Prevlačenje prstena kliznog ležaja PACVD prevlakama

Cerovečki, Josip

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:412398

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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

Repository / Repozitorij:

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







Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Josip Cerovečki

Zagreb, 2021.

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

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

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj završni rd izradio samostalno uz stručnu pomoć dr. sc. Darka Landeka, dipl. ing., koristeći znanja stečena tijekom studija te navedenu literaturu i rezultate dobivene ispitivanjem u eksperimentalnom dijelu.

Zahvaljujem se svima koji su mi pomagali prilikom izrade ovog rada, iskrena zahvala asistentu Draženu Mezdiću, mag. ing., na pruženoj pomoći u eksperimentalnom dijelu rada. Posebno se zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Darku Landeku, dipl. ing., na savjetima, strpljenju i pruženoj stručnoj pomoći.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, roditeljima, baki i bratu koji su mi ljubavlju i podrškom tijekom studija omogućili da dođem do ovog uspjeha u svojemu životu.

Josip Cerovečki

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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: **602 - 04 / 21 - 6 / 1**	
Ur.broj: **15 - 1703 - 21 -**	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Josip Cerovečki** Mat. br.: 0035212536

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Prevlačenje prstena kliznog ležaja PACVD prevlakama**

Naslov rada na engleskom jeziku: **PACVD coating of the plain bearing ring**

Opis zadatka:

Prsteni ležaja izloženi su u radu dinamičkim naprezanjima, kontaktnim pritiscima, trošenju i koroziji. Primjenom postupaka prevlačenja površina moguće je značajno povisiti otpornost na koroziju i trošenje te smanjiti trenje u ležajevima. U teorijskom dijelu rada treba opisati djelovanje opterećenja, mehanizme trošenja i zahtjeve na svojstva materijala za metalne klizne ležajeve.

U eksperimentalnom dijelu rada treba planirati i provesti prevlačenje prstena kliznog ležaja od čelika EN DIN 100Cr6 PACVD prevlakama TiN i TiCN te provesti ispitivanja:
- hrapavosti površine, prije i nakon prevlačenja
- adhezivnosti prevlaka
- faktora trenja u kontaktu prevlake i ne prevučenih površina od čelika EN DIN 100Cr6 i ležajne bronce.

Na temelju rezultata ispitivanja predložiti kombinaciju materijala i prevlaka u metalnom kliznom ležaju.

Navesti u radu korištenu literaturu i stručnu pomoć

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

Zadatak zadao:
Prof. dr. sc. Darko Landek

Datum predaje rada:
1. rok: 18 veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Branko Bauer

Sadržaj

Sadržaj I

Popis slika III

Popis tablica VI

Popis oznaka VII

Sažetak VIII

Summary IX

1. Uvod 1

TEORIJSKI DIO 2

2. Klizni ležajevi 3

2.1 Opterećenja u radu kliznih ležajeva 4

2.1.1 Klizni ležajevi s hidrostatičkim podmazivanjem 6

2.1.2 Klizni ležajevi s hidrodinamičkim podmazivanjem 6

2.2 Mehanizmi trošenja u radu kliznih ležajeva 8

2.3 Zahtjevi i izbor materijala za klizne ležajeve 10

3. Čelici za ležajeve 12

3.1 Čelik DIN 100Cr6 12

3.2 Niskolegirani Cr-čelici 12

3.3 Mikrostruktura i sastav 12

3.4 Toplinska obrada 13

3.4.1 Žarenje čelika DIN 100Cr6 14

3.4.2 Austenitizacija 16

3.4.3 Gašenje 17

3.4.4 Izotermičko poboljšanje, „Austempering“ 18

3.4.5 Martenzitno-bainitna mikrostruktura s „prethodnim gašenjem“ 20

3.4.6 Duboko hlađenje 21

3.4.7 Popuštanje 22

3.5 Bauschinger-ov efekt u čeliku DIN 100Cr6 23

3.6 Obrada odvajanjem čestica čelika DIN 100Cr6 25

4. PACVD prevlačenje čelika DIN 100Cr6 27

4.1 Toplinski postupci prevlačenja 27

4.2 PVD postupak 27

4.3 CVD postupak 29

4.4 PACVD postupak 31
4.5 Prevlake i njihova svojstva 35
4.5.1 Prevlaka TiN 36
4.5.2 Prevlaka TiCN 39
5. Metode ispitivanja 42
5.1 Hrapavost površine 42
5.2 Ispitivanje adhezivnosti prevlake 44
5.3 Ispitivanje debljine prevlake 44
5.4 Ispitivanje faktora trenja, metoda blok na prstenu 45
EKSPERIMENTALNI DIO 47
6. Plan i provedba ispitivanja 48
6.1 Plan ispitivanja 48
6.2 Provedba prevlačenja 50
6.2.1 Prevlačenje TiCN/TiN prevlakom PACVD postupkom 50
6.2.2 Prevlačenje TiN/TiCN prevlakom PACVD postupkom 51
6.2.3 Postupak nitriranja u plazmi 52
7. Rezultati ispitivanja i diskusija rezultata 53
7.1 Ispitivanje hrapavosti površine 53
7.2 Ispitivanje adhezivnosti prevlake 55
7.3 Ispitivanje debljine prevlake kalotestom 57
7.4 Ispitivanje faktora trenja i adhezijskog trošenja 60
7.5 Diskusija rezultata 71
8. Zaključak 74
LITERATURA 75
Prilog 1 : Hrapavost površina 77
Prilog 2: Tehnički podaci o senzoru IFM II5917 82

Popis slika

Slika 2. 1 Zatvoreni klizni ležaj (lijevo) i otvoreni klizni ležaj (desno) [1] 3
Slika 2.2 Vrste trenja ovisno o količini maziva na površinama u dodiru [2] 5
Slika 2.3 Princip rada kliznog ležaja s hidrostitčkim podmazivanjem [2] 6
Slika 2.4 Nastanak uljnog lika u radu kliznog ležaja sa hidrodinamičkim podmazivanjem [2] 7
Slika 2.5 Položaj rukavca u uljnom klinu pri povećanju brzine rotacije [2] 7
Slika 2.6 Stribeckova krivulja [2] 8
Slika 2.7 Načini abrazijskog trošenja [3] 8
Slika 2.8 Faze adhezijskog trošenja [3] 9
Slika 2.9 Oštećenja kliznog ležaja uslijed umora materijala [4] 9
Slika 2.10 Oštećenja nastala djelovanjem korozije [5] 10
Slika 2.11 Razni ležajni materijali [7] 11
Slika 3.1 Graf toplinske obrade čelika DIN 100Cr6 [3] 14
Slika 3.2 Postupci žarenja [9] 15
Slika 3.3 Sferoidizacijsko žarenje [9] 16
Slika 3.4 TTT dijagram za čelike nadeutektoidnog sastava i Uptonov dijagram [9] 18
Slika 3.5 TTT dijagram za čelik DIN 100Cr6 [10] 18
Slika 3.6 Mikrotvrdoća nakon ''Austempering'' postupka [12] 19
Slika 3.7 Utjecaj temperature i trajanja ''Austemperinga'' na mehanička svojstva [12] 20
Slika 3.8 Utjecaj trajanja izotermičkog držanja na omjer udjela martenzita i bainita [13] 21
Slika 3.9 Utjecaj temperature „prethodnog gašenja“ na mehanička svojstva [13] 21
Slika 3.10 Dijagram popuštanja čelika [9] 22
Slika 3.11 Dijagram popuštanja čelika DIN 100Cr6 [10] 23
Slika 3.12 Prikaz dijagrama Bauschingerov-og efekta [14] 24
Slika 3.13 Utjecaj temperature na posljedice Baushingerovog efekta [14] 25
Slika 3.14 Trošenje alata u ovisnosti o brzini okretanja obratka i trajanju obrade [15] 26
Slika 4.1 Presjek prevlake TiC na alatnom čeliku [9] 27
Slika 4.2 PVD tehnike: a) toplinsko isparavanje, b) otprašivanje, c) ioniranje [16] 28
Slika 4.3 Shematski prikaz uređaja za CVD postupak [17] 30
Slika 4.4 Shematski prikaz PACVD postupka [18] 32
Slika 4.5 PACVD uređaj na Fakultetu strojarstva i brodogradnje tvrtke Rübig GmbH 34
Slika 4.6 Koeficijent povećanja radnog vijeka materijala nakon prevlačenja TiN prevlakom [19] 36
Slika 4.7 Brzina taloženja TiN prevlake u odnosu na visinu napona [20] 37
Slika 4.8 a) Ovisnost adhezivnosti TiN prevlake na razne materijale o pulsirajućem naponu, b) Mikrotvrdoća TiN prevlake na raznim materijalima ovisno o pulsirajućem naponu [20] 37
Slika 4.9 Promjena faktora trenja u ovisnosti o koncentraciji klora tijekom prevlačenja (faktor trenja za par TiN prevlaka i čelična kuglica) [21] 38
Slika 4.10 Mikrotvrdoća TiN prevlake ovisno o temperaturi naknadnog žarenja poslije prevlačenja [22] 39
Slika 4.11 Promjena tvrdoće i gubitak mase materijala prevučenog TiCN prevlakom usporedno s neprevučenim čelikom, TiN i TiC prevlakama [23] 40
Slika 4.12 a) Faktor trenja između neprevučenog čelika i čeličnog pina, b) Faktor trenja između TiCN prevučenog čelika i čeličnog pina [24] 41
Slika 5.1 Prikaz parametara R_a i R_q [25] 42
Slika 5.2 Prikaz parametra R_z [25] 43
Slika 5.3 Prikaz parametra R_{max} [26] 43
Slika 5.4 Princip ispitivinja VDI 3198 [27] 44

Slika 5.5 Kalotest uređaj na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu tvrtke TRIBOtechnic [28] 45
Slika 5.6 a) Pravilno postavljanje uzorka, b) Nepravilno postavljanje uzorka [28] 45
Slika 5.7 Shematski prikaz metode Blok na prstenu [29] 46
Slika 6.1 Neprevučeni prsten kliznog ležaja od čelika EN DIN 100Cr6 [30] 48
Slika 7.1 Profil hrapavosti za prsten neprevučenog čelika DIN 100Cr6 53
Slika 7.2 Profil hrapavosti za prsten čelik DIN 100Cr6 prevučenog TiCN/TiN prevlakom 54
Slika 7.3 Profil hrapavosti za prsten čelik DIN 100Cr6 prevučenog TiN/TiCN prevlakom 54
Slika 7.4 Profil hrapavosti za uzorak ležajne bronce 54
Slika 7.5 Profil hrapavosti prstena čelik DIN 100Cr6 nitriranog u plazmi 54
Slika 7.6 Ispitivanje 1, mjesto utiskivanja indentora u TiCN/TiN prevlaku 55
Slika 7.7 Ispitivanje 2, mjesto utiskivanja indentora u TiCN/TiN prevlaku 56
Slika 7.8 Ispitivanje 1, mjesto utiskivanja indentora u TiN/TiCN prevlaku 56
Slika 7.9 Ispitivanje 2, mjesto utiskivanja indentora u TiN/TiCN prevlaku 56
Slika 7.10 Ispitivanje debljine TiCN/TiN prevlake kalotestom 58
Slika 7.11 Ispitivanje debljine TiN/TiCN prevlake kalotestom 58
Slika 7.12 Otisak nakon ispitivanja TiCN/TiN prevlake 59
Slika 7.13 Otisak nakon ispitivanja TiN/TiCN prevlake 59
Slika 7.14 Kalibracija opruge uređaja za ispitivanje faktora trenja 60
Slika 7.15 Uređaj za ispitivanje faktora trenja (adhezijskog trošenja) na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu 61
Slika 7.16 Usporedba faktora trenja isptivanje s dodirom u točci 61
Slika 7.17 Usporedba faktora trenja ispitivanje s dodirom u liniji 62
Slika 7.18 Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „100Cr6-100Cr6“ 63
Slika 7.19 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „100Cr6 - 100Cr6“ 63
Slika 7.20 Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „100Cr6 - TiCN/TiN prevučeno“ 64
Slika 7.21 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „100Cr6 – TiCN/TiN prevučeno“ 64
Slika 7.22 Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „100Cr6 – TiN/TiCN prevučeno“ 65
Slika 7.23 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „100Cr6 – TiN/TiCN prevučeno“ 65
Slika 7.24 a) Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „ležajna bronca - 100Cr6“ dodir u točci b) Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „ležajna bronca - 100Cr6“ dodir u liniji 66
Slika 7.25 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „ležajna bronca - 100Cr6“ dodir u točci 66
Slika 7.26 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „ležajna bronca - 100Cr6“ dodir u liniji . 66
Slika 7.27 a) Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „ležajna bronca - TiCN/TiN prevučeno“ dodir u točci b) Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „ležajna bronca – TiCN/TiN prevučeno“ dodir u liniji 67
Slika 7.28 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „ležajna bronca - TiCN/TiN prevučeno“ dodir u točci 67
Slika 7.29 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „ležajna bronca - TiCN/TiN prevučeno“ dodir u liniji 67
Slika 7.30 a) Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „ležajna bronca – TiN/TiCN prevučeno“ dodir u točci b) Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „ležajna bronca – TiN/TiCN prevučeno“ dodir u liniji 68
Slika 7.31 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „ležajna bronca – TiN/TiCN prevučeno“ dodir u točci 68
Slika 7.32 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „ležajna bronca - TiN/TiCN prevučeno“ dodir u liniji 68

Slika 7.33 a) Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „ležajna bronca - Plazma nitrirano“ dodir u točci b) Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „ležajna bronca - Plazma nitrirano“ dodir u liniji 69
Slika 7.34 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „ležajna bronca - Plazma nitrirano“ dodir u točci 69
Slika 7.35 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „ležajna bronca-Plazma nitrirano“ dodir u liniji 69
Slika 7.36 Usporedba prosječnih širina tragova trošenja za ispitane triboparove, a) Dodir u točci, b) Dodir u liniji 71
Slika 7.37 a) Prsten kliznog ležaja neprevučeni čelik DIN 100Cr6, b) Prsten kliznog ležaja prevučen TiCN/TiN prevlakom PACVD postupkom, c) Prsten kliznog ležaja prevučen TiN/TiCN prevlakom PACVD postupkom, d) Prsten kliznog ležaja nitriran u plazmi, e) Uzorak kliznog ležaja od ležajne bronce 71
Slika 9.1 Profil hrapavosti i parametri neprevučenog prstena kliznog ležaja od čelika DIN 100Cr6 . 77
Slika 9.2 Profil hrapavosti i parametri prstena kliznog ležaja prevučenog TiCN prevlakom PACVD postupkom 78
Slika 9.3 Profil hrapavosti i parametri prstena kliznog ležaja nitriranog u plazmi 79
Slika 9.4 Profil hrapavosti i parametri uzorka kliznog prstena od ležajne bronce 80
Slika 9.5 Profil hrapavosti i parametri prstena kliznog ležaja prevučenog TiN prevlakom PACVD postupkom 81
Slika 10.1 Tehnički podaci senzora IFM II5917 82

Popis tablica

Tablica 1. Prednosti i nedostaci prilikom odabira kliznih ležajeva 4
Tablica 2. Kemijski sastav DIN 100Cr6 čelika [8] 12
Tablica 3. Utjecaj temperature austentizacije na udio zaostalog austenita [11] 17
Tablica 4. Prednosti i nedostaci postupaka za prevlačenje 32
Tablica 4. Prednosti i nedostaci postupaka za prevlačenje (nastavak) 33
Tablica 5. Plan ispitivanja hrapavosti površine, kalotesta, VDI metodom 49
Tablica 6. Prikaz triboparova u ispitivanju blok na prstenu 49
Tablica 7. Osnovni parametri prevlačenja TiCN/TiN prevlakom postupkom PACVD 50
Tablica 8. Osnovni parametri prevlačenja TiN/TiCN prevlakom postupkom PACVD 51
Tablica 9. Osnovni parametri nitriranja u plazmi 52
Tablica 10. Vrijednosti parametara hrapavosti ispitnih uzoraka 53
Tablica 11. Parametri ispitivanja prstenova na kalotest uređaju 57
Tablica 12. Prosječne širine tragova trošenja 70

Popis oznaka

Oznaka	Veličina	Značenje
h_{min}	mm -	Minimalna visina uljnog sloja za postizanje tekućeg stanja trenja

Sažetak

U radu je opisano djelovanje opterećenja, mehanizmi trošenja i zahtjevi na svojstva materijala za metalne klizne ležajeve. Opisane su mogućnosti toplinske obrade i prevlačenja površine kliznog ležaja od čelika DIN 100Cr6. Provedeni su postupci prevlačenja TiN prevlakom i TiN/TiCN prevlakom postupkom PACVD, te nitriranje u plazmi. Ispitana je hrapavost površine, debljina i adhezivnosti prevlaka, otpornost na adhezijsko trošenje i faktor trenja. Iz ispitivanja hrapavosti površine uočene su razlike u parametrima i profilima hrapavosti ispitnih uzoraka. Izmjerena je debljina prevlaka i određena je prianjivost prevlaka. Iz provedenih ispitivanja utvrđeno je da je kod suhog trenja i opterećenja od 98,1 N najmanje adhezijsko trošenje ostvario tribopar „neprevučeni prsten - prsten prevučen TiCN/TiN prevlakom“. Najmanji faktor trenja uz povećano trošenja utvrđeno je kod tribopara „ležajna bronca -neprevučeni prsten“ pri dodiru u točci.

Ključne riječi : prsten kliznog ležaja, toplinska obrada, DIN 100Cr6, PACVD, TiN, TiN/TiCN

Summary

The paper describes the effects of loads, wear mechanisms and requirements on the properties of the materials for metal plain bearings. It describes the possibilities of heat treatment and coating of the plain bearing surface made of DIN 100Cr6 steel. The PACVD coating procedure of TiN coating, TiN/TiCN coating and plasma nitration were performed. The surface roughness, thickness and adhesiveness of the applied coatings and the resistance to adhesive wear tested by the friction factor and the width of the wear traces were examined. Differences in surface roughness parameters and profiles were observed from the sufrace roughness test. The thicknesses of the coating were measured and the quality of adhesion of the coatings was determined. From performed tests, it was determined that at dry friction and load of 98,1 N, the lowest adhesion wear was achieved by friction pair „uncoated ring – ring coated with TiCN/TiN coating“. The lowest friction factor with increased wear was found in the friction pair „bearing bronze – uncoated ring“ when touched at a point.

Key words: plain bearing ring, heat treatment, DIN 100Cr6, PACVD, TiN, TiN/TiCN

1. Uvod

Ležajevi se definiraju kao dijelovi stroja koji omogućuju da se jedan dio rotira ili giba u dodiru s drugim dijelom uz što je moguće manje trenja. Dodatne funkcije su prijenos tereta i omogućavanje točnog pozicioniranja komponenti. Ležajevi moraju biti pouzdani i izdržati velika statička i izmjenična naprezanja u teškim uvjetima rada. Ležajevi se prema načinu rada dijele na: klizne i kotrljajuće (valjne). Kotrljajući ležajevi se sastoje od kotrljajućih dijelova (kugličnih, valjkastih i stožastih oblika) i prstena koji formiraju stazu po kojoj se kotrljajući dijelovi kreću. Klizni ležajevi su jednostavniji i imaju manje dijelova, stoga ih je lakše održavati. Klizni ležajevi se sastoje od blazinice koje je smještena u kučištu. Blazinica koja služi kao klizna ploha je često podmazana uljem,a rjeđe mašću ili krutim sredstvom za podmazivanje. Prema djelovanju opterećenja razlikuju se radijalni i aksijalni klizni ležajevi.

Za izradu dijelova ležajeva često se koristi čelik EN DIN 100Cr6. Može se nabaviti u obliku šipki (kružni i kvadratni presjek), ploča ili bloka. Isporučuje se u kaljenom i popuštenom stanju, bez prevlake. Čelik DIN 100Cr6 pripada skupini niskolegiranih alatnih čelika za hladni rad,to jest podskupini niskolegiranih Cr čelika. Niskolegirani čelici sadrži 1…1,5 % C i 0,5…1,5 % Cr,a služe za izradu alata i dijelova ležajeva. Čelik se, osim za ležajeve, koristi i za alate za obradu drveta, centre vretena tokarilica, razvrtala i ostale alate kod kojih ne dolazi do pojave visokih temperatura u radu.

U radu će se provesti prevlačenje prstena kliznog ležaja s dvije prevlake, TiCN/TiN i TiN/TiCN. Za prevlačenje će se koristiti postupak PACVD (eng. *Plasma assisted chemical vapour deposition*), odnosno plazmom potpomognuto kemijsko prevlačenje iz parne faze na prstenima kliznih ležajeva od čelika DIN 100Cr6. Zatim će se provesti ispitivanja hrapavosti površine (prije i nakon prevlačenja), adhezivnost prevlake (metodom prema normi VDI 3198) i debljine prevlake kalotestom te faktora trenja i širine traga trošenja u kontaktu prevlake i neprevučene površine od čelika EN DIN 100Cr6 ili ležajne bronce.

TEORIJSKI DIO

2. Klizni ležajevi

Ležajevi služe kao oslonci rukavaca vratila i osovina. Razlikuju se nosivi ležajevi za radijalne sile (poprečne sile) i potporni ili uporni ležajevi za aksijalne sile (uzdužne sile). Vratila i osovine (tj. njihovi rukavci) podmazani uljem ili mastima, u rijetkim slučajevima s krutim mazivima u tuljcima ili blazinicama ležaja, izloženi su trenju klizanja. Postoje klizni ležajevi koji služe za vođenje strojnih dijelova, ali bez prijenosa vanjskih opterećenja. Kod kliznih ležajeva, ležajni dio vratila ili osovine (rukavac) naliježe na glatku, izdašno podmazivanu cilindričnu plohu. Cilindrična ploha se naziva blazinica, često je izrađena od materijala mekšeg od materijala rukavca. Smještena je u kućištu, kućište je drugi dio kliznog ležaja. Klizni ležajevi se izrađuju kao otvoreni, s dvodijelnom blazinicom, ili kao zatvoreni (očni), s jednodijelnom blazinicom.



Slika 2. 1 Zatvoreni klizni ležaj (lijevo) i otvoreni klizni ležaj (desno) [1]

Samoprilagodljivi ležaj ima blazinicu vezanu s kućištem preko kuglaste površine, te se os ležaja može prilagoditi položaju osi vratila ili osovine. Blazinice se najčešće izrađuju od bronce, sinteriranih metala ili bijelih kovina (legura kositra, bakra, olova i antimona), ali u posebnim slučajevima od gume,plastike ili drva. Prema načinu pogona i vrsti ležaja mora se stalno ili povremeno dovoditi mazivo do kliznih površina. Podmazivanje se provodi pomoću kanala, utora, komora i slično. Podmazivanje mastima se koristi kod nisko opterećenih, sporednih ležajeva i zglobova, te za okolinu izloženu prašini, jednostavno je i jeftino. Višak masti ne kaplje s ležajnih mjesta, već izlazi iz ležaja u obliku vijenca koji štiti od nečistoća. Odgovarajućim uređajima mast se tlači do ležajnih mjesta. Opasnost je prekomjerno zagrijavanje ležaja koje dovodi do topljenja masti nakon čega može doći do zapaljenja ležaja.

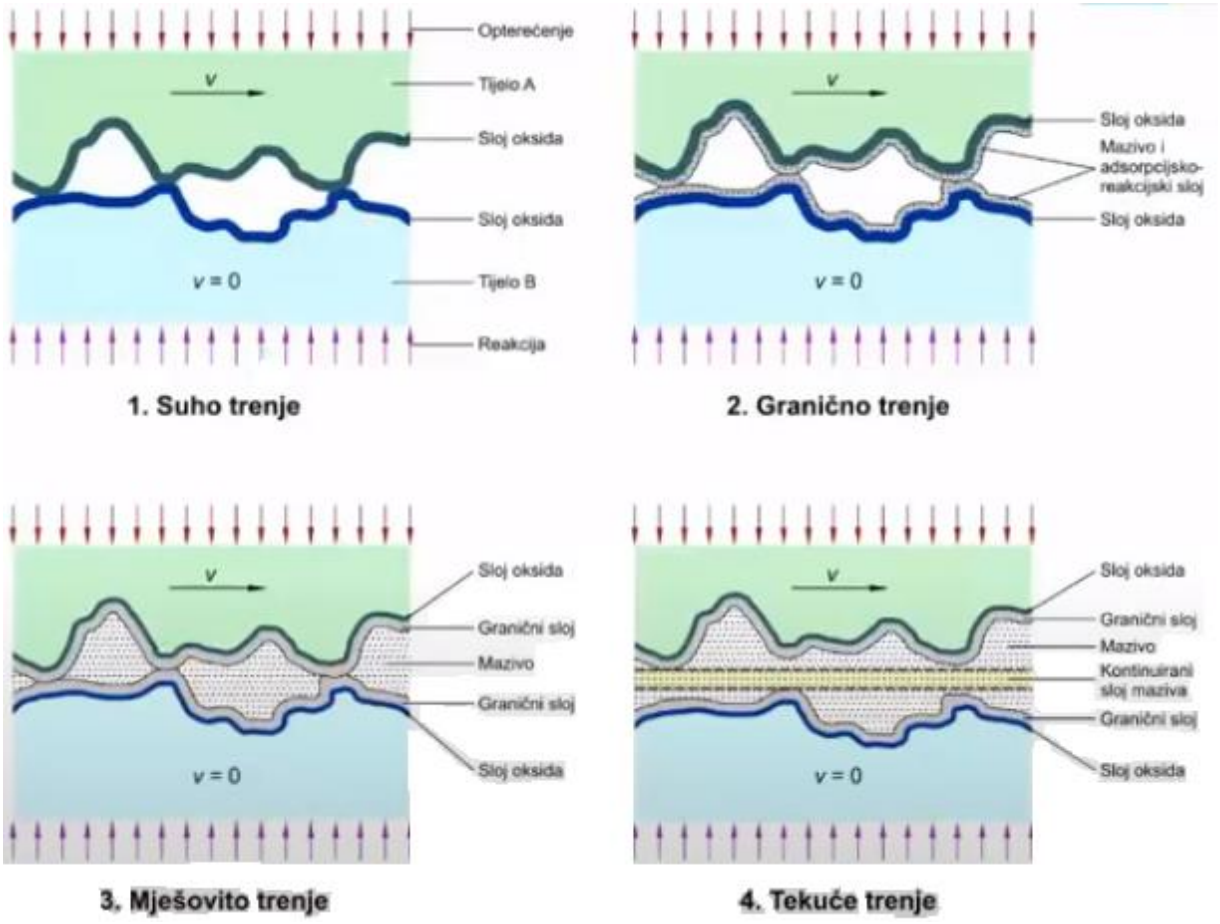
Podmazivanje uljem koristi se za sve brzohodne ležajeve s velikim površinskim pritiscima i višim temperaturama. Ručno podmazivanje je zadovoljavajuće prilikom podmazivanja zglobova, jednostavnih i lako pristupačnih sporednih ležajeva ili poljoprivrednih strojeva. Mazivo se dovodi pomoću brizgalica ili kantica za ulje do otvora za podmazivanje. Najvišim zahtjevima postavljenim na pogonsko važne ležajeve udovoljava optočno (cirkulacijsko) podmazivanje koje je ujedno i najekonomičnije i najsigurnije. Preko sistema cijevi i jedne uljne pumpe opskrbljuju se sva mjesta za podmazivanje. Višak ulja se filtrira i sakuplja u zbirnike, u posebnim slučajevima se hladi. Sakupljeno ulje se ponovno pumpa u sustav i pri tome hladi ležajeve.

Tablica 1. Prednosti i nedostaci prilikom odabira kliznih ležajeva

Prednosti kliznih ležajeva:	**Nedostaci kliznih ležajeva**:
– Dozvoljavaju velike brzine vrtnje – Tih i miran hod – Uz dobro podmazivanje imaju nizak faktor trenja, te time dug vijek trajanja – Jednostavna izrada – Pogodni za prenošenje udarnih opterećenja – Jeftiniji od valjnih ležajeva – U radijalnom smjeru zauzimaju manje prostora – Prigušuju vibracije, šumove i udarce – Mogu biti izrađeni u dijeljenoj izvedbi	– Veliko trenje prilikom pokretanja i malih brzina – Neprecizno vođenje i pozicioniranje pokretnih strojnih dijelova – Osjetljivi na nedostatak podmazivanja – Zahtijevaju pažljivo održavanje – Na kvalitetu ležajeva bitno utječu materijal i toplinska obrada rukavca vratila i osovina

2.1 Opterećenja u radu kliznih ležajeva

U radu kliznih ležajeva neizbježno se pojavljuje trenje. Trenje je sila koja se suprotstavlja relativnom kretanju tijela u dodiru. Djeluje u smjeru suprotnom od gibanja tijela paralelno s dodirnim površinama i otežava rad strojnih dijelova i stvara gubitke u obliku energije i materijala. Dijeli se na suho trenje i trenje uz podmazivanje.



Slika 2.2 Vrste trenja ovisno o količini maziva na površinama u dodiru [2]

Suho trenje se pojavljuje kada između površina u dodiru nema sredstva za podmazivanje. U tom slučaju na faktor trenja utječe stanje površina i vrsta materijala koji su u dodiru.

Kod graničnog trenja površine koje se dodiruju su prekrivene tankim i tvrdim slojem maziva, ali nečistoća i oksida. Površine se dodiruju samo u najizbočenijim točkama. Najčešće se javlja prilikom pokretanja strojnih dijelova kada su brzine vrtnje male, a dolazi do visokog faktora trenja.

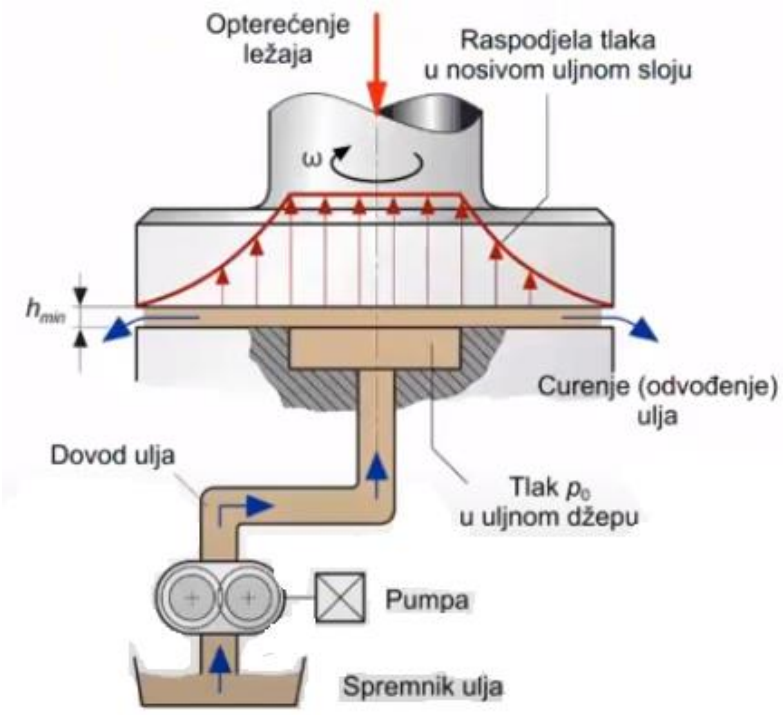
Na prijelazu između graničnog trenja i tekućeg trenja dolazi do pojave mješovitog trenja kod kojeg se površine u kontaktu dodiruju preko graničnih slojeva, ali pritisak maziva nije dovoljan da se površine odvoje.

