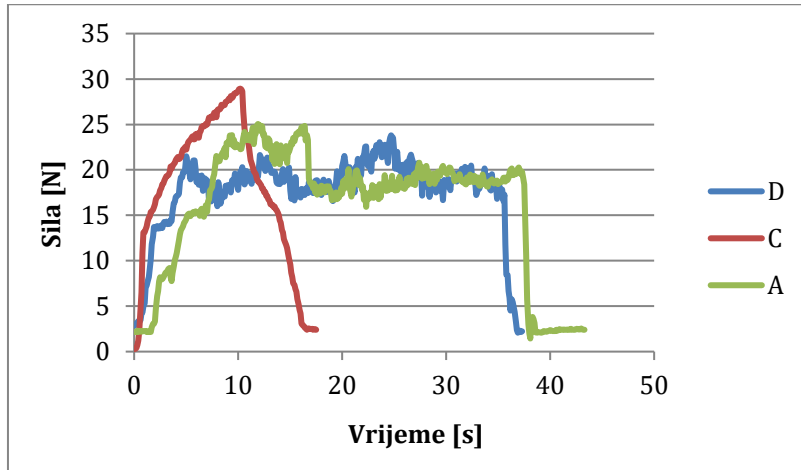
Slika 35. Najveći porast temperature u blizini provrta na ispitivanim uzorcima od aluminija

U tablici 13. navedene su dubine i srednji promjeri provrta. Dubina provrta mjerena je tri puta pomičnim mjerilom, a srednji promjer provrta mjerena je pod povećanjem 20:1 na svjetlosnom mikroskopu. Srednji promjer svih provrta nalazi se u rasponu od 5 do 6 mm. Kod bušenja u punom materijalu jedino je svrdlo P1 nitrirano u plazmi ostvarilo značajniju dubinu provrta, dok su ostala nakon 30 sekundi još ostala na površini obratka. Iz dubine i promjera provrta izračunat je volumen provrta. Iz tablice je vidljivo da je neprevučeno svrdlo P0 ostvarilo kumulativno najmanje volumene odnesenog materijala. Svrdo P2 ostvarilo je najveći volumen kod obratka A, svrdlo P4 kod obratka C, a svrdlo P1 kod obratka D. Svrdo P4 prevučeno PACVD TiN/TiCN prevlakom ostvarilo je kumulativno najveći volumen odnesenog materijala, iako je kod bušenja uzorka aluminijeve legure ostvarilo zanemarivo malu dubinu provrta.

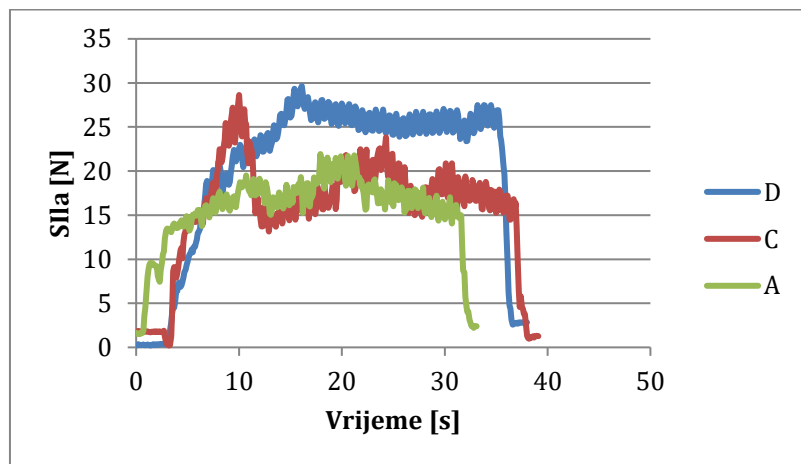
Tablica 13. Dubina i promjer provrta nakon 30 sekundi bušenja aluminijske pjene i aluminijske legure

Oznaka obratka	Oznaka svrdla	Srednja dubina provrta [mm]	Srednji promjer provrta [mm]	Volumen provrta [mm <sup>3</sup> ]
A	P0	3,83	5,76	99,80
	P1	2,32	5,85	62,36
	P2	5,56	6,07	160,89
	P3	4,03	5,66	101,40
	P4	3,85	5,93	106,33
C	P0	5,06	5,47	118,91
	P1	7,29	5,94	202,02
	P2	4,91	6,14	145,38
	P3	5,80	5,97	162,36
	P4	8,46	5,96	236,02
D	P0	0,29	2,54	1,47
	P1	1,62	5,47	38,07
	P2	0,46	3,77	5,13
	P3	0,10	1,15	1,04
	P4	0,10	1,13	1,01

