

Ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje PACVD prevlaka na visokolegiranim alatnim čelicima za hladan rad

Ormuž, Jan Karl

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:235:945758>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-02**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Jan Karl Ormuž

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Jan Karl Ormuž

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se svom mentoru, prof.dr.sc. Darku Landeku na stručnoj pomoći tijekom izrade završnoga rada i ukazanom povjerenju.

Također se zahvaljujem asistentu mag.ing. Draženu Mezdiću i tehničaru Ivanu Vovku na strpljenju i pomoći prilikom provedbe eksperimentalnog dijela rada.

Hvala mojoj obitelji na podršci i odricanju kako bi mi školovanje bilo što bezbrižnije.

Jan Karl Ormuž



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske 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: **Jan Karl Ormuž** Mat. br.: 0035206329

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

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

Opis zadatka:

Postupkom PACVD proizvode se površinski slojevi specifičnih svojstava na konstrukcijskim dijelovima i alatima. U radu treba opisati provedbu postupka PACVD i tribološka svojstva tankih tvrdih prevlaka nanesenih na visokolegirane alatne čelike za hladni rad.

U eksperimentalnom dijelu rada treba planirati i provesti ispitivanje debljine PACVD prevlaka TiN/TiCN i TiN/TiBN kalotestom i njihove otpornosti na erozijsko trošenje na dva visokolegirana alatna čelika za hladni rad. Mjerenjem gubitka mase i analizom istrošenih površina svjetlosnom mikroskopijom, usporediti otpornost na erozijsko trošenje ispitanih prevlaka u odnosu na neprevučene površine. Na temelju rezultata ispitivanja preporučiti vrstu prevlake za povišenje otpornosti na erozijsko trošenje visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad.

Navesti u radu korištenu literaturu i stručnu pomoć

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.


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.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS TABLICA.....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. VISOKOLEGIRANI ALATNI ČELICI ZA HLADAN RAD.....	3
2.1. Podjela visokolegiranih alatnih čelika	4
2.1.1. Čelici s oko 5%Cr	4
2.1.2. Visokouglični (ledeburitni) čelici s 12 %Cr	7
3. POSTUPCI PREVLAČENJA IZ PARNE FAZE	10
3.1. CVD postupak prevlačenja	11
3.2. PVD postupak prevlačenja.....	12
3.3. PACVD postupak prevlačenja	12
3.4. Tvrde prevlake	16
3.4.1. Prevlake TiN, TiCN, TiBN	18
4. Erozijsko trošenje	21
4.1. Mehanizmi trošenja.....	21
4.2. Utjecaj veličine na erozijsko trošenje	22
5. PLAN I PROVEDBA ISPITIVANJA	24
5.1. Plan ispitivanja	24
5.2. Provedba ispitivanja.....	28
5.2.1. Ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje	28
5.2.2. Ispitivanje debljine prevlake	31
5.2.3. Ispitivanje adhezivnosti prevlake.....	33
6. REZULTATI ISPITIVANJA	37
6.1. Gubitak mase erozijskim trošenjem.....	37
6.2. Debljina prevlake	41
6.3. Adhezivnost prevlake.....	45
6.4. Analiza trošenih površina.....	47
7. ZAKLJUČAK.....	51
LITERATURA.....	52
PRILOZI.....	53

POPIS SLIKA

Slika 1.	Pseudobinarni dijagram X100 CrMoV 5-1 [3].....	5
Slika 2.	Postupci kaljenja čelika X100 CrMo V 5-1 [3].....	5
Slika 3.	Postupci žarenja čelika X100CrMoV 5-1 [3].....	6
Slika 4.	Dijagram popuštanja čelika X100CrMoV 5-1 [3].....	7
Slika 5.	Pseudobinarni dijagram X210Cr12 [3]	8
Slika 6.	Toplinska obrada X210Cr12 [3].....	8
Slika 7.	Postupci prevlačenja[6]	10
Slika 8.	Shematski prikaz PACVD uređaja [10]	13
Slika 9.	PACVD uređaj tvrtke RUBIG instaliran na Fakultetu strojarstva i brodogradnje	14
Slika 10.	Procesi na površini za vrijeme PACVD prevlačenja.....	15
Slika 11.	Višeslojne prevlake	18
Slika 12.	Shematski prikaz gradijentne TiCN prevlake	19
Slika 13.	Shematski prikaz višeslojne gradijentne TiBN prevlake	20
Slika 14.	Shema tribosustava erozije čestica	21
Slika 15.	Jedinični sudar krute čestice s trošenom površinom	21
Slika 16.	Utjecaj kuta udara na erozijsko trošenje krutim česticama	22
Slika 17.	Oblik i dimenzije ispitnih uzoraka za ispitivanje otpornosti na eroziju [x]	24
Slika 18.	Označeni uzorci prije ispitivanja	25
Slika 19.	Toplinska obrada ispitnih uzorka izradenih od K110 i K390 čelika [x]	26
Slika 20.	Ultrazvučna kupka: a) prednji pogled, b) pogled odozgo (sa uzorkom)	28
Slika 21.	Etilni alkohol u ambalaži.....	29
Slika 22.	Vaga „Mettler“ Zurich.....	29
Slika 23.	Uređaj za ispitivanje otpornosti na eroziju; a) izgled uređaja, b) uzorak u držaču	30
Slika 24.	Shematski prikaz uređaja za ispitivanje otpornosti na eroziju	30
Slika 25.	Shematski prikaz kalotesta	32
Slika 26.	Uređaj TRIBOtechnic Calotester s prikazom kuglice.....	32
Slika 27.	Shematski prikaz mjerenja prionjivosti prevlake HRC metodom.....	34
Slika 28.	Rockwellow indentor „Insize“	35
Slika 29.	Šest razreda klasifikacije mjerenja prionjivosti prevlake metodom HRC	36
Slika 30.	Gubitak mase u ovisnosti o vremenu trošenja za ispitne uzorke od čelika K110 (D)	38
Slika 31.	Gubitak mase u ovisnosti o vremenu trošenja za ispitne uzorke od čelika K390 MC(C).....	38
Slika 32.	Ukupni gubitak mase za uzorke iz skupine D nakon 30 min ispitivanja	39
Slika 33.	Ukupni gubitak mase za uzorke iz skupine C nakon 30 min ispitivanja.....	40
Slika 34.	Trag trošenja na čeliku K110 snimljen na svjetlosnom mikroskopu nakon ispitivanja debljine prevlake metodom utiskivanja kuglice na uzorku D2 s TiN/TiCN prevlakom	42
Slika 35.	Trag trošenja na čeliku K110 snimljen na svjetlosnom mikroskopu nakon ispitivanja debljine prevlake metodom utiskivanja kuglice na uzorku D3 s TiN/TiBN prevlakom	42
Slika 36.	Trag trošenja na čeliku K390 MC snimljen na svjetlosnom mikroskopu nakon ispitivanja debljine prevlake metodom utiskivanja kuglice na uzorku C2 s TiN/TiCN prevlakom	43
Slika 37.	Trag trošenja na čeliku K390 MC snimljen na svjetlosnom mikroskopu nakon ispitivanja debljine prevlake metodom utiskivanja kuglice na uzorku C3 s TiN/TiBN prevlakom	43

Slika 38.	Trošene površine uzoraka D1 od čelika K110 snimljene na svjetlosnom mikroskopu.....	47
Slika 39.	Trošene površine uzoraka D2 od čelika K110 snimljene na svjetlosnom mikroskopu.....	47
Slika 40.	Trošene površine uzoraka D3 od čelika K110 snimljene na svjetlosnom mikroskopu.....	48
Slika 41.	Trošene površine uzoraka C1 od čelika K390 MC snimljene na svjetlosnom mikroskopu.....	48
Slika 42..	Trošene površine uzoraka C2 od čelika K390 MC snimljene na svjetlosnom mikroskopu.....	49
Slika 43.	Trošene površine uzoraka C3 od čelika K390 MC snimljene na svjetlosnom mikroskopu.....	49

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba postupaka prevlačenja iz parne faze[8]	16
Tablica 2. Kemijski sastav i oznake skupine visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad [11]	24
Tablica 3. Debljina prevlaka TiN/TiCN i TiN/TiBN na čeliku K110.....	44
Tablica 4. Debljina prevlaka TiN/TiCN i TiN/TiBN na čeliku K390.....	44
Tablica 5. Tragovi otisaka HRC ispitivanja na površini uzoraka D2 s TiN/TiCN prevlakom i D3 s TiN/TiBN prevlakom od K110 alatnog čelik	45
Tablica 6. Tragovi otisaka HRC ispitivanja na površini uzoraka C2 s TiN/TiCN prevlakom i C3 s TiN/TiBN prevlakom od K390 alatnog čelika.....	46

SAŽETAK

U ovom radu je opisano trošenje tvrdih prevlaka na visokolegiranim alatnim čelicima za hladan rad K110 i K390 MC. Plazmatski potpomognutim kemijskim prevlačenjem iz parne faze (PACVD) proizvedene su tvrde prevlake TiN/TiCN i TiN/TiBN. Ispitivanje na erozijsko trošenje provedeno je određivanjem gubitka mase nakon 15 i 30 min trošenja u mlazu suhog pijeska pri upadnom kutu od 45°. Naknadno je određena debljina prevlaka kalotestom, te ispitana adhezivnost prevlaka Rockwellovom metodom utiskivanja indentora. Trošene površine su analizirane svjetlosnom mikroskopijom. Ispitivanja su pokazala bolju erozijsku otpornost kod prevučениh uzoraka u odnosu na nitrirane uzorke s utjecajem adhezivnosti i debljine prevlake na rezultate ispitivanja.

Ključne riječi: PACVD, erozijsko trošenje, adhezija, TiN/TiCN, TiN/TiBN

SUMMARY

In this paper, erosive wear of hard coatings, deposited on the high-alloyed tool steels for cold work K110 and K390 MC is described. Plasma-assisted chemical vapour deposition (PACVD) was used to produce hard coatings of TiN/TiCN and TiN/TiBN. Erosion resistance tests were carried out by determining the mass loss after 15 and 30 min of wear in the dry sand stream for an angle of incidence 45°. The thickness of coatings is determined by ball indentation test, and the adhesion of the coatings is tested by Rockwell indentation test. Worn surfaces were analysed by light microscope. Tests showed higher erosion resistance of the coated samples in relation to nitride samples, with influence of adhesion and coating thickness on the test results.

Key words: PACVD, erosion wear, adhesion, TiN/TiCN, TiN/TiBN

1. UVOD

Postupci prevlačenja u parnoj fazi u posljednjih 30 godinama veoma dobili na važnosti i intenzivnom razvoju i primjeni, zbog brzog razvoja tehnologije i potrebe za produljenjem vijeka trajanja i otpornosti alatnih materijala nanošeljem triboloških Tvrde tribološke prevlake, nanese na alatne materijale, omogućavaju veće brzine rezanja prilikom postupka obrade odvajanjem čestica, čime se smanjuje trošak i održavanje samih alata te se zbog toga treba voditi računa kako bi i sam postupak prevlačenja bio što kvalitetniji. Postupci kemijskog prevlačenja iz parne faze (engl. Chemical Vapour Deposition, CVD postupak) primjenjuju se pri temperaturama između 800 i 1000 °C, zbog čega su najprikladniji za primjenu na sinteriranim tvrdim metalima, međutim, zbog visoke temperature postupka i komplicirane toplinske obrade (ponovno kaljenje i popuštanje), rijetko se primjenjuju za prevlačenje alatnih čelika. Postupci fizikalnog prevlačenja iz parne faze (engl. Physical Vapour Deposition, PVD postupak) primjenjuju se na temperaturama oko 500 °C i prikladniji su za prevlačenje alatnih čelika prethodno kaljenih i popuštenih iznad 500 °C. Postupci plazmatski potpomognutog kemijskog prevlačenja iz parne faze (engl. Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition, PACVD postupak) uključuju elemente osnovnih procesa karakterističnih za CVD i PVD postupke što omogućuje sniženje temperature postupka do oko 200 °C čime osiguravamo očuvanje integriteta same površine alata koje prevlačimo i postizemo glatku površinu. Time se proširuje primjena i na alatne čelike za hladni rad (do 200 °C) koji se popuštaju na niskim temperaturama zbog male otpornosti prema popuštanju. U radu će se utvrđivati otpornost na erozijsko trošenje, debljina prevlaka kalotestom i adhezivnost prevlaka Rockwell-ovim testom.

TEORIJSKI DIO

2. VISOKOLEGIRANI ALATNI ČELICI ZA HLADAN RAD

Alatni čelici služe za izradu alata kojima se obrađuju i oblikuju metalni ili nemetalni materijali, u pravilu se primjenjuju u toplinski obrađenom stanju, primarno zakaljeni i popušteni. S obzirom na kemijski sastav mogu biti: nelegirani, niskolegirani i visokolegirani, a prema radnoj temperaturi i uvjetima primjene na čelike za hladan rad, čelike za topli rad i brzorezne čelike. Alatni čelici za hladan rad primjenjuju se u radnim okolinama do 200 °C te moraju zadovoljavati sljedeće zahtjeve[1,2]:

- otpornost na trošenje
- otpornost na udarna opterećenja – žilavost
- otpornost na koroziju
- zakaljivost i prokaljivost alatnih čelika
- postojanost dimenzija pri kaljenju
- obradivost (odvajanjem čestica)
- sposobnost poliranja površine
- nabavna cijena

Kod visokolegiranih alatnih čelika za hladan rad glavni je legirni element krom (> 5 %), a osim njega pojedini čelici sadrže i vanadij (V), molibden (Mo) i/ili volfram (W), dok je udio ugljika između 1 i 2 %C. Legiranje kromom dovodi do stvaranja karbida $(Fe,Cr)_3C$, najčešćeg tipa $C_{23}C_6$, te rijetkog Cr_7C_3 ovisno o tome koliki je udio ugljika i kroma. Povišenjem masenog udjela kroma smanjuje se eutektoidna koncentracija i povisuju temperature pretvorbe, raste potrebna temperatura austenitizacije i povećava se količina nerastvorenih karbida u austenitu, pa će nakon kaljenja biti viši udio slobodnih karbida koji povećavaju otpornost na trošenje. Nadalje, kod čelika s manjim udjelom C (pri konstantnom %Cr) doći će do većeg otapanja Cr u austenitu (martenzitu) i čelik će biti više korozijski postojan, dok kod povećanja udjela C (pri konstantom %Cr) poboljšava se zakaljivost čelika. Pri određenom masenom udjelu od oko 12 (10,5) %Cr čelik će biti „nehrđajući“ [1,3].

Molibden (Mo) kao legirni element utječe na povišenje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, te granice puzanja, povećava prokaljivost, te sprječava pojavu krhkosti kod popuštanja. Drugi karbidotvornac vanadij (V) povisuje tvrdoću i otpornost na trošenje, te usitnjava primarno austenitno zrno, dok volfram (W) tvori vrlo tvrde i toplinski postojane karbide i njegovim legiranjem omogućava se povišenje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće [4].

