

# Životni vijek kompozitnog kliznog ležaja

---

**Katana, Branko**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2017**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:877497>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-22**

*Repository / Repozitorij:*

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





Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Branko Katana, mag. ing. mech.

**ŽIVOTNI VIJEK KOMPOZITNOG  
KLIZNOG LEŽAJA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2017.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND  
NAVAL ARCHITECTURE

Branko Katana, mag. ing. mech.

# **LIFE TIME OF COMPOSITE BEARING**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2017.



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Branko Katana, mag. ing. mech.

# **ŽIVOTNI VIJEK KOMPOZITNOG KLIZNOG LEŽAJA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:  
prof. dr. sc. Milan Opalić

Zagreb, 2017.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND  
NAVAL ARCHITECTURE

Branko Katana, mag. ing. mech.

# **LIFE TIME OF COMPOSITE BEARING**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:  
prof. dr. sc. Milan Opalić

Zagreb, 2017.

## PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

<b>UDK:</b>	621.82:621.891:620.1
<b>Ključne riječi:</b>	Klizni ležaj, kompozit, trošenje, zračnost, kemijska kompatibilnost
<b>Znanstveno područje:</b>	Tehničke znanosti
<b>Znanstveno polje:</b>	Strojarstvo
<b>Institucija u kojoj je rad izrađen:</b>	Fakultet strojarstva i brodogradnje (FSB), Zagreb
<b>Mentor rada:</b>	prof. dr. sc. Milan Opalić
<b>Broj stranica:</b>	183
<b>Broj slika:</b>	100
<b>Broj tablica:</b>	21
<b>Broj korištenih bibliografskih jedinica:</b>	126
<b>Datum obrane:</b>	Lipanj, 2017.
<b>Povjerenstvo:</b>	dr. sc. Mladen Šercer, red. prof. – predsjednik dr. sc. Milan Opalić, red. prof. – mentor dr. sc. Dragan Žeželj, docent.– član dr. sc. Krešimir Grilec, red. prof. – član dr. sc. Milan Kljajin, red. prof. Strojarskog fakulteta, Sl.Brod – član
<b>Institucije u kojima je rad pohranjen:</b>	Fakultet strojarstva i brodogradnje (FSB), Zagreb Nacionalna i sveučilišna knjižnica, Zagreb

# Zahvala

---

Zahvaljujem mentoru, prof. dr. sc. Milanu Opaliću, na kritičkom pristupu i pomoći koju mi je pružio tijekom istraživanja, provedbe pokusa i izrade ovoga rada, kao i članovima povjerenstva prof. dr. sc. Mladenu Šerceru, prof. dr. sc. Milanu Kljajinu, prof. dr. sc. Krešimiru Grilecu te doc. dr. sc. Draganu Žeželju. Također se zahvaljujem Ivanu Kovaču, Željku Katušiću i Ivici Crnjaku djelatnicima Laboratorija za elemente strojeva Fakulteta strojarstva i brodogradnje Zagreb.

Veliku zahvalnost dugujem doc. dr.sc. Zoranu Domitranu na tehničkim savjetima i pripremi ispitivanja te gospodinu Dragutinu Dušaku direktoru tvrtke Promid d.o.o. Križevci na podršci u dobavi i pripremi uzoraka za ispitivanjem i Tomislavu Alviru direktoru tvrtke Alvitom d.o.o. Zagreb na preciznoj strojnoj obradi uzoraka za testiranje.

Na kraju veliko hvala mojoj obitelji, majci Radmili i ocu Ivanu na beskrajnoj podršci i strpljenju jer su uvijek bili uz mene tijekom studiranja i pisanja ovog rada.

---

Podaci o mentoru.....	iv
Predgovor .....	v
Sažetak .....	vi
Summary .....	vii
Ključne riječi -Keywords .....	viii
Popis slika .....	ix
Popis tablica .....	xii
Popis oznaka.....	xiii
Popis kratica .....	xvii
1 Uvod.....	1
1.1 Motivacija za istraživanje.....	2
1.2 Pregled dosadašnjih istraživanja.....	4
1.3 Hipoteza.....	6
1.4 Očekivani znanstveni doprinos.....	6
1.5 Ispitne postavke i metodologija istraživanja .....	7
1.6 Struktura disertacije.....	8
2 Kompozitni materijali u proizvodnji kliznih ležajeva.....	10
2.1 Klasifikacija kompozita.....	11
2.2 Vlakna i polimerne matrice .....	12
2.2.1 Polimerne matrice .....	12
2.3 Mehanizmi oštećenja kompozita .....	13
2.4 Tribološke pojave .....	14
2.4.1 Uvod.....	14
2.4.2 Tribološki sustav kompozitni klizni ležaj / rukavac.....	17
2.5 Trenje.....	21
2.5.1 Osnove trenja.....	21
2.5.2 Mehanizam trenja kliznog ležaja.....	22
2.6 Trošenje .....	26
2.6.1 Općenito .....	26
2.6.2 Trošenje kompozita ojačanih vlaknima.....	27
2.6.3 Trošenje slojevitih (laminiranih) kompozita .....	29
2.7 Vrste ležajnih materijala.....	32



---

2.8	Polimerni materijali .....	36
2.9	Fizikalna stanja polimera.....	40
2.10	Podmazivanje.....	42
2.11	Prevlake maziva .....	43
2.12	Sastav prevlaka .....	45
2.13	Toplinsko opterećenje.....	47
2.14	Dinamičko opterećenja .....	50
2.15	Dopušteno trošenje pri dinamičkom opterećenju .....	53
2.16	Opis trošenja .....	54
2.17	Princip p-v vrijednosti, p-v dijagram i prošireni p-v dijagram .....	56
3	Eksperimentalno ispitno postolje i mjerna oprema .....	58
3.1	Opis Timken uređaja .....	59
3.1	Mjerni sustav .....	61
3.2	Mjerenje temperature.....	61
3.3	Mjerenje faktora trenja .....	64
4	Mjerenje i analiza rezultata na Timken ispitnom uređaju .....	66
4.1	Koncipiranje eksperimenta .....	66
4.2	Kriteriji za preliminarno ispitivanje životnog vijeka kompozitnog ležajnog materijala .....	68
4.3	Utjecajni parametri prilikom ispitivanja na Timken ispitnom uređaju.....	71
4.3.1	Opterećenje ispitnog uzorka.....	71
4.3.2	Brzina vrtnje ispitnog uzorka .....	72
4.3.3	Dimenzije ispitnog uzorka .....	73
4.3.4	Materijal ispitnog uzorka .....	74
4.3.5	Materijal pritisne pločice.....	76
4.3.6	Tvrdoća pritisne pločice .....	77
4.3.7	Hrapavost pritisne pločice.....	78
4.3.8	Plan pokusa .....	78
4.3.9	Provedba pokusa na Timken ispitnom uređaju .....	80
4.3.10	Kontrola mjerenja na Timken ispitnom uređaju .....	81
4.3.11	Zaključak o ispitivanju na Timken ispitnom uređaju.....	88
5	Ispitivanje trošenja kompozitnog kliznog ležaja.....	89
5.1	Eksperimentalno ispitno postolje za ispitivanje kliznih ležajeva i mjerna oprema.....	90
5.2	Mjerni sustav .....	92
5.3	Određivanje faktora trenja .....	94
5.4	Trošenje .....	96

---

5.5	Temperatura.....	100
5.6	Kut dodira između kliznog ležaja i rukavca .....	102
5.7	Proračun zračnosti kliznog ležaja .....	104
5.8	Termodinamički proračun toplinskog toka za sustav klizni ležaj / rukavac.....	106
5.8.1	Proračun temperature rukavca.....	108
5.8.2	Proračun toplinskog toka rukavca i širenje rukavca.....	110
5.8.3	Proračun toplinskog toka kliznog ležaja .....	111
5.8.4	Proračun toplinskog širenja vanjskog kućišta kliznog ležaja.....	112
5.9	Životni vijek kompozitnih kliznih ležajeva u ovisnosti o zračnosti .....	113
5.10	Utjecajni parametri prilikom ispitivanja na ispitnom uređaju za klizne ležajeve .....	116
5.11	Plan pokusa na ispitnom uređaju za klizne ležajeve .....	119
5.12	Kontrola mjerenja na ispitnom uređaju za klizne ležajeve .....	120
5.13	Analiza rezultata .....	132
5.14	Statistička obrada podataka.....	138
5.15	Smjernice za dimenzioniranje kompozitnih kliznih ležajeva .....	141
6	Zaključak.....	145
7	Bibliografski navod.....	147
	Kratki životopis .....	154
	Short Biography .....	155

## Podaci o mentoru

---

Milan Opalić rođen je 2. listopada 1949. u Gornjoj Pastuši, općina Petrinja. Osnovnu školu pohađao je u Petrinji. Srednju školu završio je u Karlovcu 1968. godine. Iste godine upisao je Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, konstrukcijski odjel. Diplomirao je 1974. godine. Kraće vrijeme radio je u tvrtki Overbeck, Herborn, u Njemačkoj, u proizvodnji alatnih strojeva. Tijekom studija obavljao je dužnosti demonstratora na predmetima Fizika (Elektrotehnički fakultet) i Elementi strojeva (Fakultet strojarstva i brodogradnje). Godine 1975. izabran je na radno mjesto asistenta te je upisao postdiplomski studij na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, a 1980. godine obranio je magistarski rad pod naslovom „Istraživanje utjecaja materijala na opteretivost pužnih prijenosnika „. Doktorirao je 1984. godine disertacijom s naslovom „Prilog istraživanju opteretivosti bokova pužnih kola pužnih prijenosnika“. Godine 1984. izabran je u znanstveno zvanje znanstveni suradnik, te radno mjesto docenta na Katedri za elemente strojeva i konstrukcija FSB, a 1989. u znanstveno zvanje viši znanstveni suradnik te radno mjesto izvanredni profesor na toj Katedri. 14. ožujka 2000. godine izabran je u znanstveno zvanje znanstveni savjetnik, te radno mjesto redovitog profesora na Katedri za elemente strojeva i konstrukcija, u Zavodu za konstruiranje FSB-a. Znanstvena aktivnost mu je vezana uz područje konstruiranja i elemenata strojeva, a posebno u području prijenosa snage i gibanja. Pod njegovim mentorstvom obranjeno je 20 magistarskih radova i disertacija na više sveučilišta u zemlji i inozemstvu. U dodiplomskoj i poslijediplomskoj nastavi nositelj je nekoliko temeljnih kolegija, od kojih je neke i osnovao. Stručna aktivnost povezana je za mehaničke konstrukcije općenito, što je rezultiralo nizom stručnih projekata od kojih je većina i izvedena. Autor je i mnogih laboratorijskih uređaja na kojima je znanstvene radove radilo niz znanstvenika. Autor je više od pedeset znanstvenih i stručnih radova, te pet sveučilišnih udžbenika. Bio je voditelj sedam znanstvenih projekata. Član je više domaćih i inozemnih stručnih asocijacija.

Zbog smanjenja cijene kompozitnih materijala u proizvodnji konstrukcijskih sklopova postaju važniji segment. Primjenjivost kompozitnih materijala u proizvodnji kliznih ležajeva posebice dolazi do izražaja kod snižavanja troškova proizvodnje te kod specijalnih primjena, gdje uporaba metalnih kliznih ležajeva nije moguća. Relativno niski troškovi proizvodnje kod velikih serija kompozitnih kliznih ležajeva odnosu na klizne ležajeve na bazi metala, dodatno povisuju nastojanja proizvođača za proširivanjem saznanja o projektiranju takvih kliznih ležajeva. Nedostatak iskustvenih vrijednosti u primjeni kompozitnih materijala kod projektiranja kliznih ležajeva, uz relativno slabu pokrivenost područja odgovarajućim normama otvaraju mnoga neriješena pitanja.

Radi velike raznolikosti kompozitnih materijala postavlja se pitanje primjenjivosti različitih vrsta kompozitnog materijala u dodiru s čeličnim rukavcem, odnosno kakav je utjecaj pojedinog materijala na radni vijek kliznog ležaja i njegovu kvalitetu rada. Primjenom konstrukcijskih kompozita smanjuje se primjena materijala na bazi konstrukcijskih čelika. Izbor materijala ovisi o mehaničkim zahtjevima i stabilnosti dimenzija u različitim medijima koji moraju zadovoljiti odabrani materijali. Važan parametar u izradi kliznog ležaja je točnost izrade, koja ovisi vrlo često o tehnološkom postupku izrade i vrsti kompozitnog materijala. Izbor odgovarajućeg materijala vrlo često je stvar kompromisa između mehaničkih svojstava i točnosti izrade te vrsti materijala rukavca.

Stupanj trošenja i promjena temperature tijekom rada kliznog ležaja ovisi o mnogo parametara koje je teško predvidjeti. Kompozitni materijali za razliku od metala pokazuju mnogo veću ovisnost o temperaturi što se odnosi na njihova mehanička svojstva. Istraživanja su pokazala da osim mehaničkih karakteristika dolazi i do geometrijskih promjena u kliznom ležaju.

Istraživanje provedeno u ovom radu vođeno je s namjerom podizanja iskustvenih saznanja o ponašanju kompozitnog kliznog ležaja u realnim radnim uvjetima, s ciljem proširivanja područja uporabe kliznih ležajeva. Poznavanje granica opteretivosti te najutjecajnijih ulaznih parametara bio bi dobar temelj za daljnja istraživanja što bi dovelo do pouzdanijeg projektiranja kompozitnih kliznih ležajeva.

Razvojem novih materijala na osnovi polimera, s određenim mehaničkim i tribološkim svojstvima, dolazi do postupnog smanjenja primjene materijala na osnovi metala. Značajan razvoj dogodio se u području kompozitnih materijala, koji se često primjenjuju u svim granama industrije. Predmet rada je usporedba triboloških svojstava kompozitnih materijala s tradicionalnim metalnim materijalima u funkciji kliznog ležaja.

Kompozitni ležajni materijali pripadaju skupini nelinearno elastičnih materijala, kod kojih krivulja opterećenja i rasterećenja u dijagramu naprezanje – deformacija nije polinom prvog stupnja. Strukturu kompozitnih materijala čine matrica kao što je npr. matrica od PTFE-a (politetrafloretlen) ili poliestera te ojačalo, koje povezano čine kompozit. Kompleksnost strukture kompozitnih materijala zahtjevno je opisati matematičkim modelima što otežava proračun predviđenog radnog vijeka u funkciji vremena i opterećenja.

S ciljem postizanja točnijih vrijednosti predviđenog radnog vijeka kompozitnih ležajnih materijala potrebno je provesti eksperimentalno istraživanje. Rezultate eksperimentalnog mjerenja moguće je usporediti s vrijednostima dobivenim proračunom ili MKE (metoda konačnih elemenata) analizom. U okviru doktorskog rada provest će se istraživanje operativnosti kompozitnih ležajnih materijala.

# Summary

---

Development of new materials based on a polymers with certain mechanical and tribological properties, leading to a gradual reduction of materials on the metal base. A significant development occurred in the field of composite materials, which are widely used in all branches of industry. The subject of this paper is to compare the tribological properties of composite materials with traditional materials based on metal in function as slide bearing.

Composite bearing materials belong to the group of non-linear materials, in which the loading and unloading curve in the stress - strain diagram is not a polynomial of the first degree. The structure of the composite material consists of fabric such as PTFE (polytetrafluoroethylene) and polyester resin, which connects matrix composites in the finish product. The complexity of the composite structure is challenge to describe as mathematical model which makes it difficult for calculation of planned service life in terms of time and work load.

To achieve more accurate value of the estimated working life time of the composite bearing material is necessary to conduct experimental research. The results of experimental measurements can be compared with those obtained by calculation or FEM (Finite Element Method) analysis.

As part of the doctoral thesis will be carried out research of load on bearing composite material.

# Ključne riječi -Keywords

---

- kompozitni materijali
- klizni ležaj
- granica opteretivosti

- composite materials
- slide bearing
- load capacity

Slika 1. Vrste kompozita .....	11
Slika 2. Tipovi oštećenja kompozita [44].....	14
Slika 3. Abrazivno trošenje na osovini od AISI 316 uslijed klizanja po ležaju od PA6+20% GF ....	15
Slika 4. Trenje i trošenje .....	16
Slika 5. Struktura tribološkog sustava [32] .....	17
Slika 6. Detaljan opis tribološkog sustava klizni ležaj / rukavac .....	19
Slika 7. Uzroci trenja/trošenja.....	19
Slika 8. Struktura rukavca nakon obrade [32].....	20
Slika 9. Vrste trenja.....	21
Slika 10. Granične vrste trenja .....	22
Slika 11. Dodir površina elemenata .....	23
Slika 12. Uspostava dodira elemenata.....	23
Slika 13. Uzroci dinamičkog trenja.....	24
Slika 14. Pojave koje prate dinamičko trenje [58] .....	25
Slika 15. Trošenje kompozita u ovisnosti o usmjerenosti vlakana [44].....	28
Slika 16. Trošenje polimernih kompozita sa staklenim i ugljičnim vlaknima [48] .....	29
Slika 17. Način pletenja tkanine [44] .....	30
Slika 18. Orijehtacija kompozita laminiranog staklenim vlaknima na kliznu plohu [44].....	30
Slika 19. Tipovi tkanja tkanine [44].....	31
Slika 20. Oštećenje rukavca uslijed pojave zavarivanja trenjem [29].....	33
Slika 21. Struktura amorfnih elastoplastomera [25].....	36
Slika 22. Elastomerni klizni ležaj.....	37
Slika 23. Strukture plastomera [25].....	38
Slika 24. Vste polimera [125] .....	39
Slika 25. Termomehanička krivulja [25].....	41
Slika 26. Stvaranje transfer filma krutog maziva na protutijelu .....	43
Slika 27. Elastomerni O-Ring sa slojem PTFE-a .....	44
Slika 28. Slojevi prevlake.....	45
Slika 29. Stvaranje topline u sustavu klizni ležaj/rukavac .....	47
Slika 30. Površinski tlak na klizni ležaj .....	50
Slika 31. a) Oštećenje sinterirane bronce, b) oštećenje polimera sa staklenim vlaknima,.....	51
Slika 32. Distribucija površinskog tlaka pri maloj površini dodira između rukavca i ležaja.....	52
Slika 33. Distribucija površinskog tlaka pri velikoj površini dodira između rukavca i ležaja.....	52
Slika 34. Obuhvatni kut dodira kliznog ležaja i rukavca .....	54
Slika 35. Linearni stupanj trošenja ovisan o putu $W_{1,s}$ ( $W_{1,s1} > W_{1,s2} > W_{1,s3} > W_{1,s4}$ ) .....	55
Slika 36. Linearni stupanj trošenja ovisan o vremenu $W_{1,t}$ ( $W_{1,t1} > W_{1,t2} > W_{1,t3} > W_{1,t4}$ ) .....	55
Slika 37. p-v dijagram .....	57
Slika 38. Timken ispitni uređaj Lab za elemente strojeva, FSB .....	58
Slika 39. Plint ispitni uređaj za klizne ležajeve tvrtke TSS [13].....	58
Slika 40. Timken ispitni uređaj .....	59
Slika 41. Shematski prikaz Timken ispitnog uređaja.....	61
Slika 42. Beskontaktni uređaj za mjerenje temperature u dodiru .....	63
Slika 43. Dodirni tlak na ležajni materijal.....	65



## Popis slika

Slika 44. Dimenzije ispitnog uzorka .....	74
Slika 45. Mehanička svojstva duromernog kompozita, ortotropne strukture [90].....	75
Slika 46. Struktura čelika otpornog na koroziju AISI 316.....	77
Slika 47. Pritisna pločica a) ravnomjeran dodir i b) neravnomjeran dodir [73].....	81
Slika 48. Ravnomjeran dodir ispitnog uzorka i pritisne pločice .....	81
Slika 49. Neravnomjeran dodir ispitnog uzorka i pritisne pločice .....	82
Slika 50. Dijagram trenja i temperature za ispitnu grupu C pri opterećenju od 80 N s dodatkom PTFE maziva .....	85
Slika 51. Dijagram trenja i temperature za ispitnu grupu D pri opterećenju od 80 N.....	85
Slika 52. Dijagram trenja i temperature za ispitnu grupu E pri opterećenju od 60 N.....	86
Slika 53. Dijagram trenja i temperature za ispitnu grupu H pri opterećenju od 60 N s dodatkom PTFE maziva .....	86
Slika 54. Dijagram trenja i temperature za ispitnu grupu A pri opterećenju od 135 N s dodatkom PTFE maziva .....	87
Slika 55. Dijagram trenja i temperature za ispitnu grupu G pri opterećenju od 80 N s dodatkom PTFE maziva .....	87
Slika 56. Uređaj za ispitivanje kliznih ležajeva .....	91
Slika 57. Presjek uređaja za ispitivanje kliznog ležaja.....	91
Slika 58. Programsko sučelje Catman za prikupljanje i obradu podataka .....	93
Slika 59. Djelovanje opterećenja na klizni ležaj i vektori sila .....	94
Slika 60. Ispitni uređaj za klizne ležajeve .....	95
Slika 61. Linearno trošenje i vektori sila kliznog ležaja/rukavca .....	96
Slika 62. Promjena izmjerenog linearnog trošenja u slučaju promjene kuta trenja .....	97
Slika 63. Teoretska površina dodira kliznog ležaja/rukavca.....	100
Slika 64. Realna površina dodira kliznog ležaja/rukavca .....	100
Slika 65. Termometar tip K.....	101
Slika 66. Beskontaktno mjerilo temperature .....	101
Slika 67. Beskontaktno mjerenje temperature rukavca.....	102
Slika 68. Zračnost kliznog ležaja, prije i poslije ugradnje te u toku rada .....	105
Slika 69. Termodinamički model klizni ležaj / rukavac.....	107
Slika 70. Eksperimentalno određivanje faktora trenja duromernog kompozita u kontaktu s čeličnom podlogom [103] .....	108
Slika 71. Djelovanje toplinskog toka na vlakno kompozitnog materijala.....	109
Slika 72. Paralelno i okomito djelovanje toplinskog toka na matricu i ojačalo kompozita .....	109
Slika 73. Elastična linearna deformacija u ovisnosti o opterećenju [125] .....	114
Slika 74. Obuhvatni kut između kliznog ležaja i rukavca.....	115
Slika 75. Ravnojeran i neravnomjeran dodir između kliznog ležaja s dodatkom maziva i rukavca	120
Slika 76. Neravnomjeran dodir između kliznog ležaja bez maziva i rukavca .....	120
Slika 77. Vrlo malo oštećenje rukavca uslijed neravnomjernog dodira kliznog ležaja bez dodatka maziva .....	121
Slika 78. Dijagrami A/B/C .....	128
Slika 79. Dijagrami D/E/F.....	128
Slika 80. Dijagram G/H/I .....	129
Slika 81. Dijagram J/K/L .....	129
Slika 82. Dijagrami M/N/O .....	130

## Popis slika

Slika 83. Dijagrami P/Q/S.....	130
Slika 84. Dijagrami T/U/Z .....	131
Slika 85. Dijagram V/X4.....	131
Slika 86. Ovisnost faktora trenja (bez dodatka maziva) o zračnosti .....	133
Slika 87. Ovisnost faktora trenja (s dodatkom PTFE maziva) o zračnosti .....	134
Slika 88. Faktor trenja (bez maziva) o ovisnosti o obuhvatnom kutu.....	136
Slika 89. Faktor trenja ( s dodatkom maziva) u ovisnosti o obuhvatnom kutu.....	137
Slika 90. Mikroskopski prikaz duromernog kompozitnog ležaja nakon pokusa .....	137
Slika 91. Shema proračuna kliznog ležaja .....	144

# Popis tablica

---

Tablica 1. Temperatura staklišta i temperatura taljenja kristalita .....	41
Tablica 2. Svojstva krutih maziva .....	45
Tablica 3. Mjerni sustav Timken ispitnog uređaja .....	61
Tablica 4. Radni parametri ispitivanja .....	64
Tablica 5. Kontaktni pritisci između duromernog kompozita NORDEN 605 Marine i AISI 316 ....	65
Tablica 6. Usporedba mehaničkih svojstva duromernih kompozita .....	67
Tablica 7. Kemijski sastav čelika otpornog na koroziju AISI 316.....	77
Tablica 8. Mehanička svojstva čelika otpornog na koroziju AISI316 pri 20 °C .....	77
Tablica 9. Izmjerene vrijednosti površinske hrapavosti.....	78
Tablica 10. Faktorski plan za Timken ispitni uređaj.....	80
Tablica 11. Rezultati ispitivanja prije i poslije pokusa na Timken ispitnom uređaju .....	83
Tablica 12. Rezultati ispitivanja dobiveni u tijeku pokusa na Timken ispitnom uređaju .....	84
Tablica 13. Mjerni sustav ispitnog uređaja za klizne ležajeve .....	92
Tablica 14. Uređaji za mjerenje prije i poslije ispitivanja.....	93
Tablica 15. Faktorski plan pokusa.....	119
Tablica 16. Rezultati mjerenja na uređaju za ispitivanje kliznih ležajeva .....	122
Tablica 17. Statistička obrada podataka .....	126
Tablica 18. Jednadžbe za izračun faktora trenja u ovisnosti o zračnosti.....	136
Tablica 19. Ovisnost faktora trenja o utjecajnim faktorima.....	139
Tablica 20. Ovisnost temperature kućišta o utjecajnim faktorima.....	140
Tablica 21. Ovisnost temperature rukavca o utjecajnim faktorima .....	140

# Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
$A$	$m^2$	površina
$a$	mm	duljina dodira (Herzov tlak)
$a_{el}$	mm	elastična linearna deformacija ležaja
$A_S$	$mm^2$	stvarna površina dodira
$A_V$	$mm^2$	idealna površina dodira
$B$	mm	širina ležaja
$C_{12}$	$W/(m^2 K^4)$	konstanta zračenja kombinacije tijela pri prijenosu topline zračenjem
$d$	mm	promjer rukavca
$D$	mm	unutarnji promjer ležaja
$DK$	mm	unutarnji promjer kod termodinamičkog proračuna
$DK_k$	mm	unutarnji promjer kućišta pri konvektivnom prijelazu topline
$DK_v$	mm	vanjski promjer kućišta ležaja
$DK_{v,k}$	mm	vanjski promjer kućišta pri konvektivnom prijelazu topline
$d_p$	mm	početni promjer rukavca
$d_v$	mm	vanjski promjer rukavca
$D_v$	mm	vanjski promjer ležaja
$D_{w,ko}$	mm	unutarnji korigirani promjer kliznog ležaja
$E_e$	MPa	modul elastičnosti materijala u kontaktu
$E_k$	MPa	modul elastičnosti kompozita
$F_g$	N	sila utega
$F_L$	N	sila opterećenja ležaja
$F_N$	N	normalna sila
$F_T$	N	sila trenja
$F_v$	N	vučna sila
$G$	GPa	modul smičnosti
$h$	mm	debljina potrošenog sloja materijala
$h_{max}$	mm	maksimalna debljina sloja materijala
$i$	-	broj izvršenih mjerenja
$I$	A	jakost struje
$k$	$W/(m^2 K)$	koeficijent prolaza topline
$k'$	$m^3/Nm$	specifični stupanj trošenja
$L$	h	radni vijek kliznog ležaja
$L_B$	mm	širina
$M_T$	N mm	moment
$p$	Pa	tlak
$P$	W	snaga
$P$	-	signifikantnost

$p_{c,max}$	MPa	kosinusni oblik raspodjele opterećenja maksimalnog površinskog tlaka
$p_{H,max}$	MPa	maksimalni površinski tlak (Hertz)
$P_r$	W	snaga potrebna za savladavanje trenja
$P_r$	-	izračunata signifikantnost
$p_{s,max}$	MPa	sinusni oblik raspodjele opterećenja maksimalnog površinskog tlaka
$p_{vs,max}$	MPa	pojednostavljeni površinski tlak prema sinusnom obliku raspodjele tlaka
$r$	mm	polumjer rukavca
$R$	$\Omega$	električni otpor
$R_a$	$\mu\text{m}$	srednje aritmetičko odstupanje profila – mjera hrapavosti površine
$R_k$	K/W	toplinski otpor
$S$	mm	zračnost kliznog ležaja
$s$	mm	prijeđeni put
$S_0$	mm	pogonska zračnost
$S_O$	mm	zračnost pri radu bez maziva
$S_{oB}$	mm	promjena zračnosti prouzročena izradom
$S_{O,pk}$	mm	minimalna zračnost između kliznog ležaja i rukavca
$S_E$	mm	zračnost ležaja nakon ugradnja
$S_F$	mm	zračnost ležaja prije ugradnje
$S_W$	mm	smanjenje promjera ležaja nastalo povećanjem radne temperature
$S_Q$	mm	zračnost zbog bubrenja materijala
$t$	s	vrijeme
$t_{ds}$	mm	debljina stijenke
$T$	N mm	okretni moment
$T_1$	K	apsolutna temperatura prve stijenke
$T_2$	K	apsolutna temperatura druge stijenke
$T_f$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura tališta kristalnog dijela strukture (tecište)
$T_F$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura u dodiru ispitnih uzoraka
$T_g$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura staklastog prijelaza (staklište)
$T_K$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura kućišta
$T_{LEŽAJ}$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura kliznog ležaja
$T_m$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura taljenja kristalita
$T_O$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura okoline
$T_W$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura rukavca
$U$	V	napon
$v$	m/s	brzina
$V_f$	-	volumni udio vlakana
$v_r$	m/s	obodna brzina
$W$	mm	širina dodira između rukavca i kliznog ležaja
$W$	J	rad

## Popis oznaka

$W_i$	mm	površina trošenja
$W_l$	$\mu\text{m}$	linearno trošenje
$W_{l,s}$	$\mu\text{m}/\text{km}$	stupanj linearnog trošenja
$W_{l,t}$	$\mu\text{m}/\text{h}$	stupanj linearnog trošenja u ovisnosti o vremenu
$W_{l,v}$	mm	vertikalno linearno trošenje
$W_m$	g	gubitak mase kliznog ležaja
$W_v$	$\text{mm}^3$	volumen trošenja
$Q$	J	toplina
$\dot{Q}$	W	oslobođen toplinski tok
$\dot{Q}_k$	W	toplinski tok oslobođen konvekcijom
$\dot{Q}_{\text{LEŽAJ}}$	W	toplinski tok ležaja
$\dot{Q}_p$	W	toplinski tok oslobođen provođenjem (kondukcijom)
$\dot{Q}_{\text{RUKAVAC}}$	W	toplinski tok rukavca
$\dot{Q}_z$	W	toplinski tok oslobođen zračenjem
$\dot{Q}_{\text{uk}}$	W	ukupno oslobođen toplinski tok
$\alpha$	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$	koeficijent prijelaza topline
$\alpha_a$	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$	koeficijent prijelaza topline prve stijenke
$\alpha_b$	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$	koeficijent prijelaza topline druge stijenke
$\alpha_{\text{zrak}}$	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$	koeficijent prijelaza topline zraka
$2\beta$	$^\circ$	obuhvatni kut <i>klizni ležaj/rukavac</i> (realni dodir)
$\gamma$	$^\circ$	obuhvatni kut <i>klizni ležaj/rukavac</i>
$\delta$	mm	debljina stijenke
$\Delta S_E$	mm	smanjenje zračnosti zbog tlačnog uprešavanja ležaja u kućište
$\Delta S_Q$	mm	promjena zračnosti zbog bubrenja ležajnog materijala
$\Delta S_W$	mm	toplinsko širenje ležajnog materijala
$\Delta T$	K	razlika temperatura stijenki
$\varepsilon_f$	-	deformacija nastala zbog kristalnog prijelaza
$\varepsilon_g$	-	deformacija nastala zbog staklastog prijelaza
$\vartheta_1$	$^\circ\text{C}$	(Celzijeva) temperatura prve stijenke
$\vartheta_2$	$^\circ\text{C}$	(Celzijeva) temperatura druge stijenke
$\lambda$	$\text{W}/(\text{m K})$	toplinska provodnost
$\lambda_l$	$\text{W}/(\text{m K})$	paralelni koeficijent provodnosti topline
$\lambda_f$	$\text{W}/(\text{m K})$	koeficijent provodnosti topline matrice
$\lambda_{\text{okomito}}$	$\text{W}/(\text{m K})$	okomit koeficijent provodnosti topline
$\lambda_r$	$\text{W}/(\text{m K})$	koeficijent provodnosti topline epoksidnog ojačala
$\mu$	-	faktor trenja
$\mu_{\text{din}}$	-	dinamički faktor trenja
$\mu_{\text{nom}}$	-	nominalni faktor trenja
$\nu$	-	Poissonov faktor
$\rho$	$\text{kg}/\text{m}^3$	gustoća
$\rho_{1,2}$	rad	kut trenja
$\sigma_n$	MPa	naprezanje

## Popis oznaka

---

$\tau_a$	MPa	smično naprezanje izazvano djelovanjem adhezije
$\Psi$	-	relativna zračnost
$\Psi_E$	-	potrebna teoretska relativna zračnost
$\Psi_F$	-	relativna ugradbena zračnost
$\Psi_W$	-	relativna zračnost kliznog ležaja pri radu
$\omega_r$	rad/s	kutna brzina

Kratica	Opis
AGMA	Udruženje američkih proizvođača zupčanika ( <i>American Gear Manufacturers Association</i> )
ASTM	Američko društvo za ispitivanje i materijale ( <i>American Society for Testing and Materials</i> )
BS	Britanske norme ( <i>British standard</i> )
C	Ugljik
CCD	Centralno kompozitni pokus ( <i>Central composite design</i> )
CCF	Plošno kompozitni pokus ( <i>Face Centered composite design</i> )
DIN	Njemački institut za norme ( <i>German Institute for Standardization</i> )
EP	Epoksid
H	Vodik
HRN	Hrvatske norme
ISO	Međunarodna organizacija za normizaciju ( <i>International Organization for Standardization</i> )
KKL	Kompozitni klizni ležaj
MoS <sub>2</sub>	Molibden disulfid ( <i>Molybdenum disulfide</i> )
PA	Poliamid
PA 46	Poliamid na osnovi politetrametilenadipinske kiseline
PA 6	Poliamid na osnovi kaprolaktama
PA 66	Poliamid na osnovi heksametilendiaminadipinske kiseline
PA GF	Poliamid ojačan staklenim česticama ili vlaknima
PC	Polikarbonat
PEEK	Poli eter-eter-keton
PET	Poli(etilen-tereftalat)
PEST	Poliester
PE-UHMW	Polietilen vrlo visoke molekularne mase
PI	Poliimid
POM	Poli(oksi-metilen)
PTFE	Poli(tetrafluretilen)
SS	Suma kvadrata
SD	Standardna devijacija
TE	Elastoplastomer
VDI	Udruga njemačkih inženjera ( <i>Association of German Engineers</i> )



Neprestanim razvojem novih proizvoda sve bolje efikasnosti sa svrhom postizanja što veće radne učinkovitosti, proizvođači kompozitnih materijala suočeni su sa smanjivanjem troškova proizvodnje kako bi postigli konkurentnost na tržištu, uz istodobno osiguranje istih ili boljih svojstava. Klizni ležajevi ovisno o aplikaciji, moraju osigurati položaj rukavca u nekom položaju ovisno o brzini vrtnje i opterećenju na ležaj, uz što manju masu te što kompaktniju izvedbu.

Masovnom proizvodnjom kliznih ležajeva za automobilsku, prehrambenu te industriju kućanskih aparata, javlja se potreba za brzom i jeftinom proizvodnjom te oblikom jednostavne geometrije kako bi njihova ugradnja bila što jednostavnija.

U tu svrhu razvijeni su kompozitni materijali prilagođeni brzom i povoljnoj proizvodnji gotovih proizvoda, što je jedan od ključnih razloga sve veće primjene kompozitnih materijala.

Vrlo velik broj kompozitnih materijala otvara proizvođačima kliznih ležajeva nove mogućnosti njihove primjene.

Kompozitni klizni ležajevi u odnosu na metalne ležajeve posjeduju odgovarajuće prednosti i nedostatke.

Prednosti kompozitnih ležajeva su sljedeće: posjeduju i do osamdeset puta veću elastičnost ovisno o tipu kompozita u usporedbi s brončanim kliznim ležajevima. Veća elastičnost kompozita dovodi do smanjenja mogućih rubnih oštećenja kliznog ležaja, ukoliko dođe do prekomjernog savijanja rukavca.

Kompozitni materijali lako se obrađuju, bilo da se radi o komadnoj maloserijskoj proizvodnji ili velikoserijskoj proizvodnji te ovisno o tipu kompozita pa nije potrebna dodatna dorada proizvoda što značajno utječe na brzinu izrade.

Kemijska otpornost kompozita je na zavidnoj razini, velika većina takvih materijala korozijski je postojana na slanu vodu te kiseline i lužine, no radi sigurnosti uvijek je prije upotrebe nekog materijala poželjno ispitati njegovu kemijsku kompatibilnost s radnim medijem.

Jedan od nedostataka kompozitnih materijala je njegovo izolatorsko svojstvo tako da pri povećanim brzinama rukavca, ukoliko dođe do zagrijavanja kontaktne površine, potrebno je hlađenje ležaja vodom, slanom vodom, uljem, emulzijom ili nekim drugim rashladnim medijem. Klizanjem rukavca po kliznom ležaju tijekom rada, specifični kontaktni tlak ciklički djeluje na ležajni materijal što dovodi nakon nekog vremena do promjene tribološko-mehaničkih svojstava ležajnog materijala. Prilikom cikličkog djelovanja na ležajni materijal dolazi do njegovog zamora.

Istraživanja su pokazala da zamor materijala nije jednak za sve kompozitne materijale [1].

Promjena radnih uvjeta značajno utječe na mehanizam trošenja kompozitnih materijala i od iznimne je važnosti proširiti znanja o primjeni kompozitnih ležajeva u praksi.

### **1.1 Motivacija za istraživanje**

Kompozitni materijali pronalaze sve veću primjenu kao konstrukcijski dijelovi u suvremenim tehničkim sustavima. Razvojem kompozitnih materijala raste i proizvodna efikasnost što dovodi do veće mogućnosti primjene kliznih ležajeva u maloserijskoj i velikoserijskoj proizvodnji. U usporedbi s metalnim kliznim ležajevima dolazi do raznih nepoznanica u projektiranju geometrije ležaja. Dodatni nedostatak predstavlja veliki asortiman različitih kompozitnih materijala koji zbog svojih mehaničko - triboloških svojstava mogu biti više ili manje pogodni za neku aplikaciju u funkciji kliznog ležaja. Iskustveni podaci vezani za tribološka i ostala svojstva nekog kompozitnog ležajnog materijala slabo su dostupni što otvara mnoga neriješena pitanja vezano za pravilno projektiranje kliznog ležaja od kompozitnih materijala.

Kompozitni materijali koji se najčešće primjenjuju za izradu kliznih ležajeva su polimerni i duromerni kompoziti. Polimerni kompoziti pogodniji su za velikoserijsku proizvodnju stoga što se dijelovi mogu proizvoditi postupkom injekcijskog prešanja. Jedini je nedostatak da je ova tehnologija više primjenjiva za dimenzijski manje oblike kao što su razni klizni ležajevi za automobilsku industriju. Duromerni kompoziti više su prilagođeni za dijelove većih gabaritnih mjera kao što su krila aviona, ležajevi za brodska vratila i općenito za razne konstrukcijske dijelove u brodogradnji itd.

Smjernice koje se koriste za konstruiranje kliznih ležajeva od kompozitnih materijala su uglavnom VDI (Udruga njemačkih inženjera) smjernice, no većina njih je starijeg datuma kao na primjer VDI 2541 koja govori o kliznim ležajevima od polimernih materijala iz 1973.

godine, zatim VDI 2543 u kojoj je objašnjena primjena plastomernih materijala u funkciji kliznog ležaja iz 1977. godine. Novije smjernice pojavile su tek 2006. godine, a to je VDI 2014 koja govori o primjeni kompozitnih materijala u konstruiranju konstrukcijskih dijelova.

Kompozitni materijali posjeduju ista ili bolja mehanička svojstva u odnosu na ležajne materijale na bazi metala kao što je bronca ili bijela kovina u određenim radnim uvjetima koji odgovaraju za kompozite. Mehanička svojstva kompozita značajno ovise o radnoj temperaturi pri povišenim temperaturama od 90 °C do 140 °C za razliku od brončanih ležajeva kod kojih ovaj temperaturni opseg nema značajnog utjecaja na mehanička svojstva. Utjecaj okoline u kojoj se nalazi neki radni stroj u koji je ugrađen klizni ležaj može biti od značaja na rad ležaja. Primjerice ako je stroj izložen vanjskim okolišnim uvjetima npr. zimi, kada temperatura može pasti i na - 50 °C u nekim dijelovima svijeta. Niska temperatura može utjecati na mehanička svojstva kompozita tako da materijal postaje krhak što pri opterećenju rukavca na ležaj može dovesti do oštećenja ležajnog materijala. Pri povišenim temperaturama dolazi do omekšavanja materijala što dovodi do promjene geometrije kliznog ležaja. Najčešća korekcija kojom se može riješiti problem oštećenja ležaja je pravilan odabir, tolerancija, tj. dosjeda između rukavca i ležaja. Različiti kompoziti također posjeduju i različitu strukturu, istraživanja pokazuju da pri niskim ili povišenim radnim temperaturama dolazi do promjena u strukturi materijala koji mogu pridonijeti pozitivno ili negativno na radni vijek kliznog ležaja. Postojeće norme za proračun kliznih ležajeva [2] [3] od kompozitnih materijala nedovoljno opisuju ulogu odabira određene zračnosti između ležaja i rukavca u ovisnosti o brzini vrtnje i opterećenju na ležaj. Istraživanja su pokazala da prilikom stvaranja prekomjerne temperature u dodiru ležaja i rukavca, dolazi do širenja kompozitnog materijala koji, ako se nalazi uprešan u neko kućište, zbog svoje nemogućnosti širenja prema van dolazi do smanjenja unutarnjeg promjera ležaja što dovodi do zaribavanja ležaja zbog prevelikog kontaktnog tlaka.

Nedostatak znanja o pravilnom određivanju tolerancija kompozitnog kliznog ležaja koji je nedovoljno pokriven normama, jedan je od nedostataka koji proizvođačima kliznih ležajeva otežava proizvodnju ležajeva veće kvalitete.

## 1.2 Pregled dosadašnjih istraživanja

Razvojem kompozitnih materijala s vrlo dobrim mehaničkim i tribološkim svojstvima postupno raste i njihova primjena u industriji [1], [2], [3]. Kompozitni ležajni materijali pronalaze sve veću primjenu u strojevima, kod kojih se javlja potreba za materijalima dugog životnog vijeka [4], [5], [6].

Današnje konstrukcije i strojevi zahtijevaju sve kvalitetnije materijale, koji mogu izdržati teške radne uvjete bez potrebe za učestalim održavanjem [7], [8].

Kompozitni se materijali, uz dodatak raznih primjesa, mogu koristiti za izradu kliznih ležajeva bez podmazivanja što zbog uklanjanja složenih sustava za podmazivanje značajno pojednostavljuje konstrukciju strojarских sustava [9], [10], [11].

Klizni ležajevi izrađeni od kompozitnih materijala ekološki su prihvatljiviji zbog izostanka podmazivanja, koje u slučaju oštećenja kućišta ležaja može kontaminirati okolinu [12]. Primjer upotrebe kompozitnih kliznih ležajeva je prehrambena industrija zbog smanjenja mogućnosti kontaminacije prehrambenih proizvoda.

Kompozitni ležajni materijali mogu se lako obrađivati metodom odvajanja čestica što olakšava njihovu primjenu kada se radi o pojedinačnoj ili maloserijskoj proizvodnji [13], [14].

Postoje i neka ograničenja vezana za kompozitne materijale, kao što je svojstvo toplinske izolacije. Klizni ležaj uslijed klizanja / kotrljanja vratila ili osovine stvara trenje, što dovodi do generiranja topline, koja se većinom mora odvesti s ležaja prisilnim hlađenjem [15], [16], [17]. Iz tog razloga kod kompozitnih kliznih ležajeva potrebno je ponekad primijeniti dodatno hlađenje fluidom.

Kompozitni ležajni materijali predmet su istraživanja brojnih znanstvenika te ih je većina u početku bila usmjerena na usporedbu ležajnih materijala na osnovi kompozita, s ležajnim materijalima na osnovi metala.

Proračun dopuštenog opterećenja i predviđenog radnog vijeka kompozitnih kliznih ležajeva provodi se prema normama DIN 31652-1/2/3, DIN 31696, DIN31656, DIN31692-1/2/3/4/5 za klizne ležajeve na osnovi metala, uz određene korekcije vezane za materijal [18]. Iz teorijskih i empirijskih istraživanja proizlaze modificirani postupci proračuna i konstrukcijskog oblikovanja kompozitnih ležajnih materijala [19], [20], [21]. Brzim razvojem kompozitnih materijala omogućeno je usavršavanje njihovih mehaničkih i triboloških svojstva što doprinosi njihovoj većoj primjeni u strojarским sustavima. Usporedno s time razvijaju se i sve učinkovitiji i ekonomičniji načini proizvodnje kompozita što utječe na nižu cijenu gotovog proizvoda, bolju kvalitetu materijala te njegovu lakšu dobavlјivost [22], [23].

Kompoziti koji se najčešće primjenjuju kao ležajni materijali su plastomerni i duromerni (matrica epoksidne smole) kompoziti [13], [24].

Duromerni kompozit posjeduje ojačalo npr. u obliku poliesterskih vlakana ili mrežice što poboljšava njegova mehanička i tribološka svojstva [25]. Matrica na osnovi epoksidne smole posjeduje vrlo dobru postojanost utjecaja agresivnih medija i vode, zbog čega se često primjenjuje u brodogradnji. Ležajni materijali na osnovi duromernih kompozita uz dodatak PTFE-a i MoS<sub>2</sub> (molibden disulfid) mogu raditi na suho bez podmazivanja zbog čega nema potrebe za kompleksnim sustavima podmazivanja i hlađenja ležaja [25], [26].

Kod rekonstrukcije strojeva s ugrađenim kliznim ležajevima od bronce, grafita, gume itd. potrebno je izvršiti konstrukcijske preinake na stroju ukoliko kućišta ležajnih mjesta nisu predviđena za kompozitne ležajeve. Za provođenje konstrukcijskih promjena ovog tipa postoji mali broj preporuka i normi. Kod preinake strojeva kompozitne klizne ležajeve mora se prilagoditi postojećim mjerama i tolerancijama kućišta ležaja. Za prilagođavanje tolerancija i dosjeda kompozitnih ležajnih materijala na postojeće dimenzije kućišta ne postoje jasne norme ili preporuke proizvođača ležajnih materijala.

Kao predmet eksperimentalnog istraživanja ispitat će se ovisnost dopuštene vrijednosti maksimalne brzine i opterećenja o temperaturi medija.

Udio raznih lužina ili kiselina utječe na strukturu kompozitnog materijala tj. može doći do razdvajanja matrice od ojačala. Kemijska postojanost kompozitnog materijala ovisi o svojstvima matrice i ojačala tj. o njihovoj postojanosti utjecaju kemijskih tvari te o uvjetima djelovanja medija (prvenstveno temperature i mehaničkog opterećenja). Matrica kompozita mora biti dovoljno kruta, ali i postojana na propagaciju pukotine. Adhezija između vlakana i matrice mora biti dovoljno velika kako prilikom opterećenja ne bi došlo do odvajanja.

Duromerni kompozitni materijali primjenjuju se u radu s različitim medijima. Prije korištenja kompozita u određenom radnom mediju, potrebno je provjeriti njihovu kemijsku kompatibilnost prema preporukama proizvođača. Kod radnog medija koji je kemijski kompatibilan s duromernim kompozitom može doći do promjene njegovih kemijskih svojstava uslijed djelovanja temperature, vremena te nekih drugih radnih uvjeta, uzrokujući oštećenje kompozita [11], [27].

Kalkulacija predviđenog radnog vijeka kompozitnih ležajnih materijala vrlo je složena te ovisi o velikom broju faktora [16]. Manji faktor trenja doprinosi većoj otpornosti na „stick-slip“ efekt te daje bolja anti-adhezivna svojstva.

### **1.3 Hipoteza**

Sve niži troškovi proizvodnje kompozitnih materijala uz kontinuirani razvoj novih kompozitnih materijala daju posebnu važnost pravilnom odabiru tolerancija i dosjeda između kliznog ležaja i rukavca. Već nakon relativno kratkog razdoblja upotrebe kompozitnih ležajnih materijala može doći do nerazjašnjenih pojava koje se javljaju tijekom rada kliznog ležaja. Postojeće norme ne obuhvaćaju u potpunosti sve karakteristike kompozitnih ležajnih materijala te je potrebno provesti istraživanja sa ciljem upotpunjavanja i ispravljanja postojećih normi. Na životni vijek kompozitnog ležaja mogu utjecati razni faktori poput tehnologije obrade ležaja, pojava vibracija, rad pri povišenoj temperaturi ili pak rad s fluidom promijenjenog kemijskog sastava.

Pretpostavka je da je moguće odrediti na koji način promjena dimenzija kompozitnog kliznog ležaja uzrokovana izradom, promjenom radne temperature ili medija utječe na ukupni životni vijek kliznog ležaja.

Hipoteza rada sastoji se u tome da je uz pravilan odabir dosjeda između rukavca i ležaja te pravilnim izborom konstrukcije ležaja s obzirom na uvjete eksploatacije, moguće je znatno produžiti životni vijek kliznog ležaja te definirati zakonitosti utjecajnih parametara na opteretivost kliznog ležaja od duromernog kompozita.

### **1.4 Očekivani znanstveni doprinos**

Testiranje na uređajima za ispitivanje kompozitnih kliznih ležajeva može se očekivati doprinos u boljem razumijevanju procesa trošenja i nastalih oštećenja tijekom životnog vijeka ležaja. Time bi se omogućilo dobivanje iskustvenih vrijednosti, važnih za točnije dimenzioniranje kompozitnih ležajeva te smanjiti potrebu za skupim i dugotrajnim ispitivanjima uz dopunu postojeće literature vezano za izbor tolerancija prema radnim uvjetima kliznog ležaja.

Ovaj rad će dati doprinos u postavljanju zakonitosti vezanih za izbor tolerancija prema radnim uvjetima kliznog ležaja.

Analizom podataka te optimizacijom podataka prikupljenih tijekom eksperimentalnog dijela istraživanja, definirat će se životni vijek prema trošenju materijala kliznog ležaja.

Istražit će se kako promjena geometrijskih karakteristika kliznog ležaja utječe na ostvareni životni vijek do pojave određenih oštećenja.

Pokušat će se definirati kriterij životnog vijeka kompozitnog kliznog ležaja u ovisnosti o opterećenju na klizni ležaj sa i bez podmazivanja krutim mazivom pri radu te će se pokušati odrediti kako se izlazne mjerne veličine ispitnih postavki mijenjaju tijekom pojave određenih oštećenja.

Polimerni kompozitni materijali vrlo su široka skupina materijala te sadrže više vrsta pogodnih materijala za izradu kliznih ležajeva koji se prema svojoj strukturi značajno razlikuju. Ostaje za potvrditi budućim istraživanjima kako se trošenje kliznog ležaja mijenja u ovisnosti o stupnju opterećenja i načinu podmazivanja.

### **1.5 Ispitne postavke i metodologija istraživanja**

U ovom istraživanju koristit će se faktorski plan pokusa jer se njime može dobiti dovoljno informacija o promatranom sustavu, učinku pojedinih faktora (varijabli) te stupnju njihove interakcije. Broj faktora i njima pridruženih stanja bit će naknadno definiran.

Tijekom realizacije predložene disertacije u planu je provedba istraživanja koje se može podijeliti u dvije temeljne faze.

Prva faza odnosi se na izradu ispitnih uzoraka koji će biti ispitani na Timken ispitnom uređaju kako bi se odredile maksimalne dopuštene vrijednosti opterećenja u ovisnosti o promjeni radnog medija i temperature.

Timken ispitni uređaj sastoji se od rotirajućeg diska izrađenog od ispitnog materijala, opterećenog s čeličnom epruvetom. Opterećena epruveta preko poluge ostvaraje dodir s rotirajućim diskom. Uređaj je izveden na način da preko mjernog vratila spojenog na elektromotor, uz regulaciju brzine vrtnje, osigurava rotacija diska te mjerenje momenta trenja. Preko sustava poluga provodi se opterećivanje rotirajućeg diska pomoću pločice smještene u kućištu uz mjerenje vertikalne sile koja djeluje na rotirajući disk. Dimenzije diska tj. vanjski promjer je 45 mm i širina 15 mm, a dimenzije ispitnog tijela su 35×35×35 mm.

Oblik epruvete odabran je s ciljem povećavanja površinskog tlaka (dodir u liniji), odnosno dobivanja graničnih vrijednosti kod  $P-v$  (*pressure-velocity*) dijagrama za duromerni kompozit. Povećavanjem dodirne površine smanjuje se površinski tlak, ali ujedno i povećava mogućnost prijelaza temperature sa rotirajućeg diska na ispitno tijelo gdje dolazi do većeg odvođenja

topline preko ispitnog tijela. Pažljivom montažom postiže se približna dodirna linija između rotirajućeg diska i ispitnog tijela.

Za mjerenje temperature sustava koristit će se beskontaktni usmjereni termometar brzog odaziva (2 ms).

Kontinuiranim mjerenjem momenta  $T$  potrebnog za savladavanje otpora gibanja rotirajućeg diska i kontinuirano mjerenje normalne sile  $F_N$  kojom se djeluje na ispitno tijelo i rotirajući disk uz poznati radijus diska moguće je dobiti silu trenja  $F_T$ , dok se dinamički faktor trenja može dobiti poznavanjem normalne sile i sile trenja. Odabrana frekvencija uzrokovanja 60 Hz dovoljna je da osigura odgovarajući broj podataka za izračun dinamičkog faktora trenja i praćenje tendencije promjene faktora u vremenu.

Vrijednosti iznosa sile  $F_N$  te brzine vrtnje  $n$ , birane su na osnovi  $P$ - $v$  dijagrama za ispitni materijal, s ciljem odabira graničnih vrijednosti te vrijednosti iznad kritičnih vrijednosti za duromerni kompozit.

Druga faza odnosi se na ispitivanje kompozitnih kliznih ležajeva u realnim uvjetima rada. Prilikom ispitivanja bit će mjerena temperatura kućišta i rukavca. Razlikom mase kliznog ležaj prije i poslije ispitivanja bit će određen specifični stupanj trošenja.

## 1.6 Struktura disertacije

Disertacija je tematski podijeljena na tri cjeline, raspoređene u šest poglavlja. Prva se cjelina odnosi na hipotezu rada, znanstveni doprinos, ispitne postavke i metodologiju te pregled istraživanja važnih za projektiranje polimernih konstrukcijskih djelova. Druga se cjelina odnosi na istraživanja vezana za vrste kompozitnih ležajnih materijala i problematiku određivanja tolerancija za sustav *kompozitni klizni ležaj/rukavac* te se provodi usporedba prema određivanju tolerancija kod kliznih ležaja na bazi metala, dok se u trećoj cjelini razmatraju dobiveni obrađeni rezultati istraživanja i daje konačan zaključak.

Prvim poglavljem uvodi se u problematiku projektiranja kompozitnih kliznih ležaja, nedostacima u literaturi, kako bi se ukazalo na motivaciju istraživanja autora u tom području. Navedeni su ciljevi i metodologija, hipoteza kao i očekivani doprinos.

U drugom poglavljju ukratko su opisani materijali koji se primjenjuju za izradu kompozitnih kliznih ležaja, te se uvodi u problematiku utjecaja određenih svojstava kompozitnih materijala



na izradu i rad kompozitnih kliznih ležajeva. Opisana su osnovna svojstva duromernih kompozita, mehanizmi oštećenja kompozita, trenje i trošenje u tribološkom sustavu *kompozitni klizni ležaj/rukavac*.

Trećim poglavljem opisano je eksperimentalno ispitno postolje i mjerna oprema. Detaljno je opisan Timken ispitni uređaj, mjerenje temperature i mjerenje faktora trenja kao bi ispitali granice opteretivosti duromernog kompozitnog materijala koji se koristi kao ležajni materijal. U četvrtom poglavlju opisuje se analizu rezultata s Timken ispitnog uređaja, te su određeni kriteriji za određivanje opterećenja, frekvencije vrtnje, dimenzije uzorka prema kojima je napravljen faktorski plan pokusa i provedeno ispitivanje. Nakon provedenih pokusa određene su granice opteretivosti kompozitnog ležajnog materijala, na čiju osnovu su određene vrijednosti opterećenja za ispitivanje kliznih ležaja u realnim radnim uvjetima.

U petom poglavlju opisan je uređaj za ispitivanje trošenja kompozitnog ležajnog materijala, te kriteriji za proračun određivanja faktora trenja, trošenja, temperature dodira, kut dodira i proračun zračnosti između kliznog ležaja i rukavca. Definirani su kriteriji zadovoljavanja radnog vijeka kliznog ležaja. Prikaz rezultata eksperimentalnog istraživanja dan je za sve izlazne veličine, s osvrtom na izdvajanje pojedinih značajki uz međusobnu usporedbu dobivenih rezultata. Opisan je način dobivanja granica opteretivosti kompozitnog ležajnog materijala pri radu bez dovođenja maziva te uz rad s krutim mazivom (PTFE) te su dane zakonitosti za proračun tolerancija kliznog ležaja u ovisnosti o opterećenju.

U zadnjem poglavlju rada izvedeni su zaključci dobiveni temeljem dobivenih rezultata eksperimentalnog istraživanja, te su dane smjernice za buduće moguće proširivanje istraživanja.

Doprinos ove disertacije je u dopuni postojećih normi za proračun kliznih ležajeva od duromernog kompozita bez dovoda maziva.

# Kompozitni materijali u proizvodnji kliznih ležajeva

---

Kompozitni materijali (kompoziti) građeni su od međusobno čvrsto spojenih različitih materijala radi dobivanja novog, drugačijeg materijala, s fizikalnim ili kemijskim svojstvima koja nadmašuju svojstva pojedinačnih komponenata ili sa svojstvima koja te komponente same nemaju. Pritom se ne radi samo o poboljšanju preradbenih, doradnih i uporabnih svojstava (npr. povećanje specifične čvrstoće i specifičnoga modula elastičnosti, lomne žilavosti, toplinske postojanosti, otpornosti prema abraziji i puzanju), nego i transportnih, skladišnih, otpadnih, uključujući konačno i cijenu. Većina kompozita sadrži jedan materijal kao kontinuiranu fazu (matricu), a u nju su uklopljeni odvojeni dijelovi druge faze, koja najčešće ima funkciju ojačala. Razlikuju se kompoziti ojačani vlaknima, kompoziti ojačani česticama, strukturni kompoziti i stanična kruta tijela.

Kompoziti ojačani vlaknima sadrže mekaniju, duktilnu matricu u koju su ugrađena čvrsta, kruta i krhka vlakna. Djelotvornost ojačanja najveća je upravo u tim kompozitima. Opterećenja se s matrice prenose na vlakna, pa su ona osnovni nosioci opterećenja. Matrica je obično polimerna, metalna ili keramička, a može biti i ugljična. Najčešća je polimerna matrica od nezasićenih poliestera i vinilnih estera, za zahtjevnije primjene i od epoksidnih smola, a ojačava se staklenim (za gradnju trupa plovila), aramidnim (zaštitni neprobojni materijali) ili ugljičnim vlaknima (šport. rekviziti); kompozit s polimernom matricom ojačan staklenim vlaknima ima u smjeru vlakana vlačnu čvrstoću približno jednaku čeliku, ali je od njega 14 puta lakši. Metalna matrica sastoji se od slitina aluminijske, magnezije, titana ili bakra ojačanih vlaknima ugljika, bora, aluminijske ili silicijeva karbida; kompozit s aluminijskom matricom ojačanom ugljičnim vlaknima rabi se npr. za izradbu dijelova motora, zrakoplova i svemirskih letjelica (raketoplan). Keramička matrica ojačava se keramičkim vlaknima od silicijeva karbida ili nitrida; kompozit se rabi za rezne alate jer je vrlo otporan prema širenju napuklina. Ugljična matrica ojačava se ugljičnim vlaknima; materijal je velike čvrstoće i na visokim temperaturama i nalazi primjenu u raketnim motorima te toplinskim turbinama. Hibridnim kompozitima nazivaju se oni kojima se jedinstvena matrica ojačava s više vrsta vlakana.

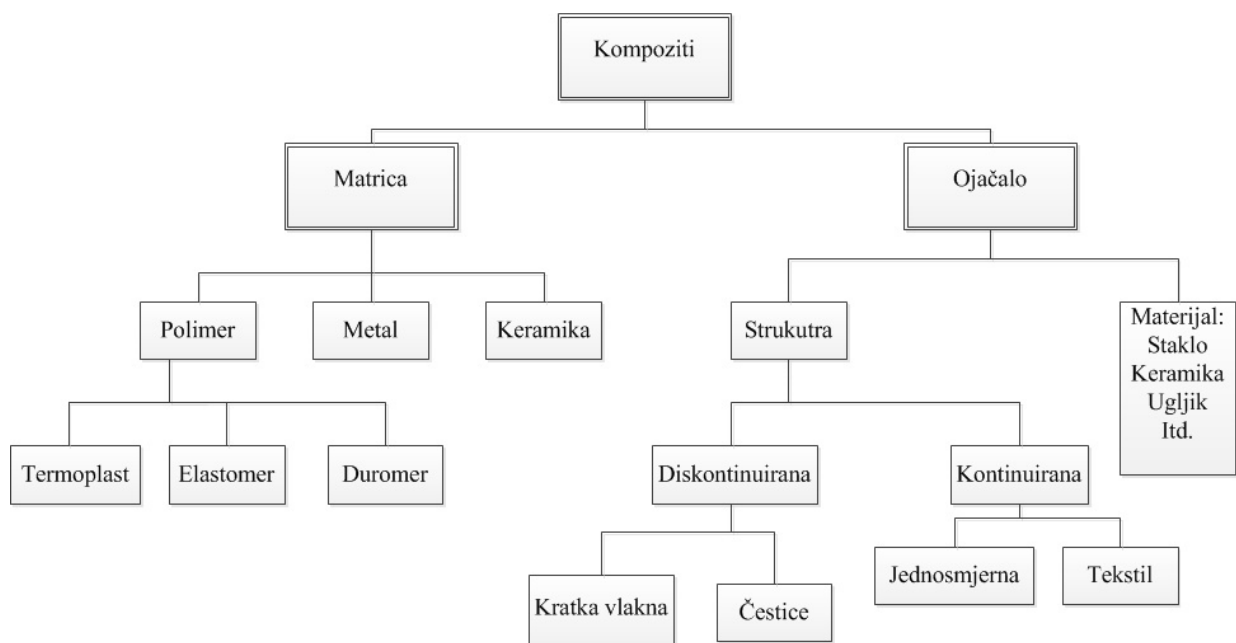
Kompoziti ojačani česticama sadrže matricu u koju su ugrađena ojačala u obliku diskretnih, jednoliko raspoređenih tvrdih i krhkih čestica. Razlikuju se kompoziti s velikim česticama te kompoziti s disperzijom, tj. ojačani vrlo malim česticama (10 do 250 nm, volumni udjel do 15%), koje povećavaju čvrstoću usporavanjem gibanja dislokacija u materijalu. Primjeri su

kompozita ojačanih česticama: beton (koji se može dodatno ojačati armiranjem), abrazivne paste za poliranje, tvrdi metali, čađom ojačana guma za pneumatike i dr.

