



Univerzitet u Nišu

Mašinski fakultet



Amir M. Al-Sammarraie

**ISTRAŽIVANJE TRIBOLOŠKIH SVOJSTAVA
RADIJALNIH KLIZNIH LEŽAJA IZRAĐENIH OD
LEGURE BELOG METALA NA BAZI KALAJA -
TEGOTENAX V840**

Doktorska disertacija

Niš, 2017.



Univerzitet u Nišu

Mašinski fakultet



Amir M. Al-Sammarraie

ISTRAŽIVANJE TRIBOLOŠKIH SVOJSTAVA RADIJALNIH KLIZNIH LEŽAJA IZRAĐENIH OD LEGURE BELOG METALA NA BAZI KALAJA - TEGOTENAX V840

Doktorska disertacija

Tekst ove doktorske disertacije

stavlja se na uvid javnosti,

u skladu sa članom 30., stav 8. Zakona o visokom obrazovanju

("Sl. Glasnik RS", br. 76/2005, 100/2007-autentično tumačenje, 97/2008, 44/2010, 93/2012, 89/2013 i
99/2014)

NAPOMENA O AUTORSKIM PRAVIMA:

Ovaj tekst se smatra rukopisom i samo se saopštava javnosti (član 7. Zakona o autorskim i srodnim
pravima, "Sl. glasnik RS", br. 104/2009, 99/2011 i 119/2012).

Nijedan deo ove doktorske disertacije nesme se koristiti
ni u kakve svrhe, osim za upoznavanje sa sadržajem pre odbrane.

Niš, 2018.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING



Amir M. Al-sammarraie

**RESEARCH OF TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS
OF RADIAL JOURNAL BEARINGS MADE OF A WHITE
METAL BASED ALLOY ON TIN - TEGOTENAX V840**

DOCTORAL DISSERTATION

Mentor:
Prof. dr Dragan Milčić

Niš, 2018.

UNIVERZITETU NIŠU

PODACI O KANDIDATU ZA PROMOCIJU DOKTORA NAUKA

Ime	Amir
Prezime	Al-Sammarraie
Datum i mesto rođenja	06. 08. 1962
Sadašnje zaposlenje	Tikrit univerzitet, Tikrit, Irak
Broj mobilnog telefona kandidata	0613034270
Elektronska pošta kandidata	amircraft.2011@yahoo.com
Naziv završenog fakulteta kandidata i godina diplomiranja	Univerzitet u Niš, mašinski fakultet
Naziv fakulteta na kome je doktorska disertacija odbranjena	Univerzitet u Niš, Mašinski fakultet u Nišu
Naziv doktorske disertacije	ISTRAŽIVANJE TRIBOLOŠKIH SVOJSTAVA RADIJALNIH KLIZNIH LEŽAJA IZRAĐENIH OD LEGURE BELOG METALA NA BAZI KALAJA - TEGOTENAX V840
datum odbrane	
Naučna oblast disertacije po CERIF šifrniku	Mašinstvo
Imena mentora	dr Dragan Milčić, redovni profesor, predsednik Mašinski fakultet Univerziteta u Niš 1- dr Dragan Milčić, redovni profesor, predsednik Mašinski fakultet Univerziteta u Niš 2- dr Radivoje Mitrović, redovni profesor Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, član 3- dr Dušan Stamenković, redovni profesor Mašinski fakultet Univerziteta u Niš 4-dr Boban Anđelović, redovni profesor Mašinski fakultet Univerziteta u Niš 5- dr Milan Banić, docent Mašinski fakultet Univerziteta u Niš
Komisija za ocenu podobnosti teme disertacije	1- dr Dragan Milčić, redovni profesor, predsednik Mašinski fakultet Univerziteta u Niš 2- dr Radivoje Mitrović, redovni profesor Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, član 3- dr Dušan Stamenković, redovni profesor Mašinski fakultet Univerziteta u Niš 4-dr Boban Anđelović, redovni profesor Mašinski fakultet Univerziteta u Niš 5- dr Milan Banić, docent Mašinski fakultet Univerziteta u Niš
Komisija za odbranu disertacije	1- dr Dragan Milčić, redovni profesor, predsednik Mašinski fakultet Univerziteta u Niš 2- dr Radivoje Mitrović, redovni profesor Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, član 3- dr Dušan Stamenković, redovni profesor Mašinski fakultet Univerziteta u Niš 4-dr Boban Anđelović, redovni profesor Mašinski fakultet Univerziteta u Niš 5- dr Milan Banić, docent Mašinski fakultet Univerziteta u Niš
UDK broj	621.822.6:532.5]:621.89(043.3) 620.178.16(043.3)

Rezime

Klizni ležaji imaju veliku primenu u teškoj mašingradnji, kod mlinova, turbina, drobilica, valjaoničkih i kovačkih mašina, presa, reduktora itd. Relativno kretanje delova uz istovremeno prenošenje opterećenja kod kliznih ležaja ostvaruje se uz prisustvo trenja klizanja. Osnovna prednost kliznih ležaja u odnosu na kotrljajne, ogleda se u njihovoj nosivosti i ako je zadovoljen uslov tečnog trenja, imaju neograničeni radni vek. Kako je tendencija razvoja savremenih mašina u stalnom poboljšanju njihovih performansi, a to je mahom povezano sa povećanjem opterećenja i učestanosti obrtanja rukavca vratila uz istovremeno smanjenje dimenzija i težine, to ovakav trend razvoja ukazuje da u budućnosti treba očekivati sve veću primenu kliznih ležaja. U tom pravcu su i sprovedena istraživanja u ovoj tezi.

Doktorska disertacija obuhvata eksperimentalno istraživanje triboloških svojstava hidrodinamički podmazivanih kliznih ležaja napravljenih od legure belog metal na bazi kalaja – TEGOTENAX V840. Za eksperimentalno istraživanje radijalnih kliznih ležaja hidrodinamički podmazivanih, na Mašinskom fakultetu u Nišu na Katedri za mašinske konstrukcije, razvoj i inženjering, razvijen je ispitni sto.

U okviru disertacije izvršena su obimna eksperimentalna istraživanja promene koeficijenta trenja i temperature ležaja u funkciji vremena u uslovima ispitivanja radijalnog opterećenja ležaja (1000, 2000, 3000 i 4000 N) i učestanosti obrtanja rukavca vratila (1000, 2000, 3000 min⁻¹). Kao rezultat eksperimentalnog istraživanja dati su i gubici snage usled trenja u procesima nestabilnih i stabilnih stanja ispitivanih kliznih ležaja. U okviru disertacije ispitivano je i habanje ležaja u uslovima ispitivanja sa različitim opterećenjima ležaja 1000, 2000, 3000 i 4000N u funkciji puta klizanja (0-905988) m, i sa varijacijom učestanosti obrtanja rukavca vratila od 1000, 2000 i 3000 min⁻¹. Habanje je procenjivano preko gubitka mase materijala posteljice ležaja. Potom je dato upoređenje eksperimentalnih i analitičkih rezultata vrednosti koeficijenta trenja dobijenih primenom Raimondovih i Boidovih dijagrama. Profili hrapavosti površine posteljice ležaja su mereni u 4 definisana položaja nakon svakog seta ispitivanja. Promene parametara površinske hrapavosti Ra i Rz su date u funkciji puta klizanja za definisane položaje merenja. Na kraju disertacije je analizirana mikrostruktura materijala kliznog ležaja pomoću skenirajućim elektronskim mikroskopom (SEM) tipa JEOL-JSM-661OLV.

Da bi se uspostavila matematička zavisnosti eksperimentalnih parametara ispitivanja kliznog ležaja u uslovima hidrodinamičkog podmazivanja (gubitak mase posteljice ležaja kao parametar habanja, površinska hrapavost posteljice ležaja, koeficijent trenja i temperatura zagrevanja ležaja), u funkciji nezavisnih parametara kao što je put klizanja i opterećenja ležaja, korišćena je veštačka neuronska mreža.

Ključne reči: radijalni klizni ležaj, hidrodinamičko podmazivanje, tribološka svojstva kliznog ležaja, koeficijent trenja, habanje, legura belih metala na kaljnoj osnovi - TEGOTENAX V840.

Abstract

Sliding bearings have a great application in heavy machine construction, in mills, turbines, crushers, rolling mills and forging machines, presses, gears, etc. Relative movement of the parts while simultaneously carrying the load on the sliding bearings is achieved in the presence of slip friction. The basic advantage of sliding bearings relative to rollers is reflected in their carrying capacity and if the condition of liquid friction is met, they have an unlimited lifetime. As the tendency of the development of modern machines to continuously improve their performance, and this is largely related to the increase in the load and the frequency of rotation of the shaft of the shaft while at the same time reducing the dimensions and weight, such a trend of development indicates that in the future, the use of sliding bearings should be expected. Studies in this thesis have been carried out in this direction.

The doctoral dissertation includes an experimental study of the tribological properties of hydrodynamically lubricated sliding bearings made of white cast alloy based alloys -TEGOTENAX V840. An experimental table was developed for experimental research of radial sliding bearings hydrodynamically lubricated at the Faculty of Mechanical Engineering in Niš at the Department of Mechanical Structures, Development and Engineering.

In the framework of the dissertation, extensive experimental investigations of the change in the friction coefficient and bearing temperature as a function of time under the conditions of radial load bearing tests (1000, 2000, 3000 and 4000 N) and the frequency of rotation of the shaft sleeve (1000, 2000, 3000 rpm) were carried out. As a result of the experimental research, power losses due to friction in the processes of unstable and stable conditions of the tested sliding bearings were also given. In the framework of the dissertation, the wear of bearings under conditions of testing with different bearing loads 1000, 2000, 3000 and 4000N in the function of the slip road (0-905988) m, and with the variation in the frequency of shaft rotation of the shaft of 1000, 2000 and 3000 rpm were tested. Hatching was estimated through the weight loss of the bed bedding. A comparison of the experimental and analytical results of the friction coefficient values obtained using the Raimond and Boid diagrams is then compared. The roughness of the bearing bed surface is measured in 4 defined positions after each test set. Changes in the surface roughness parameters R_a and R_z are given in the slipping function for the defined measurement positions. At the end of the dissertation, the microstructure of the sliding bearing material was analyzed using a scanning electron microscope (SEM) of the type JEOL-JSM-661OLV.

In order to establish the mathematical dependence of the experimental parameters of the test of the sliding bearing in the conditions of hydrodynamic lubrication (weight loss of the bearing bed as the wear parameter, the surface roughness of the bed bed, the friction coefficient and the temperature of

the bed heating), in the function of independent parameters such as the slipping path and bearing load, an artificial neural network was used.

Key words: radial sliding bearing, hydrodynamic lubrication, tribological properties of the sliding bearing, friction coefficient, wear of the slide bearing bedding from the alloy of white metal on a coarse base - TEGOTENAX V840.

ZAHVALNICA

Izražavam veoma veliku zahvalnost mom mentoru dr Dragan Milčić, redovnom profesoru Mašinskog fakulteta u Nišu, na svesrdnoj i nesebičnoj pomoći koju mi je pružao tokom izrade ove doktorske disertacije.

Takođe, izuzetnu zahvalnost dugujem kolegi doc. dr Milan Banić, na pomoći oko eksperimentalnog dela istraživanja. Hvala i ostalim kolegama sa Katedre za mašinske konstrukcije, razvoj i inženjering na iskazanom razumevanju tokom bavljenja naučnim radom i podstreku da rezultati dobiju zvaničnu formu.

Svim svojim prijateljima dugujem zahvalnost za razumevanje pošto im nisam uvek bio na raspolaganju tokom poslednjih nekoliko godina.

Ogromnu zahvalnost dugujem svojoj majci i deci na stalnoj i bezrezervnoj podršci tokom izrade ove disertacije.

I na kraju, posebno se zahvaljujem svojoj supruzi čija je ljubav, strpljenje, razumevanje i podrška, olakšala završetak doktorske disertacije.

*Amir Al-Samarraie, dipl. inž. maš.
doktorant Mašinskog fakulteta
Univerziteta u Nišu*

U Nišu, decembra 2018. godine

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1 Klizni ležaji	1
1.2 Klizni ležaji – prednosti i mane	2
1.3 Klizni ležaji – klasifikacija	2
1.3.1 Klasifikacija ležaja po tipu opterećenja	3
1.3.2. Trenje pri klizanju čvrstih tela	4
1.3.3 Klasifikacija kliznih ležaja po vrsti podmazivanja	5
1.3.3.1 Hidrostatički podmazani ležaji	5
1.3.3.2. Hidrodinamički podmazivani ležaji	6
1.4. Predmet, značaj i cilj istraživanja	6
2. PREGLED RELEVANTNIH ISTRAŽIVANJA	8
3. TRIBOLOŠKA SVOJSTVA KLIZNIH LEŽAJA	24
3.1. PODMAZIVANJE I OSNOVNE FUNKCIJE MAZIVA	24
3.1.1 Hidrostatičko podmazivanje HSP	27
3.1.2 Hidrodinamičko podmazivanje HDP	27
3.1.3 Elastohidrodinamičko podmazivanje EHDP	28
3.2. Reynoldsova jednačina	28
3.3. Hidrodinamičko podmazivanje radijalnih kliznih ležaja	32
3.4. Materijali kliznih ležaja	34
3.4.1. Opšte napomene	34
3.4.2. Materijali rukavaca	35
3.4.3. Materijali za izradu posteljica	35
3.5. Nosivost radijalnih kliznih ležaja	39
3.6. Maziva	45
3.6.1 Trenje u fluidima	47
3.6.2. Gustina ulja	48
3.7. Petrofova jednačina za trenje ležaja	48
3.8. Habanje	50
3.8.1 Zamorno habanje	52
3.8.2 Abrazivno habanje	53
3.8.3 Adhezivno habanje	54
3.8.4 Tribohemijsko habanje	56
3.8.5 Tehnike merenja habanja	56
3.8.6. Specifični faktor habanja k	56
3.8.7. Intenzitet habanja	57
3.9 Hrapavost metalnih površina	58
3.9.1 Srednje aritmetičko odstupanje profila R_a	58
3.9.2 Srednja visina neravnina R_z	59
3.9.3 Srednje kvadratno odstupanje profila R_q	59
3.9.4. Maksimalna visina neravnina profila R_y	59
3.10 Primena veštačke neuronske mreže u definisanju analitičkih zavisnosti izmernih parametara	60
4. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE TRIBOLOŠKIH PARAMETARA RADIJALNIH HIDRODINAMIČKI PODMAZIVANIH KLIZNIH LEŽAJA	65
4.1 Opis uređaja za ispitivanje	65
4.1.1 Pogonski sistem (DS)	65
4.1.2 Hidraulički sistem za opterećivanja ležaja (HLS)	66
4.1.3 Sistem podmazivanja ispitnog uzorka kliznog ležaja (LS)	67
4.1.4 Sistem za ispitivanje kliznih ležaja	67