2.1. Podjela visokolegiranih alatnih čelika

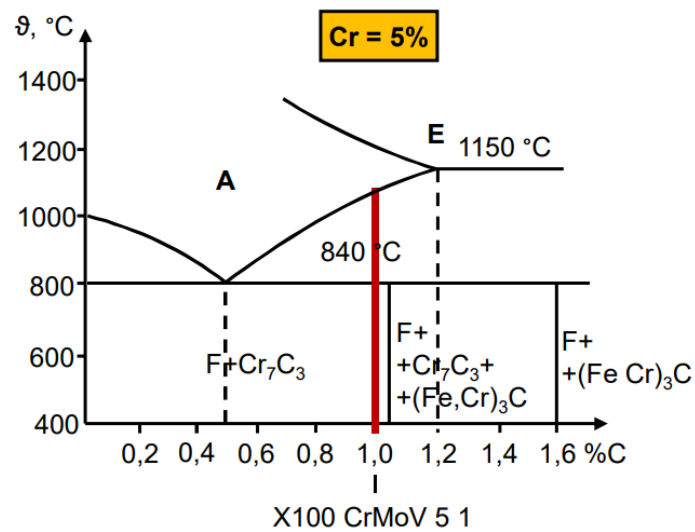
S obzirom na sastav, mikrostrukturu i istaknuta svojstva karakteristične su tri podgrupe čelika prema [1]:

- čelici s oko 5 % Cr, primjer X100CrMoV5-1
- visokouglični ledeburitni čelici s 12%Cr, primjer X210Cr12
- martenzitni nehrđajući čelici, primjer X5CrMo14

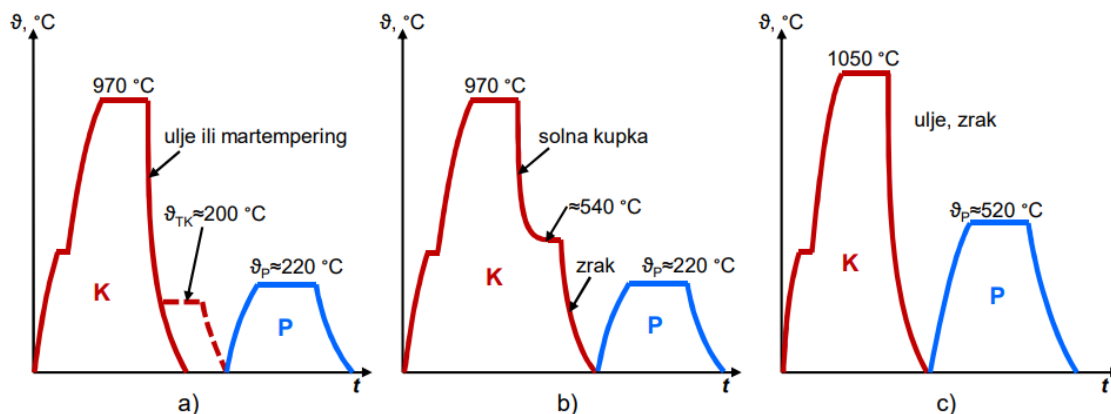
2.1.1. Čelici s oko 5%Cr

Primjer čelika s oko 5 %Cr je čelik oznake X100CrMoV 5-1, nadeutektoidan je, te je prema svojim svojstvima prijelazna vrsta od čelika 90MnCrV8. Pokazuje vrlo dobru otpornost prema trošenju (ocjena 6), dobre je žilavosti (ocjena 4), visoke prokaljivosti te izvrsne postojantosti mjera i oblika pri kaljenju[1].

Kemijski sastav je prema [1]: 1 %C, 5%Cr, 1 %Mo, 0,25 %V

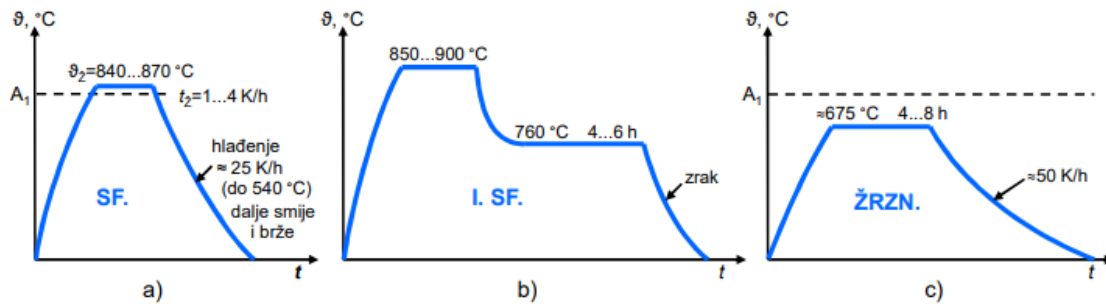


Slika 1. Pseudobinarni dijagram X100 CrMoV 5-1 [3]



Slika 2. Postupci kaljenja čelika X100 CrMo V 5-1 [3]

Temperatura austenitizacije (ϑ_a) (iz slike 2.) prema pravilu (30...70 K iznad A1) iznosi $\vartheta_a = 870...900\text{ }^\circ\text{C}$, ali zbog posebnih teško topljivih karbida $\vartheta_a \geq 920\text{ }^\circ\text{C}$ (čak $970\text{ }^\circ\text{C}$) (slika 2. (a)). Važno je naglasiti da ako je naknadno potrebno izvršiti nitriranje ili prevlačenje (PVD) treba paziti da temperatura austenitizacije nije viša od optimalne, jer pri $\vartheta_a \sim 1050\text{ }^\circ\text{C}$ doći će do većeg broja zaostalog austenita (Az) zbog veće topljivosti karbida pri višim temperaturama austenitizacije, a koji će nakon popuštanja stvoriti sekundarne martenzite (sekundarno očvršnuće). Čelik X100 CrMoV 5-1 vrlo je dobre otpornosti na trošenje (ocjena 6), dobre žilavosti (ocjena 4), visoke prokaljivosti te izvrsne postojanosti mjera i oblika pri kaljenju [1,3].



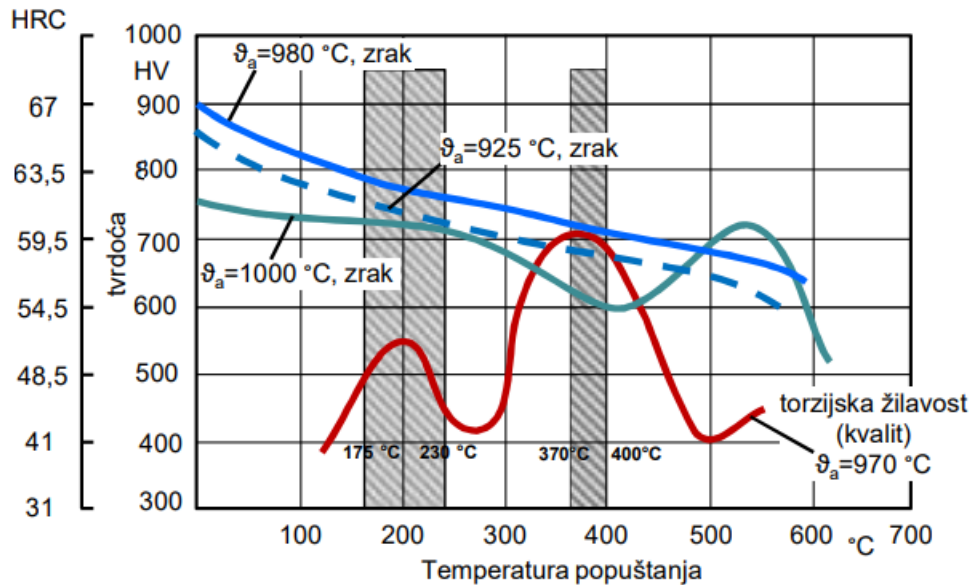
Slika 3. Postupci žarenja čelika X100CrMoV 5-1 [3]

Na slici 3. predstavljena su 3 postupka žarenja čelika X100CrMoV 5-1 : a) sferodizacijsko (meko) žarenje, b) izotermičko žarenje i c) žarenje za redukciju zaostalih napreznja.

Sferodizacijsko (meko) žarenje provodi se u svrhu pretvaranja karbida u kuglasti oblik te se time postiže najmanja tvrdoća uz maksimalnu žilavost. najbolja plastičnost te tako obraden čelik ima i najbolju rezljivost.

Izotermičkim žarenjem postizemo precizniji udjel ferita / perlita, skraćeno je vrijeme procesa, sam proces je kontinuiran (moguća je automatizacija istog).

Žarenje za redukciju zaostalih napreznja provodimo kada smo čelik prethodno podvrgnuli gruboj obradi odvajanjem čestica, deformiranju, prebrzom hlađenju i sličnim procesima gdje se javljaju napreznja koja mogu dovesti do loma, promjene oblika, sniženja plastičnosti te narušiti svojstva samog čelika. Kod ovog žarenja grijemo na dovoljno visoku temperaturu s naknadno sporim hlađenjem u cilju snižavanja zaostalih napreznja uz bez znatne promjene ostalih svojstva [5].



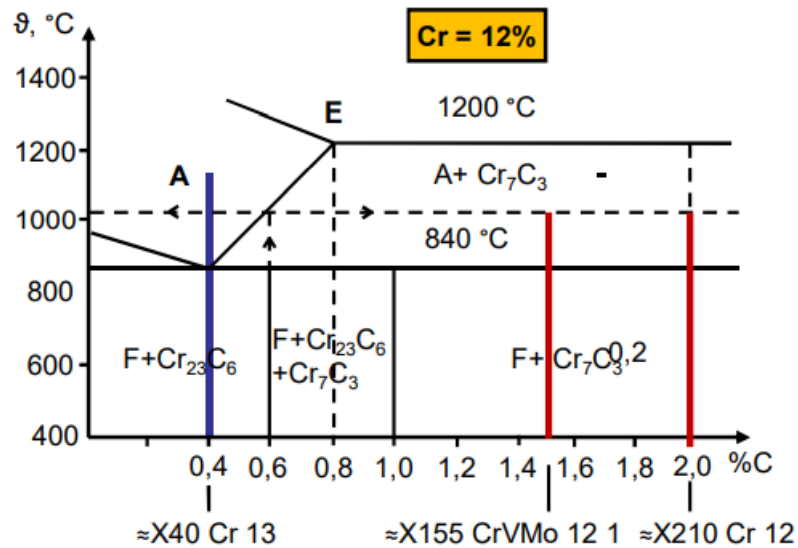
Slika 4. Dijagram popuštanja čelika X100CrMoV 5-1 [3]

Čelik X100CrMoV 5-1 nužno je odmah popustiti nakon kaljenja neovisno o temperaturi austenitizacije i mediju gašenja, a slika 4. pokazuje ovisnost tvrdoće o temperaturama popuštanja, temperaturama austenitizacije i medija.

2.1.2. Visokouglični (ledeburitni) čelici s 12 %Cr

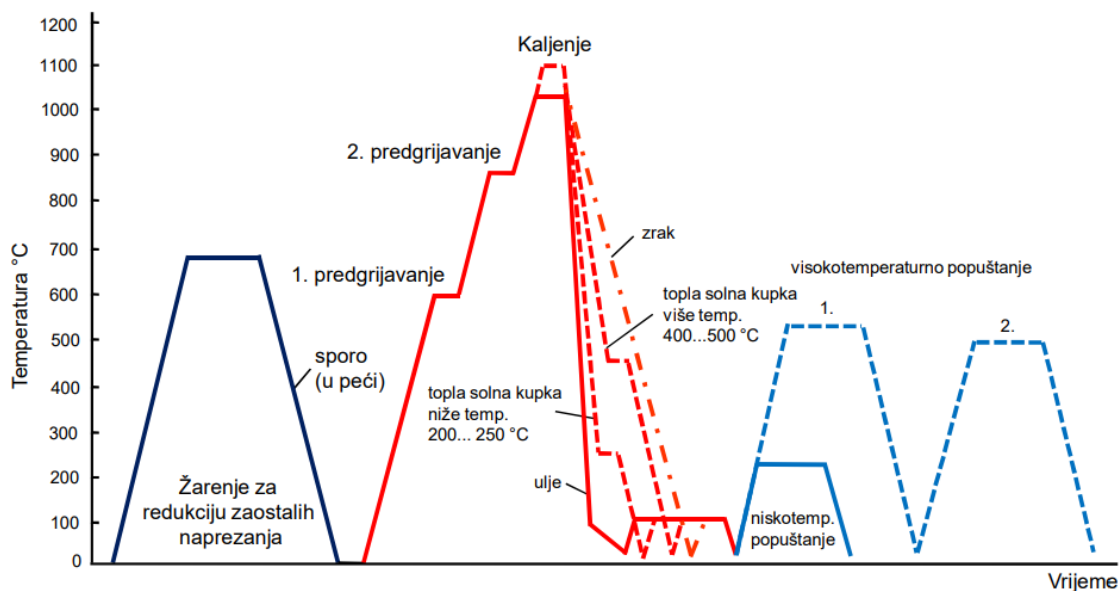
Čelici su podeutektnog („ledeburitnog“) karaktera, u zakaljenom i popuštenom stanju visok je udio (do 18 %) kvalitetnih krom karbida (Cr_7C_3) tvrdoće oko 1800 HV. Zbog toga je vrlo otporan na trošenje (ocjena 8) pri okolišnoj temperaturi, ali teško obradljiv odvanjanjem čestica i u meko žarenom stanju. Relativno male žilavosti (ocjena 1), ali vrlo dobre postojanosti mjera i oblika[1].

Kemijski sastav je prema [1]: 2 %C, 12%Cr, 0,1 %V



Slika 5. Pseudobinarni dijagram X210Cr12 [3]

Prema pseudobinarno dijagramu čelika (slika 5.) temperatura austenitizacije se bira tako da se otopi barem 0,6 %C u austenitu (θ_a oko 1000°C) i omogući postizanje maksimalne tvrdoće nakon kaljenja.



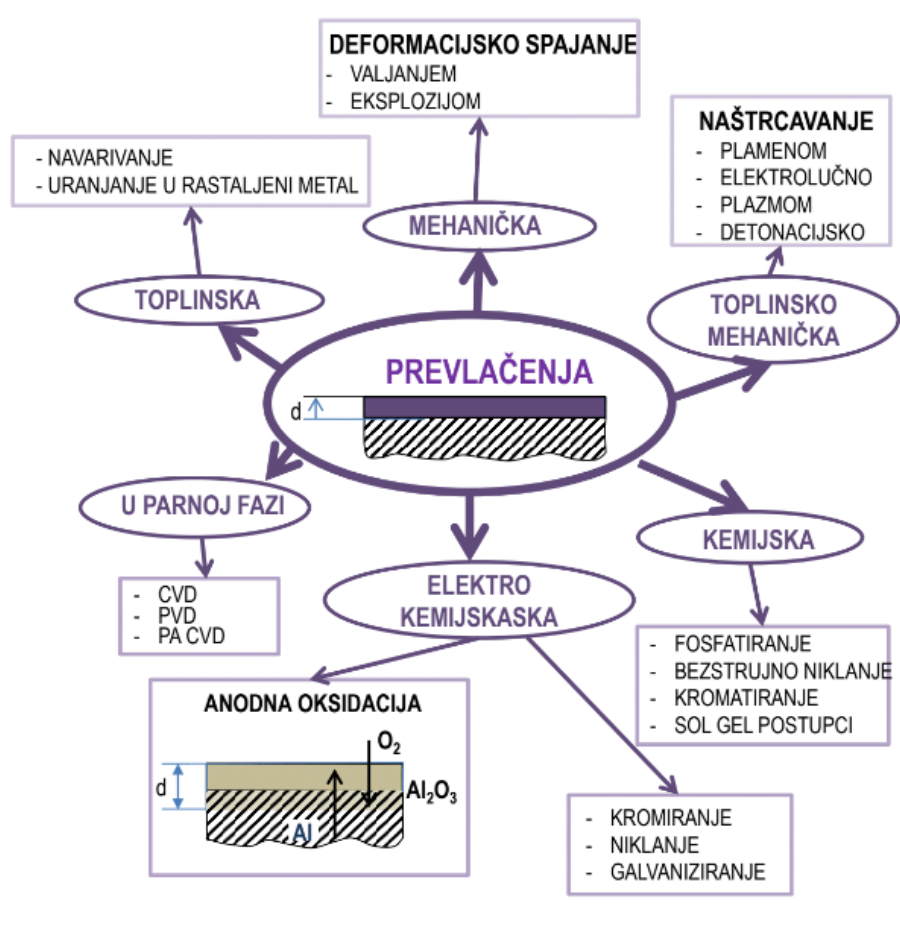
Slika 6. Toplinska obrada X210Cr12 [3]

Slika 6. predstavlja toplinsku obradu čelika X210Cr12. Čelik se prethodno kaljenu, a nakon obrade mora žariti za redukciju zaostalih naprezanja, potom čelik je potrebno predgrijati 2 puta zbog toga što se radi o visokolegiranom čeliku i kako bi se očuvala jedinstvenost mikrostrukture. Čelik se gasi te se provode po 2 popuštanja.

Mikrostruktura dobivena praškastom metalurgijom sadrži sitne karbide koji su homogeno raspoređeni po masi pri čemu dobivamo potpunu izotropnost svojstava, višu otpornost na trošenje te bolja svojstva žilavosti u odnosu na čelik dobiven konvencionalnim postupkom čija se mikrostruktura sastoji od punokrupnijih karbida s neravnomjernim rasporedom uključaka te makro i mikro segregacijama.