U strukturne kompozite ubrajaju se laminati i složene konstrukcije. Laminati su plošni slojeviti proizvodi od različitih materijala, npr. furnirske ploče ili šperploče, te kompoziti u kojima se vlakna u polimernoj matrici nalaze u slojevima. Različitom orijentacijom pojedinih slojeva mogu se smanjiti nedostaci linearne orijentiranosti kompozita ojačanih vlaknima. Složene konstrukcije (tzv. sendvič-konstrukcije) sastoje se od tankih vanjskih slojeva između kojih se nalazi neki laki materijal u obliku pčelinjega saća (primjena u građi zrakoplova), pjene, nepravilnih vrpce ili listova (npr. valoviti karton) i sl.

### 2.1 Klasifikacija kompozita

Kompozitni materijali mogu se klasificirati na nekoliko načina ovisno o veličini, obliku te distribuciji dvaju ili više slojeva različitih materijala u kompozitu (slika 1).



Slika 1. Vrste kompozita

1. Kompoziti ojačani vlaknima sastoje se od dugačkih (kontinuiranih) ili kratkih vlakana raspoređenih u matrici. Vlaknima ojačani kompoziti posjeduju poboljšanu čvrstoću, krutost te poboljšana svojstva otpornosti na krhki lom i trošenje. Širok raspon materijala za ojačanje kompozita, kao što su staklena vlakna u polimernoj matrici, koriste se za razne industrijske primjene. Materijali za ojačanje mogu biti raspoređeni u različitim položajima između vlakana. Ovisno o položaju ojačala, mijenjaju se mehaničko-tribološka svojstva kompozita.

2. Kompoziti ojačani česticama u kojima su čestice jednog ili više materijala smještene unutar mekše matrice. Čestice mogu biti metalne ili nemetalne raspršene u polimernom ojačalu. Kompoziti ojačani česticama mogu se vrlo lako razlikovati od kompozita ojačanih vlaknima. Treba spomenuti da dodatkom određenih čestica se može poboljšati otpornost kompozita na trošenje. Koje čestice je najbolje dodati za poboljšanje otpornosti na trošenje, bilo je predmet ispitivanja mnogih znanstvenika.
3. Strukturni kompoziti: sastoje se od najmanje dva različita sloja materijala spojenih skupa. Laminiranje se koristi kako bi se poboljšala svojstva u pogledu veće krutosti, krhkosti, što manje težine, otpornosti na trošenje i koroziju te dobra izolatorska svojstva u pogledu toplinske i električne izolacije.

## 2.2 Vlakna i polimerne matrice

Općenito, vlakna se dodaju polimerima kako bi poboljšali jedno ili više svojstava koje se može grupirati u nekoliko skupina:

1. otpornost na trošenje,
2. otpornost na deformaciju materijala prilikom njegovog opterećenja,
3. kemijska kompatibilnost s radnim medijem,
4. mala oštećenja na metalnim kontra površinama koje su u kliznom dodiru s kompozitnim materijalom.

Neophodna su laboratorijska ispitivanja kako bi istražili utjecaj vlakana na polimerno ojačalo. Kontinuirana ili kratka aramidna, ugljična ili staklena vlakna u raznim oblicima, koriste se za povećanje krutosti i čvrstoće polimernog kompozita [28].

### 2.2.1 Polimerne matrice

Vlakna su spojena ojačalom kako bi zajedno oblikovala strukturni element koji na sebe preuzima opterećenje. Geometrijski oblik vlakna ima velik utjecaj na poboljšanje ili smanjenje čvrstoće kompozita. U vlaknima mogu postojati neka oštećenja koja su nastala prilikom njihove proizvodnje, rukovanja ili oblikovanja u konačni oblik te mogu doprinijeti smanjenju mehaničkih svojstava gotovog proizvoda.

Materijal koji spaja vlakna u neku cjelinu ili oblik, obično se naziva matrica ili ojačalo (resin). Svojstvo matrice je oblikovanje vlakana u neku cjelinu da ih zaštiti od vanjskog utjecaja radnog

medija i potencijalnog oštećenja uz što ravnomjerniju distribuciju sile na vlakna uzrokovanih vanjskim opterećenjem na kompozit. Matrica je obično manje gustoće i čvrstoće od vlakana. Viskozitet matrice ili ojačala mora biti optimalan u ovisnosti o tipu vlakana kako bi dobili optimalnu raspodjelu ojačala u kompozitu.

Polimere korištene u funkciji matrice se može podijeliti u dvije glavne skupine:

a) Duromerna matrica (Termoset matrica)

Najčešće korištene matrice iz ove skupine su epoksidna i poliesterska matrica sa vrlo dobrim mehaničkim svojstvima uz dobru otpornost na razne kemikalije. Duromerne matrice posjeduju izotropna svojstva, njihova krutost također se mijenja s povećanjem temperature.

b) Plastomerna matrica (termoplast matrica)

Često korištene matrice iz ove skupine su polipropilen (PP), poliamid (PA), polikarbonati (PC). Za razliku od duromerne matrice, termoplasti pripadaju grupi anizotropnih materijala. Najčešće su ojačani kratkim vlaknima optimiziranih za proizvodnju postupkom injekcijskog prešanja. Prilikom konstantnog opterećenja polimernog kompozita deformacija materijala se mijenja u funkciji vremena što može izazvati pojavu pukotine u materijalu koja može dovesti do pucanja kompozita.

### 2.3 Mehanizmi oštećenja kompozita

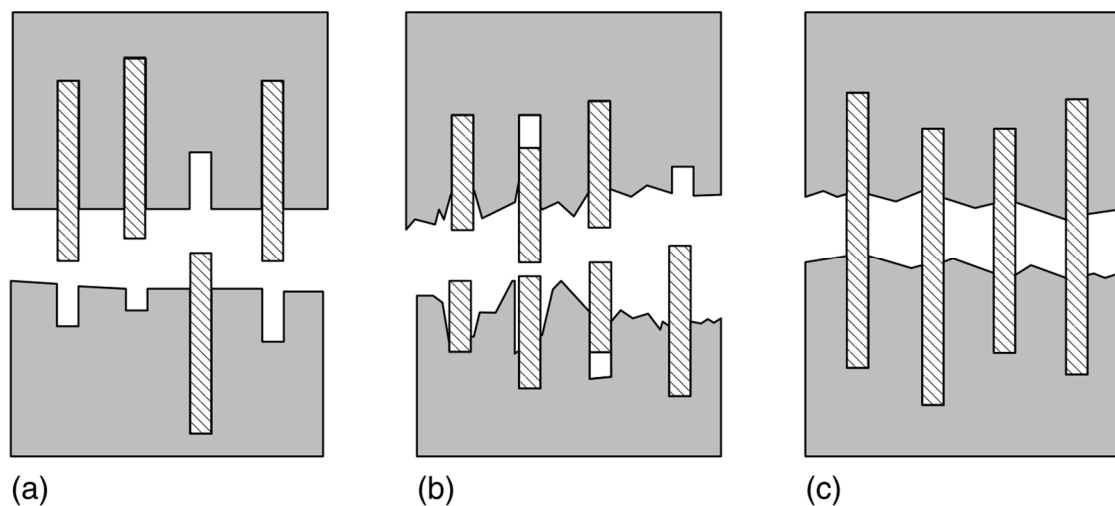
Mehanizmi ili modeli oštećenja kompozita mogu ovisiti o raznim parametrima kao što su tip materijala, način opterećenja, čvrstoća vlakana ili matrice, jačina povezanosti matrice i vlakana kao i volumni udio vlakana u kompozitu te geometrijski oblik vlakana.

Oštećenja vlakana mogu se podijeliti na nekoliko tipova:

1. Odvajanje vlakana od ojačala česta je pojava kada je opterećenje izazvano vanjskom silom na kompozit veće od maksimalno dopuštenog opterećenja koje vlakno može izdržati. Posljedica prekomjernog opterećenja je suženje vlakna što dovodi do njegovog ispadanja iz ojačala kao što se može vidjeti na slici 2 pod tip a). Ova pojava ispadanja vlakana iz matrice zamiječena je više kod vlakana sa vrlo velikim modulom elastičnosti.
2. Izvlačenje vlakana dolazi uslijed pucanja vlakana i ojačala pri djelovanju prevelikog opterećenja na kompozitni materijal kao što se može vidjeti na slici 2 pod b).

Kompozitni materijal kod kojega će doći do izvlačenja vlakana, moguće je očekivati propagaciju pukotine po cijeloj dužini konstrukcijskog dijela.

3. Pucanje matrice vrlo često se događa ukoliko u matrici imamo zaostale mjehuriće zraka ili neke druge nečistoće koje uslijed opterećenja na kompozit mogu izazvati pukotinu koja dovodi do loma matrice kao što se može vidjeti na slici 2 pod c). Ova pojava događa se kod kompozita kod kojih su vlakna vrlo velike čvrstoće i matrice koja je oštećena u nekom dijelu, bilo mehaničkim putem ili u samom procesu proizvodnje.



Slika 2. Tipovi oštećenja kompozita [44]

Kod slojevitih kompozita česta pojava oštećenja je delaminacija. Delaminacija se može opisati kao razdvajanje slojeva (laminata). Jedan od glavnih uzroka raslojavanja je pojava smičnog naprezanja između slojeva kompozita. Slojeviti kompoziti su materijali sa ortotropnim svojstvima što znači da materijal ovisno o smjeru naprezanja posjeduje drugačija mehanička svojstva.

Kod ortotropnih materijala smično naprezanje nastaje zbog tendencije za neovisnim deformiranjem svakoga sloja u kompozitnoj cjelini na koje djeluje neko opterećenje.

Smična naprezanja najveća su na rubovima slojevitih kompozita te se može zaključiti da je to područje najpodobnije za pojavu delaminacije.

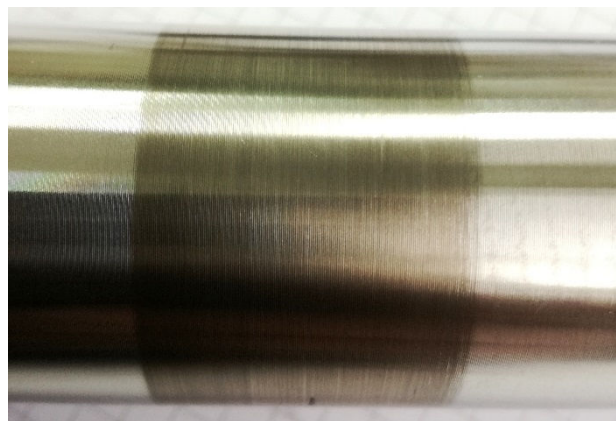
## 2.4 Tribološke pojave

### 2.4.1 Uvod

Tribologija je znanost koja istražuje i opisuje procese trenja i trošenja te podmazivanja ako je ono prisutno. Stečena znanja iz područja tribologije primjenjuju se u optimizaciji

triboloških sustava. Tribologija je interdisciplinarno područje čije se istraživanje odvija uz brojne poteškoće zbog složenosti tribološkog sustava. Kada se površine strojnih dijelova dodirnu i krenu uzajamno gibati javlja se trenje i trošenje. Kada bi se na neki način uspjelo eliminirati trenje i trošenje značajno bi se smanjio utrošak energije potrebne za rad tj. međusobno gibanje dijelova. U tom slučaju rad bi bio potreban samo za ubrzanje nekog dijela stroja. Nestanak trenja i trošenja imao bi za posljedicu produljenje životnog vijeka nekog stroja. Međutim, bez trenja neki strojni dijelovi bili bi bez funkcije kao na primjer kočioni sustavi nekog automobila. Potrebno je odgovajajuće trenje između diska kočnice i obloge koje se nalaze unutar kočionih čeljusti kako bi ostvarili potrebnu silu kočenja. Kod lamelne spojke automobila potrebno je trenje između lamele i zamašnjaka preko kojeg prenosimo moment s motora na mjenjačku kutiju [29], [30], [31], [32]. Bez trošenja ne bi mogli pisati grafitnom olovkom po papiru.

Neki radni strojevi prilagođeni su određenom stupnju trošenja koji nastaje s vremenom upotrebe kako bi se dijelovi mogli učestalije mijenjati što donosi dodatnu zaradu proizvođačima na učestalijoj prodaji rezervnih dijelova. Kao primjer može se navesti klizni ležaj od poliamida sa 20 % staklenih vlakana koji linearno kliže po osovini od čelika otpornog na koroziju AISI 316, što kao posljedicu ima prekomjerno trošenje osovine kao što se može vidjeti na slici 3 i njezino mijenjanje svake dvije godine rada [33].



**Slika 3. Abrazivno trošenje na osovini od AISI 316 uslijed klizanja po ležaju od PA6+20% GF**

Trenje i trošenje može se opisati pomoću funkcija optimizacije tribološkog sustava koji se može vidjeti na slici 4



Slika 4. Trenje i trošenje

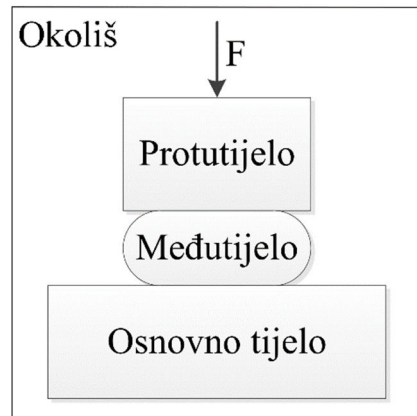
Najčešći ciljevi tribologije su poboljšanje radnih karakteristika nekog stroja, npr. u automobilskoj industriji manji okretni moment potreban za start motora i kraći zaustavni put vozila [31]. Povećanje korisnog djelovanja stroja tj. smanjenje gubitaka među dijelovima koji su međusobno u dodiru kao npr. između kliznog ležaja i rukavca dovodi do manjih gubitaka energije što može rezultirati uštedom potrošnje nekog energenta. Povećanje efikasnosti može dovesti do veće pouzdanosti sustava što kao posljedicu ima smanjenje troškova održavanja i produljenje radnog vijeka trajanja stroja.

Kako bi postigli prethodno navedene ciljeve tribologije potrebno je poboljšati postojeće ili razviti nove tribološke materijale ili sustave, istražiti sredstva za podmazivanje i sustave za podmazivanje. Najvažnije od svega je stalno prikupljanje i zapisivanje relevantnih informacija vezanih za tribologiju.



### 2.4.2 Tribološki sustav *kompozitni klizni ležaj / rukavac*

Definicija tribološkog sustava prema DIN 50320 [34] može se opisati kao transformacija raspoloživih ulaznih parametara tj. mehaničkih veličina u izlazne veličine, pri čemu rad sustava prate određene smetnje i gubici. Strukturu tribološkog sustava se može vidjeti na slici 5 kao slikovitu shemu, dok detaljan opis tribološkog sustava kompozitni klizni ležaj/rukavac može se vidjeti na slici 6.



Slika 5. Struktura tribološkog sustava [32]

Tribološki sustav [32] kao što se može vidjeti na slici 5 obuhvaćene su sljedeće komponente:

1. Osnovno tijelo koje je uglavnom važniji element sa stajališta trošenja kao što je npr. klizna staza vodilice, klizni ležaj, valjni ležaj itd.
2. Protutijelo je kod zatvorenih sustava usvojeni strojni dio kao npr. rukavac, klizna prizma vodilice, a kod otvorenih sustava stalno promjenjivo tijelo kao npr. prešani otkivci iz preše.
3. Međutijelo ili treće tijelo nalazi se između osnovnog tijela i protutijela. Ono najčešće može biti sredstvo za podmazivanje ili neki drugi medij.
4. Okolina koja neposredno okružuje osnovno tijelo, protutijelo i međutijelo, najčešće je zrak s određenim udjelima kisika, ugljikova dioksida, vode te raznih lužina i kiselina.
5. Skup opterećenja koja djeluju na tijela u tribološkom sustavu prema DIN50320 [34]:
  - a) Sila  $F$  koja može biti promjenjiva po iznosu, vremenu i pravcu djelovanja.
  - b) Brzina  $v$  pri čemu gibanje može biti klizanje, kotrljanje, mirovanje, udar ili strujanje.
  - c) Temperatura koja utječe na promjenu mehaničkih svojstva materijala, viskozitet maziva i brzinu kemijskih reakcija.

- d) Vrijeme trajanja opterećenja  $t_B$  tijekom kojeg se povećava gubitak materijala i masa produkta kemijskih reakcija.

Klasifikacija tribološkog sustava *kompozitni klizni ležaj / rukavac* proizlazi iz toga da klizni ležaj mora zadovoljiti sljedeće uvjete:

- 1) Preuzimanje radijalne i / ili aksijalne sile.
- 2) Osigurati relativno pomicanje između kompozitnog kliznog ležaja i rukavca uz minimalno trenje i trošenje.
- 3) Osigurati funkciju vođenja i prigušenje vibracija.
- 4) Osigurati odvođenje topline nastale u području kontakta kliznog ležaja i rukavca.

Struktura ležajnog materijala od velikog je značaja za geometrijsku postojanost ležaja pri djelovanju opterećenja na njega.

Rukavac se za mnoge strojarske primjene izrađuje od čelika otpornog na koroziju ili kaljenog čelika. Poznato je da čelici otporni na koroziju zbog svoje strukture djeluju vrlo abrazivno na polimerne i kompozitne materijale [36], [37] kao i kaljeni čelici zbog otežanog uglačavanja naime zbog postupka kaljenja materijala dolazi do promjene u strukturi materijala te se vanjska hrapavost površine zbog povećane tvrdoće otežano uglača [38].

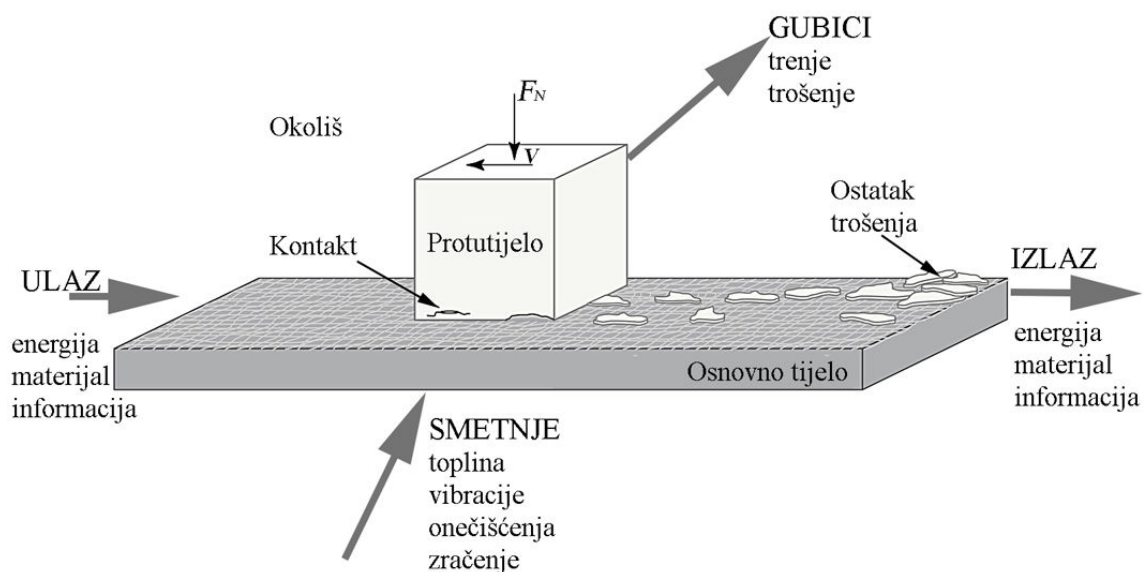
Kompozitni klizni ležajevi u strojarskim sustavima vrlo često nisu podmazivani uobičajenim sustavima za podmazivanje kao što su mineralna ili sintetička ulja.

U slučaju kad nema podmazivanja međutijelo je okolišni zrak, ako postoji sustav podmazivanja to je najčešće podmazivanje pomoću masti silikonske osnove s dodatkom PTFE-a.

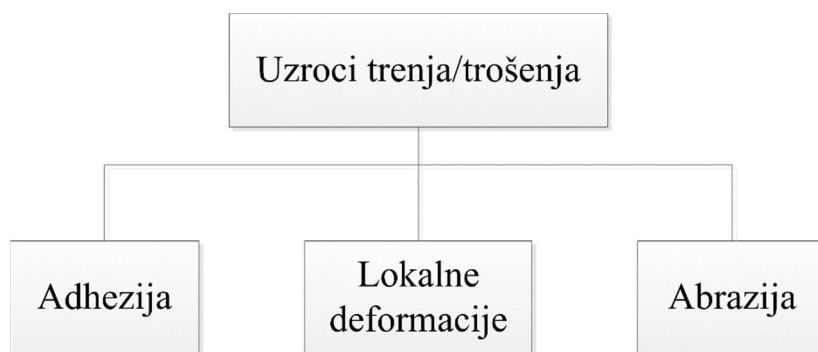
Drugi oblici podmazivanja mogu biti voda, razne paste te PTFE i  $MoS_2$  sprej.

U analizi triboloških sustava pored mehaničkih veličina trebaju se uzeti u obzir stvaranje topline uslijed kontakta ležaja i rukavca kao što se može vidjeti na slici 6 koja prikazuje detaljan opis tribološkog sustava u obliku ulaznih i izlaznih veličina.

Naime, pri trenju i trošenju dolazi do preobražaja mehaničke energije u toplinu što dovodi do porasta temperature strojnih dijelova nekog sustava. Povišenje temperature može manje ili više utjecati na kvalitetu rada ovisno za kakvu namjenu je stroj projektiran npr. može doći do smanjenja čvrstoće osnovnog tijela i protutijela ili do promjene viskoziteta maziva što dovodi do promjene debljine uljnog filma.



Slika 6. Detaljan opis tribološkog sustava klizni ležaj / rukavac



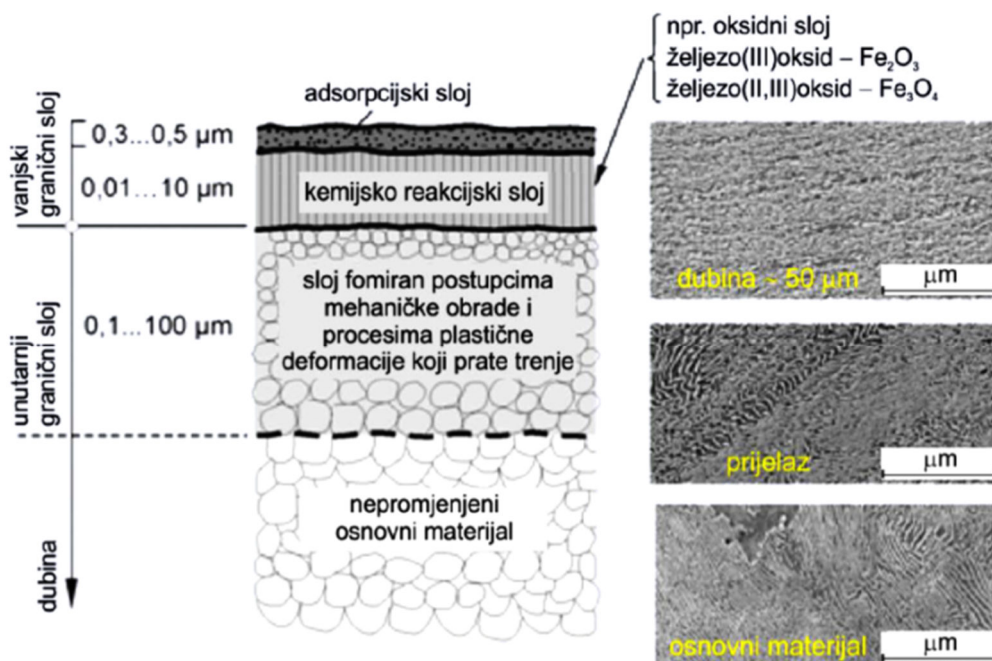
Slika 7. Uzroci trenja/trošenja

Trenje se može definirati kao otpor uzajamnom gibanju tijela koja se dodiruju, trošenje se manifestira kao odvajanje materijala s površine tijela koja se dodiruju i uzajamno gibaju, dok se podmazivanje može opisati kao unos sredstva između dodirnih površina tijela koja se uzajamno gibaju u cilju smanjenja trenja i trošenja. Zajednički su uzroci trenja i trošenja vidljivi na slici 7.

Istraživač Domitran je pri testiranju PET (polietilentereftelat) s dodatkom PTFE-a na Timken ispitnom uređaju utvrdio da nije dolazilo do značajnije promjene mase ispitnih uzoraka pa se može zaključiti da je došlo do adhezijskog trošenja [39].

Adheziju se može objasniti kao pojavu kada tijela prijanjaju na mjestima dodira uslijed djelovanja međumolekulskih sila, lokalne deformacije na mjestima dodira mijenjaju geometriju površine tijela, dok brazdanje nastaje prilikom gibanja tvrdih mikro neravnina koje razaraju

mekše mikro neravnine suprotne podloge [35]. Tijekom izrade nekog strojarskog dijela u našem slučaju rukavca, a nakon toga i njegovom uporabom u strojevima, uslijed triboloških opterećenja, promjena temperature i kemijski agresivnog djelovanja okoline dolazi do promjene u građi i kemijskom sastavu površinskog sloja strojarskog dijela kao što se može vidjeti na slici 8. Promjene materijala mogu biti izraženije, ako je strojarski dio u fazi izrade bio podvrgnut toplinskoj obradi. U tom slučaju površinski sloj jasno se razlikuje od osnovnog materijala. Prilikom izrade kompozitnog kliznog ležaja potrebno je voditi računa o odabiru odgovarajuće tehnologije obrade ležaja kako bi izbjegli moguća oštećenja matrice i / ili ojačala kompozita [40].

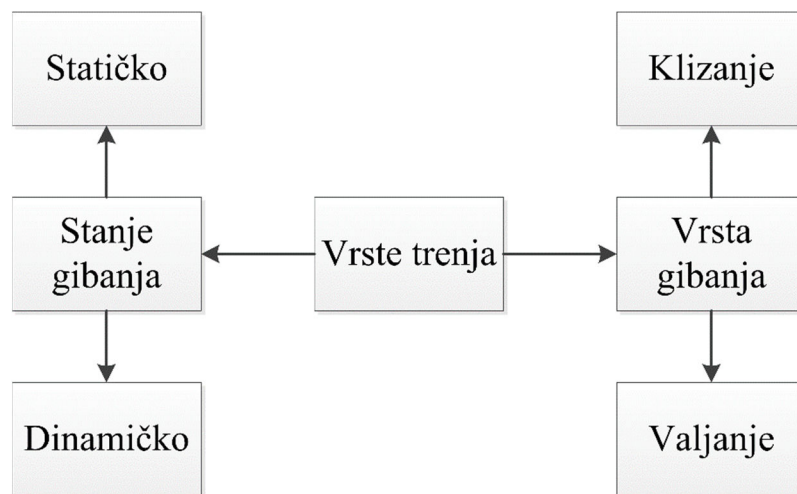


Slika 8. Struktura rukavca nakon obrade [32]

## 2.5 Trenje

### 2.5.1 Osnove trenja

Trenje se prema DIN 50323- 3 [41], može definirati kao otpor uzajamnom gibanju elemenata koji se dodiruju. Pri kontaktu elemenata između kojih nastaje trenje za posljedicu imamo trošenje, a također dolazi do gubitka mehaničke energije koja se pretvara u toplinu. Vrste trenja mogu se podijeliti prema prirodi gibanja na dvije osnovne skupine kao što može vidjeti na slici 9, a to je mirovanje/gibanje i klizanje/kotrljanje.

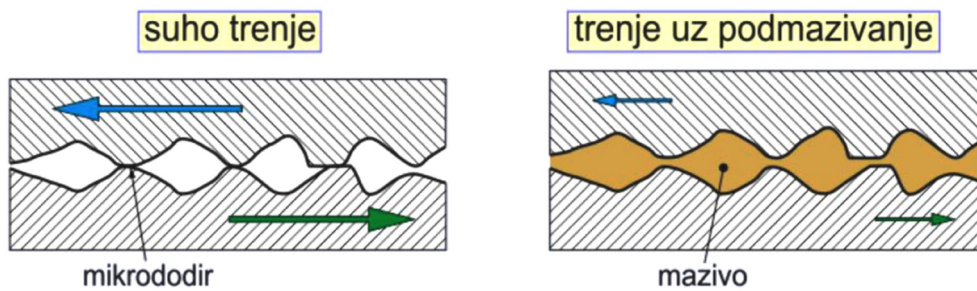


Slika 9. Vrste trenja

Statičko trenje koje se javlja neposredno prije pokretanja je veće od dinamičkog trenja koje se javlja u pokretu ako u sustavu postoji mazivo. Ukoliko u sustavu nema maziva prema Kolumbovoj teoriji statičko trenje jednako je dinamičkom trenju, a trenje klizanja veće od trenja kotrljanja [29] za oba slučaja rada.

Prema prisutnosti/odsutnosti sloja između uzajamno pokretanih dijelova razlikuju se dva granična slučaja kao što se može vidjeti na slici 10, a to su:

- Suho trenje pri kojem dolazi do neposrednog kontakta površina uzajamno pokretanih elemenata.
- Trenje uz podmazivanje tj. trenje u tekućini javlja se bez neposrednog kontakta površina uzajamno pokretanih elemenata. Kako bi se smanjilo trenje, površine elemenata su odvojene slojem maziva.



Slika 10. Granične vrste trenja

Na temelju agregatnih stanja osnovnog tijela/međutijela/protutijela razlikujemo:

1. Trenje krutih tijela - osnovno tijelo i protutijelo su u neposrednom kontaktu.
2. Trenje graničnih slojeva - osnovno tijelo i protutijelo su u kontaktu preko graničnih slojeva površina, koji su tijekom izrade tijela i procesa trenja izmijenili građu i kemijske sastave u odnosu na materijale tijela.
3. Granično trenje - između osnovnog tijela i protutijela nalazi makromolekulski sloj maziva.
4. Tekuće trenje -međutijelo je tekućina u kojoj se odvija trenje.
5. Plinsko trenje -međutijelo je plin i u njemu se odvija trenje tj. unutarnje trenje plina.
6. Mješovito trenje - kombinacija graničnog i tekućeg trenja.

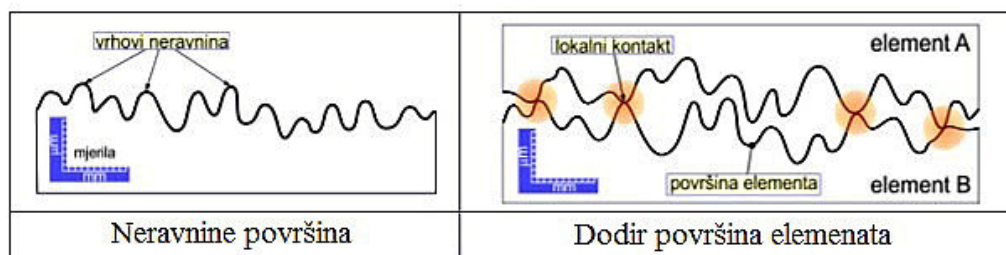
Trenje u sustavu *kompozitni klizni ležaj/rukavac* podliježe trenju klizanja uz deformacije u području dodira mekanijeg kompozitnog materijala i čeličnog rukavca. Vrste trenja karakteristične za promatrani ležajni par su granično, plinsko i mješovito trenje [6], [42].

### 2.5.2 Mehanizam trenja kliznog ležaja

Za razumijevanje triboloških stanja i procesa prilikom rada kliznog ležaja bitno je imati u vidu mikro zbivanja koja se u makro pristupu gube iz vida.

Istraživač Popov je u svojim istraživanjima vezano za trenje i trošenje kliznih ležajeva dokazao da je dovoljno ograničiti se na kvalitativnu mikroanalizu, jer je kvantitativna mikroanaliza zbog prirode površina materijala iznimno složena [29].

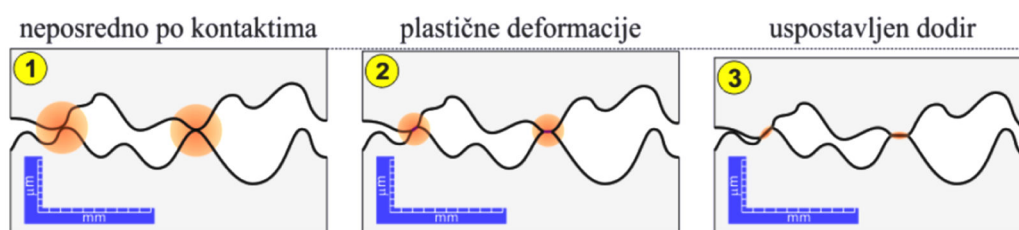
Mikroanaliza otkriva neravnine površina elemenata čiji vrhovi pri dodiru uspostavljaju kontakt kao što se može vidjeti na slici 11.



Slika 11. Dodir površina elemenata

Na slici 11 crvenim poljima označena su područja lokalnih napreznja materijala između elementa A i B. Tijekom uspostavljanja dodira, s porastom broja lokalnih kontakata te povećanjem dodirne površine dolazi do smanjenja lokalnih napreznja.

Tijekom uspostavljanja ravnoteže dolazi do elastičnog, potom i plastičnog deformiranja područja lokalnih dodira tj. elementi se uzajamno približavaju, raste broj dodira i stvarna dodirna površina kao što se može vidjeti na slici 12, od stanja 1 do stanja 3. Na mjestima prvih kontakata, uslijed velikih i brzih deformacija praćenih porastom topline u kontaktnom području, dolazi do taljenja dok bi se u procesu hlađenja formirali mikro zavari [43], [44]. Prilikom uporabe duromernih kompozita kao ležajnog materijala uslijed prije navedenog procesa dolazi do značajne promjene hrapavosti površine materijala [26], [45]. Pri pokretanju tijela za svladavanje statičkog trenja potrebno je prije svega raskinuti prethodno formirane mikro zavare.



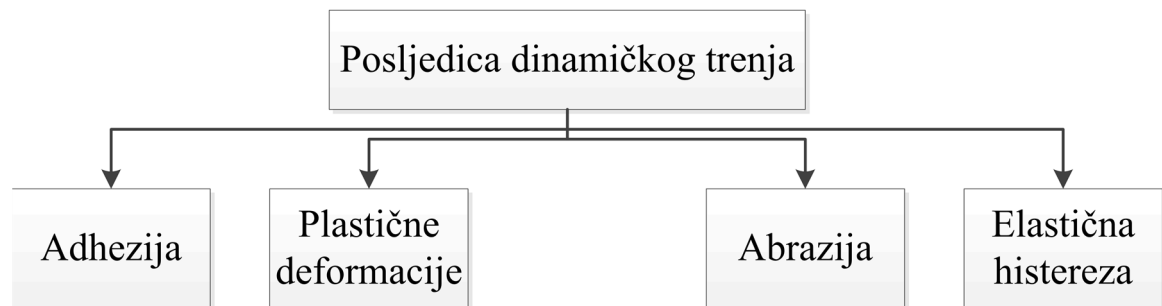
Slika 12. Uspostava dodira elemenata

Ravnoteža se uspostavlja kada se napreznje izjednači s granicom elastičnosti materijala [29] kao što se može vidjeti u jednadžbi (1).

$$\sigma_n = \frac{F_N}{A_s} = R_e \quad (1)$$

Istraživač Popov [29] u svojim istraživanjima na temelju mikroanalize dolazi do zaključka da su stvarne površine dodira manje od nazivnih površina dodira.

U procesu dinamičkog trenja sustava klizni ležaj/rukavac uključene su četiri pojave kao što se može vidjeti na slici 13.



Slika 13. Uzroci dinamičkog trenja

Pojave koje prate dinamičko trenje može se pobliže vidjeti na slici 14 pri čemu valja napomenuti da je  $F_N$  oznaka za silu koja djeluje između površina u kontaktu,  $\tau_a$  smično naprezanje izazvano djelovanjem adhezije i vučne sile  $F_v$ . Smično naprezanje također se može izraziti preko jednadžbe (2).

$$\tau_a = \mu \cdot \sigma_n \quad (2)$$

Elastična histereza česta je pojava kod polimernih i duromernih kompozita te se može opisati kao dio energije za održavanje gibanja tijela uz trenje troši se na elastične deformacije te gubi pri sporom povratu na prvobitne dimenzije [35].

Trenje sustava klizni ležaj/vratilo može se riješiti makro pristupom uz eksperimentalno određivanje faktora trenja na uređaju predviđenom za takvu namjenu.

Sila trenja  $F_T$  prema Coulombovom zakonu trenja uvijek ima suprotan smjer od vučne sile  $F_v$  te usporava uzajamno kretanje tijela. Normalna sila  $F_N$  u ovisnosti je o sili trenja  $F_T$  i koeficijentu trenja  $\mu$  [29].

$$F_T = F_N \cdot \mu \quad (3)$$

Pri početku rada kliznog ležaja sila trenja se mora savladati kako bi ostvarili uzajamno pomicanje elemenata tj. gibanje rukavca neće započeti dok je vučna sila manja od sile trenja. Također se može konstatirati da je vučna sila razmjerna normalnoj sili kojom jedan element djeluje na drugi, a neovisna je o površini dodira.

Moment trenja jednak je umnošku sile trenja i polumjera rukavca kao što se može vidjeti u jednadžbi (4).

$$M_T = F_T \cdot r \quad (4)$$



Rad koji je potrebno utrošiti za svladavanje trenja klizanja ovisi o putu  $L$  što je vidljivo u jednadžbi (5).

$$W = F_v \cdot L \quad (5)$$

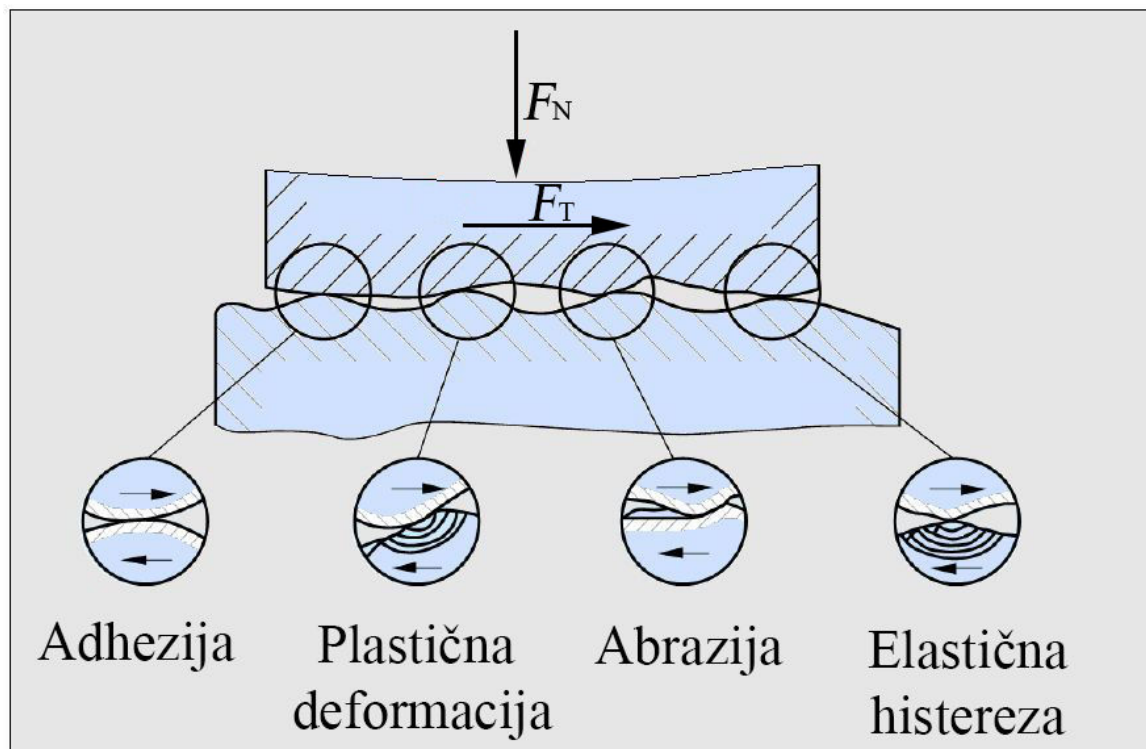
Snagu se može izraziti preko jednadžbe (6), ako je vrijeme za svladavanje puta ograničeno

$$P = \frac{W}{t} \quad (6)$$

Toplina koja se oslobodi može se opisati jednadžbom (7).

$$Q = P \cdot t \quad (7)$$

Za opis trenja u tribološkom sustavu *kompozitni klizni ležaj/rukavac* Coulombov zakon trenja dobro je primjenjiv [29] stoga se faktor trenja  $\mu$  u ovom radu koristi za opisivanje ponašanja trenja.



Slika 14. Pojave koje prate dinamičko trenje [58]

## 2.6 Trošenje

### 2.6.1 Općenito

Trošenje prema DIN 50320 [34] može se opisati kao progresivni gubitak materijala s čvrstog tijela, izazvano nekim mehaničkim uzrokom. U slučaju kada do oštećenja materijala dolazi ne mehaničkim putem kao što je npr. kemijska korozija za pojavu prema DIN 50320 [34] ta pojava ne spada pod trošenje.

Trošenje se u tribološkom sustavu *kompozitni klizni ležaj (KKL) / rukavac* može definirati kao gubitak materijala tijela koja se uzajamno gibaju.

Trošenje kao i trenje se prema DIN 50320 [34] može podijeliti prema:

1. Vrsti trošenja (ogrebotina, promjena oblika, itd.).
2. Mehanizmu trošenja (adhezija, abrazija, tribološke reakcije itd.).
3. Trošenje prema vrsti gibanja osnovnog tijela/protutijela (klizanje, valjanje, itd.).
4. Trošenje na temelju agregatnih stanja osnovnog tijela/međutijela/protutijela (kruto, granično, mješovito, plinovito, itd.).

Trošenje kao i trenje ne ovisi samo o izboru materijala koji se nalaze u međusobnom kontaktu, nego je također dio tribološkog sustava koji ovisi o velikom broju parametara.

Na trošenje tribološkog sustava *KKL / rukavac* prvenstveno utječu:

1. tlak na površinu ležaja,
2. obodna brzina rukavca,
3. međutijelo tj. mazivo (kruto, tekuće ili plinovito),
4. površinska hrapavost tvrdog materijala tj. rukavca,
5. temperatura,
6. stvarna kontaktna površina (mikro i makro geometrija) između KKL / rukavca.

Za tribološki sustav *KKL / rukavac* vibracije i kavitacija prema DIN 50320 [43] od manjeg su značaja. Pojava kavitacije moguća je kod KKL kod kojih je međutijelo čista filtrirana voda, riječna voda ili morska voda.

Glavni uzroci trošenja u tribološkom sustavu *KKL / rukavac* prema DIN 50320 [34] ovise o mehanizmu trošenja, a to su:

1. Adhezijsko trošenje koje se može opisati kao posljedica djelovanja međuatomskih / međumolekulskih sila u točkama dodira tijela gdje dolazi do formiranja mikrozavara, koji se raskidaju pri ponovnom uzajamnom gibanju tijela.
2. Abrazijsko trošenje koje je posljedica prodiranja vrhova tvrdog materijala u površinske slojeve mekšeg materijala i njegovim brazdanjem pri uzajamnom gibanju materijala.
3. Erozijsko trošenje posljedica je djelovanja fluida (sa ili bez prisutnosti krutih čestica nošenih fluidom) koji pri velikoj brzini udaraju o površinu tijela.
4. Površinski umor posljedica je stalnih promjena veličina i smjerova naprezanja površinskih slojeva tijela pri uspostavljanju i prekidu kontakata tijela koja se uzajamno gibaju.

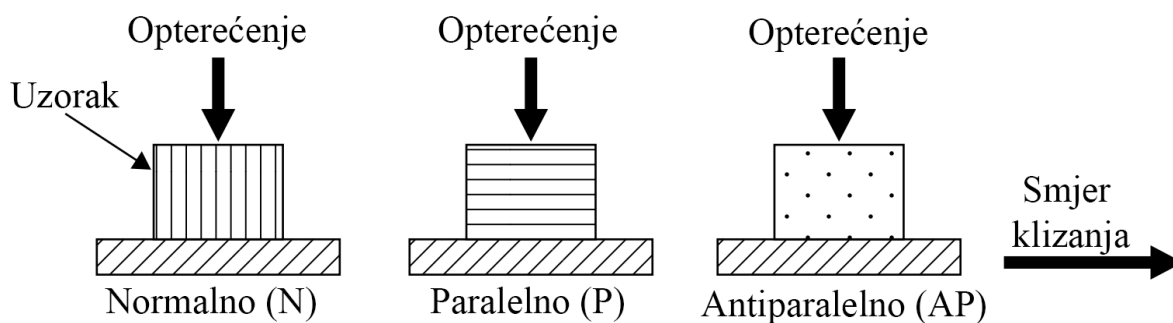
### 2.6.2 Trošenje kompozita ojačanih vlaknima

Općenito dodatak dugačkih neprekinutih vlakana je često korištena tehnika za poboljšanje mehaničko - triboloških svojstva polimernih materijala. Osim toga širok raspon različitih materijala koji se koriste za proizvodnju vlakana omogućuje oblikovanje kompozita s jedinstvenim svojstvima za razne tipove primjena. Ovaj tip kompozita ima i neke nedostatke kao što je nemogućnost proizvodnje tehnologijom ekstrudiranja ili brizganja. Proces trošenja kompozita ojačanih dugačkim vlaknima vrlo je složen. Raznolikost vlakana, kako u pogledu njihovih svojstva i volumenskog udjela u kompozitu, čini proračun trošenja materijala još kompleksnijim.

Pregledom radova istraživač Wileba [46] je uočio da je najčešći oblik trošenja kompozita izazvan pojavom adhezije između dodirnih površina. Također, mogu se pojaviti i drugi oblici trošenja, ovisno o tipu vlakna i faktoru trenja [46].

Osnovni faktori koji utječu na trošenje vlaknima ojačanih kompozita su tip vlakana, volumni udio vlakana u kompozitu te veličina i oblik vlakana na površini kompozita.

Uočeno je da smjer klizanja u odnosu na vlakna, kao i orijentacija vlakna u odnosu na kliznu površinu, ima velik utjecaj na promjenu trošenja (slika 15).



Slika 15. Trošenje kompozita u ovisnosti o usmjerenosti vlakana [44]

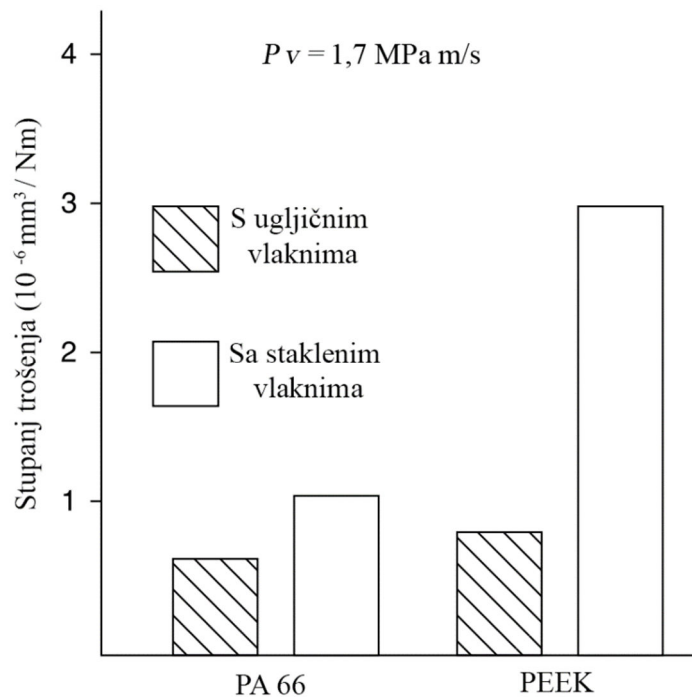
U slučaju kada je normalna orijentacija vlakana na dodirnu površinu (kao što vidimo na slici 15), kompozit može podnijeti najmanje opterećenje jer postoji velika mogućnost loma matrice od vlakana. Najveća nosivost kompozita kao i najmanje trošenje je zabilježeno kod paralelne i antiparalelne orijentacije vlakana u odnosu na dodirnu površinu.

Najčešće korištena dugačka vlakna za primjenu u proizvodnji kompozitnih materijala su staklena i ugljična vlakna. Istraživač Lanchester je 1972. godine među prvima krenuo ispitivati njihova tribološka svojstva u uvjetima sa i bez podmazivanja [47]. Njegov rezultat ispitivanja bilo je povećano trošenje kompozita zbog nemogućnosti stvaranja transfer filma na suprotnoj površini.

Kompozitni materijali ojačani kratkim vlaknima sve više se primjenjuju u dijelovima strojeva kao što su zupčanici, klizni ležajevi, nosivi dijelovi konstrukcija itd. Razlog sve veće primjene su niski troškovi proizvodnje te mogućnost rada bez podmazivanja. Primjenom raznih primjesa dobiva se mogućnost unaprjeđenija tribološka svojstva polimernih kompozita.

Na primjer kako bi se smanjila pojava adhezije, polimernom kompozitu se dodaje politetrafluoretilen (PTFE) ili grafit. Kratka aramidna vlakna, staklena i ugljična vlakna koriste se kako bi se poboljšala otpornost na puzanje i otpornost na tlačna opterećenja polimernih kompozita. Istraživač Suresha utvrdio je da polimeri ojačani kratkim vlaknima kao što su aramidna, staklena ili ugljična vlakna posjeduju i do četiri puta veću čvrstoću u odnosu na polimerne materijale bez vlakana [28]. Također je utvrđeno da stupanj trošenja raste s povećanjem opterećenja, trošenje kod polimera bez primjesa veće je za otprilike deset puta u odnosu na kompozitne polimere ojačane kratkim vlaknima. Ugljična i staklena vlakna značajno utječu na smanjenje koeficijenta

trenja kod kompozita na bazi poliamida (PA) za otprilike 50 % u odnosu na PA bez primjesa. Istraživač Vos von Friedrich ispitivao je mehaničko tribološka svojstva polyetheretherkenone (PEEK) i poliamida 66 (PA66) s dodatkom staklenih i ugljičnih vlakana te je uočio manje trošenje polimernih kompozita s dodatkom ugljičnih vlakana kao što je vidljivo na slici 16 [48].



Slika 16. Trošenje polimernih kompozita sa staklenim i ugljičnim vlaknima [48]

### 2.6.3 Trošenje slojevitih (laminiranih) kompozita

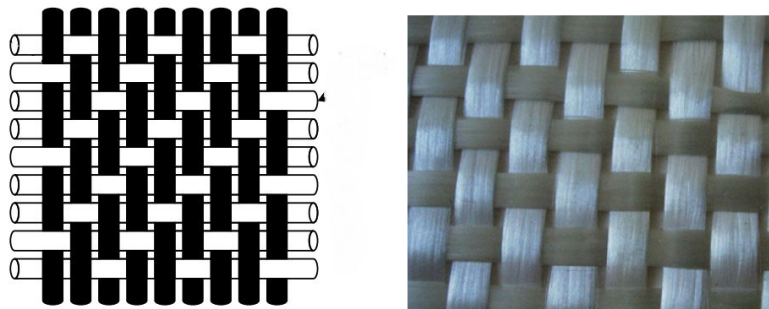
Kompoziti ojačani laminiranim vlaknima postepeno dobivaju sve više na popularnosti u raznim industrijskim primjenama zbog svojih vrlo dobrih mehaničkih svojstava, bilo da se radi o uzdužnim ili smičnim opterećenjima.

Slojeviti kompoziti su jednostavni za proizvodnju bilo da se radi o predmetima kompleksne geometrije ili jednostavnog kružnog oblika.

Za razliku od polimernih kompozita koji se dobivaju postupkom injekcijskog prešanja, kod kojih smo često limitirani dimenzijom alata za injekcijsko prešanje što značajno poskupljuje izradu proizvoda zbog veće cijene alata za njegovu izradu.

Kod slojevitih kompozita ograničenje je samo veličina peći u kojoj dolazi do stapanja ojačala s laminiranim vlaknima što nam daje mogućnost izrade većeg asortimana proizvoda.

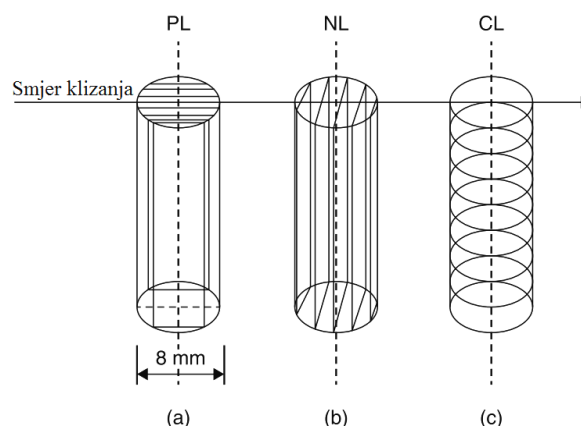
Vlakna za izradu tkanina koja se koriste za izradu slojevitih kompozita najčešće su izrađena od pamuka, stakla, polietilentereftalata (PET) ili satena, pletena su unakrsno kao što je vidljivo na slici 17.



Slika 17. Način pletenja tkanine [44]

Razni faktori kao što su omjer matrice i tkanja u kompozitu, orijentacija vlakna u tkanju, prijanjanje tkanine s matricom, geometrija vlakana u tkanju te orijentacija vlakna u tkanju utječu na tribološka svojstva slojevitog kompozita.

Utjecaj orijentacije laminiranih slojeva kompozita u odnosu na kliznu plohu jedan je od najvažnijih parametara koji treba uzeti u obzir pri procjeni triboloških svojstva kompozita. Istraživač El-Sherbiny [49] ispitivao je tribološka svojstva poliester ojačanog staklenom tkaninom (GLRP) kako je prikazano na slici 18.



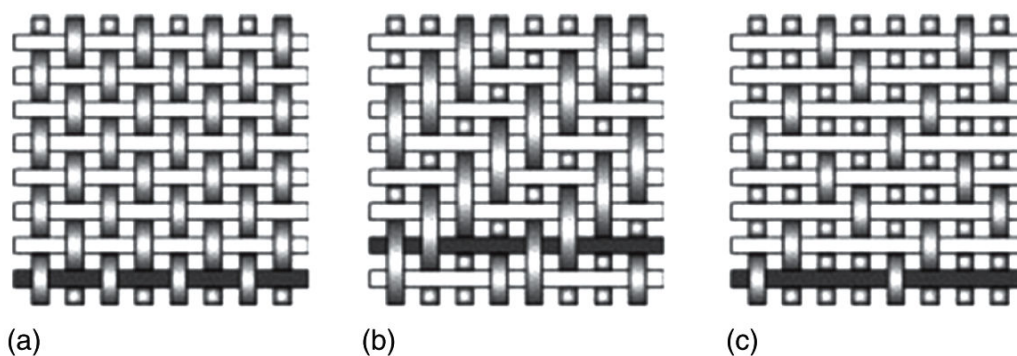
Slika 18. Orijentacija kompozita laminiranog staklenim vlaknima na kliznu plohu [44]

Na slici 18 može se vidjeti:

- a) Paralelna orijentacija laminata u odnosu na kliznu plohu (PL).
- b) Normalna orijentacija laminata u odnosu na kliznu plohu (NL).
- c) Križna orijentacija laminata u odnosu na kliznu plohu (CL).

Dokazano je da faktor trenja te otpornost na trošenje laminiranog kompozita uvelike ovisi o orijentaciji laminata na kliznu podlogu. Kod PL orijentacije, zabilježeno je najmanje trošenje. Zatim slijedi CL te NL orijentacija. Lokacija pojedinog laminata u odnosu na kliznu kontra površinu kontrolira faktor trenja i stupanj trošenja. U slučaju PL orijentacije klizna kontra površina je u dodiru sa staklenim vlaknima tkanine koja su okrenuta okomito na normalu kontra površine. Glavni proces trošenja odvija se na mjestu projekcije staklenih vlakana na kontra površinu. Kontakt matrice kompozita u ovom slučaju je jako malen. Kod NL orijentacije vlakna i matrica su u kontaktu s kontra površinom što dovodi do savijanja na rubovima ispitnog uzorka, a dovodi do efekta smicanja koje dovodi do povećanog trošenja. Najmanji faktor trenja zabilježen je kod CL orijentacije. Razlog tome je što se matrica nalazi između vlakana koja čine laminiranu strukturu, ta laminirana struktura sprječava lako odvajanje vlakana tijekom klizanja. Kod ovog tipa orijentacije vlakana, zabilježena je srednja otpornost na trošenje.

Geometrija tkanine značajno utječe na kontrolu triboloških svojstava slojevitog kompozita. Danas su dostupni razni tipovi tkanja kao što su obično, unakrsno ili slojevito tkanje tkanina (vidjeti sliku19).



Slika 19. Tipovi tkanja tkanine [44]

Kao što je prije spomenuto, trošenje tkaninom ojačanih kompozita ovisi o dva glavna faktora, a to su: prvo, lom vlakana koje može nastati zbog mikro puzanja ili mikro rezanja vlakna te drugo, promjena strukture matrice prilikom djelovanja opterećenja na kompozit.

## 2.7 Vrste ležajnih materijala

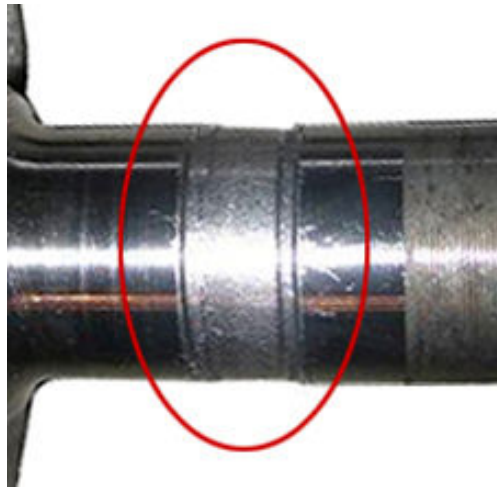
Ležajni materijali moraju zbog mogućnosti povremenih ekstremno visokih naprežanja zadovoljiti određene zahtjeve. Konkretno su to:

- otpornost na toplinu,
- otpornost na trošenje,
- dobra klizna svojstva,
- toplinska vodljivost,
- mehanička (statička i dinamička) postojanost,
- kemijska otpornost na radne medije,
- sposobnost da se sitne tvrđe nečistoće koje upadnu između površina, utisnu u unutrašnjost mekanijeg ležajnog materijala te da ne dođe do oštećenja rukavca.

Kako bi pravilno odabrali ležajni materijal za izradu kliznog ležaja prvo što moramo ustanoviti koja je brzina stroja tj. rukavca i opterećenje na klizni ležaj. Postoje dvije osnovne grupe, a to su brzohodni i sporohodni strojevi. Postoje strojevi, odnosno strojni dijelovi kod kojih se klizanje obavlja titrajno tj. postoji zakret rukavca u oba smjera i drugih, kod kojih je klizanje rotacijsko. S gledišta razmatranja, važno nam je da li je klizanje brzo ili sporo. Promatrajući rad strojeva može se vidjeti da u njihovom radu uvijek postoje različita stanja kao što su: mirovanje, početak rada, normalno gibanje, zaustavljanje i opet gibanje. Za vrijeme mirovanja, brzina je jednaka nuli. U trenutku početka gibanja tj. upuštanja u rad te u stadiju zaustavljanja dolazi do perioda gibanja male brzine. Ukoliko je stroj sporohodan, onda će ti stadiji u cijelosti imati malu brzinu pokretanja. Kod brzohodnih strojeva, naprotiv, u stanju normalnog gibanja doći će do velike brzine. Prema tome u pogonu brzohodnih strojeva postojat će s gledišta brzine dvije različite dionice; jedna u kojoj su brzine gibanja niske, i druga, u kojoj su brzine gibanja visoke. U pravilu su periodi normalnog pogona mnogo dugotrajniji nego periodi pokretanja i zaustavljanja.

Većinom su dijelovi koji se međusobno taru od potpuno drugačijeg materijala, npr. rukavac od čelika, a ležaj od bijele kovine, bronce ili duromernog kompozita. Postoji više razloga zbog kojih je u pravilu potrebno razlikovati materijale dviju površina koje se međusobno taru. Na primjer kod posve istog materijala, kod povišene temperature koja se razvija uslijed suhog trenja, nastupit će zavarivanje između površina, oštećenje nastalo na rukavcu prouzročeno ovom pojavom može se vidjeti na slici 20.





Slika 20. Oštećenje rukavca uslijed pojave zavarivanja trenjem [29]

Ova pojava bit će manja što su dodirne površine od raznorodnijih materijala. Na primjer u sustavu *rukavac / klizni ležaj* uvijek se nastoji preusmjeriti mogući kvar na dio stroja koji je jeftiniji i jednostavniji za popravak, što je najčešće klizni ležaj u ovom sustavu. Da bi rukavac ostao minimalno oštećen nije samo dovoljno da je klizni ležaj od drugog materijala već da je od takvog materijala koji će se pri preopterećenju potrošiti prije rukavca. To se osigurava izborom materijala daleko nižeg tališta od čelika. Drugi nedostatak ovakvih materijala je da se povišenjem temperature smanjuju njihova mehanička svojstva. Radna temperatura kliznog ležaja trebala bi iznositi od 40 - 80 °C, maksimalno u nekim slučajevima 120 °C.

Zahtjevi koje je dodatno potrebno postaviti za ležajne materijalu su:

- Dobra vodljivost topline, da bi se što brže odvela toplina koja nastaje pri svladavanju trenja, kod kompozitnih ležajnih materijala ovo svojstvo teško je ostvarivo zbog izolatorskih svojstva polimernih i duromernih kompozita.
- Antikorozivnost na maziva koja sadrže određenu količinu kiselina i lužina.
- Dobra tehnološka svojstva, npr. malo toplinsko stezanje, dobra livljivost, dobro prijanjanje uz podlogu te dobra obradivost.
- Dobra mehanička svojstva pri radnoj temperaturi.

Promatramo li slitine i njihovu strukturu, postoje uglavnom dva tipa slitina. Polazeći od konstatacije da slitine moraju biti građene višefazno i to uz istodobno postojanje faza različitih

po tvrdoći, može se ustanoviti da kod jednog tipa slitina prevladava meka faza, a kod drugog tvrda.

Prvi tip slitina klasičan je ležajni materijal s visokim sadržajem kositra ili olova. Za ovaj tip slitina karakteristično je nisko talište, niska tvrdoća, niska tlačna čvrstoća te vrlo dobra savitljivost.

Drugi tip slitina s vrlo velikim vrijednostima kako tališta tako i vrlo dobrih mehaničkih osobina jesu bronce, najprisutnije su olovne bronce. Kod olovnih bronci prevladava udio tvrde faze, ali vrijednosti mehaničkih svojstava razmjerno su niske, također je solidus temperatura te slitine niska.

U osnovi ležajni materijali su podijeljeni na metale i nemetale.

