

# Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje PACVD prevlaka na visokolegiranim alatnim čelicima za hladni rad

---

**Dragoje, Gabrijel**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*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:235:277346>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-20**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

*Gabrijel Dragoje*

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

*Prof. dr.sc.Darko Landek.*

Student:

*Gabrijel Dragoje*

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio samostalno uz stručnu pomoć mentora izv.prof.dr.sc Darka Landeka te koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svim profesorima, asistentima i stručnom osoblju Fakulteta strojarstva i brodogradnje na prenesenom znanju tijekom studija. Posebno se zahvaljujem mentoru izv.prof.dr.sc. Darku Landeku na uloženom trudu, vremenu i stručnoj pomoći u izradi ovog rada.

Također, zahvaljujem se svojoj zaručnici, obitelji, prijateljima i kolegama na pruženoj podršci i razumijevanju iskazanom tijekom studiranja.

Gabrijel Dragoje



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za završne 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 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Gabrijel Dragoje** Mat. br.: 0108075026

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje PACVD prevlaka na visokolegiranim alatnim čelicima za hladni rad**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Examination the abrasion resistance of PACVD coatings on cold work tool steels**

Opis zadatka:

Postupkom PACVD proizvode se površinski slojevi specifičnih svojstava na konstrukcijskim dijelovima i alatima. Prema literaturi i izvorima informacija u radu treba opisati provedbu postupka PACVD i djelovanje utjecajnih čimbenika svojstva PACVD prevlaka na visokolegiranim alatnim čelicima za hladni rad.

U eksperimentalnom dijelu rada treba planirati i provesti ispitivanje prionjivosti PACVD prevlaka TiN/TiCN i TiN/TiBN prema metodi VDI 3198 i njihove otpornosti na abrazijsko trošenje metodom „pijesak/gumeni kotač“ na dva visokolegirana alatna čelika za hladni rad. Mjerenjem gubitka mase i analizom istrošenih površina svjetlosnom mikroskopijom, usporediti otpornost na abrazijsko trošenje ispitanih prevlaka u odnosu na neprevučene površine. Na temelju rezultata ispitivanja preporučiti vrstu prevlake za povišenje otpornosti na abrazijsko trošenje visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad.

Navesti u radu korištenu literaturu i stručnu pomoć

Zadatak zadati:

30. studenoga 2020.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Darko Landek

Datum predaje rada:

1. rok: 18. veljače 2021.

2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.

3. rok: 23. rujna 2021.

Predvideni datumi obrane:

1. rok: 22. 2. – 26. 2. 2021.

2. rok (izvanredni): 9. 7. 2021.

3. rok: 27. 9. – 1. 10. 2021.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

# SADRŽAJ

---

<b>SADRŽAJ</b> .....	II
<b>POPIS SLIKA</b> .....	IV
<b>POPIS TABLICA</b> .....	VII
<b>SAŽETAK</b> .....	VIII
<b>SUMMARY</b> .....	VIII
<b>1. Uvod</b> .....	- 1 -
<b>2. Inženjerstvo površina</b> .....	- 3 -
<b>3. Razvoj i karakteristike PACVD postupka</b> .....	- 4 -
3.1 Postupak prevlačenja CVD .....	- 4 -
3.2 Postupak prevlačenja PVD.....	- 6 -
3.3 Postupak prevlačenja PACVD .....	- 8 -
<b>4. Svojstva i primjena prevlaka TiN/TiCN i TiN/TiBN</b> .....	- 10 -
4.1 Tribološka prevlaka TiN .....	- 10 -
4.2 Tribološka prevlaka TiCN.....	- 12 -
4.3 Dvoslojna prevlaka TiN/TiCN .....	- 14 -
4.4 Višeslojna prevlaka TiN/TiBN.....	- 14 -
<b>5. Visokolegirani alatni čelik za hladni rad</b> .....	- 15 -
5.1 Alatni čelik K110 .....	- 16 -
5.2 Alatni čelik K390 MC .....	- 19 -
<b>6. Abrazijsko trošenje</b> .....	- 22 -
6.1 Mehanizmi abrazijskog trošenja.....	- 23 -
6.2 Ispitivanje otpornosti na abraziju prema normi ASTM G 65.....	- 26 -
<b>7. Ispitivanje prionjivosti prevlake normom VDI 3198</b> .....	- 27 -
<b>8. Priprema i provedba pokusa</b> .....	- 30 -

<b>9. Ispitivanje prionjivosti i debljine PACVD prevlaka.....</b>	<b>- 35 -</b>
9.1. Rezultati ispitivanja prionjivosti prevlake metodom VDI 3198 .....	- 35 -
9.2 Analiza adhezivnosti prevlake .....	- 40 -
<b>10. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje.....</b>	<b>- 41 -</b>
10.1 Postupak ispitivanja abrazijskog trošenja i makro izgled uzoraka.....	- 41 -
10.2 Gubitak mase nakon abrazijskog trošenja.....	- 46 -
10.3. Analiza istrošenih površine .....	- 50 -
10.4. DISKUSIJA.....	- 58 -
<b>11. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>- 61 -</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>- 62 -</b>
<b>PRILOZI.....</b>	<b>- 65 -</b>

## POPIS SLIKA

---

<b>Slika 2.1.</b> <i>Prevučena i neprevučena oštrica reznog alata [18]</i> .....	3
<b>Slika 3.1.</b> <i>Shema uređaja za CVD postupak [6]</i> .....	5
<b>Slika 3.2.</b> <i>Shema uređaja za PVD postupak s katodnim raspršivanjem [14]</i> .....	7
<b>Slika 3.3.</b> <i>Shema uređaja za PACVD postupak [16]</i> .....	9
<b>Slika 4.1.</b> <i>Presjek presvučene prevlake TiN-a s 2.6 % i 6.3 % udio klora [19]</i> .....	11
<b>Slika 4.2.</b> <i>Izgled i boja supstrata prevučenog TiN prevlakom [9]</i> .....	12
<b>Slika 4.3.</b> <i>Izgled i boja supstrata prevučenog TiCN prevlakom [10]</i> .....	13
<b>Slika 5.1.</b> <i>Cijeli postupak toplinske obrade alatnog čelika K110 [2]</i> .....	17
<b>Slika 5.2.</b> <i>TTT – dijagram za alatni čelik K110 [2]</i> .....	18
<b>Slika 5.3.</b> <i>Postupak popuštanja za alatni čelik K110 [2]</i> .....	19
<b>Slika 5.4.</b> <i>Usporedba raspodjele karbida za K390MC alatni čelik i konvencionalni ledeburitni 12 % krom alatni čelik za hladni rad [3]</i> .....	20
<b>Slika 5.5.</b> <i>TTT – dijagram za alatni čelik K390MC [3]</i> .....	21
<b>Slika 5.6.</b> <i>Postupak popuštanja za alatni čelik K390MC [3]</i> .....	22
<b>Slika 6.1.</b> <i>Jedinični događaj abrazije [15]</i> .....	23
<b>Slika 6.2.</b> <i>Abrazija u dodiru dva tijela (a) i tri tijela (b) [15]</i> .....	24
<b>Slika 6.3.</b> <i>Shematski prikaz mikromehanizama trošenja materijala [15]</i> .....	25
<b>Slika 6.4.</b> <i>Shematski prikaz ispitivanja ASTM G 65 [1]</i> .....	26
<b>Slika 6.5.</b> <i>Parametri ispitivanja od A do E [1]</i> .....	27
<b>Slika 7.1.</b> <i>Dijamanti stožasti indentor [17]</i> .....	28
<b>Slika 7.2.</b> <i>Prikaz usporednih ispitivanja metode VDI 3198 [23]</i> .....	28



<b>Slika 8.1.</b> <i>Dimenzije ispitnih uzoraka kvadratnog oblika [5]</i> .....	30
<b>Slika 8.2.</b> <i>Industrijska vakuumska peć Rübig GmbH type PC 70/90 [5]</i> .....	33
<b>Slika 8.3.</b> <i>Toplinska obrada ispitnih uzoraka izrađenih od K110 i K390 čelika 90 [5]</i> .....	34
<b>Slika 9.1.</b> <i>Uređaj za ispitivanje tvrdoće Rockwell C metodom</i> .....	35
<b>Slika 9.2.</b> <i>Prihvatljive i neprihvatljive adhezivnosti prevlake prema VDI 3198 normi [8]</i> .....	36
<b>Slika 10.1.</b> <i>Uređaj za abrazijsko trošenje</i> .....	42
<b>Slika 10.2.</b> <i>Mjerna vaga „Meltter“ Zurich</i> .....	42
<b>Slika 10.3.</b> <i>Ultrazvučna kupka</i> .....	42
<b>Slika 10.4.</b> <i>Gubitak mase ispitnih uzoraka s oznakom D</i> .....	47
<b>Slika 10.5.</b> <i>Gubitak mase ispitnih uzoraka s oznakom C</i> .....	47
<b>Slika 10.6.</b> <i>Usporedni gubitak mase svih ispitnih uzoraka</i> .....	48
<b>Slika 10.7.</b> <i>Kumulativni gubitak mase D uzoraka</i> .....	48
<b>Slika 10.8.</b> <i>Kumulativni gubitak mase C uzoraka</i> .....	49
<b>Slika 10.9.</b> <i>Usporedni kumulativni gubitak mase svih ispitnih uzoraka</i> .....	49
<b>Slika 10.10.</b> <i>Alatni čelik K390 MC oznake C1 (plazma nitriranje) na povećanju 50 puta</i> .....	50
<b>Slika 10.11.</b> <i>Alatni čelik K390 MC oznake C1 (plazma nitriranje) na povećanju 100 puta</i> .....	51
<b>Slika 10.12.</b> <i>Alatni čelik K390 MC oznake C1 (plazma nitriranje) na povećanju 200 puta</i> .....	51
<b>Slika 10.13.</b> <i>Alatni čelik K390 MC oznake C2 (TiN/TiCN prevlaka) na povećanju 50 puta</i> .....	51
<b>Slika 10.14.</b> <i>Alatni čelik K390 MC oznake C2 (TiN/TiCN prevlaka) na povećanju 100 puta</i> ...	52
<b>Slika 10.15.</b> <i>Alatni čelik K390 MC oznake C2 (TiN/TiCN prevlaka) na povećanju 200 puta</i> ...	52
<b>Slika 10.16.</b> <i>Alatni čelik K390 MC oznake C3 (TiN/TiBN prevlaka) na povećanju 50 puta</i> ...	53
<b>Slika 10.17.</b> <i>Alatni čelik K390 MC oznake C3 (TiN/TiBN prevlaka) na povećanju 100 puta</i> ....	53
<b>Slika 10.18.</b> <i>Alatni čelik K390 MC oznake C3 (TiN/TiBN prevlaka) na povećanju 200 puta</i> ....	53

<b>Slika 10.19.</b> <i>Alatni čelik K110 oznake D1 (plazma nitriranje) na povećanju 50 puta.....</i>	54
<b>Slika 10.20.</b> <i>Alatni čelik K110 oznake D1 (plazma nitriranje) na povećanju 100 puta.....</i>	54
<b>Slika 10.21.</b> <i>Alatni čelik K110 oznake D1 (plazma nitriranje) na povećanju 200 puta.....</i>	54
<b>Slika 10.22.</b> <i>Alatni čelik K110 oznake D2 (TiN/TiCN prevlaka) na povećanju 50 puta.....</i>	55
<b>Slika 10.23.</b> <i>Alatni čelik K110 oznake D2 (TiN/TiCN prevlaka) na povećanju 100 puta.....</i>	55
<b>Slika 10.24.</b> <i>Alatni čelik K110 oznake D2 (TiN/TiCN prevlaka) na povećanju 200 puta.....</i>	55
<b>Slika 10.25.</b> <i>Alatni čelik K110 oznake D3 (TiN/TiBN prevlaka) na povećanju 50 puta.....</i>	56
<b>Slika 10.26.</b> <i>Alatni čelik K110 oznake D3 (TiN/TiBN prevlaka) na povećanju 100 puta.....</i>	56
<b>Slika 10.27.</b> <i>Alatni čelik K110 oznake D3 (TiN/TiBN prevlaka) na povećanju 200 puta.....</i>	56

## POPIS TABLICA

---

<b>Tablica 1.</b> <i>Kemijski sastav čelika K110 [2]</i> .....	16
<b>Tablica 2.</b> <i>Kemijski sastav alatnog čelika K390 MC [3]</i> .....	20
<b>Tablica 3.</b> <i>Točan kemijski sastav čelika K110 i K390 MC [5]</i> .....	30
<b>Tablica 4.</b> <i>Oznake ispitnih uzoraka alatnih čelika</i> .....	31
<b>Tablica 5.</b> <i>Fotografije mjesta utisaka dijamantnog indentora na prevlake TiN/TiCN i TiN/TiBN na alatnim čelicima K110 i K390 MC</i> .....	37
<b>Tablica 6.</b> <i>Oznaka prionjivosti ispitnih uzoraka prema VDI 3198 normi</i> .....	40
<b>Tablica 7.</b> <i>Ispitni uzorci prije i nakon 180 sekundi abrazijskog trošenja</i> .....	44

## SAŽETAK

---

U radu je ispitana otpornost na abrazijsko trošenje i adhezivnost dupleks prevlake TiN/TiCN te višeslojne TiN/TiBN prevlake dobivene postupkom PACVD (plazma aktivirano kemijsko prevlačenje iz parne faze) na visokolegiranim alatnim čelicima za hladni rad K390 MC i X155CrVMo12-1 (K110). Provedena su ispitivanja abrazijskog trošenja metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“ prema normi ASTM G65 i adhezivnost prevlake utiskivanjem indentora prema metodi VDI 3198. Prema rezultatima ispitivanja utvrđena je veća otpornost na abrazijsko trošenje prevučenih površina.

Ključne riječi: *PACVD, TiN/TiCN prevlaka, TiN/TiBN prevlaka, abrazijsko trošenje, adhezivnost prevlake*

## SUMMARY

---

The paper examines the abrasion resistance and adhesiveness of the duplex coating TiN/TiCN and multilayer TiN/TiBN coating obtained by PACVD (plasma activated chemical coating from the vapor phase) on high-alloy tool steels for cold work K390 MC and X155CrVMo12-1. Abrasion tests were performed using the "dry sand/rubber wheel" method according to the ASTM G65 standard and the adhesiveness of the coating by indenter indentation according to the VDI 3198 method. According to the test results, higher resistance to abrasion wear of coated surfaces was determined.

Keywords: *PACVD, TiN / TiCN coating, TiN / TiBN coating, abrasion wear, coating adhesiveness*

## 1. Uvod

---

Visokolegirani alatni čelici za hladni rad imaju raznovrsnu primjenu u industriji. Koriste se kao materijali za izradu štanci, alata za hladno oblikovanje, alata za utiskivanje i duboko izvlačenje, izradu igla za provlačenje, škara i slično. Visokolegirane alatne čelike odlikuju svojstva visoke otpornosti na trošenje u hladnom stanju i neznatne deformacije pri kaljenju. U svrhu dodatnog povišenja otpornosti na trošenje provode se postupci prevlačenja površina alatnih čelika prevlakama. Prevlake se na površinu čelika prevlače postupkom plazma aktiviranog kemijskog prevlačenja iz parne faze. Prevlake na alatnim čelicima moraju povećati otpornost na trošenje i produljiti vijek trajanja alata bez pojave mikropukotina i raslojavanja.

U radu će se ispitni uzorci visokolegiranog alatnog čelika za hladni rad prevući duplex TiN/TiCN i višeslojnim TiN/TiBN prevlakama PACVD postupkom. Visokolegirani alatni čelici za hladni rad su K390MC i K110 tvrtke Böhler. Na prevučenicima ispitnim uzorcima provest će ispitivanje abrazijskog trošenja prevlake metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“ i adhezivnost prevlake prema normi VDI 3198. Navedena ispitivanja će se provesti u svrhu ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje PACVD prevlaka i njihovu prionjivost na površinu visokolegiranog alatnog čelika za hladni rad.

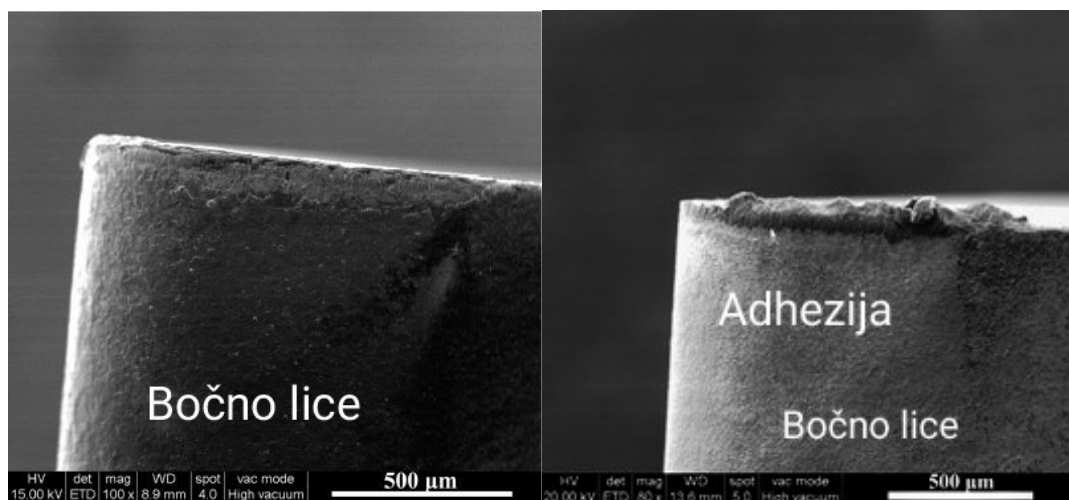
# TEORIJSKI DIO

## 2. Inženjerstvo površina

Inženjerstvo površina predstavlja primjenu tradicionalnih i inovativnih površinskih tehnologija za stvaranje sustava površinski sloj – osnovni materijal sa svojstvima koja ne može dati ni sam osnovni materijal niti sam površinski sloja, a ta svojstva moraju garantirati dobre eksploatacijske karakteristike uz prihvatljive proizvodne troškove [15].

Velika potreba za postupcima modificiranja i prevlačenja površine proizlazi iz nastajanja degradacije dijelova koji počinju isključivo ili najčešće na površini materijala. Svojstva i karakteristike površine ispituju se suvremenim metodama i sve je veći broj novih tehnoloških postupaka. Inženjerstvo površina bavi se formiranjem površinskog sloja, njegovim ispitivanjem, ali također i konstruiranje i primjenom. Modificirana površina sastoji se od funkcionalnog sloja i osnovnog materijala te nekad i potpornog sloja između navedenih. Materijali substrata ili osnovnog materijala mogu biti metali, polimeri, keramika, kompoziti, poluvodiči i staklo.

Funkcije površinskog sloja su vrlo različite. Površinski sloj može na osnovnom materijalu smanjiti trošenje, povećati otpornost trošenju i koroziju te poboljšati sami izgled osnovnog materijala. Površinski sloj na osnovnom materijalu može imati i optička svojstva transmisije, refleksije i apsorpcije zatim magnetska, optoelektrična, električna svojstva i nanostrukturiranje [15]. Na slici 2.1. prikazan je primjer neprevučene i prevučene površine TiAlN prevlakom.



Slika 2.1. Prevučena i neprevučena oštrica reznog alata [18]

Područje inženjerstva površine ima široku primjenu. Inženjerstvo površina primjenjuje se u automobilskoj industriji, strojogradnji, energetske industriji, kemijskoj i građevinskoj industriji, informacijskoj tehnici, zrakoplovno i medicinskoj tehnici, tekstilnoj, drvnoj i industriji za preradu papira i pakovanja te poljoprivredi i drugima.

Inženjerstvo površina dijelimo na postupke modificiranja i prevlačenja površine. Postupci modificiranja površine mogu biti toplinski, toplinsko-kemijski i mehanički. Postupci prevlačenja mogu biti mehanički, toplinski, toplinsko-mehanički, kemijski, elektro-kemijski, i za ovaj rad važni, postupci prevlačenja u parnoj fazi.

Postupci prevlačenja u parnoj fazi su kemijsko prevlačenje iz parne faze skraćenice CVD, fizikalno prevlačenje iz parne faze PVD i plazmom potpomognuto kemijsko prevlačenje iz parne faze skraćenice PACVD [15].

## 3. Razvoj i karakteristike PACVD postupka

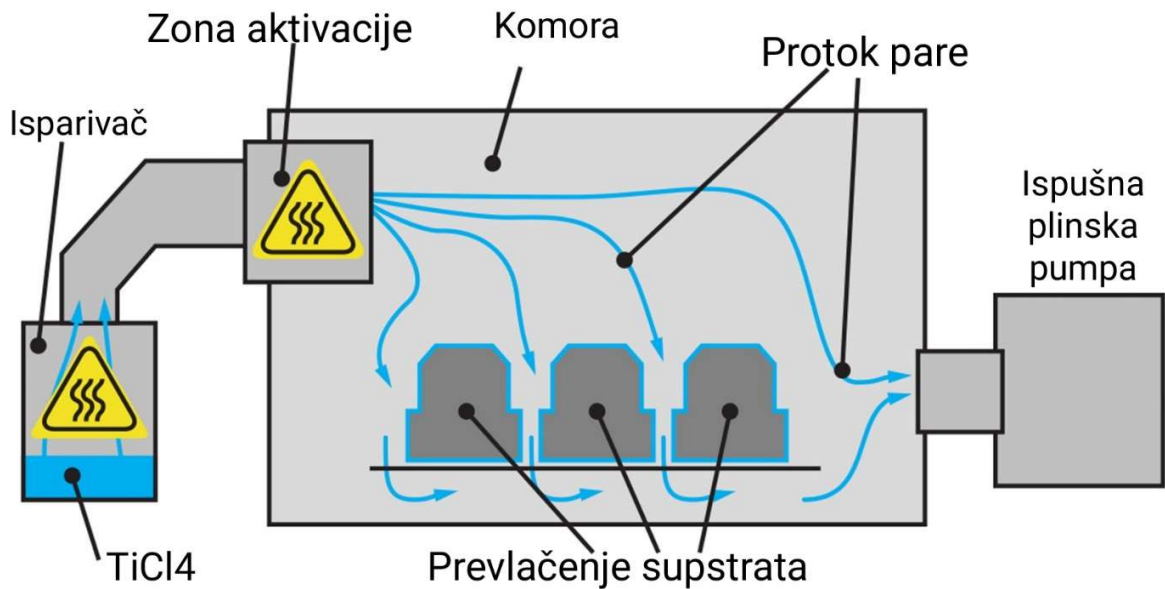
---

### 3.1 Postupak prevlačenja CVD

Postupak CVD prvobitno je razvijen za potrebe elektroničke industrije 1950-tih godina. Od 1970. godine nadalje, CVD se koristi na različitim alatima u proizvodnji. Glavna značajka CVD postupka je prevlačenje površine alata s vrlo tvrdom prevlakom koja je otporna na trošenje. Prevlake su najčešće sastavljene od titanija i nemetala, karbida i nitrida: TiC i TiN [7].