3. POSTUPCI PREVLAČENJA IZ PARNE FAZE

Sve veći broj dijelova u suvremenim konstrukcijskim i alatnim primjenama izložen je istovremeno kompleksnom djelovanju mehaničkih, triboloških, korozivskih i drugih opterećenja. Odgovor na takve uvjete slijedi iz kombinacije svojstava podloge (osnovnog materijala) i površinskog sloja čime se bavi znanstveno tehnička disciplina Inženjerstvo površina (Surface Engineering) [6]. Na slici 7. prikazani su postupci prevlačenja.



Slika 7. Postupci prevlačenja[3]

Povijest razvoja postupka prevlačenja prema [5]:

- Halogenske žarulje: para joda
- Proizvodnja čistih metala, npr. Nikal po postupku MOND
- 1958. god proizvodnja poluvodiča: Ge, Si
- 1981. god sinteza dijamanta pri atmosferskom tlaku
- tvrdi slojevi (karbidi, nitridi) od 1935 god. u laboratoriju, a u industriji kasnije

Nedostaci koji su se javljali kod PVD i CVD tehnologija prevlačenja površina doveli su do povećanog interesa za plazma potpomognuti CVD postupak. Raznolika istraživanja su započeta 90 – ih godina prošloga stoljeća ali nije bilo moguće tehnologiju primijeniti u proizvodnom procesu. Prema članku iz 1999. godine razvoj opreme za provedbu PA – CVD metode kao i potrebne vještine omogućile su proizvodnju TiN i TiCN prevlaka na tvrde metale i čelik pri temperaturama taloženja od 480 – 560 °C. Nadalje, metoda PA-CVD se pokazala kao učinkovita metoda za prevlačenje vrlo složenih obradka [7].

3.1. CVD postupak prevlačenja

CVD postupak je postupak nanošenja slojeva u parnoj fazi kemijskim putem koji se provodi na temperaturama između 800-1000°C u struji reakcijskog plina, a uključuje interakciju između smjese plinova u aktivnom okolišu (toplina, svjetlo, plazma) i površine zagrijanoga osnovnog materijala. Princip CVD postupka temelji se na kemijskom raspadu nekih od korištenih plinskih konstituenata i kemijskim reakcijama jednog ili više plinovitih spojeva s drugim parnim ili plinovitim spojevima za dobivanje gustoga, čvrstog i stabilnog filma ili prevlake na zagrijanom supstratu. Upravo visoka temperatura, koja je viša od svih temperatura popuštanja predstavlja najveći nedostatak CVD postupaka te se iz toga razloga najčešće primjenjuje kod prevlačenja tvrdih metala i keramike. Budući da se prethodno sinteriranje provodi pri višim temperaturama, pri postupku CVD nema promjena mikrostrukture i dimenzija. S druge strane, prevlačenje čelika CVD postupkom usko je povezano s tehnološkim poteškoćama zbog mikrostrukturnih promjena i deformacija osnovnog materijala te potrebe za naknadnom toplinskom obradom [8].

3.2. PVD postupak prevlačenja

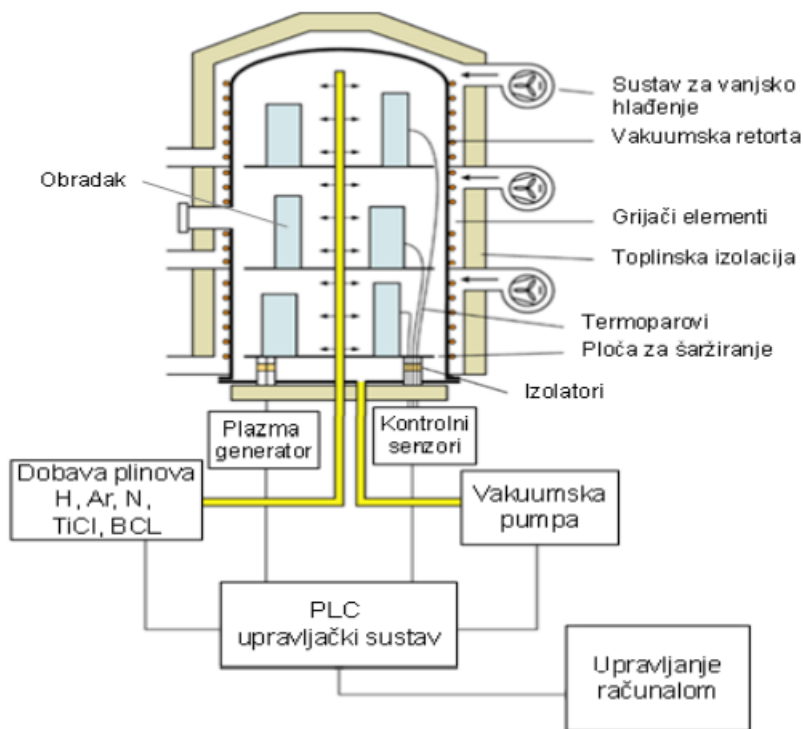
Kod PVD postupka materijal prevlake u vakuumskoj komori dovodi se u parnu fazu (isparavanjem, sublimacijom, bombardiranjem ionima, itd.) te se potom usmjerava na površinu obradka gdje parna faza kondenzira u obliku tankog filma. Postupak PVD provodi se pri nižim temperaturama (150-500°C) kod kojih nema faznih transformacija u čeliku. Ovim se postupkom mogu postići tanke prevlake gotovo svih elemenata. Nanošenje slojeva PVD postupkom odvija se u tri faze: 1. razgradnja izvornog materijala iz čvrstog u plinovito stanje; 2. transport atoma ili molekula materijala kroz vakuum do osnovnog materijala uz aktiviranje reaktivnog plina; 3. taloženje materijala u tankom sloju na osnovni materijal uz toplinskokemijske reakcije na površini osnovnog materijala [8].

3.3. PACVD postupak prevlačenja

PACVD postupak koristi energiju elektrona (plazmu) kao aktivacijsku metodu kako bi se omogućilo prevlačenje na nižim temperaturama. Opskrbljivanjem plina električnom energijom dovoljno visokog napona pri smanjenim tlakovima (<1,3 kPa) rezultira razbijanjem plina i stvaranjem plazme koja se sastoji od elektrona, iona i električni pobuđenih vrsta. Plazma može biti aktivirana pulsirajućom istosmjernom strujom (DC), izmjeničnom strujom (AC), primjenom mikrovalne pobude (MW), izbojima radio frekvencije (RF) itd. Reaktanti pare su ionizirani i disocirani pod utjecajem elektrona te stoga stvaraju kemijski aktivne ione i radikale koji prolaze heterogenu kemijsku reakciju na ili u blizini grijane površine osnovnog materijala i nanose tanki film. [9].

Slika 8. prikazuje shematski prikaz PACVD uređaja sa sastavnim dijelovima uređaja:

- vakuumska pumpa,
- vakuumska komora s grijačima,
- sustav za dobavu plinova,
- prekursor,
- generator plazme,
- sustav za neutralizaciju nusprodukata prevlačenja,
- PLC upravljački sustav.



Slika 8. Shematski prikaz PACVD uređaja [8]

Glavni nedostatak CVD postupka je već spomenuta visoka temperatura procesa (800-1000°C). PVD postupak provodi se na nižim temperatura od CVD postupka, ali uz nužnost pomicanja i zakretanja alata tijekom procesa zbog ostvarenja tzv. linije vidljivosti (eng. line of sight). U PVD postupku isparivanje metala prevlake i njeno taloženje na površinu obrađivanog predmeta provodi se najkraćim putem, tj. linijom vidljivosti prijenosa atoma između izvora materijala prevlake i površine obradaka u šarži. Ovaj problem djelomično se može riješiti rotiranjem obradaka tijekom prevlačenja, ali prevlačenje dijelova većih masa i/ili složene geometrije, s utorima, rupama i sl. ponekad nije izvedivo. Kako bi se prevladali neki od ovih nedostataka, PACVD postupkom nastoje se objediniti prednosti CVD i PVD tehnologije. Poboljšanje postupka CVD u smjeru sniženje radne temperature obrade na 450 do 600°C ostvareno je ionizacijom plinova (N_2 , Ar, H_2) u vakuumskoj komori peći i ubrzavanjem kemijskih reakcija upotrebom plazme. Također, PACVD postupak omogućuje obradu velikih i teških alata bez rotacije i nanošenje jednolične prevlake na alate složene geometrije i oblika te prevlačenje provrta. Mogućnost prethodnog plazmatskog nitriranja omogućuje stvaranje potpornog sloja i bolje prionjivosti prevlake u slučajevima niže tvrdoće osnovnog materijala,

što je čest slučaj kod alatnih čelika za topli rad. Stoga je navedeni PACVD postupak pogodan za obradu velikih i kompleksno oblikovanih alata izrađenih i od alatnih čelika za topli rad [8]. Na slici 9 prikazano je postrojenje za nitriranje u plazmi i PACVD prevlačenja.

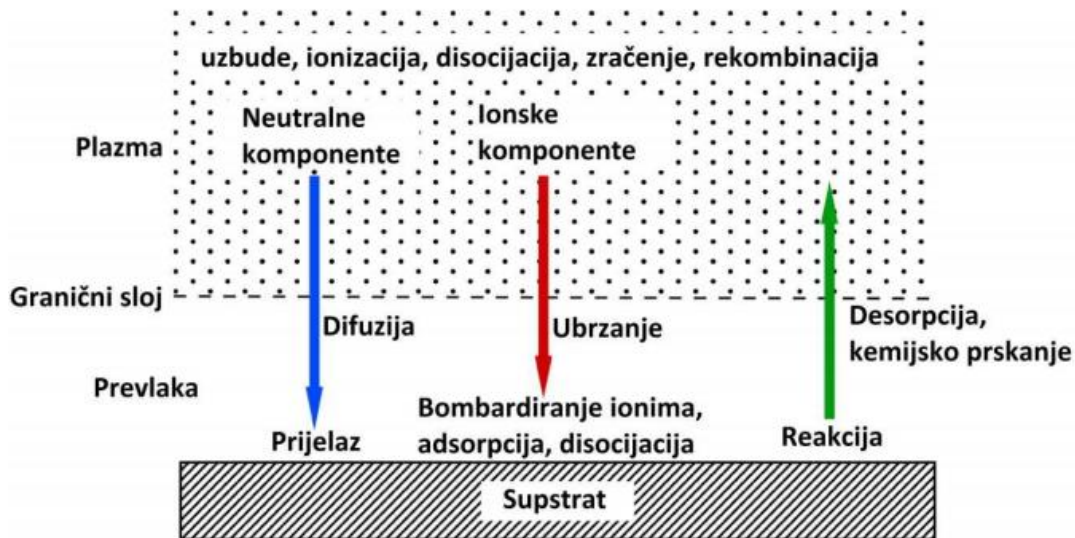


Slika 9. PACVD uređaj tvrtke RUBIG instaliran na Fakultetu strojarstva i brodogradnje[8]

Veoma je važno odabrati optimalne parametre procesa kako bismo dobili dobru adheziju, koheziju i istovremeno prihvatljivu brzinu rasta. Svojstva prevlake uvelike se razlikuju ovisno o tlaku, tako da je odabir optimalnog tlaka u procesu, kao i dobro poznavanje svojstava plazme, važno za dobivanje kvalitetnih prevlaka.

Adhezivnost prevlake na osnovni materijal predstavlja veoma bitnu stavku tijekom postupka prevlačenja, posebice kod visoko opterećenih alatnih čelika, koji bez dobre adhezivnosti prevlake na osnovnom materijalu ne bi izdržali sile kojima su izloženi tijekom eksploatacije. Ključ uspjeha dobre adhezivnosti u PACVD postupku jest temeljito čišćenje površine čelika. Čišćenje površine se ostvaruje kemijskim plazma čišćenjem u kombinaciji s fizičkim uklanjanjem kontaminirajućih elemenata koristeći otprašivanje teškim ionima [9].

Fizikalni procesi na površiniobrađivanog predmeta prikazani su na slici 10.



Slika 10. Procesi na površini za vrijeme PACVD prevlačenja[8]

Ono što je veoma bitno kod PACVD postupka, jest da ekonomske koristi mogu biti vrlo velike što se prvenstveno odnosi na uštede na osnovnom materijalu koji prevučeni ima duži životni vijek, ali i manja su nenamjerna zaustavljanja proizvodnje zbog zamjene dijelova ili veće potrebe za održavanjem. PACVD postupak nije štetan za okoliš u usporedbi s drugim postupcima prevlačenja, što je u današnje vrijeme, kada je briga za okoliš veoma bitna, vrlo važna činjenica.

Tablica 1. Usporedba postupaka prevlačenja iz parne faze[8]

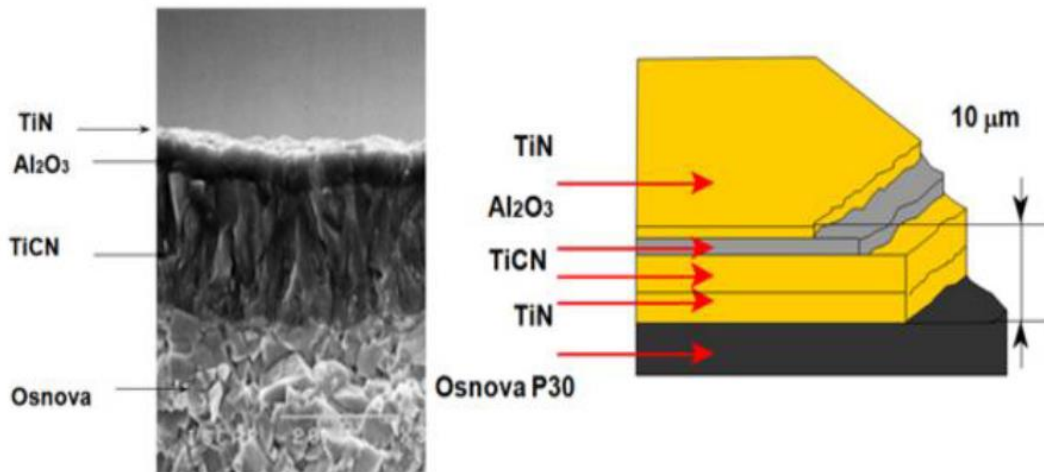
Postupak Karakteristika	PVD	CVD	PACVD
Temperatura procesa (°C)	200 - 500	800 - 1000	470 - 580
Kaljenje poslije prevlačenja	ne	potrebno	ne
Potreba za „linijom vidljivosti“	da	ne	ne
Pomicanje šarže	potrebno	ne	ne
Kvaliteta površine obratka	glatka	gruba	vrlo glatka
Poliranje poslije prevlačenja	ovisno	potrebno	ne
Dupleks proces	ne	ne	moгуće
Prionjivost na tvrde metale	vrlo dobra	vrlo dobra	prosječna
Troškovi održavanja	vrlo visoki	niski	niski
Troškovi procesa	visoki	niski	niski
Troškovi ulaganja	visoki	niski	prosječni
Primjena postupka prevlačenja	- tvrdi metali, brzorezni, niskolegirani čelici, - mali dijelovi - masovna proizvodnja - rezni alati	- dijelovi s nižim zahtjevima na postojanost mjera, - alati za duboko vučenje - tvrdi metali	- poboljšani čelik, - potrebna određena otpornost na popuštanje, - veliki alati - složene geometrije

3.4. Tvrde prevlake

U posljednjih nekoliko godina, zbog velikih zahtjeva za niže troškove, povećanjem produktivnosti i kvalitete proizvoda potiče se razvoj tvrdih prevlaka za primjenu na kalupima za obradu metala i preradu polimera. Međutim, prednosti primjene tvrdih prevlaka, koje su dobro poznate za rezne alate, u znatno manjoj su mjeri istražene kod alata za oblikovanje. Primjena postupaka prevlačenja na kalupima za tlačno lijevanje, hladno i toplo oblikovanje te preradu polimera značajno se razlikuje od primjene na reznim alatima zbog: znatno više cijene

alata, složene geometrije i velike mase alata te niže tvrdoće osnovnog materijala (problem prionjivosti prevlake). Prevlake koje pokazuju dobra svojstva u pogledu zaštite površine i produljenja vijeka trajanja reznog alata pokazuju relativno veliku sklonost naljepljivanju u kontaktu sa legurama koje se uobičajeno obrađuju alatima za oblikovanje. Nadalje, niska tvrdoća osnovnog materijala kod alatnih čelika za topli rad ne pruža dovoljno čvrstu podlogu (potporu) prevlaci te uslijed plastičnih deformacija osnovnog materijala dolazi do pucanja, delaminacije i konačno uklanjanja prevlake sa površine alata. Ova ograničenja nameću vrlo specifične zahtjeve prema svojstvima prevlake, ali i samom načinu (parametrima) njezinog nanošenja. Osim toga, sama prevlaka bez odgovarajuće „podrške“ podloge ne može izdržati složene uvjete rada koji su prisutni kod alatnih čelika za topli rad. Stoga je nužno provesti pravilnu predobradu koja uključuje i osnovnu toplinsku obradu i neki od toplinsko-kemijskih postupaka kako bi se postigla kvalitetna prevlaka s odgovarajućim svojstvima[8].

