

Utjecaj prethodne toplinske obrade alatnog čelika K490MC na svojstva PACVD prevlake TiN/TiCN

Matić, Ante

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

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:235:146850>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-08**

Repository / Repozitorij:

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





**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

ZAVRŠNI RAD

Ante Matić

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Darko Landek dipl. ing.

Student:

Ante Matic

Zagreb, 2016.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ante Matić**

Mat. br.: 0035194329

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj prethodne toplinske obrade alatnog čelika K490MC na svojstva PACVD prevlake TiN/TiCN**
Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of the previous heat treatment of tool steel K490MC on the PACVD TiN/TiCN coating properties**
Opis zadatka:

Postupkom plazmom potpomognutog kemijskog prevlačenja iz parne faze (PACVD) proizvode se površinski slojevi specifičnih svojstava na konstrukcijskim dijelovima i alatima. Mogućnost kvalitetnog prevlačenja alatnih čelika za hladni rad PACVD postupkom značajno ovisi o njihovoj prethodnoj toplinskoj obradi. Prema dostupnoj literaturi i izvorima informacija u radu treba opisati varijante prethodne toplinske obrade i prevlačenje površina visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad PACVD prevlakama TiN i TiN/TiCN.

U eksperimentalnom dijelu rada odrediti debljinu i adhezivnost višeslojne PACVD prevlake TiN/TiCN nanešene na ispitne uzorke od čelika K490MC obrađene različitom prethodnom toplinskom obradom te provesti ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje prevučenih i neprevučanih uzoraka metodom „pijesak/gumeni kotač“. Mjerenjem gubitka mase i analizom istrošenih površina svjetlosnom mikroskopijom, usporediti otpornost na abrazijsko trošenje ispitivane prevlake u odnosu na neprevučenu površinu.

Na osnovi rezultata ispitivanja procijeniti utjecaj prethodne toplinske obrade čelika K490MC na adhezivnost i otpornost na abrazijsko trošenje tvrde prevlake TiN/TiCN.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

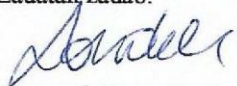
Rok predaje rada:

- 1. rok: 25. veljače 2016.
- 2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
- 3. rok: 17. rujna 2016.

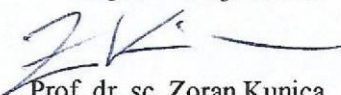
Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
- 2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
- 3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zdao:


Izv.prof. dr.sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Zoran Kunica

IZJAVA

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

ZAHVALA

Ovim putem zahvaljujem svima koji su mi pomogli u izradi završnog rada, a posebno mentoru izv.prof. dr.sc. Darku Landeku, kolegi Dini Bogdaniću za pruženu stručnu pomoć te svojoj obitelji za podršku pruženu tijekom studiranja.

SAŽETAK

U radu je primijenjen postupak prevlačenja PACVD na alatni čelik za hladni rad K490MC, prethodno kaljen, sa i bez dubokog hlađenja. Nanošenje prevlaka TiN/TiCN odvijalo se kroz 16-satni postupak prevlačenja pri temperaturi 500°C. Postignute su ujednačene vrijednosti debljine prevlaka s boljim stupnjem adhezivnosti na dijelovima uzoraka koji su bili bliži katodi tijekom postupka prevlačenja. Na prevlakama su provedena ispitivanja adhezivnosti, debljine i otpornosti na abrazijsko trošenje. Prethodna toplinska obrada pokazala je očit utjecaj na debljinu prevlake, kao i na otpornost na abrazijsko trošenje.

Ključne riječi: K490MC, PACVD, abrazijsko trošenje, TiN/TiCN.

ABSTRACT

In this paper, PACVD process was applied onto a K490MC cold-work tool steel matrix, previously heat treated, with and without deep cryogenic treatment. TiN/TiCN coatings were deposited during 16 hour cycle at temperature of 500°C, resulting in consistent thickness levels throughout the test samples, with higher adhesion degrees on sections that were closer to the cathode during the deposition cycle. Adhesion, layer thickness and abrasive wear tests that were carried out showed that previous heat treatment has obvious impact on coating thicknesses as well as on wear resistance.

Keywords: K490MC, PACVD, abrassive wear, TiN/TiCN.

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
1. UVOD.....	1
2. SVOJSTVA I PRIMJENA ALATNOG ČELIKA K490MC	2
2.2. Toplinska obrada alatnog čelika K490MC	4
2.3. Mehanička svojstva i otpornost na trošenje	8
3. PREVLAČENJE ALATNIH ČELIKA POSTUPKOM PACVD	10
3.1. Parametri postupka PACVD	10
3.2. Svojstva prevlaka TiN i TiCN.....	14
3.3. Ispitivanje prevlaka	16
3.3.1. Ispitivanje adhezivnosti prevlake	16
3.3.2. Ispitivanje debljine prevlake	18
3.3.3. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje.....	21
4. PRIPREMA I PROVEDBA ISPITIVANJA.....	24
4.1. Plan pokusa i toplinska obrada.....	24
4.2. Ispitivanje adhezivnosti prevlake TiN/TiCN	28
4.3. Ispitivanje debljine prevlake kalotestom	29
4.4. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“.....	31
5. REZULTATI I ANALIZA REZULTATA	34
5.1. Ispitivanje adhezivnosti prevlake TiN/TiCN	34
5.2. Ispitivanje debljine prevlake.....	38
5.3. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje	40
5.4. Analiza istrošenih površina	42
6. ZAKLJUČAK	44
LITERATURA	45
PRILOZI.....	46

POPIS SLIKA

Slika 1. Postupak proizvodnje čelika metalurgijom praha [2].....	3
Slika 2. Kontinuirani TTT dijagram alatnog čelika K490MC [3].....	4
Slika 3. Krivulja popuštanja za čelik K490MC [3]	5
Slika 4. Dijagram postupka klasične toplinske obrade čelika K490MC [3].....	5
Slika 5. Utjecaj parametara toplinske obrade na udjel zaostalog austenita pri kaljenju čelika AISI D2: a) utjecaj temperature i broja popuštanja, b) utjecaj vremena držanja i temperature dubokog hlađenja	6
Slika 6. Dijagram ovisnosti tvrdoće o temperaturi popuštanja kod konvencionalno i dubokim hlađenjem obrađenih čelika [4]	7
Slika 7. Ovisnost brzine trošenja o vremenu držanja na temperaturi dubokog hlađenja [4]	7
Slika 8. Usporedba kombinacije svojstava žilavosti i otpornosti na trošenje kod alatnih čelika za hladni rad [3].....	8
Slika 9. Žilavost čelika K490MC u odnosu na uobičajene alatne čelike za hladni rad [3]	8
Slika 10. Otpornost na abrazijsko trošenje čelika K490 u odnosu na uobičajene alatne čelike za hladni rad [3].....	9
Slika 11. Shematski prikaz PACVD uređaja [8]	12
Slika 12. Faze stvaranja sloja u CVD postupku prevlačenja [7].....	13
Slika 13. Shematski prikaz strukture PACVD prevlake TiN/TiCN	13
Slika 14. Svrđlo prevučeno titan nitridom [9]	14
Slika 15. Alati prevučeni prevlakom TiCN [13]	15
Slika 16. Rockwell C indentor [12].....	16
Slika 17. Prikaz postupka i šest kategorija oštećenja prevlake [11]	17
Slika 18. Prikaz primjera neupotrebljivih prevlaka [11]	17
Slika 19. Uzorak postavljen na uređaju za ispitivanje debljine prevlake [13].....	19
Slika 20. a) Pravilno podešavanja kalotesta, b) Nepravilno podešavanje kalotesta [13] [13].....	19
Slika 21. Površina uzorka nakon ispravno provedenog ispitivanja kalotestom [13]	20
Slika 22. Određivanje debljine prevlake [13].....	20
Slika 23. Skica uređaja „suhi pijesak/gumeni kotač“ [15]	21
Slika 24. Zaobljeni kvarcni pijesak Ottawa AFS 50/70 [15].....	22
Slika 25. Uređaj (a) i detalj uređaja (b) za ispitivanje metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“ [15].....	23
Slika 26. Prikaz ispitnog uzorka	24

Slika 27. Shematski prikaz toplinske obrade uzorka A01	25
Slika 28. Shematski prikaz toplinske obrade uzorka BX4	25
Slika 29. Shematski prikaz postupka prevlačenja PACVD	26
Slika 30. Prikaz označavanja površina ispitnog uzorka	27
Slika 31. Prikaz položaja otisaka pri ispitivanju adhezivnosti prevlake	28
Slika 32. Uređaj za ispitivanje debljine prevlake na FSB-u	29
Slika 33. Prikaz položaja kalota na ispitnom uzorku	30
Slika 34. Ultrazvučna kupka	31
Slika 35. Vaga "Mettler" Zurich (Laboratorij za tribologiju FSB-a)	33
Slika 36. Prikaz kalote na svjetlosnom mikroskopu	38
Slika 37. Kumulativni gubitak mase pri abrazijskom trošenju ispitnih uzoraka A01 u ovisnosti o broju okretaja gumenog kotača	40
Slika 38. Kumulativni gubitak mase pri abrazijskom trošenju ispitnih uzoraka BX4 u ovisnosti o broju okretaja gumenog kotača	40
Slika 39. Ukupni gubitak mase abrazijom uzoraka A01 i BX4 nakon 500 okretaja kotača metodom trošenja „suhi pijesak/gumeni kotač“	41
Slika 40. a) Makrosnimka traga trošenja na uzorku A01 s povećanjem 7,88:1 b) Makrosnimka traga trošenja na uzorku A01 s povećanjem 25:1 c) Snimka traga trošenja uzorka BX4 s povećanjem 1000:1 na SEM-u	42
Slika 41. a) Makrosnimka traga trošenja na uzorku BX4 s povećanjem 7,88:1 b) Makrosnimka traga trošenja na uzorku BX4 s povećanjem 25:1 c) Snimka traga trošenja uzorka BX4 s povećanjem 1000:1 na SEM-u	43

POPIS TABLICA

Tablica 1. Sastav čelika K490MC [3].....	2
Tablica 2. Usporedba parametara i karakteristika CVD, PVD i PACVD postupaka [6].....	11
Tablica 3. Osnovna fizikalna svojstva TiN prevlake [16]	14
Tablica 4. Osnovna fizikalna svojstva TiCN prevlake [16].....	15
Tablica 5. Metode za određivanje debljine prevlaka [13].....	18
Tablica 6. Varijante postupka „suhi pijesak/gumeni kotač“ [15]	22
Tablica 7. Opis ispitivanja metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“ [15].....	23
Tablica 8. Parametri toplinske obrade uzoraka	24
Tablica 9. Izgled i klasifikacija adhezivnosti otisaka na ispitnom uzorku A01	35
Tablica 10. Izgled i klasifikacija adhezivnosti otisaka na uzorku BX4	36
Tablica 11. Prikaz i kvalifikacija adhezivnosti otisaka na stranici 6 uzoraka A01 i BX4	37
Tablica 12. Debljine prevlake TiN/TiCN na ispitnim uzorcima oznaka „A01“ i BX4“	39

POPIS OZNAKA

ϑ – temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

t – vrijeme [h]

E – Youngov modul elastičnosti [GPa]

ρ – gustoća [g/cm^3]

α – koeficijent toplinske istezljivosti [K^{-1}]

λ – koeficijent toplinske vodljivosti [W/mK]

R_a – površinska hrapavost [μm]

TEORIJSKI DIO

1. UVOD

Trošenje alata predstavlja velik problem u industriji. Svaki popravak, promjena dijelova ili samo zastoj u radu mogu donijeti velike financijske gubitke. Stoga se postupcima prevlačenja i modificiranja površina alata životni vijek alata pokušava produžiti, čime se ostvaruju uštede na alatnom materijalu, troškovima popravaka i održavanja i slično.

U ovom radu opisan je suvremeni alatni čelik za hladni rad K490MC koji se koristi za izradu skupih i preciznih alata. Ispitni uzorci izrađeni od navedenog alatnog čelika prethodno su toplinski obrađeni. U cilju poboljšanja otpornosti na trošenje, čelik je prevučen prevlakom TiN/TiCN pri 500°C za što je bila potrebna temeljita priprema površine osnovnog materijala u vidu brušenja i, pred sam postupak prevlačenja, čišćenja i odmašćivanja. Ispitni uzorci su prije samog prevlačenja imali različito polazno stanje. Jedan je uzorak gašen s niže granice temperature austenitizacije (1030°C), a zatim dva puta visokotemperaturno popušten pri temperaturi od 500°C, dok je drugi gašen s više temperature austenitizacije (1080°C), nakon čega je duboko hlađen u tekućem dušiku i, naposljetku, visokotemperaturno popušten na temperaturi 575°C.

U eksperimentalnom dijelu rada provest će se ispitivanje adhezivnosti, debljine i otpornosti na abrazijsko trošenje prevlaka na alatnom čeliku K490MC u cilju određivanja utjecaja prethodne toplinske obrade na svojstva prevlake.

2. SVOJSTVA I PRIMJENA ALATNOG ČELIKA K490MC

Alatni čelici za hladni rad koriste se za izradu alata, čija površinska temperatura pri radu ne prelazi 200°C. Navedeni čelici trebaju zadovoljiti sljedeće zahtjeve. Primarni zahtjevi odnose se na otpornost na trošenje i udarnu žilavost (žilavost, udarni rad loma) i oni su nužni za primjenu praktički svakog alata. Često se u skupinu primarnih zahtjeva ubraja i otpornost na popuštanje, iako to svojstvo kod alatnih čelika za hladni rad, zbog relativno niže radne temperature alata, nije presudno za izbor alatnog čelika. Kako bi se čelik lakše izabrao, uvode se sekundarni zahtjevi koji sužavaju izbor, pa se prema njima se donosi konačna odluka o izabranom čeliku. U sekundarne zahtjeve se ubrajaju sljedeća svojstva: obradivost, dimenzijska stabilnost pri toplinskoj obradi, mogućnost obrade alata u zadanim uvjetima i slično.

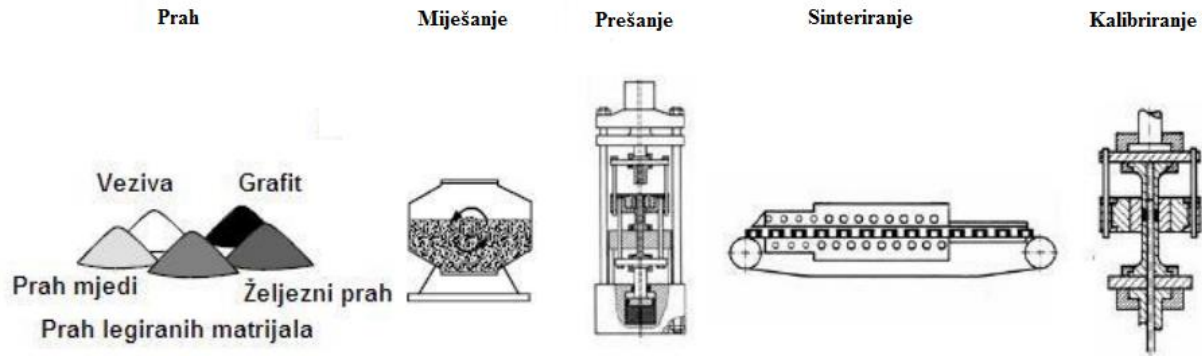
2.1. Kemijski sastav i proizvodnja alatnog čelika K490MC

Alatni čelik K490 MC pripada skupini visokogeriranih alatnih čelika za hladni rad. Poizveden je metalurgijom praha, pri čemu oznaka MC predstavlja kraticu za „MICROCLEAN“. Za kemijski sastav navedene skupine čelika uobičajno je da sadrže više od 5% kroma. Uz krom, sadržavat će još i vanadij, molibden i/ili volfram. Krom kao legirni element značajno utječe na korozivsku postojanost, a da bi sam čelik bio nehrđajući, udio kroma treba biti iznad 12%, a osim toga, utječe i na stvaranje karbida ($(Fe,Cr)_3C$, Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$). Također, krom povisuje temperaturu austenitizacije. Udio ugljika u skupini visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad iznosi između 1 do 2%. Navedena skupina čelika posjeduje dobru otpornost na trošenje. U tablici 1. prikazan je sastav čelika K490MC.