Prevlačenje se provodi u reaktoru gdje se supstrat zagrijava na zahtijevanu temperaturu. Reaktor može biti konstruiran s toplim i hladnim zidovima. U reaktorima s toplim zidovima temperatura se dobiva zračenjem grijaćih elemenata. Većina prevlaka koja se koriste za povećanje otpornosti na trošenje se prevlače u reaktorima s toplim zidovima. Tijekom prevlačenja uvode se plinovi unutar reaktora. Plinovi se raspadaju i reagiraju s površinom substrata. Raspad plinova je potaknut povišenom temperaturom. Na površini supstrata stvara se film rastaljene prevlake. Materijali koji reagiraju s površinom dostavljaju se na supstrat u parnoj fazi pomoću difuzije ili konvekcije. Na slici 3.1. prikazan je shematski rad CVD uređaja.





Slika 3.1. Shema uređaja za CVD postupak [6]

Parametri koji utječu na stvaranje kvalitetne prevlake u CVD postupku su temperatura substrata, tlak unutar komore reaktora, plinova unutar reaktora i kemijskog svojstva substrata. Temperatura substrata najvažnija je značajka koja utječe na prevlaku. Prevlake koje su prevučene na nižim temperaturama substrata sadrže puno veći broj nečistoća, dok na većim temperaturama substrata je veći koeficijent difuzije. Veći koeficijent difuzije omogućava brži rast prevlake na supstratu. Tlak unutar komore reaktora je ispod atmosferskog kako bi se dobila prevlaka bolje kvalitete i uniformnosti. Svojstva CVD prevlake također ovise o fizičkim svojstvima samoga substrata. Potrebno je uskladiti toplinska rastezanja između prevlake i substrata kako ne bi došlo do zaostalih naprezanja [24].

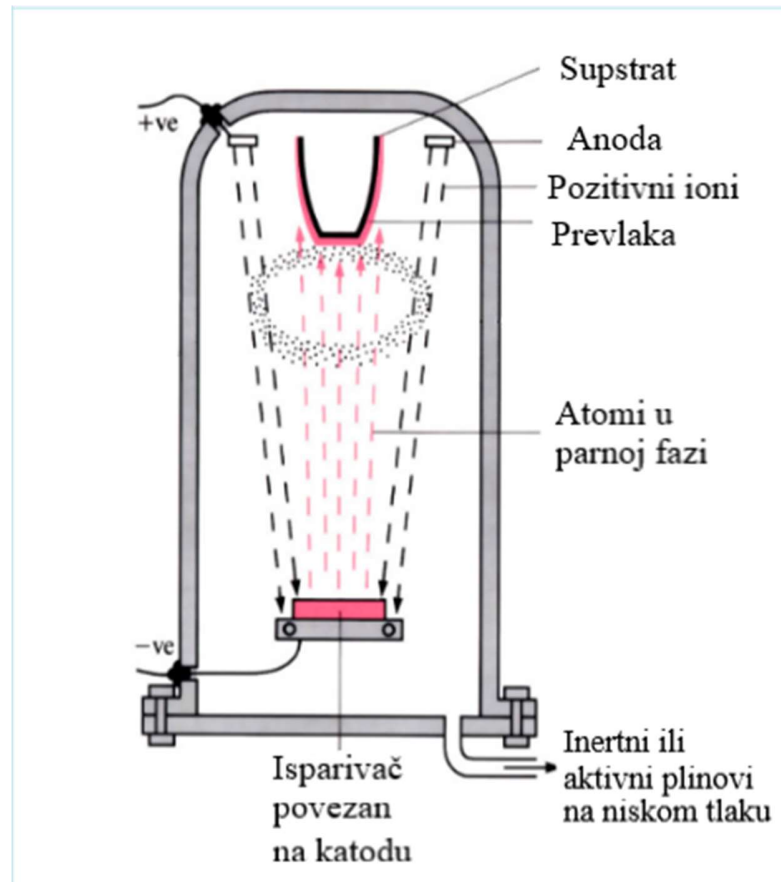
Tvrđi metali lako se prevlače CVD postupkom, ali prevlačenje zakaljenih čelika odvija se s poteškoćama. Zakaljeni čelici dobivaju se toplinskom obradom. Toplinska obrada zakaljenih čelika sastoji se od zagrijavanja nezakaljenog čelika do temperature od  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  te brzog hlađenja. Ovaj postupak naziva se kaljenje. Nakon kaljenja čelik je tvrd, ali krhak za uporabu. Potrebno je provesti postupak popuštanja. Zakaljeni čelik zagrijava se na temperature od  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  što omogućava smanjenje tvrdoće čelika, ali i veću žilavost. Zbog velikih temperatura na kojima se provodi CVD postupak, uništava se prethodno kaljenje i popuštanje. Nakon CVD postupka

potrebno je ponoviti toplinsku obradu. Naknadni postupci obrade čelika troše vrijeme i novac, stoga su razvijeni postupci prevlačenja materijala na manjim temperaturama [7].

Glavne prednosti CVD postupka prevlačenja površine su mogućnost korištenja raznovrsnih i različitih materijala. Vatrostalni materijali i keramika mogu se pomoću CVD-a prevući preko supstrata na manjim temperaturama. Prevlaka je u potpunosti uniformna s 99.9 % teoretske gustoće. Prevlaka je visoke čistoće, dobro prijanjanja uz površinu i postupkom CVD-a prevlači se s 25  $\mu\text{m}$  u minuti. Najveći nedostatak CVD postupka prevlačenja površine je visoka temperatura. Plinovi koji nastaju unutar reaktora su opasni i otrovni, stoga je potrebno dodatno ulaganje u zaštitu sigurnosti unutar postrojenja i okoliša [24].

### 3.2 Postupak prevlačenja PVD

Fizikalno prevlačenje iz parne faze je postupak koji koristi vakuum i ima mogućnost prevlačenja površine na nižim temperaturama. U CVD postupku aktivne komponente su u plinovitom stanju, dok su kod PVD postupka aktivne komponente u krutom stanju. Unutar komore PVD-a nalazi se meta od čistog metala za prevlačenje substrata. U komoru se dodaje se dušik ili neki drugi interni plin. Za razliku od CVD postupka, supstrat mora biti u ravnini s metom iz kojeg izlaze metalne komponente. Na taj način se osigurava kvalitetno prevlačenje površine. Potreba da supstrat bude u ravnini s metom ujedno je i glavni nedostatak PVD postupka. Još jedan od nedostataka PVD postupka je i sama prednost nad CVD postupkom, a to je temperatura. Prevlaka prevučena PVD postupkom ima manju adhezivnost od prevlake prevučene CVD postupkom zbog difuzije koja se odvija na višim temperaturama [7]. Slika 3.2. shematski pokazuje rad PVD uređaja.



**Slika 3.2.** Shema uređaja za PVD postupak s katodnim raspršivanjem [14]

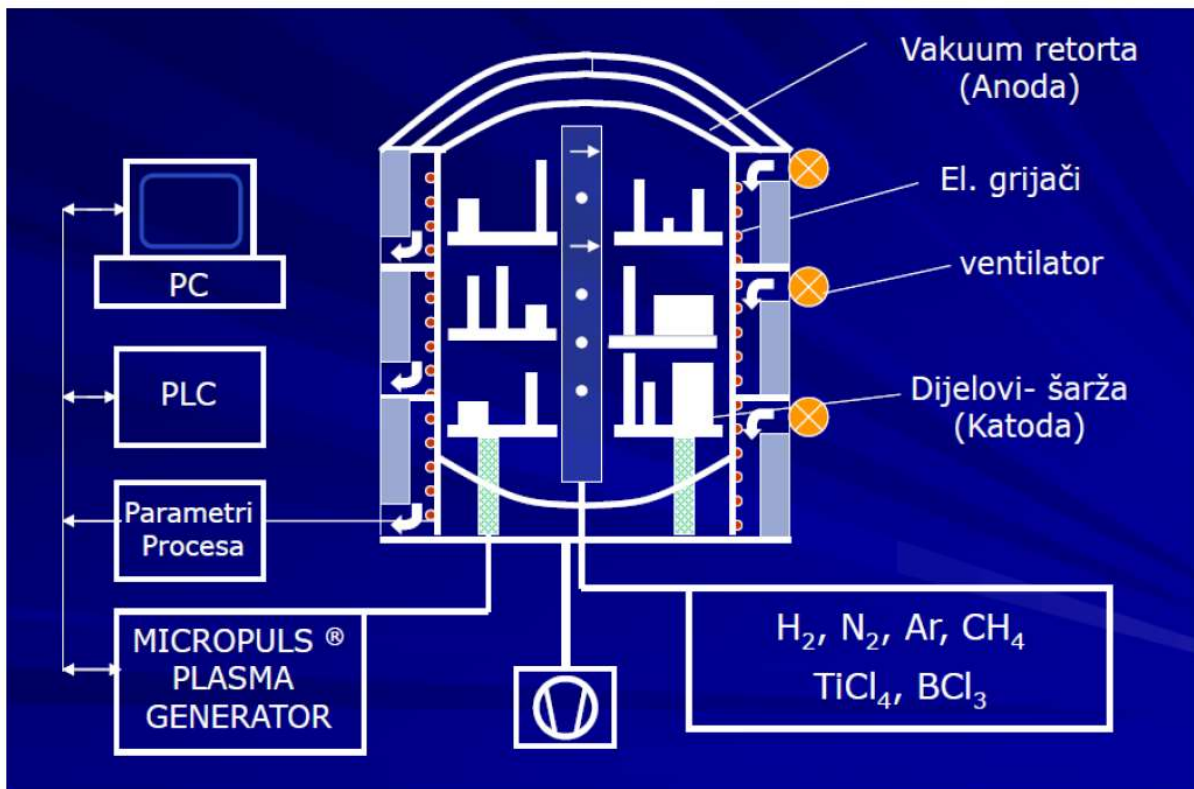
Postupak PVD prevlačenja sastoji se od tri glavna koraka. Prvi korak je isparavanje materijala iz čvrste podloge pomoću vakuuma i plinovite plazme. Drugi korak je transport parne faze u vakuumu do površine supstrata. Zadnji korak je kondenzacija na površini supstrata gdje se formira prevlaka. Veličina prevlake može varirati od nekoliko nanometara do više mikrometara. Drugačiji PVD postupci koriste ista tri glavna koraka, ali koriste druge fizikalne procese za pretvaranje materijala u parnu fazu i dostavljanje do supstrata. Pretvaranje čestica u parnu fazu iz izvora može se dobiti s toplinskim isparavanjem, katodnim raspršivanjem ili erozijom električnim lukom [15].

### 3.3 Postupak prevlačenja PACVD

Dodavanjem energije plinovima koji okružuju supstrat i ispunjavaju komoru plinovi se ioniziraju i aktiviraju. Kemijski aktivna plazma se zapali i omogućava prevlačenje površine bez dostizanja vrlo visokih temperatura. Tehnike za dobivanje plazme su različite. Plazmu možemo dobiti pomoću radiofrekvencija velike snage ili velikog napona istosmjerne struje koja se dostavlja katodi. Katoda zapali plazmu i nanosi prevlaku na supstratu. Ova dva načina paljenja plazme uzrokuju velike gubitke energije i nestabilnosti. Bolji način paljenja plazme je pomoću impulsa. Istosmjerna struja velikog napona kontrolirano se razdvaja na tok impulsa i pauzi između njih. Pomoću impulsa dobivamo dobra svojstva prevlake na supstratu.

Postrojenje za postupak PACVD sastoji se od reaktora poveznog s dovodom plina koji može kontrolirati protok plinova pomiješanih s  $TiCl_4$ . Plinovi koji ulaze u reaktor su argon, vodik, metan i dušik. U postrojenju nalazi se napajanje istosmjernom strujom s impulsnom kontrolom. Impuls se može kontrolirati od milisekunde do sekunde. U komoru reaktora povezna je vakumska pumpa koja precizno kontrolira tlak unutar komore i plinska pumpa koja čisti po okoliš opasne plinove. Postavljanje supstrata unutar komore potpomognuto je hidrauličkim sustavom. Na reaktor su povezani regulatori temperature i grijači. Pored reaktora mogu se nalaziti spektrometri koji detektiraju masu i energiju čestica koji dolaze od katode. Cijelo PACVD postrojenje se regulira s PLC regulatorom koji je povezan na računalo.

Na svojstva prevlake utječu parametri postavljeni tokom prevlačenje supstrata PACVD postupkom. Jedan od glavnih zahtjeva površinskog sloja supstrata je dobra prionjivost (adhezivnost) i kohezija prevlake. Dobra adhezivna svojstva prevlake omogućuje očuvanje prevlake kod visoko opterećenih alata. PACVD postupak bez problema prevlači površinu tvrdog metala, dok kod čelika je potrebno zagrijavanje na temperature od  $480\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  i temeljito čišćenje površine čelika. Na slici 3.3. shematski je prikazan rad i osnovni dijelovi PACVD uređaja.



Slika 3.3. Shema uređaja za PACVD postupak [16]

Parametri PACVD postupka su napon, pritisak, pojedinačni tokovi plinova i temperatura prevlačenja. Napon je potrebno uskladiti s materijalom koji prevlačimo kako bi dobili optimalni rast prevlake na supstratu. Tlak unutar komore reaktora ima utjecaj na napreznja, tvrdoću, veličinu zrna i brzinu prevlačenja površine supstrata. Tlak ima značajan utjecaj na udio klora unutar prevlake. S povećanjem tlaka unutar reaktora raste udio klora, smanjuje se brzina prevlačenja površine, tvrdoća i povećava se udio zaostalih napreznja što negativno utječe na kvalitetu prevlake. PACVD prevlake su fino sitnozrnate i ne pokazuje značajnije mikrostrukturne greške [7].

Prednosti koje omogućava PACVD su mogućnost korištenja metalnih materijala za alatne i konstrukcijske primjene. PACVD ima relativno niske temperature rada pa je pogodniji za temperaturno osjetljive supstrate. PACVD postupak prevlačenja površine stvara tanke filmove koji su odlične kvalitete, jednake debljine, otporni na pucanje te imaju vrhunsku adhezivnost. PACVD postupak odlikuje se mogućnošću prevlačenja vrlo kompleksnih i geometrijski zahtjevnih supstrata te vrlo visokih brzina prevlačenja [22].

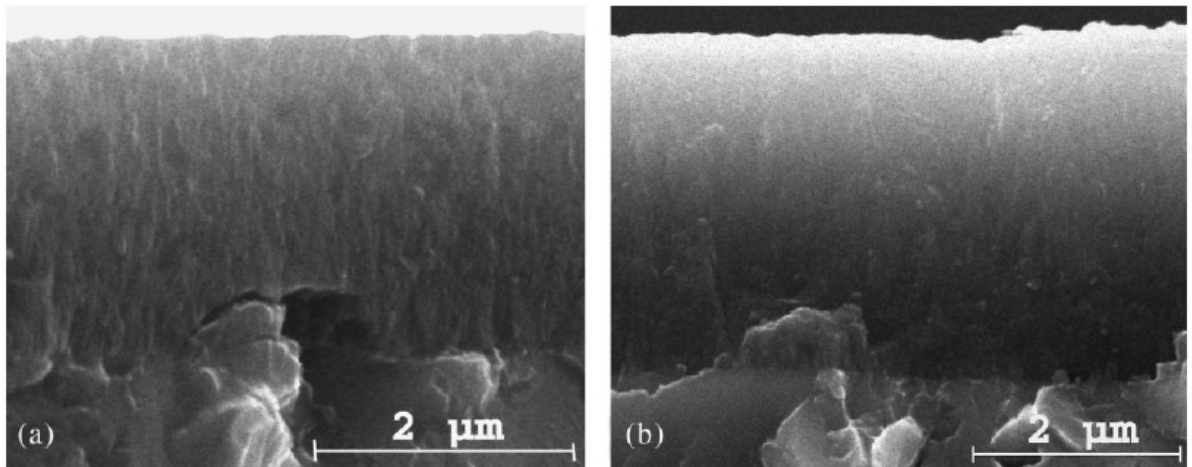
## 4. Svojstva i primjena prevlaka TiN/TiCN i TiN/TiBN

---

### 4.1 Tribološka prevlaka TiN

TiN tvrde prevlake široko se koriste za povećanje otpornosti na trošenje i koroziju na reznim i alatima za oblikovanje. TiN prevlaka ima visoku tvrdoću, otpornost na koroziju i trošenje te je zlatne boje. Zlatna boja TiN prevlake, unatoč dobrim mehaničkim svojstvima, koristi se i za dekorativne svrhe. TiN prevlaka prevlači se postupcima CVD-a i PVD-a, ali zbog zahtjeva za što manji koeficijent trenja površina metala prevlači se PACVD postupkom. Koeficijent trenja za PVD i CVD postupak je između 0.4 i 0.8 dok se kod PACVD postupka prevlačenja koeficijent trenja kontroliranim postupkom može smanjiti na 0.17. Nizak koeficijent trenja omogućava kliznim površinama manje trošenja i lubrikaciju površine. Nizak koeficijent trenja posljedica je udjela klora u komori PACVD reaktora. Klor u komoru reaktora ulazi u obliku plina  $TiCl_4$ . TiN prevlake rastu na supstratu pomoću plinova vodika, argona, dušika i  $TiCl_4$ . Tlak unutar komore reaktora održava se na 200 Pa, dok temperatura postupka varira između 510 °C i 570 °C. Potrebno je osam sati kako bi prevlaka TiN-a na supstratu narasla na debljinu od 2.4 do 2.9  $\mu m$  [19].

Variranjem temperature između 510 °C i 570 °C udio klora u plinovima komore reaktora pada s 6.3 % do 2.6 %. Udio klora važan je za svojstva supstrata. Kod udjela klora od 2.6 do 3.2 % prevlaka ima željenu orijentaciju prevlačenja, ali kod povećanog udjela orijentacija molekula TiN na površini supstrata je slučajna. S povećanjem udjela klora smanjuje se veličina zrna TiN-a. Mehanička svojstva također ovise o udjelu klora u plinovima komore reaktora PACVD postupka. S povećanjem udjela klora, tvrdoća i Youngov modul elastičnosti padaju za otprilike 30 %. Jedno od najznačajnijih svojstava TiN prevlake je mogućnost postizanja niskog koeficijenta trenja. Udio klora utječe i na veličinu koeficijenta trenja. Udio klora do 3 % ukazuje na visoki koeficijent trenja i velika zaostala naprezanja u samoj prevlaci. Povećanjem udjela klora do 6.3 % trenje se smanjuje na 0.17 i smanjuje su zaostala naprezanja u prevlaci [19]. Na slici 4.1. prikazane su površine prevučene TiN prevlakom, a) dio slike prikazuje 2.6 % udio klora dok b) dio slike prikazuje TiN prevlaku s 6.3 % udjela klora u plinskoj atmosferi komore.



**Slika 4.1.** Presjek prevlake TiN-a s 2.6 % i 6.3 % udio klora [19]

Na kvalitetnu TiN prevlaku i brzinu prevlačenja supstrata utječu i sami parametri PACVD postupka. Parametri koji utječu na brzinu rasta i kvalitetu prevlake su količina protoka plinova  $N_2/H_2$  i vrijeme pauze impulsa napajanja reaktora. Brzina rasta prevlake raste linearno s povećanjem protoka plina dušika  $N_2$ . Samo za omjer plinova  $N_2/H_2$  0.38 prevlaka je zlatne boje. Povećanjem ili smanjenjem omjera prevlaka dobiva smeđu boju. Veći protoci plinova uzorkuju veću hrapavost prevlake. Homogenost prevlake dobiva se na manjim protocima plinova. Vrijeme pauze je iznimno važan faktor za kvalitetnu TiN prevlaku. Veće pauze impulsa uzrokuju stvaranje debljih prevlaka na supstratu. Stabilnije prevlake dobivaju se u vremenu pauze impulsa. U vrijeme pauze impulsa odvija se transport dušikovih iona za stvaranje TiN prevlake i potrebno je vrijeme za stvaranje energetski stabilnih uvjeta za izbjegavanje gubitka titanija. Titanijevi ioni gube se u vremenu impulsa zbog raspršivanja na katodi, stoga je potrebno vrijeme pauze između impulsa.

Brzina prevlačenja i vrijeme procesa prevlačenja prevlake mogu se kontrolirati variranjem trajanja impulsa i pauze između njih [12]. Slika 4.2. prikazuje izgled TiN prevlake.



**Slika 4.2.** Izgled supstrata prevučenog TiN prevlakom [9]

## 4.2 Tribološka prevlaka TiCN

Prevlake od karbida i nitrida imaju visoku tvrdoću, toplinsku stabilnost i kemijsku inerciju i time poboljšavaju otpornost alata na trošenje i njihovo trajanje. Prevlaka od TiCN razvijena je zbog boljih svojstava otpornosti na trošenje i otpornosti na abraziju usporedno s prevlakom od TiN-a. Prevlake od TiCN variraju po udjelu ugljika i dušika i može se kontrolirati njihov omjer za dobivanje što boljih svojstava prevlake. U industriji se ne koristi jednoslojna TiCN prevlaka, nego višeslojna ili gradijentna prevlaka. Potrebno je zadovoljiti dva uvjeta za kvalitetnu prevlaku supstrata. Prvi uvjet je dobra adhezivnost koja se postiže nanošenjem tankog TiN sloja. Drugi zahtjev je sitnozrnata kristalna mikrostruktura, mala zaostala naprezanja i glatka površina. Tanka prevlaka od TiN najčešće se nanosi prije prevlačenja s TiCN. U komoru reaktora PACVD postupka ubacuju se plinovi argona, dušika, acetilena i  $\text{TiCl}_4$  u parnoj fazi. Iz  $\text{TiCl}_4$  dobiva se titanij za



spajanje s dušikom i ugljikom za stvaranje prevlake od TiCN. Variranje udjela ugljika mora biti precizno iz modelirano za optimalna svojstva TiCN prevlake. Omjer ugljika i dušika pored same površine je jedan. Tvrde prevlake TiCN imaju duplo više ugljika od dušika na površini supstrata. Višeslojne i gradijentne prevlake pokazale su veću tvrdoću i homogenost od jednoslojnih prevlaka. Važno je izabrati odgovarajuću tehniku prevlačenja prevlake od TiCN. Variranjem N/CH<sub>4</sub> omjera plinova u procesu PACVD postupka prevlačenja utječe na mikrostrukturu i površinu TiCN. Prevlačenje s višeslojnom i gradijentnom prevlakom filtriranim katodnim raspršivanjem CVD postupkom daje veću tvrdoću, adheziju i bolji koeficijent trenja od PVD postupaka prevlačenja površine [4]. Slika 4.3. prikazuje svrdlo prevučeno TiCN prevlakom.



