

# Trošenje kliznih ležaja

---

**Rukavina, Mislav**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:442504>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-28**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Student:  
Mislav Rukavina

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

TROŠENJE KLIZNIH LEŽAJA

Mentor:

prof. dr. sc. Krešimir Grilec

Student:

Mislav Rukavina

Zagreb, 2019.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MISLAV RUKAVINA** Mat. br.: 0035202543

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **TROŠENJE KLIZNIH LEŽAJA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **WEAR OF SLIDING BEARS**

Opis zadatka:

Ležaji su elementi strojeva koji prenose sile između površina koje su u relativnom gibanju. Ležaji kod kojih između dijelova pri gibanju dolazi do trenja klizanja nazivaju se klizni ležaji. Uzročnici koji dovode do oštećenja ležaja mogu biti mnogobrojni, a najčešći uzrok je trošenje.

U ovom radu je potrebno:

- 1) Navesti zahtjeve koje materijal kliznog ležaja mora ispuniti.
- 2) Dati pregled materijala koji se koriste za izradu kliznih ležaja.
- 3) Navesti moguće oblike trošenja kliznih ležaja.
- 4) Pronaći primjer istrošenog kliznog ležaja i analizirati njegovo trošenje.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

29. studenog 2018.

Zadatak zadao:

*K. Grilec*

Prof.dr.sc. Krešimir Grilec

Rok predaje rada:

1. rok: 22. veljače 2019.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.

3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.

2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.

3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Predsjednik Povjerenstva:

*Branko Bauer*  
 Prof. dr. sc. Branko Bauer

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

Zahvaljujem prof. Krešimiru Grilecu na svim korisnim savjetima, uloženom vremenu i trudu i pomoći u svakom trenutku. Također zahvaljujem asistentu Draženu Mezdiću.

---

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	V
POPIS OZNAKA .....	III
SAŽETAK .....	1
SUMMARY .....	2
1. UVOD .....	3
1.2. Klizni ležajevi .....	4
1.3. Dijelovi kliznog ležaja .....	5
1.4. Trenje klizanja .....	6
1.5. Osnovne vrste kliznih ležaja .....	9
2. ZAHTJEVI NA MATERIJAL KLIZNIH LEŽAJEVA .....	11
2.1. Zahtjevi vezani za čvrstoću .....	11
2.2. Zahtjevi vezani za deformacijske karakteristike materijala .....	12
2.3. Zahtjevi vezani za karakteristike površinskog sloja materijala kliznog ležaja .....	13
2.4. Ostali zahtjevi koji ne spadaju u gore navedene grupe .....	14
3. MATERIJALI KOJI SE KORISTE ZA IZRADU KLIZNIH LEŽAJA .....	15
3.1. Materijali za rukavce .....	16
3.2. Materijali za blaznice ležaja .....	17
3.3. Sinterirani materijali .....	20
3.4. Opći kriterij za izbor materijala kliznih ležaja .....	21
4. MOGUĆI OBLICI TROŠENJA KLIZNIH LEŽAJA .....	22
4.1. Abrazija .....	22
4.2. Adhezija .....	23
4.3. Umor površine .....	25

---

4.4. Tribokorozija .....	26
4.5. Ostali oblici trošenja.....	27
4.5.1. Korozija.....	27
4.5.2. Erozijska česticama.....	27
4.5.3. Erozijska kapljevina .....	29
4.5.4. Kavitacijska erozija.....	30
4.5.5. Nagrizanje, plastična deformacija i lom.....	31
4.6. Oštećenja i otkazi metalnih materijala ležaja .....	32
5. UZORCI ISTROŠENOG KLIZNOG LEŽAJA .....	34
5.1. Najčešći razlozi oštećenja kliznih ležaja motora.....	37
5.2. Kemijski sastav uzorka.....	38
5.3. Poliranje, nagrizanje i mikrotvrdoća .....	44
5.4. Mehanizmi trošenja ležaja na primjerima uzoraka.....	50
6. ZAKLJUČAK .....	54
LITERATURA .....	55

---

**POPIS SLIKA**

Slika 1 . Tipovi trenja u ležajevima.....	3
Slika 2 . Podjela ležajeva obzirom na smjer djelovanja opterećenja.....	4
Slika 3 . Primjer kliznog ležaja.....	5
Slika 4 . Dijelovi kliznog ležaja.....	6
Slika 5 . Vrste trenja .....	6
Slika 6 . Trenje klizanja.....	7
Slika 7 . Jedinični događaj procesa klizanja .....	8
Slika 8 . Jedinični događaj abrazije .....	22
Slika 9 . Jedinični događaj adhezije.....	24
Slika 10 . Jedinični događaj umora površine.....	25
Slika 11 . Jedinični događaj tribokorozije .....	26
Slika 12 . Erozijska čestica.....	28
Slika 13 . Jedinični sudar čestica s trošenom površinom .....	28
Slika 14 . Erozijska kapljevina .....	29
Slika 15 . Kavitacijska erozija .....	30
Slika 16 . Mehanizam nastanka kavitacije.....	30
Slika 17 . Učestalost pojedinog mehanizma trošenja u postotku .....	33
Slika 18 . Mercedes ML 270 CDI.....	34
Slika 19 . Primjer motora s različitim vrstama kliznih ležaja.....	35
Slika 20 . Tipovi i glavni dijelovi ležaja.....	36
Slika 21 . Istrošeni uzorci .....	38
Slika 22 . Prijenosni XRF spektrometar.....	39
Slika 23 . Prednja i stražnja strana kliznog ležaja .....	40
Slika 24 . Uzorci u poliranoj masi, naprava za poliranje.....	44
Slika 25 . Mikrostruktura u poliranom stanju uzorka 2, povećanje 100x.....	45



---

Slika 26 . Mikrostruktura u poliranom stanju s dimenzijama sloja uzorka 2 .....	45
Slika 27 . Mikrostruktura u poliranom stanju uzorka 3, povećanje 100x.....	46
Slika 28 . Mikrostruktura u poliranom stanju s dimenzijama sloja uzorka 3 .....	46
Slika 29 . Mikrostruktura u nagriženom stanju uzorka 2 s dimenzijama međusloja.....	47
Slika 30 . Mikrostruktura u nagriženom stanju uzorka 3 s dimenzijama međusloja .....	48
Slika 31 . Raspored slojeva na primjeru uzorka 2 .....	48
Slika 32 . Dvokomponentni klizni ležaj .....	49
Slika 33 . Uzorak 1 .....	51
Slika 34 . Uzorak 2-očišćeni.....	52
Slika 35 . Uzorak 2-ne očišćeni .....	52
Slika 36 . Uzorak 3-očišćeni.....	53
Slika 37 . Uzorak 3-ne očišćeni .....	53

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1 . Dozvoljena specifična opterećenja materijala kliznih ležaja.....	15
Tablica 2 . Kriterij za izbor metalnih materijala podmazivanih kliznih ležaja.....	21
Tablica 3 . Uzročnici otkaza i njihova učestalost .....	33
Tablica 4 . Kemijski sastav stražnje strane uzorka 1 .....	40
Tablica 5 . Kemijski sastav prednje strane uzorka 1 .....	41
Tablica 6 . Kemijski sastav stražnje strane uzorka 2 .....	41
Tablica 7 . Kemijski sastav prednje strane uzorka 2.....	42
Tablica 8 . Kemijski sastav stražnje strane uzorka 3 .....	42
Tablica 9 . Kemijski sastav prednje strane uzorka 3.....	43
Tablica 10 . Mikrotvrdoća uzorka 1.....	50
Tablica 11 . Mikrotvrdoća uzorka 2.....	50

---

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$F_n$	N	normalna sila
$F_t$	N	tangencijalna komponenta opterećenja
$F_{tr}$	N	sila trenja
$R_a$	$\mu\text{m}$	srednje aritmetičko odstupanje profila
$\mu$	-	faktor trenja

## SAŽETAK

Ležaji su elementi strojeva koji prenose sile između površina koje su u relativnom gibanju. Ležaji kod kojih između dijelova dolazi do trenja klizanja nazivaju se klizni ležaji. Uzroci koji dovode do oštećenja mogu biti mnogobrojni. U ovom radu navest će se zahtjevi koje materijal kliznog ležaja mora ispuniti, dati pregled materijala koji se koriste za njihovu izradu te nabrojati mogući oblici njihovog trošenja. Na primjeru istrošenih kliznih ležaja motora Mercedes ML 270 CDI analizirat će se trošenje te na temelju rada dati zaključak zbog kojeg je došlo do trošenja.

***Ključne riječi*** : klizni ležaj, materijal kliznog ležaja, trošenje

**SUMMARY**

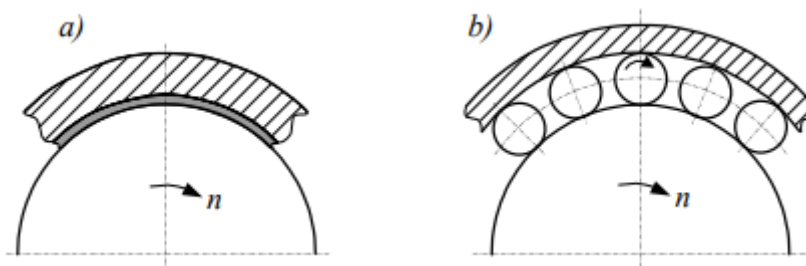
Bearings are mechanical elements that transmit the forces between surfaces in relative movement. Bearings in which there is sliding friction between the parts are called plain bearings or slide bearings. They can be damaged in many different ways. This paper presents the materials used for making plain bearings and the requirements that those materials have to meet. In addition, it lists potential ways in which plain bearings can wear out. The wear-out process is analyzed on the example of worn-out plain bearings of a Mercedes ML 270 CDI engine and, based on the theoretical part of the paper, a conclusion is drawn on what caused the plain bearings to wear out.

*Keywords:* plain bearings, materials used for making plain bearings, wear-out process

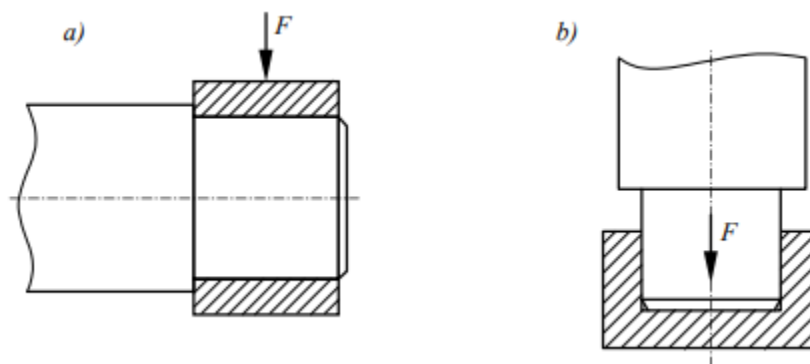
# 1.UVOD

## 1.1. Ležajevi

Ležajevi su strojni elementi koji služe za nošenje, vođenje ili oslanjanje pokretnih dijelova (npr. osovine, vratila, njihajne poluge, kotača i sl.) na mirujuće dijelove (npr. postolja, kućišta i sl.) tj. oni su elementi strojeva koji prenose sile između površina koje su u relativnom gibanju. Uz prenošenje sila s jednog elementa na drugi, osnovna im je zadaća smanjivanje trenja između njih. Podjela ležajeva s obzirom na vrstu trenja gibanja je na klizne ležaje i valjne ležaje. Prema smjeru djelovanja sila, ležaj može biti poprečni i uzdužni. Poprečni ili radijalni ležaj prenosi isključivo sile okomite na os ležaja, a uzdužni ili aksijalni preuzima one sile koje djeluju u smjeru njegove osi. Također, postoji i kombinacija oba ležaja što se naziva radijalno-aksijalni ležaj. Ispravan rad ležajeva je često od presudnog značenja za ispravan rad i vijek trajanja strojeva i naprava u koje su ugrađeni. Zbog toga je vrlo važno odabrati najprikladniju vrstu, odabrane ležajeve pravilno proračunati, te uzeti u obzir upute za njihovu ugradnju u konstrukcijski sklop stroja ili naprave. Pri tome se moraju uzimati u obzir brojni kriteriji, kao što su promjer osovine ili vratila, način opterećenja, brzina vrtnje, zahtijevani životni vijek, uvjeti rada (temperatura, prašnjava okolina), itd. [1]



Slika 1. Tipovi trenja u ležajevima a) trenje klizanja b) trenje valjanja [1]



Slika 2. Podjela ležajeva obzirom na smjer djelovanja opterećenja

a)radijalni ležaj b)aksijalni ležaj [1]

## 1.2. Klizni ležaji

Klizni ležajevi su strojni elementi koji omogućavaju vođenje pokretnih dijelova strojeva i prijenos opterećenja s rukavca osovine ili vratila na blazinicu ležaja. Kod kliznih ležaja dolazi do trenja klizanja između dijelova pri gibanju. Pri tome su klizne površine podmazane uljem, a u rjeđim situacijama mastima ili krutim sredstvima za podmazivanje. Osnovna namjena podmazivanja kliznih ležajeva jest smanjenje trenja i time smanjenje gubitaka snage, smanjenje trošenja i time povećanje vijeka trajanja ležaja, te smanjenje zagrijavanja i time sprečavanje zaribavanja ležajeva. Ova tri cilja ostvaruju se dobrim podmazivanjem, pri kojem su površina rukavca i blazinice ležaja razdvojene tankim slojem ulja (uljnim filmom), u kojem vlada tekuće trenje. Prema tome, kod idealnog kliznog ležaja nema trošenja. Dobri ležajevi mogu pod povoljnim okolnostima raditi bez vidljivog trošenja, s praktički neograničenom trajnosti. To je posljedica razvoja tribologije – znanosti o trenju, trošenju i podmazivanju. Za postizanje tekućeg trenja potrebno je u sloju maziva osigurati tlak koji omogućava ravnotežno stanje s vanjskim opterećenjem ležaja. [1]

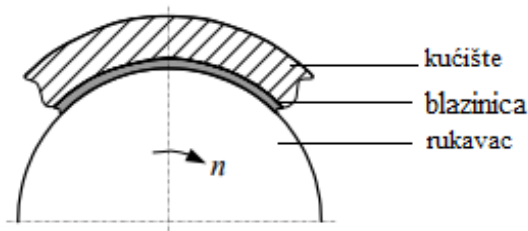


**Slika 3. Primjer kliznog ležaja [2]**

### **1.3. Dijelovi kliznog ležaja**

Osnovni dijelovi kliznog ležaja su kućište, blazinica i rukavac. Klizni ležaji djeluju na principu trenja klizanja gdje se blazinica u mirovanju direktno dodiruje s kliznim ploham rukavca, što se može vidjeti iz slike 4. Dakle kliznim ležajevima se ostvaruje neposredan prijenos opterećenja s rukavca na blazinicu. Pri tome su klizne površine podmazane uljem, a u rjeđim situacijama mastima ili krutim sredstvima za podmazivanje. Prednost je kliznoga ležaja bešuman rad, miran i tih hod, dobro amortiziranje udaraca, manja osjetljivost na nečistoće, veća tolerancija pri izradbi, lakši popravci i omogućavanje velike brzine vrtnje. Naravno kao i kod svakog strojnog elementa tako i kod kliznih ležajeva postoje nedostaci, a to su: prilikom pokretanja i malih brzina dolazi do velikog trenja, neprecizno vođenje, odnosno pozicioniranje pokretnih strojnih dijelova, jako velika potrošnja maziva, osjetljivi su ako dođe do nedostatka podmazivanja, moraju se pažljivo održavati i uređivati, na kvalitetu ležajeva jako utječu materijal i toplinska obrada vratila ili osovine [2].