Metalni ležajni materijali su razne vrste bronce, bijele kovine, aluminijske legure, sinterirani materijali te sivi lijev u nekim posebnim slučajevima. Za hidrostatičke i hidrodinamičke klizne ležajeve, bijela kovina kao ležajni materijal od velike je primjene u mnogim granama industrije. Prednost bijele kovine (kositrena i olovna bijela kovina) su njezina elastičnost tj. sposobnost da se ležaj prilagodi rukavcu. Klizna svojstva tih legura ovise o distribuciji i masenom udjelu legiranih elemenata. Današnja istraživanja o ležajnim materijalima najčešće su usmjerena kako bijelu kovinu efikasno zamijeniti polimernim i duromernim kompozitima.

Kod nemetalnih ležajnih materijala od velikog su značaja polimerni materijali. Polimerni ležajni materijali u osnovi su plastomeri i duromeri uz dodatak raznih punila i aditiva za poboljšanje kliznih svojstava te su namijenjeni za rad u području suhog i mješovitog trenja. Posjeduju manju mehaničku nosivost u odnosu na metalne ležajne materijale. Prednosti polimernih ležajnih materijala su dobro prigušenje vibracija, dobra elektro izolatorska svojstva te dobra kemijska postojanost na radne medije.

Kao adekvatna zamjena za metalne ležajne materijale razvijeni su polimerni kompoziti plastomerne i duromerne osnove.

Slitine koje u sebi sadrže velik maseni udio kositra ili olova nazivaju se kositrena ili olovna bijela kovina. Izborom i količinom legiranih elemenata definiramo mehanička, klizna i toplinska svojstva bijele kovine. Kositrene i olovne bijele kovine odlikuju se svojom ugibljivošću i prema tome sposobnošću da se ležaj geometrijski prilagodi, čak i uz razmjerno slabiju površinsku obradu. Ova skupina slitina odgovara za razmjerno manje specifične površinske pritiske. Za veće površinske pritiske te udarna i ciklička opterećenja primjena ovakvih slitina teško je moguća. Tada je potrebno primijeniti slitine druge skupine, kod kojih prevladava udio tvrdih faza i koje se odlikuju nosivošću. Zbog nedostatka ugibljivosti ova

skupina može biti primjenjiva samo u masivnim konstrukcijama i to uz vrlo preciznu obradu kako ležaja tako i rukavca.

Kositrena bijela kovina predstavlja klasičan tip ležajnog materijala. Ta slitina i danas posjeduje veliku primjenu u strojevima naročito kod lagano opterećenih brzohodnih kliznih ležajeva. Budući se ovu kovinu može promatrati kao trokomponentnu slitinu Pb-Sn-Sb može se reći da se ona nalazi u dva područja. Prvo područje je dvofazno, dok je drugo područje trofazno.

Prvo područje sastoji se od iglica  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  ili  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  u eutiktumu SnSb mješanaca. Slitine iz drugog područja sastoje se od primarnih iglica  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ , sekundarnih kockica mješanaca SbSn. Većinom se primjenjuju vrste drugog područja koje su jeftinije, a i tvrde te dopuštaju nešto veći površinski tlak. Skuplje vrste prvog područja dolaze u obzir kod udarnih opterećenja gdje je potrebna žilavost slitine.

Također ovaj tip slitine dobar je i po svom niskom koeficijentu toplinskog stezanja i po vrlo dobroj toplinskoj vodljivosti. Nedostatak kositrene bijele kovine je slaba dinamička izdržljivost koja kod titrajnih opterećenja uzrokuje pucanje ležajnog materijala.

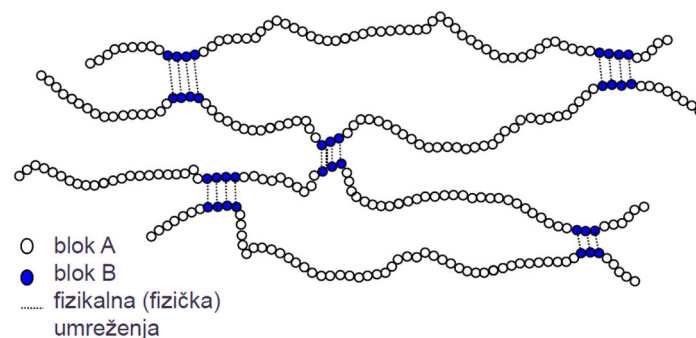
Olovna bijela kovina je razvijena je s ciljem smanjena cijene sirovine zbog manje cijene kovina koje se u njoj koriste u odnosu na kositrene bijele kovine koje su zbog velike cijene kositra značajno skuplje. Kod olovnih bijelih kovina prisutan je značajan udio antimona Sb. Prema koncentraciji antimona može se vidjeti da li se radi o slitinama približno eutektoidnog sastava, kod kojih se dobiva slična solidus temperatura kao i kod sustava SnSb koje smo prije razmotrili.

U prvom redu olovne slitine lakše se deformiraju pa se u ležaju brže povećava zazor. Osim toga ovaj tip slitina ima slabiju vodljivost topline zbog čega je njihova primjena za klizne ležajeve brzohodnih strojeva vrlo mala.

Vrlo dobar utjecaj na olovne slitine imaju dodaci kadmija, arsena, nikla i telura. Arsen usitnjuje strukturu, kadmij povećava čvrstoću i tvrdoću, nikal pospješuje žilavost i otpornost na koroziju, a telur pospješuje sitnozrnatost i homogenost strukture materijala. Povoljno djelovanje tih primjesa je tolika da se danas uglavnom primjenjuju samo ovakve legure olovne bijele kovine. Radna temperatura na kojoj se bijela kovina primjenjuje kao ležajni materijal je između  $60\text{ }^\circ\text{C}$  do  $70\text{ }^\circ\text{C}$  te ne bi smjela prijeći  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Maksimalno opterećenje rukavca na klizni ležaj od bijele kovine ne smije biti više od 18 MPa.

## 2.8 Polimerni materijali

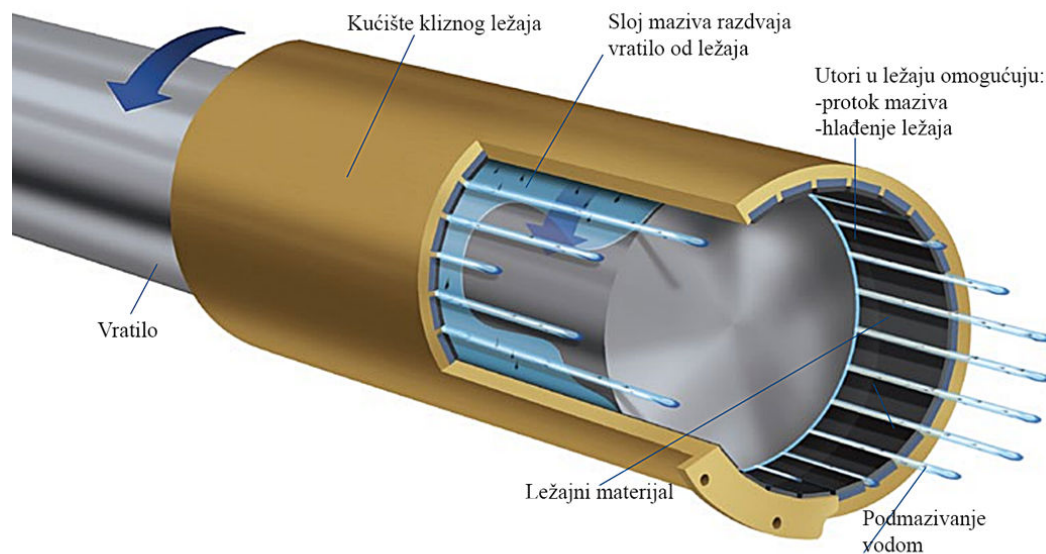
Polimerni materijali mogu se podijeliti na temelju njihova ponašanja pri povišenim temperaturama, a to su plastomeri, duromeri, elastomeri i elastoplastomeri. Elastoplastomeri karakteristični su po tome što se prerađuju kao plastomeri, a preoblikovanjem postižu svojstva slična elastomerima. Struktura elastoplastomera sastoji se od posebnih skupina blok-kopolimera ili cijepljenih kopolimera kod kojih su jedne skupine mera (A) plastomernog tipa, a druge skupine mera (B) elastomernog tipa kao što se može vidjeti na slici 21.



Slika 21. Struktura amorfnih elastoplastomera [25]

Duromeri, kao skupina materijala, sastoje se od prostorno gusto umreženih makromolekula povezanih kemijskim vezama te su netaljivi, netopljivi i ne bubre. Kod proizvodnje ležajnih materijala duromeri se upotrebljavaju uz dodatak punila ili ojačala s ciljem povećanja krutosti i čvrstoće. Takvi materijali se nazivaju duromerni kompoziti, a sastoje se od duromerne matrice te polimernih, staklenih, aramidnih ili ugljičnih vlakana u funkciji ojačala. Tipični duromeri za proizvodnju kompozita su poliesteri (PEST), vinilesteri (VE) te epoksidi (EP).

Elastomeri su skupina sintetičkih i prirodnih polimera čije su molekule međusobno povezane manjim brojem poprečnih fizikalnih (fluorove, vodikove, Van der Waalsove) i kemijskih veza. Karakterizira ih vrlo mala tvrdoća, visoka elastičnost, dobra temperaturna stabilnost te otpornost na trošenje. Ova skupina materijala pogodna je za izradu samo određenih specijalnih kliznih ležajeva podmazivanih vodom kao što je vidljivo na slici 22.



Slika 22. Elastomerni klizni ležaj

Plastomeri su najzastupljenija skupina polimera čije su molekule međusobno povezane fizikalnim vezama te su zastupljene s udjelom od 90 % ukupne proizvodnje polimera. Najrašireniji predstavnici po opsegu proizvodnje i primjeni su polietilen (PE), polipropilen (PP), poli(vinil-klorid) (PVC), polistiren (PS), poli(etilen-terftalat) (PET). Prema stupnju određenosti strukture plastomeri mogu biti amorfni, kristalni te djelomično kristalni kao što se može vidjeti na slici 23.

Amorfna struktura plastomera može se opisati nepravilnim prostornim razmještajem na većoj prostornoj skali tj. ne postoje uređene strukture reda veličine valne duljine svjetlosti pa nema loma svjetlosti što čini homogene amorfne polimere prozirnima ukoliko nemaju dodatka pigmenta ili ojačala. Svojstva amorfni polimera su dobra dimenzija stabilnost, niska sklonost puzanja, niska otpornost na kemikalije, krutost i krhkost pada s povišenjem temperature. Ovaj tip polimera pogodan je za izradu raznih dijelova kućišta nekog slabije opterećenog stroja ili uređaja.

Kristalna struktura je nakupina prostorno složenih lanaca. Takve skupine nastaju radi djelovanja međumolekulskih sila, a jačanjem sekundarnih veza između linearnih molekula dolazi do stvaranja bolje usklađenosti kristalne strukture. Većina polimernih materijala je djelomično kristalne strukture tj. makromolekule polukristalnih polimera formiraju kristalnu strukturu u nekim područjima.

Polimeri djelomično kristalne strukture su općenito neprozirni te mogu izdržati povećana mehanička opterećenja iznad temperature staklišta  $T_g$ . Prednosti ovog tipa polimera su dobra kemijska otpornost, dobra klizna svojstava, otpornost na trošenje, dobra otpornost na zamor te se može zaključiti da su polimeri iz ove skupine vrlo dobri materijali za izradu kliznih ležajeva.

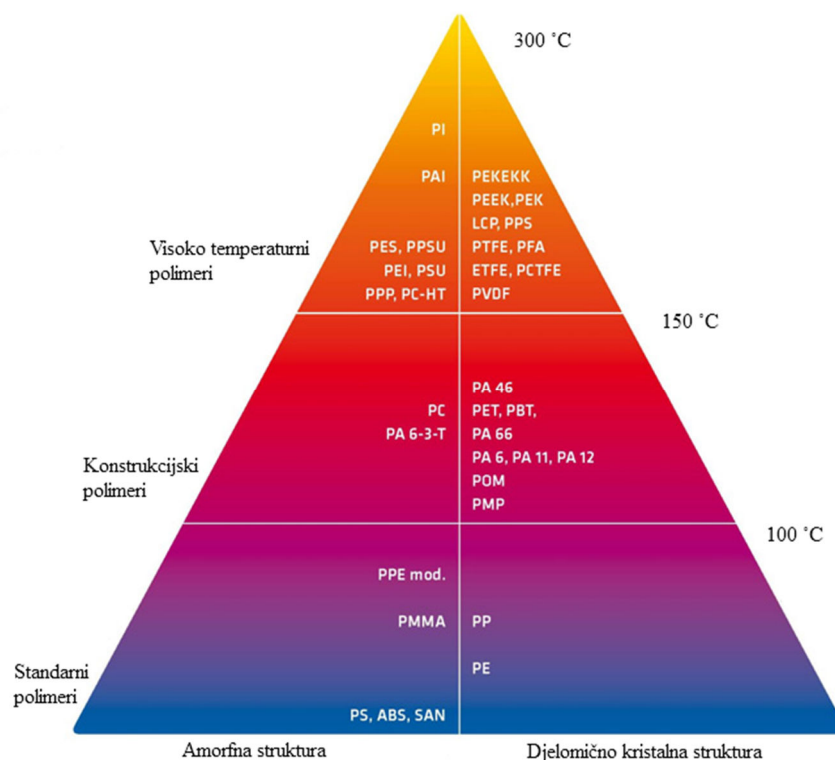


Slika 23. Strukture plastomera [25]

Tehnički upotrebljivi polimeri za izradu kliznih ležajeva sastoje se od polimera s raznim dodacima za poboljšanje mehaničko-triboloških svojstava. Dodatke čistim polimerima se može podijeliti u nekoliko skupina, a to su:

- Reakcijske tvari – pjenila, dodaci za smanjenje gorivosti, umrežavala.
- Dodaci za poboljšanje prerađljivosti – maziva, odvajala, punila, toplinski stabilizatori, regulatori viskoznosti, tiksotropni dodaci.
- Modifikatori mehaničkih svojstava – omekšavala, dodaci za povišenje žilavosti, punila, prijanjala, ojačala.
- Modifikatori površinskih svojstava – regulatori adhezivnosti, vanjska maziva, antistatici, dodaci za smanjenje sljublivanja, za smanjenje neravnina na površini.
- Modifikatori optičkih svojstava – bojila, pigmenti.
- Dodaci za poboljšanje postojanosti – svjetlosni stabilizatori (UV), antioksidansi, antistatici, biocidi.
- Ostalo – mirisi, dezodoransi.

Kao ležajni materijal najčešće se koriste konstrukcijski polimeri za slabije opterećene konstrukcijske dijelove te visokotemperaturne polimere za teške radne uvjete. Njihova detaljnija podjela može se vidjeti na slici 24.



Slika 24. Vste polimera [125]

Visoko temperaturni polimeri postojani su na trajno opterećenje temperaturom i do 320 °C, a da pri tome ne dođe do značajnih promjena u makromolekularnoj strukturi materijala. Toplinska postojanost ovakvih materijala u ovisnosti je o jačini mehaničkog opterećenja koje izaziva određene deformacije materijala koje ne smiju biti prevelike. Neki visoko temperaturni polimeri su vrlo dobri ležajni materijali za rad pri povećanim radnim temperaturama (130 °C do 250 °C) uz zadovoljavajuću čvrstoću, mali faktor trenja i mali stupanj trošenja koji obuhvaća neki tribološki sustav. U zrakoplovnoj industriji koriste se klizni ležajevi od Polyimida (PI) za visokotlačne pumpe pogonskog mehanizma. Dodatno podmazivanje kod ovog tipa ležaja nije potrebno što je od velike prednosti jer pri visokim temperaturama odabir maziva je vrlo otežan iz razloga što dolazi do promjene kemijske strukture maziva te je potrebna njegova učestala zamjena [12], [50].

Visoko temperaturni polimeri mogu se koristiti kao ležajni materijali u kombinaciji s mekanim materijalima kao što je na primjer rukavac od aluminija [44].

Poli(eter-eter-keton) (PEEK) temperaturno je postojan do 260 °C te do temperature od 200 °C nema značajnih promjena u mehaničkim svojstvima. PEEK se vrlo rijetko koristi u svom osnovnom obliku zbog slabe otpornosti na UV zračenje te se vrlo često koristi u kombinaciji sa staklenim ili ugljičnim vlaknima uz dodatak ugljika kako bi poboljšali otpornost na UV zračenje. Tako legirani polimeri pokazuju odlična mehanička svojstva te u nekim slučajevima

s njima se može zamijeniti olovnu broncu. PEEK posjeduje dobru kemijsku otpornost, otpornost na gama zračenja te dobra mehanička svojstva uz malo trenje i trošenje što ga čini idealnim materijalom za primjenu u medicinskoj industriji kao na primjer za izradu čašice tj. kliznog ležaja koji se nalazi u kontaktu s umjetnim kukom od čelika otpornog na koroziju u ljudskom organizmu.

### 2.9 Fizikalna stanja polimera

Promjena mehaničkih svojstva nekog polimernog materijala ne ovise samo o naprezanju već i o temperaturi, vremenu u kojem se neka mehanička promjena koja je najčešće prisutna u obliku neke deformacije promatra. Načini opterećenja polimera mogu se podijeliti u dvije skupine, a to su kratkotrajna i dugotrajna opterećenja. Kratkotrajna opterećenja se mogu podijeliti na udarno opterećenje koje utječe na žilavost materijala te statičko opterećenje koje utječe na čvrstoću, modul elastičnosti i tvrdoću materijala. Dugotrajna opterećenja, bilo da se radi o statičkom djelovanju koje za materijal ima za posljedicu njegovo puzanje u ovisnosti o vremenu te prilikom dinamičkog opterećenja najčešće dolazi do umora materijala. Promatramo li polimer u uvjetima opterećenja, kod njega postoje tri različite skupine fizičkih stanja u kojim se on može pronaći, a to su:

- Staklasto
- Gumasto
- Kapljasto

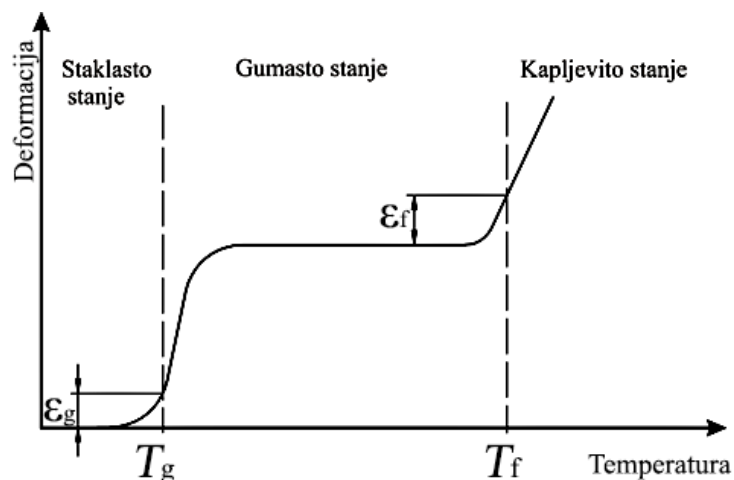
Za konstrukcijsku primjenu kapljasto stanje nije od značaja, dok čvrstom stanju materijala odgovara staklasto i gumasto stanje. Polimeri prelaze iz jednog stanja u drugo dostizanjem temperature pri kojoj se bitno mijenja prosječna energija toplinskog gibanja segmenata makromolekula pa promjene temperatura nisu oštre te postoje prijelazna područja koja se mijenjaju u ovisnosti o vrsti polimera.

Ovisnost deformacije, uzrokovana je vanjskim opterećenjem, o vremenu je moguće predočiti termomehaničkom krivuljom na kojoj su vidljiva tri deformacijska područja linearnog amorfno polimera kao što je dano na slici 25.

Prijelaz iz staklastog u gumasto stanje karakterizira se temperaturom staklastog prijelaza te se označuje kao  $T_g$  (staklište), dok se prijelaz iz gumastog u kapljevitost stanje označuje se kao  $T_f$  (tecište).



Sporazumno se temperature  $T_g$  i  $T_f$  određuju kao one koje pri kojima polimer doživljava određene, dogovorene vrijednosti deformacije  $\varepsilon_g$  odnosno  $\varepsilon_f$ .



Slika 25. Termomehanička krivulja [25]

S gledišta konstrukcijske primjene kod amorfni plastomera značajna je samo temperatura staklastog prijelaza  $T_g$  na kojoj dolazi do značajnijeg gubitka mehaničkih svojstava i mogućnosti obavljanja funkcije.

Kristalasti polimeri iznad temperature staklišta  $T_g$  ostvaruju vrlo malu gumastu deformaciju jer u kristalnoj rešetki postoje vrlo velika energijska ograničenja ka promjeni konformacije makromolekula. Dostizanjem temperature taljenja kristalita  $T_m$  dolazi do nestajanja kristalnog poretka. Kod većine kristalnih polimera koji su tehnički upotrebljivi vrijedi da je  $T_m < T_f$  te se može kazati da prije prijelaza u kapljevito stanje najprije postanu amorfni i ostvaruju visoke iznose gumaste deformacije. U tablici 1 dane su temperature staklišta  $T_g$  i temperature taljenja kristalita  $T_m$  za neke plastomere.

Tablica 1. Temperatura staklišta i temperatura taljenja kristalita

	Temperatura staklišta $T_g / ^\circ\text{C}$	Temperatura taljenja kristalita $T_m / ^\circ\text{C}$
POM	-82	175
PP	-13	183
PVC	81	285
PPS	84	285
PEEK	145	335
PEEKK	150	365
PEKEKK	160	384

## 2.10 Podmazivanje

Mnogi polimerni materijali uz neke iznimke (npr. visoko molekularni polietilen (UHMWPE) i politetrafluoretilen (PTFE) ) imaju velik faktor trenja te se može zaključiti da imaju i veliki stupanj trošenja. Podmazivanje je stoga za smanjenje trenja polimernih materijala od velikog značaja.

Cilj podmazivanja je smanjenje trenja i trošenja te ostalih popratnih pojava kao što je bubrenje ležajnog materijala. Tek preko podmazivanja u određenim slučajevima može se predvidjeti životni vijek nekog tarnog para. Mazivo treba uzeti u obzir kao dio konstrukcijskog elementa nekog tribološkog sustava koji se nalazi u funkciji međutijela nekog tarnog para.

Zahtjevi za podmazivanje su sljedeći:

- Veliko smanjenje faktora trenja.
- Što kraće vrijeme potrebno za uhodavanje stroja u pogon.
- Visoka otpornost na temperaturu.
- Kemijska postojanost na polimere.

Podmazivanje polimera može se podijeliti na:

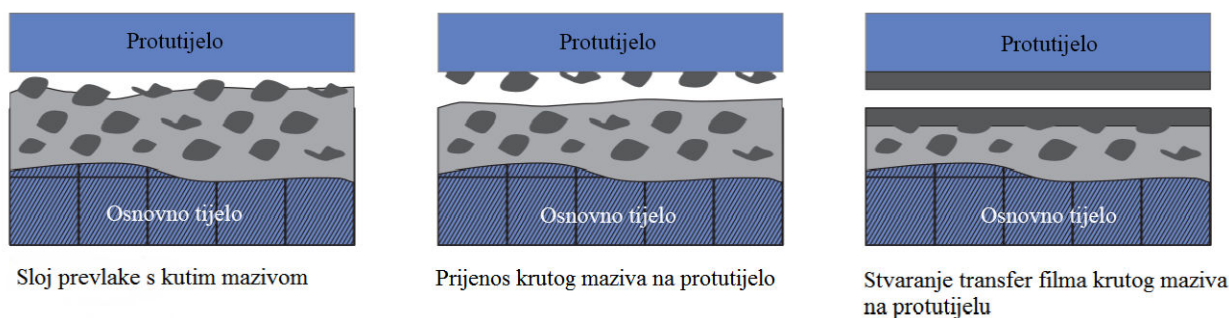
- Tradicionalno (klasično) podmazivanje.
- Integrirano mazivo unutar polimernog materijala.
- Prevlaka krutog maziva.

Kod klasičnog podmazivanja najčešći način je podmazivanje nekim konzistentnim mazivom (ulje ili mast) koje se nalazi između osnovnog tijela i protutijela. Važno je da se mazivo odabere prema radnim parametrima za polimerne materijale. Od posebnog je značaja da mazivo bude kemijski kompatibilno s polimernim materijalima [44].

Interakcija između polimera kao osnovnog tijela, maziva kao međutijela može u nekim slučajevima dovesti do loma, bubrenja ili otapanja polimernog materijala. Oštećenje polimernih materijala ne ovisi samo o trenju i mazivu već o cijelom tribološkom sustavu [42], [51].

Integrirana maziva nalaze se unutar strukture polimernog materijala. Mogući su dodaci polimerima poput krutih maziva kao npr. ugljik, PTFE, MoS<sub>2</sub> i tekuća maziva poput sintetičkih ulja. Pri početku kretanja između osnovnog tijela i protutijela ne postoji sloj maziva. Ova početna faza bez sloja maziva traje za vrijeme uhodavanja stroja te u tom razdoblju se može očekivati najveće trošenje. Nakon vremena potrebnog za uhodavanje, transfer film maziva će se formirati na protutijelu kao što se može vidjeti na slici 26 te će trošenje biti smanjeno [1], [35].

Prevlake čvrstih maziva vrlo se često upotrebljavaju kod podmazivanja polimernih materijala. Kod ovog tipa podmazivanja pri uhodavanju stroja, mazivo s površine osnovnog tijela prelazi na protutijelo te dolazi do postupnog smanjenja trenja. Tipovi maziva za ovu primjenu su najčešće DLC (diamond like carbon) koji se koriste u medicinskoj industriji te PTFE i MoS<sub>2</sub> sprejevi koji nakon sušenja ostaju na površini polimera. Ova metoda također može se koristiti vrlo efikasno za podmazivanje kompozitnih polimera. Danas se za ovu primjenu razvijaju posebna ulja sintetske osnove koje se postupkom raspršivanja nanose na podlogu.



Slika 26. Stvaranje transfer filma krutog maziva na protutijelu

Istraživač Domitran je ispitivao klizna svojstva PET materijala uz podmazivanje sintetskim mazivom u obliku laka [39]. Ispitivanja su pokazala značajno poboljšanje mehaničko triboloških svojstava PET materijala u odnosu na rad bez maziva.

## 2.11 Prevlake maziva

Prevlake maziva su disperzija krutih maziva u organskim i anorganskim spojevima. Topljivi su u vodi ili organskim otapalima. Nakon stvrdnjavanja na podlozi stvaraju suh i čvrst sloj maziva [52]. Prevlake se često koriste kao dopuna tekućim ili konzistentnim mazivima. Njihova funkcija je smanjenje trošenja, trenja, stick –slip efekta te sprečavanje korozije. U nekim slučajevima prevlake maziva služe kako bi dovele faktor trenja na određenu vrijednost kako bi se npr. osigurala samokočnost spojeva.

Prevlake maziva posebno su postojane kod trenja klizanja, dok ih je kod trenja kotrljanja potrebno izbjegavati.

Sloj prevlake maziva koji se nalazi na osnovnom tijelu vrlo je osjetljiv na veliku površinsku hrapavost tvrdog protutijela. Zato je potrebno voditi računa o adekvatnoj hrapavosti površine kako bi trošenje mazivog sloja bilo što manje.

Prevlake maziva koriste se kao površinska maziva kliznih ležajeva ili rukavaca, njihova funkcija ne mora biti samo podmazivanje npr. elastomerne brtve tipa O-prsten (O-ring) mogu imati vanjski sloj od PTFE-a kao što se vidi na slici 27. Razlog tome je ne samo da se smanji trenje već da bi se ostvarila funkcija postojanosti geometrije oblika radi lakše montaže te poboljšanja kemijske postojanosti elastomera ne neki radni medij.



Slika 27. Elastomerni O-Ring sa slojem PTFE-a

Prednosti prevlaka krutih maziva su:

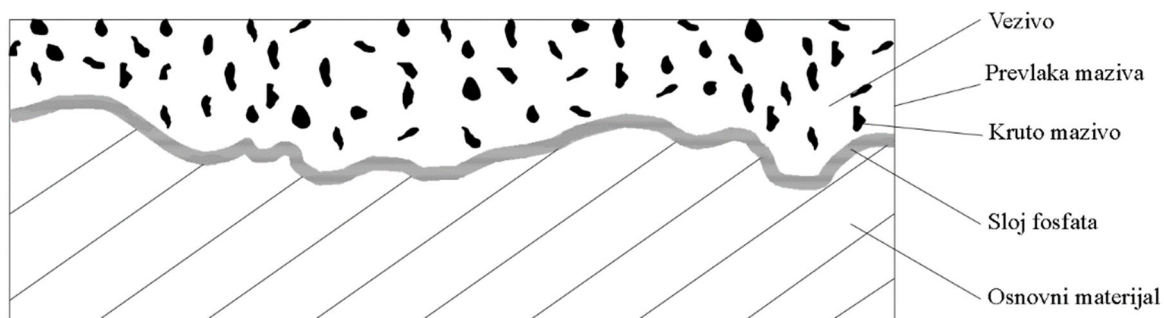
- Konstantan i mali faktor trenja
- Suhi film maziva
- Dopušteni vrlo visoki pritisci na sloj maziva
- Nepotreban sustav podmazivanja.

Nedostaci prevlaka krutih maziva:

- Ograničen životni vijek
- Pojava čestica abrazije
- Loše odvođenje topline.

## 2.12 Sastav prevlaka

Prevlake se najčešće sastoje od krutih maziva, veziva, otapala te dodatnih aditiva ako su potrebni za neke određene radne uvjete. Na slici br. 28 prikazani su slojevi krutih prevlaka. Klizna prevlaka je u pravilu debljine od 7  $\mu\text{m}$  do 15  $\mu\text{m}$ , dok je fosfatni sloj debljine 3  $\mu\text{m}$  do 8  $\mu\text{m}$ .



Slika 28. Slojevi prevlaka

Osnovna funkcija veziva je otpornost na trošenje, temperaturna postojanost kao i dobra svojstva prijanjanja na polimernu ili metalnu površinu. Kao vezivo koriste se organske smole i anorganske supstance. Anorganska veziva su uglavnom na bazi stakla i soli, vrlo su postojane na visoke radne temperature od 500 °C do 800 °C te su vrlo otporne na trošenje. Organska veziva na bazi epoksidne ili fenolne smole postojana su do maksimalne radne temperature od 310 °C. Sljedeća odlika ovih veziva je dobro svojstvo prijanjanja na naneseu podlogu te dobra kemijska postojanost na razne medije koji se nalaze u okolini prevlake.

Vrsta krutog maziva određuje tribološka svojstva prevlake. Najčešće korištena kruta maziva su PTFE, MoS<sub>2</sub> te grafit. Njihova svojstva mogu se vidjeti u tablici 2.

Tablica 2. Svojstva krutih maziva

Svojstva	PTFE	Grafit	MoS <sub>2</sub>
Maks. radna temperatura / °C	250	600	400
Tvrdoća	mala	mala	mala
Gustoća / g/cm <sup>3</sup>	2,2	2,2	4.8
Opteretivost / MPa	20	300	3000
Kemijska postojanost	vrlo dobra	vrlo dobra	dobra

Faktor trenja PTFE-a je u vakuumu kao i u normalnoj atmosferi približno konstantan te je vrlo malen uz dobru kemijsku kompatibilnost na razne medije. Nedostatak PTFE-a je vrlo nizak

kapacitet nošenja opterećenja. Također, mehanička svojstva ovog materijala značajno se smanjuju povećanjem radne temperature. Stoga se može zaključiti da se dopušteni kapacitet nošenja opterećenja smanjuje s porastom radne temperature.

Grafit u prisutnosti vlage ili u nekom tekućem radnom mediju pokazuje vrlo dobra klizna svojstva, međutim neprimjeren je za upotrebu u vakuumu. Nedostatak grafita je da u nekim određenim radnim uvjetima može uzrokovati pojavu galvanske korozije [6], [53].

Molibden disulfid ( $\text{MoS}_2$ ) u odnosu na druga kruta maziva posjeduje vrlo visoki kapacitet nošenja opterećenja pri visokim radnim temperaturama uz dobra klizna svojstva, ali je neprikladan za upotrebu u vlažnim atmosferama. Također je poznato da  $\text{MoS}_2$  može uzrokovati koroziju, ako radna temperatura pređe  $350\text{ }^\circ\text{C}$ . Pri toj temperaturi  $\text{MoS}_2$  oksidira i stvara sulfatnu kiselinu. Korozija se može pojaviti i pri drugim radnim uvjetima. Zato je bitno poznavati primjenu određenih krutih maziva za određen tip radnih uvjeta.

Nova vrsta krutog maziva je polarizirani grafrit koji posjeduje dobra svojstva  $\text{MoS}_2$  i grafita vezano za dopušteno opterećenje, temperaturnu stabilnost te mazivosti bez loših svojstava poput stvaranja korozije.

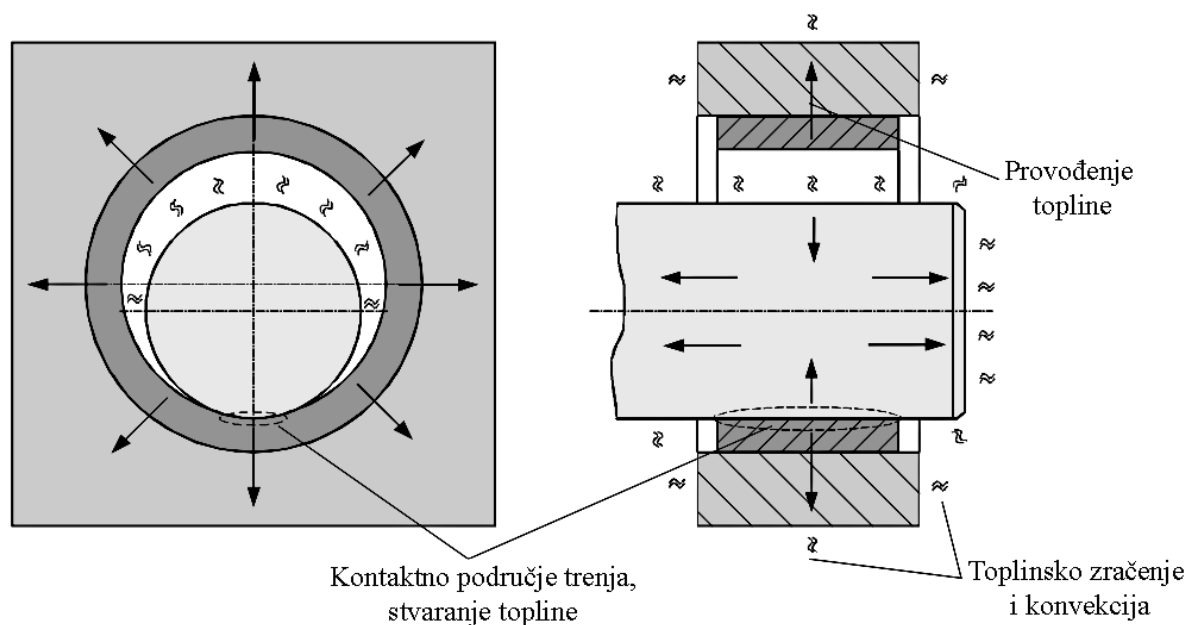
Pri nanošenju na podlogu, prevlaka se otopi u organskom otapalu ili vodi. Otapalo određuje debljinu sloja prevlake te kvalitetu nanošenja na podlogu tj. osnovno ili kontra tijelo.

Vezivo, kruto mazivo, debljina prevlake kao i svojstvo slojeva opisano na slici 28, koja se nalaze u prevlaci, bitno određuju njena klizna svojstva.

Kompozitni ležajni materijali polimerne i duromerne osnove najčešće posjeduju PTFE prevlaku zato što ovaj tip prevlake posjeduje mali faktor trenja i dobru kemijsku otpornost. Također kod kompozitnih materijala postoje i prevlake od  $\text{MoS}_2$  i grafita. Kod prevlaka od  $\text{MoS}_2$  treba voditi računa o načinu njihove primjene. Istraživanja su pokazala da u tekućim radnim medijima poput slane vode dolazi do bubrenja kompozita s dodatkom  $\text{MoS}_2$  što dovodi do smanjenja zračnosti između ležaja i rukavca što za posljedicu ima zaribavanje rukavca [35].

## 2.13 Toplinsko opterećenje

Toplinsko opterećenje može se definirati kao povišenje temperature ležaja koja je rezultat pretvorbe mehaničke energije trenja u toplinu zbog relativnog gibanja između kliznog ležaja i protutijela uz djelovanje mehaničkog opterećenja. Istraživanja pokazuju da se približno 84 % do 91 % generirane energije trenja pretvori u toplinu. Ostatak energije trenja iskoristi se za proces loma, deformacije materijala te preoblikovanje strukture materijala [54]. Na slici 29 može se vidjeti područje dodira u sustavu *klizni ležaj / rukavac* te područje stvaranja topline. Posljedica toplinskog preopterećenja može biti topljenje ležajnog materijala ukoliko se radi o plastomerima ili odvajanje matrice od ojačala, ako se radi o duromernim kompozitima. Druga pojava karakteristična za oba tipa materijala je prevelika deformacija materijala koja dovodi do povećanja kontaktne površine između kliznog ležaja i rukavca koja za posljedicu ima povećanje dodirne površine koja uzrokuje prekomjerno stvaranje topline. U konačnici to dovodi do brzog zaribavanja ležajnog materijala [55].



Slika 29. Stvaranje topline u sustavu klizni ležaj/rukavac

Kompozitni ležajni materijali koji rade u suhim radnim uvjetima bez dodatnog podmazivanja klasičnim metodama bilo da se radi o ulju ili masti, posjeduju relativno visok faktor trenja, tako da pri velikim brzinama i velikim obodnim brzinama rukavca može doći do stvaranja visoke temperature koja može biti veća od dopuštene radne temperature ležajnog materijala. Tako može doći do zaribavanja kliznog ležaja [26]. Ležajni materijali predviđeni za suhe radne uvjete

predviđeni su u većini slučajeva za rad pri visokim opterećenjima pri vrlo niskim obodnim brzinama [13], [24].

Proračun temperature u dodiru kliznog ležaja i rukavca se može dobiti preko toplinskog toka oslobođenog iz gubitaka nastalim iz trenja, tj. iz snage potrebne za svladavanje trenja kao što se može vidjeti u jednadžbi (8), (9).

$$P_r = \dot{Q} \quad (8)$$

$$P_r = F_T \cdot v_r = M_T \cdot \omega_r = \mu \cdot p \cdot r \cdot B \cdot D \quad (9)$$

Ovaj način proračuna prema jednadžbi (9) pogodan je za orijentacijski proračun, no kako bi precizno izračunali toplinski tok, potrebno je faktor trenja utvrditi eksperimentalnim putem. Kompliciranije je određivanje odvedenog toplinskog toka prema jednadžbi (10).

$$\dot{Q}_{uk} = \dot{Q}_p + \dot{Q}_k + \dot{Q}_z \quad (10)$$

Toplina se u sustavu *klizni ležaj / rukavac* prenosi na tri različita načina, a to su:

- Provođenje (kondukcija)  $\dot{Q}_p$
- Konvekcija  $\dot{Q}_k$
- Zračenje  $\dot{Q}_z$

Prijelaz toplinskog toka iz sustava na okoliš ključna je za oblikovanje geometrije kliznog ležaja kao i pravilan odabir ležajnog materijala. Jednadžbe od (11) do (13) su osnovni izrazi za prijenos toplinskog toka.

$$\dot{Q}_p = A \cdot \frac{\lambda}{\delta} (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (11)$$

$$\dot{Q}_k = A \cdot \alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (12)$$

$$\dot{Q}_z = C_{12} \cdot A \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (13)$$

Za sustav *klizni ležaj / rukavac* postoje određeni nedostaci, a to su [56]:

- Točno određivanje prijelaza topline vrlo je teško odrediti bez eksperimentalnih istraživanja.
- Zbog neuravnoteženog provođenja topline, temperaturni gradijent je neovisan o smjeru.
- Približno određivanje temperature, konkretno dva tijela u dodiru npr. kliznog ležaja i okolne konstrukcije ležaja vrlo je komplicirano odrediti točne vrijednosti omjera kontaktnih površina [11].



- Koeficijent toplinske provodnosti  $\alpha$  za kompozitne materijale ovisan je mnogo parametara koji utječu na njegovu vrijednost. Najčešće se koeficijent toplinske provodnosti određuje eksperimentalnim putem.

Matematički opis toplinskog toka za sustav *klizni ležaj / rukavac* vrlo je teško opisati konvencionalnim metodama, ako u matematički opis uključimo i eksperimentalni dio koji značajno poskupljuje istraživanja, što je za upotrebu u praktičnim realnim sustavima teško primjenjivo [56], [57]. Zato se koriste pojednostavljenje matematičke formule za proračun toplinskog toka. Toplinski tok u sustavu *klizni ležaj / rukavac* ovisan je o njihovim konstrukcijskim karakteristikama te o koeficijentu prolaza topline  $k$ .

Jednadžbom (14) može se pomoću koeficijenta prolaza topline opisati toplinski tok sustava *klizni ležaj / rukavac*:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T \quad (14)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_a} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_b}} \quad (15)$$

U jednadžbi (15) opisan je koeficijent prolaza topline koji je jednak recipročnoj vrijednosti sume specifičnih toplinskih otpora. Treba napomenuti da veličina  $1/\alpha$  predstavlja specifični toplinski otpor prijelaza topline kroz granični sloj, a  $\delta/\alpha$  označuje specifični toplinski otpor provođenja topline kroz stjenku [58].

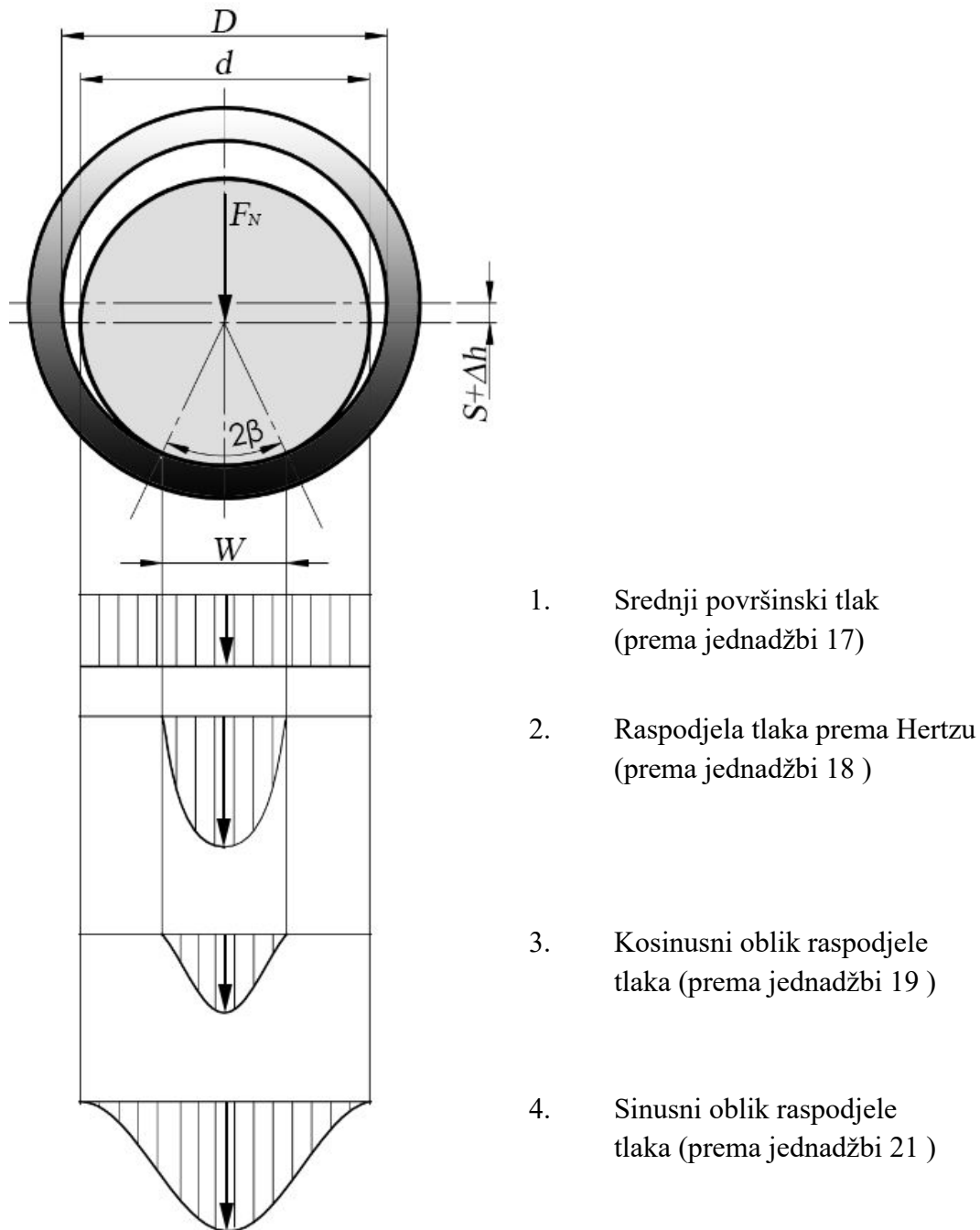
Prema istraživanjima koeficijent prolaza topline za sustav *polimerni klizni ležaj / rukavac* iznosi od 1 W/(m<sup>2</sup>K) do 10 W/(m<sup>2</sup>K) ovisno o udjelu legirnih elemenata na bazi metala, dok za sustav *kompozitni klizni ležaj / rukavac* bez dodatka legirnih elemenata na bazi metala on iznosi od 0,9 W/(m<sup>2</sup>K) do 1,5 W/(m<sup>2</sup>K) [55].

Povećanje faktora trenja rezultira povećanjem ležajne temperature  $\Delta T$  koji se može izraziti jednadžbom (16).

$$\Delta T = \frac{\mu \cdot p \cdot v \cdot B \cdot D}{k \cdot A} \quad (16)$$

## 2.14 Dinamičko opterećenja

Opasnost od mehaničkog preopterećenja kliznog ležaja, najčešće nastaje zbog prevelikog opterećenja na površinu kliznog ležaja. Posljedica preopterećenja su prevelike elasto-plastične deformacije kliznog ležaja.



Slika 30. Površinski tlak na klizni ležaj

Elastične ili plastične deformacije materijala ovisno o vrsti ležajnog materijala mogu izazvati razna oštećenja kao što se može vidjeti na slici 31 pod a) koja prikazuje oštećenja sinterirane bronce uslijed dinamičkog opterećenja, pod b) prikazana su oštećenja polimera ojačanih staklenim vlaknima pri djelovanju povišene temperature, dok se pod c) može vidjeti deformacija poliamida 66 (PA66) uslijed trajnog opterećenja.



Slika 31. a) Oštećenje sinterirane bronce, b) oštećenje polimera sa staklenim vlaknima, c) oštećenje PA66 [61]

U praksi se vrlo često za proračun koristi srednji površinski tlak  $p$  koji je opisan jednadžbom (17) koja se sastoji od normalne sile  $F_N$  koja djeluje na ležaj te diobenog promjera ležaja  $D$  i dužine ležaja  $B$ .

$$p = \frac{F_N}{B \cdot D} \quad (17)$$

Stvarni površinski tlak  $p_{\max}$  može biti višestruko veći od srednjeg tlaka  $p$  te se mijenja u ovisnosti o radnim uvjetima i zbog različitih veličina kontaktne površine između kliznog ležaja i protutijela tj. rukavaca.

U početku teoretska dodirna linija između kliznog ležaja i protutijela postupno se širi zbog trošenja i deformacije mekšeg ležajnog materijala.

Maksimalni površinski tlak  $p_{\max}$  ovisi o:

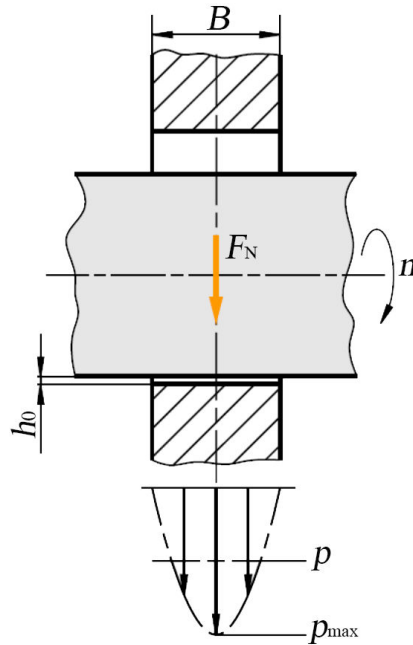
- Zračnosti kliznog ležaja
- O trošenju
- Opterećenju na ležaj
- O modulu elastičnosti  $E$  ležajnog materijala

Pri izračunu maksimalnog površinskog tlaka  $p_{\max}$  razlikujemo dva osnovna slučaja.

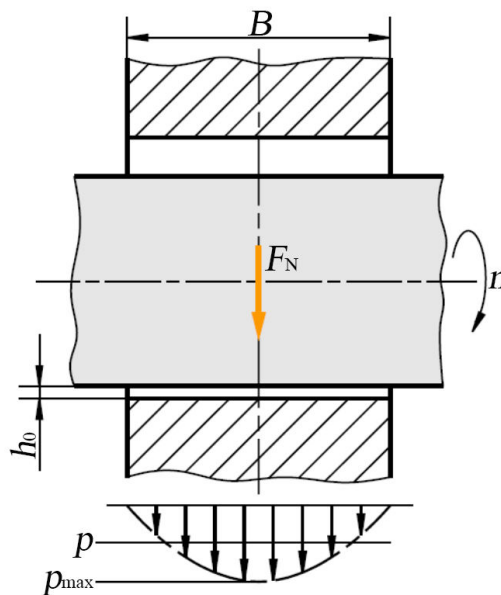
U prvom slučaju za male dodirne površine između kliznog ležaja i rukavca kao što je vidljivo na slici 32 površinski tlak  $p_{H,\max}$  prema Hertzovoj teoriji [59] za plastomerne materijale opisan je jednadžbom (18).

$$p_{H,max} = 0,836\sqrt{p \cdot E_k \cdot \psi} \quad (18)$$

Za drugi slučaj gdje imamo veliku površinu dodira ( $W \geq d/6$ ) kao što se može vidjeti na slici 33, pri maloj zračnosti i/ili malom modulu elastičnosti ležajnog materijala postoji više modela proračuna maksimalnog površinskog tlaka  $p_{max}$



Slika 32. Distribucija površinskog tlaka pri maloj površini dodira između rukavca i ležaja



Slika 33. Distribucija površinskog tlaka pri velikoj površini dodira između rukavca i ležaja

Istraživači Detter i Holecek [60] opisuju u svom radu kosinusni oblik raspodjele opterećenja maksimalnog površinskog tlaka koji je izražen jednažbom (19) i (20).

$$p_{c,\max} = \frac{F_N \cdot \left[ \left( \frac{90^\circ}{\beta} \right) - 1 \right]}{d \cdot B \cdot \frac{90^\circ}{\beta} \cdot \cos \beta} \quad (19)$$

$$\gamma = \arccos \frac{W}{d} \quad (20)$$

Približno rješenje maksimalnog površinskog tlaka na temelju sinusnog oblika opisali su istraživači Erhard i Strickle [61], [62] jednažbom (21).

$$p_{s,\max} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{F_N}{d \cdot B} \quad (21)$$

Također istraživači Erhard i Strickle [61], [62] na pretpostavci sinusne raspodjele tlaka na klizni ležaj uzimaju u obzir samo 75 % projicirane površine rukavca koji je u dodiru s kliznim ležajem, za taj slučaj maksimalni površinski tlak izražen je jednažbom (22).

$$p_{vs,\max} = \frac{16}{3\pi} \cdot \frac{F_N}{d \cdot B} \quad (22)$$

## 2.15 Dopušteno trošenje pri dinamičkom opterećenju

Uzrok trošenja kliznog ležaja od plastomera ili kompozita te njegovog kontra tijela ovisi o spektru opterećenja koja se javljaju u nekom tribološkom sustavu. Trošenje se može pojaviti u raznim oblicima kao što su čestice materijala, razne deformacije, puknuća itd.

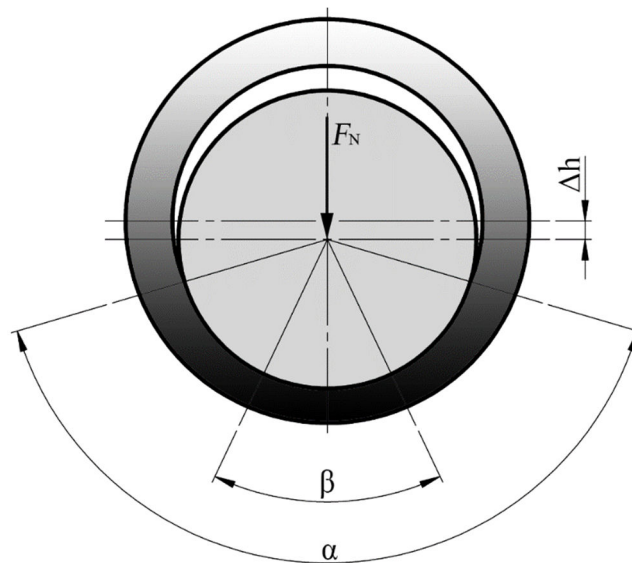
Trošenje plastomernog ili kompozitnog ležajnog materijala vrlo je komplicirano matematički opisati iz razloga što je teško predvidjeti područje kliznog kontakta dvaju tijela.

U osnovi postoji dva osnovna principa kako utvrditi trošenje.

Istraživač Kragerski [63] stavlja u prvi plan fizikalno-geometrijski sustav koji je osnova za geometrijsko-mehanički model. Trošenje prema njegovoj teoriji nastaje abrazijom i deformacijom koja je uzrokovana naprezanjem i silom koja uzrokuje opterećenje na strukturu ležajnog materijala.

Polazeći od istraživanja Trossa [64], [65], istraživač Fleischer [66], [67] razvio je energijsku formulaciju trošenja na principu gustoće energije razvijene u procesu trošenja. Osnova ove teorije su energetski procesi trenja i trošenja na mikroskopskoj i makroskopskoj razini. Bitna prednost energijskog modela je razmatranje trošenja kao mikroskopskog i makroskopskog područja koja potječu iz procesa trošenja, na koje tip opterećenja nema utjecaja.

Erhard / Stricke [61], [62] i drugi razvili su metodu vezanu za određivanje dopuštenog trošenja u ovisnosti o zračnosti kliznog ležaja i obuhvatnog kuta dodira i kuta smjera opterećenja  $\beta$  kao što se može vidjeti na slici 34. Treba naglasiti da određivanje maksimalnog dopuštenog trošenja ovisi o primjeni kliznog ležaja te ne smije biti veće od debljine stijenke ležaja. Ova teorija se najčešće primjenjuje za proračun trošenja kompozitnih ležajnih materijala. Kut  $\alpha + \beta$  za metalne ležajne materijale iznosi od  $60^\circ$  do  $100^\circ$  dok za kompozitne materijale iznosi od  $100^\circ$  do  $160^\circ$  te ne smije prijeći  $170^\circ$ .



Slika 34. Obuhvatni kut dodira kliznog ležaja i rukavca

## 2.16 Opis trošenja

Istraživač Lanchester [47] utvrdio je za tarne parove pri radu na suho, povezanost između parametara opterećenja i promjene volumena nastalog prilikom procesa trošenja te ga je nazvao volumen trošenja s oznakom  $W_v$ . Volumen trošenja  $W_v$  proporcionalan je normalnoj sili na ležaj  $F_N$  i ukupnom putu koje kontra tijelo tj. rukavac prijeđe po kliznom ležaju kao što je vidljivo u jednadžbi (23) i (24), pod uvjetom da na ta dva radna parametra ne utječu nikakvi drugi radni uvjeti kao što je npr. temperatura u kontaktu kliznog ležaja i rukavca.

$$W_v = k' \cdot F_N \cdot s \quad (23)$$

$$W_v = W_1 \cdot A = W_1 \cdot B \cdot D \quad (24)$$

Konstanta proporcionalnosti je specifični stupanj trošenja  $k'$ .

Osim volumena trošenja, gubitak materijala nekog tarnog para prikazuje se pomoću  $p$ - $v$  dijagrama.

Jednadžbom (25) i (26) Lanchster je opisao linearno trošenje u ovisnosti o  $p$ - $v$  vrijednosti, trajanju opterećenja te o tipu ležajnog materijala o kojem ovisi specifični stupanj trošenja  $k'$ .

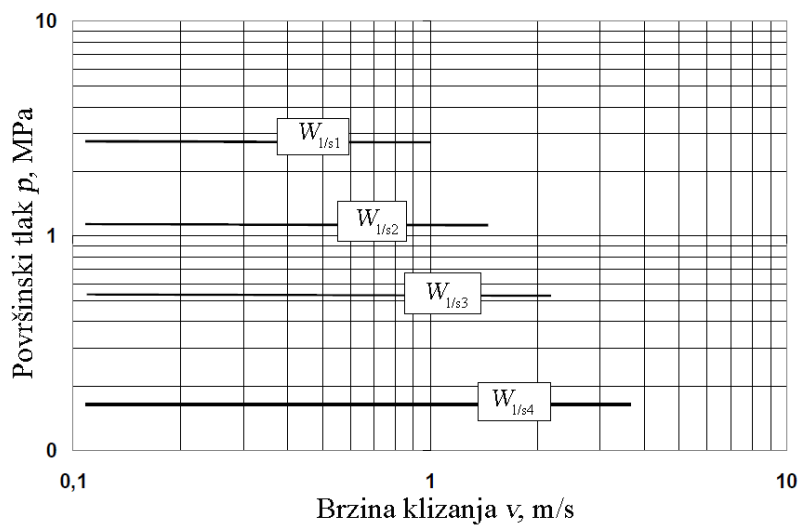
$$W_1 = k' \cdot p \cdot s \quad (25)$$

$$W_1 = k' \cdot p \cdot v \cdot t \quad (26)$$

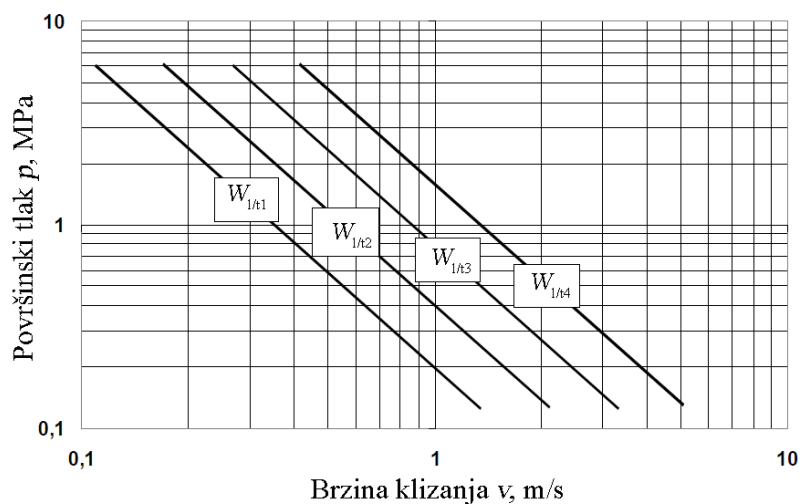
Prilagodбом jednadžbi (25) i (26) se može odrediti stupanj linearnog trošenja  $W_{1,s}$  (slika 35), ovisnog o prijeđenom putu opisanog jednadžbom (27) dok jednadžbom (28) se može opisati stupanj linearnog trošenja ovisnog o vremenu  $t$  (slika 36).

$$W_{1,s} = k' \cdot p \quad (27)$$

$$W_{1,t} = k' \cdot p \cdot v \quad (28)$$



Slika 35. Linearni stupanj trošenja ovisan o putu  $W_{1,s}$  ( $W_{1,s1} > W_{1,s2} > W_{1,s3} > W_{1,s4}$ )



Slika 36. Linearni stupanj trošenja ovisan o vremenu  $W_{1,t}$  ( $W_{1,t1} > W_{1,t2} > W_{1,t3} > W_{1,t4}$ )

## 2.17 Princip $p$ - $v$ vrijednosti, $p$ - $v$ dijagram i prošireni $p$ - $v$ dijagram

Analitički računski postupak za određivanje trenja i trošenja za određeni tribološki sustav, trenutno nije dovoljno dobar za točno određivanje pri radu nekog sustava. Ova metoda je često primjenjiva za jednostavan sustav opterećenja te vrijedi za samo određeni tip tribološkog sustava. Iz tog razloga za procjenu dopuštenih radnih uvjeta koriste se  $p$ - $v$  vrijednosti [13], [68], [69], [70], [71].

Umnožak površinskog tlaka  $p$  i brzine  $v$  je mjera za dopušteno pogonsko opterećenje (trošenje) nekog tribološkog sustava. Važno je napomenuti da je kod polimernih materijala od velikog značaja dopušteno toplinsko opterećenje pri kojemu ne dolazi do velikih mehaničkih promjena materijala.

Povećanje ležajne temperature  $\Delta T$  te linearno trošenje  $W_1$  proporcionalni su s  $p$ - $v$  vrijednosti što se može vidjeti u jednadžbi (29) i (30).

$$\Delta T = \frac{\mu \cdot p \cdot v \cdot B \cdot D}{k \cdot A} \quad (29)$$

$$W_1 = k' \cdot p \cdot v \cdot t \quad (30)$$

Dopuštena  $p$ - $v$  vrijednost u praktičnoj primjeni se vrlo često koristi kao veličina povezana sa svojstvom materijala.

Vrlo često na  $p$ - $v$  utječu razni parametri kao što su:

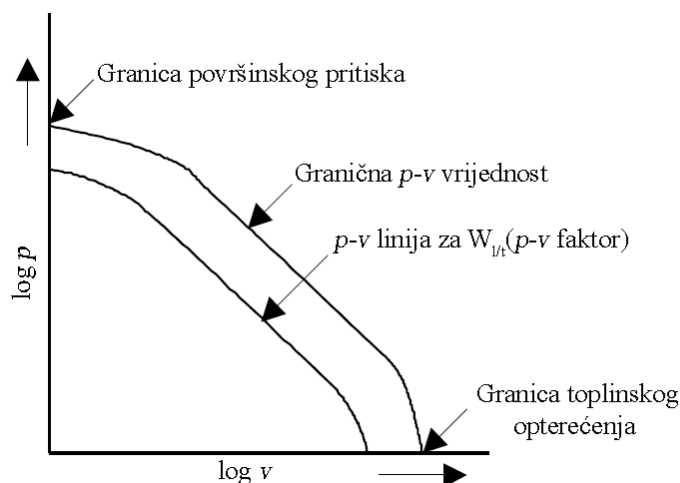
- Brzina klizanja
- Površinski tlak
- Ležajna temperatura
- Problematika vezana za linearno trošenje

Nadalje, promjenjivost faktora trošenja kao i okolišna temperatura utječu na promjenu ležajne temperature opisanoj u jednadžbi (29), također koeficijent prolaza topline  $k \cdot A$  kao i stupanj trošenja  $k'$  nisu konstantni.