**Slika 4.3.** Izgled supstrata prevučenog TiCN prevlakom [10]

### 4.3 Dvoslojna prevlaka TiN/TiCN

Prevlaka od TiN često se koristi u industriji i postala je nezamjenjiva zbog svoje otpornosti na trošenje i otpornosti na koroziju kako bi produjila vijek trajanja alata. Prevlaka od TiCN poznata je zbog svoje povećane otpornosti na oksidaciju, visoke je mikrotvrdoće i otpornosti na trošenje u uvjetima povišenih temperatura. Kako bi se iskoristila optimalna svojstva obje prevlake one se prevlače zajedno u dvoslojne, višeslojne i gradijentne prevlake. Debljina prevlake TiN/TiCN je 7  $\mu\text{m}$ . Površina dvoslojne prevlake TiN/TiCN pokazuje dobru otpornost na trošenje jer se nakon ispitivanja površine vrlo malo oštetila i u suhim uvjetima i kada je površina bila podmazivana. Usporednim testom između jednoslojne prevlake TiN-a i dvoslojne prevlake TiN/TiCN pokazalo se da bolju adheziju na površini ima dvoslojna prevlaka, a obje prevlake su bolje od neprevučenog supstrata. Ispitivanja su utvrdila optimalnu debljinu prevlake TiN/TiCN od 7  $\mu\text{m}$ . Primarni razlog primjene TiCN prevlake je smanjivanje adhezijskog trošenja [21].

### 4.4 Višeslojna prevlaka TiN/TiBN

Višeslojne prevlake s nanometarskim slojevima složenim u super rešetke često pokazuju bolja funkcionalna svojstva i poboljšana mehanička svojstva. TiN i TiBN jednoslojne prevlake odlikuju se vrhunskim svojstvima. TiN prevlaka ima odlična klizna svojstva zahvaljujući udjelu klora. TiBN prevlaka ima odličnu otpornost na trošenje zbog udjela bora. Ove dvije jednoslojne prevlake kombiniraju se u višeslojne prevlake s 4, 16, 32, 64, 128 i više od 300 slojeva koji su nanometarske debljine. Višeslojna prevlaka TiN/TiBN dobiva se PACVD postupkom. U komoru reaktora PACVD postupka upumpavaju se plinovi vodika, argona, dušika,  $\text{BCl}_3$  i  $\text{TiCl}_4$ . Temperatura od 510  $^{\circ}\text{C}$  i tlak od 200 Pa su konstantni. Način ioniziranja plinova u komori reaktora odvija su istosmjernim impulsnim napajanjem upravljanim PLC-om i računalom. Veliki broj slojeva nanometarske debljine slažu se u debljinu cijele prevlake od 2 do 3  $\mu\text{m}$ . Svaki sloj prevlake prvo se prevlači slojem TiN-a, a zatim slojem TiBN-a. Svaki od četiri sloja višeslojne prevlake pojedinačno imaju debljinu od 500 nm, 16 slojeva 200 nm, 32 sloja 90 nm, 128 slojeva 20 nm. Za same slojeve višeslojne prevlake vrlo je bitna izmjena plinova koji tvore TiN prevlaku te zatim

TiBN prevlaku. Iako TiN i TiBN jednoslojne prevlake imaju visoku tvrdoću, višeslojne prevlake s 16 slojeva ili više pokazuju tvrdoću veću od 50 GPa. Također, modul elastičnosti se povećava s povećanjem broja slojeva u 2 do 3  $\mu\text{m}$  debeloj višeslojnoj prevlaci. Povećanjem slojeva TiN/TiBN prevlake smanjuju se zaostala naprezanja zbog povećanja površine između slojeva. Višeslojna prevlaka od 300 slojeva ima 6 puta manje zaostalih naprezanja od jednoslojne prevlake TiN-a ili TiBN-a. Nedostatak većeg broja slojeva uzrokuje manji pad tvrdoće površinskog sloja. Četveroslojna prevlaka demonstrira mali koeficijent trenja nakon kratke uporabe od 0.15 kada se potroši sloj TiBN koeficijenta trenja 0.8. Mali faktor trenja omogućava TiN sloj, koji kada se potroši, vraća koeficijent trenja na 0.8. Za višeslojne prevlake TiN/TiBN prevlake trenje je konstantno 0.8 zbog tanjih slojeva koji se brzo troše pa TiBN visoke tvrdoće dolazi do izražaja. Dominantni mehanizam trošenja je adhezija s transferom materijala. Abrazivnog trošenja na prevlaci nema. Moguće je PACVD postupkom smanjiti debljinu pojedinačnih slojeva TiN/TiBN višeslojne prevlake na 5 do 7 nm. Ovisno o potrebama u kojima se nalazi, može se konstruirati TiN/TiBN višeslojna prevlaka koja ima bolja svojstva od jednoslojne TiN ili TiBN prevlake [20].

## 5. Visokolegirani alatni čelik za hladni rad

---

Alatni čelici dijele se na alatne čelike za rad u hladnom stanju, alatne čelike za topli rad, alatne čelike maraging i brzorezne čelike. Alatni čelici za rad u hladnom stanju dijele se još na nelegirane alatne čelike, niskolegirane alatne čelike za hladni rad, visokolegirane alatne čelike za hladni rad i martenzitne alatne čelike postojane na djelovanje korozije. U ovom radu radit će se s visokolegiranim alatnim čelicima za hladni rad.

Visokolegirani alatni čelici za hladni rad sadrže više od 5 % legiranih elemenata. Prosječno imaju od 1 do 2 % ugljika. Glavni legirni elementi su krom, vanadij, molibden i volfram. Krom kao najvažniji legirni element utječe na stvaranje karbida te s time povisuje otpornost na trošenje. Udio kroma veći od 12 % omogućuje čeliku otpornost na koroziju. Krom povisuje i temperaturu austenitizacije na oko 1000 °C. Zbog povišenog udjela ugljika u visokolegiranom alatnom čeliku za hladni rad bolja je zakaljivost. Potrebna je pažljiva i oprezna toplinska obrada visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad jer su skloni razugljičenju. Pri kaljenju čelik nema znatne deformacije,

stoga možemo reći da se radi o „bezdeformacijskom zakaljivom“ čeliku. Mikrostruktura u žarenom stanju pri 20 °C je F + (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> (K<sup>id</sup>, K<sup>''</sup>, K<sup>e</sup>). Austenitizacijom mikrostruktura čelika je austenit i karbidi, a sastav karbida je (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>. Gašenjem čelika mikrostruktura čelika je martenzit, karbidi i zaostali austenit. Zaostali austenit se eliminira dubokim hlađenjem u tekućem dušiku na temperaturi od -196 °C. Visokolegirani alatni čelici za hladni rad primjenjuju se za štance, alate za hladno oblikovanje, alate za utiskivanje, alate za duboko vučenje, alate za izvlačenje žica, valjke za navoje, igle za provlačenje i škare [13].

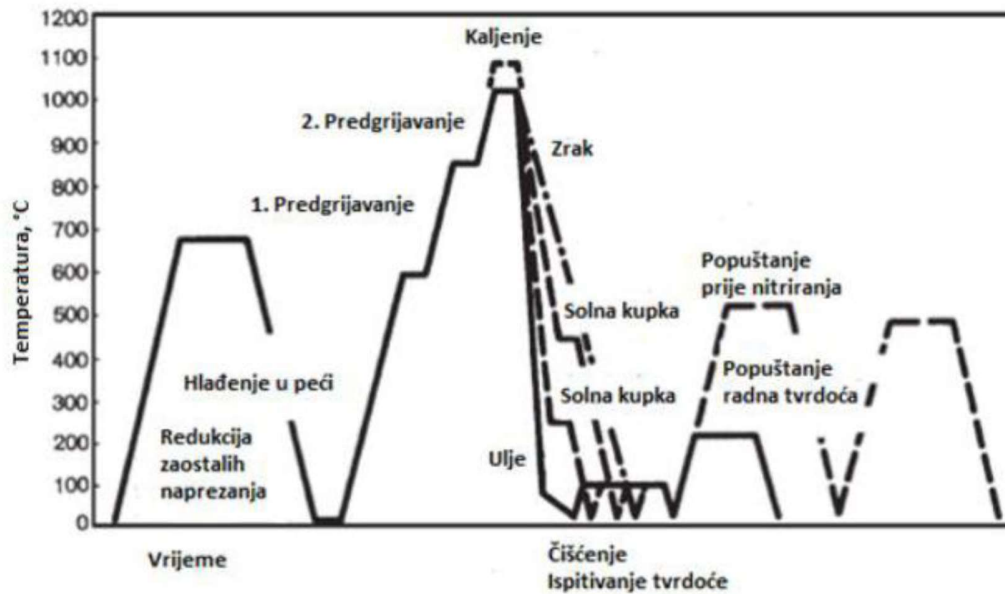
## 5.1 Alatni čelik K110

Glavne karakteristike K110 čelika su dimenzijska stabilnost, visoki udio ugljika i kroma. Prikladan je za kaljenje na zraku i odlikuje se visokom čvrstoćom. Kemijski sastav K110 čelika prikazan je na Tablica 1. Oznaka čelika prema DIN-u je 1.2379 dok je oznaka prema EN X153CrMoV12.

**Tablica 1.** Kemijski sastav čelika K110 [2]

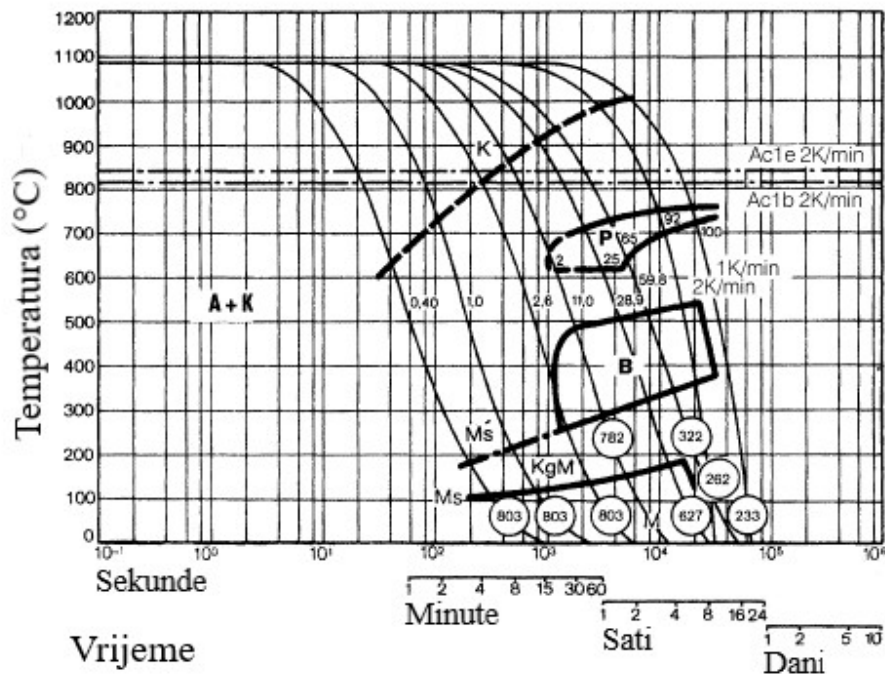
Kemijski sastav čelika X153CrMoV12-1 (K110)						
Kemijski element	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Udio u leguri (%)	1,55	0,25	0,35	11,80	0,80	0,92

Važno je provesti pravilnu toplinsku obradu. Toplinska obrada visokolegiranog alatnog čelika za hladni rad K110 sastoji se od sferodizacijskog „mekog žarenja“, žarenja za redukciju zaostalih naprezanja, kaljenja na zraku i minimalno dva ciklusa visokotemperaturnog popuštanja. Prije toplinske obrade čelici se mogu toplo kovati na temperaturama od 850 do 1050 °C. Nakon toplog kovanja slijedi toplinska obrada. Na slici 5.2. prikazana je cjelokupna toplinska obrada alatnog čelika K110 tvrtke Böhler.



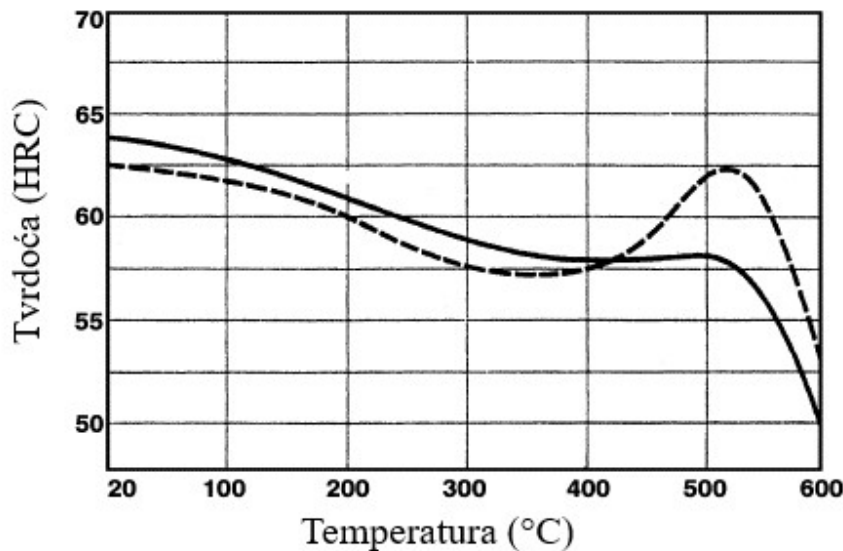
**Slika 5.1.** *Cijeli postupak toplinske obrade alatnog čelika K110 [2]*

Čeličane najčešće isporučuju čelik dobavljaču u „meko“ žarenom stanju. Čelik se zagrijava na temperaturu od 800 do 850 °C te se sporo hladi u peći do temperature od 600 °C, a zatim se hladi na zraku do sobne temperature. Tvrdoća nakon „mekog“ žarenja iznosi maksimalnih 250 HB. Čelik se u „meko“ žarenom stanju može obrađivati obradom odvajanjem čestica. Nakon sferodizacijskog „mekog“ žarenja slijedi žarenje za redukciju zaostalih naprezanja. Čelik se zagrijava na temperaturu od 650 do 700 °C te se pušta da se jako sporo hladi u peći. Nakon hlađenja do sobne temperature čelik K110 potrebno je staviti u neutralnu atmosferu na jedan do dva sata. Žarenju za redukciju zaostalih naprezanja slijedi kaljenje. Kaljenje je najosjetljiviji dio toplinske obrade. Potrebno je čelik zagrijati na temperaturu austenitizacije od 1020 do 1040 °C. Na temperaturi austenitizacije drži se trideset minuta. Hlađenje nakon zagrijavanja na temperaturu austenitizacije može biti na zraku, ulju ili solnoj kupci prethodno zagrijanoj na od 500 do 550 °C. Čelik nakon kaljenja ima maksimalnu moguću tvrdoću od 63 do 65 HRC. Brzine hlađenja K100 čelika za točnu mikrostrukturu očitava se iz TTT – dijagrama prikazanog na slici 5.3.



Slika 5.2. TTT – dijagram za alatni čelik K110 [2]

Odmah nakon kaljenja potrebno je provesti postupke visokotemperaturnog popuštanja. Čelik K110 polako se zagrijava do temperature popuštanja jedan sat za svakih 20 milimetara debljine. Čelik se zatim hladi minimalno dva sata na zraku. Ovisno o potrebama čelika za hladni rad odabire se željena tvrdoća nakon popuštanja iz dijagrama popuštanja temperature. Potrebno je provesti minimalno dva ciklusa popuštanja gdje je prvo popuštanje na radnu tvrdoću visokolegiranog alatnog čelika za hladni rad K110. Temperatura drugog popuštanja mora biti veća od temperature prevlačenje PACVD prevlake da ne dođe do uništavanja prethodne toplinske obrade čelika. Slika 5.4. prikazuje dijagram popuštanja alatnog čelika K110.



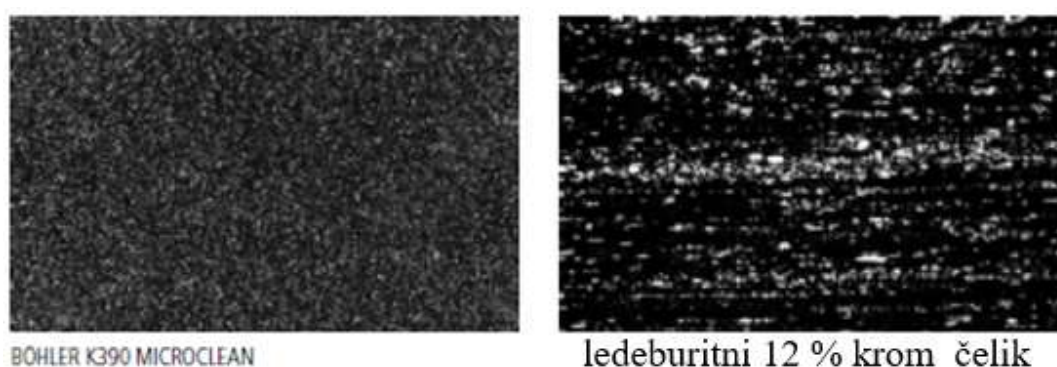
Slika 5.3. Postupak popuštanja za alatni čelik K110 [2]

Alatni čelik za hladni rad K110 koristi se za žigove, rezne alate, alate za duboko vučenje, alati za hladno oblikovanje, glodala za proreze i alate za obradu drveta [2].

## 5.2 Alatni čelik K390 MC

Alatni čelik K390 MC trenutno je najbolji alatni čelik za hladni rad tvrtke Böhler. K390 MC alatni čelik razvijen je za sve veće potrebe visoke čvrstoće i otpornosti na abrazivno trošenje alata za rezanje i alata za probijanje. Odlikuje se odličnim svojstvima jako visoke otpornosti na trošenje, izvrsne čvrstoće i visoke vrijednosti tlačne čvrstoće. Alatni čelik K390 MC proizveden je tehnologijom metalurgije praha gdje se dobije jednolična i homogena mikrostruktura kroz cijeli presjek čelika. Tehnologijom praha životni vijek alatnog čelika K390 MC povećan je za više od dva puta. Alatni čelik K390 MC je dobro oblikovljiv, relativno lako se provodi toplinska obrada i doseže visoke vrijednosti tvrdoće od 64 HRC. Tehnologijom metalurgije praha alatni čelik K390 MC pokazuje bolja svojstva usporedno s klasičnim viskougličnim ledeburitnim alatnim čelicima za hladni rad. Zahvaljujući metalurgiji praha K390 MC ima jednoliku raspodjelu karbida po

presjeku, sama veličina karbida je manja i zbog odsustva nečistoća ima veliku homogenost svojstava. Usporedba raspodjele karbida za K390 MC alatni čelik i konvencionalni ledeburitni 12 % krom alatni čelik za hladni rad prikazana je na slici 5.5. Kemijski sastav K390MC prikazan je na slici 5.6.



**Slika 5.4.** Usporedba raspodjele karbida za K390MC alatni čelik i konvencionalni ledeburitni 12 % krom alatni čelik za hladni rad [3]

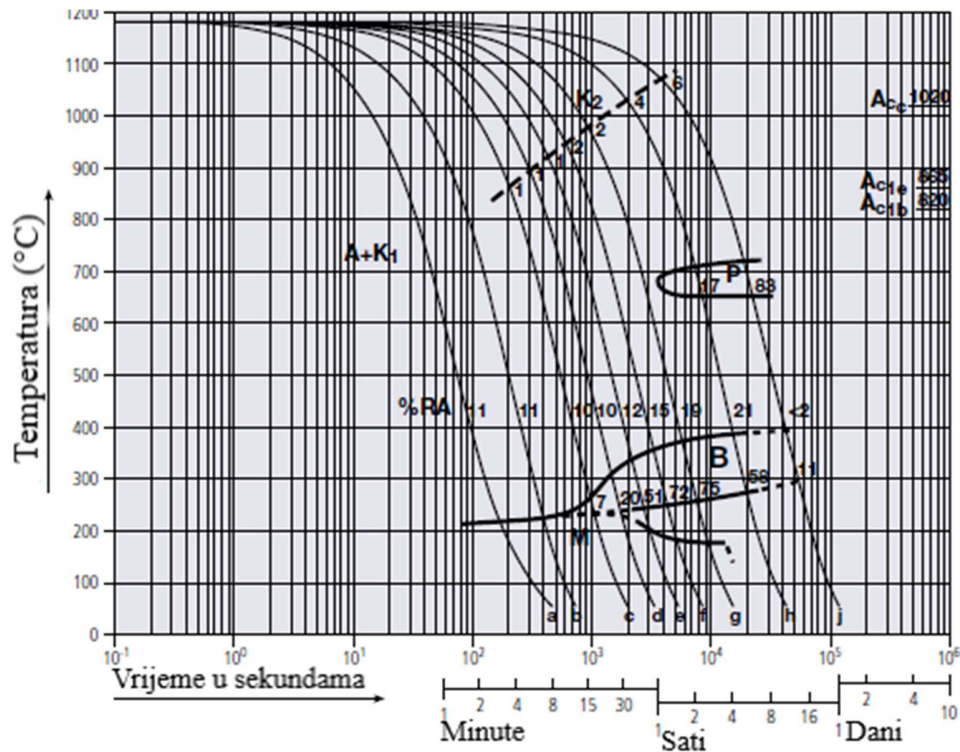
**Tablica 2.** Kemijski sastav alatnog čelika K390 MC [3]

Kemijski sastav čelika K390 MC							
Kemijski element	C	Si	Cr	Mo	V	W	Co
Udio u leguri (%)	2,45	0,55	0,35	11,80	0,80	0,92	2,00

Toplinska obrada sastoji se od sferodizacijskog „mekog“ žarenja, žarenja za redukciju zaostalih napreznja, kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja. Kao skoro svi čelici ovog tipa iz čeličane se već isporučuju u „meko“ žarenom stanju tako da toplinska obrada počinje s žarenjem za redukciju zaostalih napreznja. Alatni čelik K390 MC zagrijava se na temperature od 650 do 700 °C te se zatim sporo hladi u peći. Nakon žarenja za redukciju zaostalih napreznja provodi se kaljenje. Čelik se uz dva predgrijavanja zagrijava na temperature austenitizacije od 1030 do 1180 °C. Nakon dostignute temperature austenitizacije potrebno je držati dvadeset do trideset minuta. Zbog velikog vremena inkubacije alatnog čelika K390 MC možemo ga hladiti na zraku da postignemo sto postotnu martenzitnu mikrostrukturu. Kaljenje je moguće provesti i u vakuumskoj

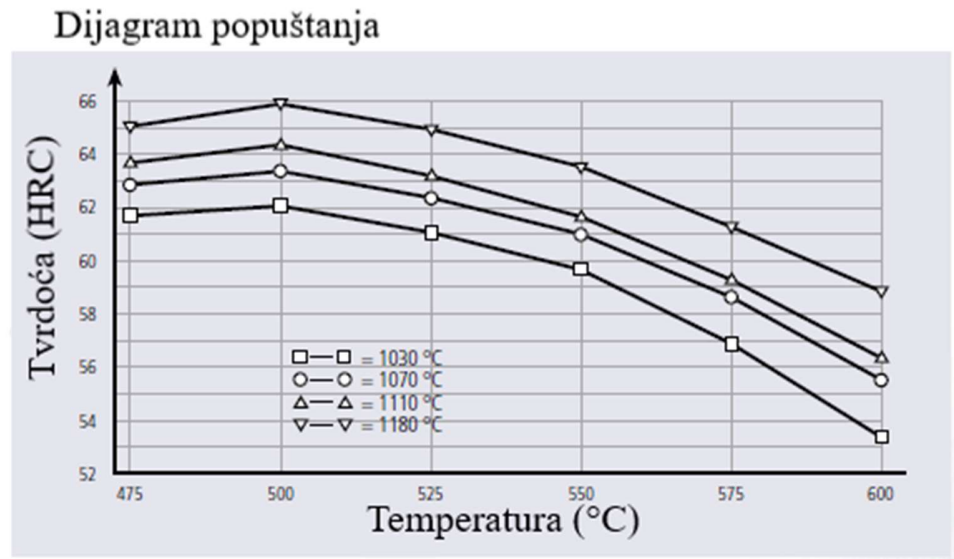


komori gdje se hladi su dušikom. Brzine hlađenja i moguće mikrostrukture dobivene hlađenjem prikazane su na TTT – dijagramu na slici 5.7.



