

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

ZAVRŠNI RAD

Domagoj Babić

Zagreb, 2016.

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

ZAVRŠNI RAD

Ime i prezime: *Domagoj Babić*

Voditelj rada: prof. dr. sc. *Franjo Cajner*

Zagreb, 2016.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

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

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj debljine TiCN prevlake na otpornost abrazijskom trošenju viskolegiranih alatnih čelika za hladni rad**
Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of TiCN coating thickness on abrasion wear resistance of high alloyed cold work tool steels**
Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada treba opisati dosadašnje spoznaje o utjecaju debljine prevlake na otpornost abrazijskom trošenju viskolegiranih alatnih čelika.

U eksperimentalnom dijelu rada planirati i provesti pokuse prevlačenja TiCN prevlakom, postupkom PACVD, kako bi se postigle dvije različite debljine na dva različita viskolegirana alatna čelika za hladni rad. Pokasima abrazijskog trošenja ustanoviti utjecaj debljine prevlake na otpornost prema trošenju ispitivanih čelika.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Zadatak zadan:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016.
2. rok (izvanredni): 30. 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.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

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 debljine prevlake na otpornost abrazijskom trošenju. Uz ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje, ispitavala se i debljina nanosenih prevlaka kalotestom, odnosno adhezivnost prevlake na tvrdomjeru Rockwell C. Tragovi trošenja na ispitnim uzorcima su analizirani na stereomikroskopu i skenirajućem elektronskom mikroskopu. Ispitivanja su pokazala dobru adhezivnost TiCN prevlake na oba osnovna materijala, kao i bolju otpornost na abrazijsko trošenje deblje prevlake u odnosu na tanju za isti osnovni materijal.

Ključne riječi: PACVD, abrazijska, TiCN, debljina prevlake, adhezivnost prevlake

Abstract:

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 resistance to abrasive wear via "dry sand-rubber wheel" method is described. The purpose of examining resistance to abrasive wear is to determine connection between coating thickness and resistance to abrasive wear of high-alloyed cold work steels. Along with method "dry sand-rubber wheel", 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 and a scanning electron microscope (SEM). Tests showed good adhesion of TiCN coating on both base materials as well as better resistance to abrasive wear of thicker coating in relation to thinner coating for the same base material.

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

SADRŽAJ

SADRŽAJ	II
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA	VI
POPIS OZNAKA	VII
IZJAVA	VIII
UVOD	1
1. TEORIJSKI DIO	2
1.1 POSTUPCI PREVLAČENJA	3
1.1.1 Kemijsko prevlačenje iz parne faze.....	3
1.1.2 Fizikalno prevlačenje iz parne faze.....	8
1.1.3 Plazma potpomognuto kemijsko prevlačenje iz parne faze.....	11
1.2 ALATNI ČELICI ZA HLADNI RAD	14
1.2.1 Alatni čelik Böhler K390PM.....	14
1.2.2 Alatni čelik Böhler K110 (EN X155CrVMo12-1).....	17
1.3 TROŠENJE	20
1.3.1 Abrazija.....	20
1.3.2 Abrazijsko trošenje.....	24
1.3.3 Eksperimentalno određivanje otpornosti na abrazijsko trošenje.....	25
1.3.3.1 Ispitivanje “suhi pijesak/gumeni kotač“	25

1.3.3.2 Ispitivanje Taber abrazija.....	26
1.3.3.3 Ispitivanje trošenja kuglicom.....	27
1.4 UTJECAJ DEBLJINE PREVLAKE NA TROŠENJE.....	28
2. EKSPERIMENTALNI DIO	31
2.1 PLAN ISPITIVANJA.....	32
2.2 PROVEDBA ISPITIVANJA.....	35
2.2.1 Ispitivanje debljine prevlake.....	35
2.2.2 Ispitivanje adhezivnosti prevlake.....	37
2.2.3 Ispitivanje trošenja na uređaju “suhi pijesak/gumeni kotač“	39
2.3 REZULTATI I ANALIZA ISPITIVANJA.....	42
2.3.1 Rezultati ispitivanja debljine prevlake.....	42
2.3.2 Rezultati ispitivanja adhezivnosti prevlake.....	45
2.3.3 Rezultati ispitivanja “suhi pijesak/gumeni kotač“	48
2.3.4 Analiza trošenih površina.....	52
3. ZAKLJUČAK.....	57
4. LITERATURA.....	58
5. PRILOZI.....	60

POPIS SLIKA

Slika 1. <i>Prevučena i neprevučena oštrica reznog alata.....</i>	3
Slika 2. <i>Višeslojna prevlaka TiN/Al₂O₃/TiCN/TiN proizvedena CVD postupkom.....</i>	4
Slika 3. <i>Koraci pri nastajanju sloja kod CVD postupka.....</i>	5
Slika 4. <i>Shematski prikaz CVD uređaja za prevlačenje.....</i>	6
Slika 5. <i>Shematski prikaz PVD uređaja za prevlačenje.....</i>	9
Slika 6. <i>Shematski prikaz PACVD uređaja za prevlačenje.....</i>	12
Slika 7. <i>Tijek proizvodnje tehnologijom metalurgije praha.....</i>	14
Slika 8. <i>TTT dijagram čelika K390PM.....</i>	16
Slika 9. <i>Tijek toplinske obrade čelika K110.....</i>	18
Slika 10. <i>Dijagram popuštanja čelika K110.....</i>	18
Slika 11. <i>Jedinični događaj abrazije.....</i>	20
Slika 12. <i>Abrazija u dodiru dva tijela (a) i tri tijela (b).....</i>	21
Slika 13. <i>Shematski prikaz mikromehanizama trošenja materijala.....</i>	22
Slika 14. <i>Shematski prikaz “čiste” abrazije.....</i>	23
Slika 15. <i>Shematski prikaz “nulte” abrazije.....</i>	23
Slika 16. <i>Uobičajni izgledi abrazijski trošenih površina.....</i>	23
Slika 17. <i>Shematski prikaz tribosustava abrazijskog trošenja.....</i>	24
Slika 18. <i>Shematski prikaz “suhi pijesak/gumeni kotač” uređaja.....</i>	26
Slika 19. <i>Shematski prikaz Taber ispitivanja.....</i>	26
Slika 20. <i>Ispitivanje trošenja kuglicom.....</i>	27
Slika 21. <i>Ispitivanje otpornosti prema abraziji pomoću slobodne i učvršćene kugle.....</i>	27
Slika 22. <i>Pucanje prevlake uslijed deformacije podloge.....</i>	29
Slika 23. <i>Oblik i dimenzije uzoraka.....</i>	32
Slika 24. <i>Toplinska obrada ispitnih uzoraka izrađenih od čelika Böhler K110 i K390PM... </i>	33

Slika 25. Način izračuna debljine prevlake pomoću kalotesta.....	35
Slika 26. Utiskivanje indentora na tvrdomjeru Rockwell C u prevlaku.....	37
Slika 27. Zaobljeni kvarcni pijesak.....	40
Slika 28. Otisak kalote na uzorku C2 02.....	42
Slika 29. Otisak kalote na uzorku D2 02.....	43
Slika 30. Otisak kalote na uzorku C2 01.....	43
Slika 31. Otisak kalote na uzorku D2 01.....	44
Slika 32. Otisak indentora na uzorku C2 01.....	45
Slika 33. Otisak indentora na uzorku C2 02.....	45
Slika 34. Otisak indentora na uzorku D2 01.....	46
Slika 35. Otisak indentora na uzorku D2 02.....	46
Slika 36. Utjecaj debljine TiCN prevlake na čeliku Böhler K110 na otpornost abrazijskom trošenju	49
Slika 37. Utjecaj debljine TiCN prevlake na čeliku Böhler K390PM na otpornost abrazijskom trošenju	49
Slika 38. Ukupni gubitak mase nakon 500 okretaja trošenja abrazijom različitih debljina TiCN prevlake na čeliku Böhler K390PM	50
Slika 39. Ukupni gubitak mase nakon 500 okretaja trošenja abrazijom različitih debljina TiCN prevlake na čeliku Böhler K110.....	50
Slika 40. Usporedba ukupnih gubitaka mase nakon 500 okretaja trošenja abrazijom različitih debljina TiCN prevlake na različitim čelicima	51
Slika 41. Stereomikroskopske slike trošenih površina uzoraka od čelika K390PM.....	52
Slika 42. Stereomikroskopske slike trošenih površina uzoraka od čelika K110.....	53
Slika 43. SEM slike trošenih površina uzoraka od čelika Böhler K390PM.....	54
Slika 44. SEM slike trošenih površina uzoraka od čelika Böhler K110.....	55

POPIS TABLICA

Tablica 1. <i>Kemijski sastav čelika K390PM</i>	14
Tablica 2. <i>Kemijski sastav čelika K110</i>	17
Tablica 3. <i>Prikaz svih uzoraka u ispitivanju</i>	34
Tablica 4. <i>Rezultati prosječnih debljina prevlaka</i>	42

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje
\bar{E}	μm	srednja vrijednost debljine prevlake
a	mm	promjer traga trošenja u osnovnom materijalu
A		austenit
b	mm	vanjski promjer traga trošenja
CVD		kemijsko prevlačenje iz parne faze
D	mm	promjer kugle
E	μm	debljina prevlake
F	N	sila
F		ferit
F_N	N	normalna sila
F_t	N	tangencijalna sila
HRC		tvrdća po Rockwellu C
K		karbid
K''		sekundarni karbid
K^e		eutektički karbid
K^{id}		eutektoidni karbid
m	g	masa
PACVD		plazma potpomognuto kemijsko prevlačenje iz parne faze
PVD		fizikalno prevlačenje iz parne faze
R_a	μm	srednje aritmetičko odstupanje mjerenog profila
t	s	vrijeme
TiC		titanov karbid
TiCN		titanov karbonitrid
TiN		titanov nitrid
v	m/s	brzina
X	μm	duljina po osi x
Y	μm	duljina po osi y
Δm_{cum}	g	srednji kumulativni gubitak mase
Δm_{sr}	g	srednji gubitak mase
σ		standardna devijacija

Izjava

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

Ovim putem se zahvaljujem svima koji su pomogli u izradi završnog rada, a posebno mentoru prof. dr. sc. Franji Cajneru na korisnim savjetima prilikom pisanja završnog rada, dipl. ing. Hrvoju Rafaelu i prof. dr. sc. Darku Landeku na samoj pomoći tijekom provedbe ispitivanja, te svojoj obitelji na podršci prilikom cjelokupnog studiranja.

UVOD

Jedan od najvažnijih zahtjeva prilikom izrade nekog dijela, uz funkcionalnost, ekonomičnost, radnu sposobnost jest i njegova trajnost. Iako bi se odabirom što kvalitetnijeg materijala mogao produljiti vijek trajanja samog dijela, danas se često primjenjuju postupci modificiranja ili prevlačenja površine, drugim riječima – inženjerstvo površina.

Osim što se odabirom odgovarajućeg postupka modificiranja ili prevlačenja površine može produljiti trajnost strojnog dijela, također je moguće dobiti kombinaciju svojstava kakve je nemoguće dobiti običnim izborom materijala. Shodno tome, nije ni iznenađujuće kako se danas najviše ulaže u razvoj što boljih, raznovidnijih i kvalitetnijih prevlaka koje mogu pridonijeti značajnom produljenju trajanja strojarskih dijelova, odnosno značajnim uštedama.

Kod postupaka modificiranja debljina osnovnog materijala ostaje ista dok se mijenjaju svojstva površine npr. difuzijom elemenata koji se koriste pri određenom postupku modificiranja površine. S druge strane, kod postupaka prevlačenja površina, na osnovni materijal se nanosi prevlaka određene debljine koja mu mijenja dimenzije, ali u većini slučajeva služi kao zaštitni sloj osnovnom materijalu (supstratu) djelujući u tom pogledu bolje od modificiranih slojeva.

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 novije plazma potpomognuto kemijsko prevlačenje iz parne faze (*eng. Plasma-assisted CVD, PACVD postupak*).

Djelotvornost nanešenih prevlaka navedenim postupcima na osnovni materijal se najčešće provjeravaju, odnosno ispituju na različite mehanizme trošenja kao što su abrazija i adhezija. Uz navedena ispitivanja, bitno je i provjeriti samu adhezivnost prevlake na supstrat, na koju utječe i sama debljina nanešene prevlake, kako ne bi došlo do ljuštenja i otpadanja prevlake. Također treba i provjeriti otpornost prevlake predviđene za rad u agresivnim sredinama i na koroziju.

U ovom radu se istražuje pretežito utjecaj debljine prevlake TiCN na abrazijsko trošenje dvaju različitih visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad.

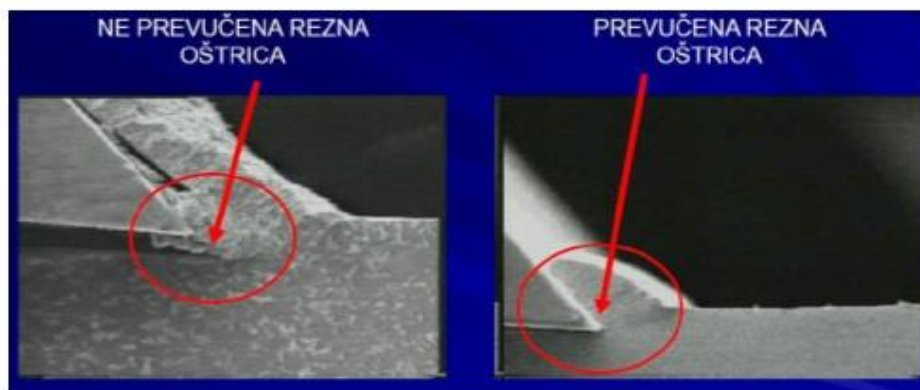
1. TEORIJSKI DIO

1.1 POSTUPCI PREVLAČENJA

1.1.1 Kemijsko prevlačenje iz parne faze

Kemijsko prevlačenje iz parne faze ili kraće – CVD, postupak je kojim se nanašaju tanki slojevi prevlaka mnogih metala, mnogi nemetalnih elemenata kao što su C i B i od kemijskih spojeva kao što su: boridi, nitridi, karbidi i oksidi. Specifikacija “kemijsko” temelji se na činjenici da se sve komponente gibaju pomoću “kemijskog transporta”.

Osnovni razlog korištenja CVD postupka jest taj što sa nanešenim prevlakama na osnovni materijal raste njegova otpornost na trošenje, kod reznih alata se to vidi kao otpornost na abraziju i adheziju. Smanjena adhezija utječe na sniženje trenja i opasnosti od hladnog navarivanja koji kod obrade čelika s neprevučanim alatima mogu predstavljati veliki problem, produžujući time samu trajnost alata (slika 1.). CVD prevlačenje posebno je prošireno na ona područja primjene gdje su već osnovni najkvalitetniji materijali dostigli svoja granična svojstva, što je naročito slučaj kod prevlačenja alata za odvajanje čestica od tvrdog metala i kod alata za oblikovanje od visokolegiranih alatnih čelika [1].

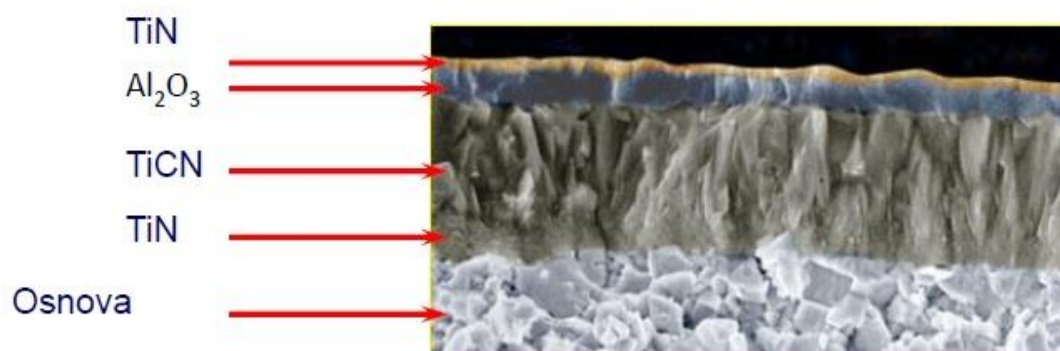


Slika 1. *Prevučena i neprevučena oštrica reznog alata [2]*

Teoretski je moguće prevlačenje svih čelika. Preniski udjeli ugljika čeliku smanjuju brzinu rasta slojeva. Uz visoki udjel slobodnog ugljika, tj. ugljika koji nije vezan u karbidima, dolazi za vrijeme rasta sloja do difuzije ugljika u sloj, pa u površinskoj zoni podloge dolazi do izvjesnog razugličenja. To se može negativno odraziti na svojstva obratka. Vrlo su prikladni svi visokolegirani alatni čelici – uz brzorezne čelike i čelici za hladni rad. Također se dobro daju prevlačiti tvrdi metali i cermeti (metalno-keramički kompoziti). U prevlačenju legura na osnovi neželjeznih metala do sada ima malo iskustava. Al legure nisu prikladne zbog preniskog tališta, a Ti legure radi nepostojanosti prema prekursorima koji sadrže halogene elemente [1].

Nakon CVD obrade slijedi hlađenje u peći, a tako postiziva intenzivnost hlađenja nije dovoljna da se visokolegirani čelici, inače kaljivi na zraku, prevedu u optimalnu strukturu kaljenja. Osim toga, često temperatura prevlačenja nije usklađena s optimalnom temperaturom austenitizacije. Za kaljive čelike mora se zbog toga nakon CVD prevlačenja izvesti toplinska obrada kaljenja i popuštanja. To ima posljedice: toplinska obrada treba biti provedena u vakuumu zbog osjetljivosti na oksidaciju karbidnih i nitridnih tvrdih faza i načelno, zbog toga što kod svake toplinske obrade nastupa određena promjena mjera koja se ne može izbjeći. Od slučaja do slučaja treba zato ispitati jesu li održive pogonske proizvodne tolerancije nakon prevlačenja i naknadne toplinske obrade.