Tablica 1. Sastav čelika K490MC [3]

%C	%Cr	%Mo	%V	%W	Ostali elementi
1,40	6,40	1,50	3,70	3,50	+Nb

Metalurgija praha ili praškasta metalurgija (eng. Powder Metallurgy - PM) je tehnologija proizvodnje mehaničkih konstrukcijskih i drugih dijelova od metalnih prahova [1]. Prah se dobiva iz taline iz razloga što je talina homogena i pri skrućivanju sitnih čestica praha ne dolazi do segregacija koje mogu značajno utjecati na mikrostrukturu čelika nakon završetka postupka. Proizvesti prah moguće je: atomizacijom, mehaničkim ili kemijskim postupcima ili elektrolizom. Nakon proizvodnje praha slijede miješanje, prešanje, sinteriranje i kalibriranje. Cijeli postupak prikazan je na slici 1.



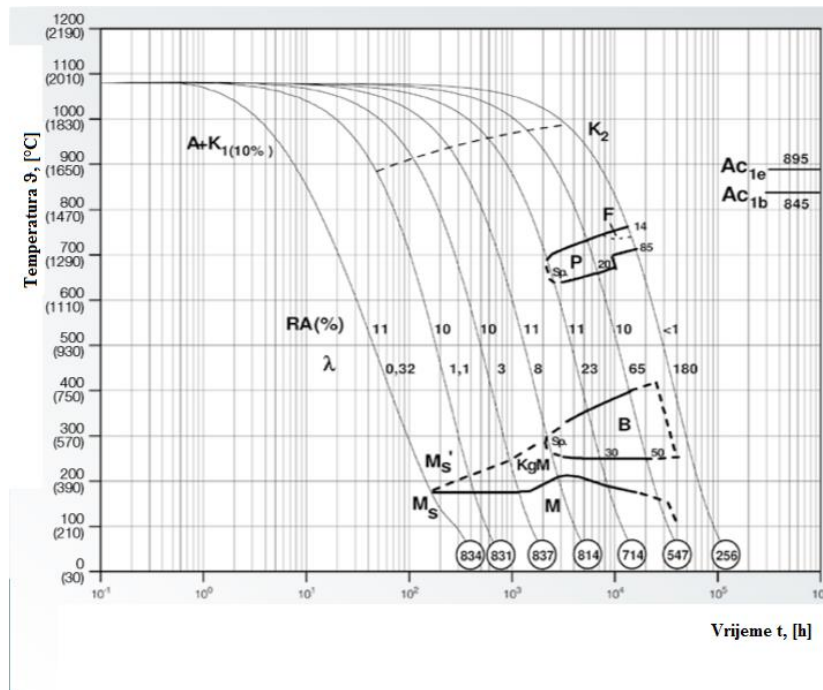
Slika 1. Postupak proizvodnje čelika metalurgijom praha [2]

Nakon miješanja, prah je potrebno prešati, odnosno, zbiti u željeni oblik. Slijedi postupak sinteriranja što je postupak povezivanja praha reakcijama u čvrstu masu, a može se odvijati pri povišenim temperaturama i povišenom tlaku (često u autoklavama).

Čelici proizvedeni praškastom metalurgijom imaju niz prednosti: sitnozrnatu i ravnomjernu mikrostrukturu, otpornost na pregrijavanje, dimenzijska postojanost, poboljšana im je sposobnost brušenja, poliranja, elektroerozije i fotonagrizanja, povišena otpornosti na trošenje. Međutim, uz prednosti, ima i nedostatke kao što su visoka cijena alata i proizvodnje što direktno utječe na prodajnu cijenu čelika (čelici proizvedeni metalurgijom praha mogu biti do 10 puta skuplji od njihovog ekvivalenta u sastavu proizvedenog klasičnom metalurgijom, ograničenost oblika zbog kalupa u kojem se prah preša.

2.2. Toplinska obrada alatnog čelika K490MC

Alatni čelik K490MC gasi se sa sličnih temperatura austenitizacije kao ostali uobičajeno primjenjivani alatni čelici za hladni rad (X155CrVMo 12-1, AISI D2) pri čemu zadržava slična mehanička svojstva za temperature austenitizacije u rasponu od 1030°C do 1080°C [7]. Pripadajući TTT dijagram čelika K490MC prikazan je na slici 2. Krivulje popuštanja čelika K490MC prikazane su na slici 3.



Slika 2. Kontinuirani TTT dijagram alatnog čelika K490MC [3]

Karakteristični slijed toplinske obrade čelika K490MC je sljedeći:

1) Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja:

- Temperatura žarenja – 650...700 °C
- Nakon progrijavanja, držanje 1..2h u neutralnoj atmosferi
- Sporo hlađenje u peći

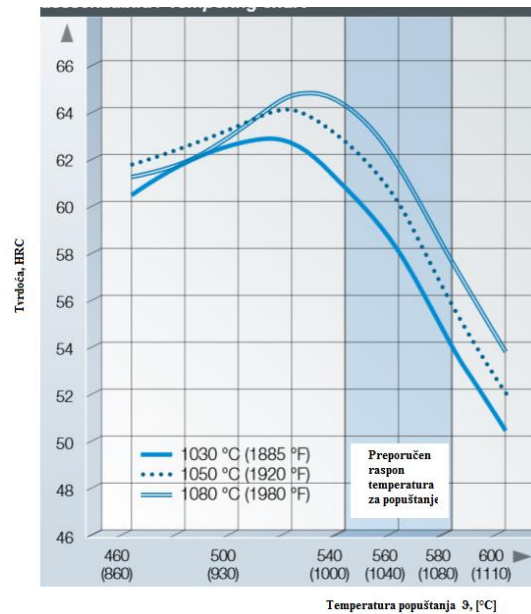
2) Kaljenje:

- Temperatura austenitizacije – 1030...1080 °C
- Držanje na temperaturi austenitizacije 20...30 min
- Gašenje u ulju

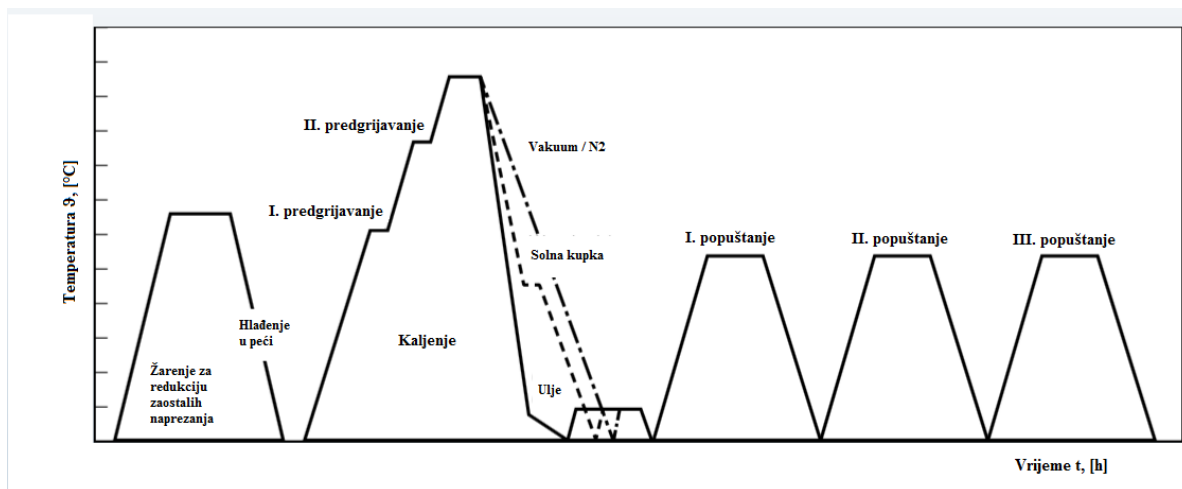
3) Popuštanje:

- Sporo ugrijavanje na temperaturu popuštanja odmah nakon kaljenja
- 1h držanja u peći za svakih 20 mm debljine (najmanje 2h)
- Hlađenje na zraku
- Preporučeno je čelik popuštati barem tri puta
- Tvrdoaća koju je moguće postići iznosi 58-64 HRC

Karakterističan slijed toplinske obrade čelika K490MC prikazan je na slici 4.



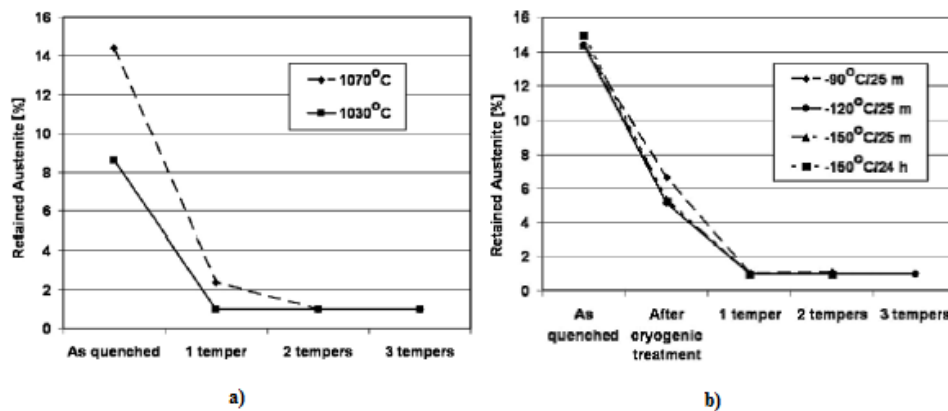
Slika 3. Krivulja popuštanja za čelik K490MC [3]



Slika 4. Dijagram postupka klasične toplinske obrade čelika K490MC [3]

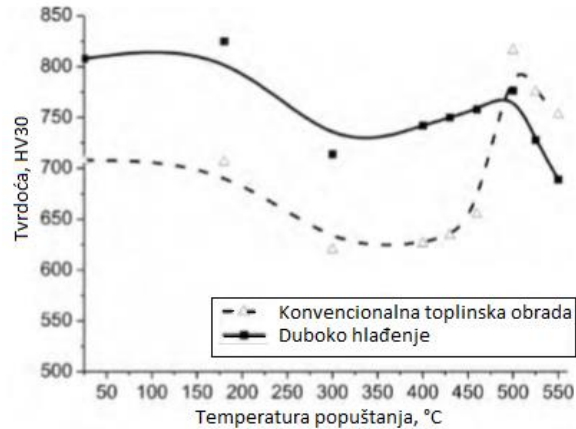
Nakon kaljenja čelika K490MC u mikrostrukturi se nalazi primarni martenzit i zaostali austenit, te eutektički i sekundarni karbidi. Za uklanjanje zaostalog austenita u zakaljenom čeliku K490MC moguće je prije popuštanja primijeniti i duboko hlađenje.

Duboko hlađenje (eng. Deep Cryogenic Treatment, DCT) je postupak koji se provodi kod čelika kojima je temperatura M_f ispod sobne temperature, a pritom sav zaostali austenit u čeliku prelazi u martenzit. Kao sredstvo za hlađenje koristi se suhi led ili tekući dušik. Vrijeme hlađenja je između 24 i 36 sati jer zaostali austenit vrlo sporo prelazi u martenzit. Radi eliminacije zaostalog austenita, umanjuje se i pojava sekundarnog otvrdnuća pri popuštanju. Na slici 5 prikazan je utjecaj parametara austenitizacije, dubokog hlađenja i popuštanja čelika AISI D2 (X155CrVMo 12-1 (1.2379)) na udjel zaostalog austenita. Iz slike 5 je vidljivo da se postiže značajno viši udjel zaostalog austenita nakon gašenja s više temperature austenitizacije, u odnosu na udjel zaostalog austenita nakon gašenja s donje preporučene temperature austenitizacije. Primjena popuštanja značajno smanjuje udjel zaostalog austenita, ali za povišene udjele, nužna su dva popuštanja. Primjena dubokog hlađenja također značajno smanjuje udjel zaostalog austenita, bez obzira na temperaturu austenitizacije i on ostaje praktički isti nepromijenjen (i nizak) nakon samo jednog popuštanja. Slični zaključci mogu se primijeniti i na čelik K490MC, iz iste skupine alatnih čelika kao i čelik AISI D2.



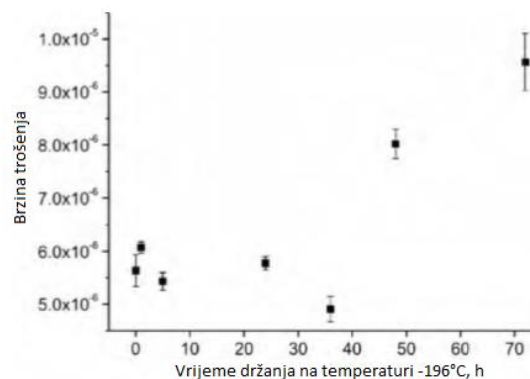
Slika 5. Utjecaj parametara toplinske obrade na udjel zaostalog austenita pri kaljenju čelika AISI D2: a) utjecaj temperature i broja popuštanja, b) utjecaj vremena držanja i temperature dubokog hlađenja

Na slici 6. prikazane su krivulje popuštanja istog čelika X153CrVMo12 (AISI D2) gašenog s temperature austenitizacije od 1080°C, nakon konvencionalnog popuštanja te nakon dubokog hlađenja i popuštanja. Iz njih se uočava izraženo jako izraženo sekundarno otvrdnuće kod popuštenih uzoraka na temperaturama popuštanja oko 500°C, dok je ono značajno manje kod duboko hlađenih i popuštenih uzoraka.



Slika 6. Dijagram ovisnosti tvrdoće o temperaturi popuštanja kod konvencionalno i dubokim hlađenjem obrađenih čelika [4]

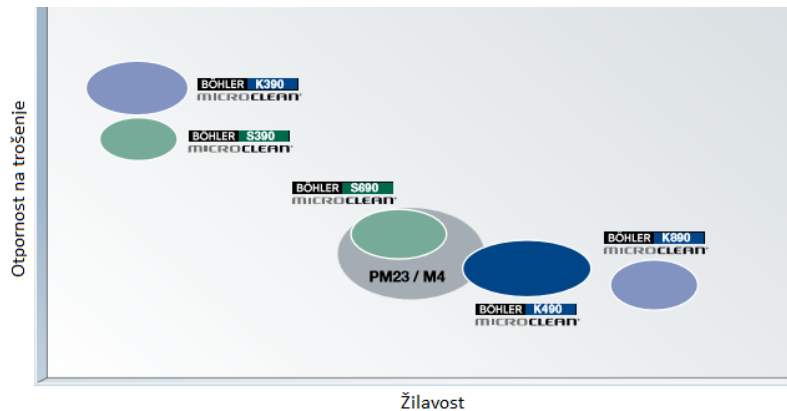
Cilj dubokog hlađenja je postizanje veće tvrdoće čelika i bolje otpornosti na trošenje u odnosu na tvrdoće postignute postupkom popuštanja. Grupa autora u [4] navodi da postupak dubokog hlađenja poboljšava otpornost na trošenje kod alata. Čimbenici koji su bili kontrolirani tijekom ispitivanja su: temperatura austenitizacije, brzina hlađenja sa sobne temperature do temperature dubokog hlađenja, vrijeme držanja, brzina ugrijavanja od temperature dubokog hlađenja do sobne temperature i temperatura popuštanja. Rezultati su pokazali da je najutjecajniji čimbenici na svojstva alatnih čelika kod konvencionalne toplinske obrade temperatura austenitizacije i popuštanja, dok su kod postupka dubokog hlađenja podijeljeni. Naime, za poboljšanje savojne čvrstoće, istezljivosti deformacije pri opterećenju pozitivno djeluje kombinacija niske temperature austenitizacije i visoke temperature popuštanja. Za obrnutu situaciju, gdje je temperatura austenitizacije visoka, a temperatura popuštanja niska, vrijedi da ona pozitivno djeluje na tvrdoću i otpornost na trošenje. Otpornost na trošenje je gotovo konstantna kod vremena držanja do 24 sata, dok iznad 36 sati otpornost na trošenje doseže maksimum. Nakon toga, otpornost na trošenje se ponovno smanjuje, što je prikazano na slici 7.