**Slika 5.5.** TTT – dijagram za alatni čelik K390MC [3]

Tvrdoća nakon kaljenja je 62 do 66 HRC. Odmah nakon kaljenja potrebno je provesti popuštanje. Sporo zagrijavamo alatni čelik do temperature popuštanja jedan sat za svakih 20 milimetara debljine najmanje dva sata. Hlađenje je na zraku. Preporučeno je popuštanje alatni čelik K390 MC barem tri puta. Ovisno na koju tvrdoću želimo popustiti alatni čelik K390 MC iščitavamo iz njegovo dijagram popuštanja prikazanog na slici 5.8.



**Slika 5.6.** Postupak popuštanja za alatni čelik K390MC [3]

Primjena alatnog čelika K390 MC proizvedenog metalurgijom praha primjenjuje se za rezne alate i štanice, alate za ekstruziju, alate za duboko vučenje, alate za valjanje, za kalupe opterećene velikim udarni radom, noževe za industriju papira i u polimernoj industriji [3].

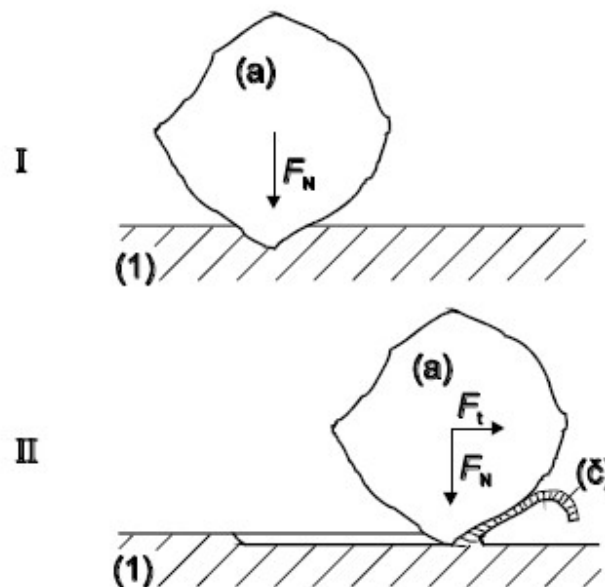
## 6. Abrazijsko trošenje

Postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama nazivamo trošenje. Četiri osnovna mehanizma trošenja su abrazija, adhezija, umor površine i tribokorozija. Jediničnim događajima opisujemo pojedine mehanizme trošenja. Jedinični događaj je slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine. On uvijek uključuje proces nastajanja pukotine i proces napredovanja pukotine [11].

U ovom radu potrebno je ispitati visokolegirani alatni čelik za hladni rad na abrazijsko trošenje, stoga će se opisati samo abrazija kao mehanizam trošenja i standardnu metodu ispitivanja abrazijskog trošenja ASTM G 65 „suhi pijesak/gumeni kotač“.

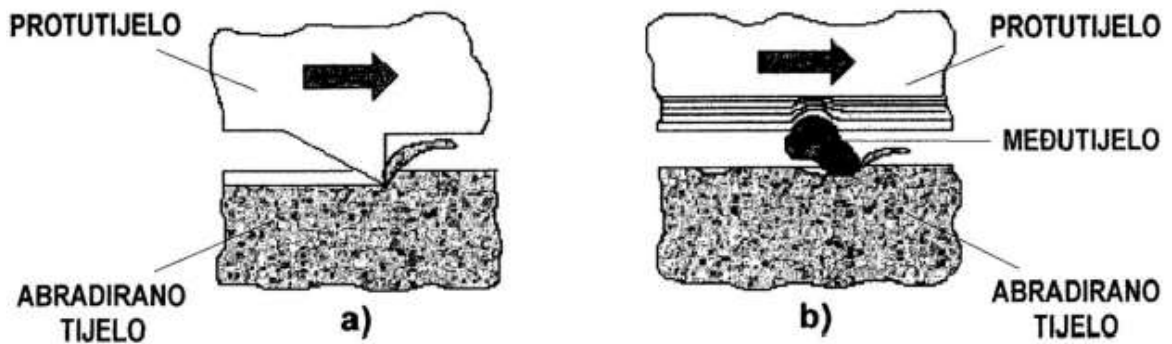
## 6.1 Mehanizmi abrazijskog trošenja

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Može se opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrijske oštrice. Jedinični događaj abrazije sastoji se od dvije faze. Prva faza je prodiranje abraziva u površinu materijala pod utjecajem normalne komponente opterećenja. Druga faza jediničnog događaja abrazije je istiskivanje materijala u obliku čestice trošenja pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja. Jedinični događaj abrazije opisan je slikom 6.1.



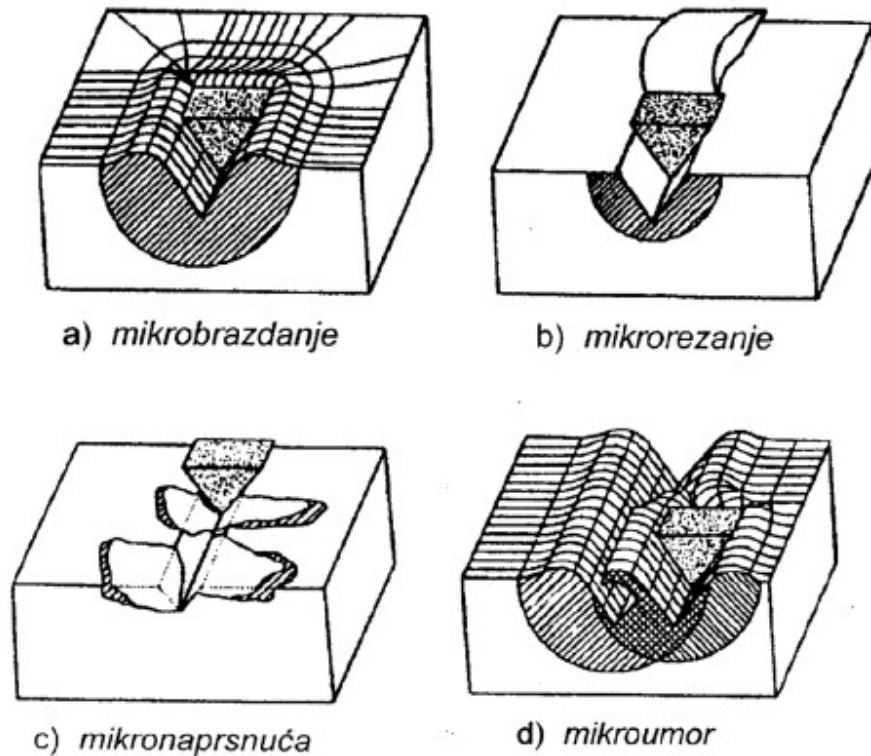
Slika 6.1. Jedinični događaji abrazije [15]

Ovisno o strukturi tribosustava mogu se pojaviti dva oblika abrazije. Prvi oblik abrazije je abrazija u dodiru dva tijela dok je drugi oblik abrazije, abrazija u dodiru s tri tijela. Kod prvog oblika abrazije ovisnog o strukturi tribosustava dva funkcionalna dijela se nalaze u dodiru. Kod drugog oblika tribosustav sastoji se od dva dijela između kojih je čestica koja se giba slobodno između funkcionalnih dijelova i djeluje abrazivno. Čestica koja radi abraziju u dodiru s tri tijela sudjeluje samo 10 % u odnošenju materijala dok se ostalo vrijeme slobodno kotrlja između funkcionalnih dijelova [11]. Slika 6.2. prikazuje tribosustav ovisno o strukturi.



**Slika 6.2.** Abrazija u dodiru dva tijela (a) i tri tijela (b) [15]

Ovisno o međusobno djelovanju između abrazijskih čestica i trošene površine razlikujemo mikrobrazdanje, mikrorezanje, mikronaprnuća i mikroumor. Mikrobrazdanje je odnošenje materijala jednako volumenu zareza nastaloga prolaskom abrazivne čestice. Mikrorezanje je odnošenje materijala proporcionalno volumenu zareza prolaskom abrazivnih čestica. Mikronaprnuća nastaju odnošenjem materijala s tvrde i krhke površine gdje se odnose veliki komadi materijala. Mikroumor je abrazivno trošenje površine materijala nastalo učestalim izmjeničnim naprezanjima. Mikropukotine nastale trenutnim deformacijama šire se po površini i uzrokuju sve veće odvajanje dijelova materijala [11].

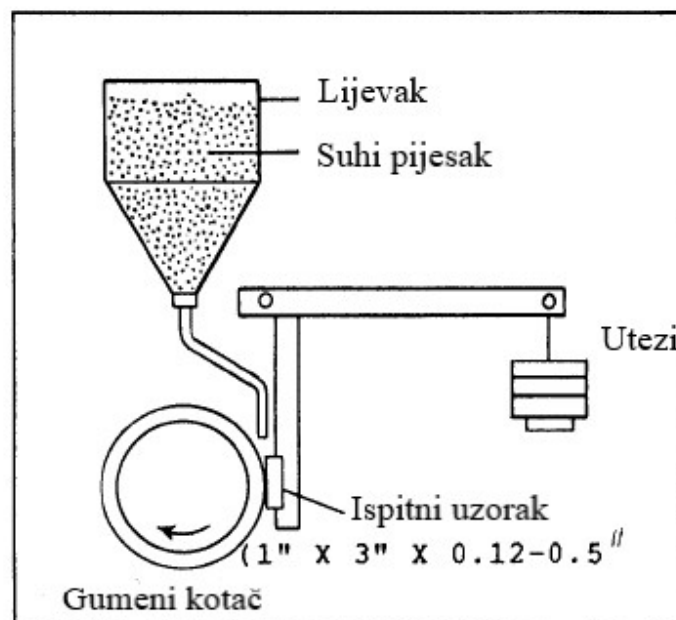


**Slika 6.3.** Shematski prikaz mikromehanizama trošenja materijala [15]

Ovisno o međusobnom odnosu tvrdoća materijala i abraziva moguća su tri slučaja abarzije. To su „čista“ abrazija, selektivna abrazija i „nulta“ abrazija. „Čista“ abrazija nastaje kada je veća tvrdoća abraziva od tvrdoće podloge. Cijela površina materijala je izbrazdana. Ako je materijal duktilan, odvojene čestice biti će u obliku spiralnih strugotina. Ako je materijal krhak, odvojene čestice su obliku malih komadića. Selektivna abrazija događa se samo kada u materijalu ima više faza od kojih je jedna ili više tvrđa od samog abraziva. Abrazivne česticu odvajaju tvrde čestice iz mekše faze. Površina je izbrazdana. „Čista“ abrazija nastaje kada je cijela podloga tvrđa od samoga abraziva. Površina ima polirani izgled, ali se na njoj javljaju čestice trošenja u obliku sitnih ljuskica. „Čista“ abrazija najčešće se događa na prevučenim površinama CVD, PVD i PACVD postupkom [11].

## 6.2 Ispitivanje otpornosti na abraziju prema normi ASTM G 65

ASTM G 65 je najrasprostranjenije i najčešće korišteno standardno ispitivanje abrazijskog trošenja niskim opterećenjem. Glavni dijelovi ispitivanja su gumeni kotač i suhi pijesak. Prije samog ispitivanja potrebno je očistiti površinu ispitivanog uzorka. Površina ispitivanog uzorka mora biti suha. Ispitni uzorak važe se na tisućinku grama 0.001 g. Brzina ispadanja pijeska iz mlaznice je između 300 do 400 grama u minuti. Vrtinja gumenog kotača ne uključuje se sve dok se ne uspostavi tok pijeska. Protok pijeska mora biti jednoličan, a ne turbulentan. Postupak ispitivanja kreće s unošenjem abraziva između ispitivanog uzorka i rotirajućeg gumenog kotača napravljenog od klorbutila s specifičnom tvrdoćom. Uzorak je pritisnut na rotirajući gumeni kotač s točno određenom silom. Sila pritiska ispitivanog uzorka je kontrolirana s polugom i utezima kako bi se ostvarila konstantna sila ispitivanog uzorka na gumeni kotač. Poluga je smještena tangentsno na gumeni kotač kako bi se osigurala maksimalna moguća sila pritiska. Gumeni kotač se vrti u smjeru padanja pijeska između gumenog kotača i ispitivanog uzorka. Vrijeme ispitivanja i aplicirana sila na ispitivani uzorak varira s tipovima ispitivanja od A do E. Kada ispitivanje završi potrebno je ponovno izvagati uzorke s točnošću miligrama. Ispitivani uzorak se vizualno pregledava za trag od trošenja. [1] Na slici 6.4. vidimo aparaturu ispitivanja norme ASTM G65.



Slika 6.4. Shematski prikaz ispitivanja ASTM G 65 [1]

Parametri ispitivanja su prikazani na slici 6.5. ovisno o kojoj se metodi ASTM G 65 radi [1].

Procedura	Sila pritiska (N)	Okretaji kotača	Linearna abrazija	
			m	(ft)
A	130 (30)	6000	4309	(14 138)
B	130 (30)	2000	1436	(4 711)
C	130 (30)	100	71.8	(236)
D	45 (10.1)	6000	4309	(14 138)
E	130 (30)	1000	718	(2 360)

<sup>A</sup> See 8.4.  
 N = Newton  
 1 lbf = 4.44822 N  
 1 Kgf = 9.806650 N  
<sup>B</sup> Tolerancija sile +/- 3 %

Slika 6.5. Parametri ispitivanja od A do E [1]

Gubitak mase preračunava se u gubitak volumena po formuli [1]:

$$\text{Gubitak volumena, mm}^3 = \frac{\text{gubitak mase (g)}}{\text{gustoća (g/cm}^3\text{)}} * 1000$$

## 7. Ispitivanje prionjivosti prevlake normom VDI 3198

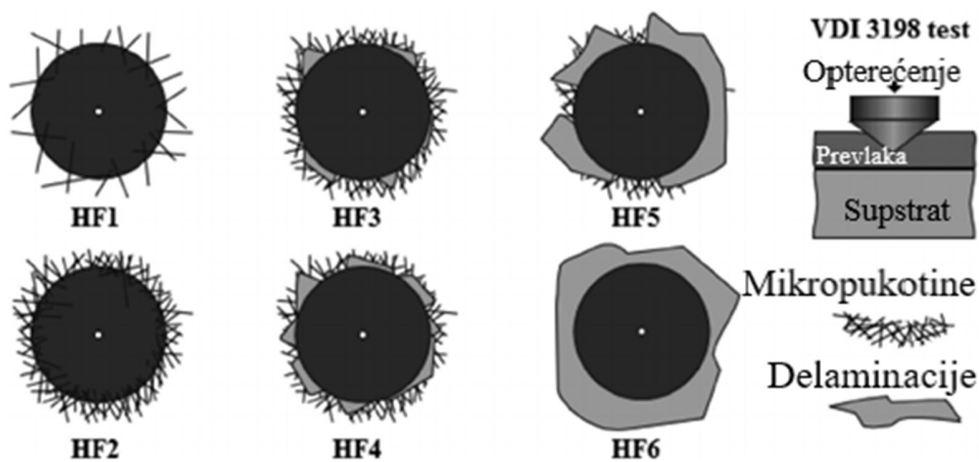
U ispitivanju prionjivosti prevlake prema normi VDI 3198 koristi se Rockwell C indentor i tvrdomjer s postupkom ispitivanja sličnom ispitivanju tvrdoće metodom Rockwell C. Pri tome se u prevučenu površinu utiskuje dijamantni stožac (indentor) (slika 7.1). Utiskivanjem indentora se izaziva probijanje prevlake i plastična deformacija supstrata uz pucanje i delaminaciju prevlake. Kao i za svaki test ispitivanja tvrdoće vrijedi pravilo da debljina podloge (supstrata) na ispitivanom uzorku mora biti najmanje deset puta veća od dubine utiskivanja indentora.. Kut stošca je 120 stupnjeva i sami vrh stošca je polumjera zaobljena od 0,2 mm. Ispitni uzorak stavi se na stalak uređaja za ispitivanje. Indentor se prisloni na površinu ispitivanog uzorka te se pritisne s početnom silom od 100 N, a time se dobiva se utisak indentora. Nakon dobivene početne dubine stisne se prekidač na samom uređaju koji dodatno opterećuje ispitani uzorak s silom pritiska od 1500 N ili 150 kg. Nakon otprilike osam sekundi s mjernog sata očita se tvrdoća po Rockwellu C. Cijeli

postupak se za jedan ispitni uzorak ponavlja se tri puta. Rezultat ispitivanja provjerava se svjetlosnim ili skenirajućim elektronskim mikroskopom [23].



**Slika 7.1.** *Dijamanti stožasti indentor* [17]

Geometrija dijamantnog stošca u kombinaciji s visokim pritiskom na podlogu uzrokuje visoke vrijednosti posmičnog naprezanja. Dobro adhezivna prevlaka i supstrat mogu izdržati visoka posmična naprezanja i brzo zaustaviti širenje pukotine. Suprotno adhezivnoj prevlaci, pukotine koje se šire i raslojavaju karakteristične su lošoj adhezivnoj prevlaci. Loše adhezivnu prevlaku karakterizira puno raslojavanja i delaminacije [23]. Na slici 7.2. opisani su prihvatljivi rezultati ispitivanja (prva četiri uzorka) i neprihvatljivi rezultati ispitivanja (druga dva desna slučaja).



**Slika 7.2.** *Prikaz usporednih ispitivanja metode VDI 3198* [23]

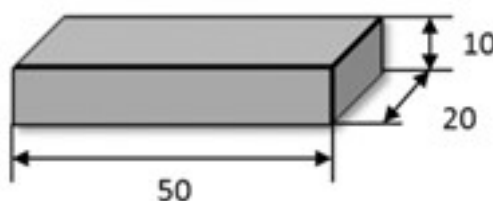


# EKSPERIMENTALNI DIO

## 8. Priprema i provedba pokusa

Eksperimentalni dio završnog rada sastoji se od ispitivanja uzoraka na abrazijsko trošenje i na ispitivanje prionjivosti prevlake VDI 3198 metodom. Uzorci su dva visokolegirana alatna čelika za hladni rad tvrtke Böhler koja su prevučena PACVD prevlakom. Ispitivanje na abrazijsko trošenje ispituje se pomoću ASTM G65 metode „suhi pijesak/gumeni kotač“. Ispitivanje adhezivnosti ili prionjivosti prevlake ispituje se utiskivanjem stožastog dijamentnog indentora opisano VDI 3198 normom u ispitivane uzorke.

Za vrijeme ispitivanja abrazijskog trošenja korišteni su uzorci kvadratnog oblika istih dimenzija prikazani na slici 8.1. i izrađeni od dva visokolegirana alatna čelika za hladni rad točnog kemijskog sastava prikazanog u Tablici 1.



Slika 8.1. Dimenzije ispitnih uzoraka kvadratnog oblika [5]

Tablica 3. Točan kemijski sastav čelika K110 i K390 MC [5]

Oznaka čelika	Kemijski sastav čelika, [%]								
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Co	Nb
<b>X155CrVMo12-1 (K110)</b>	1,55	0,30	0,30	11,30	0,75	0,75	-	-	-
<b>K390 MC</b>	2,45	0,55	0,40	4,15	3,75	9,00	1,00	2,00	-

Oba čelika su prvotno obrađena toplinskom obradom te su zatim prevučene prevlake. Prije samog prevlačenja površine prevlakama potrebno je pripremiti površinu uzorka. Površina uzorka mehanički je očišćena finim brušenjem i poliranjem kako bi se postigla površinska hrapavost  $R_a =$

$0.133 \pm 0.012 \mu\text{m}$ . Uzorci su zatim očišćeni ionskim otprašivanjem u trajanju od dva sata. Jedan uzorak od svakoga alatnog čelika je prevučen s tri tipa prevlake. Jedan uzorak od oba čelika je prevučena nitriranjem u plazmi kao kontrolna skupina. Površina druga dva uzorka prevučena su prevlakom od TiN/TiCN PACVD postupkom dok su zadnja dva uzorka prevučena prevlakom od TiN/TiBN PACVD postupkom.