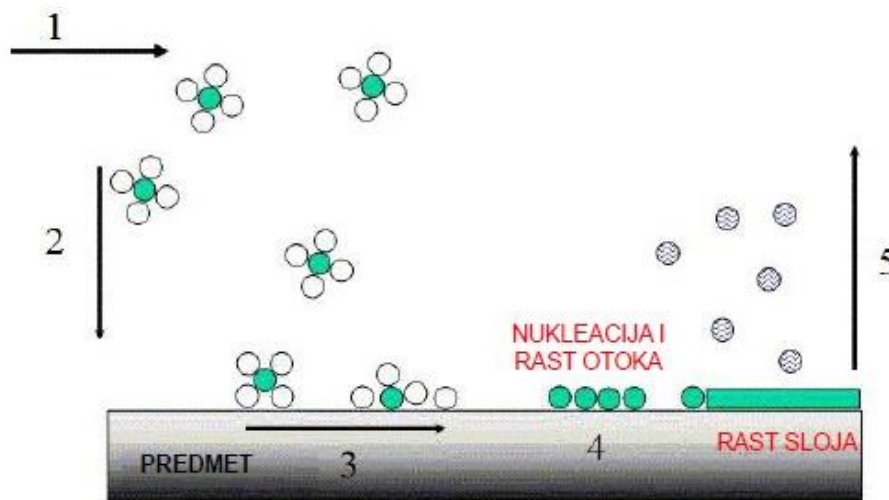
Za tribološke svrhe u primjeni se danas pojavljuju pretežno karbidi i nitridi četvrte do šeste podskupine. Od najveće je važnosti pri tome titan-nitrid (TiN), titan-karbid (TiC), kao i ternarni spoj titan-karbonitrid (Ti[C,N]). Nadalje su poznati spojevi od cirkonij-nitrida (ZrN), hafnij-nitrida (HfN), vanadij-karbida (VC) i također volfram-karbida (W_2C) i nekih drugih spojeva iz te skupine. Daljnji tip sloja je aluminijev-oksidi (Al_2O_3) koji se ne pojavljuje kao pojedinačni sloj, nego većinom zajedno s ostalim vrstama tvrdih spojeva i to u višeslojnim prevlakama. CVD prevlačenje s titan-nitridom (TiN) ili sličnim tvrdim spojevima poboljšava otpornost na adheziju i abraziju. Ostala svojstva mijenjaju se malo, kao npr. maksimalni dopušteni površinski pritisak, dinamička izdržljivost i savojna čvrstoća. Otpornost na koroziju ne daje jednoznačnu sliku. S jedne strane su tvrde prevlake, kao npr. TiN, kemijski otpornije nego čelik, ali svakako zbog napuklina u sloju može doći do stvaranja lokalnog galvanskog članka [1]. Posljedica je vrlo brzo stvaranje rupica u neplemenitijem osnovnom materijalu. Najveća temperatura primjene prevlake TiN iznosi $500^\circ C$ jer iznad te temperature dolazi vrlo brzo do oksidacije prevlake. Na slici 2. prikazana je višeslojna prevlaka TiN/ Al_2O_3 /TiCN/TiN.



Slika 2. Višeslojna prevlaka TiN/ Al_2O_3 /TiCN/TiN proizvedena CVD postupkom [3]

Nastanak sloja kod CVD postupka se može opisati u 5 faza (slika 3.):

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

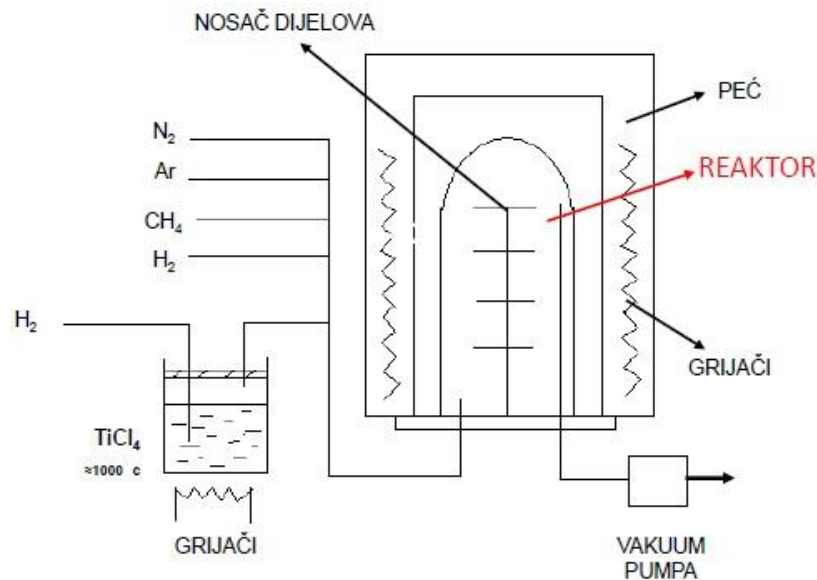


Slika 3. Faze pri nastajanju sloja kod CVD postupka [2]

Predobrada dijelova koje treba prevući sastoji se od temeljitog čišćenja pri čemu se otklanjaju slobodne čestice i ostaci masti. Nakon stavljanja u komoru, komora se evakuira i tada se u reducirajućoj atmosferi ugrije na optimalnu temperaturu obrade između 900°C i 1000°C, da bi se površina osnovnog materijala depasivirala. Ugrijavanje recipijenta odvija se ili izvana (reaktor s toplim stijenkama) ili direktnim grijanjem obradaka unutar reaktorskog prostora (reaktor s hladnim stijenkama). Pri tom je konstantna raspodjela temperature preko cijelog obratka vrlo važna pretpostavka za jednolični rast sloja [1].

Kada se dostigne temperatura obrade, prespoji se struja plina na reaktivne plinove. Za taloženje tvrdih spojeva na osnovi titana (TiN , TiC i $\text{Ti}[\text{C},\text{N}]$) kao nosač metala općenito se pri sobnoj temperaturi primjenjuje tekući titan-tetraklorid (TiCl_4), a za taloženje Al_2O_3 čvrsti aluminijev triklorid. Kao nosivo sredstvo za nemetalne komponente primjenjuje se molekularni dušik (N_2), metan (CH_4) i ugljični dioksid (CO_2). Sve polazne supstance su plinovite – tekući TiCl_4 mora zbog toga ispariti, a čvrsti AlCl_3 mora se sublimirati i uvesti u vakuumiranu komoru, u kojem reakcija stvaranja tvrdih spojeva nastupa na temperaturama između 900°C i 1000°C .

Brzina rasta sloja iznosi do nekoliko $\mu\text{m/h}$, ovisno o temperaturi i parcijalnim tlakovima polaznih slojeva. Nakon isteka vremena prevlačenja, isključuje se ugrijavanje, odnosno odstranjuje se zvonasta peć, a recipijent se hladi strujom inertnog plina. Na slici 4. prikazan je jedan takav shematski prikaz CVD uređaja za prevlačenje.



Slika 4. Shematski prikaz CVD uređaja za prevlačenje [2]

Pumpom se reakcijski plinovi i nusprodukti stalno isisavaju, pri čemu je tlak u komori namješten između nekoliko desetina milibara i normalnog tlaka. Svi dijelovi uređaja koji kod niskih temperatura dolaze u doticaj sa sporednim produktom – klornom kiselinom (HCl), moraju biti izvedeni od korozijski postojanog materijala. Neutralizacija odvodnog plina provodi se pumpama za tekućine koje se pogone nekim alkalnim medijima (npr. vodenom otopinom natrijevog hidroksida).

Brzo i relativno jednostavno izvedivo ispitivanje CVD prevučenih dijelova obuhvaća sljedeće četiri točke. Vizualnim pregledom – najbolje pod stereomikroskopom – postaju vidljivi i lokaliteti na kojima je došlo do odlupljivanja ili neprevučena mjesta. Nejednolično bojenje prevlake na obratku znači različite debljine ili različite sastave prevlaka. Razlike u boji između uzoraka koji su bili postavljene na različite pozicije u prostoru za šaržiranje ukazuju na temperaturne razlike u reakcijskom prostoru. Daljnja ispitivanja zahtijevaju lako pristupačnu i dovoljno ravnu plohu. Tako se ispitivanje površinske hrapavosti izvodi na posebnom uređaju s ticalom. Utvrđivanje debljine prevlake izvodi se na kalotnom izbrusku. Za ispitivanje prionjivosti prevlake primjenjuje se test brazdanjem (eng. *scratch test*) [1].

1.1.2 Fizikalno prevlačenje iz parne faze

Fizikalno prevlačenje iz parne faze ili kraće – PVD, je također jedan od postupaka nanašanja prevlaka na osnovni materijal, a glavna razlika u odnosu na CVD jest ta što se stvaranje slojeva provodi transportom čestica, tj. atoma, molekula i iona u vakuumu, a da se čestice na izvoru provode fizikalnim načinom iz čvrste u parnu fazu. Pomoću PVD postupka mogu se postići tanke prevlake praktički od svih elemenata. Temperatura osnovnog materijala može se pritom načelno držati toliko niskom da prevučeni PVD sloj ne traži naknadnu toplinsku obradu, tj. da se izvodi uvijek kao posljednji korak obrade što je velika prednost u odnosu na CVD postupak. Dobre kvalitete prevlaka zahtijevaju izvjesnu minimalnu temperaturu osnovnog materijala za vrijeme prevlačenja. Kemijski spojevi, kao što su metalni karbidi, nitridi ili oksidi, mogu se također izlučiti reaktivnim vođenjem procesa i danas su u tehničkoj primjeni od velikog značenja.

PVD postupak se, kao i CVD koristi najviše za prevlačenje alata, s bitnom razlikom što se ovim postupkom mogu prevlačiti i alati koji su skloni deformacijama, kao što su svrdla i glodala, budući da PVD prevučeni dijelovi ne moraju biti naknadno toplinski obrađeni. Slično kao i kod CVD prevlaka, PVD prevlake tvrdih spojeva smanjuju trošenje na osnovi sniženja abrazije i adhezije, kao što i smanjuju faktor trenja pri adheziji. Posljedica toga je viša trajnost prevučenog dijela, kao i više brzine rezanja.

Budući da se pri stvaranju sloja za vrijeme PVD procesa ne radi o kondenzaciji, moguće je u načelu prevlačiti sve materijale pri nekoj optimalnoj temperaturi. Uz sve čelike mogu se prevlačiti tvrdi metali i cermeti, kao i neželjezne legure. Ako se temperatura osnovnog materijala drži dovoljno niskom, mogu se prevlačiti i polimeri, i kod odgovarajućeg vođenja procesa i električki nevodljivi keramički materijali. Budući da PVD prevlačenje predstavlja uvijek posljednji korak u proizvodnji, treba kod prevlačenja čelika znati da se za vrijeme prevlačenja ne smije prekoračiti ranije odabrana temperatura popuštanja.

Za tribološke svrhe primjenjivi su nitridi i karbonitridi četvrte do šeste sporedne skupine periodnog sustava. Danas su najvažniji titan-nitrid (TiN), krom-nitrid (CrN, odnosno Cr₂N), ternarni spojevi titan-karbonitrid (Ti[C,N]), a također titan-aluminij-nitrid ([Ti,Al]N). Uz to su poznati brojni daljni sustavi slojeva [1].

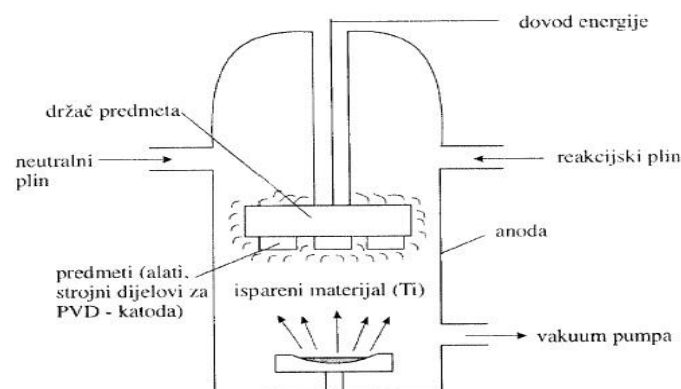
Pod postupkom PVD danas se podrazumijeva čitav niz varijanata postupka, koji svi počivaju na jednakim načelima i pri kojima je moguće taloženje svih sustava tvrdih spojeva.

Proces PVD prevlačenja sastoji se od tri koraka. U prvom koraku se pojedinačne čestice iz nekog izvora prevode iz čvrstog u plinovito stanje. Za taj korak danas postoje 5 različitih tehnički realiziranih metoda:

1. Toplinsko isparavanje
2. Isparivanje snopom elektrona
3. Isparivanje elektronskim lukom
4. Isparivanje laserskim zrakama
5. Katodno otprašivanje.

Danas je u primjeni uglavnom isparavanje snopom elektrona, odnosno elektronskim lukom kao i katodno otprašivanje. Drugi korak je transport, pri čemu se na izvoru upareni djelići uz dovoljno niski tlak kreću pravocrtnom linijom od izvora do osnovnog materijala. Zajednička karakteristika svih PVD procesa je da oni uopće ne funkcioniraju pri normalnom tlaku i da su zbog toga oni uvijek vakuumski procesi. Pravocrtno gibanje ima odlučujući nedostatak što kod kompleksnih oblika osnovnog materijala bivaju prevučene samo one površine koje su od izvora pravocrtno dostizive. To znači da će na osnovnom materijalu biti prevučene samo one plohe koje se od izvora također vidljive, pa se zbog toga govori i o procesu vidne linije. Ova loša strana se može otkloniti rotacijom osnovnog materijala prilikom PVD prevlačenja, ali svejedno predstavlja nedostatak u odnosu na CVD ili PACVD postupke prevlačenja.

Treći korak je taloženje djelića na osnovnom materijalu tj. prijelaz iz plinovitog u čvrsto stanje. Budući da je prijelaz plinovito-čvrsto stanje uvijek povezan s padom unutarnje energije, jedina pretpostavka za taloženje mora biti da temperatura osnovnog materijala nije previsoka. To je istoznačno s činjenicom da za osnovne materijale tijekom prevlačenja nema neke najniže temperature, što predstavlja jednu veliku prednost svih PVD postupaka prevlačenja. Na slici 5. prikazan je shematski prikaz PVD uređaja za prevlačenje.



Slika 5. Shematski prikaz PVD uređaja za prevlačenje [3]

Na osnovi upravo nabrojanih različitih vrsta prevođenja čvrste tvari u parnu fazu, moguće je proizvesti veliki broj teorijski provedivih PVD varijanata. Razvoj daljnjih varijanti postupaka nikako nije završen nego nesmetano napreduje.

U prvu skupinu se ubrajaju postupci koji prevode metalnu komponentu u parnu fazu pomoću elektronskog isparivača. Isplinjavanje se događa pri tom iz jedne posude (lonca) u kojoj se stvara tekuća faza zbog visokog površinskog unošenja energije. Općenito se te varijante odlikuju mogućnošću stvaranja vrlo gustih slojeva finostrukturne morfologije.

Druga skupina postupaka radi s isparivačem na osnovi električnog luka. Glavna prednost je u tome što je gustoća iona vrlo visoka i što je nije nužno podizati dodatnim mjerama. Prednost je da je izvor jednostavno izveden i da uzrokuje samo neznatne troškove. Loša je strana da kod ove metode isparivanja tipično nastaju male kapljice koje se sastoje od čiste metalne faze i koje se talože na osnovni materijal ili na rastući sloj i time mogu ometati rast sloja.

Treća metoda isparivanja, otprašivanje, ima veliko značenje. Kod ovih postupaka je praktički isključivo nužna magnetska podrška. Kao i kod isparivanja lukom, materijal izvora ostaje pri otprašivanju čvrst, tako da se mete mogu postaviti i okomito, a mogu se bez problema također primjeniti legure. Mogu se načiniti vrlo guste morfologije sloja s dobrim tarnim svojstvima i uz visoke brzine taloženja. Loša strana jesu visoki troškovi opskrbe strujom tih meta i znatno skuplji postupak od ostalih varijanata [1].

Putem PVD-a postignute prevlake slične su u svojim svojstvima CVD prevlačenju. Tako i ovdje TiN poboljšava otpornost na abraziju i adheziju. Također se događa da se ostala svojstva – maksimalni površinski pritisak, dinamička izdržljivost i savojna čvrstoća neznatno promjene.

Brzo i jednostavno izvedivo ispitivanje PVD prevučeni dijelova obuhvaća četiri načina:

1. Vizualni pregled
2. Ispitivanje površinske hrapavosti
3. Utvrđivanje debljine sloja
4. Ispitivanje čvrstoće prijanjanja

Površinska hrapavost dijelova prije prevlačenja treba biti toliko dobra koliko se traži za primjenu jer PVD prevlačenjem dolazi do samo neznatnog daljnjeg ohrapavljenja površine.

1.1.3 Plazma potpomognuto kemijsko prevlačenje iz parne faze

Glavni nedostatak CVD postupka, a to su visoke temperature obrade, nastojao se svesti na što niže temperature što bi omogućilo lakše prevlačenje prvenstveno čeličnih dijelova koji ne bi trebali ići na daljnje kaljenje već bi to bio zadnji korak u procesu izrade. Dodavajući energiju plinu koji okružuje osnovni materijal, plin se ionizira i aktivira tj. dolazi do formiranja kemijske aktivne plazme, omogućujući taloženje prevlaka na osnovni materijal bez dostizanja vrlo visokih temperatura kao kod CVD postupka prevlačenja. Takav postupak se još naziva i plazma potpomognuto kemijsko prevlačenje iz parne faze, ili kraće – PACVD postupak (u nekim literaturama i PECVD postupak).

Jedno od glavnih zahtjeva kod prevlačenja jest dobra prionljivost prevlake na osnovni materijal tj. njezina adhezivnost. U počecima nastajanja PACVD postupka, dobivale su se prevlake koje su bile vrlo dobro prionljive na tvrdi metal dok je prionljivost na čelik bila razmjerno slaba. Postupnim razvojem PACVD postupka i to je poboljšano koristeći temperaturu osnovnog materijala između 480 i 550°C. Uz to, ključ dobre adhezivnosti prevlake leži u temeljitom čišćenju površine osnovnog materijala. Razlog tomu je cilj dobivanja najjače moguće veze između osnovnog materijala i prevlake, a to se može dobiti samo vrlo visokom čistoćom osnovnog materijala prije početka postupka prevlačenja. Dobivanje zadovoljavajuće čiste površine osnovnog materijala je ostvarivo sa prikladnim čišćenjem, a potom i kemijskim plazma čišćenjem u kombinaciji sa fizikalnim uklanjanjem kontaminacija raspršivanjem teškim ionima [4].