Osnovna namjena podmazivanja kliznih ležajeva jest smanjenje trenja i time smanjenje gubitaka snage, smanjenje zagrijavanja i povećanje vijeka trajanja ležajeva. To se ostvaruje dobrim podmazivanjem, pri kojem su površine blazinice ležaja i rukavca razdvojene

tankim slojem ulja koji se naziva uljni film. U takvom stanju vlada tekuće trenje. Za njegovo postizanje potrebno je u sloju maziva osigurati tlak koji omogućava ravnotežno stanje s vanjskim opterećenjem ležaja. Ovisno o načinu podmazivanja ležajevi se dijele na ležajeve s hidrostatičkim podmazivanjem i ležajeve s hidrodinamičkim podmazivanjem.

2.1.1 Klizni ležajevi s hidrostatičkim podmazivanjem

Kod kliznih ležajeva s hidrostatičkim podmazivanjem potrebni tlak u sloju maziva se postiže pumpom koja tlači ulje na tlak manji od 20 MPa (otprilike 200 bara) (slika 2.3). Taj tlak je potreban kako bi se dobila minimalna širina sloja ulja (h_{min}) i omogućilo tekuće trenje. Ovom vrstom dobivaju se manji gubici trenja nego kod ostalih vrsti ležajeva. Takva izvedba podmazivanja nije česta u praksi zbog dodatnih troškova koji nastaju zbog nabave visokotlačne pumpe za tlačenje ulja.

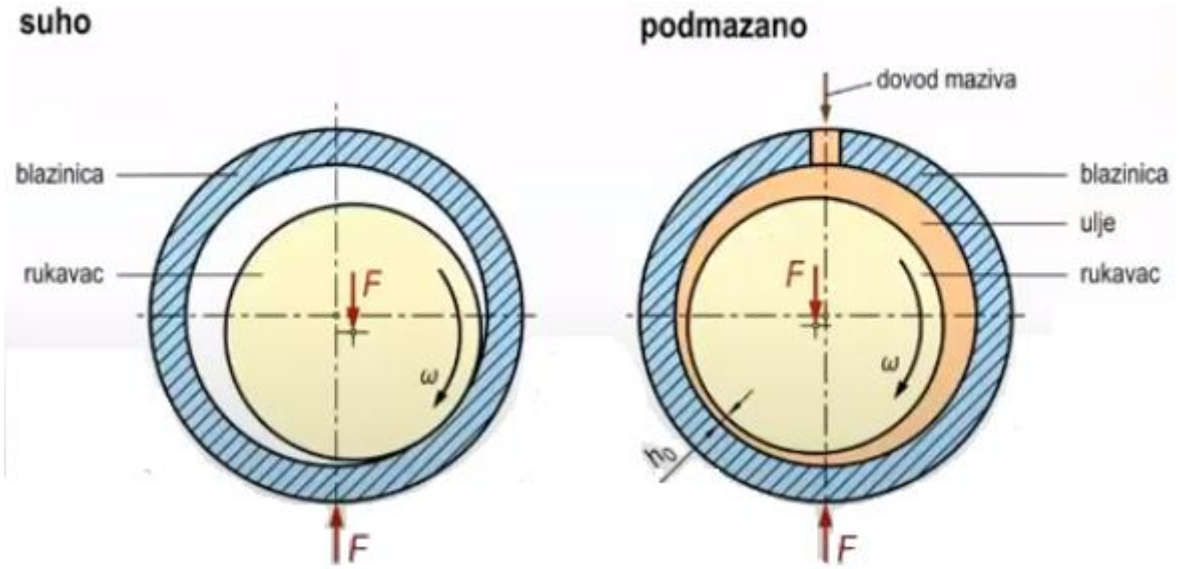


Slika 2.3 Princip rada kliznog ležaja s hidrostitčkim podmazivanjem [2]

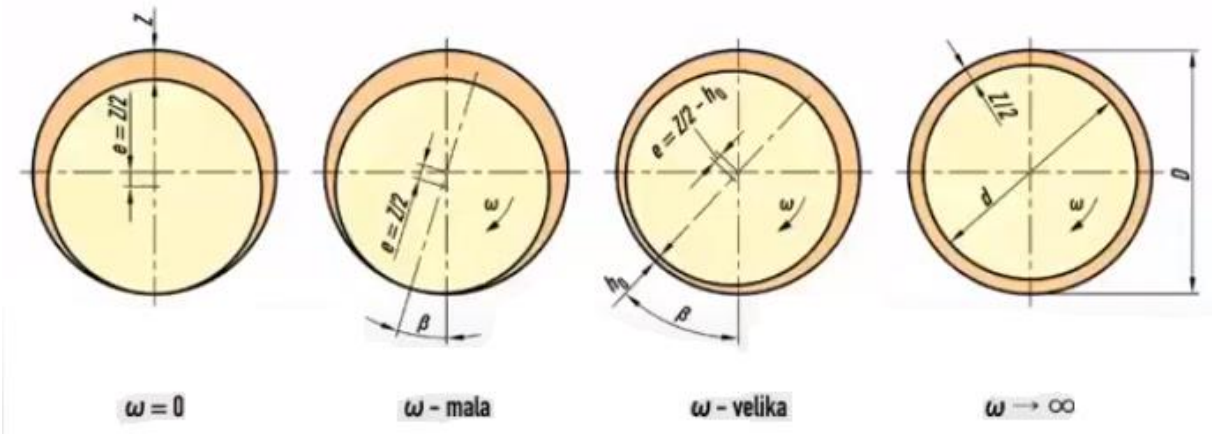
2.1.2 Klizni ležajevi s hidrodinamičkim podmazivanjem

Kod hidrodinamičkog podmazivanja ležajeva dolazi do pojave nosivog uljnog sloja uslijed povećanja brzine gibanja rukavca vratila ili osovine u ležaju. Između rukavca i blazinice ležaja nastaje klinasti procjep (uljni klin) u kojem se tlači ulje (slika 2.4). U radu

ležaja rukavac pliva u uljnom sloju udaljen od blazinice za debljinu uljnog sloja (h_0). Potrebni tlak za nošenje rukavca stvara se gibanjem, tj. rotacijom, rukavca (slika 2.5).

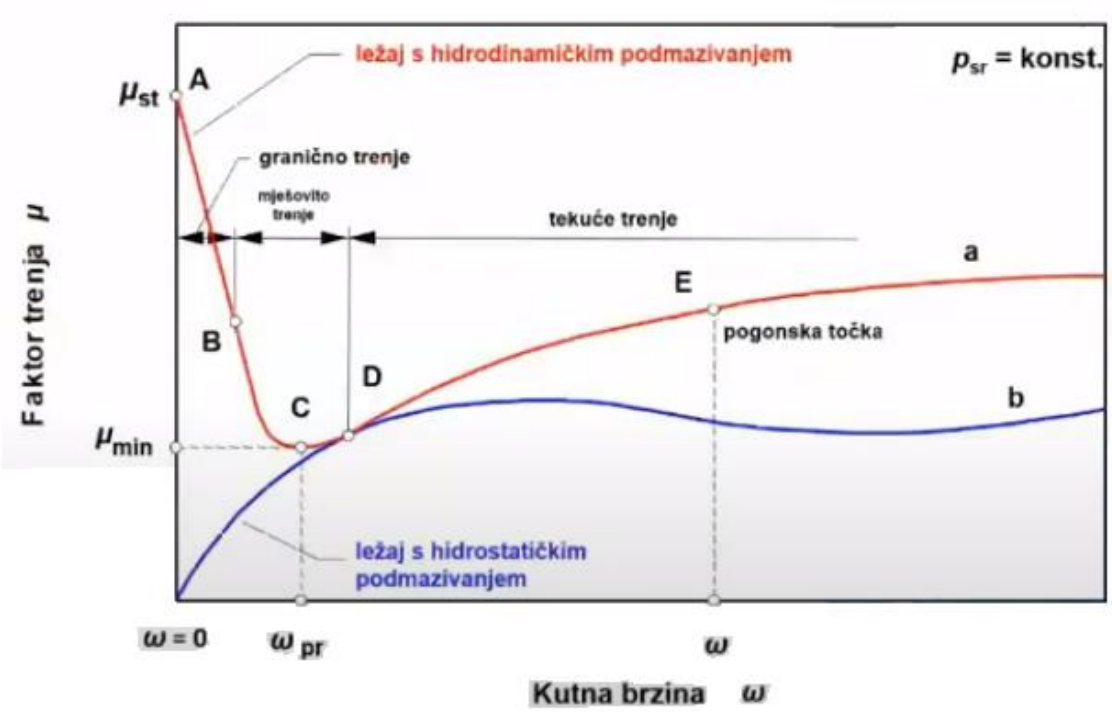


Slika 2.4 Nastanak uljnog lika u radu kliznog ležaja sa hidrodinamičkim podmazivanjem [2]



Slika 2.5 Položaj rukavca u uljnom klinu pri povećanju brzine rotacije [2]

Prikaz karakteristike promjene faktora trenja kao funkciju kutne brzine rukavca prikazuje se Stribeckovom krivuljom (slika 2.6). Krivulja vrijedi za jednu vrstu maziva i konstantan tlak među kliznim površinama.



Slika 2.6 Stribeckova krivulja [2]

2.2 Mehanizmi trošenja u radu kliznih ležajeva

Prilikom pokretanja i tijekom rada bez dobrog podmazivanja dolazi do trošenja ležajeva. Trošenjem dolazi do oštećenja i mogućeg loma ležajeva. Kada su dva metala u dodiru dolazi do pojave adhezije i abrazije. Abrazija i adhezija dva su mehanizma trošenja materijala. Oba mehanizam se pojavljuju u radu kliznih ležajeva. Do abrazije dolazi kada tvrđa čestica dođe između dvije površine koje su u kontaktu. Tvrđa čestica ostavlja trag trošenja na materijalu manje tvrdoće. Abrazija se može pojaviti u više oblika, ali u svim oblicima ostaju tragovi u obliku brazdi (slika 2.7).



Slika 2.7 Načini abrazijskog trošenja [3]

Adhezija je mehanizam trošenja koji se može podijeliti u više faza, te kao i kod abrazije potrebno da su dvije površine u kontaktu i relativnom gibanju u odnosu jedna na drugu. Prilikom kontakta uslijed gibanja, zagrijavanja i opterećenja dolazi do spajanja

materijala površina, tj. mikrozavarivanja. U drugoj fazi mehanizma dolazi do pucanja spoja i oštećenja površina. Nakon toga moguće je da čestica koja se otkrhnula počne mehanizmom abrazije oštećivati površine (slika 2.8).



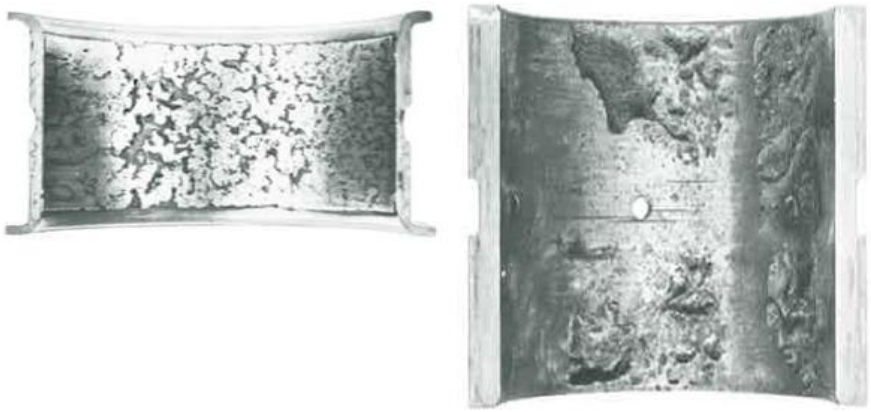
Slika 2.8 Faze adhezijskog trošenja [3]

Osim tih mehanizama trošenja do oštećenja kliznih ležajeva može doći i uslijed umora materijala ili korozije. Umor materijala (slika 2.9) se pojavljuje u slučaju pogrešnog postavljanja ležaja (loše centriranje ležaja i rukavca), zagrijavanja i ugrijavanja i vibracija.



Slika 2.9 Oštećenja kliznog ležaja uslijed umora materijala [4]

Pojava oštećenja djelovanjem korozije se može dogoditi zbog pogrešnog odabira ulja za podmazivanje (slika 2.10). Tijekom rada ležajeva može doći do razgradnje aditiva ulja, oksidacije nekih komponenti ulja koji uzrokuju koroziju ili miješanjem ulja s vodom ili sredstvom za hlađenje.



Slika 2.10 Oštećenja nastala djelovanjem korozije [5]

2.3 Zahtjevi i izbor materijala za klizne ležajeve

Za svaki strojni dio postoji niz zahtjeva koji moraju biti ispunjeni kako prilikom rada ne bi došlo do kvarova. Pogrešnim odabirom materijala može doći do velike materijalne štete, ali i do gubitka ljudskih života.

Zahtjevi na materijale kliznih ležajeva propisani su normom DIN 50282 [6]:

1. Prilagodljivost. Ležajni materijal se treba elastično, a po potrebi i i plastično prilagođavati promjenama oblika.
2. Tlačna čvrstoća. Ležajni materijal treba trajno podnositi tlačna opterećenja.
3. Podnošljivost (kompatibilnost) s materijalom rukavca.
4. Neosjetljivost na zaribavanje. Ležajni materijal mora imati svojstvo nezavarljivosti na visokim temperaturama s materijalom površina nalijeganja rukavca.
5. Mala sklonost stvaranju brazdi. Struktura treba biti takva da se na kliznim površinama pod opterećenjem i deformacijom ne stvaraju brazde, koje će dovesti do brzog trošenja.
6. Sposobnost uhodavanja. Ležajni materijal se treba lako prilagođavati odstupanjima geometrijskog oblika zbog opterećenja, tako da se površine u dodiru glačaju i da ne dolazi do povećanja njihove hrapavosti.
7. Otpornost na trošenje. Ležajni materijal treba biti otporan na promjene površine klizanja, ukoliko bi zbog mehaničkih uzroka došlo do odvajanja malih djelića.

8. Sposobnost klizanja pri nepovoljnom podmazivanju. Ležajni materijal mora omogućiti da se proces klizanja nastavi još neko kratko, ograničeno, vrijeme ukoliko nastupe nepredviđene nepovoljne okolnosti u pogonu. Ne smije doći do zaribavanja prilikom prekida dovoda maziva.
9. Sposobnost ležajnog materijala da jednoliko raspoređuje mazivo u radu.
10. Toplinska vodljivost. Ležajni materijal mora dobro odvoditi toplinu nastalu djelovanjem trenja.

Ležajni materijali se biraju i ovisno o radnoj temperaturi ležajeva. Tako se koriste blazinice od bijelih kovina (legura kositra, bakra, olova i antimona) gdje su radne temperature do 110 °C (slika 2.11). Za visoko opterećene ležajeve se koriste crveni lim, olovne i aluminijske bronce, te aluminijske bronce s velikim brojem legirnih elemenata. Koriste do radnih temperatura od 200 °C. Osim zahtjeva napisanih u normi DIN 50282, ležajni materijali moraju biti i otporni na djelovanje korozije.



Slika 2.11 Razni ležajni materijali [7]

3. Čelici za ležajeve

3.1 Čelik DIN 100Cr6

Skupina čelika u kojoj se nalaze nelegirani i niskolegirani čelici koje se primjenjuju do radnih temperatura 200 °C. Toj skupini pripada i čelik DIN 100Cr6,odnosno u AISI (American Iron and Steel Institute) standardizaciji se on označuje kao čelik AISI 52100. Podskupina kojoj taj čelik pripada su niskolegirani alatni čelici za hladni rad,točnije skupini niskolegiranih Cr-čelika. Osnovni cilj legiranja tih čelika je: povećanje prokaljivosti i dobivanje kvalitetnijih i toplinski postojanijih karbida u odnosu na Fe_3C koji daju višu tvrdoću i otpornost na trošenje. U odnosu na ostale skupine alatnih čelika zajednička su im svojstva: osrednja optornost na trošenje i žilavost te mala otpornost na popuštanje. Ciljanim legiranjem kod nekih vrsta čelika postižu se ipak neka bolja svojstva: povećanje žilavosti,održavanje visoke tvrdoće pri povišenim radnim temperaturama,povećanje postojanosti dimenzija ili neka druga svojstva koja su bitnija za uvjete eksploatacije. Uz niskolegirane Cr-čelike kojoj pripada DIN 100Cr6 čelik u niskolegirane ugljične čelike ubraja ju se i sljedeći čelici: visokougljični W-V čelici, nisko i srednjeugljični W-Cr-(Si)-V čelici, te niskolegirani Mn-Cr-V i Mn-Cr-W čelici.

3.2 Niskolegirani Cr-čelici

Osim DIN 100Cr6 čelika neki od najčesće korišćenih u toj kategoriji su i čelici: DIN 115CrV3, 140Cr3, 105Cr4 i 100CrMn6. Navedeni čelici su otporni na trošenje i visoke specifične pritiske (i do 5000 MPa), što ukazuje na njihovu primjenu u proizvodnji ležajeva. Svi čelici su nadeutektoidnog sastava.

3.3 Mikrostruktura i sastav

Kemijski sastav DIN 100Cr6 čelika koji garantira tvrtka Otai Special Steel nalazi se u tablici 2.

Tablica 2. Kemijski sastav DIN 100Cr6 čelika [8]

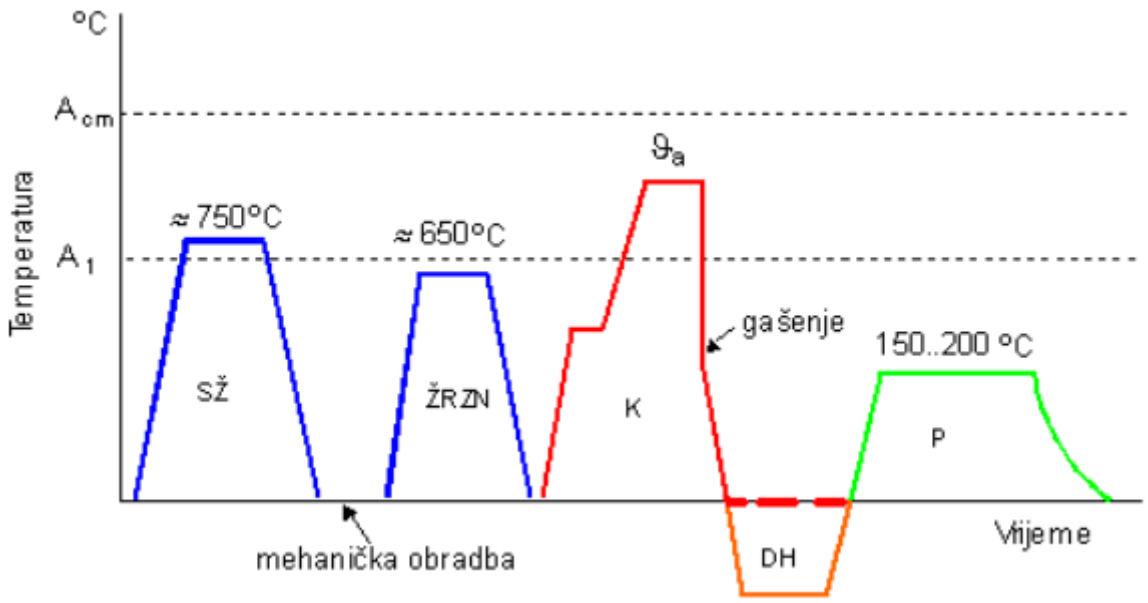
C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr(%)
0,93 - 1,05	0,15 – 0,35	0,25 – 0,45	≤ 0,025	≤0,015	1,35– 1,60

Mikrostruktura se sastoji od finih sfernih karbida zarobljenih u martenzitnoj matrici. Takva struktura je dobivena austenitizacijom sferoidizirane mikrostrukture na temperaturu 840 do 860 °C i gašenjem u ulju, te naknadno se provede niskotemperaturno popuštanje na temperaturi 160 do 180 °C. Istraživanjima se dokazalo da postoji povezanost između značajki mikrostrukture i otpornosti na umor materijala tijekom kotrljajućeg kontakta. U primjeni čelika DIN 100Cr6 za dijelove ležajeva pokazalo se da: dobivanjem strukture sa finijim česticama karbida dolazi do povećanja otpornosti na umor, interkristalni atomi kisika štetnije djeluju na otpornost na umor materijala od sulfida i da granice zrna austenita utječu na nastanak pukotina uslijed zamora djelovanjem Hertzovog naprezanja. Prilikom kaljenja postiže se mikrostuktura: martenzit (M) + $(Fe,Cr)_3C$ + A_z.

Zaostali se austenit (A_z) niskim popuštanjem transformira u karbid popuštanja samo djelomično, pa je prije popuštanja uobičajeno duboko hlađenje (pri -196 °C) za eliminaciju ove nepoželjne faze u radu tlačno opterećenih alata ili ležajeva. Austenit u slučaju visokih specifičnih pritisaka može doživjeti deformacijsku pretvorbu u martenzit.

3.4 Toplinska obrada

Toplinska obrada čelika DIN 100Cr6 sastoji se od žarenja, austenitizacije, kaljenja, dubokog hlađenja i popuštanja. Tijekom toplinske obrada postoji mnogo faktora koji utječu na mikrostrukturu čelika, a stoga i na mehanička svojstva. Kako bi se dobila željena svojstva potrebno je kontrolirati svaki dio tog procesa. Počevši od žarenja i austenitizacije pa do završetka popuštanja (slika 3.1).

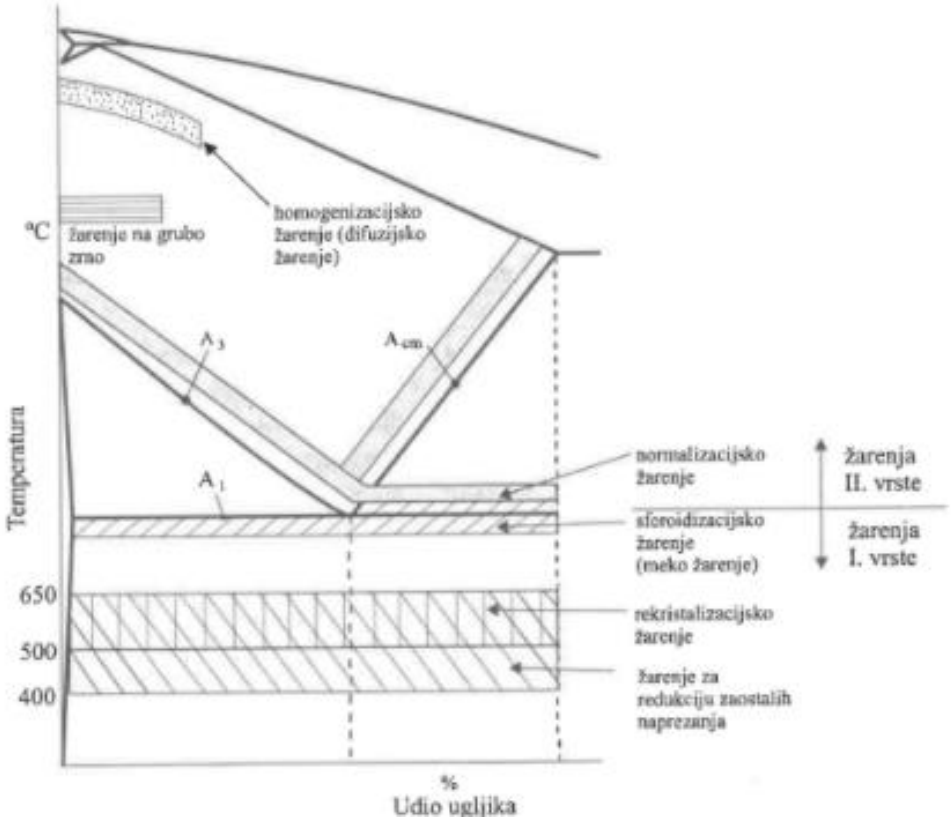


Slika 3.1 Graf toplinske obrade čelika DIN 100Cr6 [3]

3.4.1 Žarenje čelika DIN 100Cr6

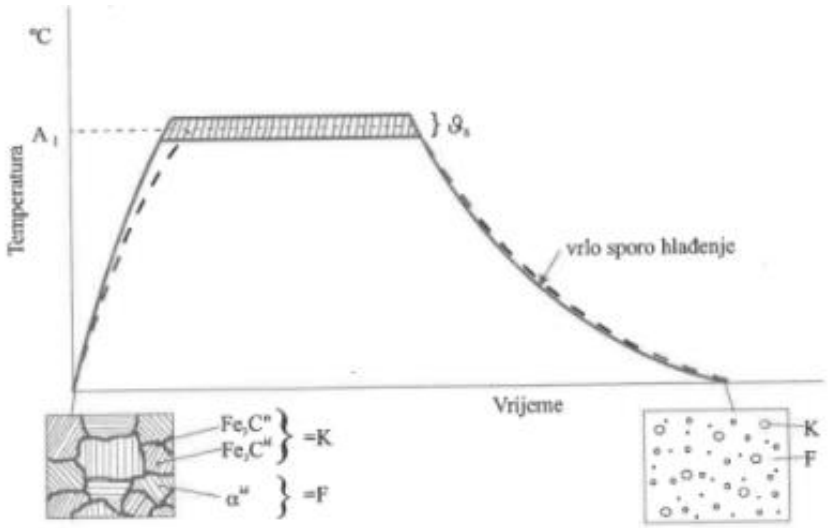
Postupci žarenja primjenjuju se u preradi raznih metala i njihovih legura u cilju postizanja specifičnih tehnoloških svojstava, kao što je npr. obradljivost. Postoji relativno velik broj postupaka. Kod željeznih legura, posebno čelika, primjenjuju se mnoge vrste žarenja. Postupci žarenja (slika 3.2) dovode čelik bliže stanju metastabilne ravnoteže. Postupci žarenja se dijele na dvije skupine:

- Postupci žarenja 1. vrste jesu oni koji se provode pri temperaturi ispod temperature A_1: žarenje za redukciju zaostalih naprezanja (napetosti) i rekristalizacijsko žarenje.
  Kod ovih postupaka žarenja, dakle, ne dolazi do prekristalizacijemikrostrukture tj. nema promjene kristalne rešetke.
- Postupci žarenja 2. vrste jesu oni, koji se provode na temperaturama oko ili iznad temperature A_1: sferoidizacijsko žarenje (meko žarenje), normalizacijsko žarenje, žarenje na grubo zrno (visokotemperaturno žarenje) i homogenizacijsko žarenje (difuzijsko žarenje)
  Kod ovih postupaka žarenja dolazi do prekristalizacije mikrostrukture. Strukturne promjene igraju odlučujuću ulogu.



Slika 3.2 Postupci žarenja [9]

Tijekom toplinske obrade čelika DIN 100Cr6 koriste se dva postupka žarenja. To su postupci sferoidizacijskog žarenja (meko žarenje) i žarenje za redukciju zaostalih naprezanja. Sferoidizacijsko ili meko žarenje (slika 3.3) postupak je ugrijavanja čelika na neku temperaturu oko A_1, duljeg držanja pri toj temperaturi te vrlo sporog ohlađivanja (u pravilu u peći) u svrhu prevođenja lameralnih (eutektoidnih) i mrežastih (sekundarnih) karbida u kuglasti oblik. Čelik DIN 100Cr6 se u tom postupku zagrijava na 790 °C do 810 °C. Time se snižava tvrdoća čelika i poboljšavaju svojstva obradljivosti (deformabilnost, obradljivost odvajanjem čestica itd.) Tvrdoća čelika u sferoidiziranom stanju niža je od one proračunate na temelju udjelu faza. Sferoidizirano stanje je međustanje čelika te se nakon odgovarajuće mehaničke obrade čelik mora drugim toplinskim obradbama dovesti u željeno strukturno stanje postizanja zahtijevanih eksploatacijskih svojstava.



Slika 3.3 Sferoidizacijsko žarenje [9]

Nakon toga se čelik DIN 100Cr6 grubo mehanički obrađuje na željene dimenzije. Zatim slijedi drugi postupak žarenja kako bi se smanjila (reducirala) zaostala naprezanja nastala tijekom obrade odvajanjem čestica. Postupak se uobičajeno provodi na temperaturama između 400 °C i 650 °C, a prilikom obrade čelika DIN 100Cr6 provodi se na temperaturama između 500 °C i 650 °C. Pri tome ne dolazi do bitnijih promjena mehaničkih svojstava strojnih dijelova niti do mikrostrukturnih promjena. Predmet se pri temperaturi žarenja drži najčešće 2 (ponekad i nekoliko) sata, a ohlađuje se vrlo sporo kako ne bi došlo do novog stvaranja toplinskih naprezanja. Zaostala naprezanja u predmetima koji su izrađeni od čelika ili drugih metalnih materijala mogu prouzročiti štetne posljedice za izradak (deformacije, a često i pucanje dijelova. Zato je potrebno reducirati što više zaostalih naprezanja.

3.4.2 Austenitizacija

Prilikom ugrijavanja na temperaturu austenitizacije čelik DIN 100Cr6 je potrebno predgrijati na temperaturu oko 500 °C. Prvi korak u dobivanju kaljenog čelika je austenitizacija, jer martenzit može nastati samo iz austenita. Temperatura austenitizacije je temperatura na koju se čelik zagrijava kako bi došlo do transformacije iz ferita koji ima BCC (engl. *Body-Centered Cubic*, prevedeno prostorno centrirana kubična) kristalnu rešetku u homogeni austenit koji ima FCC (engl. *Face-Centered Cubic*, prevedeno plošno centrirana kubična) kristalnu rešetku. Dok je čelik u stanju homogenog austenita dolazi do povećanja stabilnosti ugljika u leguri. Austenitizacija se provodi prije postupka gašenja u kojem dolazi

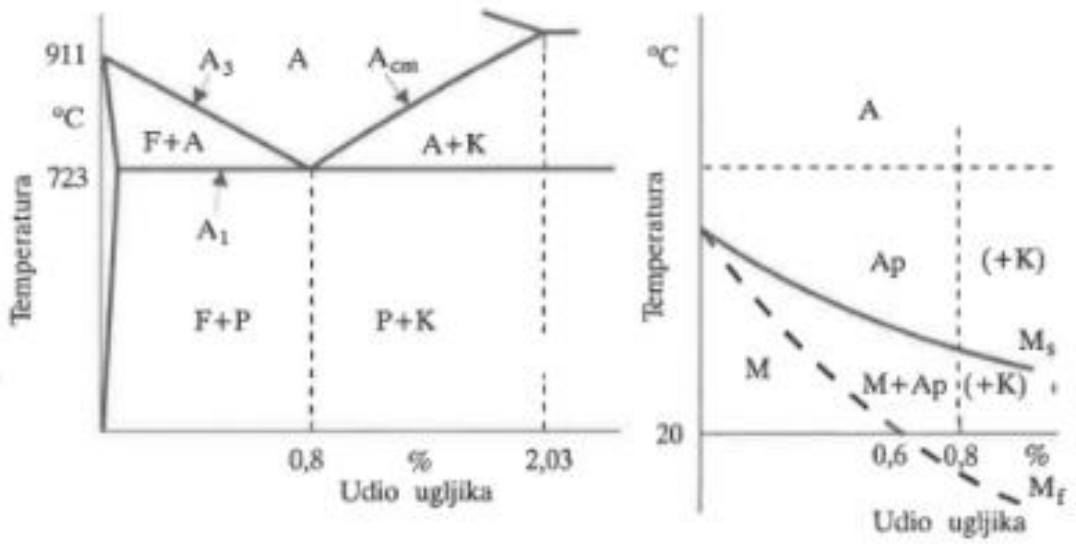
do prelaska u martenzitnu mikrostrukturu i povećanja tvrdoće. Temperatura austenitizacija je najviša temperatura na koju se čelik zagrijava tijekom toplinske obrade. Kako ne bi došlo do neželjenih posljedica kao što su grubo martenzitno zrno i visoki udio zaostalog martenzita nadeutektoidne čelike (kojima pripada čelik DIN 100Cr6) potrebno je austenitizirati na temperaturu unutar dvofaznog područja između temperatura A_1 i A_{cm} tj.: $\vartheta_a = A_1 + (50\text{-}70)$ °C. P.W. Mason i P.S. Prevéy su eksperimentom došli do zaključka da je odabir temperature austenitizacije jedan od dva faktora koji imaju najveći utjecaj na udio zaostalog austenita i povišenje tvrdoće u toplinskoj obradi čelika DIN 100Cr6. Austenitizacijom na temperaturi od 827 °C dobili su čelik s najmanjim udjelom zaostalog austenita i najveće tvrdoće. U zaključku ističu da kako bi se dobio najbolji proizvod (mali udio zaostalog austenita i visoka tvrdoća) najveću pozornost toplinske obrade trebalo bi posvetiti regulaciji temperaturi austenitizacije (tablica 3).

