Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje TiN/TiCN prevlaka na visokolegiranim alatnim čelicima za hladni rad

Babić, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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:235:697534

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Domagoj Babić

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:
izv. prof. dr. sc. Darko Landek

Student:
Domagoj Babić

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno uz stručnu pomoć mentora izv. prof. dr. sc. Darka Landeka te uz korištenje navedene literature i dobivenih rezultata ispitivanjem.

Ovim putem se zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Darku Landeku na korisnim savjetima prilikom pisanja diplomskog rada. Također se zahvaljujem doc. dr. sc. Gorani Baršić na pomoći prilikom ispitivanja hrapavosti uzoraka, dr. sc. Saši Kovačiću na pomoći prilikom ispitivanja kalotestom te Ivanu Vovku na pomoći prilikom slikanja uzoraka na svjetlosnom mikroskopu. Posebno hvala i svima onima koji su mi bili podrška tijekom studiranja i pisanja diplomskog rada.

Domagoj Babić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Domagoj Babić** Mat. br.: 0035190291

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

Naslov rada na engleskom jeziku: **Abrasion Wear Testing of TiN/TiCN Coatings Deposited on High Alloyed Cold Work Tool Steels**

Opis zadatka:

Postupkom plazmom potpomognutog kemijskog prevlačenja iz parne faze (PACVD) na podlogama od alatnih čelika proizvode se površinski slojevi povišene otpornosti na trošenje. U teorijskom dijelu rada treba opisati dosadašnje spoznaje o utjecaju kemijskog sastava i pripreme podloge od visokolegiranog alatnog čelika na adhezivnost i otpornost na trošenje tvrdih prevlaka TiN i TiCN.

U eksperimentalnom dijelu rada treba planirati i provesti pokuse prevlačenja TiN/TiCN prevlakom na dva alatna čelika za hladni rad različitog kemijskog sastava i različite pripreme površine prije prevlačenja uz dvije različite debljine prevlake. Pokusima abrazijskog trošenja metodom „suhi pijesak/gumeni kotač" treba ustanoviti utjecaj pripreme površine te debljine i adhezivnosti prevlake na otpornost na abrazijsko trošenje ispitivanih čelika.

Navesti u radu korištenu literaturu i stručnu pomoć.

Zadatak zadan: 28. rujna 2017.

Datum predaje rada: 30. studenog 2017.

Predviđeni datum obrane: 6., 7. i 8. prosinca 2017.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ…….. I

POPIS SLIKA…… III

POPIS TABLICA……VI

POPIS OZNAKA…….. VII

SAŽETAK ……VIII

SUMMARY……..IX

1. UVOD…… 1

TEORIJSKI DIO……... 2

2. PACVD POSTUPAK PREVLAČENJA…… 3

2.1 Karakteristike PACVD postupka prevlačenja……. 3

2.2 Priprema površine kod PACVD postupka prevlačenja…… 7

3. METODE ISPITIVANJA PREVLAKA……... 9

3.1 Hrapavost površine…….. 9

3.2 Adhezivnost prevlake……. 14

3.3 Debljina prevlake……18

3.4 Otpornost na abrazijsko trošenje…… 20

3.5 Mikrotvrdoća prevlake…….. 23

EKSPERIMENTALNI DIO…….. 24

4. PLAN ISPITIVANJA…… 25

5. PROVEDBA I REZULTATI ISPITIVANJA…… 29

5.1 Ispitivanje hrapavosti površine……. 29

5.2 Ispitivanje adhezivnosti prevlake…….. 30

5.3 Ispitivanje debljine prevlake…….. 34

5.4 Analiza mikrostrukture uzoraka……. 39

5.5 Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje…….. 42

5.6 Analiza trošenih površina…….. 50

6. ZAKLJUČAK…… 54

LITERATURA……... 56

PRILOZI…… 58

POPIS SLIKA

Slika 1. *PACVD uređaj na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu*..... 5

Slika 2. *Shematski prikaz PACVD uređaja za prevlačenje*..... 6

Slika 3. *Postupak čišćenja uzoraka*..... 8

Slika 4. *Srednje aritmetičko odstupanje profila hrapavosti*..... 10

Slika 5. *Određivanje parametara R_p, R_v, R_z na profilu hrapavosti*..... 11

Slika 6. *Ukupna visina profila Rt*..... 11

Slika 7. *Shematski prikaz rada profilometra*..... 12

Slika 8. *Karakteristične duljine na profilu hrapavosti površine*.....13

Slika 9. *Srednja linija profila hrapavosti površine*..... 13

Slika 10. *Vrste granica između osnovnog materijala i prevlake*..... 14

Slika 11. *Razredi za ocjenjivanje adhezivnosti prema VDI 3198*..... 17

Slika 12. *Kalotester*..... 18

Slika 13. *Shema ispitivanje debljine kalotestom*..... 19

Slika 14. *Određivanje debljine prevlake*..... 19

Slika 15. *Shematski prikaz tribosustava abrazijskog trošenja*..... 20

Slika 16. *Shematski prikaz uređaja „suhi pijesak/gumeni kotač“*..... 21

Slika 17. *Način mjerenja tvrdoće tankih tvrdih prevlaka*..... 23

Slika 18. *Oblik i dimenzije uzoraka*..... 25

Slika 19. *Toplinska obrada ispitnih uzoraka izrađenih od čelika Böhler K110 i K390PM*....26

Slika 20. *Otisak Rockwell-ovog C indentora na uzorku C2 21*..... 30

Slika 21. *Otisak Rockwell-ovog C indentora na uzorku C2 22*……31

Slika 22. *Otisak Rockwell-ovog C indentora na uzorku C2 31*……31

Slika 23. *Otisak Rockwell-ovog C indentora na uzorku C2 32*……31

Slika 24. *Otisak Rockwell-ovog C indentora na uzorku D2 21*……32

Slika 25. *Otisak Rockwell-ovog C indentora na uzorku D2 22*……32

Slika 26. *Otisak Rockwell-ovog C indentora na uzorku D2 31*……33

Slika 27. *Otisak Rockwell-ovog C indentora na uzorku D2 32*……33

Slika 28. *Otisak kalote na uzorku C2 21*……35

Slika 29. *Otisak kalote na uzorku C2 22*……35

Slika 30. *Otisak kalote na uzorku C2 31*……36

Slika 31. *Otisak kalote na uzorku C2 32*……36

Slika 32. *Otisak kalote na uzorku D2 21*……37

Slika 33. *Otisak kalote na uzorku D2 22*……37

Slika 34. *Otisak kalote na uzorku D2 31*……38

Slika 35. *Otisak kalote na uzorku D2 32*……38

Slika 36. *Usporedba debljine TiCN prevlaka na različitim uzorcima*……39

Slika 37. *Mikrostruktura ruba uzorka iz razreda C s osnovnim materijalom čelik Böhler K390PM*……40

Slika 38. *Mikrostruktura sredine uzorka iz razreda D s osnovnim materijalom čelik Böhler K110*……41

Slika 39. *Mikrostruktura ruba uzorka iz razreda D s osnovnim materijalom čelik Böhler K110*……41

Slika 40. *Zaobljeni kvarcni pijesak*……43

Slika 41. *Utjecaj debljine TiCN prevlake na čeliku Böhler K390PM s brušenim stanjem površine na otpornost abrazijskom trošenju*…… 45

Slika 42. *Utjecaj debljine TiCN prevlake na čeliku Böhler K390PM s brušenim stanjem površine na otpornost abrazijskom trošenju*…… 45

Slika 43. *Utjecaj debljine TiCN prevlake na čeliku Böhler K390PM s brušenim stanjem površine na otpornost abrazijskom trošenju*…… 46

Slika 44. *Utjecaj debljine TiCN prevlake na čeliku Böhler K390PM s brušenim stanjem površine na otpornost abrazijskom trošenju*…… 46

Slika 45. *Ukupni gubitak mase nakon 500 okretaja trošenja abrazijom različitih debljina TiCN prevlake i hrapavosti površine na čeliku Böhler K390PM*…… 47

Slika 46. *Ukupni gubitak mase nakon 500 okretaja trošenja abrazijom različitih debljina TiCN prevlake i hrapavosti površine na čeliku Böhler K390PM*…… 48

Slika 47. *Usporedba ukupnih gubitaka mase nakon 500 okretaja trošenja abrazijom različitih debljina TiCN prevlaka i hrapavosti površina na različitim čelicima*…… 48

Slika 48. *Stereomikroskopske slike istrošenih površina uzoraka od čelika Böhler K390PM s brušenim stanjem površine nakon 500 okretaja*……50

Slika 49. *Stereomikroskopske slike istrošenih površina uzoraka od čelika Böhler K390PM s poliranim stanjem površine nakon 500 okretaja*…….. 51

Slika 50. *Stereomikroskopske slike istrošenih površina uzoraka od čelika Böhler K110 s brušenim stanjem površine nakon 500 okretaja*……... 52

Slika 51. *Stereomikroskopske slike istrošenih površina uzoraka od čelika Böhler K110 s poliranim stanjem površine nakon 500 okretaja*…….. 53

POPIS TABLICA

Tablica 1. *Usporedba postupka prevlačenja iz parne faze*…… 6

Tablica 2. *Značajke varijanti postupka metode „suhi pijesak/gumeni kotač“*…… 22

Tablica 3. *Uzorci s čelikom Böhler K390 PM kao osnovnim materijalom u ispitivanju*…….28

Tablica 4. *Uzorci s čelikom Böhler K110 kao osnovnim materijalom u ispitivanju*……28

Tablica 5. *Rezultati mjerenja hrapavosti pertometrom za uzorke s osnovnim materijalom čelik Böhler K390 PM*…… 29

Tablica 6. *Rezultati mjerenja hrapavosti pertometrom za uzorke s osnovnim materijalom čelik Böhler K110*…… 30

Tablica 7. *Rezultati prosječnih debljina prevlaka*……34

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje
$\bar{E}_d$	µm	srednja vrijednost debljine prevlake
CVD		kemijsko prevlačenje iz parne faze
D	µm	promjer vanjskog prstena
d	µm	promjer unutarnjeg prstena
D'	mm	promjer kuglice
E_d	µm	debljina prevlake
F	N	sila
HRC		tvrdoća po Rockwellu C
l_n	mm	duljina vrednovanja
l_r	mm	referentna duljina
l_t	mm	duljina ispitivanja
m	g	masa
PACVD		plazma potpomognuto kemijsko prevlačenje iz parne faze
PVD		fizikalno prevlačenje iz parne faze
R	mm	promjer kuglice
R_a	µm	srednje aritmetičko odstupanje profila
R_{a}	µm	srednje aritmetičko odstupanje mjerenog profila
R_{max}		najveća visina neravnina profila
R_p	µm	najveća visina vrha profila
R_t	µm	ukupna visina profila
R_z	µm	najveća visina profila
T	°C	temperatura
TiC		titanov karbid
TiCN		titanov karbonitrid
TiN		titanov nitrid
v	m/s	brzina
v_a	m/s	brzina abraziva
X	µm	duljina po osi x
Y	µm	duljina po osi y
$\Delta\, m_{\mathrm{cum}}$	g	srednji kumulativni gubitak mase
$\Delta\, m_{\mathrm{sr}}$	g	srednji gubitak mase
σ		standardna devijacija

SAŽETAK

U radu je opisan PACVD postupak prevlačenja i mogućnost povećanja otpornosti na abrazijsko trošenje visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad. Korištena je TiCN prevlaka koja se nanosila na osnovni materijal izrađen od čelika Böhler K110 (EN X155CrVMo12-1), odnosno Böhler K390PM dobiven metalurgijom praha. Opisan je postupak ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje metodom "suhi pijesak/gumeni kotač" kako bi se utvrdio utjecaj osnovnog materijala, pripreme površine i debljine prevlake na otpornost abrazijskom trošenju. Uz ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje, ispitavala se i hrapavost površine uzoraka pertometrom, debljina nanesenih prevlaka kalotestom te adhezivnost prevlake na tvrdomjeru Rockwell C. Tragovi trošenja na ispitnim uzorcima su analizirani na stereomikroskopu dok je njihova mikrostruktura analizirana na svjetlosnom mikroskopu. Ispitivanja su pokazala dobru adhezivnost TiCN prevlake na oba osnovna materijala, kao i najveći utjecaj vrste osnovnog materijala i debljine prevlake na otpornost abrazijskom trošenju.

Ključne riječi: PACVD, abrazija, TiCN, adhezivnost prevlake, debljina prevlake, hrapavost površine

SUMMARY

In this work PACVD (Plasma-Assisted Chemical Vapour Deposition) procedure is described, as well as the possibilities of improving resistance to abrasive wear of high-alloyed cold work steels. Böhler K110 (EN X155CrVMo12-1) and Böhler K390MC steels are applied as the base for TiCN coating. The procedure of examining abrasive wear resistance via "dry sand-rubber wheel" method is described. The purpose of examining abrasive wear resistance is to determine connection between base material, surface preparation, coating thickness and abrasive wear resistance of high-alloyed cold work steels. Along with method "dry sand-rubber wheel", surface rougness via perthometer, coating thickness via Calotest and coating adhesion via Rockwell C hardness tester are also examined. The surfaces of worn samples are analyzed using a stereo microscope while their microstructure is analyzed using an optical microscope. Tests showed good adhesion of TiCN coating on both base materials. Type of material applied as base for TiCN coating and coating thickness showed as most important contributors to the abrasive wear resistance.

Key words: PACVD, abrasion, TiCN, coating adhesion, coating thickness, surface rougness

1. UVOD

Inženjerstvo površina posljednjih godina dobiva sve veći zamah u primjeni u poboljšavanju svojstava strojnih dijelova. Razlog tomu je potreba za što većom trajnosti proizvoda koja se ne može postići samo konstrukcijom proizvoda ili proizvodnim postupcima. Osim trajnosti, inženjerstvom površina se mogu poboljšati i neka druga svojstva po potrebi kao što su koeficijent trenja ili toplinska vodljivost, mogu se dobiti svojstva koja je nemoguće dobiti običnim izborom materijala, a može se i primijeniti u estetske svrhe.

Inženjerstvo površina se dijeli na postupke modificiranja i postupke prevlačenja. Kod postupaka modificiranja debljina osnovnog materijala ostaje ista dok se mijenjaju svojstva površine npr. difuzijom elemenata koji se koriste pri određenom postupku modificiranja površine. Za razliku od modificiranja, kod prevlačenja se na osnovni materijal nanosi prevlaka određene debljine koja mu mijenja dimenzije, ali u većini slučajeva služi kao zaštitni sloj djelujući u tom pogledu bolje od modificiranih slojeva.

Razvijeni su brojni načini nanašanja slojeva prevlake na osnovni materijal, a najpoznatiji među njima su kemijsko prevlačenje iz parne faze (eng. *Chemical Vapor Deposition, CVD postupak*), fizikalno prevlačenje iz parne faze (eng. *Physical Vapor Deposition, PVD postupak*) te noviji plazma potpomognuto kemijsko prevlačenje iz parne faze (eng. *Plasma-assisted CVD, PACVD postupak*).

Radi isprepletenosti raznih utjecaja na djelotvornost nanesene prevlake, nastoji se različitim ispitivanjima doći do zaključaka kako koji parametar utječe na kvalitetu nanesene prevlake. Jedan od čestih načina ispitivanja djelotvornosti prevlaka nanesenih na alate za hladni rad je ispitivanje otpornosti na abraziju. Naravno, potrebno je ispitati i adhezivnost prevlake na osnovni materijal kao jedan od osnovnih uvjeta da bi se prevlaka uopće mogla smatrati prikladnom.

U radu će se promatrati utjecaj hrapavosti površine i debljine prevlake na otpornost abrazijskom trošenju dvaju različitih visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad.

TEORIJSKI DIO

2. PACVD POSTUPAK PREVLAČENJA

2.1 Karakteristike PACVD postupka prevlačenja

Zadnjih godina je primjetan razvoj i primjena postupaka prevlačenja iz parne faze (eng. *vapour deposition*) kojima je osnovni cilj povećanje otpornosti na trošenje prevučenog strojnog dijela. Uz povećanja otpornosti na trošenje, dodatno se povećavaju kemijska i korozijska postojanost, otpornost na visokotemperaturnu oksidaciju, kao i otpornost na visokotemperaturnu oksidaciju. Cijeli proces se temelji na taloženju sloja različitog sastava u odnosu na osnovni materijal na koji se nanosi. Za razliku od procesa modificiranja u kojem debljina osnovnog materijala ostaje jednaka, kod postupaka prevlačenja dolazi do promjene debljine upravo za debljinu nanešene prevlake. Prevlake koje se danas najčešće nanašaju u procesima prevlačenja mogu biti spojevi oksidne keramike (Al_2O_3, ZrO_2, TiO_2,…), neoksidne keramike (TiC, TiN, TiCN, B_4C,…), metaloorganskih spojeva Me:CH ($W_{97}C_3$,…) te dijamantu sličnog ugljika (eng. *DLC – Diamond Like Carbon*) [1].

Postoje različite metode nanašanja slojeva prevlake na osnovni materijal. Najpoznatiji od njih su kemijsko prevlačenje iz parne faze (eng. *Chemical Vapor Deposition*, CVD postupak), fizikalno prevlačenje iz parne faze (eng. *Physical Vapor Deposition*, PVD postupak) te plazma potpomognuto kemijsko prevlačenje iz parne faze (eng. *Plasma-assisted CVD*, PACVD postupak) koji danas nalazi sve veću primjenu u postupcima prevlačenja i tako istiskuje iz uporabe CVD i PVD postupak prevlačenja.

Razlog sve veće primjene PACVD postupka prevlačenja danas je u tome što on omogućava izbjegavanje nedostataka koje ima CVD, odnosno PVD postupak prevlačenja. Kod CVD postupka prevlačenja glavni nedostatak je visoka temperatura (800 – 1000°C) procesa. Temperature procesa su znatno više od svih temperatura popuštanja, a radi nužnosti i sporog hlađenja nakon provedbe postupka, prevučeni čelici se ne mogu dovesti u optimalno zakaljeno stanje te je potrebna naknadna toplinska obrada kaljenja i popuštanja što samo dovodi do kompliciranosti, ali i povećanja troškova samog postupka. Ako još uzmemo u obzir da će svakom toplinskom obradom doći i do promjena dimenzija prevučenog dijela te da su nanešene prevlake osjetljive na oksidaciju, prilično je jasno zašto se danas CVD postupak prevlačenja uglavnom koristi za prevlačenje keramike i tvrdih metala.

PVD postupak prevlačenja za razliku od CVD postupka se odvija na znatno nižim temperaturama (150-500°C). Upravo radi niskih temperatura procesa ne dolazi do faznih transformacija u čeliku te se tako PVD postupak prevlačenja može provoditi nakon što je provedena adekvatna toplinska obrada čelika, ali zato PVD postupak prevlačenja zahtijeva pomicanje i zakretanje alata tijekom procesa radi ostvarenja linije vidljivosti (eng. *line of sight*) [2]. Ponekad radi same konstrukcije alata nije moguće pomicanjem i zakretanjem istog postići njegovu cjelovitu prevučenost što predstavlja veliki nedostatak kod PVD postupka prevlačenja.

PACVD postupak prevlačenja nastoji izbjeći već spomenute glavne nedostatke CVD, odnosno PVD postupka prevlačenja. Iako je u početku nastajanja postupka bilo problema s postizanjem dobre prionjivosti PACVD prevlaka na čelik, postupnim razvojem samog postupka došlo se i do rješenja tog problema postizanjem temperature osnovnog materijala između 480 i 550°C [3]. Uz to, ključ dobre adhezivnosti prevlake leži u temeljitom čišćenju površine osnovnog materijala. Razlog tome je cilj dobivanja najjače moguće veze između osnovnog materijala i prevlake, a to se može postići samo vrlo visokom čistoćom osnovnog materijala prije postupka prevlačenja. Dobivanje zadovoljavajuće čiste površine osnovnog materijala je ostvarivo prikladnim čišćenjem, a potom i kemijskim plazma čišćenjem u kombinaciji s fizikalnim uklanjanjem kontaminacija raspršivanjem teškim ionima [3].

Neke prednosti PACVD postupka prevlačenja u odnosu na ostale su sljedeći [4]:

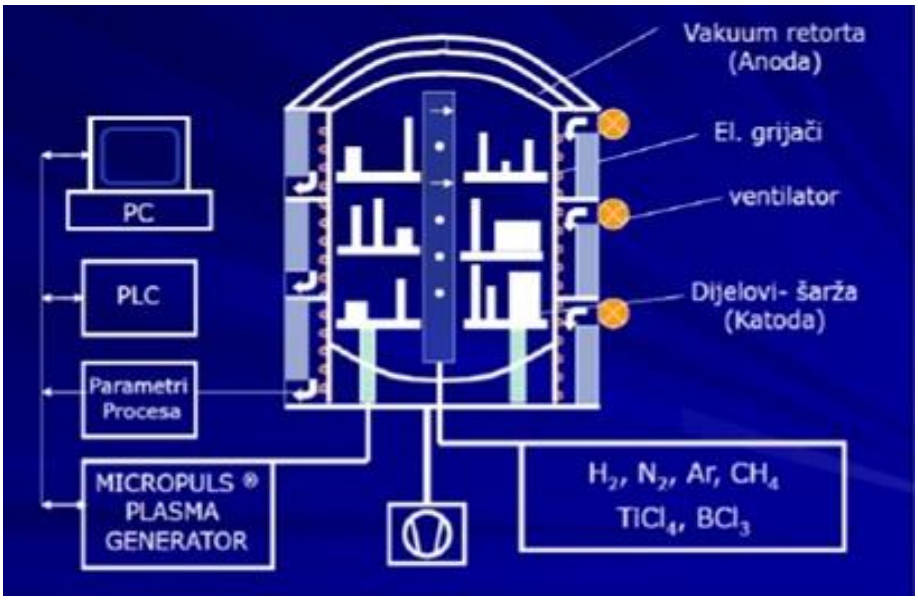
- nema promjena dimenzija obratka,
- niske temperature procesa,
- prikladnost za masivne predmete kompliciranog oblika,
- ekonomičnost postupka,
- nema emisije štetnih tvari,
- efekt samočišćenja površine,
- velika ponovljivost procesa.