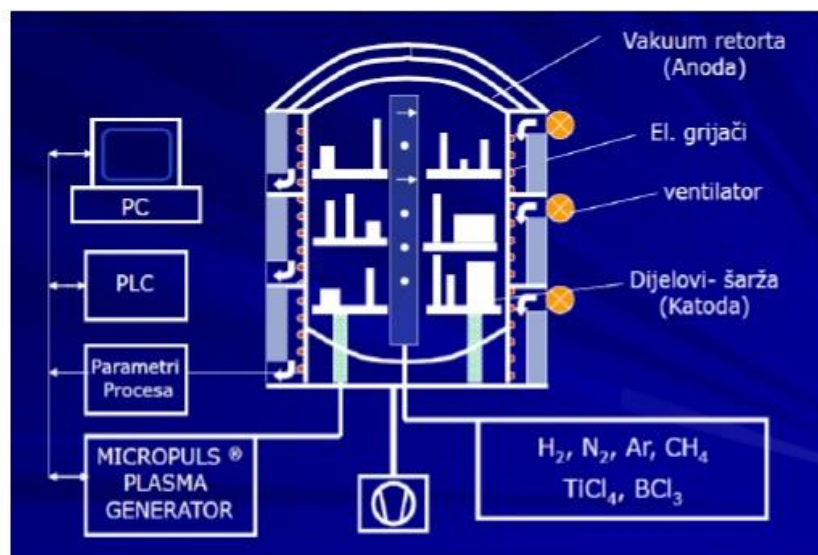
PACVD postupak prevlačenja donosi sa sobom značajne prednosti [5] :

- niska temperatura procesa (500°C),
- nema promjena dimenzija obratka,
- prikladnost za masivne predmete kompliciranog oblika,
- nema emisije štetnih tvari,
- ekonomičnost postupka,
- efekt samočišćenja površine,
- velika pouzdanost (ponovljivost) procesa.

Vidljivo je iz nabrojanog kako je značajna prednost PACVD postupka u odnosu na CVD postupka niska temperatura prevlačenja (oko 500°C u odnosu na 1000°C kod CVD postupka) što pridonosi lakšem prevlačenju obradaka dok u odnosu na PVD, PACVD ne mora koristiti mehanizme za rotaciju obradaka jer nema problema “vidne linije” i može prevući cijelu površinu obratka bilo koje geometrije.

PACVD postupkom moguće je prevlačenje različitih, vrlo tankih jednoslojnih, višeslojnih (čak i nanodimenzioniranih) slojeva kao što su titan-nitrid (TiN), titan-karbonitrid (Ti[C,N]), titan-aluminij-nitrid ([Ti,Al]N), titan-bor-nitrid ([Ti,B]N), titan-borid (TiB₂) i drugi [5].

PACVD uređaj se sastoji vakuumske komore s grijačima, vakuumske pumpe, sustava za dobavu plinova (N₂, Ar, H₂, CH₄) i prekursora (TiCl₄, BCl₃), generatora plazme, sustava za neutralizaciju nusprodukata prevlačenja te PLC regulacijskog sustava. Uz već spomenutu kemijski aktiviranu plazmu dobivenu dodavanjem energije plinu koji okružuje osnovni materijal, razvijen je jedan karakterističan tip PACVD postupka imena pulsirajući DC (eng. *direct current* – istosmjerna struja) plazma CVD postupak kod kojeg se veliki istosmjerni napon dijeli na kontrolirane pulsirajuće intervale i intervalne pauze. Pulsirajući intervali stvaraju plazmu koja omogućuje prevlačenje. Podešavanjem trajanja pulsirajućih intervala i intervala pauze, moguće je koristiti dovoljno visok napon kako bi se dobila dobra svojstva prevlaka bez pregrijavanja osnovnog materijala. Cijeli sustav je vođen PLC (programibilni logički kontroler) uređajima i računalnim programskim sustavom Simens Simatic i upravljačkim programskim sustavom proizvođača PACVD uređaja [4]. Na slici 6. je prikazan shematski prikaz PACVD uređaja.



Slika 6. Shematski prikaz PACVD uređaja za prevlačenje [2]

Baveći se primjenom prevlaka dobivenih inženjerstvom površina, bitno je razmatrati i ekonomski aspekt, u ovom slučaju PACVD 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, kvalitetu, preciznost, kao i manje vrijeme zastoja u nekim proizvodnim linijama dok se čeka na izradu skupih zamjenskih strojnih dijelova [4].

PACVD postupak prevlačenja, sa svojim specijalnim karakteristikama, predstavlja također jedan od vrlo isplativih postupaka prevlačenja. Moguće je prevlačenje obradaka svih tipova geometrije, time predstavljajući značajnu prednost nad PVD postupkom, ali pri znatno nižim temperaturama od, u mnogim slučajevima, nepogodno visokih temperatura CVD postupka prevlačenja. Dodatno, cijeli tijek PACVD postupka prevlačenja je ekološki prihvatljivo pošto nema nikakvih štetnih produkata. Uzimajući u obzir i ekonomičnost, PACVD postupak prevlačenja predstavlja isplativu tehnologiju za svakojake industrijske primjene.

1.2 ALATNI ČELICI ZA HLADNI RAD

U radu se kao podloga na nanošenje TiCN prevlake postupkom PACVD koriste uobičajni visokolegirani alatni čelik za hladni rad X155CrVMo12-1 (W.Nr. 1.2379, Böhler K110) i visokolegirani alatni čelik Böhler K390PM proizveden metalurgijom praha.

1.2.1 Alatni čelik Böhler K390PM

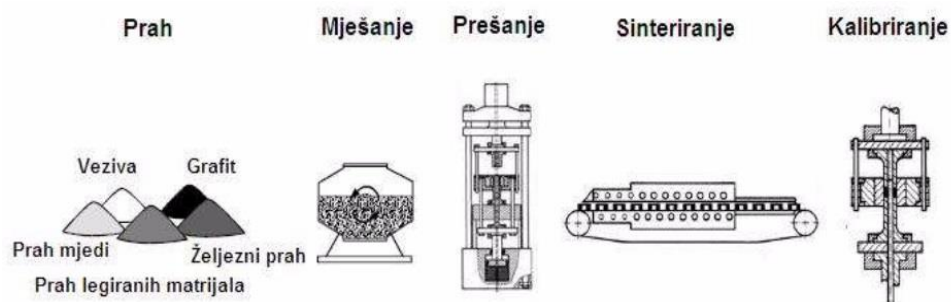
Alatni čelik za hladni rad Böhler K390PM proizveden je metalurgijom praha. Odlikuju ga izrazito visoka otpornost na trošenje, izvrsna žilavost i vrlo visoka tlačna čvrstoća. Primjenjuje se kod zahtjevnih rezanja i hladnih oblikovanja i primjenjiv je i u plastičnoj industriji. U tablici 1. prikazan je njegov uobičajni kemijski sastav.

Tablica 1. Kemijski sastav čelika Böhler K390PM [7]

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Co
2,47	0,55	0,40	4,20	3,80	9,00	1,00	2,00

Brojni su razlozi primjene metalurgije praha u proizvodnji čelika i ostalih metalnih materijala u odnosu na klasičnu proizvodnju. Glavni razlog je bolja iskoristivost (skupih) materijala i jednolično vrlo sitnozrnata mikrostruktura što rezultira boljom otpornošću na trošenje i duljim vijekom trajanja proizvedenih dijelova. Mogu se proizvoditi namjerno porozni materijali za određenu primjenu, kao što se mogu dobiti i bolja mehanička svojstva materijala istog kemijskog sastava od onog dobivenog klasičnim postupcima [6].

Metalurgija praha je tehnološki postupak pomoću kojeg se proizvode čvrsta metalna ili nemetalna tijela (proizvodi) sjedinjavanjem čestica praška jednog ili više metala odnosno nemetala. Na slici 7. prikazan je tijek proizvodnje tehnologijom metalurgije praha.



Slika 7. Tijek proizvodnje tehnologijom metalurgije praha [6]

Prah korišten u metalurgiji praha može se dobiti na različite načine kao što su:

1. Atomizacijom
2. Mehaničkim postupcima
3. Kemijskim postupcima, dekompozicijom ili precipitacijom
4. Elektrolizom.

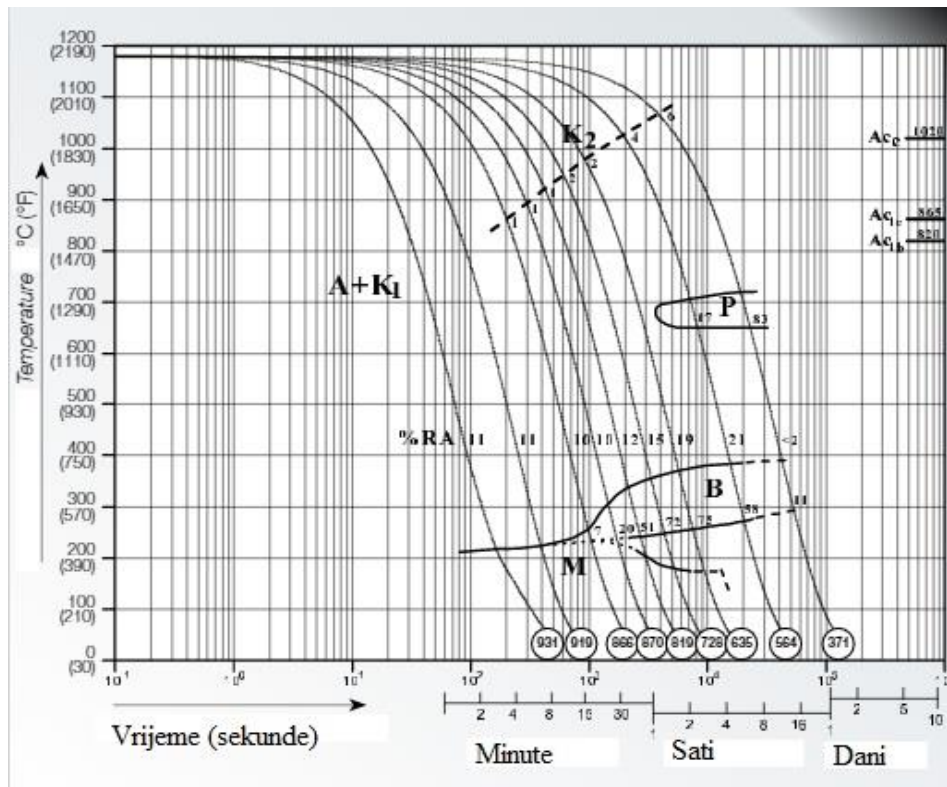
Prahovi se mogu karakterizirati svojim mehaničkim i metalurškim svojstvima kao i geometrijskim karakteristikama. Kod metalurških svojstva su bitni kemijski sastav, struktura čestica i mikrotvrdoća. Mehanička svojstva opisuju vrijeme tečenja, nasipna gustoća, stlačivost i elastični povrat otpreska. Geometrijske karakteristike čine raspodjela veličine zrna, vanjski oblik zrna, kao i unutarnja struktura zrna ili porozitet [6].

Kao i čelike dobivene klasičnim postupcima i čelik Böhler K390PM zahtjeva odgovarajuću toplinsku obradu kako bi se postigla njegova optimalna svojstva u eksploataciji. Pravilno toplinski obrađen čelik će poslužiti kao dobra podloga za predviđenu prevlaku u postupku prevlačenja. Svaka toplinska obrada, tako i ova, sastoji se od prvotnog žarenja za redukciju zaostalih naprezanja, onda kaljenja te odgovarajuće provedbe popuštanja na odgovarajućoj temperaturi omogućavajući poslije zadnju obradu prevlačenjem.

Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja služi kako bi naprezanja u samom materijalu bila što manja, te kako se pri ugrijavanju ne bi superponirala s toplinskim napreznjima i tako izazvala deformacije, pukotine ili lom obrađivanog čelika. Kod čelika Böhler K390PM žarenje za redukciju zaostalih naprezanja izvodi se na temperaturi između 650 i 700°C te između jednog i dva sata, a zatim se polagano hladi na zraku kako ne bi došlo do novih zaostalih naprezanja nastalih bržim hlađenjem. Austenitizacija čelika se izvodi sporijim ugrijavanjem uz odgovarajući broj predgrijavanja do temperatura između 1030 i 1180°C gdje se na tim temperaturama drži između 20 i 30 minuta ako su temperature između 1030 i 1150°C, odnosno 10 minuta ako je temperatura austenitizacije 1180°C. Nakon toga, čelik se gasi u ulju ili inertnom plinu [7].

Ako se traži veća žilavost, treba koristiti niže temperature austenitizacije dok se za veću otpornost na trošenje koriste više temperature. Popuštanje se mora izvesti odmah poslije kaljenja pošto su alatni čelici izrazito krhki i puni zaostalih naprezanja izazvanih brzim gašenjem. Potrebno je sporije ugrijavanje na temperaturu popuštanja, kao i dvosatno držanje. Preporuča se trostruko popuštanje kako bi se dobila najbolja radna svojstva. Postizive tvrdoće nakon provedene toplinske obrade kreću se između 58 i 64 HRC [7].

Na slici 8. prikazan je TTT dijagram za čelik Böhler K390PM.



Slika 8. TTT dijagram čelika Böhler K390PM [7]

Primjena čelika Böhler K390PM je raznovrsna. Koristi se za izradu žigova, reznih alata, noževa u drvenoj i papirnoj industriji, noževa u recikličnoj industriji, oštrica za rezanje vrlo tankih materijala, cirkularnih pila, sapnica za ulijevanje, sigurnosnih ventila, matrica za duboko vučenje, matrica kod keramičke i farmaceutske industrije itd [7].

1.2.2 Alatni čelik Böhler K110 (EN X155CrVMo12-1)

Alatni čelik Böhler K110, također poznatiji i kao EN X155CrVMo12-1 visokolegirani je alatni čelik za hladni rad koji spada u podskupinu visokougličnih čelika s 12 % Cr (ledeburitni alatni čelici za hladni rad).

Odlikuju ga zadovoljavajuća žilavost, dimenzijska stabilnost, kao i mogućnost kaljenja na zraku [8]. U tablici 2. prikazan je uobičajni kemijski sastav čelika Böhler K110.

Tablica 2. *Kemijski sastav čelika Böhler K110* [8]

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
1,55	0,30	0,30	11,30	0,75	0,75

Osnovna karakteristika svih ledeburitnih alatnih čelika za hladni rad jest ta da su podeutekličkog (ledeburitnog) karaktera. U žarenom stanju pri 20°C sadrže $F + (Cr, Fe)_7C_3$, pri čemu su karbidi karaktera: K^{id} , K^{II} , K^e (tj. eutekoidni, sekundarni i euteklički). Austenitizacijom sve do temperature solidusa (oko 1200°C) ostaje nerastvoren dio K^{II} i svi K^e tako da su pri svakoj temperaturi između 840 i 1200°C prisutne faze A+K [9].

Tipično je za sve čelike ove podgrupe da im je sastav karbida pri 1000°C $(Cr, Fe)_7C_3$, a u austenitu je rastvoreno između 0,5 do 0,6 % C i 5 do 7 % Cr. Kako je za potpuno zakaljivanje čelika nužno da mu austenit sadrži upravo između 0,5 do 0,6 % C, temperatura od 1000°C će biti uobičajna temperatura austenitizacije za sve čelike ove podgrupe.

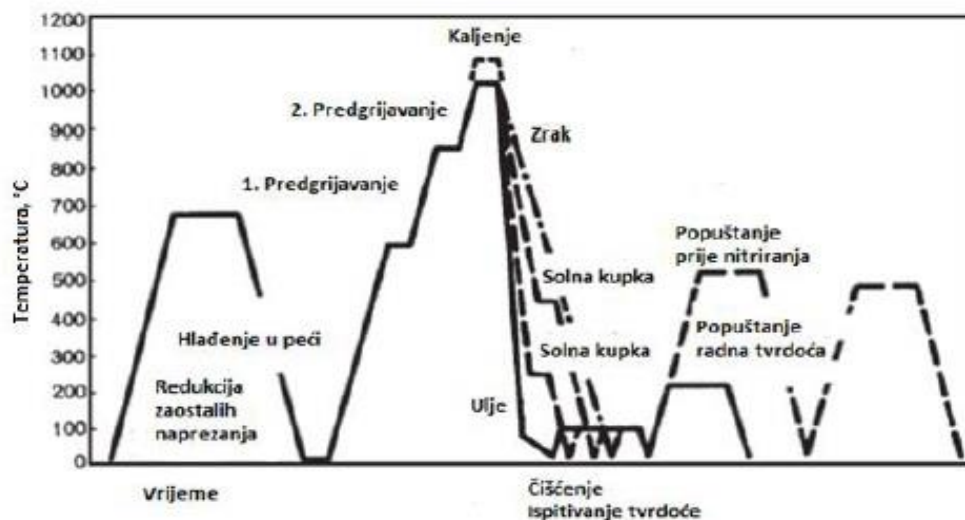
Čelici se obično isporučuju u sferoidiziranom (mekom) žarenom stanju kako bi se dobila što niža tvrdoća, omogućujući bolju obradivost. Nakon grube strojne obrade slijedi uobičajno žarenje za redukciju zaostalih naprezanja koje se provodi na temperaturama od 650 do 700°C oko dva sata te sporog hlađenja na zraku. Austenitizira se sporim ugrijavanjem, sa barem 2 predgrijavanja. Dulje je držanje na temperaturi (između 15 i 30 minuta) austenitizacije potrebno radi karbida koje treba otopiti u austenitu. Može se gasiti u više sredstava, kao što su zrak za obratke kompliciranog oblika, ulje, solna kupka ili struja plinova za jednostavnije oblike.

Posebna razlika između čelika K110 u odnosu na druge čelike svoje grupe jest legiranost molidbenom i vanadijem koji služe kao kočničari rasta austenitnog zrna (krom nema mogućnost kočenja rasta zrna) stoga se mogu austenitizirati i pri višim temperaturama omogućavajući više zaostalog austenita (što je viša temperatura austenitizacije, viši je i udio zaostalog austenita) koji će biti važan u fazi popuštanja.