4.2 Merni sistem	68
4.2.1 Termopar za merenje radne temperature	68
4.2.2 Senzor sile za merenje radijalnog opterećenja	69
4.3 Metoda određivanja koeficijenata trenja	69
4.4 Kontrola habanja ležaja	70
4.5 Merenje hrapavosti površina rukavca vratila i površina posteljice ležaja	71
4.6 Uticajni parametri prilikom ispitivanja na ispitnom uređaju	71
4.7 Ispitni uzorci korišćeni u eksperimentu	72
4.8 Vratilo korišćeno u eksperimentu	74
4.9 Ulje za podmazivanje	75
4.10 Eksperimentalni plan za ispitivanje kliznih ležaja	75
5. REZULTATI I DISKUSIJA	77
5.1 Frikciono ponašanje	77
5.1.1 Frikciono ponašanje u procesima nestabilnih i stabilnih stanja	82
5.1.2 Gubici snage usled trenja u procesima nestabilnih i stabilnih stanja kod kliznih ležaja	87
5.1.3 Frikciono ponašanje pri promeni radijalnog opterećenja i učestanosti obrtanja	90
5.2 Upoređenje eksperimentalnih i analitičkih rezultata vrednosti koeficijenata trenja dobijenih primenom Raimondovih i Boidovih dijagrama	92
5.3 Promena hrapavosti površina posteljice ležaja	95
5.4 Analiza habanja	100
5.4.1 Rezultati lokalnog gubitka materijala	100
5.4.2 Ukupan gubitak materijala	101
5.4.3 Promena intenziteta habanja	102
5.5 Ispitivanje mikrostrukture posteljice ležaja pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa	105
5.6 Uspostavljanje analitičkih zavisnosti eksperimentalnih parametara ispitivanja kliznog ležaja u uslovima hidrodinamičkog podmazivanja	107
5.6.1 Razvoj modela veštačke neuronske mreže	107
5.6.2 Analitička zavisnost koeficijenta trenja μ u funkciji učestanosti obrtanja n , opterećenja ležaja F_N i vreme klizanja t uz pomoć BP neuronske mreže	109
5.6.3 Analitička zavisnost temperature ležaja T u funkciji učestanosti obrtanja n , opterećenja ležaja F_N i vreme klizanja t uz pomoć BP neuronske mreže	111
5.6.4 Analitička zavisnost ukupnog gubitka mase Δm_t u funkciji opterećenja ležaja F_N , put klizanja s i vreme klizanja t uz pomoć BP neuronske mreže	112
5.6.5 Analitička zavisnost lokalnog gubitka mase Δm_l u funkciji opterećenja ležaja F_N i puta klizanja s uz pomoć BP neuronske mreže	113
5.6.6 Analitička zavisnost promena površinske hrapavosti položaja 1 u funkciji opterećenja ležaja F_N i puta klizanja s uz pomoć BP neuronske mreže	114
5.6.7 Analitička zavisnost promena površinske hrapavosti položaja 2 u funkciji opterećenja ležaja F_N i puta klizanja s uz pomoć BP neuronske mreže	115
5.6.8 Analitička zavisnost promena površinske hrapavosti položaja 3 u funkciji opterećenja ležaja F_N i puta klizanja s uz pomoć BP neuronske mreže	115
5.6.9 Analitička zavisnost promena površinske hrapavosti položaja 4 u funkciji opterećenja ležaja F_N i puta klizanja s uz pomoć BP neuronske mreže	116
5.6.10 Analitička zavisnosti promena ukupne površinske hrapavosti Ra_{total} u funkciji opterećenja ležaja F_N i puta klizanja s uz pomoć BP neuronske mreže	116
5.6.11 Srednje kvadratno odstupanje (MSE) između eksperimentalnih i vrednosti dobijenih ANN mrežom	117
6. ZAKLJUČAK	120
LITERATURA	123

<i>PRILOG A</i>	128
<i>PRILOG B</i>	135
<i>PRILOG C</i>	139
<i>PRILOG D</i>	143

Spisak slika

Broj slika	naslov	Broj strana
1.1	Radijalni (a), aksijalni (b) i (c) radijalno-aksijalni klizni ležaj, gde je 1) osovino, a 2) ležaj	3
1.2	Stanje u kliznom spoju: a) dodir i klizanje poluokvašenih površina, b) hidrodinamicko plivanje	3
1.3	Vrste trenja pri klizanju čvrstih tela	4
1.4	Hidrostatički podmazivani klizni ležaji: a) radijalni; b) aksijalni. (Oznake: K - komora; D - prigušnica; h - debljina uljnog sloja)	5
3.1	Šema mazivog sloja u kontaktnoj zoni	25
3.2	Mehanizmi podmazivanja	26
3.3	Sile pritiska i viskoziteta koje deluju na element maziva. (Samo su x komponentne prikazane)	29
3.4.	Sile pritiska i viskoznosti koje deluju na jedan element maziva. (Samo su x komponente prikazane)	29
3.5	Distribucija brzine u uljanom filmu	30
3.6.	Šematski prikaz položaja rukavca vratila u stanju mirovanja (a) i sa porastom broja obrtaja (b, c, d)	33
3.7.	Raspodela pritiska u uljnom sloju po obimu rukavca	33
3.8.	Posteljice kliznih ležaja: a) dvodelna debelih zidova sa obodima, b) dvodelna tankih zidova, c) prevlake od meke legure, d) samopodesiva posteljica radijalnog ležaja, e) samopodesiva posteljica aksijalnog ležaja	36
3.9	Specifično opterećenje radijalnog kliznog ležaja	40
3.10	Skica radijalnog hidrodinamičkog kliznog ležaja	42
3.11.	Stribekova kriva	45
3.12.	Tok fluida između paralelnih ploča	47
3.13.	Laminarni tok fluida u prostoru zazora kliznog ležaja	49
3.14	Šema kretanja elemenata tribomehanikih sistema	51
3.15	Zavisnost intenziteta habanja od vremena rada frikcionog para	51
3.16	Šema nastanka zamornog habanja	53
3.17	Šema nastanka adhezionog habanja	54
3.18	Određivanje parametra hrapavosti Ra	58
3.19	Određivanje parametra hrapavosti Rz	59
3.20	Određivanje parametra hrapavosti Rq.	59
3.21	Određivanje parametra hrapavosti Ry.	60
3.22	Troslojni ANN model za uspostavljanje odnosa između varijabli	61
4.1.	Probni sto za ispitivanje kliznih ležaja	66
4.2.	Balansiranje vratila ispitnog uređaja sa vratilom motora	66
4.3.	Šema alata razvijenog za testiranje kliznih ležaja konfiguracija	68
4.4.	Prenosnici korišćeni u merenju, a) termopar tip K, b) senzor sile za merenje radijalnog opterećenja ležaja, c) senzor sile za merenje sile reakcije uzrokovane momentum trenja	69
4.5.	Šema merenja sile trenja	70
4.6.	Vaga za merenje mase PRJ 1200-3N proizvođača Kern & Sohn GmbH	70
4.7.	Merenje hrapavosti jedne površine ležaja uz pomoć SURFTEST SJ-301, Mitutoyo	71
4.8.	Mernje hrapavosti jedne površine vratila uz pomoć SURFTEST SJ-301, Mitutoyo	71
4.9.	Dimenzije uzoraka ležaja korišćenih u testu	72
4.10.	Ležajna čaura koja se koristi u eksperimentu	73

4.11.	<i>Oblik i dimenzije vratilo koresne u testiranju</i>	74
4.12.	<i>Izrada vratila a)brušenjem b) provera centričnosti vratila</i>	75
5.1.	<i>Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme sa prosečnim radijalnim opterećenjem od 1000 N i brojem obrtaja 1000 min⁻¹,</i>	77
5.2.	<i>Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radijalnim opterećenjem od 2000 N, brojem obrtaja 1000 min⁻¹,</i>	77
5.3.	<i>Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radijalnim opterećenjem od 3000 N, brojem obrtaja 1000 min⁻¹,</i>	78
5.4.	<i>Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radijalnim opterećenjem od 4000 N, brojem obrtaja 1000 min⁻¹,</i>	78
5.5.	<i>Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radijalnim opterećenjem od 1000 N, brojem obrtaja 2000 min⁻¹, $\mu_{ave}=0.0459$</i>	79
5.6.	<i>Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radijalnim opterećenjem od 2000 N, brojem obrtaja 2000 min⁻¹,</i>	79
5.7.	<i>Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radijalnim opterećenjem od 3000 N, brojem obrtaja 2000 min⁻¹,</i>	80
5.8.	<i>Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radijalnim opterećenjem od 4000 N, brojem obrtaja 2000 min⁻¹,</i>	80
5.9.	<i>Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radijalnim opterećenjem od 1000 N, brojem obrtaja 3000 min⁻¹, $\mu_{aveuku}=0.071$</i>	81
5.10.	<i>Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radijalnim opterećenjem od 2000 N, brojem obrtaja 3000 min⁻¹, $\mu_{aveuku}=0.031$</i>	81
5.11.	<i>Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radijalnim opterećenjem od 3000 N, brojem obrtaja 3000 min⁻¹, $\mu_{ave}=0.0217$</i>	82
5.12.	<i>Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radijalnim opterećenjem od 4000 N, brojem obrtaja 3000 min⁻¹, $\mu_{aveuku}=0.0192$</i>	82
5.13.	<i>Promena temperature ležaja i koeficijenta trenja pri broj obrtaj 1000 min⁻¹ za različita opterećenja u stabilnom stanju</i>	84
5.14.	<i>Promena temperature ležaja i koeficijenta trenja pri broj obrtaj 2000 min⁻¹ za različita opterećenja u stabilnom stanju</i>	85
5.15.	<i>Promena temperature ležaja i koeficijenta trenja pri broj obrtaj 3000 min⁻¹ za različita opterećenja u stabilnom stanju</i>	86
5.16.	<i>Promena koeficijenta trenja za slučaj procesa stabilnog i nestabilnog stanja pri broj obrtaj 1000 min⁻¹</i>	86
5.17.	<i>Promena koeficijenta trenja za slučaj procesa stabilnog i nestabilnog stanja pri broj obrtaj 2000 min⁻¹</i>	87
5.18.	<i>Promena koeficijenta trenja za slučaj procesa stabilnog i nestabilnog stanja pri broj obrtaj 3000 min⁻¹</i>	87
5.19.	<i>Komparativna analiza gubitka snage kod stabilnih i nestabilnih procesa kod ležaja od belog metala pri rotacionoj brzini od 1000 o/min</i>	88
5.20.	<i>Komparativna analiza gubitka snage usled trenja kod stabilnih i nestabilnih procesa pri broj obrtaj 2000 min⁻¹</i>	89
5.21.	<i>Komparativna analiza gubitka snage usled trenja kod stabilnih i nestabilnih procesa pri broj obrtaj 3000 min⁻¹</i>	90
5.22.	<i>Promena prosečnog totalnog koeficijenta trenja u funkciji opterećenja ležaja za različite broj obrtaj</i>	90
5.23.	<i>Promena prosečnog totalnog koeficijenta trenja u funkciji broj obrtaj za različita opterećenja ležaja</i>	91
5.24.	<i>Dijagram za varijablu koeficijenta trenja</i>	93
5.25.	<i>Poređenje promene koeficijenta trenja dobijene eksperimentalno i analitički,</i>	94

	<i>1000 o/min</i>	
5.26.	<i>Poređenje promene koeficijenta trenja dobijene eksperimentalno i analitički, 2000 o/min</i>	94
5.27.	<i>Poređenje promene koeficijenta trenja dobijene eksperimentalno i analitički, 3000 o/min</i>	95
5.28.	<i>Površinska hrapavost vratila (A) i testiranog ležaja (čaura) (B)</i>	96
5.29.	<i>Promena površinske hrapavosti sa kliznom distancom kod unutrašnje površine osovinskog vratila zavisno od položaja 1</i>	97
5.30.	<i>Promena površinske hrapavosti sa kliznom distancom kod unutrašnje površine osovinskog vratila zavisno od položaja 2</i>	97
5.31.	<i>Promena površinske hrapavosti sa kliznom distancom kod unutrašnje površine osovinskog vratila zavisno od položaja 3</i>	97
5.32.	<i>Promena površinske hrapavosti sa kliznom distancom kod unutrašnje površine osovinskog vratila zavisno od položaja 4</i>	89
5.33.	<i>Promena površinske hrapavosti R_z sa kliznom distancom kod unutrašnje čaure zavisno od položaja 1, 2, 3 i 4</i>	99
5.34.	<i>Odnos između lokalnog gubitka težine i put klizanje</i>	101
5.35.	<i>Ukupak gubitak materijala u odnosu na put klizanje</i>	102
5.36.	<i>Promena intenziteta habanja u funkciji put klizanje</i>	102
5.37.	<i>Ukupna prosečna hrapavost kao funkcija klizne distance pod različitim radijalnim opterećenjima</i>	103
5.38.	<i>Cut-off mašine</i>	104
5.39.	<i>Rezanje uzoraka, a) aksijalni, b) poprečni presek</i>	104
5.40.	<i>Tip mašine (Struers LaboPol-250 mm discs) za brušenje i poliranje uzoraka</i>	105
5.41.	<i>SEM tipa JEOL-JSM-661OLV korišćeni mikroskop</i>	105
5.42.	<i>Skenirajuća oblast sloja belog metale na posteljici ležaja i EDX spektar uzoraka legure Tegotenax (V840) u čistom stanju</i>	106
5.43.	<i>Mikrostruktura površine posteljice ležaja sa EDX spektrom za prisustvo α faze</i>	106
5.44.	<i>Mikrostruktura površine posteljice ležaja sa EDX spektrom za prisustvo β faze</i>	107
5.45.	<i>Arhitektura ANN model</i>	118
5.46.	<i>Minimizacija Srednja kvadratna greška (mean squared error MSE) tokom procesa obučavanja ANN</i>	108
5.47.	<i>Predviđanje koeficijenta trenja u funkciji opterećenja ležaja F_N i broj obrtanja uz pomoć BP neuronske mreže</i>	111
5.48.	<i>Predviđanje temperature ležaja T u odnosu na učestanost obrtanja n i klizno vreme t uz pomoć BP neuronske mreže</i>	112
5.49.	<i>Predviđanje ukupnog gubitka mase u funkciji na put klizanje s i opterećenja F_N uz pomoć BP neuronske mreže</i>	113
5.50.	<i>Predviđanje lokalnog gubitka mase u funkciji na put klizanje s i opterećenja F_N uz pomoć BP neuronske mreže</i>	114
5.51.	<i>Predviđanje ukupne hrapavosti u odnosu na kliznu brzinu i radijalno opterećenje F_N uz pomoć BP neuronske mreže</i>	117
5.52.	<i>Vrednosti koeficijenta trenja dobijenih eksperimenom i predviđanjem ANN za radijalno opterećenje 1000 N i broj obrtaja 1000 o/min</i>	119
A1	<i>Cilinder 1</i>	128
A2	<i>Cilindrični oblik donji deo senzor</i>	128
A3	<i>Covor up semering</i>	129
A4	<i>Donji nosači</i>	129
A5	<i>Gornji nosač</i>	130