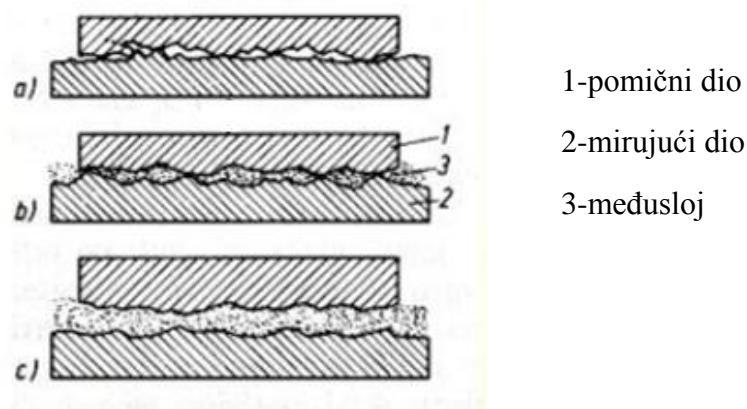




Slika 4. Dijelovi kliznog ležaja [1]

#### 1.4. Trenje klizanja

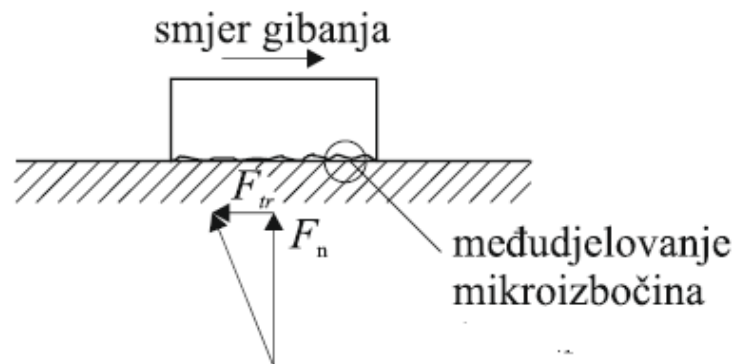
Za ostvarenje relativnog gibanja između dodirnih ploha treba savladati silu trenja. Prema definiciji trenje je sila ili otpor koja se suprotstavlja relativnom kretanju krutih tijela u dodiru. Djeluje paralelno s dodirnim površinama, a smjer joj je suprotan smjeru relativnog kretanja. Dakle za ostvarivanje relativnog gibanja između dodirnih ploha treba savladati silu trenja. Razlikuju se sljedeće vrste trenja prema agregatnom stanju tijela u kontaktu kao što su trenje među krutim površinama (tzv. vanjsko trenje) i trenje među dijelovima fluida, odnosno između krutog tijela i fluida (tekućinsko trenje ili viskoznost) [3]. Vanjsko trenje se prema podmazivanju može podijeliti na suho trenje, trenje uz podmazivanje (tekuće trenje) i mješovito trenje. Suho trenje je trenje kod kojeg između dodirnih površina nema nikakvog stranog sloja, dok se kod tekućeg trenja površine naliježanja ne dodiruju, njihove vrhove razdvaja nosivi tekući ili plinoviti sloj. Mješovito trenje je kombinacija suhog i tekućeg trenja. Na slici 5. mogu se vidjeti vrste trenja [4].



Slika 5. Vrste trenja a) suho trenje, b) mješovito trenje, c) tekuće trenje [4]

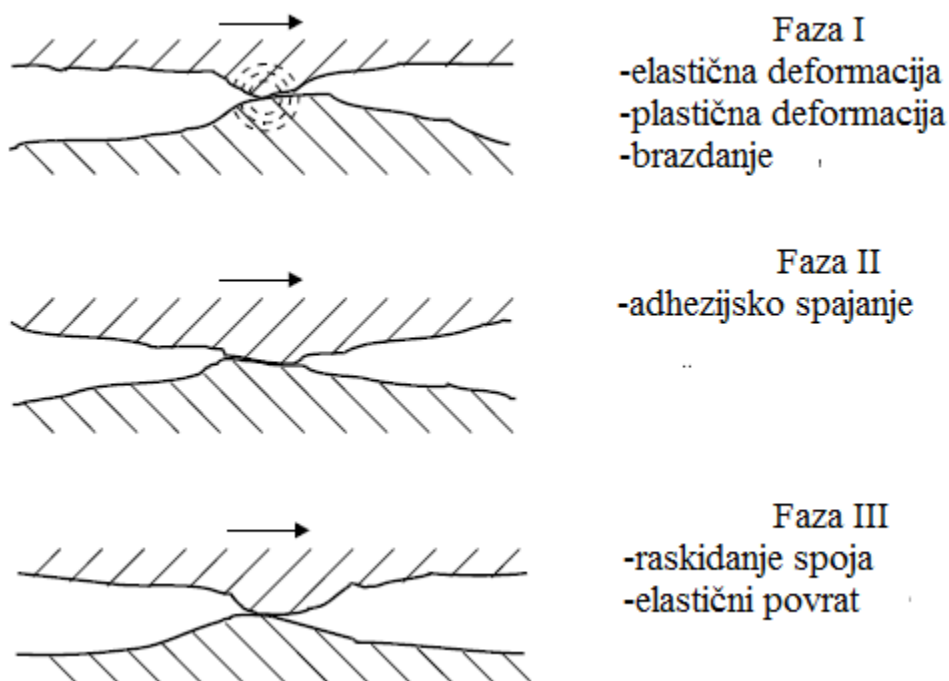
Prilikom pokretanja tijela razlikuje se trenje mirovanja (statičko trenje, trenje pokretanja) – najveća sila trenja koja prisiljava tijelo da još miruje i trenje kretanja (kinetičko, dinamičko trenje) – sila koju je potrebno savladati da bi se održalo stanje relativnog kretanja.

Trenje klizanja nastaje između dva elementa tribosustava, slika 6. Kod suhog dodira sila trenja proporcionalna je normalnom opterećenju  $F_{tr} = \mu F_n$ . Jedan zakon trenja kaže da je trenje neovisno o površini kontakta krutih tijela. Međutim stvarni dodir dviju površina razlikuje se od prividnog, geometrijskog.



Slika 6. Trenje klizanja [3]

Objašnjenje porijekla sile trenja dano je slikom 7., koja prikazuje jedinični događaj procesa klizanja tj. slijed zbivanja od početka do završetka dodira jednog para mikroizbočina.



Slika 7. Jedinični događaj procesa klizanja [3]

Sila trenja klizanja sastoji se od zbroja četiriju komponenata koje su i same zbroj pojedinačnih komponenata koje djeluju na svakom dodiru mikroizbočina. Ta jednadžba glasi:

$F_t = \Sigma F_1 + \Sigma F_2 + \Sigma F_3 + \Sigma F_4$ , gdje je  $\Sigma F_1$  otpor na elastičnu deformaciju,  $\Sigma F_2$  otpor na plastičnu deformaciju,  $\Sigma F_3$  otpor na brazdanje,  $\Sigma F_4$  otpor na kidanje adhezijskih veza.

Otpor na elastičnu deformaciju proporcionalan je modulima elastičnosti materijala kliznog para, otpor na plastičnu deformaciju ovisi o njihovim granicama razvlačenja, otpor na brazdanje ovisi o njihovim duktilnostima i o brzini relativnog gibanja, a otpor na kidanje adhezijskih veza ovisi o jačini adhezijske veze (Van der Waals, elektrostatička, metalna i kovalentna) uspostavljene između materijala kliznog para. Na trenje utječe kemijski sastav materijala, stanje obrade površine oba tijela, sastav okoline, opterećenje, brzina kretanja, način kretanja (pravocrtno, krivudavo, naprijed-natrag...), vrste kontakta (površinski, koncentrirani), temperature i prethodno klizanje po toj površini. [3]

## 1.5. Osnovne vrste kliznih ležaja

Prema [5], osnovni faktor kojim se određuje vrsta kliznog ležaja je pravac djelovanja opterećenja, pa se suglasno tome klizni ležaji dijele na radijalne, aksijalne i radijalno-aksijalne. S obzirom na način vođenja na linearne, rotacijske, linearno-rotacijske i sferne.

Prema vrsti materijala od kojeg su izrađeni, klizni ležaji dijele se u dvije velike grupe:

- metalni,
- nemetalni.

Prema vrsti podmazivanja dijele se na :

- hidrodinamičke,
- hidrostatičke,
- hibridne,
- plinsko-dinamičke,
- plinsko-statičke,
- ležaji s uljnim slojem nastao istiskivanjem,
- porozne/sinterirane,
- samopodmazivajuće,
- sklop ležaja s vlastitim uljem,
- ležaji s čvrstim mazivom,
- ležaji bez podmazivanja.

U odnosu na konstrukciju i način rada elementa, klizni ležaji mogu biti:

- cilindrični,
- profilirani cilindrični,
- ležaji s više uljnih klinova,
- samopodesivi,
- aksijalni s nepokretnim segmentima,
- radijalni i aksijalni ležaji s pokretnim segmentima,
- sklop kliznog ležaja s postoljem i
- sklop kliznog ležaja s naslonom.

## 2. ZAHTJEVI NA MATERIJAL KLIZNIH LEŽAJEVA

Kod odabira materijala za klizne ležajeve potrebno je voditi računa o materijalu blazinice ležaja, materijalu rukavca, ali također i o materijalu maziva. Ta tri materijala zajedno tvore tribološki sustav čija svojstva su izrazito bitna za ispravan rad kliznih ležajeva bez obzira o kojoj se vrsti trenja radi. Od temeljnih zahtjeva najvažnija je otpornost na trošenje, posebno je naglasak kod kliznih ležajeva na otpornost na adheziju ukoliko klizni ležaj radi u uvjetima suhog trenja. Svi zahtjevi koji se postavljaju metalnim materijalima za klizne ležaje mogu se razvrstati u sljedeće grupe:

- zahtjevi vezani za čvrstoću
- zahtjevi vezani za deformacijske karakteristike materijala
- zahtjevi vezani za karakteristike površinskog sloja materijala kliznog ležaja [5]

### 2.1. Zahtjevi vezani za čvrstoću

Čvrstoća materijala se obično razmatra kao tlačna čvrstoća i čvrstoća ili otpornost na umor. Tlačna čvrstoća mora biti dovoljna da bi se izbjegla plastična deformacija ležajnog materijala, a otpornost na umor je veoma važna veličina koja često određuje primjenu pojedinih materijala. Spomenuta svojstva definiraju istovremeno granično dozvoljeno opterećenje i moć nošenja.

Granično dozvoljeno opterećenje je ono pri kojem ležaj pouzdano radi, a iznad te veličine dolazi do oštećenja ležaja zbog trajne deformacije ležišnog materijala i/ili loma uslijed preopterećenja ili umora. To opterećenje je funkcija, pored ostalog, čvrstoće ležišne figure, a kod višeslojnih ležaja i čvrstoće veze s osnovnim materijalom. Veličina i vrsta opterećenja su u vezi s otpornošću materijala na umor, veoma važne karakteristike materijala ležaja, posebno onih koji su tokom rada izloženi promjenjivom opterećenju.

To znači da ležišni materijal, bilo da je direktno apliciran u kućište, bilo da se koristi za proizvodnju jednoslojnog ili višeslojnog uložka, mora biti sposoban da nosi dato opterećenje na radnoj temperaturi bez nastajanja pukotina uslijed umora.

Moć nošenja se definira kao jedinično opterećenje koje trajno može izdržati ležišni materijal pri nekom naprezanju, bez dostizanja granično dozvoljenog opterećenja, a pri nekoj vrijednosti trošenja. U vezi s tim, dozvoljena vrijednost trošenja je ograničena zahtjevima ili očekivanim vijekom trajanja ležaja [5].

## **2.2. Zahtjevi vezani za deformacijske karakteristike materijala**

Kao karakteristike koje zavise od deformabilnosti ležišnog materijala-posteljice, najčešće se navode prilagodljivost, otpornost na abraziju materijala rukavca i sposobnost apsorpiranja nečistoća.

Prilagodljivost označava sposobnost ležišnog materijala da se, bilo elastičnim ili elastičnoplastičnim deformacijama, prilagodi naprezanjima, bez narušavanja zakona klizanja. To, drugim riječima, znači mjera sposobnosti materijala da kompenzira nepodešenost, neparalelnost i druge geometrijske greške.

Otpornost na abraziju rukavca pokazuje tendenciju ležišnog materijala da vrši abraziju spregnutog materijala. Izabrani materijal ležaja ne smije biti razlog pojave abrazivnog trošenja rukavca.

Sposobnost apsorpiranja nečistoća je veoma važno svojstvo materijala ležaja, jer je prisustvo raznih nečistoća u ležaju neizbježno. Mogu biti različitog porijekla, ali su najčešće to produkti trošenja, prašina ili druge čvrste čestice koje dolaze u ležaj iz vanjske sredine. Sposobnost materijala da apsorbira te materije i tako spriječi abraziju kako površine samog ležaja, tako i rukavca očigledno je velika prednost. Mekši materijali imaju bolju sposobnost apsorpiranja [5].

### 2.3. Zahtjevi vezani za karakteristike površinskog sloja materijala kliznog ležaja

Svojstva ležišnog materijala i površinskog sloja (prevlaka) određuju i druge važne tribološke karakteristike. Tu spadaju kompatibilnost, karakteristike uhodavanja, otpornost na adhezivno, erozijsko, kavitacijsko i korozijsko trošenje, sposobnost formiranja reaktivnih slojeva, sposobnost kvašenja površina i rad u pogrešnim uvjetima.

Kompatibilnost ili otpornost na zaribavanje jest sposobnost ležišnog materijala da u uvjetima graničnog podmazivanja ležaju omogući rad s prihvatljivim vrijednostima trenja i trošenja. To praktično znači da kompatibilnost materijala ležaja i rukavca treba biti takva da trošenje u uvjetima nepotpunog podmazivanja svede na najmanju moguću mjeru.

Karakteristika uhodavanja predstavlja svojstvo ležišnog materijala da smanji početno trenje i trošenje u kratkom vremenskom intervalu, dobrim prilagođavanjem kliznih površina.

Otpornost na adhezivno i abrazivno trošenje je diktirano s većim opterećenjem i težim uvjetima rada suvremenih kliznih ležaja. Adekvatna konstrukcija je odlučujuća za minimiziranje adhezivnog trošenja, ali ležišni materijal mora biti sposoban tolerirati određenu veličinu trošenja bez utjecaja na karakteristike ležaja.

Otpornost na trošenje izazvano strujanjem maziva, kao što su erozivno i kavitacijsko trošenje, su pojave često prisutne u radu kliznih ležaja. Erozijsko trošenje nastaje zbog udara mlaza tekućine ili čvrstih čestica nošenih mlazom o površinu ležaja. Kavitacijsko trošenje je posljedica nastajanja formiranih parnih mjehura u tekućem mazivu. Spomenuti parni mjehuri nastaju u području rada ležaja u kojem pritisak u mazivu padne ispod pritiska para tekućina. Materijal ležaja mora biti otporan na ove vrste trošenja posebno u slučajevima gdje su one izražene.

Otpornost na koroziju: karakteristike materijala ležaja ne smiju se bitno mijenjati uslijed djelovanja ulja, vode ili drugih kontaminanata s kojima materijal može doći u dodir. Ovo svojstvo je važno kod ležaja podmazivanih neinhibiranim uljima ili uljima koja sadrže aditive protiv trošenja. Poželjno je da ležišni materijal ne korodira do takvog stupnja gdje dođe do poremećaja u funkcioniranju ležaja.



Sposobnost formiranja reaktivnih slojeva označava svojstvo materijala da formira tribokemijske slojeve, općenito za smanjenje trošenja, s konstituentima iz maziva.

Sposobnost kvašenja označava svojstvo materijala da formira sloj maziva na površini.

Rad u pogoršanim uvjetima je sposobnost materijala ležaja da u neočekivanim i nepovoljnim uvjetima podmazivanja održi neophodno kretanje u određenom vremenskom periodu [5].

#### **2.4. Ostali zahtjevi koji ne spadaju u gore navedene grupe**

Uz gore navedena svojstva i već prije naglašeno najvažnije svojstvo otpornosti na trošenje imamo još odgovarajuću dinamičku čvrstoću, otpornost na dodirni pritisak, otpornost na nagrizanje kliznih površina, dobro vezivanje za površinu, sposobnost odvođenja topline i sposobnost jednolikog raspoređivanja maziva u tribo sustavu. Općenito je nemoguće udovoljiti svim gore navedenom zahtjevima. Zbog toga se u praksi odlučuje za takav materijal rukavca i blazinice ležaja kojim će se uz upotrebljeno sredstvo podmazivanja postići najbolja svojstva tribološkog sustava.

### 3. MATERIJALI KOJI SE KORISTE ZA IZRADU KLIZNIH LEŽAJA

Radijalni i aksijalni klizni ležaji izrađuju se pretežno od različitih metalnih materijala, dok se u određenim područjima u primjeni i nemetalni materijali. Izbor metalnih materijala ležaja uvijek je stvar kompromisa. Mekši materijali daju bolju sposobnost apsorpiranja nečistoća, ali imaju nižu moć nošenja. Tvrđi materijali pokazuju veću moć nošenja, ali su manje tolerantni na odstupanja i prisustvo čestica. Zbog toga je pri izboru materijala ležaja potrebno odrediti koje su karakteristike najvažnije za date uvjete primjene i tako definirati osnovne zahtjevne karakteristike materijala. Prvi faktor je specifično opterećenje koje pojedini materijali mogu podnijeti. Postojeća praksa uspostavlja dozvoljena specifična opterećenja (jedinična opterećenja) za različite materijale koji se danas koriste za izradu kliznih ležaja (tablica 1.).