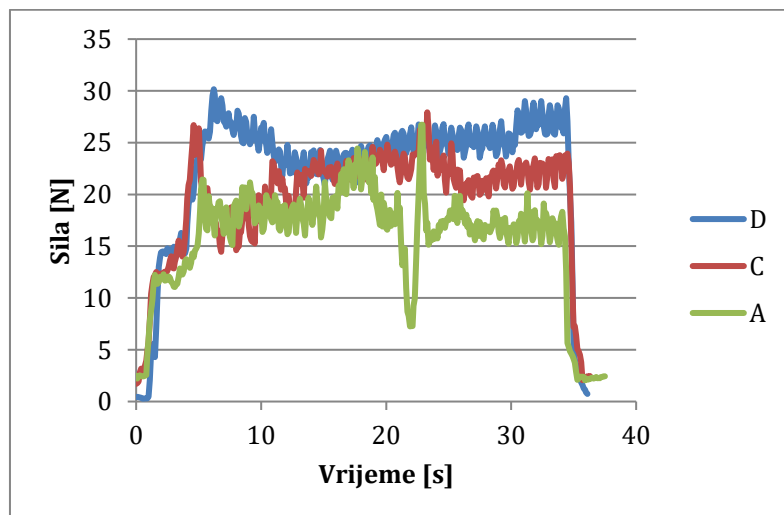
Na slikama 36. do 40. prikazane su promjene aksijalne sile svrdla kod bušenja ispitnih uzoraka. Prilikom provedbe ispitivanja sila se pokušavala držati oko 20 N. Iz dijagrama je vidljivo da sila stepenasto uz vibracije mijenja iznos tijekom cijelog ciklusa bušenja, a najveći skokovi mogu se uočiti kod bušenja aluminijskih pjena. Skokovi su izraženi kod svrdla P2 i P4 tijekom bušenja uzorka A od aluminijske pjene. Svrdo tijekom bušenja aluminijske pjene nailazi na poroznosti zbog kojih dolazi do velikih oscilacija i stepenastih promjena u vrijednosti sile bušenja, posebno kod aluminijske pjene manje gustoće (uzorak C).



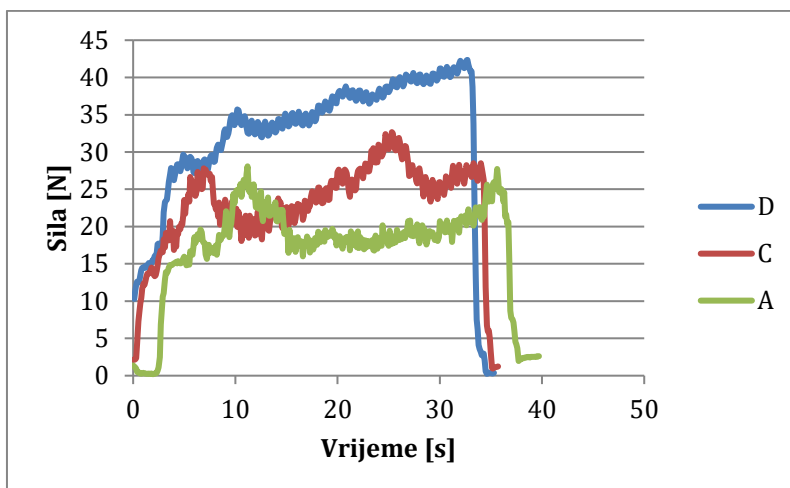
Slika 36. Promjene aksijalne sile svrdla P0 kod bušenja uzoraka