Pošto su svi čelici ove grupe visokolegirani, imaju predispoziciju za efekt sekundarne tvrdoće prilikom popuštanja koje se izvodi na temperaturama oko 500°C. No međutim, samo čelik Böhler K110 dolazi u obzir za visokotemperaturno popuštanje koje će izazvati efekt sekundarne tvrdoće jer mu je martenzitno zrno nakon gašenja sitnije od ostalih čelika ove skupine, radi legiranosti vanadijem, čineći ga žilavijim. Također, vanadij osim što utječe na sitnozrnatost čelika nakon gašenja omogućava i otpornost na popuštanje. To omogućava da se višestruko visokotemperaturno popušta, za razliku od ostalih čelika te skupine koji se popuštaju niskotemperaturno.

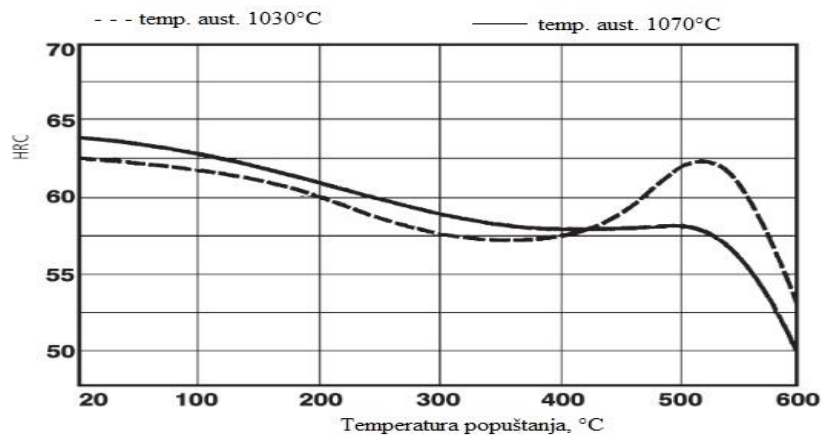
Preporuča se najmanje 2 puta provesti popuštanje, prvo radi postizanja efekta sekundarne tvrdoće, a drugo kako bi se dobiveni sekundarni martenzit popustio i time mu se povisila žilavost, ali i snizila tvrdoća. Temperatura drugog popuštanja mora biti viša od temperature naknadnog PACVD prevlačenja kako ne bi došlo do neželjenih promjena u čeliku uzrokovanih višom temperaturom prevlačenja. Postizive tvrdoće nakon provedene toplinske obrade, a prije postupka prevlačenja kreću se između 58 do 61 HRC [8].

Na slici 9. prikazan je tijek uobičajne toplinske obrade čelika Böhler K110.



Slika 9. *Tijek toplinske obrade čelika Böhler K110 [8]*

Na slici 10. je prikazan dijagram postizivih tvrdoća prilikom popuštanja čelika Böhler K110, koji potvrđuje činjenicu kako su optimalne temperature prvotnog popuštanja oko 500°C kada se postiže efekt sekundarnog otvrdnuća.



Slika 10. Dijagram popuštanja čelika Böhler K110 [8]

Alatni čelik Böhler K110, također kao i čelik Böhler K390PM ima raznovrsnu primjenu kod hladnog rada, odnosno nižih temperatura ili rada kod kojeg se ne razvija prevelika toplina. Čelik Böhler K110 se koristi kod reznih alata, žigova, alata za obradu drva, alata za duboko vučenje, štanci, alata za hladno oblikovanje, alata za utiskivanje, alata za izvlačenje žice, valjaka za navoje, glodala za proreze [9].

1.3 TROŠENJE

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama [10].

Premda postoji neizbrojno veliki broj slučajeva trošenja, većina autora je suglasna da su samo četiri osnovna mehanizma trošenja [10] :

- abrazija,
- adhezija,
- umor površine,
- tribokorozija.

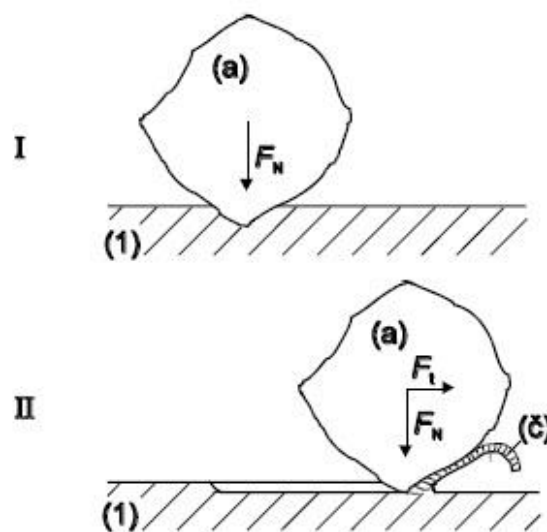
Mehanizmi trošenja opisuju se jediničnim događajima. Jedinični događaj je slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine. On uvijek uključuje proces nastajanja pukotina i proces napredovanja pukotina.

Pošto je tema ovog rada utjecaj debljine prevlake na abrazijsko trošenje visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad i jer je kod primjene alata najčešći abrazijski mehanizam trošenja, dalje će se pisati samo o abraziji.

1.3.1 Abrazija

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama.

Može se opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice s dvije faze jediničnog događaja što prikazuje slika 11.



Slika 11. Jedinični događaj abrazije [10]

Jedinični događaj abrazije se sastoji od dvije faze:

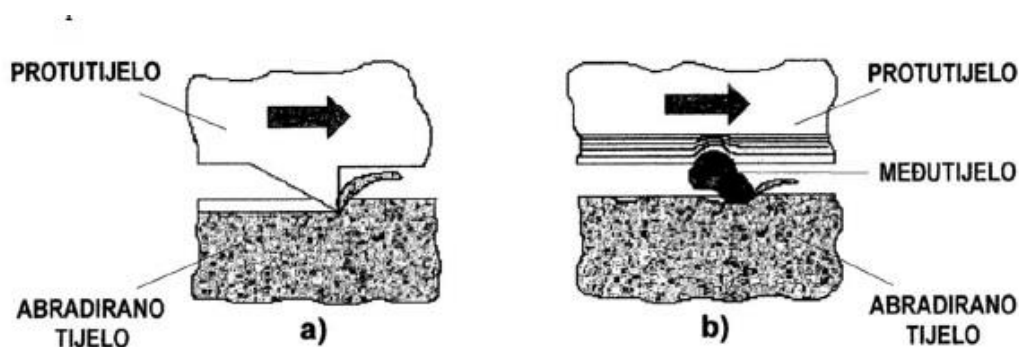
1. faza – prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja F_N .
2. faza – istiskivanje materijala u obliku čestice trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja F_T .

Mehanizam abrazije moguće je analizirati s nekoliko različitih gledišta [10]:

1. Ovisno o strukturi tribosustava u kome se zbiva abrazija

- Abrazija u dodiru dva tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela.
- Abrazija u dodiru tri tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela te međutijela (čestice) koje se gibaju slobodno između funkcionalnih dijelova i djeluju abrazijski.

Na slici 12. prikazane su abrazije u dodiru dva i triju tijela.



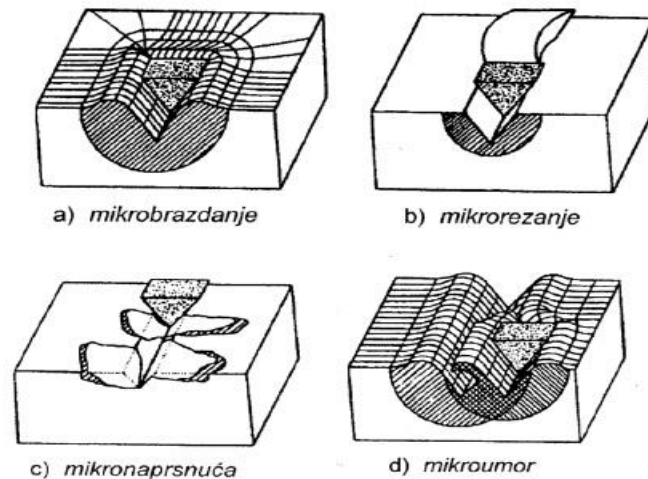
Slika 12. Abrazija u dodiru dva tijela (a) i tri tijela (b) [10]

2. Ovisno o međusobnom djelovanju između abrazijskih čestica i trošene površine

- Mikrobrazdanje (slika 13.a) – odnošenje materijala proporcionalno volumenu brazde nastale plastičnom deformacijom pri prolazu jedne abrazijske čestice, uz uvjet da se rubovi brazde odvoje od površine u obliku produkata trošenja. U idealnom slučaju će materijal biti potisnut u stranu u obliku bočnih “grebena”.
- Mikrorezanje (slika 13.b) – odnošenje materijala jednako volumenu zareza nastalog prolazom abrazijske čestice.

- Mikronaprsnuća (slika 13.c) – odnošenje materijala s krhke površine mehanizmom nastanka i širenja mikropukotina. Pri tome se s površine odnose veliki djelići materijala.

- Mikroumor (slika 13.d) – odnošenje materijala mehanizmom umora površine nastalim učestalim izmjeničnim opterećenjem. Materijal je izložen trenutnim deformacijama uslijed čega nastaju mikropukotine koje se zatim šire i koje u konačnici uzrokuju odvajanje dijelova materijala trošene površine. Mikroumor može nastati i kao posljedica višestrukog učestalog mehanizma mikrobrazdanja.



Slika 13. Shematski prikaz mikromehanizama trošenja materijala [10]

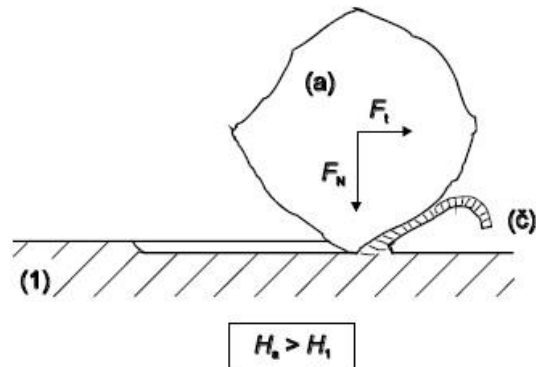
3. Ovisno o međusobnom odnosu tvrdoća abraziva i materijala

- “čista” abrazija – nastaje kada je tvrdoća abraziva (a) veća od trošene podloge (1). Površina je izbrazdana, a čestice trošenja su u obliku spiralne strugotine u slučaju kada je abradirani materijal duktilan, odnosno lomljene strugotine, kada je abradirani materijal krhak (slika 14.).

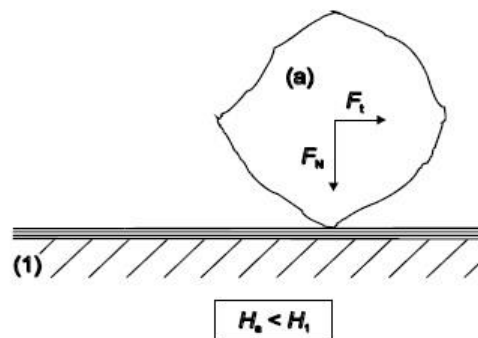
- selektivna abrazija – djeluje kada u abradiranom materijalu postoji faza tvrđa od abraziva. Abraziv reže samo zahvaćeni sloj mekše faze. Površina je izbrazdana s prekidima na mjestima gdje se na površini nalaze zrna ili trake tvrde faze.

- “nulta” abrazija – nastaje kada je cijela abradirana površina tvrđa od abraziva. Površina ima polirani izgled, a čestice trošenja trebale bi biti sitne ljuskice koje potječu od vanjskog graničnog sloja (slika 15.).

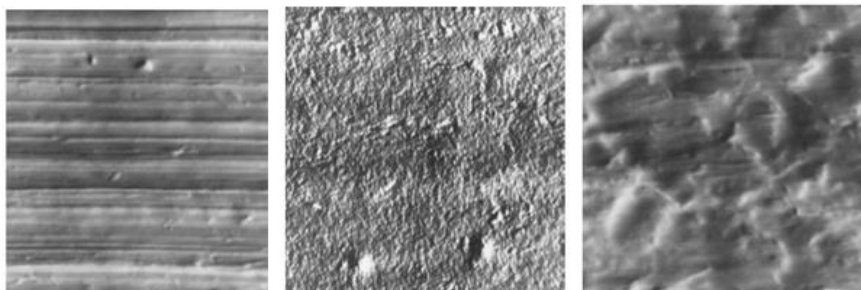
Kako bi se izbjegao slučaj “čiste” abrazije koji se može javljati kod neprevučениh materijala tokom vremena, različitim postupcima oplemenjivanja površina (boriranjem, vanadiranjem, CVD postupkom prevlačenja, PVD postupkom prevlačenja, PACVD postupkom prevlačenja itd.) nastoji se dobiti “nulti” tip abrazije u kojem neće doći do abrazije trošenog dijela. Na slici 16. prikazani su uobičajni izgledi abrazijski trošenih površina.



Slika 14. Shematski prikaz “čiste” abrazije [10]



Slika 15. Shematski prikaz “nulte” abrazije [10]

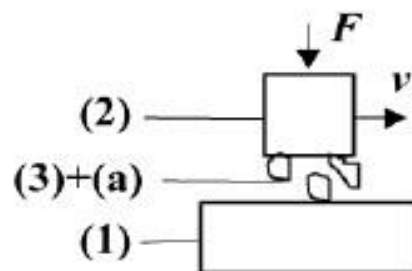


Slika 16. Uobičajni izgledi abrazijski trošenih površina [10]

Otpornost na 1. fazu mehanizma abrazije (prodiranje abraziva u površinu materijala) određena je s više utjecajnih čimbenika, a najznačajniji je međusobni omjer mikrotvrdoće abraziva i materijala trošene površine. Na otpornost na 2. fazu mehanizma abrazije (istiskivanje materijala u obliku čestice trošenja) najutjecajniji čimbenik je način napredovanja pukotine koji općenito može biti duktilni, krhki ili umor (površine). [10]

1.3.2 Abrazijsko trošenje

Abrazijsko trošenje je istiskivanje materijala izazvano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Karakteristika ove vrste trošenja je prisutnost tvrdih abrazivnih čestica uglavnom mineralnog podrijetla, pa se ponekad naziva i mineralno trošenje. Na slici 17. prikazana je shematski prikaz tribosustava abrazijskog trošenja.



Slika 17. Shematski prikaz tribosustava abrazijskog trošenja [10]; 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.

Primjeri abrazijskog trošenja su: radni dijelovi poljoprivredne, građevinske i rudarske mehanizacije, stapne muljne pumpe, alati za obradu odvajanjem čestica.

1.3.3 Eksperimentalno određivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

Kako bi se mogla provjeriti otpornost raznih materijala na abrazijski tip trošenja, razvijene su eksperimentalne metode s kojima je moguće to utvrditi. Najpoznatije od njih su [10] :

- ispitivanje “suhi pijesak/gumeni kotač” (ASTM G 65 – suhi uvjeti ispitivanja)
- Taber abrazija
- ispitivanje trošenja kuglicom
- ispitivanje otpornosti na abraziju pomoću slobodne kugle
- ispitivanje otpornosti na abraziju pomoću učvršćene kugle

1.3.3.1 Ispitivanje metodom “suhi pijesak/gumeni kotač”

Ispitivanje metodom “suhi pijesak/gumeni kotač” sastoji se od abradiranja epruvete standardnih dimenzija (oko 12x24x72 mm) kvarcnim pijeskom za ispitivanje (Ottawa AFS 50/70). Pijesak se dovodi između epruvete i rotirajućeg kotača obloženog gumom [1].

Epruveta je opterećena normalnom silom od:

- 130 N za postupak A,B i C
- 45 N za postupak D

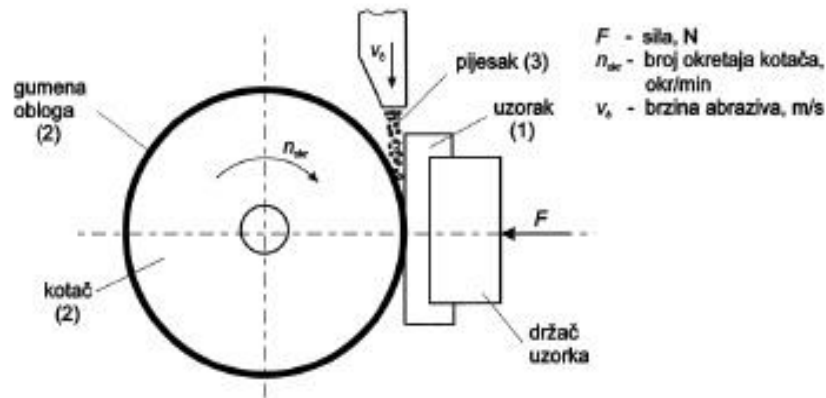
Trajanje ispitivanja je:

- 6000 okretaja za postupak A i D
- 2000 okretaja za postupak B
- 100 okretaja za postupak C

Epruveta se važe prije i poslije ispitivanja, a gubitak mase preračunava se u gubitak volumena [1].

Način prikazivanja vrijednosti kao vrijednosti gubitka volumena ΔV po ASTM G 65-94 u ovisnosti o trajanju ispitivanja. Metoda „suhi pijesak/gumeni kotač“ služi za rangiranje materijala u slučajevima kada abrazija prevladava kao mehanizam dotrajavanja. Gubitak volumena ispitivanog materijala, čija trajnost u određenom tribosustavu nije poznata može se usporediti s rezultatom ispitivanja za materijal čija je trajnost u istom tribosustavu poznata.

Na slici 18. prikazan je shematski prikaz uređaja “suhi pijesak/gumeni kotač”.



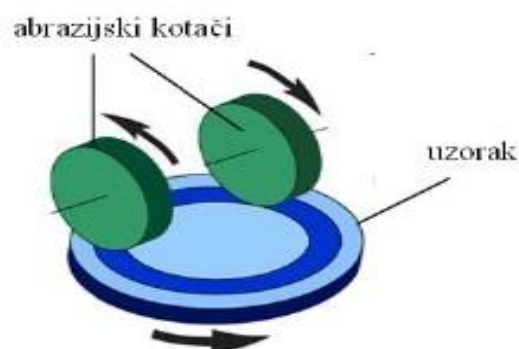
Slika 18. Shematski prikaz uređaja “suhi pijesak/gumeni kotač” [10]

1.3.3.2 Ispitivanje Taber abrazija

Taber abrazijom određuju se iznosi abrazijskog trošenja, kao i Taber indeksa trošenja površine materijala. Uzorak je u obliku diska ravne površine koji se abradira pomoću dva kotačića obloženih gumom. Taber ispitivanjem se istražuje otpornost na abraziju različitih vrsta površinskih prevlaka u suhom i vlažnom okruženju.