A6	<i>Nosac zavretnje</i>	130
A7	<i>Raod</i>	131
A8	<i>Semering</i>	132
A9	<i>Semering 2</i>	132
A10	<i>Senzor SLDPRT</i>	133
A11	<i>Sklop</i>	134
B1	<i>šema promene koeficint trenje uz Raimondi and Boyd</i>	136
B2	<i>šema promene koeficint trenje uz Raimondi and Boyd</i>	136
B3	<i>šema promene koeficint trenje uz Raimondi and Boyd</i>	147
B4	<i>šema promene koeficint trenje uz Raimondi and Boyd</i>	148
C1	<i>šema promene koeficint trenje uz Raimondi and Boyd</i>	140
C2	<i>šema promene koeficint trenje uz Raimondi and Boyd</i>	140
C3	<i>šema promene koeficint trenje uz Raimondi and Boyd</i>	141
C4	<i>šema promene koeficint trenje uz Raimondi and Boyd</i>	142
D1	<i>šema promene koeficint trenje uz Raimondi and Boyd</i>	144
D2	<i>šema promene koeficint trenje uz Raimondi and Boyd</i>	145
D3	<i>šema promene koeficint trenje uz Raimondi and Boyd</i>	146
D4	<i>šema promene koeficint trenje uz Raimondi and Boyd</i>	147

Spisak tabela

Broj tabela	naslov	Broj strana
3.1	<i>Poređenje različitih vrsta potpunog podmazivanja</i>	27
3.2	<i>Svojstva metalnih materijala ležaja</i>	38
3.3	<i>Dozvoljene vrednosti debljine uljnog filma h_{\min} u μm</i>	41
3.4	<i>Klasifikacija mehanizama habanja</i>	51
3.5	<i>Priroda oštećenja na kontaktnim površinama</i>	52
4.1	<i>Hemijski sastav čaure AISI440C i materijala posteljice beli metal</i>	73
4.2	<i>Mehanička i fizička svojstva ležaja</i>	73
4.3	<i>Srednje aritmetičko odstupanje mikroprofila Ra za ležaj i vratilo i njihove mase</i>	74
4.4	<i>Karakteristike ulja ISO VG 32 (94) korišćenog u eksperimentima</i>	75
4.5	<i>Definisani parametri za ispitivanje kliznih ležaja</i>	76
5.1	<i>Stabilno i nestabilno stanje temperature i promena koeficijenta trenja sa promenljivim opterećenjima i rotacionom brzinom</i>	83
5.2	<i>Operacioni parametri korišćeni za skup eksperimenata trenja za stabilne i nestabilne procese</i>	88
5.3	<i>Operacioni parametri korišćeni za promenu totalnog prosečnog koeficijenta trenja</i>	92
5.4	<i>Eksperimentalni i analitički rezultati vrednosti koeficijenta trenja</i>	93
5.5	<i>Parametar hrapavosti vratila i ležaja</i>	96
5.6	<i>Upoređivanje statističkih eksperimentalnih rezultata prilikom varijacije hrapavosti Ra i Rz.</i>	99
5.7	<i>Performanse predviđanja razvijenih ANN modela</i>	109
5.8	<i>Simulacija vrednosti matematičkog modela</i>	117
5.9	<i>Srednja kvadratna greška između eksperimentalno dobijenih vrednosti i rezultata dobijenih korišćenjem veštačke neuronske mreže ANN.</i>	118
PB	<i>Upoređivanje eksperimentalnih i analitičkih rezultata pomoću američkih grafikona</i>	135
PC	<i>Upoređivanje eksperimentalnih i analitičkih rezultata pomoću američkih grafikona</i>	139
PD	<i>Upoređivanje eksperimentalnih i analitičkih rezultata pomoću američkih grafikona</i>	143

Spisak pojmova, termina, oznaka

η	[Ns/m ²]	koeficijent dinamičke viskoznosti
μ	[-]	koeficijent trenja
ρ	[Kg/m ³]	gustina ulja
ψ	[μ m]	relativni zazor ležaja
ε	[μ m]	relativna ekscentričnost
δ	[m]	relativna debljina uljnog sloja
ω	[sec ⁻¹]	ugaona brzina
τ	[Pa]	tangencijalni napon
v_i	[°C]	temperatura ulja na izlazu
v_u	[°C]	temperatura ulja na ulazu
v_L	[°C]	radna temperatura ležaja
v_0	[°C]	radna temperatura okoline
c	[μ m]	veličina zazor
f	[μ m]	apsolutni zazor ležaja
e	[μ m]	ekscentrično rastojanje
h_0	[m]	debljina uljnog sloja
h_{0min}	[m]	minimalna debljina uljnog sloja
D	[m]	prečnik ležaja
V_L	[m ³]	zapremina ležaja
V	[m ³]	zapremina habanja
s	[m]	dužine puta klizanja
r	[m]	poloprečnik vratila
K	[-]	koeficijent habanja
d	[m]	prečnik vratila
B	[m]	širina ležaja
H_{soft}	[HV]	tvrdća mekšeg materijala
K_a	[-]	konstanta abrazivnog habanja
w	[g]	izgubljena masa
Q	N / m ²	modul habanja
I_h	[m ²]	intenzitet habanje
F_t	[N]	sila trenja
A	[m ²]	površina kućišta ležaja
F_N	[N]	normalno opterećenje
n	[min ⁻¹]	broj obrtaja rukavca vratila (radna učestanost obrtanja)
n_{gr}	min ⁻¹	granični broj obrtaja
u	[m/s]	linearna brzina tečnosti
M_f	[Nm]	frikcioni moment
F_s	[N]	senzor reakcione sile
p	[N/m ²]	specifično opterećenje ležaja
p_{doz}	[N/m ²]	dozvoljeno specifično opterećenje ležaja
R_a	[μ m]	srednje aritmetičko odstojanje profila od srednje linije
R_q	[μ m]	srednje kvadratno odstupanje profila
R_y	[μ m]	maksimum visine hrapavosti
R_z	[μ m]	srednja visina neravnina
l_{ab}	[m]	krak poluge
t_{av}	[°C]	prosečna temperatura
Q_0	[W]	količina toplote koja ležaj predaje okolini

Q_P	[W]	Količina toplote koja se odvodi prinudnim hlađenjem ležaja
k_c	W/(m ² K)	koeficijent prelaza toplote
S_0	[-]	Somerfeldov broj
C_{gr}	[-]	konstanta
P_G	[W]	gubici usled otpora trenja
v	[m/s]	brzina klizanje
c	J/(m ³ K)	specifična toplota ulja
q	m ³ /s	protok ulja
K_{ql}	[-]	bezdimenzioni koeficijent protoka
C_1, C_2	[-]	konstantne integrala Rejnoldsove jednačine
x	[-]	koordinata u pravcu kretanja
z	[-]	koordinata u aksijalnom pravcu,
y	[-]	koordinata u pravcu radialnu
w_{ij}, v_j	[-]	skupovi težina iz ulaznih do skrivenih neurona i iz skrivenih do izlaznih neurona
b_j, b_k	[-]	- bias skrivenih neurona i izlaznih neurona
f, g	[-]	aktivacione funkcije u skrivenom i izlaznom sloju
V, W		matrice težine između ulaznog i skrivenog sloja i skrivenog i izlaznog sloja
B	[-]	bias matrica skrivenih neurona
\hat{y}	[-]	ANN predviđanje
b_{ok}	[-]	bias izlaznog neurona
X	[-]	vektor ulaznih parametara
p_n	[-]	normalizovani podatak
p_i	[-]	prvobitni (sirovi) podaci
p_{min}	[-]	minimalne vrednosti sirovih podataka
p_{max}	[-]	maksimalne vrednosti sirovih podataka
<i>ANN (Artificial neural network)</i>	[-]	veštačke neuronske mreže
<i>MSE (mean square error)</i>	[-]	srednja kvadratna greška
<i>MAPE (Mean Absolute Percentage Error)</i>	[-]	srednja apsolutna procentualna greška
<i>DOE</i>	[-]	klasično projektovanje eksperimenta
<i>DS (Drive System)</i>	[-]	Pogonski sistem
<i>HLS (Hydraulic Loading System)</i>	[-]	Hidraulički sistem opterećenja
<i>LS (Lubricant System)</i>	[-]	Sistem podmazivanja

(„Kaže se, 'Bog je stvorio čvrsta tela, a pakao od njihove površine'“)

1. Uvod

Konstruisanje kao misaoni i stvaralački proces je u najširem smislu intelektualni poduhvat preduzet za zadovoljavanje određenih potreba na najbolji mogući način. Oslonjeno na otkrića i zakone nauke konstruisanje je tehnička aktivnost usmerena ka razvoju i izradi proizvoda. Narastajuća potreba za razvojem kompleksnih proizvoda visokog kvaliteta proširila je listu zahtevanih svojstava konstrukcije kao parametara ocene proizvoda. Pored konvencionalnih svojstava: funkcija, oblik, dimenzije, materijal, ergonomska svojstva, estetska svojstva, tehnološkičnost i ekonomičnost, sve veća je potreba za dobrim tribološkim i ekološkim svojstvima konstrukcije. Tribološki i ekološki ispravno konstruisanje su novi aspekti procesa konstruisanja ali i značajni parametri kvaliteta novog proizvoda.

Tribološki ispravno konstruisanje je značajan pokazatelj kvaliteta konstruisanja i tehničkog nivoa proizvoda. Osnovne karakteristike ovakve konstrukcije su minimiziranje trenja i habanja do granice mogućeg uz istovremeno povećanje nivoa pouzdanosti i produženja radnog veka. Zahtevi su veoma složeni i često nekompatibilni sa osnovnim pokazateljima kvaliteta konstrukcije, ali su neophodni ukoliko želimo da približimo radni vek, veku funkcionalnog starenja konstrukcije.

U poznatoj knjizi o analizi i podmazivanju ležaja zapisan je i sledeći pasus: "Ležaj treba da apsorbuje što je moguće manje energije, da se što sporije haba tokom rada, da zauzima što manje prostora i da mu je cena što je moguće niža". Navedeni zahtevi napisani još 1949, godine aktuelni su i danas. Najvećim delom ove zahteve zadovoljavaju različite vrste hidrodinamičkih podmazivani kliznih ležaja.

1.1 Klizni ležaji

Ležaji su mašinski elementi čiji je zadatak da omoguće relativno kretanje obrtnih delova uz istovremeno prenošenje opterećenja između njih i obezbeđenje tačnosti njihovog položaja. Prvenstveno se koriste kod pokretnih veza sa kružnim kretanjem, npr. u osloncima vratila i osovina, gde omogućuju okretanje rukavca u odnosu na nepomični oslonac uz istovremeno prenošenje opterećenja.

Kod kotrljajnih ležaja ova pokretljivost se ostvaruje na principu kotrljanja, a kod kliznih na principu klizanja.

Klizni ležaji se primenjuju tamo gde nije moguća upotreba kotrljajnih ležaja. Na mestima koja su nepristupačna za ugradnju kotrljajnih ležaja klizni ležaji mogu biti pogodna rešenja, jer se mogu izraditi kao dvodelni ili ležaji iz više delova. Tipičan primer su rukavci kolenastog vratila motora

kod koga se ugradjuju dvodelni klizni ležaji. Takode, gde kotrljajni ležaj stvara neprihvatljiv nivo vibracija i buke, rešenje se nalazi u primeni kliznih ležaja. Mnogi kotrljajni ležaji nisu pogodni za ekstremno visoke brzine rotacije pa se rešenja pronalaze u primeni specijalnih kliznih ležaja.