Tvrde prevlake (eng. hard coatings) najčešće se koriste za tribološku zaštitu reznih alata te su uobičajeno sastavljene od nitrida, borida i karbida prijelaznih metala (TiN, CrN, TiAlN, TiBN, TiCN, itd.). Izbor odgovarajuće tvrde prevlake ovisi o specifičnom tribološkom sustavu (materijal obratka, parametri obrade i materijal alata). Glavna uloga tvrdih prevlaka je poboljšanje svojstava alata i produljenje njegovog vijeka trajanja te unaprjeđenje produktivnosti. Osim zaštite površine alata od trošenja, prevlake se koriste radi poboljšanja podmazivanja, povećanja kemijske postojanosti i otpornosti na koroziju. Prevlake uglavnom nemaju utjecaja na svojstva osnovnog materijala (podloge), ali mogu značajno promijeniti mehanička, toplinska, optička i električna svojstva površine podloge (osnovnog materijala). U radu su alatni čelici za hladni rad prevučeni tvrdim višeslojnim prevlakama TiN/TiCN i TiN/TiBN. Na slici 11. prikazane su višeslojne prevlake.



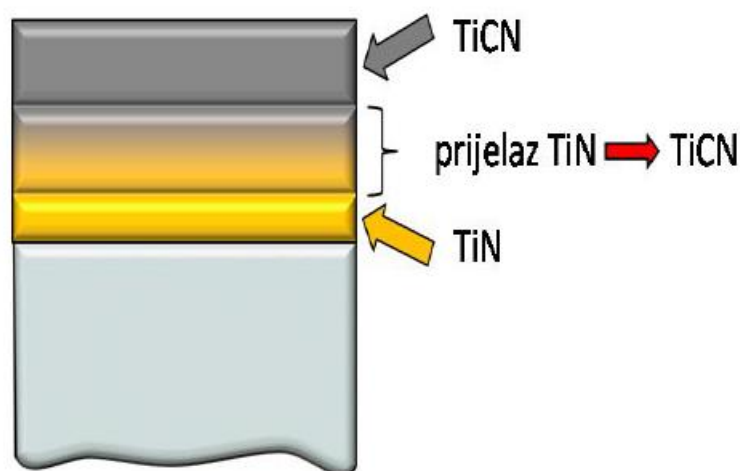
Slika 11. Višeslojne prevlake [8]

3.4.1. Prevlake TiN, TiCN, TiBN

Tvrde prevlake na bazi Ti uspješno su prevučene postupkom PACVD na alatne čelike pri temperaturama nižim od temperature popuštanja osnovnog materijala. TiN ima plošno centriranu kubičnu kristalnu rešetku s parametrom rešetke $a_0=0,4242$ nm. Struktura i svojstva sloja TiN uvelike ovise o uvjetima prevlačenja. S porastom temperature prevlačenja, raste i hrapavost TiN površine, a suprotno od hrapavosti, istraživanja su ustvrdila da korozivna postojanost iste prevlake pada s porastom temperature prevlačenja sto tako se brzina rasta TiN povećava približno linearno s porastom toka N_2 . Samo za određeni N_2/H_2 omjer tokova plinova je boja TiN slojeva zlatna, dok s povećanjem ili smanjenjem toka plina N_2 boja TiN slojeva postaje sve izraženije smeđa. Istraživanja su pokazala da u većini slučajeva veća tlačna zaostala napreznja u prevlaci i viši modul elastičnosti prevlake znači i veću lomnu žilavost. Primjenom PACVD postupka moguće je ostvariti i niže vrijednosti koeficijenta trenja TiN sloja nego što se to ostvaruje PVD ili CVD postupcima i to zbog toga što kod PACVD postupka postoji određena količina klora u prevlakama dobivenih iz , tako da PACVD postupak predstavlja veoma koristan alat za prilagodbu svojstava trenja i trošenja TiN sloja podešavanjem sadržaja Cl. Tvrdoća TiN sloja iznosi oko 2500 HV 0,01. Nitiranje kao postupak može se provesti u plinu, solnim kupkama i plazmi, a u ovom radu je korišteno upravo zadnje spomenuto, plazmatsko nitiranje. Tijekom formiranja difuzijske zone plazmatsko nitiranje omogućuje najveću tvrdoću površine za osnovni materijal, ali ne daje

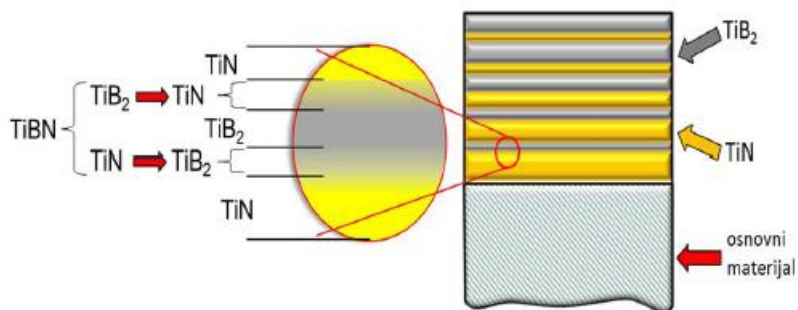
uvijek dobra svojstva nosivosti. Za visoko opterećene, prevučene tribološke kontakte, duktilnost i lomna žilavost osnovnog materijala pokazuju se kao važnije značajke od tvrdoće površine. TiN prevlaka ima primjenu u industriji već dugi niz godina i zahvaljujući svojoj dobroj korozivskoj postojanosti i otpornosti na trošenje primjenjuje se na reznim alatima, alatima za oblikovanje i dijelovima strojeva. TiN sloj služi kao potporni sloj TiCN, odnosno TiBN sloju u višeslojnom sustavu prevlaka, kako bi smanjila tlačna zaostala naprezanja između prevlake i podloge na samom njihovom spoju te kako bi se povećala prionjivost prevlake[8].

TiCN prevlaka je poznata po boljoj otpornosti prema oksidaciji i tvrdoci pri visokim temperaturama od TiC prevlake, a također i po puno boljoj mehaničkoj otpornosti i toplinskoj stabilnosti u odnosu na TiN prevlaku. Sive je boje te tvrdoće oko 3200 HV 0,01. Ono po čemu je stvarno prepoznatljiva je to da kada je umetnuta preko druge prevlake, kao što je TiN prevlaka, ima nizak faktor trenja u kontaktu s čelikom te visok koeficijent toplinske vodljivosti. Svojstva TiCN prevlaka ovise o arhitekturi prevlake, koja se može promijeniti podešavanjem ravnoteže dušika i ugljika u sloju. Primarni mehanizam trošenja za prevlaku TiN/TiCN jest adhezijsko trošenje. TiN/TiCN prevlaka korištena u radu predstavlja gradijentnu prevlaku koja započinje slojem TiN koji poboljšava adhezivnost, a zatim dolazi do gradijentnog prijelaza iz TiN u TiCN te nanošenje čistog TiCN sloja. Takav gradijentni prijelaz omogućava bolju prionjivost među slojevima i smanjenje zaostalih naprezanja u prevlaci jer se izbjegava nagli prijelaz mehaničkih svojstava slojeva različitih karakteristika u prevlaci. Slika 12. prikazuje gradijente TiCN prevlake.



Slika 12. Shematski prikaz gradijentne TiCN prevlake[8]

TiBN tvrde prevlake imaju veoma dobra svojstva kao što su visoka tvrdoća, dobra stabilnost pri povišenim i visokim temperaturama, odlična otpornost prema koroziji. Tvrdoća prevlake iznosi oko 4000 HV 0,05. TiBN prevlaka je kompozitna prevlaka koja se sastoji od TiN, TiB i TiB₂ kristala. Kombinacijom TiN slojeva koji imaju nizak koeficijent trenja i nanokompozitnih TiBN slojeva dolazi do porasta tvrdoće i zaostalih naprezanja, a dobivamo i nova strukturna i funkcionalna svojstva. Mogu se konstruirati višeslojne prevlake s ovećanom otpornosti prema plastičnoj deformaciji gdje dolazi do povećanja lomne žilavosti u usporedbi s jednoslojnim TiN i TiBN prevlakama. Struktura gradijentne prevlake TiN/TiBN korištene u radu sastoji se od potpornog sloja TiN koji, kao i kod TiCN prevlake, ima ulogu poboljšavanja prionjivosti prevlake smanjenjem zaostalih naprezanja u prevlaci nakon kojeg slijedi naizmjenično TiB₂ i TiN sloj određeni broj puta, te na kraju ide TiB₂ sloj. Svakim sljedećim nanošenjem debljina TiN sloja se smanjuje, dok suprotno tome, svakim sljedećim nanošenjem, debljina TiB₂ sloja se povećava. Tako je na početku prevlačenja nanešen TiN sloj najveće debljine, a svaki sljedeći sloj je sve tanji, dok je kod TiB₂ prevlake na početku nanešena najmanja debljina sloja da bi završni sloj imao najveću debljinu[8].



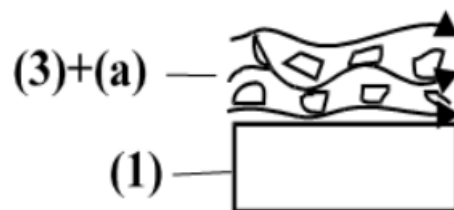
Slika 13. Shematski prikaz višeslojne gradijentne TiBN prevlake[8]

4. Erozijsko trošenje

4.1. Mehanizmi trošenja

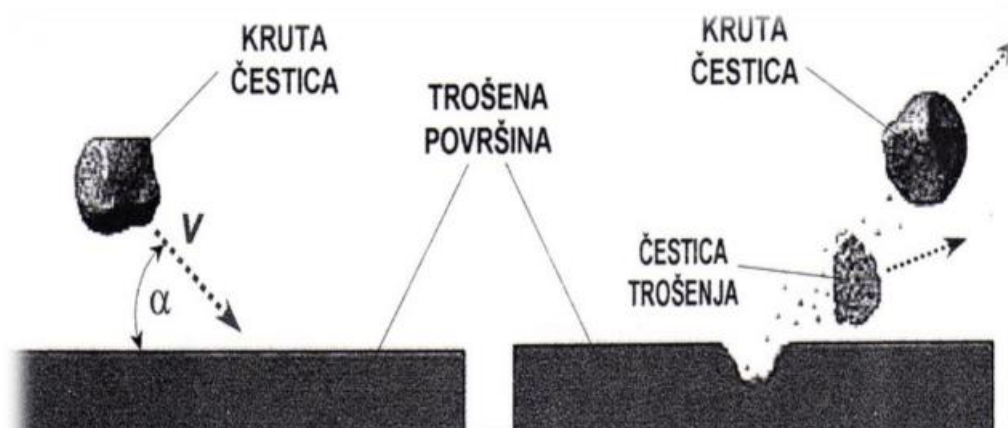
Erozija česticama je gubitak materijala s površine krutog tijela zbog relativnog strujanja fluida u kojem se nalaze krute čestice [10]. Karakterističan tribosustav je prikazan na slici 14. s osnovnim dijelovima:

- funkcionalni dio (1)
- fluid (3)
- čestica (a)



Slika 14. Shema tribosustava erozije čestica [10]

Najznačajniji mehanizmi koji se javljaju kod erozije česticama su abrazija i umor površine te se njihov učinak opisuje na razini jediničnog sudara čestice s trošenom površinom, prikazanog na Slici 15.

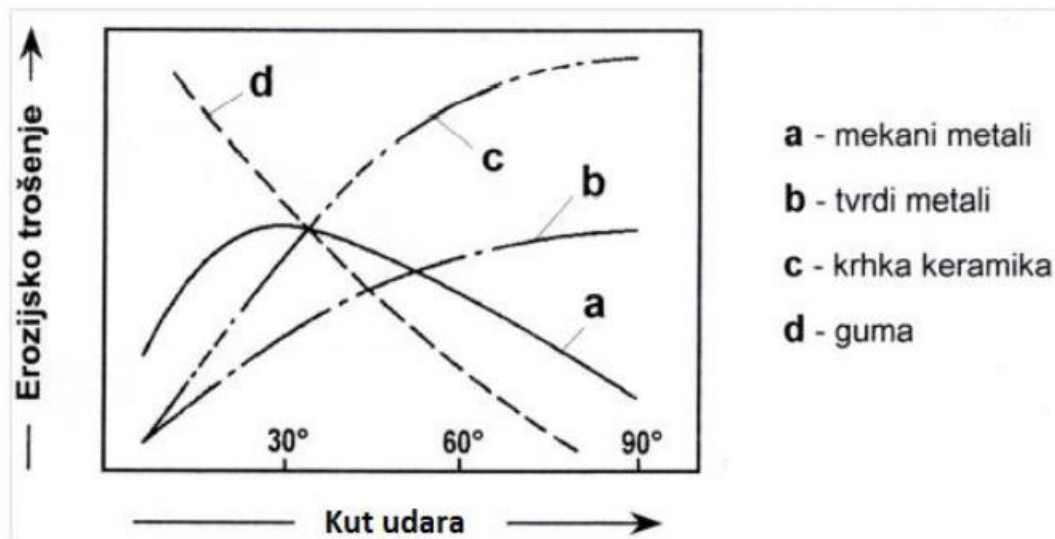


Slika 15. Jedinični sudar krute čestice s trošenom površinom [10]

Ovisno o kutu udara (α) čestica od trošenu površinu, erozija može biti abrazivna (mali kut udara čestica od trošenu površinu) ili udarna (gotovo okomiti kut udara čestica od trošenu površinu), odnosno ovisno o kutu udara čestica i jedan i drugi mehanizam trošenja (abrazija i umor površine) mogu biti podjednako zastupljeni [11].

4.2. Utjecaj veličine na erozijsko trošenje

Već prije spomenuti kut udara α ima značajan utjecaj na brzinu trošenja erozijom i određen je vrstom materijala trošenog erozijom te se na Slici 16. jasno vidi kako je brzina trošenja erozijom kod duktilnijih materijala kao što su guma ili mekani metal zastupljenija pri manjim kutovima (15...30°), dok kod krhkih materijala kao što su tvrdi metal ili keramika, brzina trošenja erozijom je najzastupljenija pri normalnom kutu, odnosno oko 90°.



Slika 16. Utjecaj kuta udara na erozijsko trošenje krutim česticama [10]

EKSPERIMENTALNI DIO

5. PLAN I PROVEDBA ISPITIVANJA

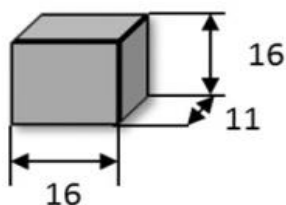
5.1. Plan ispitivanja

Ispitivanja koja su se provodila u sklopu završnog rada vršila su se na uzorcima čelika za hladan rad dobivenim dvjema različitim metodama i različitog kemijskog sastava prema tablici 2.

Tablica 2. Kemijski sastav i oznake skupine visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad [11]

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

Uzorci su proizvedeni od strane tvrtke BÖHLER, gdje je čelik K110 (oznaka uzorka „D“) proizveden konvencionalnim postupkom, dok je čelik K390 MC (oznaka uzorka „C“) proizveden postupkom metalurgije praha s veoma fino raspoređenim i homogenim karbidima u mikrostrukturi. Uzorci za ispitivanje erozijskog trošenja oblika i dimenzija prikazani su na slici 17. Njihova površina je prije prevlačenja mehanički očišćena finim brušenjem i poliranjem kako bi se postigla površinska hrapavost $R_a = 0.133 \pm 0.012 \mu\text{m}$. Uzorci su potom očišćeni postupkom ionskog otprašivanja prije PACVD prevlačenja u trajanju od 2 sata [11].