**Tablica 1. Dozvoljena specifična opterećenja materijala kliznih ležaja [5]**

Grupa materijala	Dozvoljeno specifično opterećenje, MPa	Tvrdoća rukavca, HB
Bijeli metali olovne i kositrene osnove	5	150
Bakar-olovo	7	250
Olovne bronce	7	300-400
Kositrene bronce	7	300-400
Aluminijske legure	7	300-500
Cink-aluminijske legure	7	-

Dati podaci se odnose na normalne uvjete rada, čisto ulje za podmazivanje, dobru podešenost i površinsku obradu. U cilju zadovoljavanja zahtjeva rada i odgovarajuće moći nošenja, površine rukavca i ležaja trebaju biti obrađene da hrapavost, iskazana preko srednjeg aritmetičkog odstupanja profila  $R_a$ , bude manja od  $0,4 \mu\text{m}$ . Poboljšanje kvalitete obrađene površine treba osigurati uvijek kada je specifično opterećenje blizu dozvoljene granice za izabrani materijal ležaja. Kod samopodmazujućih i poroznih kliznih ležaja također je uobičajeno da hrapavost  $R_a$  bude manja od  $0,4 \mu\text{m}$  [5].

### 3.1. Materijali za rukavce

Kod kliznih ležajeva se teži tome da površina rukavaca bude približno tri do pet puta tvrđa od površine blazinice ležaja. Time se trošenje ležaja ograniče prije svega na trošenje blazinice ležaja, koji se u slučaju kritičnog trošenja jednostavno zamijeni. Troškovi su u tom slučaju mnogo manji nego kada bi trošenje nastalo na rukavcu osovine ili vratila. Obzirom da su rukavci ležajeva obično i dijelovi osovine ili vratila, izrađeni su od jednakih materijala (konstrukcijski čelici, poboljšani čelici i čelici za cementiranje i kaljenje). Najvažnije je da se rukavci mogu kvalitetno obraditi, obzirom na odabrani materijal, te da se tako na njima može postići što tvrđa i glatkija površina (preporučuje se tvrdoća  $64 \text{ HRc} \approx 810 \text{ HV}$ ). S ovog aspekta, čelici za cementiranje i kaljenje bolji su nego konstrukcijski čelici i poboljšani čelici, iako se i površinskim kaljenjem poboljšanih čelika mogu postići zadovoljavajuća svojstva. Konstrukcijski čelici, koji se ne kale, primjereni su samo za nisko opterećene klizne ležajeve. Rukavci kliznih ležajeva se nakon grube mehaničke obrade (struganje, grubo brušenje, itd.) i toplinske obrade (cementiranje i kaljenje, poboljšavanje, površinsko kaljenje, itd.) prije ugradnje još i fino mehanički obrade (fino brušenje, honovanje, lepovanje, itd.) čime se postižu vrlo glatke klizne površine. Za poboljšanje svojstava čvrstoće obzirom na površinski pritisak, rukavci kliznih ležaja se, posebno u zadnje vrijeme, još i dodatno kromiraju, čime se postižu bolja antifrikcijska svojstva i veća otpornost protiv nagrivanja kliznih površina [1].

### 3.2. Materijali za blazinice ležaja

Prema [1] i [5], i kod materijala za blazinice ležaja bitno je da se klizne površine mogu precizno obraditi i tako postići dobra antifriksijska svojstva. Poseban problem pri obradi predstavljaju dijelovi koji otpadaju jer se pri obradi utiskuju u površinu, te je oštećuju. S ovog aspekta, za blazinice ležaja primjerenije je upotrijebiti legure za gnječenje, a ne legure za lijevanje, koje se inače lakše obrađuju.

Za blazinice ležaja najviše se koriste neželjezni metali (kositar, cink, olovo, bakar, aluminij) i njihove legure zbog dobrih kliznih svojstava pri nedovoljnom podmazivanju. Obzirom da su njihova svojstva čvrstoće ovisna o temperaturi, upotrebljavaju se samo u određenom temperaturnom području:

- legure olova i kositra: do 80 °C
- legure cinka: do 100 °C
- legure aluminija: do 150 °C
- legure bakra (bronce) za lijevanje: do 250 °C
- legure kositra za gnječenje: do 300 °C

Kositar se legira prvenstveno olovom, bakrom i antimonom. Blazinice ležaja od legura kositra imaju odlična antifriksijska svojstva, neosjetljivi su na geometrijska i radna odstupanja, te penetraciju sitnih produkata trošenja. Dobro svojstvo kositra je i to što ga se može u tankim slojevima (nekoliko  $\mu\text{m}$ ) galvansko nanijeti na druge materijale. Zbog male čvrstoće (vrlo su mekani) blazinice ležaja od legura kositra uvijek je potrebno ugraditi u odgovarajuće kruto kućište. Mehanička svojstva ovih legura su dobra, ali naglo opadaju s povećanjem temperature iznad 180°C. Ove legure se lako lijevaju i imaju čvrstu vezu(adhezijom) s osnovom od čelika.

---

Cink se legira prvenstveno aluminijem i bakrom. Blazinice ležaja od legura cinka imaju prije svega dobra antifriksijska svojstva. Obzirom da su jeftini, izrađuju se u masivnim proizvodnjama. Imaju dobru krutost i čvrstoću, nešto niži koeficijent trenja, zadovoljavajuću livljivost i prilagodljivost. Upotrebljavaju se za manje zahtjevne klizne ležajeve. Radne temperature su im ograničene na 120°C, a pri sobnim ili blago povišenim temperaturama nemaju dimenzijsku stabilnost tijekom starenja. Pri povišenim temperaturama dolazi do promjena u dimenzijama tj. do velikog produljenja materijala. Tijekom vremena dolazi i do promjene tvrdoće, a tvrdoća zavisi o postotku bakra u leguri.

Olovo se legira prije svega bakrom, kositrom i cinkom. Blazinice ležaja od legura olova imaju vrlo dobra svojstva podmazivanja. Obzirom da su vrlo mekani, neosjetljivi su na geometrijska i radna odstupanja, ali su slabo otporni na trošenje. Upotrebljavaju se prvenstveno u velikim i grubim ležajevima (npr. uležištenje osovina vagona).

Bakar se upotrebljava za blazinice ležaja prvenstveno u obliku raznih bronci (udio bakra je iznad 50%). Bronze imaju vrlo dobru toplinsku vodljivost te time dobru sposobnost hlađenja ležajeva. Također imaju i zadovoljavajuću čvrstoću i dobru sposobnost deformiranja. Raznim nemetalnim dodacima (fosfor) poboljšavaju im se i antifriksijska svojstva. Obzirom da su slabo otporni na penetraciju produkata trošenja, u ovim ležajevima potrebno je osigurati dobar protok maziva. Upotrebljavaju se prije svega slijedeće bronze:

- Olovne bronze sadrže 10 do 28% olova. Obzirom da su vrlo mekane, neosjetljive su na geometrijska odstupanja i rubne pritiske, ali su slabo otporne na trošenje. Primjerene su prvenstveno za male brzine klizanja. Upotrebljavaju se za manje zahtjevne ležajeve, u kojima nije potrebno da je rukavac osovine ili vratila površinski kaljen. Visok postotak olova ovim legurama omogućava bolju prilagodljivost i kompatibilnost. Te se legure također legiraju s kositrom koji povećava čvrstoću, otpornost na trošenje, moć nošenja i tvrdoću.
- Kositreno-olovne bronze sadrže 5 do 14% kositra i 3 do 25% olova. Pri većem udjelu olova imaju dobru prilagodljivost materijala rukavca i blazinice ležaja, ali slabu otpornost na trošenje. Imaju veliku tvrdoću, i vlačnu čvrstoću. Uglavnom se koriste za izradu masivnih kliznih ležaja.

- Aluminijeve bronce sadrže oko 10% aluminija i manje udjele nikla, mangana i željeza. Razmjerno su tvrde i time otporne na trošenje. Upotrebljavaju se prije svega tamo gdje postoji opasnost od korozije. Dobru čvrstoću zadržavaju i na povišenim temperaturama (preko 200 °C)

Čisti aluminij se ne koristi za izradu kliznih ležaja zato što ima loša kompatibilna svojstva i ležaji često zaribavaju, čak i kad je rukavac velike tvrdoće, a ulje za podmazivanje čisto. Da bi se popravila ova svojstva aluminij se legira. Aluminij se legira prije svega s bakrom, željezom, cinkom, manganom, silicijem i kositrom. Blazinice ležaja od legura aluminija upotrebljavaju se prvenstveno tamo gdje je i kućište od lakih metala. Obzirom da dobro provode toplinu imaju dobru sposobnost hlađenja. Te legure imaju veliku moć nošenja, dobru otpornost na umor, otpornost na koroziju i otpornost na trošenje.

Od željeznih materijala za blazinice ležaja prvenstveno se upotrebljava sivi lijev, jer njegova struktura (grafitne lamele) omogućuje dobra svojstva podmazivanja. S druge strane, sivi lijev ima slabija antifriksijska svojstva pri nedovoljnom podmazivanju, slabo je otporan na rubne pritiske, te ima slabiju sposobnost razrađivanja ležajeva. Dobra svojstva podmazivanja blazinica ležaja postižu se sinteriranim metalima, koji su porozni i lako upijaju ulje (do 30% svog volumena). Pri radu ulje izlazi kroz pore zbog opterećenja i povišene temperature, te podmazuje klizne površine. Pri mirovanju, kada se ležaj ohladi, ulje opet otječe natrag u pore. Sinteriraju se prije svega legure željeza te kositrene i olovne bronce. [1]

### 3.3. Sinterirani materijali

Za izradu kliznih ležaja se u značajnoj mjeri koriste i metalni prahovi, od kojih se prave porozni tj. sinterirani ležaji. Porozni ležaji su ležaji s vlastitim sadržajem maziva. Materijal ležaja je porozan, po čemu su i dobili naziv, ali se često nazivaju i sinterirani ležaji jer se tijekom izrade materijal podvrgava procesu sinteriranja. Porozni ležaji od metala izrađuju se od metalnog praha postupkom prešanja i sinteriranja. Prešanje se izvodi na sobnoj temperaturi u specijalnim alatima, a proces sinteriranja u redukcijskoj atmosferi i na temperaturi od oko 80% od apsolutne temperature taljenja metala. Gotovi ležaji se impregniraju odgovarajućim uljem, što znači da pore imaju ulogu spremnika za mazivo. U tijeku rada mazivo struji kroz pore i podmazuje sklop rukavac-ležaj.

Specifična svojstva poroznih ležaja su poroznost i propustljivost (permabilnost). Veličina poroznosti određuje količinu ulja koju sadrži ležaj i njegove mehaničke karakteristike. S porastom poroznosti opadaju mehanička svojstva, dok količina ulja u ležaju raste. U izradi poroznih ležaja od metala su zastupljena dva osnovna materijala. To su prah bronce i prah željeza. Kao dodatak ovim materijalima često se koristi i grafit, kojim se povećava samopodmazivanje kao i pouzdanost ležaja, naročito u graničnim uvjetima podmazivanja.

Sinterirani ležaji od bronce su najčešće u upotrebi. Otporni su na trošenje, žilavi su, prilagodljivi su i otporni na koroziju. Pogodni su za srednja opterećenja i srednje do velike brzine klizanja. Ležaji od sinteriranog željeza su jeftiniji od ležaja izrađenih od bronce, ali su osjetljiviji na koroziju i imaju loša tribološka svojstva. Koriste se za niža opterećenja i srednje brzine klizanja [5].

### 3.4. Opći kriterij za izbor materijala kliznih ležaja

Pored moći nošenja i dozvoljene radne temperature za izbor materijala podmazivanih kliznih ležaja mogu se definirati kriteriji shodno tome kako materijali reagiraju s utvrđenim uvjetima rada.

**Tablica 2. Kriterij za izbor metalnih materijala podmazivanih kliznih ležaja [5]**

Osnovna svojstva	Mehaničke i tribološke karakteristike kao kriterij	Svojstva materijala ležaja i površinskog sloja
A. Mehanička svojstva	A1. Tvrdoća A2. Otpornost na umor	Prilagodljivost
B. Toplinska svojstva	B1. Koeficijent toplinskog širenja B2. Toplinska provodljivost	
C. Otpornost na koroziju		
D. Karakteristike u uvjetima graničnog podmazivanja	D1. Koeficijent trenja D2. Uvjeti dodira D3. Brzina trošenja	Kompatibilnost Hrapavost površine Modul elastičnosti
E. Cijena		Raspoloživost materijala Obradivost materijala
F. Ponašanje u uvjetima abrazije	F1. Faktor trenja F2. Uvjeti dodira F3. Brzina trošenja	Sposobnost apsorpiranja materijala Tvrdoća materijala
G. Otpornost na kavitacijsku eroziju	G1. Brzina trošenja G2. Tendencija ka pittingu	Svojstva sustava: materijal-ležaj-mazivo

U datoj tablici, grupe od A do E su opće primjenjive i treba ih koristiti svaki put kada se razmatra neki novi materijal ili, što je češći slučaj, kada se dati materijal koristi za neku novu namjenu. Grupe F i G se razmatraju kada postoji opasnost od prisustva abrazivnih čestica ili je ležajni sustav izložen pojačanim vibracijama. Kriteriji A, B i E su povezani sa svojstvima materijala za koje se može zaključiti da su relativno nezavisni od cjelokupnog sustava ležaja. Nasuprot tome, kriteriji označeni kao C, D, F i G su zavisni od promatranog sustava [5].



## 4. MOGUĆI OBLICI TROŠENJA KLIZNIH LEŽAJA

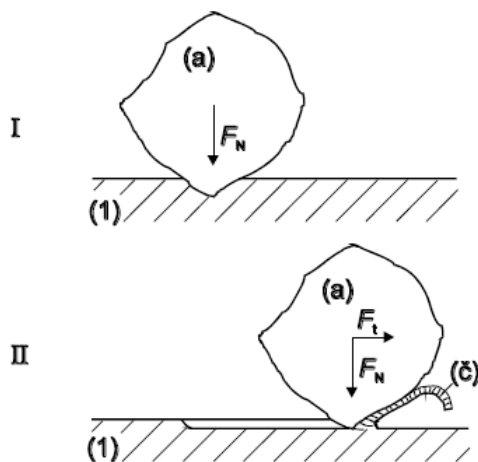
Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama. Premda postoji neizbrojno veliki broj slučajeva trošenja, ona su svrstana u četiri osnovna mehanizma trošenja:

- abrazija
- adhezija
- umor površine
- tribokorozija

Mehanizmi trošenja opisuju se jediničnim događajima. Jedinični događaj je slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine. On uvijek uključuje proces nastajanja pukotina i proces napredovanja pukotina [3].