Stolčić s uzorkom rotira (60 o/min) uzrokujući rotaciju para abrazijskih kotača u suprotnom smjeru i abraziju uzorka u njihovoj dodirnoj liniji. Trag trošenja je prstenastog oblika, a čestice trošenja neprekidno se uklanjaju pomoću stacionarnog ispušnog uređaja. Trošenja se određuju mjereći masu čistog uzorka na početku i na završetku Taber testa [10].

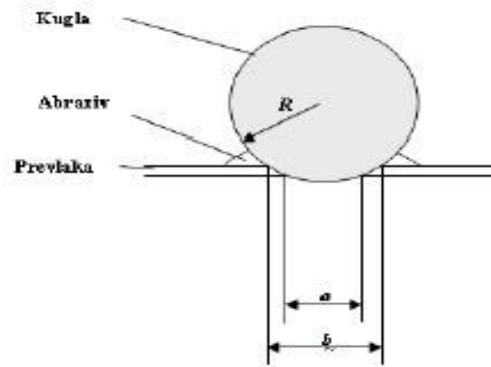
Na slici 19. prikazana je shematski prikaz Taber ispitivanja.



Slika 19. Shematski prikaz Taber ispitivanja [10]

1.3.3.3 Ispitivanje trošenja kuglicom

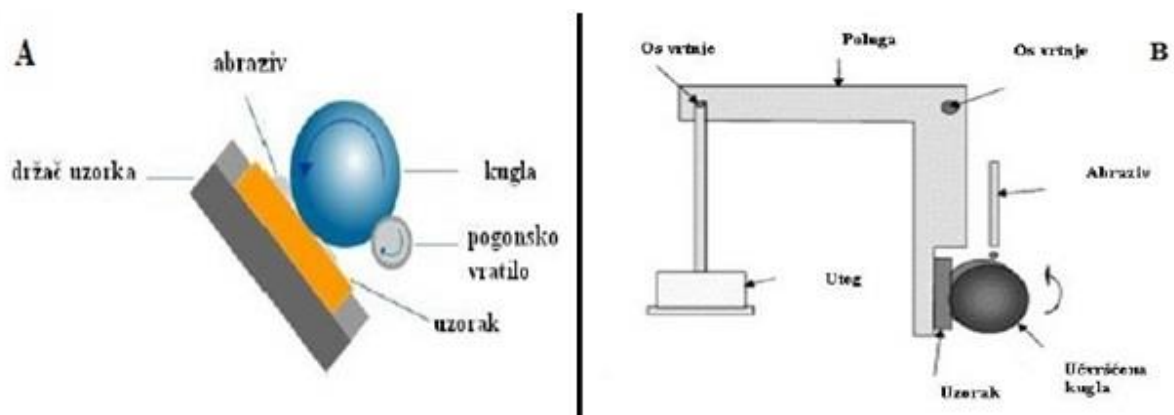
Kod metode ispitivanja trošenja kuglicom, kugla poznatih dimenzija, slobodna ili učvršćena, u dodiru je s prevlakom i okreće se određenom brzinom uz prisutnost abraziva. Zbog djelovanja sile dolazi do trošenja prevlake i stvaranja kratera na površini uzorka (slika 20.).



Slika 20. Ispitivanje trošenja kuglicom [10]; gdje je a – promjer traga trošenja u osnovnom materijalu, mm i b – vanjski promjer traga trošenja, mm

Prateći i mjereći promjenu dimenzija nastalog traga trošenja na prevlaci ovisno o vremenu ili prijeđenom putu kugle i poznavajući promjer kugle može se jednostavno izračunati potrošeni volumen prevlake u jedinici vremena ili po jedinici prijeđenog puta, a time i izraziti i otpornost prevlake prema abraziji.

Postoje još metode ispitivanja otpornosti prema abraziji pomoću slobodne kugle (slika 21.A) te ispitivanje otpornosti prema abraziji pomoću učvršćene kugle (slika 21.B).



Slika 21. Ispitivanje otpornosti prema abraziji pomoću slobodne (A) i učvršćene kugle (B) [10]

1.4 UTJECAJ DEBLJINE PREVLAKE NA TROŠENJE

U prethodnom poglavlju nabrojani su mehanizmi trošenja i detaljnije je opisan abrazijski mehanizam trošenja. Budući da se u radu ispituje utjecaj debljine prevlake na abrazijsko trošenje, u ovom poglavlju će se detaljnije pisati o toj temi.

Trošenje prevlake je složen proces koji ovisi o više čimbenika. Prilikom izbora prevlake za odgovarajuće uvjete eksploatacije, potrebno je uzeti u obzir čimbenike kao hrapavost i topografiju površine, omjer tvrdoće prevlaka/podloga, koeficijent toplinske dilatacije prevlake i podloge, zaostala naprezanja u nanesejoj prevlaci, strukturu same prevlake, tvrdoću prevlake, adheziju prevlake, kao i njezinu debljinu. Također je bitno predvidjeti i uvjete rada u kojima će se prevučeni dio nalaziti, svojstva podloge, kao i sama svojstva drugog tribopara – onoga koji troši samu prevlaku.

Otpornost na trošenje sustava osnovni materijal/prevlaka ovisit će uglavnom o svojstvima prevlake sve dok prevlaka u potpunosti prekriva površinu kontakta. Kada se prevlaka počne parcijalno trošiti ili kada je prevlaka izložena adhezijskom oštećenju ili pukotinama, tada i svojstva osnovnog materijala postaju značajna [11].

Moguće je postupcima prevlačenja dobiti različite debljine prevlaka. Debljine uobičajnih prevlaka kreću se u mikrometrima. Makar se ne čini da neka razlika u debljini prevlake na razini mikrometra može utjecati na drugačije trošenje iste prevlake, to nije slučaj.

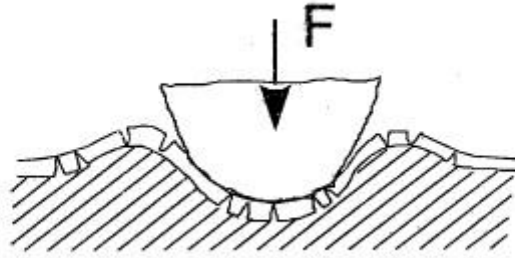
Povećanjem debljine prevlake, produžit će se vijek trajanja radnog komada sve dok je brzina trošenja postupna. Međutim, debljina sloja je ograničena zbog zaostalih naprezanja koja se javljaju tijekom postupka prevlačenja. Radi toga je prevlaka uvijek jako tanka u odnosu s dopuštenom dubinom trošenja, te mora biti izrazito otporna na trošenje uz zadovoljavajuću adheziju i otpornost prema pukotinama i raslojavanju.

Poznato je da pri teoretskom (Hertzovom) opterećenju mjesto pojave maksimalnog naprezanja nije na površini materijala, već na određenoj udaljenosti ispod nje. Kod kliznog dodira kakav se pojavljuje kod abrazije, naprezanja koja se javljaju, rezultat su kombiniranog utjecaja vanjskog opterećenja i trenja te se vrijednost maksimalnog naprezanja u odnosu na normalno opterećenje povećava i pomiče prema prednjem rubu dodira i prema površini.

Postoje određene razlike u raspodjeli naprezanja kod jednorodnih materijala i kod triboloških sustava osnovni materijal/prevlaka. Što je površina tvrđa i kruća, sposobnija je podnijeti veće naprezanje i akumulirati više plastične deformacije. Uz tvrdoću, debljina prevlake također igra veliku ulogu. Kod vrlo tankih prevlaka, vrijednost maksimalnog naprezanja pada ispod prevlake u podlogu. Prevlaka u tom slučaju sama ne podnosi opterećenje već trajnost tribosustava ovisi o karakteristikama osnovnog materijala tj. podloge.

S porastom debljine prevlake, maksimalno naprezanje raste i pomiče se prema površini materijala gdje se najgori slučaj javlja ako maksimalno naprezanje padne u spoj prevlake i podloge. S obzirom da na tom mjestu postoje zaostala naprezanja i da su skoro uvijek prisutne nečistoće i nepravilnosti, tada koncentracija naprezanja može dovesti do odvajanja prevlake što dovodi do zaključka kako trajnost tribosustava ne ovisi samo o svojstvima i materijalu prevlake, već i o tvrdoći podloge, jer što je podloga tvrđa, prevlake su trajnije [11].

Na slici 22. prikazano je pucanje prevlake uslijed deformacije podloge.



Slika 22. Pucanje prevlake uslijed deformacije podloge [11]

U pregledanim znanstvenim radovima koji su se usredotočili na problematiku svojstava i trošenja nanešenih prevlaka i koji su ispitivali različite prevlake na različite vrste trošenja, debljina prevlake i njezin utjecaj na trošenje nije bio glavni problem koji bi se doveo u vezu sa rezultatima ispitivanja u većini radova, iz razloga što trošenje prevlake, kako je prije navedeno, ovisi o više isprepletenih čimbenika. Debljina prevlake je u većini radova obično navedena kao podatak, ali bez značajnijeg utjecaja u konačnim zaključcima ili tek kao jedan od zaključaka.

Iako debljina prevlake nije značajnije ispitana u radovima, svejedno se je došlo do nekoliko zaključaka u vezi razlika između tanjih i debljih prevlaka.

Tanje prevlake bitno ovise o tvrdoći samog osnovnog materijala. Makar se danas mogu proizvoditi izrazito tvrde tanke prevlake od 3 do 4 mikrometara debljine, koncentrirano opterećenje, npr. pritisak zrnca pijeska o prevlaku, može deformirati osnovni materijal i probiti prevlaku. Iako je u ovom slučaju prevlaka znatno tvrđa od zrnca pijeska, došlo je do njezinog probijanja radi nedovoljno tvrdog osnovnog materijala koji nije podupirao prevlaku. Takvi slučajevi dovode do vrlo brzog abradiranja tankih prevlaka i bržeg trošenja [12].

Iz tog se došlo do empirijskog pravila kako prevlaka mora imati 10 % debljine u odnosu na promjer tipične abrazivne čestice kako bi bila otporna na abraziju. Inače, prevlaka će se ponašati kao ljuska jajeta, te će ju koncentrirano opterećenje lagano i brzo probiti [12].

S druge strane, deblja prevlaka, iako neće biti brzo probijena kao tanja, nosi problem zaostalih naprezanja koja se mogu javljati tijekom samog stvaranja prevlake na osnovni materijal. Zaostala naprezanja uz nedovoljno glatku površinu osnovnog materijala mogu dovesti do njezinog spontanog otpadanja čak i prije same eksploatacije. Rizik raslojavanja iniciran zaostalim naprezanjima u prevlaci raste s porastom debljine prevlake [13].

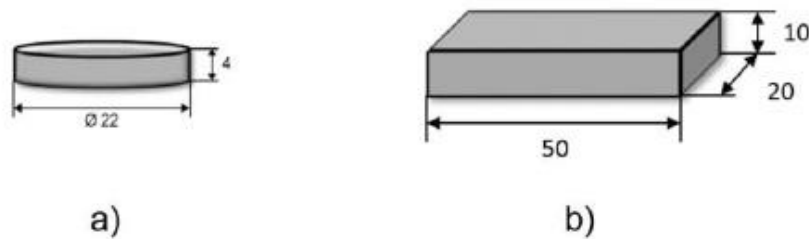
Uz sve navedena ponašanja tanjih i debljih prevlaka prilikom njihovog stvaranja i trošenja, ispitivanja njihove otpornosti na abraziju su potvrdila kako su deblje prevlake otpornije na abrazijsko trošenje nego tanje unatoč mogućoj slabijoj prionjivosti i mogućnosti raslojavanja radi zaostalih naprezanja u samoj prevlaci [13, 14].

2. EKSPERIMENTALNI DIO

2.1 PLAN ISPITIVANJA

U eksperimentalnom dijelu rada željelo se ispitati utjecaj debljine TiCN prevlake na abrazijsko trošenje visokolegiranih čelika za hladni rad pomoću metode “suhi pijesak/gumeni kotač“. Prije samog ispitivanja trebala su se još provesti ispitivanje debljine prevlake kalotestom i ispitivanje njezine adhezivnosti na osnovni materijal utiskivanjem koničnog dijamentnog indentora na tvrdomjeru Rockwell C.

Za cijelo ispitivanje korištene su 2 vrste oblika i dimenzija uzoraka. Za abrazijsko trošenje su korišteni uzorci u obliku kvadra dimenzija 10x20x50 mm, dok su za određivanje debljine prevlaka i za određivanje adhezivnosti prevlaka korišteni uzorci u obliku valjka visine 4 mm i promjera 22 mm (slika 23.).



Slika 23. Oblik i dimenzije uzoraka [15]; gdje su: a) uzorak za ispitivanje debljine i adhezivnosti, b) uzorak za abrazijsko ispitivanje

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

Korištene su 2 vrste čelika koje će poslužiti kao osnovni materijal, čelik Böhler K390PM i čelik Böhler K110. Prije prevlačenja PACVD postupkom, navedeni čelici su bili podvrgnuti odgovarajućoj toplinskoj obradi koja se sastojala od kaljenja i dvostrukog visokotemperaturnog popuštanja.

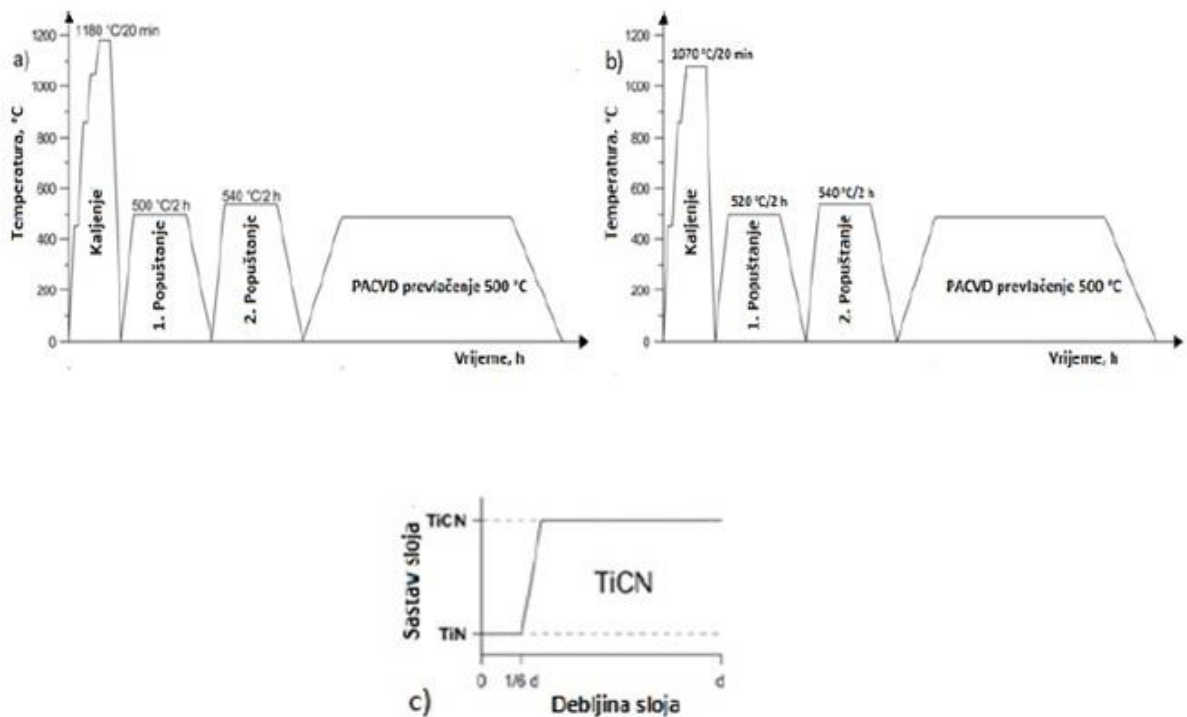
Nakon toplinske obrade osnovnih materijala, a prije postupka PACVD prevlačenja, površine ispitnih uzoraka su strojno brušene te je dobivena prosječna hrapavost površine uzoraka od čelika Böhler K110 $R_a = 0,2525 \mu\text{m}$, odnosno $R_a = 0,2915 \mu\text{m}$ za uzorke od čelika Böhler K390PM.

Nakon toga uzorci su stavljeni u ultrazvučnu kupku radi čišćenja. Postupak PACVD prevlačenja proveden je pomoću plazme aktiviranom pulsirajućom istosmjernom strujom u Rübiger 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 24. i odabrani su prema preporukama proizvođača i prethodnim istraživanjima.



Slika 24. Toplinska obrada ispitnih uzoraka izrađenih od čelika Böhler K110 i K390PM [15]:

- 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).

Obje skupine uzoraka prevučene su TiCN prevlakom koja je označena brojem 2.

Ispitni uzorci su strojno brušeni prije prevlačenja što je označeno brojem 0.

Debljina prevlake je označena brojem 1 ako se radi o tanjoj prevlaci, odnosno brojem 2 ako je riječ o debljoj prevlaci.

Zadnji broj u oznaci uzorka označava redni broj ponavljanja koji mogu biti 1 ako je riječ o prvom, odnosno broj 2 ako je riječ o drugom ponavljanju. Cijelo ispitivanje se provelo na 8 ispitnih uzoraka koji su navedeni u tablici 3.