Vidljivo je iz nabrojanog kako je značajna prednost PACVD postupka prevlačenja u odnosu na CVD postupak niska temperatura prevlačenja dok u odnosu na PVD postupak se ne zahtijeva zakretanje i pomicanje obradaka jer nema problema linije vidljivosti te se također mogu prevući obratci bilo koje geometrije.

PACVD uređaj se sastoji od vakuumske komore s grijačima, vakuumske pumpe, sustava za dobavu plinova (N_2, Ar, H_2, CH_4) i prekursora ($TiCl_4$, BCl_3), generatora plazme, sustava za neutralizaciju nusprodukata prevlačenja te PLC regulacijskog sustava [3]. Plazma, pomoću koje se i odvija sami postupak prevlačenja, moguće je aktivirati pulsiranjem istosmjerne (DC) ili izmjenične struje (AC), mikrovalnom (MW) pobudom, izbojima radio frekvencije (RF) itd. Pulsirajući DC (eng. *direct current*) plazma CVD postupak prevlačenja dijeli istosmjerni napon na kontrolirane pulsirajuće intervale i intervale pauze. Pulsirajući intervali stvaraju plazmu koja omogućuje prevlačenje te je podešavanjem trajanja pulsirajućih intervala i intervala pauze moguće koristiti dovoljno visok napon bez pregrijavanja osnovnog materijala [2]. Cijeli sustav je vođen PLC (programibilni logički kontroler) uređajima i računalnim programskim sustavom Simens Simatic i upravljačkim programskim sustavom PACVD uređaja [5]. Na slici 1. se nalazi PACVD uređaj koji se nalazi na Fakultetu strojarstva i brodogradnje na Katedri za toplinsku obradu i inženjerstvo površina dok se na slici 2. nalazi shema PACVD uređaja.



Slika 1. *PACVD uređaj na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu*



Slika 2. *Shematski prikaz PACVD uređaja za prevlačenje* [1]

Kako bi se dobila najbolja usporedba postupaka prevlačenja spomenutih u ovom poglavlju, u tablici 1. će biti prikazana njihova glavna obilježja.

Tablica 1. *Usporedba postupka prevlačenja iz parne faze* [2]

Karakteristika/proces	CVD	PVD	PACVD
Temperatura procesa (°C)	800 - 1000	200 - 500	470 - 580
Kaljenje poslije prevlačenja	potrebno	ne	ne
Potreba za linijom vidljivosti	ne	da	ne
Pomicanje šarže	ne	potrebno	ne
Kvaliteta površine obratka	gruba	glatka	vrlo glatka
Poliranje poslije prevlačenja	potrebno	ovisno	ne
Dupleks proces	ne	ne	moguće
Prionjivost na tvrde metale	vrlo dobra	vrlo dobra	prosječna
Troškovi održavanja	niski	vrlo visoki	niski
Troškovi procesa	niski	visoki	niski
Troškovi ulaganja	niski	visoki	prosječni

Baveći se primjenom prevlaka dobivenih inženjerstvom površina, bitno je razmatrati i ekonomski aspekt postupka prevlačenja. U pravilu, ekonomske prednosti PACVD postupka prevlačenja mogu biti vrlo velike. Primjerice, postupkom PACVD prevlačenja može se značajno produljiti očekivani vijek trajanja određenih strojnih dijelova pritom tvoreći značajne uštede. Još se poboljšavaju otpornost na trošenje, kvaliteta, preciznost kao i manje vrijeme zastoja u nekim proizvodnim linijama dok se čeka na izradu skupih zamjenskih strojnih dijelova [5].

PACVD postupak prevlačenja kao i drugi postupci prevlačenja ima određene parametre koji utječu na sami postupak. To su:

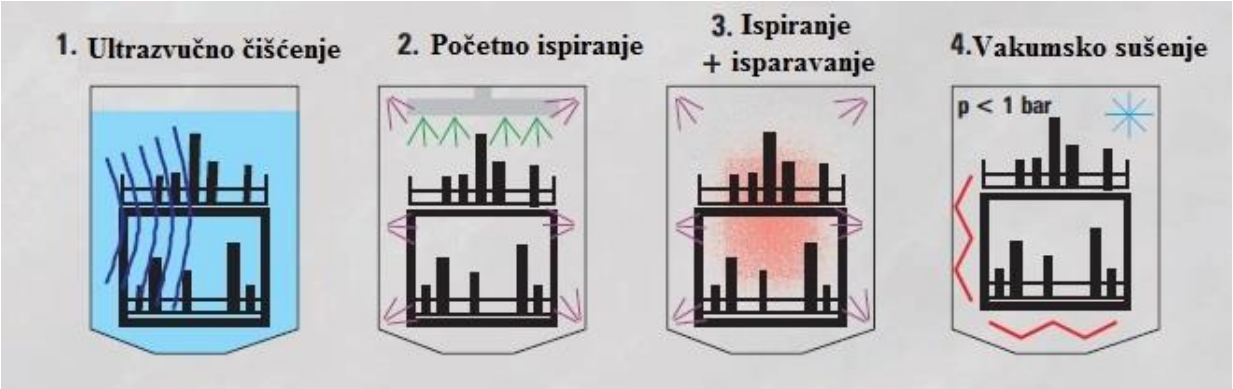
- tlak: 10^{-3} Pa; 10 – 1000 Pa,
- temperatura: 300°C; 500 – 600°C,
- napajanje generatora plazme: istosmjerna ili izmjenična struja različitih frekvencija,
- debljina sloja prevlake: 1 – 10 μm,
- vrsta nanesenog sloja: TiN, TiC, TiCN, TiAlN, Al_2O_3,…
- reakcijski plinovi: N_2, H_2, Ar, CH_4, $TiCl_4$,…

1.2 Priprema površine prije PACVD prevlačenja

Priprema površine osnovnog materijala je prvi, a ujedno i najvažniji korak prilikom nanošenja prevlake PACVD postupkom. Sama učinkovitost nanešene prevlake značajno ovisi o njenoj sposobnosti da se na odgovarajući način veže na osnovni materijal. Može se reći kako je dobro izvedena priprema površine osnovnog materijala najbitniji čimbenik koji utječe na cjelokupna svojstva prevlake. Samo mala prisutnost nečistoća na površini osnovnog materijala kao što su ulje, masnoće i oksidi mogu fizički smanjiti adhezivnost prevlake na osnovni materijal. Razlog tome leži u činjenici da nečistoće smanjuju površinsku napetost koja je ključna za dobru adhezivnost prevlake [6]. Kemijski uključci koji nisu lako primjetni kao što su kloridi i sulfati privlače vlagu kroz prevlaku što rezultira njenom manjom učinkovitošću [7].

Prije nanašanja prevlake na osnovni materijal, najčešće se koristi mehaničko čišćenje površine kao što su brušenje, poliranje, pjeskarenje, honanje, lepanje, superfiniš itd. Naravno, sama mehanička obrada površine nije dovoljna već je potrebno i njeno odmašćivanje i čišćenje. Najčešće se čišćenje provodi u ultrazvučnoj kupci koja je napunjena alkoholom koji će

poslužiti kao sredstvo za čišćenje. Na slici 3. će biti prikazan jedan od postupaka čišćenja uzoraka prije nanašanja prevlake koja se sastoji od 4 koraka. Prvi korak je ultrazvučno čišćenje nakon kojeg se provodi početno ispiranje. Treći korak uključuje samo ispiranje zajedno s isparavanjem nakon kojeg slijedi zadnji, četvrti korak, a to je vakumsko sušenje.



Slika 3. *Postupak čišćenja uzoraka* [6]

Sami cilj cijelog postupka čišćenja je ukloniti čestice abrazive s površine kao što su zrnca brusnog papira ili pijeska, ali i paste za poliranje. Nakon svega kako bi se osigurali što bolji uvjeti za nanašanje prevlake, provodi se ionsko čišćenje površine otprašivanjem (eng. *sputtering*). Otprašivanjem se nastoje ukloniti adsorbirani plinovi koji su potencijalno ostali na površini osnovnog materijala, ali i oksidni slojevi koji značajno otežavaju dobru prionjivost prevlake. Često će nakon otprašivanja na površini nastati neravnine koje će samo pripomoći boljem vezanju prevlake na osnovni materijal.

Nakon svake pripreme površine treba se provesti kontrola kako bi se utvrdilo jesu li pripremane površine spremne za prevlačenje. Obično se to provodi vizualnim pregledom, površinskim mjeračem ili trakama koje provjeravaju da površina nije preglatka ili prehrapava za prevlaku koja će se nanositi [7].

3. METODE ISPITIVANJA PREVLAKA

3.1 Hrapavost površine

Hrapavost površine je mikrogeometrijska nepravilnost površine koja nastaje tijekom postupka obrade ili drugih utjecaja, a ujedno je i mjera za teksturu površine. Hrapavost površine u određenim slučajevima bitno utječe na radna svojstva strojnih dijelova, posebno na mjestima međusobnog spoja pojedinih elemenata [8].

Hrapavost površine utječe na dinamičku čvrstoću, otpornost na koroziju, sposobnost nalijeganja, prijenos topline itd. Iako je u većini slučajeva poželjna što manja hrapavost površine koja tako povisuje cijenu izrađenog strojnog dijela radi obično duljih i skupljih postupaka obrade, postoje slučajevi u kojima veća hrapavost površine bitno ne utječe na svojstva dijela ili naprotiv, poboljšava svojstva strojnih dijelova.

Tekstura površine se odnosi na fine nepravilnosti u koje spadaju brjegovi i dolovi, a dobiveni su na površini putem postupka oblikovanja. Hrapavost i valovitost predstavljaju dvije najbitnije komponente teksture površine, a predstavljaju odstupanja koja su kraćih valnih duljina od odstupanja od oblika koja uključuje komponente teksture i ostale nepravilnosti te tako spadaju u topografiju površine [9].

Parametri hrapavosti površine se definiraju i računaju ovisno o vrsti profila. Tako se razlikuju tri vrste parametara koji se označavaju na sljedeći način:

- R – parametar hrapavosti profila,
- W – parametar valovitosti profila,
- P – parametar primarnog profila.

Kod 2D mjernih sustava postoje sljedeći parametri:

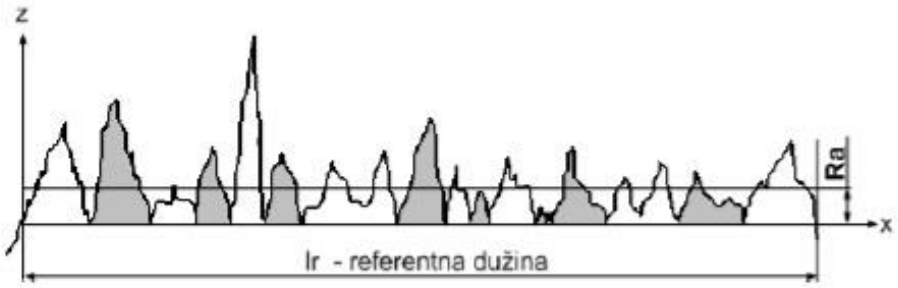
- amplitudni – opisuju varijacije po visini profila,
- uzdužni – opisuju varijacije uzduž profila,
- hibridni – opisuju varijacije iz kombinacije uzdužnih i amplitudnih karakteristika profila,
- krivuljni i srodni – opisuju varijacije na krivuljama dobivenim iz uzdužnih i amplitudnih karakteristika profila [9].

Kod 3D mjernih sustava postoje sljedeći parametri:

- amplitudni – opisuju varijacije po visini površine,
- prostorne – opisuju varijacije uzduž površine,
- hibridne – opisuju varijacije iz kombinacije uzdužnih i amplitudnih karakteristika površine,
- funkcionalni – opisuju funkcionalna svojstva površine (karakteriziraju svojstva trošenja i podmazivanja); izračunavaju se iz krivulje udjela materijala (Abott – Firestone krivulja),
- parametri značajki – izračunavaju se iz identificiranih značajki na površini, nakon odvajanja površine u motive [9].

Najčešće korišteni parametar za opisivanje hrapavosti površine je amplitudni parametar *Ra*. *Ra* je aritmetička sredina apsolutnih odstupanja profila hrapavosti od srednje linije. Najčešće je naveden kao nadzorni parametar, a ako se njegova vrijednost mijenja, tada se proces njegove kontrole mijenja: brzina, tip alata, posmak, sredstvo za hlađenje. R_a ne daje nikakve informacije o obliku nepravilnosti na površini, a moguće je dobiti slične R_a vrijednosti za različite profile. Upravo iz tog razloga je korisno navesti proces kojim je površina obrađivana [10]. Izraz prema kojem se R_a računa je naveden pod izrazom 1., dok je srednje aritmetičko odstupanje prikazano na slici 4.

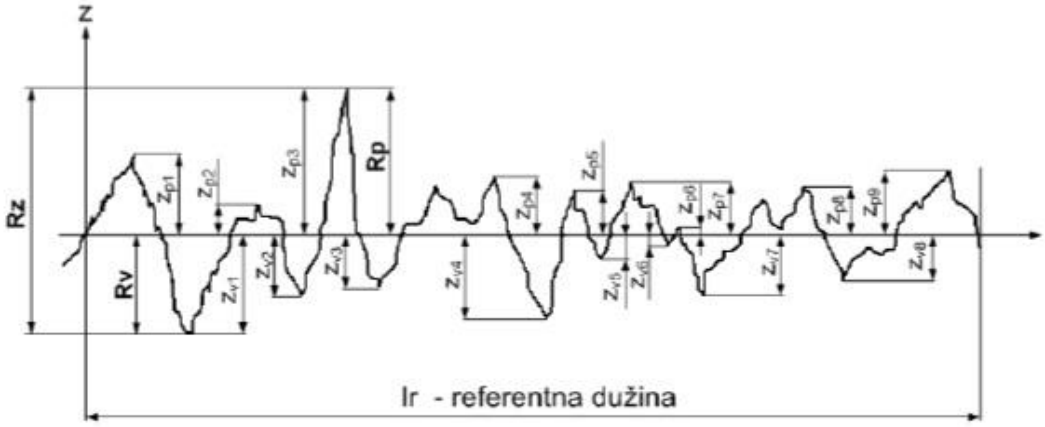
$$Ra = \frac{1}{lr}\oint_0^{br} \mathrm{I}Z(x)\mathrm{I}\mathrm{d}x \qquad (1.)$$



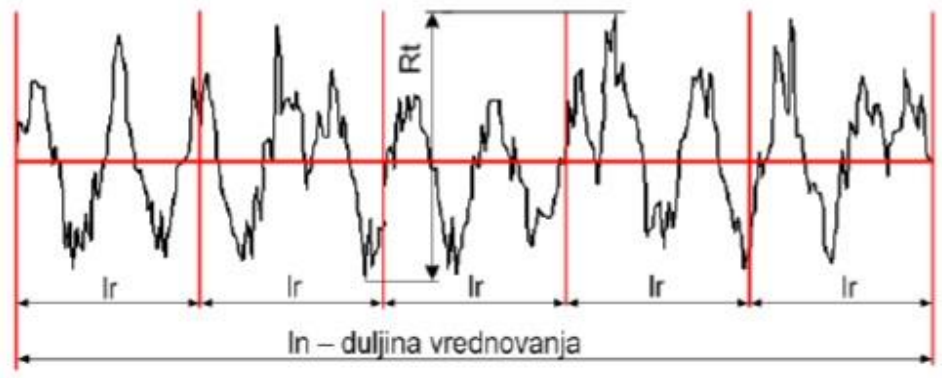
Slika 4. *Srednje aritmetičko odstupanje profila hrapavosti*[10]

Osim *Ra* postoje i drugi amplitudni parametri i drugi amplitudni parametri kao što su:

- *Rp* – najveća visina vrha profila na referentnoj dužini (slika 5.),
- *Rv* – najveća dubina dola profila na referentnoj dužini (slika 5.),
- *Rz* – zbroj *Rp*-a i *Rv*-a, odnosno najveća visina profila unutar referentne dužine (slika 5.),
- *Rt* – ukupna visina profila (zbroj visine najvećeg vrha profila i dubine najnižeg dola profila unutar referentne dužine) prikazana na slici 6.

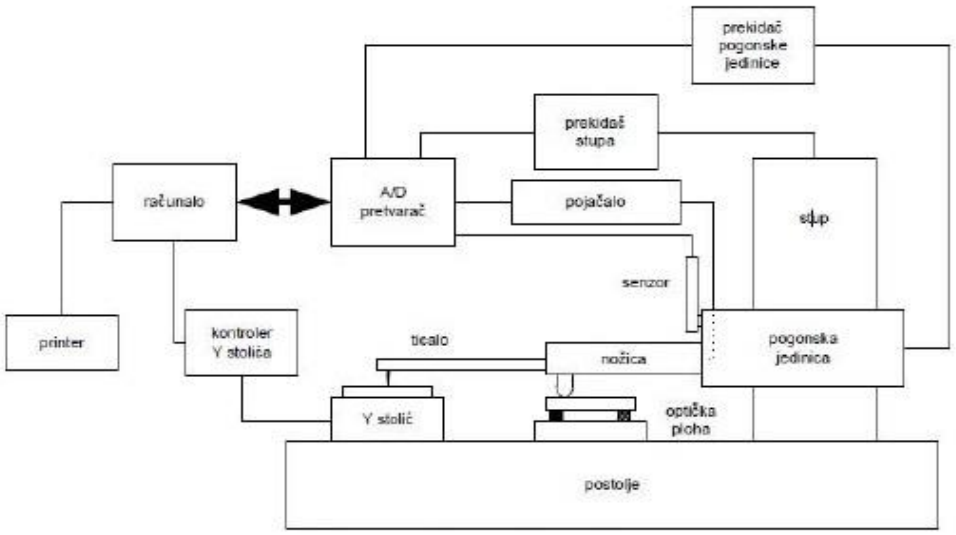


Slika 5. *Određivanje parametara R_p, R_v, R_z na profilu hrapavosti* [10]



Slika 6. *Ukupna visina profila R_t* [10]

Ispitivanjem hrapavosti površine određuje se faktor trenja prevlake. Mjerenje hrapavosti najčešće se izvodi uređajima s ticalom, odnosno profilometrima čija je shema prikazana na slici 7.



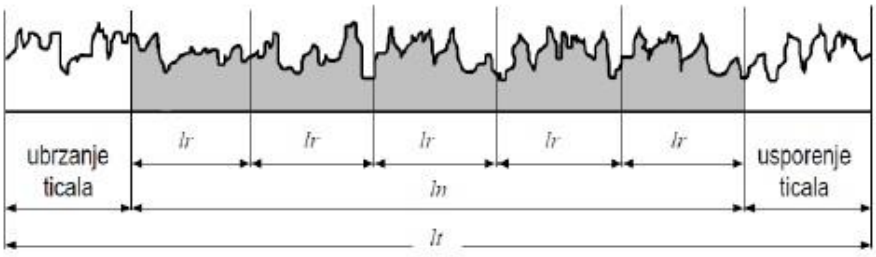
Slika 7. *Shematski prikaz rada profilometra* [11]

Upravljanje je pomoću računala. Step motor ili linearni motor, smješten u pogonskoj jedinici, vrši translaciju u smjeru osi X, a mjerna ravnina se ostvaruje odnosom optičke plohe ispod nožice i Y stolića. Gibanjem ticala po površini, nožica pretvara gibanje u analogni signal koji se pojačava u pojačalu. Signal se digitalizira u A/D pretvaraču i dovodi do računala [11].

Postoje i uređaji s ticalom koji karakteriziraju površinu 2D, odnosno 3D parametrima. Kod 2D parametara ticalo prelazi preko površine u samo jednom smjeru, dok se kod 3D parametara ticalo giba u dva smjera. Logično je zaključiti kako je rezultat 2D karakterizacije linija, odnosno profil površine dok je kod 3D karakterizacije to prostorna tekstura površine [9].

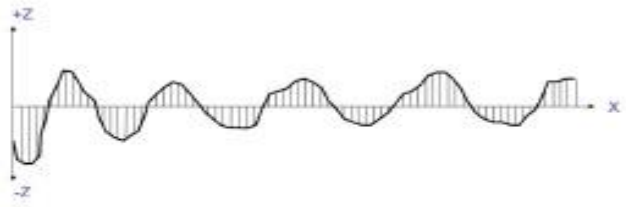
Danas se za mjerenje hrapavosti površine koristi i pertometar, nova generacija mjernih uređaja razvijen od tvrtke Mahr GmbH. Uređajem se analizira hrapavost, oblik i topografija površine, a sastoji se od računala koji povezuje jedinicu s ticalom i pisača za ispisivanje rezultata [11].

Da bi se moglo izvršiti ispitivanje kod 2D profila hrapavosti, potrebno je definirati karakteristične duljine ispitivanja, a to su: duljina ispitivanja *lt*, duljina vrednovanja *ln*, referentna duljina *lr* što je sve prikazano na slici 8.