### 4.1. Abrazija

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Može se opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice, s dvije faze jediničnog događaja, slika 8. [3]



Slika 8. Jedinični događaj abrazije [3]

Jedinični događaj abrazije sastoji se od dvije faze:

I faza - prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja  $F_N$

II faza - istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja  $F_t$

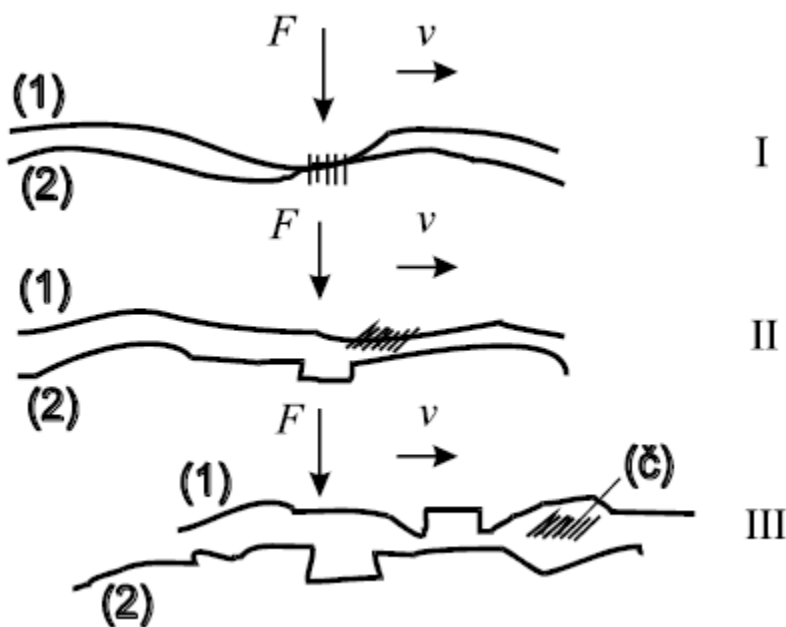
Kod kliznog trošenja stupanj opasnosti od abrazije je nizak. Abrazija nastaje uslijed prisustva čvrstih materijala(nečistoća) u ležaju. Materijali kliznih ležaja su tijekom rada izloženi utjecaju čvrstih čestica iz različitih izvora. Te nečistoće mogu dospjeti u ležaj tijekom proizvodnje, montaže ili u eksploataciji. Pri tome se razlikuju:

- abrazivne čestice dospjele u ležaj iz vanjske okoline
- abrazivne čestice nastale trošenjem dijelova sklopa ležaja

Ležaj oštećen abrazivnim trošenjem treba demontirati i zamijeniti ga novim uz detaljno čišćenje sistema za podmazivanje i ugradnje novih i poboljšanih filtera, uz istovremenu zamjenu maziva u sistemu. Međutim, potrebno je naglasiti da značajno veću ulogu u sprečavanju abrazivnog trošenja materijala ležaja, koji su relativno male tvrdoće i time neotporni na abraziju, ima sistem brtvljenja ležaja i pročišćavanje maziva koji se koristi za njegovo podmazivanje. U odnosu na karakteristike materijala, manje su podložni abraziji materijali s boljom sposobnošću apsorpcije nečistoća. [5]

## 4.2. Adhezija

Adhezijsko trošenje karakterizira prijelaz materijala s jedne klizne plohe na drugu pri relativnom gibanju, a zbog procesa zavarivanja krutih faza. Jedinični događaj adhezije može se opisati u tri faze, slika 9. [3]



Slika 9. Jedinični događaj adhezije [3]

Faza I - Nastajanje adhezijskog spoja različitog stupnja jakosti na mjestu dodira izbočina

Faza II - Raskidanje adhezijskog spoja. Čestica trošenja ostaje spontano “nalijepljena” na jednom članu kliznog para.

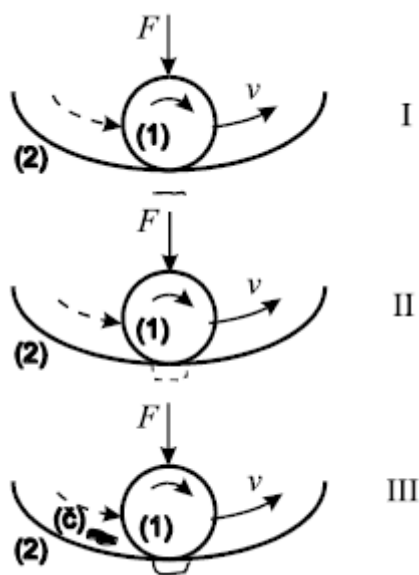
Faza III - Otkidanje čestice (eventualno). Oblik čestica trošenja ovisi o uvjetima, a uglavnom je listićast.

Čestice iščupane s jedne površine ostaju privremeno ili trajno “nalijepljene” odnosno navarene na drugu kliznu površinu. Stupanj pojave adhezije kod kliznog trošenja je vrlo visok. Najčešći razlozi za pojavu adhezivnog trošenja kod kliznih ležaja su neadekvatni zazori, zbog grešaka konstrukcije ili montaže, neadekvatna opskrba ležaja mazivom ili neodgovarajuće karakteristike maziva. Tijekom rada ležaja, prekid uljnog sloja izazvan ekstremnim opterećenjem ili vibracijama, kao i loše uravnoteženje mogu biti uzrok adhezivnog trošenja. Adhezivno trošenje se manifestira od blagog nestajanja materijala s površine, praćeno često promjenom boje površine zbog zagrijavanja i povlačenja materijala zbog omekšanja, pa do zaribavanja. U slučaju pojave nepoznatog nestajanja materijala, ležaj se može ponovno koristiti ukoliko se uklone uzroci (povećanje zazora, odstranjivanje

vibracija i sl.). Ako su na površini ležaja, istovremeno zapažene krhotine, takav ležaj treba zamjeniti [2].

### 4.3. Umor površine

Umor površine je odvajanje čestica s površine uslijed cikličkih promjena naprežanja. Jedinični događaj umora površine prikazan je na slici 9. s tri faze [3].



Slika 10. Jedinični događaj umora površine [3]

Faza I - Stvaranje mikropukotine, redovito ispod površine

Faza II - Napredovanje mikropukotine

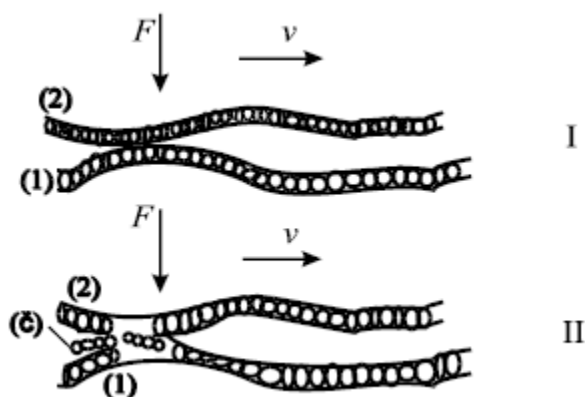
Faza III - Ispadanje čestice trošenja, obično oblika pločice ili iverka

U prvoj fazi nastaje podpovršinska pukotina jer je najveće smično naprežanje kod koncentriranog dodira (tzv. Hertz-ovo naprežanje) uvijek ispod same površine. Ovo je tzv. faza inkubacije jer praktički nema nikakvog odvajanja čestica. U drugoj fazi podpovršinska pukotina izbija na površinu. Od toga trenutka iz pukotine redovito izlaze sitne kuglaste čestice. U trećoj fazi jediničnog događaja umora površine dolazi do ispadanja krupne čestice oblika ivera, što na površini ostavlja oštećenje oblika rupice. Zato se ovaj oblik trošenja uobičajeno naziva pitting (rupičenje). Ova vrsta trošenja nastaje pri dinamičkom opterećenju kliznih ležaja. Međutim, površinski umor može se javiti i u slučaju preopterećenja ili vibracija, kao i pri povišenim radnim temperaturama, što kod pojedinih

vrsta materijala (npr. bijelih metala) može značajno smanjiti dinamičku izdržljivost. Otpornost na umor mijenja se inverzno s tvrdoćom, a razmjerno s debljinom antifrakcijskog sloja. U početnom periodu površinski umor se manifestira pojavom krhotina koje se tijekom daljnjih napreznja proširuju, međusobno spajaju, što dovodi do odvajanja materijala. Kod umora površine potrebno je otkloniti uzrok pojave površinskog umora ili koristiti materijal za ležaj s visokom otpornošću na umor.

#### 4.4. Tribokorozija

Tribokorozija ili tribokemijsko trošenje je mehanizam trošenja pri kojem prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okolišem. Jedinični događaj tribokorozije s dvije faze prikazuje slika 11. [3]



Slika 11. Jedinični događaj tribokorozije [3]

I - stvaranje (ili obnavljanje) sloja produkata korozije

II - mjestimično razaranje sloja produkata korozije

Do tribokorozije dolazi pri ponavljajućem relativnom gibanju dva kruta triboelementa. U uskom rasporu kao produkti korozije nastaju praškaste čestice oksida. Do tribokorozije neće doći ako se primjeni podmazivanje ili eliminira relativno gibanje dijelova. Najvažniji čimbenik otpornosti na tribokoroziju je kemijska pasivnost materijala u određenom mediju. Tribokorozija je u pravilu "poželjan" mehanizam trošenja jer slojevi proizvoda korozije zaštićuju metalne površine od neposrednog dodira metal/metal.

## **4.5. Ostali oblici trošenja**

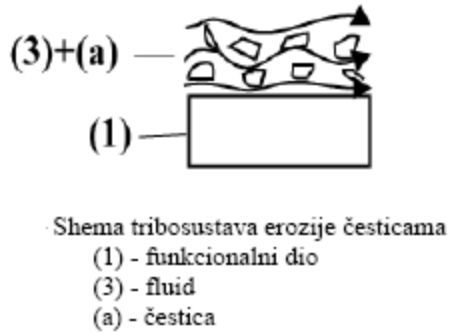
Uz gore navedene osnovne oblike trošenja postoje još mnogi drugi poput korozije, erozije, kavitacije itd. O njima će biti riječ u narednim poglavljima.

### **4.5.1. Korozija**

Korozija je spontano razaranje materijala pod djelovanjem okolnog medija-plina, kapljevine ili krutih agresivnih čestica, a zbog kemijskih ili elektrokemijskih procesa. Također korozija je promjena na površini ili unutrašnji koja izaziva gubitak materijala i promjenu svojstava. Postoji više vrsta korozije, ona može biti opća ili selektivna. Od selektivnih tipova razlikujemo točkastu, kontaktnu, interkristalnu, napetosnu, koroziju u rasporu, eroziju, kavitaciju [6]. Korozija kod kliznih ležajeva najčešće je izazvana korištenjem krivog maziva ili izborom krivog materijala ležaja za određene uvjete rada. Svojstva metalnih materijala kliznih ležaja unutar razmatranog tribološkog sustava trebaju biti nepromijenjena ili da se mijenjaju samo u dozvoljenim granicama tijekom dužeg vremenskog perioda. Stoga je bitno da materijal i mazivo budu kompatibilni jer korozija ovisi o njihovim kemijskim i mehaničkim interakcijama. Upotrebom krivog maziva dolazi do oksidacije koja se vidi na površini materijala. Korozija se može spriječiti tako da se izmjene karakteristike maziva tj. da se izabere pravilno mazivo ili izborom materijala ležaja koji je jače otporan na određeni tip korozije [5].

### **4.5.2. Erozijska česticama**

Erozija nastupa uz istovremeno djelovanje agresivnog medija i mehaničkog trošenja uzrokovanog nestrujavanjem ili udaranjem plina, tekućine ili pare koji sadržavaju krute čestice. Dijelimo je na eroziju česticama i eroziju kapljevnom. Erozijska česticama je gubitak materijala s površine krutog tijela zbog relativnog gibanja (strujanja) fluida u kojem se nalaze krute čestice. Shema tribosustava erozije česticama prikazana je na slici 12. Relativno gibanje se može opisati kao strujanje. Opasnosti od pojedinih mehanizma trošenja je visok kod abrazije, erozije, a nizak je ali postoji kod tribokorozije [3].

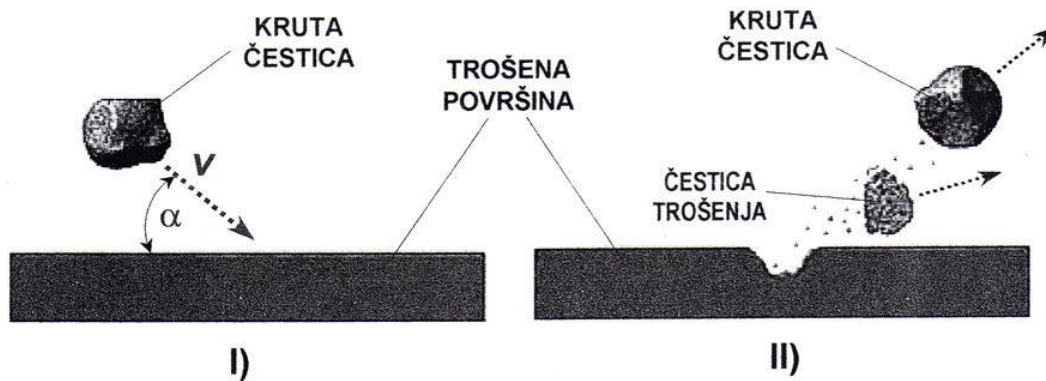


Slika 12. Erozija česticama[3]

Budući da je osim mehanizma abrazije u procesima erozije česticama značajan i mehanizam umora površine, njihovi učinci i utjecaji različitih čimbenika opisuju se na razini jediničnog sudara čestice s trošenom površinom, prikazanog na slici 13.

Jedinični sudar sastoji se od dvije faze:

- I. „Upad“ krute čestice određenom brzinom gibanja i pod određenim kutom, te njezin trenutni sudar s trošenom površinom materijala;
- II. Odbijanje krute čestice od trošene površine uz prateće razaranje površine otkidanjem djelića materijala u obliku čestice trošenja

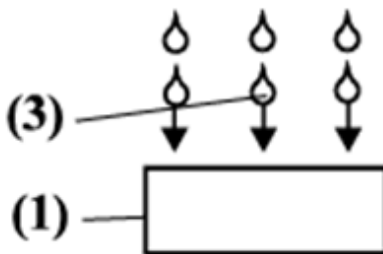


Slika 13. Jedinični sudara čestice s trošenom površinom [3]

Pokazatelj otpornosti na trošenje je udio i tvrdoća tvrde faze odnosno dinamička izdržljivost površine, ovisno o kutu upada čestica. Erozijska kod koje je strujanje pod malim kutom u odnosu na površinu naziva se abrazivna erozija, a kad čestice udaraju o površinu gotovo okomito to je udarna erozija [3].

#### 4.5.3. Erozijska kapljevina

Erozijska kapljevina je trošenje izazvano strujanjem kapljevine ili plina s kapljicama. Situacija je slična kao kod erozije česticama ali bez krute faze. Zato je isključen abrazivski mehanizam trošenja pa ostaje umor površine kao najopasniji mehanizam trošenja. Također, ukoliko se radi o agresivnom mediju, prijete opasnost i od intenzivne tribokorozijske. Ako se kapljice gibaju brzinom 100 m/s govori se o erozijskoj kapljevini. Sraz tekućih kapljica koje udaraju u čvrstu površinu pri visokoj brzini je erozijski udarom tekućine (erozijski mlaz, erozijska kapljevina) [3].



Shema tribosustava erozije kapljevina

(1) - funkcionalni dio

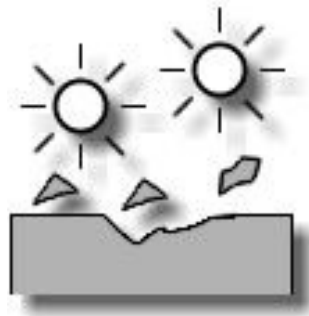
(3) - kapljevina

Slika 14. Erozijska kapljevina [3]

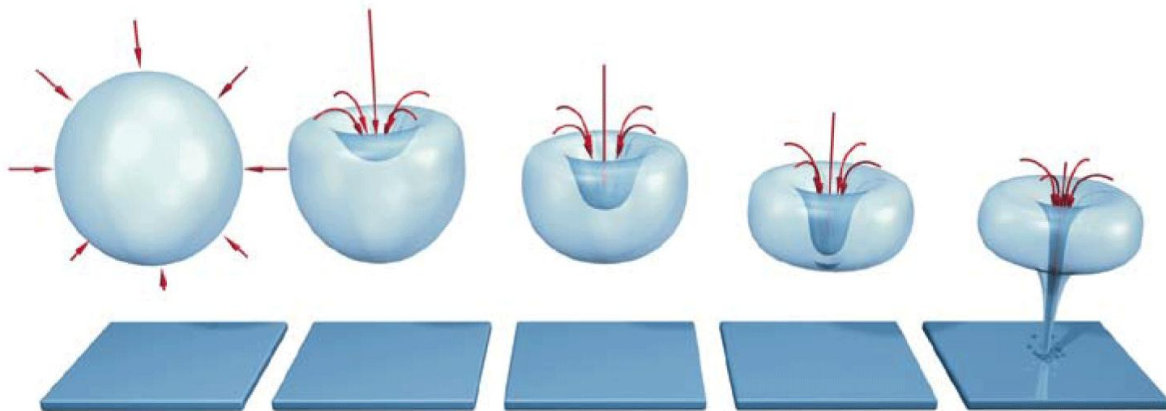


#### 4.5.4. Kavitacijska erozija

Kavitacijska erozija nastaje zbog nagle implozije (nagle promjene tlaka i faze) kavitiranog mjehurića koji implodira velikom brzinom stvarajući visoke lokalne tlakove u vrlo kratkom vremenu na vrlo malom području. Posljedica toga je naprezanje u materijalu ukoliko mjehurić implodira u blizini njegove površine. Shema tribosustava kavitacijske erozije prikazana je na slici 15, [3].