Slika 7. Ovisnost brzine trošenja o vremenu držanja na temperaturi dubokog hlađenja [4]

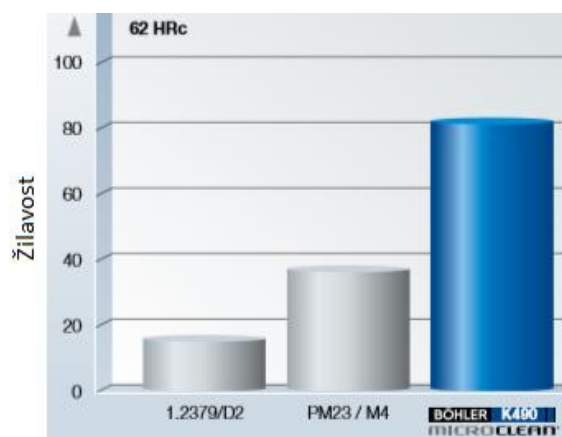
2.3. Mehanička svojstva i otpornost na trošenje

Čelik K490 je novi Böhlerov alatni čelik za hladni rad koji među ostalim uobičajeno korištenim visokolegiranim alatnim čelicima predstavlja kompromis između žilavosti i otpornosti na trošenje, što je prikazano u dijagramu na slici 8. Od proizvođača se isporučuje u meko žarenom stanju s maksimalnom tvrdoćom od 280 HB.

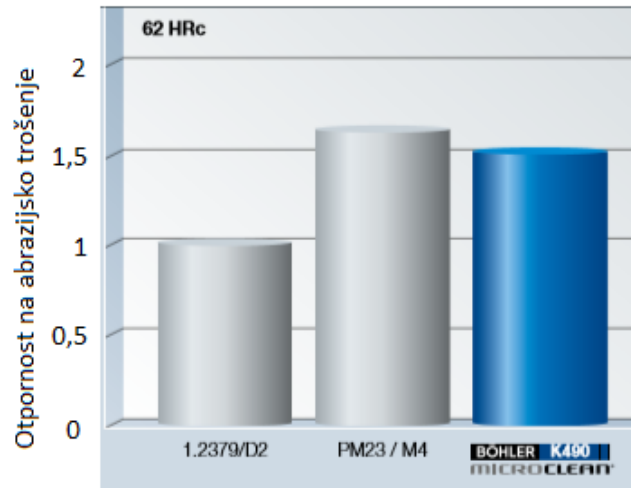


Slika 8. Usporedba kombinacije svojstava žilavosti i otpornosti na trošenje kod alatnih čelika za hladni rad [3]

Alatni čelik K490MC je značajno poboljšanih svojstava u odnosu na čelike kao što su M4 ili PM23 te uz dobru otpornost na trošenje ima značajno veću žilavost. Svojim svojstvima, dobrom obradivošću i neosjetljivošću na izbor temperature austenitizacije (iz preporučenog intervala temperatura) pri toplinskoj obradi omogućava raznovrsniju alatnu primjenu. Prikaz žilavosti i otpornosti na abrazivno trošenje čelika K490MC nalazi se na slikama 9. i 10.



Slika 9. Žilavost čelika K490MC u odnosu na uobičajene alatne čelike za hladni rad [3]



Slika 10. Otpornost na abrazijsko trošenje čelika K490 u odnosu na uobičajene alatne čelike za hladni rad [3]

Ostala svojstva čelika K490MC jesu sljedeća:

- Odlična obradivost
- Visoka tlačna čvrstoća
- Jednostavna toplinska obrada
- Stabilna mehanička svojstva

Primjena čelika K490MC je vrlo raznolika, pa se tako može koristiti za sljedeće alate:

- Rezne alate
- Alate za vučenje
- Alate za izradu navoja
- Kalupe za sinteriranje
- Kalupe u farmaceutskoj industriji
- Kalupe za izradu keramike
- Industrijske noževe
- Alate u industriji polimera...

3. PREVLAČENJE ALATNIH ČELIKA POSTUPKOM PACVD

3.1. Parametri postupka PACVD

Postupak plazmom potpomognutog kemijskog prevlačenja iz parne faze (eng., Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition) je postupak nanošenja tankih slojeva nastalih kao produkt složenih kemijskih reakcija jednog ili više ioniziranih plinova s parnim ili plinovitim prekursorom (izvorom metalnih elemenata za prevlaku) na zagrijanom supstratu. Ovaj postupak atomske depozicije daje prevlake vrlo visoke čistoće, čija se struktura može kontrolirati na nanometarskoj ili čak atomarnoj razini [5]. Postupak PACVD razvijen je kao poboljšanje fizikalnog prevlačenja iz parne faze (eng., Physical Vapour Deposition) koji nije prikladan za dijelove složene geometrije i klasičnog CVD postupka koji nije bio prikladan za alatne čelike zbog visoke temperature procesa prevlačenja i sljedećih značajnih nedostataka:

- a) Sigurnosni rizik od raznih toksičnih, korozivnih, zapaljivih i/ili eksplozivnih plinova prekursora CVD postupka,
- b) Često potrebna dvostruka toplinska obrada (zbog visoke temperature CVD obrade),
- c) Visoki investicijski troškovi za CVD uređaj,
- d) Opasnost od deformacija prevlake (kod čelika),
- e) Velika potrošnja energije tijekom prevlačenja.

Razvojem PACVD postupka postignuta su značajna poboljšanja i proširenja područja primjene proizašla iz promjene sljedećih parametara u odnosu na CVD postupak [5]:

- 1) Temperatura prevlačenja:
 - Klasični CVD postupak: 800...1000°C
 - PACVD postupka: 450...650°C
- 2) Tlak u vakuumskoj komori
 - Klasični CVD postupak: – atmosferski, niski, ultravisoki vakuum
 - PACVD postupak: grubi do srednji vakuum: 0,01...0,13 Pa

Pri tome su u provedbi PACVD postupka zadržane sljedeće prednosti CVD postupka [5]:

- a) Mogućnost proizvodnje materijala visoke gustoće i čistoće (>99%),
- b) Proizvodnja ujednačenih filmova s dobrom ponovljivošću i adhezijom uz relativno visoku brzinu taloženja,
- c) Mogućnost jednolikog prevlačenja dijelova složene geometrije,
- d) Upravljiva brzina taloženja,
- e) Mogućnost stvaranja metastabilnih faza,
- f) Dobra kontrola stehiometrije i debljine filma,
- g) Jeftino predčišćenje..

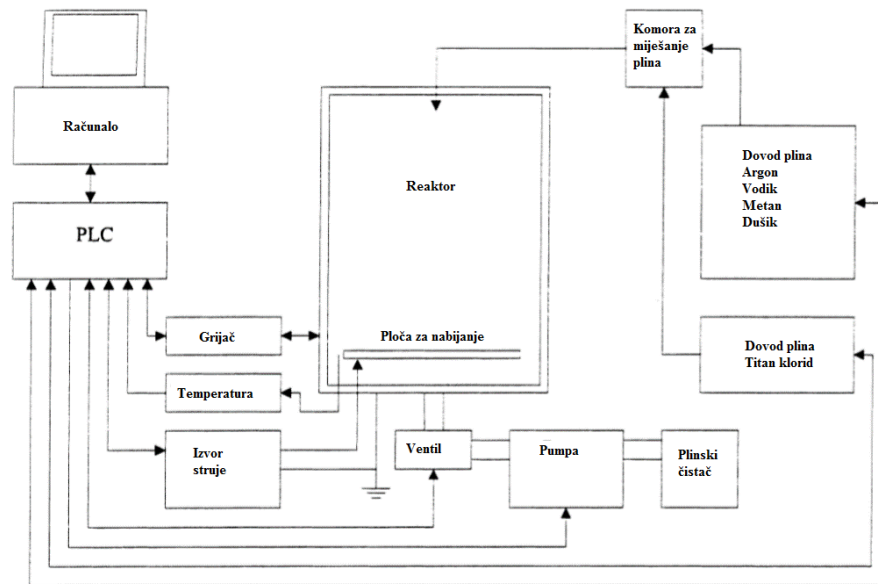
U tablici 2. uspoređena su svojstva postupaka PACVD u odnosu na postupke PVD i CVD.

Tablica 2. Usporedba parametara i karakteristika CVD, PVD i PACVD postupaka [6]

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

Za tribološke svrhe postupkom PACVD nanose se pretežno karbidi i nitridi od četvrte do šeste podskupine periodnog sustava elemenata. Od najveće je važnosti pri tome titan-nitrid (TiN), titan-karbid (TiC), kao i ternarni spoj titan-karbonitrid (Ti[C, N]). Nadalje su poznati spojevi od cirkonij-nitrida (ZrN), hafnij-nitrida (HfN), vanadij-karbida (VC) te volfram-karbida (W₂C) i nekih drugih spojeva iz te skupine [9].

Shematski prikaz PACVD uređaja prikazan je na slici 11. Uređaj se sastoji od vakuumske komore (reaktora) s grijačima spojene na sustav za dovođenje smjese uobičajenih plinova (Ar, H₂, CH₄, N₂) i prekursora (TiCl₄), čiji se protok može vrlo pouzdano regulirati, generatora plazme, sustava za neutralizaciju nusprodukata prevlačenja, napajanja te PLC regulacijskog sustava. Dodavajući energiju plinu koji okružuje obratke, inertni i aktivni plinovi se ioniziraju i aktiviraju, odnosno stvorena je kemijski aktivirana plazma koja omogućuje prevlačenje bez dostizanja visokih temperatura koje su karakteristične za klasični CVD postupak. Sam se proces izvodi uz automatsku regulaciju PLC-om (eng. Programmable Logic Controller - programabilni logički kontroler) vođen postavkama zadanim u odgovarajućem računalnom programu.



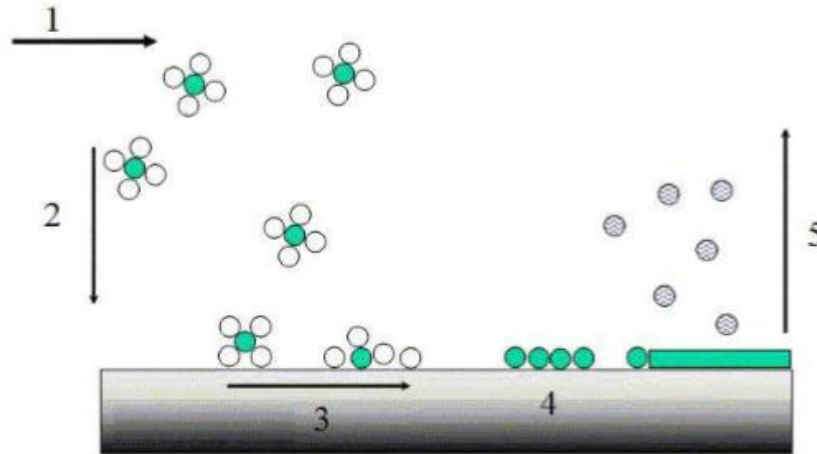
Slika 11. Shematski prikaz PACVD uređaja [8]

Priprema obradaka za postupak PACVD prevlačenja sastoji od finog brušenja i eventualno poliranja te čišćenja i odmašćivanja. Dobra priprema površine substrata (optimalna je srednja hrapavost manja $R_a < 0,2 \mu\text{m}$) preduvjet je postizanja dobre adhezivost prevlake. Također je nužno odabrati kompatibilne materijale substarta i prevlake, odnosno eventualno provesti npr. postupka prethodnog nitiranja (bez zone spojeva) kako bi se ostvarila dobra prionljivost npr. nitridnih prevlaka (TiN, TiCN).

Nakon stavljanja šarže u komoru, komora se evakuira i u reducirajućoj atmosferi ugrije na temperaturu između $450 \text{ }^\circ\text{C}$ do $650 \text{ }^\circ\text{C}$. Potom se površina substarta čisti postupkom otprašivanja u plazmi (sastavljenoj od iona dušika, argona i vodika), kako bi se uklonio sloj oksida i eventualno zaostale nečistoće. Ugrijavanje šarže se ostvaruje vanjskim grijanjima (reaktor s toplim stijenkama) ili direktnim grijanjem obradaka plazmom unutar reaktorskog prostora (reaktor s hladnim stijenkama). Pri tome je jednolična raspodjela temperature u cijeloj šarži važna pretpostavka za jednolični rast sloja.

U postupku PACVD pojavljuje se sljedećih pet faza prijenosa mase kao i postupku CVD shematski prikazanih na slici 12:

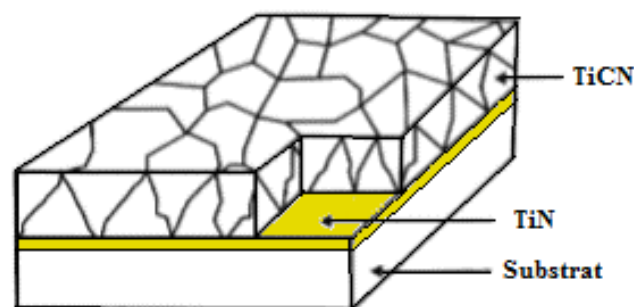
- 1) Ubacivanje reaktanata u retortu (vakuumsku komoru).
- 2) Difuzija reaktanata kroz granični sloj do površine predmeta.
- 3) Adsorpcija reaktanata na površinu.
- 4) Reakcija na površini: nastanak otoka ili klastera.
- 5) Difuzija (uklanjanje) produkata koji ne sudjeluju u nastanku sloja od površine predmeta.



Slika 12. Faze stvaranja sloja u CVD postupku prevlačenja [7]

Pri tome treba naglasiti da se kod PACVD postupka nastankom plazme između obradka i elektroda, odnosno unutrašnje stjenke vakuumske komore ubrzavaju se faze 2. do 5.

Kada se ostvari temperatura prevlačenja, prespoji se dovod plina na dovod reaktivnih plinova (prekursora) iz kojih će kemijskim reakcijama nastati materijal prevlake. Za prevlake na osnovi titana kao prekursor se uobičajeno koristi kapljevina TiCl_4 koja isparuje u potom se ubacuje vakuumsku komoru – reaktor. U njoj na temperaturama između $450\text{ }^\circ\text{C}$ do $650\text{ }^\circ\text{C}$ nastaje niz kemijskih reakcija u kojima kao industrijski koristan produkt nastaje prevlaka na površini šarže. Brzina rasta sloja iznosi do nekoliko $\mu\text{m/h}$, ovisno o temperaturi, parcijalnim tlakovima reakcijskih plinova i para prekursora te parametrima plazme (vrsti plazme, naponu i električnoj snazi plazme, trajanju impulsa i dr.). Za vrijeme rasta sloja također dolazi do pojačane međudifuzije između osnovnog materijala i sloja. To ukupno rezultira izvrsnom prionljivošću slojeva. Nakon isteka vremena prevlačenja isključuje se ugrijavanje a vakuumska komora (reaktor) se hladi strujom zraka. Na slici 13. shematski je prikazana struktura CVD i PACVD prevlake.



Slika 13. Shematski prikaz strukture PACVD prevlake TiN/TiCN

3.2. Svojstva prevlaka TiN i TiCN

Titan nitrid (TiN) je izuzetno tvrd keramički materijal, koji se često koristi kao tvrda zaštitna prevlaka na titanovim legurama, čeliku ili aluminiju da štite površinu alata ili konstrukcijskih dijelova od trošenja. U većini primjena debljina tankog sloja titan nitrida je manja od 5 μm . Osnovna fizikalna svojstva TiN prevlake nalaze se u tablici 3.

Tablica 3. Osnovna fizikalna svojstva TiN prevlake [16]

Osnovna fizikalna svojstva	
Youngov modul elastičnosti, E	251 GPa
Gustoća	5,40 g/cm ³
Najviša radan temperatura	500 °C
Tvrdoća (Vickers)	2300 \pm 300 HV0,05
Faktor trenja u triboparu s čelikom 100Cr6	0,60 -0,65
Koeficijent toplinskog istezanja, α	9,35 \times 10 ⁻⁶ K ⁻¹
Koeficijent toplinske vodljivosti, λ	19,2 W/(m K)
Površinska hrapavost, R _a	0,2 μm

Najveća primjena titan nitrida je za tvrde prevlake na alatima kod alatnih strojeva, kao što su svrdla za bušenje i glodala, kojima se time vijek trajanja povećava za 3 ili više puta. Učinkovitost se može povećati primjenom višeslojnog prevlačenja. TiN spada u skupinu neoksidnih keramičkih prevlaka koje karakterizira vrlo visoka tvrdoća, visoko talište i kemijska otpornost (nagrizaju ga samo vruće kiseline) i mali koeficijent trenja. Zlatne je boje, a svrdlo prevučeno titan nitridom prikazano je na slici 14.



Slika 14. Svrdlo prevučeno titan nitridom [9]

Titan karbonitrid (TiCN) je još jedna prevlaka iz skupine neoksidne keramike, a također se koristi kao prevlaka na raznim reznim alatima radi produljivanja vijeka trajanja. Odlikuje se vrlo visokom tvrdoćom, poboljšanom otpornošću na trošenje, dobrim adhezivnim svojstvima, žilavošću, niskim faktorom trenja i sl. Osnovna fizikalna svojstva prevlake TiCN navedena su u tablici 4. Nanosi se u debljinama 2-4 μm .