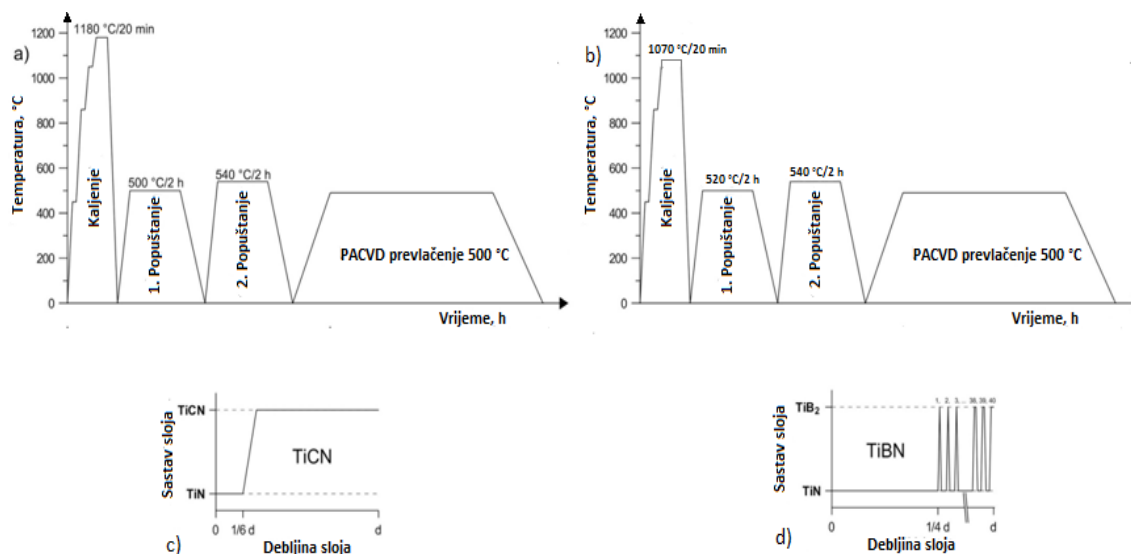
Slika 17. Oblik i dimenzije ispitnih uzoraka za ispitivanje otpornosti na eroziju [11]

Prevlake koje su nanese postupkom PACVD zajedno s nitriranim stanjem materijala, u radu su označene brojevima i prikazane na slici 18. [11] :

- TiN prevlaka – 1
- TiN/TiCN prevlaka – 2
- TiN/TiBN prevlaka – 3



Slika 18. Označeni uzorci prije ispitivanja



Slika 19. Toplinska obrada ispitnih uzorka izradenih od K110 i K390 čelika [11]

Na slici 19. prikazana je toplinska obrada ispitnih uzoraka izradenih od K110 i K390 čelika:

- dijagram cjelokupnog procesa toplinske obrade K390 čelika,
- dijagram cjelokupnog procesa toplinske obrade K110 čelika,
- PACVD proces prevlačenja za nastanak duplex TiN/TiCN prevlake,
- PACVD proces prevlačenja za nastanak višeslojne TiN/Ti-B-N prevlake

Prethodno postupku plazmatskog nitiranja (za uzorke oznake C1 i D1) i PACVD postupka prevlačenja površine (za uzorke C2-3 i D2-3) očišćeni su ionskim otprašivanjem u trajanju od 2h. Prethodno obradi modifikacije površine i PACVD postupka oba čelika za hladan rad obavljena je toplinska obrada uz tri predgrijavanja te nakon kaljenja i dva popuštanja [11].

Ispitni uzorci su nakon čišćenja prevučeni tankom TiN prevlakom koja predstavlja vezivi sloj između podloge i prevlake TiCN (za uzorke oznaka C2 i D2) odnosno višeslojne prevlake TiN/Ti-B-N (za uzorke oznaka C3 i D3).

PACVD prevlačenje je izvršeno pomoću plazme aktivirane pulsirajućom istosmjernom strujom u Rübiger GmbH type PC 70/90 industrijskoj vakuumskoj peći u Laboratoriju za

toplinsku obradu Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Parametri PACVD prevlačenja su izabrani prema preporukama proizvođača PACVD sustava i prijašnjih istraživanja. Plazmatsko nitriranje obavljeno je na istom [11].

Proces nastajanja sloja kod C2 i D2 uzoraka je sljedeći (slika 26. a):

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 (slika 26.b):

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 84. sloj (trajanje 7h i 15 min),
3. Nanošenje rubnog TiB₂ sloja.

Po završetku modifikacije površine i prevlačenja PACVD postupkom provedeno je ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje, kalotest te adhezivnost prevlake kako bi se ustvrdilo koja od prevlaka daje najbolja svojstva.

5.2. Provedba ispitivanja

5.2.1. Ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje

Ispitivanje na erozijsko trošenje uzoraka odvijalo se prema sljedećim koracima:

1. Čišćenje uzoraka ultrazvučnom kupkom
2. Mjerenje početne mase,
3. Stavljanje uzorka u držač za ispitivanje,
4. Trošenje uzoraka u definiranom vremenskom periodu,
5. Vađenje uzoraka i ponovno čišćenje,
6. Mjerenje gubitka mase,
7. Ponavljanje 3.-6. koraka dok se ne zadovolji traženi ciklus ispitivanja,
8. Računanje gubitka mase.

Čišćenje uzorka se odvijalo na način da se uzorak stavio u čašicu napunjenu etilnim alkoholom (slika 23.) te se postavio u ultrazvučnu kupku prema slici 20. Postupak čišćenja se odvijao u vremenskom periodu od 90 sekundi.



Slika 20. Ultrazvučna kupka: a) prednji pogled, b) pogled odozgo (sa uzorkom)



Slika 21. Etilni alkohol u ambalaži

Nakon što je završio postupak čišćenja, uzorak se pažljivo izvadio iz čašice magnetom kako ne bi došlo do nanošenja čestica prašine sa ruku koje mogu doprinijeti povećanju mase pri vaganju.

Vaganje je odrađeno u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje na vagi prikazanoj na slici 22. Vaga je analitička s rezolucijom 10^{-4} g, odnosno prikazuje rezultate na četiri decimale.

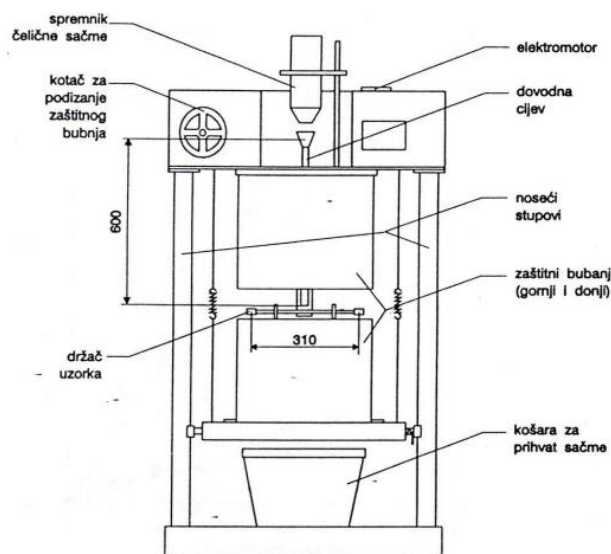


Slika 22. Vaga „Mettler“ Zurich

Po završetku vaganja uzorak se pričvršćuje na držač vijkom (slika 23. b)) i postavlja se zaštitni bubanj kako ne bi došlo do nekontroliranog raspršivanja pijeska po okolini (slika 23. a)) te se postavlja pijesak u spremnik i uređaj se pušta u rad na predodređeni vremenski period. Ovaj uređaj služi samo za ispitivanje erozije trošenja suhim pijeskom. Pojedini dijelovi uređaja prikazani su na slici 24.



Slika 23. Uređaj za ispitivanje otpornosti na eroziju; a) izgled uređaja, b) uzorak u držaču



Slika 24. Shematski prikaz uređaja za ispitivanje otpornosti na eroziju [12]

Parametri procesa erozijskog trošenja:

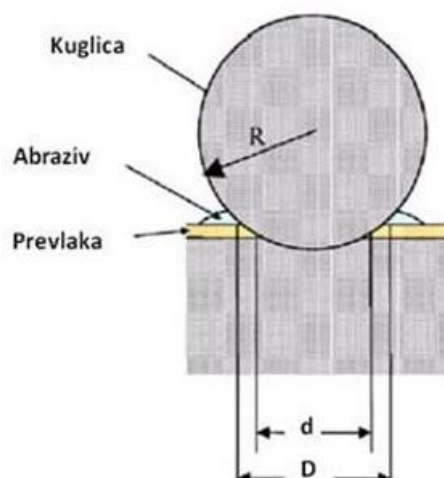
- Brzina okretanja: 1440 okr/min,
- Trajanje ispitivanja: 30 min (interval 15 min)
- protok čestica abraziva: 3,12 g/s
- kut udara uzorka u mlaz abraziva: 45°

Mehanizmi trošenja koji se javljaju su umor površine, ali i abrazija zbog kuta pri kojem čestice udaraju na površinu uzorka od 45° pa postoji dio uzorka po kojemu čestice klize. Ovim ispitivanjem dobit ćemo uvid u elastična svojstva prevlake i potpornog sloja te otpornost prema umoru površine. Tijekom ispitivanja najviše se pažnje obraćalo na pravovremeno dodavanje pijeska (abraziva) kako bi se ispitivanje moglo izvršiti uspješno i vjerodostojno za svaki uzorak. Najviše poteškoća tijekom ispitivanja je izazivao neprohodan put pijeska niz dovodnu cijev koja se znala zaštopati zbog loše konstrukcije prihvatnog grla i vlažnog pijeska.

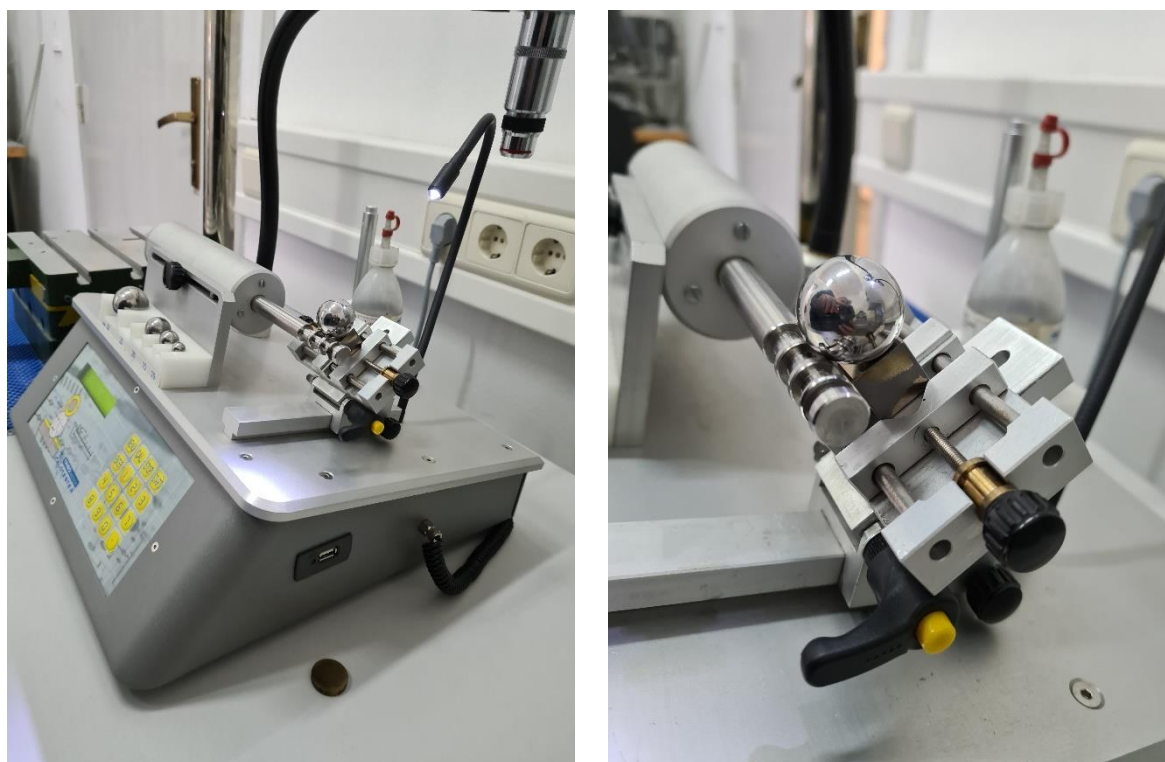
5.2.2. Ispitivanje debljine prevlake

Debljina prevlake ima značajan utjecaj na svojstva prevlake. U ovome radu debljina TiCN i TiBN prevlaka određena je metodom utiskivanja kuglice (eng. ball crater) ili kalotestom prema normi ISO EN 1071. Kuglica od kaljenog čelika, propisanih dimenzija, utiskuje se određenom silom u površinu ispitnog uzorka sa prevlakom. U ovom slučaju sila je određena masom (promjerom) kuglice. Položaj kuglice u odnosu na uzorak i kontaktno opterećenje su konstantni. Kuglica rotira zadanom brzinom i uz prisustvo abraziva (dijamantna pasta) prodire u prevlaku i osnovni materijal. Cilj metode je stvaranje kratera u obliku kalote na uzorku te se postupak provodi dok kuglica ne probije prevlaku. Svjetlosnim mikroskopom vrši se mjerenje otiska.

Mjerenje je provedeno u Laboratoriju za toplinsku obradu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje na uređaju TRIBOtechnic Calotester.



Slika 25. Shematski prikaz kalotesta [13]



Slika 26. Uređaj TRIBOtechnic Calotester s prikazom kuglice

Ovom metodom može se izvršiti i kvalitativna ocjena prionjivosti između prevlake i osnovnog materijala, ali i adhezivnost između slojeva ukoliko se radi o višeslojnim prevlakama sa debljim slojevima. Ukoliko prionjivost prevlake nije dobra dolazi do ljuštenja prevlake između prevlake i osnovnog materijala ili između slojeva prevlake.

Koraci ispitivanja:

- postavljanje uzorka u čeljust uređaja i pričvršćivanje,
- postavljanje kuglice od kaljenog čelika između osovine i uzorka,
- podešavanje kuta i udaljenosti između kuglice i osovine kako bi se kuglica mogla nesmetano rotirati bez proklizavanja,
- ručno podešavanje parametara i pokretanje uređaja,
- dodatak nekoliko kapi dijamantne paste (abraziv),
- ručno zadani interval završava i uzorak se skida s uređaja,
- mjerenje otiska optičkom mjernom opremom.

Parametri ispitivanja su:

- brzina vrtnje – 300 okr/min,
- vrijeme trajanja postupka – 60 s,
- promjer kuglice – 25 mm.

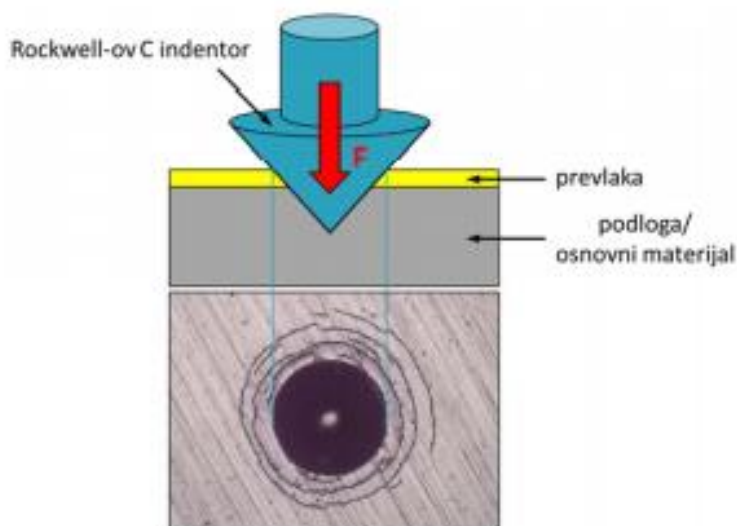
Ispitivanje se provelo po jedan put za oba dvije vrste alatnog čelika za hladan rad sa različitim kombinacijama TiN/TiCN/TiBN prevlaka (D2, D3, C2, C3).