Slika 15. Kavitacijska erozija [3]



Slika 16. Mehanizma nastanka kavitacije [7]

Relativno gibanje se može opisati kao strujanje. Pokazatelj otpornosti na trošenje je dinamička izdržljivost površine. U ovom tipu trošenja imamo veliku opasnost na pojavu umora površine te nešto nižu opasnost na tribokoroziju. Karakteristika kavitacije je cikličko stvaranje i implozija mjehurića na površini koja je u dodiru s fluidom. Uzrok stvaranja mjehurića je oslobađanje otopljenog plina iz tekućine u području tlaka oko nule ili podtlaka. Negativni tlakovi (podtlakovi) se često javljaju u područjima gdje dolazi do velikih promjena geometrije [3].

Uzroci pojave kavitacijske erozije kod kliznih ležaja su promjenjivost pritiska u ležaju, vibracije rukavca, neadekvatno strujanje maziva kroz otvore i kanale. Najčešće se pojavljuje kod ležaja izloženih visokom opterećenju, vibracijama i velikom broju okretaja. Oštećenja kavitacijskom erozijom karakterizira pojava razaranja materijala uvijek na istim ili sličnim mjestima ležaja i pojava krhotina kao kod umora materijala. Razlikujemo nekoliko vrsta kavitacijske erozije koje su usisna, izlazna, strujna i udarna. Može se spriječiti poboljšanjem konstrukcije ležaja, povećanjem pritiska ulja u sistemu za podmazivanje, smanjenjem zazora, izborom materijala sa većom otpornošću na kavitacijsku eroziju, itd. [5]

#### **4.5.5. Nagrizanje, plastična deformacija i lom**

Uz gore navedene oblike trošenja postoje još mnogi drugi koji nisu toliko učestali. Nagrizanje ležaja je oštećenje koje nastaje na spoju blazinica ili na kućištu ležaja ispod blazinice. Uzroci su mala pomicanja i vibracije ležaja u kućištu te vibracije stacionarnog rukavca u ležaju tijekom transporta. Pomicanja ležaja u kućištu dovode do oštećenja stražnje strane ležaja. Vibracije rukavca manifestiraju se pojavom krhotina i adhezivnim trošenjem površine ležaja. Često je prisutna i korozija. Može se spriječiti eliminacijom vibracija, pravilnom ugradnjom ležaja ili provjerom čvrstoće kućišta.

Uzroci pojave plastične deformacije su nepravilnosti u sistemu podmazivanja i neodgovarajući sloj maziva radi čega dolazi do taljenja materijala ležaja na površini i plastičnog strujanja. U težim slučajevima moguća je pojava zaribavanja. Može se spriječiti izmjenama u sistemu podmazivanja ili promjenom karakteristike maziva.

Do loma dolazi radi preopterećenja, udarnih opterećenja ili kod višeslojnih ležaja zbog neodgovarajuće veze ležišnog materijala i osnove. Vidljiv je kao gubitak ležišnog materijala s većih površina. Može se spriječiti poboljšanjem tehnologije proizvodnje, otklanjanjem mogućih preopterećenja ili izrazitih udarnih opterećenja [5].

#### 4.6. Oštećenja i otkazi metalnih materijala ležaja

Ispravnost i pouzdanost strojeva i uređaja su prije svega funkcija ispravnosti pokretnih dijelova, od kojih su klizni ležaji svakako najvažniji elementi. Zbog toga, oštećenja i otkazi ovih veoma važnih elemenata mogu prouzročiti znatne materijalne gubitke. Mada je, po pravilu, cijena samog kliznog ležaja relativno mala, svako oštećenje ležaja kojim se smanjuje funkcionalna ispravnost sistema ili nastaje otkaz može izazvati velike indirektne troškove.

Smatra se da je klizni ležaj neispravan kao posljedica nekog oštećenja:

- kada postane potpuno nefunkcionalan
- kada je još funkcionalan, ali nije sposoban da namijenjenu funkciju obavi zadovoljavajuće u svim uvjetima rada
- kada ga ozbiljno oštećenje učini nepouzdanim za njegovu upotrebu, što zahtjeva njegovo uklanjanje bilo radi popravka ili zamijene

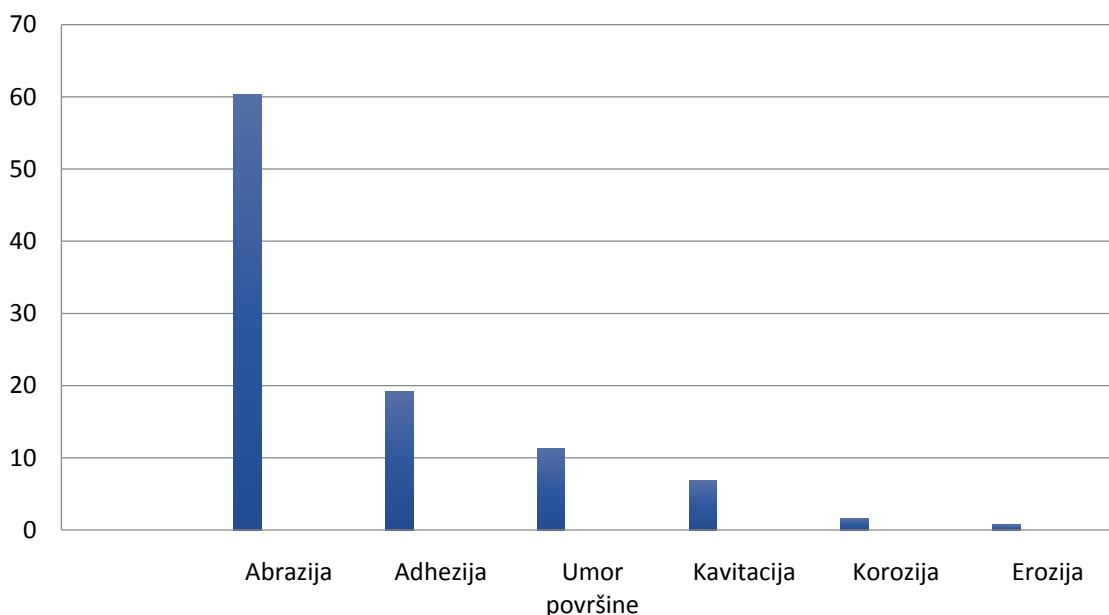
Osnovni uzročnici koji dovode do oštećenja i otkaza kliznih ležaja su mnogobrojni, ali se mogu razvrstati u nekoliko osnovnih grupa koje uključuju aspekte konstruiranja, izbora materijala, nesavršenosti materijala, proizvodnje i procesa obrade, sklapanja, kontrole, ispitivanja, skladištenja, transporta, održavanja, nepredviđenog izlaganja preopterećenju i direktnog mehaničkog i kemijskog oštećenja u tijeku rada. Veoma često više uzročnika doprinosi otkazu kliznog ležaja.

Otkazi i oštećenja izazvana navedenim grupama uzročnika manifestiraju se najčešće kao trošenje, lom i plastična deformacija materijala. To su istovremeno i osnovni vidovi otkaza, koji se mogu podijeliti, u odnosu na svojstva materijala, u dvije kategorije. Jedna je povezana i zavisna najviše o čvrstoći materijala, a druga je funkcija triboloških procesa. Lom i plastična deformacija su oštećenja u funkciji čvrstoće, dok je trošenje sa svim manifestacijama vezano uz tribološke procese.

**Tablica 3. Uzročnici otkaza i njihova učestalost [5]**

Uzročnici otkaza	Učestalost,%
Greške proizvodnje:	23,4
Neadekvatni proračun	9,1
Greška u materijalu	3,6
Nepravilnost u proizvodnji i montaži	10,7
Greške u eksploataciji	39,1
Trošenje tijekom dugotrajnog rada	30,5
Ostalo	7,0

Kao što je vidljivo iz tablice različiti oblici trošenja kliznih ležaja jedni su od najčešćih pojava manifestacije otkaza stoga na njih treba obratiti veliku pozornost. Najprisutnije vrste trošenja date su slikom 17. [5]

**Slika 17. Učestalost pojedinog mehanizma trošenja kliznih ležaja u postotku [5]**

---

## 5. UZORCI ISTROŠENOG KLIZNOG LEŽAJA

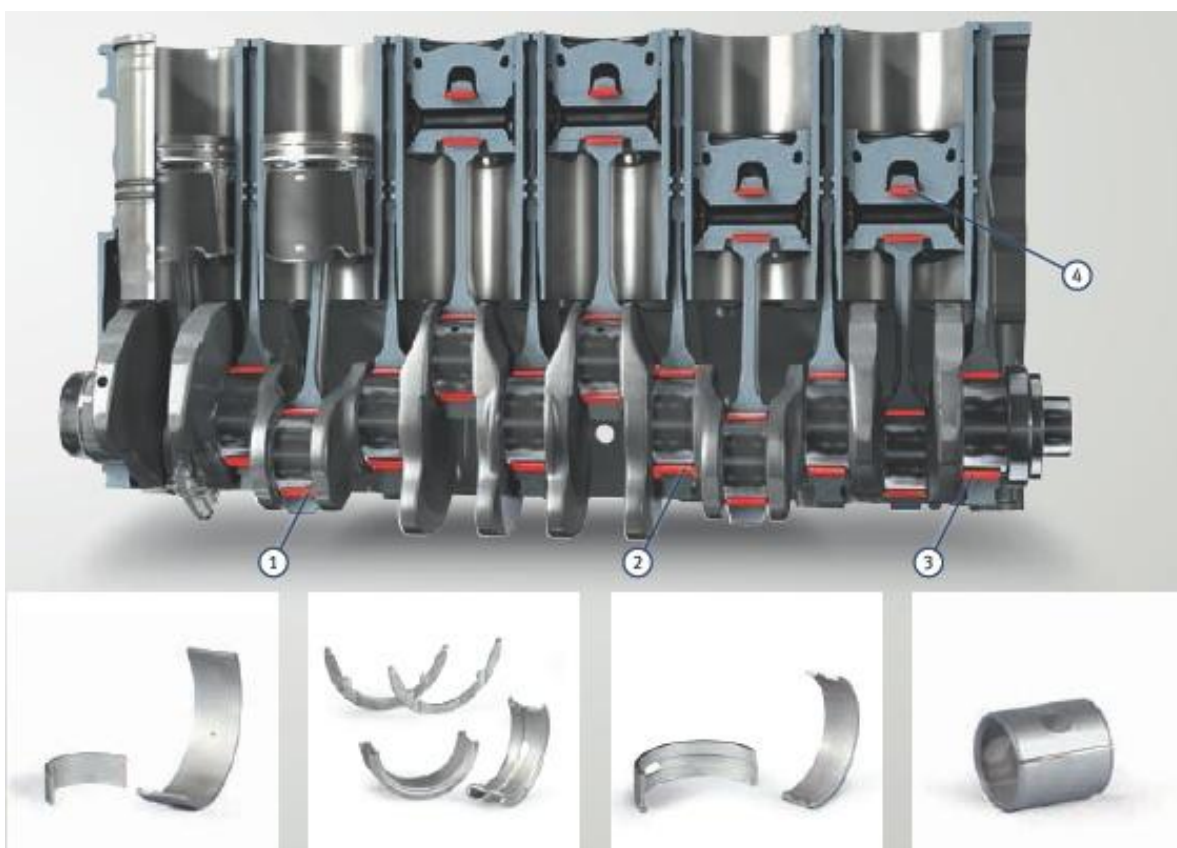
Uzorci su uzeti iz motora automobila Mercedes ML 270 CDI iz 2004. godine. Mercedes ML 270 CDI je terensko vozilo koje koristi peterocilindrični dizel motor, maksimalne brzine 185km/h, te težak 2 tone. Radi nepravilnog rada motora auto je odvezen na servis gdje su utvrđeni oštećeni klizni ležajevi koje je trebalo zamijeniti. U daljnjem tekstu utvrdit će se uzroci oštećenja kliznih ležajeva i dati moguća rješenja za njihovo sprečavanje.



Slika 18. Mercedes ML 270 CDI [8]

Klizni ležajevi motora osnova su za skladan rad u kojem po mogućnosti ne dolazi do trošenja niti trenja između kućišta motora tj. klipnjače i osovina koje se okreću kao što su koljenasto vratilo, bregasto vratilo, vratilo za prekretnu polugu i vratilo za izjednačenje. Njihovo mehaničko opterećenje u motoru s unutarnjim izgaranjem iznimno je veliko, stoga, ležajevi moraju biti otporni na umor, fleksibilni, otporni na velika opterećenja, trošenje, koroziju itd. [9]. Postupak procjene oštećenja motora uvijek zahtijeva sveobuhvatan pristup utvrđivanju uzroka, koji mnogo puta nije jasan. Također nakon popravka motora kvarovi se često mogu ponoviti. Razlog tome je što oštećene komponente mogu biti zamijenjene, ali uzrok oštećenja nije ispravljen.

Zbog visoke razine složenosti sustava, interakcija između pojedinih dijelova ležaja unutar motora, uzrok oštećenja općenito nije lako prepoznati. Uzroci se mogu naći u samom ležaju, ali i u okolini ležaja. Iako ležaj općenito trpi najveća oštećenja, samom zamjenom njega nismo pronašli rješenje i ispravili uzrok oštećenja. Dakle prilikom profesionalne obnove motora, stvarni uzrok štete mora se odrediti kako bi se u budućnosti mogle poduzeti odgovarajuće sigurnosne mjere. Klizni ležaji pružaju raspodjelu primijenjenog opterećenja duž cijelog područja motora. Postoji nekoliko tipova kliznih ležaja koji se koriste u motorima, poput glavnih ležaja, ležajevi klipnjače, ležajevi s prirubnicama, ležajevi koljenaste osovine, aksijalni ležaji. [10]



**Slika 19. Primjer motora s različitim vrstama kliznih ležaja**

**1-ležajevi klipnjače, 2-ležajevi prirubnice i aksijalni ležaji, 3-glavni ležaji, 4-čahure klipnjače**

Ležajevi klipnjače povezuju klipnjaču s koljenastim vratilom. Ljuska ležaja može se podijeliti na dva dijela: gornji (poklopac) i donji. Ljuska ležaja s donje strane podložna je puno većem naprezanju naspram ljuske ležaja s gornje strane. Sila paljenja koja nastaje tijekom izgaranja prenosi se u koljenasto vratilo kroz njih. Kod benzinskih motora, ležajne ljuske na strani poklopca također su izložene velikom naprezanju, jer postoje velike inercijske sile zbog većih brzina u usporedbi s dizelskim motorom. Ležajevi klipnjača opskrbljuju se uljem preko provrta glavnih ležaja kroz koljenasto vratilo. Ležajevi koljenaste osovine su glavni ležaji. On je također podijeljen na gornju i donju ljusku. Kod glavnih ležajeva donja ljuska ležaja podliježe većem naprezanju tako što apsorbira silu paljenja. Sile prebačene s klipnjače u koljenasto vratilo apsorbiraju su u nekoliko glavnih ležajeva, što znači da su oni podložni manjem naprezanju od donje strane ljuske ležajeva klipnjače. Gornja ljuska glavnog ležaja sadrži uljni utor koji ulje prenosi do ležajeva klipnjače kroz provrte do koljenastog vratila. Također postoje još aksijalni ležaji koji imaju zadatak apsorbiranja aksijalne sile koja nastaje prilikom na primjer aktiviranja kvačila [10].



Slika 20. Tipovi i glavni dijelovi ležaja [11]

---

## 5.1. Najčešći razlozi oštećenja kliznih ležaja motora

Ležajevi motora smanjuju trenje između rotirajućeg dijela motora i nepomičnog dijela te podupiru koljenasto vratilo. Materijal ležaja koji se koristi mora biti izuzetno jak zbog naprezanja uzrokovanih eksplozijama u motoru. Smanjivanje trenja djelomično se postiže činjenicom što različiti metali klizu jedan po drugom s manje trenja i trošenja nego što to čine slični materijali. Iako sam materijal može motoru davati neka svojstva za smanjenje trenja, njegove performanse poboljšava mazivo između pokretnih i nepomičnih površina. Još jedna od dužnosti ležaja je uspostavljanje i održavanje uljnog filma. Najčešći razlozi oštećenja su nečistoće, nedovoljno podmazivanje, krivo postavljanje, lomovi itd.

Krhotine, poput prljavštine ili prašine, mogu nanijeti značajnu štetu na površini kliznog ležaja. Ako je u sustavu za podmazivanje, prljavština će obično ostaviti obodne ogrebotine i često će ostati na podlozi ležaja. Stoga je važno voditi računa o tome da sustav za podmazivanje uvijek bude temeljito ispran. Drugi način na koji prljavština može naštetiti jest taj da komponente motora nisu potpuno čiste. Strane čestice zarobljene između komponenata ležaja će povisiti njegovu površinu (napraviti grbu). Ova mala grba može dovesti do kontakta ležaja i koljenastog vratila što će otežati njihovo klizanje. Potrebno je uvijek osigurati postavljanje ležaja na čiste površine.