Označavanje ispitnih uzoraka napravljeno je na sljedeći način:

- oznaka C – ispitni uzorci kojima je osnovnim materijala za prevlačenje čelik K390 MC,
- oznaka D – ispitni uzorci kojima je osnovnim materijala za prevlačenje čelik K110.

Broj 1 pored oznaka C i D označava prevlaku dobivenu nitriranjem u plazmi, broj 2 imenuje prevlaku TiN/TiCN dobivenu PACVD postupkom dok broj 3 pored oznaka C i D označava prevlaku od TiN/TiBN-a dobivenu postupkom PACVD-a. Sistematski poredane oznake ispitivanih uzoraka prikazane su u Tablici 2. [5].

**Tablica 4.** Oznake ispitnih uzoraka alatnih čelika

Oznaka uzorka	Osnovni materijal	Prevlaka
C1	Alatni čelik Böhler K390 MC	Nitriranje u plazmi
C2	Alatni čelik Böhler K390 MC	TiN/TiCN
C3	Alatni čelik Böhler K390 MC	TiN/TiBN
D1	Alatni čelik Böhler K110	Nitriranje u plazmi
D2	Alatni čelik Böhler K110	TiN/TiCN
D3	Alatni čelik Böhler K110	TiN/TiBN

Toplinska obrada koja je prethodila prevlačenju oba alatna čelika sastoji se od kaljenja. Kaljenje se sastoji od predgrijavanja do temperature austenitizacije, zatim držanje na istoj temperaturi i ohlađivanja na zraku. Nakon ovog postupka kaljenja potrebno je oba čelika podvrgnuti postupku popuštanja koji su u oba slučaja ponavljaju dva puta. Unatoč sličnom postupku toplinske obrade razlikuje se u samim parametrima postupaka. Alatni čelik K390 MC prije dovođenja do temperature austenitizacije ima tri predgrijavanja. Prvo predgrijavanje je na temperaturi 450 °C, drugo 860 °C, a zadnje i treće je na temperaturi od 1050 °C. Nakon predgrijavanja slijedi ugrijavanje do temperature austenitizacije od 1180 °C. Alatni čelik K390 MC hladi se na zraku s čime završava postupak kaljenja. Alatni čelik K110 ima dva predgrijavanja na prvu temperaturu od 450 °C, zatim na 860 °C te se onda dovodi do temperature austenitizacije od 1070 °C gdje se kao i čelik K390 MC hladi na zraku. Oba čelika se popuštaju dva puta. Čelik K390 MC se dva sata prvo popušta na temperaturi od 500 °C te zatim na temperaturi od 540 °C dva sata. Čelik K110 prvo se popušta na temperaturi od 520 °C te zatim na 540 °C i oba postupka popuštanja za čelik K110 traju po dva sata.

Nakon toplinske obrade, površina čelika očisti se finim brušenjem i poliranjem te ionskim otprašivanjem na temperaturi 500 °C u trajanju dva sata. Postupak prevlačenja PACVD postupkom proveden je pomoću plazme aktiviranom pulsirajućom istosmjernom strujom napona 500 V, na tlaku od 2 mbara i pomoću mješavine plinova dušika, argona, vodika i metana. Za dobivanje prevlaka TiN, TiCN i TiBN u mješavini prethodno navedenih plinova dodaju se vaporizirani plinovi TiCl<sub>4</sub> i TiB<sub>3</sub>. Naziv peći za PACVD postupak je Rübige GmbH type PC 70/90 industrijska vakuumska peć prikazana na slici 8.2. [5].



**Slika 8.2** Industrijska vakuumska peć Rübige GmbH type PC 70/90 [5]

Proces nastajanja sloja kod C1 i D1 uzoraka je nastanak prevučene prevlake stavljanjem supstrata u plazma aktiviranu atmosferu u trajanju od 1.5 h na temperaturu od 480 °C gdje se u komoru upumpavaju plinovi dušika.

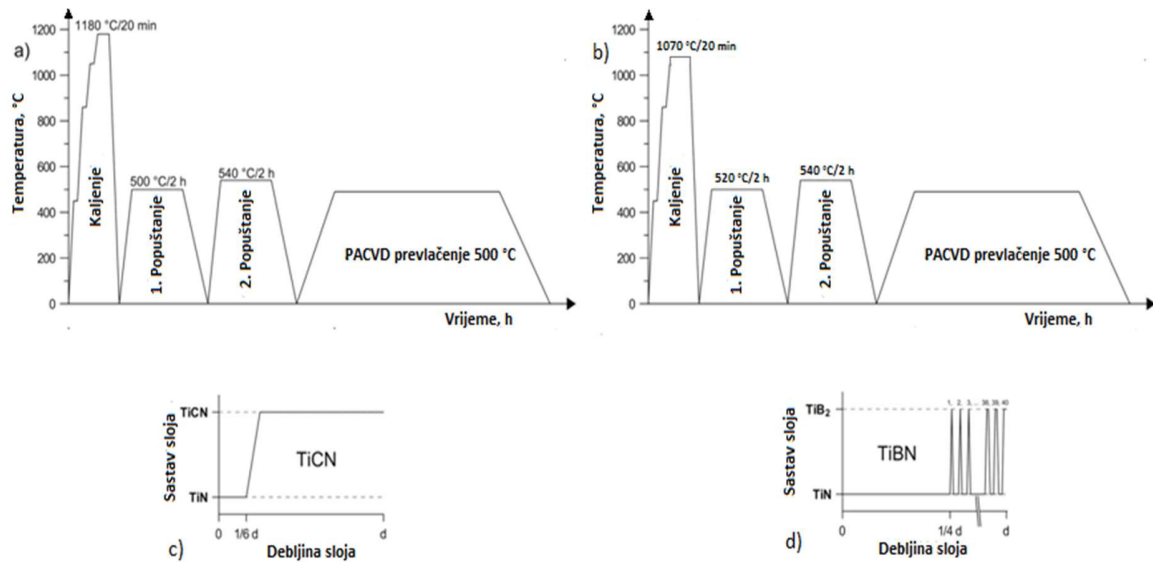
Proces nastajanja sloja kod C2 i D2 uzoraka je sljedeći:

1. Nastanak TiN sloja čija debljina iznosi 1/6 debljine cjelokupne prevlake (trajanje 1h i 30 min),
2. Promjena protoka plinova i nastanak prijelaznog sloja iz TiN u TiCN (trajanje 30 min),
3. Nastanak TiCN sloja (trajanje 6h).

Proces nastajanja sloja kod C3 i D3 uzoraka je sljedeći:

1. Nastanak TiN sloja čija debljina iznosi 1/4 debljine cjelokupne prevlake (trajanje 1h i 30 min),
2. Izmjenično slaganje TiN i Ti-B-N slojeva dok ne nastane 42. sloj (trajanje 7h i 15 min),
3. Nanošenje rubnog TiB<sub>2</sub> sloja.

Sav postupak toplinske obrade čelika K390MC prikazan je na slici a). Na slici b) prikazan je cjelokupni postupak toplinske obrade čelika K110 dok su na slikama c) i d) prikazani postupci PACVD proces prevlačenja za nastanak duplex TiN/TiCN prevlake (c) i PACVD proces prevlačenja za nastanak višeslojne TiN/Ti-B-N prevlake (d) [5].



**Slika 8.3** Toplinska obrada ispitnih uzoraka izrađenih od K110 i K390 čelika:

- a) dijagram cjelokupnog procesa toplinske obrade K390 čelika,
- b) dijagram cjelokupnog procesa toplinske obrade K110 čelika,
- c) PACVD proces prevlačenja za nastanak duplex TiN/TiCN prevlake,
- d) PACVD proces prevlačenja za nastanak višeslojne TiN/Ti-B-N prevlake[5].

## 9. Ispitivanje prionjivosti i debljine PACVD prevlaka

---

### 9.1. Rezultati ispitivanja prionjivosti prevlake metodom VDI 3198

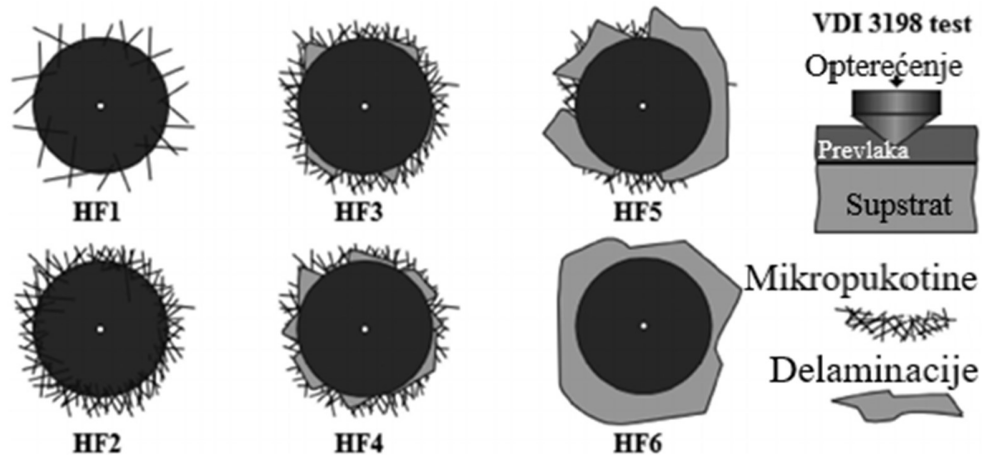
Prionjivost podloge ispituje se Rockwell C metodom opisanom po normi VDI 3198. Ispitivanje se provodilo na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u laboratoriju za toplinski obradu na uređaju za ispitivanje tvrdoće po Rockwell C metodi. Uređaj za ispitivanje tvrdoće po Rockwell-u i adhezivnosti površine prikazan je na slici 9.1.



**Slika 9.1.** Uređaj za ispitivanje tvrdoće Rockwell C metodom

Nakon ispitivanja uzorci su pregledani na svjetlosnom mikroskopu. Pregledava se samo mjesto utiskivanja dijamentnog stošca. Mjesto oko utiska dijamentnog stošca pokazuje prijanjivost same prevlake. Fotografije s otiscima indentora na mikroskopu uspoređuju se s reprezentativnim modelima po VDI 3198 metodi. Skaliranje svojstva prionjivosti prevlaka je od HF1 do HF6. Prevlaka s oznakom HF1 je dobro prionjiva prevlaka dok prevlaka s oznakom HF6 je prevlaka loše prionjivosti. Prihvatljive adhezivnosti površine su od HF1 do HF4, dok su neprihvatljive HF5 i HF6. Uspoređuju se mjesta utiskivanja dijamentnog stošca, točnije, uspoređuju se delaminacije,

raslojavanje prevlake te same pukotine oko mjesta utiska. Ispitivanje se provodi na uzorcima C2, C3, D2 i D3. Ispituje se adhezivnost ili prionjivost podloge prevlaka od TiN/TiCN i TiN/TiBN. Ogledni model usporedbe prionjivosti podloge prikazan je na slici 9.2.



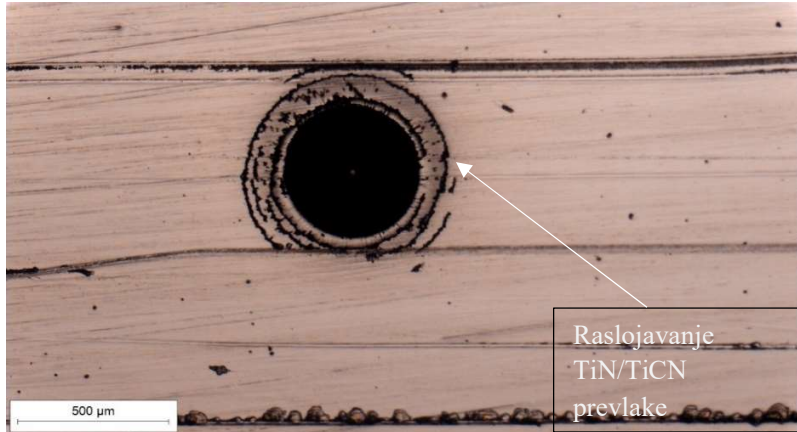
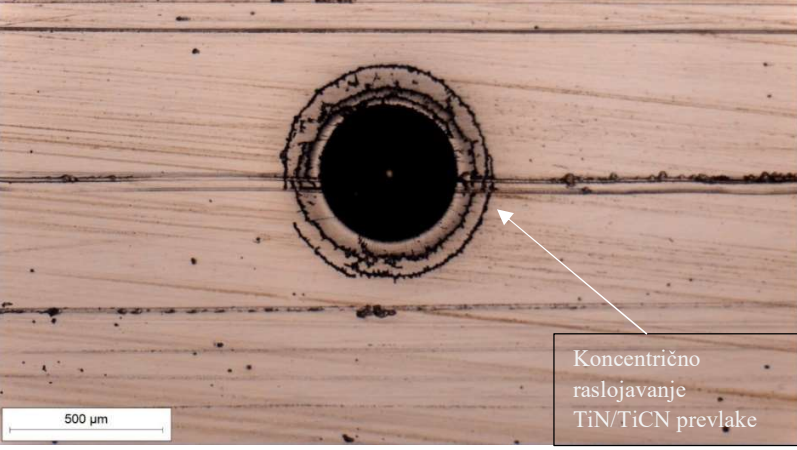
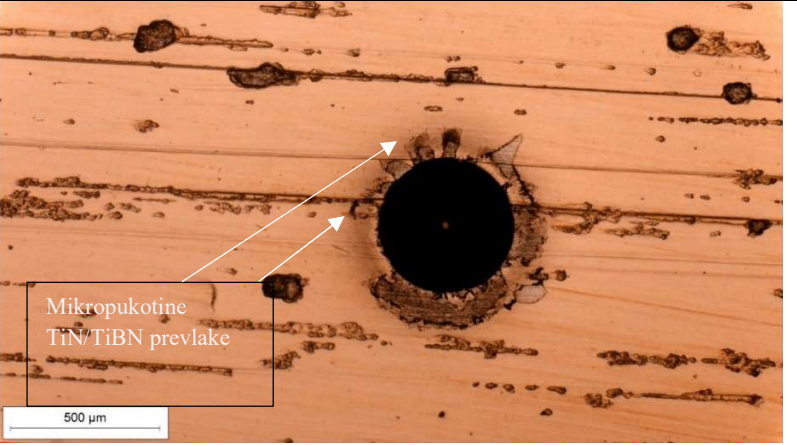
**Slika 9.2.** *Prihvatljive i neprihvatljive adhezivnosti prevlake prema VDI 3198 normi [8]*

Rezultati ispitivanja VDI 3198 metodom prikazani su u Tablici 4. Ispitivani su ispitni uzorci C2, C3, D2 i D3. Prikazani su najreprezentativniji uzorci po svakome čeliku i prevlaci i ispod svake fotografije je oznaka koja označava usporedbu prema modelu VDI 3198 norme.


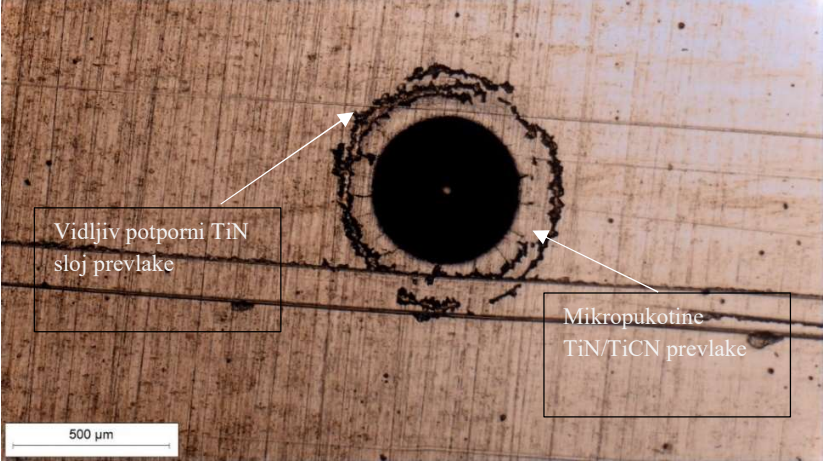
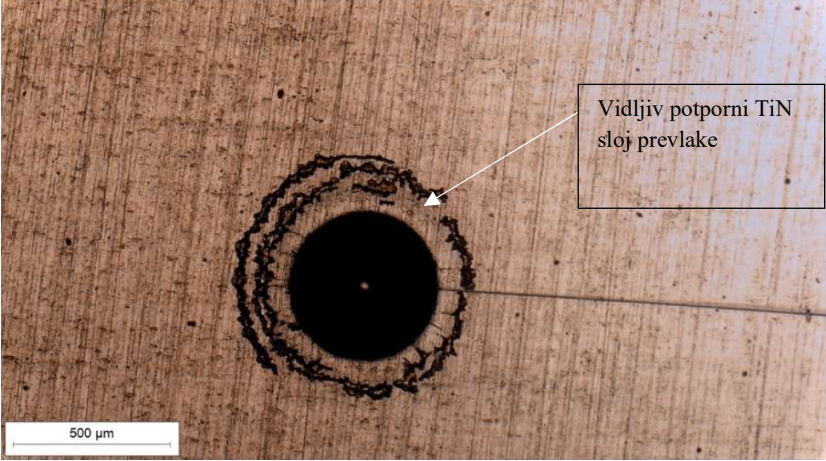
Rezultati ispitivanja VDI 3198 metodom prikazani su u Tablici 5. Ispitivani su ispitni uzorci C2, C3, D2 i D3. Prikazani su najreprezentativniji uzorci po svakome čeliku i prevlaci i ispod svake fotografije je oznaka koja označava usporedbu prema modelu VDI 3198 norme.



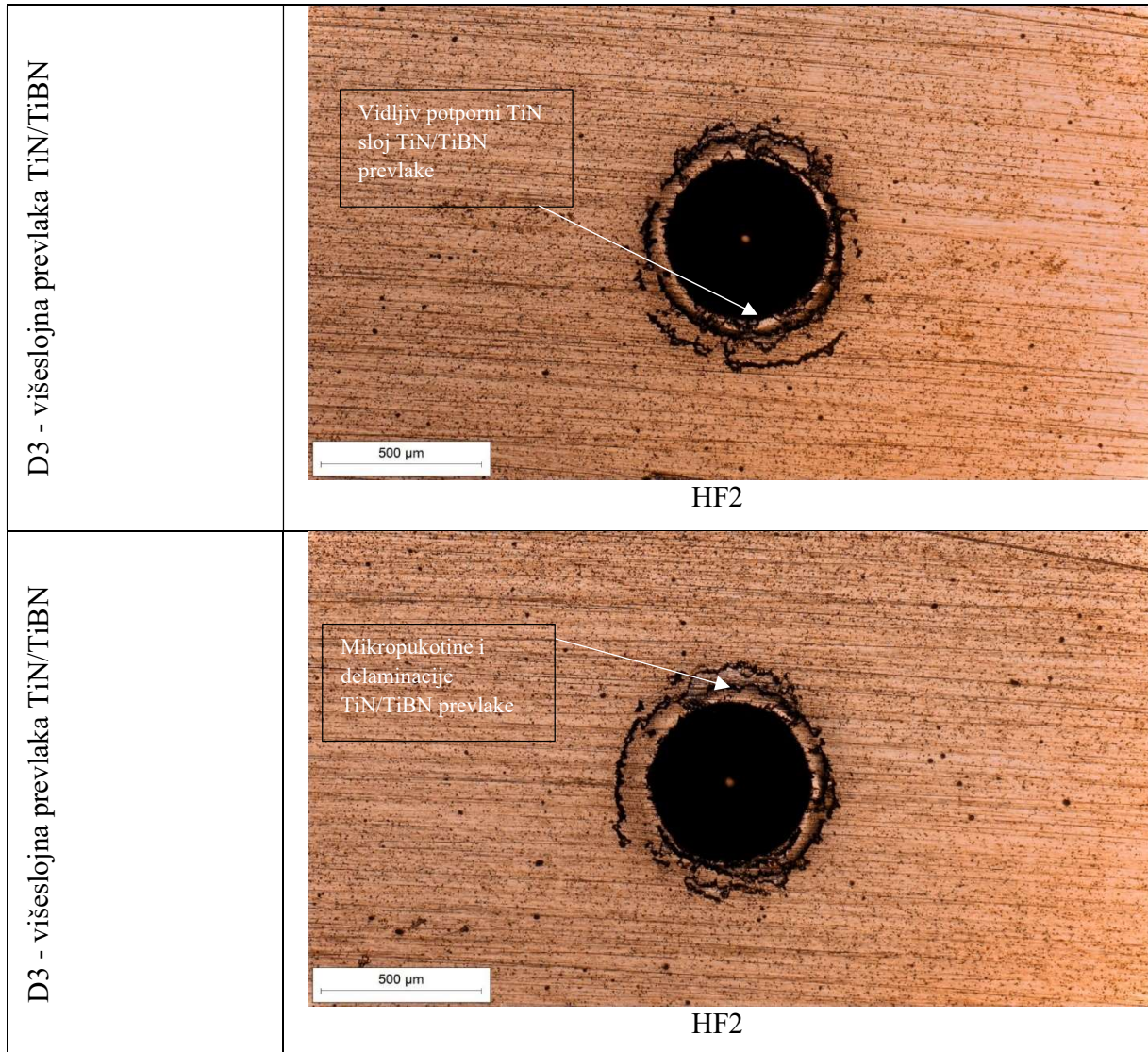
**Tablica 5.** Fotografije mjesta utisaka dijamantnog indentora na prevlake TiN/TiCN i TiN/TiBN na alatnim čelicima K110 i K390 MC

C2 – duplex prevlaka TiN/TiCN	 <p style="text-align: center;">HF4</p>
C2 – duplex prevlaka TiN/TiCN	 <p style="text-align: center;">HF4</p>
C3 – višeslojna prevlaka TiN/TiBN	 <p style="text-align: center;">HF3</p>

**Tablica 5.** Fotografije mjesta utisaka dijamantnog indentora na prevlake TiN/TiCN i TiN/TiBN na alatnim čelicima K110 i K390 MC (nastavak)

C3 – višeslojna prevlaka TiN/TiBN	 <p>500 μm</p> <p>HF4</p>
D2 - duplex prevlaka TiN/TiCN	 <p>Vidljiv potporni TiN sloj prevlake</p> <p>Mikropukotine TiN/TiCN prevlake</p> <p>500 μm</p> <p>HF3</p>
D2 - duplex prevlaka TiN/TiCN	 <p>Vidljiv potporni TiN sloj prevlake</p> <p>500 μm</p> <p>HF3</p>

**Tablica 5.** Fotografije mjesta utisaka dijamantnog indentora na prevlake TiN/TiCN i TiN/TiBN na alatnim čelicima K110 i K390 MC (nastavak)



## 9.2 Analiza adhezivnosti prevlake

Ispitivana je adhezivnost prevlake TiN/TiCN i TiN/TiBN na alatnim čelicima K110 i K390 MC po VDI 3198 metodi. Na svakoj su prevlaci tri puta napravljena utiskivanja dijamentnog stožastog indentora za ispitivanje tvrdoće prema Rockwellu C. Po iznosima tvrdoće u tablici 3. vidi se da su prevučeni čelici visoke tvrdoće. Tvrdoća svih prevlake je između 59 i 64 HRC. Prevlake nanosene na alatni čelik K390 MC pokazuju višu tvrdoću od 63 do 64 HRC, dok iste prevlake nanosene na alatni čelik K110 imaju iznose tvrdoće u vrijednostima od 59 do 60 HRC. Prema klasifikaciji prikazanoj u poglavlju teorijskog dijela 7.2. sve prevlake imaju zadovoljavajuću prionjivost prevlake. Sažeti prikaz svih usporedba prionjivosti prema metodi VDI 3198 prikazan je u tablici 5.