Slika 8. *Karakteristične duljine na profilu hrapavosti površine* [11]

Da bi se mogli izračunati parametri hrapavosti potrebno je definirati liniju profila koja se definira za primarni profil, profil hrapavosti i profil valovitosti (slika 9.) [9].

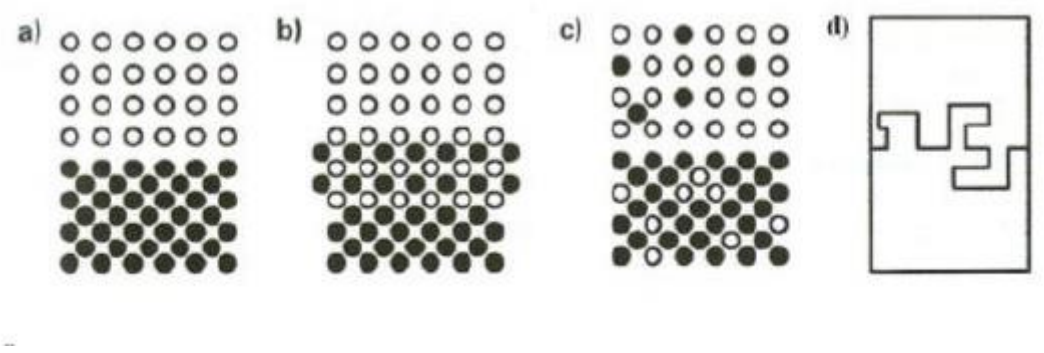


Slika 9. *Srednja linija profila hrapavosti površine* [11]

3.2 Adhezivnost prevlake

Adhezivnost ili prionjivost prevlake definira se kao stanje u kojem se dvije površine različitih materijala drže zajedno uslijed kemijskih ili mehaničkih veza [1]. Za razliku od kohezije koja se odnosi na veze unutar jednog materijala, adhezija se uvijek odnosi na veze između dva različita materijala. U sustavu osnovni materijal/prevlaka, adhezivnost je najvažnije svojstvo jer sva dobra svojstva prevlake (mehanička, tribološka, kemijska) gube smisao ukoliko je prionjivost prevlake na podlogu loša te ukoliko dolazi do ljuštenja iste [12].

Adhezivnost kao svojstvo se može definirati koristeći pristup mehanike loma u kojoj je adhezivnost energija, odnosno međuravninska lomna energija sustava osnovni materijal/prevlaka, potrebna za propagaciju pukotine između dvije ravnine po jediničnoj površini. Ponekad nije sasvim jasno radi li se o međuravninskom lomu ili je stvar kohezivne prirode što dovodi do toga da se lom može dogoditi i u osnovnom materijalu i u prevlaci, a ne samo na njihovoj granici. Ne treba ni naglasiti kako je priroda loma uvjetovana vrstom osnovnog materijala i prevlake koji uzrokuju između njih određene vrste granica [13]. Postoje četiri vrste granica koje su prikazane na slici 10.



Slika 10. *Vrste granica između osnovnog materijala i prevlake* [13]

a) Oštra granica je ona gdje između osnovnog materijala i prevlake postoji jasna granica koja je širine jednog ili dva sloja atoma. Takva granica posljedica je slabih veza između osnovnog materijala i prevlake. Zbog oštrog prijelaza greške su usmjerene na usko područje granice, gradijenti naprezanja su veliki pa je uslijed toga i adhezija slaba. Poboljšanje adhezije u ovom slučaju moguće je ostvariti povećanjem hrapavosti podloge.

b) Granica s nastankom kemijskog spoja je granica koja nastaje kada pri dodiru osnovnog materijala i prevlake dođe do kemijske reakcije i nastanka kemijskog spoja. Nastanak srednjeg međusloja općenito poboljšava adheziju ako je taj sloj dovoljno tanak. Često nastanak srednjeg sloja prati promjene volumena što dovodi do povećanja unutarnjih naprezanja i smanjenja adhezije.

c) Granica s difuzijskim procesom nastaje ukoliko su materijal podloge i prevlake međusobno topivi. Prijelaz iz osnovnog materijala u prevlaku je postupan i adhezija takvog sustava je dobra.

d) Mehanički spoj nastaje kada je površina osnovnog materijala hrapava tako da se prevlaka ispreplete preko površinskih nepravilnosti koje u tom slučaju djeluju kao sidro. Adhezija nije toliko ovisna o kemijskoj kompatibilnosti materijala koliko o topografiji površine.

Osnovni oblici adhezijske veze između supstrata i prevlake su:

- Fundamentalna (osnovna) adhezijska veza – suma svih molekularnih i atomskih veza između prevlake i osnovnog materijala na njihovoj dodirnoj površini.
- Termodinamička adhezijska veza – promjena u slobodnoj energiji pri formiranju ili raskidanju spoja osnovni materijal/prevlaka.
- Praktična adhezijska veza – sila koja je potrebna za odstranjivanje prevlake s osnovnog materijala, bez obzira na početak loma – mjeri se eksperimentalnim postupcima.

Dobra adhezivnost prevlaka je jedan od preduvjeta dobrih svojstava prevlake iz razloga što će zbog slabe adhezivnosti svojstva prevlake biti loša te će doći do njezinog ljuštenja i prekomjernog trošenja što je jedan od najčešćih nedostataka i uzroka loših svojstava prevlaka.

Loša adhezivnost prevlake se očituje stvaranjem pukotina i mjehurića koji uslijed opterećenja propagiraju što zaključno rezultira ljuštenjem prevlake te je jedan od najčešćih uzroka narušavanja integriteta prevlake i uzrok njezinom prekomjernom trošenju. Ljuštenje prevlake nikad nije potpuno i ne pojavljuje se naglo već nastaje kao rezultat postupnog pucanja vezivnih sila između prevlake i osnovnog materijala. Ljuštenje prevlake najprije će se pojaviti na mjestima gdje su zaostala naprezanja najveća kao što su provrti, rubovi ili kutovi.

Adhezivnost prevlake jedno je od najmanje shvaćenih svojstava zbog svoje kompleksnosti koje uključuje velik broj različitih čimbenika i njihovu međusobnu interakciju (elektrostatske sile, difuzija, kemijsko i mehaničko vezivanje, itd.) [2]. Na adhezivnost, a samim time i na svojstva prevlake utječe osnovni materijal. Za dobru adhezivnost prevlake nužna je kvalitetna predobrada površine, njezina čistoća i u mnogim slučajevima potporni međusloj. Pored mehaničkog i kemijskog čišćenja površine, prije nanošenja same prevlake se uobičajeno provodi ionsko čišćenje površine otprašivanjem (eng. *sputtering*) [2].

Iako mehaničko i ionsko čišćenje površine otprašivanjem mogu uzrokovati neravnine na površini koje mogu poboljšati adheziju prevlake zbog stvaranja mehaničkih veza s osnovnim materijalom, različite nepravilnosti i nečistoće mogu uzrokovati lokalni porast naprezanja [14]. Previsoka zaostala naprezanja tlačna naprezanja u prevlaci loše utječu na njezinu adhezivnost, a ostali faktori koji imaju utjecaj na adhezivnost prevlake su razlike u kristalnoj strukturi i koeficijentu toplinskog rastezanja prevlake i osnovnog materijala.

Prije samog prevlačenja nužno je prilagoditi tehnologiju osnovne toplinske obrade osnovnog materijala i naknadnog modificiranja i/ili prevlačenja površinskog sloja. Kako bi se optimirala adhezivnost prevlake, koriste se sljedeće metode [13]:

- priprema površine prije nanošenja prevlake – mehaničko i kemijsko čišćenje površine uz adekvatnu hrapavost,
- primjena višeslojnih prevlaka – smanjenje gradijenta naprezanja na sučelju supstrata i prevlake,
- preobrada prije nanošenja prevlake – nanošenje međusloja između osnovnog materijala i prevlake ili promjena kemijskog sastava i strukture površinskog sloja osnovnog materijala bez promjene u jezgri.

Jedna od metoda ispitivanja adhezivnosti prevlake je Rockwellova metoda utiskivanja indentora prema VDI 3198. Uobičajena metoda mjerenja tvrdoće prema Rockwell-u (HRC) koristi se za jednostavnu procjenu adhezivnosti prevlaka zbog svoje brzine i jednostavnosti mjerenja. Metoda HRC se temelji na utiskivanju dijamantnog indentora u obliku stošca sa vršnim kutem 120° i radijusa zaobljena 0,2 mm opterećenjem od 1471 N u površinu uzorka. Prodiranje indentora uzrokuje velike plastične deformacije osnovnog materijala te lomi i prevlaku. 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 [2].

Adhezivnost prevlake podijeljena je u šest razreda (slika 11.) prema teksturi oštećenja oko ruba otiska [13]:

HF1 – mali broj pukotina,

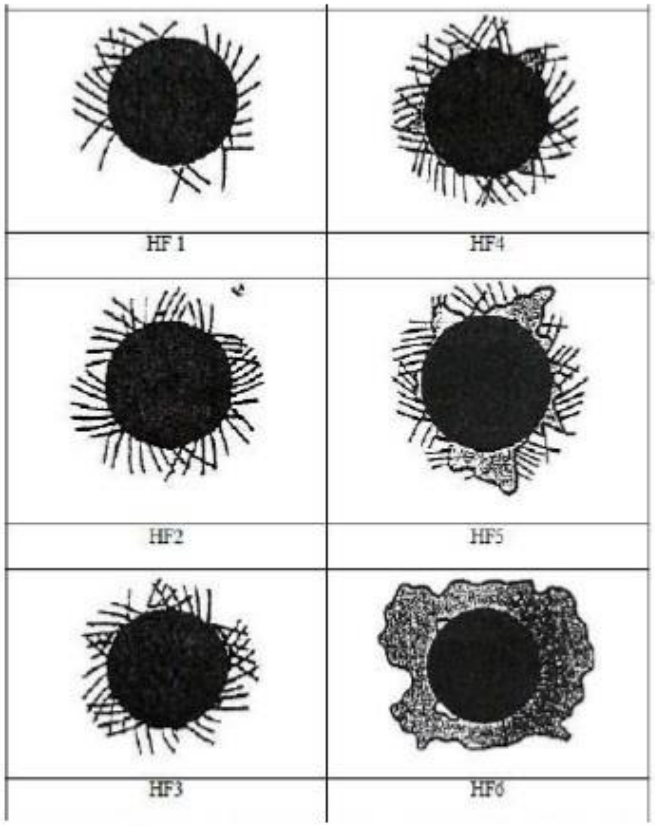
HF2 – veći broj pukotina, bez ljuštenja,

HF3 – pukotine uz slabo ljuštenje,

HF4 – pukotine uz djelomično ljuštenje,

HF5 – pukotine uz prevladavajuće ljuštenje,

HF6 – potpuno ljuštenje prevlake.



Slika 11. *Razredi za ocjenjivanje adhezivnosti prema VDI 3198* [13]

3.3 Debljina prevlake

Debljina prevlake ima značajan utjecaj na njezina svojstva. Najpoznatija metoda ispitivanje debljine prevlake je utiskivanjem 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 s prevlakom. Sila je određena masom kuglice. Položaj kuglice, koja rotira zadanom brzinom i uz prisustvo abraziva pomoću kojeg prodire u prevlaku i supstrat, u odnosu na uzorak i kontaktno opterećenje su konstantni. Cilj metode je stvaranje kratera u obliku kalote na uzorku te se postupak provodi dok kuglica ne probije prevlaku. Optičkom mjernom opremom se vrši mjerenje otiska, a preciznost postupka ovisi o hrapavosti površine, kontrastu slojeva i optičkoj opremi za mjerenje otiska na površini uzorka [2]. Debljina prevlake se računa prema izrazima 2. i 3. :

$$E_d = \frac{X \text{ x } Y}{D'} \quad [\mu\text{m}] \tag{2.}$$

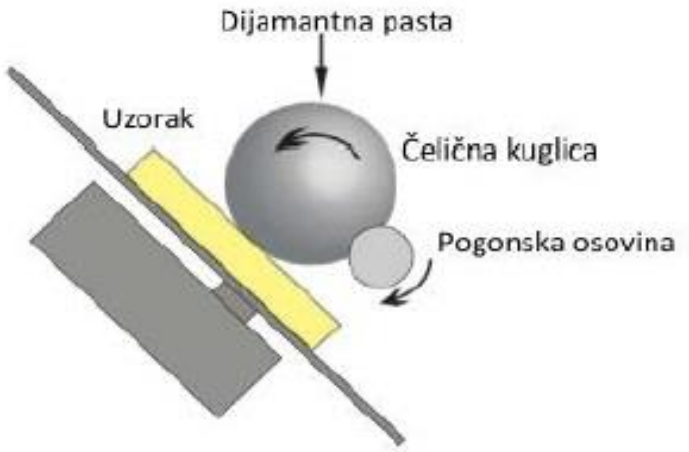
$$E_d = \frac{D^2 - d^2}{2R} \quad [\mu\text{m}] \tag{3.}$$

Kod izraza 2. E_d predstavlja debljinu prevlake, X debljinu vanjskog prstena, Y udaljenost između vanjskog i unutarnjeg prstena, a D' promjer kuglice. Kod izraza 3. D predstavlja promjer vanjskog prstena, d promjer unutarnjeg prstena, a R promjer kuglice.

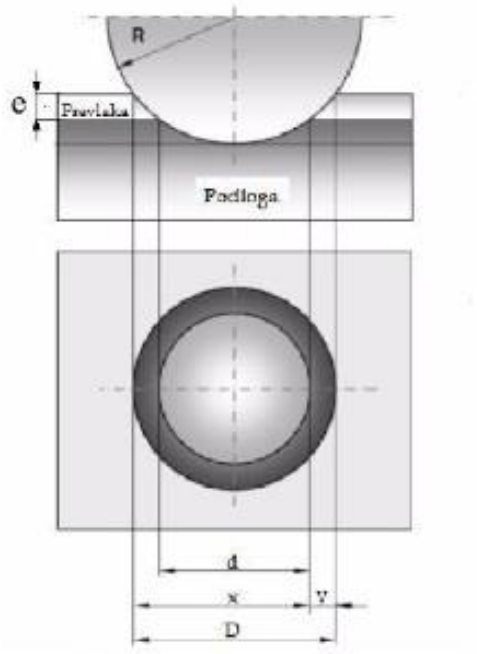
Na slici 12. je prikazan sam kalotester, a na slikama 13. i 14. su prikazani shema ispitivanja debljine kalotestom, odnosno samo određivanje debljine prevlake.



Slika 12. *Kalotester*



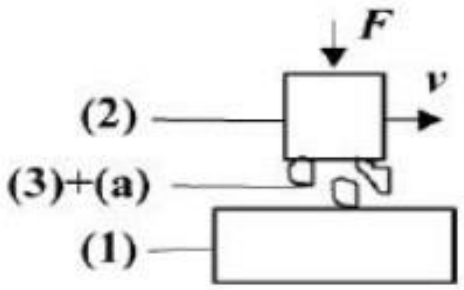
Slika 13. *Shema ispitivanje debljine kalotestom* [15]



Slika 14. *Određivanje debljine prevlake* [15]

3.4 Otpornost na abrazijsko trošenje

Abrazijsko trošenje je istiskivanje materijala izazvano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Karakteristika ovog trošenja je prisustvo tvrdih abrazivnih čestica uglavnom mineralnog podrijetla pa se ponekad naziva i mineralno trošenje. Na slici 15. prikazan je shematski prikaz tribosustava abrazijskog trošenja.



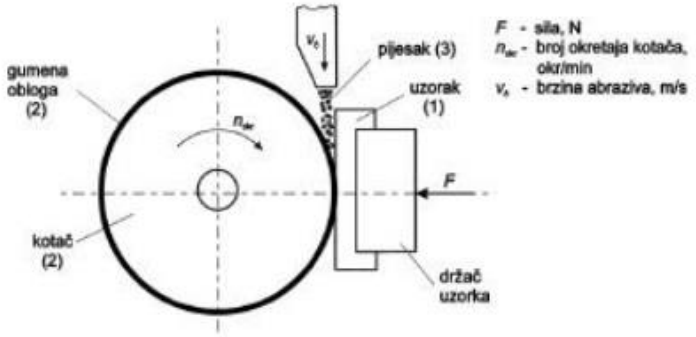
Slika 15. *Shematski prikaz tribosustava abrazijskog trošenja* [15]; gdje je: (1) – funkcionalni dio, (2) – funkcionalni dio, (3) međusredstvo (mazivo), (a) – abraziv, F – sila, v – brzina

Relativno gibanje se može opisati kao klizanje. Stupanj opasnosti od pojedinih mehanizama trošenja:

- abrazija – jako visoki;
- umor površine – niski;
- tribokorozija – najniži.

Tribološke mjere za izbjegavanje abrazijskog trošenja se sastoje od eliminacije abraziva iz tribosustava ako je to moguće ili izbora odgovarajućeg materijala, odnosno primjena postupka zaštite površine bilo modificiranjem bilo prevlačenjem.

Razvijene su brojne metode ispitivanja otpornosti materijala na abrazijsko trošenje. Ona koja je posebno zanimljiva za ovaj rad je „suhi pijesak/gumeni kotač“ (eng. dry sand/rubber wheel) prema normi ASTM G-65. Shematski prikaz uređaja „suhi pijesak/gumeni kotač“ je prikazan na slici 16.



Slika 16. *Shematski prikaz uređaja „suhi pijesak/gumeni kotač“* [15]

Metoda „suhi pijesak/gumeni kotač“ se sastoji od trošenja površine ispitivanog uzorka abrazivnim česticama pijeska određene veličine zrna i pod određenim pritiskom na mjestu dodira epruvete i gumenog kotača. Svrha i prednost ove metode je točno provođenje ispitivanja u određenim uvjetima pa su rezultati dobiveni ovom metodom univerzalni i međusobno usporedivi [17].

Za precizno dobivanje rezultata ispitni uzorak se važe na analitičkoj vagi prije i poslije provođenja pokusa, te se bilježi gubitak mase uzrokovan abrazijom. Rezultati se također mogu iskazivati kao gubitak volumena u mm^3. Ovakav način prikaza rezultata pogodan je kod materijala kod kojih je osjetna razlika u gustoći.

Norma ASTM G-65 predviđa četiri varijante postupka koje se odabiru prema otpornosti materijala na abraziju ili prema debljini ispitnog uzorka, a značajke su prikazane u tablici 2.

Varijanta A: Ispitivanje relativno jakog intenziteta abrazivnog trošenja za rangiranje materijala od niske do visoke otpornosti na abraziju. Ova varijanta pogodna je za rangiranje materijala srednje visoke do ekstremno visoke otpornosti na abraziju.

Varijanta B: Kratkotrajna varijanta postupka varijante A. Ova varijanta pogodna je za rangiranje materijala srednje i niske otpornosti abraziji. Koristi se kada gubitak volumena prilikom ispitivanja prema varijanti A premašuje vrijednosti od 100 mm^3.

Varijanta C: Kratkotrajna varijanta postupka varijante A koja se primjenjuje kod ispitivanja otpornosti na abraziju tankih slojeva na ispitnom uzorku.

Varijanta D: Varijanta postupka A s lakšim opterećenjem koja se koristi za rangiranje materijala niske otpornosti na abraziju [17].

Tablica 2. *Značajke varijanti postupka metode „suhi pijesak/gumeni kotač“* [17]

Varijanta postupka	Sila na epruvetu (N)	Broj okretaja kotača (okr)	Relativni put (m)	Vrijeme trajanja postupka (min)
A	130	6000	4309	30
B	130	2000	1436	10
C	130	100	71,8	0,5
D	45	6000	4309	30

Kod uređaja za provedbu ispitivanja metode „suhi pijesak/gumeni kotač“ normom ASTM G-65 bitne su i ujednačene karakteristike bitnih elemenata samog ispitivanja.

Kotač mora biti obložen gumom čija tvrdoća iznosi 60 po Shoreu, a dopušta se vrijednost tvrdoće između 58 – 62 po Shoreu. Mjerenje tvrdoće se mora provesti na najmanje četiri mjesta na gumenom kotaču, odnosno pod kutom od 90° na vanjskom polumjeru kotača [17].

Abraziv koji se koristi u metodi je zaobljeni kvarcni pijesak Ottawa AFS 50/70. Udio vlage u pijesku ne smije prelaziti 0,5 % masenog udjela jer bi se u suprotnom mogle dobiti pogrešne konačne vrijednosti ispitivanja. Radi problema vage se pijesak mora skladištiti u posebnim prostorijama s konstantnom temperaturom i količinom vlage, zatvorenim kutijama sa žaruljom ili u pećima za sušenje elektroda za zavarivanje. Ako se u pijesku i nađe veći udio vlage, potrebno ga je zagrijati na temperaturu od 100 °C i na toj temperaturi držati minimalno 1 h i tako ponavljajući postupak dok vlaga nije svedena na prihvatljivu razinu [17].

Veličina zrna ima utjecaj na veličinu trošenja u slučaju kad je tvrdoća abraziva veća od tvrdoće materijala koji se troši. Kod vrlo sitnih abrazivnih čestica trošenje je vrlo veliko. Kod većih zrnaca trošenje naglo pada da bi daljnjim povećanjem zrna ponovno počelo rasti do određene veličine zrna nakon čega veličina zrna uglavnom ne utječe na trošenje. Kod abraziva koji su mekši od materijala koji se troši veličina čestica abraziva nema nikakvog utjecaja na veličinu trošenja [17].

Valja također naglasiti kako je kod vage pomoću koje se mjeri gubitak mase uzorka bitna njena osjetljivost od 0,001 g osim kod varijante C kod koje se zahtjeva osjetljivost od 0,0001 g [18].