Tablica 3. Utjecaj temperature austentizacije na udio zaostalog austenita [11]

Uvjeti		
Faktori	Uzorak 1	Uzorak 2
Temperatura austenitizacije	827 °C (1520 F)	827 °C (1520 F)
Temperatura popuštanja	177 °C (350 F)	177 °C (350 F)
Trajanje popuštanja	2 sata	2 sata
Trajanje dubokog hlađenja	1 sat	-
Rezultati		
Volumni udio zaostalog austenita	0	0
Tvrdoća po Rockwellu C	58,7	57,9

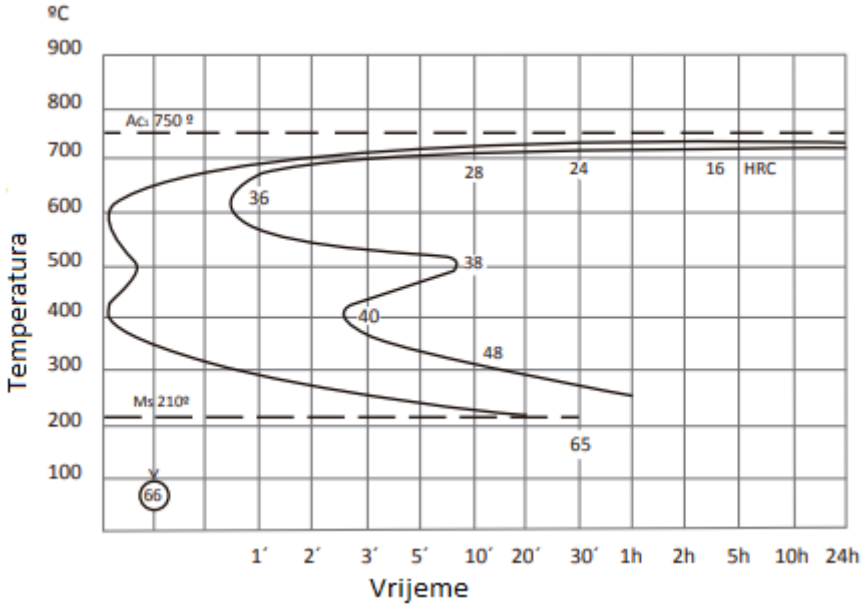
3.4.3 Gašenje

To je postupak kojim se nakon ugrijavanja na temperaturu austenitizacije i držanja na toj temperaturi, čelik se zatim stavlja u sredstvo za gašenje (kao što su voda ili ulje, ali moguće je sporo hlađenje na zraku). Brzim hlađenjem čelika dolazi do pretvorbe iz austenita u martenzit. U slučaju čelika nadeutektoidnih sastava nakon gašenja mikrostruktura se sastoji od martenzita, zaostalog austenita i karbida. Pri odabiru brzine hlađenja potrebno je poznavati izgled TTT (engl. *Time Temperature Transformation*) dijagrama za nadeutektoidne čelike (slika 3.4).



Slika 3.4 TTT dijagram za čelike nadeutektoidnog sastava i Uptonov dijagram [9]

Zbog legirnih elemenata TTT dijagram za čelik DIN 100Cr6 se razlikuje od klasičnog TTT dijagrama za nadeutektoidne čelike (slika 3.5).

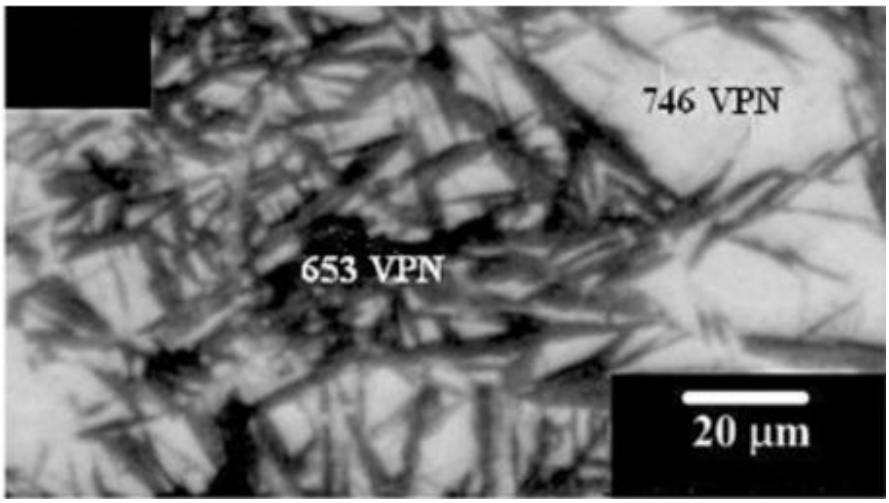


Slika 3.5 TTT dijagram za čelik DIN 100Cr6 [10]

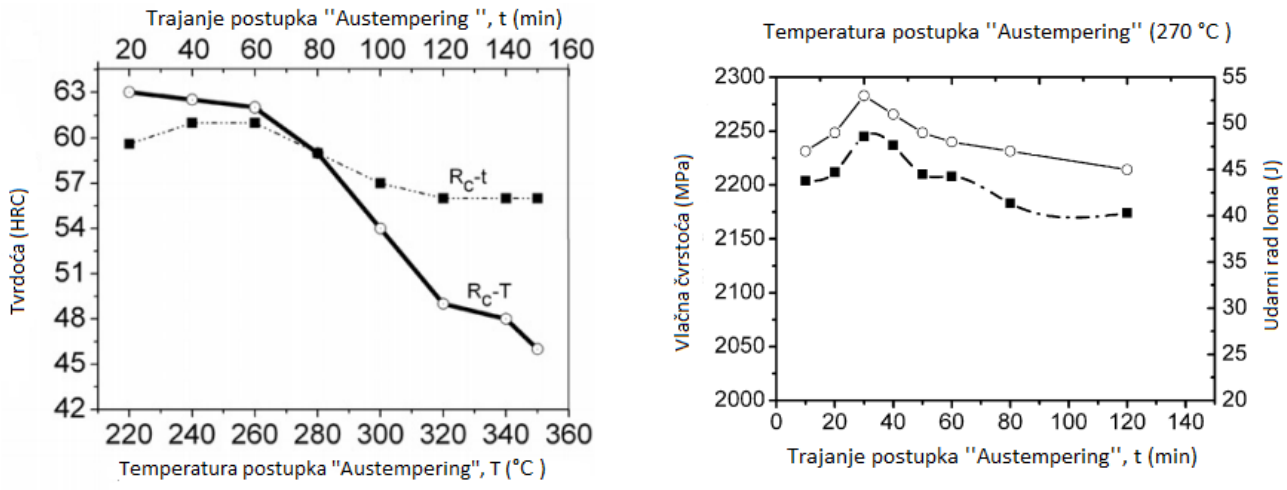
3.4.4 Izotermičko poboljšanje, „Austempering“

U literaturi se naziva i obrada na bainit. Postupci izotermičke obrade ostvaruju se prebacivanjem austenitiziranog izratka u kupku temperature izotermičke pretvorbe ϑ_{iz} (npr. u rastaljeno olovo, u rastaljenu solnu kupku) s tim da temperatura bude niža od temperature A_1, ali iznad temperature početka pretvorbe potlađenog austenita u martenzit. 1990. godine

F.C. Akbasoglu i D.V. Edmonds su pokazali da ležajni čelik sa bainitnom mikrostrukturom pruža bolju otpornost na trošenje i manja je vjerojatnost za pojavom vodikove krhkosti nego kod čelika sa martenzitnom mikrostrukturom. Međutim, čelik DIN 100Cr6 nije podložan procesu ''austemperinga'' (izotermičkom držanju iznad temperature početka pretvorbe austenita u martenzit, tj. M_s temperaturi) kako bi se dobila potpuno bainitna mikrostruktura, pogotovo u primjeni velikih razmjera, ponajviše zbog fizičkih ograničenja i složenosti toplinske obrade koja se zahtjeva. Kasnijim ispitivanjima došlo se do zaključka da dodatkom legirnih elemenata, kao na primjer molibdena (Mo), smanjilo bi se vrijeme postupka ''austemperinga'' kako bi se dobila pretežno bainitna struktura. Nadalje, čelik DIN 100Cr6 s potpuno bainitnom strukturom ima lošija mehanička svojstva nego isti čelik koji je kaljen i popušten. Stoga, čelik s potpuno bainitnom strukturom nije najbolji izbor pri odabiru materijala koji će se koristiti za dijelove ležajeva. Ali je moguće kombinacijom bainitne i martenzitne mikrostruktere, tj. dupleks strukturom, dobiti bolja mehanička svojstva (tvrdoća, vlačna čvrstoća i udarni rad loma). Najbolja kombinacija svojstava dobije se prilikom ''austemperinga'' pri temperaturi od 270 °C i trajanju od 30 minuta nakon kojeg slijedi gašenje u vodi kako bi se dobila bainitno-martenzitna mikrostruktura (slika 3.6). Takvom mikrostrukturom se postižu povišene vrijednosti tvrdoće (~62 HR_c), vlačne čvrstoće (~2250 MPa) i udarnog rada loma (~53 J) (slika 3.7). Ovu kombinaciju odličnih svojstava nije moguće dobiti konvencionalnom toplinskom obradom čelika DIN 100Cr6.



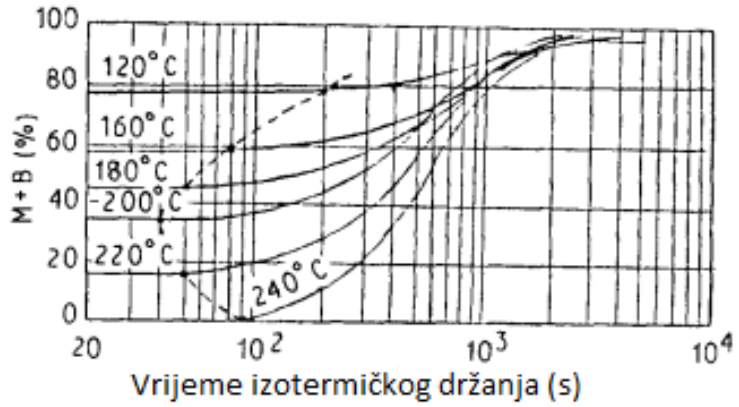
Slika 3.6 Mikrotvrdoća nakon ''Austempering'' postupka [12]



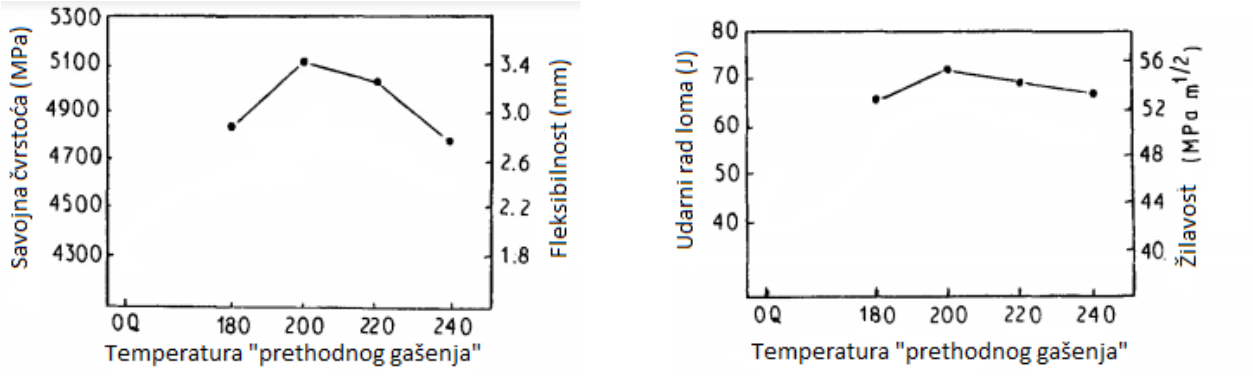
Slika 3.7 Utjecaj temperature i trajanja ''Austemperinga'' na mehanička svojstva [12]

3.4.5 Martenzitno-bainitna mikrostruktura s „prethodnim gašenjem“

Postupak s „prethodnim gašenjem“ (eng. *Pre-quenching*) poseban je po postizanju martenzitno-bainitne mikrostrukture. Postupak se sastoji od gašenja na temperaturu ispod temperature M_s i zatim ugrijavanja na temperaturu na kojoj dolazi to stvaranja bainita te držanja na toj temperaturi nakon čega slijedi ponovno gašenje. C. Li i J.L. Wang su 1993. godine ispitivali kako temperatura na kojem se provodi „prethodno gašenje“ utječe na razvoj martenzitno-bainitne mikrostrukture i kakav je utjecaj na mehanička svojstva. Došli su do rezultata da nakon austenitizacije na temperaturi 850 °C, kaljenjem na temperaturu nižu od temperature M_s može znatno smanjiti period inkubacije naknadne izotermne bainitske transformacije na temperaturi od 240 °C. Nakraće vrijeme inkubacije se ostvaruje pri kaljenjem na temperaturu od 200 °C (slika 3.8). Kada je temperatura „prethodnim gašenjem“ preniska, dolazi do prevelikog stvaranja martenzita i postupak ne pridonosi smanjenju vremena inkubacije. Najbolja kombinacija mehaničkih svojstava ostvaruje se pri temperaturi „prethodnog gašenja“ od 200 °C, koja je ispod temperature M_s, koje je popraćeno postupkom izotermičkog poboljšanja na temperaturi od 240 °C i trajanju od 18 minuta (potrebno je naknadno popuštanje na 200 °C i trajanju od 1,5 sat) (slika 3.9). Između mikrostruktura nastalih ovim postupkom i postupkom opisanim ranije (Izotermičko poboljšavanje u dijelu 3.4.4) nema značajne razlike.



Slika 3.8 Utjecaj trajanja izotermičkog držanja na omjer udjela martenzita i bainita [13]



Slika 3.9 Utjecaj temperature „prethodnog gašenja“ na mehanička svojstva [13]

3.4.6 Duboko hlađenje

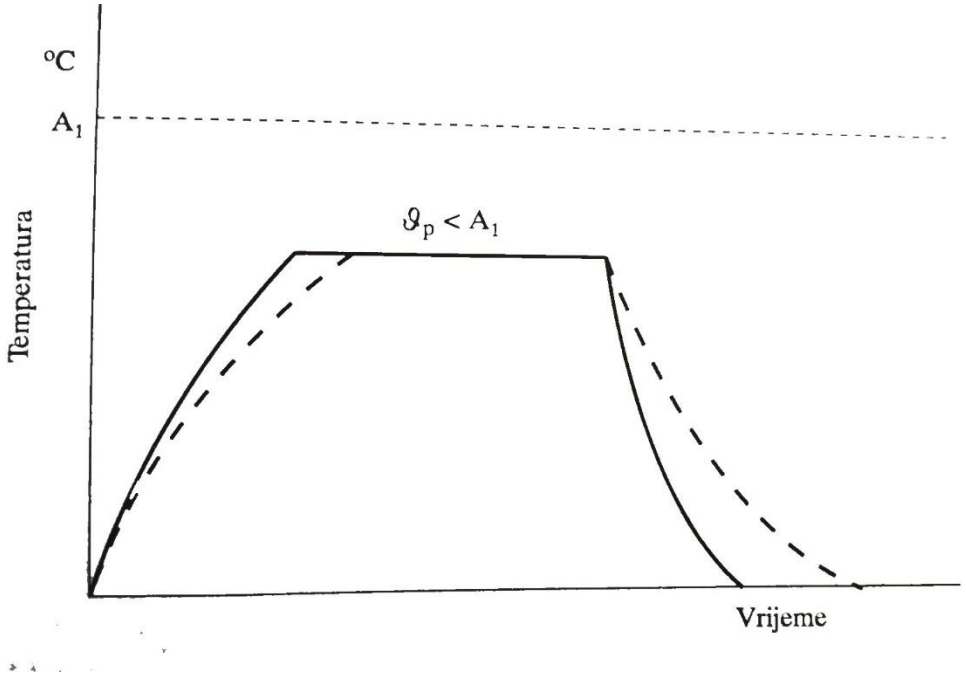
Duboko hlađenje je postupak kod kojeg se snižava količina zaostalog austenita u mikrostrukturi nakon kaljenja. Prilikom kaljenja kod čelika sa povišenim sadržajem ugljika hlađenje na sobnu temperaturu nije dovoljno da dođe do potupune transformacije u martenzit. Temperature početka (M_s) i temperatura kraja (M_f) martenzitne transformacije ovise o sadržaju ugljika u čeliku. Granična vrijednost je oko 0,65% C, a nakon tog udjela temperatura M_f pada ispod 0 °C. Postupak se provodi hlađenjem čelika ispod temperature M_f pomoću sredstva koje ima temperaturu znatno nižu od temperature M_f (smjesa alkohola i ''suhog leda'' – CO_2 ili tekući zrak, tekući dušik i sl. Smanjenjem količine zaostalog austenita postižu se poboljšanja mehaničkih svojstva poput povišenja tvrdoće, povišenje čvrstoće, povišenje kontaktne nosivosti čelika (otpornost na lokalnu plastičnu deformaciju) i povišenje otpornosti na abrazijsko trošenje.

3.4.7 Popuštanje

Popuštanje je postupak ugrijavanja kaljenog čelika na neku temperaturu ispod temperature A_1 (slika 3.10) u svrhu:

- povišenja žilavosti martenzita postignutog kaljenjem
- sniženja (redukcije) vlastitih zaostalih naprezanja (''napetosti'') martenzita
- postizanje dimenzijske postojanosti (kod visokolegiranih alatnih čelika pretvorbom zaostalog austenita u martenzit i karbid popuštanja)

Popuštanjem se redovno i snizuje tvrdoća postignuta kaljenjem, no to sniženje nikako nije cilj, nego samo nužna posljedica popuštanja.



Slika 3.10 Dijagram popuštanja čelika [9]

Prema visini temperature popuštanja (ϑ_p) postupci se popuštanja dijele na:

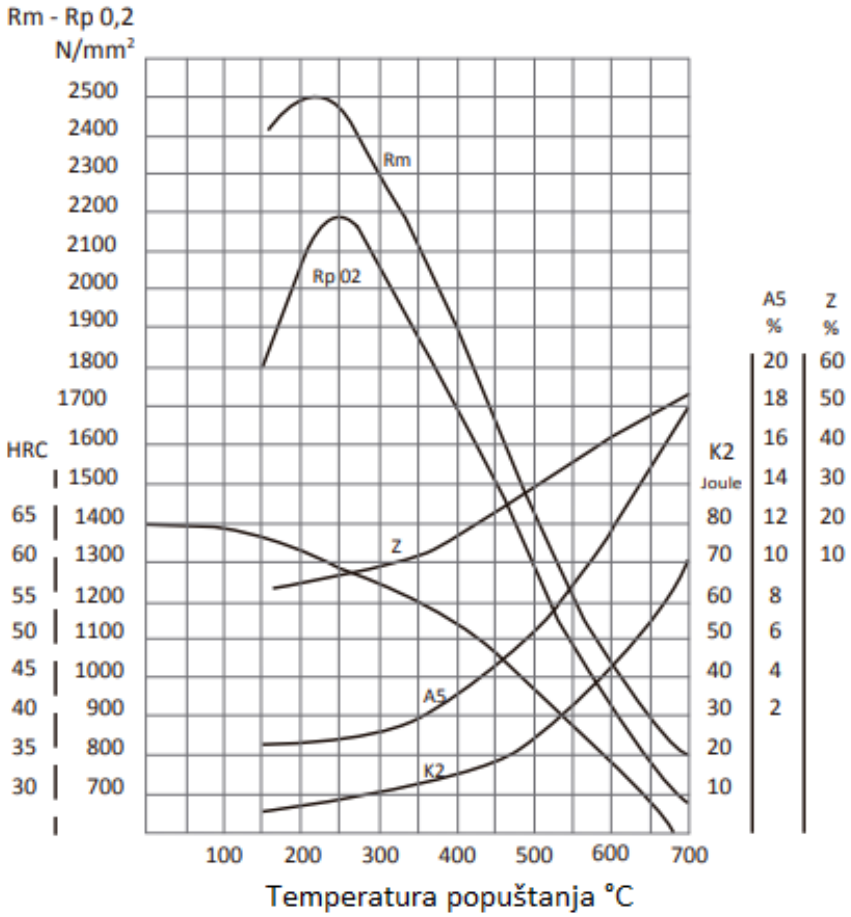
- niskotemperaturno popuštanje ($\vartheta_p < 220$ °C)
- srednjetemperaturno popuštanje (220 °C < ϑ_p < 400 °C)
- visokotemperaturno popuštanje (400 °C < $\vartheta_p < A_1$)

Pri popuštanju čelika (ovisno o parametrima postupka) dolazi do:

- sniženja prosječnog udjela ugljika u martenzitu na oko 0,25 %C i manje
- stvaranje karbida koji su nastali popuštanjem martenzita

– pretvorbe zaostalog austenita (u martenzit)

Pri toplinskoj obradi čelika DIN 100Cr6 provodi se niskotemperaturno popuštanje pri temperaturama od 150 °C do 300 °C određenim prema dijagramu popuštanja (slika 3.11).

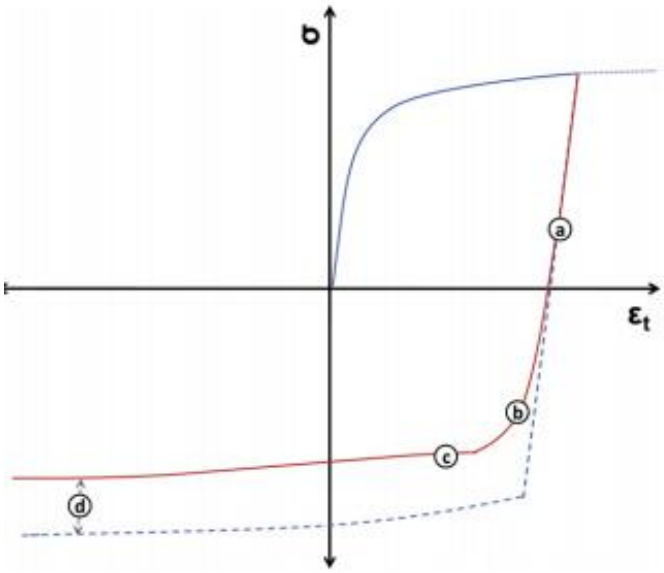


Slika 3.11 Dijagram popuštanja čelika DIN 100Cr6 [10]

3.5 Bauschinger-ov efekt u čeliku DIN 100Cr6

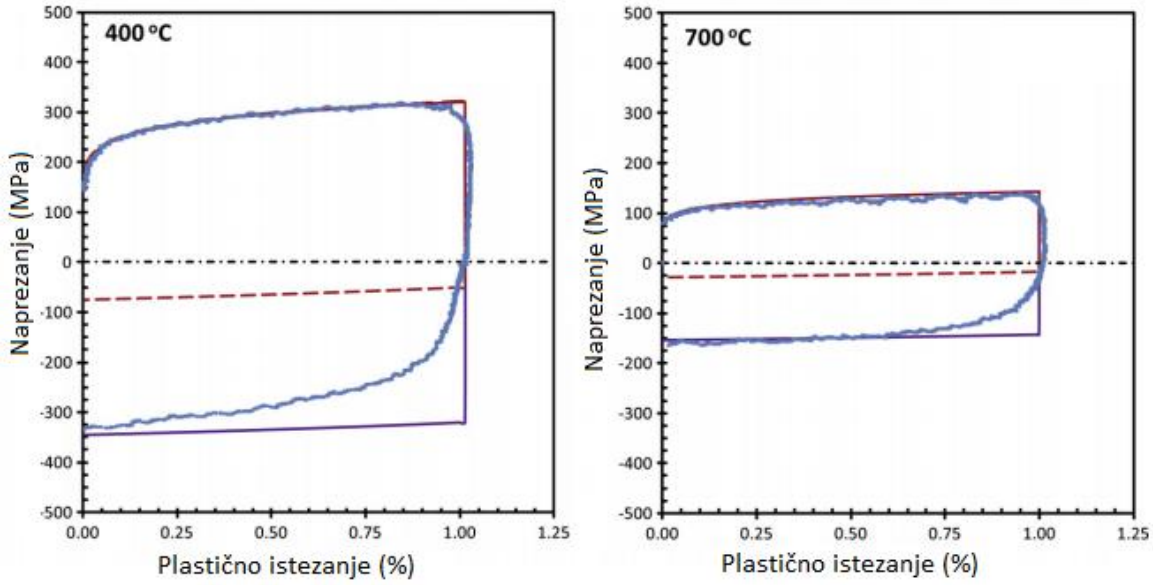
Tijekom toplinske obrade čeličnih dijelova, zbog zagrijavanja i faznih transformacija, dolazi do kontinuiranog povećanja unutrašnjih naprezanja. U kaljenom dijelu naprezanja variraju ovisno o vremenu, ovisno o termomehanički svojstvima, temperaturi na kojoj se obrađuje i brzini hlađenja dijela. Kada se prekorači lokalna granica razvlačenja na nekoj temperaturi u bilo kojoj točki dijela dolazi do nejednolike plastične deformacije, što rezultira izobličenjem i nastankom zaostalih naprezanja. Osim prilikom kaljenja to se može dogoditi i prilikom zavarivanja, a pogotovo prilikom zavarivanja u više prolaza. Baushinger-ovim efektom se naziva kad dolazi do reduciranja vlačne ili tlačne granice razvlačenja nakon

suprotnog naprezanja koje izaziva plastične deformacije (slika 3.12). Bauschinger-ov efekt se javlja u širokom rasponu materijala od monokristala do polikristala, čistih metala i legura, očvrsnutih metala pomoću disperziranih čestica i kompozita s metalnim matricama.



Slika 3.12 Prikaz dijagrama Bauschingerov-og efekta [14]

Na slici 3.12 se vidi krivulja naprezanja-istezanja za Bauschinger-ov test razvlačenja i sabijanja koja prikazuje nekoliko značajki Bauschinger-ovog efekta: uranjena pojava elastičnosti (točka a), prolazno omekšanje (točka b), stagnacija omekšanja uslijed rada (točka c), trajno omekšanje (točka d). Postoje dvije glavne teorije koje objašnjavaju mnogobrojne i kompliciranе mehanizme zbog kojih dolazi do Bauschinger-ovog efekta: nazivaju se, teorija unutarnjih naprezanja i teorija dislokacija. Teorija unutarnjih naprezanja je nastala ranije i temeljila se na djelovanju unutarnjih naprezanja i makroskopskih zaostalih naprezanja nastalih zbog nehomogenih deformacija u polikristalnim metalima. Teorija dislokacija se počela koristiti zato što korišteni mehanizmi u teoriji mogu opisivati Bauschinger-ov efekt u monokristalnim materijalima, što nije bio slučaj prilikom korištenja teorije unutarnjih naprezanja. U materijalu DIN 100Cr6 također se može vidjeti utjecaj Bauschinger-ovog efekta koji ima jači ili slabiji utjecaj ovisno o temperaturi na kojoj se materijal primjenjuje (slika 3.13).



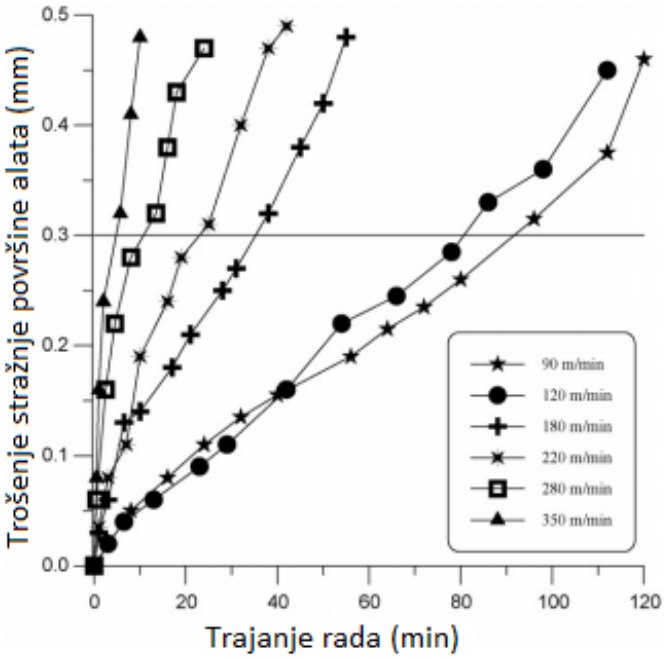
Slika 3.13 Utjecaj temperature na posljedice Baushingerovog efekta [14]

Zbog utjecaja Bauschinger-ovog efekta dolazi do nestabilne plastične deformacije (uslijed temperaturnih naprezanja koja se razvijaju oko čestica karbida prilikom kaljenja) i oštećenja materijala te dolazi do pucanja veza između austenitno-karbidnih čestica na niskim temperaturama.

3.6 Obrada odvajanjem čestica čelika DIN 100Cr6

Prilikom obrade odvajanjem čestica dolaze to kompleksne interakcije između alata i obratka na kontaktnoj površini. U tom sustavu dolazi do razvijanja velikih sila i visokih temperatura što dovodi do trošenja, a ponekad i do loma reznog alata. Uobičajeno takvi uvjeti dovode do oštećenja kontaktne površine, pojavljuju se oštećenja na alatu i na obratku, ili smanjenju preciznosti oblika i dimenzija obratka ili promjene mehaničkih svojstava materijala. Proces trošenja reznog alata se može okarakterizirati kao komplicirani proces zbog fizičkih i kemijskih promjena na dodirnim površinama sustava koje su rezultat kontinuiranog odvajanja površinskih slojeva. Također trošenje utječe na dimenzijske parametre alata, količinu razvijene topline, trajanje alata i preciznost dimenzija obratka. Tehnološkim razvojem moguće je proizvesti materijale koji imaju povišenu tvrdoću (kaljeni čelici i otvrdnuti lijevovi), što rezultira sa sve težom obradom odvajanjem čestica. Stoga je potrebno razviti odgovarajuće rezne alate, koji će odgovarati novim zahtjevima. Materijali koji imaju povećanu otpornost na abraziju i povećanu tvrdoću trebaju biti obrađivani puno tvrđim alatima poput alata s polikristalnom bor nitridnom mikrostrukturom (kubična

kristalna rešetka). Prilikom tokarenja trošenje reznog alata ovisi o brzini rotiranja obratka (v_c) i trajanju mehaničke obrade (t), što je prikazano na slici 3.13.