**Tablica 6.** Oznaka prionjivosti ispitnih uzoraka prema VDI 3198 normi

Oznaka čelika	Prvi otisak	Drugi otisak
C2	HF 4	HF 4
C3	HF 3	HF 4
D2	HF 3	HF 3
D3	HF 2	HF 2

Prema Tablici 5. može se uočiti da tvrde podloge alatnog čelika K390 MC imaju nešto lošiju prionjivost prevlake naspram istih prevlaka na K110 alatnom čeliku. Također, vidljivo je da TiN/TiBN prevlaka na oba čelika ima bolju adhezivnost od TiN/TiCN prevlake na istom čeliku.

TiN/TiCN prevlaka sastoji se od dva sloja, potpornog TiN sloja i zatim iznimno mikrotvrđog i otpornog na trošenje TiCN sloja. Utiskivanjem indentora, TiCN zbog svoje tvrdoće krhko puca po cijelom obrubu utiska i urušava se prema njemu. Prema poglavlju teorijskog dijela 4.3. uočavamo da je primarno trošenje TiN/TiCN prevlake adhezijsko trošenje što su i ispitivanja, također, pokazala. TiN/TiBN je višeslojna prevlaka koja na oba ispitana alatna čelika pokazuje bolju prionjivost prevlake. Na rubovima utiska je manje delaminacija i mikropukotina nego kod TiN/TiCN prevlake. Kvalitetnija adhezijska svojstva TiN/TiBN prevlake opet pokazuje prevlaka prevučena preko K110 alatnog čelika. Bolja adhezijska svojstva prevlake daju višeslojne prevlake

jer se sa svakim prevučeni slojem smanjuju unutarnja naprezanja povećanjem površine između slojeva same prevlake.

## 10. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

---

### 10.1 Postupak ispitivanja abrazijskog trošenja i makro izgled uzoraka

Provedeno je abrazijsko ispitivanje opisano u poglavlju 6.2. teorijskog dijela metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“ po normi ASTM G65. Ispitivanje je provedeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u laboratoriju za tribologiju. Ispitani su uzorci C1, C2, C3, D1, D2 i D3. Ispitivanjem je utvrđen gubitak mase nakon abrazijskog trošenja prevlake ispitnih uzoraka. Opterećenje na ispitni uzorak od sustava poluga uređaja iznosi 1,75 kg ili 17,5 N. Suhi pijesak koji služi kao abraziv je kvarcni pijesak male veličine zrna. Ispitni uzorci izvagani su na mjernoj vagi prije samog ispitivanja kako bi se utvrdila početna masa uzoraka bez trošenja. Jedan uzorak ispitivan je tri minute ili 180 sekundi. Nakon svakih 60 sekundi ispitni uzorak je izvađen iz uređaja i izvagan na mjernoj vagi. Prije svakog vaganja potrebno je očistiti cijeli uzorak od ostataka čestica abraziva i masti kako ne bi utjecalo na rezultate vaganja. Čišćenje ispitnih uzoraka izvodi se pomoću ultrazvučne kupke u trajanju od 90 sekundi. Ultrazvučna kupka puni se vodom. Ispitni uzorak stavlja se u plastičnu čašu koja se puni etanolom kako bi prekrila cijeli uzorak. Plastična se čaša postavi u vodu ultrazvučne kupke te se uređaj uključuje. Nakon vađenja iz plastične čaše ispunjene etanolom potrebo je ispitni uzorak osušiti na zraku u trajanju od 30 sekundi. Ispitni uzorak se nakon čišćenja donosi na mjerenje gubitka mase. Prenošnje i rukovanje ispitnog uzorka mora se prenositi s lateks rukavicama kako se površina ne bi zamastila i kako nečistoća ne bi utjecala na rezultate vaganja. Ukupno po jednom ispitnom uzorku dobije se četiri očitavanja s mjerne vage. Uređaj za ispitivanje abrazijskog trošenja prikazan je na slici 10.1. Na slici 10.3. prikazana je ultrazvučna kupka koja se koristila u čišćenju površine od masnoća i okom nevidljivih čestica dok je na slici 10.2. prikazana mjerna vaga „Meltter“ Zurich na kojoj su se vagali mjerni uzorci prije i nakon ispitivanja na abrazijsko trošenje po normi ASTM G 65.



**Slika 10.1.** Uređaj za abrazijsko trošenje

Postupak ispitivanja abrazijskog trošenja metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“ prema normi ASTM G65 sastoji se od sljedećih koraka:

- Čišćenje ispitnog uzorka pomoću ultrazvučne kupke
- Sušenje uzorka
- Početno vaganje ispitnog uzorka na mjernoj vagi
- Postavljanje ispitnog uzorka za uređaj za ispitivanje abrazijskog trošenja
- Trošenje ispitnog uzorka
- Vađenje uzorka iz uređaja
- Ponovno čišćenje ispitnog uzorka pomoću ultrazvučne kupke
- Sušenje ispitnog uzorka
- Vaganje ispitnog uzorka na mjernoj vagi
- Zapisivanje mase nakon trošenja



**Slika 10.2.** Mjerna vaga „Mettler“ Zurich



**Slika 10.3.** Ultrazvučna kupka

Postupak ispitivanja metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“ sastoji se od sljedećih koraka:




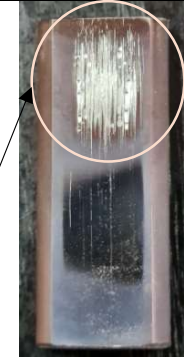

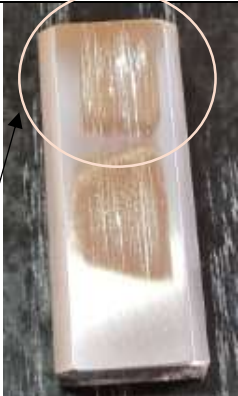
- Stavljanje kvarnog pijeska u lijevak smješten na vrhu uređaja
- Otvaranje zaštitnih vrata uređaja
- Stezanje ispitnog uzorka u stezne čeljusti uređaja
- Otvaranje osovine na vrhu lijevka s pijeskom za uspostavu protoka pijeska
- Pritiskanje poluge kako bi ispitni uzorak pozicionirali tangencijalno na rub gumenog kotača
- Zatvaranje zaštitnih vrata uređaja
- U isto vrijeme paljenje uređaja i štoperice
- Isključivanje uređaja i zaustavljanje protoka pijeska
- Otvaranje zaštitnih vrata i vađenje ispitnog uzorka iz stezanih čeljusti uređaja

Postupak vaganja na mjernoj vagi sastoji se od sljedećih koraka:

- Otvaranje zaštitnog stakla mjerne vage
- Postavljanje ispitnog uređaja na vagu i zatvaranje zaštitnog stakla
- Povlačenje sustava poluga mjerne vage
- Očitavanje mase ispitnog uzorka
- Blokiranje sustava poluge mjerne vage
- Otvaranje zaštitnog stakla i vađenje ispitnog uzorka

Izgled površine prije i nakon 180 s trošenja prikazan je u tablici 7.

**Tablica 7.** Ispitni uzorci prije i nakon 180 sekundi abrazijskog trošenja

Oznake ispitnih uzoraka	Početno stanje površine ispitnog uzorka prije ispitivanja	Abrazijsko trošenje površine ispitnog uzorka nakon 180 s
D1		 <p>Abrazijsko trošenje</p>
D2		 <p>Abrazijsko trošenje</p>
D3		 <p>Abrazijsko trošenje</p>



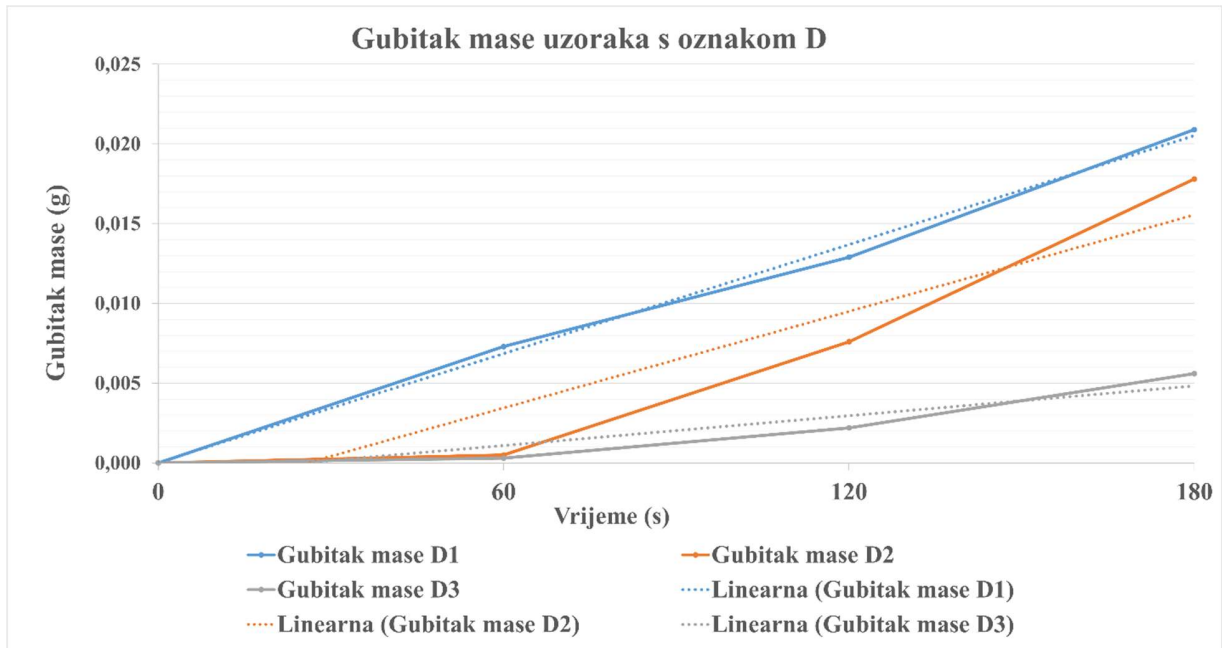
**Tablica 7.** Ispitni uzorci prije i nakon 180 sekundi abrazijskog trošenja (nastavak)

C1		 <p data-bbox="1013 813 1262 846">Abrazijsko trošenje</p>
C2		 <p data-bbox="1013 1294 1262 1328">Abrazijsko trošenje</p>
C3		 <p data-bbox="1013 1821 1262 1854">Abrazijsko trošenje</p>

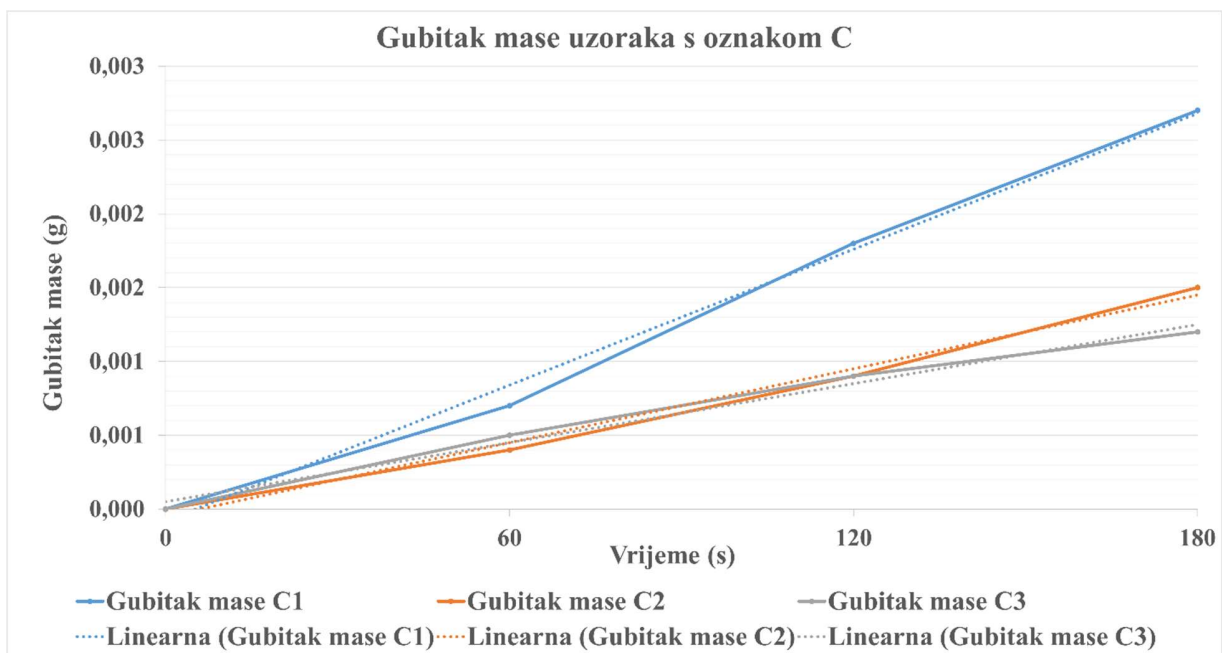
## 10.2 Gubitak mase nakon abrazijskog trošenja

Prethodno opisano ispitivanje u poglavlju 10.1 rezultiralo je informacijama o gubitku masa ispitnih uzoraka. Gubici masa omogućuju nam usporedbu otpornosti na trošenje abrazijskom prevlakom od TiN/TiCN i TiN/TiBN naspram plazmom nitriranog ispitnog uzorka i međusobno. Promatran je gubitak mase na ispitnim uzorcima dva visokolegirana alatna čelika za hladni rad K390 MC i K110 prevučena prevlakama. Ukupno je šest ispitnih uzoraka na kojima se prati pojedini gubitak mase, razlike između pojedinih gubitaka mase i ukupni kumulativni gubitak mase pojedinog ispitnog uzorka. Ispitivanje se sastoji od četiri mjerenja na vagi. Prvo mjerenje provodi se kako bi se utvrdila početna masa ispitivanog uzorka. Svaki od ostala tri vaganja provodi se nakon 60 sekundi trošenja ispitnog uzorka. Iznos izvagane mase nakon svakog ciklusa trošenja naziva se pojedini gubitak mase. Razlika između pojedinih gubitaka mase je razlika između početnog stanja prije trošenja i neposredno nakon 60 sekundi ispitivanja na uređaju za abrazijsko trošenje. Ukupni ili kumulativni gubitak mase zbroj je svih pojedinih gubitaka mase jednog ispitnog uzorka nakon sva 3 ciklusa po 60 sekundi ili nakon 180 sekundi. Svi podaci o pojedinim masama, razlikama između pojedinih masa i ukupnom gubitku mase nalazi se u priložima 1. i 2.

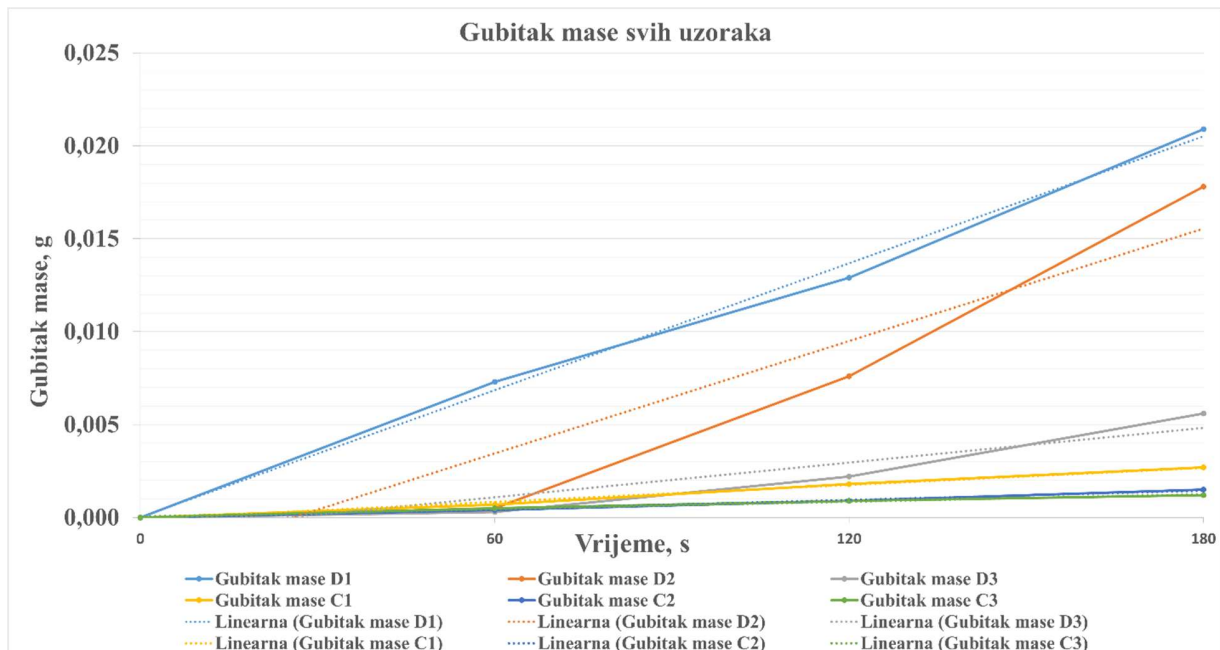
Slika 10.4. i 10.5. prikazuju gubitak mase ispitnih uzoraka u odnosu na vrijeme u sekundama. Slika 10.5. prikazuje informacije o gubitku masa osnovnog materijala izrađenog od visokolegiranog alatnog čelika K390 MC prevučenog prevlakama. Slika 10.4. prikazuje informacije o gubitku masa osnovnog materijala izrađenog od visokolegiranog alatnog čelika K110 prevučenog prevlakama. Svaka točka na grafu prikazuje izmjereni gubitak mase nakon 60 sekundi trošenja. Puna linija spaja sve točke pojedinih gubitaka masa dok iscrtkana linija predstavlja krivulju linearne aproksimacije trošenja. Što je krivulja linearne aproksimacije strmija, to je veće abrazijsko trošenje i manja otpornost na abrazijsko trošenje.



Slika 10.4. Gubitak mase ispitnih uzoraka s oznakom D

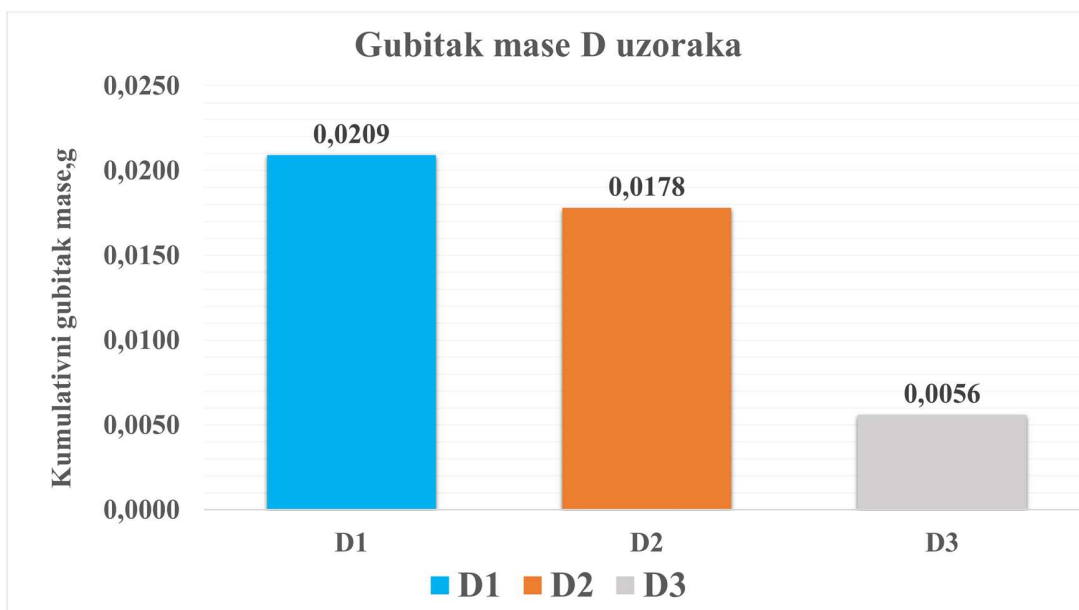


Slika 10.5. Gubitak mase ispitnih uzoraka s oznakom C

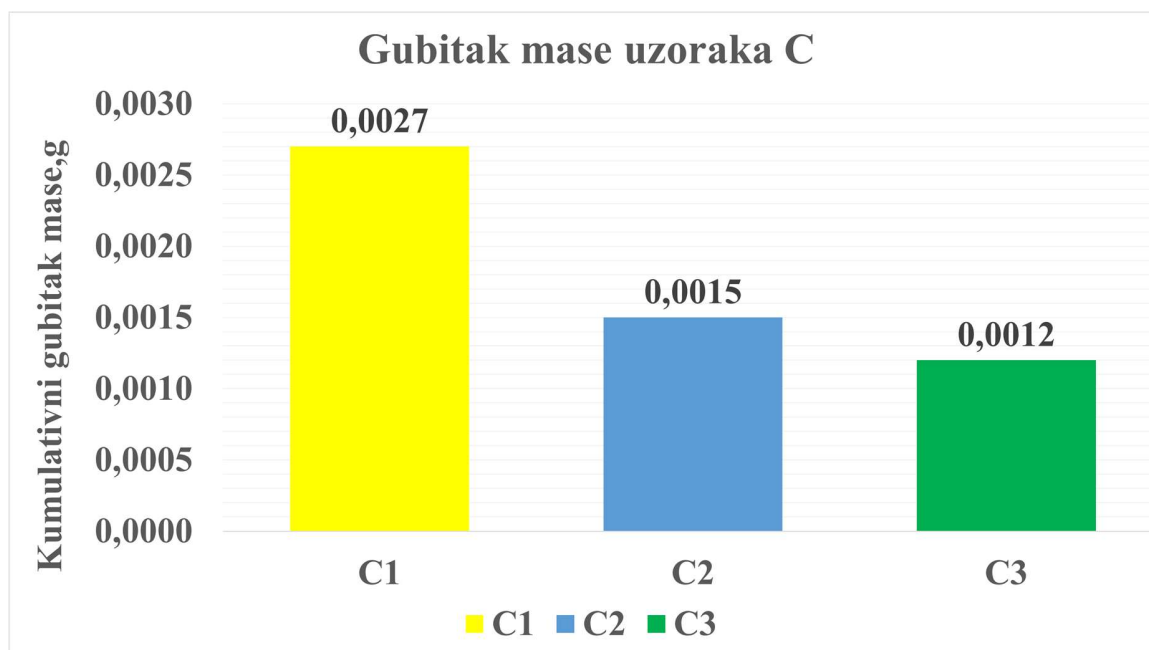


Slika 10.6. Usporedni gubitak mase svih ispitnih uzoraka

Slika 10.7. i 10.8. predstavljaju ukupne ili kumulativne gubitke mase nakon završetka cijelog ciklusa trošenja nakon 180 sekundi. Slika 10.7. prikazuje ukupni gubitak mase za uzorke s oznakom D dok slika 10.8. prikazuje ukupni gubitak masa za uzorke s oznakom C. Veći gubitak mase korelira s višim abrazivnim trošenjem i manjoj otpornosti na isto.