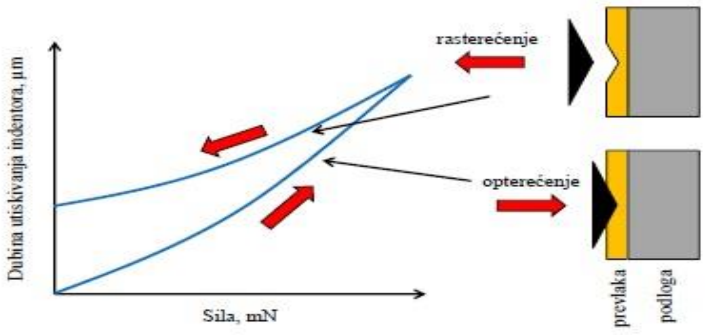
3.5 Mikrotvrdoća

Kod ispitivanja tvrdoće tankih slojeva i prevlaka njihova debljina mora biti dovoljno velika kako bi se izbjegao utjecaj podloge na rezultat mjerenja. Dubina utiskivanja trebala bi biti približno jednaka jednoj desetini debljini prevlake/sloja. Kod prevelikog opterećenja će elastična i plastična deformacija otiska prodrijeti u podlogu te tako izazvati manji iznos ispitivane tvrdoće. Na ispitivanje tvrdoće i izbor opterećenja značajno utječe i površinska hrapavost prevlake. Kod manjih opterećenja u slučaju grubljih površina, kada indentor dođe u kontakt s brijegom, nejednolik kontakt između površine i indentora povećava lokalna naprezanja na mjestima kontakta što rezultira većom deformacijom materijala i posljedično prikazom manje tvrdoće. Tijekom kontakta indentora s udubinom, javlja se suprotna pojava te je iznos tvrdoće precijenjen [2].

Primijenjeno opterećenje ovisi o materijalu koji se ispituje te je ispitivanje tvrdoće podijeljeno u tri kategorije prema dubini prodiranja indentora [2]:

- nanotvrdoća – 0,001 - 1 μm,
- mikrotvrdoća – 1 – 50 μm,
- makrotvrdoća – 50 – 1000 μm.

Kod ispitivanja mikrotvrdoće i nanotvrdoće tvrdih prevlaka prema ISO 14577 iznos tvrdoće određuje se iz krivulje ovisnosti dubine utiskivanja h i sile utiskivanja F koja se dobiva snimanjem vrijednosti sile F i dubine prodiranja h kao funkcije vremena tijekom utiskivanja (slika 17.). Tijekom opterećenja dio krivulje koji nastaje predstavlja elastična i plastična svojstva materijala/prevlake. Ukoliko se pojavi plastična deformacija, tijekom rasterećenja dolazi do drugačije krivulje, što predstavlja elastični povrat materijala/prevlake i krajnja dubina nakon rasterećenja različita je od nule [2].



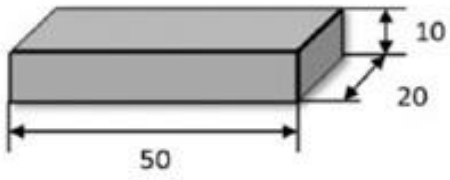
Slika 17. *Način mjerenja tvrdoće tankih tvrdih prevlaka* [2]

EKSPERIMENTALNI DIO

4. PLAN ISPITIVANJA

U eksperimentalnom dijelu rada željelo se ispitati utjecaj debljine TiCN prevlake i hrapavosti površine na abrazijsko trošenje visokolegiranih čelika za hladni rad pomoću metode "suhi pijesak/gumeni kotač". Prije samog ispitivanja otpornosti na abraziju trebala su se još provesti ispitivanje hrapavosti površine, ispitivanje debljine prevlake kalotestom i ispitivanje njezine adhezivnosti na osnovni materijal utiskivanjem koničnog dijamantnog indentora na tvrdomjeru Rockwell C te analiza mikrostrukture.

Korišteni su uzorci oblika kvadra dimenzija 10x20x50 mm koji su prikazani na slici 18.



Slika 18. *Oblik i dimenzije uzoraka* [19]

Izrada ispitnih uzoraka koja uključuje toplinsku obradu i prevlačenje PACVD postupkom, provedena je u Laboratoriju za toplinsku obradu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Korištene su dvije vrste čelika koje će poslužiti kao osnovni materijal, čelik Böhler K390PM dobiven metalurgijom praha i čelik Böhler K110 (EN X155CrVMo12-1). Prije prevlačenja PACVD postupkom, navedeni čelici su bili podvrgnuti odgovarajućoj toplinskoj obradi koja se sastojala od kaljenja i dvostrukog visokotemperaturnog popuštanja.

Nakon toplinske obrade osnovnih materijala, a prije postupka PACVD prevlačenja, površine jednog dijela ispitnih uzoraka su brušene, a drugog polirane te su se tako dobile dvije različite hrapavosti površine čije će se vrijednosti naknadno odrediti mjerenjima hrapavosti površine.

Nakon toga su uzorci stavljeni u ultrazvučnu kupku radi čišćenja i odmaščivanja površine. Ultrazvučna kupka je bila napunjena s 2 L vode, a unutar je bila smještena čaša napunjena 1 dcL 75 % alkohola, a sam postupak je trajao 90 sekundi. Ideja je bila alkoholom ukloniti čestice abraziva brušenja, pijesak kao i pastu za poliranje koji su naknadno ostali nakon njihovih obrada.

Zadnji korak prije provedbe samog PACVD prevlačenja je bio sputtering. Sputteringom se nastojalo ukloniti adsorbirane plinove i oksidni sloj na samoj površini uzoraka koji bi negativno utjecali na postupak PACVD prevlačenja. Time se dobila prikladna površina za njezino daljnje prevlačenje.

Postupak PACVD prevlačenja proveden je pomoću plazme aktiviranom pulsirajućom istosmjernom strujom u Rübig GmbH type PC 70/90 industrijskoj vakuumskoj peći.

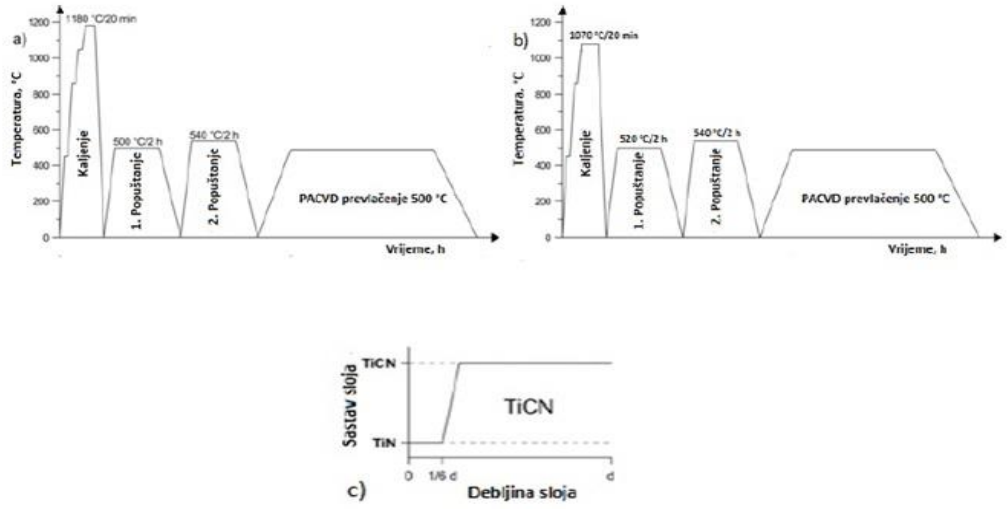
Nastanak sloja kod ispitnih uzoraka je idući:

1. Nastanak TiN 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 6 h).

Parametri PACVD postupka prevlačenja, kao i cijela toplinska obrada uzoraka u ispitivanju dani su na slici 19. i odabrani su prema preporukama proizvođača i prethodnim istraživanjima.



Slika 19. *Toplinska obrada ispitnih uzoraka izrađenih od čelika Böhler K110 i K390PM* [19]:

a) *dijagram toplinske obrade čelika Böhler K390PM*

b) *dijagram toplinske obrade čelika Böhler K110*

c) *PACVD postupak prevlačenja za nastanak duplex TiN/TiCN prevlake*

Označavanje ispitnih uzoraka osmišljeno je na idući način:

C – uzorci kojima kao podloga služi čelik Böhler K390PM,
D – uzorci kojima kao podloga služi čelik Böhler K110 (EN X155CrVMo12-1).

Prva znamenka poslije slova predstavlja vrstu prevlake. Svi uzorci su prevučeni TiCN prevlakom kojoj je oznaka 2.

Iduća znamenka predstavlja naknadnu obradu s kojom je postignuta konačna hrapavost ispitnih uzoraka. Brušeni uzorci su označeni brojem 2 dok su polirani uzorci označeni brojem 3.

Nakon toga se označava debljina prevlake. Uzorci s tanjom prevlakom se označavaju s 1, a oni s debljom prevlakom s 2.

Zadnji brojevi predstavljaju broj ponavljanja. 1 za prvo, odnosno 2 za drugo ponavljanje za uzorke u istoj seriji. Cijelo ispitivanje se sastojalo od 16 ispitnih uzoraka koje je podijeljeno u 6 dijelova:

1. Određivanje hrapavosti površine ispitnih uzoraka.

2. Određivanje adhezivnosti prevlaka utiskivanjem indentora na tvrdomjeru Rockwell C.

3. Određivanje debljine prevlaka kalotestom.

4. Analiza mikrostrukture uzoraka

5. Abrazijskog trošenja ispitnih uzoraka metodom “suhi pijesak/gumeni kotač”.

6. Analiza trošenih površina pomoću stereomikroskopa

Svi uzorci i provedena ispitivanja nad njima su prikazani u tablicama 3. i 4. U tablici 3. su prikazani uzorci koji su kao osnovni materijal imali čelik Böhler K390 PM, a u tablici 4. su prikazani uzorci s osnovnim materijalom čelikom Böhler K110.

Tablica 3. *Uzorci s čelikom Böhler K390 PM kao osnovnim materijalom u ispitivanju*

Oznaka uzorka	**Osnovni materijal**	**Priprema površine**	**Ispitivanja**					
C2 211	Čelik Böhler K390 PM	Brušenje	Hrapavost površine	Adhezivnost prevlake	Debljina prevlake	Analiza mikrostrukture	Otpornost na abraziju	Analiza trošenih površina
C2 212								
C2 221								
C2 222								
C2 311		Poliranje						
C2 312								
C2 321								
C2 322								

Tablica 4. *Uzorci s čelikom Böhler K110 kao osnovnim materijalom u ispitivanju*

Oznaka uzorka	**Osnovni materijal**	**Priprema površine**	**Ispitivanja**					
D2 211	Čelik Böhler K110	Brušenje	Hrapavost površine	Adhezivnost prevlake	Debljina prevlake	Analiza mikrostrukture	Otpornost na abraziju	Analiza trošenih površina
D2 212								
D2 221								
D2 222								
D2 311		Poliranje						
D2 312								
D2 321								
D2 322								

5. PROVEDBA I REZULTATI ISPITIVANJA

5.1 Ispitivanje hrapavosti površine

Ispitivanje hrapavosti površine uzoraka provedeno je na pertometru u Laboratoriju za precizno mjerenje dužina na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Za svako stanje je odabran jedan uzorak kao predstavnik te je na njima provedeno 6 ispitivanja iz kojih su se onda izvukle srednje vrijednosti.

Definirane su duljina ispitivanja l_t u iznosu od 1,75 mm za uzorke s brušenim stanjem površine, odnosno 0,56 mm za uzorke s poliranim stanjem površine i duljina vrednovanja l_n u iznosu 1,25 mm za uzorke s brušenim stanjem i 0,4 mm za uzorke s poliranim stanjem površine.

U tablicama 5. i 6. bit će prikazani iznosi R_a, R_z, R_p i R_{max} dobiveni mjerenjem za uzorke s osnovnim materijalom od čelika Böhler K390PM (tablica 5.) i za uzorke s osnovnim materijalom od čelika Böhler K110 (tablica 6.). Detaljniji rezultati dobiveni mjerenjem pertometrom su dani u prilozima.

Tablica 5. *Rezultati mjerenja hrapavosti pertometrom za uzorke s osnovnim materijalom čelik Böhler K390PM*

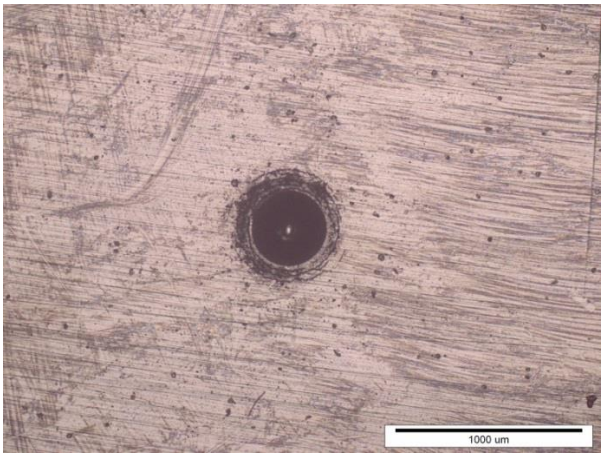
Čelik Böhler K390PM	R_a [µm]	R_z [µm]	R_p [µm]	R_{max} [µm]
C2 21	0,042 ± 0,002	0,346 ± 0,035	0,186 ± 0,063	0,446 ± 0,067
C2 22	0,04 ± 0,01	0,341 ± 0,085	0,192 ± 0,15	0,496 ± 0,132
C2 31	0,005	0,034 ± 0,004	0,024 ± 0,004	0,041 ± 0,006
C2 32	0,01 ± 0,002	0,09 ± 0,031	0,123 ± 0,103	0,182 ± 0,106

Tablica 6. *Rezultati mjerenja hrapavosti pertometrom za uzorke s osnovnim materijalom čelik Böhler K110*

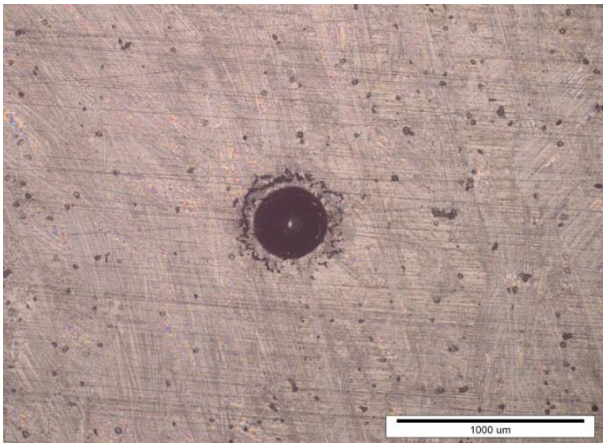
Čelik Böhler K110	R_a [µm]	R_z [µm]	R_p [µm]	R_{max} [µm]
D2 21	0,048 ± 0,006	0,378 ± 0,032	0,258 ± 0,05	0,464 ± 0,025
D2 22	0,058 ± 0,003	0,475 ± 0,074	0,291 ± 0,126	0,628 ± 0,121
D2 31	0,017 ± 0,001	0,117 ± 0,007	0,101 ± 0,013	0,143 ± 0,011
D2 32	0,016 ± 0,003	0,154 ± 0,025	0,161 ± 0,049	0,21 ± 0,055

5.2 Ispitivanje adhezivnosti prevlake

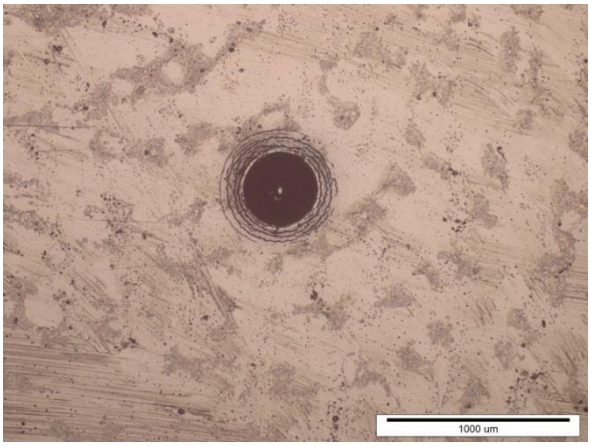
Ispitivanje adhezivnosti prevlake se provelo u Laboratoriju za toplinsku obradu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu utiskivanjem dijamantnog indentora na tvrdomjeru Rockwellu C u prevlaku kao što je opisano u poglavlju 3.2. U svaki uzorak se utiskivalo pet otisaka koji su kasnije slikani na svjetlosnom mikroskopu te se potom subjektivno procijenila adhezivnost prevlake. Radi velikog broja dobivenih slika otisaka za svaki uzorak će biti odabran jedan reprezentativni primjerak pošto nije bilo značajnih odstupanja među otiscima za isti uzorak.



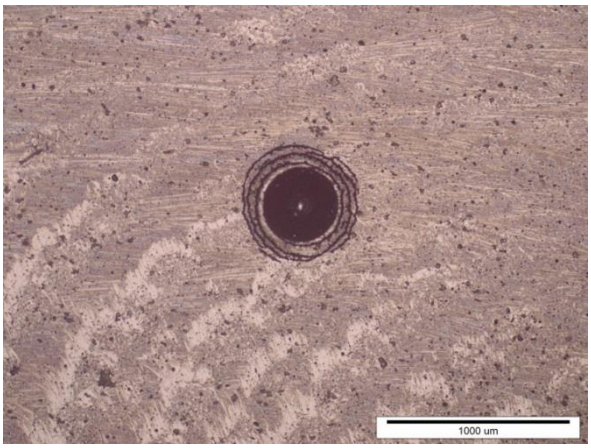
Slika 20. *Otisak Rockwell-ovog C indentora na uzorku C2 21*



Slika 21. *Otisak Rockwell-ovog C indentora na uzorku C2 22*

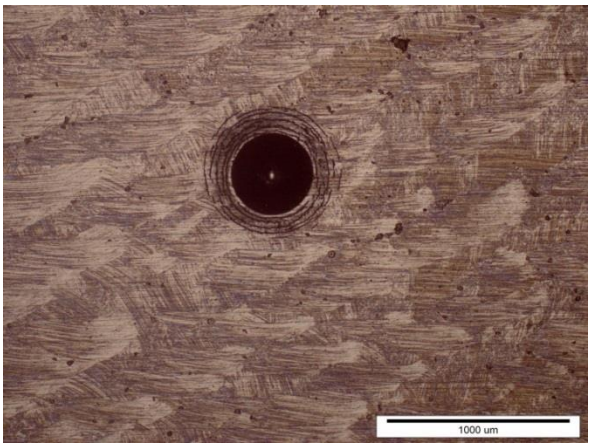


Slika 22. *Otisak Rockwell-ovog C indentora na uzorku C2 31*

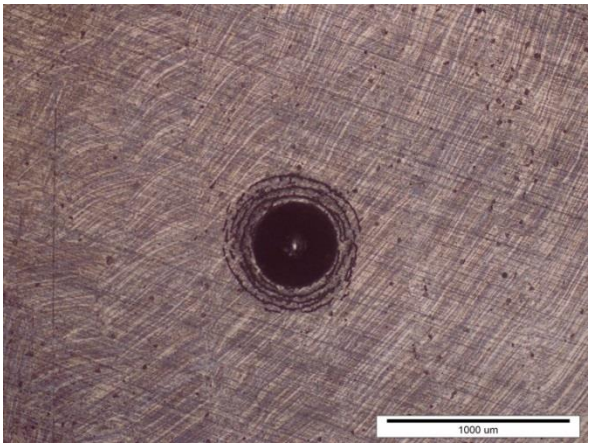


Slika 23. *Otisak Rockwell-ovog C indentora na uzorku C2 32*

Kao što je vidljivo na slikama od 20. do 23. na ispitnim uzorcima koji su kao podlogu imali čelik Böhler K390 PM se može primijetiti veći broj pukotina, ali bez pojave značajnog ljuštenja čime bi se subjektivnom procjenom adhezivnost prevlake svrstala između razreda 2 i 3. Također je primjetno kako brušeni uzorci (C2 2) imaju manje pukotina u odnosu na polirane uzorke (C2 3) dok ispitni uzorci s tanjom prevlakom imaju više pukotina u odnosu na one ispitne uzorke koji imaju deblju prevlaku.



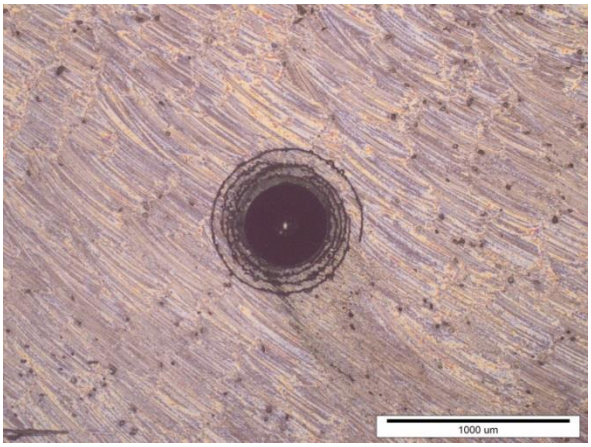
Slika 24. *Otisak Rockwell-ovog C indentora na uzorku D2 21*



Slika 25. *Otisak Rockwell-ovog C indentora na uzorku D2 22*



Slika 26. *Otisak Rockwell-ovog C indentora na uzorku D2 31*



Slika 27. *Otisak Rockwell-ovog C indentora na uzorku D2 32*

Na slikama od 24. do 27. su prikazani otisci indentora na ispitnim uzorcima koji su kao osnovni materijal imali čelik Böhler K110. Kod uzoraka koji su kao završnu obradu imali brušenje (D2 2) vidljiv je veći broj pukotina, ali bez pojave ljuštenja čime bi se, kao i kod svih ispitnih uzoraka koji su kao osnovni materijal imali čelik K390 PM, subjektivnom procjenom adhezivnost prevlaka svrstala između razreda 2 i 3. Za razliku od brušenih, kod ispitnih uzoraka koji su bili polirani (D2 3) je uz veći broj pukotina vidljivo i lagan početak ljuštenja što upućuje na slabiju adhezivnost prevlake u odnosu na brušene uzorke.