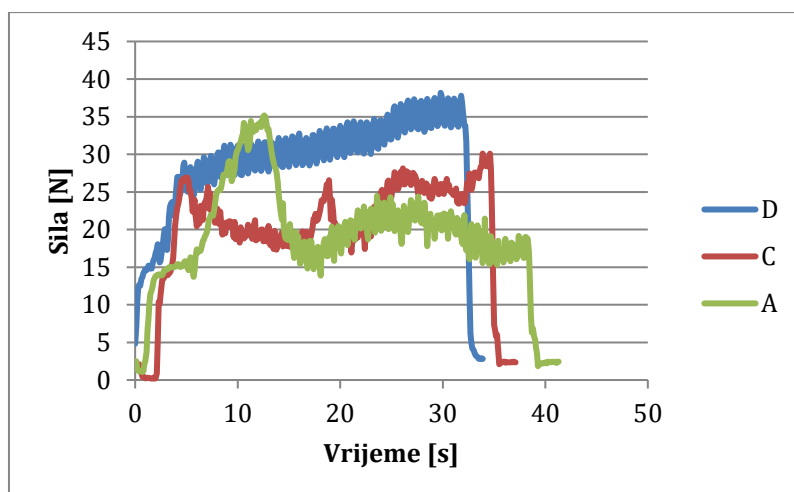
Slika 37. Promjene aksijalne sile svrdla P1 kod bušenja uzoraka



Slika 38. Promjene aksijalne sile svrdla P2 kod bušenja uzoraka



Slika 39. Promjene aksijalne sile svrdla P3 kod bušenja uzoraka



Slika 40. Promjene aksijalne sile svrdla P4 kod bušenja uzoraka

Iz rezultata svih provedenih ispitivanja trošenja uočava se da neprevučeno svrdlo nije ostvarilo značajno lošije rezultate od ostalih svrdla, a mogući razlog neuspješnosti nekih od prevučenih svrdla može biti pojava zaobljenja poprečne oštrice svrdla nakon prevlačenja. Pojava zaobljenja narušava vršni kut svrdla te u jednom periodu trošenja otežava i usporava svrdlo u radu. Naznaku mogućih značajnijih razlika između neprevučenog svrdla i prevučenih može se pronaći kod bušenja uzorka punog presjeka od aluminijske legure 6082 T6 gdje je kod neprevučenog svrdla termoelementima zabilježeno veće zagrijavanje nego kod ostalih svrdla. Prevučeno svrdlo P1 jedino je ostvarilo značajniju dubinu pri bušenju punog presjeka. Za uzorak punog aluminija potrebno je koristiti veće sile kako bi svrdla uspješnije prodirala u

materijal. Jedan od mogućih faktora loših rezultata kod zadnjeg uzorka može biti i djelomična istrošenost svrdla nakon bušenja prva dva uzorka. Za utvrđivanje statistički značajnijih rezultata potrebno je provesti veći broj ispitivanja s različitim parametrima.

## 9. ZAKLJUČAK

U radu je provedeno ispitivanje otpornosti na trošenje neprevučenog spiralnog svrdla od brzoreznog čelika promjera 5 mm te četiri svrdla s površinom nitriranom u plazmi ili prevučenom prevlakama PACVD TiN, PACVD TiN/TiCN te PVD TiN. Ispitivanim svrdlima izbušeni su provrti u uzorcima od aluminijske pjene i uzorku punog presjeka od aluminijske legure 6082 T6. Aluminijske pjene očekivano su predstavljale znatno manji izazov za bušenje. Iz rezultata ispitivanja trošenja zaključuje se sljedeće:

- Neprevučeno svrdlo izbušilo je ukupno najmanji volumen provrta uz veće zagrijavanje od ostalih svrdla kod bušenja uzorka aluminijske legure. Neprevučeno svrdlo je izbušilo ukupni volumen provrta od 220,2 mm<sup>3</sup>.
- Svrdlo prevučeno PVD TiN prevlakom jedino je ostvarilo značajniju dubinu kod bušenja uzorka aluminijske legure punog presjeka. Svrdlo prevučeno PVD TiN prevlakom izbušilo je ukupni volumen provrta od 302,4 mm<sup>3</sup>.
- Kod svrdla prevučenog PACVD TiN prevlakom izmjereno je najveće zagrijavanje kod bušenja uzorka aluminijske pjene te najveće oscilacije u iznosu sile. Svrdlo prevučeno PACVD TiN prevlakom izbušilo je ukupni volumen provrta od 311,4 mm<sup>3</sup>.
- Kod svrdla nitriranog u plazmi uočena je pojava manje količine naljepaka nego kod ostalih svrdla. Svrdlo nitrirano u plazmi izbušilo je ukupni volumen provrta od 264,8 mm<sup>3</sup>.
- Svrdlo prevučeno PACVD TiN/TiCN prevlakom izbušilo je provrt najvećeg volumena u ispitivanju kod uzorka aluminijske pjene. Svrdlo prevučeno PACVD TiN/TiCN prevlakom izbušilo je ukupni volumen provrta od 343,3 mm<sup>3</sup>.