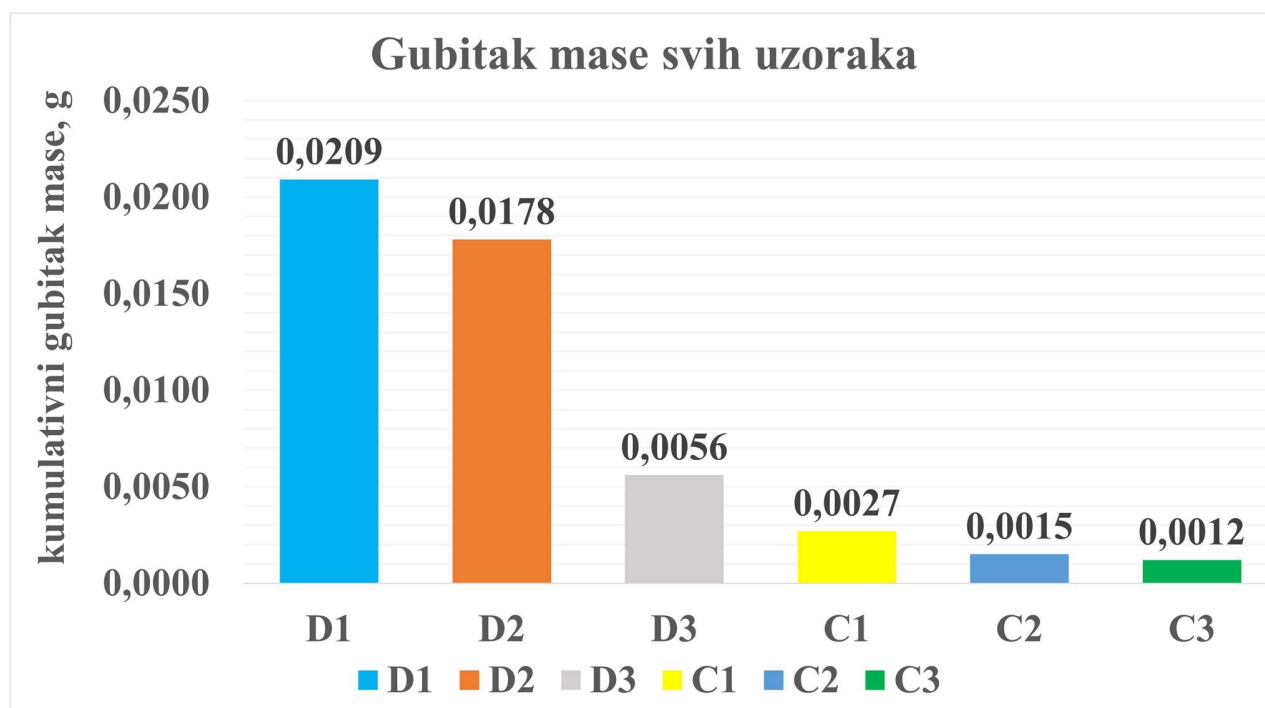


Slika 10.7. Kumulativni gubitak mase D uzoraka



Slika 10.8. Kumulativni gubitak mase C uzoraka

Slika 10.9. prikazuje usporedbu svih ukupnih gubitaka mase svih ispitnih uzoraka.

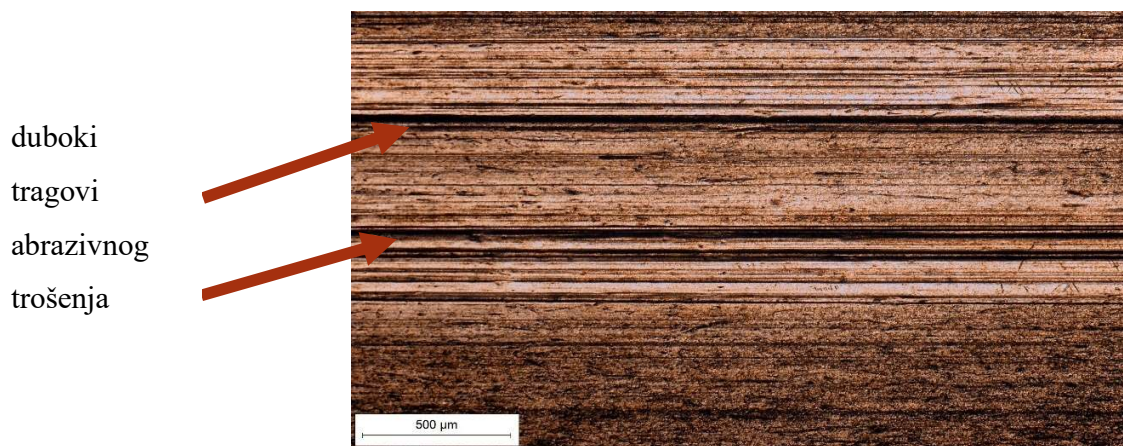


Slika 10.9. Usporedni kumulativni gubitak mase svih ispitnih uzoraka

### 10.3. Analiza istrošenih površine

Ispitivanjem površine na abrazivno trošenje metodom ASTM G 65 dobivene su potrošene površine ispitnih uzoraka koje su fotografirane na svjetlosnom mikroskopu. Fotografije su snimljene s povećanjem 50x, 100x i 200x. Analizirat će se potrošena površina kako bi se vidjela otpornost prevlake na abrazivno trošenje i razorno ponašanje abraziva na površini. Prvo će se analizirati pojedine površine alatnog čelika K110, zatim pojedine površine alatnog čelika K390 MC. Nakon pojedinačne analize, prokomentirat će se površine alatnog čelika K110 i K390 MC među samom skupinom čelika i naposljetku sve površine ispitnih uzoraka.

Na slikama 10.10. do 10.27. prikazane su fotografije površina napravljene na svjetlonosnom mikroskopu.



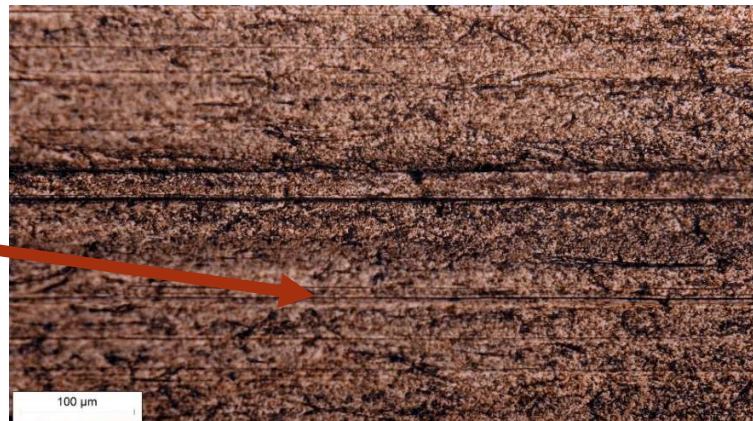
**Slika 10.10.** *Alatni čelik K390 MC oznake C1 (plazma nitiranje) na povećanju 50 puta*

osnovni materijal –  
potpuni nestanak  
plazma nitriranog sloja



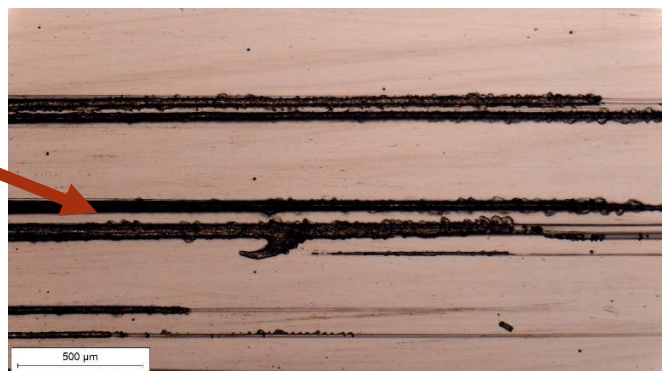
**Slika 10.11.** *Alatni čelik K390 MC oznake C1 (plazma nitriranje) na povećanju 100 puta*

sitne bijele točkice = fino  
disperzirani karbidi po  
cijeloj površini osnovnog  
materijala



**Slika 10.12.** *Alatni čelik K390 MC oznake C1 (plazma nitriranje) na povećanju 200 puta*

probijena TiCN  
prevlaka do  
osnovnog  
materijala



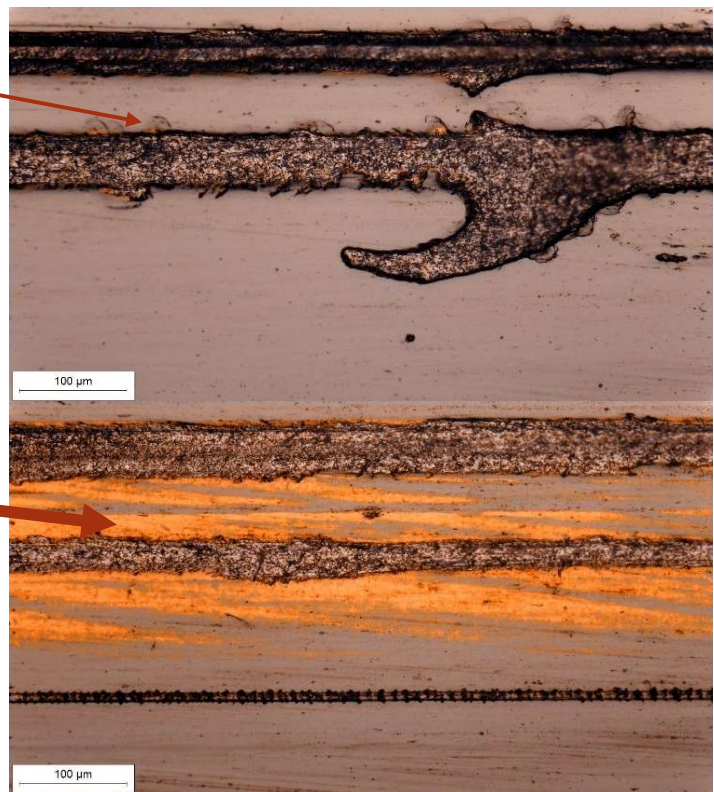
**Slika 10.13.** *Alatni čelik K390 MC oznake C2 (TiN/TiCN prevlaka) na povećanju 50 puta*

pukotine ne  
napreduju iz  
brazde u brazdu,  
dobro otporna



**Slika 10.14.** *Alatni čelik K390 MC oznake C2 (TiN/TiCN prevlaka) na povećanju 100 puta*

Mikropukotina ne putuje  
u sljedeću brazdu,  
vidljiv potporni zlatni  
TiN sloj

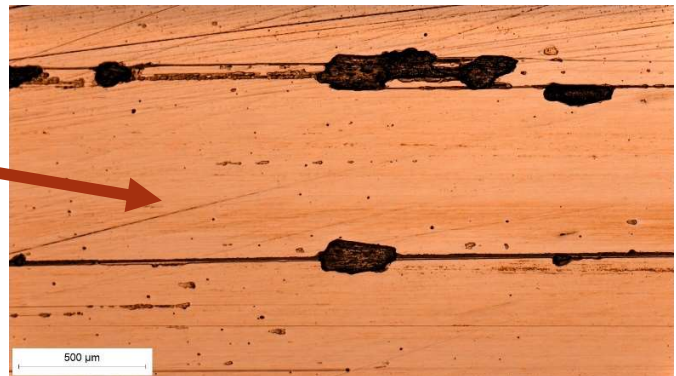


Vidljivo probijanje  
površinskog TiCN  
sloja, ali TiN potporni  
sloj i dalje postojan

**Slika 10.15.** *Alatni čelik K390 MC oznake C2 (TiN/TiCN prevlaka) na povećanju 200 puta*



većina prevlake očuvana, malo vidljivi tragovi abrazivnog trošenja

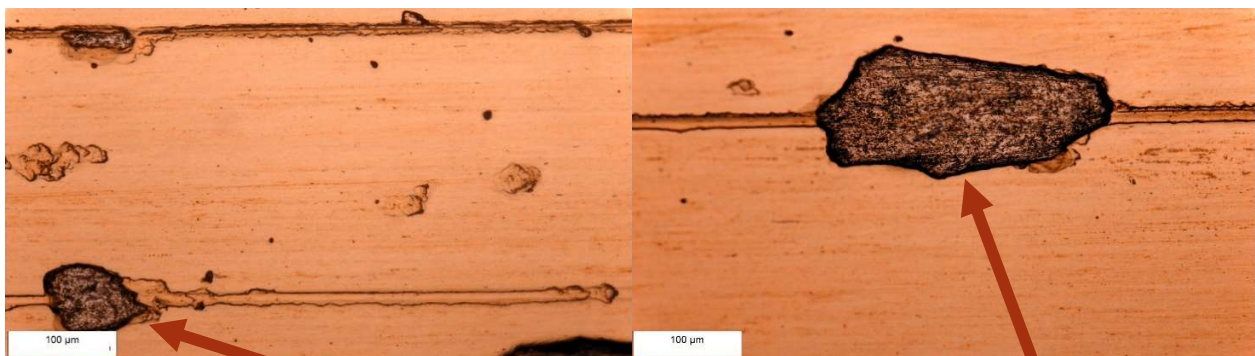


**Slika 10.16.** *Alatni čelik K390 MC oznake C3 (TiN/TiBN prevlaka) na povećanju 50 puta*

prevlaka nije probijena do kraja, vidi se brazda prolaska abrazivne čestice



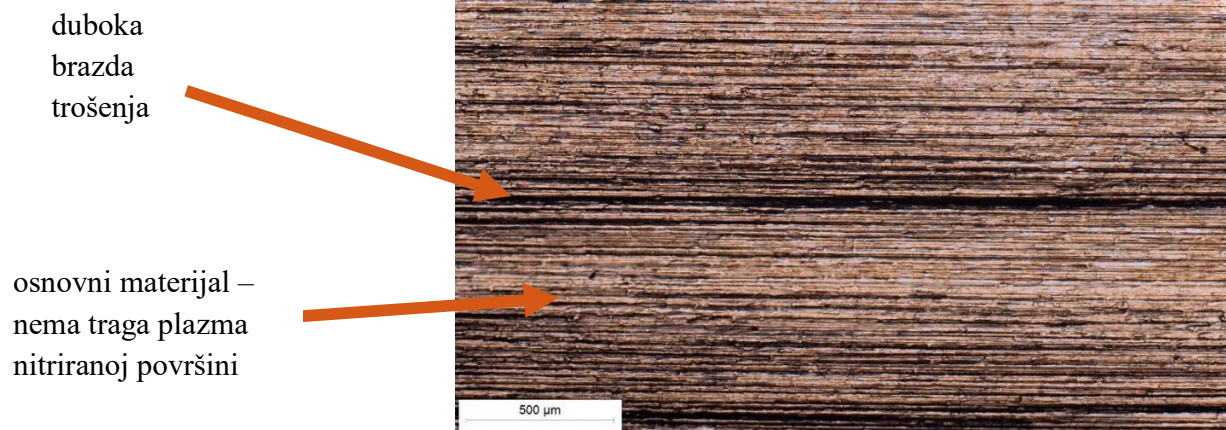
**Slika 10.17.** *Alatni čelik K390 MC oznake C3 (TiN/TiBN prevlaka) na povećanju 100 puta*



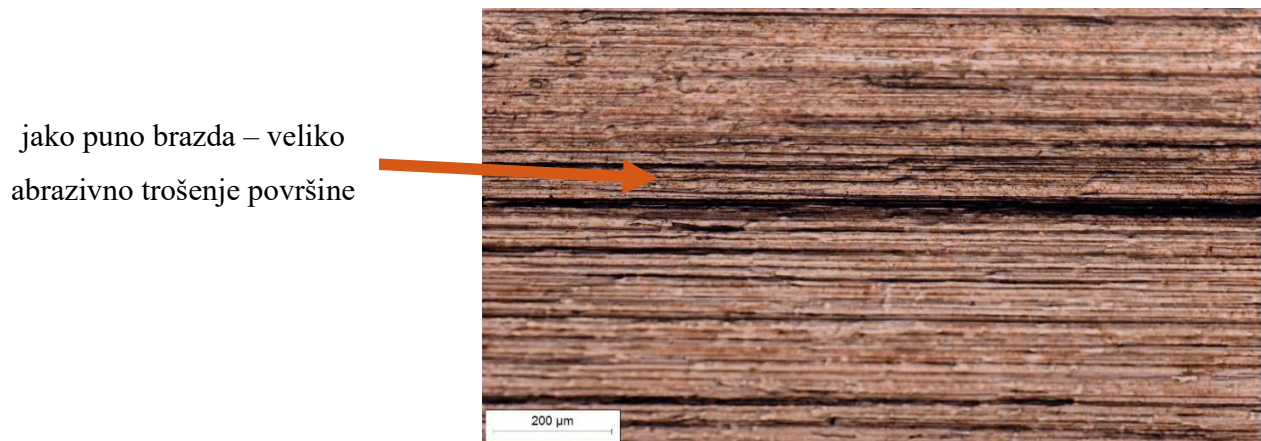
pukotine i krateri ne napreduju po cijeloj površini prevlaci

Krater uzrokovan prolaskom abrazivne čestice

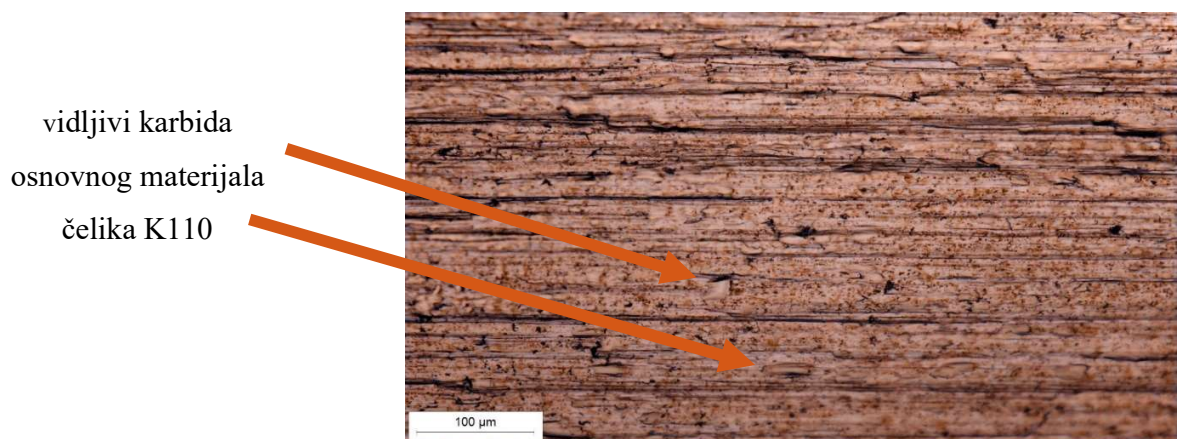
**Slika 10.18.** *Alatni čelik K390 MC oznake C3 (TiN/TiBN prevlaka) na povećanju 200 puta*



**Slika 10.19.** *Alatni čelik K110 oznake D1 (plazma nitriranje) na povećanju 50 puta*



**Slika 10.20.** *Alatni čelik K110 oznake D1 (plazma nitriranje) na povećanju 100 puta*



**Slika 10.21.** *Alatni čelik K110 oznake D1 (plazma nitriranje) na povećanju 200 puta*

prevlaka je  
probijena i srednje  
izbrazdana



**Slika 10.22.** *Alatni čelik K110 oznake D2 (TiN/TiCN prevlaka) na povećanju 50 puta*

Lom prevlake prolaskom  
abrazivne čestice, ali ne  
napreduje po cijeloj  
površini



**Slika 10.23.** *Alatni čelik K110 oznake D2 (TiN/TiCN prevlaka) na povećanju 100 puta*

jasno vidljivi karbidi  
plave boje osnovnog  
materijala čelika K110



**Slika 10.24.** *Alatni čelik K110 oznake D2 (TiN/TiCN prevlaka) na povećanju 200 puta*



**Slika 10.25.** *Alatni čelik K110 oznake D3 (TiN/TiBN prevlaka) na povećanju 50 puta*

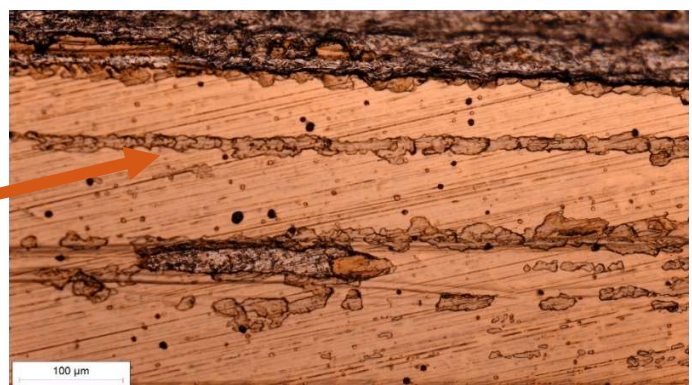
potporni TiN  
sloj prevlake

mikropukotina  
ne napreduje po  
površini



**Slika 10.26.** *Alatni čelik K110 oznake D3 (TiN/TiBN prevlaka) na povećanju 100 puta*

mikropukotine i počeci  
probijanja TiBN sloja  
višeslojne prevlake



**Slika 10.27.** *Alatni čelik K110 oznake D3 (TiN/TiBN prevlaka) na povećanju 200 puta*

Uspoređujući površine plazma nitrirane površine oba čelika uopće nije vidljiv nitrirani sloj koji je prekrivao površinu. Površina je potrošena do osnovnog materijala. Na slikama 10.10. do 10.12. i 10.19. do 10.27. jasno su prikazane površine koje su izbrazdane i tragovi abrazivnog trošenja su veliki. S većim povećanjima vidimo da su brazde jako duboke. Unatoč što se na oba čelika jasno vidi mikrobrazdanje površine, alatni čelik K390 MC ima nešto manje duboke brazde za razliku od alatnog čelika K110. Na obje površine osnovnog materijala vidljivi su karbidi. Karbidi na čeliku K390 MC su fino disperzirani i malo vidljivi tek na najvećem povećanju. Karbidi čelika K110 su znatno veći za razliku od čelika K390 MC. Abrazivne čestice su „čisto“ odrezale karbide i napravile jasne presjeke.