1.2 Klizni ležaji – prednosti i mane

Klizni ležaji imaju izvesne prednosti u odnosu na kotrljajne ležaje. A to su:

- Osnovna prednost kliznih ležaja ogleda se u njihovoj nosivosti odnosno radnom veku. Ako se kod kliznog ležaja obezbede uslovi hidrodinamičkog plivanja, onda on ima skoro neograničeni radni vek. Ovo je naročito bitno kod rada sa visokom učestanošću obrtanja, gde kotrljajni ležaji zbog ograničene nosivosti i ograničenog radnog veka ne mogu da se primene. Sa druge strane tendencija razvoja savremenih mašina ogleda se u stalnom poboljšanju njihovih performansi. To je mahom povezano sa uvećanjem opterećenja, brzine i brojeva obrtaja uz istovremeno smanjenje dimenzija i težine. Ovakav trend razvoja ukazuje da u budućnosti treba očekivati veću primenu kliznih ležaja. Na to ukazuju i istraživanja koja se vrše u ovoj oblasti.
- Zbog velike površine klizanja po kojoj se dodiruju rukavac i posteljica ležaja, a koje su razdvojene uljem, klizni ležaji imaju mogućnost prigušenja buke i vibracija, odnosno mogu da prime znatna udarna opterećenja u toku rada.
- Klizni ležaji mogu biti izrađeni kao jednodelni i dvodelni, dok su standardni kotrljajni jednodelni. To im omogućuje primenu u slučajevima gde ležaji zbog montaže moraju da se rade iz dva dela, kao na primer kod kolenastih vratila.
- Razlika u ceni izrade između pojedinačne i serijske proizvodnje je daleko manja kod kliznih nego kod kotrljajnih ležaja. Kotrljajni ležaji su konkurentni sa cenom u odnosu na klizne samo u slučaju serijske i masovne proizvodnje. Za rukavce prečnika ispod 10 mm i iznad 300 mm kotrljajni ležaji izrađuju se samo izuzetno, pa je u tom slučaju daleko racionalnija ugradnja kliznih ležaja.
- Prednost kliznih ležaja u odnosu na kotrljajne očigledna je u pogledu kompaktnosti konstrukcije. Za istu nosivost dimenzije kliznih ležaja su dosta manje u odnosu na kotrljajne. To se naročito odnosi na radijalni pravac, odnosno kod uležištenja vratila koja se nalaze neposredno jedno uz drugo.

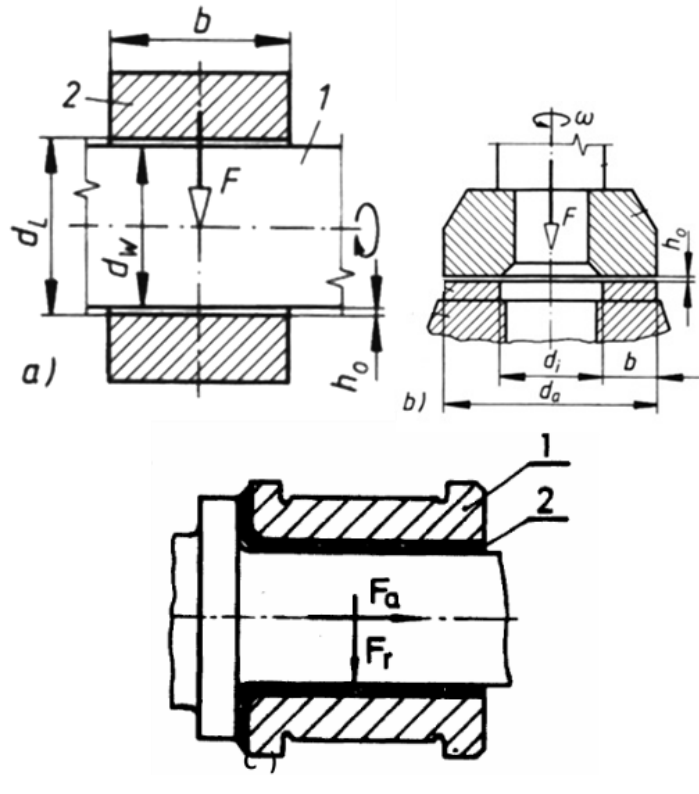
1.3 Klizni ležaji – klasifikacija

Klizni ležaji se klasifikuju na tri načina:

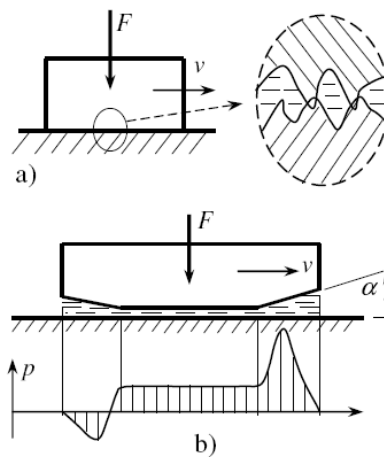
- Po tipu opterećenja koje prenose
- Po tipu podmazivanja
- Po tipu mehanizma podmazivanja

1.3.1 Klasifikacija ležaja po tipu opterećenja

- a. Radijalni ležaji
- b. Aksijalni ležaji
- c. Radijalno-aksijalni ležaji



Sl. 1.1. Radijalni (a), aksijalni (b) i (c) radijalno-aksijalni klizni ležaj, gde je 1) osovino, a 2) ležaj



Sl. 1.2. Stanje u kliznom spoju: a) dodir i klizanje poluokvašenih površina, b) hidrodinamičko plivanje

Klizni spoj čine dve relativno pokretne površine koje su u dodiru ili su na međusobnom bliskom rastojanju slika 1.1. Ako su površine suve i ako se međusobno dodiruju, između njih se ostvaruje

suvo trenje. Ako su površine podmazane i ako je pod opterećenjem ulje istisnuto tako da se površine dodiruju, reč je o klizanju poluokvašenih površina slika 1.2, a. Pri dovoljno velikoj brzini kretanja jedne površine u odnosu na drugu, ulje prodire između površina i razdvaja njihove površine. Formira se uljni film tj. ostvaruje se hidrodinamičko plivanje slika 1.2, b.

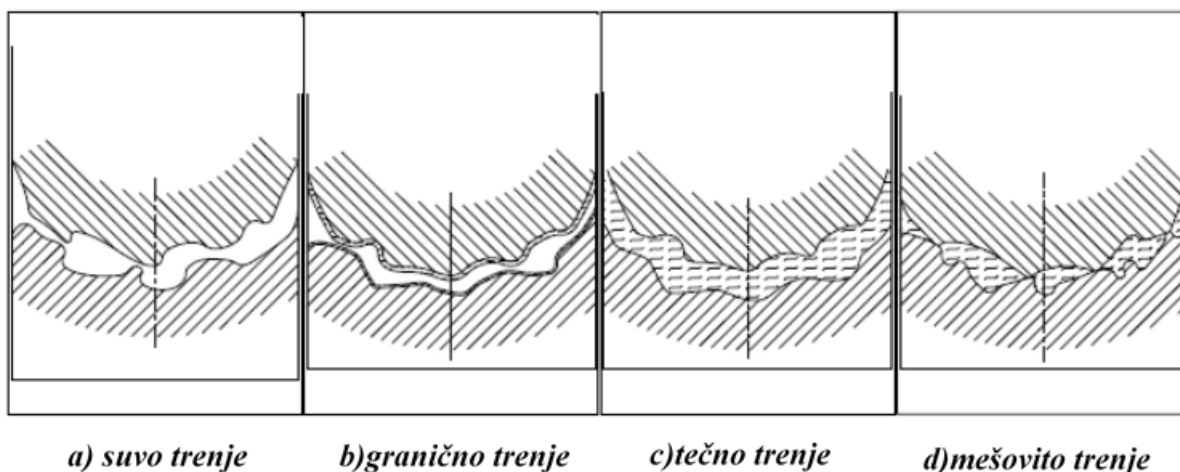
1.3.2. Trenje pri klizanju čvrstih tela

Pod pojmom trenje podrazumeva se kompleks pojava koje nastaju pri relativnom kretanju dodirnih površina dva čvrsta tela, od kojih su najznačajnije: pojava sila ili momenata otpora kretanju; proces pretvaranja jednog dela mehaničke energije tela u toplotu, praćen povećanjem temperature; habanje dodirnih površina, praćeno promenom oblika i dimenzija.

Ako su dodirne površine dva čvrsta tela tehnički čiste, što znači da na njima nema vidljivih tragova bilo kakvih sredstava za podmazivanje ili prljavštine, onda se pri klizanju ovih površina ostvaruje takozvano "**suvo trenje**", slika 1.3, a.

Ako su dodirne površine pokriven tankim, jednomolekularnim ili višemolekularnim, slojem maziva koji se nalazi pod dejstvom molekularnih sila graničnih površina čvrstih tela ("granični sloj" maziva), onda se ostvaruje "**granično trenje**", slika 1.3, b.

Ako su klizne površine potpuno razdvojene slojem maziva tako da je potpuno sprečen neposredni dodir čvrstih tela onda se trenje dešava među česticama maziva i zove se "**tečno trenje**", a sve pojave u takvom sloju podležu zakonima mehanike fluida, slika 1.3, c.



Sl. 1.3. Vrste trenja pri klizanju čvrstih tela

Ako su neki delovi kliznih površina potpuno razdvojeni mazivom, a na nekim delovima (na primer, na vrhovima neravnina) postoji samo granični sloj maziva, onda je to slučaj "**mešovitog trenja**" slika 1.3, d.

Uslovi trenja najnepovoljniji su u slučaju "suvog trenja" i ono se kod kliznih ležaja ne može dozvoliti.

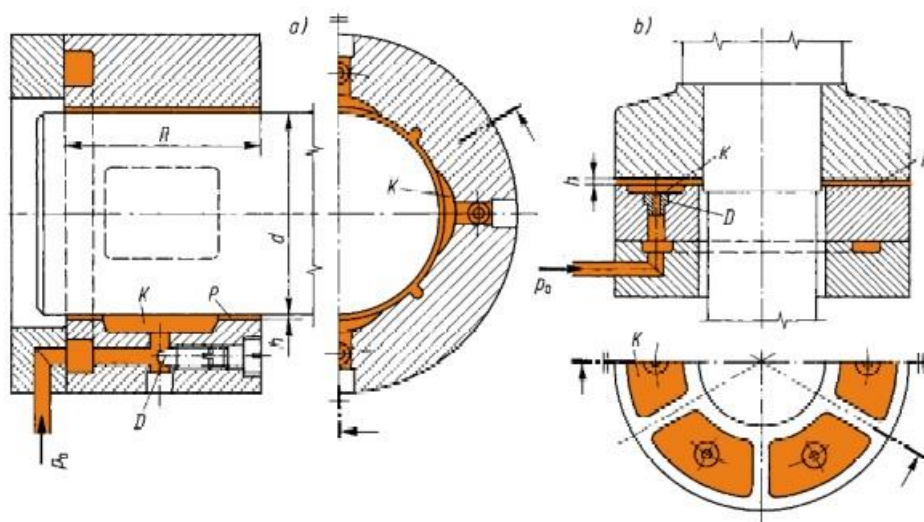
Najpovoljnije je "tečno trenje", ali se ono može ostvariti samo pod određenim uslovima, tako da veliki broj kliznih ležaja radi u uslovima "mešovitog trenja".

1.3.3 Klasifikacija kliznih ležaja po vrsti podmazivanja

S obzirom na mehanizam podmazivanja ležaja se dele na hidrostatički i hidrodinamički podmazivne ležaje.

1.3.3.1 Hidrostatički podmazani ležaji

Podmazivanje kliznih površina kod hidrostatički podmazivanih ležaja vrši se ubacivanjem ulja pod visokim pritiskom direktno između kliznih površina (slika 1.4). Klizne površine se razdvajaju za nekoliko stotih delova milimetra nezavisno od toga dali se one međusobno kreću ili miruju. Pritisak ulja ostvaruje se pomoću pumpe koja se nalazi izvan ležaja, a zatim se odgovarajućim cevima dovodi u sam ležaj. Hidrostatički ležaji mogu da prenesu vrlo velika opterećenja. Regulacija pritiska u pojedinim komorama omogućuje da se utiče na tačnost položaja vratila u toku rada. Kod hidrostatički podmazivanih kliznih ležaja klizne površine su uvek razdvojene slojem ulja nezavisno od režima rada (pokretanje, zaustavljanje, promena smera okretanja, niža učestanost obrtanja, nestacionarni režimi rada). Zbog toga su otpori trenja vrlo mali, a radni vek praktično neograničen. Nosivost ovih ležaja je takođe velika, a imaju i visoku tačnost vođenja.



Sl. 1.4. Hidrostatički podmazivani klizni ležaji: a) radijalni; b) aksijalni.
(Oznake: K - komora; D - prigušnica; h - debljina uljnog sloja)

1.3.3.2. Hidrodinamički podmazivani ležaji

Kod hidrodinamički podmazivanih kliznih ležaja stvaranje nosećeg uljnog sloja moguće je samo ukoliko se klizne površine kreću relativno jedna u odnosu na drugu dovoljno velikom brzinom i

ukoliko su postavljene pod odgovarajućim uglom (položaj klina). Brzina relativnog kretanja kliznih površina (brzina klizanja) jednaka je obimnoj brzini rukavca v .

Ulje koje prijanja na klizne površine biva zahvaćeno od pokretne površine i ubačeno u klinasti zazor. Sa povećanjem brzine klizanja povećava se i pritisak ulja u klinastom zazoru i dostiže svoj maksimum nešto ispred minimalne debljine uljnog sloja h_0 . Zatim se pritisak ulja smanjuje do nule, a ponekad može da se javi čak i podpritisak. Raspored pritiska je isti bez obzira da li su površine ravne ili zakrivljene.

1.4. Predmet, značaj i cilj istraživanja

Klizni ležaji imaju veliku primenu u teškoj mašingradnji, kod mlinova, turbina, drobilica, valjaoničkih i kovačkih mašina, presa, reduktora itd. Relativno kretanje delova uz istovremeno prenošenje opterećenja kod kliznih ležaja ostvaruje se uz prisustvo trenja klizanja. Istraživanja izvršena poslednjih godina dovela su do značajnog usavršavanja kliznih ležaja. Osnovna prednost kliznih ležaja u odnosu na kotrljajne ogleda se u njihovoj nosivosti i radnom veku. Ako se kod kliznog ležaja obezbede uslovi hidrodinamičkog plivanja, onda on ima skoro neograničeni radni vek. Ovo je naročito bitno kod rada sa velikim brojem obrtaja, gde kotrljajni ležaji zbog ograničene nosivosti i ograničenog radnog veka ne mogu da se primene. Sa druge strane tendencija razvoja savremenih mašina ogleda se u stalnom poboljšanju njihovih performansi. To je mahom povezano sa povećanjem opterećenja, brzine i brojeva obrtaja uz istovremeno smanjenje dimenzija i težine. Ovakav trend razvoja ukazuje da u budućnosti treba očekivati još veću primenu kliznih ležaja. Na to ukazuju i istraživanja koja se vrše u ovoj oblasti.

Predmet naučnog istraživanja u okviru ove disertacije je istraživanje tribološkog ponašanja kliznih ležaja izrađenih od legure belog metala na bazi kalaja TEGOTENAX V840 u uslovima hidrodinamičkog podmazivanja.