Subjektivnom procjenom se adhezivnost prevlake na ovim ispitnim uzorcima svrstava između razreda 3 i 4. Kao i kod ispitnih uzoraka koji su kao osnovni materijal imali čelik Böhler K390 PM, i kod ovih uzoraka je vidljivo da se kod tanjih prevlaka utiskivanjem indentora stvorio veći broj pukotina u odnosu na one uzorke s debljom prevlakom.

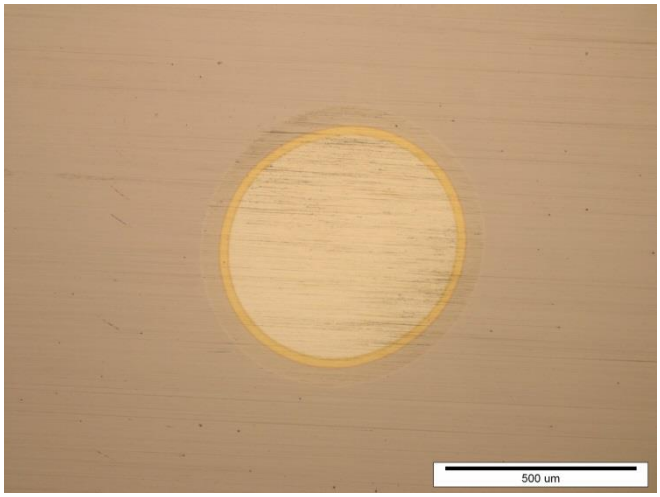
5.3 Ispitivanje debljine prevlake

Provedba ispitivanja na kalotesteru opisanog u poglavlju 3.3 pomoću kojeg se mjerila debljina prevlake, rezultirala je sljedećim srednjim rezultatima $\bar{E}_d$ prikazanim u tablici 7. Detaljniji rezultati i obrada ispitivanja debljine prevlake pojedinih uzoraka dani su u prilogu.

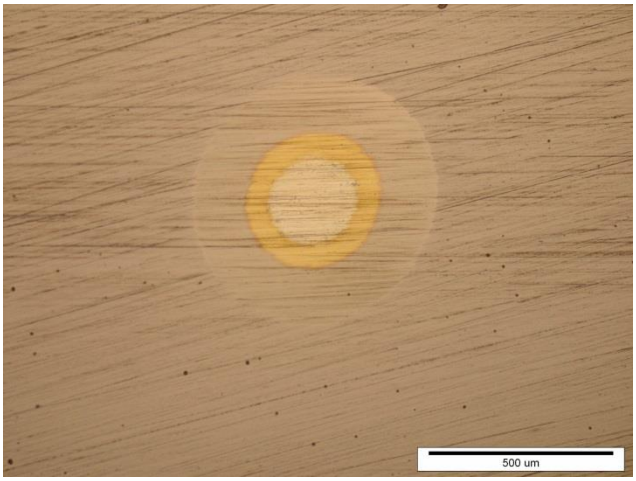
Tablica 7. *Rezultati prosječnih debljina prevlaka*

Oznaka uzorka	$\bar{E}_d$ [µm]
C2 21	2,705
C2 22	5,55
C2 31	2,655
C2 32	4,885
D2 21	2,68
D2 22	4,785
D2 31	3,095
D2 32	4,75

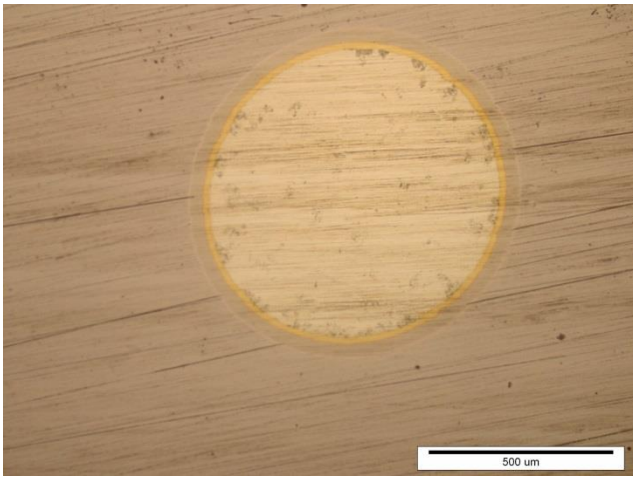
Na slikama od 28. do 31. prikazan je izgled dobivenih kalota na ispitnim uzorcima s osnovnim materijalom od čelika Böhler K390 PM.



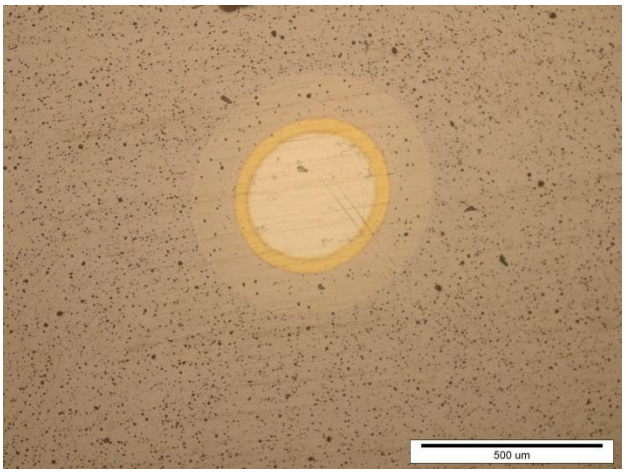
Slika 28. *Otisak kalote na uzorku C2 21*



Slika 29. *Otisak kalote na uzorku C2 22*

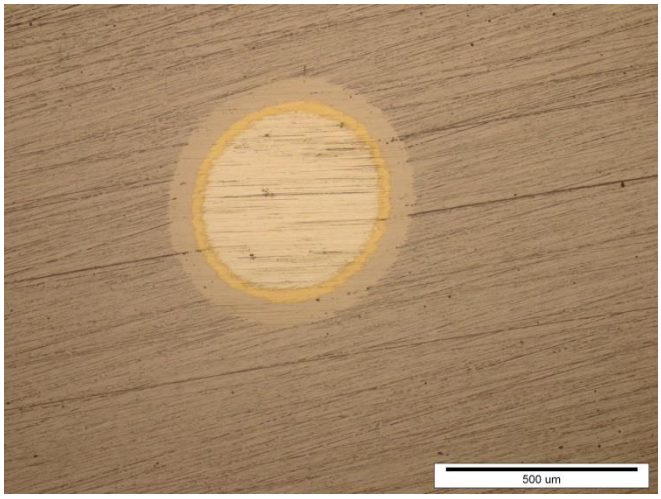


Slika 30. *Otisak kalote na uzorku C2 31*

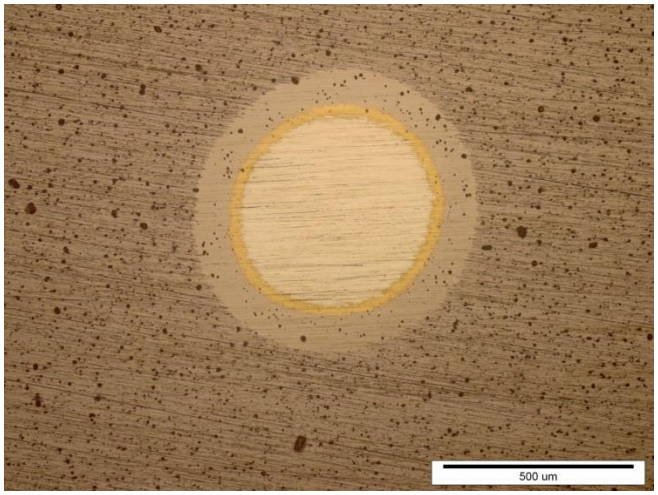


Slika 31. *Otisak kalote na uzorku C2 32*

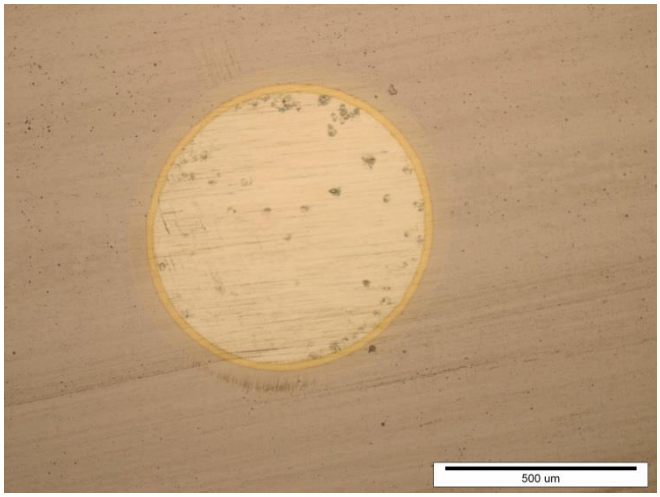
Na slikama od 32. do 35. prikazan je izgled dobivenih kalota na ispitnim uzorcima s osnovnim materijalom od čelika Böhler K110.



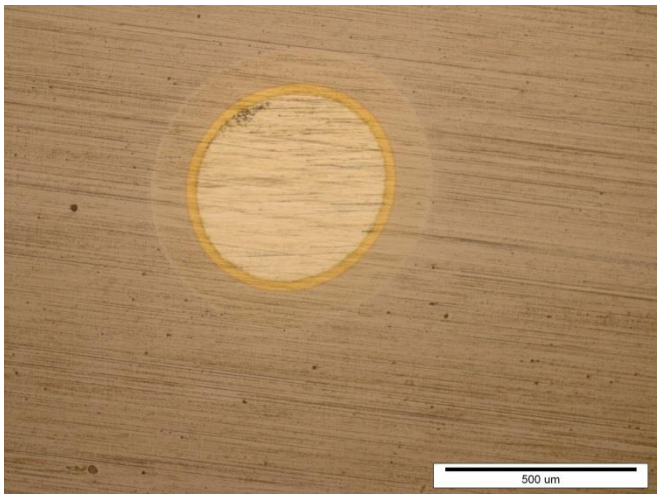
Slika 32. *Otisak kalote na uzorku D2 21*



Slika 33. *Otisak kalote na uzorku D2 22*

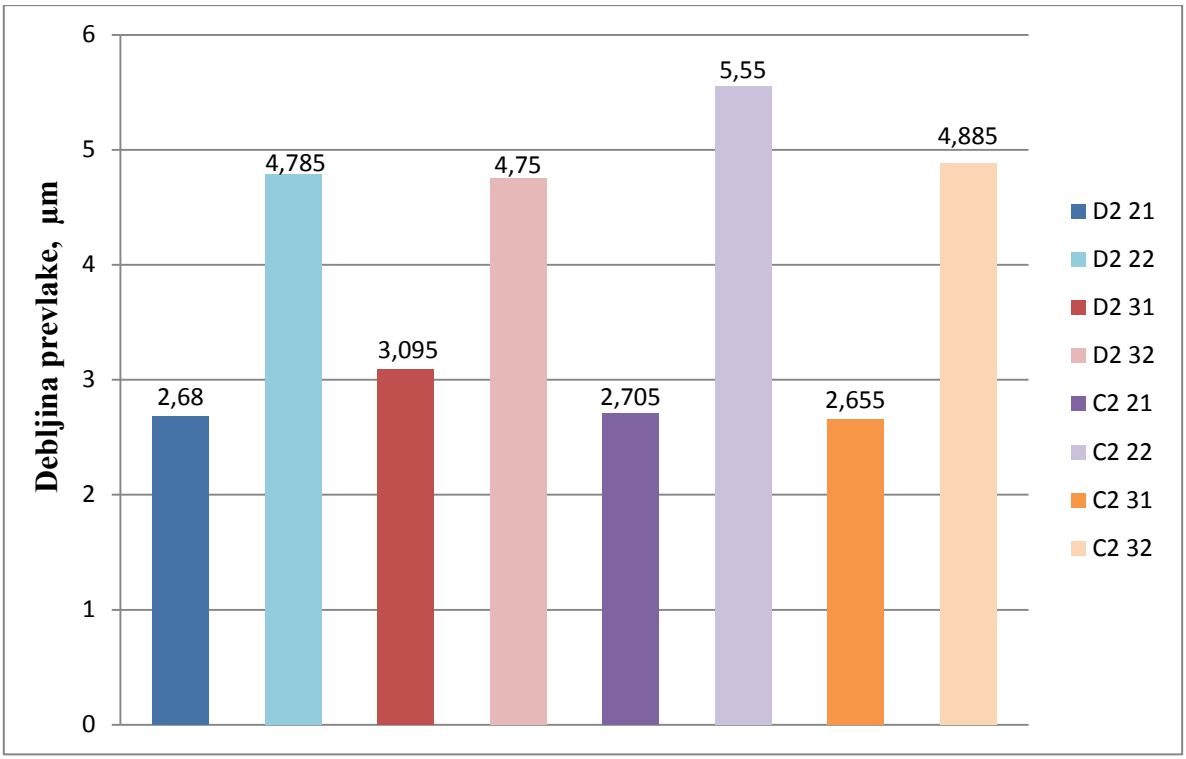


Slika 34. *Otisak kalote na uzorku D2 31*



Slika 35. *Otisak kalote na uzorku D2 32*

Kako bi se lakše vizualno vidjela usporedba debljine prevlake za uzorke, izrađen je dijagram prikazan na slici 36.



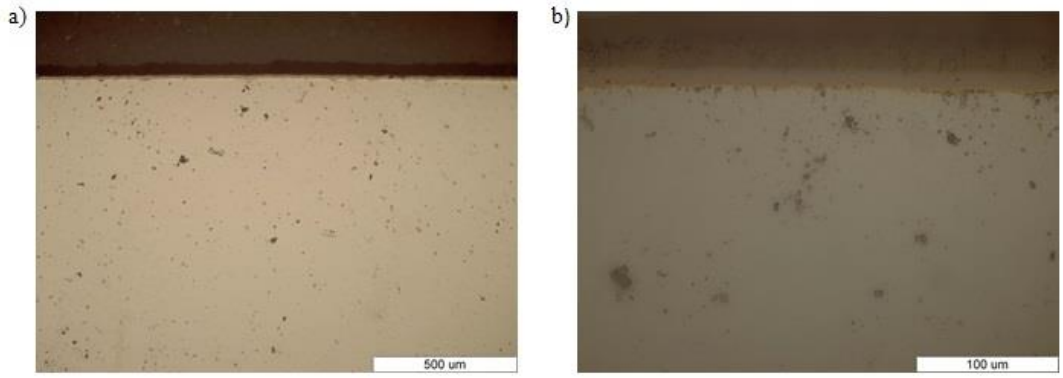
Slika 36. *Usporedba debljine TiCN prevlaka na različitim uzorcima*

5.4 Analiza mikrostrukture

Za potrebe ispitivanja provedena je i analiza mikrostrukture uzoraka. Odabran je jedan uzorak za svaki osnovni materijal koji je kasnije izrezan, uliven u polimernu masu te kasnije nagrižen u nitalu kako bi se mogao slikati na svjetlosnom mikroskopu i kasnije analizirati.

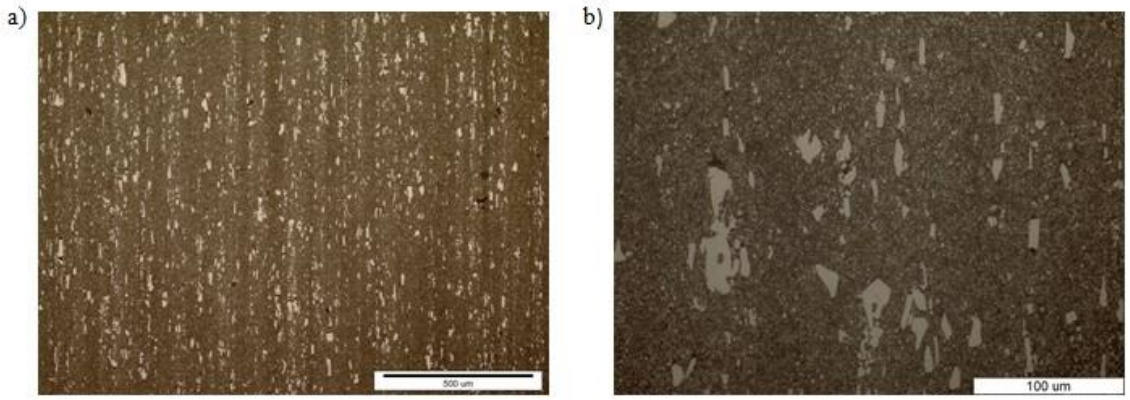
Valja naglasiti kako se uzorak iz razreda oznake C nije dao nagristi niti duljim držanjem u nitalu. Kod uzorka iz razreda C je slikan samo rubni dio pri različitim povećanjima dok je kod uzorka iz razreda D slikan i rubni dio i središnji dio.

Na slici 37. će biti prikazan rubni sloj uzorka C povećan 100 i 500 puta. Primjećuje se pošto je čelik Böhler K390PM osnovni materijal koji je dobiven metalurgijom praha ujednačena struktura s ravnomjerno raspoređenim karbidima koji su nosioci tvrdoće te tako služe kao prikladna podloga za TiCN prevlaku. Pri povećanju od 500 puta se vidi tanki TiN sloj koji je poslužio kao međusloj između osnovnog materijala i TiCN prevlake radi sličnijeg koeficijenta toplinskog rastezanja i samim time boljeg prianjanja TiCN prevlake. Također se pri povećanju od 500 puta vidi jednoliko nanešena TiCN prevlaka bez udubljenja.

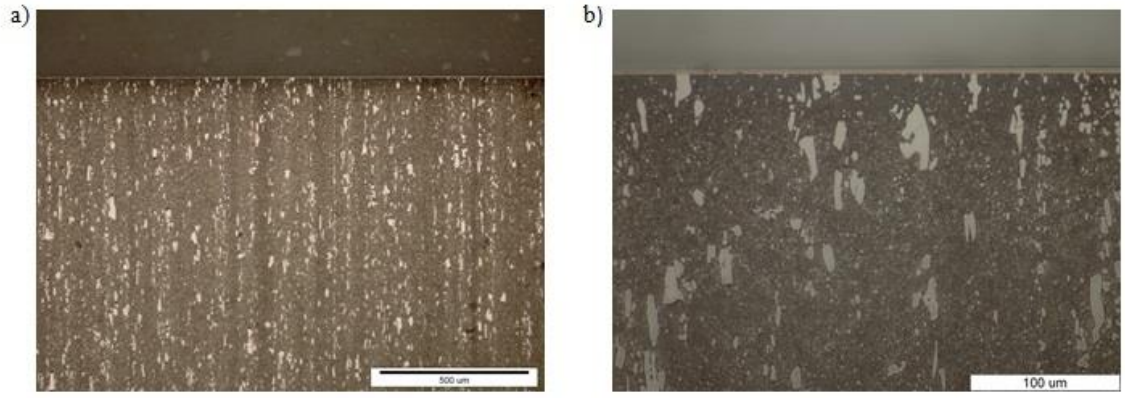


Slika 37. *Mikrostruktura ruba uzorka iz razreda C s osnovnim materijalom čelik Böhler K390PM:*
a) povećanje od 100 puta
b) povećanje od 500 puta

Na slikama 38. i 39. će biti prikazani rubni sloj, odnosno sredina uzorka iz razreda D koji je kao osnovni materijal imao čelik Böhler K110 (EN X155CrVMo12-1). Kao što je vidljivo iz oznake čelika, najprisutniji legirni element je krom te će ovaj čelik za posljedicu u sebi najviše sadržavati kromovih karbida. I na slici 38. koja prikazuje središnji dio i na slici 39. koja prikazuje rub je vidljiva usmjerenost karbida koji tvore trakastu strukturu koja je nastala kao posljedica izrade čelika. Usmjerenost karbida bi moglo dovesti do anizotropije što djeluje nepovoljno na svojstvo čelika za razliku od čelika Böhler K390PM kod kojeg su karbidi ravnomjerno raspoređeni omogućujući tako jednaka svojstva u svim smjerovima. Na slici 39. gdje je prikazan rubni sloj uzorka iz razreda D je također kao i na slici 37. vidljiv TiN sloj kao i TiCN sloj bez udubina i neravnina čime se može pretpostaviti da se je prevlaka dobro prihvatila na osnovni materijal.



Slika 38. *Mikrostruktura sredine uzorka iz razreda D s osnovnim materijalom čelik Böhler K110:*
a) povećanje 100 puta
b) povećanje 500 puta



Slika 39. *Mikrostruktura ruba uzorka iz razreda D s osnovnim materijalom čelik Böhler K110:*
a) povećanje 100 puta
b) povećanje 500 puta

5.5 Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

Ispitivanje otpornosti abrazijskom trošenju metodom "suhi pijesak/gumeni kotač" prema normi ASTM G 65-85 provedeno je na ukupno 8 uzoraka u idućim koracima:

1. Čišćenje ispitnog uzorka pomoću ultrazvučne kupke
2. Postavljanje ispitnog uzorka u uređaj za ispitivanje metodom "suhi pijesak/gumeni kotač"
3. Trošenje ispitnog uzorka
4. Vađenje ispitnog uzorka iz uređaja
5. Ponovno čišćenje uzorka u ultrazvučnoj kupki
6. Sušenje ispitnog uzorka
7. Vaganje ispitnog uzorka na mjernoj vagi
8. Računanje promjene mase ispitnog uzorka.