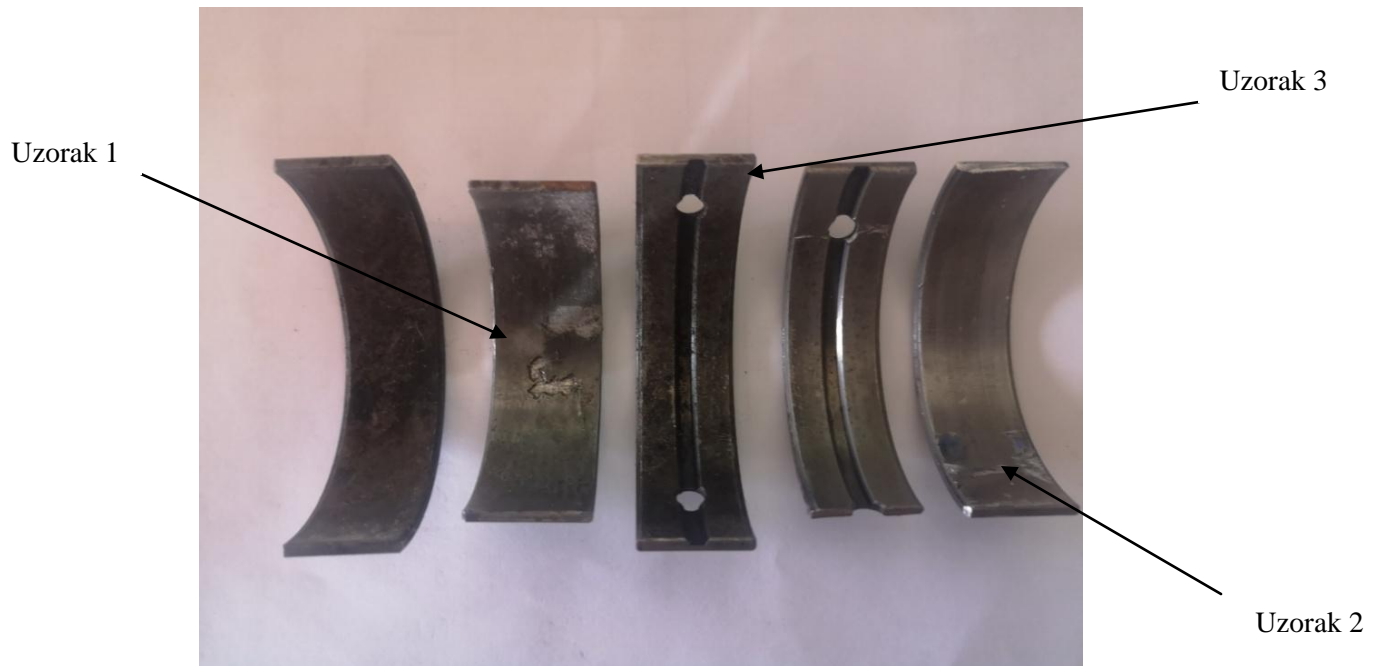
Nedovoljno podmazivanje najčešće dovodi do potpunog kvara motora. Nepostojanje odgovarajućeg uljanog filma rezultirat će kontaktom metal-metal, povremeno samo s jednim ležajem ili često na većem broju ležaja. Kako bi se ovo spriječilo potrebno je voditi računa o prolazima za ulje, radu pumpa za ulje, razrjeđivanju goriva itd.

Ponekad su kvarovi rezultat pogrešaka prilikom postavljanja ležaja. Na primjer, ako se ležajna polovica bez rupe za ulje nepravilno postavi u položaj u kojem je otvor potreban, taj rukavac neće dobiti podmazivanje. Također se mogu vidjeti i druge vrste pogrešaka u sastavljanju. Ako je klipnjača ili poklopac glavnog ležaja postavljen u pogrešnom položaju ležaj nije pravilno postavljen, podmazivanje neće biti dovoljno i može uzrokovati kvar. Pažljivi postupci ugradnje kliznog ležaja veoma su važni u svakom aspektu ugradnje motora. Neoprezne pogreške su uvijek skupe. [12].



## 5.2. Kemijski sastav uzoraka

Analizi je podvrgnuto 3 vrste kliznih ležajeva iz motora Mercedes ML 270 CDI. Dva glavna ležaja i jedan ležaj klipnjače. Ležaj klipnjače će se nazivati uzorkom 1, glavni ležaj bez provrta za ulje uzorkom 2 i glavni ležaj s provrtom za ulje uzorkom 3.



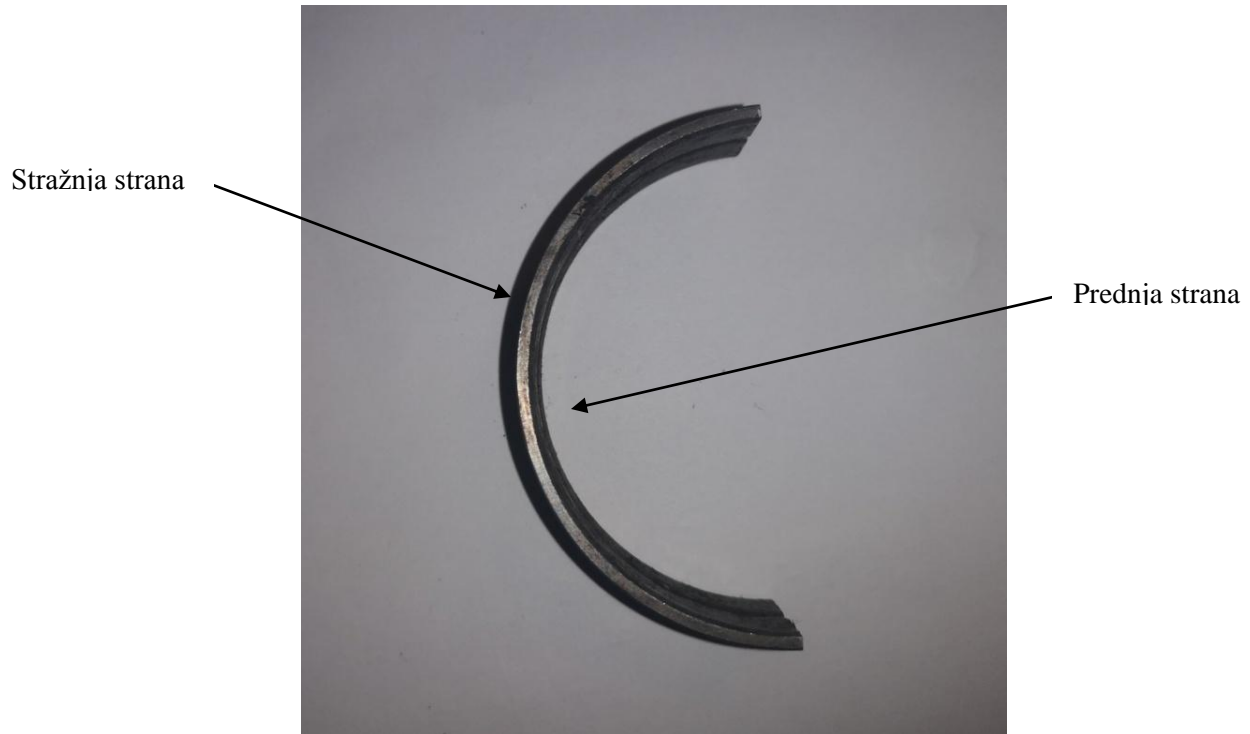
**Slika 21. Istrošeni uzorci**

Uzorci su podvrgnuti kemijskoj analizi pomoću prijenosnog XRF spektrometra koji ima četiri ključne komponente: izvor pobude (rendgenska cijev), detektor, multifilterski kotač za kompenzaciju smetnji i poboljšanje izvora i jedinicu za prikupljanje i obradu podataka. On omogućuje identifikaciju kemijskih elemenata bez ikakve pripreme uzorka i pruža brze i točne rezultate.



**Slika 22. Prijenosni XRF spektrometar**

Uzorci su analizirani s vanjske i unutarnje strane. Analizirani su u očišćenom stanju i direktno iz uporabe (neočišćeno stanje). Kemijski sastav s vanjske strane očišćenih uzoraka je veoma sličan. Utvrđeno je da se radi o ugljičnom čeliku čije je najvažnije svojstvo deformabilnost (duktilnost), udio željeza u sva tri slučaja je bio preko 98%, također je vidljivo prisustvo nečistoća poput sumpora i fosfora bez legiranih elemenata. Unutarnja strana uzorka 1 i 2 je legura aluminija, magnezija i kositra s prisustvom nečistoća i željeza koji se inače ne nalazi u ovakvim legurama. Kositar je glavni element legiranja u spojevima koji su razvijeni za industriju ležajeva. On se koristi u ležajevima u kojima su nisko trenje, tlačna čvrstoća, otpornost na koroziju, umor i čvrstoća materijala važni uvjeti. Magnezij doprinosi čvrstoći i tvrdoći spoja stvaranjem intermetalnih spojeva. Budući da se radi o potrošenom kliznom ležaju može se zaključiti da su čestice abrazije ili krhotine iz dijela koji klizi o klizni ležaj došle na njegovu površinu pa je to razlog prisustva željeza u kemijskom sastavu. Uzorak 3 je pokazao da se radi o leguri aluminija, željeza i kositra. Radi nejasnoća u vezi s kemijskim sastavom uzorak je podvrgnut daljnjoj analizi. Svi uzorci analizirani u neočišćenom stanju su prikazali gotovo identičan kemijski sastav kao i u očišćenom samo sa većim prisustvom nečistoća i željeza.



**Slika 23. Prednja i stražnja strana kliznog ležaja**

**Tablica 4. Kemijski sastav stražnje strane uzorka 1**

Kemijski element	Postotak
Fe	99,10%
Mn	0,26%
Zn	0,08%
Sn	0,18%
P	0,020%
S	0,37%

**Tablica 5. Kemijski sastav prednje strane uzorka 1**

Kemijski element	Postotak
Mg	9,53%
Al	45,51%
Si	2,33%
Fe	18,72%
P	0,044%
Ni	0,06%
P	0,044%
Cu	1,85%
Sn	21,11%
Pb	0,74%

**Tablica 6. Kemijski sastav stražnje strane uzorka 2**

Kemijski element	Postotak
Fe	98,92%
Mn	0,26%
Zn	0,16%
Sn	0,16%
S	0,36%
P	0,016%

**Tablica 7. Kemijski sastav prednje strane uzorka 2**

Kemijski element	Postotak
Mg	5,75%
Al	74,01%
Si	1,87%
Fe	2,84%
P	0,081%
Zn	0,0073%
S	0,302%
Cu	1,29%
Sn	13,76%
Pb	0,026%

**Tablica 8. Kemijski sastav stražnje strane uzorka 3**

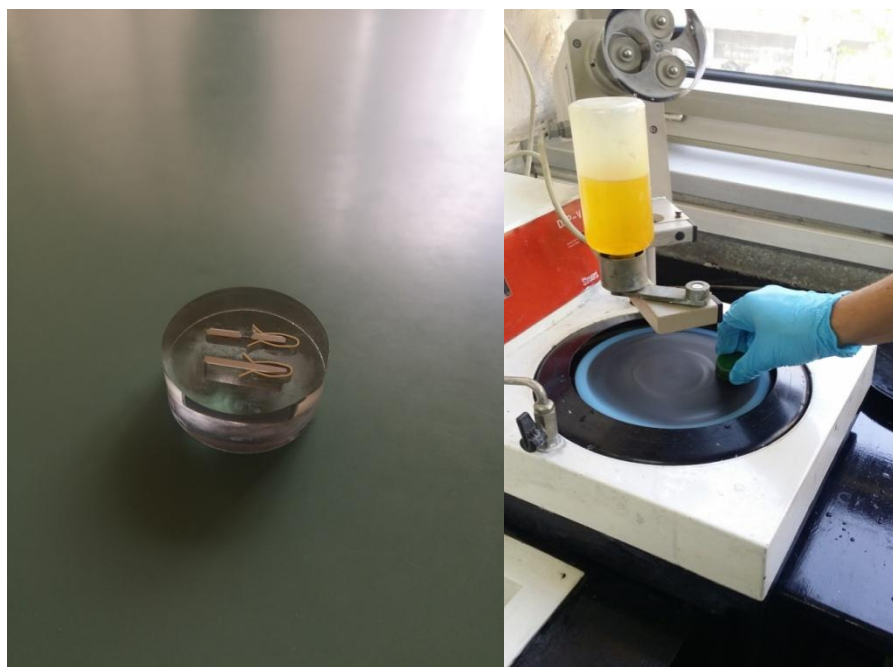
Kemijski element	Postotak
Fe	98,96%
Mn	0,36%
Zn	0,17%
Sn	0,15%
S	0,18%
P	0,016%

**Tablica 9. Kemijski sastav prednje strane uzorka 3**

Kemijski element	Postotak
Al	15,33%
Si	0,42%
S	0,118%
Mn	0,18%
Fe	72,42%
Cu	1,41%
Sn	10,07%
Pb	0,04%

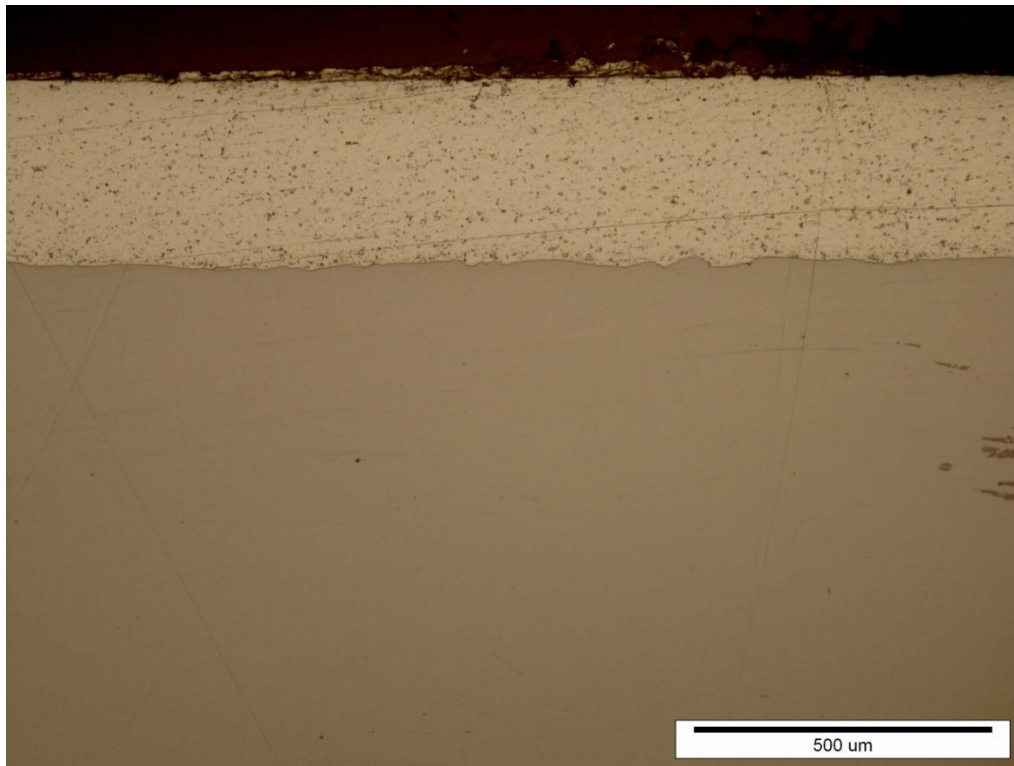
### 5.3. Poliranje, nagrivanje i mikrotvrdoća

Radi daljnje analize kliznih ležaja, dva uzorka su izrezana i ulivena u polimernu masu. Uzorci se ulijevaju u polimernu masu radi zaštite, uniformnog oblika za automatsku primjenu, lakšeg rukovanja i analize rubova. U poliranom stanju se vide nemetalni uključci ako postoje, porozitet i pukotine. Poliranje se vršilo na uređaju STRUERS tako što se uređaj s uzorkom na njemu okreće brzinom od 150 okretaja u minuti. Također i uređaj i uzorak se podmazuju lubrikantom za vrijeme poliranja. Nakon poliranja uzorak se ispiru od paste i posuši te je dalje podvrgnut analizi pod svjetlosnim mikroskopom.