Cilj ovog rada je “određenje triboloških karakteristika kliznih ležaja sa hidrodinamičkim podmazivanem” kako bi se poboljšao njihov rad na velikim mašinama i to smanjenjem gubitka snage i uticaja na okoline dok bi se, istovremeno, povećala pouzdanost mašina. Preciznije, ovaj rad ima za ciljeve:

- Razvoj ispitnog stola za istraživanje triboloških osobina kliznih ležaja.
- Istraživanje triboloških parametara kliznih ležaja od legure belog metala (TEGOTENAX V840).
- Laboratorijsko ispitivanje kliznih ležaja od legure belog metala (TEGOTENAX V840) u uslovima hidrodinamičkog podmazivanja.

- Istraživanje zavisnosti promene koeficijenta trenja u funkciji opterećenja ležaja u uslovima različitih brzina klizanja.
- Istraživanje zavisnosti veličine habanja u funkciji različitih opterećenja i različitih brzina klizanja.
- Istraživanje zavisnosti promene temperature ležaja u uslovima različitih brzina klizanja i različitih nivoa opterećenja kliznih ležaja od legure belog metala TEGOTENAX V840.
- Ispitivanje promene hrapavosti kontaktne površine ležaja u funkciji opterećenja ležaja i različitih brzina klizanja.
- Eksperimentalni rezultati koeficijenta trenja su se upoređivali sa dijagramima Raimondija i Bojda. Uporedno analiza eksperimentalnih rezultata sa drugim istraživanjima.
- Primena veštačke neuronske mreže ANN, za dobijanje analitičkih zavisnosti koeficijenta trenja, temperature, habanja i hrapavosti ležaja u funkciji radijalnog opterećenja ležaja i kliznog puta zasnovanih na eksperimentalnim podacima.

2. PREGLED RELEVANTNIH ISTRAŽIVANJA

Uporedo sa sve većom praktičnom primenom kliznih ležaja, vršena su eksperimentalna i teorijska istraživanja, posebno, procesa trenja i habanja. Ogroman istraživački napor je usmeren na istraživanje hidrodinamičkih podmazivanih kliznih ležaja tokom druge polovine 20. i početkom 21. veka. Korišćenje računara sa visokim performansama je umnogome poboljšalo simuliranje hidrodinamički podmazivanih kliznih ležaja ali je ostala suštinska potreba za opipljivim eksperimentalnim rezultatima.

Nažalost, za razliku od triboloških ispitivanja, oprema za testiranje ležajeva nije standardizovana ni raznovrsna. Otežavajuća okolnost je sama složenost termičkih i dinamičkih efekata koji se odigravaju u hidrodinamičkim podmazivanim kliznim ležajima tokom rada. To samo ističe potrebu za eksperimentom pod realnim opterećenjem, a to je skupo. Izazovi skopčani sa testiranjem hidrodinamički podmazivanih kliznih ležaja doveli su do toga da se istraživanja izvode u nekoliko istraživačkih centara širom sveta za razliku od široko rasprostranjenih istraživanja kao što je slučaj sa nekim drugim poljima triboloških istraživanja.

Marinković A. et al [1] je izvršio brojna eksperimentalna istraživanja, koja su usmerena na određivanje "pv" karakteristike, temperature i trenja. Eksperimenti sa poroznim metalnim ležajevima pokazuju da vrednosti temperature i koeficijenta trenja postaju stalne nakon pola sata rada u okviru odgovarajućeg opterećenja. Prikazani rezultati pokazuju da sadržaj C (Grafita) u sinterovanoj bronzi kao nosećem materijalu ima veliki uticaj na trenje, habanje i temperaturu u čvrstom mazivu.

Eksperimentalnu opremu je prvobitno konstruisao Parkins W.D. u ranim sedamdesetim godinama dvadesetog veka na Krenfield univerzitetu u Velikoj Britaniji. Ona se dosta koristila uz određene modifikacije u istraživačkim i studentskim istraživačkim projektima pod nadzorom Parkinsa. Godine 1997. je oprema prebačena na Otvoreni univerzitet u Velikoj Britaniji, gde je dalje modifikovana za dalja istraživanja pod nadzorom Martina K.J. Ispitni sto, koji se koristi za određivanje dinamičkih karakteristika ulja kod hidrodinamički podmazivanih kliznih ležaja razvio je Martin K. J et al [2]. Najnovija dostignuća uključuju mogućnost testiranja na većim brzinama koristeći specijalno konstruisani pogonski motor i nove tehnike testiranja i analize. Novi softver i poboljšana konstrukcija se koriste kako bi se omogućilo da se na ispitnom stolu testira u kontinuitetu široki spektar različitih tipova i veličina ležaja.

Hidrodinamički podmazivani klizni ležaji, koji se koriste kod današnjih visokoproduktivnih mašina neophodno je da izdrže velika opterećenja pri velikim brojevima obrtaja. Sve teži uslovi pod kojima funkcionišu hidrodinamički ležajevi dovode do povećanog rasipanja energije u uljnom filmu, kao i povećanja temperature, čime se značajno menjaju radne karakteristike podmazanih

kontakata. Kao rezultat, viskozitet maziva i kapacitet opterećenja su smanjeni dok se elastična deformacija kontaktnih površina povećava. Bouyer J, Fillon M. [3] se bave eksperimentalnim određivanjem performansi kliznog ležaja prečnika 100 mm koji je opterećen obrtnim momentom. Utvrđena su hidrodinamička polja pritiska i temperature u srednjoj ravni ležaja, temperature u dva aksijalna pravca, proticanje ulja i minimalna debljina uljnog filma za različite uslove rada. Ispitivanja su izvedena za učestanošću obrtanja u rasponu od 2000, 3000 i 4000 min⁻¹ sa maksimalnim statičkim opterećenjem od 9000 N i promenom obrtnog momenta od 0 do 70 Nm. Rezultati ove studije dokazali su da karakteristike ležaja u mnogome zavise od neuravnoteženosti. Maksimalni pritisak u srednjoj ravni smanjuje se za 20 % za najveći neuravnoteženi obrtni moment, dok se minimalna debljina uljnog filma smanjuje za 80 %. Neuravnoteženost izaziva značajnije promene karakteristika ležaja pri niskim brojevima obrtaja ili malim opterećenjima. Hidrodinamički efekti su tada relativno mali, a ležaj pruža manji otpor na neuravnoteženost.

Gubitak materijala usled habanja je univerzalna pojava i privukla je pažnju mnogih naučnika, inženjera i tehnologa zbog njegove važnosti. Eman J. et al. [4] su proučavali uticaj kalaja na intenzitet habanja Al legura. Mehanizam habanja je proučavan sa tribometarom (tribometer sa uzorkom na disku) pod različitim uslovima opterećenja (100-2500) gr, pri konstantnoj brzini klizanja i tvrdoćom čeličnog diska 45 HRC. Glavna legura (Al-1Cu) je pripremljena topljenjem i nalivanjem rastopljenog metala u metalnom kalupu. Vezivanje između kalaja i matrice je bolje kada je sadržaj kalaja veći. Al-13% Sn-1% Cu pokazuje veću brzinu habanja u odnosu na ostale legure testirane pod istim uslovima. Kod legura sa visokim učešćem kalaja, područje ispod površine ima plastične deformacije u pravcu klizanja. Brzina habanja legura smanjuje se s povećanjem sadržaja Sn i povećava se sa rastućim opterećenjem.

Ušteda energije, zaštita životne sredine, ekonomski i bezbednosni aspekti u društvu naglašavaju važnost kontrole trenja i habanja u mašinama i uređajima. Podmazivanje uljem je najčešći način za kontrolu trenja i habanja. Međutim, upotreba tečnog maziva često nije poželjna zbog ekoloških razloga, problema sa zadržavanjem u kontaktnoj zoni, starenje, skladištenje, kontaminacije itd. Površinski inženjering sada nudi efikasni način kontrole trenja i habanja, gde se karakteristike kontaktnih površina menjaju površinskom obradom. Prevlaka tankog sloja na površini menja karakteristike površine materijala i može da bude važan alat u kontroli trenja i habanja. Tribohemijski i površinski fizički efekti kao i površinski zamor dešavaju se pre loma materijala se ovde tretiraju kao čisto mehanizmi za modifikaciju površine Holmberg K et al [5]. Efekat skale u tribološkom kontaktu ilustrovan je objašnjavanjem tipičnih površinskom hrapavošću vezanom za tribološke mehanizme za dijamanske i DLC (Diamond-like carbon) prevlake površina.

Tribohemijski i površinski fizički efekti i površinski zamor koji se dešavaju pre preloma materijala se tretiraju kao mehanizmi za modifikaciju površine materijala.

Industrijska primena tvrdih premaza na bazi nitrida na čeliku se kontinuirano povećava. Visoka tvrdoća, faktor niskog trenja, dobra adhezija na čelične podloge kao i dobra termička i hemijska stabilnost čine TiN premaze pogodne za zaštitu od habanja različitih mehaničkih komponenti. Iako su tribološka svojstva TiN premaza široko proučavana, još uvek postoji niz mogućih područja primene gde bi trebalo da se istraži ponašanje TiN premaza u odnosu na habanje. Razumevanje mehanizama habanja koji se javljaju tokom kontakta TiN sa drugim materijalima igra značajnu ulogu u proširenju polja eksploatacije. Kakaš D. et al [6] je proučavao uticaj brzine klizanja na trenje i habanje TiN prevlaka tokom suvog amo-tamo klizanja aluminijumskom kuglicom. Kako bi se utvrdila optimalna brzina klizanja, ispitivane su prevlake različitih hrapavosti. Opseg hrapavosti površina analiziranih u ovom istraživanju daje uvid u retko istraživano područje sa finom završnom obradom. Testovi habanja su sprovedeni sa malim opterećenjima i malim brzinama klizanja kako bi se utvrdilo ponašanje TiN prevlaka pri umerenim opterećenjima. Utvrđene su niske vrednosti koeficijenta trenja u rasponu od 0,13 do 0,24. Kod svih hrapavosti zapažen je trend opadanja koeficijenta trenja i trend povećanja brzine habanja s povećanjem brzine klizanja. Optimum niskog koeficijenta trenja i niske brzine habanja je utvrđen pri srednjoj hrapavosti (Ra) od 20 nm.

Hidrodinamički podmazivani klizni ležaji se široko koriste u mehaničkim sistemima, a često su jedina praktična opcija u slučajevima gde su vratila podložna visokim brzinama i visokim opterećenjima. U takvim uslovima, termički efekti postaju glavni faktor u performansama ležajeva. Generisanje velikih količina toplote viskoznom disipacijom dovodi do značajnog povećanja temperature u uljnom filmu. Ovo dovodi do smanjenja viskoznosti ulja i time smanjenja nosivosti. Ukoliko je potrebno da se poboljša predviđanje karakteristika kao i da se izvrši prevencija otkaza sistema koji radi u uslovima neophodno je da se razumeju i uzmu u obzir termički efekti.

Brito F.P [7] je eksperimentalno uticaj temperature dovedenog ulja i pritiska na radne karakteristike kliznih ležaja od 100 mm sa dva aksijalna žljeba koja su se nalazila na $\pm 90^\circ$ do linije opterećenja. Tokom eksperimenta mereni su hidrodinamički pritisak na srednjoj ravni, temperatura ulja na ležaju i vratilu, obrtni moment, protok ulja i pozicija vratila. Utvrđeno je da postojanje žljebova značajno utiče na temperaturu na ležaju izuzev u slučajevima malih opterećenja odnosno niski pritisaka kada je efekat hlađenja uzvodnog žleba značajan. Utvrđeno je da je temperatura osovine blizu maksimalne temperature ležaja za niska opterećenja, znatno manja od ove vrednosti za velika opterećenja. Srednja temperatura vratila je znatno veća od izlazne temperature samo pri visokim brzinama vratila.

Većina studija o hidrodinamičkim podmazivanim (HD) kliznim ležajima polazi od pretpostavke da su vratila i ležaji kruta tela. Poznato je da se kod ležaja koji su opterećeni velikim opterećenjem, u posebnim slučajevima i/ili kada se koriste ležaji sa prevlakama na kontaktnim površinama, dolazi do izobličenja kontaktnih površina koja su značajna i ne mogu se ignorisati. Elastična deformacija ležaja usled hidrodinamičkog pritiska menja oblik uljnog filma, modifikuje raspodelu pritiska i stoga menja radne karakteristike ležaja. Stoga, radni učinak postaje značajno drugačiji od onih izračunatih u klasičnoj hidrodinamičkoj teoriji gde se pretpostavlja da su ležaji kruta tela. Javorova J. et al [8] su proučavali radne karakteristike kliznih ležaja sa konačnom dužinom, uzimajući u obzir efekte ne-Njutn Rabinovič reološke protoka i elastične deformacije ležaja. Prema Rabinovičevom modelu fluida, konstitutivna jednačina kubičnog napona koristi se za računanje ne-Njutnovog efekta pseudoplastičnih i dilatantnih maziva. Numeričko rešenje modifikovane Reinoldsove jednačine vrši se korišćenjem FDM-a sa tehnikom nad-relaksacije. Rezultati za radne karakteristike stabilnog stanja izračunate su za različite vrednosti nelinearnih faktora i parametara elastičnosti. Zaključeno je da su u poređenju sa njutonskim mazivima dobijene veće vrednosti pritiska uljnog filma i nosivosti za dilatantna maziva, dok je slučaj obrnut za pseudoplastična maziva.

Moderna tendencija ka razvoju mašina većih snaga zahteva bolje mehaničke komponente koje mogu da nose veće opterećenje, a da su istom trenutku gabaritno isti ili manji po veličini. Nosivost aksijalnih klizni ležaj s nagibnim segmentima može značajno da se poveća korišćenjem PTFE kao zamene za beli metal. Evgeny Ket al [9] su fokusirani na radijalne klizni ležaj gde je ispitivao efekte tanke PTFE prevlake na njihove karakteristike stabilnog stanja. Rezultati istrage pokazuju da PTFE sloj smanjuje maksimalni pritisak i povećava nosivost, temperaturu i gubitak snage radijalnog ležaja. Blagi rast radijalnog zazora kod ležaja sa PTFE prevlakama imaju poboljšane radne karakteristike (veća nosivost i manji gubitak energije) u poređenju sa ležajima od belog metala.