Iz gore navedenih uvjeta može se vidjeti da na  $p$ - $v$  vrijednost utječu mnogi parametri, iz tog razloga potrebno je definirati  $p$ - $v$  vrijednost za određeni tribološki sustav.

Jedna od veličina kojom se može prikazati pogonske radne uvjete je pomoću  $p$ - $v$  dijagrama [68], [72] kao što se može vidjeti na slici 37 na kojoj su  $p$ - $v$  vrijednosti podijeljene na  $p$ - $v$  faktor te  $p$ - $v$  graničnu vrijednost.



Slika 37.  $p$ - $v$  dijagram

Iz slike 37 može se vidjeti da  $p$ - $v$  faktor opisuje granicu pri kojoj postoji konstantan linearni stupanj trošenja ovisan o vremenu uz konstantan stupanj trošenja  $k$ . Međutim stupanj trošenja se progresivno povećava s povećanjem  $p$ - $v$  vrijednosti.

Istraživač Adledbary [42] u svojoj knjizi opisuje maksimalnu dopuštenu granicu ( $p$ - $v$  granicu) pri kojoj ne dolazi do topljenja tj. razdvajanja matrice od ojačala nekog kompozitnog ležajnog materijala.

Prilikom određivanja granične  $p$ - $v$  vrijednosti, dolazi do određenih problema. Problem je u tome da ne postoji jedinstvena metoda provedbe pokusa. Povećanje naprezanja može se kontinuirano ili koracima ovisnim o vremenskom intervalu povećati faktor trenja što daje drukčije mjerne rezultate.

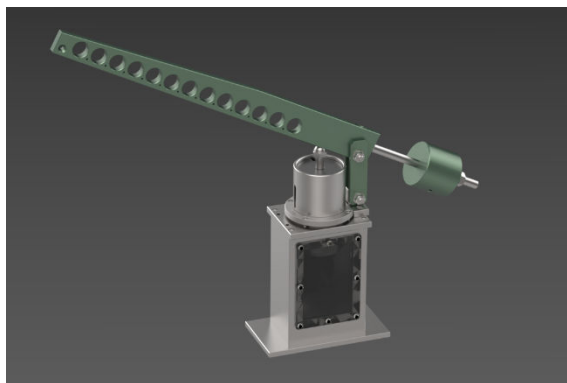
Istraživač Domitran [39] u svom istraživanju o kliznim svojstvima PET-a s dodatkom PTFE-a opisao je prošireni  $p$ - $v$  dijagram u ovisnosti o kontaktnoj temperaturi dvaju tijela u dodiru, te je prikazana ovisnost radne temperature o opterećenju.

Ukratko  $p$ - $v$  vrijednost,  $p$ - $v$  dijagram i prošireni  $p$ - $v$  dijagram uvijek vrijede za odgovarajući sustav *klizni ležaj / rukavac*. Treba napomenuti da relativno kratko vrijeme ispitivanja pri kojemu se može utvrditi  $p$ - $v$  vrijednost, u nekim slučajevima ne odgovara dugim vremenskim intervalima koji odgovaraju radnim karakteristikama nekog stroja što može biti uzrok zaribavanju kliznog ležaja zbog prevelikog toplinskog opterećenja. Iz tog razloga se  $p$ - $v$  vrijednost može smatrati orijentacijskom veličinom dok  $p$ - $v$  dijagram i prošireni  $p$ - $v$  dijagram daju detaljnije informacije za konstruiranje kliznog ležaja.

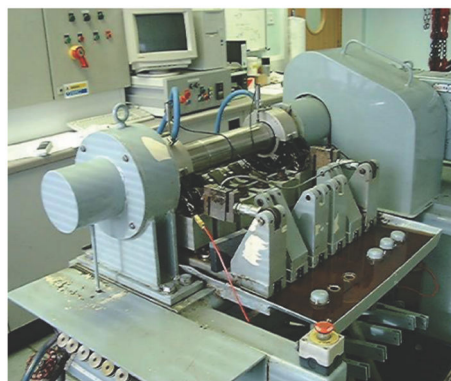
## Ekperimentalno ispitno postolje i mjerna oprema

---

Nedostatak iskustvenih vrijednosti kod kompozitnih ležajnih materijala te slaba pokrivenost normi za većinu novijih kompozitnih materijala za izradu kliznih ležajeva, nepoznavanje granica opteretivosti te detaljnija analiza temperature u dodiru kliznog ležaja i rukavca pri radu zahtijevaju ispitivanje ležaja u specijaliziranim uređajima. Ispitivanje kliznog ležaja u radu provode se na specijaliziranim strojevima kao što su uređaji tipa Timken [73], [74] koji se može vidjeti na slici 38 te Plint koji je prikazan na slici 39 te posebno konstruirani strojevi za specifičnu namjenu ispitivanja kliznog ležaja u određenim radnim uvjetima.



Slika 38. Timken ispitni uređaj Lab za elemente strojeva, FSB



Slika 39. Plint ispitni uređaj za klizne ležajeve tvrtke TSS [13]

Na Timken uređaju se može ispitati ponašanje ležajnog materijala u kontaktu s protutijelom od materijala od kojeg će u realnom slučaju biti izrađen rukavac. Ovom metodom se mogu ispitati i odrediti  $p$ - $v$  vrijednosti za neki ležajni materijal u ovisnosti o temperaturi dodira između uzorka i protutijela te odrediti faktor trenja. U slučaju kada je moguć duži period ispitivanja na Timken uređaju promjenom mase uzorka nakon ispitivanja može se odrediti i stupanj trošenja  $k$ . [73], [74]

Ispitivanja na Timken ispitnom uređaju provodi se prema odgovarajućim normama tipa ASTM D 2509 – 93 koja govori o metodi ispitivanja uzorka pri podmazivanju s masti [73] te ASTM D 2782 – 94 u kojoj je opisan postupak ispitivanja materijala pri podmazivanju s tekućim mazivom [74].

Norme ASTM D 2509 – 93 i D 2782 – 94 namijenjene su ispitivanju ležajnih materijala na bazi metala s podmazivanjem u obliku masti ili maziva velikog viskoziteta. U našem slučaju ležajni

materijal je duromerni kompozit koji radi bez maziva ili uz podmazivanje krutim mazivom kao što je PTFE tako da navedene norme ne mogu se primijeniti za ispitivanje kompozita.

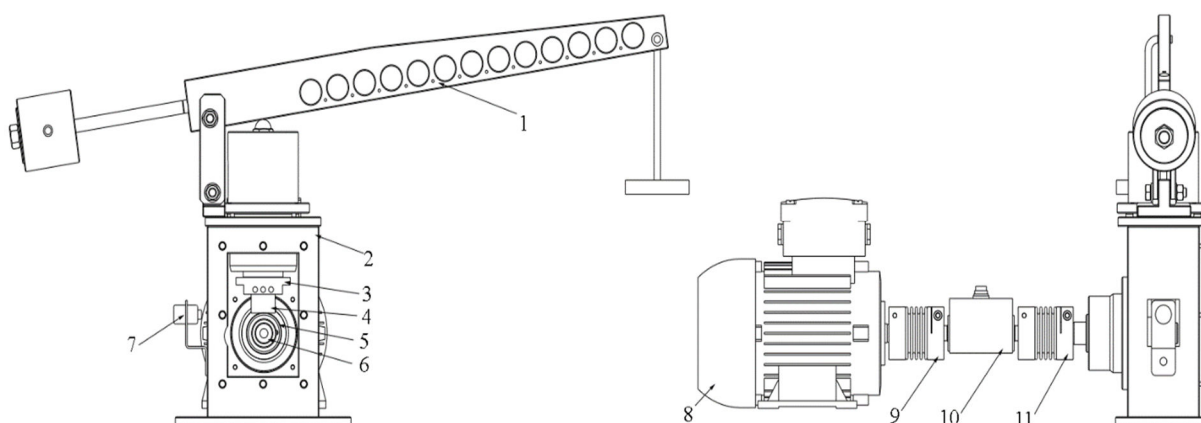
Ovisno o mehaničko – tribološkim svojstvima potrebno je prilagoditi  $p$ - $v$  vrijednosti te vrijeme trajanja ispitivanja na Timken uređaju.

Prije testiranja na stroju za ispitivanje realnih uvjeta kliznog ležaja kompozitni ležajni materijal biti će testiran na Timken uređaju koji se nalazi u Laboratoriju za elemente strojeva Fakulteta strojarstva i brodogradnje sa svrhom određivanja  $p$ - $v$  vrijednosti, faktora trenja i temperature u dodiru između uzorka i protutijela od čelika otpornog na koroziju tipa AISI 316.

Vrijeme testiranja uzorka je 120 minuta, uzorak duromernog kompozita nakon izrade i numeriranja se odmašćuje i važe prije i nakon ispitivanja, također prije i poslije ispitivanja se mjeri hrapavost površine uzorka i protutijela.

### 3.1 Opis Timken uređaja

Ekperiment je proveden na modificiranom test uređaju tipa Timken za ispitivanje trenja s rotirajućim diskom i teoretskim dodirnom linijom [49]. Ispitni uređaj prema slici 40 sastoji se od rotirajućeg diska (poz. br 5, slika. 40) izrađenog od duromernog kompozitnog materijala, opterećenog s protutijelom (poz. 4, slika 40) u obliku pločice od čelika otpornog na koroziju AISI 316 pričvršćenog u mjernu dozu (poz. br 3, slika 40). Opterećena pločica preko poluge (poz. 1, slika 40) ostvaruje dodir između rotirajućeg diska i mirujuće pločice. Uređaj je izveden na način da preko mjernog vratila (poz. 10, slika 40) spojenog na elektromotor (poz. 8 slika 40) uz regulaciju brzine vrtnje pomoću frekventnog pretvarača marke *Mitsubishi* tip *E700* osigurava rotaciju diska.



Slika 40. Timken ispitni uređaj

Dijelovi Timken ispitnog uređaja:

- |  |   |
|--|---|
| 1...momentna poluga                        | 7...mjerač temperature <i>Optris CTP7</i> |
| 2...kućište uređaja                        | 8...elektromotor <i>Končar 5AZ 80B-6</i>  |
| 3...mjerna doza <i>HBM TYP U3 0,5 kN</i>   | 9...spojka <i>HBM 20 Nm</i>               |
| 4...pritisna pločica od AISI 316           | 10...mjerno vratilo <i>HBM T20WN</i>      |
| 5...ispitni uzorak od duromernog kompozita | 11...spojka <i>HBM 20 Nm</i>              |
| 6...pogonsko vratilo                       |   |

Preko sustava poluga (poz. 1, slika 40) ostvaruje se opterećivanje rotirajućeg diska (poz. 5, slika 40) pomoću pločice smještene u mjernu dozu (poz. br 3, slika 40) uz mjerenje vertikalne sile koja djeluje na rotirajući disk te temperature neposredno iza linije dodira diska i pritisne pločice. Dimenzije diska tj. vanjski promjer je 43 mm i širina 10 mm, dimenzija pritisne pločice je 35×35×35 mm.

Tijekom rada uređaja, a uslijed vrtnje diska i mirovanja pločice dolazi do povećanja temperature zbog trenja koje se javlja u dodiru između dvije površine koja će biti izmjerena beskontaktnim mjeračem temperature (poz. br 7, slika 40).

Oblik pritisne pločice konstruiran je s ciljem povećavanja površinskog tlaka (dodir u liniji), odnosno dobivanja graničnih vrijednosti kod  $p$ - $v$  dijagrama za duromerni kompozitni materijal. Povećavanjem dodirne površine smanjujemo površinski tlak, ali ujedno i povećavamo mogućnost prijelaza temperature sa rotirajućeg diska na pločicu.

Pažljivom montažom postignuta je približna dodirna linija između rotirajućeg diska i pritisne pločice. Podmazivanje se vrši nanošenjem PTFE maziva u spreju prije početka rada na disk naštrcavanjem bez dodira s pritisnom pločicom.

### 3.1 Mjerni sustav

Mjerni sustav je tako izveden da se može mjeriti više parametara prilikom testiranja nekog ispitnog materijala tj. ispitivanja tribološko-mehaničkih svojstava željenog materijala. Na slici 42 prikazana je struktura mjernog sustava te načini spajanja i prikupljanja podataka, dok je u tablici 3 prikazan popis svih korištenih mjernih sustava i način prikupljanja signala. Tijekom provedbe eksperimenta, prikupljanje podataka provodi se pomoću mjernog pojačala tip *Spider 8* proizvođača *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM)* (Njemačka) [75] i programskog paketa *Catman* [76] koji je priključen na računalo koje služi za prikaz i pohranu podataka, dok se upravljanje brzinom vrtnje provodi pomoću frekventnog regulatora brzine vrtnje elektromotora u području od 0 do 1000 min<sup>-1</sup>, marke *Mitsubishi E700* [77]. Mjerenje temperature i faktora trenja bit će detaljno opisani u daljnjem tekstu.

Tablica 3. Mjerni sustav Timken ispitnog uređaja

Mjerena veličina	Mjerni sustav	Prikupljanje signala	
		Upravljačkim sustavom stroja	Vanjskim mjernim računalom
Ispitni moment, $T_i$ / Nm	Mjerno vratilo, HBM T20 mjerno područje 20 Nm		✓
Jakost struje motora, moment otpora, $T_v$ / Nm	Frekventni regulator Hitachi E 700	✓	
Brzina vrtnje	Mjerno vratilo, TRS 600, brzina maksimalno 9000 min <sup>-1</sup>		✓
Temperatura okoliša	Termopar (Pt100)		✓
Temperatura dodira kliznog ležaja i rukavca	IR, beskontaktni termometar OPTRIS CT P7		✓

### 3.2 Mjerenje temperature

Odrađivanje temperature u dodiru ispitnih uzoraka  $T_f$  detaljno je objasnio Lanchester u svom istraživanju [25] opisan je teoretski dodir dva ispitna uzorka gdje jedan miruje a drugi se giba uz djelovanje sile  $F_N$  kao što se može vidjeti na slici 43.

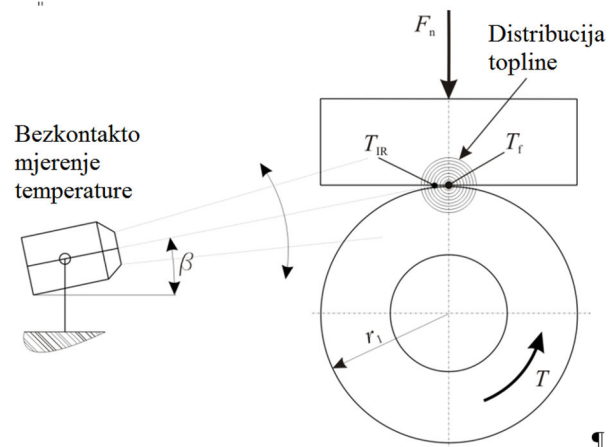
Zbog vrlo kratkog vremena pojavljivanja Flash temperature [7] u dodiru nije se moguće dovoljno približiti stvarnoj vrijednosti upotrebom kontaktnih termometara.

Drugi problem približavanju mjerenja Flash temperature  $T_f$  koji je i relativno spor prijelaz topline kod duromernih kompozitnih materijala zbog niskog koeficijenta toplinske vodljivosti. Njegova je vrijednost od 0,15 do 0,4 W/(m K) i u odnosu na čelik otporan na koroziju toplinske provodnosti 17 W/(m K) višestruko je niži.

Dobra izolacijska svojstva duromernih kompozita koja su vrlo velika prepreka kod upotrebe kontaktnih mjerila temperature za ovakvu aplikaciju. Mjerenje beskontaktnim putem, iako nešto lošije rezolucije samih termometara, mogu pružiti zadovoljavajuću točnost za dobivanje okvirnih vrijednosti. Odabrano je beskontaktno mjerilo temperature CT P7 proizvođača Optris radnog područja od 0 do 710 °C, brzine odziva 150 ms, s točnošću od  $\pm 1$  °C do 25 °C ili  $\pm 0,5$  °C iznad 25 °C te optičkom rezolucijom kod 90% energije od 10:1 i podesivim faktorom emisije od 0,1-1,1.

Prilikom upotrebe beskontaktnog mjerila potrebno je voditi računa o okolini koja može utjecati na dobivene rezultate. Nedostatak bezkontaktnog mjerenja kod ovakve primjene je uvjet da točka u kojoj se temperatura mjeri bude što preciznije fokusirana unutar područja mjerne zrake, te ne postoji mogućnost mjerenja neposrednim putem kao što je to slučaj kod kontaktnog mjerenja sa ciljem dobivanja temperature što bliže iznosu Flash temperature potrebno je smanjiti na najmanju moguću mjeru sve čimbenike koji bi ometali dodir zrake termometra i točke mjerenja.

Sukladno tome provedeno je mjerenje primjenom maziva u obliku spreja. Kruta maziva poput PTFE nanešena u tankom sloju kao mazivo zbog svojeg izolatorskog svojstva može utjecati na točnost dobivenih rezultata jer postoji vrlo velika mogućnost ometanja prostora između radne točke i termometra. Odrađivanje fokusiranja zrake termometra provedeno je prema slici 42 namještanjem kuta  $\beta$  u radu do dobivanja maksimalne temperature. Dobivena temperatura je najbliža području izvora flash temperature.



Slika 42. Beskontaktni uređaj za mjerenje temperature u dodiru

U sklopu mjernog uređaja predviđeno je mjerenje temperature radnog okoliša stroja jednim kanalom pri čemu je upotrijebljen termopar tip Pt100, radnog područja od 0 do 600 °C. Umjeravanjem je postignuta točnost od  $\pm 1,5$  °C. Mjerenje okolišne temperature provodi se isključivo kao kontrolna veličina za slučaj mogućih devijacija temperature okoliša te utjecaj temperature okoliša na izlazne rezultate ostalih mjernih veličina, odnosno uklanjanje grube pogreške. Senzor temperature za mjerenje radne okoline postavljen je na udaljenosti 0,1 m od najtoplijeg dijela ispitnog postolja zbog utjecaja toplote nastale isijavanjem u okolinu.

### 3.3 Mjerenje faktora trenja

Preko mjerenog pojačala dobiveni su podaci o promjeni momenta  $T$  potrebnog za savladavanje otpora gibanja prema vremenu uz odabranu frekvenciju uzrokovanja od 60 Hz. Odabrana frekvencija osigurava dovoljan broj podataka za izračun promjene dinamičkog faktora trenja i promjenu temperature na izlazu iz dodira uz praćenje tendencije promjene faktora u vremenu. Poznavanjem promjene momenta  $T$  i sile  $F_N$  kojom se djeluje na pločicu i rotirajući disk uz, poznati promjer diska koji iznosi 43 mm, moguće je dobiti silu trenja  $F_T$  prema izrazu (31), dok je dinamički faktor trenja dobiven prema izrazu (32).

$$F_T = \frac{T}{r_1} \quad (31)$$

$$\mu_{\text{din}} = \frac{F_T}{F_N} \quad (32)$$

Tablica 4. Radni parametri ispitivanja

	Razina 1	Razina 2	Razina 3	Razina 4
Normalna sila $F_N / \text{N}$	60	80	60	80
Brzina vrtnje $n / \text{min}^{-1}$	300	300	300	300
Obodna brzina $v / \text{m/s}$	0,675	0,675	0,675	0,675
Mazivo	LOCTITE LB 8192	LOCTITE LB 8192	Bez podmazivanja	Bez podmazivanja

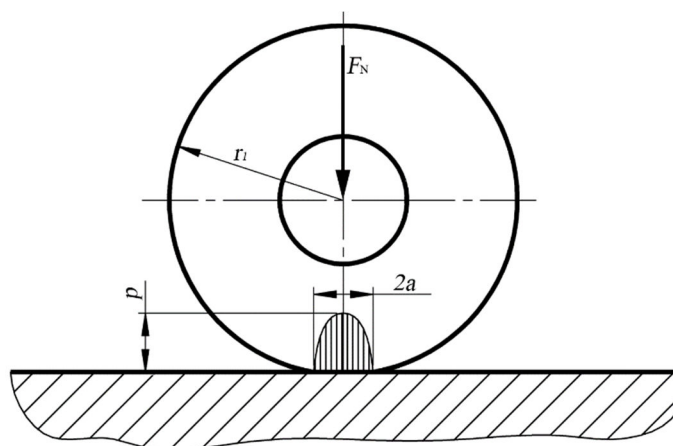
Pokus je proveden na 3 različita diska i pločica s odabranim kompozitnim materijalom tipa NORDEN 605 Marine. Prema brzinama vrtnje iz tablice 4 i ukupnom vremenu proizlazi da je ukupni prevaljeni put 13.500 m. Odabrano vrijeme rada pojedinog uzorka određeno je sa ciljem detekcije stanja izlaznih varijabli nakon uhodavanja ispitnih uzorka, gdje su varijable promjene faktora trenja, te utjecaj radnih temperatura tijekom rada na određenim radnim točkama. Pred pokusima su određene radne točke dane u tablici 4 na osnovu snimanih temperatura na izlazu iz zahvata prema maksimalnim temperaturama dopuštenim u radu za kompozitni ležajni materijal tipa NORDEN 605 Marine, te prema kriteriju temperaturnog zaribavanja.

Odabrano mazivo nanošeno je na uzorak koji se vrti pri  $100 \text{ min}^{-1}$ . Pri tom postupku nanošenja, sloj PTFE se ravnomjernije nanosi na površinu te je debljina sloja maziva veća. Izvršeno je okretanje diska bez dodira sa ispitnom pločicom u vremenu od 60 sekundi prije početka mjerenja te se nakon toga pristupalo opterećivanju uzorka bez zaustavljanja vrtnje. Time smo postigli da uvijek kod opterećenja bude prisutno mazivo. Nanošenjem PTFE maziva simuliramo skuplji tip duromernog kompozita kod kojeg je u procesu proizvodnje mazivo



integrirano u strukturu materijala. Metodom nanošenja maziva na njegovu površinu ispitujemo njegovu funkciju u tribološkom sustavu u odnosu na tribološki sustav s kompozitnim materijalom bez podmazivanja. Nedostatak PTFE maziva je njegova relativno mala otpornost na površinske tlakove te u ovisnosti o radnoj temperaturi dolazi do velikih promjena mehaničke čvrstoće nanesenog maziva.

Prema Hertz-ovoj teoriji širina tlaka  $2a$  na ispitni uzorak dobivena je iz jednadžbe (35). Jednadžbom (33) prikazan je način izračunavanja tlaka u dodiru, a jednadžbom (34) određen je modul elastičnosti za slučaj kontakta dva različita materijala. Širina tlaka pokazuje nam deformaciju diska tj. širinu kontakta koja ovisi o modulu elastičnosti diska i modulu elastičnosti pritisne pločice (Slika 43). Iz tablice 5 može se vidjeti da je širina kontakta povećava sa povećavanjem opterećenja  $F_N$ .



Slika 43. Dodirni tlak na ležajni materijal

$$p = \sqrt{\frac{F_N \cdot E_c}{2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot B}} \quad (33)$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right] \quad (34)$$

$$a = \sqrt{\frac{8 \cdot F_N \cdot r_1}{\pi \cdot E_c \cdot B}} \quad (35)$$

Tablica 5. Kontaktni pritisci između duromernog kompozita NORDEN 605 Marine i AISI 316

Testni materijali	Poissonov koeficijent $\nu$	Modul elastičnosti $E$ / MPa	Modul elastičnosti materijala u kontaktu $E_c$ / MPa	Površinski tlak pri $F_{N1}=60$ N $p$ / MPa	Površinski tlak pri $F_{N2}=80$ N $p$ / MPa	Površinski tlak pri $F_{N3}=135$ N $p$ / MPa	Širina tlaka pri $F_{N1}$ $a$ / mm	Širina tlaka pri $F_{N2}$ $a$ / mm
NORDEN 605 Marine	0,37	2700	6165,228	16,5487	19,1078	24,8218	0,230	0,266

# Mjerenje i analiza rezultata na Timken ispitnom uređaju

---

U ovom poglavlju je iscrpno opisan eksperimentalni dio rada te postupak mjerenja. Na osnovi dobivenih rezultata izvršena je analiza utjecajnih parametara na izlazne parametre. Poglavlje je podijeljeno u dvije osnovne cjeline.

U prvoj cjelini opisan je koncept eksperimenta te plan provedbe i postupci mjerenja rezultata. Druga cjelina sastoji se od obrade rezultata eksperimentalnog djela istraživanja, dan je prikaz obrade podataka i rasprava rezultata dobivenih obradom podataka. Također su dane usporedbe pojedinih izlaznih veličina te su postavljene granice opteretivosti kliznog ležaja za ispitnu brzinu vrtnje prema ulaznim parametrima pokusa, uz analiziranje pojedinih faktora i njihovih utjecaja na očekivani radni vijek kompozitnog ležajnog materijala. Ovaj eksperiment je proveden na Timken ispitnom uređaju opisanom u poglavlju prije s ciljem ispitivanja dopuštenih granica opteretivosti novog ležajnog materijala. Prilikom ispitivanja na temelju  $p$ - $v$  dijagrama od proizvođača ležajnog materijala određene su dopuštene vrijednosti pri kojima ležajni materijal u kontaktu s rukavcem može duže vrijeme raditi bez oštećenja. Prilikom ispitivanja na Timken ispitnom uređaju dopuštene granice opteretivosti propisane od proizvođača povećane su 25 % do 40 %. Razlog zašto su granice opteretivosti smanjene od strane proizvođača ležajnog materijala su zbog toga što je primjena novog ležajnog materijala na bazi dugometnog kompozita relativno neistražena.

## 4.1 Koncipiranje eksperimenta

Zadatak ovog eksperimenta je odrediti maksimalno dopušteno opterećenje koje kompozitni ležajni materijal može izdržati tijekom svog životnog vijeka, uz uvjet da ne dođe do oštećenja ležaja i/ili rukavca. Vrlo veliki broj mogućih utjecajnih faktora utječe na radne parametre ležajnog materijala. Zasebni utjecaj svakog od radnih parametra utvrđen je brojnim istraživanjima [1], [3], [6], [17], [35], [39], [78], [79] na području metalnih i polimernih ležajnih materijala.

Dobra klizna svojstva duromernog kompozita prvenstveno dolaze do izražaja kod rada bez dovoda maziva, odnosno kod rada uz kruto mazivo (PTFE, MoS<sub>2</sub>), koje se obično dodaje materijalu prilikom prerade. U eksploataciji su klizni ležajevi uvijek opterećeni kombinacijom

radnih parametra te se nameće važnost poznavanja očekivanih vrijednosti granica opteretivosti u određenim radnim uvjetima. Granice koje su postavljene za izbor parametara ispitivanja ovise o ograničenjima proizašlim iz Timken ispitnog postolja. Vrijednosti opterećenja ponajprije obodne brzine vrtnje ispitnog uzorka i opterećenja na uzorak proizašla su ponajprije pregledom literature.

Istraživač Razaei [19] u svom radu opisao je trošenje duromernog kompozita trgovačkog naziva Orkot TXMM koji je prema mehaničko tribološkim svojstvima sličan duromernom kompozitu proizvođača NORDEN 605 Marine koji se koristi za ispitivanja u ovom radu. U tablici 6 dana su svojstva oba kompozita. U radu je istraživač Razei prilikom određivanja stupnja trošenja ležajnog materijala, došao do zaključa da pri dopuštenim  $p$ - $v$  vrijednostima dolazi do zanemarivog trošenja koje je vrlo teško izmjeriti. U ispitivanju za potrebe disertacije,  $p$ - $v$  vrijednosti su uvećane za oko 25%, uz pretpostavku da pri ispitivanju neće doći do oštećenja ležajnog materijala i/ili rukavca. Vrijednosti  $p$ - $v$  su povećane iz razloga kako bi se smanjilo potrebno vrijeme ispitivanja.

**Tablica 6. Usporedba mehaničkih svojstva duromernih kompozita**

Svojstva kompozita	Mjerna jedinica	Orkot TLMM	Norden 605 Marine
Tlačna čvrstoća	MPa	90	90
Vlačna čvrstoća	MPa	60	60
Savojna čvrstoća	MPa	65	69
Smična čvrstoća	MPa	80	100
Maksimalno statičko opterećenje	N	120	110
Maksimalno dinamičko opterećenje	N	60	55
Gustoća	kg/m <sup>3</sup>	79,33	79,56
Bubrenje u vodi	%	≤0,1	≤0,15
Faktor trenja, pri opterećenju od 15 MPa, kontratijelo AISI 316, pri radu na suho	-	0,13	0,10 - 0,15

Kad ležaj vrši svoju funkciju, dakle kad se rukavac opterećen nekom silom vrti određenim brojem okretaja, javljaju se na ležaju i posljedice tog rada, a to su zagrijavanje i trošenje. Obje posljedice djeluju nepovoljno te kod prekoračenja makar jedne od njih dolazi do prekida ispravne funkcije ležaja. Previsoka ležajna temperatura dovest će ležajni materijal do stanja oštećenja tj. taljenja, a opterećenje rukavca i broj okretaja kojim se on vrtil izazvat će takve deformacije klizne plohe da će ležaj biti uništen.

Do iste situacije će dovesti i prekomjerno trošenje klizne plohe, uz pretpostavku da se temperatura ležaja ne poveća iznad dopuštene, jer povećana zračnost nastala istrošenjem smanjit će tehnološku točnost rada ležaja, a to znači da je ležaj uništen.

Već ovo kratko razmatranje dovodi do zaključka da oba kriterija moraju imati neku vezu s opterećenjem i brojem okretaja rukavca. U razmatranju je spomenuta povećana zračnost, što znači povećanje u odnosu na početnu zračnost, dakle još jedan prisutan faktor u kliznom ležaju, uz materijal rukavca, i njegovu površinsku hrapavost.

Ovdje nisu spomenuti svi faktori koji se javljaju u radu kliznog ležaja, ali se može već na osnovu navedenih zaključiti da je za pravilan izbor tih faktora nužno poznavati efekte njihovog djelovanja na određeni kriterij jer prema veličini tog efekta treba zaključiti kojem faktoru treba posvetiti veću pažnju, tj. uspije li se njega optimalno definirati bit će produžen vijek trajanja ležaja.

Dosad je bilo govora samo o efektima pojedinih faktora no očito je da u takvom djelovanju nekoliko faktora mora postojati i njihovo međudjelovanje - interakcija, koja također ima određeni efekt na određeni kriterij.

Zadatak ovog eksperimenta je odrediti maksimalne dopuštene vrijednosti opterećenja ležajnog materijala na osnovu kojih će se ispitati klizni ležaj u realnim radnim uvjetima iz kojih se obradom rezultata mogu odrediti smjernice za konstruiranje kliznog ležaja od kompozitnog materijala.

## **4.2 Kriteriji za preliminarno ispitivanje životnog vijeka kompozitnog ležajnog materijala**

Za praćenje rada kliznog ležaja od kompozitnog materijala uz mirno opterećenje, kontinuirani pogon, bez dovođenja sredstva za podmazivanje, odabrani su ovi kriteriji:

- ležajna temperatura,
- istrošenje ležaja,
- faktor trenja.

Ležajna temperatura odabrana je kao kriterij jer njezin iznos je rezultat djelovanja faktora trenja u kliznom ležaju pa dosta vjerno odražava sve promjene njihovih odnosa. Ona je posljedica razvijene topline na kliznoj plohi i nešto je niža od temperature klizne plohe radi svojstva kompozitnog materijala da djeluje kao toplinski izolator. Bilo bi korisno i registrirati

temperaturu klizne plohe jer je to mjesto gdje će se najprije javiti posljedice previsoke temperature.

Ležajna temperatura mjerena je beskontaktnim termometrom tipa CT P7 proizvođača Optris u zoni neposrednog kontakta između pritiskne pločice od čelika otpornog na koroziju i ispitnog uzorka od duromernog kompozita, (mjerenje temperature opisano je u poglavlju 3.2).

Istrošenje ležaja je također važan pokazatelj njegove dobrote, a isto tako je rezultat djelovanja faktora koji se javljaju u radu kliznog ležaja.

U stvari trebalo bi pratiti vijek trajanja ležaja. On se određuje na osnovu trošenja i vremena rada ležaja. Vijek trajanja u ovom ispitivanju bilo teško definirati jer se radilo o laboratorijskom istraživanju pa se je dopušteno istrošenje moglo samo pretpostaviti, što ne mora biti realno. Daleko bi bilo lakše definirati vijek trajanja da se radilo o konkretnom pogonskom slučaju jer se tada zna koliko je dopušteno istrošenje i kad se ono prekorači tehnološka točnost više ne zadovoljava, pa bi vrijeme rada do postizanja graničnog istrošenja predstavljalo vijek trajanja. Dakle, u radu je kao kriterij uzeto istrošenje koje je određeno na kraju svakog pokusa. Razlikom mase ispitnog uzorka nakon ispitivanja određen je volumenski stupanj trošenja (opisan u poglavlju 2.17).

Razlika mase ispitnog uzorka nakon ispitivanja mjerena je pomoću vage točnosti 0,001 g tipa PRJ 1200-3N, proizvođača *Kern & Sohn GmbH* (Njemačka).

Kako bi se uspjelo odrediti stupanj trošenja kompozitnog ležajnog materijala, vrlo je važno voditi računa o površinskoj hrapavosti ispitnih uzorka i pritiskne pločice.

Duromerni kompozit nakon obrade iz poluproizvoda u ispitni uzorak odgovarajućih dimenzija, zbog svoje strukture materijala vrlo je grube površinske obrade, tj. njegova površinska hrapavost iznosi od 3,45 do 6,21  $\mu\text{m}$  za usporedbu s pritisknom pločicom od čelika otpornog na koroziju AISI 316 na kojoj je izmjerena hrapavost od 0,40 do 0,76  $\mu\text{m}$ . Važno je napomenuti da je površinska hrapavost nejednolika po cijeloj površini duromernog kompozita te prilikom ispitivanja dolazi do uglačavanja ispitnog uzorka tj. dolazi do smanjenja površinske hrapavosti. Površinska hrapavost ispitnih uzoraka i protutijela bila je mjerena uređajem za mjerenje hrapavosti tipa SURFTEST SJ210, proizvođača *Mitutoyo* (Japan) [80].

Prilikom mjerenja hrapavosti vrlo je važno napomenuti da je za mjerenje površinske hrapavosti duromernog kompozita relativno velike površinske hrapavosti potrebno odabrati optimalan detektor za mjerenje s dovoljno velikim mjernim rasponom kao što je model serije 178-391 od proizvođača *Mitutoyo* mjernog područja od 0 do 10  $\mu\text{m}$ , sila igle za mjerenje je 4 mN. Dok za mjerenje površinske hrapavosti čelika otpornog na koroziju AISI 316 odabran je mjerni detektor

serije 178-293, proizvođača *Mitutoyo* mjernog raspona od 0 do 2  $\mu\text{m}$ , mjerna sila igle za mjerenje hrapavosti je 0,75 mN kako bi dobili što preciznije rezultate mjerenja.

Mjerenje hrapavosti prema standardu ISO 4288-1996 [81] provedeno je na taj način da je mjerna igla stavljena na ispitni uzorak prošla put od 2,5 mm uz silu igle na dodirnu površinu od 4 mN. Uređaj snima stanje površine te prema jednadžbi (36) izračunava hrapavost. Pomak igle je linearan pod pravim kutom u odnosu na mjerni uzorak.

Jednadžba (36) opisuje matematički model izračuna srednje površinske hrapavosti, dok nam oznaka  $i$  koje je opisana jednadžbom 37 označava broj izmjerenih mjerenja.

$$Ra_i = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (36)$$

$$i = 1, \dots, n \quad (37)$$

Prilikom utvrđivanja stupnja trošenja ispitni uzorci radi dimenzijske kontrole bili su izmjereni prije i poslije ispitivanja. Pri ispitivanju uzorka s dodatkom krutog maziva (PTFE) uzorci su bili podvrgnuti mjerenju prije nanesenog maziva te nakon nanosa krutog maziva. Prilikom ispitivanja na Timken ispitnom uređaju samo vanjski promjer bio je u kontaktu s pritisnom pločicom te je samo vanjski promjer bio uzet kao kontrolna veličina za mjerenje. Mjerenje vanjskog promjera bilo je provedeno mikrometrom tip 293, mjernog područja od 25 do 50 mm, preciznosti  $\pm 0,001$  mm, proizvođača *Mitutoyo* (Japan) [82].

Faktor trenja uzet je kao kriterij jer predstavlja zapravo vezu između temperature ispitnog uzroka i istrošenja. On je razlog stvaranja topline na mjestu dodira pritisne pločice od AISI 316 i ispitnog uzorka od duromernog kompozita, a svakako da doprinosi i rezultatu istrošenja [17], [42], [51].

Faktor trenja je određivan tokom izvođenja pokusa preko mjernog pojačala te su dobiveni podaci o promjeni momenta  $T$  potrebnog za savladavanje otpora gibanja prema vremenu uz odabranu frekvenciju uzorkovanja od 60 Hz. Poznavanjem promjene momenta  $T$  i sile  $F_n$  kojom se djeluje na pločicu i rotirajući disk uz poznati promjer diska koji iznosi 43 mm, moguće je dobiti silu trenja  $F_T$ . Detaljan opis mjerenja faktora trenja opisan je u poglavlju 3.3

## 4.3 Utjecajni parametri prilikom ispitivanja na Timken ispitnom uređaju

Utjecajni faktori za rad kliznog ležaja od kompozitnog materijala bez dovodenja maziva uz mirno opterećenje i stalni pogon, definirani su na osnovu pregleda literature [3], [6], [17], [25], [45], [48], [49], [73], [83], [84].

- Opterećenje ležaja ( $F$ )
- Broj okretaja ispitnog uzorka ( $n$ , obodna brzina)
- Dimenzije ispitnog uzorka:
  - vanjski promjer ( $d_v$ )
  - širina ( $L$ )
  - širina dodirne površine ( $L_v$ )
  - debljina stjenke ( $S$ )
- Materijal ispitnog uzorka
- Materijal pritisne pločice
- Hrapavost pritisne pločice ( $R_a$ )
- Tvrdća površine pritisne pločice

### 4.3.1 Opterećenje ispitnog uzorka

Opterećenje ispitnog uzorka svakako je jedan od bitnih faktora za ležaj. Istraživači [17], [19], [25] [39] su istraživali utjecaj opterećenja na ranije navedene kriterije kako bi svoje istraživanje mogli predočiti što sličnije realnim radnim uvjetima u nekom stroju.

Opterećenje ležaja u literaturi daje se najčešće kao srednji ležajni tlak, znači opterećenje preračunato na projekciju klizne plohe kao što se može vidjeti u jednadžbi (17) opisanoj u poglavlju 2.15.

Znatno je bolje ako se takav odnos daje za maksimalni tlak na mjestu dodira ispitnog uzorka i pritisne pločice, a koji se najčešće izračunava po Hertz-ovoj jednadžbi (18) opisanoj u poglavlju 2.15. Duromerni kompozit od kojeg je izrađen ispitni uzorak spada u grupu ortotropnih materijala tj. modul elastičnosti  $E$  [19] mijenja se u ovisnosti o smjeru djelovanju sile na kompozit. Kompoziti ovog tipa mijenjaju svoja mehanička svojstva u ovisnosti o radnoj temperaturi. Pri temperaturi od 60 °C do 110 °C dolazi do značajnog smanjenja nosivosti duromernog kompozita, dok kratkotrajno materijal može biti izložen temperaturi od 130 °C nakon čega dolazi do njegovog uništenja.

Iz navedenog objašnjenja o radnoj temperaturi kompozita vidi se ovisnost da veše opterećenje dozvoljava samo nižu temperaturu ležaja.

Na osnovu dopuštenih vrijednosti prema podacima iz literature [13], [19], [17] odabrane su dvije razine opterećenja za predviđeno ispitivanje, što znači da je prilikom ispitivanja opterećenje ispitnog uzorka promjenjivi faktor:

$$F_1 = 60 \text{ N}$$

$$F_2 = 80 \text{ N}$$

Prva razina opterećenja uzeta je kao vrijednost koja je karakteristična za polimerne kompozitne materijale [24], pri kojoj nastaje tlak od  $p = 16,5487 \text{ MPa}$ , dok je druga razina opterećenja predviđena za duromerne kompozite [13] te iznosi  $p = 19,1078 \text{ MPa}$  između podloge i ispitnog uzorka. Kratkotrajno duromerni kompozit može izdržati i veća opterećenja [46], kako bi ispitali ponašanje kompozitnog materijala pri većem opterećenju odabrana je sila od 135 N, pri kojoj tlak u kontaktom području iznosi  $p = 24,8218 \text{ MPa}$ .

Tlak u kontaktnom području izračunat je pomoću jednanžbi (33), (34) i (35), ostale veličine potrebne za proračun su navedene u tablici 5.

### 4.3.2 Brzina vrtnje ispitnog uzorka

Broj okretaja ispitnog uzorka, odnosno pomoću njega izražena obodna brzina ispitnog uzorka, nisu tako opširno istraženi u literaturi kao drugi faktori. Prema [42], [43], [47] faktor brzine ne utječe na visinu faktora trenja niti na istrošenje, ukoliko temperatura klizne plohe ne promjeni svojstva materijala.

Da obodna brzina ispitnog uzorka doprinosi stvaranju topline radi trenja, može se zaključiti na osnovu jednadžbe (16), opisane u poglavlju o toplinskom opterećenju, 2.14. Dakle veći broj okretaja tj. veća obodna brzina rezultira stvaranjem više topline u ležaju, odnosno i višom temperaturom u području kontakta.

Već samo radi toga trebalo bi uzeti u obzir broj okretaja prilikom izvođenja pokusa.

Prema [19] kod duromernog kompozita je obodna brzina ispitnog uzorka od znatnog utjecaja na sposobnost opterećenja pritisnom pločicom. Do istog se zaključka dolazi ako se nastavi razmišljanje o povećanju temperature ležaja radi povećanja obodne brzine rukavca, jer prema jednadžbi (16) to mora dovesti do smanjenja opterećenja ili će radi povećane temperature klizne plohe doći do katastrofalnih posljedica za ispitni uzorak.

Duromerni kompoziti kao ležajni materijal najčešće se koriste u strojevima gdje imamo relativno visoki površinski tlak između ležaja i rukavca te male obodne brzine, stoga je broj



okretaja uzet kao nepromjenjiv faktor, a prema literaturnim podacima [1], [49], [73] odabrana je njegova vrijednost:

$$v_1 = 0,675 \text{ min}^{-1}$$

Kako bi ispitivali maksimalno dopušteno opterećenje duromernog kompozita [85], pri opterećenju od 80 N za ispitivanje je korištena obodna brzina od 1,013 min<sup>-1</sup>.

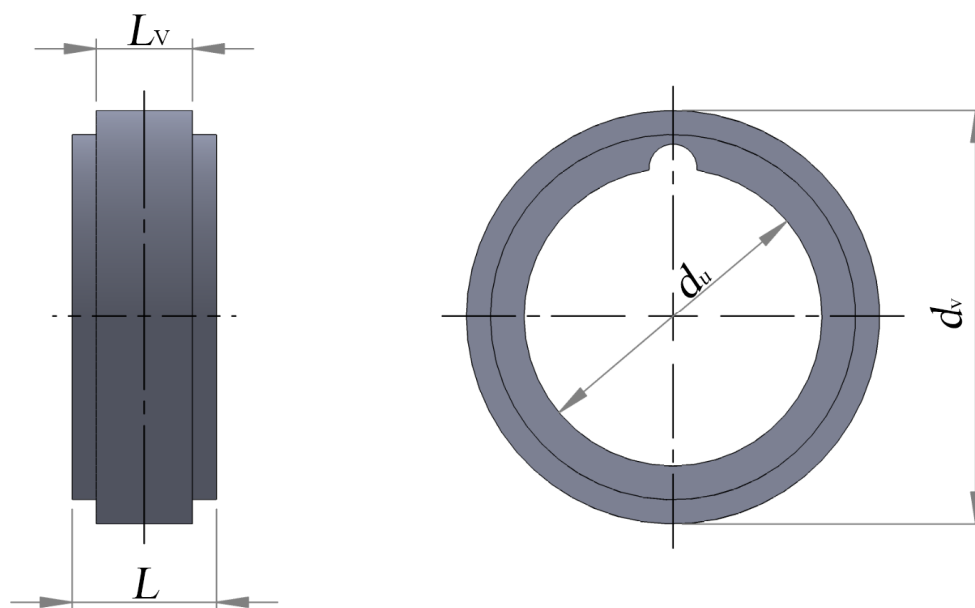
### 4.3.3 Dimenzije ispitnog uzorka

Dimenzije ispitnog uzorka odabrane su prema uvjetu ograničenja ispitnog postolja tj. Timken ispitnog uređaja. Pregledom normi D2509-93 [73] i D 2782-94 [74] kojima je opisano ispitivanje na Timken ispitnom uređaju uz podmazivanje uljem ili masti. Na osnovu navedenih normi i ograničenja ispitnog postolja odabrane su dimenzije ispitnog uzorka od duromernog kompozita (Slika 44). Naime, promjenom dodirne širine ispitnog uzorka mijenja se srednji ležajni tlak, pa se može održati u granicama preporučenog dopuštenog tlaka [13], [47], [86].

Debljina ispitnog uzorka odabrana je prema preporuci proizvođača kompozitnog materijala [72], [86]. Naime duromerni kompozit posjeduje vrlo veliku elastičnost kao što se može vidjeti u tablici 5 te prilikom preopterećenja može doći do prevelike deformacije kompozita što može izazvati prekomjerne vibracije prilikom ispitivanja iz razloga što se javlja prevelika zračnost između pogonskog vratila i unutarnjeg promjera ispitnog uzorka.

Prevelika zračnost također može nastati zbog pojave prekomjerne topline između ispitne pločice i ispitnog uzorka koja kao kompozit posjeduje vrlo dobra izolatorska svojstva koja uzrokuju slabu odvodnju toplinskog toka od uzorka na okolinu te dolazi do stvaranja vrlo visoke temperatura koja uzrokuje deformaciju uzorka što dovodi do pojave vibracije prilikom ispitivanja.

Prilikom izrade ispitnih uzoraka korištenjem literature o obradi kompozitnih materijala postupkom odvajanja čestica [40] odabrani su noževi za obradu kompozitnog materijala tip *H10A* proizvođača *SANDVIK* [87].



Odabrane dimenzije ispitnog uzorka su:

- vanjski promjer ( $d_v = 43$  mm)
- unutarnji promjer ( $d_u = 31$  mm)
- širina ( $L = 15$  mm)
- širina dodirne površine ( $L_v = 10$  mm)
- debljina stjenke ( $S = 6$  mm)

Slika 44. Dimenzije ispitnog uzorka

#### 4.3.4 Materijal ispitnog uzorka

Na osnovu istraživanja [35], [36], [50], [51], [62], [88] o kompozitnim ležajnim materijalima dokazano je da su kompoziti adekvatna zamjena za ležajne materijale na bazi bronce, aluminija, bijele kovine, itd.

Pri istraživanju u ovoj disertaciji za ispitivanje je korišten duromerni kompozit čiji kemijski sastav može se pronaći u knjizi istraživača Goodmana [89].

Mehanička svojstva u pogledu modula elastičnosti, Poissonovog koeficijenta te modula smičnosti koji je različit u sve tri osi materijala zbog njegove ortotropne strukture može se pronaći u radu istraživača Razaieja [19] (Slika 45), dok su ostala mehanička svojstva prikazana u tablici 6.

Vrlo je važno naglasiti da duromerni kompoziti koju su predmet ovog istraživanja nisu dovoljno proučeni (istraživanja su u toku), ali se može smatrati da duromerni kompozit koji će biti predmet ovog istraživanja posjeduje minimalne razlike u svojstvima kao ranije opisani kompozitni materijal u istraživanju znanstvenika Razaieja [19].

Za ispitivanje je osiguran duromerni kompozit proizvođača *NORDEN* tip *Marine 605* te *NORDEN Marine 605* s dodatkom PTFE krutog maziva tip *LB 8192* proizvođača *LOCTITE* njegovu površinu [90].

$$E_{11} = 2800 \text{ MPa}$$

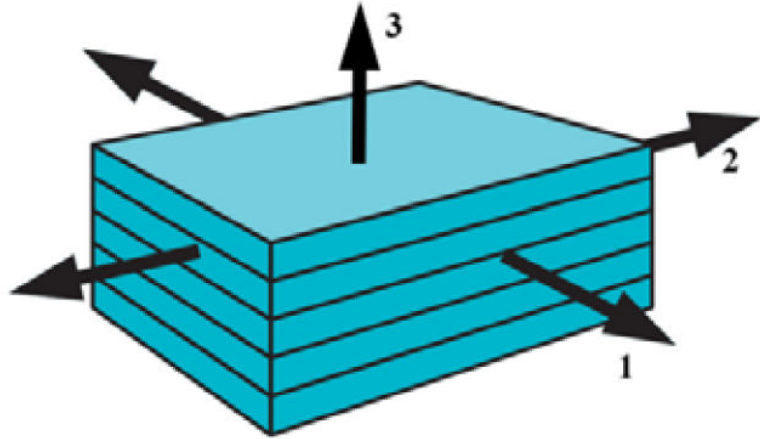
$$E_{22} = 2560 \text{ MPa}$$

$$E_{33} = 2560 \text{ MPa}$$

$$\nu_{12} = 0,30$$

$$\nu_{13} = 0,45$$

$$\nu_{23} = 0,45$$



Slika 45. Mehanička svojstva duromernog kompozita, ortotropne strukture [90]

*NORDEN Marine 605* je duromerni kompozit bez ikakvih dodataka krutih maziva što limitira njegovu primjenu u vrlo opterećenim radnim strojevima. Pregledom istraživanja [6], [7], [8], [9], [35] zabilježene su vrlo pozitivne promjene u tribološkim svojstvima materijala kojim je kao kruto mazivo dodan PTFE.

Kruta maziva poput PTFE-a mogu biti dodana duromernom kompozitu u samom procesu njegove proizvodnje ili na neku kliznu površinu gotovog kompozitnog dijela. Treba naglasiti da duromerni kompoziti s integriranim mazivom imaju nekoliko puta veću cijenu, dok kompoziti na koje se nanosi mazivo neposredno prije upotrebe, cijena samog maziva nije visoka.

Prilikom izvođenja pokusa korišten je isti materijal, samo jedan dio ispitnih uzoraka je bio bez dodatka krutog maziva, dok je drugi dio uzorka bio s dodatkom maziva te je materijal uzet kao primjenjivi faktor na dva nivoa:

$$m_1 = \textit{NORDEN Marine 605}$$

$$m_2 = \textit{NORDEN Marine 605} + \textit{PTFE (LOCTITE, LB 8192)}$$

#### 4.3.5 Materijal pritisne pločice

Pritisna pločica u Timken ispitnom uređaju simulira protutijelo tj. rukavac u tribološkom sustavu *kompozitni klizni ležaj / rukavac* opisanog u poglavlju 2.4.2.

Vrlo je važno napomenuti da pri kontaktu pritisne pločice i ispitnog uzorka imamo dodir u liniji te je dodirna površina relativno mala, dok u realnom sustavu *klizni ležaj / rukavac* imamo veću površinu dodira koja ovisi o velikom broju parametara opisanih u poglavlju 2.16.

Materijal rukavca vrlo je istražen u znanstvenim radovima i literaturi. Prema literaturi [7], [13] [51], [84] najčešće se koristi čelik *St 44-2*.

Čelik je optimalni materijal za izradu rukavca jer je to najzastupljeniji materijal u strojarskim konstrukcijama te vrlo pogodan za obradu metodom odvajanja čestica. Ovaj materijal je vrlo pogodan za rukavce koji su u kontaktu s kliznim ležajem uz podmazivanje uljem, mastima ili nekim krutim mazivom.

Prilikom upotrebe duromernog kompozita kao ležajnog materijala najčešće pomazivanje u tom sustavu je voda, slana voda i kruto mazivo vrlo tankog mazivog sloja.

Maziva male viskoznosti poput vode u sustavu *klizni ležaj / rukavac*, ako je rukavac napravljen od čelika koji nije korozijski postojan može doći do oštećenja kliznog ležaja i/ili rukavca.

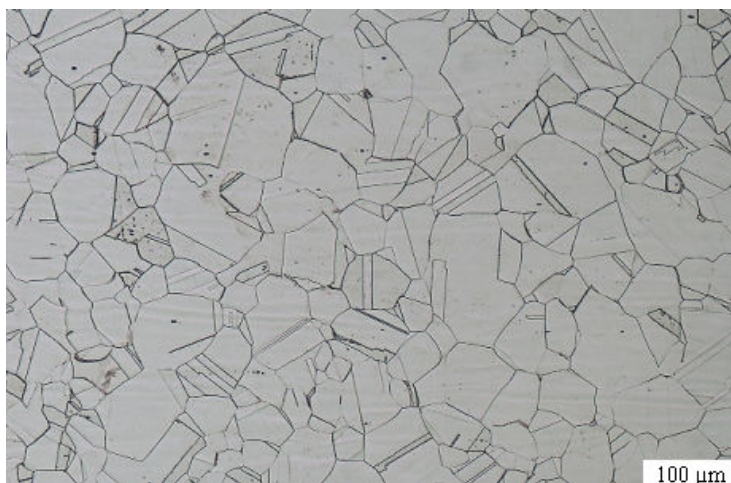
Pregledom literature [3], [13], [42], [49], [84] najčešće korišteni materijali za izradu rukavca koji kao radni medij za podmazivanje i hlađenje kliznog ležaja koriste demineraliziranu vodu, riječnu vodu, slanu vodu te PTFE kruta maziva su čelici otporni na koroziju *AISI304*, *AISI 316*, *AISI 316L*. Ako imamo u mediju za podmazivanje i hlađenje dodatak male koncentracije (do 5% maksimalno) kiseline i/ili lužine tada se koristi kao materijal rukavca *Incorel 625*.

U slučaju kada u kontaktu rukavca i kompozitnog kliznog ležaja dolazi do pojave podtlaka koji može dovesti do stvaranja kavitacije moguća su oštećenja rukavca i/ili kliznog ležaja [12], [24]. Za izvođenje pokusa na Timken ispitnom uređaju odabran je čelik otporan na koroziju *AISI 316 (X5 CrNiMo 17-12-2)* od kojeg su izrađene pritisne pločice dimenzije 35×35×35 mm, u tabeli 7 mogu se vidjeti kemijska svojstva dok se u tablici 8 mogu vidjeti mehanička svojstva odabranog materijala [91], [92]. *AISI 316* sadrži oko 0,08% ugljika, dodatak od 2-2,5%

molibdena poboljšava otpornost materijala na piting koroziju, ovaj čelik otporan na koroziju ima potpunu austenitnu strukturu na sobnoj temperaturi (Slika 46).

Značajke ovog čelika su dobra kovnost, duktilnost, otpornost na koroziju te postojanost na vrlo visokim i niskim temperaturama [6], [50].

Nedostatak ovog materijala je abrazivno djelovanje na polimerne materijale po kojima dolazi do klizanja ovog tipa čelika otpornog na koroziju kao i vrlo slaba kemijska postojanost na lužine [26], [44], [46], [93].



Slika 46. Struktura čelika otpornog na koroziju AISI 316

Tablica 7. Kemijski sastav čelika otpornog na koroziju AISI 316

C / %	Si / %	Mn / %	P / %	S / %	Cr / %	Ni / %	Mo / %	N / %
≤ 0,08	≤ 1,0	≤ 2,0	≤ 0,045	≤ 0,03	16-18	10-14	2-2,5	≤ 0,1

Tablica 8. Mehanička svojstva čelika otpornog na koroziju AISI316 pri 20 °C

Tvrdoća / HB	$R_{p0,2}$ / MPa	$R_m$ / MPa	Istezljivost $A$ / %
≤ 205	460	600-720	40

Korišten materijal za pritisnu pločicu je *AISI 316*.

#### 4.3.6 Tvrdoća pritisne pločice

Prema podacima iz literature [13], [49], [86], [92] za izradu rukavca tj. pritisne pločice preporuča se koristiti čelike niže tvrdoće od 190 do 250 (HB).

Tvrdoća pritisne pločice od AISI 316 izmjerena je u Laboratoriju ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu te je izmjerena vrijednost iznosila 195 HB.

#### 4.3.7 Hrapavost pritisne pločice

Pregledom literature [29], [33], [94] može se vidjeti da površinska hrapavost uvelike utječe na faktor trenja, tj. ovisno o veličini površinske hrapavosti ovisi i veličina faktora trenja. Promjenom površinske hrapavosti dvaju tijela koji su u međusobnom kontaktu dolazi i do promjene faktora trenja. Prema preporukama za veličinu površinske hrapavosti rukavca u našem slučaju pritisne pločice preporuča se vrijednost od 0,4 do 0,8  $\mu\text{m}$ . Izmjerom površinske hrapavosti pomoću mjernog instrumenta *Mitutoyo* tip *SURFTEST SJ-210* opisanog u poglavlju 4.2 dobivene su slijedeće vrijednosti navedene u tablici 9.

**Tablica 9. Izmjerene vrijednosti površinske hrapavosti**

Ploha br.	1-1	2-2	3-3	4-4
Izmjerena vrijednost Ra / $\mu\text{m}$	0,77	0,72	0,76	0,71

#### 4.3.8 Plan pokusa

Vrlo velik broj istraživanja u znanosti i industriji je empirijsko. Upotreba statističkih metoda u pogledu planiranja pokusa može se značajno povećati efikasnost procesa eksperimentiranja što može dovesti do pouzdanijih metoda izvođenja zaključka vezano za predmet nekog ispitivanja. Pokusi se u proizvodnim organizacijama izvode radi povećanja znanja o raznim proizvodnim procesima. U svrhu kontinuiranog poboljšanja kvalitete proizvoda ili procesa nužno je razumjeti ponašanje procesa te broj varijabli i njihov utjecaj na procese [95]. U strojarskim sustavima pokusi se vrlo često rade u svrhu istraživanja, procjene ili potvrde neke hipoteze. Istraživanje se odnosi na razumijevanje podataka iz nekog procesa. Procjena se odnosi na utvrđivanje učinka procesnih varijabli ili faktora na izlazne karakteristike nekog procesa. Potvrda podrazumijeva provjeru predviđenih rezultata dobivenih iz pokusa. U proizvodnim procesima vrlo često je od primarnog interesa za istraživanje odnos između ključnih ulaznih varijabli ili faktora te izlaznih procesa. Statističke metode kao i statističko razmišljanje imaju vrlo važnu ulogu u planiranju, provođenju, analizi i interpretaciji podataka inženjerskih pokusa. U planiranju pokusa inženjer često radi promjene ulaznih varijabli ili faktora, a zatim određuje kako se izlazna svojstva razlikuju u skladu s tim. Vrlo je važno napomenuti da sve varijable ne utječu jednako na izvođenje pokusa. Stoga je cilj da se pokus planski osmisli kako bismo shvatili koje varijable najviše utječu na proces [96].

Primjena plana pokusa u proizvodnim procesima značajna je za:

- Poboljšanje stabilnosti procesa.
- Poboljšanje dobiti i povrat ulaganja.
- Smanjenje proizvodnih troškova.
- Smanjena vremena konstruiranja i vrijeme razvoja.
- Povećano razumijevanje odnosa između ključnih ulaznih i izlaznih procesa.

Industrijski eksperimenti uključuju slijed aktivnosti:

1. Hipoteza je pretpostavka koja je motivacija za eksperiment.
2. Pokus je niz testova provedenih za ispitivanje hipoteze.
3. Analiza uključuje razumijevanje podataka i obavljanje statističke analize podataka prikupljenih eksperimentom.
4. Tumačenje rezultata eksperimentalne analize.
5. Zaključak uključuje je li prvotna hipoteza istinita ili lažna. Vrlo često se više eksperimenata obavlja kako bi se ispitala hipoteza.

Temeljna načela planiranja pokusa vrlo su važan dio svakog pokusa te se sastoje od tri osnovna djela, a to su replikacija, randomizacija i blokiranje.

Replikaciju se može opisati kao ponavljanje osnovnog pokusa što omogućava procjenu greške pokusa. Randomizacijom se određuje nasumičan redoslijed ispitivanja ispitnih uzoraka.

Blokiranje se može objasniti kao tehniku koju se koristi za povećanje preciznosti kod pokusa [95], [97].

Prilikom dva pokusa koji su izvedeni u ovom radu, prvi pokus na ispitnom uređaju Timken bit će izveden u svrhu ispitivanja granica opteretivosti duromernog kompozitnog materijala, dok drugi pokus, koji će biti pojašnjen u daljnjem tekstu, izveden je s ciljem ispitivanja kompozitnog ležajnog materijala u realnim radnim uvjetima.

Pri ispitivanju na Timken ispitnom uređaju kao i na uređaju namijenjenom za ispitivanje kliznog ležaja u realnim uvjetima rada, odabran je faktorski plan pokusa. Faktorski plan pokusa odabran je zbog toga što se s manjim brojem provedenih pokusa može generirati veću količinu informacija o tome kako ulazne varijable utječu na izlazne podatke procesa. Broj izvedenih pokusa ovisi o broju faktora. Kod Timken ispitnog uređaja postoje dva faktora, stoga slijedi  $2^2=4$  pokusa kao što se može vidjeti u tablici 10. Svaki pokus je ponavljan tri puta na tri različita

ispitna uzorka. Pri ispitivanju na uređaju za ispitivanje kliznih ležajeva u realnim radnim uvjetima postoje četiri faktora pa slijedi  $2^4=16$  pokusa. Svaki pokus je ponovljen tri puta [96].

**Tablica 10. Faktorski plan za Timken ispitni uređaj**

$2^2$	$n_1$	
	$F_1$	$F_2$
$m_1$	1,1	1,2
$m_2$	2,1	2,2

#### 4.3.9 Provedba pokusa na Timken ispitnom uređaju

Izvođenje pokusa odvijalo se na sljedeći način: prije ispitivanja ispitni uzorak od duromernog kompozita kao pritisna pločica od čelika otpornog na koroziju odmašćena je sredstvom za odmašćivanje proizvođača *LOCTITE*, tip SF 7063. Nakon odmašćivanja ispitni uzorak kao i pritisna pločica podvrgnuti su mjerenju mase i hrapavosti površine dodirnih ploha. Ovaj postupak proveden je istim redoslijedom i nakon ispitivanja. Prije i poslije pokusa mjeren je vanjski promjer ispitnog uzorka. Rezultati mjerenja mase i hrapavosti površine kao i razlika vanjskog promjera ispitnog uzorka prije i poslije pokusa vidljivi su u tablici 11.

Razlika promjera kao i razlika mase koriste se za utvrđivanje stupnja trošenja ispitnog materijala koje je opisano u poglavlju 2.17.