Tablica 4. Osnovna fizikalna svojstva TiCN prevlake [16]

Osnovna fizikalna svojstva	
Youngov modul elastičnosti, E	450 – 1900 GPa
Gustoća	7,00 g/cm ³
Najviša radna temperatura	450 °C
Tvrdoća (Vickers)	3500 ± 500 HV _{0,05}
Faktor trenja u triboparu s čelikom 100Cr6	0,2
Površinska hrapavost, R_a	0,17 μm

Prevlaka TiCN je plavo-sive boje i primjena joj je vrlo svestrana, a zbog svoje netoksičnosti moguća je njena primjena i u medicini kao prevlaka na raznim medicinskim instrumentima, pa čak i implantatima. Alati prevučeni prevlakom TiCN prikazani su na slici 15. Usporedba parametara i karakteristika postupaka CVD, PVD i PACVD prikazana je u 2ablici 2.



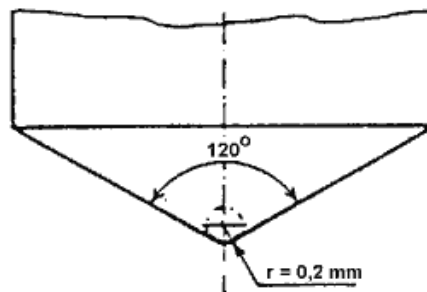
Slika 15. Alati prevučeni prevlakom TiCN [13]

3.3. Ispitivanje prevlaka

Jednoslojno ili višeslojno prevučeni materijali predstavljaju alternativu konvencionalnim materijalima koji su inače ograničeni svojstvima površine, međutim, da bi prevlaka poboljšala mehanička svojstva alata, ona mora zadovoljiti određene kriterije, kao što su adhezivnost, debljina, otpornost na trošenje i slično, stoga je potrebno, prije primjene samog alata, provesti ispitivanja koja će nam dati uvid u ponašanje materijala prilikom uporabe.

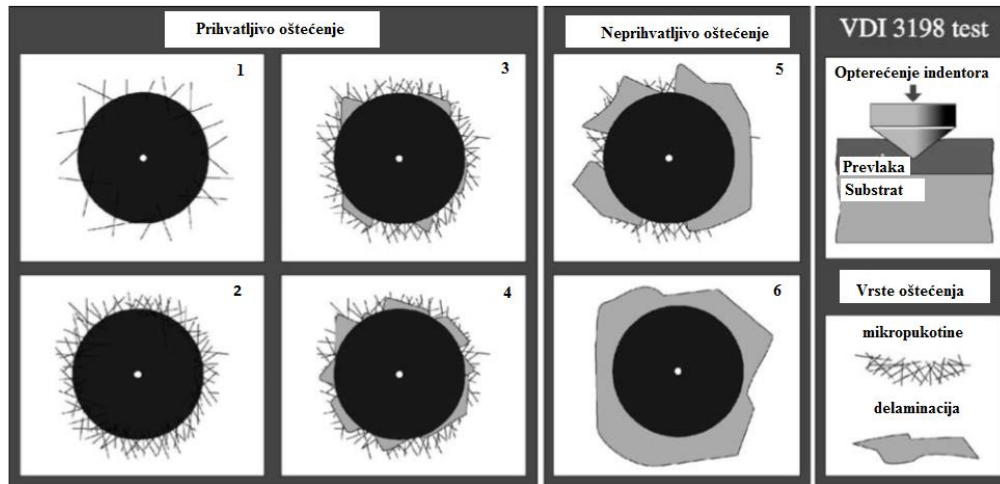
3.3.1. Ispitivanje adhezivnosti prevlake

Ispitivanje prevlaka može biti izvedeno na više načina, međutim, ovom radu je provedeno ispitivanje prema normi VDI 3198 koje se temelji na utiskivanju Rockwell C indentora na prevučenoj površini. Ovim ispitivanjem, može se, prema autorima iz [11], ukazati na dvije karakteristike prevlake: adhezivnost, ali i krhkost i kohezivnost. Pritom se prati ponašanje materijala, odnosno prevlake na površini oko otiska, po čemu se onda daljnjim razmatranjem donosi zaključak o svojstvima. Prikaz Rockwell C indentora nalazi se na slici 16.



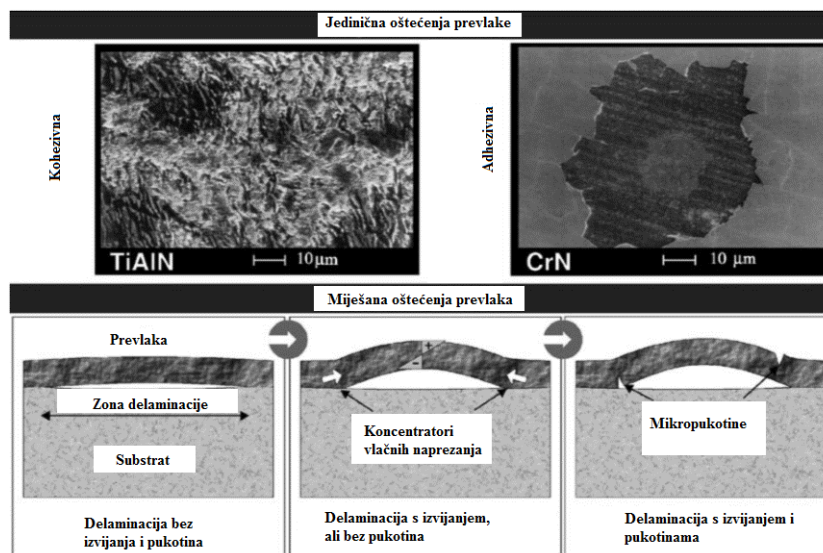
Slika 16. Rockwell C indenter [12]

Rockwell C indenter je izrađen od dijamanta kao stožac s vršnim kutom od 120° , a svojim utiskivanjem uzrokuje plastičnu deformaciju na površini ispitivanog materijala. Pri ispitivanju se mora poštovati pravilo 1/10, što znači da uzorak mora biti barem 10 puta deblji od dubine otiska indenterom. Nakon utiskivanja, otisak se promatra mikroskopom i pritom se pozornost obraća na ponašanje prevlake oko otiska i po tome se svrstava u jednu od šest kategorija. Na slici 17. prikazani su postupak utiskivanja kao i navedene kategorije oštećenja prevlake.



Slika 17. Prikaz postupka i šest kategorija oštećenja prevlake [11]

Kao što je to vidljivo na slici 17., ponašanja prevlaka u kategorijama od 1 do 4 su prihvatljiva, dok su kategorije 5 i 6 neprihvatljive. U prve dvije moguće je uočiti kako se oštećenje prevlake oko otiska sastoji samo od mikropukotina, kojih, naravno, u kategoriji 2 ima znatno više. U kategorijama 3 i 4 se već javljaju i začeci delaminacije, što su sitni dijelovi prevlake koji su se pod opterećenjem indentora odvojile od površine osnovnog materijala. I, naposljetku, u kategorijama 5 i 6, delaminacija je znatna i oštećenje prevlake preveliko, iz čega se da zaključiti da je prevlaka vrlo slabe adhezivnosti i, stoga, neupotrebljiva. Primjeri neupotrebljivih prevlaka prikazani su na slici 18.

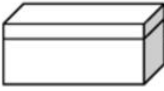
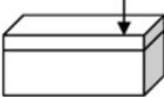
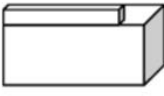




Slika 18. Prikaz primjera neupotrebljivih prevlaka [11]

3.3.2. Ispitivanje debljine prevlake

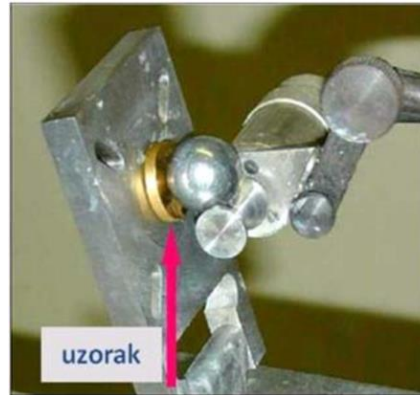
Ispitivanja debljine moguće je kategorizirati u nekoliko skupina, među njima su optičke metode, metode odnošenjem, elektromagnetski postupci i slično, a njihov prikaz nalazi se u tablici 5.

Tablica 5. Metode za određivanje debljine prevlaka [13]

Optičke metode		- Materijalografija - SEM - Holografske metode
Elektromagnetski postupci		- Vrtložne struje - Magnetska indukcija - Volumne metode
Metode odnošenjem		- Kulometrija - Uredaji s ticalom - Postupak utiskivanjem kalote
Metode odjeka		- povratno raspršivanje β - zraaka - ultrazvučne metode
Postupci pobuđivanjem		- flouescencija x- zraaka

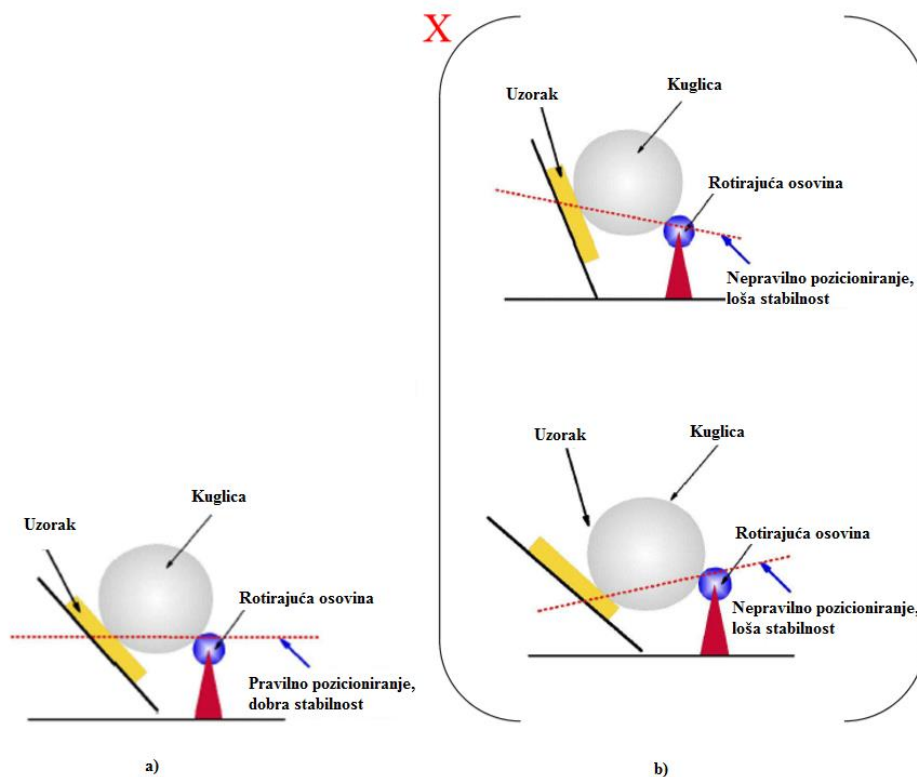
Za ovaj rad relevantan je postupak određivanja debljine prevlake kalotestom (EN 1071-2 : 2003), koji spada u skupinu metoda odnošenjem. Metoda se izvodi na način da se kuglica određenog promjera odlaže istovremeno na uzorak koji je potrebno istrošiti i na rotirajuću osovinu, kao što je prikazano na slici 19. Nakon postavljanja uzorka, podešavaju se parametri ispitivanja, a parametre su:

- Vrijeme ispitivanja [s]
- Broj okretaja [o/min]



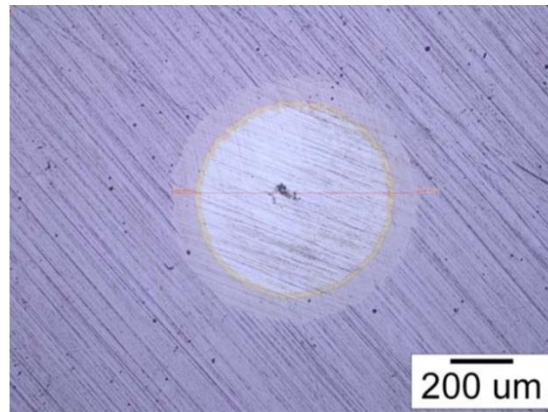
Slika 19. Uzorak postavljen na uređaju za ispitivanje debljine prevlake [13]

Za pravilno ispitivanje izuzetno je bitno dobro postaviti uzorak i kuglicu, jer se zbog nepravilnog podešavanja može dogoditi da se kuglica pri ispitivanju prestane okretati zbog nepravilne raspodjele mase, i pritom prestane trošiti uzorak. Primjeri pravilnog i nepravilnog podešavanja kalotesta nalaze se na slici 20.



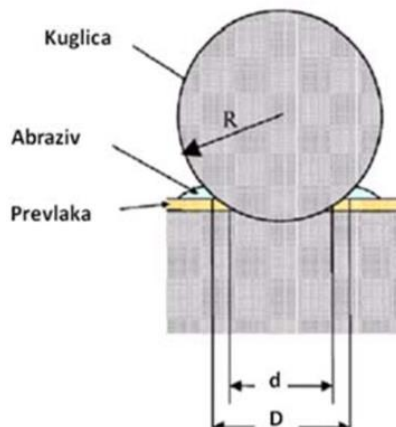
Slika 20. a) Pravilno podešavanja kalotesta, b) Nepravilno podešavanje kalotesta [13] [13]

Nakon pravilnog podešavanja uzorka i kuglice, potrebno je dodati abraziv uz pomoć kojega će kalota istrošiti površinu uzorka, s čime ispitivanje može početi. Po završetku ciklusa trošenja, slijedi analiza istrošene površine, jedna takva nalazi se na slici 21., na kojoj je vidljivo da se radi o višeslojnoj prevlaci TiN/TiCN (kružni vijenac zlatne boje je TiN, dok je površinski sloj TiCN).



Slika 21. Površina uzorka nakon ispravno provedenog ispitivanja kalotestom [13]

Da bi se izračunala debljina prevlake (e), potrebno je zadati polumjer kuglice kojom je izvršeno trošenje (R), izmjeriti vanjski promjer kuglice (D) i unutarnji promjer kuglice (d), koji se zatim unose u jednadžbu (1) (slika 22).



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

D – vanjski promjer otiska

d – unutarnji promjer otiska

R – polumjer kuglice

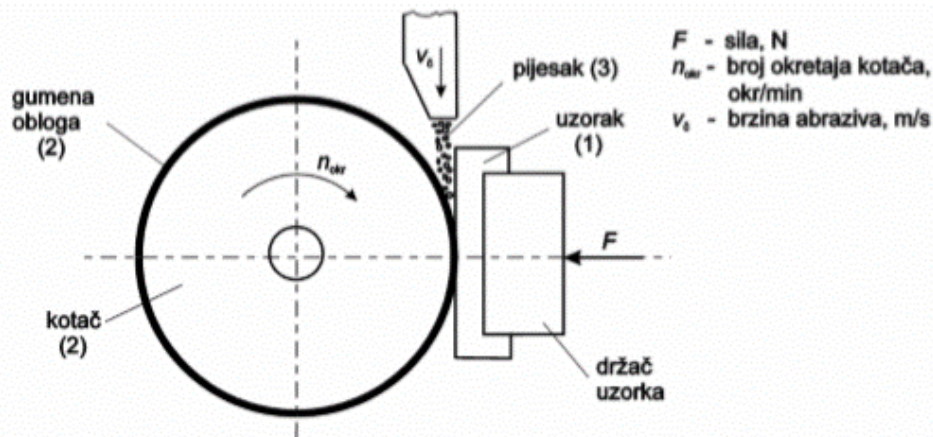
Slika 22. Određivanje debljine prevlake [13]

3.3.3. Ispitivanje otpornosti na abrazivno trošenje

Trošenje je velik problem u industriji, a dotrajalost dijelova, troškovi popravaka i zamjene istrošenih dijelova, kao i bilo kakva radna stanica u proizvodnji uzrokuju značajne financijske izdatke. Iz tog razloga nužno je koristiti materijal optimalan za specifičnu primjenu. Da bi se odredio materijal pogodan za neku primjenu, potrebno je odrediti njegova svojstva, a laboratorijska ispitivanja abrazivnog trošenja su brz i jeftin način za prikupljanje velike količine informacija. U literaturi [14, 15] su opisana sljedeća ispitivanja otpornosti na abrazivno trošenje:

- Abrazija gumenim kotačem („Suhi pijesak/gumeni kotač“) (ASTM G 65, ASTM G 105)
- Taber abrazija (ASTM D4060)
- Abrazija vlažnim muljem
- Ispitivanje etrošenja kuglicom

Za ovaj rad bitno je ispitivanje „suhi pijesak/gumeni kotač“ („dry sand/rubber wheel“, ASTM G 65). Prikaz uređaja „suhi pijesak/gumeni kotač“ nalazi se na slici 23.