Provedeno prvotno čišćenje ispitnog uzorka u ultrazvučnoj kupki služi da se odstrane slojevi prašine i prljavštine koji su se mogli zadržati na površini ispitnog uzorka, kako bi se precizno znala početna masa.

Sam proces čišćenja ispitnih uzoraka u ultrazvučnoj kupki se sastoji od punjenja čaše alkoholom dovoljnom količinom koja će prekriti cijeli ispitni uzorak, te zatim stavljanja čaše, u kojoj se nalazi ispitni uzorak uronjen u alkohol, u prostor ultrazvučne kupke napunjene vodom i podešavanje trajanja čišćenja na 90 sekundi. Nakon čišćenja, uzorak se vadi iz čaše te potom suši kako bi bio spreman za mjerenje na vagi ili provedbu abrazijskog ispitivanja.

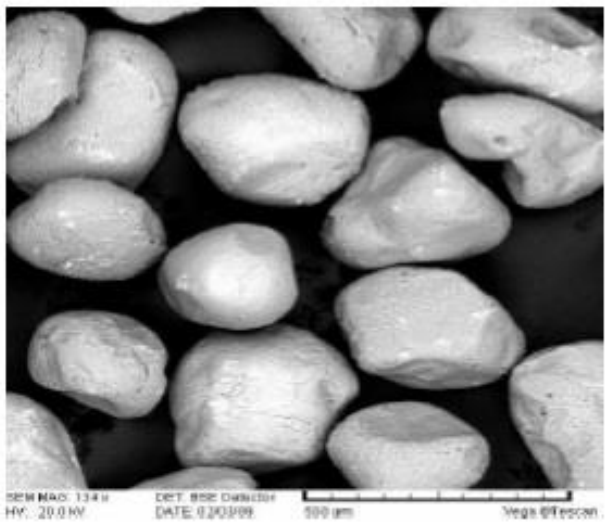
Postupak ispitivanja metodom "suhi pijesak/gumeni kotač" sastoji se od sljedećih koraka:

1. Stavljanje pijeska u lijevak
2. Umetanje ispitnog uzorka u čeljusti držača uzorka
3. Uključivanje uređaja koji pokreće kotač
4. Istovremeno zatvaranje uređaja i povlačenja poluge koja pomiče uzorak prema kotaču

5. Čekanje dok brojač ne pokaže traženi broj okretaja
6. Zaustavljanje uređaja i zaustavljanje tečenja pijeska iz lijevka
7. Povratak poluge na prvotni položaj i vađenje uzorka iz čeljusti držača.

Provedba ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje na jednom uzorku podijeljena je u pet dijelova; nakon svakih 100 okretaja uzorak se vadi iz uređaja, čisti u ultrazvučnoj kupki te mu se potom mjeri masa, odnosno gubitak mase daljnjim preračunavanjem. Ispitni uzorak poslije vađenja iz uređaja na sebi sadrži zrnca pijeska koja su ostala i nakon ispitivanja te je ispitni uzorak potrebno ponovno očistiti u ultrazvučnoj kupki kako bi se osiguralo točno mjerenje mase na mjernoj vagi. Cijeli ciklus ispitivanja za jedan uzorak završava nakon 500 okretaja.

Za ispitivanje je korišten zaobljeni kvarcni pijesak, prikazan na slici 40. koji se prethodno dobro čuvao u zatvorenoj vreći ili spremniku kako ne bi došlo do reakcije s okolinom i mogućeg upijanja vlage što ne bi omogućilo reprezentativnost samog ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje kao i dobivenih rezultata.



Slika 40. *Zaobljeni kvarcni pijesak* [15]

Kao što je već navedeno, prije početka postupka ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje metodom "suhi pijesak/gumeni kotač" i nakon svakih 100 okretaja i naknadnih čišćenja u ultrazvučnoj kupki, ispitnim uzorcima se mjeri masa na vagi. Potrebno je ispitnom uzorku odrediti masu prije početka ispitivanja, kao i nakon svakih 100 okretaja kako bi se kasnije ti podaci mogli obraditi i izračunati gubici mase ispitnih uzoraka.

Mjerenje na vagi sastoji se od nekoliko koraka:

1. Otvaranje pregrade i postavljanje ispitnog uzorka na vagu
2. Zatvaranje pregrade i spuštanje poluge
3. Podešavanje pretpostavljene mase na vagi i ponavljanje postupka sve dok se ne odredi točna masa uzorka
4. Zapisivanje izmjerene mase i vađenje uzorka iz uređaja.

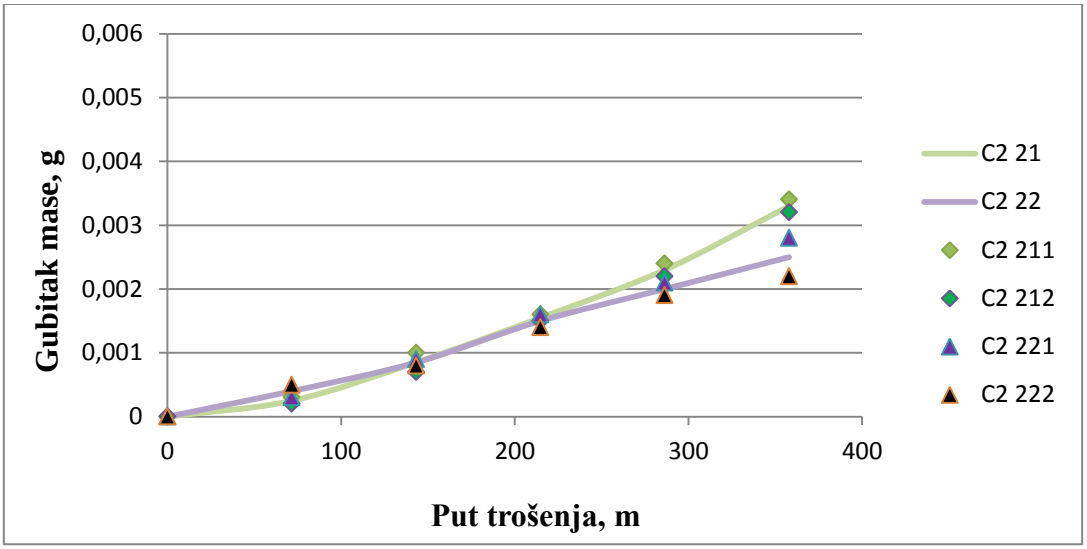
Nakon provedenih ispitivanja dobiveni su rezultati o gubicima mase pojedinih uzoraka omogućujući usporedbu otpornosti na abraziju TiCN prevlake na različitim osnovnim materijalima, različitih debljina te na različitim hrapavostima površine.

Praćen je gubitak mase kroz svih 16 ispitivanja za svaki pojedini uzorak te su izračunate srednje i ukupne vrijednosti gubitka mase. Nakon svakih 100 okretaja je za svaki ispitni uzorak izračunata razlika u masi između prethodnog i idućeg stanja i nakon toga se izračunala srednja vrijednost gubitka za ista stanja ispitnih uzoraka.

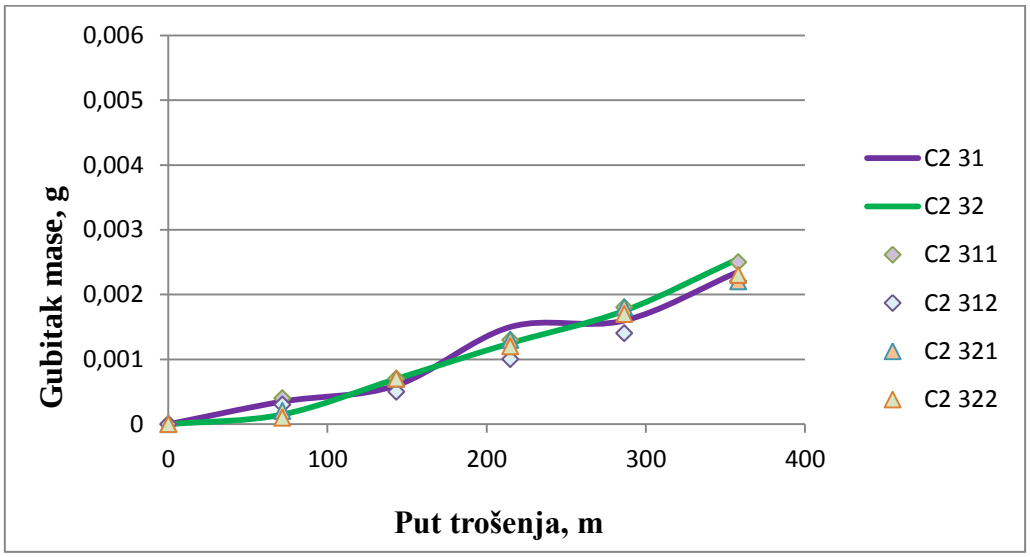
Ukupni gubitak mase se kumulativno zbrajao sa već izračunatim prosječnim gubicima mase za pojedino stanje ispitnog uzorka kako bi se kasnije mogli uspoređivati gubici masa nakon 500 okretaja kotača između uzoraka sa istim osnovnim materijalom, ali različitim debljinama prevlake i stanjima površine.

Podaci o masama ispitnih uzoraka praćen nakon svakih 100 okretaja kotača, kao i izračunate srednje vrijednosti gubitaka mase i ukupni gubici mase za ispitne uzorke koji imaju isti osnovni materijal, dani su u prilozima 3. do 6. Radi potrebe istraživanja, u prikazu rezultata je broj okretaja kotača preračunat u put trošenja prikazan u metrima koristeći formulu za opseg kruga. Mjerenjem promjera kotača ustanovljeno je kako je 100 okretaja kotača ekvivalent putu trošenja u iznosu od 71, 592 m. Shodno tome, konačni put trošenja iznosi 357, 96 m.

Na slikama 41. i 42. prikazani su gubici mase ispitnih uzoraka u odnosu na put trošenja. Slika 41. sadrži podatke za ispitne uzorke s osnovnim materijalom izrađenim od čelika Böhler K390 PM, kao i slika 42., ali za drugo početno stanje površine. Svaki pojedini ispitni uzorak je prikazan točkama nakon svakih 100 okretaja kotača, odnosno 71, 592 m dok pune linije predstavljaju srednje vrijednosti za isto stanje ispitivanih uzoraka.



Slika 41. *Utjecaj debljine TiCN prevlake na čeliku Böhler K390PM s brušenim stanjem površine na otpornost abrazijskom trošenju*

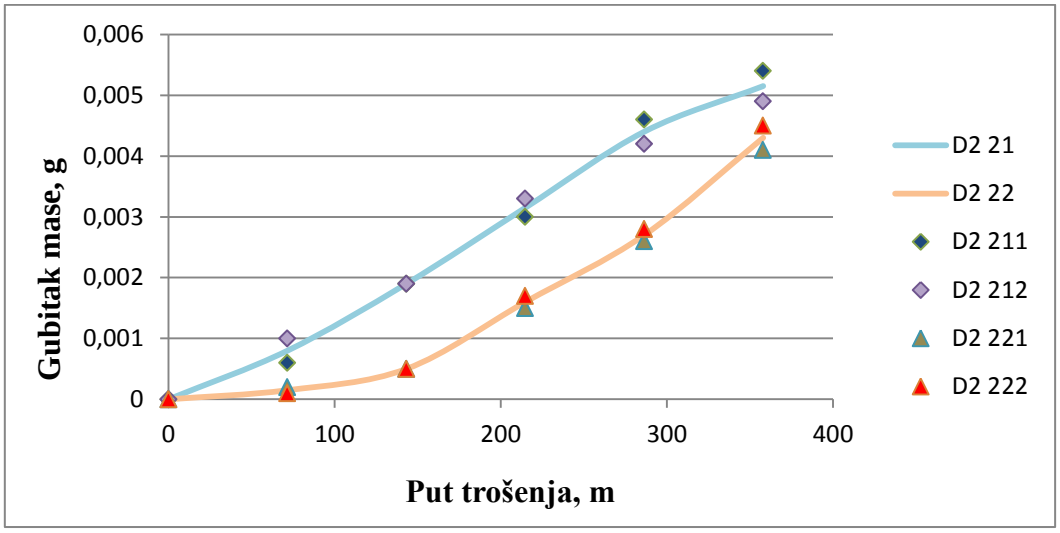


Slika 42. *Utjecaj debljine TiCN prevlake na čeliku Böhler K390PM s poliranim stanjem površine na otpornost abrazijskom trošenju*

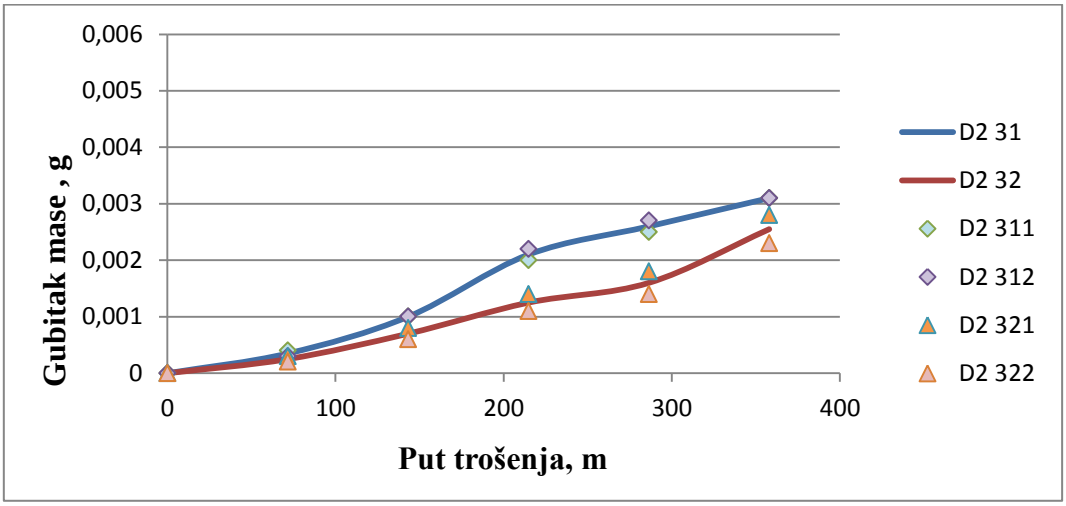
Na slici 41. je vidljivo kako su u prosjeku uzorci s debljom TiCN prevlakom oznake C2 22 izgubili manje na masi nego uzorci s tanjom TiCN prevlakom oznake C2 21 što je vidljivo po položenijem ponašanju krivulje na dijagramu.

S druge strane, na slici 42. je vidljivo kako su kod uzoraka s poliranim stanjem površine oni s tanjom TiCN prevlakom oznake C2 31 izgubili manje na masi nego uzorci s debljom TiCN prevlakom oznake C2 32. Treba napomenuti kako je vidljivo i neobično ponašanje krivulje koja predstavlja uzorke s debljom TiCN prevlakom te ne treba isključiti mogućnost kako je prilikom ispitivanja došlo do nepredviđenih uvjeta.

Na slikama 43. i 44. će biti prikazani na isti način uzorci koji su kao osnovni materijal imali čelik Böhler K110.



Slika 43. *Utjecaj debljine TiCN prevlake na čeliku Böhler K110 s brušenim stanjem površine na otpornost abrazijskom trošenju*

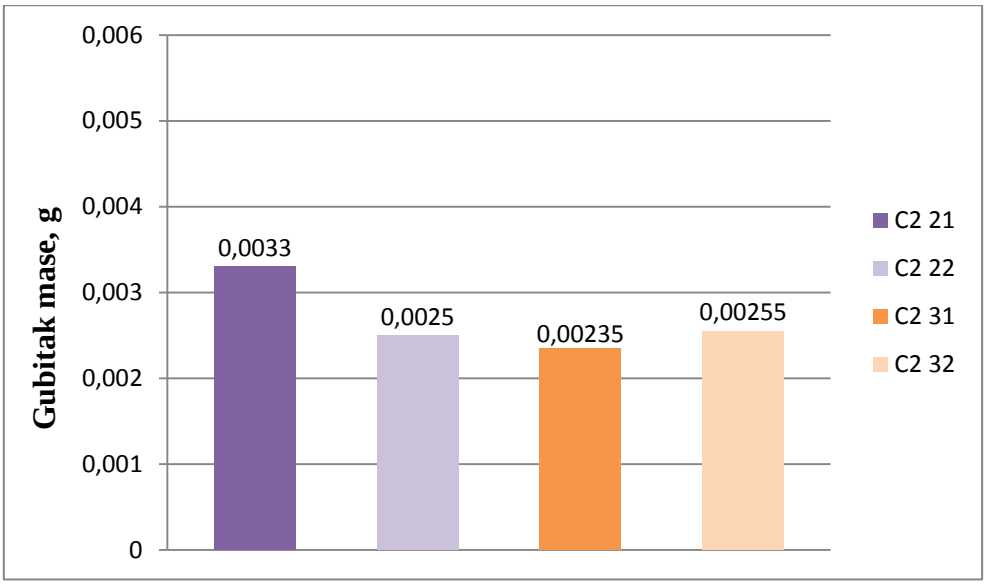


Slika 44. *Utjecaj debljine TiCN prevlake na čeliku Böhler K110 s poliranim stanjem površine na otpornost abrazijskom trošenju*

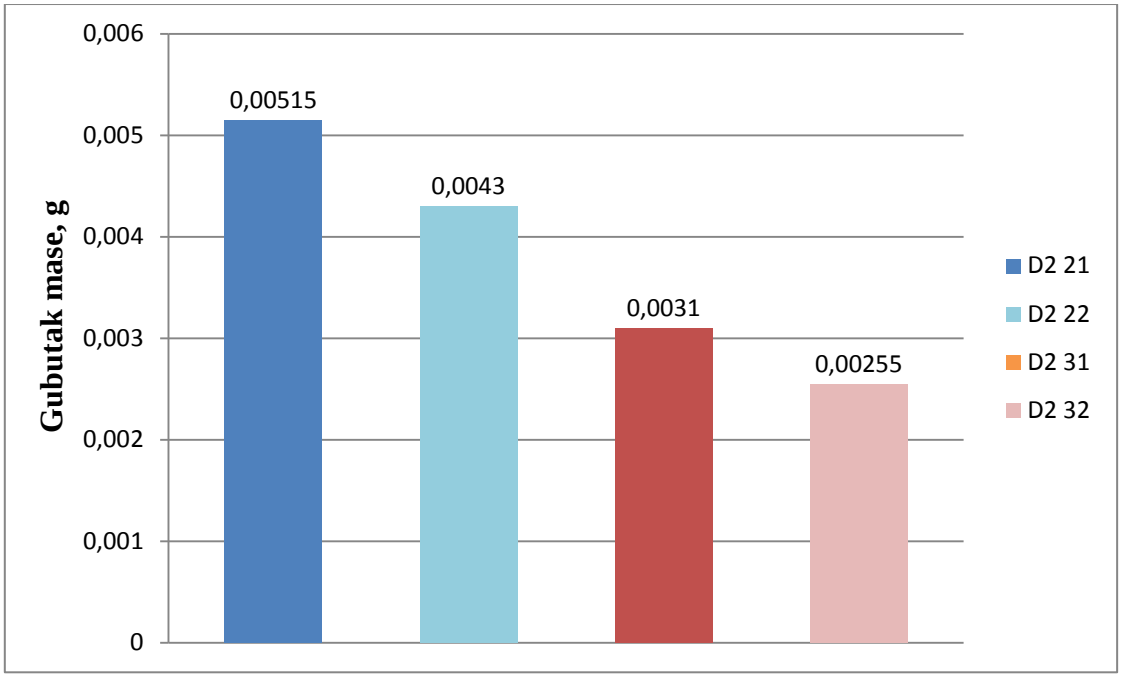
Na slici 43. je vidljivo kako su u prosjeku uzorci s debljom TiCN prevlakom oznake D2 22 izgubili manje na masi nego uzorci s tanjom TiCN prevlakom oznake D2 21 što je vidljivo po položenijem ponašanju krivulje na dijagramu.

Za razliku od uzoraka s osnovnim materijalom od čelika Böhler K390PM, na slici 44. je vidljivo kako su u prosjeku uzorci s debljom TiCN prevlakom oznake D2 32 također izgubili manje na masi nego uzorci s tanjom TiCN prevlakom oznake D2 31.