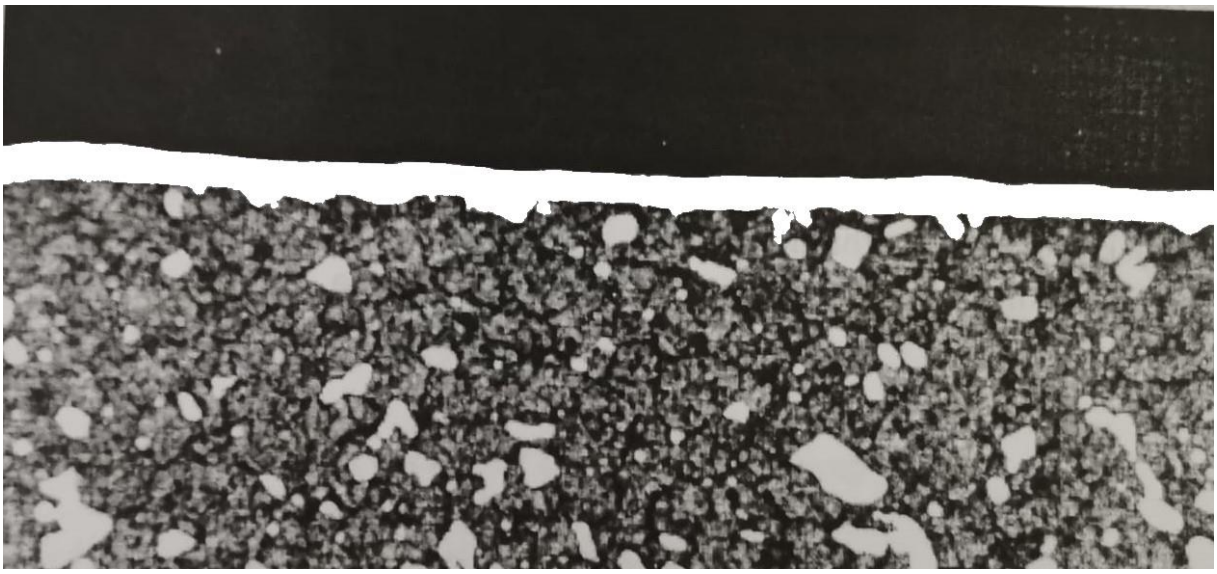
Slika 3.14 Trošenje alata u ovisnosti o brzini okretanja obratka i trajanju obrade [15]

Optimalna produktivnost obrade čelika DIN 100Cr6 ostvaruje se alatom s CBN (engl. *cubic bor nitride*, prevedeno bor nitrid s kubičnom kristalnom rešetkom) pri brzini rotacije obratka od 120 m/min. Hrapavost površine nakon obrade ovisi o režimu obrade i trošenju CBN alata. Povećanjem brzine rotiranja obratka povećava se trošenje alata što direktno dovodi do smanjenja kvalitete površine, odnosno povećanja hrapavosti. Toplina stvorena obradom je većinom se odvodi kroz odvojenu česticu i tako značajno smanjuje temperaturu obratka i reznog alata.

4. PACVD prevlačenje čelika DIN 100Cr6

4.1 Toplinski postupci prevlačenja

Strojni dijelovi, najčešće alati, nakon kaljenja i popuštanja te završne strojne obradbe toplinski se prevlače tankim i vrlo tvrdim slojevima u svrhu povišenja otpornosti na trošenje a time i produljenja njihove trajnosti. Prevlače se neoksidnim keramičkim spojevima (TiC, TiN, TiCN) (slika 4.1), slojevima oksidnih keramičkih spojeva (Al_2O_3), a u najnovije vrijeme i slojevima dijamanata i dijamantu sličnim spojeva. Postoje postupci kemijskog prevlačenja iz parne faze (engl. *Chemical Vapour Deposition*, skraćeno: CVD-postupci) koji se izvode pri temperaturama oko 900 °C i postupci fizikalnog prevlačenja iz parne faze (engl. *Physical Vapour Deposition*, skraćeno: PVD-postupci) koji se izvode pri temperaturama oko 500 °C. Svi navedeni postupci razvijeni su s ciljem postizanja više otpornosti na trošenje.

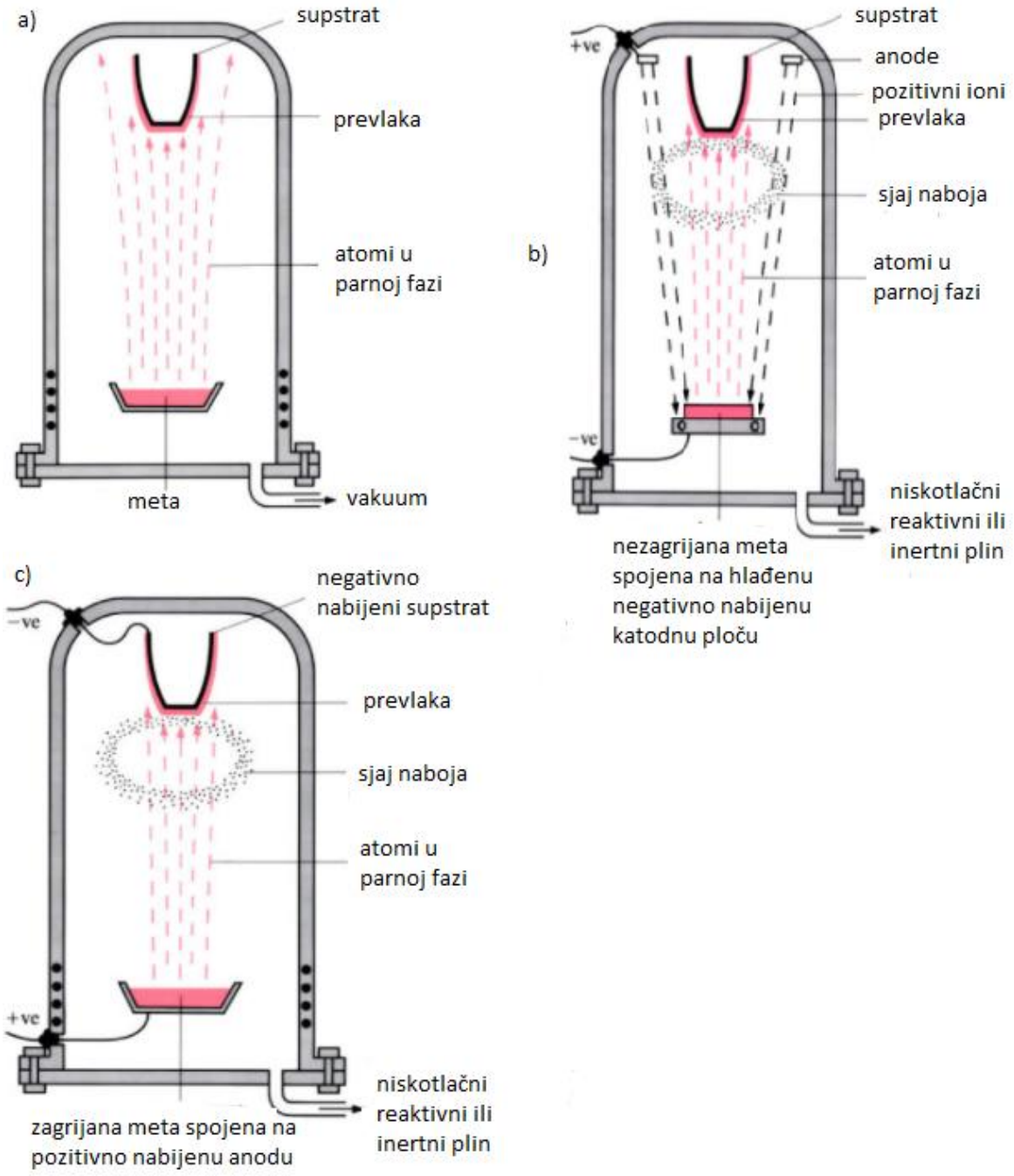


Slika 4.1 Presjek prevlake TiC na alatnom čeliku [9]

4.2 PVD postupak

Fizikalni postupak nanošenja prevlaka iz parne faze u kojem nastaje tanki sloj na površini obratka. Postupkom se mogu nanositi slojevi od čistih metala, legura ili keramika, a slojevi su uobičajeno debljine između 1 i 15 µm. Debljina jednoslojne PDV prevlake je uobičajeno 1-5 µm, dok je debljina višeslojnih prevlaka do 15 µm. Uz iznimke poput CrN prevlake koja može dostići debljine do 100 µm. U PVD postupku ostvaruje se isparivanje i nanošenje atoma, iona ili molekula materijala izvora (meta) na obradak (supstrat). PVD

postupci se dijele na tri glavne tehnike: toplinsko isparavanje (engl. Thermal evaporation), otprašivanje (engl. sputtering) i ioniranje (engl. ion plating) (slika 4.2).



Slika 4.2 PVD tehnike: a) toplinsko isparavanje, b) otprašivanje, c) ioniranje [16]

Kod postupka toplinskog isparavanja koristi zagrijavanje materijala izvora kako bi se formirala para koja se zatim kondenzira na obratku u obliku prevlake. Zagrijavanje se provodi pomoću vrućih niti (filamenta), električnog otpora, elektrona ili laserske zrake i električnog luka. Otprašivanje uključuje električno stvaranje plazme između materijala izvora i obratka.

Ioniziranje je postupak koji je zapravo kombinacija toplinskog isparavanja i prskanja. Sva tri načina se mogu koristiti za izravno nanošenje materijala ili ''reaktivno'' (neizravno) pri kojem se kemijska reakcija događa u pari ili plazmi između atoma materijala izvora i reaktivnih plinova. Postupak se provodi pri temperaturi obratka od 200 do 400 °C, pri kojima nema faznih transformacija, što je znatno niže od temperature na kojoj se provodi CVD postupak. PVD je postupak kod kojeg obradak ne smije biti zaklonjen ili na neki drugi način ograđen od materijala izvora koji isparava. U engleskom govornom području se to naziva line-of-sight (vidno polje) postupak. Neki obratci se rotiraju kako bi prevlaka bila ravnomjerno rasprostranjena. Trajanje PVD postupka je uobičajeno 1 do 3 sata po jednoj šarži. Trajanje postupka ovisi o materijalu kojim se prevlači i željenoj debljini prevlake. Prevlake se nanose brzinom od 50 do 500 µm/h ovisno o tehnici koja se koristi. Prevučene površine nije potrebno dodatno mehanički ili toplinski obrađivati. PVD postupci se koriste za aluminijske dijelove i keramičke otpornike u elektroničkoj industriji, nereflektirajuće keramičke prevlake u optici, u dekorativne svrhe na plastici, korozijski postojane prevlake na lopaticama parnih turbina, te kao zaštitne prevlake kod reznih alata i dijelova preša.

4.3 CVD postupak

Kemijski postupak nanošenja prevlaka iz parne faze u kojem pri visokim temperaturama dolazi do kemijske reakcije na površini ugrijanog supstrata, gdje su materijali kojim se prevlači u plinovitom stanju (slika 4.3). Najjednostavniji CVD proces je pirolitička dekompozicija plinskih spojeva na supstratu pri kojem nastaje prevlaka kao kruti produkat kemijske reakcije. Formule za kemijske reakcije kod kojih na površini nastaju čvrte prevlake od volframa (W), titan karbida (TiC) i titan nitrida (TiN):

$$\mathrm{WF_6 + 3H_2 = W(s) + 6HF\ (g)} \tag{3.3.1}$$

$$\mathrm{TiCl_4 + CH_4 = TiC\ (s) + 4HCl\ (g)} \tag{3.3.2}$$

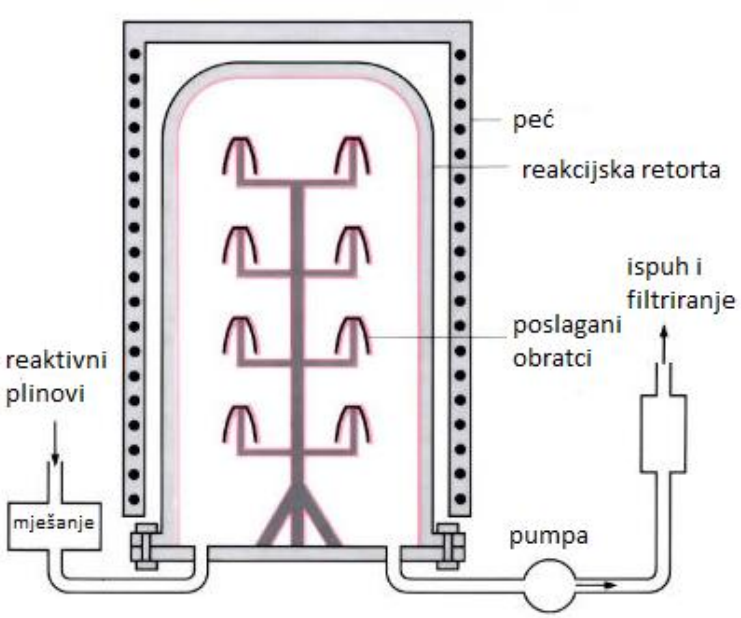
$$\mathrm{TiCl_4 + \frac{1}{2}N_2 + 2H_2 = TiN\ (s) + 4HCl\ (g)} \tag{3.3.3}$$

U reakcijama navedenim iznad reagiraju samo plinovi, ali ponekad tijekom CVD postupak znatnu ulogu ima i materijal supstrata. Prilikom prevlačenja ugljičnih i

cementiranih čelika slojem titan karbida (TiC) dolazi do reakcije s ugljikom u čeliku o čemu ovisi brzina rasta debljine sloja.

$$\mathrm{TiCl_4 + C + H_2 = TiC\,(s) + 4HCl\,(g)} \qquad (3.3.4)$$

Ova reakcija može dovesti do smanjenja udjela ugljika u čeliku (razugljičavanje) neposredno ispod sloja prevlake, što treba uzeti u obzir pri odabiru materijala supstrata.



Slika 4.3 Shematski prikaz uređaja za CVD postupak [17]

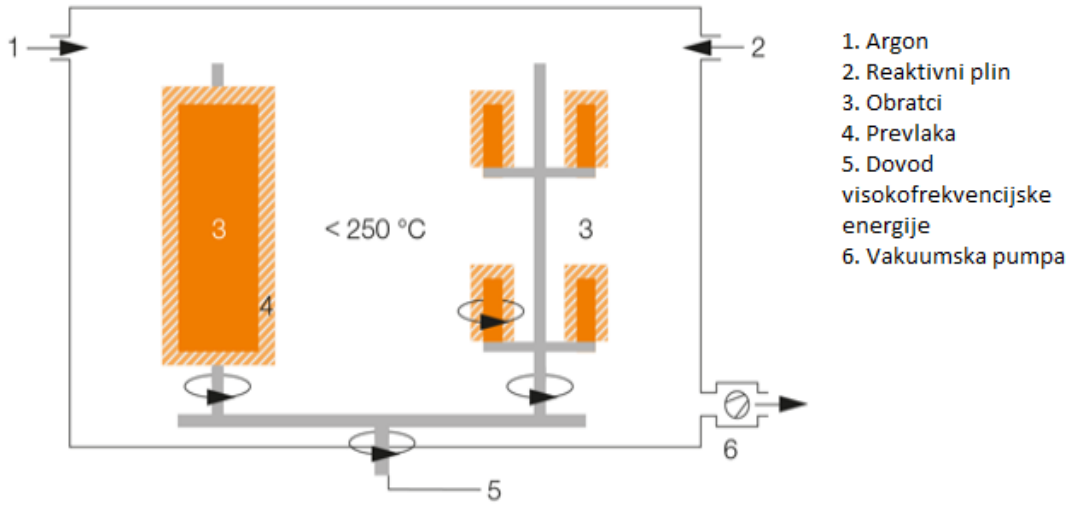
Glavna prednost CVD postupka je što se koriste plinovi, što se odnosi na njihove karakteristike. Jedna od tih karakteristika je što CVD postupak nije line-of-sight (vidno polje) odnosno obratci ne moraju biti posebno pozicionirani kao kod PVD postupka, te se mogu prevući teško dostupna mjesta. CVD postupak pruža mnoge prednosti nad ostalim postupcima prevlačenja. To uključuje širok raspon materijala za prevlačenje na bazi metala, legura i keramike, te kemijski spojevi poput karbida, nitrida, borida i oksida. Prevlake koje se nanose mogu biti izrazito male poroznosti i visoke čistoće. Postupak može biti ekonomičan, ako se prevlači veliki broj šarži s velikim brojem dijelova. CVD postupak se provodi u temperaturnom rasponu od 600 °C do 1100 °C pri atmosferskom tlaku ili vakuumu. Pri tako visokim temperaturama može doći do negativnih posljedica u materijalu supstratu. Primjerice u čelicima, često dolazi do zagrijavanja na temperaturu austenitizacije zbog kojeg je potrebno nakon postupka prevlačenja dodatno toplinski obraditi supstrat kako bi se dobila

željena mehanička svojstva. CVD postupak se koristi u područjima kod kojih su osnovni najkvalitetniji materijali dostigli svoja granična svojstva. To je slučaj kod alata za oblikovanje deformiranjem i alata za obradu odvajanjem čestica. Najpogodniji materijali za obradu ovim postupkom su tvrdi metali i cermeti (metalnokeramički kompoziti). Postupak se koristi u biomedicini, mikro i nano uređajima, fotoelektričnoj i optoelektroničkoj opremi za kompozite, te poluvodičkoj industriji. CVD postupak se može podijeliti u više kategorija (tehnika) ovisno o tlaku na kojem se postupak provodi ili ovisno o izvoru topline, odnosno vrsti energije, koji se koristi za aktivaciju kemijske energije. Neke tehnike CVD postupka su:

- CVD postupak pri atmosferskom tlaku (engl. Atmospheric-pressure CVD,skraćeno APCVD)
- CVD postupak pri niskom tlaku (engl. Low-pressure CVD, skraćeno LPCVD)
- CVD postupak pri visokom vakuumu (engl. Ultrahigh Vaccum CVD, skraćeno UVCVD)
- Plazmom potpomognut CVD postupak (eng. Plasma Assisted CVD, skraćeno PACVD)
- Laserski CVD postupak (engl. Laser CVD, skraćeno LCVD)
- Foto CVD postupak (engl. Photo-initiated CVD, skraćeno PICVD)

4.4 PACVD postupak

Plazmom potpomognuti CVD (PACVD ili PECVD, engl. *Plasma enchanced CVD*) postupak jedan je od hibridnih tehnika CVD postupka kojim se proširuje raspon spojeva koji se primjenjuju za prevlačenje (prekursori), reaktivni organski i anorganski, te također za inertni spojevi. Organski i anorganski monomeri koji se koriste u ovom postupku prolaze kroz raspadanje i radikalnu polimerizaciju dok su izloženi visoko energetskom mlazu plazme, te nastaje tanak sloj prevlake na obratku (slika 4.4). PACVD koristi prednosti PVD i CVD postupaka (tablica 4).



Slika 4.4 Shematski prikaz PACVD postupka [18]

Tablica 4. Prednosti i nedostaci postupaka za prevlačenje

CVD	PVD	PACVD
Prednosti: - Nije line-of-sight postupak - velika brzina prevlačenja - guste prevlake -moguće prevlačenje s više spojeva odjednom	Prednosti: - kontrola taloženja na atomskoj razini - nisu potrebni posebni spojevi - sigurnije od CVD postupka zbog nedostka otrovnih spojeva - nema nusprodukata	Prednosti: - do određene mjere nije line-of-sight postupak - velika brzina prevlačenja - niske temperature - koriste se organski i anorganski spojevi - specifična svojstva prevlaka - toplinska i kemijska stabilnost - visoka otpornost na koroziju i otapala - nema ograničenja na konstrukciju i sastav obradaka

Tablica 4. Prednosti i nedostaci postupaka za prevlačenje (nastavak)

CVD	PVD	PACVD
Nedostaci: - visoke temperature - otrovnost nekih spojeva - većinom se koriste anorganksi spojevi	Nedostaci: - line-of-sight postupak - niska brzina prevlačenja - vrlo tanke prevlake	Nedostaci: - niska otpornost na vlaku i starenje - postojanost tlačnih i zaostalih naprezanja u prevlaci - dugo trajanje postupka - postojanost otrovnih i eksplozivnih plinova u plazmi - visoka cijena opreme

Razvoj PACVD postupka započinje 50. i 60. godina prošlog stoljeća, kada se prvi put počinje proučavati raspad organskih spojeva u prisutnosti elektronskog snopa. U elektrooptičkim sustavima nakon izloženosti površine elektronskom snopu dolazi do taloženja tankog sloja. Znanstvenici su proučavanjem tog efekta došli do zaključka da dolazi do interakcije između elektronskog snopa i para organskih spojeva prisutnih u vakuumu. Zaključili su da je mehanizam nastanka tankog sloja polimerizacija slobodnih radikala organskih molekula nakon izlaganja elektronskom snopu praćeno taloženjem na ciljanoj površini. U PACVD postupku potreban je vanjski izvor energije za ionizaciju atoma i molekula (nastajanje plazme), sustav za smanjivanje tlaka (održavanje plazme) i reakcijska komora. Monomeri koje se koriste u ovom postupku su uglavnom u plinovitom ili tekućem stanju koje se lako može ispariti, međutim postoje studije koje koriste čvrste monomere. Kada se plinoviti ili tekući spojevi s visokim tlakom pare puste u reakcijsku komoru dolazi do disocijacije i aktivacije prekursora i to u prisutnosti plazme, što omogućuje taloženje na puno nižim temperaturama u odnosu na CVD postupak.

Jedna od metoda proizvodnje plazme je zagrijavanje plina, ali temperature ionizacije su vrlo visoke i to može biti ograničavajuće za ovu metodu. Drugi način proizvodnje plazme je pomoću električne energije na različitim frekvencijama. Dijele se na plazmu ostvarenu

istosmjernim električnim poljem (DC), plazmu mikrovalne frekvencije (MW), poznatu i kao žarno pražnjenje, radiofrekvencijsku plazmu (RF) i plazmu električnog luka. Korištenjem dviju elektroda u reakcijskoj komori, visokofrekventna energija se primjenjuje na plin koji se ionizira. Kada se koristi mikrovalna frekvencija, plazma se stvara primjenom visokofrekventnog električnog polja frekvencije 2,45 GHz pri niskom tlaku na plinova poput kisika, argona ili dušika koji se ioniziraju (plinovi nosači plazme). Na tako visokim frekvencijama elektroni se zbog svoje male mase mogu ubrzati i doći na višu razinu energije, te će doći do povećanja njihove temperature. To nije slučaj kod težih iona i njihova temperatura ostaje niska. Takva plazma se naziva neizotermna plazma. Elektroni sa svojom visokom energijom su ti koji se sudaraju s molekulama plina kojima prevlačimo, tako plinovi postaju reaktivni i započinju taloženje na površini obratka. Radiofrekvencijska plazma se koristi pri prevlačenju materijala koji ne provode električnu struju. Plazma nastala pomoću električnog luka je izrazito visoke temperature i zahtjeva veliku količinu energije. Uglavnom se koristi za taloženje dijamanata gdje se proces odvija pri višim tlakovima. Prednosti korištenja plazme nastale u električnom luku je smanjeno nastajanje atoma vodika, velika brzina taloženja i velika debljina prevlake. Glavni nedostatak ove metode je visoka temperatura, stoga je potrebno provesti hlađenje obratka. Na slici 4.5 prikazan je PACVD uređaj s plazmom ostvarenom pulsiranjem istosmjernog električnog polja.



Slika 4.5 PACVD uređaj na Fakultetu strojarstva i brodogradnje tvrtke Rübig GmbH

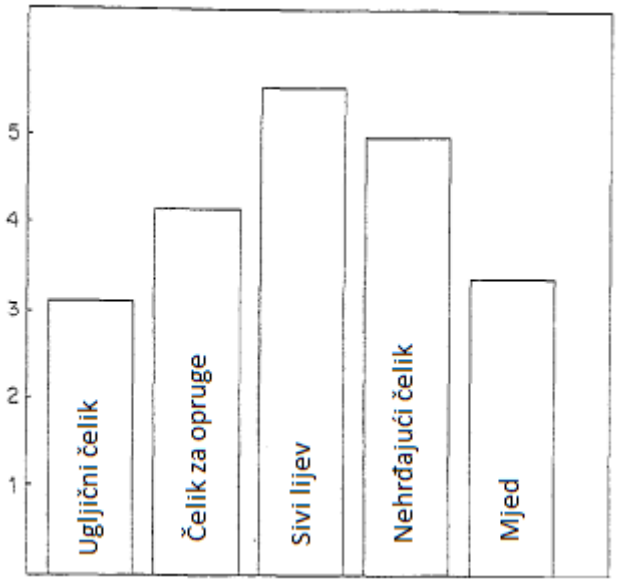
Najveći nedostatak PACVD postupka je veći udio vodika u prevlaci, što je posljedica korištenja plazme. Sintetizirani polimeri unutar plazme imaju neke nedostatke, poput nestabilnosti protiv starenja i vlage, što je posljedica slobodnih radikala koji postoje u njima. Nestabilnost u prisutnosti vlage se pojavljuje se zbog polarnih bočnih skupina koje mogu apsorbirati vodu. Kada se postupak provodi sa valovima nižih frekvencija dolazi do tlačnih i zaostalih naprezanja u prevlaci što može dovesti do pucanja.

PACVD se prvotno počeo koristiti u mikroelektronici, odnosno električnim izolacijskim prevlakama, vodljivim prevlakama, poluvodičima, difuzijskim maskama i kondenzatorima. Nakon više od 10 godina razvoja dolazi i do širenje primjene postupka, te on tako počinje koristiti za izradu integriranih sklopova, solarnih ćelija, tranzistora, fotonaponske i fotonske opreme. Anorganske prevlake imaju primjenu u pakiranju hrane i biomedicinskoj opremi. Svojstva prevlaka se mogu lako kontrolirati kako bi se dobili homogene organske prevlake na velikim podlogama (silicij i staklo) s različitim mehaničkim, kemijskim, toplinskim ielektričnim svojstvima. Zbog svojeg relativno umjerenog karaktera ovaj postupak se odnedavno koristi za razne biološke primjene. Biološke primjene uključuju imobilizaciju biomolekula (enzima i proteina), biometalizacija nanočestica zlata, srebra i platine uz pomoć DNA,aminokiselina ili proteina, razgradnja i smanjenje molekularne težine poput hitozana kako bi se poboljšala njihova svojstva, promjena funkcionalnosti površine dodavanjem funkcionalnih skupina (aminske, karboksilne i silanske skupine), izrada hibridno organske i anorganske prevake za poboljšanje dielektričnih svojstava. Takva površinska obrada implantata i biomaterijala za primjenu u biosenzorima.

4.5 Prevlake i njihova svojstva

U kasnim 1960.-im počinju se koristiti prevlaka TiN (titan nitrid) i ostale prevlake otporne na trošenje. Praćeno napretkom u tehnologijama obrade (CVD i PVD) koje omogućavaju uspješno prevlačenje čeličnih alata i komponenti ovim prevlakama. Imalo je revolucionarni učinak na smanjenje troškova proizvodnje u raznim područjima industrije. Iako su prevlake dovele do znatnog produljenja radnog vijeka reznih alata, to je samo mali dio svih prednosti koje ti materijali posjeduju. Kombinacija visoke otpornosti na trošenje, malo trenje i odlična kemijska stabilnost omogućuje reznom alatu veće brzine i veću dubinu obrade dok u isto vrijeme produžuje radni vijek (slika 4.6), povećava kvalitetu površine i

smanjuje potrošnju energije. Smanjenje troškova zbog povećanja produktivnosti i smanjenja vremena zastoja znatno više utječe nego prednosti produljenja radnog vijeka alata. Isto vrijedi i za ostale alata i dijelove u strojarstvu (kalupa, preša, ležajeva). Prilikom oblikovanja metala alati koji su prevučeni nitridnom prevlakom s jednom ili više komponenti su otporniji na trošenje i proizvode dijelove kvalitetnije površine. U preradi polimera ove prevlake generiraju značajno manje financijske troškove kroz bolju završnu obradu komponenti, niže trošenje kalupa i lakše izbacivanje komponenti iz kalupa.

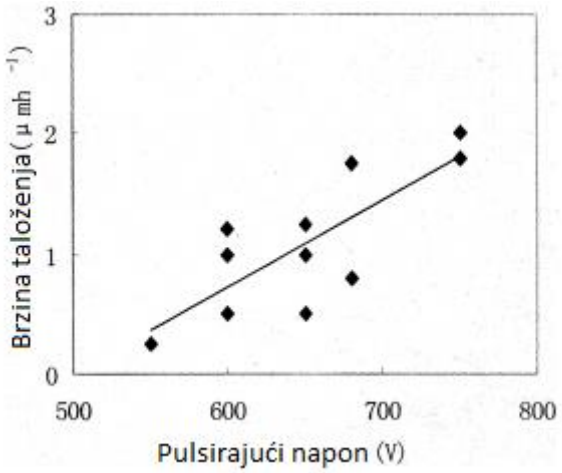


Slika 4.6 Koeficijent povećanja radnog vijeka materijala nakon prevlačenja TiN prevlakom [19]

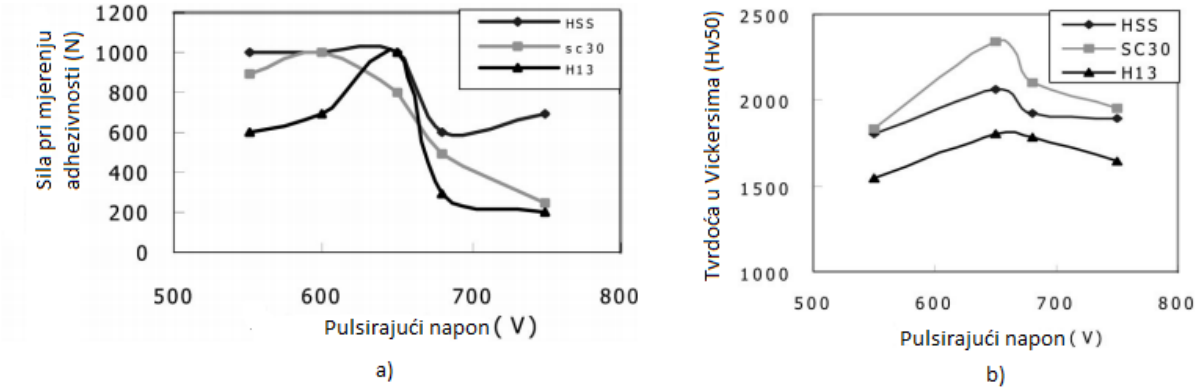
4.5.1 Prevlaka TiN

Titan nitrid prevlaka sa svojom prepoznatljivom zlatnom bojom jedna je od najpopularnijih prevlaka. Koristi se kao opća prevlaka kako bi se poboljšala svojstva osnovnog materijala. Odlike prevlake su dobra otpornost na trošenje, toplinska stabilnost i nizak faktor trenja. Koristi se kao podsloj kada se osnovni materijal prevlači s više prevlaka, ponajviše zbog svoje odlične adhezivnosti. Svojstva prevlaka ovisi o udjelu klora u prevlaci, koji se može kontrolirati prilikom postupka, i o vrsti plazme koja se koristi u PACVD postupku. Korištenjem izmjenične struje prilikom postupka može se utjecati na adhezivnost, brzinu taloženja prevlake, veličinu zrna, tvrdoću i zaostala naprezanja. Prilikom korištenja izmjenične struje jedan od važnijih parametara koji se regulira je napon. TiN prevlake koje su prevučene korištenjem visokog napona imaju veća zrna i manju tvrdoću, ali brzina nanošenja

je veća nego kada se koristi niski napon (slika 4.7). Adhezivnost i zaostala naprezanja se smanjuju povišenjem napona. Kada se koristi plazma napona vrijednosti manjeg od 650 V dolazi do nastajanja međusloja između prevlake i osnovnog materijala (slika 4.8). To se događa zbog male udaljenosti između površine obratka i prostora u kojem se događaju kemijske reakcije između plazme i aktivnih plinova. Kada je napon plazme iznad 650 V taj prostor kemijskih reakcija je dalje od površine obratka i ne dolazi do pojave međusloja. Pojavom međusloja povećava se adhezivnost prevlake. Izmjenična struja ima mali utjecaj na zaostala naprezanja i adhezivnost. Povećanjem frekvencije izmjenične struje dolazi do smanjenje brzine taloženja prevlake. Kod kratkih utora malih promjera (Φ2 x 10 mm) moguće je jednoliko prevlačenje pri visokoj frekvenciji zbog potisnutih lukova unutar utora.