Slika 23. Skica uređaja „suhi pijesak/gumeni kotač“ [15]

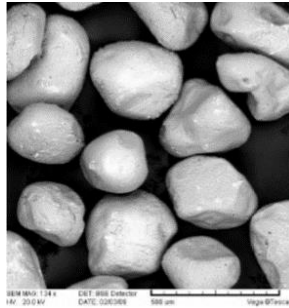
Metoda ispitivanja „suhi pijesak/gumeni kotač“ simulira abrazivno trošenje u dodiru tri tijela s malim napetostima. Ovakav tip trošenja se pojavljuje u rudarskoj industriji, npr. kod užadi koja je izložena sporom trošenju uzrokovanom klizanjem i kotrljanjem abrazivskih čestica poput kamenja i ruda zatočenih između metalnih površina.

Sam uređaj sastoji se od:

- čeličnog kotača s naplatkom gume promjera 228 mm X 12,77 m,
- pješčanog lijevka povezanog preko cijevi s brizgalicom koja dopušta protok od 250- do 350-g/min,
- kočnice koja zaustavlja motor nakon određenog broja okretaja,

- poluge koja drži uzorak i stvara horizontalnu silu prema kotaču gdje protječe pijesak.

Ispitivanje se sastoji od abradiranja uzorka (1) standardnim zaobljenim kvarcnim pijeskom Ottawa AFS 50/70 (slika 24.). Epruveta se naslanja na kotač (2) obložen gumom tvrdoće oko 60 Shore A, a opterećena je utezima preko koljenaste poluge. Sila F iznosi 130 N ili 45 N ovisno o varijanti postupka, a još je promjenljiv i ukupni broj okretaja kotača koji se registrira brojačem.



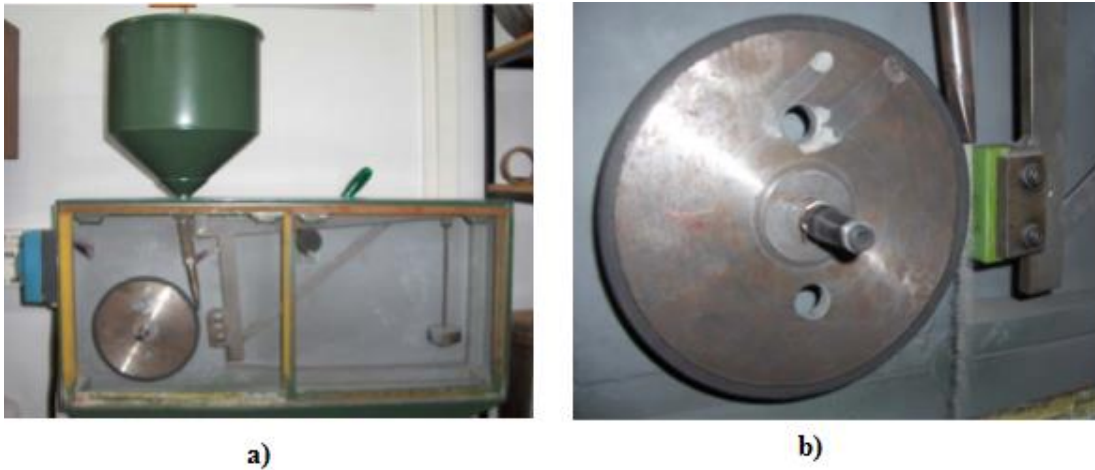
Slika 24. Zaobljeni kvarcni pijesak Ottawa AFS 50/70 [15]

Uzorak za ispitivanje je prizma debljine 3...13 mm i njegova gustoća mora biti poznata kako bi se izračunao volumen istrošen prilikom ispitivanja. Po završetku ispitivanja na uzorku ostaje trag trošenja.. Vaganjem uzorka prije i poslije ispitivanja utvrđuje se gubitak mase koji se preračunava u gubitak volumena. Ova metoda omogućuje relativno rangiranje otpornosti na abrazijsko trošenje različitih materijala ako je prevladavajući mehanizam trošenja abrazija. Da bi se dobila krivulja trošenja, potrebno je trošenje provoditi u određenim ciklusima, primjerice, nakon svakih 100 okretaja na uređaju, uzorak se vadi, čisti i važe, a zatim vraća u uređaj na sljedeći ciklus. Parametri ispitivanja su sila i broj okretaja kotača, a varijante postupka i pripadajući parametri prikazani su u tablici 6.

Tablica 6. *Varijante postupka „suhi pijesak/gumeni kotač“* [15]

Varijanta postupka	Sila na uzorak, N	Broj okretaja kotača
A	130	6000
B	130	2000
C	130	100
D	45	6000

Na slici 25. prikazani su uređaj i detalj uređaja za ispitivanje metodom „suhi pjesak/gumeni kotač“. U tablici 7. nalazi se opis ispitivanja metodom „suhi pjesak/gumeni kotač“.



Slika 25. Uređaj (a) i detalj uređaja (b) za ispitivanje metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“ [15]

Tablica 7. Opis ispitivanja metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“ [15]

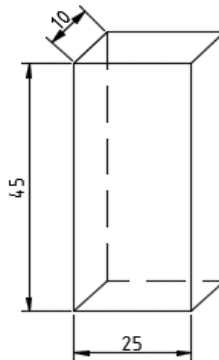
Svrha ispitivanja	Određivanje otpornosti na trošenje materijala na abraziju trećim tijelom
Uzorci	Ravni (površinski modificiran) uzorak (dimenzije: $\sim 76 \times 25 \times (3,2-12,7)$ mm), u kontaktu s rotirajućim gumenim kotačem. Abrazivne čestice su čestice zaobljenog kvarcnog pijeska standardne granulacije.
Uvjeti ispitivanja	- Brzina rotacije kotača: 200 ± 10 okr/min - Opterećenje: 45 N ili 130 N - Protok abraziva: 250-400 g/min
Mjerenje	- Gubitak mase - Dubina traga trošenja analizom profila
Vrsta trošenja	Abrazija pri malom naprezanju

EKSPERIMENTALNI DIO

4. PRIPREMA I PROVEDBA ISPITIVANJA

4.1. Plan pokusa i toplinska obrada

Prethodno izrađeni uzorci toplinski su obrađeni i prevučeni postupkom PACVD na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za toplinsku obradu. Pripremljena su dva uzorka u obliku kvadra dimenzija 45x20x10, kao što je to prikazano na slici 26.



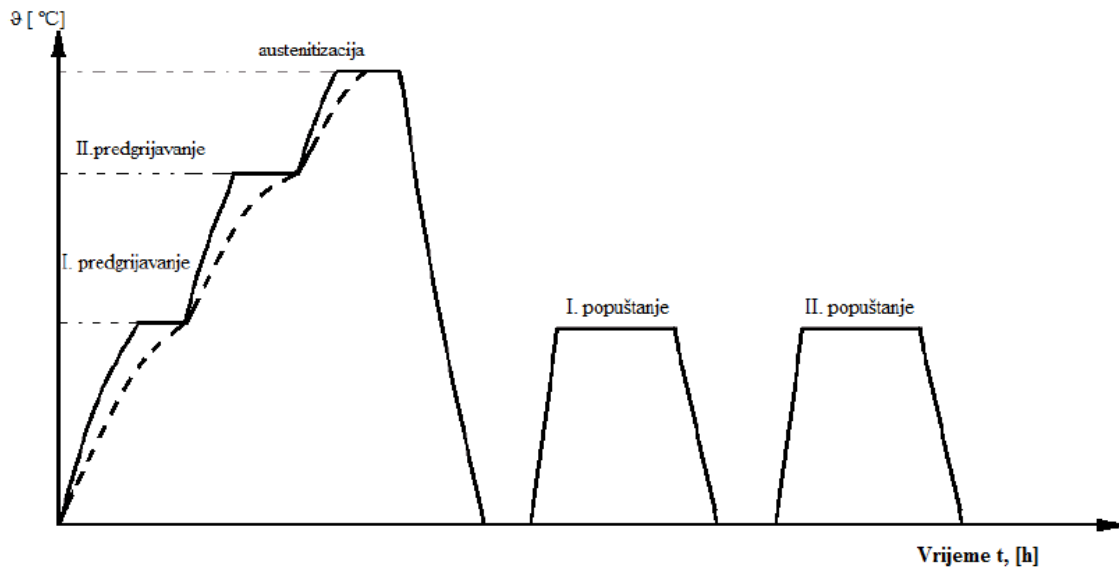
Slika 26. Prikaz ispitnog uzorka

Uzorci su izrađeni od istog materijala, suvremenog čelika Böhler K490MC, a označeni su oznakama „A01“ i „BX4“. Oznake se sastoje od tri znaka od kojih svaki predstavlja određeni parametar toplinske obrade. Parametri toplinske obrade uzoraka navedeni su u tablici 8. Z aispitivanja u radi izabrani su uzorci obrađeni s dva značajno različita postupka toplinske obrade i različitom tvrdoćom nakon završnog popuštanja.

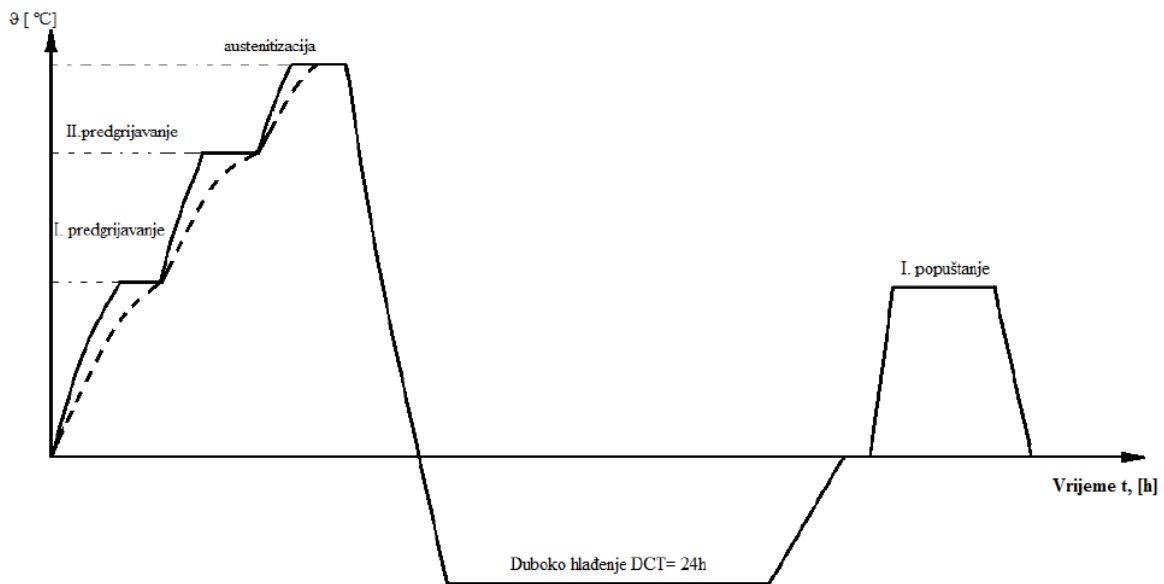
Tablica 8. Parametri toplinske obrade uzoraka

Oznaka uzorka	Parametri toplinske obrade	Tvrdoća nakon toplinske obrade, HRC
A01	<ul style="list-style-type: none"> <u>Kaljenje</u>: 450°C/1h/870°C/30'/1030°C/30'/N₂ <u>Popuštanje</u>: 500°C/2h/zrak 	62 ± 2
BX4	<ul style="list-style-type: none"> <u>Kaljenje</u>: 450°C/1h/870°C/0,5h/1080°C/20'/N₂ <u>Duboko hlađenje</u>: -196°C/24h <u>Popuštanje</u>: 575°C/2h/zrak 	65 ± 2

Tijek toplinske obrade uzorka A01 prikazan je na slici 27, a toplinske obrade uzorka BX4 na slici 28.



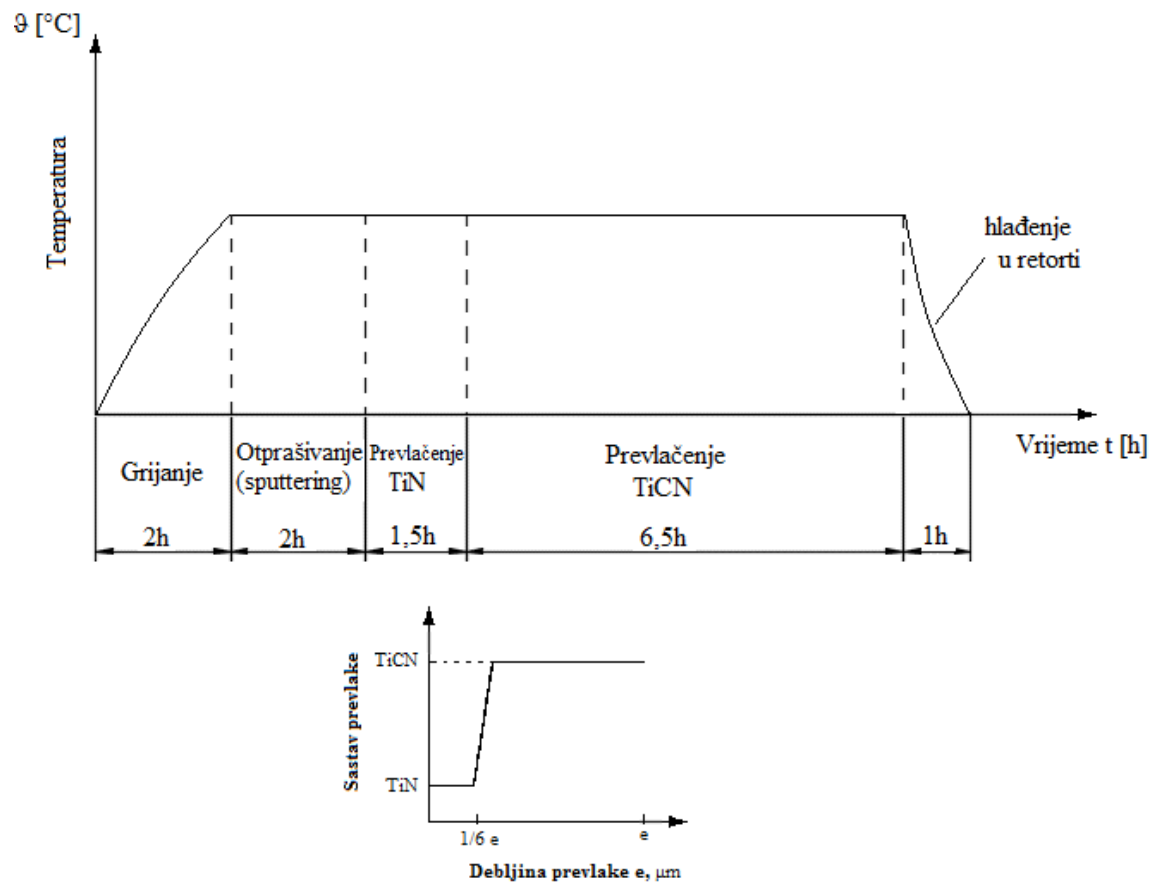
Slika 27. Shematski prikaz toplinske obrade uzorka A01



Slika 28. Shematski prikaz toplinske obrade uzorka BX4

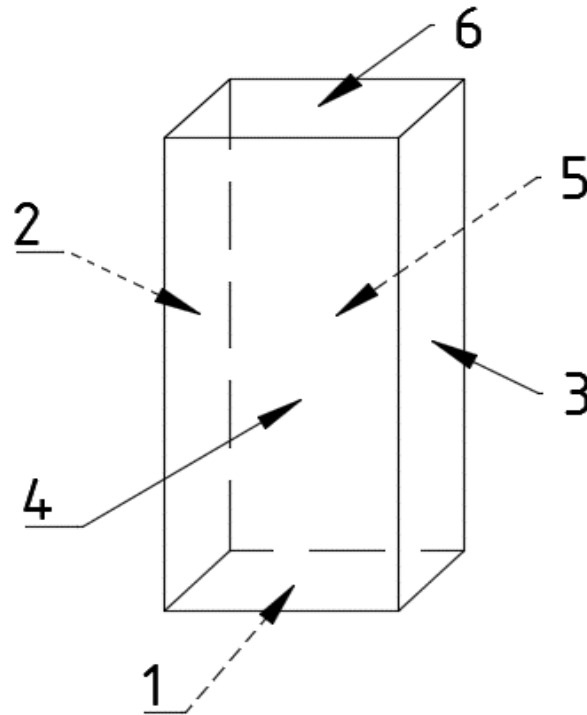
Ispitni uzorci na kojima su provedena ispitivanja u radu jesu A01, koji je klasično toplinski obrađen (gašenje s temperature 1030 °C s tri popuštanja na temperaturi 500 °C) i BX4 (gašen s temperature 1080 °C i duboko hlađen u tekućem dušiku na -196 °C). Naposljetku, oba su uzorka prevučena istim postupkom PACVD pri temperaturi 500°C. Tlak u vakuumskoj komori iznosio je

2 mbar, napon plazme 490V, a snaga plazme 1400W. Postupak je trajao 16 sati. Shematski prikaz nalazi se na slici 29.