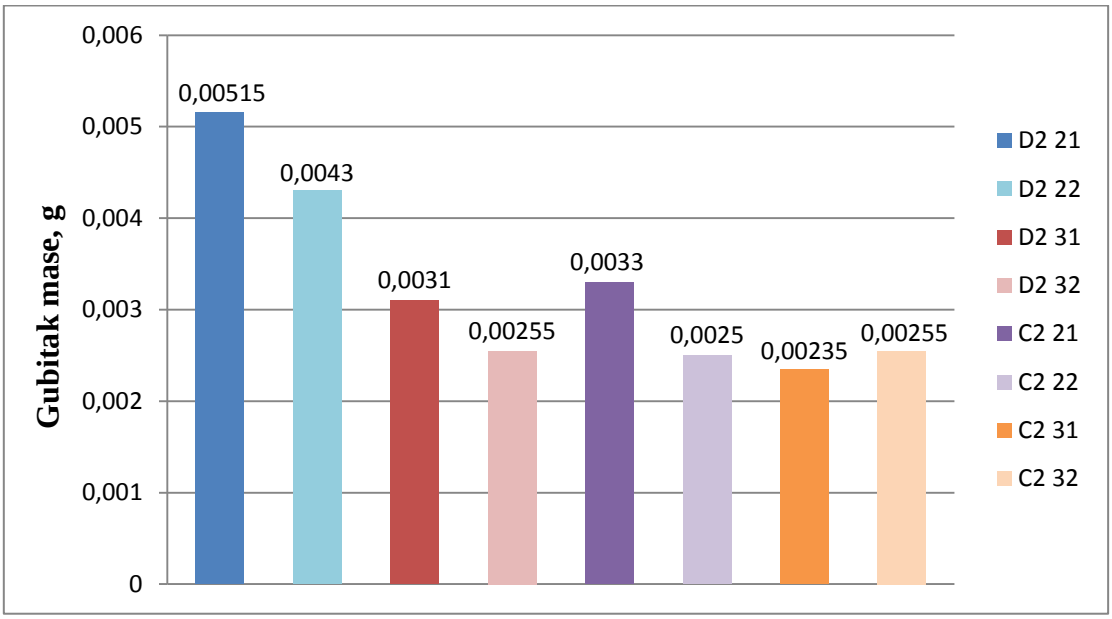
S obzirom da dijagrami prikazani na slikama od 41. do 44. uspoređuju samo dva stanja za isti osnovni materijal kroz svakih 100 okretaja kotača kako bi se pratio trend trošenja, izrađeni su dijagrami koji prikazuju konačni gubitak mase nakon 500 okretaja kotača za isti osnovni materijal (slika 45. i slika 46.) te jedan na kojem su prikazana svih 8 stanja (slika 47.).



Slika 45. *Ukupni gubitak mase nakon 500 okretaja trošenja abrazijom različitih debljina TiCN prevlake i hrapavosti površine na čeliku Böhler K390PM*



Slika 46. *Ukupni gubitak mase nakon 500 okretaja trošenja abrazijom različitih debljina TiCN prevlake i hrapavosti površine na čeliku Böhler K110*



Slika 47. *Usporedba ukupnih gubitaka mase nakon 500 okretaja trošenja abrazijom različitih debljina TiCN prevlaka i hrapavosti površina na različitim čelicima*

Kao što se može vidjeti na slikama 45. i 46. vidljiv je trend kako za isti osnovni materijal i stanje površine se deblja TiCN prevlaka pokazala otpornijom na abrazijsko trošenje osim kod uzoraka s osnovnim materijalom čelik Böhler K390PM s poliranim stanjem površine gdje se vjerojatno radi nepredviđenih uvjeta dogodila anomalija te je tanja TiCN prevlaka izgubila manje na masi.

Kada se sve stavi na jedan dijagram kao na slici 47. može se vidjeti i utjecaj osnovnog materijala na otpornost abrazijskom trošenju. Za isto stanje površine je vidljivo kako su uzorci s osnovnim materijalom čelik Böhler K390PM izgubili manje na masi u odnosu na uzorke koji su kao osnovni materijal imali čelik Böhler K110.

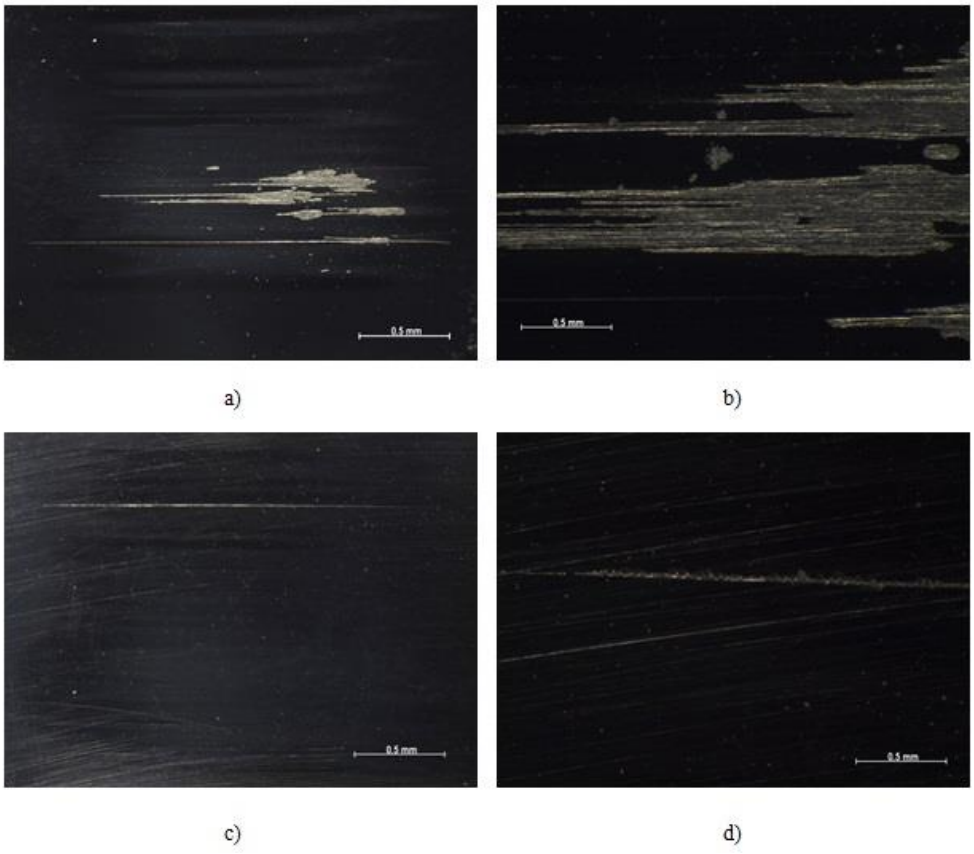
Ako se to dovede u vezu s poglavljem 4.4 u kojem je analizirana mikrostruktura uzoraka, može se zaključiti kako je čelik Böhler K390PM dobiven metalurgijom praha prikladniji kao osnovni materijal radi ravnomjerno raspoređenih karbida i ujednačnih svojstava u svim smjerovima za razliku od čelika Böhler K110 koji se radi klasične proizvodnje koji za posljedicu imaju usmjerenosti karbida u strukturi ponaša lošije.

Zanimljivo je kako su uzorci D2 31 i D2 32 izgubili manje na masi od uzoraka C2 21 makar su imali kao osnovni materijal neprikladniji čelik Böhler K110 što može ići u prilog tome kako hrapavost površine i debljina prevlake također pridonose otpornosti na abrazijsko trošenje prevlaka.

5.6 Analiza trošenih površina

Ispitivanjem otpornosti na abrazijsko trošenje dobivene su trošene površine ispitnih uzoraka koje su slikane na stereomikroskopu kako bi se analiziralo ponašanje prevlake prilikom njezinog probijanja.

Na slikama 48. i 49. prikazani su izgledi istrošenih površina slikanih na stereomikroskopu na ispitnim uzorcima čiji je osnovni materijal izrađen od čelika Böhler K390PM. Na slici 48. su prikazani uzorci s brušenim stanjem površine, a na slici 49. uzorci s poliranim stanjem površine.



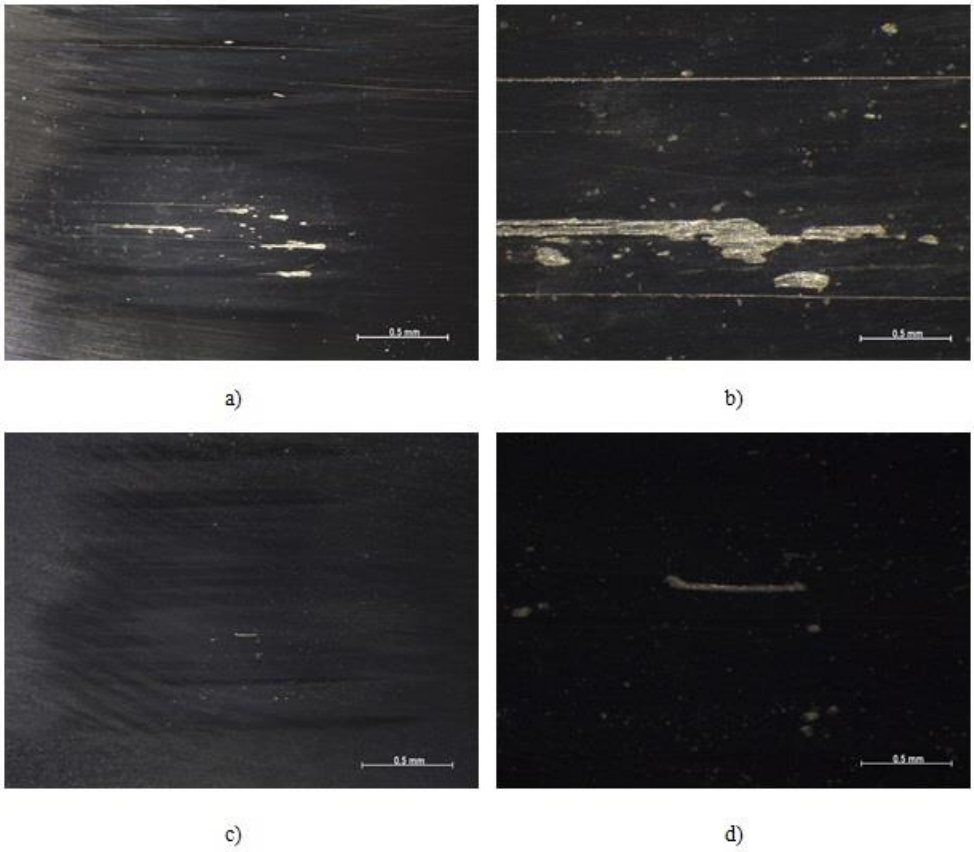
Slika 48. *Stereomikroskopske slike istrošenih površina uzoraka od čelika Böhler K390PM s brušenim stanjem površine nakon 500 okretaja*:

a) uzorak C2 21 – povećanje 7 puta

b) uzorak C2 21 – povećanje 50 puta

c) uzorak C2 22 – povećanje 7 puta

d) uzorak C2 22 – povećanje 50 puta



Slika 49. *Stereomikroskopske slike istrošenih površina uzoraka od čelika Böhler K390PM s poliranim stanjem površine nakon 500 okretaja*:

a) uzorak C2 31 – povećanje 7 puta

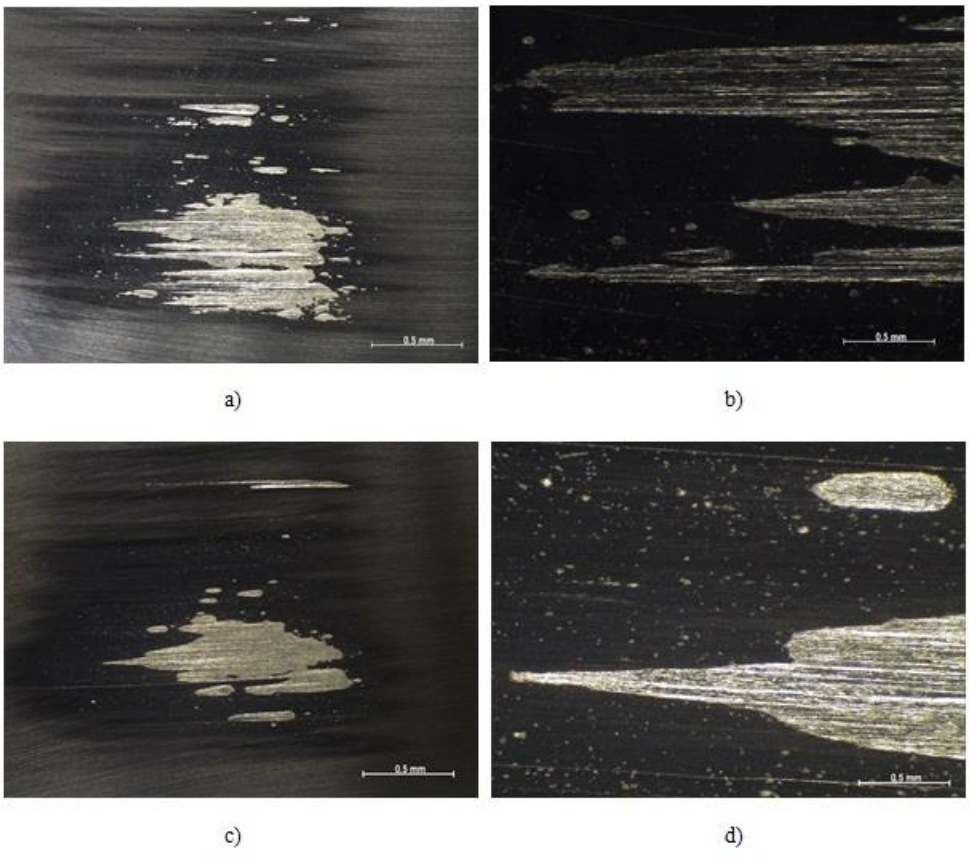
b) uzorak C2 31 – povećanje 50 puta

c) uzorak C2 32 – povećanje 7 puta

d) uzorak C2 32 – povećanje 50 puta

Kao što je vidljivo na slikama 48. i 49., neovisno o stanju površine su uzorci s debljom prevlakom značajno manje istrošeni u odnosu na uzorke s tanjom prevlakom. Sam izgled trošenih površina kod uzoraka s tanjom prevlakom sugerira da nije došlo do naglog otpadanja trošenih čestica već je prisutna plastična deformacija oko mjesta probijanja prevlake. Kod uzoraka s debljom prevlakom je vidljiv samo tanki trag trošenja koji više upućuje da je neko zrnce pijeska vjerojatno prilikom ispitivanja zarezalo u prevlaku te je na taj način probilo i potrošilo.

Na slikama 50. i 51. prikazani su izgledi istrošenih površina slikanih na stereomikroskopu na ispitnim uzorcima čiji je osnovni materijal izrađen od čelika Böhler K110. Na slici 50. su prikazani uzorci s brušenim stanjem površine, a na slici 51. uzorci s poliranim stanjem površine.



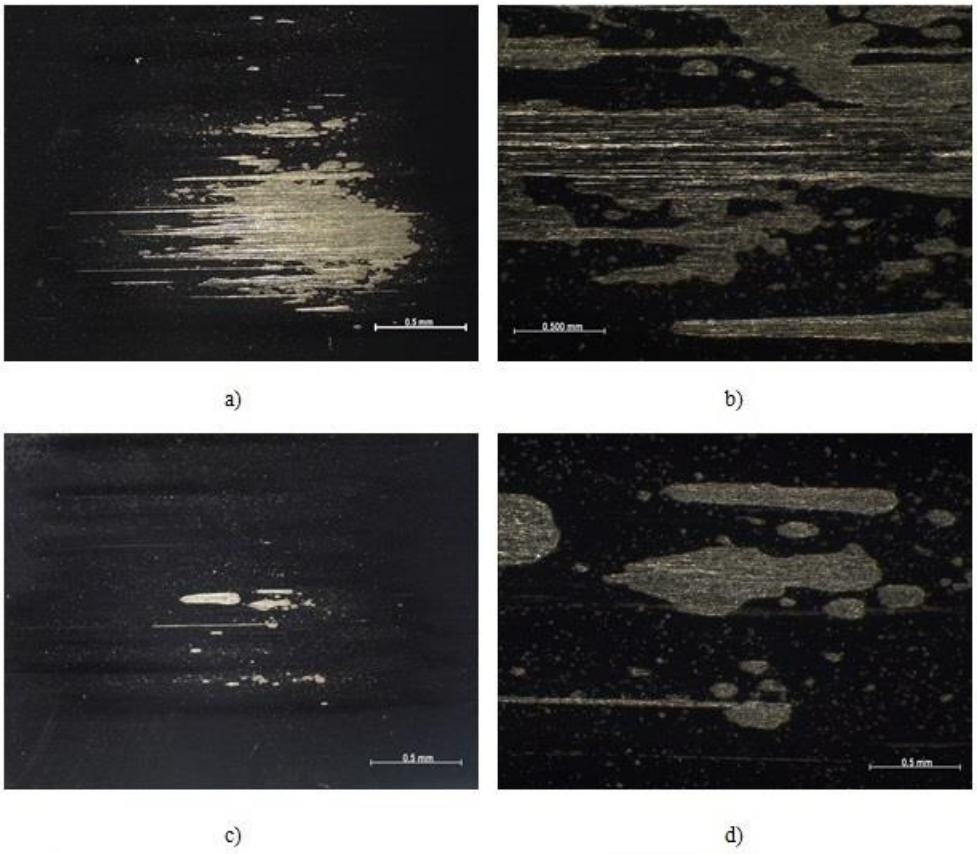
Slika 50. *Stereomikroskopske slike istrošenih površina uzoraka od čelika Böhler K110 s brušenim stanjem površine nakon 500 okretaja*:

a) uzorak D2 21 – povećanje 7 puta

b) uzorak D2 21 – povećanje 50 puta

c) uzorak D2 22 – povećanje 7 puta

d) uzorak D2 22 – povećanje 50 puta



Slika 51. *Stereomikroskopske slike istrošenih površina uzoraka od čelika Böhler K110 s poliranim stanjem površine nakon 500 okretaja*:

a) uzorak D2 31 – povećanje 7 puta

b) uzorak D2 31 – povećanje 50 puta

c) uzorak D2 32 – povećanje 7 puta

d) uzorak D2 32 – povećanje 50 puta

Za razliku od uzoraka s osnovnim materijalom čelikom Böhler K390PM, na svim uzorcima su vidljivi tragovi trošenja kod kojih je isto vidljiva plastična deformacija oko mjesta probijanja prevlake. Vidljivo je kako je kod uzorka D2 32 se prevlaka najmanje potrošila te su tragovi trošenja neravnomjerno raspoređeni za razliku kod drugih uzoraka gdje se trag trošenja pretežito kontinuirano nastavlja.

6. ZAKLJUČAK

U radu je opisan PACVD postupak prevlačenja s kojim se nanosila TiCN prevlaka različitih debljina na osnovne materijale od dva različita visokolegirana alatna čelika za hladni rad brušene ili brušene i polirane površine kako bi se utvrdila povezanost osnovnog materijala, debljine prevlake i hrapavosti površine na otpornost abrazijskom trošenju. Podloge za nanešene prevlake su bili čelici Böhler K110 (EN X155CrVMo12-1) i Böhler K390PM dobiven metalurgijom praha.

Uzorcima se ispitivala hrapavost površine pertometrom, adhezivnost tvrdomjerom Rockwell C i debljina prevlake kalotestom te im je analizirana mikrostruktura na svjetlosnom mikroskopu prije nego što im je ispitana otpornost abrazijskom trošenju metodom "suhi pijesak/gumeni kotač". Nakon provedenog ispitivanja, tragovi trošenja su analizirani na stereomikroskopu.

Iz rezultata se može zaključiti sljedeće:

- Ispitni uzorci od čelika Böhler K390PM pokazali su manji gubitak mase nakon ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje u odnosu na uzorke od čelika Böhler K110. Stoga se može zaključiti da se u ovom ispitivanju vrsta materijala podloge pokazala najutjecajnijom na otpornost abrazijskom trošenju TiCN prevlake.

- Sve ispitane TiCN prevlake su pokazale dobru adhezivnost neovisno o vrsti osnovnog materijala i hrapavosti površine. Međutim, treba naglasiti kako je kod uzoraka s osnovnim materijalom izrađenim od čelika Böhler K110 u brušenom i poliranom stanju (uzorci D2 31 i D2 32) adhezivnost prevlake ipak bila nešto slabija u odnosu na ostale uzorke.

- Kod uzoraka s istim osnovnim materijalom, uzorci s brušenim i poliranim stanjem površine su u prosjeku izgubili manje na masi nakon ispitivanja otpornosti abrazijskom trošenju od uzoraka s brušenim stanjem površine.

- Analizom na stereomikroskopu je utvrđeno kako je TiCN prevlaka pokazala dobru duktilnost prilikom probijanja jer je prisutna plastična deformacija, a ne krhki lom oko mjesta probijanja.

- Debljina prevlake je također utjecala na otpornost abrazijskom trošenju jer su kod uzoraka s istim osnovnim materijalom deblje prevlake izgubile manje na masi nego tanje prevlake za isti osnovni materijal i hrapavost površine, osim kod uzoraka C2 31 i C2 32. Kod njih je primjećen neuobičajen izgled dijagrama koji upućuje na moguće nepredviđene uvjete prilikom provedbe ispitivanja.

Iako se je u ovom radu ispitivala otpornost na abrazijsko trošenje visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad, daljnja ispitivanja bi se trebala usmjeriti na proučavanje utjecaja drugih vrsta trošenja na trajnost nanešenih prevlaka pošto su alati tijekom eksploatacije izloženi različitim vrstama trošenja. Također je potrebno daljnja ispitivanja usmjeriti prema detaljnijem proučavanju utjecaja različitih parametara na otpornost abrazijskom trošenju kako bi se što bolje shvatilo ponašanje prevlaka, kao i sustava osnovni materijal – prevlaka prilikom trošenja čime bi se životni vijek alata mogao produljiti i time dovesti do značajnih ušteda.

LITERATURA

[1] Cajner F., Matijević B., Jakovljević S., Grilec K., Predavanja i vježbe iz kolegija „Tribologija i inženjerstvo površina“, autorizirana predavanja, FSB, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2014.