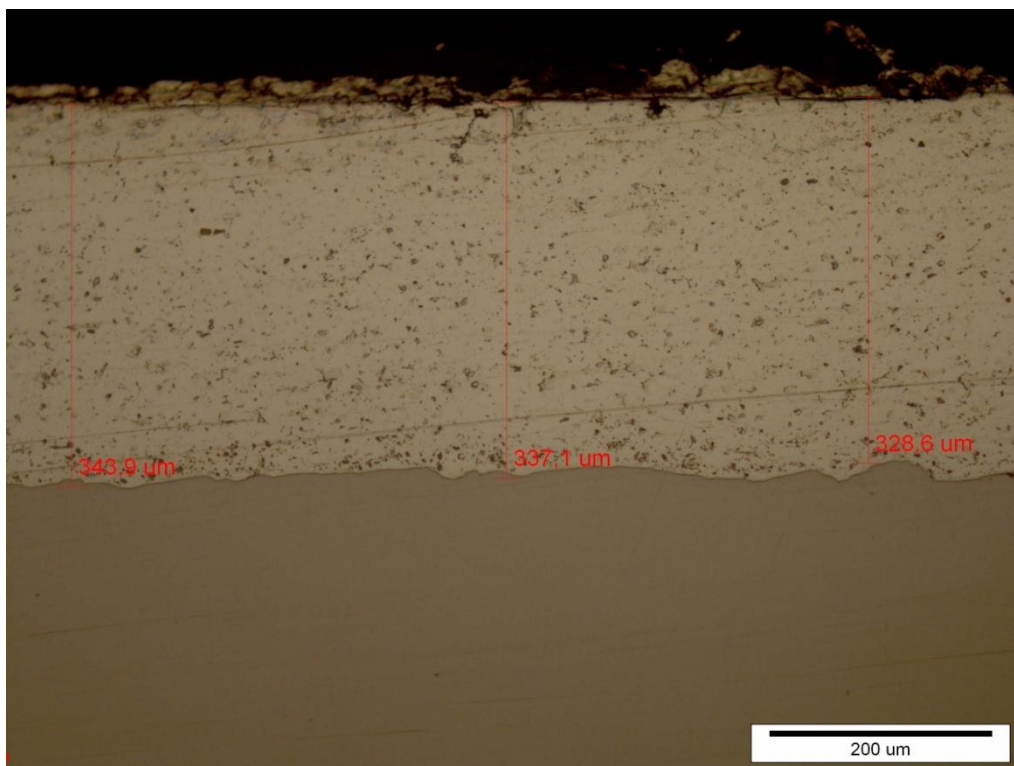


Slika 24. a)Uzorci u polimernoj masi b)naprava za poliranje

Površine uzoraka su kvalitetno polirane, nakon čega su promatrane na svjetlosnom mikroskopu. Na uzorcima nisu uočene nikakve nepravilnosti strukture. Uzorci 2 i 3 su podvrgnuti poliranju. Uočena su dva sloja: osnova i aluminjska legura. Oba uzorka pokazala su veoma sličnu mikrostrukturu u poliranom stanju. Na oba uzorka vidljiv je sloj približne debljine od 300 $\mu$ m. Zbog nedostatka informacija uzorci su podvrgnuti daljnjoj analizi.

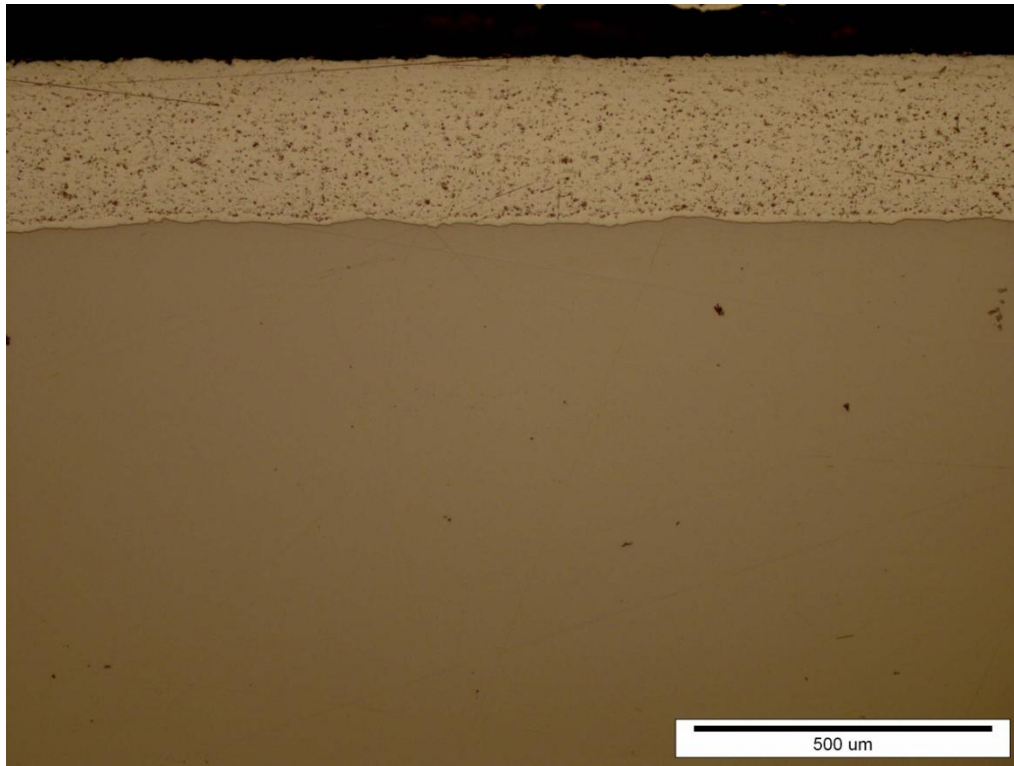


Slika 25. Mikrostruktura u poliranom stanju uzorka 2, povećanje 100x

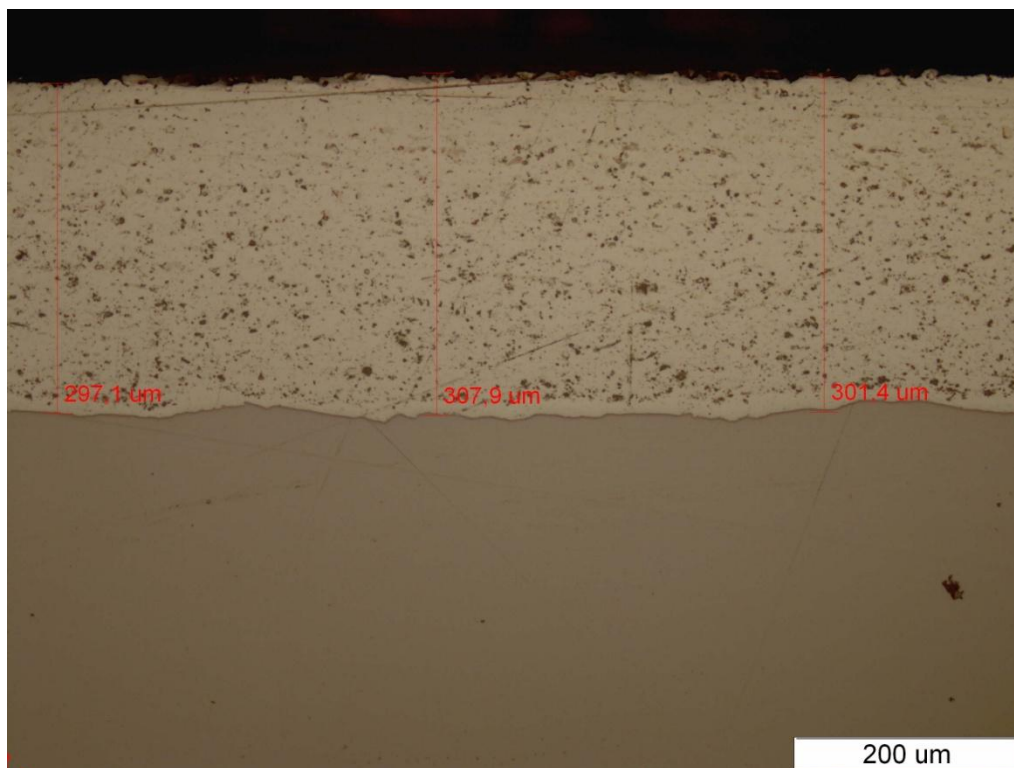


Slika 26. Mikrostruktura u poliranom stanju s dimenzijama sloja uzorka 2, povećanje 200x



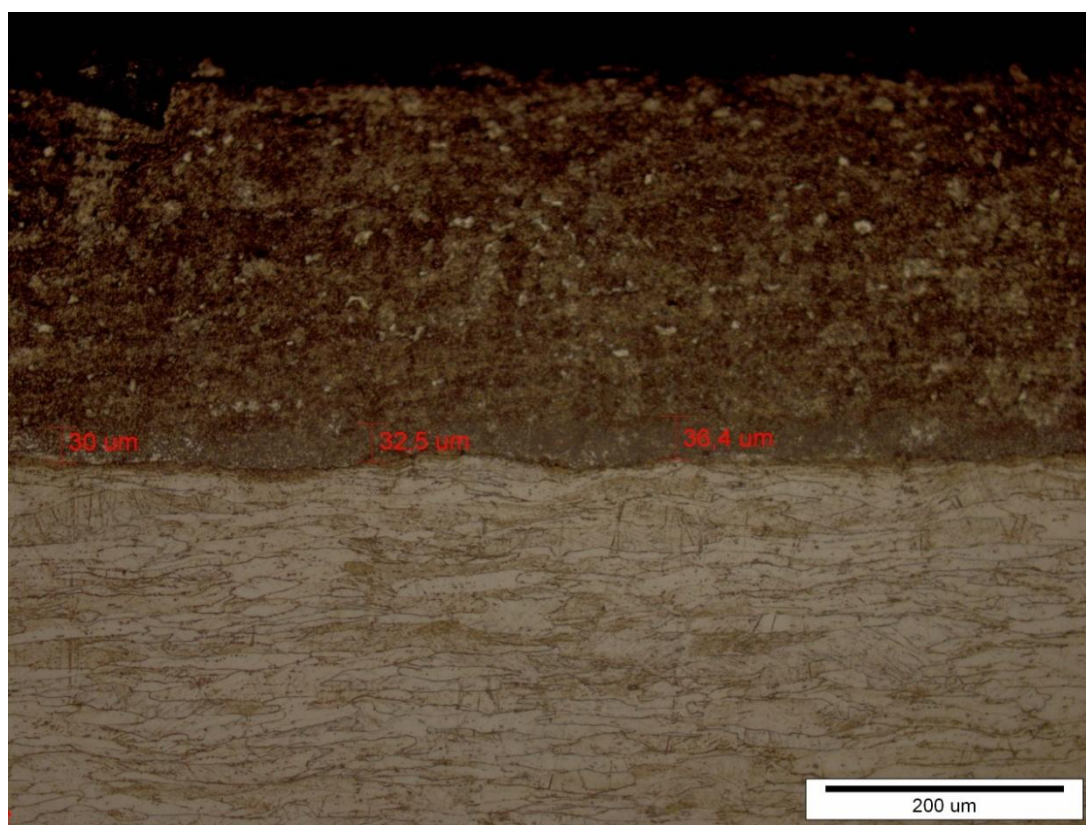


Slika 27. Mikrostruktura u poliranom stanju uzorka 3, povećanje 100x

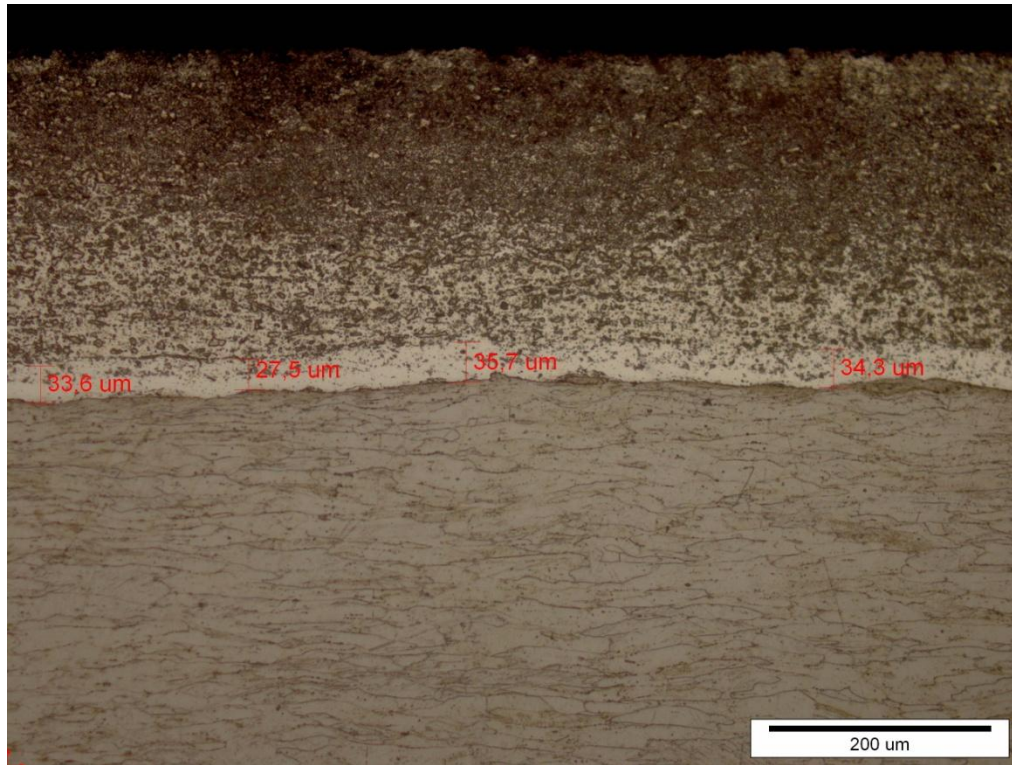


Slika 28. Mikrostruktura u poliranom stanju s dimenzijama sloja uzorka 3, povećanje 200x

Nagrizanje je postupak koji se provodi nakon poliranja s ciljem uklanjanja nečistoća s površina uzorka. Čelični dijelovi uzorka nagriženi su sredstvom za nagrizanje pod nazivom nital. To je tri postotna dušična kiselina i alkohol. Aluminijski dijelovi uzorka nagriženi su s Keller reagensom koji se sastoji od 2.5 ml  $\text{HNO}_3$ , 1.5 ml HCL, 1 ml HF i 95 ml destilirane vode. Uzorci su ostavljeni u sredstvu za nagrizanje 2 do 3 sekunde pri čemu dolazi do kemijske reakcije na površinu uzorka. Nakon toga se uzorci isperu u vodi da se prekine kemijska reakcija. U nagriženom stanju u uzorku 2 primijetio se jasno vidljiv međusloj između aluminijske legure i osnovnog materijala. Prema podacima iz literature, to bi mogao biti sloj čistog aluminijskog. U uzorku 3 također se da naslutiti međusloj čija granica nije jasno vidljiva već se on kontinuirano spaja s legurom aluminijskog. Također se da zaključiti po izduženim kristalnim zrnima da je podloga od čeličnog lima u valjanom stanju te da nije toplinski obrađena. Međusloj uzorka 2 i 3 je debljine oko 33  $\mu\text{m}$ .



**Slika 29. Mikrostruktura u nagriženom stanju uzorka 2 s dimenzijama međusloja, povećanje 200x**



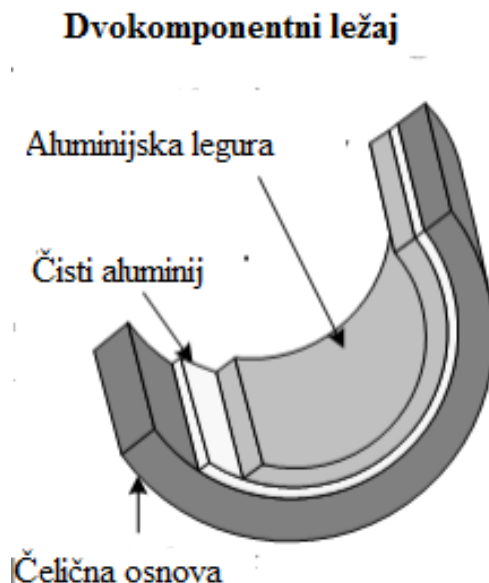
**Slika 30. Mikrostruktura u nagriženom stanju uzorka 3 s dimenzijama međusloja, povećanje 200x**

Iz svih gore navedenih podataka da se naslutiti da se radi o dvokomponentnom ležaju s čeličnom osnovom, aluminijskom legurom i međuslojem čistog aluminijskog između njih. Čelična osnova podržava konstrukciju ležaja te održava krutost ležaja. Međusloj pruža bolju povezivost osnovnog sloja i legure.