Slika 29. Shematski prikaz postupka prevlačenja PACVD

Površine ispitnih uzoraka označene su brojevima od 1 do 6, gdje je površina 1 ona na kojoj je utisnuta oznaka uzorka (A01, BX4), a to je ujedno i ona stranica na kojoj je uzorak stajao tijekom postupka prevlačenja. Oznake stranica prikazane su na slici 30.



Slika 30. Prikaz označavanja površina ispitnog uzoraka

Bočne površine, kao što to prikazuje slika 30, označene su sa 2 i 3, prednja i stražnja s 4 i 5 i naposljetku, gornja površina sa oznakom 6.

4.3. Ispitivanje debljine prevlake kalotestom

Ispitivanje debljine prevlake provedeno je kalotestom (EN 1071-2 : 2003), kako je opisano u poglavlju 3.3.2.

Priprema ispitivanja se sastoji od čišćenja uzorka i namještanja i osiguravanja istog u uređaju. Površinu uzorka potrebno je dobro očistiti i odmastiti, a zatim se postavlja u uređaj za ispitivanje. Nakon osiguravanja potrebno je odabrati kuglicu kojom će se ispitivanje provesti. Za ovaj rad odabrana je kuglica promjera 25 mm. Naposljetku je potrebno podesiti parametre trošenja prevlake.

Parametri trošenja i odabrene vrijednosti su:

- Vrijeme trajanja ispitivanja – 50 [s]
- Broj okretaja rotirajuće osovine – 300 [o/min]

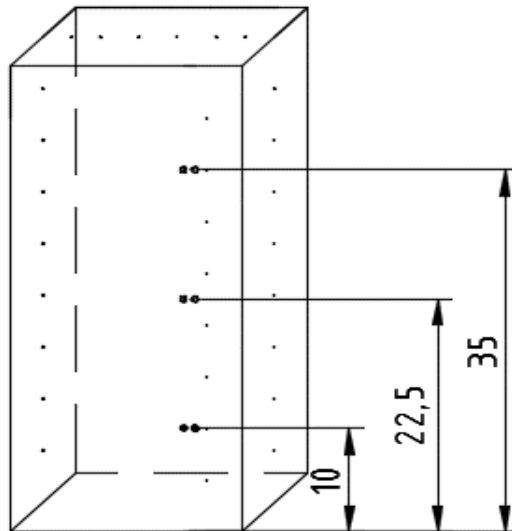
Pri ispitivanju je na kuglicu dodano abrazivno sredstvo kako bi pospješilo trošenje površine i time skratilo vrijeme ispitivanja.

Ispitivanje je provedeno na uređaju prikazanom na slici 32.



Slika 32. Uređaj za ispitivanje debljine prevlake na FSB-u

Površine trošene ovim postupkom su površine 4 na oba uzorka (prema slici 30.), a trošene su dvaput na tri različite visine uzorka, 10 mm, 22,5 mm i 35 mm, kao što je prikazano na slici 33.



Slika 33. Prikaz položaja kalota na ispitnom uzorku

4.4. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“

Ispitivanje abrazijskog trošenja provodi se da bi se dobile informacije o gubitku mase u određenim uvjetima trošenja. Cjelokupna procedura je vremenski vrlo zahtjevna i iziskuje veliku pozornost. Provodi se u nekoliko koraka:

- 1) Čišćenje uzorka u ultrazvučnoj kupci,
- 2) Postavljanje uzorka u stroj za ispitivanje metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“
- 3) Trošenje uzorka,
- 4) Vađenje uzorka i ponovno čišćenje u ultrazvučnoj kupci,
- 5) Sušenje uzorka,
- 6) Vaganje uzorka na mjernom uređaju,
- 7) Računanje promjene mase.

Čišćenje uzorka provodi se da bi se uklonile čestice pijeska koje su nakon ispitivanja ostale na površini uzorka, ali i zbog odstranjivanja čestica prljavštine na površini koje su se pojavile prilikom rukovanja s uzorkom ili zbog okoline u kojoj se on nalazi. Čišćenje se vrši pomoću ultrazvučne kupke prikazane na slici 34.



Slika 34. *Ultrazvučna kupka*

Postupak čišćenja uzorka u ultrazvučnoj kupki je sljedeći:

- 1) Punjenje prazne čaše alkoholom do mjere kod koje je čitav uzorak uronjen,
- 2) Otvaranje kupke i punjenje vodom,
- 3) Postavljanje čaše s uzorkom i alkoholom u kupku,
- 4) Podešavanje vremena čišćenja (90 sekundi),
- 5) Pažljivo odstranjivanje uzorka iz čaše te sušenje.

Nakon čišćenja površine, uzorak se podvrgava trošenju. Ispitivanje trošenja provodi se metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“ koji je detaljno opisan u poglavlju 3.3.3. Sam postupak sastoji se od sljedećih koraka:

- 1) Podešavanje brojača okretaja na nulu,
- 2) Postavljanje i pritezanje uzorka na držaču uzorka,
- 3) Ulijevanje pijeska u lijevak,
- 4) Uključivanje stroja i početak vrtnje kotača,
- 5) Istovremeno povlačenje poluge i zatvaranje uređaja,
- 6) Pažljivo promatranje trošenja dok se ne izvrši željeni broj okretaja kotača,
- 7) Isključivanje stroja i zatvaranje protoka pijeska,
- 8) Povratak poluge na prijašnji položaj, otvaranje uređaja i vađenje uzorka.

Ispitivanje je provedeno abrazijskim trošenjem tijekom 500 okretaja. Pritom se, nakon svakih 100 okretaja, uzorak vadi iz uređaja, čisti u ultrazvučnoj kupci, važe i zatim se ponovno postavlja u uređaj, gdje se ponovno brojač postavlja na nulu i broji do 100 okretaja, sve dok se ne dosegne ukupno 500.

Oba uzorka (A01 i BX4) dvaput su podvrgnuta trošenju, na stranicama 4 i 5 prema slici 30., dakle, svaki uzorak nakon završenog ispitivanja sadrži dva traga trošenja. Zatim se, prema informacijama dobivenim vaganjem uzoraka nakon svakog ciklusa, računaju promjene mase između ciklusa i ukupna promjena mase. Uzorci su vagani na preciznoj vagi "Mettler" Zurich prikazanoj na slici 35.



Slika 35. Vaga "Mettler" Zurich (Laboratorij za tribologiju FSB-a)

Mjerenje se vrši kroz sljedećih par koraka:

- 1) Otvaranje komore i postavljanje uzorka na vagu,
- 2) Zatvaranje komore i spuštanje poluge,
- 3) Podešavanje pretpostavljene težine i višestruko ponavljanje dok se ne izmjeri točna masa,
- 4) Uspoređivanje s prethodnim rezultatima i utvrđivanje gubitka mase.

Tijekom postupka trošenja uzoraka, potrebno je stalno biti u stanju pripravnosti, pošto sam ciklus trošenja od 100 okretaja ne traje dugo. Osim toga, nužno je pratiti razinu pijeska u uređaju da ga prilikom ispitivanja ne bi ponestalo, što bi uvelike utjecalo na točnost ispitivanja. Pijesak je potrebno držati u zatvorenoj posudi da bi se zaštitio od vlage koja bi mogla prilikom ispitivanja uzrokovati zastoj protoka u mlaznici, a moguće ga je i ponovno koristiti, pošto čestice trošenja nisu velike i nemaju velik utjecaj pri ispitivanju.

5. REZULTATI I ANALIZA REZULTATA

5.1. Ispitivanje adhezivnosti prevlake TiN/TiCN

Ispitivanje provedeno prema postupku opisanom u 3.3.1, rezultiralo je informacijama o kvaliteti prevlaka na čeliku K490MC. Pomoću tih informacija moguće je usporediti koja je toplinska obrada čelika K490MC rezultirala boljom podlogom za prevlačenje postupkom PACVD. U tablici 9. prikazani su otisci na stranicama 2, 3 i 4, prema slici 30. Niz 1 u tablici 9. predstavlja otiske na stranici 4, niz 2 oznake na stranici 2, a niz 3 oznake na stranici 3. Isto vrijedi za otiske na uzorku BX4 koji su prikazani u tablici 10.




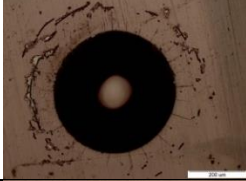

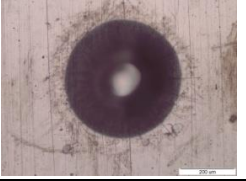
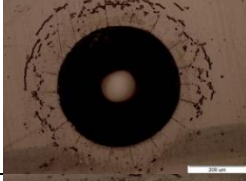

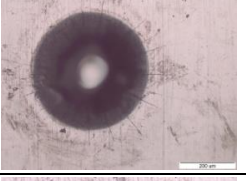
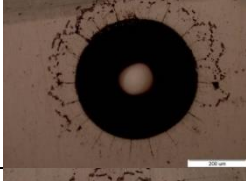
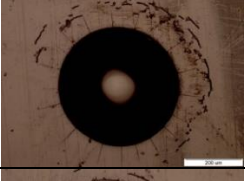
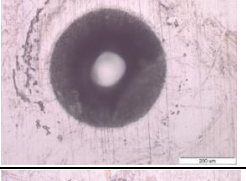
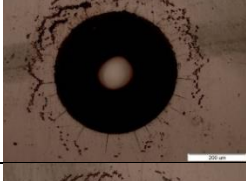
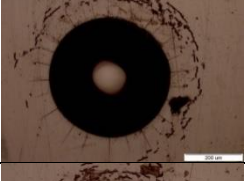
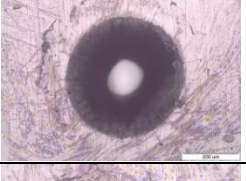
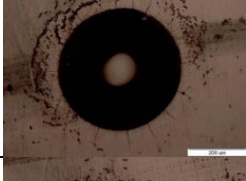
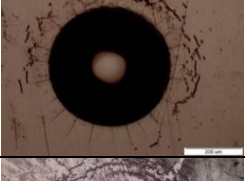
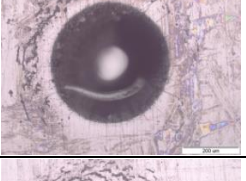
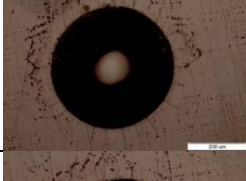
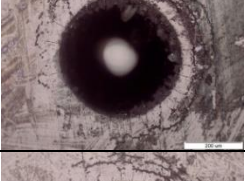
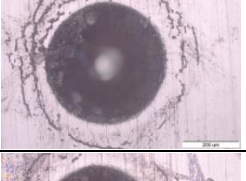
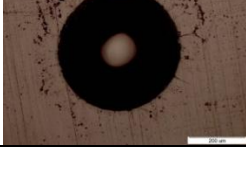
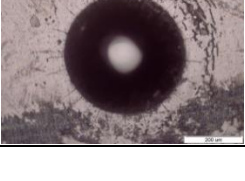
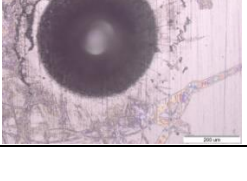
O adhezivnosti ispitnog uzorka A01 (kaljen i dva puta visokotemperaturno popušten) iz tablice 9. može se zaključiti sljedeće:

- Najbolja adhezivnost postignuta je pri donjoj površini uzorka koja je bila u direktnom kontaktu s katodom tijekom postupka PACVD prevlačenja, tj. na visini 5 mm. Na ovoj udaljenosti od donje površine uzorka otisci ispitnih nizova 2 i 3 klasificirani kategorijom 1 što je, prema normi VDI 3198 kategorija najbolje adhezivnosti bez pojave delaminacije prevlake. Takav se trend kod niza 2 nastavlja do 10 mm, a kod niza 3 do čak 15 mm visine.
- Iznad 15 mm od donje površine uzorka adhezivnot je nešto slabija i pripada kategoriji 3. Iz tablice 9 se na udaljenostima od donje površine uzorka većim od 15 mm uočavaju radijalne pukotine i pojava delaminacije prevlake

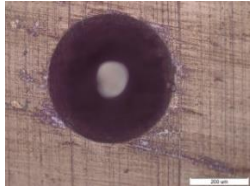
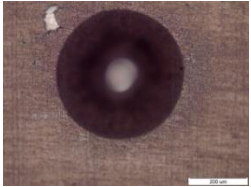

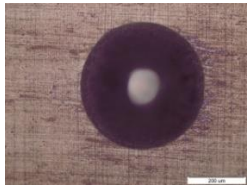
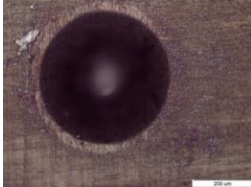
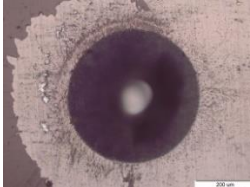
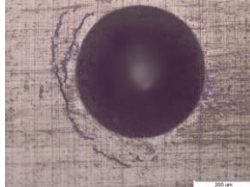
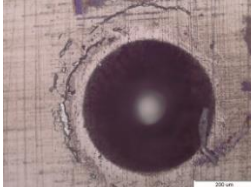
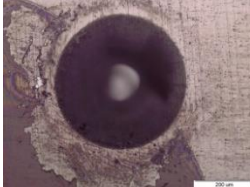
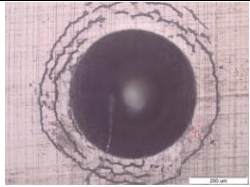
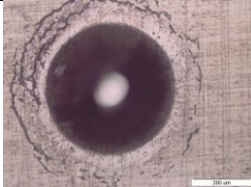
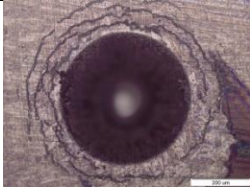
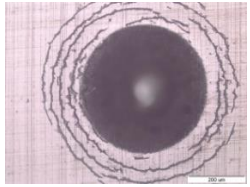
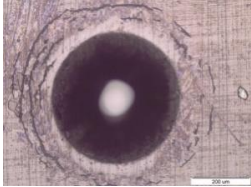
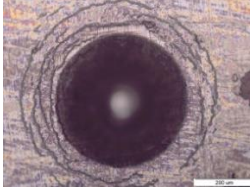
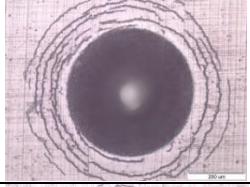
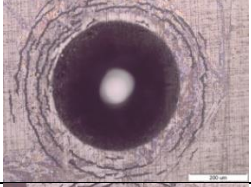
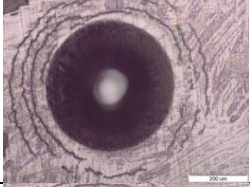
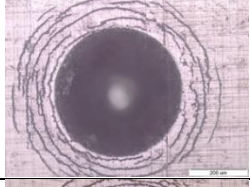
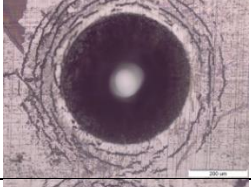
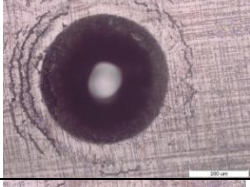
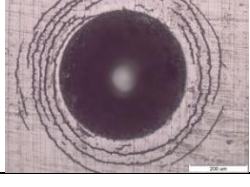
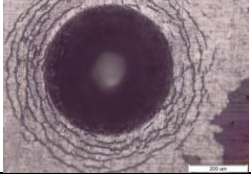

Ispitni uzorak BX4 (kaljen, duboko hlađen i visokotemperaturno popušten) iz tablice 10. može se zaključiti sljedeće:

- Najbolja adhezivnost postignuta je pri donjoj površini uzorka, tj. na visini do 10 mm, pri čemu se kod svih ispitnih nizova otisci mogu klasificirani kategorijom 1 što je, prema normi VDI 3198 kategorija najbolje adhezivnosti bez pojave delaminacije prevlake.
- Iznad 15 mm od donje površine uzorka adhezivnot je slabija i pojavljuje se delaminacija prevlake s kružnim pukotinama oko mjesta utiskivanja inentora, što se može ocijeniti ketegorijom 3.