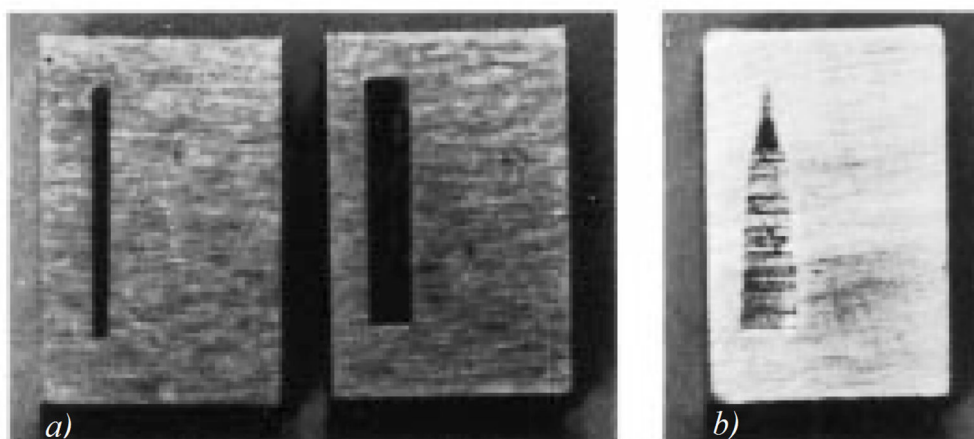
Tijekom izvođenja pokusa, prikupljanje podataka provodi se pomoću mjernog pojačala, tip *Spider 8* proizvođača *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM)* (Njemačka) [75] i programskog paketa *Catman* [76] koji je priključen na računalo koje služi za prikaz i pohranu podataka. Rezultati pokusa prikazani su u tablici 12.

Grafički prikaz pomoću dijagrama pokazuje detaljnije zbivanja tijekom pokusa. Obradom dobivenih podataka učinjen je dijagram za svaku ispitnu grupu. Kod ispitnih grupa A, B i F dolazi do oštećenja uzorka zbog preopterećenja kompozitnog materijala što dovodi do njegovog oštećenja. Ova mjerenja bilo je nužno izvesti kako bi se utvrdila granica opteretivosti kompozitnog materijala. Nakon utvrđivanja granice opteretivosti duromernog kompozitnog materijala, utvrđene su četiri ispitne grupe koje su prikazane u tablici 12, a to su C, D, E i G. Rezultate u toku ispitivanja od ispitnih grupa C, D, E i G u obliku dijagrama koji pokazuje temperaturu dodira ispitnog uzorka i pritisne pločice može se vidjeti na slikama 58, 59, 60 i 61.

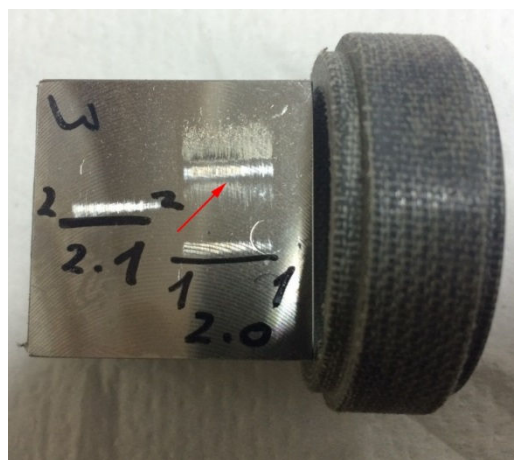


#### 4.3.10 Kontrola mjerenja na Timken ispitnom uređaju

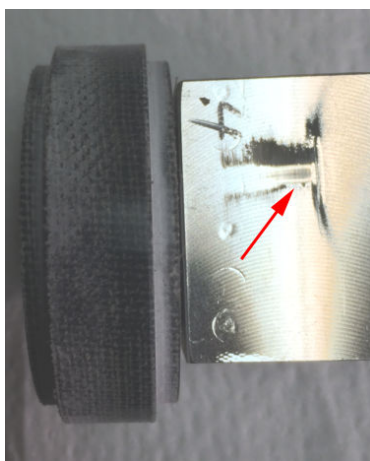
Prema ASTM normi D2509-93 [73] vrlo je važno voditi računa o obliku dodirne površine između ispitnog uzorka i pritiskne pločice. Ako uzorak dobro ne naliježe mjerenje neće biti u skladu s normom pa usporedba rezultata neće biti relevantna. Na slici 47 pod a) može se vidjeti ravnomjerna površina dodira pri kojoj se može očekivati realne mjerne rezultate, dok pod b) gdje imamo neravnomjernu dodirnu površinu rezultati će biti nerelevantni. Pri neravnomjernoj dodirnoj površini dolazi do većeg dodirnog tlaka jer je površina dodira manja što može utjecati na povećano stvaranje topline u području dodira dvaju tijela što za posljedicu može imati promjenu faktora trenja. Prilikom postavljanja ispitnog uzorka na Timken ispitni uređaj, ako je došlo do greške u montaži ispitnog uzorka i/ili pritiskne pločice mogu imati neravnomjeran dodir *ispitnog uzorka / pritiskne pločice* (Slika 49).



Slika 47. Pritisna pločica a) ravnomjeran dodir i b) neravnomjeran dodir [73]



Slika 48. Ravnomjeran dodir ispitnog uzorka i pritiskne pločice



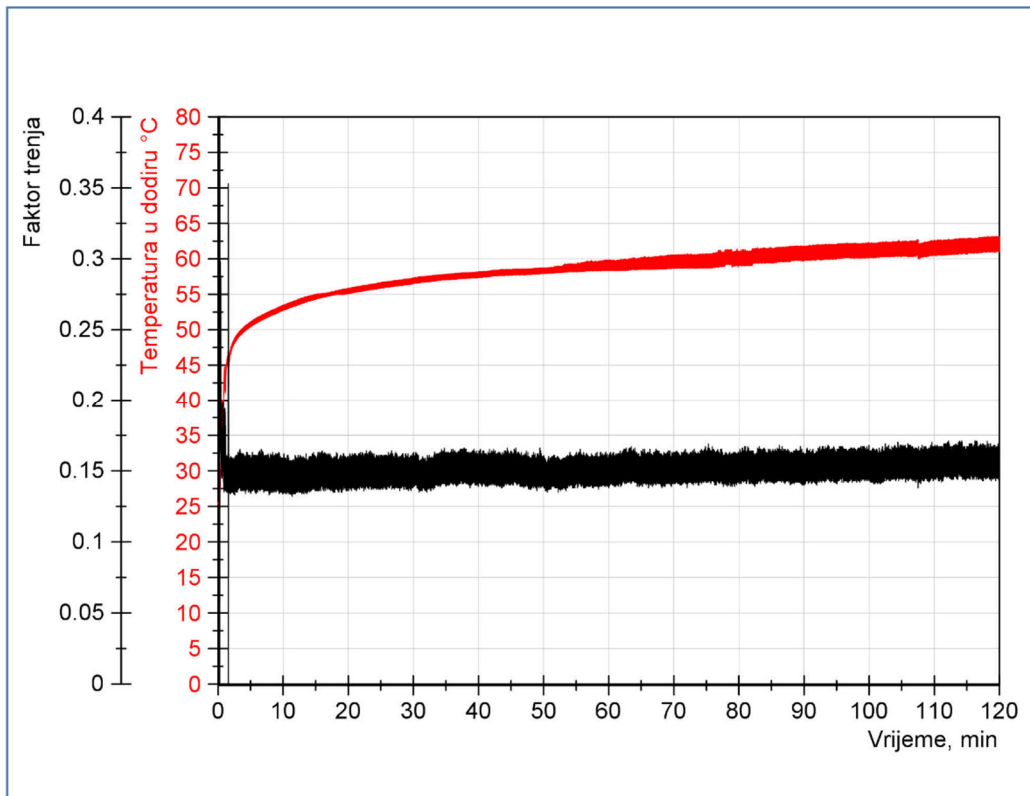
**Slika 49. Neravnomjeran dodir ispitnog uzorka i pritisne pločice**

Tablica 11. Rezultati ispitivanja prije i poslije pokusa na Timken ispitnom uređaju

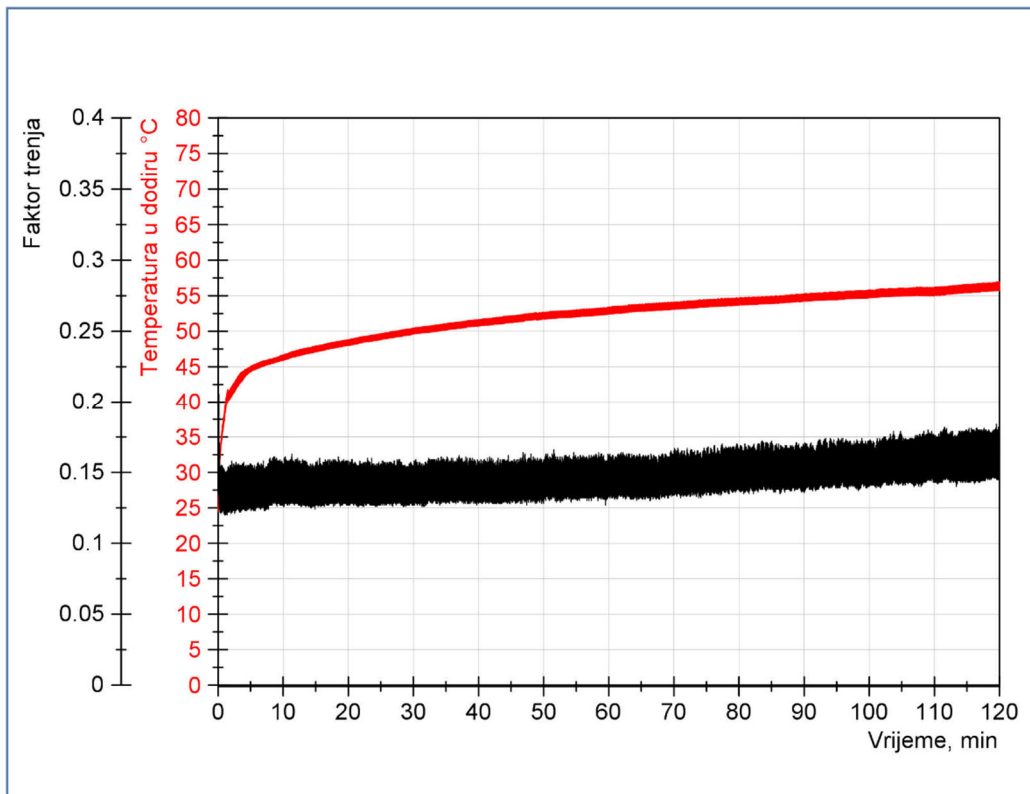
Datum ispitivanja	Broj uzorka	Mazivo/ Ispitna grupa	Sila / N / Broj okretaja / o/min	Masa uzorka / g	Masa uzorka s dodatkom PTFE-a / g	Masa uzorka nakon ispitivanja / g	Hrapavost uzorka Ra / $\mu$ m	Hrapavost uzorka nakon ispitivanja Ra / $\mu$ m	Promjer ispitnog uzorka / mm	Promjer uzorka s dodatkom PTFE-a / mm	Promjer ispitnog uzorka nakon ispitivanja / mm	Broj pritisne pločice	Masa pločice prije ispitivanja / g	Masa pločice nakon ispitivanja / g
30.06.2016. Br. 1	1,2	PTFE/A	135/300	12,021	12,059	11,990	5,148	1,29	43,01	43,09	42,99	2-1 5/2-2	216,159	216,158
28.06.2016. Br. 1	1,4	PTFE/A	135/300		11,954	11,844	3,45	2,97			43,11	2-1	216,161	216,159
30.06.2016. Br. 2	1,5	PTFE/B	200/300		11,972	11,964	3,12	1,49	42,95	43,03	42,98	2-1/5	216,160	216,158
01.07.2016. Br. 1	1,6	PTFE/C	80/300	12,001	12,018	12,010	4,98	3,99		43,06	43,01	2-1	216,158	216,156
14.07.2016. Br.1	1,7	D	80/300	12,006	---	12,000	4,89	1,67	42,99	----	42,97	2-2/1	216,066	216,065
15.07.2016. Br. 1	1,8	E	60/300	11,836	---	11,829	3,40	2,90	43,02	----	43,00	2-2/2,1	216,064	216,063
15.07.2016. Br. 2	1,9	F	80/450	11,879	---	11,850	6,16	3,28	43,03	---	42,98	2-2/2	216,064	216,063
16.07.2016. Br. 1	2,0	D	80/300	11,874	---	11,842	6,21	4,40	43,04	---	42,98	2-2/3-1	216,178	216,175
16.07.2016. Br. 2	2,1	E	60/300	11,973	---	11,967	3,08	2,76	43,01	---	42,98	2-2/3-2	216,175	216,175
16.07.2016. Br. 3	2,2	D	80/300	11,913	---	11,906	2,28	2,04	43,02	---	42,99	2-2/3-3	216,175	216,176
17.07.2017. Br. 1	2,3	E	60/300	12,003	---	12,000	4,28	2,21	42,99	---	42,97	2-2/4-4	216,176	216,175
17.07.2017. Br. 2	2,4	PTFE/C	80/300	11,989	12,009	12,001	2,69	1,09	42,99	43,04	42,99	2-2/4-1	216,254	216,252
17.07.2017. Br. 3	2,5	PTFE/C	80/300	11,955	11,962	11,957	4,68	1,37	42,98	43,03	43,00	2-2/4-2	216,252	216,258
18.07.2016. Br. 1	2,6	PTFE/C	80/300	11,945	11,979	11,967	4,12	0,82	42,99	43,04	42,99	2-2/4-3	216,258	216,255
19.07.2016. Br. 1	2,7	PTFE/G	60/300	11,994	12,032	12,021	3,26	1,03	43,01	43,05	42,98	2-2/4-4	216,255	216,253
19.07.2016. Br. 2	2,8	PTFE/G	60/300	11,970	12,078	12,011	3,49	1,54	42,98	43,03	43,01	2-2/5-1	216,253	216,252
19.07.2016. Br. 3	2,9	PTFE/G	60/300	11,960	12,010	12,001	4,50	0,89	43,01	43,05	42,99	2-2/5-2	216,256	216,255

**Tablica 12. Rezultati ispitivanja dobiveni u tijeku pokusa na Timken ispitnom uređaju**

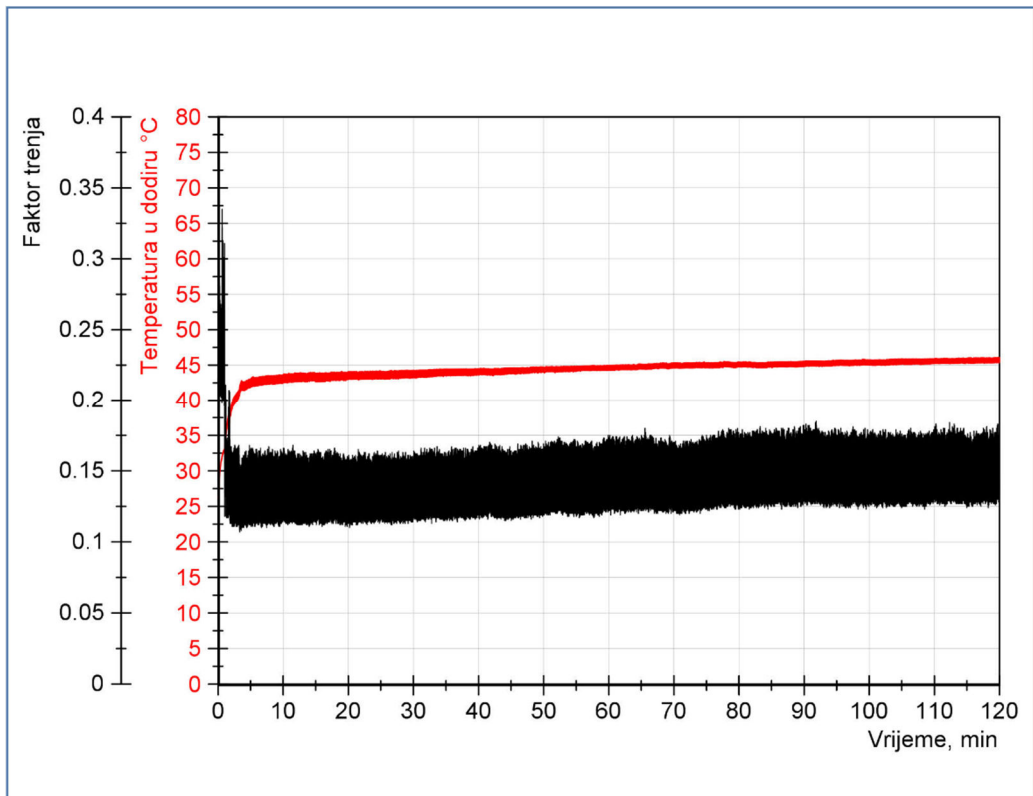
Ispitna grupa	Mazivo	Sila opterećenja / N / broj okretaja / min <sup>-1</sup>	Dimenzija ispitnog uzorka U×V×L / mm	Slika broj:	Temperatura kućišta					Trenje kliznog ležaja				
					Srednja temperatura / °C	SS E+08	SD	Varijanca	Greška	Srednji faktor trenja	SS E+08	SD	Varijanca	Greška
A	PTFE	135/300	31×43×15	54	Neuspjelo mjerenje									
B	PTFE	200/300	31×43×15		Neuspjelo mjerenje									
C	PTFE	80/300	31×43×15	50	54,1631	1,122	1,5053	2,2661	0,002436	0,1427	7787,6819	0,003101	9,636E-06	5,023E-6
D		80/300	31×43×15	51	53,5069	9,583	1,8582	3,4530	0,003214	0,1491	7468,2789	0,010129	0,0000103	0,000018
E		60/300	31×43×15	52	42,7596	2,999	4,7732	22,7838	0,011859	0,2835	13152,510	0,028525	0,000814	0,000071
F		80/450	31×43×15		Neuspjelo mjerenje									
G		80/450	31×43×15	55	Neuspjelo mjerenje									
H	PTFE	60/300	31×43×15	53	52,1219	1,038	0,70195	0,4927	0,001136	0,1449	8035,2221	0,003176	0,00001	5,139E-6



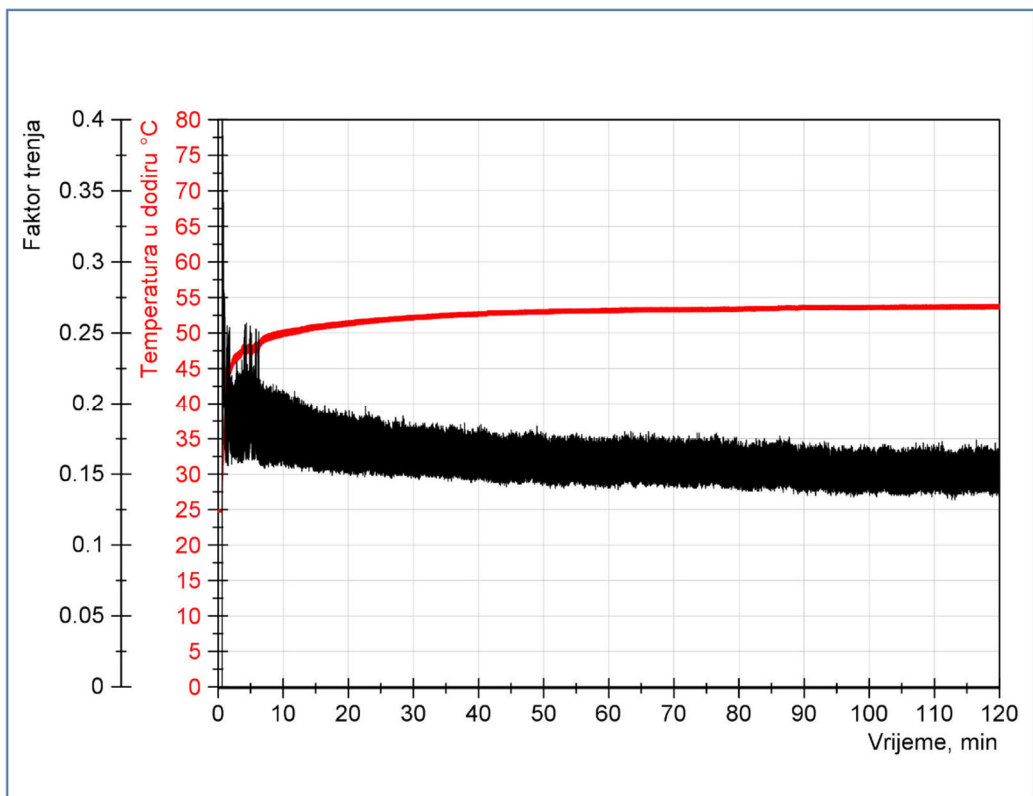
Slika 50. Dijagram trenja i temperature za ispitnu grupu C pri opterećenju od 80 N s dodatkom PTFE maziva



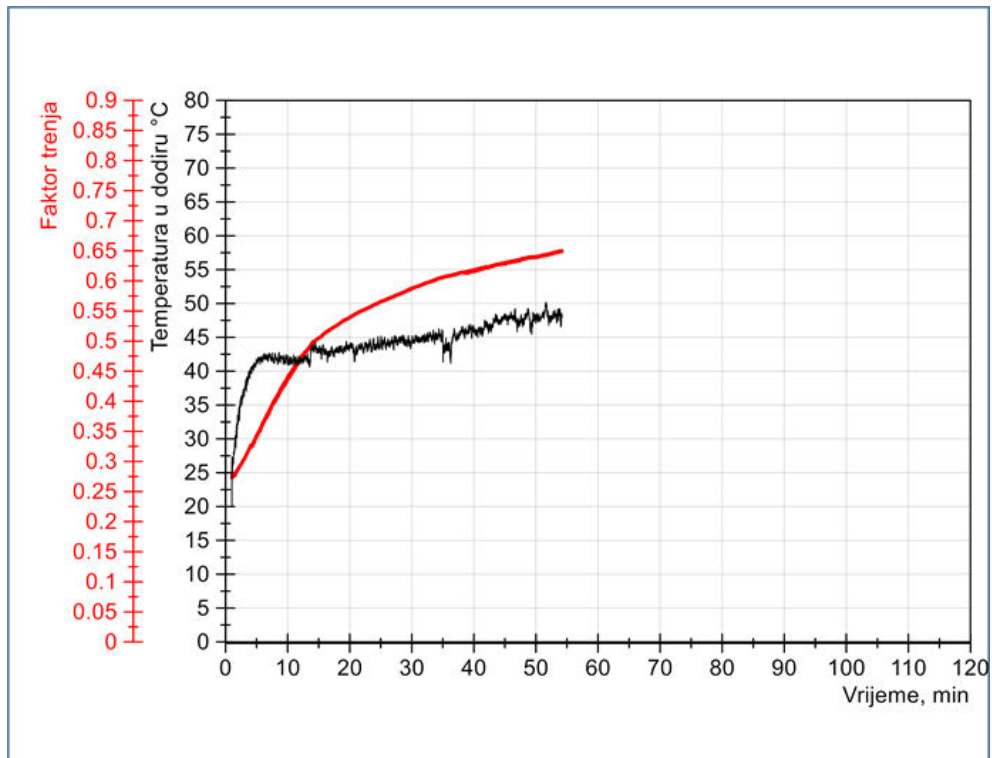
Slika 51. Dijagram trenja i temperature za ispitnu grupu D pri opterećenju od 80 N



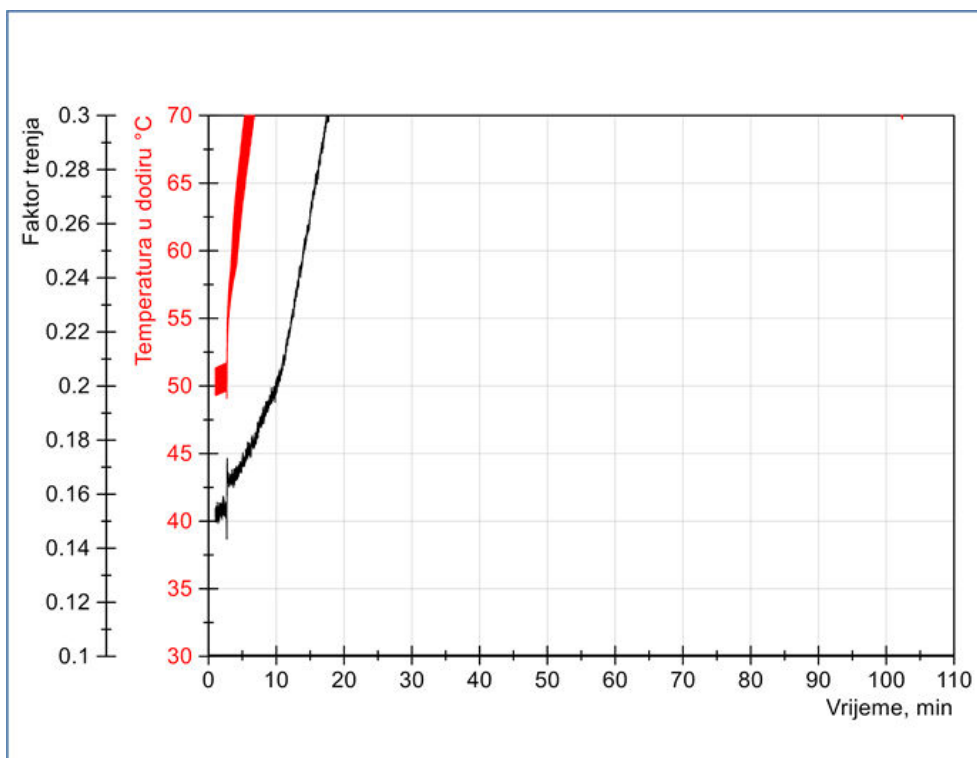
Slika 52. Dijagram trenja i temperature za ispitnu grupu E pri opterećenju od 60 N



Slika 53. Dijagram trenja i temperature za ispitnu grupu H pri opterećenju od 60 N s dodatkom PTFE maziva



Slika 54. Dijagram trenja i temperature za ispitnu grupu A pri opterećenju od 135 N s dodatkom PTFE maziva



Slika 55. Dijagram trenja i temperature za ispitnu grupu G pri opterećenju od 80 N s dodatkom PTFE maziva

#### 4.3.11 Zaključak o ispitivanju na Timken ispitnom uređaju

Obradom rezultata mjerenja u NI DIAdem programskom paketu za slučaj kada se pri ispitivanju koristi kruto mazivo (PTFE). Na ispitnom uzorku trenje je manje u odnosu na ispitne uzorke bez krutog maziva kao što se može vidjeti na slikama 51 i 52 koje prikazuju dijagrame ispitnih grupa D i E iz tablice 12. Vrlo je važno napomenuti da je prilikom ispitivanja uzoraka koji su imali dodatak maziva primijećeno da je temperatura u području kontakta nakon nekog vremena rada stabilna bez povećanja, kao što se može vidjeti na slikama 50 i 53 (ispitna grupa C i H, tablica 12), što nam ukazuje na stabilan rad na duži vremenski period koji može iznositi i više od predviđenih 120 min koliko je trajao pojedinačni pokus. Kod ispitnih grupa A, B, F i G kod kojih se željelo ispitati maksimalno dopušteno opterećenje duromernog kompozita uglavnom imali smo dva slučaja oštećenja zbog kojih se moralo prekinuti mjerenje.

Prvi slučaj oštećenja zbog kojeg se moralo prekinuti ispitivanje bilo je zaribavanje ispitnog uzorka od kompozitnog materijala. Razlog zaribavanja bio je prevelika obodna brzina od 1,031 m/s pri opterećenju od 80 N kao što se može vidjeti na slici 55 koja prikazuje ispitnu grupu G. Pregledom literature [19], [55], [85] istraženo je da su kompozitni ležajni materijali više podložni sustavima pri kojima postoji veće opterećenje u pogledu tlaka na ležaj pri manjim obodnim brzinama, nego u slučajevima gdje postoje visoke obodne brzine i niža opterećenja. Ispitivanje provedeno na ispitnoj grupi G potvrđuje da ova zakonitost vrijedi i za duromerne kompozite.

Drugi slučaj oštećenja zbog kojeg se moralo prekinuti ispitivanje bilo je značajno povećanje temperature u području ispitnog uzorka i pritisne pločice tj. temperatura je bila viša od dopuštene te je došlo do širenja kompozitnog ispitnog uzorka što je utjecalo na povećanje zračnosti uzorka što je za posljedicu imalo velike vibracije mjerne doze te se iz sigurnosnih razloga moralo prekinuti ispitivanje. Tip oštećenja prouzročen previsokom temperaturom u dodiru može se vidjeti na slici 54 pod ispitnom grupom A, pogledom na dijagram može se vidjeti da temperatura i trenje rastu jako brzo te nakon 55 minuta dolazi do velikih vibracija i prekida ispitivanja. Nakon završenog ispitivanja na Timken ispitnom uređaju može se zaključiti da predviđena ispitna opterećenja u pogledu sile  $F_1= 60$  N i  $F_2= 80$  N te pri obodnoj brzini od  $v_1= 0,675$  min<sup>-1</sup> na osnovu prethodnih istraživanja može se zaključiti da ispitni uzorci na tim opterećenjima mogu raditi stabilno u predviđenom vremenu ispitivanja, ako rade bez podmazivanja te uz podmazivanje krutim mazivom (PTFE) mogu raditi značajno duže.

Ovo istraživanje daje dovoljno dobre smjernice za odabir ispitnih parametara na uređaju za ispitivanje kliznih ležajeva opisanog u sljedećem poglavlju.



# Ispitivanje trošenja kompozitnog kliznog ležaja

---

U ovom dijelu rada bit će detaljno opisan postupak određivanja faktora trenja, stupnja trošenja kao i temperature dodira kliznog ležaja i rukavca na uređaju za ispitivanje kliznih ležajeva.

U prvom poglavlju bit će opisan način računanja faktora trenja kao i opis postupka mjerenja faktora trenja na uređaju za ispitivanje kliznih ležajeva.

U drugom poglavlju bit će opisan postupak određivanja stupnja trošenja kao i obuhvatni kut dodira kliznog ležaja i rukavca preko kojeg se određuje volumensko trošenje.

Zbog izolatorskog svojstva kompozitnog ležajnog materijala bilo je potrebno definirati kako izmjeriti temperaturu rukavca i kućišta kliznog ležaja što je opisano u trećem poglavlju.

Nakon definiranja osnovnih smjernica koje su vrlo važne za konstruiranje geometrije kliznog ležaja, a to su faktor trenja, stupanj trošenja i temperatura koja nastaje uslijed klizanja kliznog ležaja i rukavca, mogu se definirati smjernice za izračun kuta dodira između kliznog ležaja i rukavca opisanog u četvrtom poglavlju.

Duromerni kompozitni materijal od kojeg su izrađeni klizni ležajevi posjeduje vrlo velik koeficijent toplinskog širenja, koji iznosi  $10 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  u odnosu na čelik otporan na koroziju AISI 316 od kojeg je izrađen rukavac kod kojeg iznosi  $17,2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , dok za čelik St 42, od kojeg je izrađeno kućište ležaja iznosi  $4,7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  što ukazuje na veliko širenje kompozitnog materijala pri djelovanju topline. Vrlo veliko širenje kompozitnog materijala uzrokuje promjenu geometrije kliznog ležaja što u konačnici uzrokuje promjenu zračnosti između kliznog ležaja i rukavca opisanog u petom poglavlju. Kako bi se detaljnije istražio utjecaj temperature na kompozitni klizni ležaj u šestom poglavlju, termodinamičkim proračunom opisano je kako proračunati temperaturu rukavca, toplinsko širenje rukavca, proračun toplinskog toka kliznog ležaja, proračun toplinskog širenja kliznog ležaja i kućišta kliznog ležaja. Na osnovu termodinamičkog proračuna koji je opisan u šestom poglavlju može se definirati proračun korigiranog toplinskog širenja kompozitnog kliznog ležaja pomoću kojeg se definira relativna zračnost između kliznog ležaja i rukavca što je opisano u sedmom poglavlju.

## 5.1 Eksperimentalno ispitno postolje za ispitivanje kliznih ležajeva i mjerna oprema

Nakon ispitivanja kompozitnog ležajnog materijala na Timken ispitnom uređaju opisanog u četvrtom poglavlju, obradom rezultata ispitivanja utvrđene su granice opteretivosti ležajnog materijala pri kojima ne dolazi do oštećenja materijala u radu.

Cilj ispitivanja bio je utvrditi granicu opteretivosti materijala pri kojemu ležaj može raditi duži period vremena, a da ne dođe do zaribavanja ležaja ili nekog drugog oblika oštećenja. Pri ispitivanju kompozitnog ležajnog materijala bez i s podmazivanjem krutim mazivom (PTFE) bilo je vrlo važno pronaći radne parametre u pogledu opterećenja pri odgovarajućem broju okretaja pri kojem nakon nekog vremena ne dolazi do povećanja temperature u području kontakta ispitnog uzorka i pritisne pločice što ukazuje da ležajni materijal pri određenim ispitnim parametrima može raditi bez da dođe do nekog oblika oštećenja. Nedostatak Timken ispitnog uređaja je da na ispitni uzorak koji pritišće pritisna pločica djeluje veliki kontakti tlak jer je dodir u liniji između dva materijala u kontaktu.

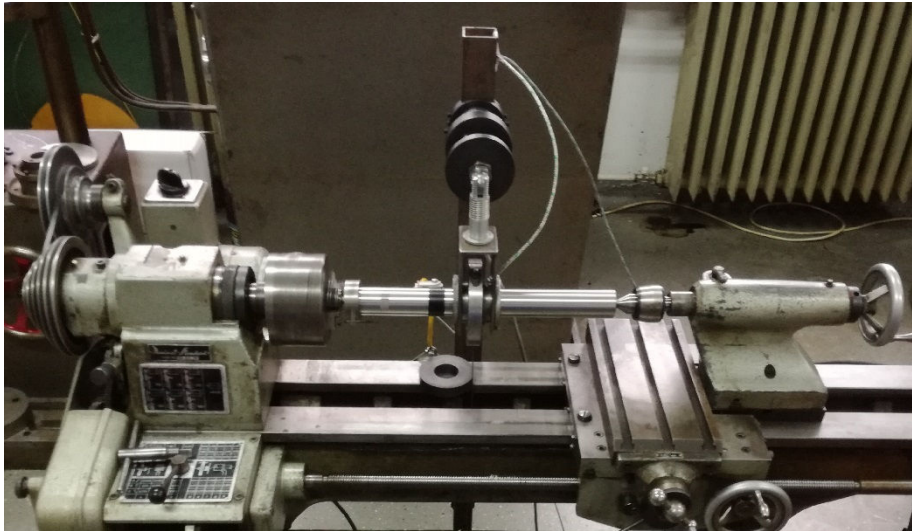
U slučaju kliznog ležaja dodirna površina *kliznog ležaja / rukavca* je nekoliko puta veća te je dodirni tlak između kontaktnih površina niži što može utjecati na promjenu faktora trenja, stupnja trošenja te stvaranje toplinskog toka između dodirnih površina. Kako bi se definirao uređaj za ispitivanje kliznih ležajeva u realnim radnim uvjetima pregledom literature [98], [99], [100] može se pronaći uređaje za ispitivanje kliznih ležajeva koju odgovaraju našim zahtjevima.

Na osnovu prethodnih istraživanja konstruiran je uređaj za ispitivanje kliznih ležajeva koji se može vidjeti na slici 56. Dok je presjek uređaja sa svim dijelovima vidljivi su na slici 57. Uređaj za ispitivanje kliznih ležajeva postavljen je u Laboratoriju za elemente strojeva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu gdje je i provedeno ispitivanje. Uređaj za ispitivanje kliznih ležajeva sastoji se od pogonskog djela tj. adaptiranog tokarskog stroja tipa *EMCO Maximat Standard (Austria)* s kojim se pogoni rukavac na kojem se nalazi uređaj za ispitivanje kliznih ležajeva.

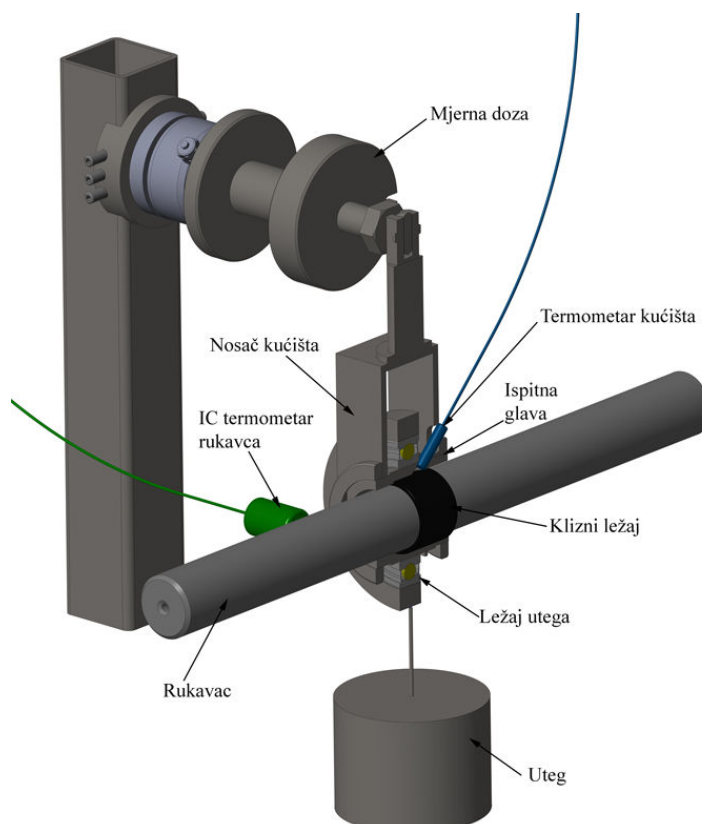
Pogon uređaja ide od elektromotora preko stupnjevanog klinastog remenskog prijenosa koji omogućuje okretanje rukavca u rasponu od 65 do 1550 min<sup>-1</sup>.

Kompozitni klizni ležaj uprešan je u kućište uređaja, a sve zskupa učvršćeno je u kotrljajući kuglični ležaj radi mogućnosti mjerenja djelovanja sile trenja.

Opterećenje ležaja realizirano je pomoću vješanja utega, u ovom slučaju opterećenje je bilo realizirano na dvije razine.



Slika 56. Uređaj za ispitivanje kliznih ležajeva



Slika 57. Presjek uređaja za ispitivanje kliznog ležaja

## 5.2 Mjerni sustav

Tijekom provedbe pokusa prikupljanje podataka provodi se s pomoću mjernog pojačala tip *Spider 8* proizvođača *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM)* (Njemačka) [75] i programskog paketa *Catman* [76] koji je instaliran na računalo koje služi za prikaz i pohranu podataka što je vidljivo na slici 58, dok je opis mjernog sustava ispitnog uređaja prikazan u tablici 13.

Prilikom mjerenja pomoću *Catman* programskog paketa frekvencija snimanja podataka bila je 60 Hz što znači da u dva sata mjerenja koliko traje ispitivanje, imamo otprilike 430,000 podataka.

Ovako veliku količinu podataka vrlo teško je obraditi u nekom standardnom programskom paketu kao što je npr. *Office Excel* (Microsoft) stoga je korišten programski paket *NI DIAdem* (National Instruments) [101] razvijen za analizu velike količine podataka. U ovom programu su obrađeni i statistički podatci mjerenja kao što su suma kvadrata (SS), standardno odstupanje (SD), varijanca (V), srednja vrijednost mjerenog kanala, greška mjerenja.

Dijagrami mjerenja na Timken ispitnom uređaju kao i na uređaju za ispitivanje kliznih ležajeva dobiveni su obradom podataka u ovom programu. Prednost ovog programa u odnosu na ostale slične programe za ovu namjenu je njegova brza obrada podataka i jednostavnost izrade dijagrama.

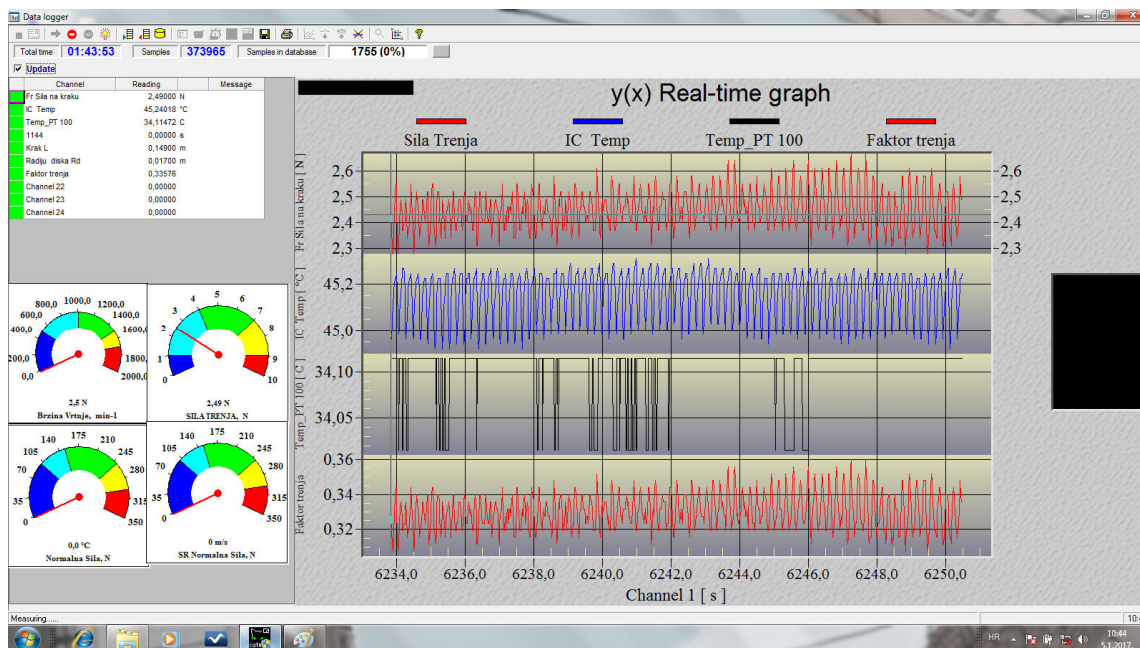
Tablica 13. Mjerni sustav ispitnog uređaja za klizne ležajeve

Mjerena veličina	Mjerni sustav	Prikupljanje signala		Opisano u poglavlju broj/str.
		Upravljačkim sustavom stroja	Vanjskim mjernim računalom	
Sila trenja, $F_{T2}$ / N	Mjerna doza <i>HBM TYP U3</i>		✓	3,1/ str. 63
Brzina vrtnje / $\text{min}^{-1}$	Tahometar tip DT-2259	✓		3,1/str. 79
Temperatura kućišta kliznog ležaja / °C	Termometar <i>TC LTD International</i> , tip K, klasa 1		✓	5,5/str. 103
Temperatura dodira kliznog ležaj i rukavca / °C	IR, beskontaktni termometar <i>OPTRIS CT P7</i>		✓	3,2/str. 62

Prije i poslije ispitivanja mjerena je razlika mase uzorka kompozitnog kliznog ležaja, hrapavost površine mjerena je prije i poslije ispitivanja na ispitnom uzorku kliznog ležaja kao i na rukavcu. Unutarnji promjer kliznog ležaja bio je mjeran nakon uprešavanja u kućište kliznog ležaja prije i poslije ispitivanja pomoću uređaja za mjerenje unutarnjeg promjera mjernog područja 18-35 mm, preciznosti 0,001 mm proizvođača *Carl Mahr* tip D189 (Njemačka). Vrlo je važno napomenuti da je mjerenje izvedeno kada je kućište ležaja bilo ohlađeno na 25 °C. Korišteni uređaji u mjerenju vrijednosti prije i poslije ispitivanja navedeni su u tablici 14.

**Tablica 14. Uređaji za mjerenje prije i poslije ispitivanja**

Mjerena veličina	Mjerni sustav	Opisano u poglavlju/str.
Unutarnji promjer kliznog ležaja / mm	<i>Mahr</i> , D 189	5,2/ str. 95
Hrapavost površine / $\mu\text{m}$	<i>Mitutoyo</i> , SURFTEST SJ210	4,2/ str. 70
Masa uzorka m / g	<i>Kern &amp; Sohn GmbH</i> , PRJ 1200-3N	4,2/ str. 69
Vanjski promjer kliznog ležaja / mm	<i>Mitutoyo</i> , tip 293	4,2/ str. 72



**Slika 58. Programsko sučelje Catman za prikupljanje i obradu podataka**

### 5.3 Određivanje faktora trenja

U ovom radu faktor trenja između duromernog kliznog ležaja i čeličnog rukavca dobiven je na ispitnom uređaju prema odgovarajućoj definiciji za izračun faktora trenja u skladu sa standardom DIN 50323-3 [41]. Faktor trenja bit će određen jednačinom (38). Sila koja djeluje na ležaj  $F_L$  jednaka je sili utega i ispitne glave u kojem se nalazi ležaj te djeluje u kontra smjeru u odnosu na kontaktnu površinu dodira kliznog ležaja i rukavca kao što se vidi na slici 59. Sila trenja  $F_T$  djeluje okomito u odnosu na os normalne sile  $F_N$ .

$$\mu = \frac{F_T}{F_L} \quad (38)$$

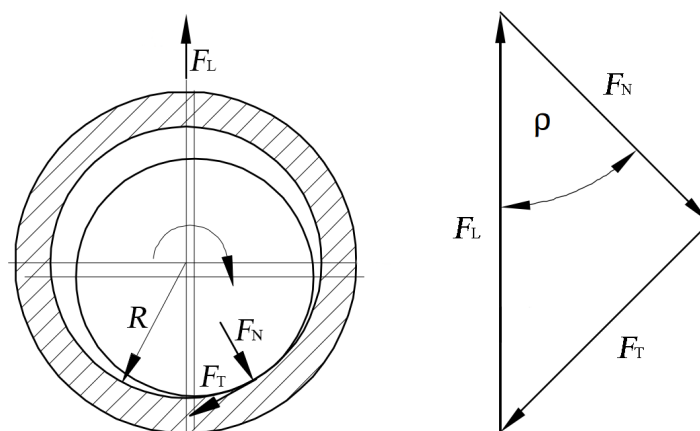
Faktor trenja  $\mu$  se može izračunati direktno u slučaju da se ne može izmjeriti normalna sila  $F_N$  koja djeluje na ležaj. U tom slučaju prema literaturi [102], [103] moramo izračunati nominalni faktor trenja  $\mu_{nom}$  prema jednačini (39).

$$\mu_{nom} = \frac{F_T}{F_L} \quad (39)$$

Sila trenja  $F_T$  i sila opterećenja ležaja  $F_L$  može se kontinuirano mjeriti na ispitnom uređaju za klizne ležajeve. Prema literaturi [102], [103] matematički je opisana veza između nominalnog faktora trenja te faktora trenja prema DIN 50323-3 koji se može vidjeti u jednačini (40).

$$\mu = \frac{\mu_{nom}}{\sqrt{1 - \mu_{nom}^2}} \quad (40)$$

Daljnijim istraživanjima prema literaturi [102], [103] faktor trenja može se izračunati preko nominalnog faktora trenja pomoću jednačine (41).

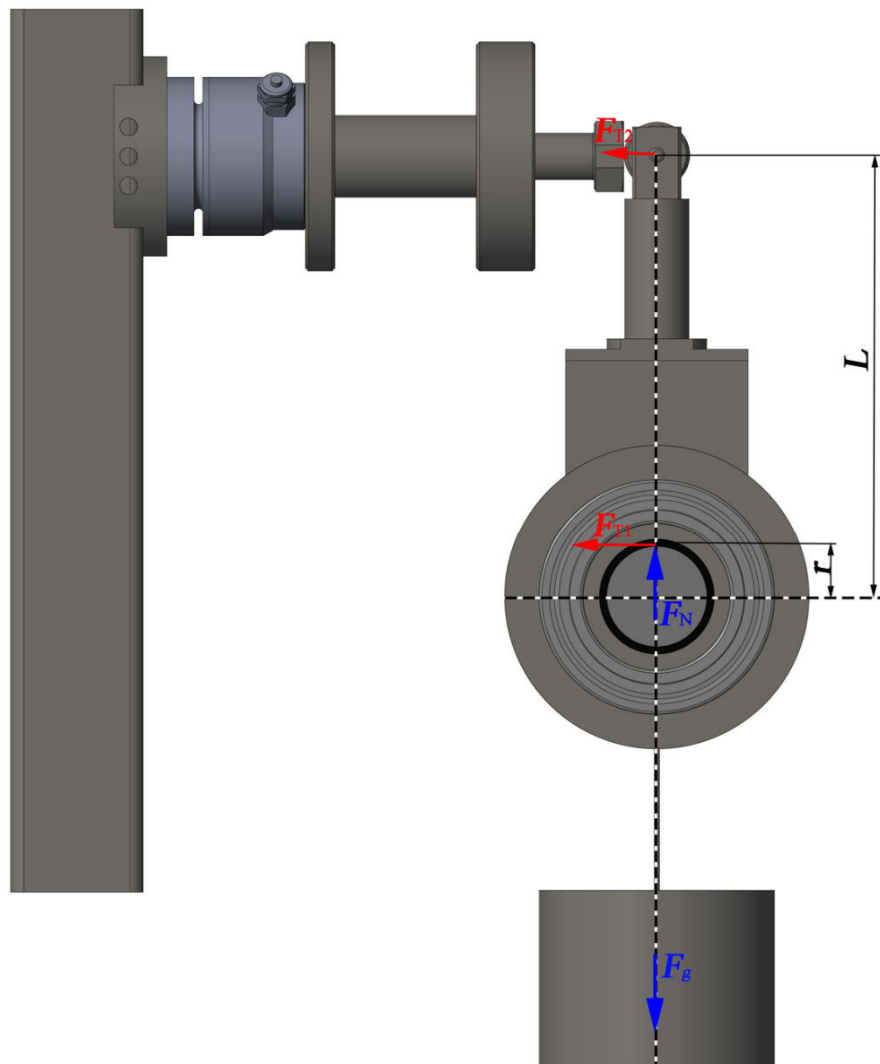


Slika 59. Djelovanje opterećenja na klizni ležaj i vektori sile

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\mu_{nom}}\right)^2 - 1}} \quad (41)$$

Sila trenja između kompozitnog kliznog ležaja i rukavca označena je oznakom  $F_{T1}$ , a sila koja je preko momentne poluge prenesena na mjernu dozu označena je oznakom  $F_{T2}$  (Slika 60). Trenje se može izračunati pomoću jednadžbe (42). Važno je napomenuti da je normalna sila  $F_N$  jednaka sili opterećenja utega  $F_g$ .

$$\mu = \frac{F_{T2} \cdot L}{r} \cdot \frac{1}{F_N} \quad (42)$$



Slika 60. Ispitni uređaj za klizne ležajeve

## 5.4 Trošenje

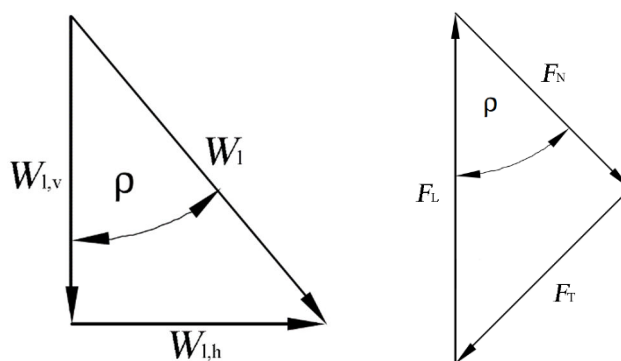
Pri ispitivanju kliznih ležajeva linearno trošenje, kao i gubitak mase svakog duromernog kliznog ležaja, izmjereno je i izračunato nakon ispitivanja.

U slučaju preopterećenja, bilo da se radi o prevelikom opterećenju na ležaj zbog prevelike sile na ležaj i/ili prevelike obodne brzine rukavca, dolazi do stvaranja velikog toplinskog toka u području kontakta kliznog ležaja i rukavca. Prilikom stvaranja velikog toplinskog toka dolazi do stvaranja visoke temperature u kontaktnom području između kliznog ležaja i rukavca koja dovodi do oštećenja kompozitnog ležaja. U tom slučaju nije moguće određivanje trošenja, kao ni referentan gubitak mase jer pri povišenim temperaturama dolazi do razdvajanja matrice od ojačala u duromernom kompozitu.

Prema DIN 50320 [34] promjena mase ležajnog materijala okomita je na nosivu površinu te se definira kao linearno trošenje. Prilikom određivanja kontinuiranog linearnog trošenja dolazi do određenih problema koji će biti opisani u daljnjem tekstu.

Na temelju predviđenog ispitnog uređaja u kojem je ugrađen, ispitni klizni ležaj je opterećen ležajnom silom  $F_L$  kao što je prikazano na slici 59. Vrlo je važno napomenuti da se linearno trošenje  $W_1$  ne mjeri u ovisnosti o djelovanju normalne sile  $F_N$  već se linearno trošenje mjeri u ovisnosti o djelovanju ležajne sile  $F_L$  kao što se vidi na slici 61.

Promjena kuta trenja  $\rho$  rezultira promjenom faktora trenja što teoretski za posljedicu može imati promjenu stupnja linearnog trošenja. No u realnosti ipak ne dolazi do promjene linearnog trošenja kao što se može vidjeti na slici 63.

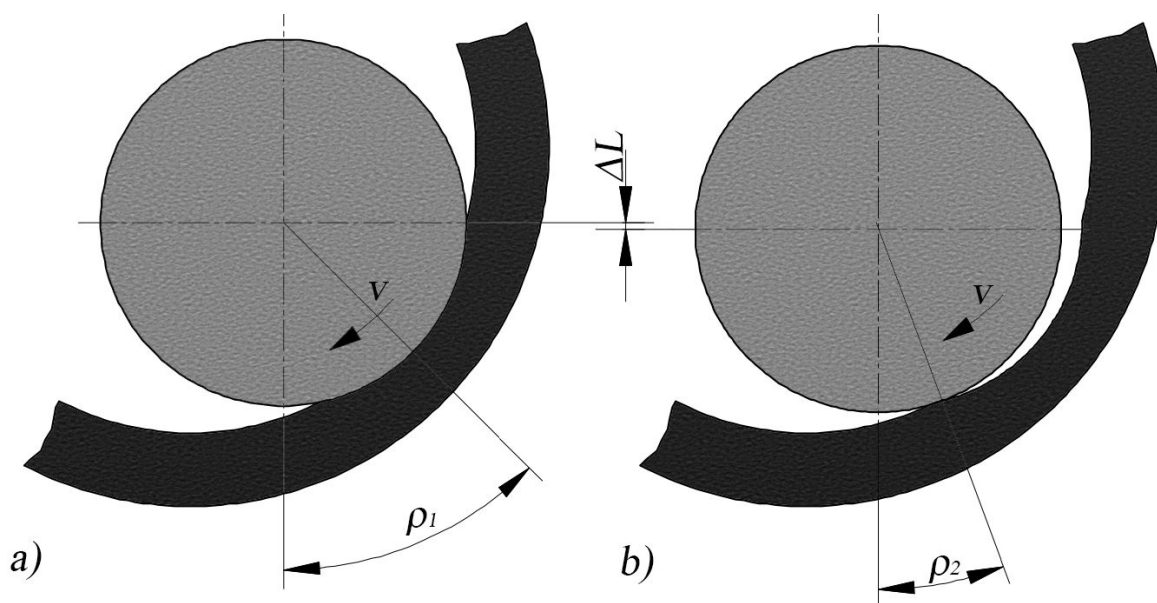


Slika 61. Linearno trošenje i vektori sila kliznog ležaja/rukavca

Na slici 62 pod a) vidi se određen kut trenja  $\rho_1$  u kontaktu kliznog ležaja i rukavca. Ako dođe do promjene kontaktne površine kliznog ležaja i rukavca, dolazi do promjene kuta trenja  $\rho_2$  kao što prikazuje slika 62 pod b), a da pri toj promjeni ne dođe do značajne promjene u stupnju



linearnog trošenja. Prilikom promjene kuta trošenja s  $\rho_1$  na  $\rho_2$  dolazi do pomaka vratila za  $\Delta L$  (Slika 62) koji, ovisno o svojoj veličini, može utjecati na promjenu ukupne dužine puta koje rukavac prođe po kliznom ležaju.



Slika 62. Promjena izmjerenog linearnog trošenja u slučaju promjene kuta trenja

Veći problem je toplinsko širenje kompozitnog ležajnog materijala unutar čeličnog kućišta ispitnog uređaja što može značajno utjecati na promjenu tolerancija kliznog ležaja i rukavca, što za posljedicu može imati veliku razliku u promjeni veličine kuta trenja te u tom slučaju može doći do promjene linearnog trošenja.

Zbog navedenih problema mjerenja kontinuiranog linearnog trošenja, preporuča se mjerenje vrijednosti ispitnog uzorka na sobnoj temperaturi [42] tj. nakon ispitivanja duromernog kliznog ležaja. Potrebno je ispitni uzorak ostaviti da se ohladi kako bi mjerenje bilo što relevantnije.

Prema slici 61 vidi se ovisnost vertikalnog linearnog trošenja  $W_{l,v}$  i linearnog trošenja  $W_l$  o kutu trenja  $\rho$  što se može opisati jednadžbom (43) prema [34].

$$\cos \rho = \frac{W_{l,v}}{W_l} \quad (43)$$

Iz jednadžbe (43) linearno trošenje se može izraziti pomoću jednadžbe (44), dok kut trenja se može opisati jednadžbom (45). Iz jednadžbe (44) i (45) može se dobiti precizno opisano linearno trošenje kao što se može vidjeti u jednadžbi (46).

$$W_l = \frac{W_{l,v}}{\cos \rho} \quad (44)$$

$$\rho = \arctan \mu \quad (45)$$

$$W_1 = \frac{W_{1,v}}{\cos \left[ \arctan \left( \frac{1}{\sqrt{\left( \frac{1}{\mu_{nom}} \right)^2 - 1}} \right) \right]} \quad (46)$$

Ukupno linearno trošenje kliznog ležaja određuje se mjerenjem debljine stjenke ležaja prije i nakon pokusa. U slučaju ovog ispitivanja bit će mjeren unutarnji promjer kliznog ležaja prije i nakon ispitivanja pa je tom razlikom moguće utvrditi promjenu u debljini stjenke. Jedan od mogućih izvora pogreške prilikom mjerenja kao što je navedeno u literaturi [35], [42] je zbog lake deformacije stjenke duromernog kliznog ležaja. Preporuča se mjerenje unutarnjeg promjera ležaja tek kad je ugrađen u čelično kućište ispitnog uređaja.

Gubitak mase kliznog ležaja  $W_m$  bit će izmjeren preciznim mjerenjem na vagi opisanoj u poglavlju 4.2. Iz razlike u masi kliznog ležaja  $W_m$ , gustoće ležajnog materijala  $\rho$ , prijeđenog puta  $s$ , te ležajne sile  $F_L$  može se odrediti specifični stupanj trošenja  $k'$  koji je opisan jednadžbom (47).

$$k' = \frac{W_m}{\rho \cdot F_N \cdot s} \quad (47)$$

Specifični stupanj trošenja također može se izraziti preko volumnog trošenja  $W_v$ , prijeđenog puta i ležajne sile opisanog jednadžbom (48).

$$k' = \frac{W_v}{F_N \cdot s} \quad (48)$$

Volumensko trošenje može se odrediti pomoću linearnog trošenja  $W_1$ , promjer rukavca  $b$ , te širine ležaja  $B$ , opisano jednadžbom (49).

$$W_v = \pi \cdot d \cdot W_1 \cdot B \quad (49)$$

Površina dodira između kliznog ležaja i rukavca, uzrokovana deformacijom rukavca o podlogu mekanijeg kompozitnog ležaja, se može vidjeti na slici 63.

Kasnija istraživanja [104], [105] o volumenu trošenja kod kliznih ležajeva pojednostavljena su radi lakšeg računanja.

Istraživač Detter [106] opisao je volumno trošenje jednadžbom (53) u uvjetima kada idealne površine kontakta  $A_v$  između vratila i rukavca, što je vrlo rijetko u realnim slučajevima primjene kliznog ležaja u nekom stroju. Može se zaključiti da je proračun prema Detteru vrlo dobra teoretska osnova za daljnje istraživanje ove problematike.

Volumno trošenje [106], [105] za dodirni kut  $\gamma \leq 90^\circ$  u ovisnosti o zračnosti kliznog ležaja  $S$ , može se izračunati putem sustava jednažbi od (50) do (53).

$$\gamma = \arcsin \left[ \frac{d}{d+S} \cdot \sin \left[ \arccos \left[ 0,5 \left( \frac{d+S}{2 \cdot W_1 + S} + \frac{2 \cdot W_1 + S}{d+S} - \frac{d}{d+S} \cdot \frac{d}{2 \cdot W_1 + S} \right) \right] \right] \right] \quad (50)$$

$$\beta = \arccos \left[ 0,5 \left( \frac{d+S}{2 \cdot W_1 + S} + \frac{2 \cdot W_1 + S}{d+S} - \frac{d}{d+S} \cdot \frac{d}{2 \cdot W_1 + S} \right) \right] \quad (51)$$

$$A_v = \frac{d^2}{4} \cdot (\hat{\gamma} - \sin(\gamma) \cdot \cos(\gamma)) - \left( \frac{d+S}{2} \right)^2 \cdot (\hat{\beta} - \sin(\beta) \cdot \cos(\beta)) \quad (52)$$

$$W_v = A_v \cdot B \quad (53)$$

Gitter i Kunze [107], [108] istražili su realno područje dodira između kliznog ležaja i rukavca (Slika 64) te su zaključili da je realni promjer rukavca  $d_{ws}$  manji od promjera rukavca  $d$ , ali je manji i od unutarnjeg promjera kliznog ležaja  $D$ .

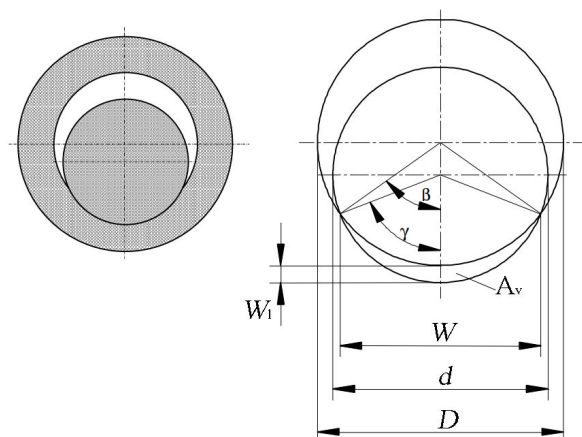
Iz istraživanja [107], [108] proizlazi sustav jednažbi od (55) do (57) za određivanje volumnog trošenja preko promjene unutarnjeg promjera kliznog ležaja prije i poslije ispitivanja.

Preko promjene unutarnjeg promjera kliznog ležaja može se izračunati površinu dodira između kliznog ležaja i rukavca prije ispitivanja i poslije ispitivanja, označeno oznakom  $A_1$  i  $A_2$  kao što vidi u jednažbi (55) (56). Nakon određivanja promjene površine jednažbom (57) može se odrediti volumno trošenje.