Tablica 3. *Prikaz svih uzoraka u ispitivanju*

Oznaka uzorka	Osnovni materijal	Prevlaka	Ponavljanje
C2 011	čelik Böhler K390PM	tanja TiCN	prvo
C2 012			drugo
C2 021		deblja TiCN	prvo
C2 022			drugo
D2 011	čelik Böhler K110	tanja TiCN	prvo
D2 012			drugo
D2 021		deblja TiCN	prvo
D2 022			drugo

Cijelo ispitivanje sastavljeno je od 3 dijela:

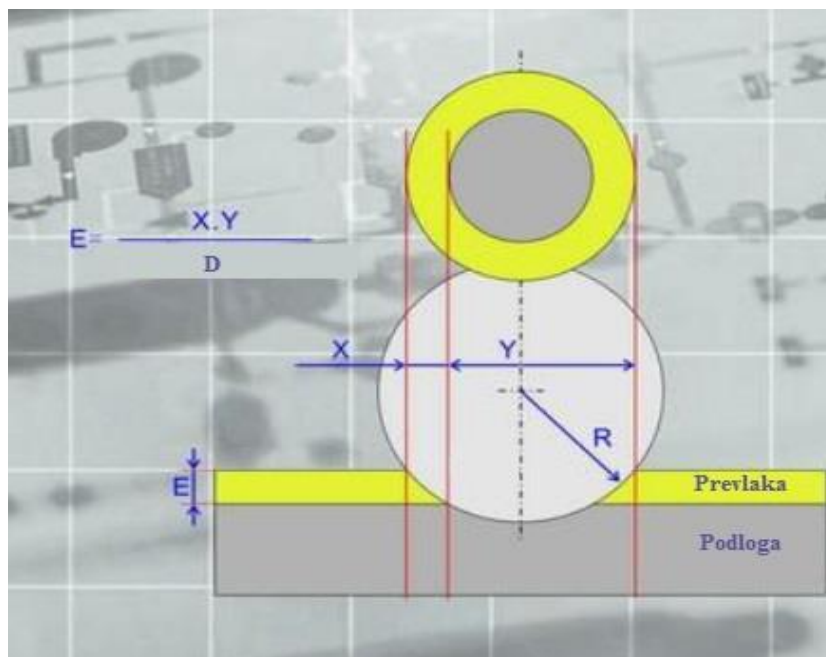
1. Određivanje debljine prevlaka uzoraka kalotestom.
2. Određivanje adhezivnosti prevlaka utiskivanjem indentora na tvrdomjeru Rockwell C.
3. Abrazijskog trošenja ispitnih uzoraka metodom "suhi pijesak/gumeni kotač".

2.2 PROVEDBA ISPITIVANJA

2.2.1 Ispitivanje debljine prevlake

Primjenom postupaka prevlačenja PACVD dobivaju se prevlake malih debljina. Uređaj koji olakšava postupak mjerenja tj. određivanja debljina nanešenih slojeva naziva se kalotester.

Princip rada kalotestera zasniva se na sferičnoj kugli zadanog promjera koja pritiskom i rotacijom pri željenom broju okretaja u kontaktu s površinom radnog komada troši prevlaku. Nakon određenog vremenskog trajanja rotacije, proces se prekida i na radnom komadu nastaje trošenje u obliku kalote. Dimenzije kalote se mjere i pomoću zadane formule se računa debljina prevlake (slika 25.).



Slika 25. Način izračuna debljine prevlake pomoću kalotesta [16]

Sferične kugle koje se primjenjuju kod kalotestera su različith dimenzija. Najmanja kugla je promjera $\phi 10$ mm, a najveća $\phi 30$ mm. Upotrebom kugle većih dimenzija povećava se preciznost mjerenja. Kako bi se poboljšala abrazivnost pri provođenju procesa mjerenja, na sferičnu kuglu nanosi se dijamantna emulzija.

Nakon namještanja radnog komada i sferične kugle počinje proces trošenja. Vrtanja glavne osovine koja je zadužena za okretanje sferične kugle je regulirana unaprijed određenim brojem okretaja. Nakon nastanka kalote na uzorku, optičkim mikroskopom koji se nalazi na samom kalotesteru, mjere se dimenzije kalote. Dimenzije kalote se izražavaju X i Y mjerama pomoću skale na optičkom mikroskopu. Zadnji korak je izračunavanje debljine prevlake pomoću odgovarajuće formule i uvrštavanjem izmjerenih X i Y mjera [16].

Izraz za izračunavanje debljine prevlake glasi (1.):

$$E = \frac{X Y}{D} [\mu\text{m}] \quad (1.)$$

Na svakom ispitnom uzorku provedena su 3 mjerenja na nasumično odabranim mjestima na uzorku kako bi se dobio što točniji podatak za debljinu prevlake. Za svako se mjerenje izračunavala debljina prevlake, te potom srednja vrijednost, po izrazu 2.:

$$\bar{E} = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{3} \quad (2.)$$

Za ispitivanje na kalotesteru korištena je sferična kugla promjera $\phi 20$ mm. Svako pojedino mjerenje trajalo je 20 sekundi. Iz dobivenih srednjih vrijednosti debljine prevlake prvog i drugog ispitnog uzorka istog stanja, izračunata je također srednja vrijednost debljine prevlake koja se uzima za debljinu prevlake tog istog stanja.

Dobiveni rezultati ispitivanja prikazani su u poglavlju 2.3.1 u tablici 4. i na slikama od 28. do 31., kao i u prilogima 1. i 2.

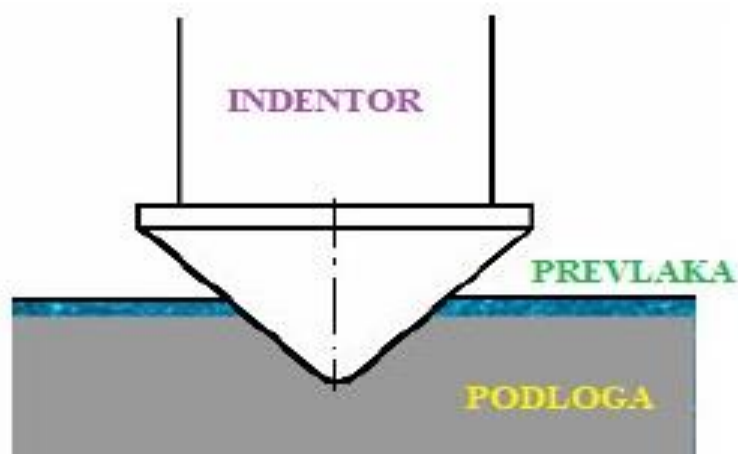
2.2.2 Ispitivanje adhezivnosti prevlake

Adhezivnost ili prionjivost prevlake definira se kao stanje u kojem se dvije površine (različitih materijala) drže zajedno uslijed kemijskih ili mehaničkih veza [2].

Osnovni oblici adhezijske veze između prevlake i podloge 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 prevlaka/podloga.
- Praktična adhezijska veza – sila koja je potrebna za odstranjivanje prevlake s podloge, bez obzira na početak loma – mjeri se eksperimentalnim postupcima.

Adhezivnost TiCN prevlaka ispitana je pomoću ispitivanja prema normi VDI 3198 koja se sastoji od utiskivanja koničnog dijamantnog indentora na tvrdomjeru Rockwell C u prevlaku ispitnog uzorka. Način ispitivanja prikazan je na slici 26.



Slika 26. Utiskivanje indentora na tvrdomjeru Rockwell C u prevlaku [17]

Utiskivanjem indentora u prevlaku ispitnog uzorka stvara se otisak koji se kasnije promatra pod određenim povećanjem na svjetlosnom mikroskopu. Oko otiska se obično javljaju delaminirana područja i mikronapukline te se na temelju delaminiranosti i količine mikronapuklina po procjeni određuje adhezivnost ispitivane prevlake, te konačno i njezina prihvatljivost.

Metoda je subjektivna što predstavlja najveći nedostatak pošto se procjene o prihvatljivosti prevlaka mogu razlikovati među ispitivačima. Metoda kao takva ne daje empirijske podatke koji bi se kasnije mogli obraditi, već se rezultati ispitivanja svode na prihvatljivost adhezivnosti prevlake.

Na svakom uzorku utiskivao se tri put dijamantni indentor na tvrdomjeru Rockwell C na trima slučajno odabranim mjestima kako bi se mogla ujednačiti procjena adhezivnosti TiCN prevlake na osnovnim materijalima. Otisci su promatrani na svjetlosnom mikroskopu te se na temelju njih donosio zaključak o adhezivnosti prevlake.

Analiza ispitivanja prikazana je u poglavlju 2.3.2, a snimke samog ispitivanja prikazane su na slikama od 32. do 35.

2.2.3 Ispitivanje trošenja na uređaju “suhi pijesak/gumeni kotač”

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.

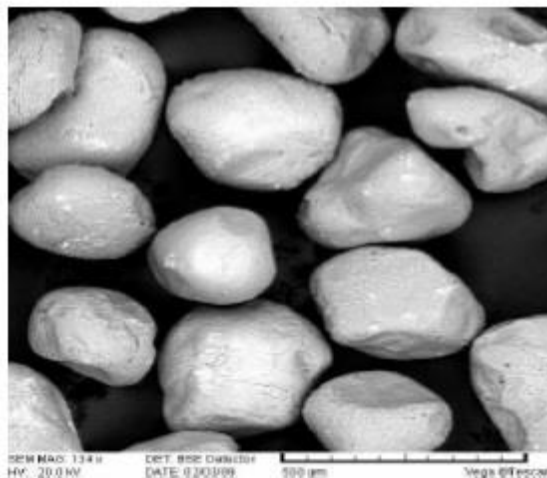
Postupak ispitivanja metodom “suhi pijesak/gumeni kotač” sastoji se od sljedećih koraka:

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 ili ako to nije dovoljno onda do trenutka kad je vidljivo njezino probijanje. Za sve ispitne uzorke, 500 okretaja je bilo dovoljno kako bi se TiCN prevlaka probila, te nije bilo potrebe za daljnjim trošenjem. Valja naglasiti kako se prvi trošeni ispitni uzorak, C2 021, trošio do 1000 okretaja iz razloga što je bilo pretpostavljeno da će se tek pri oko 1000 okretaja TiCN prevlaka probiti, ali se na kraju promatranjem ustanovilo kako je već nakon 500 okretaja prevlaka bila probijena, te su za uzorak C2 021 obrađeni podaci samo do 500 okretaja kotača.

Za ispitivanje je korišten zaobljeni kvarcni pijesak, prikazan na slici 27. 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 27. Zaobljeni kvarcni pijesak [10]

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.

Rezultati ispitivanja prikazani su u poglavlju 2.3.3 na slikama od 36. do 40., kao i u prilogima od 3. do 6.

2.3 REZULTATI I ANALIZA REZULTATA

2.3.1 Rezultati ispitivanja debljine prevlake

Provedba ispitivanja na kalotesteru opisanog u poglavlju 2.2.1 pomoću kojeg se mjerila debljina prevlake, rezultirala je sljedećim rezultatima prikazanim u tablici 4. Detaljniji rezultati i obrada ispitivanja debljine prevlake pojedinih uzoraka dan je u prilogu 1. i 2.

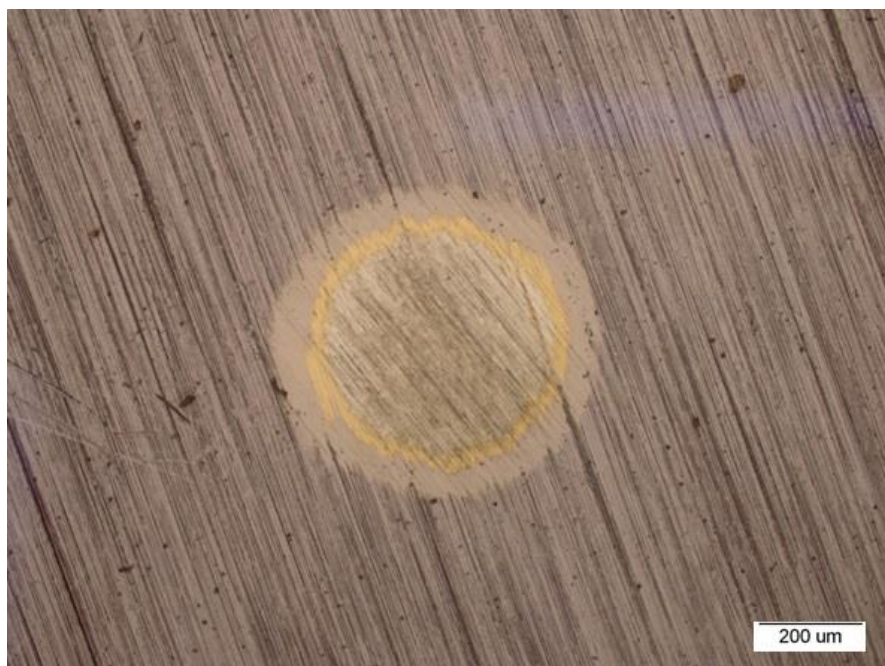
Tablica 4. *Rezultati prosječnih debljina prevlaka*

Oznaka uzorka	Debljina prevlake [μm]
C2 01	1,9
C2 02	2,99
D2 01	2,025
D2 02	2,955

Na slikama od 28. do 31. prikazan je izgled dobivenih kalota na ispitnim uzorcima.



Slika 28. *Otisak kalote na uzorku C2 01*



Slika 29. *Otisak kalote na uzorku D2 01*



Slika 30. *Otisak kalote na uzorku C2 02*



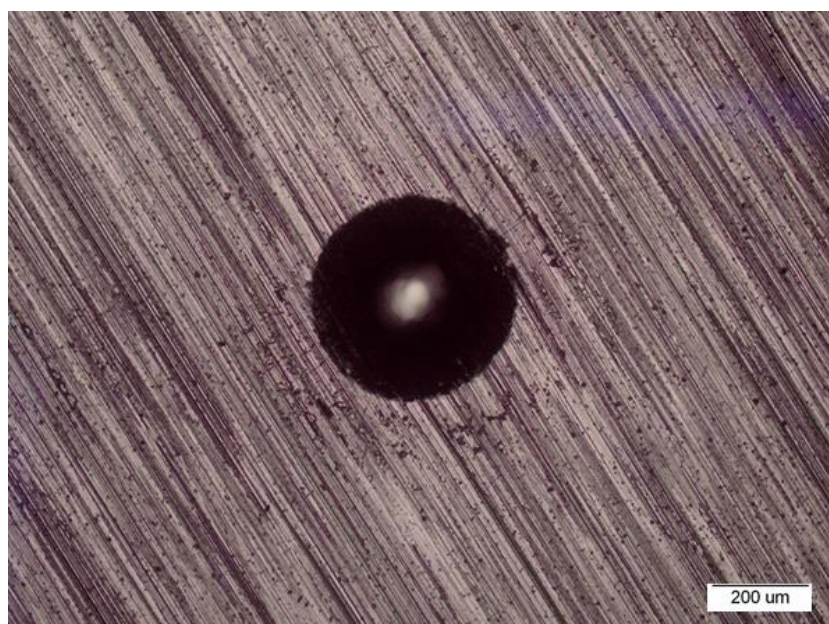
Slika 31. *Otisak kalote na uzorku D2 02*

2.3.2 Rezultati ispitivanja adhezivnosti prevlake

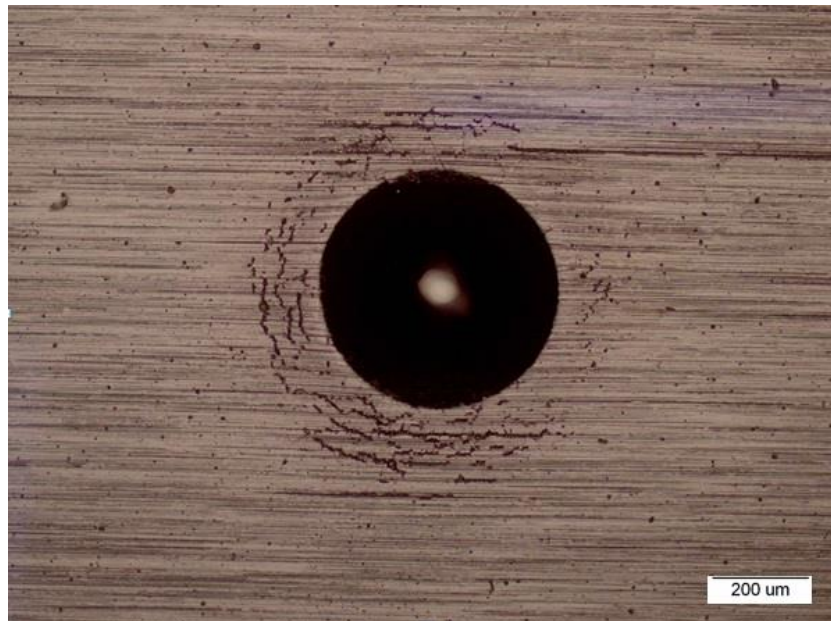
Na slikama od 32. do 35. prikazani su otisci dobiveni utiskivanjem koničnog dijamantnog indentora na tvrdomjeru Rockwellu C u prevlaku kao što je opisano u poglavlju 2.2.2. Za svako stanje ispitnog uzorka odabrana je jedna slika pošto nije bilo značajnijih razlika u slikama za iste uzorke.



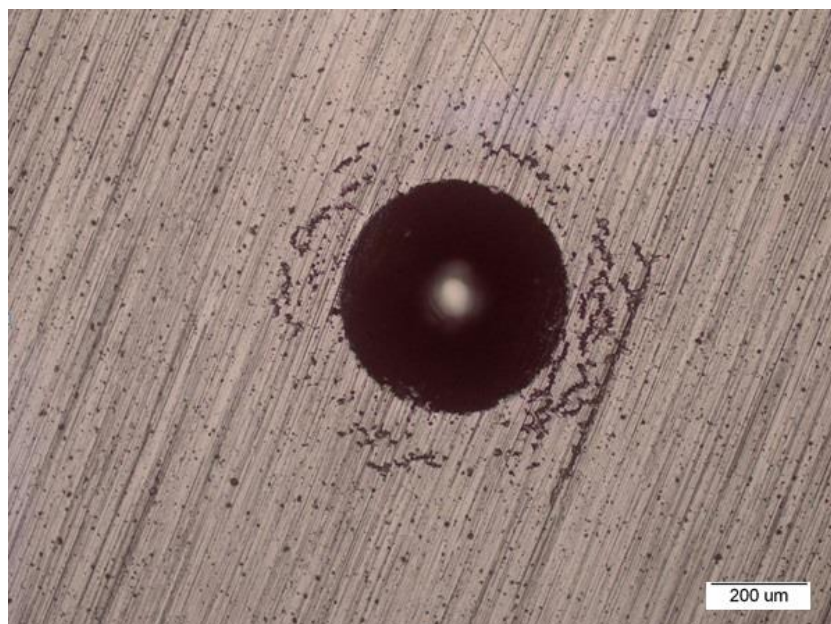
Slika 32. *Otisak Rockwellovog C indentora na uzorku C2 01*



Slika 33. *Otisak Rockwellovog C indentora na uzorku C2 02*



Slika 34. *Otisak Rockwellovog C indentora na uzorku D2 01*



Slika 35. *Otisak Rocwellovog C indentora na uzorku D2 02*

Kao što je vidljivo na slikama od 32. do 35. nije došlo do značajne količine mikronapuklina ili delaminacije prevlake prilikom utiskivanja koničnog dijamantnog indentora na tvrdomjeru Rockwell C u prevlaku te se može zaključiti kako je adhezivnost prevlaka prihvatljiva i kako nema značajnijih razlika u adhezivnosti između debljih i tanjih prevlaka za iste podloge.