Tablica 9. Izgled i klasifikacija adhezivnosti otisaka na ispitnom uzorku A01

Udaljenost od baze uzorka z, mm	Izgled i klasifikacija adhezivnosti otisaka prema VDI 3198					
	NIZ 1		NIZ 2		NIZ 3	
5		3		1		1
10		3		1		1
15		3		3		1
20		3		3		3
25		3		3		3
30		3		3		3
35		3		3		3
40		3		3		3

Tablica 10. Izgled i klasifikacija adhezivnosti otisaka na uzorku BX4

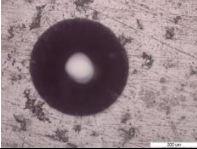
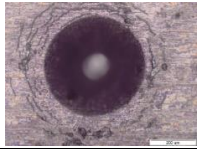
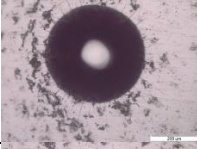
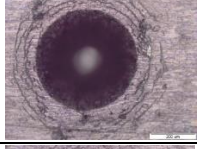
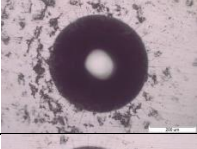
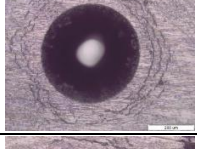
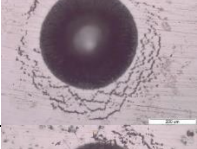
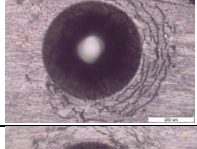
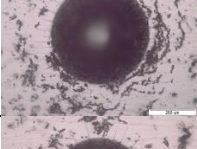
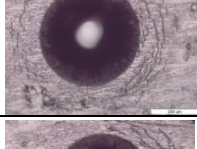
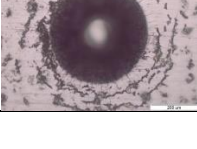
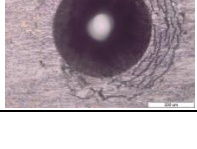
Udaljenost od baze uzorka z, mm	Izgled i klasifikacija adhezivnosti otisaka prema VDI 3198					
	NIZ 1		NIZ 2		NIZ 3	
5		1		1		1
10		1		1		2
15		3		3		3
20		3		3		3
25		3		3		3
30		3		3		3
35		3		3		3
40		3		3		3

U tablici 11. nalazi se prikaz otisaka na stranicama broj 6 na oba uzorka. Iz rezultata ispitivanja adhezivnosti uočavaju se sljedeće pojave:

- Na površinama 6 kod oba uzorka moguće je uočiti da je adhezivnost podjednaka. Gotovo su svi otisci svrstani pod kategoriju 3 zbog očite delaminacije oko otiska.
- N uzorku A01 se na udaljenosti od površine 2 (prema slici 30.) od 20 mm i 22,5 mm, adhezivnost blago pogoršava, utoliko što je moguće uočiti da su se komadići prevlake u potpunosti odvojili od podloge, što je razlog svrstavanja ovih dvaju otisaka u kategoriju 4.

Iako su neki dijelovi podloge na površinama oznake „6“ znatno lošije adhezivnosti od drugih, svi su otisci i dalje svrstani u kategorijama 1-4, što ih karakterizira kao prihvatljive. Međutim, površine 6 kod oba uzorka pokazale su najlošiju adhezivnost što je možda rezultat obrade koja je prethodila prevlačenju (stranice 6 bile su slabo obrađene, dok su stranice 2, 3, 4 i 5 brušene do hrapavosti oznake 600).

Tablica 11. Prikaz i kvalifikacija adhezivnosti otisaka na stranici 6 uzoraka A01 i BX4

Udaljenost od površine oznake „2“, mm	Izgled i klasifikacija adhezivnosti otisaka prema VDI 3198					
	A01			BX4		
2,5			3			3
5			3			3
10			3			3
15			3			3
20			4			3
22,5			4			3

5.2. Ispitivanje debljine prevlake

Ispitivanje debljine prevlake provedeno je kalotestom i postupak je detaljno opisan u poglavlju 3.3.2. Ispitivanje debljine prevlake. Informacije dobivene ovim dijelom ispitivanja daju uvid u ukupnu debljinu prevlake kao i debljinu pojedinih slojeva (TiN/TiCN). Primjer kalote gledane svjetlosnim mikroskopom nalazi se na slici 36.



Slika 36. Prikaz kalote na svjetlosnom mikroskopu

Kao što je to vidljivo na slici 36., kalote su kotirane na šest mjesta. Za ispitivanje debljine prevlaka bitni su dijametri kružnica kalote, pa se tako kotiraju:

- d_{01} – promjer najveće kružnice, predstavlja granicu traga trošenja
- d_{02} – promjer srednje kružnice, predstavlja granicu između sloja TiN i TiCN
- d_{03} - promjer najmanje kružnice, predstavlja granicu između podloge i TiN

Radi što točnijeg određivanja debljine, kotiranje svakog dijametra provelo se dvaput, i to horizontalno i okomito, što rezultira s ukupno šest kota po kaloti. Postupak računanja debljine prevlake prethodno detaljno opisan u poglavlju 3.3.2. rezultira podacima navedenim u tablici 12.

Veličina e_{TiN} predstavlja srednju vrijednost debljina sloja TiN, a veličina e srednju vrijednost ukupnih debljina prevlake dobivenih iz horizontalnih i vertikalnih kota na svjetlosnom mikroskopu.

Tablica 12. Debljine prevlake TiN/TiCN na ispitnim uzorcima oznaka „A01“ i BX4“

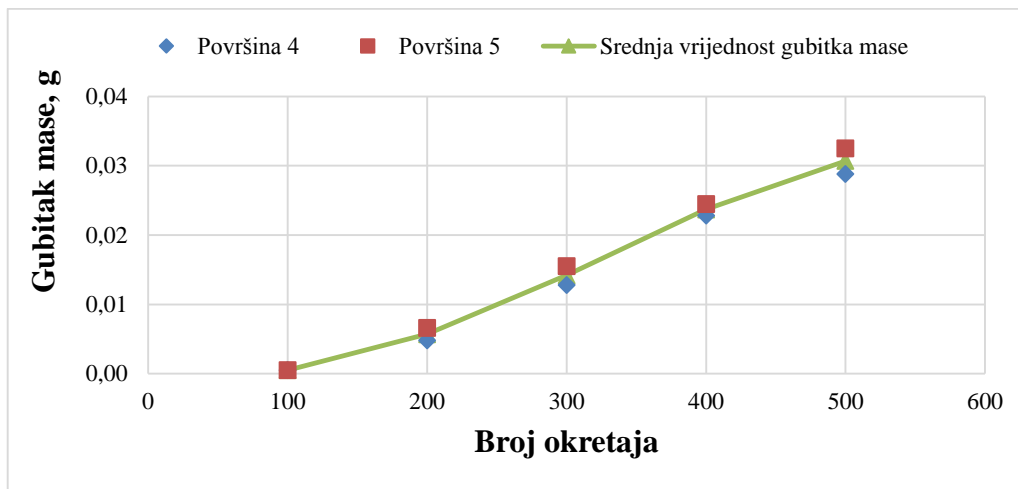
Uzorak	Udaljenost otiska od donje površine uzorka (z, mm)	e_{TiN} , μm	e , μm
A01	10	0,453	2,167
	22,5	0,483	2,350
	35	0,604	2,237
BX4	10	0,700	1,764
	22,5	0,560	2,160
	35	0,592	2,231

Iz dobivenih rezultata moguće je primijetiti da je debljina prevlake uzorka A01 imala malih promjena po visini uzorka ali su te promjene ostale unutar raspona 0,2 μm , dok je kod uzorka BX4 debljina rasla s visinom uzorka, i ukupna razlika debljina na visini 35 mm i 10 mm je 0,467 μm . Iz rezultata navedenih tablicom 12 zaključuje se da je srednja debljina PACVD prevlake TiN/TiCN na ispitnim uzorcima sljedeća:

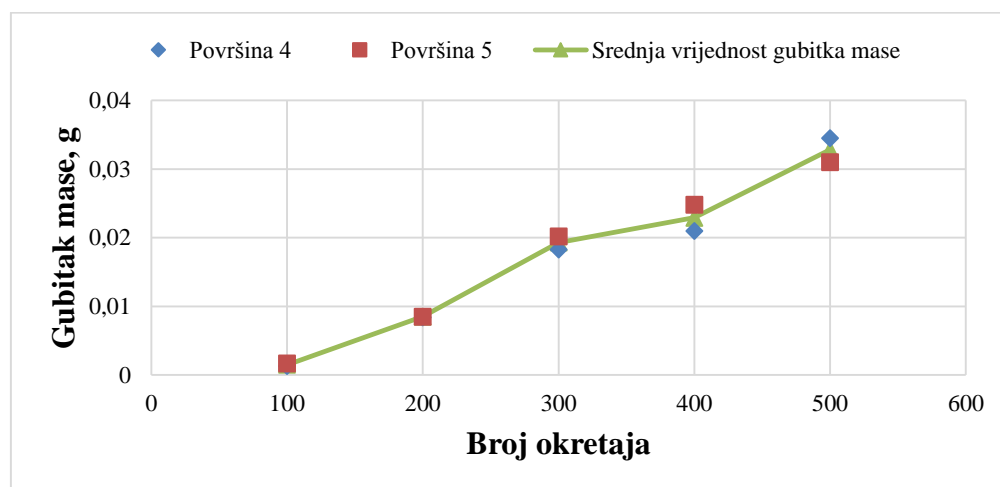
- a) prevlaka na uzorku A01: $e = 2,25 \mu\text{m}$
- b) prevlaka na uzorku BX4: $e = 2,05 \mu\text{m}$

5.3. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

U provedenom ispitivanju otpornosti trošenju, prema poglavlju 3.3.3. praćen je gubitak mase uzoraka kroz pet ciklusa na dvije stranice uzorka (stranice 4 i 5 prema slici 30). Dobiveni rezultati omogućuju praćenje brzine trošenja na uzorcima i njihovu usporedbu. U dijagramu na slikama 37. i 38. prikazani su kumulativni gubici mase uzoraka u ovisnosti o broju okretaja pri ispitivanju uzoraka A01 i BX4.



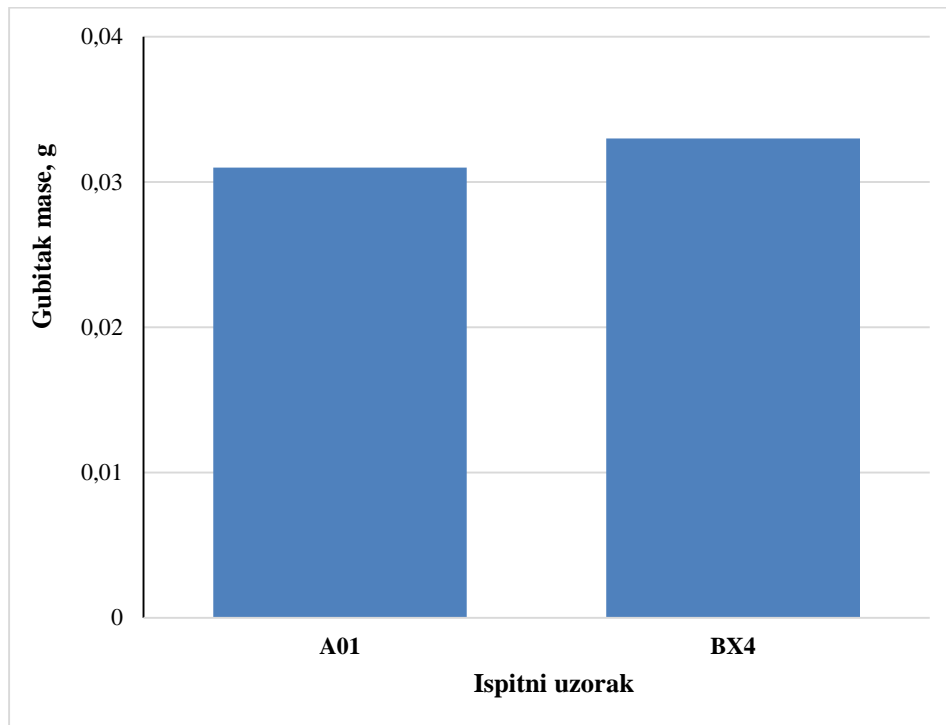
Slika 37. Kumulativni gubitak mase pri abrazijskom trošenju ispitnih uzoraka A01 u ovisnosti o broju okretaja gumenog kotača



Slika 38. Kumulativni gubitak mase pri abrazijskom trošenju ispitnih uzoraka BX4 u ovisnosti o broju okretaja gumenog kotača

U početku trošenja uzorka A01, do 200 okretaja, još nije došlo do probijanja prevlake, pa je registriran mali gubitak mase. Nakon 200 okretaja prevlaka je napokon probijena i uz gubitak mase zbog trošenja prevlake, troši se i podloga. Nakon prijeđenih 400 okretaja, prevlaka je potpuno istrošena i masa ispitnog uzorka se gubi samo trošenjem podloge. Iz dijagrama na slici 38., slično kao i kod ispitnog uzorka A01, vidljivo je da je prevlaka ispitnog uzorka BX4 izdržala sve do 300 okretaja gumenog kotača, nakon čega je značajno trošenje podloge ispitnog uzorka.

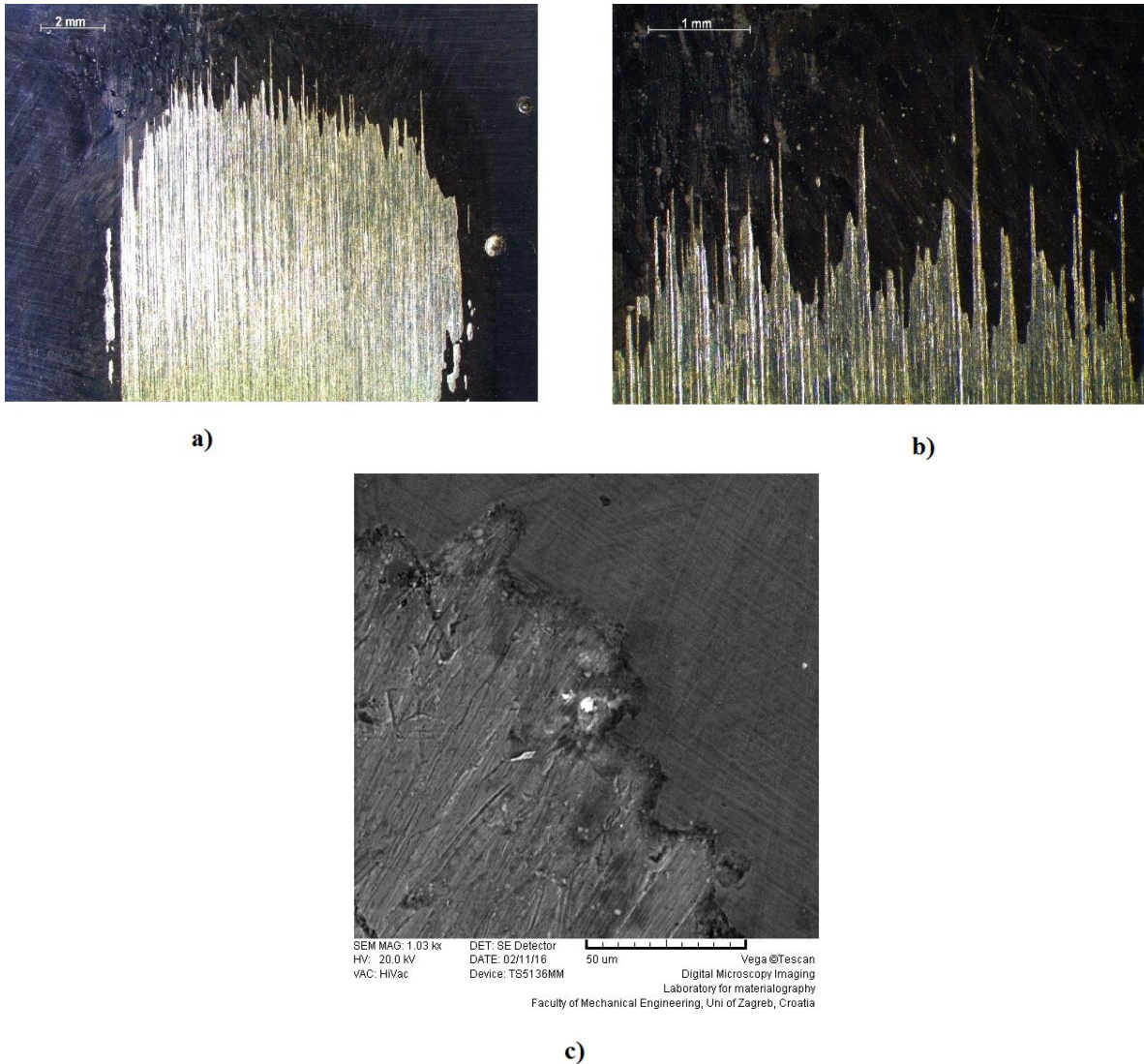
Srednja vrijednosti gubitaka mase ispitnih uzoraka A01 i BX4 nakon 500 okretaja gumenog kotača prikazana je na slici 39. Iz rezultatata abrazijskog trošenja uzorka moguće je zaključiti da ispitni uzorak BX4 pokazuje nešto veći gubitak mase tijekom ispitivanja od ispitnog uzorka A01 unatoč većoj polaznoj tvrdoći.