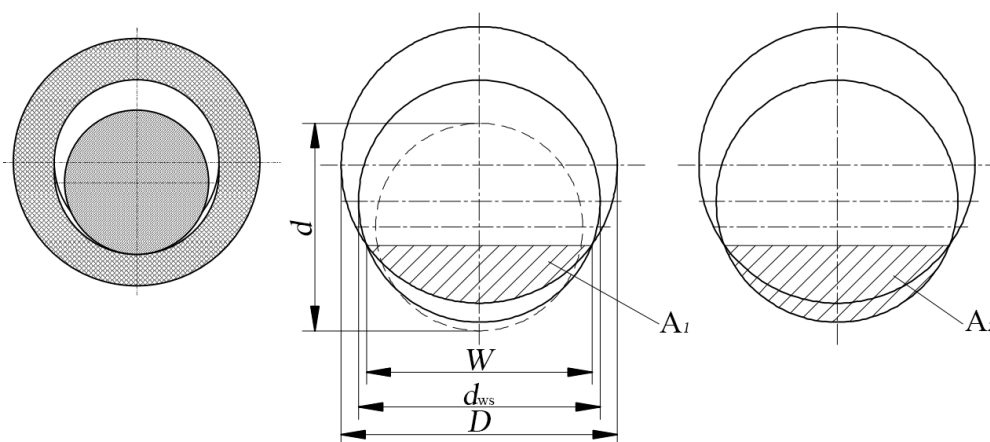
$$A_1 = \left[ \frac{W}{\frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{2} - \frac{W^2}{4}} + W_1 + \frac{W^2}{4 \left( \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{2} - \frac{W^2}{4}} + W_1 \right)}} \right] \cdot \left[ \frac{\frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{2} - \frac{W^2}{4}} + W_1}{2} + \frac{W^2}{8 \left( \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{2} - \frac{W^2}{4}} + W_1 \right)} \right]^2 - \frac{W}{2} \left[ \frac{W^2}{8 \left( \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{2} - \frac{W^2}{4}} + W_1 \right)} - \frac{\frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{2} - \frac{W^2}{4}} + W_1}{2} \right] \quad (55)$$

$$A_2 = \frac{D^2}{4} \cdot \arcsin \frac{W}{D} - \frac{W}{2} \cdot \sqrt{\frac{D^2}{2} - \frac{W^2}{4}} \quad (56)$$

$$W_v = (A_1 - A_2) \cdot B \quad (57)$$



Slika 63. Teoretska površina dodira kliznog ležaja/rukavca



Slika 64. Realna površina dodira kliznog ležaja/rukavca

## 5.5 Temperatura

Mjerenje temperature vrlo je važno zbog ortotropnog svojstva duromernog kompozita od kojeg su izrađeni klizni ležajevi za testiranje. Ortotropna struktura kompozita prilikom promjene temperature podložna je promjeni mehaničkih svojstava materijala što pri vrlo visokim temperaturama (iznad 90 °C) može dovesti do prekomjerne deformacije kliznog ležaja što za posljedicu može imati zaribavanje kliznog ležaja. Nedostatak duromernih kompozita su njegova izolatorska svojstava, bilo zbog električne izolacije kao i toplinske izolacije, što nam otežava mjerenje temperature kliznog ležaja pri radu. Kako bi izmjerili temperaturu nastalu trenjem kliznog ležaja i rukavca, unutar kućišta u kojem je smješten ispitni klizni ležaj ugrađen je precizni termometar klase 1 (Slika 65), proizvođača *TC LTD International*, tipa K prema

standardu IEC 584.1:1995 / BS EN 60584.1:1996 [109] mjernog područja od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+375\text{ }^{\circ}\text{C}$ , preciznosti  $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kako bi ostvarili što bolji kontakt između kućišta i termometra korištena je termalna pasta proizvođača *Artic cooling*, toplinske vodljivosti  $\lambda=5,6\text{ W/mK}$ .

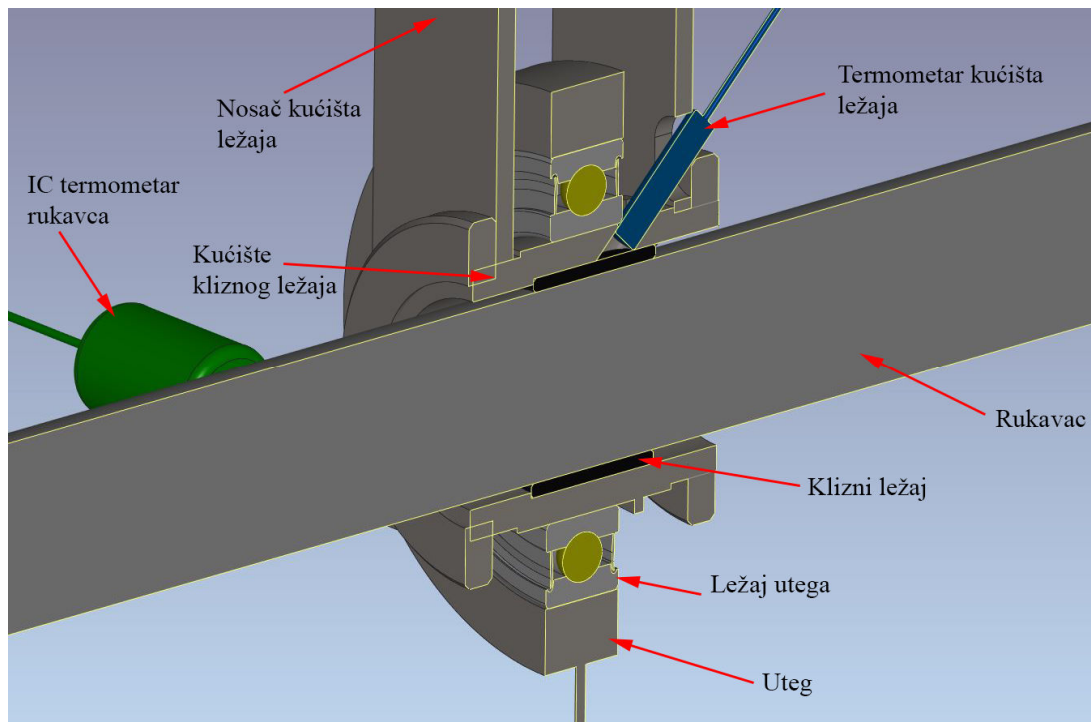


**Slika 65. Termometar tip K**

Na se na rukavcu mjeri temperatura beskontaktnim mjerilom opisanim u poglavlju 3.2. Beskontaktno mjerilo predviđeno je za mjerenje temperature isključivo polimernih materijala. Za slučaj mjerenja temperature na rukavcu od čelika AISI 316, zbog refleksije svjetlosti dolazi do greške prilikom mjerenja. Kako bi izbjegli grešku prilikom mjerenja beskontaktnim mjerilom temperature, dio vratila na kojem se mjeri temperatura obojen je u crnu mat boju kao što se vidi na slici 66. Radi smanjenja refleksije svjetlosti dobiva se preciznije mjerenje temperature vratila. Na slici 67 prikazani su dijelovi ispitnog uređaja za beskontaktno mjerenje temperature.



**Slika 66. Beskontaktno mjerilo temperature**



Slika 67. Beskontaktno mjerenje temperature rukavca

### 5.6 Kut dodira između kliznog ležaja i rukavca

U literaturi se kut  $\gamma$  [106] ili  $\beta$  [110] opisuje kao kut dodira između kliznog ležaja i rukavca (slika 71). Vrlo često se kut dodira naziva i obuhvatni kut. Kut dodira u daljnjem tekstu ovog rada bit će označen kao  $2\beta$ .

Istraživanja [110] su pokazala da klizni ležajevi uprešani u čelično kućište pri radnom opterećenju nemaju veći kut dodira od  $100^\circ$ . U slučaju da je kut veći od  $100^\circ$  istraživanja su pokazala da dolazi do značajnog povećanja faktora trenja.

Kut dodira veći od  $2\beta > 100^\circ$  prisutan je u strojevima u kojima su velika opterećenja kliznog ležaja te male obodne brzine rukavca. U takvim sustavima kut dodira je do  $140^\circ$ .

Teorijski opis dodira u liniji kliznog ležaja i rukavca značajno se mijenja pri opterećenju rukavca na klizni ležaj što uzrokuje elastičnu deformaciju kliznog ležaja kao i rukavca što također utječe i na promjenu dodirne površine dvaju tijela u kontaktu.

Na kut dodira  $2\beta$  može se utjecati prilikom konstruiranja promjenom geometrije kliznog ležaja. Zbog djelovanja deformacije i/ili trošenja materijala može doći do promjene kuta dodira.

U istraživanju [37], [42], [79] je zabilježeno da povišenje radne temperature ležajnog materijala utječe na povećanje kuta dodira.

Djelovanje topline na duromerni kompozitni klizni ležaj u nekom određenom vremenu može izazvati puzanje materijala tj. može dovesti do viskoelastičnih promjena u strukturi duromernog kompozita što može utjecati na promjenu zračnosti ležaja koje kao posljedicu mogu imati promjenu kuta dodira.

Puzanje materijala definira se kao pojava s kojom tijekom vremena dolazi do povećanja deformacije pri konstantnom opterećenju tj. konstantnom naprezanju. Prilikom puzanja kompozita vrijeme se uzima kao faktor pri opisivanju veze između naprezanja i deformacije materijala.

Istraživač Barbero [111] je prilikom ispitivanja viskoelastičnih svojstava polimernih kompozita utvrdio da na puzanje kompozita utječe viskoelastično svojstvo matrice dok efekt puzanja nema mjerljiv utjecaj na vlakna. Ova pojava je kod duromernih kompozita u literaturi vrlo malo istražena.

Istraživač Wenger [110] izveo je jednadžbu (58) za izračun kuta dodira  $2\beta$  uzevši u obzir linearno trošenje ležaja  $W_1$ , zračnost  $S$  između ležaja i rukavca te elastičnu linearnu deformaciju ležaja  $a_{el}$ .

$$2\beta = 2 \cdot \arccos \left( \frac{S}{S + (W_1 + a_{el})} + \frac{0,5 \cdot S + (W_1 + a_{el})}{D} \right) = 235 \cdot \sqrt[4]{\frac{p}{E_e \cdot \psi_F}} \quad (58)$$

## 5.7 Proračun zračnosti kliznog ležaja

Proračun zračnosti kliznog ležaja je od vrlo velike važnosti kako bi ležaj u nekom stroju mogao odraditi predviđeni radni vijek. Prilikom proračuna zračnosti ležaja mnogi utjecaji poput vrste materijala ležaja / rukavca, obodne brzine rukavca, opterećenja, stvaranje topline uslijed djelovanja sile trenja na ležaj, itd. utječu na pravilan izbor dimenzija ležaja. Potrebna teorijska relativna zračnost  $\psi_E$  prilikom ugradnje ležaja u kućište prema jednadžbi (61) je mjera koja se može izmjeriti prije početka rada kliznog ležaja.

Pri radu kliznog ležaja u području kontakta ležaja i rukavca dolazi do stvaranja trenja koje za posljedicu ima stvaranje topline. Prilikom stvaranja topline dolazi do promjene geometrije ležaja koja za posljedicu ima promjenu zračnosti ležaja. Pokusima su istraženi kako će promjena faktora trenja i temperature ovisiti o opterećenju, zračnosti ležaja i tipu podmazivanja ležaja.

Pri određivanju zračnosti ležaja temeljna je razlika između zračnosti ležaja nakon ugradnje u kućište koje se označava oznakom  $S_E$ , a naziva se još i ugradbena zračnost te zračnosti ležaja prije ugradnje u kućište koja se označava oznakom  $S_F$  i naziva se proizvodna zračnost.

Zračnost prije ugradnje  $S_F$  jednaka je zračnosti koju se dobije nakon proizvodnje ležaja, dok prilikom uprešavanja ležaja u kućište dolazi do deformacije ležajnog materijala što uzrokuje smanjenje zračnosti na konačnu veličinu označenu oznakom  $S_E$ .

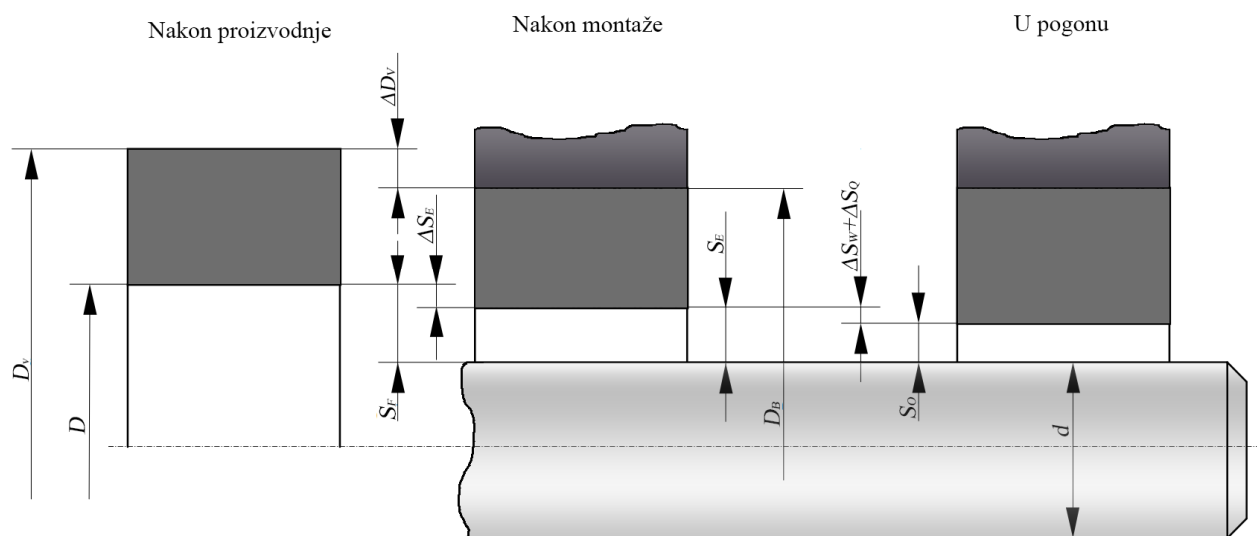
U postupku određivanja zračnosti vrlo je velika razlika između zračnosti ležaja prije i poslije ugradnje u kućište zbog postupka uprešavanja ležaja koje izaziva deformaciju kompozitnog ležajnog materijala.

Postoje slučajevi kod kojih se kompozitni ležaj lijepi u kućište pomoću ljepila. U tom slučaju deformacija ležajnog materijala je znatno manja stoga je i razlika prije navedenih zračnosti manja.

Proizvodna zračnost  $S_F$ , kao što se može vidjeti u jednadžbi (59) te na slici 68, sastoji se od pogonske zračnosti  $S_0$ , kao i ostalih parametara koji utječu na ukupnu veličinu zračnosti, a to su smanjenje zračnosti zbog tlačnog uprešavanja ležaja u kućište ( $\Delta S_E$ ), toplinsko širenje ležajnog materijala ( $\Delta S_W$ ) i promjena zračnosti zbog bubrenja ležajnog materijala ( $\Delta S_Q$ ).

$$S_F = S_0 + \Delta S_E + \Delta S_W + \Delta S_Q \quad (59)$$





Slika 68. Zračnost kliznog ležaja, prije i poslije ugradnje te u toku rada

Pogonsku zračnost  $S_0$  se definira kao zračnost koja se javlja u pogonskim uvjetima pri klizanju rukavca po kliznom ležaju. Vrlo je važno naglasiti kako je ova zračnost promjenjiva tj. ovisna je o zagrijavanju pri kojem dolazi do deformacije kliznog ležaja.

Vrijednost osnovne zračnosti mora biti dovoljno velika tako da u najtežim radnim uvjetima stroja imamo dovoljno zračnosti kako bismo osigurali siguran rad kliznog ležaja.

U slučaju da je vanjski promjer  $D_v$  duromernog kompozitnog ležaja veći od potrebnog prilikom uprešavanja ležaja može doći do prevelike deformacije koja može uzrokovati smanje osnovne zračnosti  $S_0$  što za posljedicu može imati zaribavanje ležaja.

Prilikom odabira optimalnog vanjskog promjera  $D_v$  kliznog ležaja nakon njegovog uprešavanja doći će do smanjenja zračnosti za  $\Delta S_E$ . Dodatno smanjenje zračnosti uzrokovano je stvaranjem topline nastalom iz trenja klizanja kliznog ležaja i rukavca što uzrokuje širenje duromernog kompozita jer se ležaj ne može širiti prema van. Zbog čeličnog kućišta dolazi do smanjenja unutarnjeg promjera ležaja što uzrokuje smanjenje zračnosti za  $\Delta S_w$ . Upotrebom maziva, ovisno o tipu kompozita, dolazi do većeg ili manjeg bubrenje materijala što također dovodi do smanjenja unutarnjeg promjera ležaja što za posljedicu ima smanjenje zračnosti  $\Delta S_Q$ .

Ugradbena zračnost  $S_E$ , kao što se može vidjeti u jednadžbi (60), sastoji se od osnovne zračnosti, toplinske promjene zračnosti i promjene zračnosti uzrokovane bubrenjem ležajnog materijala.

$$S_E = S_0 + \Delta S_w + \Delta S_Q \quad (60)$$

Relativna zračnost za proračun hidrodinamičkih kliznih ležajeva opisana je jednadžbom (61), veličina ugradbene zračnosti  $S_E$  podijeljena je s unutarnjim promjerom ležaja prije ugradnje  $D$ .

$$\psi_E = \frac{S_E}{D} \quad (61)$$

## 5.8 Termodinamički proračun toplinskog toka za sustav *klizni ležaj / rukavac*

Za proračun potrebne zračnosti u tribološkom sustavu *klizni ležaj/rukavac* potrebno je postaviti termodinamički model sustava tj. dijelova koji se nalaze u međusobnom kontaktu kako bi odredili temperature pojedinih dijelova te istražili utjecaj na promjenu njihovih geometrijskih veličina koje se mogu vidjeti na slici 69.

U daljnjem radu za geometrijske varijable prilikom proračuna bit će korištene oznake  $w$  (toplo),  $kh$  (hladno) i  $ko$  (korigirano).

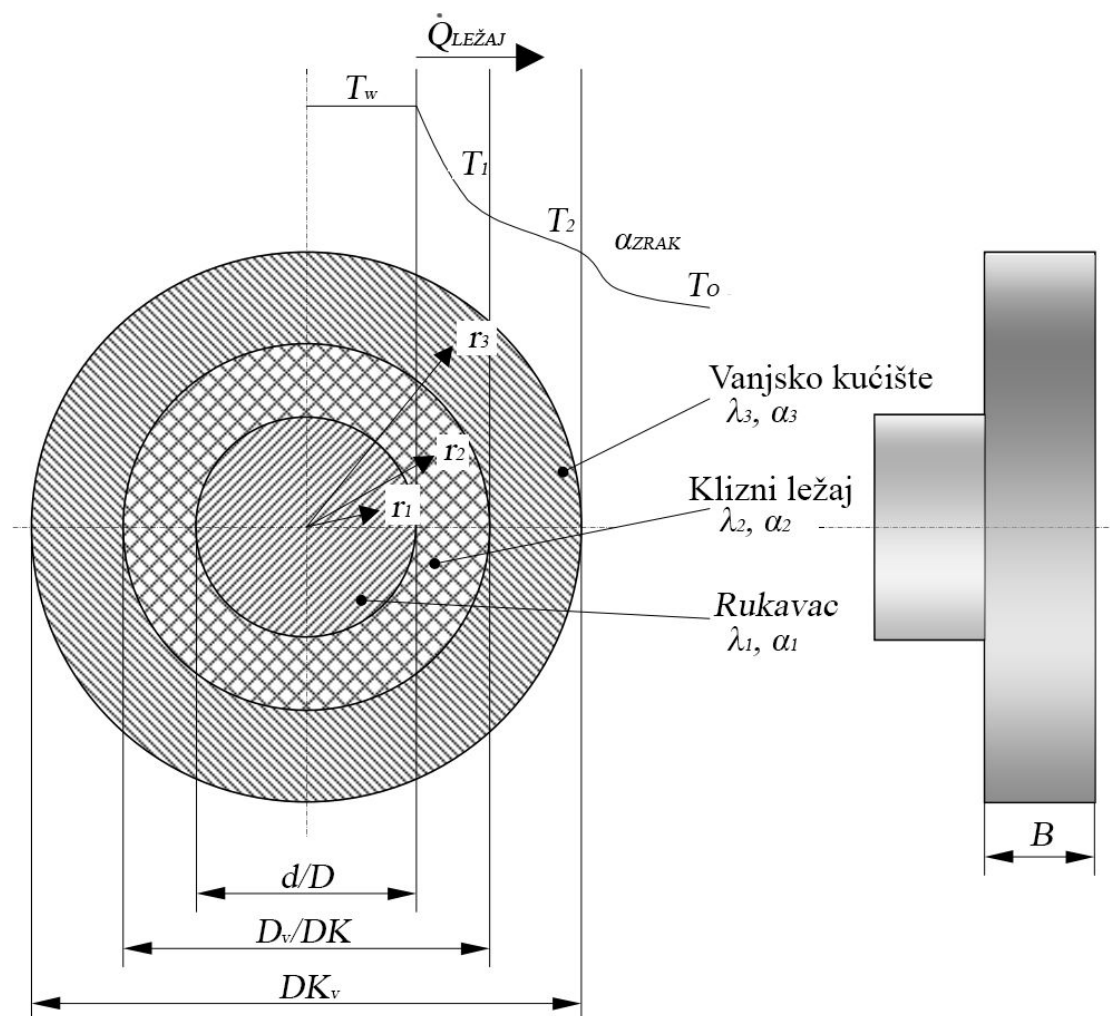
Pojednostavljenja i pretpostavke:

- Koeficijent toplinskog rastezanja je konstantn.
- Brzina klizanja, temperatura okoline, sila na ležaj i faktor trenja se ne mijenjaju.
- Potreban je stacionaran prijenos topline.
- Općenito je koeficijent vodljivosti topline  $\lambda$  ovisan o temperaturi,  $\lambda = \lambda(T)$ , a kod kompozitnih materijala (npr. duromerni kompozit ) ovisi i o smjeru vlakna u njemu.
- Zračenje i konvekcija nisu uzeti u obzir unutar sustava *klizni ležaj / rukavac*.
- Prema Detteru [106] rukavac se ravnomjerno zagrijava u području kontakta s kliznim ležajem kada djeluje radijalna sila na ležaj.
- U aksijalnom smjeru dolazi do pada temperature rukavca, što smo dalje od kliznog ležaja temperatura će biti manja.
- Razlika temperature između kliznog ležaja i vanjskog kućišta kliznog ležaja biti će mjerena prilikom ispitivanja.
- Temperatura rukavca će biti mjerena u neposrednoj blizini kontakta s kliznim ležajem.

Kako bismo odredili potrebnu zračnost kliznog ležaja potrebno je odrediti relativnu zračnost  $\psi_E$  prije ugradnje ležaja u kućište, kao i relativnu zračnost koja se javlja prilikom rada ležaja označenu oznakom  $\psi_w$ .

Kako bi odredili gore navedene relativne zračnosti potrebno je poznavati sljedeće karakteristike materijala:

- koeficijent prijelaza topline  $\alpha_1$  do  $\alpha_3$ ,
- koeficijent toplinske vodljivosti  $\lambda_1$  do  $\lambda_3$ ,
- koeficijent prijelaza topline zraka  $\alpha_{\text{zrak}}$ ,
- temperatura okoline  $T_0$ ,
- koeficijent prolaza topline  $k$ ,
- širina kliznog ležaja  $B$ ,
- faktor trenja  $\mu$ ,
- normalna sila na ležaj  $F_N$ ,
- brzina klizanja  $v$ ,
- promjer kliznog ležaja  $D_a$ , unutarnji promjer  $DK$  i vanjski promjer kućišta ležaja  $DK_v$  kao što može se vidjeti na slici 77.



Slika 69. Termodinamički model klizni ležaj / rukavac

Određivanje relativne ugradbene zračnosti  $\psi_E$  provodi se iterativnim putem, polazeći od vanjskoga promjera vratila  $d$  te unutarnjeg promjera kliznog ležaja  $D$  u hladnom stanju prije rada pa do oslobođenog toplinskog toka prilikom rada ležaja koji utječe na smanjenje zračnosti.

Odabrana vrijednost relativne ugradbene zračnosti  $\psi_E$  mora biti dovoljno velika tako da klizni ležaj može kontinuirano raditi u najnepovoljnijim radnim uvjetima, tj. zračnost je smanjena na minimalnu dopuštenu veličinu zbog utjecaja jednog ili više radnih parametara.

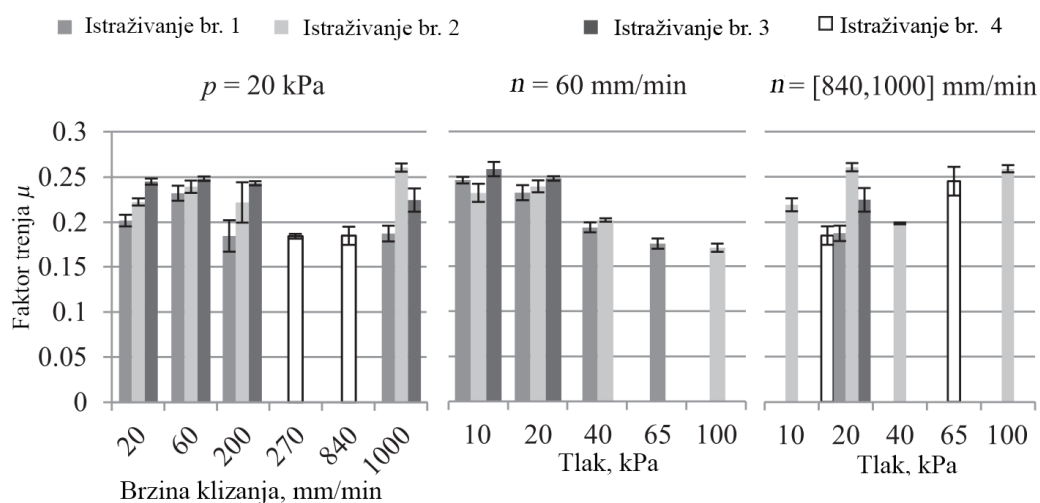
### 5.8.1 Proračun temperature rukavca

Temperaturu rukavca  $T_W$  može se izračunati pomoću jednadžbe (72) za koju moramo znati sljedeće vrijednosti: koeficijent prolaza topline  $k$ , površina dodira  $A$ , faktor trenja  $\mu$ , normalna sila  $F_N$ , obodna brzina rukavca  $v$  i temperatura okoline  $T_O$ .

$$T_W = \frac{\mu \cdot F_N \cdot v}{k \cdot A} + T_O \quad (62)$$

Faktor trenja za slučaj *klizni ležaj / rukavac* dobit će se eksperimentalnim putem na uređaju za ispitivanje kliznih ležajeva.

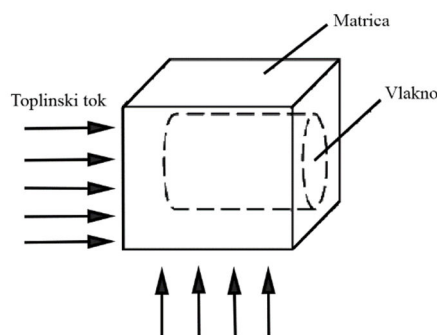
Pregledom literature [103] zabilježeno je više različitih istraživanja u pogledu određivanja faktora trenja duromernog kompozita u kontaktu s čeličnom podlogom ovisno o brzini klizanja i opterećenju te bez podmazivanja. Faktor trenja iznosi od 0,18 do 0,32 kao što se može vidjeti na slici 70.



Slika 70. Eksperimentalno određivanje faktora trenja duromernog kompozita u kontaktu s čeličnom podlogom [103]

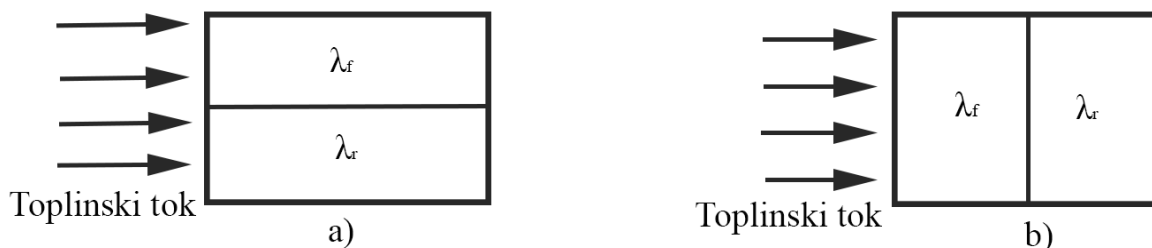
Koeficijent prolaza topline  $k$  i površina dodira  $A$  dva tijela u kontaktu opisuju toplinsko stanje sustava *klizni ležaj / rukavac*. Prema literaturi [112], [113], istraživanja su pokazala za sustav *polimerni klizni ležaj / rukavac* iznos koeficijenta prolaza topline pomnožen s određenom površinom dodira iznosi između 1 W/K i 10 W/K ovisno o vrsti ležajnog materijala. U slučajevima kada u kompozitu imamo ugljična vlakna, koeficijent vodljivosti topline je veći pa je  $k \cdot A$  veći, dok u slučajevima kompozita sa staklenim vlaknima kod kojeg je koeficijent vodljivosti topline manji  $k \cdot A$  je manji.

Istraživanja [112], [114] su pokazala da kod duromernih kompozita zbog anizotropnog svojstva materijala, ovisno o smjeru djelovanja topline na vlakna, imat će drukčiji koeficijent vodljivosti topline  $\lambda$  kao što se može vidjeti na slici 71.



Slika 71. Djelovanje toplinskog toka na vlakno kompozitnog materijala

Teoretski koeficijent toplinske vodljivosti kompozita ovisi o rasporedu vlakana i ojačala. Za ravnomjerno raspoređena vlakna unutar ojačala, kao što je slučaj kod ispitnog kompozitnog materijala koji je predmet ovog istraživanja, može se imati dva slučaja koeficijenta toplinske vodljivosti. U slučaju kada je toplinski tok djeluje paralelno u smjeru vlakna postoji paralelni koeficijent vodljivosti topline  $\lambda_{\parallel}$  koji se može vidjeti na slici 72 pod a), a u slučaju kada postoji djelovanje toplinskog toka okomito na vlakna imamo okomit koeficijent vodljivosti topline  $\lambda_{\perp}$  kao što se može vidjeti na slici 72 pod b).



Slika 72. Paralelno i okomito djelovanje toplinskog toka na matricu i ojačalo kompozita

Paralelni koeficijent vodljivosti topline  $\lambda_{\parallel}$  može se izračunati pomoću jednadžbe (63).

$$\lambda_{\parallel} = V_f \cdot \lambda_f + (1 - V_f) \cdot \lambda_r \quad (63)$$

Okomit koeficijent vodljivosti topline  $\lambda_{\perp}$  može se izračunati pomoću jednadžbe (64).

$$\lambda_{\perp} = \frac{1}{\frac{V_f}{\lambda_f} + \frac{1 - V_f}{\lambda_r}} \quad (64)$$

U jednadžbi (63) i (64) oznakom  $\lambda_f$  označen je koeficijent vodljivosti topline matrice tj. vlakana kompozita koja za staklena vlakna iznosi 1,2 W/m K, dok je oznakom  $\lambda_r$  označen koeficijent vodljivosti epoksidnog ojačala koji iznosi 0,27 W/m K, a oznakom  $V_f$  označen je volumni udio vlakna koji iznosi približno 0,556 [112].

Za ispitni duromerni kompozit koji će biti ispitan u ovom radu kao ležajni materijal Norden marine 605, okomit koeficijent vodljivosti topline  $\lambda_{\perp}$  iznosi 0,296 W/m K. Okomit koeficijent vodljivosti topline  $\lambda_{\perp}$  uzet je iz razloga što prilikom rada kliznog ležaja toplinski tok djeluje okomito na strukturu kompozitnog ležajnog materijala.

Debljina stjenke ležaja od velikog je značaja za prijelaz topline na kućište ležaja. Što je debljina stjenke ležaja veća, prijelaz topline s ležaja na kućište će biti manji, što pak dovodi do otežanog hlađenja kliznog ležaja.

### 5.8.2 Proračun toplinskog toka rukavca i širenje rukavca

Prema normi R310DE 2950 [115] toplinski tok kliznog ležaja odveden preko čeličnog vratila može se opisati pomoću jednadžbe (65)

$$\dot{Q}_{\text{RUKAVAC}} = K_1 \cdot \frac{\pi \cdot B \cdot d}{z} \cdot \lambda_{\perp} \cdot \Delta T + K_2 \cdot \frac{2\pi \cdot d^2}{4 \cdot d} \cdot \lambda_r \cdot \Delta T \quad (65)$$

Bezdimenzijski faktori  $K_1$  i  $K_2$  opisuju u kojoj mjeri se prenosi toplinski tok s kliznog ležaja na vratilo ovisno o ležajnom materijalu te geometriji ležaja, a prema normi R310DE 2950 [115] za polimerne kompozite ove veličine iznose  $K_1 = 0,5$  i  $K_2 = 0,0416$ .

Toplinski tok prilikom ispitivanju na uređaju za klizne ležajeve djeluje okomito na kompozitna vlakna stoga koeficijent vodljivosti topline za kompozitni ležaj iznosi  $\lambda_{\perp} = 0,296$  W/mK, dok za rukavac od čelika otpornog na koroziju on iznosi  $\lambda_r = 17$  W/m K.

Prema literaturi [116] toplinsko širenje rukavca tj. promjer rukavca  $d_w$  može se opisati prema jednadžbi (66).

$$d_w = \alpha_1 \cdot (T_w - T_o) \cdot d_p + d_p \quad (66)$$

U jednadžbi (66) oznakom  $\alpha_1$  označen je koeficijent rastezanja materijala tj. čelika otpornog na koroziju od kojeg je izrađen rukavac. Temperatura rukavca pri radu je označena oznakom  $T_w$ , temperatura okoline  $T_o$ , a početni promjer rukavca označen je oznakom  $d_p$ .

### 5.8.3 Proračun toplinskog toka kliznog ležaja

Ukupna snaga trenja opisana je jednadžbom (67).

$$P_R = \mu \cdot F_N \cdot v \quad (67)$$

Za proračun toplinskog toka kliznog ležaja  $\dot{Q}_{LEŽAJ}$  prvo je potrebno izračunati ukupni toplinski otpor kliznog ležaja od duromernog kompozita. Toplinski otpor  $R_{k,ukupno}$  izražava otpor prolasku topline te je suprotan koeficijentu prolaska topline  $k$ .

Ovisno o debljini stjenke ( $\delta$ ), površini stjenke ( $A$ ), te karakteristikama materijala od kojih nam je u ovom slučaju najbitniji koeficijent prolaza topline ( $\lambda_k$ ), toplinski otpor  $R_k$  opisan je jednadžbom (68) [54].

$$R_k = \frac{\delta}{\lambda_k \cdot A} \quad (68)$$

Kao što se može vidjeti u jednadžbi (67) toplinski otpor raste debljinom stjenke, a opada s povećanjem površine stjenke i/ili povećanjem koeficijenta prolaza topline.

Razliku temperatura između unutarnje i vanjske stjenke ( $\Delta T$ ) može se opisati kao umnožak toplinskog otpora i toplinskog otpora ( $\dot{Q}_{LEŽAJ}$ ) kao što se može vidjeti u jednadžbi (69).

$$\Delta T = R_k \cdot \dot{Q}_{LEŽAJ} \quad (69)$$

Analogno Ohmovom zakonu iz elektrotehnike koji je opisan jednadžbom (70), jednadžba (69) poznata je još kao Ohmov zakon provođenja topline. To se može pojasniti kao promjenu temperature, tj. u našem slučaju pad temperature jednak je naponu struje, toplinski otpor jednak je električnom otporu, dok je toplinski tok jednak jakosti struje [54].

$$U = R \cdot I \quad (70)$$

Ovisno o broju stjenki koje se nalaze u međusobnom dodiru toplinske otpore može se međusobno zbrojiti kao paralelni spoj otpornika u elektrotehnici [54], što se može vidjeti opisano jednadžbom (71).

$$\frac{1}{R_{k,ukupno}} = \frac{1}{R_{\lambda 1}} + \frac{1}{R_{\lambda 2}} + \frac{1}{R_{\lambda 3}} + \dots + \frac{1}{R_{\lambda n}} \quad (71)$$

Formulacijom Ohmovog zakona za cijevnu stijenu, toplinski otpor [54] može se opisati jednadžbom (72).

$$R_k = \frac{\ln \frac{D}{D_v}}{2 \cdot \pi \cdot B \cdot \lambda_k} \quad (72)$$

Kako bismo izračunali toplinski otpor cijevnih stjenki za konkretni slučaj ispitnog postolja koji se može vidjeti u jednadžbi (73) potrebno je znati koeficijent prolaza topline kompozitnog ležajnog materijala ( $\lambda_2$ ), vanjskog čeličnog kućišta ležaja ( $\lambda_2$ ) te dužinu kliznog ležaja ( $B$ ).

$$R_{k,ukupno} = \frac{\ln \frac{DK_{v,k}}{DK_k}}{2 \cdot \lambda_3 \cdot \pi \cdot B} + \frac{\ln \frac{D_{v,k}}{D_k}}{2 \cdot \lambda_2 \cdot \pi \cdot B} \quad (73)$$

Toplinski tok kliznog ležaja može se izračunati pomoću jednadžbe (74).

$$\dot{Q}_{LEŽAJ} = \frac{(T_w - T_o)}{R_{k,ukupno}} \quad (74)$$

#### 5.8.4 Proračun toplinskog širenja vanjskog kućišta kliznog ležaja

Kako bi izračunali toplinsko širenje kućišta potrebno je odrediti pad temperature od unutarnje stjenke kućišta  $T_1$  do vanjske strane kućišta  $T_2$  koji može se vidjeti na slici 77.

Temperaturu  $T_2$ , tj. temperaturu s vanjske strane kućišta dana je jednadžbom (75). Važno je napomenuti da vanjska temperatura ovisi o temperaturi okoline  $T_o$  [58].

$$T_2 = \frac{\dot{Q}_{LEŽAJ}}{\pi \cdot B \cdot \alpha_{zrak} \cdot DK_{v,k}} + T_o \quad (75)$$

Temperaturu unutarnje strane kućišta ležaja  $T_1$ , koja je u kontaktu s vanjskim promjerom kliznog može se izračunati pomoću jednadžbe (76).

$$T_1 = \frac{\dot{Q}_{LEŽAJ} \cdot \ln \frac{DK_{v,k}}{DK_k}}{2 \cdot \pi \cdot B \cdot \lambda_3} + T_2 \quad (76)$$

Pretpostavka proračuna ispitnog sustava tj. vanjskog kućišta ležaja je stacionarno provođenja topline [54] s dovoljno malom greškom i za nestacionarno provođenje topline. Pri nestacionarnom provođenju topline temperatura se mijenja tijekom vremena, stoga nema pravilnog oblika linearnog pada temperature već imamo nelinearan pad temperature.



## 5.9 Životni vijek kompozitnih kliznih ležajeva u ovisnosti o zračnosti

Pregledom radova [42], [48], [110], u ovisnosti o zračnosti između kliznog ležaja i rukavca mijenja se faktor trenja, na određenoj zračnosti faktor trenja je najmanji.

Povećanjem zračnosti očekivali bi sve manje vrijednosti temperature i faktora trenja, no ta pojava se ne događa. Povećanjem zračnosti dolazi do povećanja faktora trenja i temperatura.

Ovu pojavu je uočio i istraživač Wenger [110] te je u svom istraživanju opisao promjenu faktora trenja u ovisnosti o obuhvatnom kutu između rukavca i kliznog ležaja. Kao što je opisano u poglavlju 5.6 obuhvatni kut  $2\beta$  može se opisati pomoću jednadžbe (58) te ovisi o modulu elastičnosti dva materijala u kontaktu ( $E_c$ ) koji se može izračunati pomoću jednadžbe (34), tlaka na klizni ležaj ( $p_{c,max}$ ) opisane jednadžbom (19) te relativne zračnosti opisane jednadžbom (61). Promjenu faktora trenja u ovisnosti o zračnosti također je uočio i istraživač Barbero [111]. Povećanjem zračnosti dolazi do smanjenja debljine stjenke ležajnog materijala. Smanjenjem stjenke ležajnog materijala pri djelovanju opterećenja na ležaj dolazi do vrlo velike deformacije ležajnog materijala što dovodi do povećanja faktora trenja.

U slučaju smanjenja zračnosti obuhvatni kut se povećava pa dolazi do povećanja kontaktne površine između kliznog ležaja i rukavca. Pri vrlo malim zračnostima obuhvatni kut je vrlo velik što može dovesti do stvaranja vrlo velike topline koja za posljedicu može imati značajno smanjenje zračnosti što može dovesti do zaribavanja [111].

U slučaju pravilnog odabira zračnosti, a da je debljina stjenke kliznog ležaja prevelika pri djelovanju tlaka na ležaj dolazi do vrlo velikog pomaka rukavca u ležajni materijal što dovodi pak do vrlo velike deformacije koja za posljedicu ima povećanje obuhvatnog kuta ( $2\beta$ ).

Iz istraživanja Wengera [110] i Barbera [111] može se zaključiti da je za pravilan odabir geometrije kliznog ležaja potrebno voditi računa o debljini stjenke kliznog ležaja i zračnosti. Na osnovi ove dvije veličine može se odrediti obuhvatni kut ( $2\beta$ ).

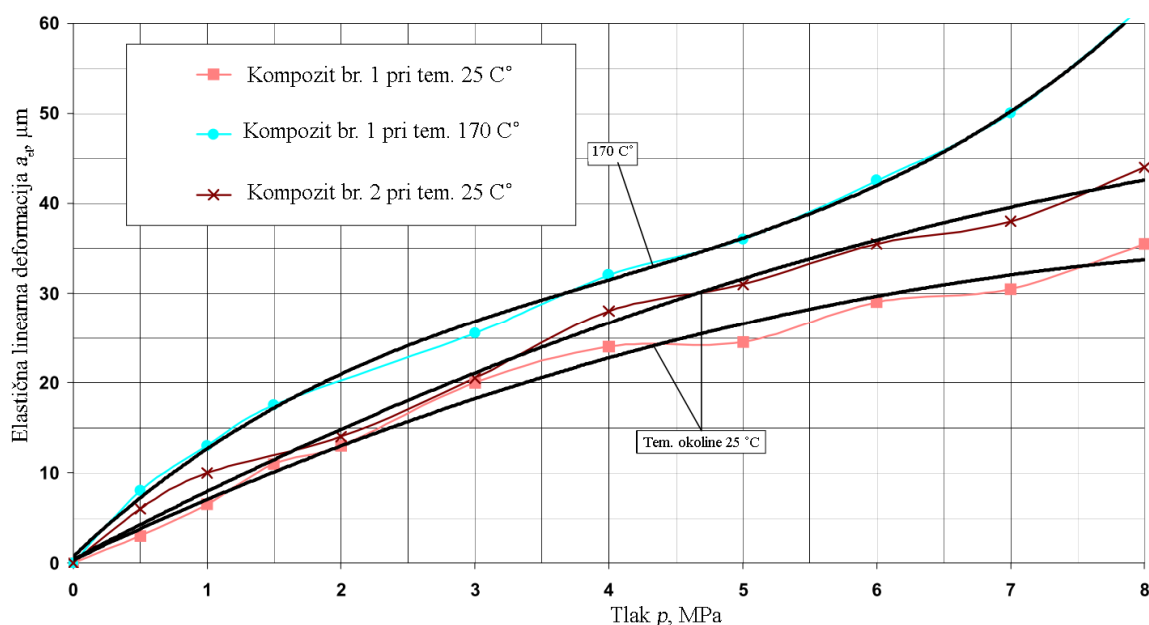
Obuhvatni kut ( $2\beta$ ), prema Wengeru [110], pri kojem je rad kliznog ležaja još moguć je  $90^\circ$ . Prekoračenje ove vrijednosti dovodi do velikog porasta faktora trenja i zagrijavanja koje dovodi do zaribavanja kliznog ležaja i/ili rukavca.

Kao što je opisano u poglavlju 5.4 i 5.6 značajan utjecaj na veličinu i oblik stvarne površine dodira *kliznog ležaja / rukavca* ima sila trenja ( $F_R$ ).

Na smanjenje životnog vijeka kompozitnog kliznog ležaja utječe povećanje deformacije stjenke ležaja, stupanj trošenja i povećanje temperature.

Životni vijek kompozitnog kliznog ležaja prema Detter / Holecku [60] ovisi o faktoru trenja, obuhvatnom kutu i opterećenju na klizni ležaj.

Detter i Holeck [60] su uočili da smanjenje zračnosti kliznog ležaja koja za posljedicu ima povećanje obuhvatnog kuta, može biti uzrokovano česticama kompozita nastalim kao posljedica trošenja što se može vidjeti na slici 74. Čestice kompozita nakupljene u među prostoru između kliznog ležaja i rukavca uzrokuju smanjenje zračnosti što za posljedicu ima povećanje obuhvatnog kuta.



Slika 73. Elastična linearna deformacija u ovisnosti o opterećenju [125]

Kako bi odredili realni obuhvatni kut između kliznog ležaja i rukavca te širinu dodira ( $W$ ), potrebno je odrediti elastičnu linearnu deformaciju ( $a_{el}$ ) duromernog kompozita koja se mijenja u ovisnosti o tlaku. Na slici 73 se može vidjeti promjenu linearne deformacije za dvije vrste kompozita čija su mehaničkim svojstvima slična duromernom kompozitu koji je ispitan u disertaciji [125].

Erhard i Strickle [62] formulirali su jednadžbu za izračun elastične linearne deformacije duromernog kompozita u ovisnosti o opterećenju na kompozit koja je opisana jednadžbom (77), a širinu dodira ( $W$ ) opisana je jednadžbom (78), dok pomak nastao zbog trošenja može se označiti oznakom ( $h$ ) kao što je prikazano na slici 74.

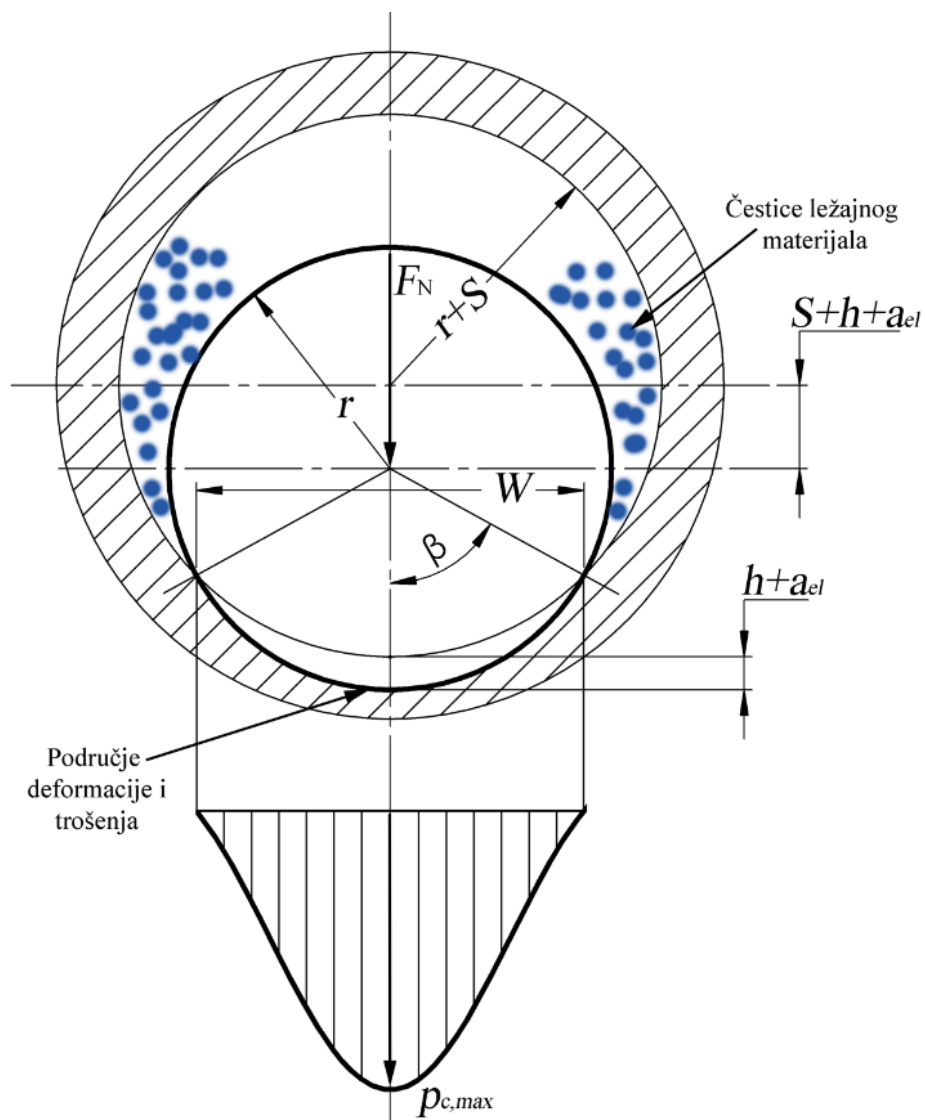
$$a_{el} = \frac{F_N}{\left(\frac{2 \cdot W}{t} + \sin 45^\circ\right) \cdot B} \cdot \frac{4}{\pi \cdot E_c} \quad (77)$$

$$W = d \cdot \sqrt[3]{1 - \frac{1}{\left(2 \cdot \frac{a_{el}}{S} + 1\right)^2}} \cdot \left(1 + \frac{\psi}{1000}\right) \quad (78)$$

Pregledom literature [125] zapaženo je da promjenom zračnosti uzrokovane trošenjem ležajnog materijala dolazi do povišenja faktora trenja kao i do porasta ležajne temperature.

Volumen nastao trošenjem može se opisati jednačbom (79).

$$V_{max} = B \cdot \pi \cdot \frac{d + D_B}{2} \cdot \frac{S \cdot 1,64}{2} \quad (79)$$



Slika 74. Obuhvatni kut između kliznog ležaja i rukavca

## 5.10 Utjecajni parametri prilikom ispitivanja na ispitnom uređaju za klizne ležajeve

Utjecajni faktori za rad kliznog ležaja od kompozitnog materijala bez dovođenja maziva uz mirno opterećenje i stalni pogon, definirani su na osnovu ispitivanja na Timken ispitnom uređaju (poglavlje 4.3.11.) te pregleda literature [3], [6], [17], [25], [39], [45], [48], [73], [83], [84]. Na osnovu prethodnih istraživanja kompozitnih ležajnih materijala većina istraživanja bila je u smjeru upotrebe kliznih ležaja uz podmazivanje mazivima male ili velike viskoznosti. Kao što je već prije navedeno nedostatak kompozitnih ležajnih materijala je njihovo izolatorsko svojstvo stoga je potrebno na neki način odvesti toplinu nastalu trenjem u kontaktnom području rukavca / kliznog ležaja. U slučaju da nema mogućnosti odvodnje topline mazivom potrebno je neko drugo konstrukcijsko rješenje.

Pregledom literature istraživač Friedrich [50], [117] utvrdio je da se toplinski tok stvoren klizanjem rukavca po polimernom kompozitnom ležaju može smanjiti primjenom krutih maziva, dok istraživač Harnoy [118] opisuje smanjenje toplinskog toka nastalog klizanjem tako da povećamo zračnost između kliznog ležaja / rukavca.

Oba istraživanja, bilo da se radi o primjeni krutih maziva ili promjeni zračnosti ležaja, nisu prilagođena za duromerne kompozite od kojih su u ovom slučaju napravljeni klizni ležajevi. Stoga je cilj ispitati kako utječe promjena zračnosti kao i primjena krutog maziva u ovom slučaju PTFE-a na smanjenje faktora trenja koji je uz opterećenje i obodnu brzinu jedan od utjecajnih faktora na stvaranje toplinskog toka u području kontakta kliznog ležaja / rukavca.

Pri provedbi pokusa mijenjan je unutarnji promjer kliznog ležaja u rasponu od 34,1 – 35 mm, Odabrane zračnosti kliznog ležaja su:  $S_1=0,1$  mm,  $S_2=0,15$ mm,  $S_3=0,3$ mm i  $S_4=0,5$ mm. Određivanje životnog vijeka kompozitnog ležajnog materijala nije jednostavno utvrditi, pogotovo trenje i trošenje ležajnog materijala pri radu bez dovoda maziva ili uz dodatak krutog maziva. Zbog vrlo složenih procesa koji se javljaju u kontaktu između ležaja i rukavca potrebno je prikupiti što je više moguće informacija koje mogu pomoći pri određivanju životnog vijeka kliznog ležaja [45], [79], [111].

U mnogim slučajevima vrijeme eksploatacije kliznog ležaja znatno je dulje u odnosu na trajanje ispitivanja pri kojemu je eksperimentalnim putem određen stupanj trošenja nekog kompozitnog materijala [42], [47].

Istraživanjem je dokazano da kratkoročni testovi od 60 – 180 minuta mogu biti dovoljni za određivanje stupnja trošenja i faktora trenja nekog kompozitnog materijala, stoga je predviđeno vrijeme ispitivanja određeno na 120 minuta [42], [83], [104].

Također je dokazano da nakon uhodavanja kompozitnog kliznog ležaja i rukavca dolazi do promjene faktora trenja, što također se može potvrditi promjenom hrapavosti površine prije i nakon ispitivanja. Ovaj slučaj promjene vrlo je čest kod duromernih kompozita koji su predmet ovog istraživanja [37], [42]. Nakon završetka pokusa uzorci su odmašćeni te je na mjestu kontakta ležaja i rukavca mjerena je hrapavost površine te masa uzorka. Rukavac je prije svakog pokusa odmašćen te je izmjerena hrapavost površine prije i poslije ispitivanja.

U tablici 16 mogu se vidjeti vrijednosti površinske hrapavosti prije i poslije ispitivanja.

Izrada ispitnih uzoraka – kliznih ležajeva opisana je u poglavlju 4.3.3., uzorci su nakon proizvodnje odmašćeni sredstvom za odmašćivanje *LOCTITE*, SF 7063.

Kruta maziva poput PTFE-a koja se nanose na klizni ležaj te zatim ostave da se mazivo osuši, pokazala su svoju efikasnost samo na određenim  $p$ - $v$  vrijednostima [42].

Pregledom literature [7], [105] dokazano je da utjecaj PTFE maziva na smanjenje faktora trenja ovisi o pritisku na kompozitni ležajni materijal te ta vrijednost iznosi 0,2 – 0,3 MPa, ako je mazivo nanoseno naknadno na kompozit. U slučaju da je kruto mazivo impregnirano u kompozit tlak pri kojem je trenje najmanje iznosi 0,4 – 0,8 MPa [105].

Dimenzije ležaja i rukavca bile su mjerene prije i poslije ispitivanja, a vrijednosti mjerenja nalaze se u tablici 16.

Masa ispitnog kliznog ležaja bila je mjerena prije i poslije ispitivanja uz prethodno odmašćivanje sredstvom za odmašćivanje *LOCTITE*, SF 7063, masu ispitnih uzorak može se vidjeti u tablici 16. Razlika mase ( $W_m$ ) kliznog ležaja je potrebna kako bi odredili specifični stupanj trošenja  $k'$  pomoću jednadžbe (47).

Temperatura je mjerena na rukavcu i u kućištu kliznog ležaja, mjerna oprema i način postave termometara je detaljnije opisan u poglavlju 5.5.

Temperatura rukavca nam je potrebna kako bi odredili toplinski tok  $\dot{Q}$  nastao klizanjem rukavca po kliznom ležaju te za izračun koeficijenta prolaza topline i površine dodira  $k \cdot A$ .

Faktor trenja mjereno je pomoću mjerne doze, a opis mjerenja trenja kao i sam uređaj za mjerenje dani su u poglavlju 5.3.

Faktor trenja nam je potreban kako bi odredili gubitak snage  $P_Q$  koji ovisi o veličini faktora trenja te kako bi odredili koja zračnost kliznog ležaja nam je najpovoljnija za predviđene radne uvjete.

Svi mjerni instrumenti korišteni pri provedbi pokusa navedeni su u poglavlju 5.2.

Na osnovu prethodnih ispitivanja na Timken ispitnom uređaju koja su opisana u poglavlju 4.3.11 određeni su ispitni parametri za ispitivanje kliznih ležajeva koje se može vidjeti navedene u daljnjem tekstu.

Nakon ispitivanja, za dimenziju kliznog ležaja pri kojoj je faktor trenja bio najmanji, bila je dodatno ispitana ta dimenzija ležaja pri kojoj će unutarnji promjer biti umanjen za 0,1 mm te uvećana za 0,1 mm pri maksimalnom opterećenju od 115 N ( $p = 0,1914$  MPa, jed. (19) ) kako bi odredili optimalnu zračnost kliznog ležaja pri radu.

- Opterećenje kliznog ležaja ( $F$ )
  - $F_1=65\text{N}$
  - $F_2=115\text{N}$
  
- Obodna brzina rukavca ( $v$ )
  - $v_1= 0,53$  m/s
  
- Dimenzije ispitnog uzorka:
  - vanjski promjer kliznog ležaja ( $d_v=39$  mm)
  - unutarnji promjer kliznog ležaja ( $d_u=34,1-35$  mm)
  - širina kliznog ležaja ( $L=27$  mm)
  
- Materijal ispitnog uzorka
  - $m_1= \text{NORDEN Marine 605}$
  - $m_2= \text{NORDEN Marine 605 + PTFE (LOCTITE, LB 8192)}$
  
- Materijal rukavca
  - AISI 316
  
- Hrapavost kliznog ležaja ( $R_a$ )
  - Ovisno o uzorku, vidjeti tablicu 16
  
- Vanjski promjer rukavca ( $D$ )
  - $D= 34,01-34,03$  mm
  
- Hrapavost rukavca ( $R_a$ )
  - $R_a= 1,40-1,51$   $\mu\text{m}$
  
- Tvrdoća površine rukavca
  - 196 HB

## 5.11 Plan pokusa na ispitnom uređaju za klizne ležajeve

Cilj pokusa je istražiti utjecajne faktore i njihove međusobne interakcije na odabrane kriterije u svrhu određivanja životnog vijeka kompozitnog kliznog ležaja. U svrhu tog istraživanja potrebno je provesti faktorski plan pokusa na dvije razine [95], [119], [120].

U postupku izbora i opisa utjecajnih faktora za jedan klizni ležaj određene su razine ovih faktora koji će tijekom pokusa biti promatrani, kao i veličina onih koji će u tijeku pokusa biti konstantni. Provedba pokusa je predviđena po tri ponavljanja za određenu grupu radnih parametara u ovisnosti o veličini zračnosti, opterećena, sa i bez krutog maziva. Ponavljanje je potrebno kako bi tijekom statističke obrade podataka dobili vjerodostojnije podatke mjerenja tijekom pokusa. Prema broju odabranih promjenjivih faktora definira se i opseg faktorskog plana pokusa [120], [95]. Za ovaj slučaj pokusa predviđena su četiri promjenjiva faktora na dvije razine te se dobiva faktorski plan pokusa od  $2^4$  što znači 16 pokusa po tri ponavljanja od svake skupine. Tako dobivamo ukupno 48 pokusa kao što se može vidjeti u tablici 15.

Iz predloženog plana pokusa proizlazi ekonomičnost ovakvog tipa pokusa. Uz relativno mali broj izvedenih pokusa, dozvoljava analizu rezultata te donošenje zaključaka o utjecajnim parametrima na životni vijek kliznog ležaja.

U usporedbi s klasičnim načinom izvođenja pokusa gdje se mijenja jedan faktor, a ostali drže konstantnim (OVAT) ne samo da osigurava manji broj izvođenja pokusa nego daje mogućnost donošenja zaključaka o utjecajima koje klasični pokus ne bi niti registrirao [120].

Za statističku obradu podatka bit će korištena analiza varijance (ANOVA) i F-test [119].

**Tablica 15. Faktorski plan pokusa**

$2^4$	$S_{1(a)}=0,1$ mm		$S_{2(b)}=0,15$ mm		$S_{3(c)}=0,3$ mm		$S_{4(d)}=0,5$ mm	
	$n_1$		$n_1$		$n_1$		$n_1$	
	$F_1$	$F_2$	$F_1$	$F_2$	$F_1$	$F_2$	$F_1$	$F_2$
$m_1$	1	2	3	4	5	6	7	8
$m_2$	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8

Brojevi u tablici predstavljaju ispitnu grupu za koju se radi ponavljanje pokusa s tri različita uzorka tj. ležaja. Vrijeme trajanja pokusa iznosilo je 120 min.

## 5.12 Kontrola mjerenja na ispitnom uređaju za klizne ležajeve

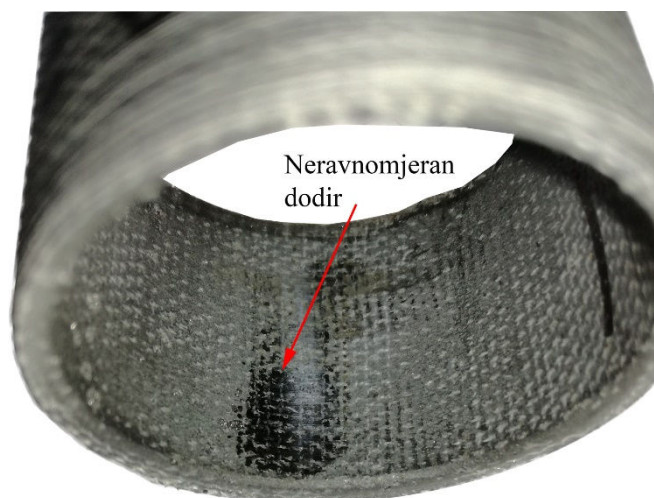
Kontrola mjerenja slična je kontroli mjerenja na Timken ispitnom uređaju opisanog u poglavlju 4.3.10. Vrlo je važno da imamo jednoliku površinu dodira između rukavca i kliznog ležaja.

Ako nemamo ravnomjernu površinu dodira, provedeno ispitivanje ne zadovoljava jer nemamo mjerodavne podatke u pogledu faktora trenja i temperature ispitne glave i rukavca.

Na slici 75 može se vidjeti uzorak kliznog ležaja s dodatkom krutog maziva kod kojeg smo imali ravnomjeren dodir s rukavcem, dok primjer neravnomjernog dodira može se vidjeti na slici 75 desno. Tu se može vidjeti neravnomjeren dodir kao i na slici 76 gdje se također vidjeti neravnomjeren dodir kliznog ležaja bez dodatka krutog maziva



Slika 75. Ravnojeran i neravnomjeren dodir između kliznog ležaja s dodatkom maziva i rukavca



Slika 76. Neravnomjeren dodir između kliznog ležaja bez maziva i rukavca



Neravnomjeran dodir između kliznog ležaja i rukavca može se dogoditi u slučaju da je klizni ležaj pogrešno ugrađen u ispitnu glavu.

Drugi razlog neravnomjernog dodira kliznog ležaja i rukavca je loša obrada uzorka u pogledu tolerancija oblika, bilo da se radi o kliznom ležaju i/ili rukavcu.

Za oba slučaja dodira bez obzira na rad s mazivom ili bez njega na rukavcu nije zabilježeno nikakvo oštećenje što se može vidjeti na slici 77, ako u nekom stroju iz nekog razloga dođe do povećanih rubnih tlakova neće doći do prekomjernih oštećenja kliznog ležaja i/ili rukavca. [121]



**Slika 77. Vrlo malo oštećenje rukavca uslijed neravnomjernog dodira kliznog ležaja bez dodatka maziva**

Razlog zašto su duromerni kompozitni materijali znatno postojaniji na rubne pritiske u odnosu na bronzu, bijelu kovinu te ostale ležajne materijale na bazi metala je u njihovoj elastičnosti koja je i do 80 puta veća od bronce [68], [121], [122].