Babit legure se široko koriste kao komponente ležaja. Postoje dve vrste Babbit legura, i to na bazi kalaja i na bazi olova. Babbitove legure poseduju mnoga korisna svojstva kao što su dobra kompatibilnost sa čeličnim vratilima ili mogućnost ugradnje stranih čestica. Tribološke karakteristike Babbit legura u suvim i uljem podmazanim uslovima intenzivno se istražuju tokom proteklih decenija.

Međutim, teško je sprovesti istragu o tribološkom ponašanju kada se podmazivanje izvodi vodom, posebno kod podmazivanja morskom vodom. Hairong, W et al [10] su sistematski istraživali tribološko ponašanje Babbit legure 16-16-2, u kontaktu klizanja sa aluminijumskom bronzom ZCuAl9Mn2 podmazanom morskom vodom. Brzina klizanja je povećana sa opterećenjem, ali je smanjena sa brzinom klizanja. Formiranje bazičnog olovo hidroksi bikarbonata

$Pb_3(OH)_2(CO_3)_2$ tokom procesa klizanja odigrala je kritičnu ulogu u preostalom niskom koeficijentu trenja u morskoj vodi.

Babiti su lakotopljive legure sistema Pb–Sb, Sn–Sb, Pb–Sn–Sb, kao i Zn– babiti sa dodacima Cu i Al i Al–babiti sa dodacima Cu, Ni i Sb. Mikrostruktura babita se takođe sastoji od meke osnove – čistog metala ili α čvrstog rastvora i tvrde faze.

Feyzullahoglu E. [11] je istraživao tribološko ponašanje mesinga i dve različita materijala na bazi kalaja u uslovima klizanja podmazanih uljem, legura sa niskim sadržajem Sb (7%) poznata kao SAE 12 koja se široko koristi u automobilskoj industriji i drugai visokim sadržaj Sb (20%) je Sn-Sb-Cu legura i CV619 mesing. Koristeći opremu za ispitivanje ležaja Teckuipment HFN tipa 5, određivane su karakteristike habanja i trenja određene su u odnosu na put klizanja, brzinu klizanja i opterećenje ležaja. Svrha ove studije je istraživanje triboloških svojstava koje nose legure sa različitim sastavom koje se posebno koriste u teškim industrijskim uslovima.

Adalet Zeren [12] je istraživao ležaje na bazi kalaja u uslovima suvog klizanja. Studija je uključivala nizak Sb sadržaj (7%) poznat kao SAE 12 i legure Sn-Sb-Cu leguru koja se široko koristi u automobilskoj industriji. Skeniranje elektronskim mikroskopom (SEM) i energetske disperzne rentgenske spektrografije (EDX) koriste se za razumevanje triboloških događaja, naročito za sposobnost ugrađivanja. Testovi su izvođeni u suvim uslovima klizanja, jer uprkos prisustvu mazivnog filma, pod teškim uslovima rada suvo klizanje može doći s vremena na vreme, što izaziva lokalno habanje.

A.Zeren et al [13] istražio je tribološko ponašanje dva različita materijala za ležaje na bazi kalaja u suvim uslovima, tj. WM-2 i WM-5. Eksperimenti su vršeni u uslovima suvog klizanja, jer uprkos prisustvu mazivnog filma, u teškim radnim uslovima, može se pojaviti povremeno suvo klizanje što dovodi do lokalnog habanja. Zapaženo je da se WM-2 i WM-5 legure mogu koristiti u uslovima suvog klizanja, a da su radne karakteristike WM-5 legure bolje pod teškim radnim uslovima nego WM-2 zbog legirajućih elemenata. Volmen habanja kod WM-5 je niži nego kod WM-2 pod sličnim uslovima tribološkog opterećenja. Prema tome, očekuje se da će životni vek WM-5 biti duži od WM-2.

Koeficijent trenja sa obzirom na put klizanja je manji kod WM-5 legure koja ima veći sadržaj Sb. Povećanje sadržaja Sb sa 7,5% na 20% omogućilo je povećanje tvrdoće WM-5. Na osnovu prethodnih istraživanja [11, 12, 13] napravljeno je poređenje sa eksperimentalnim rezultatima postojećih teza u vezi sa erozijom

Osnovna karakteristika samopodmaznih ležajeva jeste da ne zahtevaju posebno održavanje i podmazivanje tokom rada. Izraz samodmazujući grafit objašnjava se činjenicom da kristali grafita zahtevaju veoma malu tangencijalnu silu za kretanje. Grafit je sposoban da formira orijentisanu

prevlaku na površini metala, koji zamenjuje mazivo. To određuje oblasti primene: na mestima gde su maziva neefikasna, ili na mestima izloženim visokim ili niskim temperaturama, u reaktivnom okruženju, gde se tečnosti za podmazivanje ne mogu koristiti zbog mogućnosti kontaminacije proizvoda ili okoline. Osnovna uloga grafita je da se smanji otpor relativnom kretanju izazvanih trenjem. Kako koeficijent trenja definiše otpornost trenje na kretanje, Bojić N. et al [14] je definisao istraživanje kako bi eksperimentalno odredio koeficijent trenja samopodmazujućih ležaja sa pokrivanjem grafita od 20 i 30%. Eksperimentalno istraživanje je pokazalo da povećanje procenta pokrivanja grafitom smanjuje trenje.

Trenje, habanje i podmazivanje površina u kontaktu su glavni predmeti široke interdisciplinarne nauke tribologije. Zbog jakih nepovratnih i rasipajućih odnosa između komponenti sistema, koeficijent trenja i brzina habanja su karakteristike celog tribosistema a ne unutrašnja svojstva materijala. Oprema za testiranje habanja je konstruisana i proizvedena na univerzitetu od strane Ozsarac U et al [15], kako bi se ispitalo ponašanje habanja konvencionalno korišćenih legura kliznih ležajeva. Testovi habanja ovih ležaja izvršeni su korišćenjem ove nove aparature. Na ovoj opremi testirane su karakteristike habanja tri vrste uzoraka. To su uzorci kalajne bronzne RB-1 i RB-7. Testovi habanja su izvedeni pod opterećenjem od 10, 20 i 40 N sa brzinom klizanja 0,5 m/s korišćenjem uzoraka u obliku prstena. Eksperimenti su sprovedeni na 2 sata. Po završetku testova mereni su gubici mase uzoraka, izračunat je koeficijent trenja, izvršena su optička i SEM ispitivanja, a konačno su određene karakteristike habanja konvencionalno korišćenih legura kliznih ležajeva.

Brockwell K. et al [16] su sproveli obimno testiranje segmentnih kliznih ležaja sa papučama (PIVOTED SHOE JOURNAL - PSJ) sa aspekta konstrukcije i operativnih varijabli. Ove varijable uključuju lokaciju segmenata, orijentaciju opterećenja, učestanost obrtanja vratila i opterećenje ležaja. Studija je izvedena na opremi koja omogućava merenje performanse stabilnog stanja u uslovima lakog do umereno teškog jediničnog opterećenja i relativno visokih radnih brzina. Brockwell K et al u [17] predstavili su izveštaj o istraživanju segmentnih kliznih ležaja (PSJ) koji su podmazivana uljima viskoziteta ISO VG 32 i VG 68.

Da bi se utvrdio efekat opterećenja na habanje usled klizanja belog metala na bazi kalaja JIS WJ2, eksperimenti su izvedeni za različita opterećenja i učestanosti obrtanja. Tachi Y. Et al [18] su utvrdili da postoji konstitutivni zakon u pogledu predviđanja količine pohabanog materijala tokom procesa habanja.

Istraživano je tribološko ponašanje mesinga i dva različita materijala na bazi kalaja za izradu posteljice hidrodinamički podmazivanog kliznog ležaja, koji se široko koriste za uležištenje vratila, sa velikim opterećenjem i velikim učestanostima obrtanja. Na ponašanje u ležištu je uticalo način na

koji se ulje isporučuje do otvora ležaja. Često se vrši isporuka ulja kroz par aksijalnih žljebova. Arab A. [19] je eksperimentalno istražio procenu uticaja ugla između osovine žleba i linije opterećenja na termohidrodinamičko ponašanje dvostrukih žlebova hidrodinamičkih kliznih ležaja. Mereni suprofili temperature interface ulje-čaure, temperatura ulja na izlazu, maksimalna temperatura čaure, ukupn protoka i protoka ulja kroz svaki od žljebova za varijabilni primenjena opterećenja i dovod ulja pritiskom, dok je temperatura hranjenja održavana konstantnim (40°C). Utvrđeno je da je varijacija pravca opterećenja ima jak uticaj na performanse ležaja.

Ahmad M. A et al. [20] ispitivali su uticaj pozicije žljeba za ulje na temperaturu i pritisak kod hidrodinamičkih kliznih ležaja. Uslovi eksperimentalnog testiranja bili su obimni. Rezultati pokazuju da promena pozicija žljeba za ulje imaju uticaj na temperaturu i pritisak do neke mere; temperaturni profil ima tendenciju da se smenjuje kada su žljebovi za ulje nalazi u konvergentnom delu blizu položaja debljine minimalnog uljnog filma. Različite pozicije žljebova za ulje imaju tendenciju da utiču na profil pritiska u podmazivanju ležaja.

Daniel G. B, Cavalca K. L. [21] razvili su termohidrodinamički model. Analiza termičkih efekata ima izrazitog značaja u kontekstu rotordinamike. Eksperimentalni testovi su izvedeni kod kliznih ležaja koji su u građeni u parnoj turbini kako bi se validirao model. Raspodela pritiska u uljnom filmu i raspodela temperature se izračunavaju zajedno. Od raspodele pritiska određuje se polje raspodele brzine kao i viskozna disipacija, a na kraju i raspodela temperature. Metoda konačnih zapremina primenjuje se za rešavanje Reynoldsove jednačine i energetske jednačine u termohidrodinamičkom modelu (THD). Rezultati pokazuju da je temperatura veća sa povećanjem brzine okretanja usled smicanja uljnog filma.

Amit C. et al. [22] sprovedli su termohidrodinamičku studiju analize eliptičnih kliznih ležaja za tri različita komercijalno dostupnih ulja. Metoda konačnih razlika je primenjena za numeričko rešenje Reynoldsove i energetske jednačine. Izvršena je komparativna studija za porast temperature ulja, termalnih pritisaka i nosivosti.

Adatepe H. et al [23] su izveli brojne eksperimente pod različitim statičkim opterećenjima korišćenjem ispitnog stola za testiranje kliznih ležaja. Mikro-žljebovi su napravljeni rezanjem mikrokanala oko i preko površine kliznih ležaja. Rezultati su pokazali da je najveća vrednost koeficijenta trenja, kao i trenje obrtnog momenta, dobijena na transverzalnim mikro-žljebovima kliznih ležajeva.

Monmousseau p. et al [24] su proučavali termičko i mehaničko ponašanje ležaja tokom prelaznog perioda od inicijalnog stabilnog stanja do konačnog stabilnog stanja. U cilju ispitivanja ponašanje kliznih ležaja pod dinamičkom opterećenju, usled gubitka lopatice kod gasnih i parnih turbina, nelinearnom analizom, uključujući i lokalne termičke efekte sa realnim graničnim uslovima

i deformacijama ležaja. Posle poređenja teorijskih rezultata dobijenih sa četiri modela i eksperimentalnih podataka pod uslovima stabilnog stanja, razmatrana je evolucija glavnih karakteristika za tri različita slučaja dinamičkog opterećenja. Prikazani su uticaj tranzitnog perioda na minimalnu debljinu uljnog filma, maksimalni pritisak, maksimalnu temperaturu. Konačno stabilnog stanja se dobija dugo nakon pojavljivanja dinamičkog opterećenja.

Prednosti povezane sa polimernim kompozitima u odnosu na aplikacije ležaja su u poslednje vreme intenzivno proučavane i istraživane. Polimeri kao što je poli-tetra-fluoro-etilen (PTFE) su izazvali značajan interes prilikom selekcije materijala za takve primene. McCarthy D.M.C. et al [25, 26] su imali za cilj određivanje odgovarajućeg materijala za upotrebu u hidrodinamički podmazivanim kliznim ležajima. Ova studija istražuje trenje i habanje nastalo tokom prelaska iz stacionarnog stanja na operativnu brzinu (ubrzanje) tokom startovanja. Ovo je ispitano sa čistim PTFE zajedno sa nizom komercijalno dostupnih kompozita na bazi PTFE-a i babbit materijalom u graničnim/mešovitim uslovima podmazivanja. Ispitivanja su izvedena pomoću standardnog laboratorijskog uređaja za testiranje mineralnog ulja VG32. Dobijeni rezultati pokazuju da korišćenje polimernog kompozitnog materijala ima jasne prednosti u poređenju sa čistim PTFE i babbitom u smislu smanjenog habanja i skoka trenja pri pokretanju.

Korišćenje ekološki prilagođenih maziva u industrijskoj primeni predstavlja glavno interesno područje za podizanje ekološke svesti i potencijal za poboljšanje radnih karakteristika. Klizni i kuglični ležaji su glavne mehaničke komponente u brojnim primenama, uključujući i turbine kod hidroelektrana. Da bi se maksimalno povećala efikasnost ovih uređaja, izbor odgovarajućeg maziva je od suštinskog značaja. Probnica za ispitivanje hidrodinamički podmazivanih kliznih ležaja se koristila za upoređenje karakteristika tri EAL-s (zasićeni estar VG32, bazična tečnost uljane repice i propilen glikol dioleat) u odnosu na tri mineralna turbinska ulja (ISO VG 32, ISO VG 46 i ISO VG 68) u hidrodinamičkom režimu. Dobijeni su rezultati za temperaturu, gubitke snage i minimalne debljine uljnog filma. Razmatran je i uticaj indeksa viskoznosti ulja. Iz dobijenih rezultata jasno je da EAL funkcionišu zadovoljavajuće u poređenju sa mineralnim uljima testiranim u određenom rasporedu ležajeva. Sintetička estarska tečnost pokazuje karakteristike vrlo bliske onima koje su pronađene za mineralno ulje VG 46. Indeks viskoznosti izgleda da igra važnu ulogu, zajedno sa toplotnim kapacitetom u dobijanju debljine uljnog filma. Ovo ukazuje na to da je moguće zameniti maziva u određenim aplikacijama sa tankijim, višim VI fluidima.