Jedina uočljiva razlika u slikama je što se je adhezivnost pokazala boljom na onim ispitnim uzorcima čija je podloga načinjena od čelika Böhler K390PM tj. na ispitnim uzorcima označenim slovom C što se može vidjeti po jako malim, teško primjetnim mikropukotinama, dok se kod ispitnih uzoraka čija je podloga načinjena od čelika Böhler K110 tj. kod ispitnih uzoraka označenih slovom D mogu vidjeti značajnije pukotine.

Iako je TiCN prevlaka na uzorcima označenim slovom D imala više mikropukotina utiskivanjem dijamantnog indentora, adhezivnost TiCN prevlaka prihvatljiva je na objema podlogama.

2.3.3 Rezultati ispitivanja trošenja metodom “suhi pijesak/gumeni kotač”

Provedba ispitivanja opisana u poglavlju 2.2.3 rezultirala je informacijama o gubicima mase pojedinih uzorka omogućujući usporedbu otpornosti na abraziju TiCN prevlake na različitim osnovnim materijalima, kao i usporedbu deblje i tanje TiCN prevlake na istom osnovnom materijalu.

Praćen je gubitak mase kroz svih 8 ispitivanja za svaki pojedini uzorak, te su izračunate srednje i ukupne vrijednosti gubitka mase.

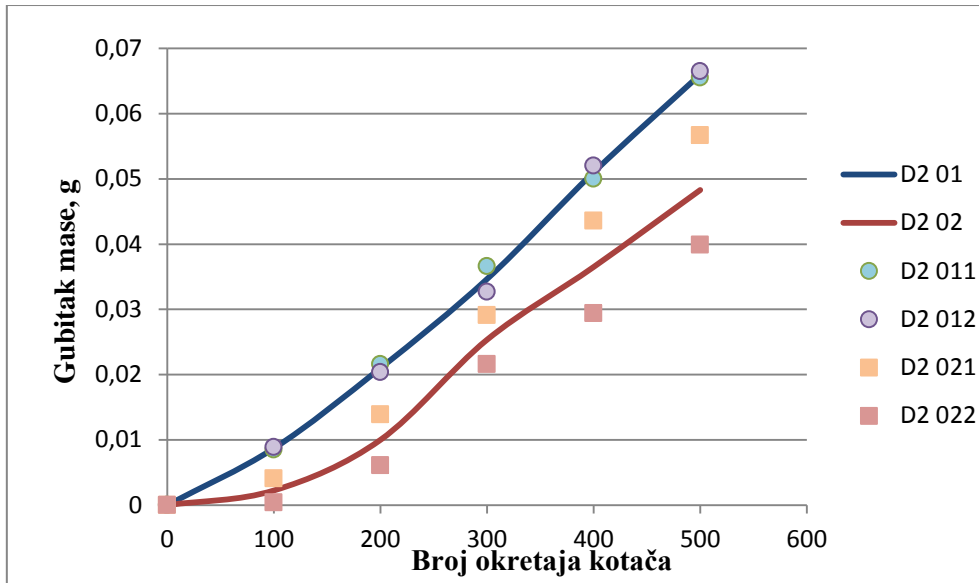
Nakon svakih 100 okretaja je za svaki ispitni uzorak izračunata razlika u masi između prethodnog i idućeg stanja i nakon toga se izračunala srednja vrijednost gubitka za ista stanja ispitnih uzoraka.

Ukupni gubitak mase se kumulativno zbraja 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.

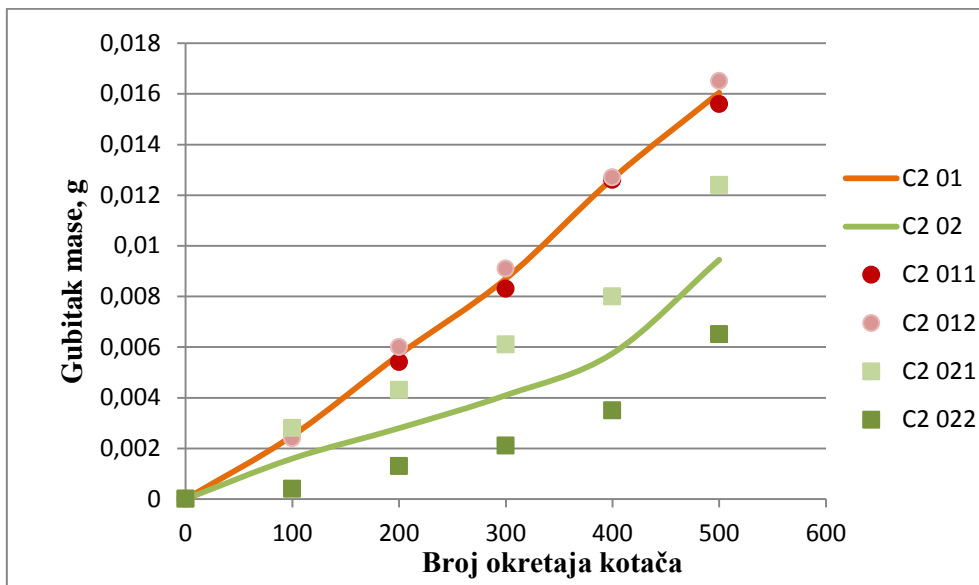
Podaci o masama ispitnih uzoraka praćen nakon svakih 100 okretaja kotača, kao i izračunate srednje vrijednosti gubitaka mase i ukupni gubici mase za ispitne uzorke koji imaju isti osnovni materijal, dani su u prilogima 3. do 6.

Na slikama 36. i 37. prikazani su gubici mase ispitnih uzoraka u odnosu na broj okretaja kotača. Slika 36. sadrži podatke za ispitne uzorke s osnovnim materijalom izrađenim od čelika Böhler K110, dok slika 37. sadrži podatke za ispitne uzorke s osnovnim materijalom izrađenim od čelika Böhler K390PM. Svaki pojedini ispitni uzorak je prikazan točkama nakon svakih 100 okretaja kotača, dok pune linije predstavljaju srednje vrijednosti za isto stanje ispitivanih uzoraka.

Vidljivo je na slikama 36. i 37. kako su ispitni uzorci sa debljim prevlakama, C2 02 za ispitne uzorke sa osnovnim materijalom izrađenim od čelika Böhler K390PM i D2 02 za ispitne uzorka sa osnovnim materijalom izrađenim od čelika Böhler K110, pokazali veću otpornost na abrazijsko trošenje, za isti osnovni materijal, što se vidi iz položenijeg ponašanja njihovih krivulja u odnosu na tanje prevlake C2 01 i D2 01.

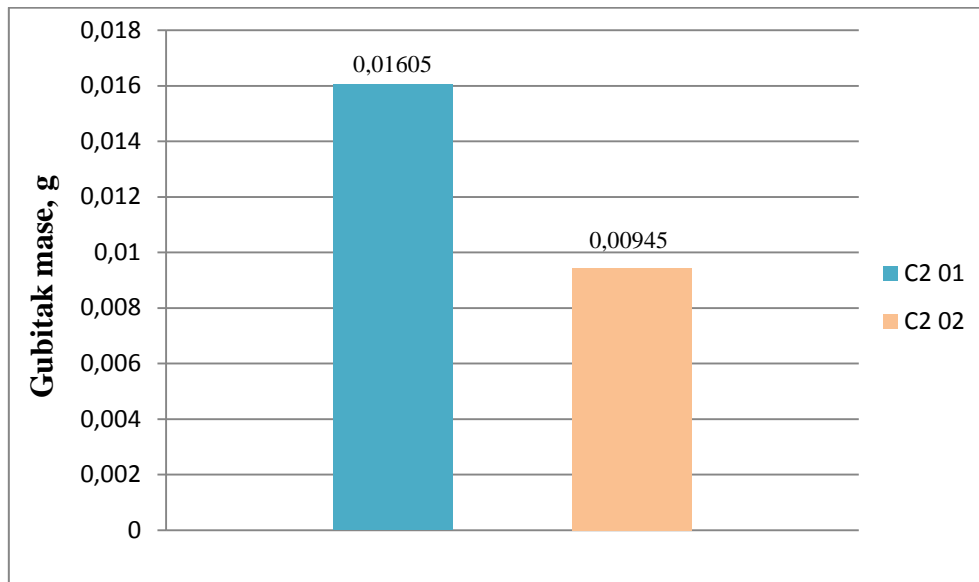


Slika 36. Utjecaj debljine TiCN prevlake na čeliku Böhler K110 na otpornost abrazijskom trošenju

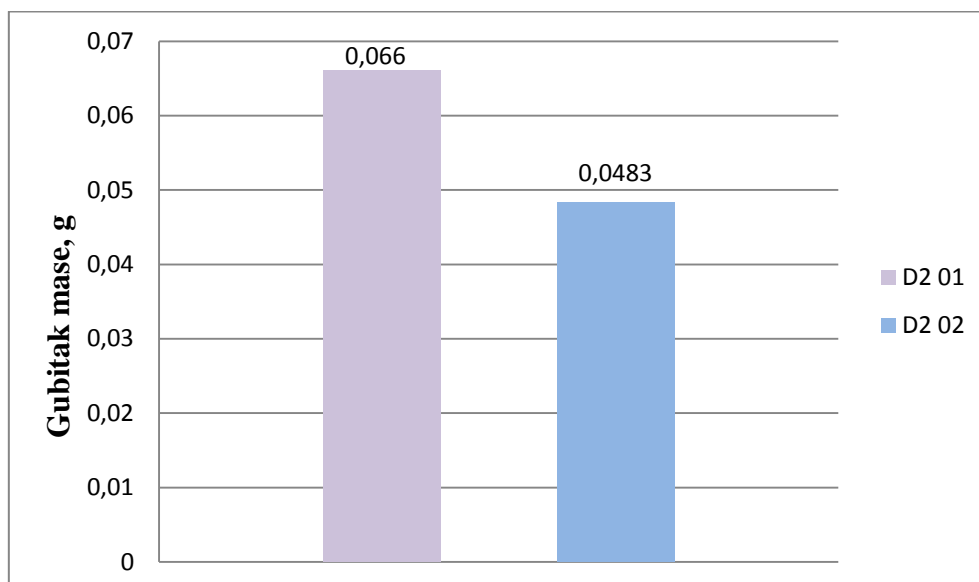


Slika 37. Utjecaj debljine TiCN prevlake na čeliku Böhler K390PM na otpornost abrazijskom trošenju

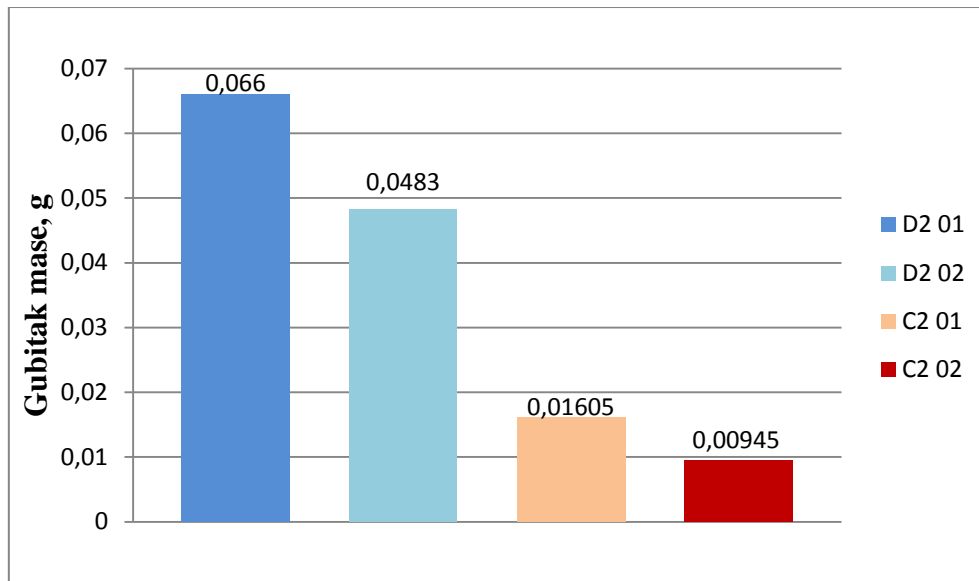
Slike 38. i 39. prikazuju ukupni gubitak mase nakon 500 okretaja kotača te samu usporedbu u gubicima mase između ispitnih uzoraka na istom osnovnom materijalu. Slika 40. zajednički prikazuje ukupni gubitak mase nakon 500 okretaja za sve ispitne uzorke.



Slika 38. Ukupni gubitak mase nakon 500 okretaja trošenja abrazijom različite debljine TiCN prevlake na čeliku Böhler K390PM



Slika 39. Ukupni gubitak mase nakon 500 okretaja trošenja abrazijom različite debljine TiCN prevlake na čeliku Böhler K110



Slika 40. Usporedba ukupnih gubitaka mase nakon 500 okretaja trošenja abrazijom različitih debljina TiCN prevlaka na različitim čelicima

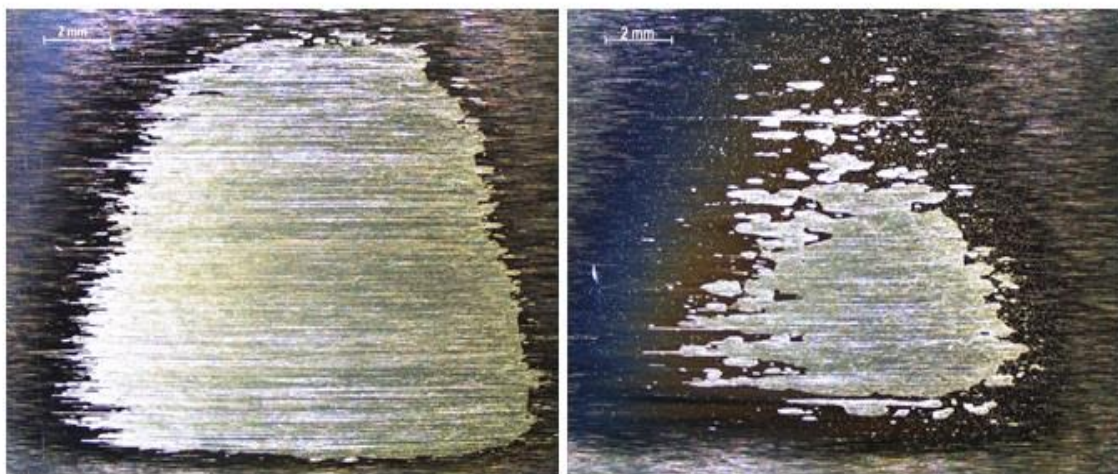
Kao što je vidljivo na slikama 38. i 39., ispitni uzorci sa debljim prevlakama za isti osnovni materijal su nakon 500 okretaja kotača izgubili manje mase od ispitnih uzoraka sa tanjim prevlakama.

Na slici 40. na kojoj se prikazuje usporedba za sve ispitane uzorke vidljiv je i utjecaj osnovnog materijala na proces trošenja jer su ispitni uzorci sa tanjom prevlakom na podlozi od čelika Böhler K390PM izgubili manje na masi od ispitnih uzoraka sa debljom prevlakom na podlozi od čelika Böhler K110 nakon 500 okretaja kotača.

2.3.4 Analiza trošenih površina

Ispitivanjem otpornosti na abrazijsko trošenje dobivene su trošene površine ispitnih uzoraka koje su slikane prvo na stereomikroskopu, a potom dodatno na skenirajućem elektronskom mikroskopu (SEM-u) kako bi se analiziralo ponašanje prevlake prilikom njezinog probijanja.

Na slici 41. prikazan je izgled istrošenih površina slikanih na stereomikroskopu na ispitnim uzorcima čiji je osnovni materijal izrađen od čelika Böhler K390PM.



a)

b)

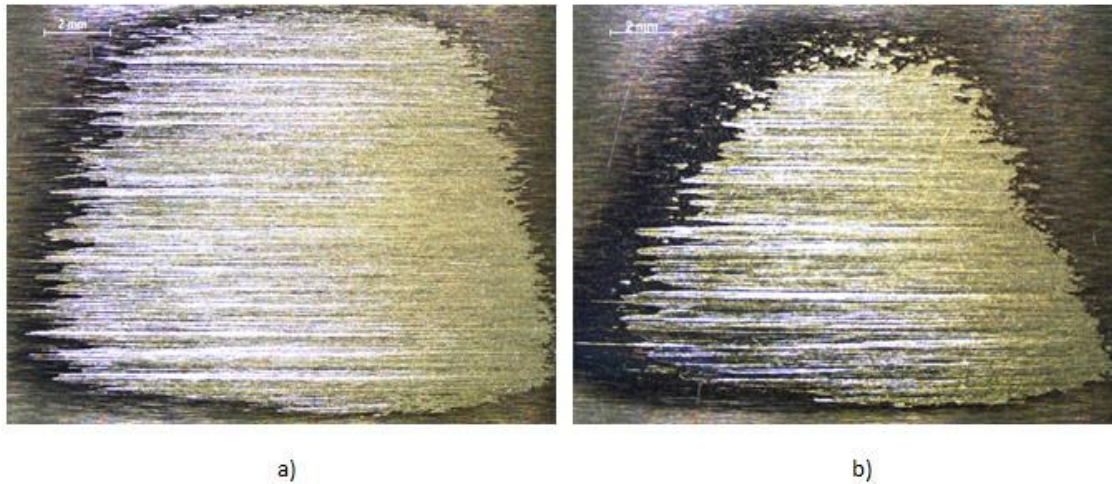
Slika 41. Stereomikroskopske slike istrošenih površina uzoraka od čelika Böhler K390PM nakon 500 okretaja:

a) uzorak sa tanjom TiCN prevlakom – C2 01

b) uzorak sa debljom TiCN prevlakom – C2 02

Kao što je vidljivo na slici 41., znatno je manji trag trošenja kod uzorka C2 02, odnosno ispitnog uzorka sa debljom prevlakom, u odnosu na uzorak C2 01 sa tanjom prevlakom. Kod C2 01 uzorka se vidi jednoliki trag trošenja s obzirom na ranije probijanje prevlake u odnosu na C2 02 uzorak. Kod C2 02 uzorka su i vidljiva neravnomjerno raspoređena mjesta trošenja, kao i plastična deformacija oko mjesta probijanja prevlake.