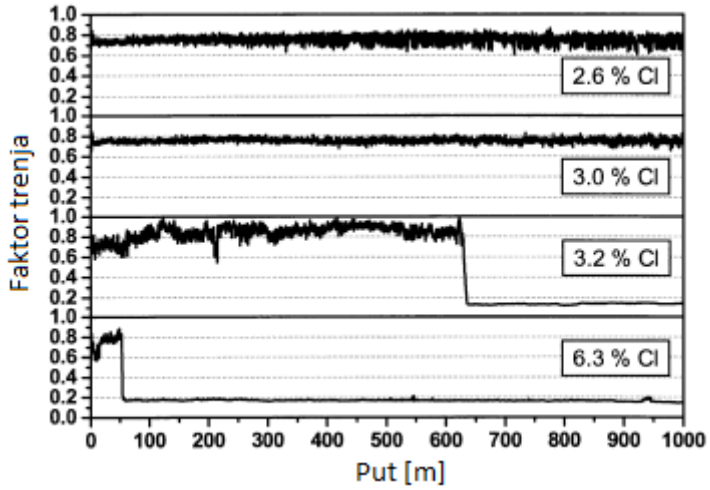
Slika 4.7 Brzina taloženja TiN prevlake u odnosu na visinu napona [20]



Slika 4.8 a) Ovisnost adhezivnosti TiN prevlake na razne materijale o pulsirajućem naponu, b) Mikrotvrdoća TiN prevlake na raznim materijalima ovisno o pulsirajućem naponu [20]

Na mikrostrukturu i mehanička svojstva prevlake znatno utječe udio klora (slika 4.9). S porastom udjela klora između 2.6 % i 6.3 % dolazi do promjene orijentacije unutar

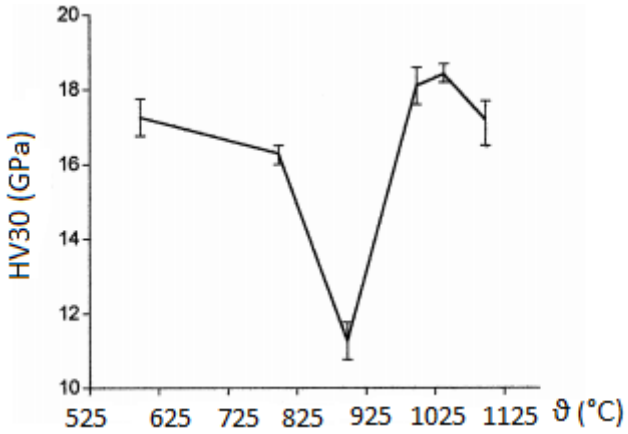
strukture. Dolazi do promjene iz 100 orijentacije u slobodnu orijentaciju što dovodi do smanjenja zrna i hrapavosti površine. Dok je udio klora manji od 3.2 % ne dolazi do pada mehaničkih svojstava poput Youngovog modula elastičnosti i tvrdoće. Povećanjem udjela klora dolazi do znatnog pada. Udio klora utječe i na ponašanje faktora trenja. Prevlake sa udjelom klora do 3.2% imaju stabilan faktor trenja vrijednosti oko 0.75, dok s povećanjem udjela klora iznad te vrijednosti i nakon vremena uhodavanja dolazi do smanjenja faktora trenja do minimalnih 0.17 (faktor trenja u sustavu TiN prevlaka i kuglica od čelika DIN 100Cr6). Do toga dolazi zbog izlučivanja klora na granicama zrna čemu slijedi nastajanje tankog samopodmazujućeg sloja prilikom reakcije klora sa vlagom. Na faktor trenja utječe i temperatura pri kojoj se ispituje, tako na temperaturama između 60 °C i 100 °C dolazi do povećanja faktora trenja. Uzrok tome je smanjena vlažnost i ne dolazi do nastajanja samopozmazujućeg sloja između dodirnih površina. Na temperaturama iznad 100 °C dolazi do malog pada faktora trenja zbog nastanka oksidnog sloja na površini prevlake. Na temperaturama višim od 200 °C dolazi do povećanja trošenja prevlake, primarno abrazijom, što je posljedica smanjenja tvrdoće prevlake.



Slika 4.9 Promjena faktora trenja u ovisnosti o koncentraciji klora tijekom prevlačenja (faktor trenja za par TiN prevlaka i čelična kuglica) [21]

Zagrijavanjem TiN prevlake na temperature između 800 °C i 1100 °C i hlađenjem pod zaštitom vodika na 125 °C, odnosno toplinska obrada postupkom žarenja, dolazi do promjene u mikrostrukturi prevlake i shodno tome, dolazi do pozitivne promjene u mehaničkim svojstvima poput otpornosti na trošenje, otpornosti na koroziju i adhezivnosti. Žarenjem se kristalnost prevlake, čime se povećava otpornost na trošenje i otpornost na

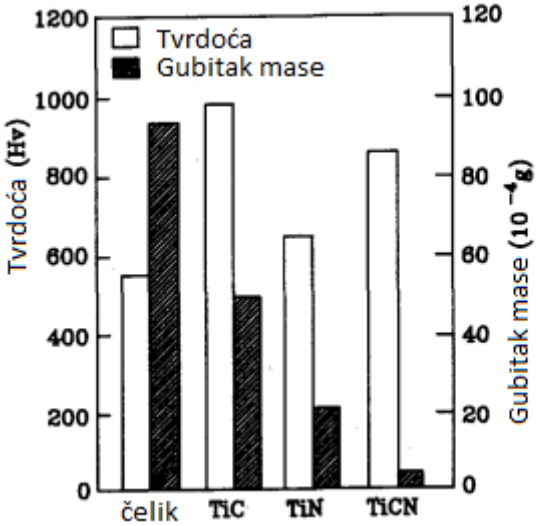
korozijsko djelovanje. Tijekom žarenja dolazi do difuzije atoma između prevlake i osnovnog materijala što povećava adhezivnost i tvrdoću. Zagrijavanjem na temperature iznad 900 °C može se značajno sniziti udio klora u prevlaci. Minimalna mikrotvrdoća prevlake je nakon žarenja na temperaturu od 100 °C zbog promjena u mikrostrukturi (slika 4.10).



Slika 4.10 Mikrotvrdoća TiN prevlake ovisno o temperaturi naknadnog žarenja poslije prevlačenja [22]

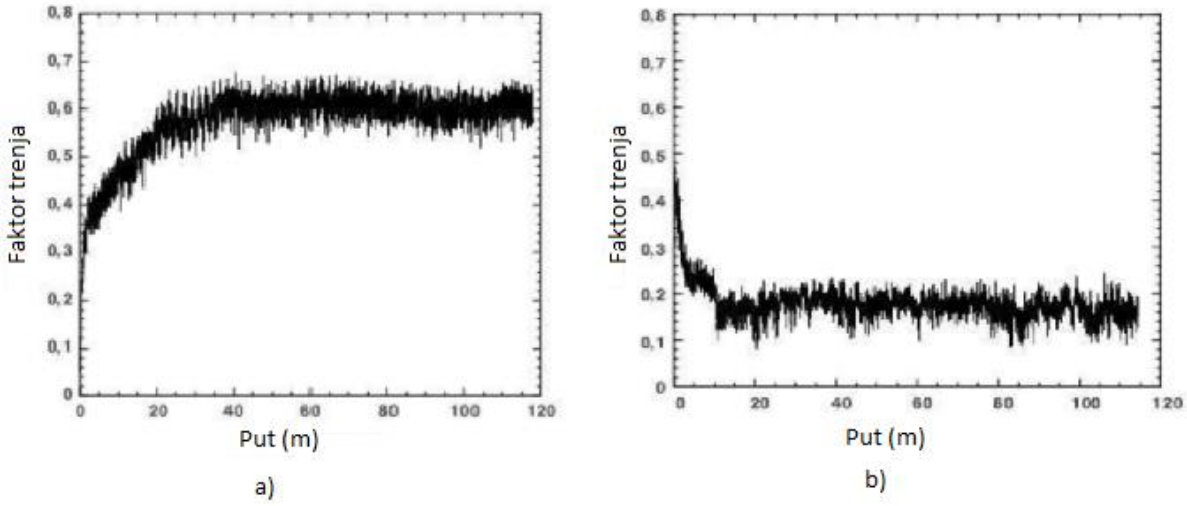
4.5.2 Prevlaka TiCN

Titan karbonitrid prevlaka se može koristiti samostalno ili kao nadsloj TiN prevlaci. Prevlaka ima prednosti naspram TiN (titan nitrid) i TiC (titan karbon). Prevlaka ima lako podesivu mikrostrukturu i kemijska svojstva. Ima bolju lomnu žilavost i veću tvrdoću od TiN prevlaka, a istovremeno ima bolju postojanost pri povišenim temperaturama i bolju adhezivnost od TiC prevlaka. TiCN prevlaka je otpornija na trošenje (slika 4.11).



Slika 4.11 Promjena tvrdoće i gubitak mase materijala prevučenog TiCN prevlakom usporedno s neprevučenim čelikom, TiN i TiC prevlakama [23]

Tijekom prevlačenja parametri koji imaju veliki utjecaj su temperatura na kojoj se postupak provodi i protok plinova argona (Ar) i metana (CH_4) postupku. Temperatura utječe na promjenu tvrdoće prevlake, dok brži protok plinova utječe na smanjenje brzine taloženja i smanjenje površinske tvrdoće (zbog smanjenja veličine zrna i difuzije klora u granice zrna). Optimatizacijom tih parametara može se dobiti bolja otpornost na trošenje nego korištenjem TiN i TiC prevlaka. Optimalna temperatura postupka ovisi o materijalu dijela koji se prevlači. Odabirom previsoke temperature dolazi do mekšanja površine i gubi se sposobnost nošenja prevlake. Temperaturni raspon prevlačenja TiCN prevlakama postupkom PACVD je između 300 °C i 500 °C. Zbog umjerene tvrdoće i lomljivosti (veća tvrdoća od TiN prevlaka i manja lomljivost od TiC prevlaka) ima veću nosivost i manje šanse da dođe do dubokog brazdanja tijekom eksploatacije. Kao i kod drugih prevlaka, prevlačenje TiCN prevlakom dovodi do smanjenja faktora trenja između prevlake i drugog strojnog dijela. U tom području se TiCN prevlaka pokazala boljom od TiN prevlake (slika 4.12).



Slika 4.12 a) Faktor trenja između neprevučenog čelika i čeličnog pina, b) Faktor trenja između TiCN prevučenog čelika i čeličnog pina [24]

Vrijednosti faktora trenja mogu se sniziti ispod 0.1. Prevlaka je plavo-sive boje. Koristi se za prevlačenje bušilica i razvrtala kod kojih dolazi do zagrijavanja do 400 °C te kod oblikovanja nehrđajućih čelika.

5. Metode ispitivanja

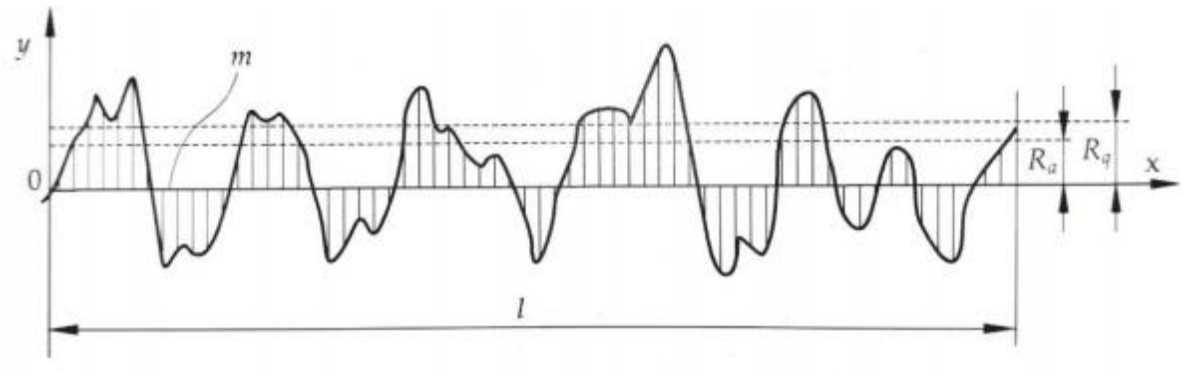
U eksperimentalnom dijelu završnog rada provest će se tri vrste ispitivanja. Ispitivanja će se provesti na ispitnim uzorcima od alatnog čelika 100Cr6, TiCN/TiN prevlaci, TiN/TiCN prevlaci, ležajnoj bronci, te uzorku obrađenom nitriranjem u plazmi. Ispitivanja koja će završni rad obuhvatiti su ispitivanje hrapavosti površine, ispitivanje debljine prevlake kalotestom, ispitivanje adhezivnosti prevlake VDI metodom i ispitivanje „Block on ring“ metodom uz analizu traga trošenja na svjetlosnom mikroskopu sa povećanjem od 50 puta.

5.1 Hrapavost površine

Površinska hrapavost su mikrogeometrijske nepravilnosti na površini predmeta koje su mnogo puta manje od dimenzija promatranog dijela površine. Pod pojmom hrapavosti ne smatraju se makrogeometrijske nepravilnosti površine kojima se dimenzije približuju duljinskoj mjeri površine ili je nadmašuju, primjer takve nepravilnosti je valovitost površine.

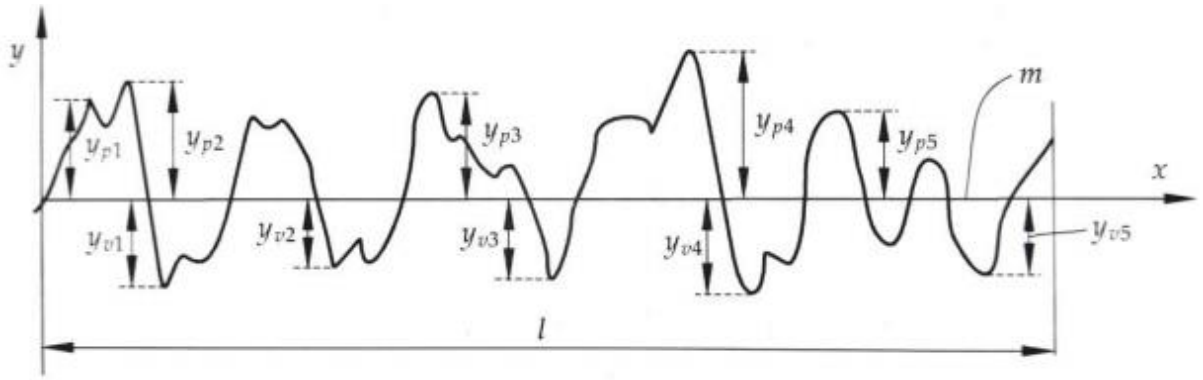
Izgled površine se prikazuje pomoću profila *p* (presjek promatrane površine presječene određenom ravninom) na referentnoj liniji *l* (dogovorena duljina dijela profila na izabranog za određivanje hrapavosti) (slika 5.1). Podaci o hrapavosti površine se prikazuju numerički. Osnovni parametri hrapavosti površine u sistemu srednje linije su:

- Srednja linija profila , *m* – srednja linija profila u granicama referentne duljine siječe profil p tako da je zbroj kvadrata udaljenosti y od svih točaka profila od srednje linije jednak minimumu.
- Prosječno odstupanje profila, R_a – srednja aritmetička udaljenost profila od srednje linije.



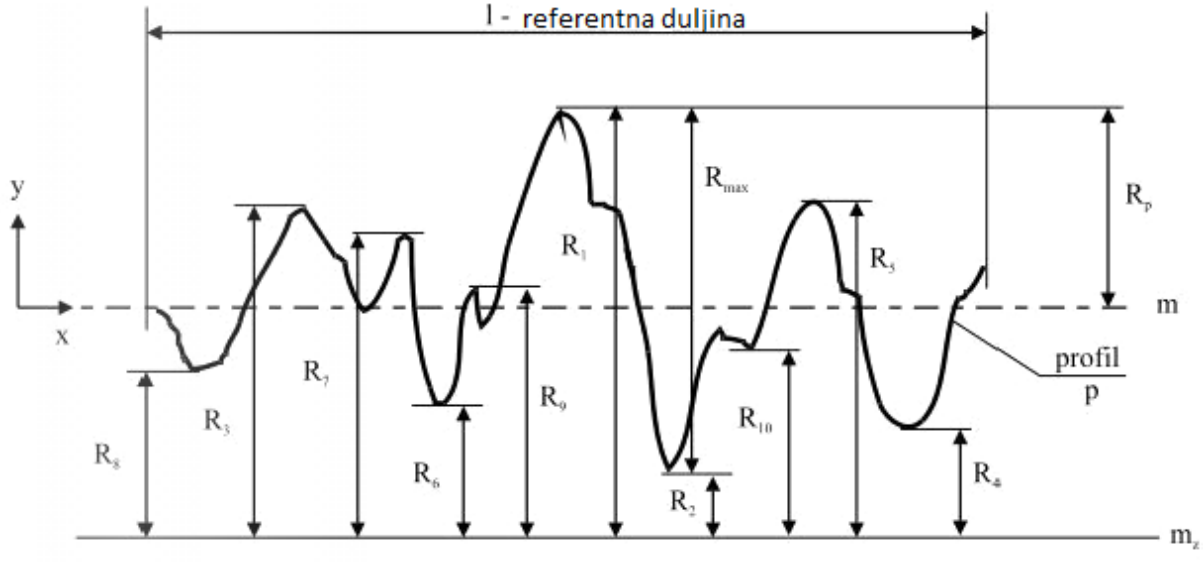
Slika 5.1 Prikaz parametara R_a i R_q [25]

- Srednje kvadratno odstupanje profila, R_q – srednja kvadratna vrijednost profila *p* u granicama referentne duljine *l*
- Prosječna visina neravnina, R_z – mjeri se u deset točaka (slika 5.2). Razlika između srednjih aritmetičkih vrijednosti udaljenosti R (pet najviših i pet najnižih točaka profila) u granicama referentne duljine od bilo koje linije koja ne siječe profil, a paralelna je sa srednjom linijom.



Slika 5.2 Prikaz parametra R_z [25]

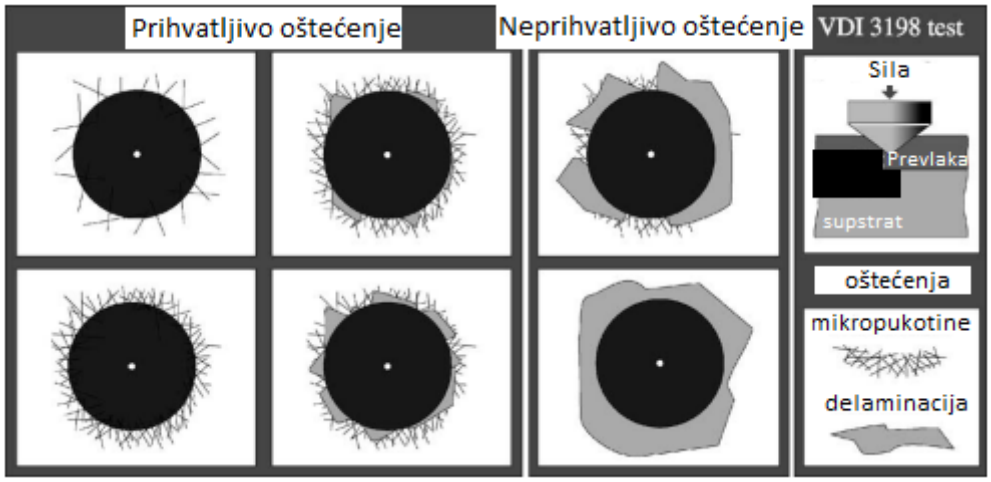
- Najveća visina neravnina, R_{max} – razmak između dvaju pravaca koji su paralelni sa srednjom linijom profila i koji dotiču najviše odnosno najniže točke profila (slika 5.3).



Slika 5.3 Prikaz parametra R_{max} [26]

5.2 Ispitivanje adhezivnosti prevlake

Ispitivanje Rockwell C indentorom je opisano u normi VDI 3198 kao destruktivno testiranje kvalitete prevlaka. Princip ove metode je prikazan na slici 5.4.



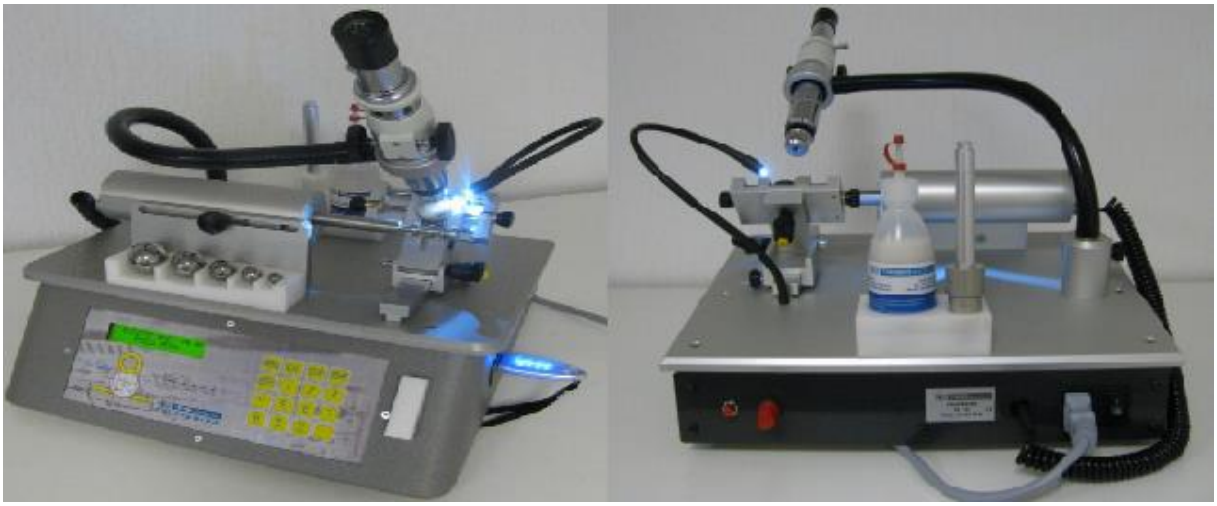
Slika 5.4 Princip ispitivinja VDI 3198 [27]

Stožasti dijamantni indentor prodire u ispitni uzorak ostavljajući znatnu plastičnu deformaciju na supstratu i probijenu prevlaku. Ova metoda slijedu pravilo 1 naprema 10, kao i ostala indentorska ispitivanja, što znači da debljina uzorka mora biti barem 10 puta veća od dubine otiska nakon utiskivanja indentora.

5.3 Ispitivanje debljine prevlake

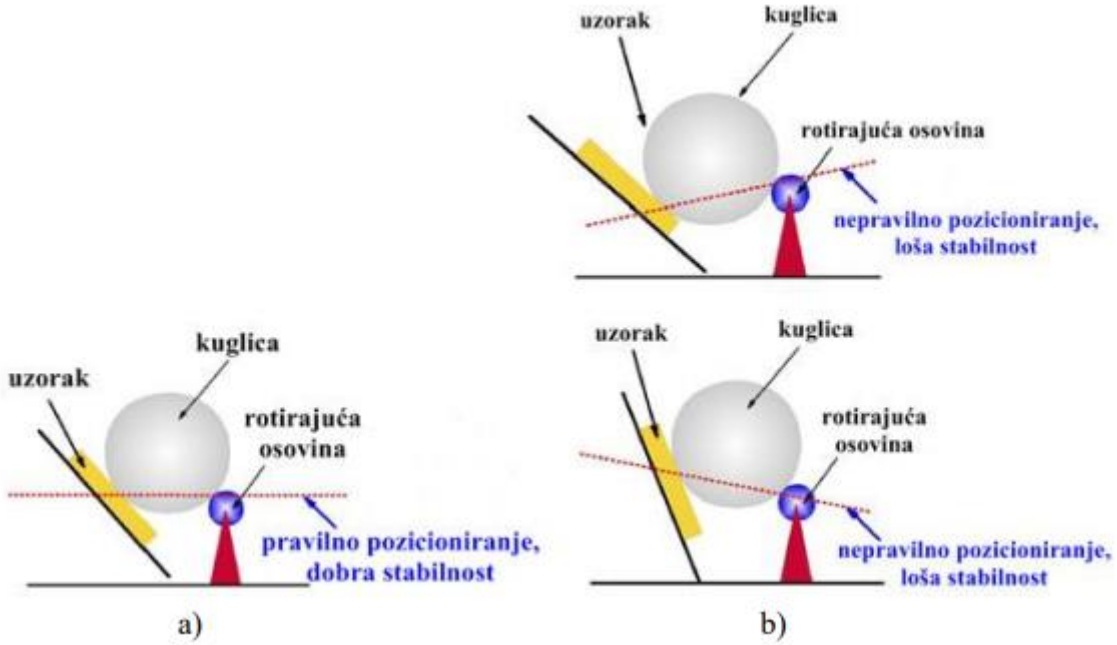
Ispitivanje kalotestom ili ispitivanje debljine prevlake je jednostavna i jeftina metoda ispitivanja. Koristi se za mjerenje debljina prevlaka u rasponu od 0,1 do 50 mikrometara. Taj raspon odgovara prevlakama nanesenim PVD i CVD postupcima, plazmom nanesenim slojevima, obojanim i lakiranim površinama. Postupak se zbog svoje jednostavnosti koristi u raznim granama industrije za poboljšanje površinskih svojstava alata i komponenti. Moguće je ispitivanje jednoslojni i višeslojnih prevlaka. Postupak se može koristiti za ispitivanje potrošenosti površine nakon ispitivanja metodom pina na disku. Uređaj se sastoji od držača ispitnog uzorka i čelične kuglice poznatog promjera koja se okreće prema površini na rotirajućoj osovini koju pogoni motor dok se dijamantna pasta nanosi na područje kontakta (slika 5.5). Kuglica se rotira kratko vrijeme, uobičajeno vrijeme je ovisno o debljini prevlake. Zbog abrazivne prirode dijamantne paste kratko vrijeme ispitivanja je dovoljno da dođe do

nastanka kratera. Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu nalazi se kalotester, proizvela ga je tvrtka TRIBOtechnic iz Francuske.



Slika 5.5 Kalotest uređaj na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu tvrtke TRIBOtechnic [28]

Prilikom provedbe ispitivanja bitno je pravilno postaviti ispitni uzorak u odnosu na čeličnu kuglicu i rotirajuću osovinu (slika 5.6).

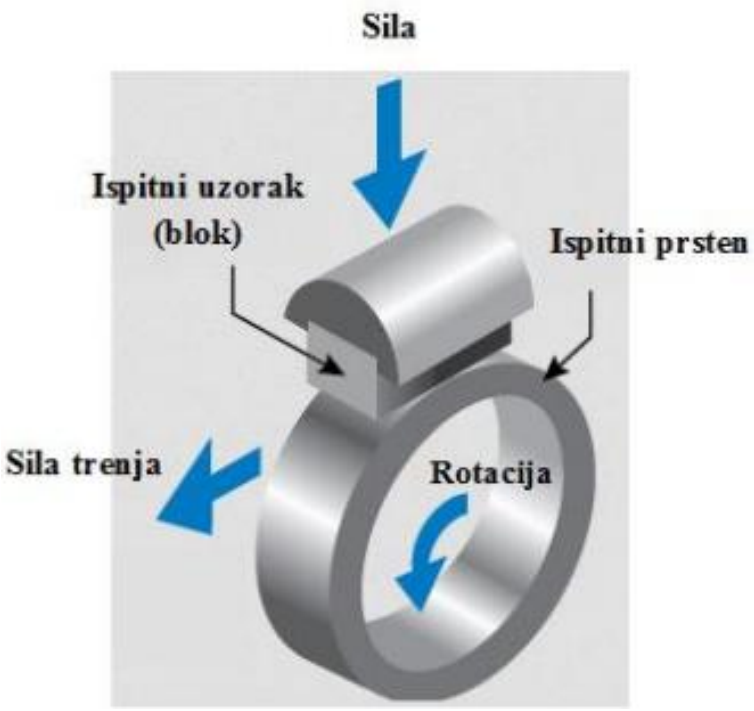


Slika 5.6 a) Pravilno postavljanje uzorka, b) Nepravilno postavljanje uzorka [28]

5.4 Ispitivanje faktora trenja, metoda blok na prstenu

Metodom ispitivanja „blok na prstenu“ se u laboratorijskim uvjetima određuje otpornost na trošenje materijala (slika 5.7). Ovim se ispitivanjem određuju faktori trenja i

trošenje triboloških parova materijala, te se mogu rangirati po njihovim karakteristikama u raznim uvjetima. Prednost ove metode je velika fleksibilnost. Tribološki parovi mogu biti od bilo kojih materijala bez obzira njegova svojstva. Stoga su kombinacije neograničene. Međutim u laboratorijskim uvjetima se najčešće ispituju metali. Ovo ispitivanje se može provesti u suhim uvjetima,tj. bez uporabe podmazivajućeg sredstva, ali je moguće korištenje raznih maziva, tekućina ili plinskih atmosfera kako bi se simulirali uvjeti eksploatacije. U ispitivanju je moguće kontrolirati brzinu rotacije osovine na kojoj se nalazi prsten i opterećenje kojim uzorak pritišće prsten. Uređaj za ispitivanje se sastoji od osovine koju pogoni motor i držača uzorka koji određenom težinom pritišće prsten koji se nalazi na osovini. Ispitivanje je normirano prema ASTM G77 normi. Pomoću senzora ili nekog drugog uređaja se mjeri pomak opruge uslijed djelovanja trenja između uzorka i prstena. Rezultati ispitivanja se mogu prikazati u obliku faktora trenja u ovisnosti o putu ili trajanju ispitivanja, ali je moguće i prikazati gubitak volumena na prstenu i uzorku. Gubitak volumena se izražava u kubnim milimetrima (mm^3). Manji gubitak volumena znači veću otpornost na trošenje.



Slika 5.7 Shematski prikaz metode Blok na prstenu [29]

EKSPERIMENTALNI DIO

6. Plan i provedba ispitivanja

6.1 Plan ispitivanja

Eksperimentalni dio, prevlačenje i ispitivanja, provedena su na prstenima kliznih ležajeva od čelika EN DIN 100Cr6 proizvođača NTN, oznake 1R30X35X17 (slika 6.1).



Slika 6.1 Neprevučeni prsten kliznog ležaja od čelika EN DIN 100Cr6 [30]

Prsten je proizvedeno tako da je vanjski promjer 35 mm, unutarnji 30 mm, a širina 17 mm. Prevlačenja su provedena u Zagrebu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za toplinsku obradu. Ispitivanja su provedena u laboratorijima na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Cilj ispitivanja je odrediti i predložiti, na temelju rezultata ispitivanja, optimalni par materijala u radu kliznih ležajeva. U tablici 5 prikazan je plan ispitivanja za ispitivanja hrapavosti površine, kalotesta i VDI metode, dok su u tablici 6 prikazani triboparovi korišteni u ispitivanju blok na prstenu (ispitivanje faktora trenja).

Ispitivani su uzorci: prsten od neprevučenog čelika DIN 100Cr6, prsten od čelika DIN 100Cr6 prevučen prevlakom PACVD TiCN/TiN, prsten od čelika DIN 100Cr6 prevučen prevlakom PACVD TiN/TiCN, prsten od čelika DIN 100Cr6 nitriran u plazmi, te izrezani uzorci iz kliznog prstena od ležajne bakreno-olovne bronce nanesene na čelik C10.