Usporedbom duplex TiN/TiCN prevlake na alatnim čelicima vidljivi su tragovi abrazivnog trošenja. Prevlaka je postojanija na K390 MC čeliku i manje je abrazivnog djelovanja naspram K110 alatnog čelika. Većina prevlake TiN/TiCN na K390 MC alatnom čeliku je očuvana. Na nekim dijelovima vidljivim pod većim povećanjem prikazano je trošenje gornjeg TiCN sloja dok potporni sloj TiN zlatne boje nije probijen. Prolaskom abrazivne čestice nastale mikropukotine ne šire se iz brazde u brazdu nego se po svom nastanku odmah zaustavljaju. Abrazivne čestice tijekom probijanja prevlake ne uzrokuju nagle mikropukotine, stoga možemo reći da unatoč visokoj tvrdoći TiN/TiCN prevlaka nije krhka. Na alatnom čeliku K110 abrazivno trošenje uzrokovalo je mnogo mikrobrazdanja sve do osnovnog materijala. Na osnovnom materijalu su vidljivi karbidi plave boje.

Višeslojna TiN/TiBN prevlaka pokazala je najveću otpornost na trošenje od svih ostalih ispitnih uzoraka. TiN/TiBN prevlaka postojanija je na K390 MC alatnom čeliku. Prolaskom abrazivne čestice preko TiN/TiBN prevlake na K390 MC alatnom čeliku skoro pa ne dolazi do probijanja površine. Vidljiv je mali trag brazdanja prevlake. Obzirom da se radi o višeslojnoj prevlaci potroši se nekoliko slojeva, no prevlaka je i dalje postojana. Tamo gdje abrazivna čestica probije prevlaku nastaje krater uzorkovan krhkim lomom koji se ne širi. Višeslojna TiN/TiBN prevlaka na alatnom K110 čeliku pokazala je manju otpornost na trošenje. Mikrobrazdanje je jasno vidljivo i prodiranje abrazivnih čestica do osnovnog materijala. Mikropukotine se ne šire po površini prevlake unatoč tome što je prisutan nagli i krhki lom prevlake. Krhki lomovi i mikropukotine vidljive su po cijeloj putanji abrazivne čestice preko višeslojne TiN/TiBN prevlake.

Abrazivne čestice na nekim mjestima nisu do kraja probile prevlaku jer se vidi potporni TiN sloj zlatne boje.

Kompariranjem prevlaka samo K390 MC alatnog čelika, najveću otpornost na trošenje ima višeslojna TiN/TiBN prevlaka. Duplex TiN/TiCN prevlaka je također otporna na abrazijsko trošenje, ali ima više mikrobrazdanja od TiN/TiBN prevlake. Najmanju otpornost pokazale je plazmom nitrirana površina. Prevlake na K110 alatnom čeliku pokazale su također dobru otpornost na abrazijsko trošenje naspram plazmom nitrirane površine. Višeslojna TiN/TiBN prevlaka, također, na K110 alatnom čeliku pokazuje najbolju otpornost na trošenje.

## 10.4. DISKUSIJA

Cjelokupna provedba ispitivanja iz poglavlja 10.1 do 10.3 rezultirala je informacijama o otpornosti na abrazijsko trošenje i adhezivnosti prevlaka od TiN/TiCN i TiN/TiBN nanesenih na dva različita visokolegirana alatna čelika za hladni rad tvrtke Böhler.

Rezultati ispitivanja otpornosti na abraziju pokazali su visoku otpornost svih prevlaka na ovaj tip trošenja. Plazmom nitrirana površina oba čelika je brzo istrošena i isključivo je potrošnja osnovnog materijala. Na alatnom čeliku K110 rezultati gubitka mase prevlake su veći od gubitaka mase na alatnom čeliku K390 MC. Provedba ispitivanja na abrazijsko trošenje trajala je 180 sekundi.

Na alatnom čeliku K110 prevlaka od TiN/TiCN bila je postojana na prvom mjerenju mase nakon 60 sekundi trošenja. Između 60 sekundi i 120 sekundi prevlaka se istrošila i probijena je sve do osnovnog materijala. Nakon probijanja prevlake počelo je trošenje osnovnog materijala što je uzorkovalo veliki porast gubitka mase. Na slikama sa skenirajućeg elektronskog mikroskopa vidljivo je da je prevlaka od TiN/TiCN-a na alatnom čeliku K110 je izbrazdana i uništena. Na povećanju od 200 puta vidljivi su tragovi trošenja karbida u osnovnom materijalu. Alatni čelik K110 napravljen konvencionalnom tehnologijom izrade čelika također pokazuje manju otpornost na trošenje od alatnog čelika K390 MC koji je napravljen metalurgijom praha. Sama izrada čelika također pridonosi da nakon probijanja prevlake alatni čelik K110 ima veće gubitke mase od alatnog čelika K390 MC. Usporedbom nitriranih površina oba alatna čelika koja su brzo izgubila nitriranu površinu, vidimo manje gubitke mase alatnog čelika K390 MC. Višeslojna TiN/TiBN

prevlaka je na alatnom čeliku K110 pokazala najveću otpornost na trošenje. Prevlaka je izdržala s jako malim gubicama mase 60 sekundi. Između drugog intervala u trajanju od 60 do 120 sekundi abrazivno trošenje se povećalo što je proporcionalno većem gubitku mase prevlake. Prevlaka je i dalje postojana. U zadnjem intervalu u trajanju od 120 do 180 sekundi gubitak mase je značajan što nam govori da je prevlaka probijena i da se troši osnovni materijal alatni čelik K110.

Na alatnom čeliku K390 MC prevlake TiN/TiCN i TiN/TiBN gubici mase uzorkovani abrazivnim trošenjem su iznimno mali. Najveći gubitak mase pokazala je plazmom nitrirana površina alatnog čelika K390 MC. Prevlaka TiN/TiCN na alatnom čeliku K390 MC ima linearni porast gubitka mase. Na površini nakon ispitivanja od 180 sekundi na nekim mjestima vidljiva su mikrobrazdanja prevlake tamo gdje je čestica uspjela probiti prevlaku. Prolaskom abrazivne čestice preko prevlake prvo se skidao tvrdi TiCN sloj dok je potporni TiN sloj ostao nedirnut. Nakon daljnjeg djelovanja abrazivne čestice probile su TiN potporni sloj te došle do osnovnog materijala, ali ne po cijeloj površini nego samo na određenim mjestima. Na fotografijama skenirajućeg elektronskog mikroskopa najvećeg povećanja brazde gdje je prošla abrazivna čestica imaju ostatke TiN sloja zlatne boje tokom cijele brazde. Mikropukotine ne napreduju kroz površinu prevlake nego po samom nastanku ostaju na mjestu nastajanja. Mikropukotine ne nastaju naglo i stoga ne nastaju krhki lomovi prevlake unatoč visokoj tvrdoći površinskog TiCN sloja. Višeslojna TiN/TiBN prevlaka na alatnom čeliku K390 MC pokazala je najbolju otpornost na trošenje od svih ispitanih uzoraka. Abrazivno trošenje nije vidljivo golim okom i gubitak mase je najmanji. Većim povećanjem na elektronskom mikroskopu vidljivo je da abrazivne čestice rijetko probijaju prevlaku. Tamo gdje abrazivna čestica probije prevlaku nastaje krater. Krater nastaje jer je TiN/TiBN prevlaka visoke tvrdoće i krhko puca. Unatoč krhkom lomu mikropukotine ne napreduju kroz cijelu površinu nego se brzo zaustavlja njihov rast i širenje. Na slikama manjeg povećanja vidljivi su početni znakovi nastajanja mikrobrazdanja nastalih abrazivnim trošenjem. Zbog same konstrukcije višeslojne TiN/TiBN prevlake prolaskom abrazivnih čestica potroši se nekoliko slojeva prevlake, ali ne dolazi do osnovnog materijala. Ispitivanja bi bilo potrebno produljiti kako bi se TiN/TiBN prevlaka u potpunosti abrazivno potrošila.

Ispitivanjem adhezivnost prevlake prema VDI 3198 metodi ispitane su prevlake TiN/TiCN i TiN/TiBN-a na visokolegiranim alatnim čelicima za hladni rad tvrtke Böhler. Prema metodi VDI 3198 uspoređuju se utisci stožastog dijamantnog indentora na površini čelika s modelima izgleda

utiska prema normi VDI 3198. Skala prema normi ide od HF1 do HF6 oznake. Zadovoljavajućom adhezivnosti prevlake smatraju se prevlake s oznakom HF1 do HF4 dok se oznake HF5 i HF6 smatraju nezadovoljavajuće. Prevlaka koja ima oznaku sa što manjim brojem pokazuje najbolju adhezivnost podloge. Većim brojem oznake prevlaka pokazuje neželjene posljedice smičnog naprezanja koje uzorkuje dijamantni indentor, a to su sve veće mikropukotine, raslojavanja i delaminacije koje okružuju mjesto utiska indentora. Svi ispitni uzorci s prevlakama pokazali su zadovoljavajuće rezultate i variraju od oznaka HF2 do HF4. Prevlake na alatnom čeliku K110 pokazale su bolju prionjivost prevlake od istih na alatnom čeliku K390 MC. Višeslojna TiN/TiBN na oba alatna čelika pokazala je bolja adhezivna svojstva od duplex TiN/TiCN prevlake.

Na alatnom čeliku K390 MC TiN/TiCN ima oznaku HF4. Oko mjesta utiska vidljive su mikropukotine koje čine dvije koncentrične kružnice oko mjesta utiska. Prevlaka je prihvatljiva jer se mikropukotine ne šire daleko od mjesta utiska i ravnomjerno su raspoređene. Na istom alatnom čeliku višeslojna TiN/TiBN prevlaka pokazala je bolja prijanjajuća svojstva i dodijeljena joj je oznaka HF3. Vidljiva su mjesta delaminacija, ali ih nema puno. Mikropukotine koje su nastale na ovoj prevlaci pucaju krhko, ali se brzo zaustavlja njihovo širenje.

Na alatnom čeliku K110 duplex TiN/TiCN prevlaka ima oznaku HF3 usporedbeno s modelom pucanja prevlaka prema normi VDI 3198. Oko mjesta utiska vidljive su koncentrične pukotine oko mjesta utiska indentora. Delaminacije su također vidljive, a na fotografijama s elektronskog mikroskopa primjetan je potporni zlatni TiN sloj. Mikropukotine su ravnomjerno raspoređene i nisu se širile daleko od samog mjesta utiska indentora što pokazuje zadovoljavajuću adhezivnost prevlake. Višeslojna TiN/TiBN prevlaka je na alatnom čeliku K110 pokazala najbolju prionjivost prevlake. Komparativna oznaka višeslojne TiN/TiBN prevlake je HF2. Oko samoga utiska vidljiva je mikropukotina u neposrednoj blizini oblika koncentrične kružnice oko samoga mjesta utiska. Raslojavanje je iznimno malo i vidljivo tek na nekim samotnim mjestima. Višeslojna TiN/TiBN prevlaka zbog visokog broja slojeva naspram TiN/TiCN prevlake ima bolja adhezivna svojstva. Više slojeva preuzima velika posmična naprezanja utiska indentora i raspoređuje ih na puno veću površinu komparativno sa samo dva sloja TiN/TiCN prevlake.



## 11. ZAKLJUČAK

---

U radu je opisan PACVD postupak prevlačenja visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad K390 MC i K110 normirane oznake X155CrVMo12-1. Alatni čelici prevučeni su duplex TiN/TiCN i višeslojnom TiN/TiBN prevlakom. Provedeno je ispitivanja na abrazijsko trošenje metodom „suhi pijeska/gumeni kotač“ po normi ASTM G 65 i ispitivanje adhezivnosti prevlake prema metodi VDI 3198.

Iz ispitivanja zaključuje se:

- kompariranjem površina čelika prevučenim nitriranjem u plazmi pokazano je da alatni čelik K390 MC proizveden metalurgijom praha ima 7,7 puta manje gubitaka mase naspram alatnog čelika K110 izrađenog konvencionalnim načinom izrade čelika,
- najveću otpornost na abrazijsko trošenje imaju prevlake navučene na alatni čelik K390 MC naspram istih prevlaka prevučenih na alatni čelik K110,
- višeslojna TiN/TiBN prevlaka na oba alatna čelika pokazuje bolju otpornost na trošenje od duplex TiN/TiCN prevlake na istom čeliku,
- višeslojna TiN/TiBN prevlaka ima 4,5 puta manji gubitak mase prevlake na alatnom čeliku K390 MC nego na alatnom čeliku K110 iz čega zaključujemo da je TiN/TiBN prevlaka na alatnom čeliku K390 MC pokazuje 4,5 puta veću otpornost na abrazijsko trošenje,
- višeslojna prevlaka TiN/TiBN pokazala je i bolja adhezivna svojstva od duplex prevlake TiN/TiCN-a na istom čeliku dok najbolja svojstva prionjivosti u ovom radu, pokazala je višeslojna TiN/TiBN prevlaka na alatnom čeliku K390 MC.

Prema navedenim zaključcima ispitivanja iz ovog rada može se zaključiti da će prevlake TiN/TiCN i TiN/TiBN prevučene PACVD postupkom značajno povećati otpornost na abrazijsko trošenje, a time i produljiti vijek trajanja alata.

## LITERATURA

---

- [1] ASTM. (2016.). ASTM G65 - 16e1. *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*. West Conshohocken, PA: The American Society for Testing and Materials.
- [2] BÖHLER. (2021.). *BÖHLER K110, Cold work tool steel*. Dohvaćeno iz <https://www.bohler.hr/hr/products/k110/>
- [3] BÖHLER. (2021.). *BÖHLER K390PM*. Dohvaćeno iz BÖHLER K390PM: <https://www.bohler.hr/hr/products/k390pm/>
- [4] Bull, S., Bhat, D., & Staia, M. (2003). Properties and performance of commercial TiCN coatings. . *Surface and Coatings Technology*, str. 499-514.
- [5] Cajner, F., Landek, D., Rafael, H., Jačan, J., & Bogdani, D. (20.-22.. svibanj 2015.). Wear resistance of TiN/TiCN and TiN/Ti-B-N multilayer coatings fabricated by the pulsed DC PACVD process on K390 MC cold work tool steel. *Proceeding of the EU Conference on Heat Treatment and 22nd IFHTSE Congress*. Venice, Italija.
- [6] DropWise. (2021.). *Thermally Initiated Chemical Vapor Deposition*. Dohvaćeno iz DropWise Technologies Corp.: <https://drop-wise.com/technology/>
- [7] Eskildsen, S. S., Mathiasen, C., & Foss, M. (1999.). Plasma CVD: process capabilities and economic aspects. *Surface and Coating Technology*, str. 18-24.
- [8] Flores-Rentería, M., Ortiz-Domínguez, M., Keddám, M., & Damián-Mejía, O. (2015.). *High Temperature Materials and Processes*. Dohvaćeno iz A Simple Kinetic Model for the Growth of Fe<sub>2</sub>B Layers on AISI 1026 Steel during the Powder-pack Boriding: [https://www.researchgate.net/publication/277577032\\_A\\_Simple\\_Kinetic\\_Model\\_for\\_the\\_Growth\\_of\\_Fe2B\\_Layers\\_on\\_AISI\\_1026\\_Steel\\_during\\_the\\_Powder-pack\\_Boriding](https://www.researchgate.net/publication/277577032_A_Simple_Kinetic_Model_for_the_Growth_of_Fe2B_Layers_on_AISI_1026_Steel_during_the_Powder-pack_Boriding)
- [9] GmbH, E. P. (2021.). *TiCN - The Coating for Tougher Cases*. Dohvaćeno iz [https://www.eifeler-austria.com/en/pvd\\_coating/hard\\_coating\\_ticn/](https://www.eifeler-austria.com/en/pvd_coating/hard_coating_ticn/)

- [10] GmbH, E. P. (2021.). *TiN - The All-Round Coating*. Dohvaćeno iz [https://www.eifeler-austria.com/en/pvd\\_coating/hard\\_coating\\_tin/](https://www.eifeler-austria.com/en/pvd_coating/hard_coating_tin/)
- [11] Grilec, K., Jakovljević, S., Ivušić, V., & Landek, D. (2015.). *Tribologija. Autorizirana predavanja iz kolegija "Tribologija i inženjerstvo površina"*. FSB, Katedra za materijale.
- [12] Hardt, P., Eckel, M., Schmidt, M., & Wulff, H. (1999). Influence of process parameters on the growth of TiN in different sized plasma-assisted chemical vapor deposition reactors. *Surface and Coatings Technology*, str. 238-243.
- [13] Landek, D. (2020). *Alatni materijali. Autorizirana predavanja iz kolegija "Posebni metalni materijali"*. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za materijale, Katedra za toplinsku obradbu i inženjerstvo površina.
- [14] Manupedia. (2018.). *OpenLearn - Free Learning from The Open University*. Dohvaćeno iz Physical vapour deposition (PVD): <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/physical-vapour-deposition-pvd>
- [15] Matijević, B., Landek, D., Grilec, K., & Jakovljević, S. (2018.). *Tribologija i inženjerstvo površina. Autorizirana predavanja iz kolegija "Tribologija i inženjerstvo površina"*. Zagreb: FSB.
- [16] Matijević, B. (2018). *Modificiranja i prevlačenje površinskih slojeva, autorizirana predavanja. Autorizirana predavanja iz kolegija "Tribologija i inženjerstvo površina"*. Zagreb: FSB.
- [17] MXBAOHENG. (2021.). *Diamond Rockwell Indenter HRC-3 for Hardness Tester Diamond Indenter 120 Degree for Rockwell Hardness Tester*. Dohvaćeno iz <https://www.amazon.com/Diamond-Rockwell-Indenter-Hardness-Tester/dp/B06XKWWPLH>
- [18] Ren, Z., Qu, S., Zhang, Y., Li, X., & Yang, C. (2018.). *Machining Performance of TiAlN-Coated Cemented Carbide Tools with Chip Groove in Machining Titanium Alloy Ti-6Al-0.6Cr-0.4Fe-0.4Si-0.01B. Metals 8 no.10. Metals*.
- [19] Stoiber, M., Badisch, E., Lugmair, C., & Mitterer, C. (2003). Low-friction TiN coatings deposited by PACVD. *Surface and Coatings Technology*, str. 451-456.

- [20] Stoiber, M., Perlot, S., Mitterer, C., Beschliesser, M., Lugmair, C., & Kullmer, R. (2004). PACVD TiNyTi–B–N multilayers: from micro- to nano-scale. *Surface and Coatings Technology*, str. 348–354.
- [21] Su, Y., & Kao, W. (1998). Optimum multilayer TiN–TiCN coatings for wear resistance and actual. *Wear*, str. 119–130.
- [22] Thierry. (2006.). *Manufacturer's Surface Activation Guide for Improved Adhesion*. Stuttgart: Thierry Plasma.
- [23] Vidakis, N., Antoniadis, A., & Bilalis, N. (2003.). The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds. *Journal of Materials Processing Technology*, str. 481–485.
- [24] Wheeler, D. (2006). Chemical vapour deposition methods for protection against wear. U *Surface coatings for protection against wear* (str. 101-145).

## PRILOZI

**Prilog 1.** Masa i gubitak mase alatnog čelika K110

Oznaka čelika					<i>Böhler K110</i>
Oznaka uzorka	Masa i gubitak mase uzoraka	Vrijeme trajanja trošenja (s)			
		0 s	60 s	120 s	180 s
<b>D1</b>	$m$ (g)	75,0699	75,0626	75,0570	75,0490
	$\Delta m$ (g)	0	0,0073	0,0056	0,0080
	$m_{uku}$ (g)	0	0,0073	0,0129	0,0209
<b>D2</b>	$m$ (g)	74,4988	74,4983	74,4912	74,4810
	$\Delta m$ (g)	0	0,0005	0,0071	0,0102
	$m_{uku}$ (g)	0	0,0005	0,0076	0,0178
<b>D3</b>	$m$ (g)	74,5331	74,5328	74,5309	74,5275
	$\Delta m$ (g)	0	0,0003	0,0019	0,0034
	$m_{uku}$ (g)	0	0,0003	0,0022	0,0056

**Prilog 2. Masa i gubitak mase alatnog čelika K390 MC**

Oznaka čelika		<b>Böhler K390MC</b>			
Oznaka uzorka	Masa i gubitak mase uzorka	Vrijeme trajanja trošenja (s)			
		0 s	60 s	120 s	180 s
<b>C1</b>	$m$ (g)	72,6106	72,6099	72,6088	72,6079
	$\Delta m$ (g)	0	0,0007	0,0011	0,0009
	$m_{uku}$ (g)	0	0,0007	0,0018	0,0027
<b>C2</b>	$m$ (g)	71,0499	71,0495	71,0490	71,0484
	$\Delta m$ (g)	0	0,0004	0,0005	0,0006
	$m_{uku}$ (g)	0	0,0004	0,0009	0,0015
<b>C3</b>	$m$ (g)	71,1540	71,1535	71,1531	71,1528
	$\Delta m$ (g)	0	0,0005	0,0004	0,0003
	$m_{uku}$ (g)	0	0,0005	0,0009	0,0012