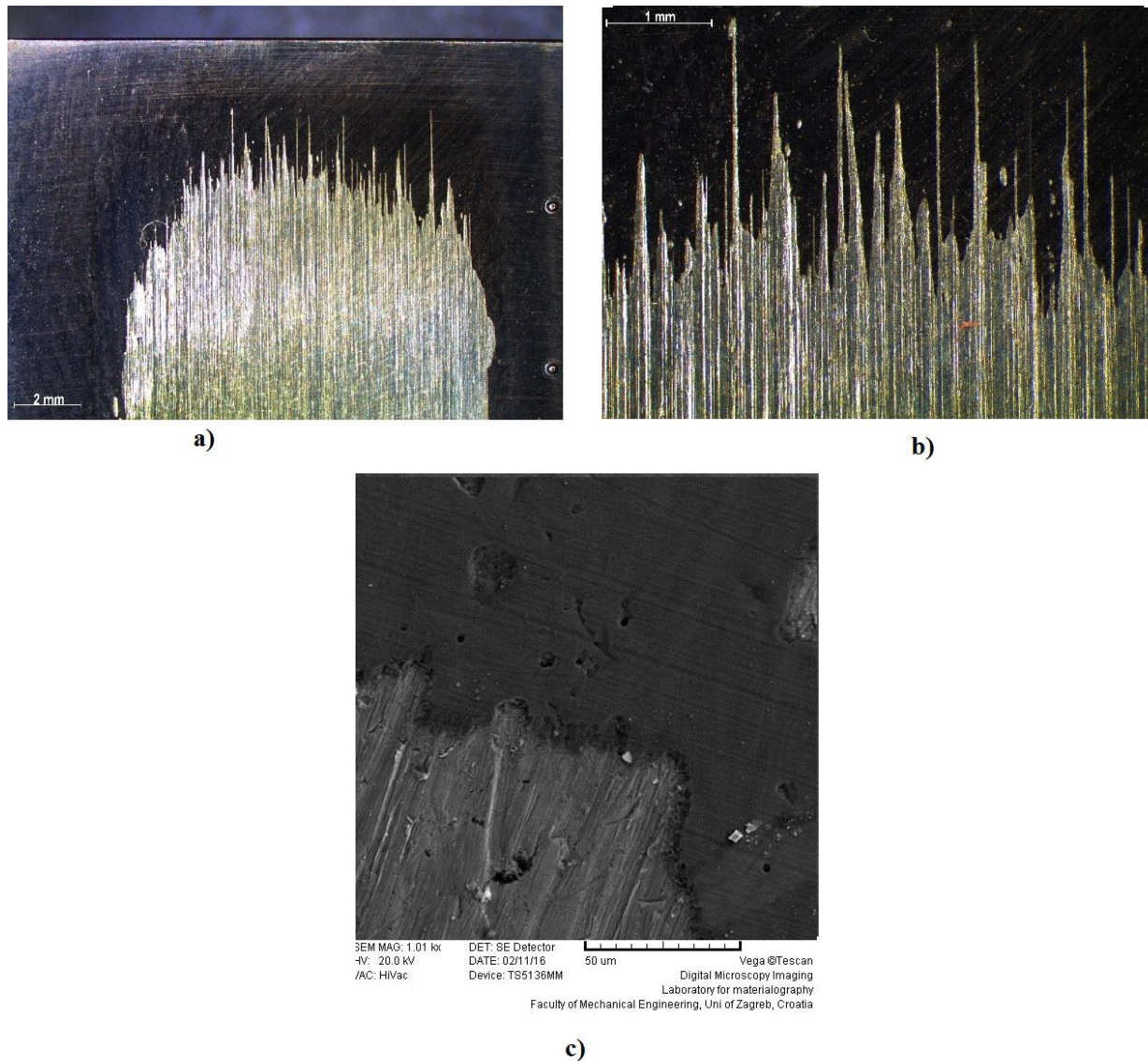
Slika 39. Ukupni gubitak mase abrazijom uzoraka A01 i BX4 nakon 500 okretaja kotača metodom trošenja „suhi pijesak/gumeni kotač“

5.4. Analiza istrošenih površina

Po završetku ispitivanja abrazijskim trošenjem istrošene površine su analizirane na stereomikroskopu i skenirajućem elektronskom mikroskopu (SEM-u) da bi se sagledalo ponašanje prevlake pri trošenju. Izgled površine uzorka A01 nakon ispitivanja prikazan je na slici 40, a uzorka BX4 na slici 41.



Slika 40. a) *Trag trošenja na uzorku A01 s povećanjem 7,88:1*
b) *Trag trošenja na uzorku A01 s povećanjem 25:1*
c) *Traga trošenja uzorka BX4 s povećanjem 1000:1 na SEM-u*



Slika 41. *a) Trag trošenja na uzorku BX4 s povećanjem 7,88:1
 b) Trag trošenja na uzorku BX4 s povećanjem 25:1
 c) Trag trošenja uzorka BX4 s povećanjem 1000:1 na SEM-u*

Iz izgleda trošenih površina uočava se isti mehanizam trošenja – abrazija česticama pijeska koje se urezju u površinu prevlake TiN/TiCN i površinu podloge. Pri tome se prevlaka TiN/TiCN odnosi s trošene površine bez značajnije delaminacije. Odnosenje prevlake je ravnomjerno po dubini prevlake pri čemu se abrazijom istovremeno troši podsloj TiN i gornji sloj TiCN.

LITERATURA



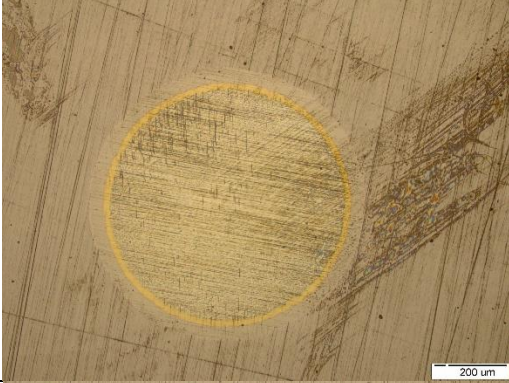



- [1] Web 1: https://hr.wikipedia.org/wiki/Metalurgija_praha
- [2] Web 2: https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1427789015-0-pred2_bm_2015_svijetlo.pdf
- [3] Böhler Cold Work Tool Steel Catalogue – K490 Microclean
- [4] Oppenkowski A.; Weber S.; Theisen W.; „*Evaluation of factors influencing deep cryogenic treatment that affect the properties of tool steels*“, Journal of Materials Processing Technology, 2010.
- [5] Gojić, M.; „*Površinska obradba materijala*“, Sveučilište u Zagrebu, 2010.
- [6] K. L. Choy; „*Chemical vapour deposition of coatings*“, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, 2001.
- [7] Filetin T.; Grilec K.; „*Postupci modificiranja i prevlačenja površina*“, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2004.
- [8] Eskildsen, S. S.; Mathiasen, C.; Foss M.; „*Plasma CVD: process capabilities and economic aspects*“, Danish Technological Institute, Aarhus, 1999.
- [9] Web 3: <https://shop.berner.eu/berner/hr/product/167411>
- [10] Web 4:
http://www.asiamachinery.net/supplier/product_details.asp?ProID=1748&SupID=2563
- [11] Vidakisa, N.; Antoniadisa, A.; Bilalis, N.; „*The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds*“, Technological Educational Institute of Crete, Romanou 3, Crete 73133, Greece, 2003.
- [12] Web 5: <http://www.hegewald-peschke.com/interesting-facts/guidelines-to-hardness-testing.html>
- [13] Landek, D.; Vježbe iz kolegija Tribologija i inženjerstvo površina; „*Karakterizacija površinskih slojeva*“, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014.
- [14] Hawk, J.A.; Wilson, R.D.; Tylczak, J.H.; Dogan, O.N.; „*Laboratory abrasive wear tests: investigation of test methods and alloy correlation*“, US Department of Energy, Albany Research Center, 1999.
- [15] Grilec, K.; Ivušić, V.; „*Tribologija – Autorizirana predavanja*“, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [16] Web 5: <http://www.eifeler.com/>

PRILOZI







Prilog 1. Rezultati ispitivanja debljine prevlake

Uzorak	Visina otiska	Kota	d ₀₁ , μm	d ₀₂ , μm	d ₀₃ , μm	e _{TIN} , μm	e, μm	e _{sr} , μm	e _{sr} – ukupno, μm	
A01	10 mm	H	875,9	764,7	731,2	0,501	2,325	2,337	2,167	
		V	877,2	769,4	731,2	0,573	2,348			
		H	767,4	643,9	626,2	0,225	1,968	1,998		
		V	772,9	667,8	628,2	0,513	2,027			
	22,5 mm	H	950,2	848,6	807	0,689	2,516	2,449		2,350
		V	929,7	810,4	791,3	0,306	2,382			
		H	972,7	880	841,1	0,670	2,516	2,251		
		V	959,8	858,1	842,4	0,267	2,116			
	35 mm	H	875,9	764,7	731,2	0,501	2,325	2,337	2,237	
		V	877,8	769,4	731,2	0,573	2,348			
		H	689,6	576,4	513,6	0,685	2,118	2,137		
		V	696,5	579,1	519,1	0,659	2,156			
BX4	10 mm	H	713,5	591,4	568,2	0,269	1,826	1,826		1,764
		V	718,3	607,8	580,5	0,324	1,790			
		H	779,0	698,5	666,4	0,438	1,628	1,703		
		V	800,8	707,4	680,8	0,369	1,778			
	22,5 mm	H	779,0	672,6	642,8	0,392	1,936	2,029	2,160	
		V	762,6	658,3	607,8	0,639	2,121			
		H	725,1	598,2	545,7	0,600	2,280	2,291		
		V	731,2	604,4	551,8	0,608	2,302			
	35 mm	H	875,9	764,7	731,2	0,501	2,325	2,337		2,231
		V	877,2	769,4	731,2	0,573	2,348			
		H	842,4	742,2	702,6	0,572	2,060	2,125		
		V	834,2	747,6	697,8	0,720	2,090			

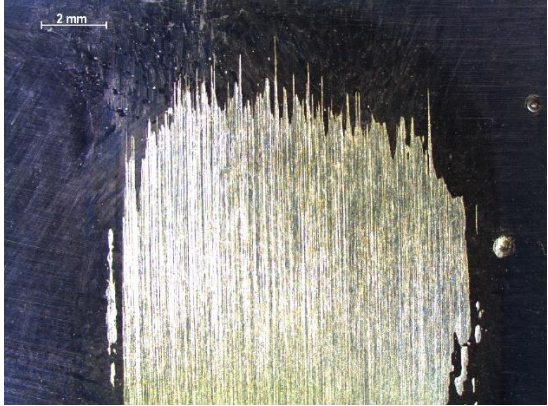
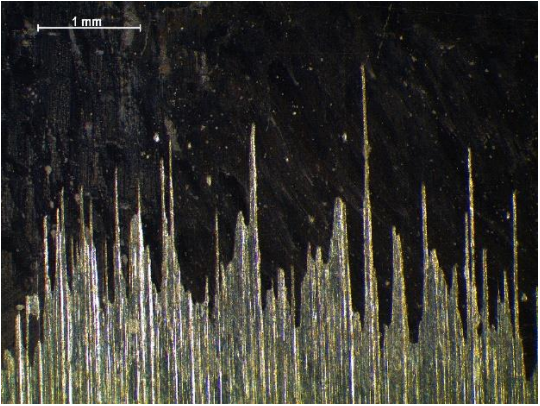

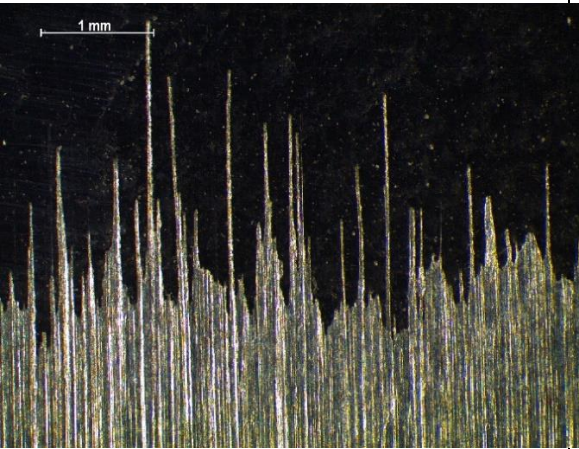
Prilog 2. Prikaz kalota na uzorku A01

A01	Broj otiska na visini z	
Visina z, mm	1	2
10		
22,5		
35		

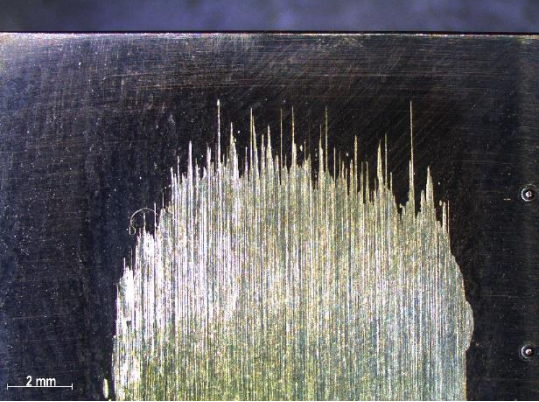
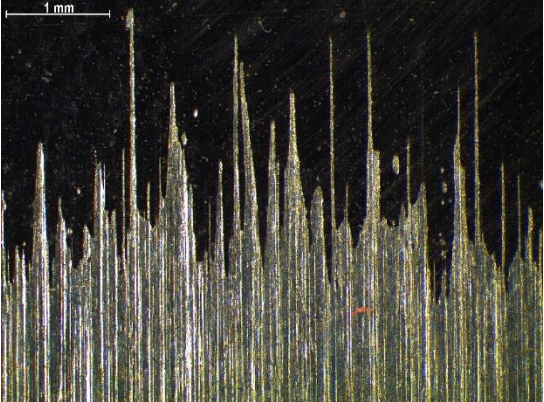
Prilog 3. Prikaz kalota na uzorku BX4

BX4	Broj otiska na visini z	
Visina z, mm	1	2
10		
22,5		
35		

Prilog 4. Prikaz istrošenih površina nakon ispitivanja otpornosti abrazijskom trošenju za uzorak A01

A01	Povećanje	
Stranica	7,88	25
4		
5		

Prilog 5. Prikaz istrošenih površina nakon ispitivanja otpornosti abrazijskom trošenju za uzorak A01

BX4	Povećanje	
Stranica	7,88	25
4		
5	