Ispitivanje faktora trenja s uzorcima od ležajne bronce provedeno je dva puta . Prvo ispitivanje je provedeno s dodirom u točci, dok je drugo ispitivanje provedeno s dodirom u liniji. Plan ispitivanja naveden je u tablici 5. Ispitani triboparovi navedeni su u tablici 6.

Tablica 5. Plan ispitivanja hrapavosti površine, kalotesta, VDI metodom

Ispitni uzorci	Ispitivanje		
	Ispitivanje hrapavosti površine	Kalotest (debljina prevlake)	VDI metoda (adhezivnost prevlake)
1. Neprevučeni 100Cr6 čelik	x	-	-
2. Prevučeni čelik 100Cr6 TiCN/TiN prevlakom PACVD postupkom	x	x	x
3. Prevučeni čelik 100Cr6 TiN /TiCN prevlakom PACVD postupkom	x	x	x
4. Ležajna bronca	x	-	-
5. 100Cr6 čelik nakon nitriranja u plazmi	x	-	-

Tablica 6. Prikaz triboparova u ispitivanju blok na prstenu

Ispitni uzorci	1. Neprevučeni 100Cr6 čelik	2. Ležajna bronca
1. Neprevučeni 100Cr6 čelik	x	x
2. Prevučeni čelik 100Cr6 prevlakom TiCN/TiN postupkom PACVD	x	x
3. Prevučeni čelik 100Cr6 prevlakom TiN /TiCN postupkom PACVD	x	x
4. Ležajna bronca (CuPb)	x	-
5. 100Cr6 čelik nitriran u plazmi	-	x

6.2 Provedba prevlačenja

6.2.1 Prevlačenje TiCN/TiN prevlakom PACVD postupkom

Osnovni radni parametri prevlačenja nalaze se u tablici 7. Postupak je proveden na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na uređaju PC 70/90 tvrtke Rübig.

Tablica 7. Osnovni parametri prevlačenja TiCN/TiN prevlakom postupkom PACVD

Parametri postupka	Vrijednosti parametara
Temperatura čišćenja površine otprašivanjem iona	500 °C
Vrijeme čišćenja površine otprašivanjem iona	2 h
Temperatura prevlačenja	500 °C
Protok H_2	140 l/h
Protok N_2	15 l/h
Protok Ar	10 l/h
Protok prekursora $TiCl_4$	3 l/h
Trajanje prevlačenja prevlakom TiCN	3,5 h
Protok CH_4	4 l/h
Trajanje prevlačenja prevlakom TiN	1,5 h
Tlak u vakuumskoj komori	2 mbar
Napon plazme	490 V
Snaga plazme	1650 W
Trajanje hlađenja komore do 20 °C	6 h

6.2.2 Prevlačenje TiN/TiCN prevlakom PACVD postupkom

Osnovni radni parametri prevlačenja nalaze se u tablici 8. Postupak je proveden na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na uređaju PC 70/90 tvrtke Rübig.

Tablica 8. Osnovni parametri prevlačenja TiN/TiCN prevlakom postupkom PACVD

Parametri postupka	Vrijednost parametra
Temperatura čišćenja površine otprašivanjem iona	450 °C
Vrijeme čišćenja površine otprašivanjem iona	2 h
Temperatura prevlačenja	500 °C
Trajanje prevlačenja prevlakom TiN	2 h
Protok H_2 za TiN prevlaku	140 l/h
Protok N_2 za TiN prevlaku	15 l/h
Protok Ar) za TiN prevlaku	10 l/h
Protok H_2 za TiCN prevlaku	140 l/h
Protok N_2 za TiCN prevlaku	15 l/h
Protok Ar za TiCN prevlaku	10 l/h
Protok CH_4 za TiCN prevlaku	4 l/h
Trajanje prevlačenja prevlakom TiN	6 h
Tlak u vakuumskoj komori	2 mbar
Napon plazme	490 V
Snaga plazme	1650 W
Trajanje hlađenja komore do 20 °C	6 h

6.2.3 Postupak nitriranja u plazmi

Osnovni radni parametri nitriranja nalaze se u tablici 9. Postupak je proveden na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na uređaju PC 70/90 tvrtke Rübig.

Tablica 9. Osnovni parametri nitriranja u plazmi

Parametri postupka	Vrijednost parametra
Temperatura čišćenja površine otprašivanjem iona	600 °C
Vrijeme čišćenja površine otprašivanjem iona	2 h
Temperatura nitriranja	600 °C
Trajanje nitriranja u plazmi	9 h
Udjel H_2	63 %
Udjel N_2	32 %
Udjel Ar	5 %
Tlak u vakuumskoj komori	2 mbar
Napon plazme	560 V
Snaga izvora plazme	1000 W

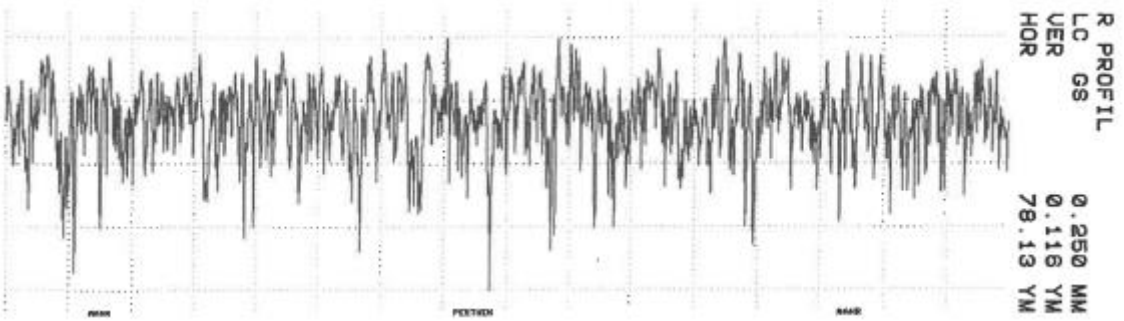
7. Rezultati ispitivanja i diskusija rezultata

7.1 Ispitivanje hrapavosti površine

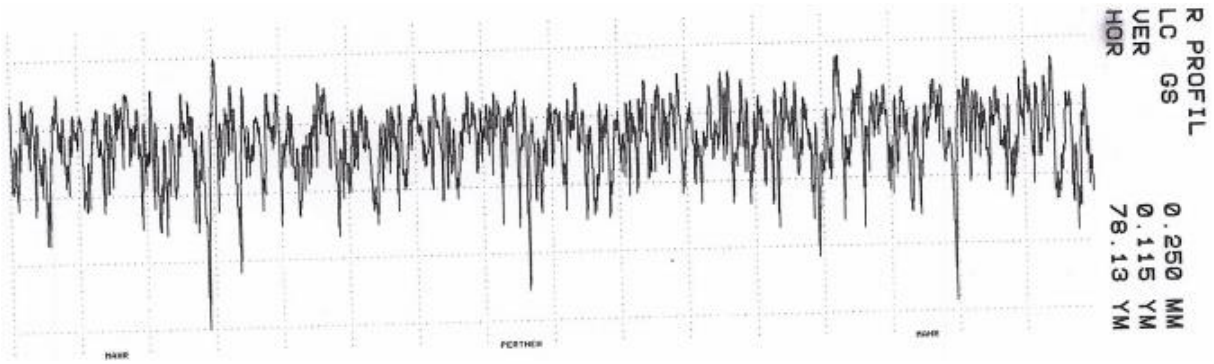
Ispitivanje hrapavosti je provedeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina. Svi uzorci su ispitani 5 puta, osim uzorka prevučenog čelika s TiN/TiCN prevlakom postupkom PACVD koji je ispitan 6 puta. Svim uzorcima je izračunata srednja vrijednost parametara hrapavosti. Ispitani su prsten od neprevučenog čelika, prsten prevučenog čelika TiCN/TiN prevlakom PACVD postupkom, uzorak ležajne bronce, čelični prsten obrađen postupkom nitriranja u plazmi, te prsten prevučenog čelika TiN/TiCN prevlakom PACVD postupkom. Parametri hrapavosti R_{max}, R_z i R_a prikazani su u tablici 10 i za svaki od njih prikazan je profil hrapavosti. Ostali parametri hrapavosti prikazani su u prilogu. Rezultati ispitivanja profila hrapavosti prikazani su na slikama 7.1 do 7.5.

Tablica 10. Vrijednosti parametara hrapavosti ispitnih uzoraka

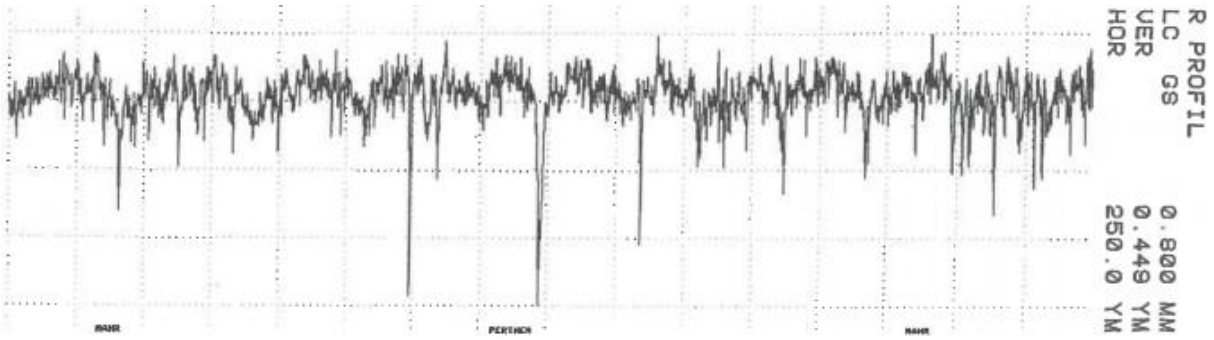
Parametri hrapavosti	1. Neprevučeni čelik	2. Prsten prevučen TiCN/TiN prevlakom	3. Prsten prevučen TiN/TiCN prevlakom	4. Ležajna bronca	5. Prsten nitriran u plazmi
R_{max}, [µm]	0,470 ± 0,059	0,474 ± 0,126	1,526 ± 0,377	8,724 ± 1,442	0,513 ± 0,075
R_z, [µm]	0,400 ± 0,039	0,369 ± 0,036	1,106 ± 0,215	6,847 ± 0,818	0,418 ± 0,056
R_a, [µm]	0,050 ± 0,003	0,045 ± 0,002	0,104 ± 0,018	1,133 ± 0,191	0,052 ± 0,014



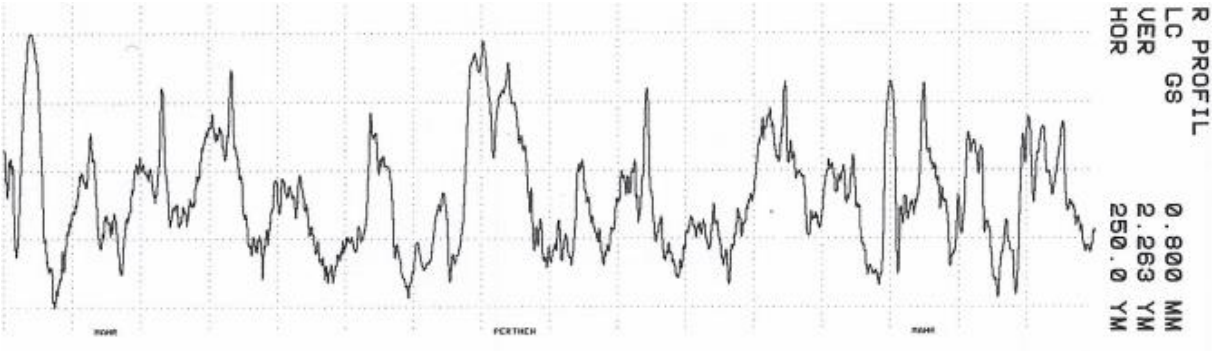
Slika 7.1 Profil hrapavosti za prsten neprevučenog čelika DIN 100Cr6



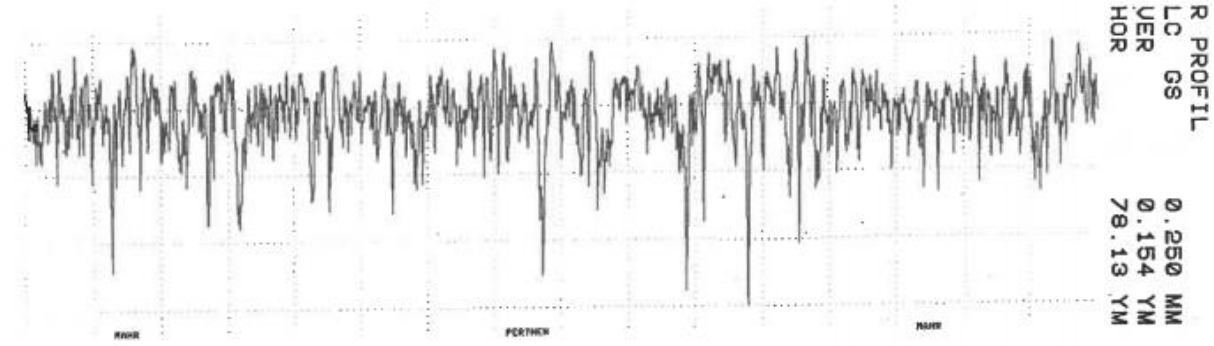
Slika 7.2 Profil hrapavosti za prsten čelik DIN 100Cr6 prevučenog TiCN/TiN prevlakom



Slika 7.3 Profil hrapavosti za prsten čelik DIN 100Cr6 prevučenog TiN/TiCN prevlakom



Slika 7.4 Profil hrapavosti za uzorak ležajne bronce

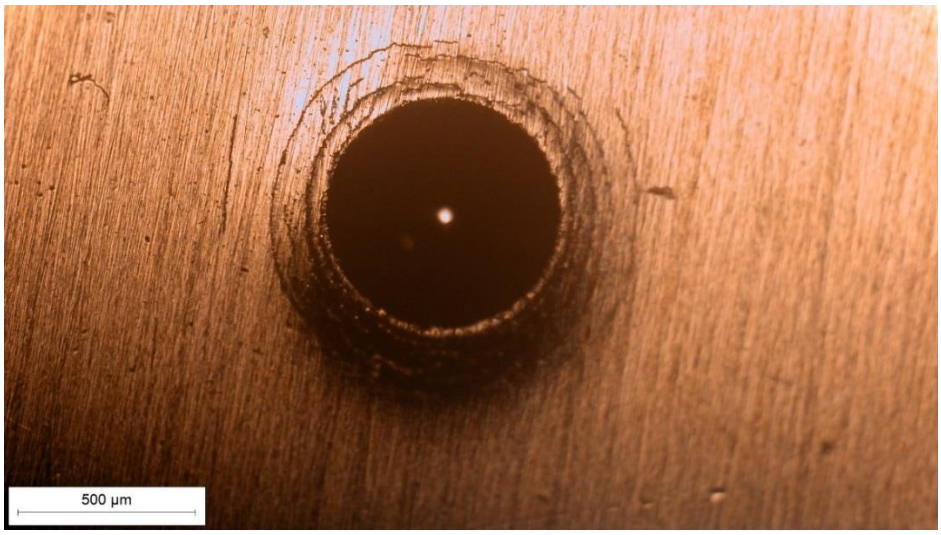


Slika 7.5 Profil hrapavosti prstena čelik DIN 100Cr6 nitriranog u plazmi

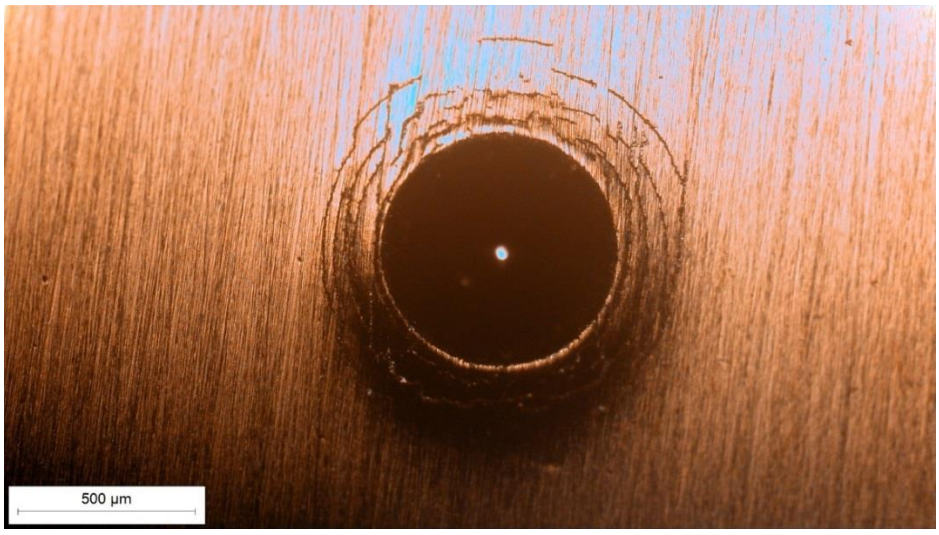
Prstenovi kliznih ležajeva se masovno proizvode, stoga je za očekivati da će površinska hrapavost svih prstenova biti približno ista. Zbog toga je moguća njihova zamjena i usporedba svojstava. Najveća visina neravnina na prstenu kliznog ležaja tvrtke NTN u polaznom stanju je R_{max}= 0,470 µm. Nakon prevlačenja TiCN/TiN prevlakom nema značajne promjene u parametrima hrapavosti (R_{max}= 0,474 µm). Kod prstena prevučenog podslojem TiN i slojem TiCN kao gornjim slojem dolazi do povećanja površinske hrapavosti 3 puta te kod ovog prstena R_{max} iznosi 1,526 µm. Unatoč tom povećanju ne dolazi do znatne promjene profila hrapavosti. Uzorci od ležajne bakar-olovne bronce imaju znatno drugačiji profil hrapavosti od ostalih prstenova, kod njih je R_{max} više od 18 puta veći u odnosu na polazno stanje prstenova od čelika 100Cr6 te iznosi 8,724 µm. Oblik profila hrapavosti i vrijednosti parametara kod prstena kliznog ležaja nitriranog u plazmi su slične kao i kod neprevučenog prstena kliznog ležaja R_{max}= 0,513 µm.

7.2 Ispitivanje adhezivnosti prevlake

Ispitivanje je provedeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u Laboratoriju za toplinsku obradu. Ispitani su prevučeni prstenovi kliznih ležajeva, TiCN/TiN prevlaka i TiN/TiCN prevlaka. Svaki uzorak je ispitan dva puta. Nakon ispitivanja uzorci su pogledani i snimljeni svjetlosnim mikroskopom pod povećanjem od 50 puta. Na slikama 7.6 do 7.9. su prikazana mjesta na kojima je Rockwell C indentor napravio oštećenje.



Slika 7.6 Ispitivanje 1, mjesto utiskivanja indentora u TiCN/TiN prevlaku



Slika 7.7 Ispitivanje 2, mjesto utiskivanja indentora u TiCN/TiN prevlaku



Slika 7.8 Ispitivanje 1, mjesto utiskivanja indentora u TiN/TiCN prevlaku



Slika 7.9 Ispitivanje 2, mjesto utiskivanja indentora u TiN/TiCN prevlaku

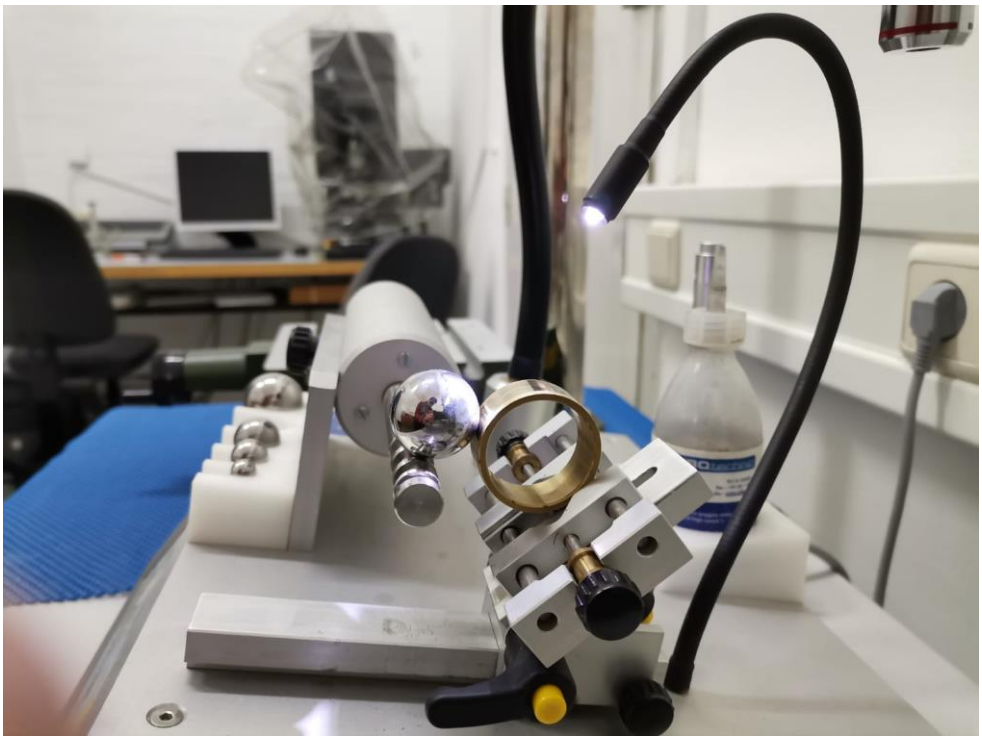
Na slikama (7.6 i 7.7) ispitivanja vidljive su kružne pukotine TiCN/TiN prevlake. Uspoređujući ta oštećenja sa onima koja su prihvatljiva prema normi, vidljivo je da adhezivnost prevlake TiCN/TiN nije dobra i zadovoljavajuća. Prema slikama (7.8 i 7.9) vidljivo je manje oštećenje prevlake TiN/TiCN na mjestima prodiranja indentora u površinu. Uslijed nastajanja manjeg oštećenja, moguće je zaključiti da je adhezivnost TiN/TiCN prevlake bolja od adhezivnosti TiCN/TiN prevlake.

7.3 Ispitivanje debljine prevlake kalotestom

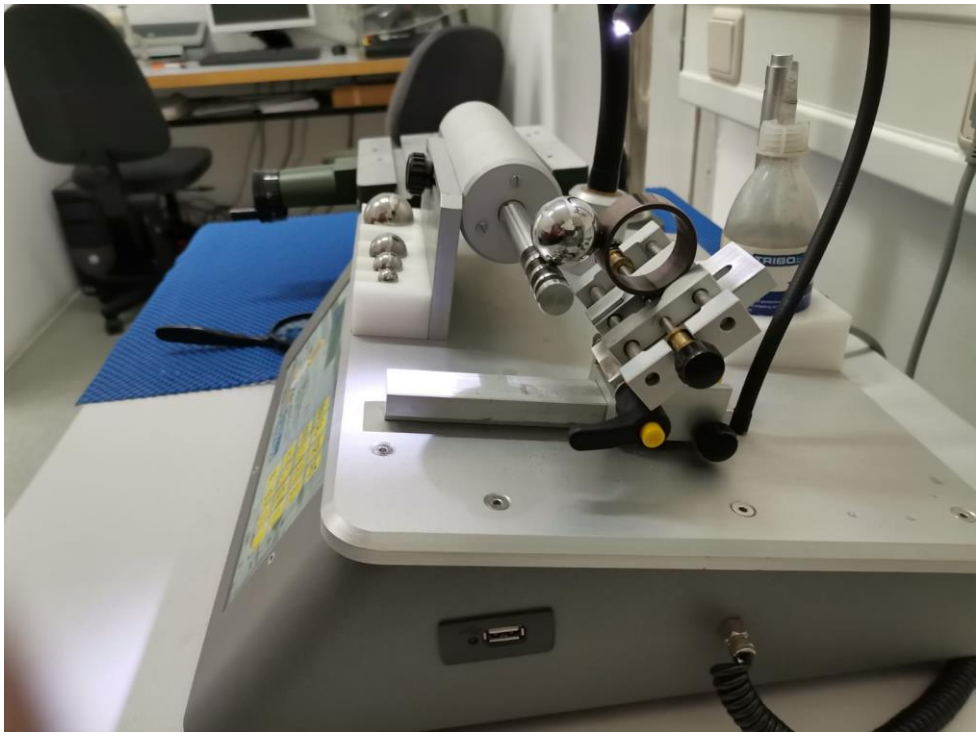
Ispitivanje je provedeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u Laboratoriju za toplinsku obradu. Ispitani su prevučeni prstenovi kliznih ležajeva, TiCN/TiN prevlaka i TiN/TiCN prevlaka. Svaki uzorak je ispitan tri puta. Nakon ispitivanja uzorci su pogledani i snimljeni svjetlosnim mikroskopom pod povećanjem od 50 puta. Parametri ispitivanja su prikazani u tablici 11. Prikaz ispitivanja vidi se na slikama 7.10 i 7.11.

Tablica 11. Parametri ispitivanja prstenova na kalotest uređaju

Parametri ispitivanja	1. Prsten prevučen TiCN/TiN prevlakom	2. Prsten prevučen TiN/TiCN prevlakom
Trajanje ispitivanja [s]	60	90
Brzina okretanja osovine [rpm]	600	600



Slika 7.10 Ispitivanje debljine TiCN/TiN prevlake kalotestom



Slika 7.11 Ispitivanje debljine TiN/TiCN prevlake kalotestom

Ispitivanjem je zbog trošenja prevlake ostavljen otisak eliptičnog oblika. Na svjetlosnom mikroskopu otisci su snimljeni i izmjereni te prikazani na slikama 7.12 i 7.13..



Slika 7.12 Otisak nakon ispitivanja TiCN/TiN prevlake

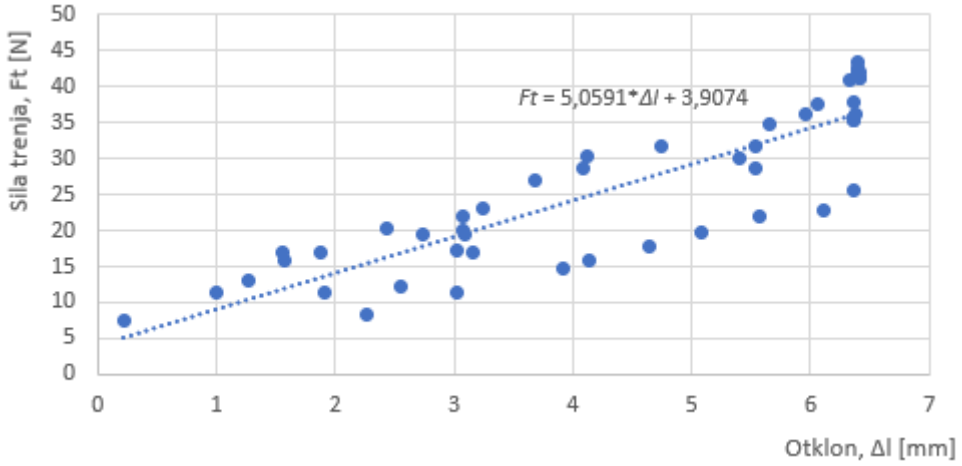


Slika 7.13 Otisak nakon ispitivanja TiN/TiCN prevlake

Debljina prevlake se izračunava pomoću formule koja je dana u priručniku za korištenje uređaja [28]. Srednja vrijednost debljine TiCN/TiN prevlake u 3 mjerenja iznosi 3,2919 µm, dok izmjerena vrijednost TiN/TiCN prevlake iznosi 7,1819 µm. Prema slikama (7.12 i 7.13) jasno se vidi razlika u debljinama prevlaka. Na slici 7.13 se vidi da je TiN/TiCN prevlaka nekoliko puta deblja od TiCN/TiN prevlake (slika 7.12).

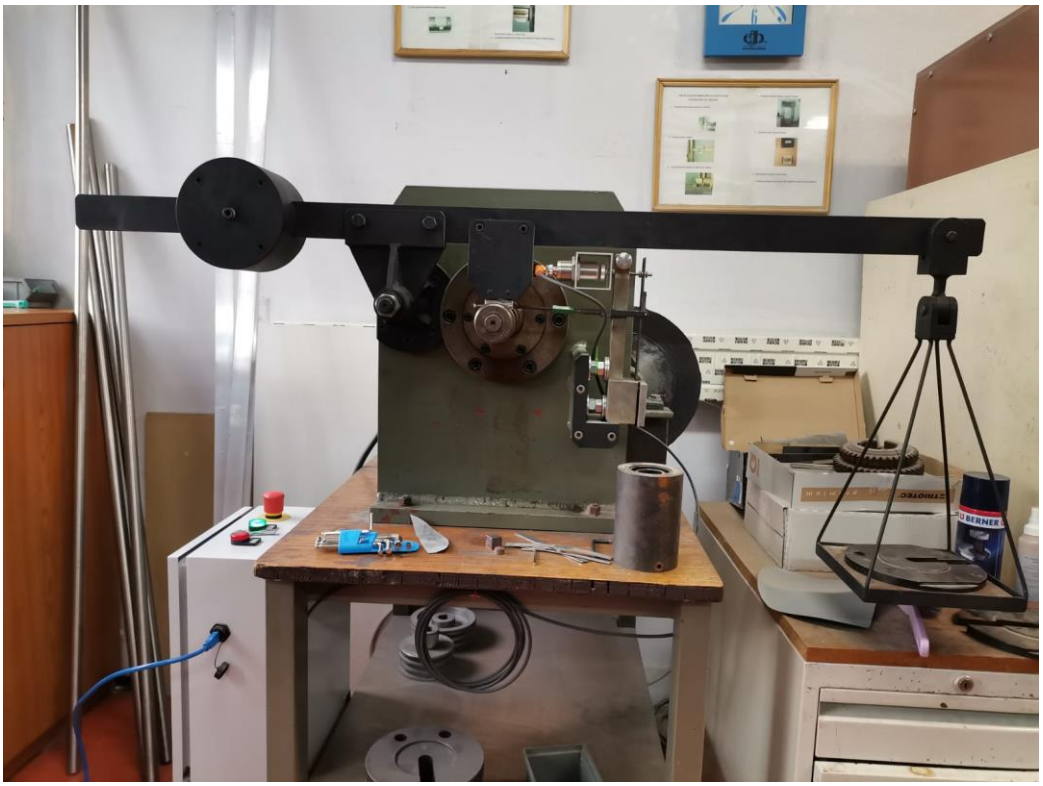
7.4 Ispitivanje faktora trenja i adhezijskog trošenja

Prvi korak je kalibracija uređaja za ispitivanje, tj. opruge, kako bi se mogla odrediti konstanta savojne opruge (slika 7.14). Kasnije se pomoću konstante savojne opruge dobivaju se sile trenje za pojedine prstenove. Kalibracija je provedena u trajanju od 50 sekundi pomoću dinamometra. Vrijednosti mjerene na dinamometru su pridružene vrijednostima promjene naponu koju bilježi senzor koji se nalazi na uređaju. Promjene napona se pomoću linearnog gradijenta koji iznosi 1,11 V/mm, preračunaju u otklon (Δl). Tehnički podaci senzora su prikazani u prilogu. Prilikom kalibracije i određivanja konstante opruge uočeno je da postoji zračnost u savijanju opruge prilikom otpuštanja opruge.