Tribološki proces karakteriše obostrana interakcija između frikcionih tela, međusloja i okruženja sistema, koji se odvija u prostoru i vremenu. Opterećenje tela (delova) i reakcija se prenose kroz klizne parove, koje vrše translaciono kretanje, rotaciju ili ljuljanje. Brzine površina pokretnih objekata su različite. Trenje klizanja ocenjuje se koeficijentom trenja po Kolumbsovom modelu

trenja (uzima se kao bezdimenziona promenjiva μ). Merenje koeficijenta trenja vršeno je u kliznom zglobu. Labašova E., Đuriš R. [27] opisali su testiranje rotacionog kliznog para. Njihove tribološke karakteristike merene su eksperimentalnom opremom Tribotestor'89. U radu je analizirana vrednost koeficijenta trenja za čaure od mesinga, aluminijuma i poliamida za izabrano opterećenje (brzina klizanja, opterećenje, trajanje). Najveće smanjenje veličine koeficijenta trenja zabeženo je za čaure od aluminijuma, njegova vrednost je smanjena za 87,5% u toku rada. Smanjenje koeficijenta trenja zabeleženo je oko 82% za čaure od mesinga i oko 72% za čaure od poliamida. Rad ležaja je bio 10 minuta u svim testovima. Labašová E.[28] je ispitivala koeficijent trenja za bronzani materijal (CuZn25Al6) sa umetnutim grafitom i drugim bronzanim materijalom (CuSn12). Spoljna fiksna čaura bila je izložena normalnom opterećenju iste veličine u svim testovima. Proces opterećenja je povećan od 50 N do 600 N tokom rada 300 s, nakon čega je opterećenje održavano na odgovarajućem nivou. Dobijeni rezultati pokazuju da koeficijent trenja raste sa povećanjem brzine klizanja.

Aktivni delovi svih komponenti su u kontaktu sa funkcionalnim delom druge komponente ili mašinski obrađeni materijalom. Oštećenja (otkaza) ovih aktivnih delova (funkcionalnih oblasti) komponenti mašine su jedan od najčešćih uzroka otkaza na mašini. Otkaz dovodi do nemogućnosti komponenti mašine da ispune željenu funkciju. Temperatura se često posmatra kao parametar otkaza. Trenje se dešava na mestu gde su pokretna tela (npr. ležaji) međusobno u kontaktu i ovo trenje prati povećanje temperature materijala. Kada je povećanje temperature veoma veliko, materijal se može oštetiti i time funkcionalna područja mogu oštetiti. Labašová et al [29] se bavi merenjem temperature na kontaktnim površinama rotacionog kliznog para. Upoređivane su vrednosti temperature dobijene termoelementom i termo kamerom tokom eksperimenta.

Mićić M. et al [30] su dali teorijsko razmatranje bitnih svojstava ležaja od belog metala (kalajnog babita). Izvršeno je poređenje pojedinih elemenata važnih za ležaj koji su u vezi sa uticajem dve različite tehnologije izrade ležaja, tj. nalivanje i navarivanje. Data je analiza eksperimentalnih rezultata za dve proizvodne tehnologije, i to: makro i mikrostrukture, tvrdoće, poroznosti, spoja belog metala i čelika, kao i pojava segregacija. Rezultati su prikazani da uzorci dobijeni navarivanjem nemaju ni jednu negativnu karakteristiku bitnu za ležajeve, primena argona kao zaštite u procesu navarivanja mogla bi se smatrati neophodnom bar za jedan do dva poslednja naneta sloja i presudnom za izbegavanje neželjnog uticaja kiseonika zbog obrazovanja jedinjenja SnO_2 , tanak međusloj FeSn_2 omogućava bolje kvašenje i poboljšava spoj čelika i belog metala, a u izvedenim uslovima navarivanja ne pokazuje negativan efekat zbog nastanka krtoeg međusloja u kome se stvaraju zatezni naponi.

Olovne bronze su u širokoj upotrebi kao materijal ili kao premaz čeličnih delova za aplikacije kao ležajeva, vratila i hidraulične pumpe. Olovo deluje kao efikasno čvrsto mazivo u sistemima koji funkcionišu ispod granice, ili suvim uslovima. Iz ekoloških i pravnih razloga se pokušava da se ukloni olovo iz legura koje se koriste kod ležaja. Brojni materijali su već predloženi kao alternativa olovnim legurama, posebno metalnim kompozitima koji sadrže čestice za samopodmazivanje kao što su grafit, MoS₂ ili PTFE. Povećanje otpora u odnosu na habanje alternativnih materijala u odnosu na olovnou bronzu zahteva naučno razumevanje relevantnih mehanizama, a posebno odnos između mikrostrukture materijala i tribološkog ponašanja. Međutim, sadašnje razumevanje mehanizama pomoću kojih olovo poboljšava tribološka svojstva legura je ograničeno. Ekuei S. et al [31] su ispitivali ulogu mikrostrukture i hrapavosti legure na habanje i trenje olovne i bezolovne kalajne bronze. Eksperimenti sa kuglom na disku su izvedeni u suvim uslovima sa čeličnim kuglicama koje klize na bronzanim diskovima. Skeniranje elektronskim mikroskopom (SEM), energetske disperzivne elektronske mikroskopije (EDKS), rentgenske fotoelektronske spektroskopije (KSPS) i Augerove elektronske spektroskopije izvršene su za analizu staza klizanja i oštećenja kuglica. Efekat redukcije habanja olova doveden je u stvaranje oksidovanog olovnog sloja. Istraživanje suvog klizanja olovne bronze CuSn10Pb10 pod opterećenem sa čeličnom kuglicom dovelo je do zaključaka da efekat smanjenja habanja olova je povezan sa formiranjem oksidnog olovnog sloja debljine približno 15 nm koji pokriva habajuće površine zavisi od kombinovanog efekta mikrostrukture i hrapavosti površine.

Tribološke karakteristike zaptivača u suvim uslovima kontakta proučavao je Jones G.A. [32]. Eksperiment je pokazao da u radu dolazi do pucanja kontaktnih filmova. Pucanje kontaktnog filma dovodi do tranzicije sa režima vrlo niskog habanja ka režimu brzog habanja. Analiza rezultata i radnih karakteristika omogućili su da se identifikuju mehanizmi formiranja kontaktnih filmova i funkcionalnost filma u čvrstom kontaktu.

Mesing i posebno bronza u legurama na bazi bakra se široko koriste kao ležaja koji se koristi kod kliznih ležaja. Čisti bakarni materijali se ne koriste kao materijali za klizne ležaje zbog svojih niskih mehaničkih svojstava i tvrdoće. Ovi materijali sa prihvatljivim tribološkim i mehaničkim svojstvima daju zadovoljavajuće rezultate u kliznim ležajima. Bekir. U., Enver A[33] je istraživao tribološka i mehanička svojstva ležaja proizvedenih od bakra na bazi CuSn10 bronzi i CuZn30 mesinga. Ispitivani su efekti legiranih elemenata Cu, Sn i Zn na tribološka i mehanička svojstva kliznih ležaja. Eksperimenti su izvedeni sa 20N opterećenja, učestanošću obrtanja od 1500min⁻¹ u trajanju od 2.5 h pomoću radialnih ležaja. Razultati testiranja pokazuje da vrednosti hrapavosti površina nakon habanja smanjene su kod CuSn10, CuZn30 i čistog Sn, ali se ove vrednosti povećale u slučajevima sa čistim Cu i čistim Zn ležajima. Najveći koeficijenti trenja nastali su u

CuSn10 i čistim Cu ležajima dok su najniži koeficijenti trenja nastali u čistim Sn i čistim Zn ležajima, najviša temperatura ležaja se javila u CuSn10 i CuZn30 ležajima, dok su najniže temperature ležaja nastale u čistim Cu, čistim Sn i čistim Zn ležajima. Najveći gubitak materijala usled habanja nastao je kod CuZn30 i CuZn30 ležaja, dok je najmanji gubitak habanja nastao u čistim Zn, čistim Cu i čistim Sn ležajima.

Podmazivanje je jedno od najstarijih i najkorisnijih tehnologija. Istorijski gledano, njihovo poreklo može se pratiti upotrebom različitih vrsta masti i vode u vreme egipatskih faraona kada su se grade piramide. Nanotehnologija je revolucionarni koncept uveden u 21. veku koji ima potencijal da poboljša karakteristike materijala na mnogim poljima. Mnogi istraživači su objavili da su nano maziva efikasna u smanjenju habanja i trenja. Primenili su različite vrste nanočestica izrađenih od polimernih, metalnih, organskih i neorganskih materijala za izradu nano maziva. Chang-Gun Lee et al [34] su koristili grafitne nanočestice za proizvodnju nano maziva sa poboljšanim tribološkim osobinama i karakteristikama podmazivanja, osnovno sredstvo za podmazivanje bilo je industrijski ulje za menjače, koje ima kinematičku viskoznost od 220 cSt pri 40 °C. Da bi se istražile fizička i tribološka svojstva nano maziva, koeficijenti trenja i temperature su mereni pomoću tribometra disk na disku. Rezultati ukazuju da grafitne nanočestice aditivi poboljšavaju svojstva podmazivanja standardnih maziva.

Gustina snage u različitim mašinama se povećava iz godine u godinu zbog rastućih zahteva za mehaničkom i ekonomskom efikasnošću. Jedna od posledica povećanja gustine snage jeste da kritične komponente prenosa električne energije moraju nositi sve veća opterećenja. Hidrodinamičke klizne ležaje su tipični kritični elementi pri prenosu snage koje nose visoka opterećenja u različitim mašinama. Stoga, vrlo je važno znati prave ili očekivane radne uslove ležišta. Tokom poslednjih decenija napravljene su brojne studije o uslovima rada hidrodinamičkih kliznih ležaja. Merenje pritiska uljnog filma u stvarnim hidrodinamičkim kliznim ležajima u realnim uslovima rada izvršio je Valkonen, A. et al [35]. Kao glavni uređaj za testiranje korišćen je višenamenski uređaj za testiranje ležaja sa hidrauličnim sistemom opterećenja. Podaci o eksperimentalnom pritisku filma ulja upoređeni su sa rezultatima iz simulacija. Rezultati se mogu koristiti u razvoju sigurnijih i efikasnijih mašina.

Tehnologija površinske teksture je novootkrivena tehnika u tribološkoj zajednici i metod koji poboljšava trenje i podmazivanje različitih mehaničkih komponenti. Tekstura na površini, kao što su mikro rupice ili žlebovi, je dobro poznat pristup poboljšanju triboloških performansi kliznih površina. Analiza su izvršili Singh P. i Rana C. P [36] za ispitivanje uticaja teksturnih površina koje bi mogle poboljšati hidrodinamičke radne karakteristike. Ispitivani su parametri kao što su tekstura površine, učestanost obrtanja vratila, i različiti uslovi opterećenja. Primetno je da je povećanjem

opterećenja pri konstantnoj brzini procentualno povećanje maksimalnog pritiska veće kod kliznih ležaja sa teksturom u odnosu na glatke ležaje i da povećanje brzina pri stalnom opterećenju i stalnom pritisku ulja, procentualno povećanje maksimalnog pritiska je više kod kliznih ležaja sa teksturom u odnosu na glatke ležaje.

Hidrodinamički podmazivani klizni ležajevi se često koriste za uležištenje pri velikim brzinama, teško opterećenih vratila. Često se mazivo snabdeva pod propisanim pritiskom i temperaturom kroz jedan ili dva aksijalnih žljebova. Temperatura maziva (T_f) je faktor koji bitno utiče na performanse ovih mašinskih elemenata. Viskozitet maziva, koja snažno zavisi od lokalne temperature, je parameter odgovoran za stvaranje hidrodinamičkog pritiska unutar tečnosti. Francisco P. B. [37] je eksperimentalno istraživao uticaj temperature ispuštanja maziva (T_f) na ponašanje dvosmernih žljebova hidrodinamičkih ležaja. Nekoliko opterećenja, učestanosti obrtanja vratila i geometrije ležaja su testirane pod konstantnim pritiskom maziva (p_f), dok je T_f uzimao četiri različite vrednosti između 29°C i 58°C.

Čak i ako se do sada smatralo da je nemoguće da voda može proizvesti kontinuiran fluidni film koji može da nosi opterećenje između dve klizne površine usled niske viskoznosti, proučavanje podmazivanja vode nije potpuno novo. Adelina B. [38] ispitivao je mogućnost racionalnog korišćenja maziva na bazi vode kako bi se rešili tribološki problem gde je ispitivan uticaj vlaženja površine različitih materijala na trenje i habanje sa trenjem klizanja od 100%, odabrani su sledeći materijali: čelici AISI 1050 i AISI 420, pyrex staklo, teflon (PTFE) i ugljenična vlakna. Svi imaju različite uglove kvašenja površine (θ). Ispitivanja sa ovim materijalima su izvedena pomoću tribomera uzorak na disku (pin-on-disc) sa homogenim i heterogenim sklopovima u suvim uslovima i podmazivanjem sa uljem i vodom.

Prisustvo mikrometarskih tekstura na površini može modifikovati karakteristike trenja te površine. Dugo je poznato da mikrometarske nepravilnosti na površini utiču na nosivost paralelnih kliznih površina, ali tek nedavno su takve teksture napravljene da poboljšaju trenje mehaničkih delova. Teksture su veličine 28-257 μm na površinama nerđajućeg čelika izrađene mikroivenjem. Vodio ih je Ashwin R. et al [39]. Karakteristike trenja ovih površina su testirane u potopljenim uslovima pomoću pomoću tribomera uzorak na disku (pin-on-disc). Numeričke simulacije rešile su Navier-Stokesove jednačine za predviđanje podizanja teksture. Tokom hidrodinamičkog podmazanog klizanja, teksturne površine pokazuju trenje čak 80% niže od površina bez teksture. Dobijeni trendovi u eksperimentima dobro se poklapaju sa simulacijama i ukazuju na pravila oblikovanja prilikom implementacije ove tehnologije.