U strojevima gdje je postojala mogućnost pojave povećanog rubnog tlaka, kod ležajnih materijala na bazi metala ovaj problem se rješavao smanjenjem ukupne dužine ležaja kao što se može vidjeti na slici 32. Zbog smanjenja dužine ležaja smanjuje se i dodirna površina kliznog ležaja / rukavca što utječe na smanjenje nosivosti.

Kod primjene duromernih kompozita kao ležajnog materijala kao što je prije navedeno, rubni tlak je manji pa se može koristiti ležajeve veće dužine (Slika 33) što nam utječe na povećanje nosivosti ležaja.

Tablica 16. Rezultati mjerenja na uređaju za ispitivanje kliznih ležajeva

Datum	Broj uzorka	Mazivo	Sila opterećenja / N	Ispitna grupa	Masa uzorka prije ispitivanja / g	Masa uzorka s dodatkom PTFE-a / g	Masa uzorka poslije ispitivanja / g	Razlika mase / g	Unutarnji promjer uzorka prije ispitivanja / mm	Unutarnji promjer uzorka poslije ispitivanja / mm	Razlika promjera / mm	Površinska hrapavost uzorka prije ispitivanja Ra / $\mu\text{m}$	Površinska hrapavost uzorka poslije ispitivanja Ra / $\mu\text{m}$	Površinska hrapavost rukavca prije ispitivanja Ra / $\mu\text{m}$	Površinska hrapavost rukavca poslije ispitivanja Ra / $\mu\text{m}$	Specifični stupanj trošenja $k'$ / $\text{m}^3/\text{Nm}$
28.12.2016. br. 1	1,5		65	A	9,748		9,743	0,005	34,13	34,125	0,005	2,75	2,65	1,47	1,45	1,5388E-14
28.12.2016. br. 2	1,1		65	A	9,804		9,799	0,005	34,128	34,132	0,004	2,49	2,43	1,45	1,44	1,5388E-14
28.12.2016. br. 3	1,2		65	A	9,753		9,749	0,004	34,133	34,138	0,005	2,47	2,23	1,51	1,46	1,23104E-14
29.12.2016. br. 1	1,3	PTFE	65	B	9,735	9,759	9,755	0,004	34,147	34,143	0,004	3,76	1,16	1,55	1,54	1,23104E-14
29.12.2016. br. 2	1,3-1	PTFE	65	B	9,735	9,757	9,753	0,004	34,147	34,142	0,005	3,56	1,28	1,54	1,53	1,23104E-14
30.12.2016. br. 1	1,4	PTFE	65	B	9,734	9,561	9,557	0,004	34,145	34,141	0,004	3,25	1,32	1,48	1,45	1,23E-14
30.12.2016. br. 2	1,6		115	C	9,721		9,714	0,007	34,19	34,196	0,006	2,68	2,27	1,29	1,26	1,21766E-14
30.12.2016. br. 3	1,6-1		115	C	9,716		9,71	0,006	34,145	34,14	0,005	2,39	2,31	1,34	1,33	1,04371E-14
02.01.2017. br. 1	1,7		115	C	9,778		9,771	0,007	34,17	34,176	0,006	3,12	2,23	1,35	1,34	1,21766E-14
02.01.2017. br. 2	1,8	PTFE	115	D	9,772	9,788	9,781	0,007	34,168	34,174	0,006	3,19	1,23	1,45	1,44	1,21766E-14
02.01.2017. br. 3	1,8-1	PTFE	115	D	9,772	9,785	9,779	0,006	34,165	34,171	0,006	3,18	1,24	1,44	1,42	1,04E-14
03.01.2017. br. 1	1,9	PTFE	115	D	9,743	9,758	9,752	0,006	34,186	34,181	0,005	2,57	1,6	1,48	1,48	1,04371E-14
03.01.2017. br. 2	2,1		65	E	9,508		9,502	0,006	34,224	34,229	0,005	4,32	2,25	1,5	1,47	1,84656E-14
03.01.2017. br. 3	2,2		65	E	9,371		9,364	0,007	34,243	34,251	0,008	3,98	2,3	1,43	1,41	2,15432E-14
05.01.2017. br. 1	2,2-1		65	E	9,369		9,363	0,006	34,235	34,241	0,006	3,64	2,68	1,45	1,42	1,84656E-14
05.01.2017. br. 2	2,3	PTFE	65	F	9,507	9,635	9,63	0,005	34,242	34,248	0,006	2,38	1,16	1,34	1,36	1,5388E-14
05.01.2017. br. 3	2,3-1	PTFE	65	F	9,507	9,526	9,521	0,005	34,241	34,246	0,005	3,32	2,02	1,32	1,33	1,5388E-14
07.01.2017. br. 1	2,4	PTFE	65	F	9,677	9,691	9,685	0,006	34,243	34,249	0,006	4,18	2,63	1,33	1,33	1,84656E-14
07.01.2017. br. 2	2,5		115	G	9,528		9,523	0,005	34,224	34,229	0,005	3,02	2,07	1,42	1,4	8,69758E-15

## Ispitivanje trošenja kompozitnog kliznog ležaja

Datum	Broj uzorka	Mazivo	Sila opterećenja / N	Ispitna grupa	Masa uzorka prije ispitivanja / g	Masa uzorka s dodatkom PTFE-a / g	Masa uzorka poslije ispitivanja / g	Razlika mase / g	Unutarnji promjer uzorka prije ispitivanja / mm	Unutarnji promjer uzorka poslije ispitivanja / mm	Razlika promjera / mm	Površinska hrapavost uzorka prije ispitivanja Ra / $\mu\text{m}$	Površinska hrapavost uzorka poslije ispitivanja Ra / $\mu\text{m}$	Površinska hrapavost rukavca prije ispitivanja Ra / $\mu\text{m}$	Površinska hrapavost rukavca poslije ispitivanja Ra / $\mu\text{m}$	Specifični stupanj trošenja $k'$ / $\text{m}^3/\text{Nm}$
07.01.2017. br. 3	2,6		115	G	9,503		9,497	0,006	34,246	34,253	0,007	3,25	1,25	1,45	1,44	1,04371E-14
10.01.2017. br. 1	2,6-1		115	G	9,488		9,483	0,005	34,241	34,246	0,005	2,24	1,87	1,46	1,45	8,69758E-15
10.01.2017. br. 2	2,7	PTFE	115	H	9,559	9,589	9,585	0,004	34,251	34,255	0,004	2,6	1,69	1,48	1,47	6,95807E-15
10.01.2017. br. 3	2,7-1	PTFE	115	H	9,559	9,586	9,582	0,004	34,253	34,258	0,005	2,31	1,33	1,48	1,46	6,95807E-15
10.01.2017. br. 4	2,8	PTFE	115	H	9,464	9,495	9,49	0,005	34,282	34,29	0,008	2,64	1,39	1,46	1,45	8,69758E-15
11.01.2017. br. 1	3,1		65	I	9,044		9,041	0,003	34,52	34,525	0,005	2,87	2,09	1,51	1,5	9,23282E-15
11.01.2017. br. 2	3,1-1		65	I	9,042		9,038	0,004	34,511	34,515	0,004	2,75	0,94	1,5	1,47	1,23104E-14
11.01.2017. br. 3	3,2		65	I	9,033		9,03	0,003	34,562	34,566	0,004	3,17	1,88	1,52	1,49	9,23282E-15
11.01.2017. br. 4	3,3	PTFE	65	J	9,044	9,075	9,073	0,002	34,535	34,538	0,003	2,87	2,17	1,5	1,48	6,15521E-15
12.01.2017. br. 1	3,3-1	PTFE	65	J	9,044	9,071	9,069	0,002	34,536	34,54	0,004	2,89	1,97	1,49	1,46	6,15521E-15
12.01.2017. br. 2	3,4	PTFE	65	J	9,034	9,067	9,07	0,003	34,532	34,536	0,004	2,49	1,56	1,39	1,36	9,23282E-15
12.01.2017. br. 3	3,6		115	K	9,054		9,051	0,003	34,525	34,53	0,005	3,07	2,34	1,34	1,32	5,21855E-15
12.01.2017. br. 4	3,7		115	K	8,936		8,933	0,003	34,541	34,548	0,007	2,69	1,31	1,42	1,4	5,21855E-15
12.01.2017. br. 5	3,7-1		115	K	8,933		8,93	0,003	34,531	34,536	0,005	2,69	1,28	1,4	1,38	5,21855E-15
13.01.2017. br. 1	3,5	PTFE	115	L	9,016	9,041	9,038	0,003	34,55	34,555	0,005	3,11	1,9	1,42	4,41	5,21855E-15
13.01.2017. br. 2	3,9	PTFE	115	L	9,058	9,1	9,098	0,002	34,58	34,585	0,005	2,47	1,23	1,42	1,4	3,47903E-15
17.01.2017. br. 1	3,9-1	PTFE	115	L	9,058	9,095	9,091	0,004	34,505	34,525	0,02	2,23	1,68	1,41	1,4	6,95807E-15
17.01.2017. br. 2	4,1		65	M	8,295		8,299	0,004	34,866	34,87	0,004	2,46	2,11	1,38	1,37	1,23104E-14
17.01.2017. br. 3	4,2		65	M	8,306		8,301	0,005	34,882	34,887	0,005	2,7	2,16	1,36	1,35	1,5388E-14

Ispitivanje trošenja kompozitnog kliznog ležaja

Datum	Broj uzorka	Mazivo	Sila opterećenja / N	Ispitna grupa	Masa uzorka prije ispitivanja / g	Masa uzorka s dodatkom PTFE-a / g	Masa uzorka poslije ispitivanja / g	Razlika mase / g	Unutarnji promjer uzorka prije ispitivanja / mm	Unutarnji promjer uzorka poslije ispitivanja / mm	Razlika promjera / mm	Površinska hrapavost uzorka prije ispitivanja Ra / $\mu\text{m}$	Površinska hrapavost uzorka poslije ispitivanja Ra / $\mu\text{m}$	Površinska hrapavost rukavca prije ispitivanja Ra / $\mu\text{m}$	Površinska hrapavost rukavca poslije ispitivanja Ra / $\mu\text{m}$	Specifični stupanj trošenja $k'$ / $\text{m}^3/\text{Nm}$
17.01.2017. br. 4	4,1-1		65	M	8,294		8,29	0,004	34,872	34,876	0,004	2,46	1,43	1,42	1,4	1,23104E-14
17.01.2017. br. 5	4,3	PTFE	65	N	8,281	8,318	8,314	0,004	34,917	34,922	0,005	2,9	1,11	1,41	1,39	1,23104E-14
18.01.2017. br. 1	4,4	PTFE	65	N	8,214	8,256	8,253	0,003	34,918	34,922	0,004	2,98	1,04	1,42	1,4	9,23282E-15
18.01.2017. br. 2	4,3-1	PTFE	65	N	8,281	8,314	8,311	0,003	34,93	34,935	0,005	3,04	1,41	1,45	1,42	9,23282E-15
18.01.2017. br. 3	4,4-1	PTFE	115	O	8,214	8,253	8,25	0,003	34,935	34,94	0,005	2,98	0,88	1,42	1,41	5,21855E-15
18.01.2017. br. 4	4,5-1	PTFE	115	O	8,208	8,237	8,234	0,003	34,925	34,931	0,006	2,51	1,2	1,42	1,4	5,21855E-15
19.01.2017. br. 1	4,6	PTFE	115	O	8,164	8,201	8,198	0,003	34,92	34,925	0,005	2,41	1,43	1,5	1,48	5,21855E-15
19.01.2017. br. 2	4,7		115	P	8,232		8,228	0,004	34,91	34,915	0,005	3,05	2,49	1,4	1,38	6,95807E-15
19.01.2017. br. 3	4,8		115	P	8,179		8,175	0,004	34,919	34,925	0,006	2,94	1,96	1,42	1,4	6,95807E-15
20.01.2017. br. 1	4,9		115	P	8,005		8	0,005	34,918	34,924	0,006	2,27	1,34	1,45	1,43	8,69758E-15
24.01.2017. br. 1	1.sij	PVX	115	Q	10,862		10,861	0,001	34,22	34,224	0,004	1,94	1,28	1,45	1,44	1,73952E-15
25.01.2017. br. 1	1.vlj	PVX	115	Q	10,704		10,703	0,001	34,224	34,221	0,003	1,89	1,22	1,45	1,43	1,73952E-15
25.01.2017. br. 2	1.ožu	PVX	115	Q	10,681		10,68	0,001	34,21	34,215	0,005	1,85	1,76	1,45	1,45	1,73952E-15
14.02.2017. br.1	5,1		115	T	9,48		9,475	0,005	34,47	34,475	0,005	2,56	1,14	1,48	1,41	8,69758E-15
14.02.2017. br.2	5,2		115	T	9,418		9,414	0,004	34,449	34,455	0,006	3,58	1,16	1,45	1,43	6,95807E-15
14.02.2017. br.3x	5,3		115	T	9,34		9,335	0,005	34,482	34,478	0,004	2,74	1,36	1,51	1,46	8,69758E-15
14.02.2017. br.4	5,3	PTFE	115	U	9,217	9,25	9,246	0,004	34,45	34,447	0,003	2,81	1,3	1,45	1,43	6,95807E-15
14.02.2017. br.5	5,4	PTFE	115	U	9,219	9,252	9,248	0,004	34,44	34,445	0,005	2,68	1,02	1,46	1,42	6,95807E-15
14.02.2017. br.6x	5,5	PTFE	115	U	9,214	9,255	9,249	0,006	34,48	34,485	0,005	2,72	1,18	1,49	1,43	1,04371E-14

## Ispitivanje trošenja kompozitnog kliznog ležaja

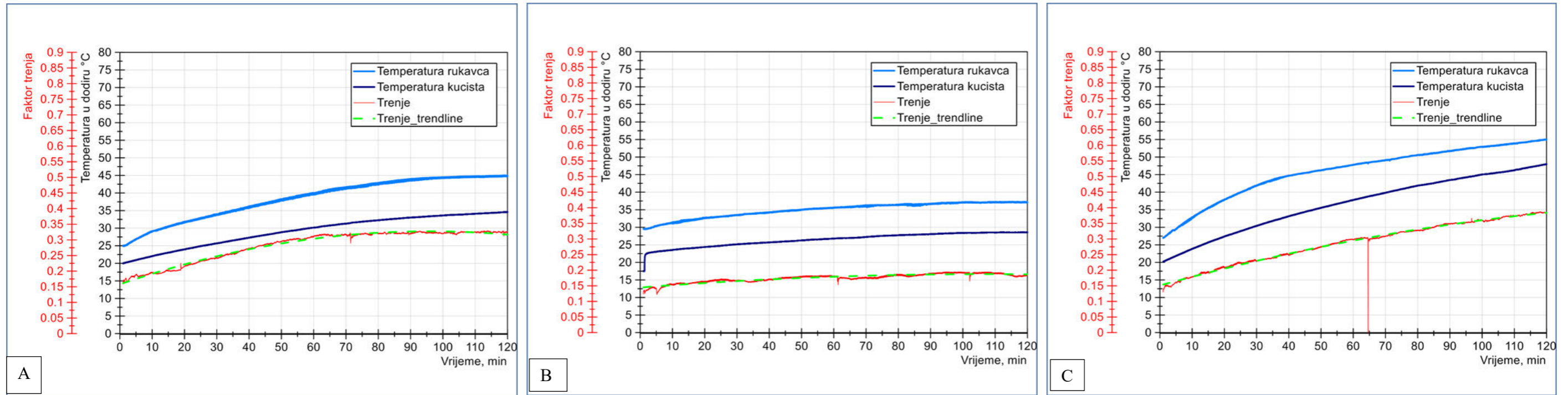
Datum	Broj uzorka	Mazivo	Sila opterećenja / N	Ispitna grupa	Masa uzorka prije ispitivanja / g	Masa uzorka s dodatkom PTFE-a / g	Masa uzorka poslije ispitivanja / g	Razlika mase / g	Unutarnji promjer uzorka prije ispitivanja / mm	Unutarnji promjer uzorka poslije ispitivanja / mm	Razlika promjera / mm	Površinska hrapavost uzorka prije ispitivanja Ra / $\mu\text{m}$	Površinska hrapavost uzorka poslije ispitivanja Ra / $\mu\text{m}$	Površinska hrapavost rukavca prije ispitivanja Ra / $\mu\text{m}$	Površinska hrapavost rukavca poslije ispitivanja Ra / $\mu\text{m}$	Specifični stupanj trošenja $k'$ / $\text{m}^3/\text{Nm}$
15.02.2017. br. 1	6,1		115	Z	8,808		8,804	0,004	34,69	34,695	0,005	2,45	1,18	1,48	1,46	6,95807E-15
15.02.2017. br. 2	6,2		115	Z	8,877		8,873	0,004	34,68	34,685	0,005	1,81	0,67	1,44	1,41	6,95807E-15
15.02.2017. br.3x	6,3		115	Z	8,849		8,844	0,005	34,65	34,658	0,008	1,93	1,02	1,42	1,4	8,69758E-15
15.02.2017. br. 4	6,4	PTFE	115	V	8,762	8,794	8,79	0,004	34,66	34,665	0,005	3,23	1,24	1,45	1,43	6,95807E-15
16.02.2017. br. 1	6,5	PTFE	115	V	8,762	8,913	8,91	0,003	34,561	34,565	0,004	2,65	0,78	1,42	1,4	5,21855E-15

Tablica 17. Statistička obrada podataka

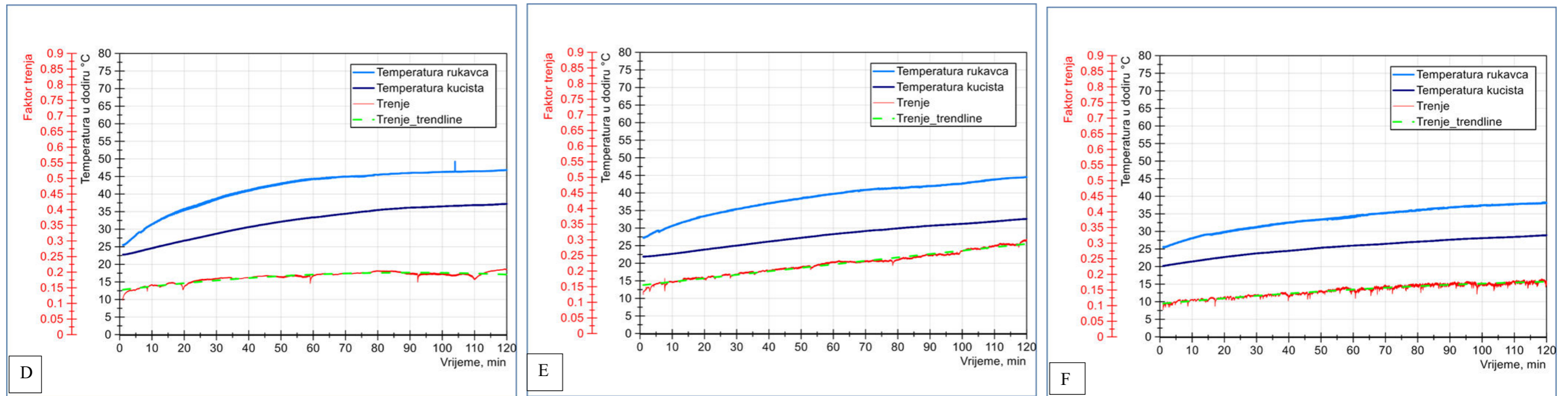
Ispitna grupa	Mazivo	Sila opterećenja	Dimenzija ispitnog uzorka U×V×L	Slika broj:	Temperatura rukavca					Temperatura kućišta					Trenje kliznog ležaja				
					Srednja temperatura, /°C	SS E+08	SD	Varijanca	Greška	Srednja temperatura, /°C	SS E+08	SD	Varijanca	Greška	Srednji faktor trenja,	SS	SD	Varijanca	Greška
A		65	34,15×39,05×27	78	38,447	6,525	5,669	32,14	0,008626	29,2135	3,764	4,2365	17,948	0,006446	0,2826	35559,82	0,049159	0,002417	0,000075
B	PTFE	65	34,15×39,05×27	78	34,9473	5,295	2,073	4,2992	0,003155	28,628	3,039	1,7999	3,2399	0,002739	0,1749	13298,69	0,013564	0,000184	0,000021
C		115	34,15×39,05×27	78	40,274	7,145	5,655	31,9821	0,008604	31,0351	4,226	3,8721	14,999	0,005891	0,1844	14748,61	0,01021	0,000104	0,000016
D	PTFE	115	34,15×39,05×27	79	41,732	7,654	5,483	30,068	0,008343	32,1912	4,557	4,3128	18,6	0,006562	0,1843	14808,51	0,01673	0,00028	0,000025
E		65	34,3×39,05×27	79	38,544	6,505	4,468	19,964	0,006798	27,829	3,389	3,18	10,1126	0,004838	0,2217	95807,38	0,03837	0,001473	0,000058
F	PTFE	65	34,3×39,05×27	79	33,772	4,977	3,389	11,491	0,005158	25,5382	2,842	2,3934	5,7288	0,003642	0,1484	9712,942	0,020794	0,000432	0,000032
G		115	34,3×39,05×27	80	45,895	9,288	6,606	43,65	0,010052	35,5201	5,612	6,1146	37,389	0,009303	0,2377	24551,19	0,01689	0,000285	0,000026
H	PTFE	115	34,3×39,05×27	80	41,213	7,418	4,322	18,6868	0,006577	29,8319	3,867	2,2887	5,2387	0,003482	0,1205	6353,042	0,01326	0,000176	0,00002
I		65	34,6×39,05×27	80	38,18	6,418	5,267	27,7491	0,008015	28,7965	3,622	3,028	9,169	0,004607	0,2199	21337,14	0,03188	0,001016	0,000049
J	PTFE	65	34,6×39,05×27	81	30,945	4,191	3,535	12,4992	0,005379	24,3492	2,576	1,832	3,3563	0,002787	0,0822	2956,14	0,008864	0,000079	0,000013
K		115	34,6×39,05×27	81	45,811	9,237	6,284	39,499	0,009562	36,4334	5,866	5,5016	30,2683	0,00837	0,2571	28597,04	0,008422	0,000071	0,000013
L	PTFE	115	34,6×39,05×27	81	37,435	6,16	4,942	24,4293	0,00752	28,63	3,577	2,844	8,3176	0,004388	0,1197	6260,401	0,01227	0,000151	0,000019
M		65	35×39,05×27	82	33,952	5,052	4,069	16,5564	0,006191	26,639	3,081	1,8482	3,416	0,002812	0,1831	14800,95	0,02653	0,000704	0,00004
N	PTFE	65	35×39,05×27	82	32,428	4,563	2,128	4,52957	0,003238	25,6312	2,842	0,9625	0,92728	0,001465	0,1304	7374,825	0,00733	0,000054	0,000011
O	PTFE	155	35×39,05×27	82	38,525	6,497	4,441	19,7259	0,006757	27,4787	3,288	2,4325	5,9173	0,003701	0,1167	5913,134	0,006919	0,000048	0,000011
P		115	35×39,05×27	83	44,327	8,687	6,777	45,937	0,010312	31,644	4,429	4,875	23,8	0,007422	0,1923	17116,03	0,051679	0,002671	0,000079

Ispitivanje trošenja kompozitnog kliznog ležaja

Ispitna grupa	Mazivo	Sila opterećenja	Dimenzija ispitnog uzorka U×V×L	Slika broj:	Temperatura rukavca					Temperatura kućišta					Trenje kliznog ležaja				
					Srednja temperatura, /°C	SS E+08	SD	Varijanca	Greška	Srednja temperatura, /°C	SS E+08	SD	Varijanca	Greška	Srednji faktor trenja,	SS	SD	Varijanca	Greška
Q	PEEK PV×	115	34,3×39,05×27	83	40,25	7,159	6,093	37,1364	0,009272	34,721	5,332	5,359	28,722	0,008154	0,1973	17183,28	0,028511	0,000813	0,000043
S	PTFE G415	115	34,3×39,05×27	83	38,8459	6,575	3,6057	13,0012	0,005486	34,28	5,131	3,539	12,526	0,005385	0,1488	9623,42	0,06923	0,000012	0,000017
T		115	34,5×39,05×27	84	47,447	9,894	6,241	38,964	0,009497	35,701	6,625	5,9758	35,71	0,009092	0,3038	39906,33	0,006438	0,000041	9,6E-06
U	PTFE	115	34,5×39,05×27	84	42,0444	7,711	4,1579	17,288	0,006326	31,7138	4,375	2,6419	6,979	0,00402	0,1612	11931,78	0,008094	0,000066	0,000012
Z		115	34,7×39,05×27	84	46,5056	9,592	7,585	57,535	0,01154	35,498	5,646	6,8379	46,757	0,0104	0,279	33955,87	0,02747	0,000759	0,000042
X1		65	33,95×39,0×27		Neuspjelo mjerenje										0,7821				
X2	PTFE	65	33,95×39,0×27		Neuspjelo mjerenje										0,6356				
X3		115	33,95×39,0×27		Neuspjelo mjerenje										0,8189				
X4	PTFE	115	33,95×39,0×27	85	Neuspjelo mjerenje										0,6356				

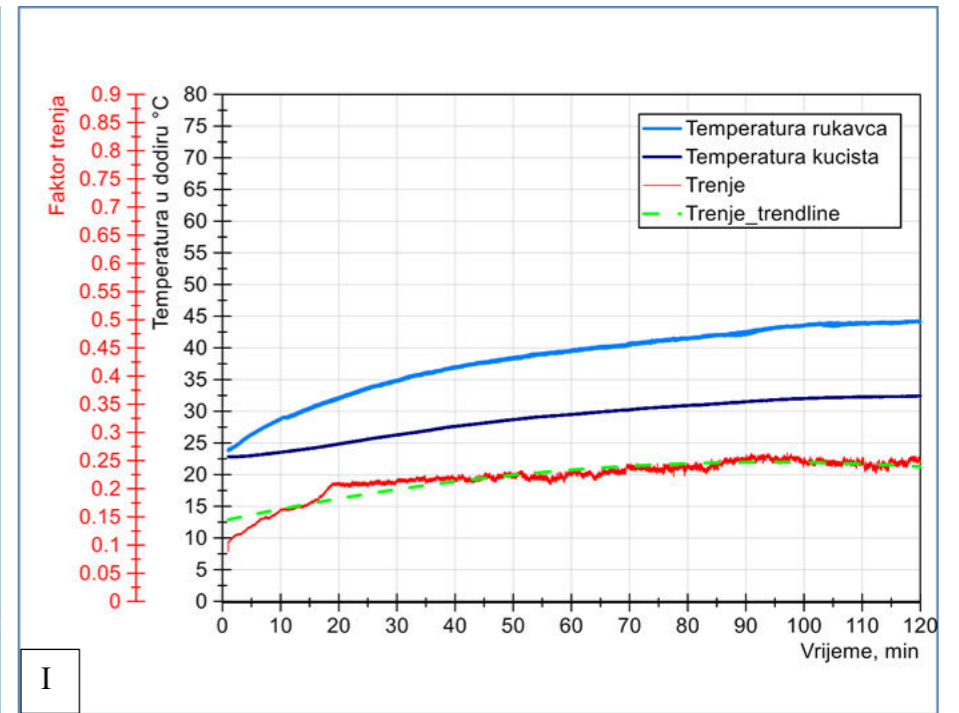
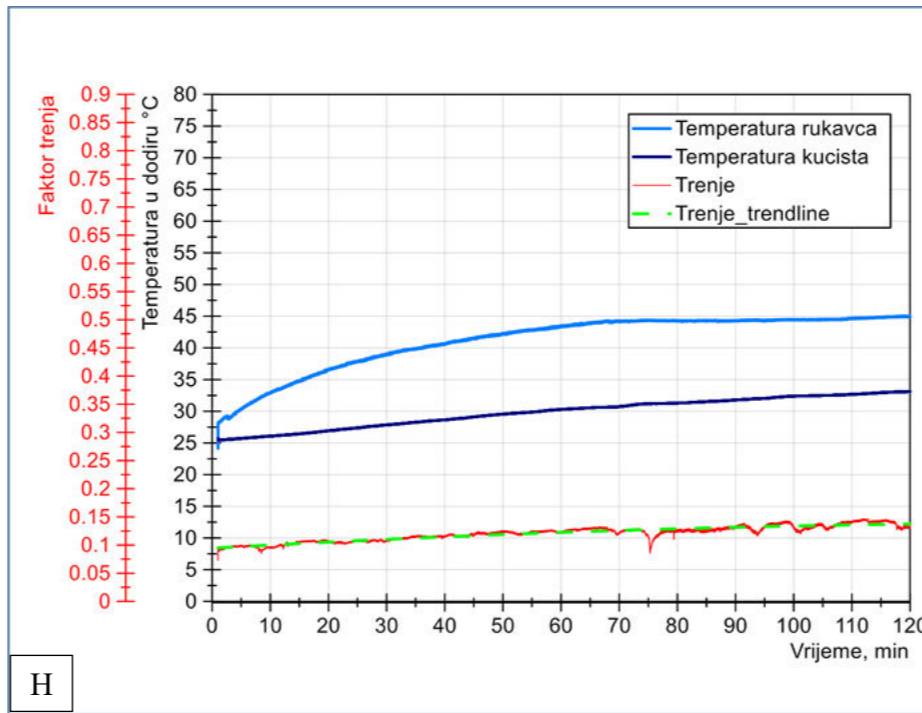
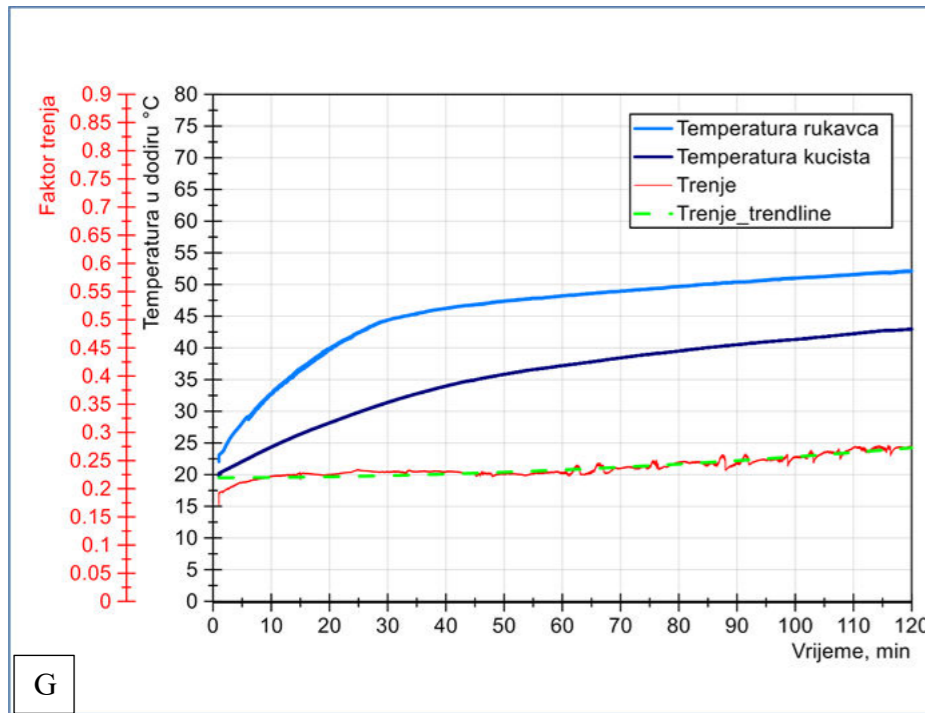


Slika 78. Dijagrami A/B/C

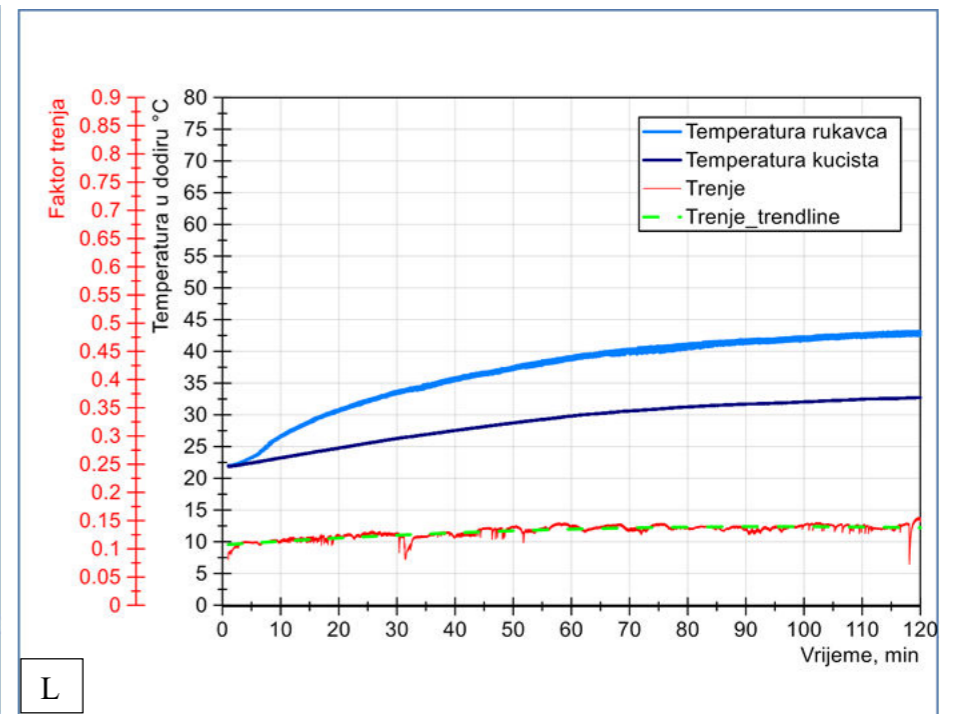
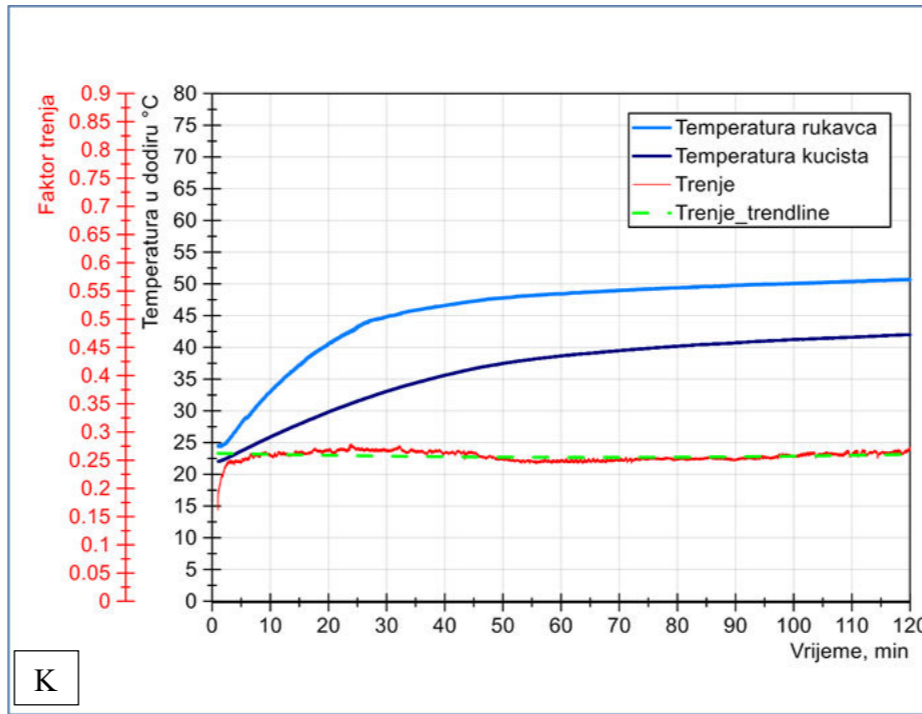
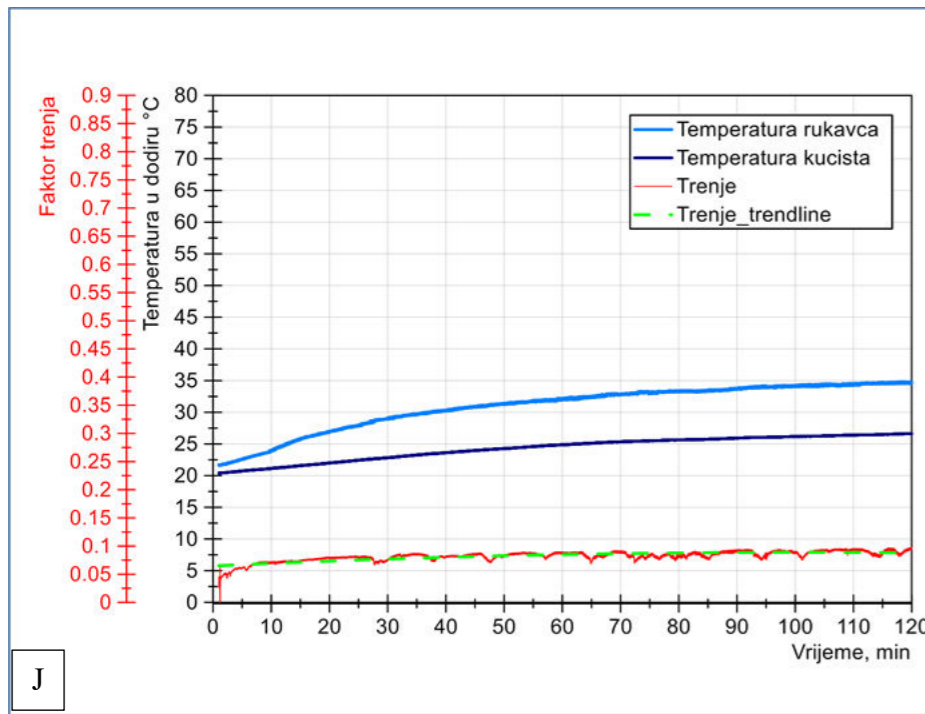


Slika 79. Dijagrami D/E/F

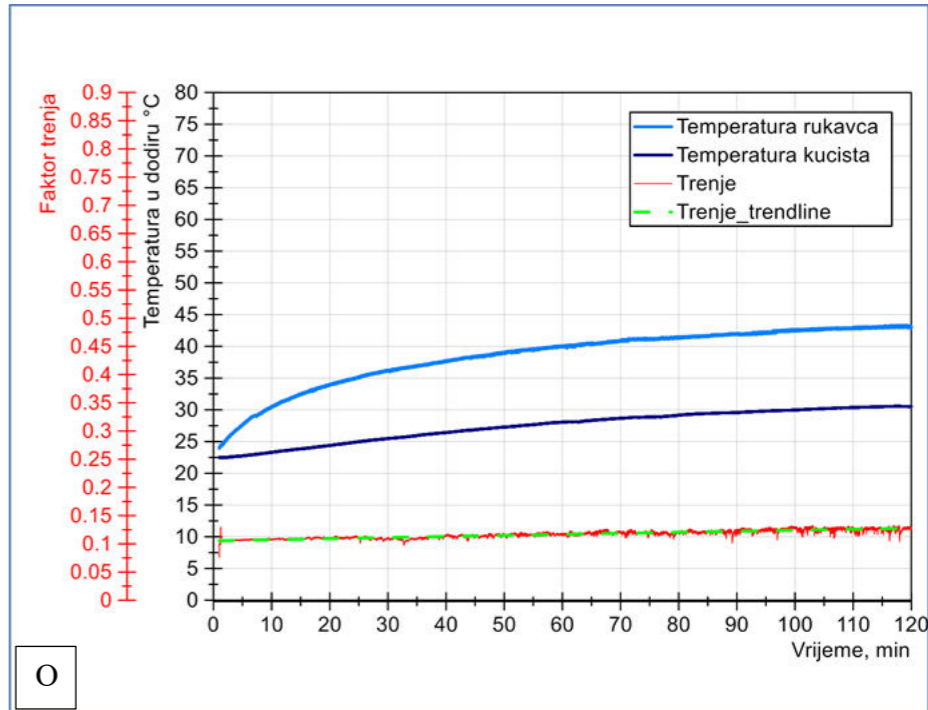
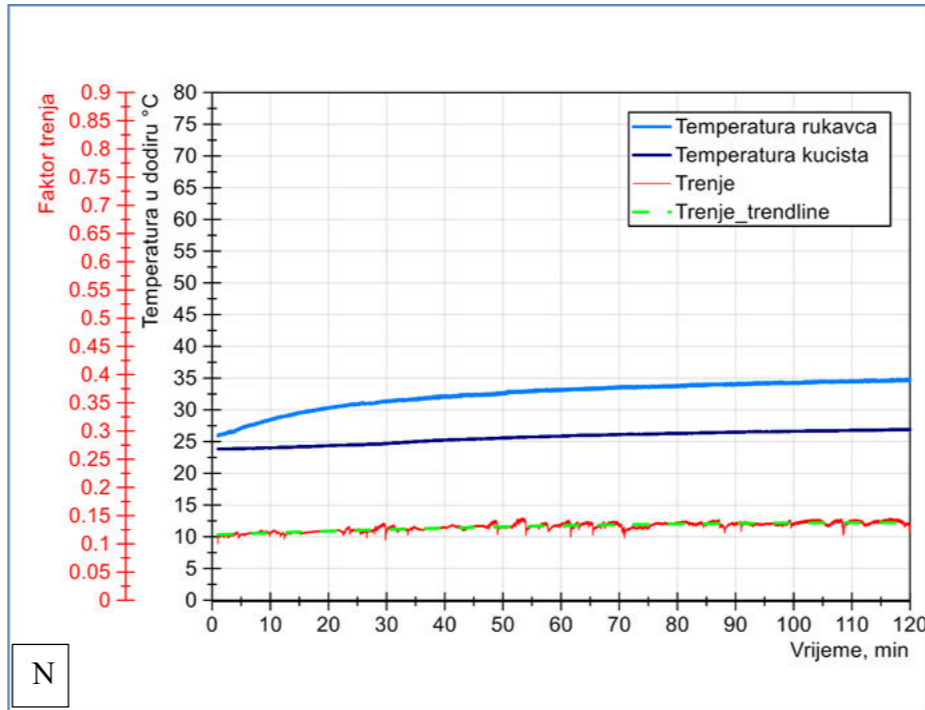
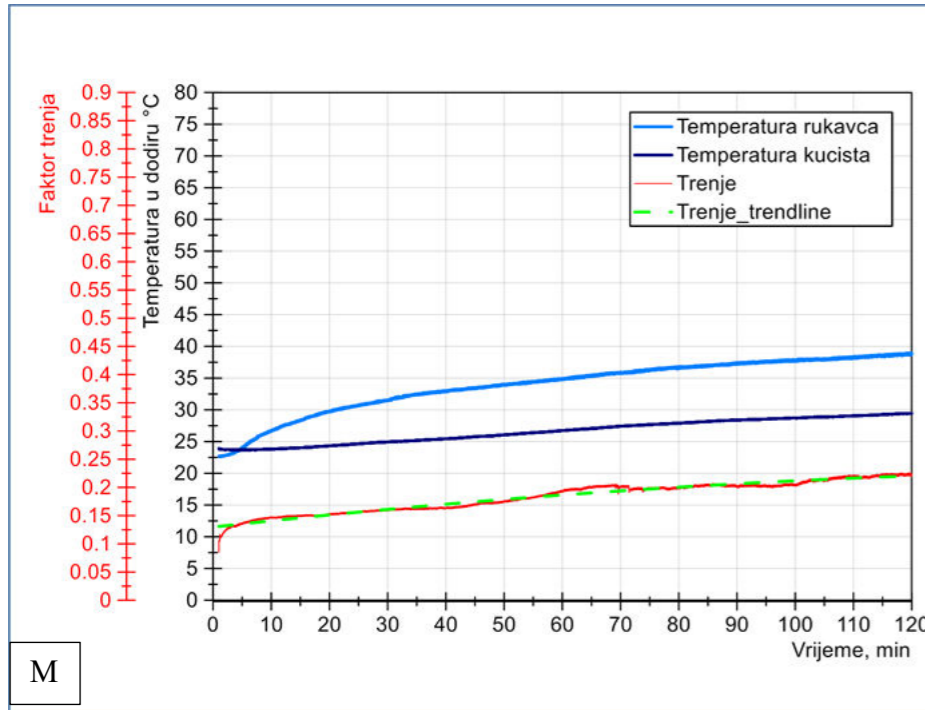




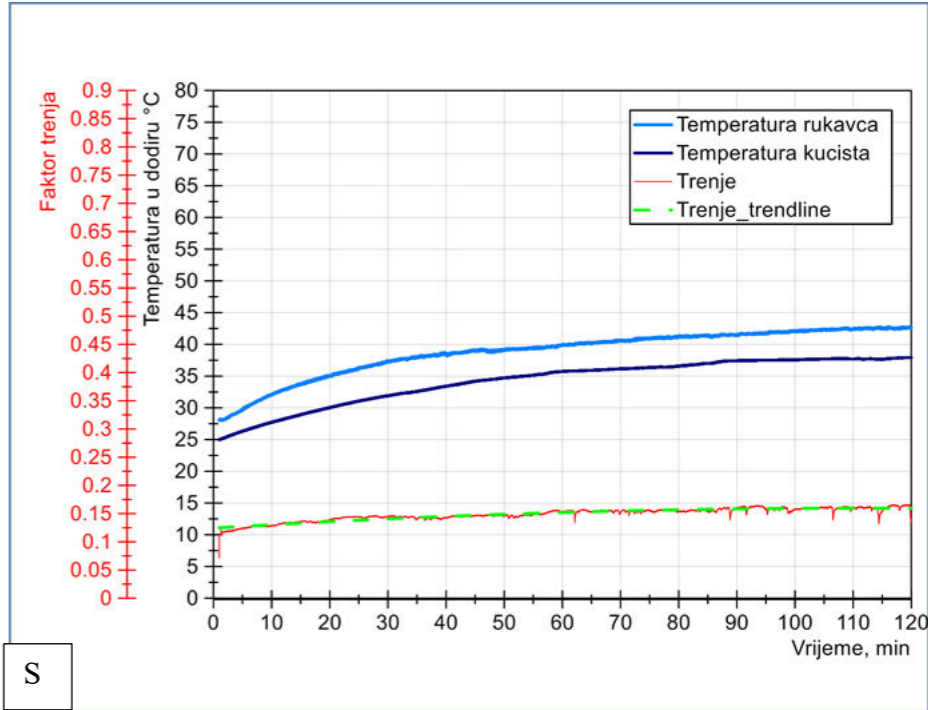
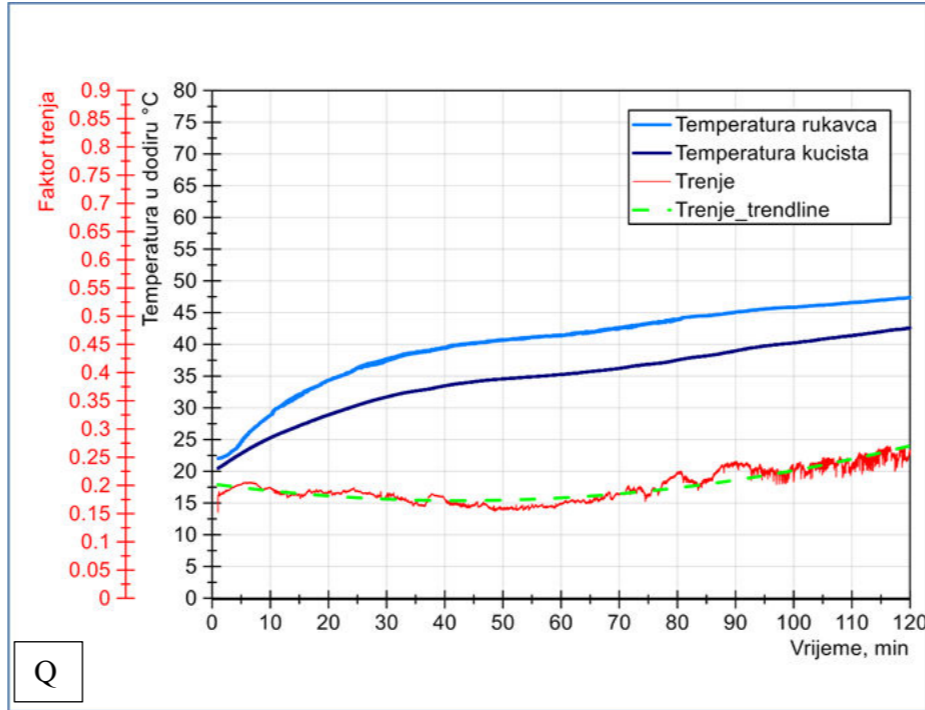
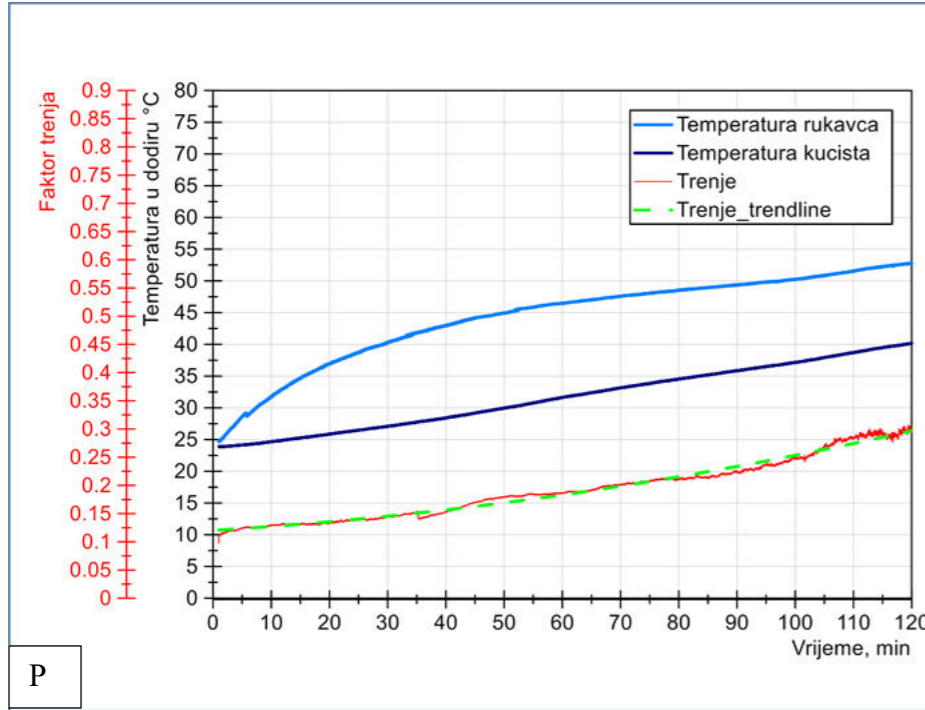
Slika 80. Dijagram G/H/I



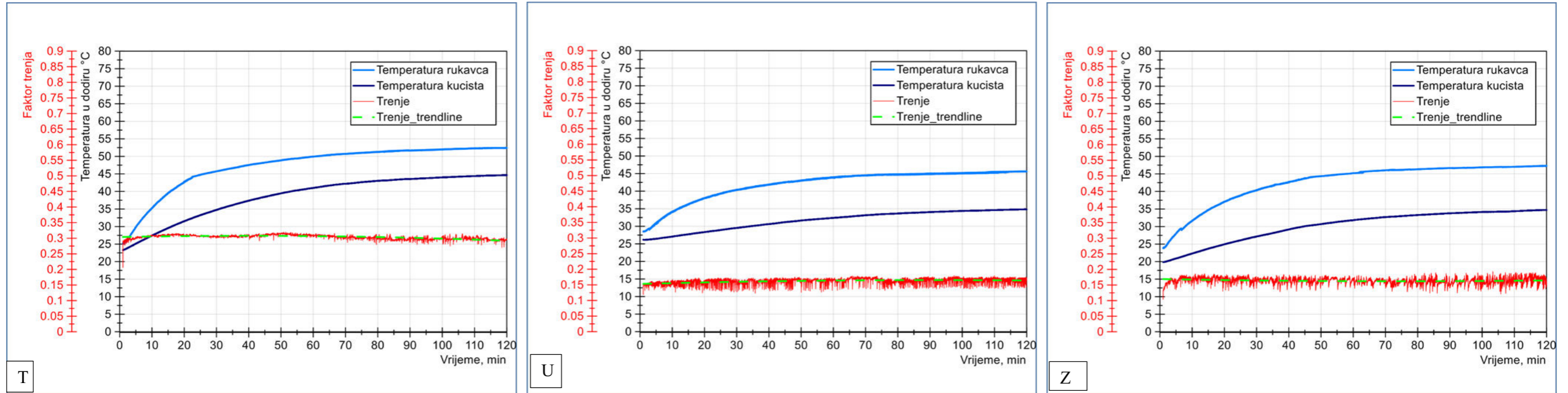
Slika 81. Dijagram J/K/L



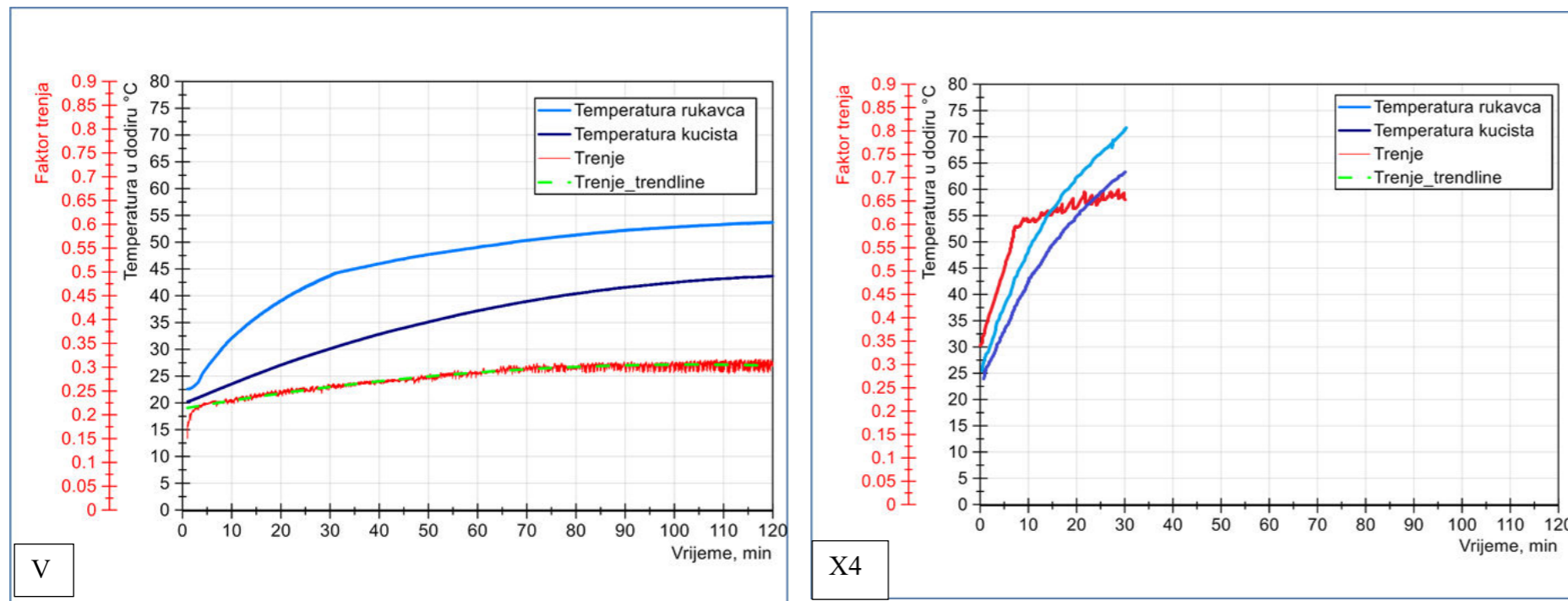
Slika 82. Dijagrami M/N/O



Slika 83. Dijagrami P/Q/S



Slika 84. Dijagrami T/U/Z



Slika 85. Dijagram V/X4

### 5.13 Analiza rezultata

Provedbom pokusa dobiveni su određeni rezultati mjerenja koji su nam potrebni za određivanje životnog vijeka kompozitnog kliznog ležaja u pogledu promjene mase i dimenzija, te površinske hrapavosti ispitnog kliznog ležaja i rukavca.

Promjena promjera kliznog ležaja kao i gubitak mase bila je potrebna za određivanje specifičnog stupnja trošenja  $k'$ . Svaka ispitna grupa označena je velikim početnim slovom te je poredana abecednim redom, a predstavlja određene parametre za provedbu pokusa na uređaju za ispitivanje kliznih ležaja u pogledu opterećenja, veličinu zračnosti te uz dodatak maziva ili bez njega. Gore navedene rezultate mjerenja može se vidjeti u tablici 16.

Na osnovi dobivenih rezultata može se vidjeti specifični stupanj trošenja, koji nam je potreban za proračun životnog vijeka kliznog ležaja, a izračunati ga se može pomoću jednadžbe (47) čija prosječna vrijednost iznosi  $k'= 5,25 \text{ E-14 m}^3/\text{Nm}$ . Za slučaj da na kompozitnom kliznom ležaju nemamo sloj krutog maziva (PTFE). Ako pak imamo dodatak krutog maziva (PTFE) prosječna vrijednost specifičnog stupanja trošenja je nešto veća  $k'= 6,96 \text{ E-14 m}^3/\text{Nm}$ . Razlog većeg stupnja trošenja je u tome što dio krutog maziva prelazi na drugu naležnu površinu odnosno rukavac. Na rukavcu dolazi do smanjenja hrapavosti površine što u konačnici rezultira manjim faktorom trenja te nakon nekog vremena dolazi do stabilne temperature rada koja se tijekom daljnjeg ispitivanja ne mijenja značajno.

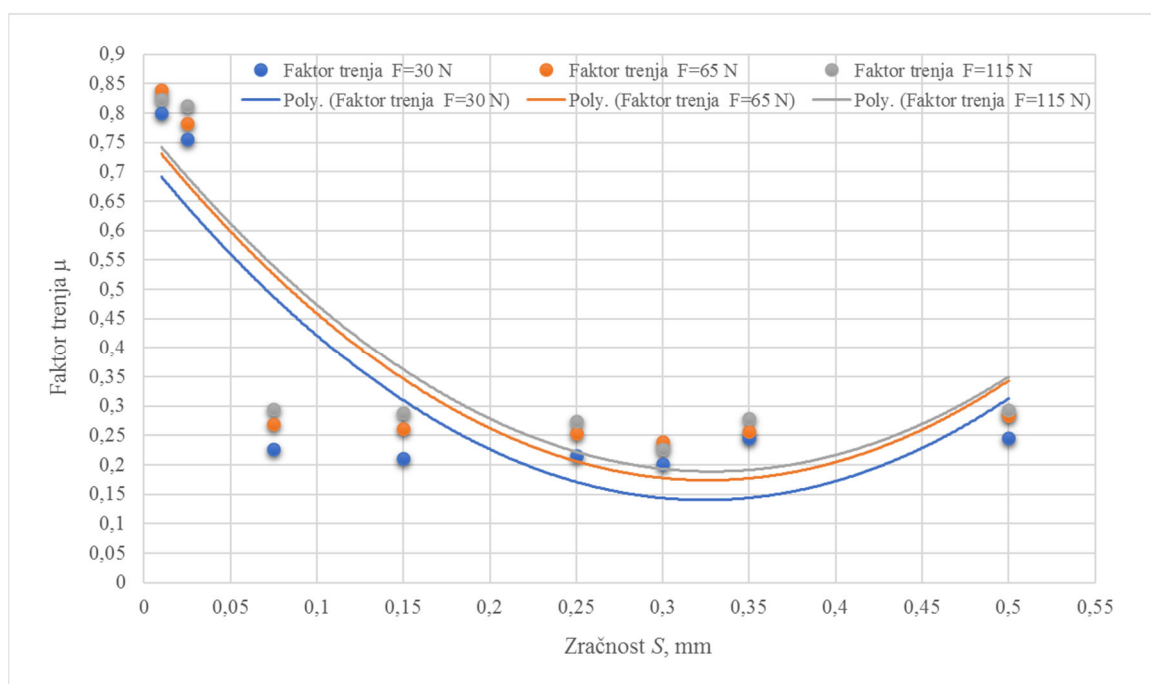
Za usporedbu s duromernim kompozitnim materijalom korišten je PEEK s dodatkom ugljičnih vlakana koji imaju funkciju matrice te dodatak grafita u funkciji maziva trgovačkog naziva TECAPEEK PVX [123] kod kojeg je stupanj trošenja vrlo mali te iznosu  $k'= 1,74 \text{ E-15 m}^3/\text{Nm}$  (srednja vrijednost), ali zbog većeg faktora trenja koji iznosi 0,1973 temperatura rukavca i kućišta je nestabilna. U tijeku provedbe pokusa to se može vidjeti na slici 84, ispitna grupa Q. U zadanim radnim uvjetima nije preporučljivo koristiti ovaj ležajni materijal zbog toga što s vremenom može doći do značajnog povećanja temperature što može izazvati neki oblik oštećenja.