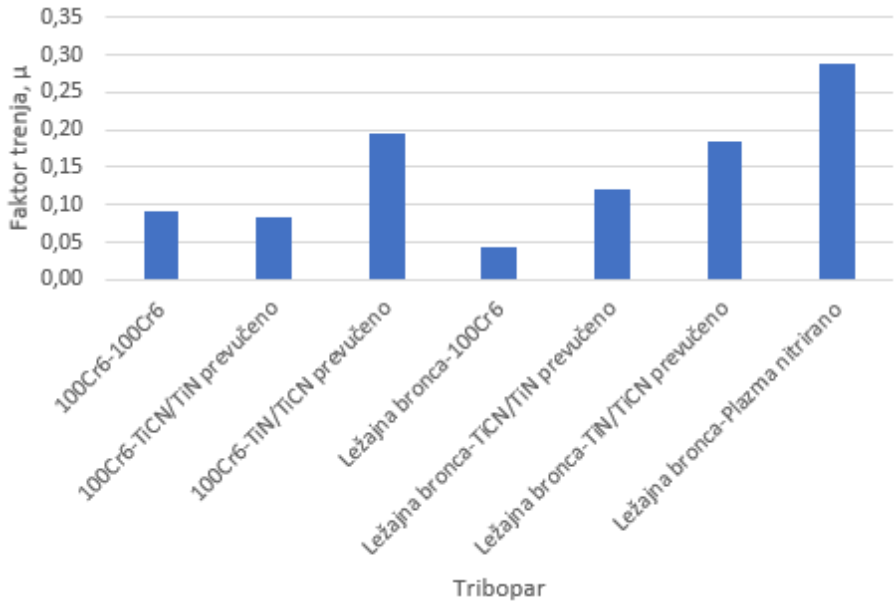


Slika 7.14 Kalibracija opruge uređaja za ispitivanje faktora trenja

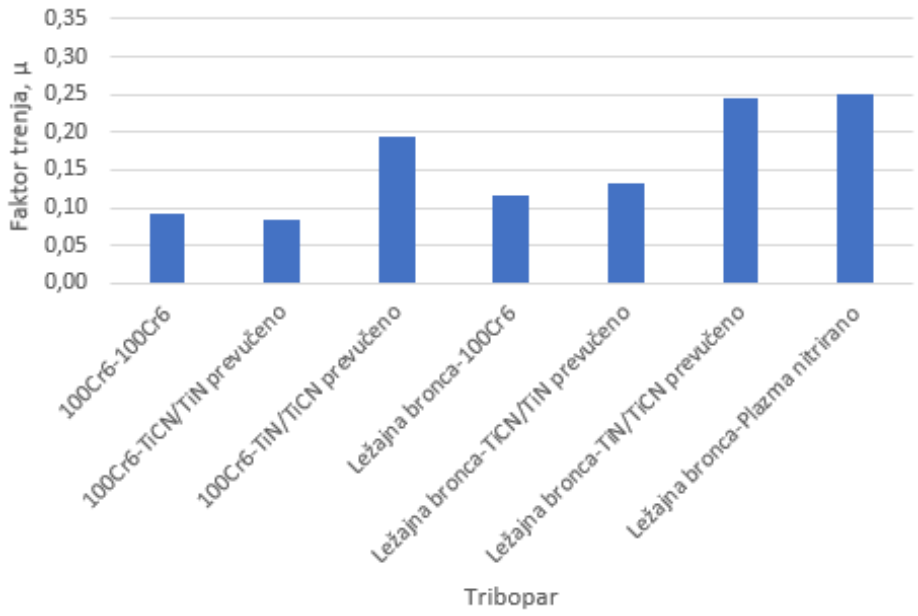
Nakon kalibracije svaki je prsten ispitivan normalnom silom od 98,1 N. Svako ispitivanje je trajalo 150 sekundi i senzor je mjerio podatke u razmaku od 0,1 sekundu. Na temelju tih podataka izračunati su koeficijenti trenja za svaki tribopar. Usporedba faktora trenja triboparova se može vidjeti na slikama 7.16 i 7.17. Protupar su bili čelik DIN 100Cr6 i bakreno olovna ležajna bronca. Uređaj za ispitivanje faktora trenja i otpornosti na adhezijsko trošenje prikazan je na slici 7.15.



Slika 7.15 Uređaj za ispitivanje faktora trenja (adhezijskog trošenja) na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu

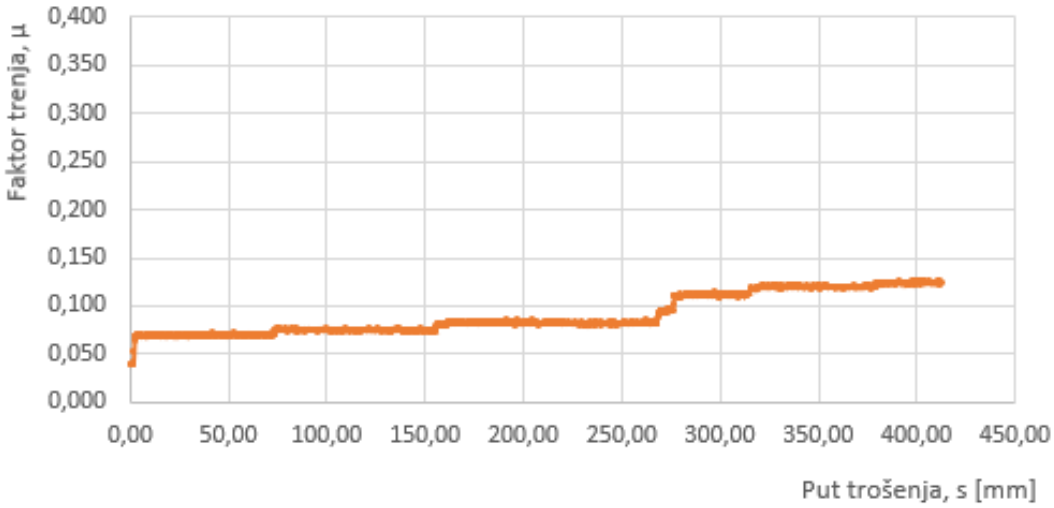


Slika 7.16 Usporedba faktora trenja isptivanje s dodirom u točci

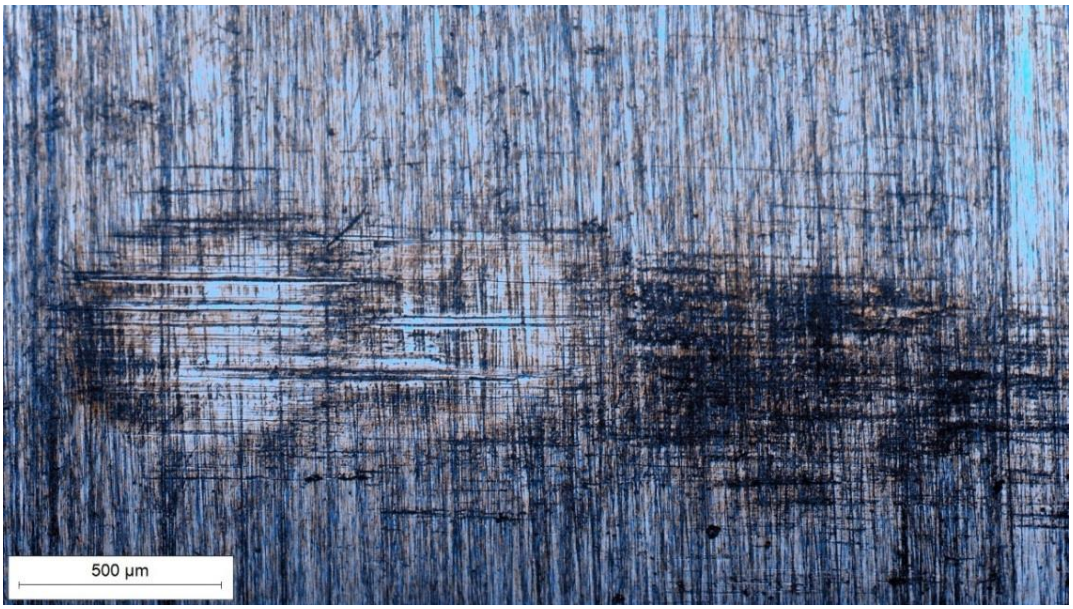


Slika 7.17 Usporedba faktora trenja ispitivanje s dodirom u liniji

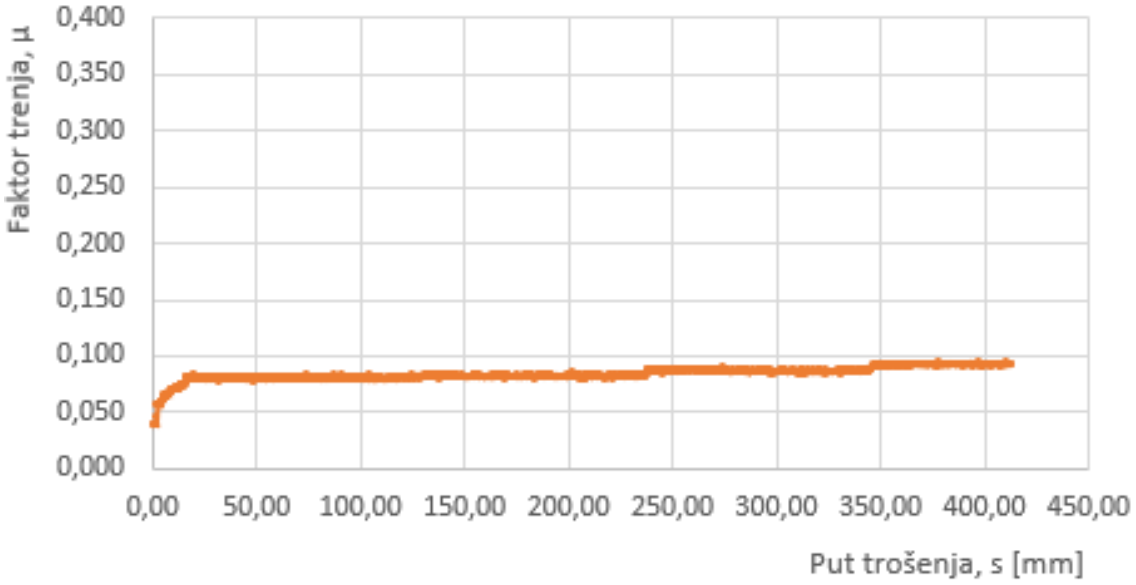
Ispitivanja provedena s protuparom od čelika DIN 100Cr6 provedena su jednom, stoga nema razlike u podacima na slikama 7.16 i 7.17. Ispitivanja provedena s protuparom od ležajne bronce provedena su dva puta. Zbog načina na koji se proizvode prstenovi kliznih ležajeva od ležajne bronce provedena su ispitivanja s obzirom na vrstu dodira. Na slici 7.16 prikazane su vrijednosti faktora trenja za dodir u točci, dok su na slici 7.17 prikazane vrijednosti faktora trenja za dodir u liniji. Iz slika je uočljiva razlika između faktora trenja ovisno o dodiru. Vrijednosti su manje u svim slučajevima dodira u točci. Jednako je uočljivo da pri dodiru u točci je najmanja prosječna vrijednost faktora trenja za tribopar „ležajna bronca-100Cr6“, dok je u dodiru u liniji najmanja vrijednost faktora za tribopar „100Cr6 – TiCN/TiN prevlaka“. Na sljedećim slikama 7.19 do 7.345 prikazani su faktori trenja za svaki tribopar u odnosu na put trošenja, uz snimljenu sliku na svjetlosnom mikroskopu sa povećanjem od 50 puta koja prikazuje trag trošenja.



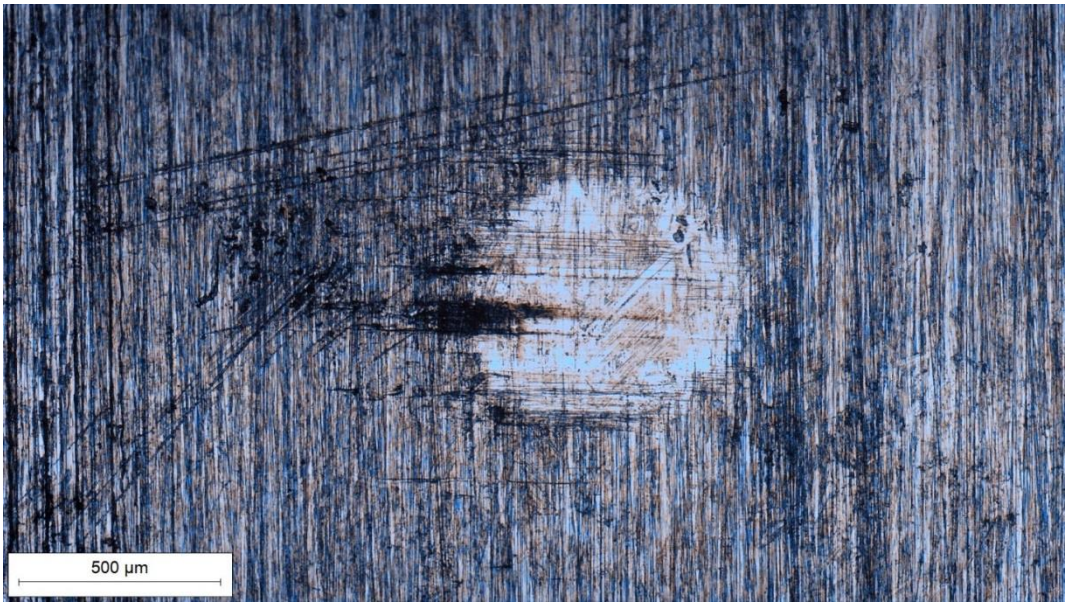
Slika 7.18 Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „100Cr6-100Cr6“



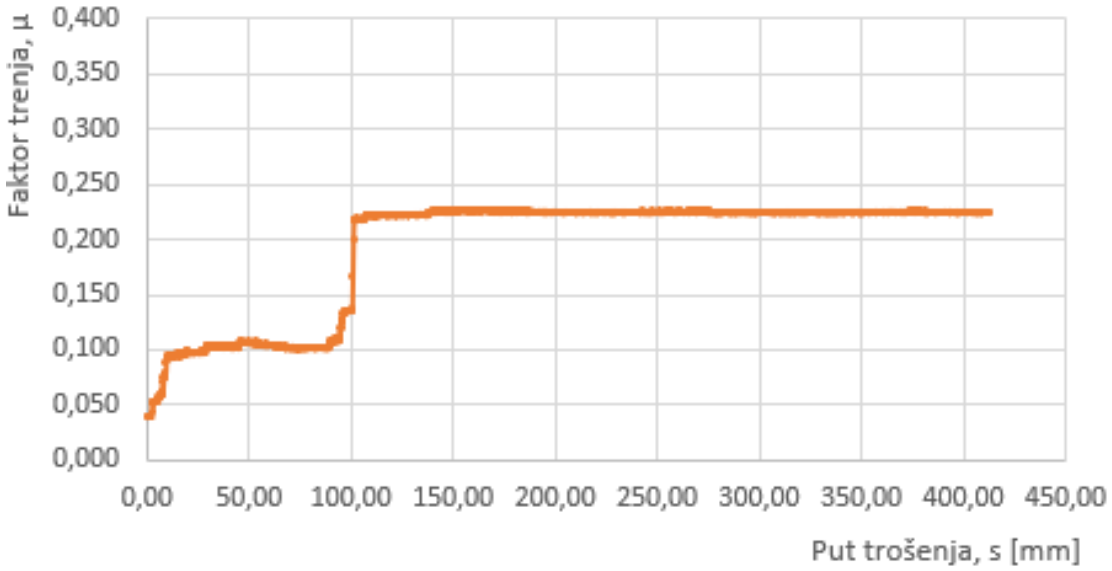
Slika 7.19 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „100Cr6 - 100Cr6“



Slika 7.20 Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „100Cr6 - TiCN/TiN prevučeno“



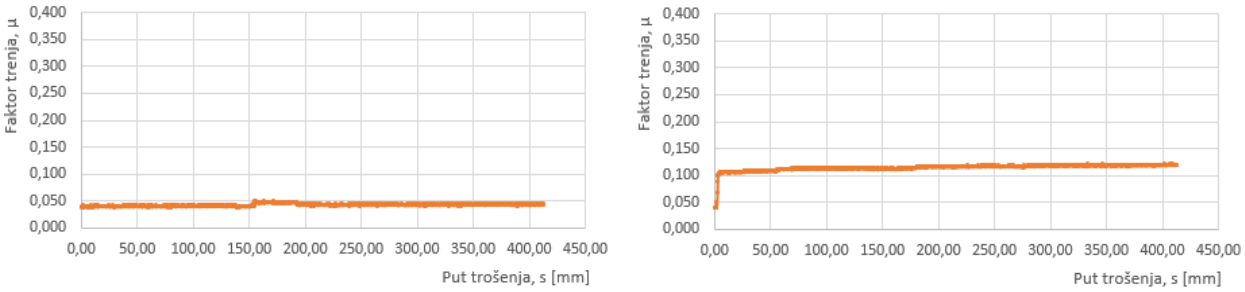
Slika 7.21 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „100Cr6 – TiCN/TiN prevučeno“



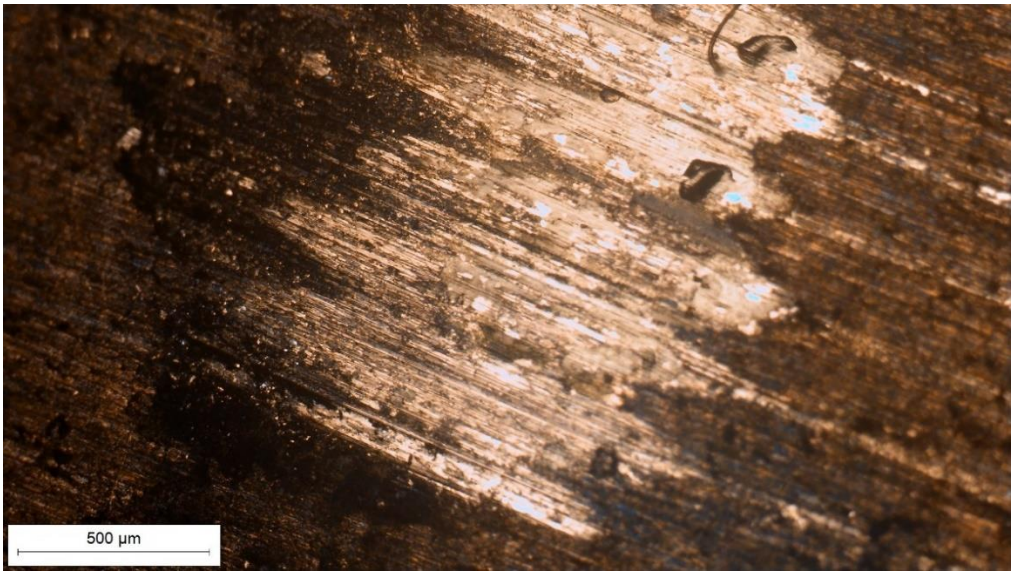
Slika 7.22 Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „100Cr6 – TiN/TiCN prevučeno“



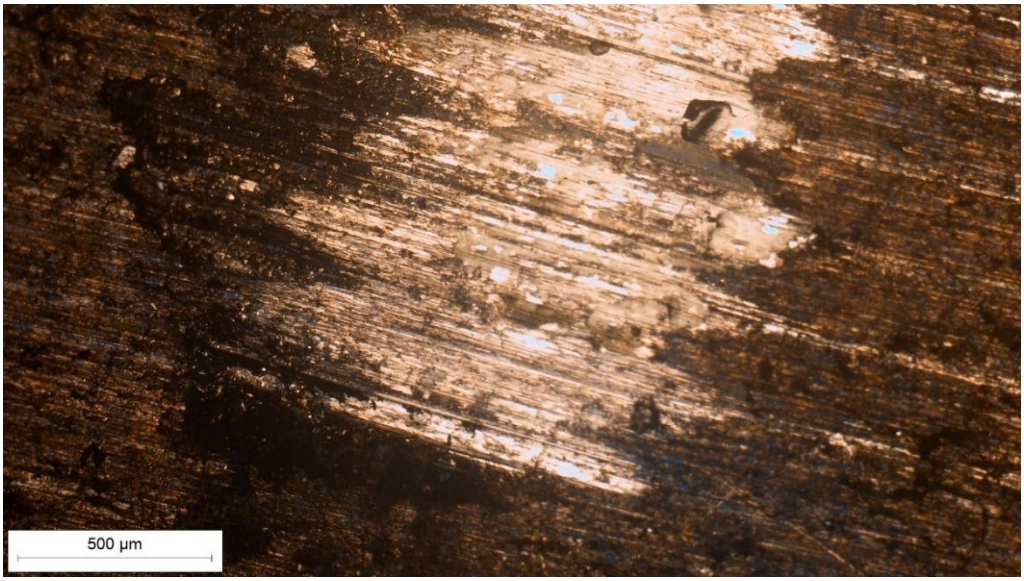
Slika 7.23 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „100Cr6 – TiN/TiCN prevučeno“



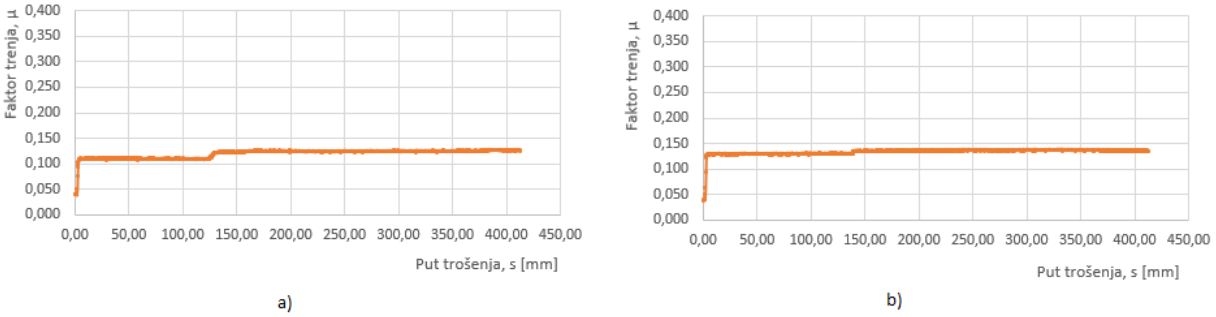
Slika 7.24 a) Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „ležajna bronca - 100Cr6“ dodir u točci b) Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „ležajna bronca - 100Cr6“ dodir u liniji



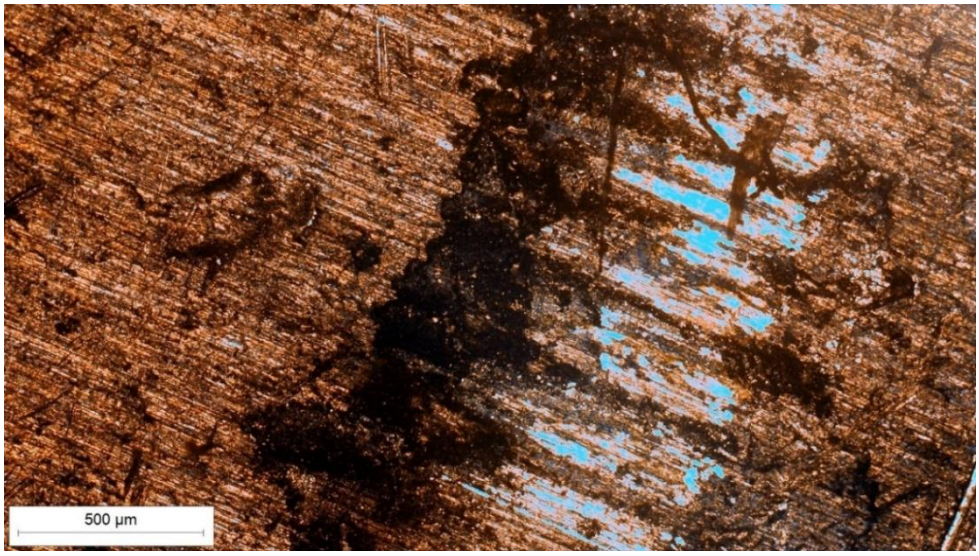
Slika 7.25 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „ležajna bronca - 100Cr6“ dodir u točci



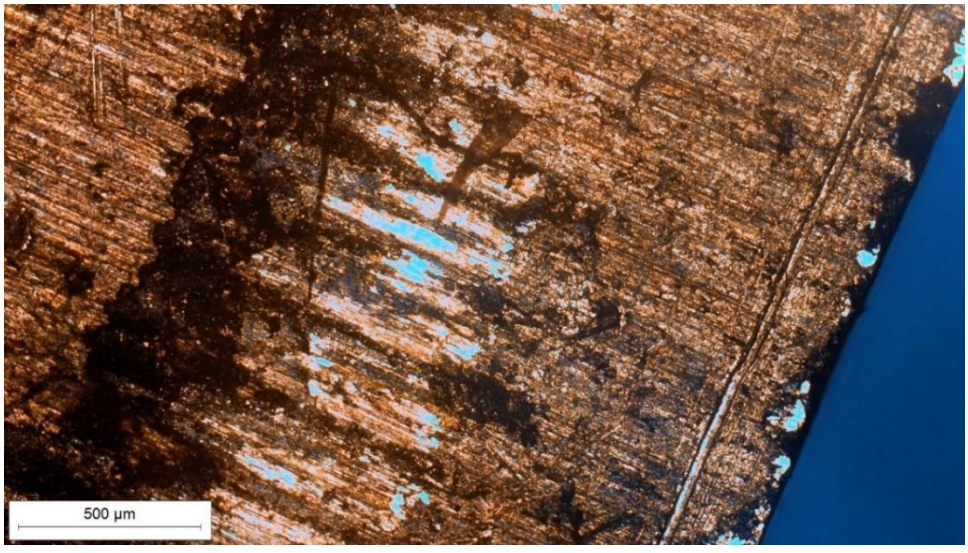
Slika 7.26 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „ležajna bronca - 100Cr6“ dodir u liniji



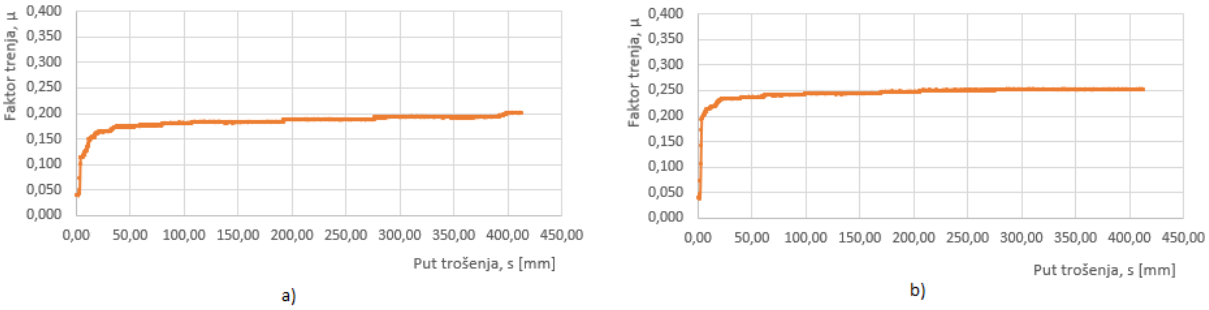
Slika 7.27 a) Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „ležajna bronca - TiCN/TiN prevučeno“ dodir u točci b) Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „ležajna bronca – TiCN/TiN prevučeno“ dodir u liniji



Slika 7.28 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „ležajna bronca - TiCN/TiN prevučeno“ dodir u točci



Slika 7.29 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „ležajna bronca - TiCN/TiN prevučeno“ dodir u liniji



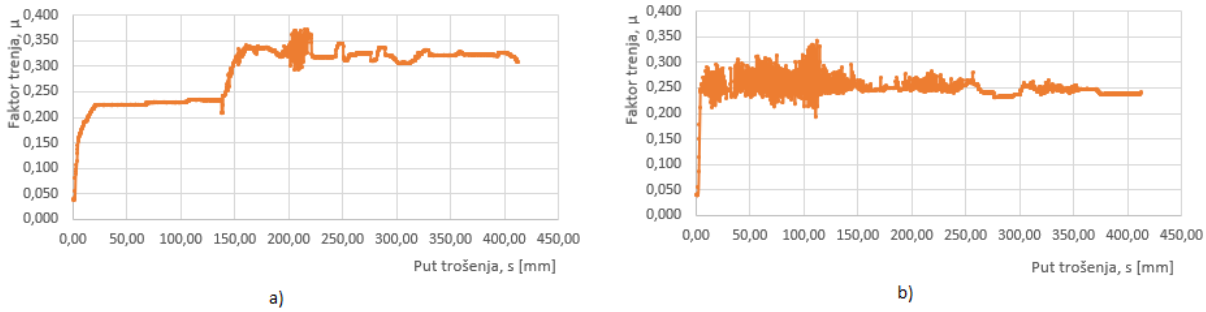
Slika 7.30 a) Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „ležajna bronca – TiN/TiCN prevučeno“ dodir u točci b) Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „ležajna bronca – TiN/TiCN prevučeno“ dodir u liniji



Slika 7.31 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „ležajna bronca – TiN/TiCN prevučeno“ dodir u točci



Slika 7.32 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „ležajna bronca - TiN/TiCN prevučeno“ dodir u liniji



Slika 7.33 a) Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „ležajna bronca - Plazma nitrirano“ dodir u točci b) Ovisnost faktora trenja o putu trošenja za tribopar „ležajna bronca - Plazma nitrirano“ dodir u liniji



Slika 7.34 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „ležajna bronca - Plazma nitrirano“ dodir u točci



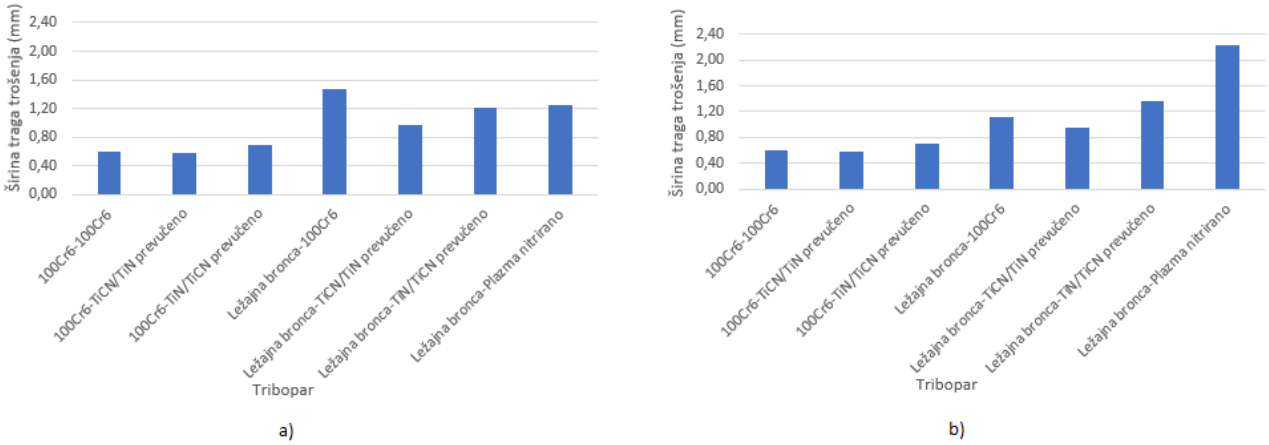
Slika 7.35 Prikaz traga trošenja nakon ispitivanja tribopar „ležajna bronca-Plazma nitrirano“ dodir u liniji

Na slikama 7.18 do 7.35 se uočava kako faktor trenja utječe na trag trošenja. Kod većine triboparova s povećanjem faktora trenja dolazi do većeg trošenja materijala, što je i očekivano. Vrijednosti prosječnih širina tragova trošenja prikazane su u tablici 12 i na slici 7.36.