5.2.3. Ispitivanje adhezivnosti prevlake

Prionjivost prevlaka ispitivana je Rockwell-ovom metodom utiskivanja indentora prema ViDI 3198. Ispitivanja su prevedena radi procjene prionjivosti novo razvijenih prevlaka. Upravo je dobra prionjivost preduvjet dobrih svojstava prevlake, tj. ako je prionjivost slaba

onda će i svojstva prevlake biti loša te će doći do njezinog ljuštenja i prekomjernog trošenja što je jedan od najčešćih nedostataka i uzroka loših svojstava prevlaka.

Uobičajena metoda mjerenja tvrdoće prema Rockwell-u (HRC) koristi se za jednostavnu procjenu prionjivosti prevlaka zbog svoje brzine i jednostavnosti mjerenja. Metoda HRC temelji se na utiskivanju indentora dijamantnog stožac sa vršnim kutem 120° i radijusa zaobljenja 0,2 mm opterećenjem od 1471 N u površinu uzorka. Prodiranje indentora uzrokuje velike plastične deformacije podloge (osnovnog materijala) te lomi i prevlaku (slika 31). Zbog velikih vlačnih naprezanja na rubu otiska dolazi do pucanja i/ili ljuštenja prevlake u slučaju slabe prionjivosti. Prionjivost prevlake određuje se prema teksturi i količini oštećenja prevlake koja su se pojavila oko otiska.



Slika 27. Shematski prikaz mjerenja prionjivosti prevlake HRC metodom[8]

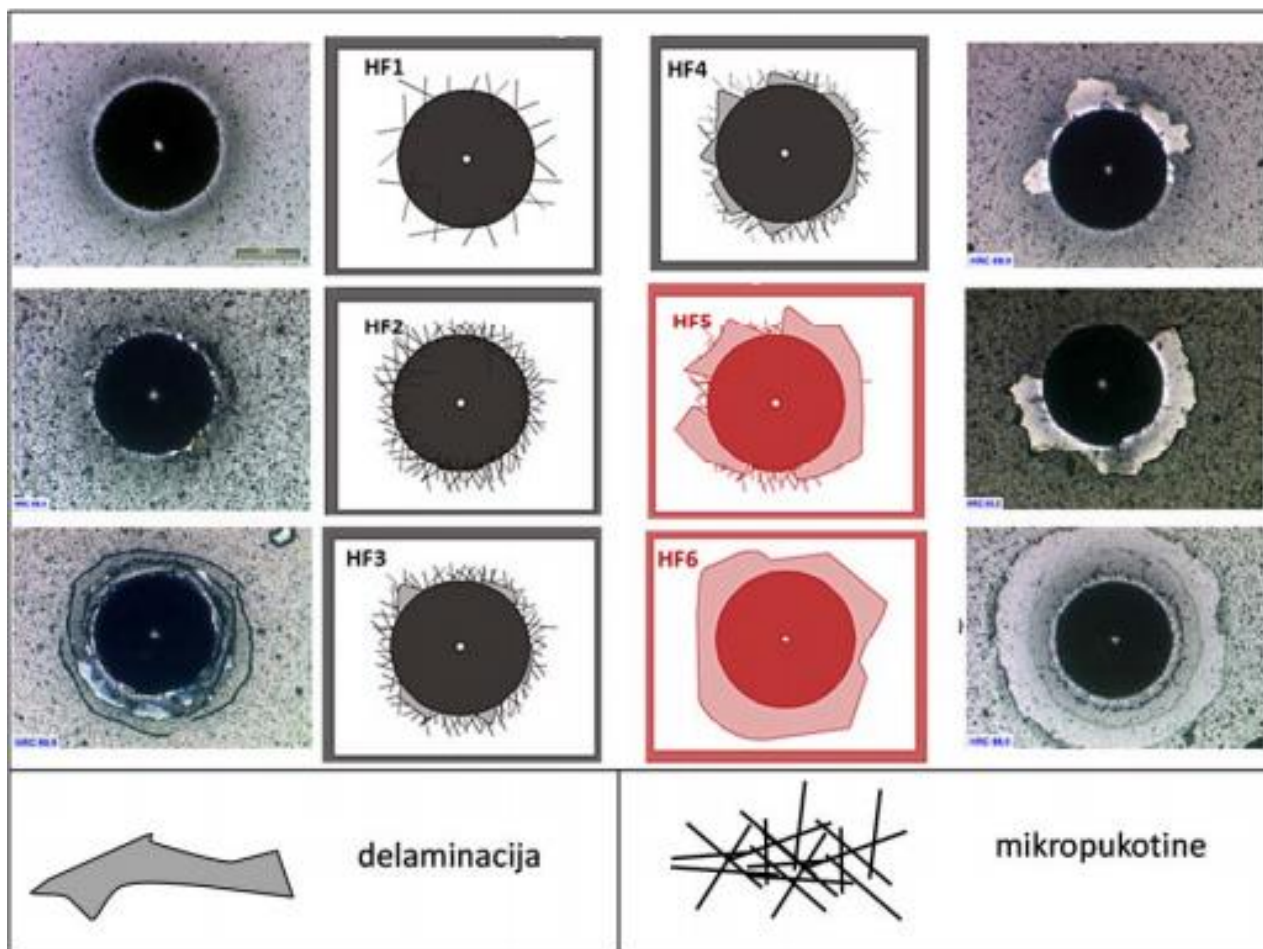


Slika 28. Rockwell indenter „Insize“

Prionjivost prevlake podijeljena je u šest razreda koji su prikazani na slici 29. prema teksturi oštećenja oko ruba otiska:

- HF1 – mali broj pukotina
- HF2 – veći broj pukotina, bez delaminacije (ljuštenja)
- HF3 – pukotine uz slabu delaminaciju
- HF4 – pukotine uz djelomičnu delaminaciju
- HF5 – pukotine uz prevladavajuću delaminaciju
- HF6 – potpuna delaminacija prevlake.

Razredi HF1 i HF2 ukazuju na dobru prionjivost prevlake, dok razredi HF3 i HF4 ukazuju na zadovoljavajuću prionjivost prevlake (prihvatljiva je samo mala količina delaminacije). U slučaju razreda HF5 i HF6, gdje prevladava delaminacija prevlake oko otiska, prionjivost prevlake nije prihvatljiva.



Slika 29. Šest razreda klasifikacije mjerenja prionjivosti prevlake metodom HRC [8]

6. REZULTATI ISPITIVANJA

U daljnjem tekstu rada prikazani su rezultati ispitivanja debljine prevlaka kao i adhezivnosti prevlaka, ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje nakon kojeg su površine uzoraka snimljene svjetlosnim mikroskopom.

6.1. Gubitak mase erozijskim trošenjem

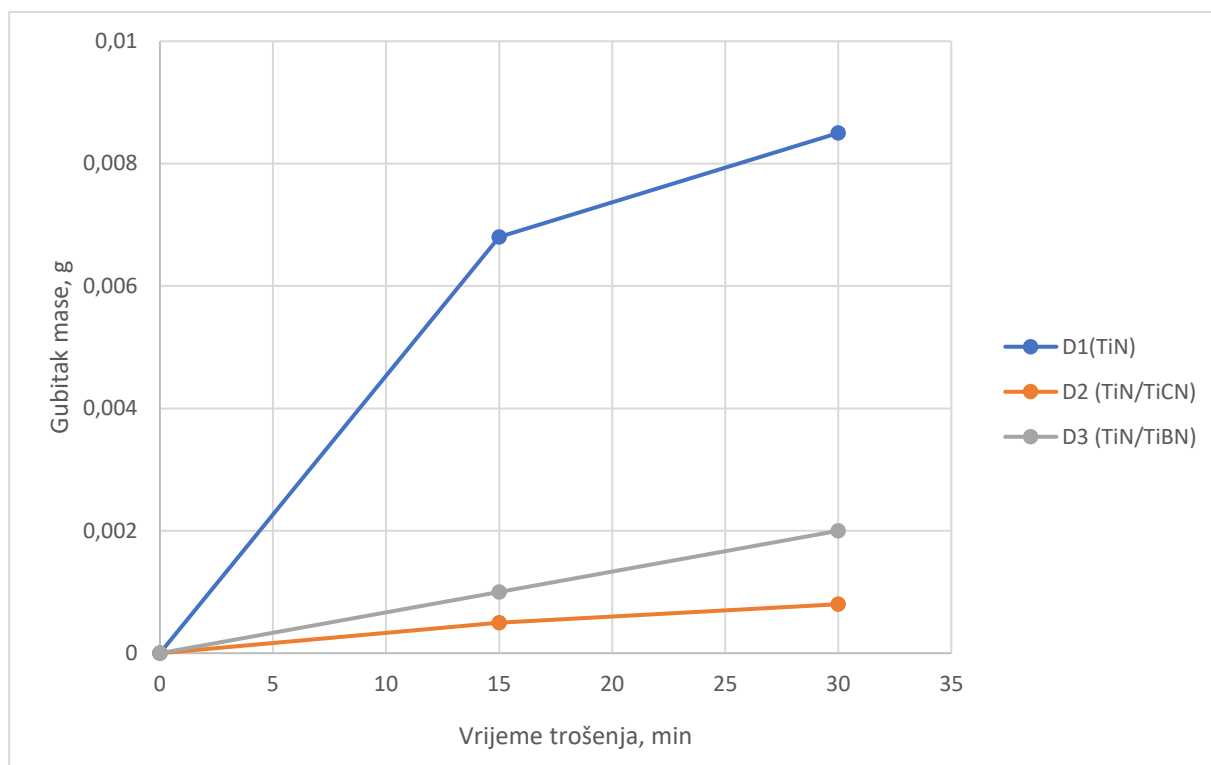
Po završetku ispitivanja erozijskog trošenja i vaganja uzoraka dovije se podatak o gubitku mase pojedinog uzorka koji se određuje prema izrazu:

$$\Delta m = m_1 - m_2$$

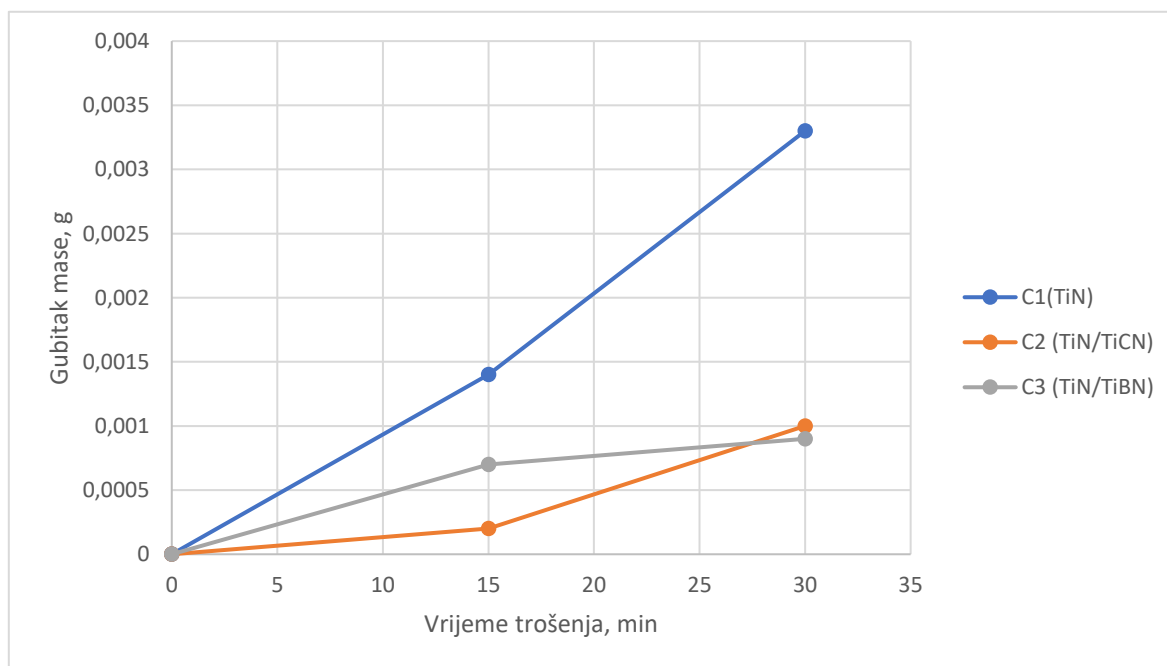
pri čemu je:

- m_1 - masa uzorka prije ispitivanja, [g],
- m_2 - masa uzorka nakon ispitivanja, [g].

Ukupni srednji gubitak mase izračunat je za svih 6 ispitivanja. Na slikama 30. i 31. prikazan je gubitak mase u ovisnosti o vremenu trošenja.



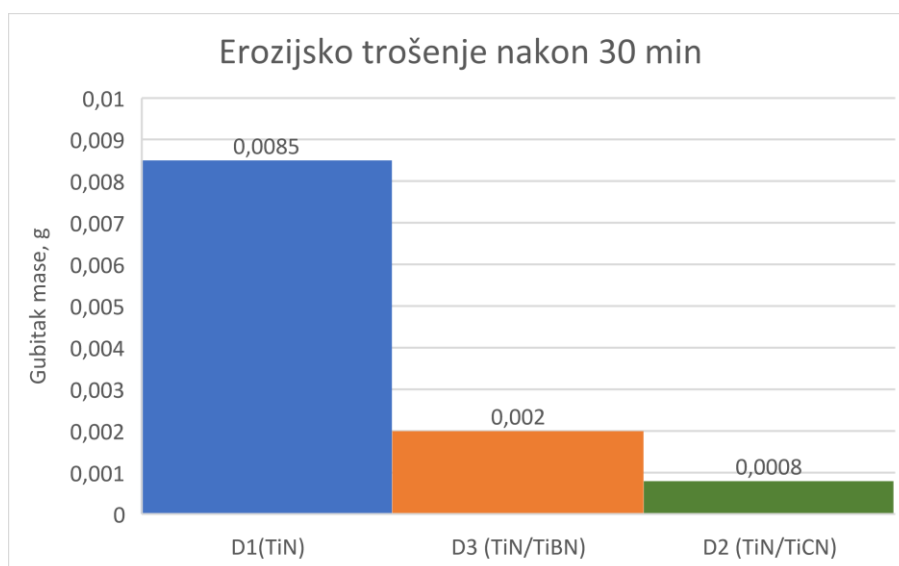
Slika 30. Gubitak mase u ovisnosti o vremenu trošenja za ispitne uzorke od čelika K110 (D)



Slika 31. Gubitak mase u ovisnosti o vremenu trošenja za ispitne uzorke od čelika K390 MC(C)

Prikazane su krivulje sa vrijednostima kumulativnog gubitka mase. One pokazuju trend trošenja prevlaka u odnosu na trošenje modificiranog nitrinog sloja TiN. Kod oba čelika je vidljivo da se neprevučeni uzorci troše gotovo linearno i brzo, dok se kod prevučenih uzoraka, postupnim gubitkom prevlake, povećava gubitak mase. Iz slika 30 . i 31. uočava se značajno povećanje otpornosti na trošenje prevučenih uzoraka u odnosu na ne prevučene za oba ispitivana čelika. Na uzorcima od čelika K110 (čelici oznaka D) prevlaka TiN/TiCN pokazala se otpornija na trošenje u odnosu na prevlaku TiN/TiBN. Kod čelika K390 MC (čelici oznaka C) može se uočiti da se prevlaka TiN/TiCN manje trošila u prvome vremenskom periodu ispitivanja u odnosu na TiN/TiBN, ali da se počela više trošiti u drugom vremenskom periodu i kumulativni gubitak mase joj je ispao veći. Na tu pojavu je moglo utjecati začepeljivanje odvoda za dovod praška i rezultiralo manjim trošenjem materijala.