U budućim istraživanjima preporučuje se provesti bušenja sa svrdlima različitih promjera u trajanju duljem od 30 sekundi. Za utvrđivanje statistički značajnijih rezultata potrebno je provesti veći broj ispitivanja s različitim parametrima. Za uzorak punog aluminijskog presjeka potrebno je koristiti veće sile kako bi se povećao učinak bušenja.

## 10. LITERATURA:

- [1] Krach W., Daxner T., Rammerstorfer F.G.: Metallic Foams versus Human Bones, Proceedings of the EUROMAT Conference, Rimini, 2000.
- [2] Garai F.: International Journal of Engineering and Management Sciences (IJEMS) Vol. 5. No. 2, 2020.
- [3] Andrews E., Sanders W., Gibson L.J.: Compressive and tensile behaviour of aluminium foams, Materials Science and Engineering A270 (1999.), 113-124
- [4] Miyoshi T., Itoh M., Akiyama S., Kitahara A.: Aluminum Foam, "Alporas": The Production Process, Properties and Applications: Cambridge University Press, 2011.
- [5] Ashby M.F., Evans A., Fleck N.A., Gibson L.J., Hutchinson J.W., Wadley H.N.G.: Metal Foams - A Design Guide, Butterworth Heinemann, 2000.
- [6] [https://www.mdpi.com/materials/materials-09-00085/article\\_deploy/html/images/materials-09-00085-g007.png](https://www.mdpi.com/materials/materials-09-00085/article_deploy/html/images/materials-09-00085-g007.png) , pristupljeno lipanj 2023.
- [7] Leskovšek V.: Optimiranje postupka toplinske obrade brzoreznih čelika u vakuumu, doktorska disertacija, FSB, Zagreb, 1999.
- [8] Hoyle G.: High Speed Steels, Butterworths & Co., 2, 1988
- [9] Šolić S.: Utjecaj mikrostrukture brzoreznog čelika na tribološka svojstva reznih alata, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [10] Landek D.: Alatni materijali, autorizirane podloge za predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [11] Huđ I.: Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2023.
- [12] Klaić M.: Deveto predavanje Oblikovanje deformiranjem i obrada odvajanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, pristupljeno 24. travnja 2023.
- [13] Salopek M.: Utjecaj hlađenja na sile rezanja i temperaturu kosti kod postupka bušenja, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [14] <https://www.guhring.com/Support/Technical/DIN-1412> pristupljeno travanj 2023.
- [15] Nedić B., Lazić M.: Proizvodne tehnologije: Obrada metala rezanjem, predavanja; Mašinski fakultet, Kragujevac
- [16] Holmberg K., Matthews A.: Coatings Tribology, Elsevier Science B. V., Amsterdam 1994.
- [17] Klaić, M., Indirektni nadzor istrošenosti alata i tvrdoće obratka kod bušenja kamena, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.



- [18] Klaić M.: Peto predavanje Oblikovanje deformiranjem i obrada odvajanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, pristupljeno srpanj 2023.
- [19] Gojić M., Površinska obradba materijala. Sisak: Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2010.
- [20] Roy M.: Surface Engineering for Enhanced Performance against Wear, Springer Vienna, pp. 319, 2013.
- [21] Augusta D.: Dupleks postupak aluminiziranja i nitriranja čelika, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [22] Grilec K., Jakovljević S.: Tribologija, Autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015. .
- [23] Landek D.; Podloge za vježbu iz kolegija 'Proizvodne tehnologije', dio Toplinska obrada, 2013.
- [24] Matijević B. Iskustva u primjeni PACVD tehnologije u praksi. Znanstveno-stručni skup: Primjena novih inovativnih postupaka inženjerstva površina. Slavonski Brod; 2016.
- [25] Martinez M.: Trošenje prstena kliznog ležaja prevučenog prevlakama TiN i TiCN u uvjetima mješovitog trenja, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.
- [26] Beljak A., Produljenje trajnosti kalupa za injekcijsko prešanje polimernih materijala postupcima prevlačenja, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015