[2] Kovačić S., Utjecaj nitriranja i prevlačenja na svojstva alatnih čelika za topli rad, doktorski rad, FSB, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2015.

[3] Filetin T., Grilec K., Postupci modificiranja i prevlačenja površina, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2004.

[4] Cajner F., Kumić I., Kovačić S., Cingesar M., Publikacija ARISE projekta, FSB, Zagreb, 2014.

[5] Eskildsen S.S., Mathiasen C., Foss M., Plasma CVD: process capabilities and economic aspects, Danish Technological Institute, Aarhus, 1999.

[6] Compendium 2014, PLATIT, 54th edition, 2014., str. 40 – 41.

[7] Surface preparation for coating, National Physical Laboratory, 2000., str. 1 – 2.

[8] Jelaska D., Elementi strojeva, FESB, Sveučilište u Splitu, Split, 2011.

[9] Runje B., Predavanja iz kolegija „Teorija i tehnika mjerenja“, FSB, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2010.

[10] Marković M., Obnovljivost rezultata mjerenja debljine sloja premaza, diplomski rad, FSB, Zagreb, 2013.

[11] Jakovac F., Karakterizacija PACVD prevlake na tvrdom metalu, diplomski rad, FSB, Zagreb, 2016.

[12] Krumes D., Toplinska obrada, Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 2000.

[13] Botić S., Utjecaj hrapavosti površine na prionjivost PACVD prevlake na tvrdim metalima, diplomski rad, FSB, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2016.

[14] Matijević B., Toplinska obrada metala i inženjerstvo površina, Zbornik radova, Hrvatsko društvo za toplinsku obradu i inženjerstvo površina (HDTOIP), Zagreb, 8.6.2000.

[15] Razum T., Ispitivanje prionjivosti tvrdih PACVD prevlaka na alatnom čeliku za topli rad, diplomski rad, FSB, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2016.

[16] Jakovljević S., Grilec K., Tribologija, FSB, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2015.

[17] Božić A., Usporedba otpornosti na abrazijsko trošenje različitih materijala, završni rad, FSB, Zagreb, 2013.

[18] Standard ASTM G-65 – 85 : Conducting dry sand/rubber wheel abrasion tests

[19] Cajner F., Landek D., Rafael H., Bogdanić D., Jačan J., Wear resistance of TiN/TiCN and TiN/Ti-B-N multilayer coatings fabricated by the pulsed DC PACVD process on K390 MC cold work steel, Proceeding of the EU Conference on Heat Treatment and 22nd IFHTSE Congress, Venice, Italy, 20-22. 05. 2015.

PRILOZI

Prilog 1. *Rezultati mjerenja hrapavosti površine na pertometru za uzorak C2 21*

perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen

LT	1.750 MM
LM	1.250 MM
VB	12.50 YM

LABORATORIJ
ZA PRECIZNA MJERENJA
DUZINA

FAKULTET STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE
ZAGREB

OBJEKT:C2 211

NR.:
NAME:G.BARSIC

MESS.-NR.: 6
T1 RHT 6-50 50 6

	KENNWERT		STATISTIK N = 6						
	LC GS 0.250 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.446	0.067	0.178	0.510	0.333		
2	RZ	YM	0.346	0.035	0.108	0.391	0.284		
3	RA	YM	0.042	0.002	0.007	0.046	0.039		
4	RP	YM	0.186	0.063	0.145	0.271	0.126		
5	RPM	YM	0.126	0.017	0.048	0.156	0.108		
6	WT	YM	0.098	0.022	0.060	0.140	0.080		
7	RT	YM	0.477	0.066	0.181	0.541	0.360		
8	PT	YM	0.482	0.083	0.223	0.565	0.342		

Prilog 2. *Rezultati mjerenja hrapavosti površine na pertometru za uzorak C2 22*

perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen

LT	1.750 MM
LM	1.250 MM
VB	12.50 YM

LABORATORIJ
ZA PRECIZNA MJERENJA
DUZINA

FAKULTET STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE
ZAGREB

OBJEKT:C2 221

NR.:
NAME:G.BARSIC

MESS.-NR.: 6
T1 RHT 6-50 50 6

	KENNWERT		STATISTIK N = 6						
	LC GS 0.250 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.496	0.132	0.388	0.645	0.257		
2	RZ	YM	0.341	0.085	0.198	0.421	0.223		
3	RA	YM	0.040	0.010	0.027	0.054	0.027		
4	RP	YM	0.192	0.150	0.393	0.485	0.092		
5	RPM	YM	0.119	0.050	0.136	0.211	0.076		
6	WT	YM	0.178	0.128	0.320	0.368	0.049		
7	RT	YM	0.525	0.165	0.512	0.785	0.273		
8	PT	YM	0.613	0.167	0.455	0.813	0.359		

Prilog 3. *Rezultati mjerenja hrapavosti površine na pertometru za uzorak C2 31*

perthometer S8P 4.5

Perthen (Mahr)

LT 0.560 MM
LM 0.400 MM
VB 12.50 YM

LABORATORIJ
ZA PRECIZNA MJERENJA
DUZINA

FAKULTET STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE
ZAGREB

OBJEKT:C2 311

NR.:
NAME:G.BARSIC

MESS.-NR.: 6
T1 RHT 6-50 50 6

	KENNWERT		STATISTIK N = 6						
	LC GS 0.080 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.041	0.006	0.018	0.053	0.035		
2	RZ	YM	0.034	0.004	0.010	0.040	0.031		
3	RA	YM	0.005	0.000	0.002	0.006	0.005		
4	RP	YM	0.024	0.004	0.012	0.031	0.018		
5	RPM	YM	0.019	0.003	0.008	0.024	0.016		
6	WT	YM	0.043	0.015	0.038	0.062	0.024		
7	RT	YM	0.042	0.007	0.021	0.056	0.035		
8	PT	YM	0.076	0.018	0.049	0.100	0.051		

Prilog 4. *Rezultati mjerenja hrapavosti površine na pertometru za uzorak C2 32*

perthometer S8P 4.5

Perthen (Mahr)

LT 0.560 MM
LM 0.400 MM
VB 12.50 YM

LABORATORIJ
ZA PRECIZNA MJERENJA
DUZINA

FAKULTET STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE
ZAGREB

OBJEKT:C2 321

NR.:
NAME:G.BARSIC

MESS.-NR.: 6
T1 RHT 6-50 50 6

	KENNWERT		STATISTIK N = 6						
	LC GS 0.080 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.182	0.106	0.290	0.368	0.078		
2	RZ	YM	0.090	0.031	0.083	0.151	0.068		
3	RA	YM	0.010	0.002	0.005	0.014	0.009		
4	RP	YM	0.123	0.103	0.265	0.314	0.050		
5	RPM	YM	0.056	0.031	0.082	0.118	0.037		
6	WT	YM	0.046	0.033	0.085	0.111	0.026		
7	RT	YM	0.188	0.101	0.282	0.368	0.085		
8	PT	YM	0.209	0.100	0.281	0.388	0.108		

Prilog 5. *Rezultati mjerenja hrapavosti površine na pertometru za uzorak D2 21*

perthometer S8P 4.5

Perthen (Mahr)

LT 1.750 MM
LM 1.250 MM
VB 12.50 YM

LABORATORIJ
ZA PRECIZNA MJERENJA
DUZINA

FAKULTET STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE
ZAGREB

OBJEKT:D2 211

NR.:
NAME:G.BARSIC

MESS.-NR.: 6
T1 RHT 6-50 50 6

	KENNWERT		STATISTIK N = 6						
	LC GS 0.250 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.464	0.025	0.062	0.501	0.439		
2	RZ	YM	0.378	0.032	0.095	0.420	0.326		
3	RA	YM	0.048	0.006	0.014	0.053	0.039		
4	RP	YM	0.258	0.050	0.137	0.343	0.205		
5	RPM	YM	0.194	0.023	0.060	0.220	0.159		
6	WT	YM	0.127	0.043	0.111	0.189	0.079		
7	RT	YM	0.485	0.033	0.089	0.529	0.439		
8	PT	YM	0.522	0.066	0.198	0.613	0.416		

Prilog 6. *Rezultati mjerenja hrapavosti površine na pertometru za uzorak D2 22*

perthometer S8P 4.5

Perthen (Mahr)

LT 1.750 MM
LM 1.250 MM
VB 12.50 YM

LABORATORIJ
ZA PRECIZNA MJERENJA
DUZINA

FAKULTET STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE
ZAGREB

OBJEKT:D2 221

NR.:
NAME:G.BARSIC

MESS.-NR.: 6
T1 RHT 6-50 50 6

	KENNWERT		STATISTIK N = 6						
	LC GS 0.250 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.628	0.121	0.272	0.809	0.537		
2	RZ	YM	0.475	0.074	0.222	0.615	0.393		
3	RA	YM	0.058	0.003	0.008	0.064	0.056		
4	RP	YM	0.291	0.126	0.336	0.544	0.208		
5	RPM	YM	0.215	0.043	0.124	0.294	0.170		
6	WT	YM	0.150	0.074	0.175	0.256	0.081		
7	RT	YM	0.665	0.165	0.419	0.962	0.543		
8	PT	YM	0.720	0.126	0.351	0.944	0.593		

Prilog 7. *Rezultati mjerenja hrapavosti površine na pertometru za uzorak D2 31*

perthometer S8P 4.5

Perthen (Mahr)

LT 1.750 MM
LM 1.250 MM
VB 12.50 YM

LABORATORIJ
ZA PRECIZNA MJERENJA
DUZINA

FAKULTET STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE
ZAGREB

OBJEKT:D2 312

NR.:
NAME:G.BARSIC

MESS.-NR.: 6
T1 RHT 6-50 50 6

	KENNWERT		STATISTIK N = 6						
	LC GS 0.250 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.143	0.011	0.027	0.154	0.127		
2	RZ	YM	0.117	0.007	0.022	0.130	0.108		
3	RA	YM	0.017	0.001	0.002	0.018	0.016		
4	RP	YM	0.101	0.013	0.036	0.124	0.089		
5	RPM	YM	0.076	0.004	0.011	0.082	0.072		
6	WT	YM	0.143	0.046	0.106	0.190	0.084		
7	RT	YM	0.157	0.018	0.042	0.179	0.137		
8	PT	YM	0.249	0.041	0.100	0.315	0.215		

Prilog 8. *Rezultati mjerenja hrapavosti površine na pertometru za uzorak D2 32*

perthometer S8P 4.5

Perthen (Mahr)

LT 1.750 MM
LM 1.250 MM
VB 12.50 YM

LABORATORIJ
ZA PRECIZNA MJERENJA
DUZINA

FAKULTET STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE
ZAGREB

OBJEKT:D2 321

NR.:
NAME:G.BARSIC

MESS.-NR.: 6
T1 RHT 6-50 50 6

	KENNWERT		STATISTIK N = 6						
	LC GS 0.250 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.210	0.055	0.153	0.311	0.159		
2	RZ	YM	0.154	0.025	0.063	0.194	0.130		
3	RA	YM	0.016	0.003	0.007	0.020	0.013		
4	RP	YM	0.161	0.049	0.132	0.254	0.122		
5	RPM	YM	0.104	0.024	0.066	0.143	0.077		
6	WT	YM	0.124	0.162	0.427	0.451	0.024		
7	RT	YM	0.226	0.048	0.126	0.320	0.195		
8	PT	YM	0.308	0.138	0.375	0.566	0.191		

Prilog 9. *Rezultati ispitivanja debljine prevlake i adhezivnosti za uzorke od čelika Böhler K390PM s brušenim stanjem površine*

Uzorak	D (µm)	d (µm)	D_{sr} (µm)	d_{sr} (µm)	E_d (µm)	$\bar{E}_d$ (µm)	Stupanj adhezivnosti
C2 211	696,7	596,7	682,175	570,85	2,79	**2,705**	2 - 3
	710,7	600					
	656	542,7					
	665,3	544					
C2 212	736	641,3	773,825	684	2,62		2 - 3
	733,3	632					
	821,3	738					
	804,7	724,7					
C2 221	666,7	384,7	660,85	376,175	5,9	**5,55**	2 - 3
	658	388					
	654	364					
	664,7	368					
C2 222	638	386,7	677,35	446	5,2		2 - 3
	642	383,3					
	724,7	514					
	704,7	500					

Prilog 10. *Rezultati ispitivanja debljine prevlake i adhezivnosti za uzorke od čelika Böhler K390PM s poliranim stanjem površine*

Uzorak	D (µm)	d (µm)	D_{sr} (µm)	d_{sr} (µm)	E_d (µm)	$\bar{E}_d$ (µm)	Stupanj adhezivnosti
C2 311	863,3	783,3	792,475	705	2,62	**2,655**	2 - 3
	843,3	765,3					
	736	642,7					
	727,3	628,7					
C2 312	895,3	819,3	775,65	683,35	2,69		2 - 3
	889,3	816,7					
	662	548,7					
	656	548,7					
C2 321	647,3	422,7	677	472,175	4,71	**4,885**	2 - 3
	636,7	419,3					
	716,7	528,7					
	707,3	518					
C2 322	656	424	668,35	440,325	5,06		2 - 3
	662	428,7					
	680,7	451,3					
	674,7	457,3					

Prilog 11. *Rezultati ispitivanja debljine prevlake i adhezivnosti za uzorke od čelika Böhler K110 s brušenim stanjem površine*

Uzorak	D (µm)	d (µm)	D_{sr} (µm)	d_{sr} (µm)	E_d (µm)	$\bar{E}_d$ (µm)	Stupanj adhezivnosti
D2 211	850	776	743,325	647,35	2,67	**2,68**	2 - 3
	835,3	764,7					
	639,3	520					
	648,7	528,7					
D2 212	651,3	546,7	654,475	542	2,69		2 - 3
	652	540,7					
	663,3	545,3					
	651,3	535,3					
D2 221	841,3	684,7	779,675	606,525	4,8	**4,785**	2 - 3
	842,7	682					
	718	528,7					
	716,7	530,7					
D2 222	730	545,3	738,675	554	4,77		2 - 3
	742	546,7					
	740,7	566,7					
	742	557,3					

Prilog 12. *Rezultati ispitivanja debljine prevlake i adhezivnosti za uzorke od čelika Böhler K110 s poliranim stanjem površine*

Uzorak	D (µm)	d (µm)	D_{sr} (µm)	d_{sr} (µm)	E_d (µm)	$\bar{E}_d$ (µm)	Stupanj adhezivnosti
D2 311	596,7	458,7	645,325	522,5	2,89	**3,095**	3 – 4
	600	457,3					
	695,3	588					
	689,3	586					
D2 312	839,3	747,3	693,675	562,15	3,3		3 - 4
	848,7	754,7					
	542,7	371,3					
	544	375,3					
D2 321	865,3	714,7	791,8	630,175	4,6	**4,75**	3 - 4
	853,3	712					
	733,3	546,7					
	715,3	547,3					
D2 322	672,7	451,3	663,5	441,8	4,9		3 - 4
	680	453,3					
	659,3	429,3					
	642	433,3					

Prilog 13. *Rezultati ispitivanja otpornosti na abraziju uzoraka od čelika Böhler K390PM*

Oznaka čelika							**Böhler K390PM**
Oznaka uzorka	**Masa i gubitak mase uzorka**	**Broj okretaja kotača**					
		0	100	200	300	400	500
C2 21	m,g	69,5594	69,5591	69,5584	69,5578	69,557	69,556
		70,8733	70,8731	70,8726	70,8718	70,8711	70,8701
	$m_{sr,1}$, g	0	0,0003	0,0007	0,0006	0,0008	0,001
		0	0,0002	0,0005	0,0008	0,0007	0,001
	Δm_{sr}, g	0	0,00025	0,0006	0,0007	0,00075	0,001
	σ, g	0	0,00005	0,0001	0,0001	0,00005	0
	$\Delta m_{cum,1}$, g	0	0,00025	0,00085	0,00155	0,0023	**0,0033**
C2 22	m,g	70,7875	70,7874	70,7832	70,7814	70,7795	70,7751
		71,1935	71,1931	71,1922	71,1914	71,19	71,187
	$m_{sr,2}$, g	0	0,0003	0,0006	0,0007	0,0005	0,0007
		0	0,0005	0,0003	0,0006	0,0005	0,0003
	Δm_{sr}, g	0	0,0004	0,00045	0,00065	0,0005	0,0005
	σ, g	0	0,0001	0,00015	0,00005	0	0,0002
	$\Delta m_{cum,2}$, g	0	0,0004	0,00085	0,0015	0,002	**0,0025**
C2 31	m, g	69,6082	69,6078	69,6075	69,6069	69,6064	69,6057
		70,5773	70,577	70,5768	70,5763	70,5759	70,5751
	m_{sr}, g	0	0,0004	0,0003	0,0006	0,0005	0,0007
		0	0,0003	0,0002	0,0005	0,0004	0,0008
	Δm_{sr}, g	0	0,00035	0,00025	0,00055	0,00045	0,00075
	σ, g	0	0,00005	0,00005	0,00005	0,00005	0,00005
	Δm_{cum}, g	0	0,00035	0,0006	0,00115	0,0016	**0,00235**
C2 32	m, g	69,2491	69,2489	69,2484	69,2478	69,2473	69,2469
		73,035	73,0349	73,0343	73,0338	73,0333	73,0327
	m_{sr}, g	0	0,0002	0,0005	0,0006	0,0005	0,0004
		0	0,0001	0,0006	0,0005	0,0005	0,0006
	Δm_{sr}, g	0	0,00015	0,00055	0,00055	0,0005	0,0005
	σ, g	0	0,00005	0,00005	0,00005	0	0,0001
	Δm_{cum}, g	0	0,00015	0,0007	0,00125	0,00175	**0,00225**

Prilog 14. *Rezultati ispitivanja otpornosti na abraziju uzoraka od čelika Böhler K110*

Oznaka čelika							**Böhler K110**
Oznaka uzorka	**Masa i gubitak mase uzorka**	**Broj okretaja kotača**					
		0	100	200	300	400	500
D2 21	m,g	79,3968	79,3962	79,3949	79,3938	79,3922	79,3914
		79,5172	79,5162	79,5153	79,5139	79,513	79,5123
	$m_{sr,1}$, g	0	0,0006	0,0013	0,0011	0,0016	0,0008
		0	0,001	0,0009	0,0014	0,0009	0,0007
	$\Delta\, m_{sr}$, g	0	0,0008	0,0011	0,00125	0,00125	0,00075
	σ, g	0	0,0002	0,0002	0,00015	0,00035	0,00005
	$\Delta\, m_{cum,1}$, g	0	0,0008	0,0019	0,00315	0,0044	**0,00515**
D2 22	m,g	79,3627	79,3625	79,3622	79,3612	79,3601	79,3586
		79,5711	79,571	79,5706	79,5694	79,5683	79,5666
	$m_{sr,2}$, g	0	0,0002	0,0003	0,001	0,0011	0,0015
		0	0,0001	0,0004	0,0012	0,0011	0,0017
	$\Delta\, m_{sr}$, g	0	0,00015	0,00035	0,0011	0,0011	0,0016
	σ, g	0	0,00005	0,00005	0,0001	0	0,0001
	$\Delta\, m_{cum,2}$, g	0	0,00015	0,0005	0,0016	0,0027	**0,0043**
D2 31	m, g	79,1483	79,1479	79,1473	79,1463	79,1458	79,1452
		79,3232	79,3229	79,3222	79,321	79,3205	79,3201
	m_{sr}, g	0	0,0004	0,0006	0,001	0,0005	0,0006
		0	0,0003	0,0007	0,0012	0,0005	0,0004
	$\Delta\, m_{sr}$, g	0	0,00035	0,00065	0,0011	0,0005	0,0005
	σ, g	0	0,00005	0,00005	0,0001	0	0,0001
	$\Delta\, m_{cum}$, g	0	0,00035	0,001	0,0021	0,0026	**0,0031**
D2 32	m, g	79,0658	79,0655	79,065	79,0644	79,064	79,063
		79,3426	79,3424	79,342	79,3415	79,3412	79,3403
	m_{sr}, g	0	0,0003	0,0005	0,0006	0,0004	0,001
		0	0,0002	0,0004	0,0005	0,0003	0,0009
	$\Delta\, m_{sr}$, g	0	0,00025	0,00045	0,00055	0,00035	0,00095
	σ, g	0	0,00005	0,00005	0,00005	0,00005	0,00005
	$\Delta\, m_{cum}$, g	0	0,00025	0,0007	0,00125	0,0016	**0,00255**

Prilog 15. *Kumulativni gubitak mase za uzorke od čelika Böhler K390PM*

	Gubitak mase, g			
Put trošenja, m	**C2 21**	**C2 22**	**C2 31**	**C2 32**
0	0	0	0	0
71,592	0,00025	0,0004	0,00035	0,00015
143,184	0,00085	0,00085	0,0006	0,0007
214,776	0,00155	0,0015	0,00115	0,00125
286,368	0,0023	0,002	0,0016	0,00175
357,96	0,0033	0,0025	0,00235	0,00225
Böhler K390PM				

Prilog 16. *Kumulativni gubitak mase za uzorke od čelika Böhler K110*

	Gubitak mase, g			
Put trošenja, m	**D2 21**	**D2 22**	**D2 31**	**D2 32**
0	0	0	0	0
71,592	0,0008	0,00015	0,00035	0,00025
143,184	0,0019	0,0005	0,001	0,0007
214,776	0,00315	0,0016	0,0021	0,00125
286,368	0,0044	0,0027	0,0026	0,0016
357,96	0,00515	0,0043	0,0031	0,00255
Böhler K110				