Na slici 42. prikazan je izgled istrošenih površina slikan na stereomikroskopu na ispitnim uzorcima čiji je osnovni materijal izrađen od čelika Böhler K110.



Slika 42. Stereomikroskopske slike trošenih površina uzoraka od čelika Böhler K110 nakon 500 okretaja:

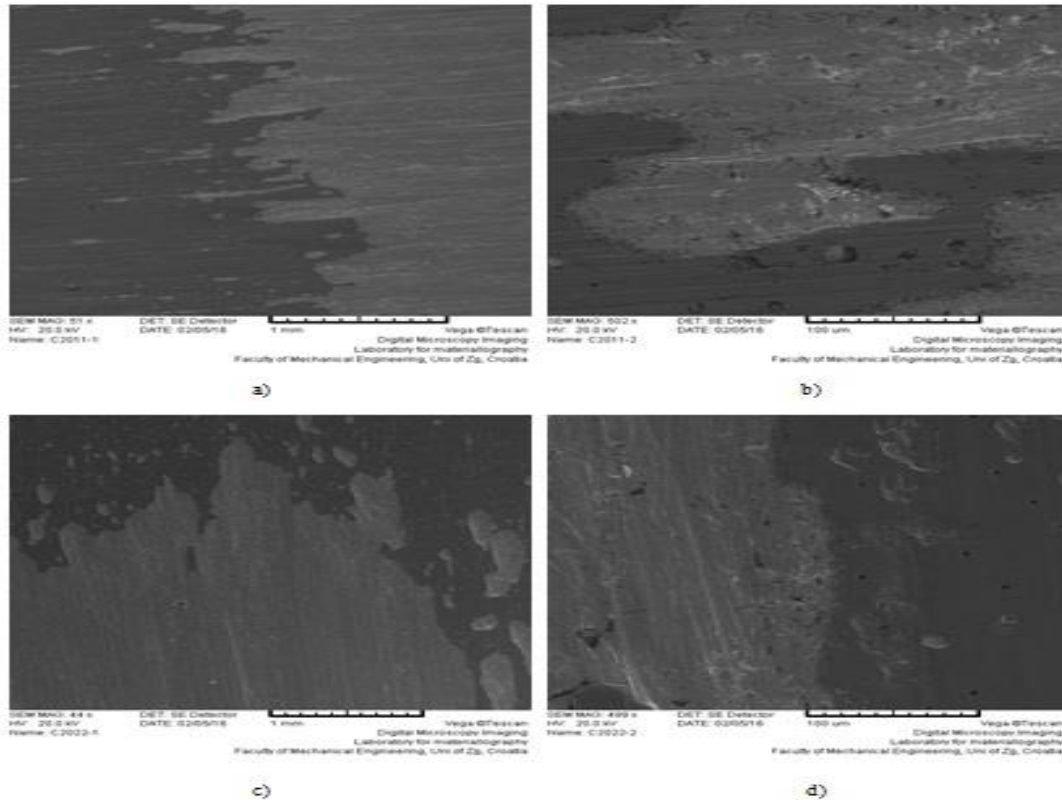
a) uzorak sa tanjom TiCN prevlakom – D2 01

b) uzorak sa debljom TiCN prevlakom – D2 02

Kao i kod slike 41. gdje je kao osnovni materijal poslužio čelik Böhler K390 PM, i na slici 42. je vidljivo kako je manji trag trošenja kod ispitnog uzorka sa debljom TiCN prevlakom na osnovnom materijalu od čelika Böhler K110, D2 02, u odnosu na trag trošenja ispitnog uzorka sa tanjom prevlakom, D2 01. Ako se uspoređi sa tragovima trošenja na ispitnim uzorcima C, vidi se kako su tragovi trošenja jednoličniji i ravnomjerno raspoređeni.

Nakon slikanja na stereomikroskopu, tragovi trošenja su slikani i na skenirajućem elektronskom mikroskopu pri povećanjima od 50 i 500 puta, kako bi se još bolje mogao analizirati prijelaz s prevlake na osnovni materijal prilikom njezina probijanja.

Na slici 43. prikazane su slike tragova trošenja na skenirajućem elektronskom mikroskopu za ispitne uzorke s osnovnim materijalom izrađenim od čelika Böhler K390PM, odnosno za uzorke grupe C.

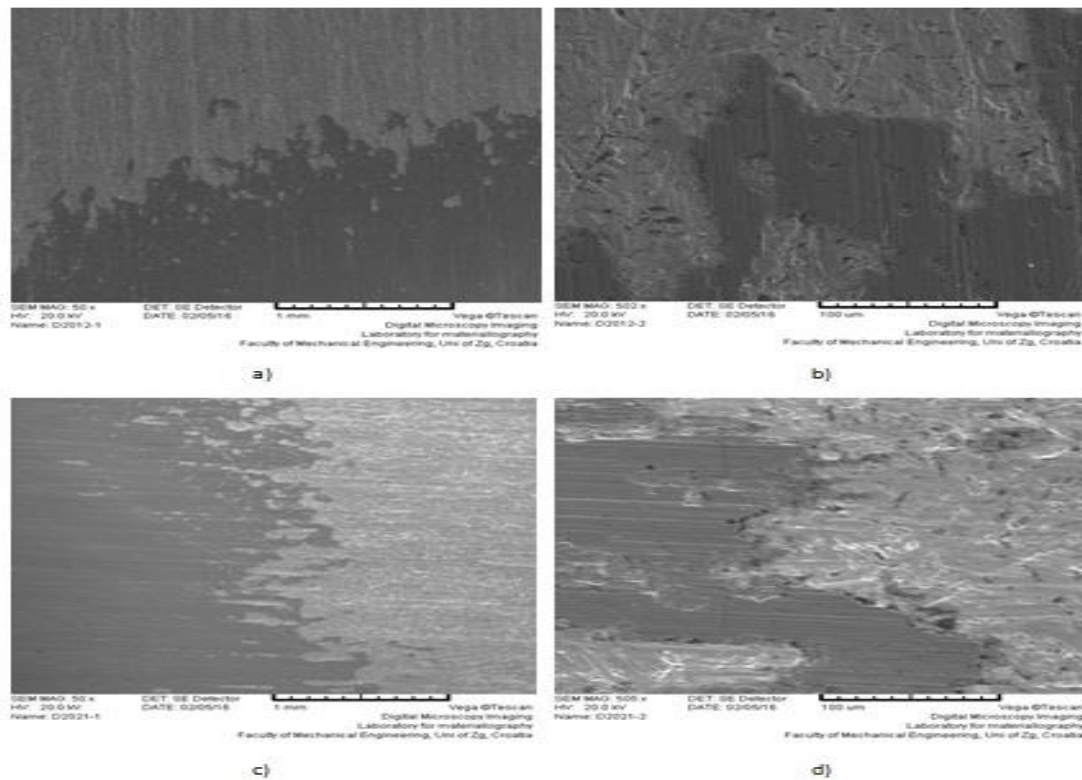


Slika 43. SEM slike istrošenih površina uzoraka od čelika Böhler K390PM nakon 500 okretaja:

- a) C2 01 uzorak, povećanje od 50 puta
- b) C2 01 uzorak, povećanje od 500 puta
- c) C2 02 uzorak, povećanje od 50 puta
- d) C2 02 uzorak, povećanje od 500 puta

Na slici 43. jasno se vidi kako prijelaz trošenja sa prevlake na osnovni materijal kod ispitnih uzoraka od čelika Böhler K390PM nije nagli što bi bilo karakteristično za krhki lom i pucanje prevlake, već je prisutna plastična deformacija što ne dovodi do naglog pucanja prevlake i time do njezinog postupnijeg probijanja.

Na slici 44. prikazane su slike tragova trošenja na skenirajućem elektronskom mikroskopu za ispitne uzorke s osnovnim materijalom od čelika Böhler K110, odnosno za uzorke grupe D.



Slika 44. SEM slike trošenih površina uzoraka od čelika Böhler K110 nakon 500 okretaja:

- a) D2 01 uzorak, povećanje od 50 puta
- b) D2 01 uzorak, povećanje od 500 puta
- c) D2 02 uzorak, povećanje od 50 puta
- d) D2 02 uzorak, povećanje od 500 puta

Kao i kod uzoraka grupacije C prikazanih na slici 43., tako je i kod ispitnih uzoraka grupe D od čelika Böhler K110, primjetna plastična deformacija prilikom probijanja TiCN prevlake. Može se zaključiti kako je proces probijanja i odvajanja prevlake od osnovnog materijala kod uzoraka grupe D istog principa kao i kod uzoraka grupe C.

Zaključno, uspoređujući slike 43. i 44. jasno je kako se TiCN prevlaka slično ponaša na oba osnovna materijala, sa prisutnom plastičnom deformacijom tijekom probijanja i odvajanja, što potvrđuje već prethodni zaključak kako su oba osnovna materijala, čelik Böhler K110 i čelik Böhler K390PM, prihvatljivi kao osnovni materijal nanešene prevlake. Činjenica kako TiCN prevlaka ne puca naglo i ne delaminira se izraženo, sugerira kako prevlaka uz visoku tvrdoću nije izrazito krhka.

3. 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 kako bi se utvrdila povezanost debljine nanosene prevlake i otpornosti na abrazijsko trošenje. Podloge za nanešene prevlake su bili čelici Böhler K110 (X155CrVMo12-1) i Böhler K390PM dobiven metalurgijom praha.

Iz rezultata ispitivanja zaključuje se sljedeće:

- Osnovni materijal izrađen od čelika Böhler K390PM pokazao se prikladnijim u odnosu na čelik Böhler K110 zbog manjeg gubitka mase prilikom ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje.
- Za isti osnovni materijal, deblje TiCN prevlake pokazale su se boljim rješenjem u odnosu na tanje prevlake radi manjeg ukupnog gubitka mase tijekom ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje.
- TiCN prevlaka je na oba osnovna materijala pokazala dobru duktilnost i mali stupanj delaminacije prilikom abrazijskog trošenja što uz izrazito visoku tvrdoću proširuje njezinu primjenu.
- Obje ispitane debljine slojeva TiCN pokazale su, bez obzira na podlogu, dobru adhezivnost i ponašanje u uvjetima abrazijskog trošenja.

Daljnja istraživanja bi trebalo usmjeriti prema određivanju optimalne debljine prevlake i završne obrade osnovnog materijala prije postupka prevlačenja kako bi se mogao produljiti radni vijek prevučениh materijala prilikom abrazijskog trošenja.

4. LITERATURA

- [1] Filetin T., Grilec K., Postupci modificiranja i prevlačenja površina, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2004.
- [2] Cajner F., Matijević B., Jakovljević S., Grilec K., Predavanja i vježbe iz kolegija “Tribologija i inženjerstvo površina”, autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2014.
- [3] Cajner F., Matijević B., Predavanja iz kolegija “Toplinska obrada”, autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2014.
- [4] Eskildsen S.S., Mathiasen C., Foss M., Plasma CVD: process capabilities and economic aspects, Danish Technological Institute, Aarhus, 1999.
- [5] Cajner F., Kumić I., Kovačić S., Cingesar M., Publikacija ARISE projekta, FSB, Zagreb, 2014.
- [6] Matijević B., Predavanja iz kolegija “Napredne tehnologije materijala”, autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2014.
- [7] Böhler K390MC, Böhler Edestahl GMBh & Co KG, Kapfenberg
- [8] Böhler K110, Böhler Edestahl GMBH & Co KG, Kapfenberg
- [9] Novosel M., Cajner F., Krumes D., Alatni materijali, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Slavonski Brod, 1996.
- [10] Jakovljević S., Grilec K., Tribologija, FSB, Zagreb, 2015.
- [11] Sabolić T., Otpornost na abrazijsko trošenje toplinski naštrcanih Al_2O_3 prevlaka, završni rad, FSB, Zagreb, 2007.
- [12] Zhuk Y., HardideTM advanced CVD coatings protect against wear, erosion and corrosion, Surface World, 2010.
- [13] Wänstrand O., Wear resistant low friction coatings for machine elements, Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala, 2000.
- [14] Chiu P.-H., Hu C.-J., Wear and corrosion resistance of pure titanium subjected to aluminization and coated with microarc oxidation ceramic coating, Taipei, 2015.
- [15] 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.

- [16] Beljak A., Produljenje trajnosti kalupa za injekcijsko prešanje polimernih materijala postupcima prevlačenja, završni rad, FSB, Zagreb, 2015.
- [17] PLATIT, Coating Adhesion by Rockwell hardness tester, Switzerland

5. PRILOZI

Prilog 1. Rezultati ispitivanja debljine prevlake za uzorke od čelika Böhler K390PM

Uzorak	X (piksel)	Y (piksel)	X (μm)	Y (μm)	E (μm)	Srednja vrijednost (μm)	Srednja vrijednost (μm)
C2 011	136	882	92,83276	602,0478	2,24	2,1	1,9
	118	862	80,54608	588,3959	1,90		
	172	676	117,4061	461,4334	2,17		
C2 012	126	644	86,00683	439,5904	1,51	1,7	
	144	692	98,29352	472,3549	1,86		
	148	626	101,0239	427,3038	1,73		
C2 021	166	850	113,3106	580,2048	2,63	2,77	2,99
	194	792	132,4232	540,6143	2,86		
	184	824	125,5973	562,4573	2,83		
C2 022	186	1020	126,9625	696,2457	3,54	3,21	
	198	818	135,1536	558,3618	3,02		
	198	830	135,1536	566,5529	3,06		

Prilog 2. Rezultati ispitivanja debljine prevlake za uzorke od čelika Böhler K110

Uzorak	X (piksel)	Y (piksel)	X (μm)	Y (μm)	E (μm)	Srednja vrijednost (μm)	Srednja vrijednost (μm)
D2 011	146	776	99,6587	529,6928	2,11	1,99	2,025
	158	664	107,8498	453,2423	1,96		
	174	584	118,7713	398,6348	1,89		
D2 012	152	752	103,7543	513,3106	2,13	2,06	
	164	676	111,9454	461,4334	2,07		
	144	740	98,29352	505,1195	1,99		
D2 021	204	728	139,2491	496,9283	2,77	2,85	2,955
	220	660	150,1706	450,5119	2,71		
	152	1082	103,7543	738,5666	3,07		
D2 022	206	806	140,6143	550,1706	3,09	3,06	
	198	848	135,1536	578,8396	3,13		
	192	830	131,058	566,5529	2,97		

Prilog 3. 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 01	m, g	70,3518	70,3492	70,3464	70,3435	70,3392	70,3362
		70,7311	70,7287	70,7251	70,722	70,7184	70,7146
	$m_{sr,1}, g$	0	0,0026	0,0028	0,0029	0,0043	0,003
		0	0,0024	0,0036	0,0031	0,0036	0,0038
	$\Delta m_{sr}, g$	0	0,0025	0,0032	0,003	0,00395	0,0034
	σ, g	0	0,0001	0,0004	0,0001	0,00035	0,0004
	$\Delta m_{cum,1}, g$	0	0,0025	0,0057	0,0087	0,01265	0,01605
C2 02	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	0,0028	0,0015	0,0018	0,0019	0,0044
		0	0,0004	0,0009	0,0008	0,0014	0,003
	$\Delta m_{sr}, g$	0	0,0016	0,0012	0,0013	0,00165	0,0037
	σ, g	0	0,0012	0,0003	0,0005	0,00025	0,0007
	$\Delta m_{cum,2}, g$	0	0,0016	0,0028	0,0041	0,00575	0,00945

Prilog 4. Kumulativni gubitak mase za uzorke od čelika Böhler K390PM

Broj okretaja kotača	Gubitak mase, g	
	C2 01	C2 02
0	0	0
100	0,0025	0,0016
200	0,0057	0,0028
300	0,0087	0,0041
400	0,01265	0,00575
500	0,01605	0,00945
Böhler K390PM		

Prilog 5. 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 01	m, g	75,3866	75,3781	75,365	75,35	75,3366	75,3211
		74,0352	74,0263	74,0148	74,0025	73,9832	73,9687
	$m_{sr,1}, g$	0	0,0085	0,0131	0,015	0,0134	0,0155
		0	0,0089	0,0115	0,0123	0,0193	0,0145
	$\Delta m_{sr}, g$	0	0,0087	0,0123	0,01365	0,01635	0,015
	σ, g	0	0,0002	0,0008	0,00135	0,00295	0,0005
	$\Delta m_{cum,1}, g$	0	0,0087	0,021	0,03465	0,051	0,066
D2 02	m, g	74,7672	74,7631	74,7533	74,7381	74,7236	74,7105
		74,3132	74,3128	74,3071	74,2916	74,2838	74,2733
	$m_{sr,2}, g$	0	0,0041	0,0098	0,0152	0,0145	0,0131
		0	0,0004	0,0057	0,0155	0,0078	0,0105
	$\Delta m_{sr}, g$	0	0,00225	0,00775	0,01535	0,01115	0,0118
	σ, g	0	0,00185	0,00205	0,00015	0,00335	0,0013
	$\Delta m_{cum,2}, g$	0	0,00225	0,01	0,02535	0,0365	0,0483

Prilog 6. Kumulativni gubitak mase za uzorke od čelika Böhler K110

Broj okretaja kotača	Gubitak mase, g	
	D2 01	D2 02
0	0	0
100	0,0087	0,00225
200	0,021	0,01
300	0,03465	0,02535
400	0,051	0,0365
500	0,066	0,0483
Böhler K110		