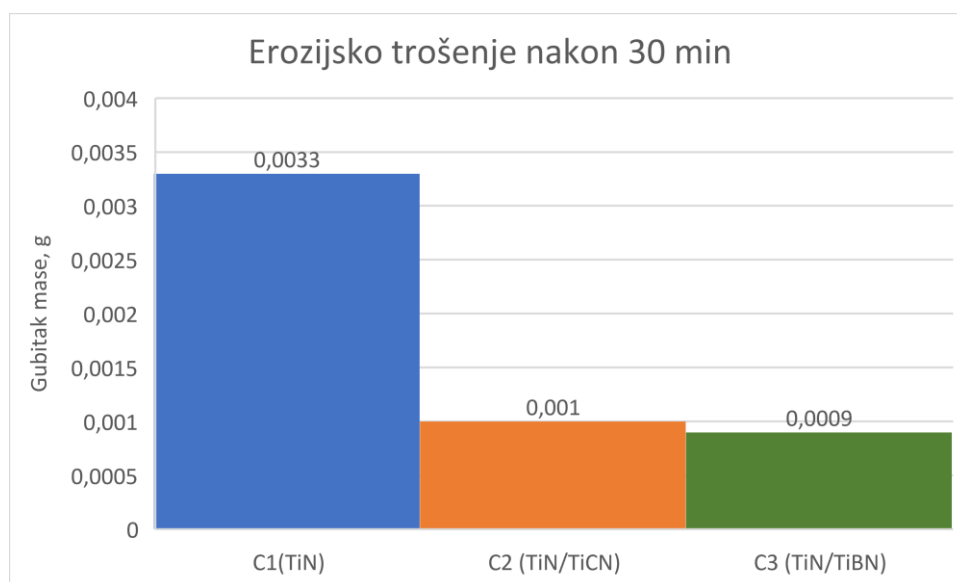
Slika 32. i 33. prikazuju gubitke mase uzoraka nakon 30 min ispitivanja. Usporedba rezultata ispitivanja pokazuje kako je primjenom plazmatskog nitriranja i TiCN, odnosno TiBN PACVD prevlakama došlo do značajnog povećanja otpornosti na erozijsko trošenje kod alatnih čelika za hladan rad.



Slika 32. Ukupni gubitak mase za uzorke iz skupine D nakon 30 min ispitivanja

Iz rezultata ispitivanja čelika oznake D (K110) nakon 30 min ispitivanja prikazanih na slici 32. može se zaključiti sljedeće:

- Nitrirana površina uzoraka D1 pokazuje značajno veći gubitak mase od prevučenih površina uzoraka D2 i D3.
- Uzorci prevučeni TiN/TiCN prevlakom (D2) pokazuju 10,625 puta manji gubitak mase od neprevučenih uzoraka (D1).
- Uzorci prevučeni TiN/TiBN prevlakom (D3) pokazuju 4,25 puta manji gubitak mase od neprevučenih uzoraka (D1).



Slika 33. Ukupni gubitak mase za uzorke iz skupine C nakon 30 min ispitivanja

Iz rezultata ispitivanja čelika oznake C (K390) nakon 30 minuta ispitivanja prikazanih na slici 32. može se zaključiti sljedeće:

- Nitrirana površina uzoraka C1 pokazuje značajno veći gubitak mase od prevučenih površina uzoraka C2 i C3.
- Uzorci prevučeni TiN/TiCN prevlakom (C2) pokazuju sličan gubitak mase u usporedbi s uzorcima prevučeni TiN/TiBN prevlakom (C3)
- Uzorci prevučeni TiN/TiCN prevlakom (C2) pokazuju 3,3 puta manji gubitak mase od neprevučenih uzoraka (C1).

- Uzorci prevučeni TiN/TiBN prevlakom (C3) pokazuju 3,7 puta manji gubitak mase od neprevučениh uzoraka (C1).

Rezultati ispitivanja pokazuju kako obje prevlake prevučene na oba čelika povoljno utječu na otpornost prema erozijskom trošenju. Najbolju otpornost pokazuje TiN/TiCN prevlaka prevučena na čelik K110 (D2).

6.2. Debljina prevlake

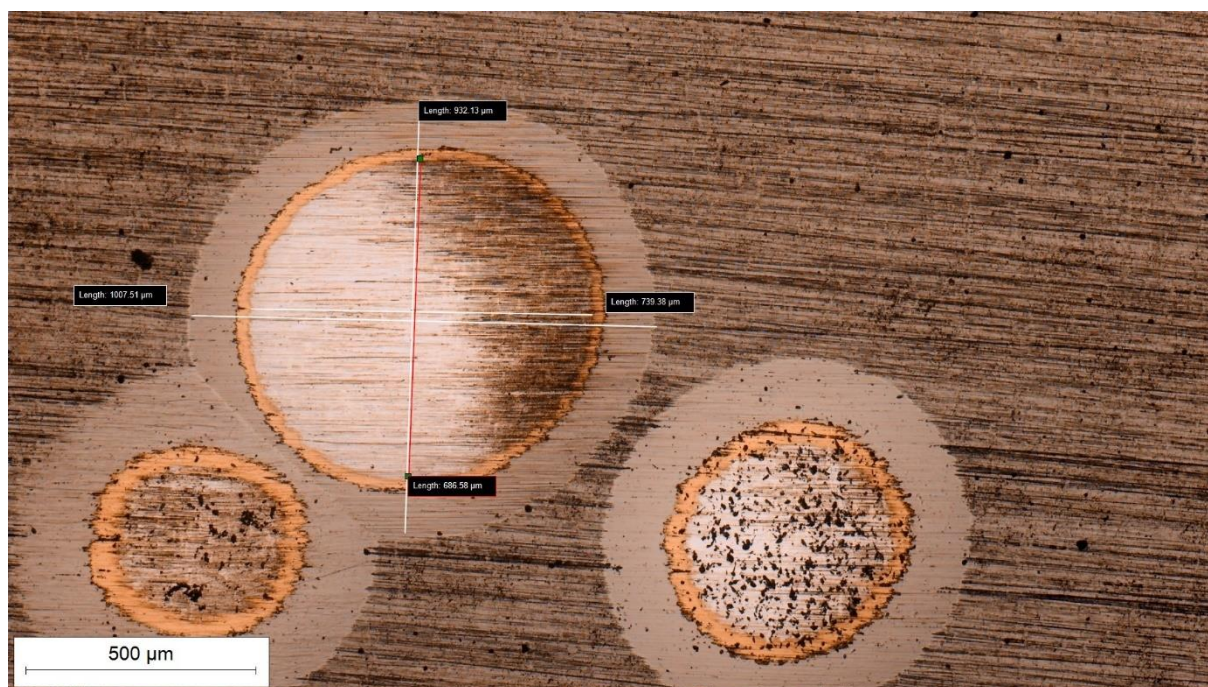
Debljina prevlake se računa prema sljedećem izrazu:

$$E = \frac{D^2 - d^2}{8R} \quad (1)$$

Gdje je:

- E – debljina prevlake,
- D – vanjski promjer otiska,
- d – unutarnji promjer otiska,
- R – polumjer kuglice

Utiskivanjem kuglice od kaljenog čelika na uzorku ostaje trag koji je prikazan na slikama 34., 35., 36., i 37. za svaku skupinu uzoraka s prevlakom (D2, D3, C2, C3) i snimljen na svjetlosnom mikroskopu u Laboratoriju za metalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje.



Slika 34. Trag trošenja na čeliku K110 snimljen na svjetlosnom mikroskopu nakon ispitivanja debljine prevlake metodom utiskivanja kuglice na uzorku D2 s TiN/TiCN prevlakom



Slika 35. Trag trošenja na čeliku K110 snimljen na svjetlosnom mikroskopu nakon ispitivanja debljine prevlake metodom utiskivanja kuglice na uzorku D3 s TiN/TiBN prevlakom



Slika 36. Trag trošenja na čeliku K390 MC snimljen na svjetlosnom mikroskopu nakon ispitivanja debljine prevlake metodom utiskivanja kuglice na uzorku C2 s TiN/TiCN prevlakom



Slika 37. Trag trošenja na čeliku K390 MC snimljen na svjetlosnom mikroskopu nakon ispitivanja debljine prevlake metodom utiskivanja kuglice na uzorku C3 s TiN/TiBN prevlakom

Kod svih uzoraka s tragom trošenja vidljiv je TiN potporni sloj koji ima karakterističnu zlatno žutu boju. Debljina prevlaka, određena izrazom (1), prikazana u tablicama 3. i 4.

Tablica 3. Debljina prevlaka TiN/TiCN i TiN/TiBN na čeliku K110

Broj mjerenja	Uzorak D2	Uzorak D3
	TiN/TiCN prevlaka	TiN/TiBN prevlaka
1.	2,77	2,67
2.	2,86	2,51
3.	1,99	2,62
4.	2,34	2,21
5.	1,58	2,25
6.	1,68	4,08
Srednja debljina sloja [μm]	2,20	2,72


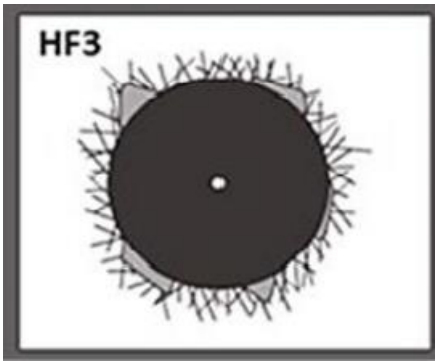

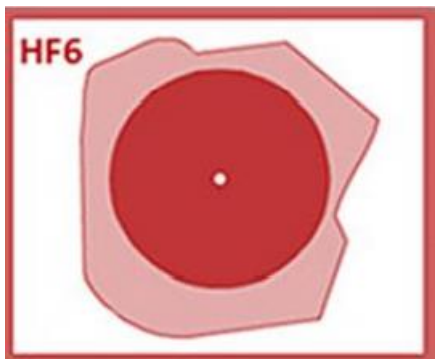
Tablica 4. Debljina prevlaka TiN/TiCN i TiN/TiBN na čeliku K390

Broj mjerenja	Uzorak C2	Uzorak C3
	TiN/TiCN prevlaka	TiN/TiBN prevlaka
1.	1,59	1,19
2.	2,15	1,40
3.	2,07	0,92
4.	2,14	1,23
5.	1,99	1,18
6.	2,30	0,96
Srednja debljina sloja [μm]	2,39	1,15


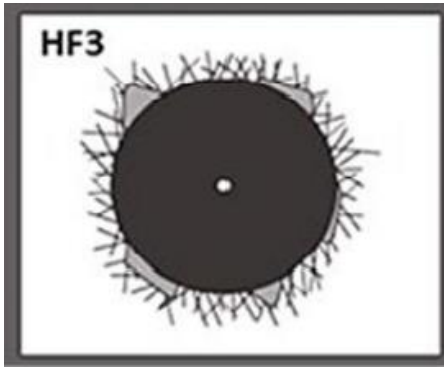

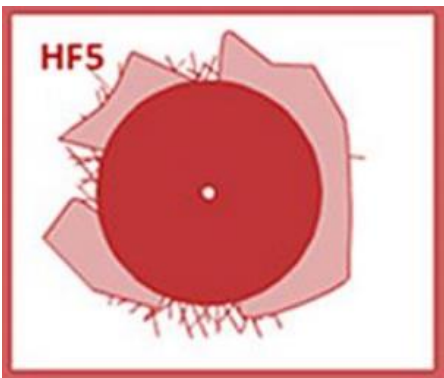
6.3. Adhezivnost prevlake

Adhezivnost prevlake je ispitana na sva četiri prevučena uzorka (D2, D3, C2, C3) s po dva otiska na svakom uzorku. Samo ispitivanje Rockwell metodom provedeno je u Laboratoriju za toplinsku obradu Fakulteta strojarstva i brodogradnje, dok su se nakon utiskivanja penetratora, površine snimile svjetlosnim mikroskopom u Laboratoriju za metalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Reprezentativni primjerci snimljenih površina s pripadajućim ocjenama kvalitete adhezivnosti prevlake prikazani su u tablicama 5. i 6.

Tablica 5. Tragovi otisaka HRC ispitivanja na površini uzoraka D2 s TiN/TiCN prevlakom i D3 s TiN/TiBN prevlakom od K110 alatnog čelika

Oznaka čelika	Vrsta prevlake	Snimljene površine	Ocjena kvalitete
K110 (D)	TiN/TiCN (uzorak D2)		
	TiN/TiBN (uzorak D3)		

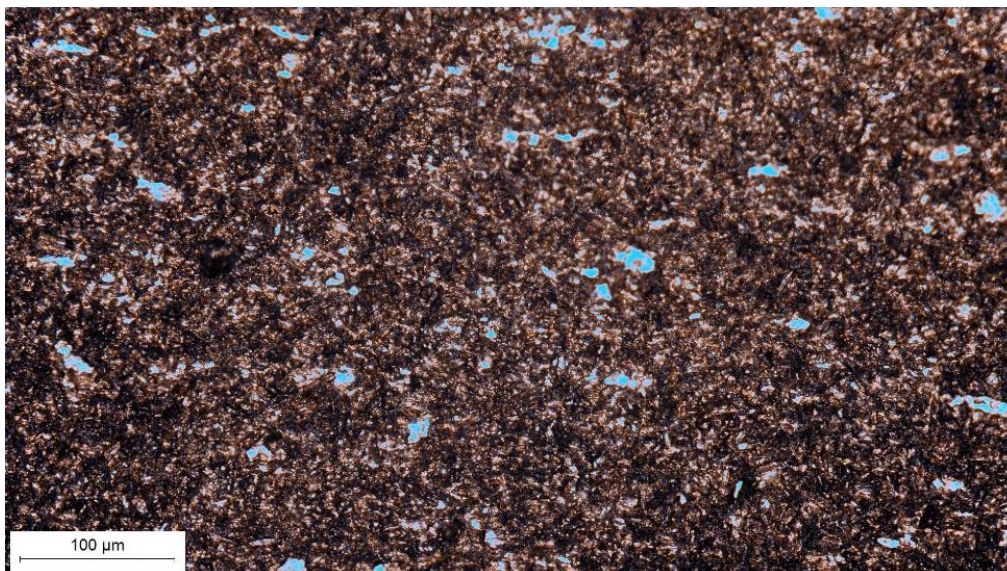
Tablica 6. Tragovi otisaka HRC ispitivanja na površini uzoraka C2 s TiN/TiCN prevlakom i C3 s TiN/TiBN prevlakom od K390 alatnog čelika

Oznaka čelika	Vrsta prevlake	Snimljene površine	Ocjena kvalitete
K390 (C)	TiN/TiCN (uzorak C2)		
	TiN/TiBN (uzorak C3)		

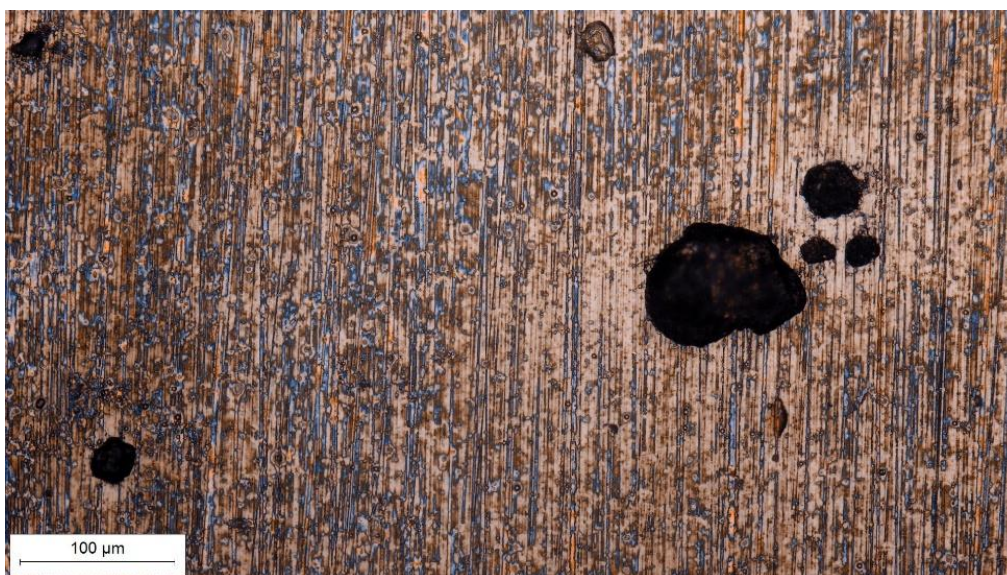
Rezultati prikazani u tablicam 5. i 6. pokazuju bolju adhezivnost TiN/TiCN prevlaka za oba alatna čelika za hladan rad u odnosu na TiN/TiBN prevlake. Kod uzoraka D2 i C2 vidi se prisutnost delaminacije u manjoj mjeri uz istovremenu prisutnost mikropukotina, ali i dalje ocjenjujemo dobru adhezivnost. Nedovoljnu adhezivnost bilježimo kod D3 i C3 uzorka koji su bili prevučeni TiN/TiBN prevlakama. Kod uzorka D3 prisutnost delaminacije prevladava uz istovremenu prisutnost mikropukotina, dok kod C3 uzorka je došlo do potpune delaminacije prevlake te se ona nije imala jako lošu adhezivnost.