**Slika 31. Raspored slojeva na primjeru uzorka 2**





Slika 32. Dvokomponentni klizni ležaj [13]

Kod uzorka 3, prema kemijskom sastavu i svemu viđenom u analizi, može se zaključiti da se radi o sinteriranom kliznom ležaju na bazi željeza. Ležajevi od sinteriranog željeza su jeftiniji, ali su osjetljiviji na koroziju i imaju lošija tribološka svojstva. Koriste se za niža opterećenja i srednje brzine klizanja.

Mikrotvrdoća uzorka mjerila se pomoću metode po Vickersu. Po toj metodi penetretor je dijamanatna istostrana četverostrana piramida s kutem između stranica od  $136^\circ$ . Koristio se uteg od 200 grama. Mjerena su dva uzorka, na svakom uzorku pojedinačno mjerio se sloj i čelična podloga. Očekivano, čelična osnova pokazala se tvrdom od ležajnog sloja. Srednja vrijednost ležajnog sloja uzorka 2 je 75 HV<sub>0,2</sub>, a čelične osnove je 242 HV<sub>0,2</sub>. Uzorak 3 dao je rezultate ležajnog sloja 47 HV<sub>0,2</sub>, a čelične osnove 234 HV<sub>0,2</sub>.

**Tablica 10. Mikrotvrdoća uzorka 1**

UZORAK 1		
Broj mjerenja	Tvrdoća ležajnog sloja, HV0,2	Tvrdoća čelične osnove, HV0,2
1.	80,4	237
2.	55,0	257
3.	72,9	233
4.	104,0	199
5.	60,5	186

**Tablica 11. Mikrotvrdoća uzorka 2**

UZORAK 1		
Broj mjerenja	Tvrdoća ležajnog sloja, HV0,2	Tvrdoća čelične osnove, HV0,2
1.	46,1	186
2.	45,8	178
3.	42,3	207
4.	52,7	308
5.	50,1	291

#### 5.4. Mehanizmi trošenja ležaja na primjerima uzoraka

Uzorci su poslikani na svjetlosnom mikroskopu i na temelju njihovih slika da se naslutiti o kojim mehanizmima trošenja se radi. Uzorci 2 i 3 poslikani su u očišćenom i ne očišćenom stanju. U ne očišćenom stanju površine su prikrivene nečistoćama stoga je veoma teško dati procijeu o mehanizmu trošenja jer se površine ne vide jasno.

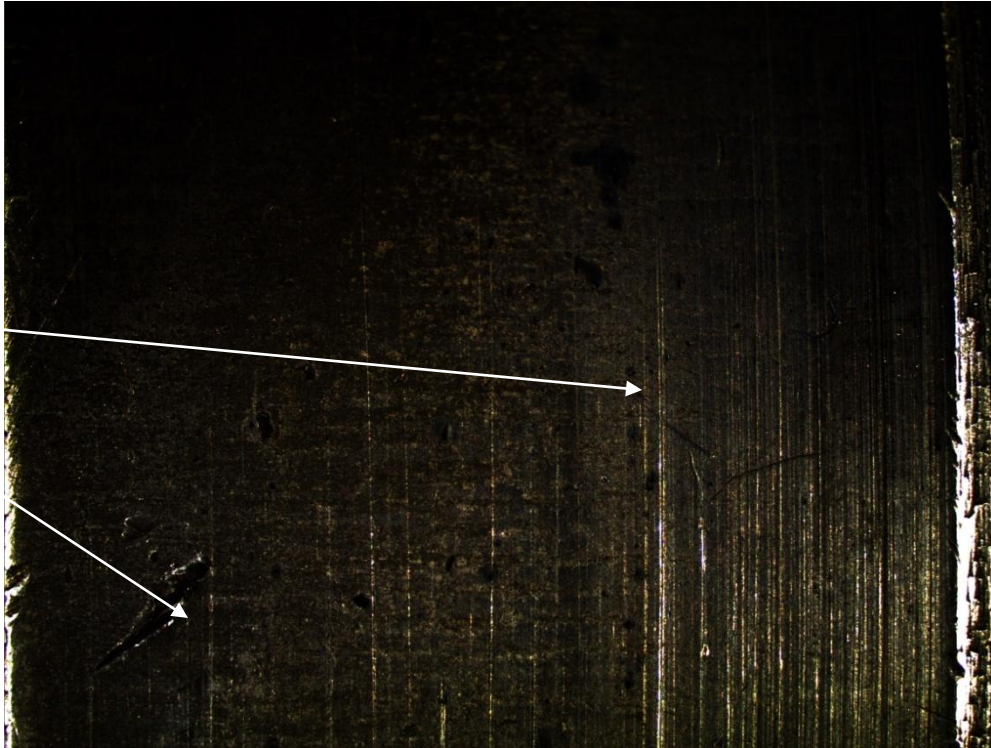
Na uzorku 1 prepoznato je zaribavanje, kombinacija adhezije i umora materijala, vidljive su prskotine koje bi se tijekom daljnjeg vremena proširile. Da bi se umor spriječio potrebno je odrediti uzroke pojave ili koristiti materijal s većom dinamičkom izdržljivošću površine. Kod adhezije najvažnije je odrediti uzroke njene pojave.



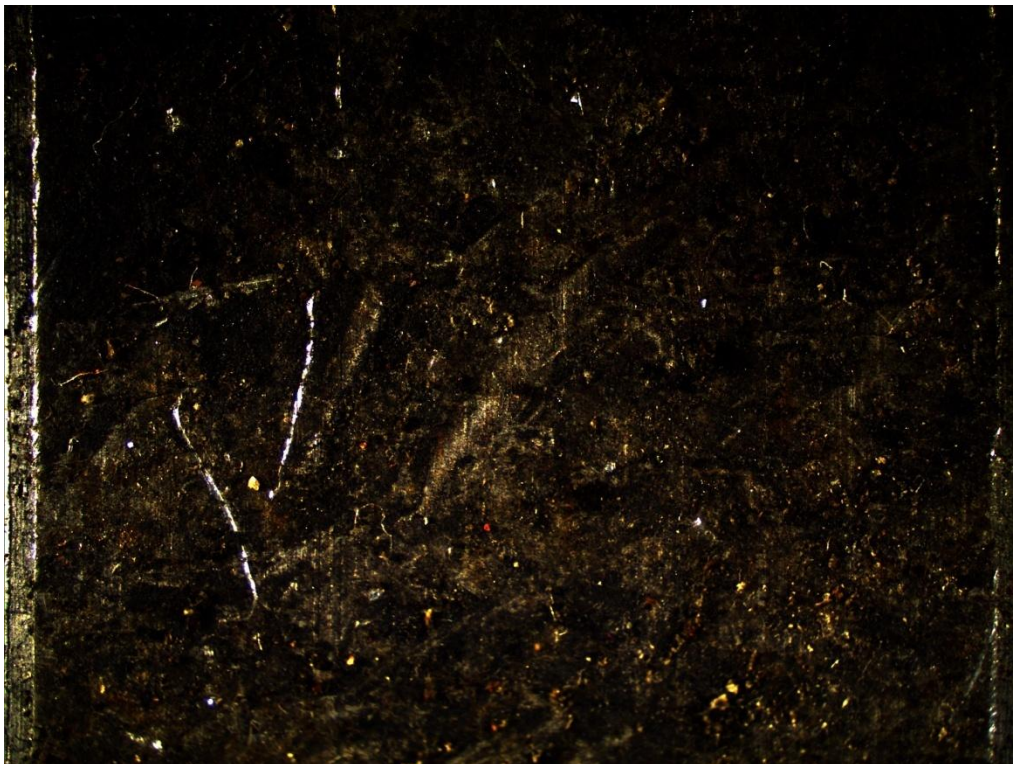
**Slika 33. Uzorak 1**

Na očišćenom uzorku 2 vidljive su utisnuti djelići stranih tijela na površini što je tipičan primjer abrazije. Te strane čestice su u ležaj mogle doći iz okoline ili nastati trošenjem dijelova sklopa. Ležajeve na koje je abrazija već djelovala treba zamijeniti da bi sistem i dalje funkcionirao. Na neočišćenom uzorku 2 nisu jasno vidljivi tragovi trošenja ali su jasno vidljive nečistoće i strani uključci.

trag abrazijskog  
trošenja



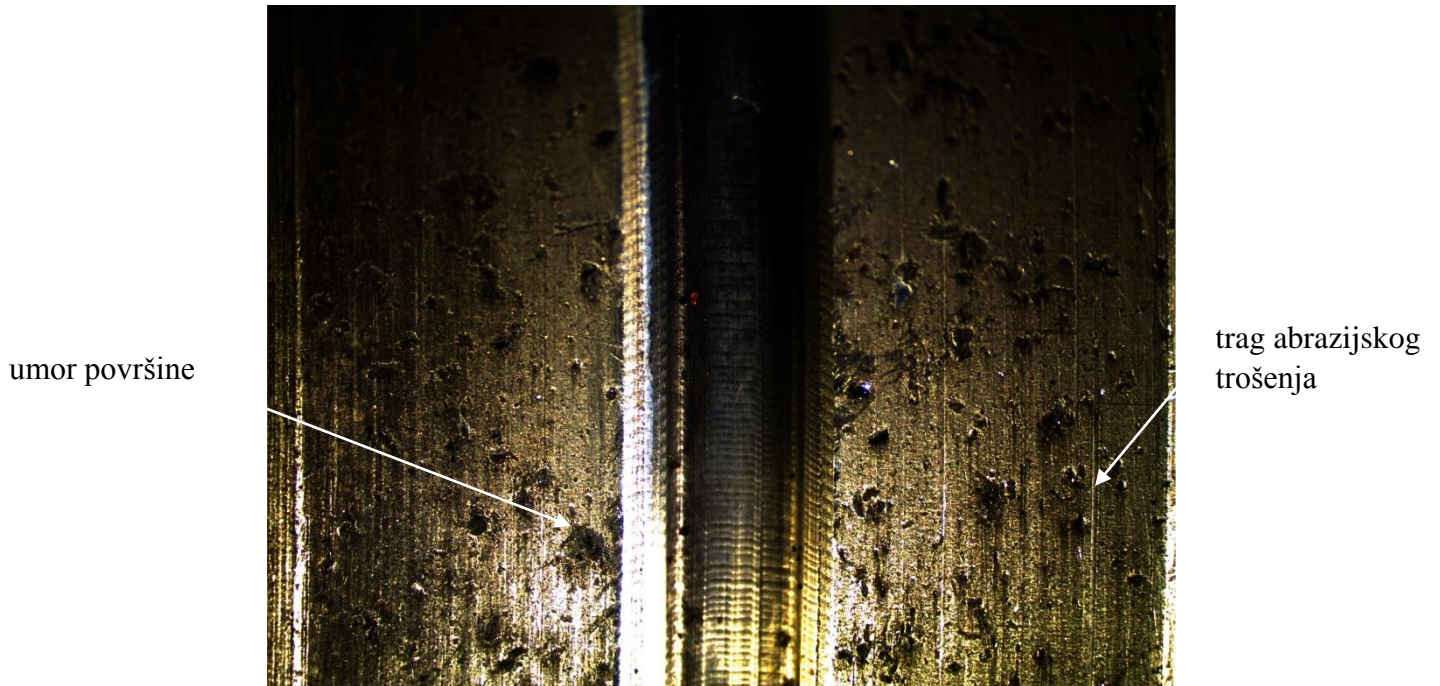
Slika 34. Uzorak 2-očišćeni



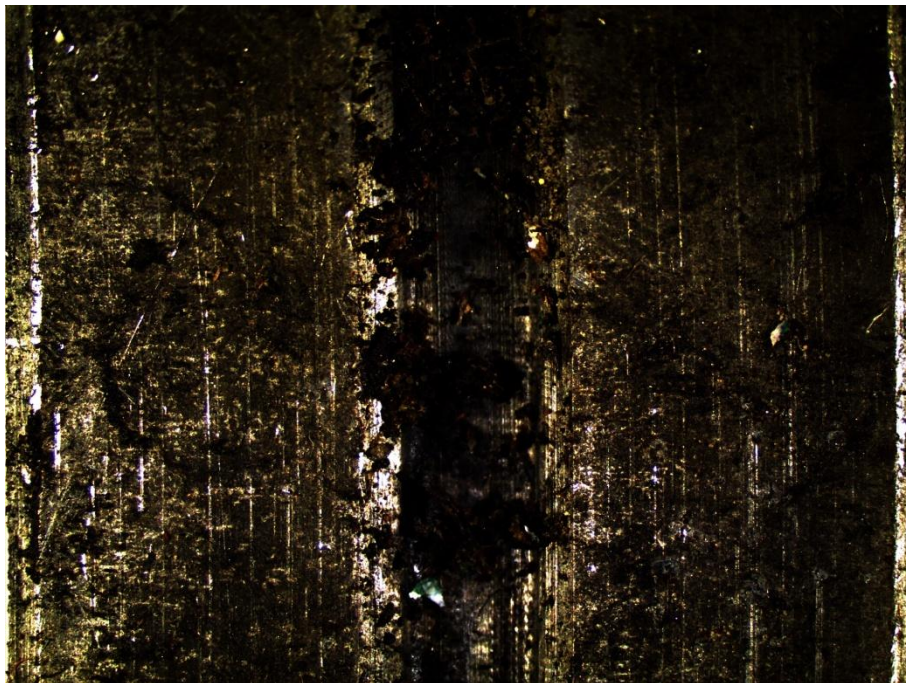
Slika 35. Uzorak 2-ne očišćeni



Kod uzorka 3 je vidljiva abrazija i umor površine. Utisnuti dijelci abrazivnih čestica nalaze se duž cijele površine kliznog ležaja. Na ne očišćenom dijelu ponovno je teško vidljiv mehanizam trošenja.



Slika 36. Uzorak 3-očišćeni



Slika 37. Uzorak 3- ne očišćeni



## **6. ZAKLJUČAK**

Klizni ležajevi su vrlo važni elementi svakog tribo sustavu. Prilikom njihovog izbora potrebno je biti veoma pažljiv, treba voditi računa o materijalu kliznog ležaja, zahtjevima koji se na njih postavljaju, a i o samom sustavu. Loš izbor istog može rezultirati velikim financijskim troškovima. Na temelju ispitivanja na primjerima istrošenih kliznih ležaja zaključeno je da se radi o dvokomponentnim kliznim ležajevima. Uzorak 1 i 2 imaju čeličnu osnovu sa ležajnim slojem od aluminijske legure, a uzorak 3 čeličnu osnovu sa slojem sinterirane legure željeza i aluminijske. Pokazano je da je ležajna legura puno mekša od čelične osnove. Na primjeru istrošenih kliznih uzoraka uočeni su najčešći mehanizmi trošenja: abrazija, adhezija i umor površine.

## LITERATURA

- [1] Damir Jelaska, Elementi strojeva, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2005
- [2] <https://www.hennlich.hr/proizvodi/sustavi-za-linearna-kretanja-klizni-lezaj-43.html>
- [3] Grilec K., Jakovljević S., Marić G.: Tribologija u strojarstvu, FSB, Zagreb, 2017.
- [4] Elementi strojeva II, stručni preddiplomski studij strojarstva, Tehnički fakultet, Rijeka, 2007
- [5] Rac A., Vencl A., Metalni materijali kliznih ležaja, Beograd, 2005
- [6] Filetin T., Kovačiček F., Indof J., Svojstva i primjena materijala, Zagreb, 2013
- [7] <https://hevvyumps.com/blog/tech-talk/gain-in-depth-knowledge-on-cavitation/>
- [8] <https://www.automanijak.com/uporedno/8279/0/mercedes-benz-ml-270-cdi-VS->
- [9] <http://motor-diht.hr/asortiman/motorna-grupa/aksijalni-lezajevi-motora/>
- [10] [https://www.ms-motorservice.com/fileadmin/media/MAM/PDF\\_Assets/Damage-to-engine-bearings\\_861097.pdf](https://www.ms-motorservice.com/fileadmin/media/MAM/PDF_Assets/Damage-to-engine-bearings_861097.pdf)
- [11] [https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=bearings\\_in\\_internal\\_combustion\\_engines](https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=bearings_in_internal_combustion_engines)
- [12] <https://www.knowyourparts.com/technical-resources/engine/types-of-engine-bearing-damage/>
- [13] [https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=engine\\_bearing\\_materials](https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=engine_bearing_materials)