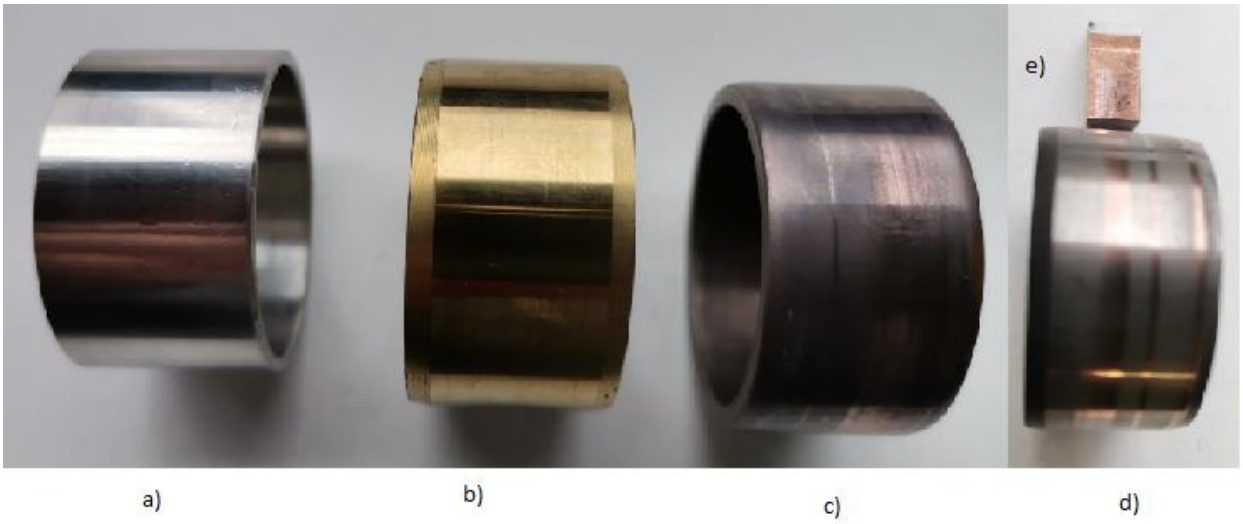
Tablica 12. Prosječne širine tragova trošenja

Triboparovi	Širine tragova trošenja (μm)
100Cr6 - 100Cr6	598,82
100Cr6 – TiCN/TiN prevučeno	584,83
100Cr6 – TiN/TiCN prevučeno	696,95
Ležajna bronca - 100Cr6 (dodir u točci)	1474,37
Ležajna bronca - TiCN/TiN prevučeno (dodir u točci)	964,34
Ležajna bronca - TiN/TiCN prevučeno (dodir u točci)	1217,41
Ležajna bronca - Plazma nitrirano (dodir u točci)	1250,53
Ležajna bronca - 100Cr6 (dodir u liniji)	1110,95
Ležajna bronca – TiCN/TiN prevučeno (dodir u liniji)	958,29
Ležajna bronca – TiN/TiCN prevučeno (dodir u liniji)	1365,80
Ležajna bronca - Plazma nitrirano (dodir u liniji)	2232,97

Sa slika 7.17 do 7.34 je uočljivo da triboparovi s čelikom DIN 100Cr6 ostavljaju kružni otisak trošenja, dok je kod triboparova sa ležajnom broncom taj trag deformiran. Vrijednosti širine traga trošenja su u skoro svim slučajevima veći kod dodira u liniji i u triboparu s ležajnom broncom. Izgled prstenova i uzorka od ležajne bronce nakon trošenja prikazan je na slici 7.37.



Slika 7.36 Usporedba prosječnih širina tragova trošenja za ispitane triboparove, a) Dodir u točci, b) Dodir u liniji



Slika 7.37 a) Prsten kliznog ležaja neprevučeni čelik DIN 100Cr6, b) Prsten kliznog ležaja prevučen TiCN/TiN prevlakom PACVD postupkom, c) Prsten kliznog ležaja prevučen TiN/TiCN prevlakom PACVD postupkom, d) Prsten kliznog ležaja nitriran u plazmi, e) Uzorak kliznog ležaja od ležajne bronce

7.5 Diskusija rezultata

Ispitivanja su provedena u cilju odabira najbolje kombinacije materijala u međusobnom dodiru tijekom rada kliznih ležajeva. Ispitani su prstenovi kliznih ležajeva od čelika i izrezani uzorci ležajne bronce koji su izrezani iz većeg prstena. Polazni materijal je čelik DIN 100Cr6 od kojeg je napravljen jedan od prstenova ostao neprevučen. Tri prstena su obrađeni postupcima PACVD i nitriranjem u plazmi. Prstenovi obrađeni PACVD postupkom su prevučeni TiCN/TiN prevlakom i TiN/TiCN prevlakom.

Ispitivanjem svojstva površinske hrapavosti pokazalo se da se postupkom prevlačenja PACVD TiCN/TiN prevlake minimalno mijenjaju parametri površinske hrapavosti, ali kod prevlačenja sa TiN/TICN prevlakom PACVD postupkom dolazi do znatnog povećanja tih parametara. Iz rezultata ispitivanja vidljivo je da je došlo do povećanja od 2 do 3 puta (ovisno o mjerenom parametru). Nakon prevlačenja objema prevlakama nije došlo do značajnije promjene u obliku profila, ali kod profila TiN/TiCN prevlake uočljivi su izraženije su visine izbočina i dubine udubina. Postupkom nitriranja u plazmi ne dolazi do znatnog povećanja parametara i oblik profila nije promijenjen. Uzorak od ležajne bronce ima puno grublju površinu od ostalih prstenova, parametri su preko 17 puta veći od parametara prstena od čelika DIN 100Cr6, što se vidi iz oblika profila.

Ispitivanjem na kalotest uređaju izmjerene su debljine TiCN/TiN prevlake i TiN/TiCN prevlake. Prema formulama koje su dane u priručniku uređaja dobivene su vrijednosti koje odgovaraju parametrima prevlačenja. TiCN/TiN prevlaka zbog kraćeg trajanja prevlačenja je tanja. U tri mjerenja koja su provedena dobije se prosječna debljina sloja TiCN/TiN iznosi 3,29 µm, dok su vrijednosti debljine prevlake TiCN/TiN varirale od 2,87 µm do 3,53 µm ovisno o ispitanoj kaloti nastaloj ispitivanjem. TiN/TiCN prevlaka, je veće debljine. Izračunata prosječna debljina debljina ove prevlake je 7,18 µm, gdje je u 3 mjerenja vrijednost debljine iznosila između 5,65 µm i 8,62 µm ovisno o izmjerenoj kaloti. Provedbom više mjerenja dobile bi se točnije vrijednosti debljina i s manjim odstupanjima. Kod ispitivanja adhezivnosti prevlaka, koja su provedena VDI 3198 metodom, uočljivo je veće oštećenje TiCN/TiN prevlake što je povezano s manjom debljinom prevlake. Usporedivši izgled oštećenja na prevlaci nastala prodiranjem indentora sa referentnim oštećenjima zadanima u normi, može se zaključiti da adhezivnost TiCN/TiN prevlake zadovoljavajuća, ali pripada kategoriji slabije adhezivnosti (HF4). TiN/TiCN prevlaka je u ispitivanju dala bolje rezultate adhezivnosti i može se svrstati u razred iznad TiCN/TiN prevlake (HF3).

U ispitivanju adhezijskog trošenja i faktora trenja ispitani su uzorci podijeljeni u triboparove. Ispitivanja provedena s parom od ležajne bronce napravljena su u dva slučaja ovisno o položaju uzorka od ležajne bronce. To je napravljeno zbog zakrivljenosti površine uzorka. Usporedbom faktora trenja svih triboparova mogu se podijeliti na prihvatljive, manje prihvatljive i neprihvatljive triboparove. Triboparovi koji su pokazali najmanje vrijednosti faktora trenja (u slučaju suhog trenja) su „ležajna bronca - neprevučeni prsten“,

„neprevučeni prsten - prsten prevučen TiCN/TiN prevlakom“ i „neprevučeni prsten - neprevučeni prsten“. U manje prihvatljive triboparove mogu se uvrstiti „ležajna bronca - prsten prevučen TiCN/TiN prevlakom“, „ležajna bronca - prsten prevučen TiN/TiCN prevlakom“ i „neprevučeni prsten - ležajna bronca“, dok se kao neprihvatljivi tribopar može smatrati „ležajna bronca – prsten nitriran u plazmi“. Zaključci vrijede za ispitane uzorke ležajne bronce s dodirom u točci. Manje faktore trenja imaju prstenovi sa manjom površinskom hrapavosti osim u slučaju sa prstenom nitriranim plazmi. Mogući razlog za visoki faktor trenja u tom slučaju je postojanje zone spojeva. Moguće rješenje je brušenje kako bi se ona uklonila. Smanjenje trenje kod svih triboparova moguće je dodavanjem ulja za podmazivanje. Kada se uzorci s ležajnom broncom ispituju s dodirom u liniji faktori trenja svih triboparova rastu. U tom slučaju najmanje faktore trenja imaju triboparovi „neprevučeni prsten - prsten prevučen TiCN/TiN prevlakom“ i „neprevučeni prsten - neprevučeni čelik“. Uzevši u obzir tragove trošenja najmanji tragovi trošenja nastaju u kontaktu triboparova s neprevučenim čelikom. Kod tih triboparova oblik kružnog oblika gdje je došlo do većeg trošenja uz poprečne linije odnošenja materijala s površine. Kod prstena prevučenog s TiN/TiCN prevlakom došlo je do izduženog traga trošenja zbog izraženijeg profila hrapavosti. Zbog grublje površine ležajne bronce tragovi trošenja su širi, izduljenog i nepravilnog oblika s oscilirajućim promjenama u širini. Uzevši u obzir ispitivanja provedena u radu najmanji faktor trenja uz najmanje adhezijsko trošenje pokazao se tribopar „neprevučeni čelik - prsten prevučen TiCN/TiN prevlakom“ u slučaju suhog trenja uz opterećenje od 98,1 N. Za taj tribopar moguće je preko grafa aproksimirati kako će se u budućnosti nastaviti trošenje, dok se to kod triboparova sa TiN/TiCN prevlaka ne može zbog nepredvidivog ponašanja na grafu.

8. Zaključak

Na temelju provedenih ispitivanja hrapavosti površine, debljine i adhezivnosti prevlaka, otpornosti na adhezijsko trošenje (faktor trenja i širina traga trošenja) na uzorcima: prsten od čelika DIN 100Cr6, prsten prevučen TiCN/TiN prevlakom PACVD postupkom, prsten prevučen TiN/TiCN prevlakom PACVD postupkom, prsten nitriranim u plazmi i uzorku prstena od ležajne bronce dolazi se do sljedećih zaključaka.

Iz rezultata hrapavosti površine slijedi da se prevlačenjem TiCN/TiN prevlakom ne mijenja hrapavost površine i oblik profila. Prevlačenjem TiN/TiCN prevlakom dolazi do povećanja hrapavosti površine uz male promjene profila. Nitriranjem u plazmi ne dolazi do promjene površinske hrapavosti i profila, ali nastankom zone spojeva na površini dolazi do promjene mehaničkih svojstava u obliku povećanja trošenja.

Mjerenjem debljina prevlaka utvrđuje se da je TiCN/TiN prevlaka tanja od TiN/TiCN prevlake. Rezultati ispitivanja adhezivnosti prevlaka pokazuju da se TiCN/TiN prevlaka slabije prianja na površinu čelika DIN 100Cr6 od TiN/TiCN prevlake.

Iz ispitivanja faktora trenja i širine traga trenja slijedi da se, slučaju suhog trenja uz opterećenje od 98,1 N, postiže mali faktor trenja i najmanji trag trenja na triboparu „neprevučeni prsten - prsten prevučen TiCN/TiN prevlakom“ te je ta kombinacija materijala preporučljiva za rad u ispitanim uvjetima. Najmanji faktor trenja uz povećani trag trošenja prisutan je kod tribopara ležajna bronca-neprevučeni čelik s dodirom u točci.

Smanjenje faktora trenja i traga trošenja moguće je uz promjenu parametara toplinske obrade ili dodatnu obradu odvajanjem česticama, poput brušenja i poliranja. Drugi uobičajeni način smanjenja vrijednosti trošenja i trenja je dodavanje ulja za podmazivanje.

U nastavku ovih istraživanja preporučuje se provesti ispitivanja za slučajeve tekućeg trenja koje je uobičajeno prisutno u radu kliznih ležajeva. U uvjetima tekućeg trenja preporučuje se ispitati utjecaj vrste i temperature ulja za podmazivanje na faktor trenja i trag trošenja, uzevši u obzir reakcije koje su moguće u kontaktu prevlaka i ulja.

LITERATURA

[1] https://new.abb.com/mechanical-power-transmission/mounted-bearings/journal-plain-bearings dostupno (1.2.2021.)

[2] Vučković K., Podloge za predavanja iz kolegija „Elementi konstrukcija II“, Ležajevi, autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2020.

[3] Landek D., Predavanje iz kolegija „Posebni metalni materijali“, „Alatni materijali“, autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2020.

[4] https://www.machinerylubrication.com/Read/638/failure-analysis-bearings dostupno (1.2.2021.)

[5] https://www.waukbearing.com/resources/bearing-damage-index/corrosion/ dostupno (1.2.2021.)

[6] Decker K. H., Elementi strojeva, Golden marketing, Tehnička knjiga, Zagreb, 2006.

[7] http://www.bearing.net.au/bearings/plain-bearings-bushes dostupno (1.2.2021.)

[8] https://www.otaisteel.com/products/bearing-steel-and-gear-steel/100cr6-steel/ dostupno (1.2.2021.)

[9] Stupnišek M., Cajner F., Osnove toplinske obrade, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.

[10] https://www.ausasteel.com/fichas/Bearing-Steel-100Cr6-AUSA.pdf dostupno (4.2.2021.)

[11] P.W. Mason, P.S Prevey, Iterative Tagauchi analysis: Optimizing the austenite content and hardness in 52100 steel, Journal of Materials Engineering and Perfomance, 2001.

[12] J. Chakraborty, D. Bhattachrjee, I. Manna Austempering of bearing steel for improved mechanical properties, 2008.

[13] C. Li, J. L. Wang, Effect of pre-quenching on martensite-bainitic microstructure and mechanical properties of GCr15 bearing steel, Journal of materials science, 1993.

[14] C. Şimşir, M. Dalgiç, T. Lübben, A. Irretier, M. Wolff, H. W. Zoch, The Bauschinger effect in supercooled austenite of SAE 52100 steel, Acta Materialia, 2010.

[15] M. A. Yallese, K. Chaoui, N. Zeghib, L. Boulanouar, JF. Rigal, Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool, Journal of materials processing technology, 2009.

[16] https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/physical-vapour-deposition-pvd dostupno (5.2.2021.)

[17] https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/chemical-vapour-deposition-cvd dostupno (5.2.2021.)

[18] https://www.oerlikon.com/balzers/com/en/portfolio/surface-technologies/pacvd/ dostupno (6.2.2021.)

[19] K.N. Strafford, Tribological properties of coating-expectations, performance and the design dilemma, Surface and Coatings Technology, 1996.

[20] S. Ma, Y. Li, K. Xu, Investigation on processing of industrial set-up plasma enchanced chemical vapour deposition with pulsed d.c. power, Surface and Coatings Technology, 2000.

[21] M. Stoiber, E. Badisch, C. Lugmair, C. Mitterer, Low-friction coatings deposited by PACVD, Surface and Coatings Technology, 2003.

[22] Z. Cheng, HR. Peng, GW. Xie, YL. Shi, Annealing studies of TiN films deposited by plasma-assisted CVD, Surface and Coatings Technology, 2001.

[23] H.L. Wang, J.L. He, M.H. Hon, Sliding wear resistance of TiCN coatings on tool steel made by plasma-enchanced chemical vapour deposition, Wear, 1993.

[24] N. R. Banapurmath, M. R. Tungal, S. A. Hallad, K. S. Kaladagi, N. B. Angadi, A. S. Shettar, Tribological studies on bearings coated with titanium carbo-nitride (TiCN) using chemical vapour deposition (Cvd) method, Journal of applied rsearch and techonolgy, 2018.

[25] Grilec K., Jakovljević S., Marić G., Tribologija u strojarstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.

[26] https://www.yumpu.com/xx/document/read/49890600/hrapavost-povrsine dostupno (8.2.2021.)

[27] N. Vidakis, A. Antoniadis, N. Bilalis, The VDI 3198 indentation test evaluation of reliable qualitative control of layered compounds, Journal of Materials Processing Technology, 2003.

[28] TRIBOtechnic, Calotester User's guide

[29] https://extremecoatings.net/technical-resources/test-results/adhesive-wear-test-astm-g77/ dostupno (8.2.2021.)

[30] https://eshop.ntn-snr.com/en/1R30X35X17-13838073.html dostupno (8.2.2021.)

Prilog 1 : Hrapavost površina

perthometer S8P 4.5

Perthen

LT 1.750 MM
LM 1.250 MM
VB 12.50 YM

LABORATORIJ
ZA PRECIZNA MJERENJA
DUZINA

FAKULTET STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE
ZAGREB

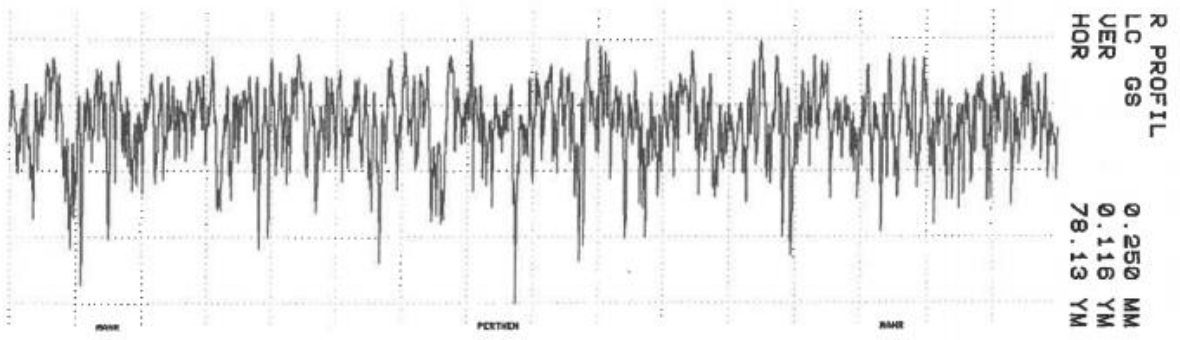
OBJEKT:UZORAK 0

NR.:18.2.2019.
NAME:G.BARSIC

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

KENNWERT — STATISTIK N = 6

	LC GS 0.250 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.470	0.059	0.167	0.535	0.368		
2	RZ	YM	0.400	0.039	0.098	0.451	0.353		
3	RA	YM	0.050	0.003	0.008	0.053	0.046		
4	RP	YM	0.150	0.003	0.008	0.154	0.146		
5	RPM	YM	0.138	0.007	0.019	0.146	0.127		
6	WT	YM	0.051	0.023	0.060	0.095	0.034		
7	RT	YM	0.478	0.048	0.135	0.542	0.487		
8	PT	YM	0.498	0.038	0.092	0.556	0.464		



Slika 9.1 Profil hrapavosti i parametri neprevučenog prstena kliznog ležaja od čelika DIN 100Cr6

perthometer S8P 4.5

Perthen (Mahr)

LT	5.600 MM
LM	4.000 MM
VB	12.50 YM

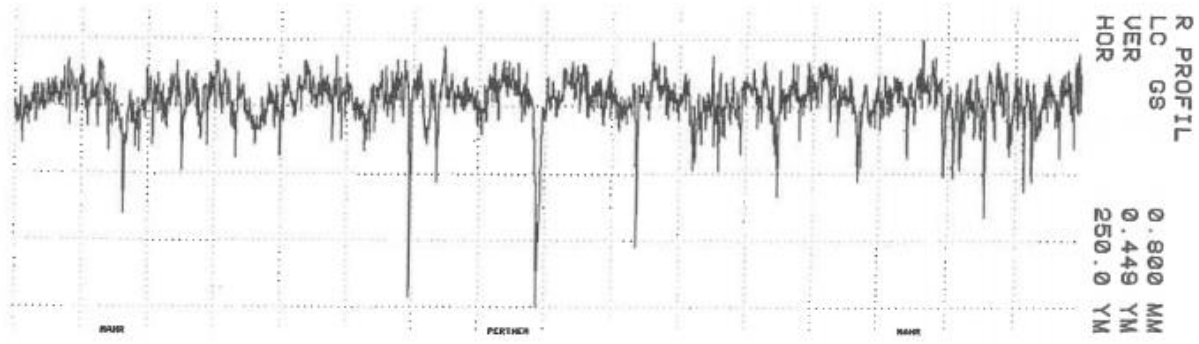
LABORATORIJ
ZA PRECIZNA MJERENJA
DUZINA

FAKULTET STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE
ZAGREB

OBJEKT:CILINDAR
S PREVLAKOM
NR.:
NAME:G.BARSIC

MESS.-NR.: 5
T1 RHT 6-50 50 6

	KENNWERT LC GS 0.800 MM		STATISTIK N = 5 X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	1.526	0.377	0.931	2.072	1.141		
2	RZ	YM	1.106	0.215	0.522	1.329	0.807		
3	RA	YM	0.104	0.018	0.050	0.127	0.076		
4	RP	YM	0.462	0.090	0.228	0.683	0.375		
5	RPM	YM	0.368	0.050	0.132	0.453	0.321		
6	WT	YM	0.421	0.197	0.480	0.729	0.249		
7	RT	YM	1.629	0.358	0.863	2.163	1.300		
8	PT	YM	1.783	0.219	0.578	2.138	1.560		



Slika 9.2 Profil hrapavosti i parametri prstena kliznog ležaja prevučenog TiCN prevlakom PACVD postupkom

perthometer S8P 4.5

Perthen

LT	1.750 MM
LM	1.250 MM
VB	12.50 YM

LABORATORIJ
ZA PRECIZNA MJERENJA
DUZINA

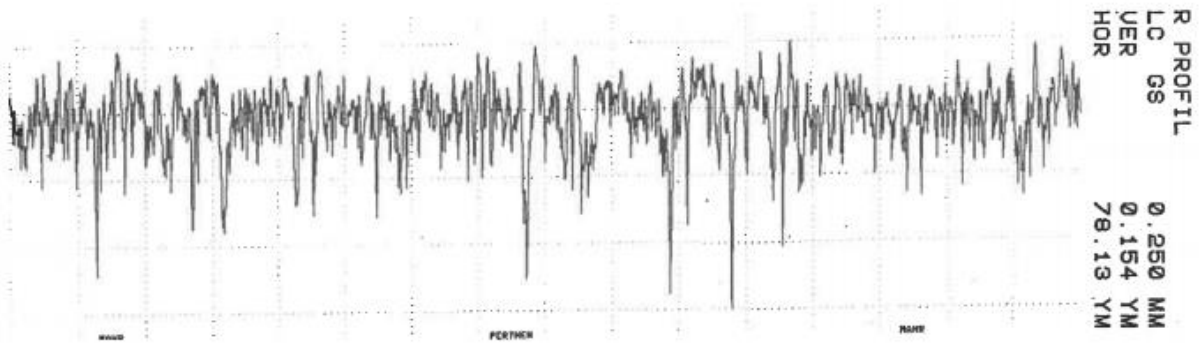
FAKULTET STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE
ZAGREB

OBJEKT:UZORAK 3

NR.:18.2.2019.
NAME:G.BARSIC

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

	KENNWERT		STATISTIK N = 6						
	LC GS 0.250 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.513	0.075	0.168	0.615	0.447		
2	RZ	YM	0.418	0.056	0.133	0.497	0.365		
3	RA	YM	0.052	0.003	0.005	0.055	0.050		
4	RP	YM	0.167	0.014	0.044	0.190	0.146		
5	RPM	YM	0.143	0.012	0.031	0.153	0.122		
6	WT	YM	0.093	0.085	0.225	0.265	0.040		
7	RT	YM	0.523	0.072	0.168	0.615	0.447		
8	PT	YM	0.571	0.105	0.256	0.698	0.443		



Slika 9.3 Profil hrapavosti i parametri prstena kliznog ležaja nitriranog u plazmi

perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen

LT	5.600 MM
LM	4.000 MM
VB	12.50 YM

LABORATORIJ
ZA PRECIZNA MJERENJA
DUZINA

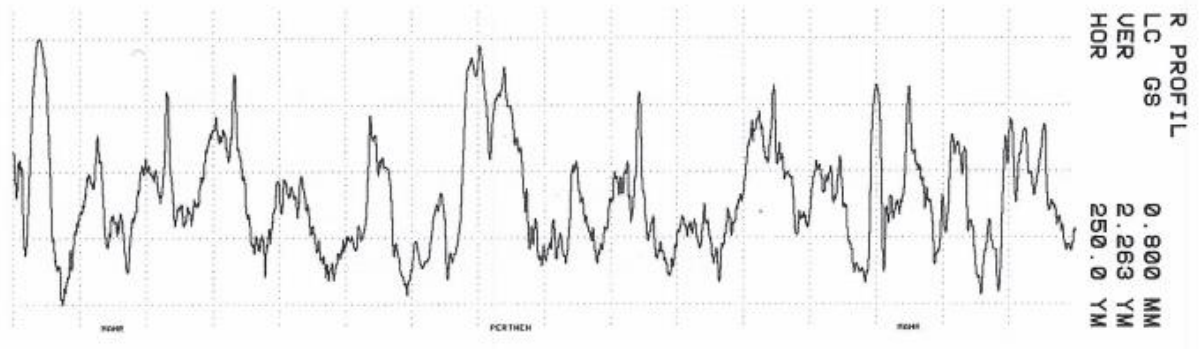
FAKULTET STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE
ZAGREB

OBJEKT:UNUTARNJI

NR.:28.01.2021.
NAME:G.BARSIC

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

KENNWERT			STATISTIK N = 6						
	LC GS 0.800 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	8.724	1.442	3.948	11.34	7.392		
2	RZ	YM	6.847	0.818	1.839	7.693	5.855		
3	RA	YM	1.133	0.191	0.513	1.467	0.954		
4	RP	YM	5.383	0.873	2.435	6.944	4.509		
5	RPM	YM	4.118	0.585	1.347	4.781	3.434		
6	WT	YM	5.331	2.543	6.367	9.580	3.213		
7	RT	YM	8.824	1.406	3.948	11.34	7.392		
8	PT	YM	12.81	2.936	7.851	17.40	9.554		



Slika 9.4 Profil hrapavosti i parametri uzorka kliznog prstena od ležajne bronce

perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen

LT	1.750 MM
LM	1.250 MM
VB	12.50 YM

LABORATORIJ
ZA PRECIZNA MJERENJA
DUZINA

FAKULTET STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE
ZAGREB

OBJEKT:VANJSKI

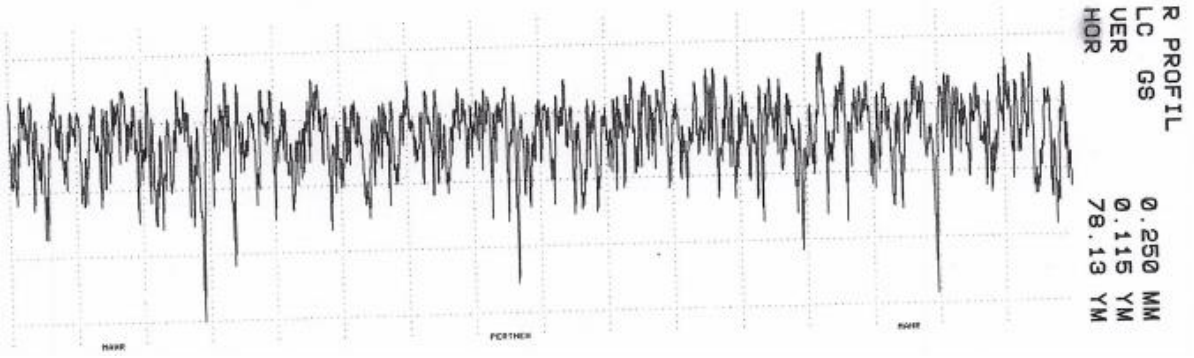
NR.:28.01.2021.
NAME:G.BARSIC

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

KENNWERT

STATISTIK N = 6

	LC GS 0.250 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.474	0.126	0.336	0.727	0.391		
2	RZ	YM	0.369	0.036	0.101	0.438	0.336		
3	RA	YM	0.045	0.002	0.005	0.048	0.043		
4	RP	YM	0.181	0.025	0.076	0.227	0.151		
5	RPM	YM	0.142	0.016	0.050	0.169	0.119		
6	WT	YM	0.051	0.007	0.020	0.060	0.040		
7	RT	YM	0.481	0.123	0.336	0.727	0.391		
8	PT	YM	0.495	0.116	0.314	0.723	0.409		



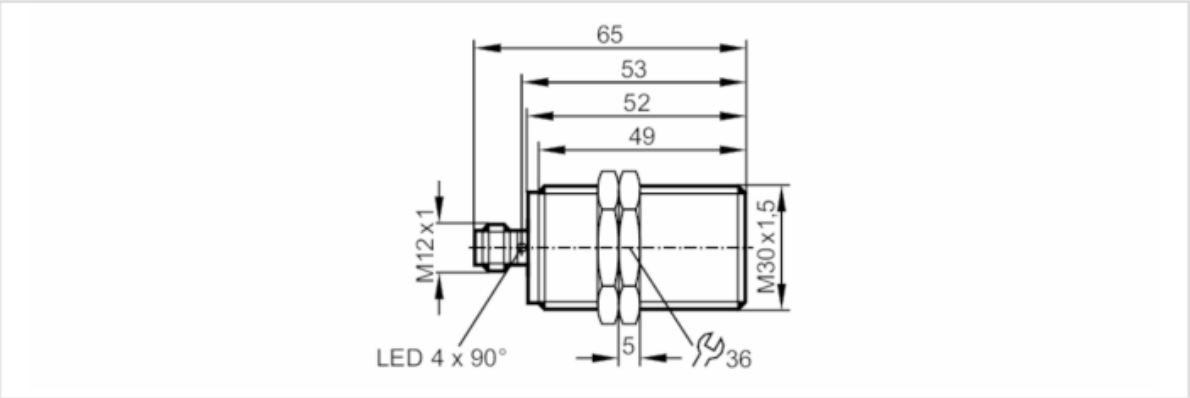
Slika 9.5 Profil hrapavosti i parametri prstena kliznog ležaja prevučenog TiN prevlakom PACVD postupkom

Prilog 2: Tehnički podaci o senzoru IFM II5917

II5917

Induktivni analogni senzor s IO-Linkom

IIK4010A2PKG/IO/US



IO-Link

Značajke proizvoda		
Električna izvedba		PNP/NPN; (prigodno za parametrizaciju)
Izlazna funkcija		Normalno zatvoreno/normalno otvoreno; (prigodno za parametrizaciju)
Komunikacijsko sučelje		IO-Link
Kućište		Tip navoja
Dimenzije	[mm]	M30 x 1,5 / L = 65
Električni podaci		
Radni napon	[V]	15...30 DC
Potrošnja struje	[mA]	< 30
Zaštitna klasa		II
Zaštita od obrnutog polariteta		da
Izlazi		
Električna izvedba		PNP/NPN; (prigodno za parametrizaciju)
Izlazna funkcija		Normalno zatvoreno/normalno otvoreno; (prigodno za parametrizaciju)
Maks. naponski pad izlaza prekapčanja DC	[V]	2,5
Trajna snaga struje izlaza prekapčanja DC	[mA]	100
Frekvencija prekapčanja DC	[Hz]	300
Analogni naponski izlaz	[V]	0...10; (linearni; gradijent: 1,111 V/mm; za prednji i ciljni pristup od blagog čelika: 30 x 30 x 1 mm)
Min. otpornost na opterećenje	[Ω]	2000
Zaštita od kratkog spoja		da
Zaštita od preopterećenja		da
Domet nadzora		
Mjerno područje	[mm]	1...10
Poveznica IO sa sklopnom točkom	[mm]	1,88...9,35

Slika 10.1 Tehnički podaci senzora IFM II5917