6.4. Analiza trošenih površina

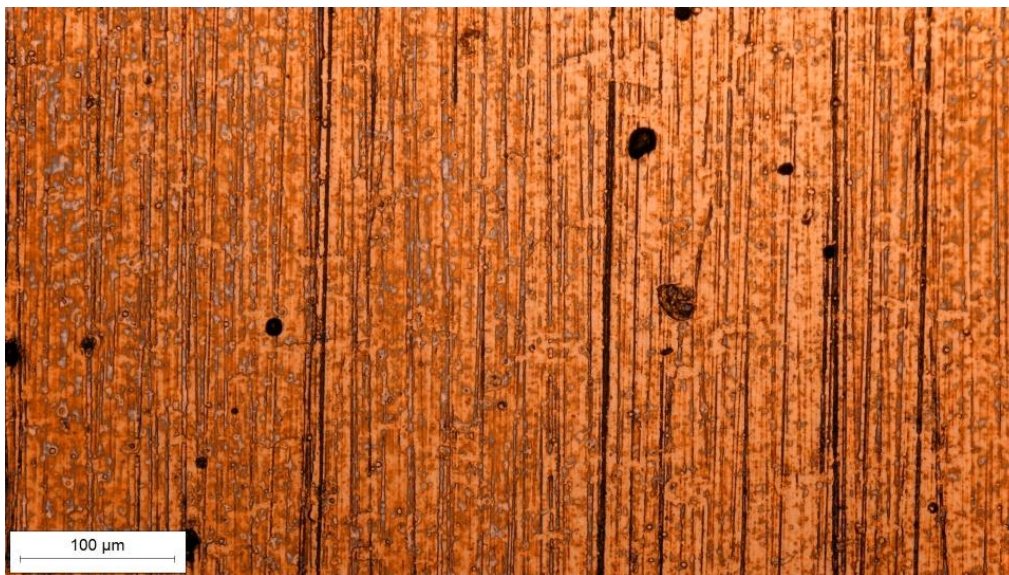
Izgled trošeni površina snimljen na svjetlosnom mikroskopu u Laboratoriju za metalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje prikazan je na slikama od 38. – 43.



Slika 38. Trošene površine uzoraka D1 od čelika K110 snimljene na svjetlosnom mikroskopu



Slika 39. Trošene površine uzoraka D2 od čelika K110 snimljene na svjetlosnom mikroskopu



Slika 40. Trošene površine uzoraka D3 od čelika K110 snimljene na svjetlosnom mikroskopu



Slika 41. Trošene površine uzoraka C1 od čelika K390 MC snimljene na svjetlosnom mikroskopu



Slika 42.. Trošene površine uzoraka C2 od čelika K390 MC snimljene na svjetlosnom mikroskopu



Slika 43. Trošene površine uzoraka C3 od čelika K390 MC snimljene na svjetlosnom mikroskopu

Slike snimljene na svjetlosnom mikroskopu pokazuju jednolično trošenje erozijom izazvano erozivnim česticama pijeska kod nitriranih uzoraka oba čelika D1 i C1 (slike 38. i 41.). Kod uzorka D2 primjećujemo mjestimično stvaranje kratera oko prevlake na slici 39., dok uzorak D3 (slika 40.) pokazuje vrlo dobru otpornost na erozijsko trošenje kao i uzorak C2 (slika 42.). Na uzorku C3 (slika 43.) došlo je do stvaranja kratera, ali se isto tako može primijetiti na njegovu rubu kako je erozijsko trošenje bilo ispitivano pod kutem (od 45°).

7. ZAKLJUČAK

Za poboljšanje otpornost na erozijsko trošenje visokolegiranih alatnih čelika za hladan rad oznake K110 i K390 MC proizvođača BÖHLER prevučeni su prevlakama TiN/TiCN i TiN/TiBN postupkom PACVD. U radu smo istražili karakteristike površinskih slojeva te se provelo ispitivanje otpornosti na erozijsko trošenje pri kutu od 45°, debljina nanosene prevlake kalotestom i adhezivnost samih prevlaka Rockwell – ovom metodom.

Utvrđivanjem gubitka mase uzorka slijedno ispitivanju otpornosti na erozijsko trošenje, zaključuje se kako se najveći gubitak mase javlja kod uzorka koji su bili samo nitrirani (TiN) u odnosu na one prevučene TiN/TiCN i TiBN prevlakama za oba K110 i K390 MC alatna čelika za hladan rad. Najbolja otpornost na erozijsko trošenje postignuta je nakon prevlačenja čelika K110 prevlakom TiN/TiCN. Navedena prevlaka ima čak 10,625 puta manji gubitak mase u odnosu na nitrirani uzorak čelika K110. Ispitni uzorci prevučeni prevlakom TiN/TiBN na oba čelika kao i prevlaka TiN/TiCN na čeliku K390 MC pokazuju značajno manji gubitak mase (oko 3 do 5 puta) u odnosu na nitrirane uzorke, ali ipak ne tako dobru otpornost na erozijsko trošenje kao prevlaka TiN/TiCN na čeliku K110.

Adhezivnost TiN/TiCN prevlaka na oba uzorka čelika je ista i pokazala se puno boljom od uzorka prevučenih TiN/TiBN prevlakama. Uzorci prevučeni TiN/TiCN prevlakom imaju prisutnost delaminacije i mikropukotina, ali i dalje ocjenjujem dobru adhezivnost. Uzorci prevučeni TiN/TiBN imaju nedovoljnu adhezivnost.

Najveća debljina prevlake javlja se kod uzorka prevučenog TiN/TiBN prevlakom na čeliku K110 i iznosi 2,72 μm , dok najmanja na uzorku K390 MC prevučenog TiN/TiBN iznosa 1,15 μm . Uzorci prevučeni TiN/TiCN za oba čelika pokazuju slične iznose debljine prevlake od 2,2 do 2,4 μm .

U cilju određivanja otpornosti na trošenje i povećanja adhezivnosti prevlaka u raznim eksploatacijskim uvjetima, daljina istraživanja bi se trebala provesti da se ustvrdi kako se prevlake ponašaju u ovisnosti o upadnom kutu razornih čestica i traženju optimalne kombinacije parametra PACVD postupka.

LITERATURA

- [1] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, Zagreb
- [2] S. Kožuh: Specijalni čelici, Skripta, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [3] V. Rade, D. Ćorić, D. Landek: Predavanja iz kolegija „Posebni metalni materijali“, Autorizirana predavanja, FSB, 2018.
- [4] T. Kostadin: Čelici i željezni ljevovi, Veleučilište u Karlovcu, 2017.
- [5] D. Landek, B. Matijević: Predavanja iz kolegija „Toplinska obrada“, Autorizirana predavanja, FSB, 2018.
- [6] F. Cajner, D. Landek, Saša Kovačić: Introduction and application of new technologies of plasma nitriding and PACVD coating, Proceeding of the 5th International Conference on Mechanical Technologies and Structural Materials, Split, Croatia, 24- 25. 09. 2015.
- [7] S.S. Eskildsen, C. Mathiasen, M. Foss, Plasma CVD: Process capabilities and economic aspects, Surface and Coatings Technology, no. 116 – 119, pp. 18 – 24, 1999.
- [8] S. Kovačić: Utjecaj nitriranja i prevlačenja na svojstva alatnih čelika za topli rad, Doktorski rad, FSB, Zagreb, 2015.
- [9] K.L. Choy: Chemical vapour deposition of coatings, Progress in material science, no. 48, pp. 57 – 67, 2003.
- [10] K. Grilec, S. Jakovljević: Predavanja iz kolegija „Tribologija“, Autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2015.
- [11] F. Cajner, D. Landek, H. Rafael, J. Jačan, D. Bogdanić: 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, 20-22. 05. 2015., Venice, Italy
- [12] I. Kladarić, V. Ivušić: Otpornost na umor površine poboljšanog nodularnog lijeva, MATRIB, no. 99, pp. 119-127, 1999.
- [13] D. Landek: Karakterizacija površinskih slojeva I, Autorizirane vježbe, FSB, Zagreb, 2015.

PRILOZI

Prilog 1.1. Rezultati ispitivanja otpornosti na eroziju ispitnih uzoraka izrađenih od K110 čelika

Oznaka uzorka	Masa i gubitak mase uzorka	Vrijeme trošenja erozijom, min		
		0	15	30
D1	m, g	21,901	21,8942	21,8925
	m_{sr} , g	21,9724	21,9661	21,9598
	Δm_1 , g	0	0,0068	0,0017
	$\Delta m_{cum,1}$, g	0	0,0068	0,0085
D2	m, g	21,9725	21,972	21,9717
	Δm_1 , g	0	0,0005	0,0003
	$\Delta m_{cum,1}$, g	0	0,0005	0,0008
D3	m, g	21,9295	21,9285	21,9275
	Δm_1 , g	0	0,001	0,001
	$\Delta m_{cum,1}$, g	0	0,001	0,002

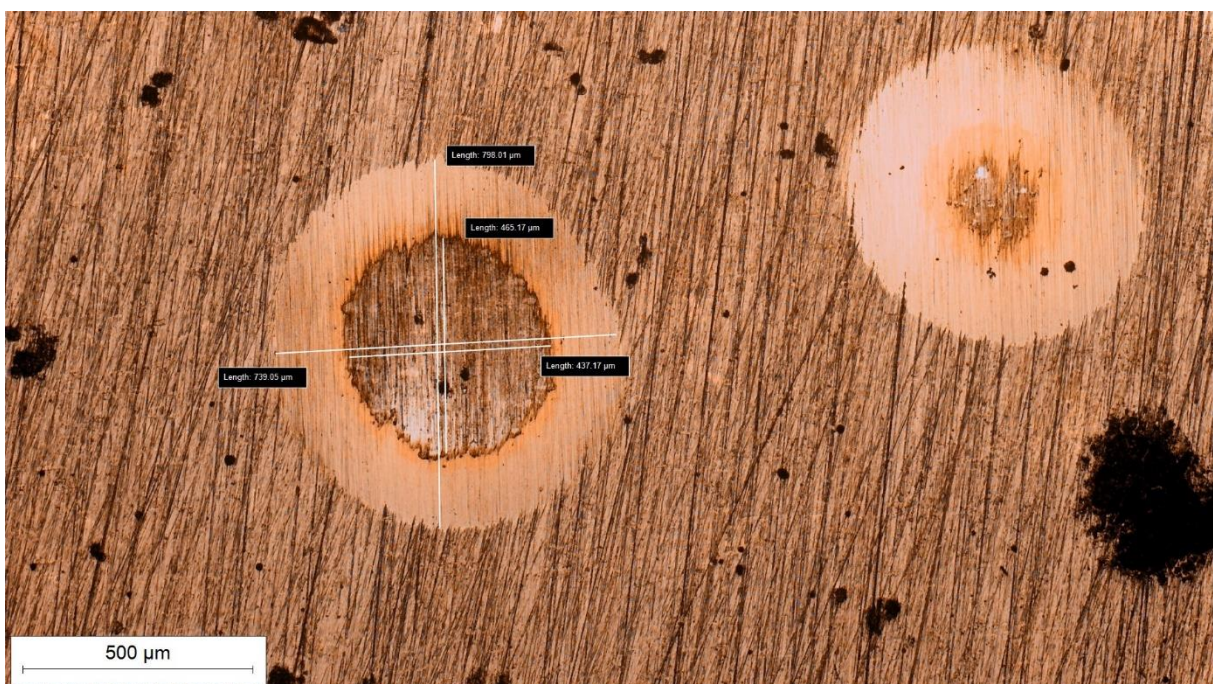
Prilog 1.2. Rezultati ispitivanja otpornosti na eroziju ispitnih uzoraka izrađenih od K390 čelika

Oznaka uzorka	Masa i gubitak mase uzorka	Vrijeme trošenja erozijom, min		
		0	15	30
C1	m, g	21,5198	21,5184	21,5165
	$\Delta m_{sr,1}$, g	0	0,0014	0,0019
	$\Delta m_{cum,1}$, g	0	0,0014	0,0033
C2	m, g	21,5357	21,5355	21,5347
	$\Delta m_{1,1}$, g	0	0,0002	0,0008
	$\Delta m_{cum,1}$, g	0	0,0002	0,001
C3	m, g	21,4837	21,483	21,4828
	$\Delta m_{1,1}$, g	0	0,0007	0,0002
	$\Delta m_{cum,1}$, g	0	0,0007	0,0009

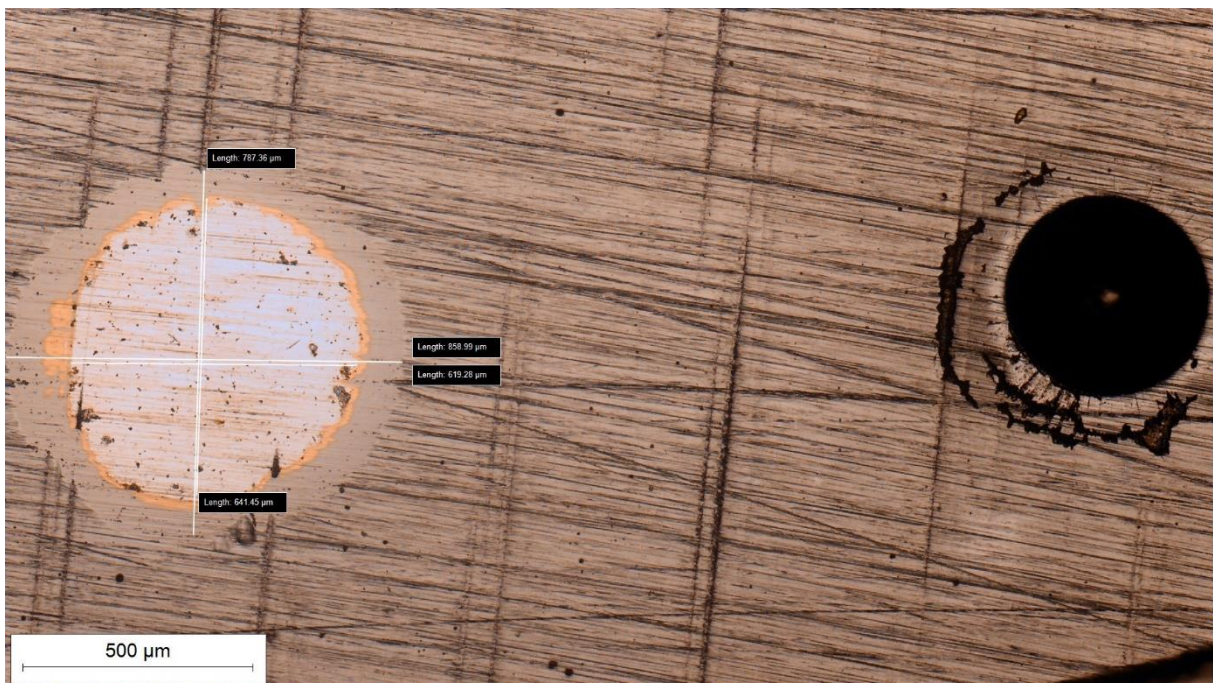
Prilog 2.1. Trag trošenja na čeliku K110 snimljen na svjetlosnom mikroskopu nakon ispitivanja debljine prevlake metodom utiskivanja kuglice na uzorku D2 s TiN/TiCN prevlakom



Prilog 2.3. Trag trošenja na čeliku K110 snimljen na svjetlosnom mikroskopu nakon ispitivanja debljine prevlake metodom utiskivanja kuglice na uzorku D3 s TiN/TiBN prevlakom



Prilog 2.3. Trag trošenja na čeliku K390 snimljen na svjetlosnom mikroskopu nakon ispitivanja debljine prevlake metodom utiskivanja kuglice na uzorku C2 s TiN/TiCN prevlakom



Prilog 2.4. Trag trošenja na čeliku K390 snimljen na svjetlosnom mikroskopu nakon ispitivanja debljine prevlake metodom utiskivanja kuglice na uzorku C3 s TiN/TiBN prevlakom