U tijeku mjerenja na ispitnom uređaju bila je mjerena temperatura rukavca, temperatura kućišta i faktor trenja. Ovi podatci su nam potrebni kako bi odredili gubitak snage opisan jednadžbom (66) nastao zbog povećanja ili smanjenja faktora trenja koji ovisi o ispitnim postavkama. Temperatura rukavca ( $T_w$ ) i temperatura kućišta ( $T_1$ ) potrebna nam je za termodinamički proračun, kao i koeficijent prolaza topline ( $k$ ) koji se može izračunati iz

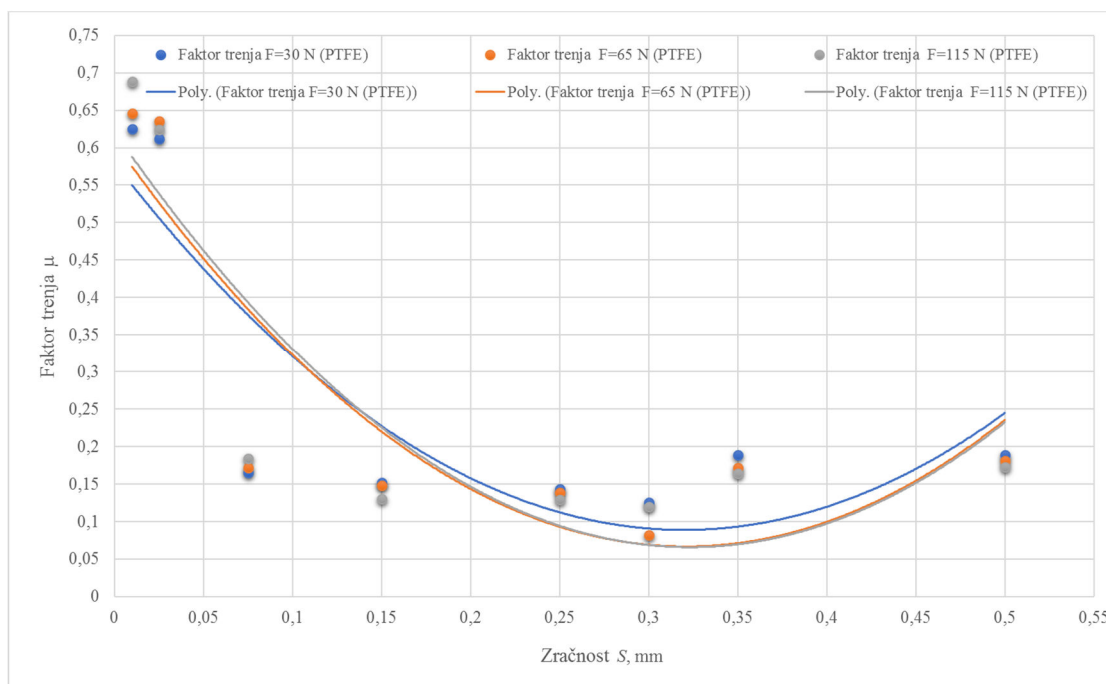
jednadžbe (62). Navedene vrijednosti u pogledu temperatura kućišta i rukavca te faktor trenja za svaku ispitnu grupu mogu se vidjeti u tablici 17, dok dijagrami mjerenja mogu se vidjeti na slikama 78 do 85. Pregledom vrijednosti dobivenih tijekom pokusa koje su vidljive u tablici 17, može se zaključiti da ispitni uzorci koji su radili uz dodatak krutog maziva (PTFE) tijekom nekog vremena postižu stabilnu temperaturu rada stoga se može zaključiti da daljnjim radom sa istim radnim parametrima ne bi došlo do oštećenja kliznog ležaja i/ili rukavca. Ispitne grupe kod koji s vremenom ne dolazi do značajne promjene temperature su: B, D, F, H, J, L, N, U i V dok kod ispitne grupe O dolazi do značajnije promjene temperature tijekom vremena. Kod ispitne grupe J i L kod koje je zračnost iznosila 0,3 mm, faktor trenja je bio najmanji i to pri opterećenju od 65 N iznosi  $\mu=0,0822$ , dok pri opterećenju od 115 N iznosi  $\mu=0,1197$ , kao što se može vidjeti na slici 82. Pri radu bez maziva faktor trenja na opterećenju od 65N je iznosio  $\mu=0,2199$ , dok je na opterećenju od 115 iznosio  $\mu=0,2571$  što se može vidjeti na slici 83.

Kako bi bili sigurni da pri toj zračnosti imamo najmanje trenje, bilo je izvedeno dodatno ispitivanje sa među zračnosti od 0,25 mm koje predstavlja ispitna grupa T i U te zračnost od 0,35 mm koje predstavlja ispitna grupa Z i V. Za obje zračnosti faktor trenja je iznosio  $\mu=1,1612$  pri opterećenju od 65 N, dok je  $\mu=1,1638$  pri opterećenju od 115N.

Može se zaključiti da je zračnost 0,3 mm pri radu bez dovoda maziva ili uz kruto mazivo optimalan izbor.



Slika 86. Ovisnost faktora trenja (bez dodatka maziva) o zračnosti



Slika 87. Ovisnost faktora trenja (s dodatkom PTFE maziva) o zračnosti

Promjena faktora trenja ovisi o promjeni zračnosti pa se uz dodatak krutog maziva faktor trenja značajno smanjuje što se može vidjeti na slici 87, dok promjenom sile opterećenja ne dolazi do značajnije promjene faktora trenja kao što se vidi na slici 86 i 87.

Toplinski tok nastao klizanjem između rukavca i kliznog ležaja opisan je jednadžbom (73) te za slučaj kada je najveće trenje ( $\mu=0,8129$ ) on iznosi 49,54 W, za najmanje trenje ( $\mu=0,0822$ ) on iznosi 2,83 W. Povezanost između kuta dodira i faktora trenja može se vidjeti na slici 93.

Na osnovu dobivenih podataka mjerenja može se definirati jednadžbe za izračun faktora trenja u ovisnosti o zračnosti za slučaj bez dodatka maziva i s dodatkom maziva koje se može vidjeti u tablici 18.

Promjenom zračnosti dolazi do promjene obuhvatnog kuta između kliznog ležaja i rukavca. Pri zračnosti od 0,3 mm gdje je faktor trenja bio najmanji za slučaj sa i bez podmazivanja obuhvatni kut je iznosio  $62^\circ$ . Daljnjim radom dolazi do trošenja kliznog ležaja što dovodi do povećanja zračnosti koja za posljedicu ima smanjenje obuhvatnog kuta. Rezultatima ispitivanja koja se mogu vidjeti na slici 88 i 89 minimalni i maksimalni obuhvatni kut pri kojem ne dolazi do značajnijeg povećanja faktora trenja je od  $58^\circ$  do  $75^\circ$ .

Za slučaj malih opterećenja u pogledu tlaka na ležaj i velike obodne brzine rukavca što je manji obuhvatni kut manja je površina dodira između rukavca i ležaja što za posljedicu ima veće stvaranje topline te povećanje faktora trenja.

Kod kliznih ležajeva gdje imamo veliko opterećenje u pogledu tlaka na ležaj te male obodne brzine rukavca dolazi do veće elastične linearne deformacije ležajnog materijala te što je trošenje veće, rukavac ulazi više u ležajni materijal te dolazi do povećanja obuhvatnog kuta. Na temelju provedenih pokusa može se zaključiti da prilikom proračuna radnog vijeka kliznog ležaja treba voditi računa o obuhvatnom kutu kako bi tijekom rada imali najmanji faktor trenja.

Prema jednadžbi (58) može se izračunati obuhvatni kut u ovisnosti o promjeni zračnosti nastaloj zbog trošenja ležajnog materijala i linearne elastične deformacije ležajnog materijala. Proračunom prema jednadžbi (58) za optimalnu zračnost od 0,3 mm može se utvrditi da maksimalni pomak nastao zbog trošenja ne smije biti veći od 0,198 mm.

Prilikom ispitivanja na ispitnom uređaju za klizne ležajeve, pri premaloj zračnosti od 0,05 mm, obuhvatni kut je iznosio  $2\beta = 99,4480^\circ$  pri kojem je nakon cca. 30 minuta ispitivanja došlo do zaribavanja ležaja, a faktor trenja je iznosio  $\mu = 0,7821-0,8189$  (bez maziva, ispitna grupa X1 i X3, tablica 17) te  $\mu = 0,6359 - 0,6459$  (s PTFE mazivom, ispitna grupa X2 i X4, tablica 17).

Ovisnost obuhvatnog kuta i faktora trenja bez maziva može se vidjeti na slici 88, dok ovisnost faktora trenja o obuhvatnom kutu za slučaj kada imamo dodatak maziva može se vidjeti na slici 89.

Na osnovu istraživanja dobivenih u ovom radu može se zaključiti da promjena zračnosti utječe na promjenu obuhvatnog kuta. Prema rezultatima ispitivanja najmanji faktor trenja iznosio je pri obuhvatnom kutu od  $58^\circ$  do  $75^\circ$  što je ekvivalentno povećanju zračnosti nastaloj zbog trošenja koja iznosi približno 64 % ukupne vrijednosti propisane zračnosti.

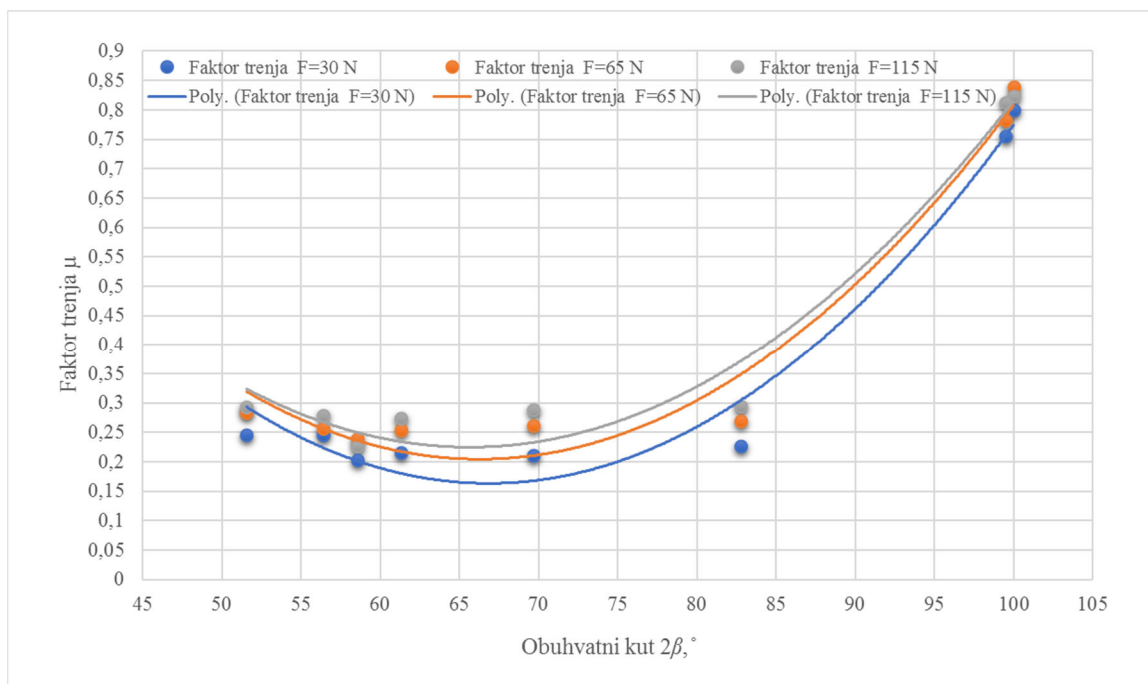
Na temelju provedenih istraživanja može se definirati jednadžba (80) za određivanje maksimalne radne zračnosti koja vrijedi za uvjet pri kojem imamo mali tlak na ležaj i veliku obodnu brzinu rukavca

$$h_{\max} = S \cdot 1,64 \quad (80)$$

Za slučaj kada imamo veliki tlak na ležaj i malu obodnu brzinu rukavca potrebno je pri proračunu obuhvatnog kuta uzeti u obzir elastičnu linearnu deformaciju ležajnog materijala koja se može izračunati pomoću jednadžbe (77).

Tablica 18. Jednadžbe za izračun faktora trenja u ovisnosti o zračnosti

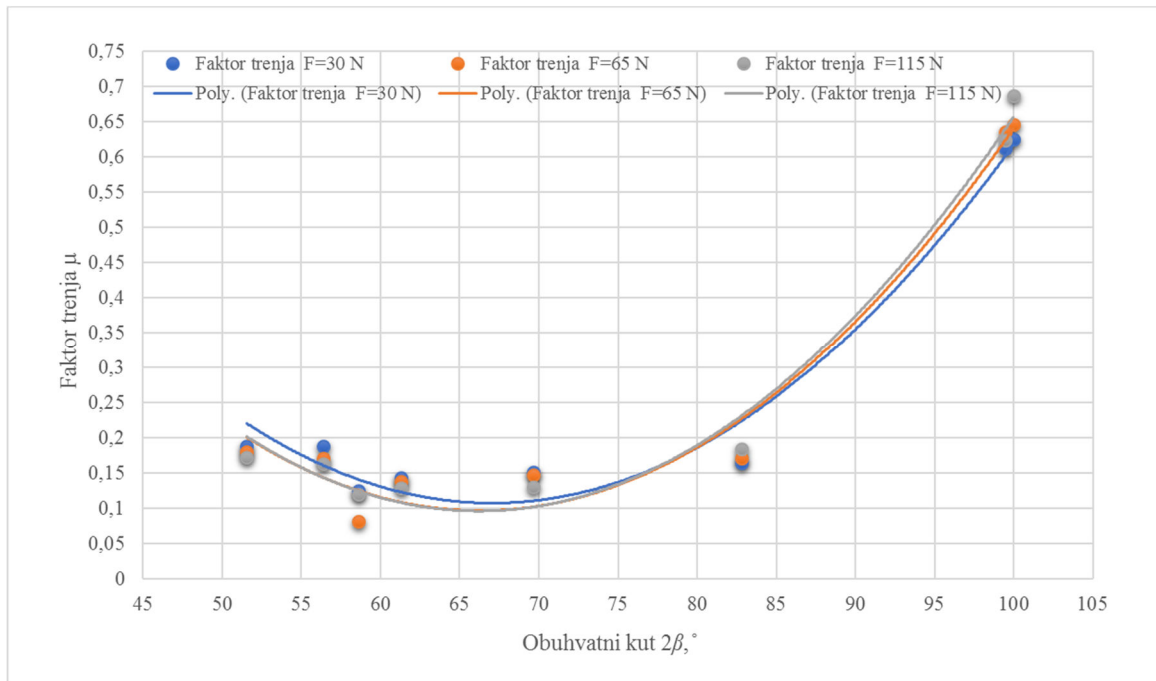
Sila opterećenja $F_N / \text{N}$	Mazivo	Jednadžba
30	-	$\mu = 5,5879 \cdot S^2 - 3,6232 \cdot S + 0,7276$
65	-	$\mu = 5,5828 \cdot S^2 - 3,6384 \cdot S + 0,7667$
115	-	$\mu = 5,4660 \cdot S^2 - 3,5892 \cdot S + 0,7779$
30	PTFE	$\mu = 4,8037 \cdot S^2 - 3,0729 \cdot S + 0,5803$
65	PTFE	$\mu = 5,2574 \cdot S^2 - 3,3738 \cdot S + 0,6080$
115	PTFE	$\mu = 5,3243 \cdot S^2 - 3,4411 \cdot S + 0,6219$



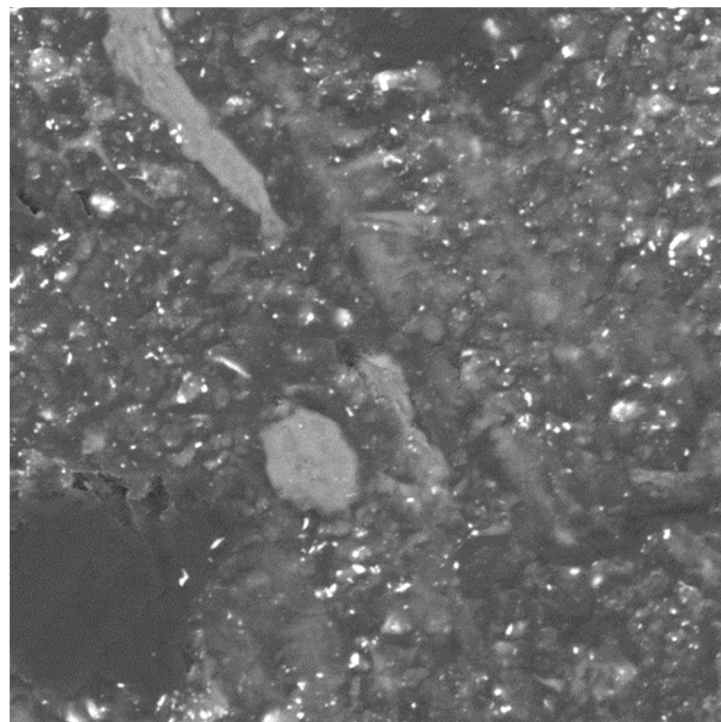
Slika 88. Faktor trenja (bez maziva) o ovisnosti o obuhvatnom kutu

U laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, ispitni uzroci kompozitnog ležaja su analizirani na elektronskom mikroskopu te je utvrđeno da tijekom rada nije došlo do nikakvih oštećenja u pogledu odvajanja matrice od ojačala koja su opisana u poglavlju 2.3 što se može vidjeti na slici 90.





Slika 89. Faktor trenja ( s dodatkom maziva) u ovisnosti o obuhvatnom kutu



SEM MAG: 1.39 kx      DET: BSE Detector      Vega ©Tescan  
 HV: 20.0 kV      DATE: 03/17/17      Digital Microscopy Imaging  
 VAC: HiVac      Device: TS5136MM      Laboratory for materialography  
 Faculty of Mechanical Engineering, Uni of Zagreb, Croatia

Slika 90. Mikroskopski prikaz duromernog kompozitnog ležaja nakon pokusa

## 5.14 Statistička obrada podataka

S ciljem da vidimo utjecaj nezavisnih kategoričkih varijabli (faktora), a to su mazivo, sila opterećenja i dimenzija na zavisne varijable faktora trenja, temperaturu kućišta i temperaturu rukavca provedene su tri analize varijance (ANOVA) [119] za svaku zavisnu varijablu posebno. Svaki od kategoričkih faktora ima određeni broj nivoa.

Mazivo ima dva nivoa, jedan nivo za rad bez maziva i jedan nivo s krutim mazivom.

Sila opterećenja također ima dva nivoa, za svako opterećenje po jedan nivo (65N i 115N)

Zračnost ima 4 nivoa, svaki nivo je jedna veličina zračnosti. Veličine zračnosti može se vidjeti u tablici 15.

Za svaku kombinaciju nivoa (ukupno  $2 \times 2 \times 4 = 16$  kombinacija) provedena su tri mjerenja svake od zavisnih varijabli. Međutim, srednja vrijednost dobivenih rezultata obrađena je u programskom paketu NIDIAdem koji automatski računa prosjeke tih mjerenja pa konačno imamo po jedan rezultat mjerenja (prosjek triju replikacija) svake zavisne varijable za svaku od 16 kombinacija.

ANOVA [119] otkriva da li različiti nivoi jedne nezavisne varijable statistički značajno mijenjaju vrijednosti zavisne mjerene varijable. Može se zaključiti da ANOVA otkriva ima li statistički značajne razlike u populacijskim prosjecima zavisne varijable za različite nivoe nezavisne varijable.

Prije analize podataka potrebno je odrediti nultu i alternativnu hipotezu:

- Nulta hipoteza: nema statistički značajne razlike u populacijskim prosjecima.
- Alternativna hipoteza: ima statistički značajne razlike u populacijskim prosjecima.

Otkrivanje statistički značajnih razlika se provodi tzv. F-testom. Za velike vrijednosti F-testne statistike nulta hipoteza se odbacuje pa tada zaključujemo da ima statistički značajne razlike u populacijskim prosjecima. Analizom varijance i F-testom u programskom paketu R [124] za obradu statističkih podataka u tablici 19 se može vidjeti da faktor trenja najviše ovisi o mazivu i zračnosti.

Pretpostavka je da promjenom zračnosti može utjecati na životni vijek kliznog ležaja od kompozitnog materijala.

Prva statistička analiza provedena je na promjeni faktora trenja u ovisnosti o mazivu, sili na ležaj i zračnosti.

Mazivo je najutjecajniji faktor na smanjenje faktora trenja, što se može vidjeti iz vrijednosti  $F = 27,736$  za koji je  $Pr(0,00365) \leq P(0,005)$  te se može zaključiti da signifikantno utječe na promjenu faktora trenja jer je izračunata signifikantnost ( $Pr$ ) značajno manja od pretpostavljene signifikantnosti ( $P=0,05$ ). Drugi faktor koji značajnije utječe na promjenu faktora trenja je promjena zračnosti *kliznog ležaja / rukavca* za koji je  $F= 11,682$  kod kojeg je  $Pr(0,0033) \leq P(0,005)$  te također signifikantno utječe na faktor trenja. Sila na promjenu faktora trenja ima najmanji utjecaj i nema signifikantan utjecaj.

Na osnovi statističke analize može se zaključiti da faktor mazivo i faktor zračnost je  $Pr$ -vrijednost manja od 0.05 što znači da odbacujemo nultu hipotezu i zaključujemo da ima statistički značajne razlike u populacijskim prosjecima trenja za nivoe sa mazivom i bez maziva te stoga vizualnom inspekcijom dobivenih brojki može se zaključiti da je pri korištenju maziva trenje statistički značajno manje, nego u slučaju kada nema maziva. Promjenom zračnosti s manje na veću zračnost, dolazi do postepenog pada faktora trenja.

**Tablica 19. Ovisnost faktora trenja o utjecajnim faktorima**

Utjecajni faktori	Df	SS	SD	F-vrijednost	Pr	$\leq P(0,005)$
Mazivo	1	0,030774	0,030774	27,736	0,000365	***
Sila	1	0,000058	0,000058	0,052	0,823549	
Zračnost	3	0,005599	0,001866	11,682	0,003332	**
Ostatak	10	0,011095	0,00111			

Druga statistička analiza provedena je s promjenom temperature kliznog ležaja u ovisnosti o mazivu, sili na ležaj i zračnosti.

Za faktor mazivo,  $Pr$ -vrijednost je manja od 0,05 što znači da odbacujemo nultu hipotezu i zaključeno je da ima statistički značajne razlike u populacijskim prosjecima temperatura kućišta za nivoe sa mazivom i bez maziva. Vizualnom inspekcijom dobivenih brojki (tablica 19) može se vidjeti da je pri korištenju maziva temperatura kućišta statistički značajno manja nego u slučaju kada nema maziva.

Za faktor sila opterećenja,  $Pr$ -vrijednost je manja od 0,05 što znači da odbacujemo nultu hipotezu te je zaključeno da ima statistički značajne razlike u populacijskim prosjecima temperatura kućišta za nivoe sile opterećenja od 65N i 115N te stoga vizualnom inspekcijom dobivenih brojki

može se zaključiti da je pri sili od 65N temperatura kućišta statistički značajno manja nego pri sili od 115N.

Za faktor dimenzija, Pr-vrijednost je veća od 0,05 pa je zaključeno da različite dimenzije danih nivoa ne rezultiraju statistički značajnim razlikama u populacijskim prosjecima varijable temperatura kućišta kao što se može vidjeti u tablici 20.

**Tablica 20. Ovisnost temperature kućišta o utjecajnim faktorima**

Utjecajni faktori	Df	SS	SD	F-vrijednost	Pr	≤ P (0,005)
Mazivo	1	38,54	38,54	17,49	0,00204	**
Sila	1	81,63	81,63	42,01	7,06E-05	***
Zračnost	3	12,98	4,33	1,098	0,39763	
Ostatak	10	39,39	3,94			

Treća statistička analiza analizira promjenu temperature rukavca u ovisnosti o mazivu, sili na ležaj i zračnosti. Za faktor mazivo Pr-vrijednost je manja od 0,05 što znači da odbacujemo nultu hipotezu i zaključujemo da ima statistički značajne razlike u populacijskim prosjecima temperature rukavca za nivoa sa mazivom i bez maziva te vizualnom inspekcijom dobivenih brojki (tablica 21) može se vidjeti da je pri korištenju maziva temperatura rukavca statistički značajno manja nego u slučaju kada nema maziva.

Za faktor zračnost, Pr-vrijednost je manja od 0,05 što znači da odbacujemo nultu hipotezu te je zaključeno da ima statistički značajne razlike u populacijskim prosjecima temperature rukavca. Promjenom nivoa zračnosti temperatura rukavca je statistički značajno manja.

Za faktor dimenzija, Pr-vrijednost je veća od 0,05 pa zaključujemo da različite sile opterećenja ne rezultiraju statistički značajnim razlikama u populacijskim prosjecima varijable temperatura rukavca.

**Tablica 21. Ovisnost temperature rukavca o utjecajnim faktorima**

Utjecajni faktori	Df	SS	SD	F-vrijednost	Pr	≤ P (0,005)
Mazivo	1	74,1	74,1	17,09	0,00203	**
Sila	1	14,18	4,73	1,09	0,39763	
Zračnost	3	182,23	182,23	45,01	8,05E-05	***
Ostatak	10	43,37	4,34			

## 5.15 Smjernice za dimenzioniranje kompozitnih kliznih ležajeva

Kako bi odredili smjernice za dimenzioniranje kliznih ležajeva od kompozitnih materijala prvo je bilo potrebno odrediti faktor trenja u dodiru kliznog ležaja i rukavca, temperaturu u području dodira te specifični stupanj trošenja.

Na osnovi dobivenih vrijednosti koje može se vidjeti u tablici 16 i 17 formulirane su korigirane jednadžbe za određivanje zračnosti između kliznog ležaja i rukavca te jednadžbe za izračun životnog vijeka kliznog ležaja u ovisnosti o dopuštenom trošenju za ovaj kompozitni ležajni materijal, te se može navesti pet točaka znanstvenog doprinosa ove disertacije:

- 1) Izrađen je matematički model proračuna kliznog ležaja s obzirom na uvjete eksploatacije.
- 2) Optimiranjem geometrije kliznog ležaja otkriveno je poboljšanje tribološkog sustava klizni ležaj / rukavac.
- 3) Definirani su utjecajni parametri tribološkog sustava klizni ležaj / rukavac na osnovu kojih su dane zakonitosti za izbor tolerancija prema radnim uvjetima kliznog ležaja.
- 4) Analizom te optimizacijom podataka prikupljenih tijekom praktičnog dijela istraživanja, definiran je životni vijek prema specifičnom stupnju trošenja kliznog ležaja od kompozitnog materijala.
- 5) Definirane su jednadžbe za praktični proračun životnog vijeka kliznog ležaja.

Prvi korak pri konstruiranju geometrije kliznog ležaja je izračun kuta dodira između rukavca i ležaja ( $2\beta$ ) koji je opisan jednadžbom (58), a zatim se može izračunati površinski tlak prema jednadžbi (19). Obuhvatni kut ( $2\beta$ ) za najmanju propisanu zračnost kliznog ležaja od 0,075 mm iznosio je  $99,88^\circ$  dok za najveću zračnost od 0,5 iznosi  $51,55^\circ$ . Za duromerni kompozitni materijal maksimalni obuhvatni kut ne smije biti veći od  $90^\circ$  [110].

Tlak između ležaja i rukavca  $p_{c,max}$  za opterećenje od 115 N iznosi 0,1913 MPa, dok za opterećenje od 65 N on iznosi 0,1202 MPa.

Preporuka proizvođača kompozitnog materijala [86] je da pri radu bez maziva opterećenje ne smije prelaziti više od 0,2 MPa, dok uz podmazivanje vodom ono ne smije prijeći više od 0,8 MPa. Ako ležaj zadovoljava uvjete opteretivosti u pogledu maksimalnog tlaka i obuhvatnog kuta, može se krenuti s konstruiranjem geometrije ležaja.

Teoretski opis proračuna zračnosti opisan je u poglavlju 5.7. Na osnovu njega će se formulirati i dopuniti jednadžbe za proračun zračnosti kliznog ležaja.

Vanjski promjer kliznog ležaja  $D_v$  ležaja mora biti veći od promjera kućište ležaja  $D_B$  kako bi ostvarili stezni spoj između kliznog ležaja i kućišta. Prema literaturi [86] vanjski promjer ležaja mora biti veći za zračnost  $S_E$  koju se može izraziti jednadžbom (81)

$$S_E = \frac{0,0028 \cdot D_B}{2} \quad (81)$$

Konačnu dimenziju vanjskog promjera kliznog ležaja može se definirati jednadžbom (82).

$$D_v = D_B + 2 \cdot S_E \quad (82)$$

Za klizne ležajeve kod kojih je vanjski promjer  $D_v$  približno jednak promjeru kućišta ležaja  $D_b$ , klizni ležajevi se lijepe u kućište ljepljivom. Važno je napomenuti da maksimalna zračnost između kućišta / ležaja ne smije biti veća od 0,08 mm, (uvjet proizvođača ljepljive).

Za slučaj lijepljenih kliznih ležajeva zračnost  $S_E$  pri proračunu proizvodne zračnosti  $S_F$  ne uzima u obzir.

Nakon obrade kompozitnog ležajnog materijala prema uputama proizvođača [86] pri kontroli dimenzije unutarnjeg promjera ležaja, zabilježili smo da tolerancija izrade iznosi  $\pm 0,05$  mm što utječe na promjenu zračnosti. Stoga jednadžbom (83) može se izraziti promjenu zračnosti  $S_{OB}$  prouzročenu izradom.

$$S_{OB} = 0,025 [mm] \quad (83)$$

Prema normi [115] za polimerne kompozitne materijale minimalna zračnost između kliznog ležaja i rukavca opisana je jednadžbom (84) što za promjer rukavca od 34 mm iznosi 0,136mm.

$$S_{O,pk} = 0,004 \cdot d \quad (84)$$

To približno odgovara ispitnim uzorcima s dimenzijom kliznog ležaja od  $34,3 \times 39 \times 27$  mm koje su opisane u ispitnim grupama E, F, G i H kod kojih faktor trenja pri radu bez maziva iznosi  $\mu = 0,2217-0,2377$  dok pri radu s krutim mazivom  $\mu = 0,1484-0,1205$ .

Kod zračnosti od 0,3 mm pri radu bez maziva za ispitnu grupu I i K faktor trenja je iznosio  $\mu = 0,2199-0,2571$ , dok za slučaj sa krutim mazivom u koje spadaju ispitne grupe J i L faktor trenja je iznosio  $\mu = 0,0822-0,1197$ .

Na osnovu istraživanja provedenih u ovom radu može se odrediti jednadžba (85) za određivanje zračnosti pri radu bez maziva.

$$S_o = 0,008 \cdot d \quad (85)$$

Kao što smo već prije naveli u poglavlju 5.7 na zračnost kliznog ležaja značajno utječe porast radne temperature te dolazi do dodatnog smanjenja zračnosti, stoga jednadžba (86) opisuje smanjenje promjera ležaja nastalo povećanjem radne temperature.

$$S_w = 3 \cdot t (\varepsilon_f + \alpha \cdot \Delta T) \quad (86)$$

$$\Delta T = T_w - T_o \quad (87)$$

U jednadžbi (82) debljina stijenke ležaja označena je oznakom ( $t$ ), linearni faktor širenja ležaja  $\varepsilon_f$  koji za klizne ležajeve koji rade bez dotoka maziva iznosi 0,003 [115] dok za klizne ležajeve podmazivane vodom on iznosi 0,020 [115]. Linearni koeficijent širenja materijala  $\alpha$  za duromerni kompozit iznosi  $7 \times 10^5 \text{ K}^{-1}$ .

Debljina stijenke  $s$  kompozitnog kliznog ležaja [86] može se izračunati pomoću jednadžbe (88).

$$t = (0,035 \cdot d) \cdot 1,65 \quad (88)$$

Bubrenje materijala tijekom rada s krutim mazivom, kao i bez njega, nije zabilježeno te zračnost zbog bubrenja materijala  $S_Q$  može se zanemariti.

Na osnovu navedenih promjena koju utječu na promjenu zračnosti može se definirati pogonsku zračnost  $S_F$  koje se može opisati jednadžbom (89).

$$S_F = S_E + S_{OB} + S_O + S_w \quad (89)$$

Konačni promjer kliznog ležaja prije ugradnje u kućište može se opisati jednadžbom (90).

$$D = 2 \cdot S_F + d \quad (90)$$

Smanjenje debljine stijenke može se prema Archadu [126] opisati jednadžbom (88) i (89).

$$V_{\max} = k \cdot F_N \cdot s \quad (88)$$

$$h_{\max} = \frac{V_{\max}}{D_0 \cdot \pi \cdot B} \quad (89)$$

Na osnovu maksimalne promjene debljine stijenke nastale zbog trošenja opisane jednadžbom (78) i maksimalnog volumena trošenja opisanog jednadžbom (80) može se iz jednadžbe (88) izvesti korigiranu jednadžbu za izračun puta ( $s$ ).

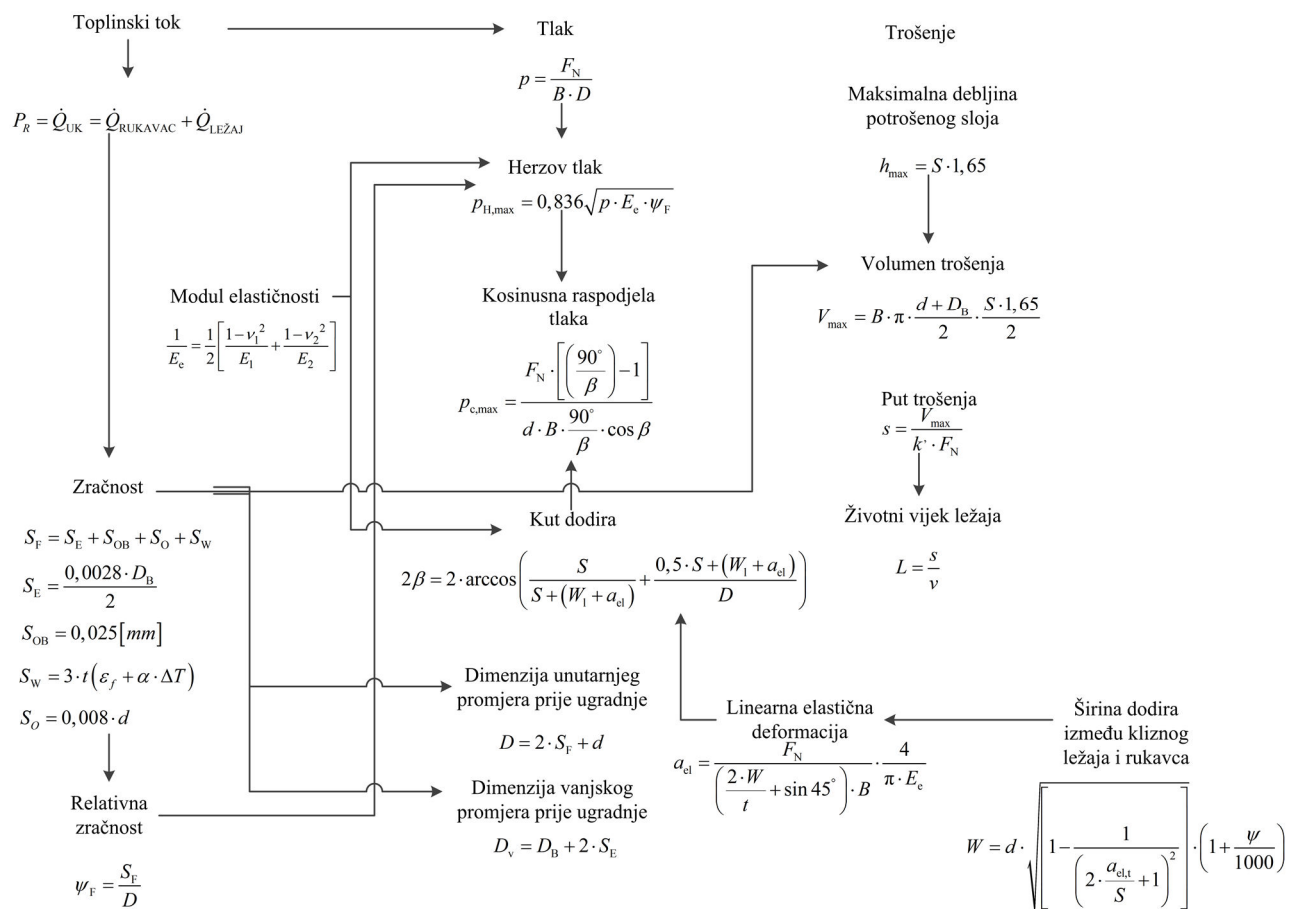
$$s = \frac{V_{\max}}{k \cdot F_N} \quad (90)$$

Radni vijek kliznog ležaja može se opisati pomoću izračunatog puta ( $s$ ) i obodne brzine rukavca ( $v$ ), jednadžba (91).

$$L = \frac{s}{v} \quad (91)$$

Toplinski tok rukavca prema jednadžbi (65) i ležaja prema jednadžbi (74) za radne uvjete bez dovoda maziva ne smije prelaziti više od 15 W.

Dijagram toka za proračun kliznog ležaja bez podmazivanja može se vidjeti na slici 91.



Slika 91. Shema proračuna kliznog ležaja



## Zaključak

---

Na osnovu provedenih istraživanja može se zaključiti da je duromerni kompozitni materijal pogodan za izradu kliznih ležajeva za uvjete rada bez dovoda maziva što se uglavnom prije izbjegavalo zbog mogućnosti oštećenja. Pravilnim izborom zračnosti kompozitni ležajni materijali mogu imati vrlo dug životni vijek eksploatacije, a da pri tome ne dođe do oštećenja ležaja i/ili rukavca.

Prvo ispitivanje koje smo izvodili bilo je na Timken ispitnom uređaju pomoću kojeg smo odredili:

- temperaturu kontakta između kompozitnog ispitnog uzorka i čelične pritisne pločice,
- faktor trenja.

Ispitivanje na Timken ispitnom uređaju provedeno je u svrhu određivanja granica opteretivosti kompozitnog ležajnog materijala.

U svrhu prikupljanja relevantnijih podataka izrađen je uređaj za ispitivanje kliznih ležaja u realnim uvjetima rada bez dovoda maziva. Izrađeni mjerni uređaj omogućuje nam mjerenje sljedećih vrijednosti:

- faktor trenja između kliznog ležaja i rukavca,
- temperaturu rukavca,
- temperaturu kliznog ležaja,
- razliku mase kompozitnog ležaja nakon ispitivanja.

Na osnovu ispitivanja na realnom uređaju za klizne ležajeve odredili smo:

- specifični stupanj trošenja kompozitnog ležajnog materijala,
- toplinski tok rukavca i kliznog ležaja.

Provedeni su pokusi s četiri osnovne zračnosti između kliznog ležaja i rukavca. Za onu zračnost kod koje je faktor trenja bio najmanji, proveden je dodatni par pokusa za koji je ta zračnost varirala za  $\pm 0,1$  mm kako bi utvrdili optimalnu zračnost za propisane radne uvjete. Utvrđeno je da je faktor trenja manji uz pravilan odabir zračnosti između ležaja i rukavca. Pri odabiru optimalne zračnosti faktor trenja je najmanji, a uz to obuhvatni kut između rukavca i ležaja iznosi od  $65^\circ$  do  $75^\circ$  pri kojem je i specifični stupanj trošenja najmanji.

Primjenom krutog maziva (PTFE) dolazi do značajnog smanjenja faktora trenja što također utječe i na smanjenje temperature kućišta i rukavca tijekom rada.

Trošenje kompozitnog kliznog ležaja s dodatkom krutog maziva kao i bez njega relativno je malo te se može očekivati dug radni vijek. Tijekom ispitivanja na rukavcu nije bilo tragova značajnijeg trošenja i/ili oštećenja.

Na osnovu ispitivanja provedenih na kompozitnom ležajnom materijalu mogu se utvrditi određena poboljšanja u odnosu na ležajne materijale na bazi metala, a to su:

- duži radni vijek kliznog ležaja,
- manji faktor trenja,
- vrlo malo trošenje kompozita,
- vrlo dobra opteretivost ležaja pri radu bez dovoda maziva,
- dimenzijska stabilnost ležaja u širokom spektru utjecajnih parametara.

Dobivenim zakonitostima za dimenzioniranje kliznih ležajeva od duromernog kompozita moguće je pouzdanije i točnije odrediti nosivost (opteretivost) te parametre koji utječu na promjenu zračnosti kliznog ležaja u ovisnosti o uvjetima rada na čijoj osnovi se može dimenzionirati pravilnu geometriju ležaja.

Tako dobivenim rezultatima može se zaključiti da je hipoteza ovog doktorskog rada potvrđena.

Proširivanje znanja u pogledu pravilnog odabira zračnosti između *kliznog ležaja/rukavca* daje nam nove mogućnosti primjene kompozitnih kliznih ležaja u strojevima.

Preporuka za daljnja istraživanja bila bi dodatna ispitivanja duromernih kompozita pri podmazivanju mazivima male viskoznosti kao što je npr. voda.

Iz rezultata ispitivanja ovog rada vidljivo je da se bez maziva ležajni materijal pri opterećenju više grije za razliku od slučaja kad imamo dodatak krutog maziva. Ako nema maziva treba voditi računa o dopuštenom opterećenju zbog prekomjernog grijanja.

Kada bi imali mazivo male viskoznosti i vrlo velikog protoka kroz ležaj, veliki dio toplinskog toka bi se mogao odvesti s ležaja što bi nam osiguralo veće dopušteno opterećenje ležaja.

Za daljnja istraživanja bilo bi vrlo dobro istražiti utjecaj zračnosti za sustav *klizni ležaj / rukavac* pri podmazivanju vodom.

Pri odabiru odgovarajuće zračnosti bilo bi dobro ispitati utjecaj obodne brzine rukavca kako bi dobili hidrodinamičko strujanje maziva između ležaja i rukavca.

---

## Bibliografski navod

---

- [1] M. Ando i J. Sukumaran, Tribological behavior od composite-steel on rolling contracts for various loads, *Sustainable Construction and Design*, 2011.
- [2] J. Sukumaran, M. Ando i P. D. Baets, Effect of Velocity on Roll/Slip for low and high load conditions in Polymer composite, *Sustaunable Construction and Design*, 2011.
- [3] L. Capitanu i V. Florescu, Tribological Aspects of Wear of Polished Steel surface in dry contact on Polymer Composites with Glass Fibers, *American Journal of Material Science*, svez. 3, 2013.
- [4] J. Ivens, M. Urbanus i C. D. Smet, Shape recovery in a thermoset shape memory polymer and its fabric-reinforced composites, svez. 5, br. 254-261, 2011.
- [5] H. Jin, C. . L. Mangun, . S. . S. Dylan, J. . S. Moore, N. . R. Sottos i S. . R. White, Self-healing thermoset using encapsulated epoxy-amine healing chemistry, svez. 1, 2012.
- [6] W. Brostow, V. Kovačević, D. Vrsaljko i J. Whitworth, Tribology of polymers and polymer-based composites, svez. 32, br. 273 - 290, 2010.
- [7] J. . K. Lancaster, Dry bearings: a survey of materials and factors affecting their performance, 1973.
- [8] M. Dhanabalakrishnan, P. Sangaravadivel, N. Babu i R. Shenbagaraj, Development of particulate reinforced mmc to improve tribological properties for bush bearing, svez. 4, br. 1, 2013.
- [9] G. Kalacska, An engineering approach to dry friction behaviour of numerous engineering plastics with respect to the mechanical properties, *eXPRESS Polymer Letters*, svez. 7, pp. 199-210, 2013.
- [10] H. Dhieb, J. G. Buijnsters i J. P. Celis, Degradation Of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites Under Sliding In Ambient Air, *Laboratory Soete*, 2011.
- [11] A. Miszczak i A. Czaban, Surface Topography Of Slide Journal Bearings, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, svez. 18, pp. 279-285, 2011.
- [12] S. R. Donald, Upthrust problems on multistage vertical turbine pumps, 2005.
- [13] S. S. Trelleborg, Orkot hydro Berings, Bearing design Guide, TSS, 2013.
- [14] L. W. McKeen, The effect of temperature and other factors on plastics and elastomers, 2 ur., Norwich: William Andrew Inc., 2008.
- [15] D. Vlahović, Termoplasti u strojogradnji, Zagreb: Metalurški kombinat Željezara Sisak, 1972.
- [16] V. Quaglioni, P. Dubini, D. Ferroni i C. Poggi, Influence of counterface roughness on friction properties of engineering plastics for bearing applications, br. 1650–1658, 2009.
- [17] M. Opalic, Z. Domitran i B. Katana, Comparison of antifriction properties of polymer composites and bronze, *Technical Gazette*, svez. 4, br. 389-396 2014.
- [18] K. Karlheinz, Decker Machinenelemente, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2011.

- [19] A. Rezaei, W. V. Paepegem, P. D. Baets, W. Ost i J. Degrieck, Adaptive finite element simulation of wear evolution in radial sliding bearings, 2012.
- [20] S. W. Tsai, A general theory of strength for anisotropic materials, *Air force material laboratory Ohio*, 1972.
- [21] S. W. Zhang i R. Y. HE, Advances in the study on wear of metals by polymers, br. 39, 2004.
- [22] T. S. Solution, Engineering manual for industrial application, TSS, 2008.
- [23] M. Šercer, B. Križan i R. Basan, Konstruiranje polimernih proizvoda, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2009.
- [24] Thordon, Hydro-turbine Bearings, Thordon Bearings, 2007.
- [25] J. K. Lancaster, Dry bearings: a survey of materials and factors affecting their performance, *Tribology*, 1973.
- [26] M. Gruender, High-PV Wear Study of Six High Performance Wear Grade Engineering Plastics, 2012.
- [27] J. Cayer Barrioz, D. Mazuyer, P. Kapsa, A. Chateauminois i G. Robert, Abrasive wear micromechanisms of oriented polymers, *Polymer*, svez. 45, pp. 2729-2736, 2004.
- [28] B. Suresha i K. N. Kumar, Investigations on mechanical and two-body abrasive wear behaviour on glass/carbon fabric reinforced vinyl ester composites, *Materials and Design*, pp. 2056-60, 2008.
- [29] V. L. Popov, Kontaktmechanik und Reibung, Berlin : Springer-Verlag, 2009.
- [30] W. Steinhilper i B. Sauer, Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2, Fünfte vollständig neu bearbeitete Auflage, Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- [31] K. Reif, Bremsen und Bremsregelsysteme, Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2010.
- [32] P. J. Dolcini i C. Canudas, Dry Clutch Control for Automotive Applications, London: Springer-Verlag, 2010.
- [33] B. Katana i B. Mladen, Polymer Materials In The Food Industry, DAAM, Požega, 2016.
- [34] DIN 50320: Verschleiß; Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes, Beuth Verlag, Berlin, Dezember 1979.
- [35] H. Czichos i K. -H. Habig, Tribologie - Handbuch - Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik, Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2010.
- [36] M. J. Hinton, A. S. Kaddour i P. D. Soden, Failure Criteria in Fibre Reinforced Polymer Composites: The World-Wide Failure Exercise, Elsevier, 2004.
- [37] T. Nguyen, J. Sukumaran, J. D. Pauw i P. D. Baets, Tribological behaviour of polymer bearings under dry and water lubrication.
- [38] A. Z. Skorokhod i V. V. Kopytkov, Prediction of Wear Rate by Friction of Irradiated Thermoplastic Polymers in Fluids, svez. 33, br. 10.3103/S1068366612040113, 2012.
- [39] Z. Domitran, D. Žeželj i B. Katana, Influence of contact pressure and sliding speed on the temperature and coefficient of friction in sliding contact between two PET samples, *Technical Gazette*, svez. 2, br. 389-396, 2016.

- [40] J. I. Y. Sheikh-Ahmad, *Machining of Polymer Composites*, New York: Springer Science+Business Media, 2009.
- [41] DIN 50323-3: Tribologie; Reibung, Arten, Zustände, Kenngrößen, Beuth Verlag, Berlin, Dezember 1993.
- [42] A. Adbelbary, *Wear of polymers and composites*, Elsevier, 2014.
- [43] Z. Marx, *Trockenlaufende Gleitlager aus hochtemperaturbeständigen Kunststoffen*, TU Chemnitz: Dissertation, 1997.
- [44] H. Domininghaus, P. Eyerer, P. Elsner i T. Hirth, *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*, 6., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Berlin : Springer-Verlag, 2005.
- [45] B. J. Briscoe i S. K. Sinha, *Wear of polymers*, br. 401.
- [46] W. Wieleba, The mechanism of tribological wear of termoplastic materials, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, br. 7(4), 2007.
- [47] J. K. Lanchester, *Polymer-based bearing materials - The role of fillers and fibre reinforcement*, 1972.
- [48] H. Voss i K. Friedrich, On the wear behaviour of short-fibre-reinforced PEEK composites, *Wear*, pp. 1-18, 1987.
- [49] E. G. El-Sherbiny i A. A.S. Abo-El-Ezz, Friction and wear properties of polymeric composite materials for bearing applications, *WEAR*, pp. 45-53, 1995.
- [50] K. Friedrich, Z. Lu i A. M. Hager, Recent advances in polymer composites tribology, *Wear*, pp. 139-144, 1995.
- [51] L. Capitanu i V. Florescu, Tribological Aspects of Wear of Polished Steel Surfaces in dry Friction Contact on Polymer Composites with Glass Fibres, *svez. 3*, br. 8-18, 2013.
- [52] N.N., *Gleitlacke und Beschmirungen aus einer Hand*, Fuchs Lubritech gmbH, 1999.
- [53] A. A. Cenna, P. Dastoor, A. Beehag i N. . W. Page, Effects of graphite particle addition upon the abrasive wear of polymer surfaces, *svez. 36*, br. 891-900, 2001.
- [54] H. Windisch, *Thermodynamik Ein Lehrbuch für Ingenieure*, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2008.
- [55] J. P. Pascault, H. Sautereau i J. Verdu, *Thermosetting Polymers*, New York: Eastern Hemisphere Distribution, 2002.
- [56] P. Stephan, K. Schaber, K. Stephan i F. Mayinger, *Thermodynamik, Band 1: Einstoffsysteme Grundlagen und technische Anwendungen*, Berlin: Springer-Verlag, 2006.
- [57] K. Stierstadt, *Thermodynamik Von der Mikrophysik zur Makrophysik*, Berlin: Springer-Verlag, 2010.
- [58] D. Labuhn i O. Romberg, *Keine Panik vor Thermodynamik!*, Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2006.
- [59] H. Hertz, *Über die Berührung fester elastischer Körper und über die Härte*, *Gesammelte Werke Bd.*, 1895.

- [60] H. Detter i K. Holecek, Der Reibungswiderstand und die Beanspruchung von feinmechanischen, *Feinwerktechnik* 74/ 11, Sves. 1 od 2S. 461-465, 1970.
- [61] G. Erhard i E. Strickle, Berechnung der statischen Tragfähigkeit von Querlagern aus thermoplastischen Kunststoffen, *Konstruktion*, Sves. 1 od 2S. 237-241, 1977.
- [62] G. Erhard i E. Strickle, Maschinenelemente aus thermoplastischen Kunststoffen: Lager und Antriebsselemente, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1985.
- [63] Î. W. Kragelski, Reibung und Verschleiß, Berlin: VEB Verlag Technik, 1971.
- [64] A. Tross, Über das Wesen und den Mechanismus der Festigkeit, München: Selbstverlag, 1966.
- [65] A. Tross, Die Mechanismen von Reibung und Verschleiß im Lichte einer neuen, submikroskopischen und energetisch aufgebauten Festigkeitshypothese, *Schmieretechnik*, svez. 6, br. S. 327-338, 1966.
- [66] G. Fleischer, Energiebilanzierung der Festkörperreibung als Grundlage zur energetischen Verschleißberechnung, Magdeburg: Plenarvortrag: 8. Tribotechnisches Kolloquium der TH Magdeburg, 1976.
- [67] G. Fleischer, Energetische Methode der Bestimmung des Verschleißes, *Schmieretechnik*, svez. 9, br. S. 269-274, 1973.
- [68] N.N., Kunststoffe Hoechst - Auslegung von Gleitlagern, Hoechst AG: Produktinformationen, 1978.
- [69] N.N., Wartungsfrei durch Inkorporation, KEM, 1992.
- [70] N.N., NORGLIDE - Das Marken-Lager unter den wartungsfreien Gleitlagern, NORTON PAMPUS GmbH: Produktinformationen, 1993.
- [71] N.N., Pacific Bearing Gleitlager, Nadella GmbH: Produktinformationen, 1997.
- [72] T. S. Solution, Orkot Bearing, Engineering manual for industrial ppplication, TSS, 2008.
- [73] D 2509 – 93 Standard Test Method for Measurement of Load-Carrying Capacity of Lubricating Grease (Timken Method), ASTM International, West Conshohocken, 1998.
- [74] D 2782 – 94 Standard Test Method for Measurement of Extreme-Pressure Properties of Lubricating Fluids (Timken Method), ASTM International, West Conshohocken, 1996.
- [75] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH HBM, Travanj 2013. [Mrežno]. Available: <http://www.hbm.com/en/menu/products/measurement-electronics-software/specialized-data-acquisition-systems/spider8/>.
- [76] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH HBM, Travanj 2013. [Mrežno]. Available: <http://www.hbm.com/en/menu/products/software/data-acquisition-software/>.
- [77] Advenced Motion Controls, Travanj 2013. [Mrežno]. Available: <http://www.a-m-c.com/products/driveware.html>.
- [78] A. Abdelbary, M. . N. Abouelwafa i I. . M. EL Fahham , Evaluation and prediction of the effect of load frequency on the wear properties of pre-cracked nylon 66, svez. 3, br. DOI 10.1007/s40544-014-0044-4, 2014.
- [79] M. . A. Ashraf, B. . S. Najafabadi, M. G. Ellis i H. Y. Hsu , Virtual testing of a polymer sliding contact, br. 179, 2006.

- [80] NN, SURFTEST SJ210 Mitutoyo, © 2014 Mitutoyo America Corporation, Aurora IL, 01 2014. [Mrežno].
- [81] NN, ISO 4288-1996-Surface Measurement, 1996. [Mrežno].
- [82] NN, Mirometar Mitutoyo, [Mrežno].
- [83] D. O. Adams, A Comparison of CEN and ASTM Test Methods for Composite Materials, Washington, DC 20591, 2004.
- [84] B. Chen, J. Wang i F. Yan, Friction and Wear Behaviors of Several Polymers Sliding Against GCr15 and 316 Steel Under the Lubrication of Sea Water, 2011.
- [85] B. B. Jia, T. S. Li, . X. J. Liu i P.-. H. Cong, Tribological behaviors of several polymer–polymer sliding combinations under dry friction and oil-lubricated conditions, br. 262, 2007.
- [86] NN, Norden Maritime AS / Engineering Manual, Industriveien 13 | 5210 Os | Norway: Intertek, 2009.
- [87] NN, SANDVIK-Insert for turning, 11 2016. [Mrežno]. Available: [/www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/Pages/productdetails.aspx?c=cngp+432+h10a](http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/Pages/productdetails.aspx?c=cngp+432+h10a).
- [88] R. Butterfield, . D. Farmer i . E. M. Scurr, The role of interfacial energy in wear at lubricated plastic-metal contacts, *Wear*, svez. 18, pp. 243-250, 1971).
- [89] S. . H. Goodman, Handbook of Thermoset Plastics, New Jersey : Noyes Publications, 1998.
- [90] NN, LOCTITE LB 8192 Technical Data Sheet, Loctite - Henkel, November 2009. [Mrežno]. Available: <http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF/8192-EN?pid=8192&format=MTR&subformat=REAC&language=EN&plant=WERCS>.
- [91] P. Ljubičić, J. Kodvanj i B. Ljubenkovic, Mechanical characteristics of the stainless steel at sub-zero temperatures (properties of material).
- [92] NN, Euro inox, Stainless Steel: Tables of Technical Properties, Luxemborg: Euro Inox, 2007.
- [93] T. Kovačić, Struktura i svojstva polimera, I. Klarić, B. Andričić i J. Jelenčić, Ur., Split: Udžbenici Sveučilišta u Splitu, 2010.
- [94] B. Ivkovic, . M. Djukdjanovic i . D. Stamenkovic, The Influence of the Contact Surface Roughness on the Static Friction Coefficient, *Tribology in industr*, svez. 4, br. Volume 22, 2000.
- [95] H. Toutenburg, Statistical Analysis of Designed Experiments, Munchen, Germany: Springer, 2009.
- [96] P. Goos i B. Jones, Optimal Design of Experiments, Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [97] M. Oestreich i . O. Romberg, Keine Panik vor Statistik!, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, GWV Fachverlage GmbH, 2009.

- [98] M. Kadnár, J. Kadnár, S. Hloch, J. Valíček i J. Rusnák, The design and verification of experimental machine for real journal bearings testing, *Technical Gazette*, svez. 1, br. ISSN 1330-3651, 2011.
- [99] H. Stand, Sedign, Testing and Analysos of journal Bearings for construction Equipment, KTH, Stockholm, 2005.
- [100] R. Govindaraj, Design of journal bearing test Rig, BTH, Karlskrona, 2012.
- [101] NN, NI DIAdem, National Instruments, 22 2 2017. [Mrežno]. Available: <http://www.ni.com/diadem/whatis/>.
- [102] H.-y. Wang, Y.-k. Hu, . F. Gao, D.-w. Zhao i D.-h. Zhang, Nominal friction coefficient in spread formulas based on lead rolling experiments, *Alsevier*, br. DOI: 10.1016/S1003-6326(15)63893-6, 2016.
- [103] Ulrich Sachs, Friction and bending in thermoplastic composites forming processes, Netherlands: Ipskamp Drukkers B.V., Enschede, The Netherlands, 2014.
- [104] D. Ligterink, i A. d. Gee, Measurement of Wear in Radial Journal Bearings, *Tribotest journal*, svez. 3, br. DOI: 10.1002/tt.3020030104, 1996.
- [105] B. Birkramjit i M. Kalin, Tribology of ceramics and composites, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- [106] H. Detter, Berechnungshinweise für Gleitlager im Trockenlauf der Gleitpaarung Kunststoff-Stahl, *Schmiertechnik + Tribologie*, Sves.1 od 2str. 107-113, 1975.
- [107] J. Gitter, Untersuchung selbstschmierender Gleitwerkstoffe, Dresden: TU Dresden, 1975.
- [108] K. Kunze, Beitrag zum Reibungs- und Verschleißverhalten modifizierter Thermoplaste für wartungs-, Dresden: TU Dresden, 1982.
- [109] P. R. N. Childs, Prsctical temperature Measurement, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
- [110] E. Wenger, Bestimmung des Lagerspiels von Kunststoffharzpreßstoffen unter Berücksichtigung der, *Stahl und Eisen*, svez. 3, br. 84, 1964.
- [111] E. J. Barbero, Finite element analysis if composite materials, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2008.
- [112] L. SHI, Heat Transfer in the Thick Thermoset Composites, Netherlands: by Uitgeverij BOXPress || Proefschriftmaken.nl, 2016.
- [113] T. Owens, Thermal Management In Fiber-Reinforced Composite Applications, 2009.
- [114] D. Cugnet, . C. Hauviller, A. Kuijper, V. Parma i G. Vandoni, Thermal Conductivity Of Structural Glass/Fibre Epoxy Composite As A Function Of Fibre Orientation, Grenoble, 2002.
- [115] N. N, Kunststoffgleitlager berechnung nach norm R310DE 2950, Bosch Rexroth AG, 2010, pp. 1-19.
- [116] K. Kabus, Decker Maschinenelemente, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2011.
- [117] K. Fredrich, Z. Zang i A. K. Schlarb, Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites, *Composite Science and Technology*, pp. 2329-43, 2005.



- [118] A. Harnoy, Bearing design in machinery, New York: Marcel Dekker Inc., 2003.
- [119] A. Rutherford, Introducing ANOVA and ANCOVA, London: SAGE Publications Ltd, 2001.
- [120] J. Antony, Design of experts for Engineers and Scientists, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003.
- [121] Z. Zhang, K. Friedrich i K. Velten, Prediction on tribological properties of short fibre composites using artificial neural networks, *Wear*, pp. 668-75, 2002.
- [122] C. G. Pratt, Plastic based bearing, *Lubrication and Lubricants*, svez. 8, 1967.
- [123] Ensinger, Ensinger, Ensinger, 17 3 2017. [Mrežno]. Available: <http://www.ensinger-online.com/modules/public/datapdf/index.php?s1=TECAPEEK&s2=0&s3=SN2&s4=PVX&s5=1&L=0>.
- [124] T. R. Foundation, The R Project for Statistical Computing, The R Foundation, 26 3 2017. [Mrežno]. Available: <https://www.r-project.org/>.
- [125] Deters, L.; Mueller, F.; Berger, M., Self lubricationg Dry Bearing - Fundaments and Methods of calculation, *Wear* - Elsevier, p.p. 183-195, 2003.
- [126] J. F. Archard, Surface topography and tribology, pp. 213-220, October 1974.

# Kratki životopis

---

Branko Katana rođen je u Koprivnici, 11. travnja 1986. godine. U Križevcima je završio osnovnu školu te maturirao u matematičkoj gimnaziji 2005. godine.

Iste godine upisao je studij strojarstva, konstrukcijski smjer, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Završava navedeni studij 2011. godine obranom diplomskog rada s temom *Postrojenje za obradu plodova kestena*, čime stječe akademski naziv magistar inženjer strojarstva (mag. ing. mech.).

U periodu rada u tvrtki *Trelleborg Sealing Solutions* prisustvuje brojnim školovanjima u edukacijskim centrima tvrtke diljem Europe te radi u području razvoja radi na razvoju novih elastomernih i polimernih materijala za primjenu u prototipovima raznih strojeva koji bi nakon testiranja išli u serijsku proizvodnju.

Radi honorarno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, gdje drži vježbe iz predmeta *Elementi konstrukcija 1, 1A i 1B te Elementi konstrukcija 2, 2A i 2B*.

Trenutno radi na Veleučilištu Velika Gorica kao predavač za predmete *Tehničko crtanje i dokumentacija, Goriva i maziva, Termodinamika, Motori, Elementi konstrukcija*, na usmjerenu održavanje vozila i zrakoplova.

Objavio je slijedeće znanstvene radove i konferencije:

Znanstveni radovi:

- Opalic, M.; Domitran, Z.; Katana, B. Comparison of antifriction properties of polymer composites and bronze. // Tehnicki vjesnik – Technical Gazette. 21, 5(2014), pp. 1089-1095.
- Domitran, Z.; Žeželj, D., Katana, B. Influence of contact pressure and sliding speed on the temperature and coefficient of friction in sliding contact between two pet samples. // Tehnicki vjesnik – Technical Gazette. 23, 2(2016), pp. 389-396

Konferencije:

- Katana, Branko; Buric, Mladen; 5th International conference Vallis Aurea”: Polymer materials in the food industry, 22nd-24th September 2016, Pozega, Croatia
- Buric, Mladen; Katana, Branko; 5th International conference Vallis Aurea”: Low cost experimental setup for 2d digital image correlation method, 22nd-24th September 2016, Pozega, Croatia

## Short Biography

---

Branko Katana was born in Koprivnica, on 11 April 1986. In Križevci he completed the elementary school and graduated at Mathematical high school in 2005.

The same year he enrolled in the engineering, design direction, at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb, and in 2011 he defended the thesis on the topic *Plant for processing chestnuts*, and he received the academic title Master of Mechanical Engineering (mag. ing. mech.).

While working at the company *Trelleborg Sealing Solutions* he attended numerous training courses in educational business centers across Europe.

He works in the area of development new elastomeric and polymeric materials for the use in prototypes of various machines that after testing went into production.

He works part-time at the Faculty of Mechanical Engineering, where he lectures Exercises in *Machine Elements 1, 1A and 1B* and the *Machine Elements 2, 2A and 2B*, currently working at the University of Applied Sciences Velika Gorica as a lecturer for courses *Technical drawings and documentation, Fuels and lubricants, Thermodynamics, Engines, Machine Elements*, in the courses of Motor Vehicle Maintenance and Aircraft Maintenance.

He has published the following scientific papers and attended the conferences:

Scientific papers:

- Opalic, M.; Domitran, Z.; Katana, B. Comparison of antifriction properties of polymer composites and bronze. // Tehnicki vjesnik – Technical Gazette. 21, 5(2014), pp. 1089-1095
- Domitran, Z.; Žeželj, D., Katana, B. Influence of contact pressure and sliding speed on the temperature and coefficient of friction in sliding contact between two pet samples. // Tehnicki vjesnik – Technical Gazette. 23, 2(2016), pp. 389-396

Conferences:

- Katana, Branko; Buric, Mladen; 5th International conference Vallis Aurea”: Polymer materials in the food industry, 22nd-24th September 2016, Pozega, Croatia
- Buric, Mladen; Katana, Branko; 5th International conference Vallis Aurea”: Low cost experimental setup for 2d digital image correlation method, 22nd-24th September 2016, Pozega, Croatia