Polimerni klizni ležajevi (obično termoplasti) ili ležajevi napravljeni od metalno-polimernih jedinjenja se sve više koriste. Za razliku od metalnih kliznih ili kotrljajućih ležajeva, njima je

potrebno malo ili im nije potrebno održavanje. To znači da se ove vrste ležajeva podmazuju samo jednom (početno podmazivanje) ili uopšte ne treba konvencionalno ulje za podmazivanje ili mast (suvo klizanje).

Marx S., Junghans R. [40] su ispitali trenje i habanje kliznih ležajeva napravljenih od termoplastika za visoke temperature kako bi se utvrdila mogućnost primene suvog klizanja. Ispitna aparatura za ispitivanje kliznih ležajeva je konstruisana i napravljena da omogući kontrolu opterećenja, učestanosti obrtanja i temperature, a da se kontinuirano prate temperatura, trenje i habanje. Eliminacija toplote u uređaju gde su ležaji je znatno niža zbog niske toplotne provodljivosti termoplastičnog materijala. Rezultati su da odnos kontaktne površine i preseka toplotne provodnosti metalnog dela sa koim je ležaj u kontaktu je mnogo manji, tj. bolji, za tribometarom (tribometer s uzorkom na disku) nego za sistem uležištenja. Oblast kontakta između pin i diska je ravna i njegova veličina se ne menja tokom testa. Čestice nastale habanjem mogu uticati na dalji proces nošenja na pozitivan ili negativan način dok kod tribometra ove čestice mogu da se sklanjaju.

Većina literature navodi nepovoljne tribološke i ekološke efekte izazvane oštećenjima od habanja. Što se tiče trenja, pokazalo se da čestice habanja povećavaju brazdanje površina koje vode ka višim koeficijentima trenja. Mosleh M. et al [41] pokazuju da čestica habanja ulaze u područje klizanja kod ležaja koji radi u suvim uslovima što dovodi do povećanja normalnog opterećenja. Veće normalno opterećenje zauzvrat rezultira u brzom porastu trenja obrtnog momenta ležaja i može izazvati oštećenja. Model je razvijen kako bi predvideo porast normalnog opterećenja. Eksperimentalni rezultati podržavaju da čestice habanja igraju glavnu ulogu pri suvom trenju geometrijski ograničenih kliznih sistema, naročito nakon što dođe do naglog porasta obrtnog momenta usled trenja. Formiranje čestica nastalih habanjem u kontaktu uzrokuje povećano normalno opterećenje na kontaktnoj tački. Naglo povećanje obrtnog momenta usled trenja kod zatvorenih kliznih sistema pri suvom klizanju uglavnom je rezultat povećanja normalnog opterećenja. Iako se koeficijent trenja može povećati i zbog povećanih brazdi, njegov doprinos većem otpornosti na trenje je mali.

Kontrola trenja u tribološkim sistemima je glavno područje studija koje može poboljšati energetska efikasnost i radni vek mašinskih elemenata. U potrazi za ovim ciljem decenijama su rađene intenzivna istraživanja kompleksnih pojava koje se javljaju u kontaktima koji rade u oblasti elastohidrodinamičkih podmazivanja. Autori Echávarri J. et al [59] su analizirali primenljivost veštačkih neuronskih mreža za predviđanje koeficijenta trenja. Prikazan je razvoj nekoliko različitih veštačkih neuronskih mreža. Neuronske mreže obučene su tribološkim testovima na maloj vučnoj mašini, koja obezbeđuje koeficijent trenja u tačkastom kontaktu. Kada se treniranje mreže završi,

mreže se primenjuju kao alati za predviđanje rezultata u različitim uslovima rada. Njihove prednosti i mane se analiziraju u poređenju sa konvencionalnim simulacionim alatima. Pokazano je da ANN sa jednostavnim dizajnom omogućava brzo prognoziranje rezultata sa odličnom preciznošću. ANN se obučava sa prethodnim eksperimentima koeficijenta trenja i deluje kao "crna kutija", koja daje koeficijent trenja kao izlaz nakon što su isporučeni neki ulazi na uslove rada. Kao rezultat toga, podaci o intermedijarnim proračunima su izgubljeni. Ova informacija može biti od velikog interesa i nije lako merljiva, kao što su raspodela debljine filma, kontakti pritisak i temperatura.

Aluminijumske legure i ostali laki materijali imaju primenu u automobilske industriji, s obzirom na smanjenje potrošnje goriva i zaštitu životne sredine, gde mogu uspešno vratiti delove čelika i livenog gvožđa. Ove legure se široko koriste u zgradama i konstrukcijama, kontejnerima i ambalaži, morskim, vazduhoplovnim, kosmičkim i električnim industrijama zbog njihove male mase, otpornosti na koroziju u većini okruženja ili kombinacije ovih osobina. Kumar T. R. i Rajendran I. [43] su i napravili studiju da bi predvideli gubitak mase novo razvijene legure na bazi aluminijuma. Dve različite legure se pripremaju spajanjem i onda se ispituje trenje klizanja i svojstva habanja ove legure prema hrom čeliku za različita normalna opterećenja (50 N, 60 N i 70 N) u uslovima različitih puteva klizanja. Testovi se sprovode pri konstantnoj brzini klizanja od 1 m/sec i podmazivanja uljem i predgrevanjem cirkulacionog motornog ulja 20w40 na temperaturi od 800°C. Model veštačke neuronske mreže (ANN) razvijen je da predviđa gubitak mase novo razvijene legure na bazi aluminijuma. Uočeno je da su predviđene vrednosti pokazale dobar saglasnost sa eksperimentalnim vrednostima sa koeficijentom korelacije od 0.999973. Ovaj model ANN se može koristiti i za predviđanje gubitka materijala bilo kog materijala.

Laki materijali poput sintaktičkih pena u metalnoj matrici i kompozitne metalne matrice imaju potencijal da se koriste kao zamena komponenata od čelika i livenog gvožđa, posebno kada je matični materijal aluminijum. Ovi kompoziti su povećali otpornost na habanje, poboljšali čvrstoću, imaju nisku gustinu, povećanu otpornost na koroziju i visoku krutost nad osnovnim legurama. Ekka K. K. et al [44] su istraživali habanje nano-kompozita iz aluminijumskih matrica sa nanočesticama (AMNCs), dve različite nano-pojačanja su SiC od Al₂O₃. Procenat ojačanja takođe varira od 0,5 do 1,5 %. Za istraživanje habanja uzimani su u obzir faktori poput normalnog opterećenja, brzine klizanja i puta klizanja. Takođe je korišćena Tagučijeva metoda planiranja eksperimenta za istraživanje za istraživanje i habanje usled klizanja. Takođe, regresija i veštačka neuronska mreža koriste se za razvoj modela koji predviđaju stopu habanja ovih kompozita. Rezultati su pokazali da AMNC-ojačani sa nano SiC česticama pokazuju bolju otpornost na habanje od AMNC-ojačanih sa nano-Al₂O₃.

Za poboljšanje triboloških osobina, istraživači su uglavnom koristili metalne matrice na bazi aluminijuma. Koristeći Tagučijeva metoda planiranja eksperimenta za proučavanje habanja kompozita sa suvim klizanjem izvestili su da na brzinu habanja utiče put klizanja, opterećenje i brzina klizanja. ANN je nelinearna statistička tehnika koja se može koristiti za rešavanje problema koji nisu podobni za konvencionalne statističke metode. Saravanan S. D. i Senthilkumar M [45] su razvili model veštačke neuronske mreže (ANN) kako bi predvideo brzinu habanja i koeficijent trenja za Rice Husk Ash (RHA) ojačani kompozit legure aluminijuma. Kompozit je proizveden korišćenjem trake za mešanje i njihovo tribološko ponašanje je testirano pomoću testera habanja Pin-on-Disc. Eksperimenti su sprovedeni na osnovu Orthogonal array (L27) generisane Tagučijevom tehnikom i njihovi rezultati su korišćeni za treniranje ANN modela. Razvijeni model ANN-a može da predvidi brzinu habanja i koeficijent trenja sa tačnoću od 95%. Uočeno je da su korišćenjem obučenog modela ANN dobijeni izlazni parametri mogu dobiti za bilo koji ulazni parametar. Takođe, vremenski zahtevni i skupi eksperimentalni proces se mogu izbeći.

Početne studije o fluidnom dinamičkom ponašanju kliznih ležaja zasnovane na numeričkom rešenju Reynoldsove jednačine datiraju iz pedesetih godina dvadesetog veka, zahvaljujući radu Raimondi i Boid. Oni su prikazali rezultate u korisnim bezdimenzionalnim grafikama spremnim za korišćenje prilikom konstruisanja, koji su danas prihvaćeni i kod standarda kodiranja. Panthi A. et al [46] se bavio modeliranjem i simulacijom kliznih ležaja kako bi se utvrdio profil pritiska i minimalna debljina uljnog filma korišćenjem metode konačnih elemenata. Pritisak nastao unutar filma tečnosti analiziran je rešavanjem Reynoldsove jednačine, uz pomoć Raimondi i Boid. Grafici omogućavaju određivanje vrednosti minimalne debljine uljnog filma, gubitke snage, zahtev za snabdevanje uljem, dinamičke koeficijente, ekscentričnost i na kraju se izračunava maksimalni pritisak.

Istraživanja u okviru ove doktorske disertacije obuhvataju eksperimentalna ispitivanja tribološkog ponašanja hidrodinamički podmazivanih radijalnih kliznih ležaja napravljenih od legure belog metala na bazi kalaja –TEGOTENAX V840 u uslovima mešovitoj ili tečnoj trenja. Eksperimentalna istraživanja se ostvaruje upotrebom probnog stola za ispitivanje kliznih ležaja razvijene na Katedri za mašinske konstrukcije, razvoj i inženjering Mašinskog fakulteta Univerzitetu u Nišu.

Ispitivano je habanje radijalnog kliznog ležaja pri različitim radijalnim opterećenjem kao i različitim učestanostima obrtanja rukavca vratila. Za podmazivanje ležaja korišćeno je mineralno ulje ISO VG 32.

Na kraju eksperimentalnih ispitivanja je sprovedeno ispitivanje mikrostrukture posteljice ležaja uz pomoć SEM i optičkog mikroskopa za proučavanje dejstva mikrostrukture na tribološko ponašanje legure kalaja u uslovima podmazivanja.

3. TRIBOLOŠKA SVOJSTVA KLIZNIH LEŽAJA

3.1. PODMAZIVANJE I OSNOVNE FUNKCIJE MAZIVA

Podmazivanje je osnovna aktivnost preventivnog održavanja tehničkih sistema i definiše se kao primena određenog sredstva sa ciljem da se smanji sila trenja, a samim tim i habanje i oštećenje kliznih površina (SRPS M.C3. 303). Materijal na kliznim površinama kojim se postižu ti efekti predstavlja mazivo.

Iako su podmazivanje i maziva na ovaj način definisani isključivo s tribološkog aspekta njihova primarna uloga je kompleksnija i različito se ispoljava u širokom spektru tehničkih sistema. Svaka od uloga zahteva specifične karakteristike maziva, odnosno njihovih aditiva.

U raznovrsnim tribomehaničkim sistemima mazivo ima sledeće primarne funkcije:

- smanjenje trenja i habanja,
- hlađenje komponenti sistema i
- zaštita od korozije elemenata sistema.

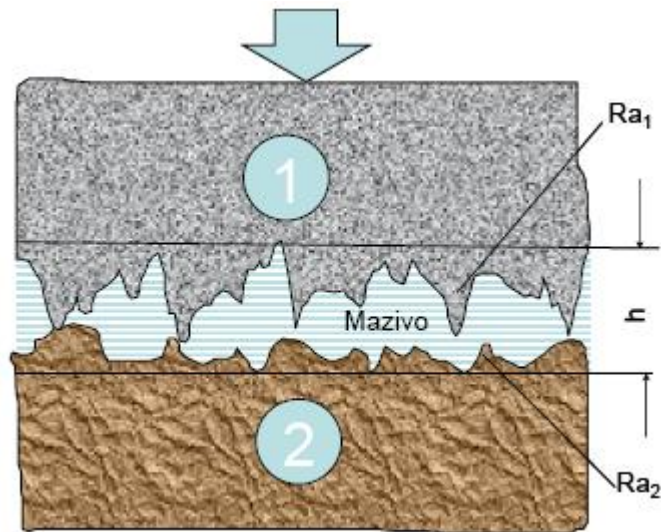
Pored ovih osnovnih, mazivo ima i druge funkcije, kao što su:

- zaštita od prodiranja različitih kontaminenata u zonu kontakta,
- amortizacija udara i vibracija,
- prenos snage i kretanja i
- elektroizolacija.

Da bi efikasno obavljalo svoje funkcije mazivo mora da ispuni sledeće osnovne zadatke:

- ✓ da izdrži spoljašnje kontaktno opterećenje i obezbedi razdvajanje kontaktnih površina, tj. da obavi zadatak podmazivanja u užem smislu,
- ✓ da odvede toplotu koja se generiše trenjem i/ili sagorevanjem,
- ✓ da obezbedi kontrolu procesa korozije i rđe,
- ✓ da sprečava procese stvaranja taloga usled degradacije maziva i obezbedi njihovu disperziju,
- ✓ da spreči pojavu samopaljenja u motorima,
- ✓ da obezbedi uklanjanje nerastvorljivih kontaminenata i
- ✓ da neutrališe bilo kakve korozione produkte koji se mogu stvoriti u procesu funkcionisanja sistema.

Suština podmazivanja sastoji se u razdvajanju kontaktnih površina koje se relativno kreću slojem maziva. Na taj način se smicanje, koje uzrokuje otpor relativnom kretanju, odvija u mazivu ili na granici između maziva i materijala kontaktnih elemenata slika 3.1.



Slika 3.1 Šema mazivog sloja u kontaktnoj zoni

Stepen razdvojenosti kontaktnih površina tribomehaničkih elemenata zavisi od njihove hrapavosti i debljine sloja maziva. S obzirom na stepen razdvajanja, odnosno debljinu sloja maziva, mogu se definisati dve bazne vrste podmazivanja: potpuno i nepotpuno podmazivanje.

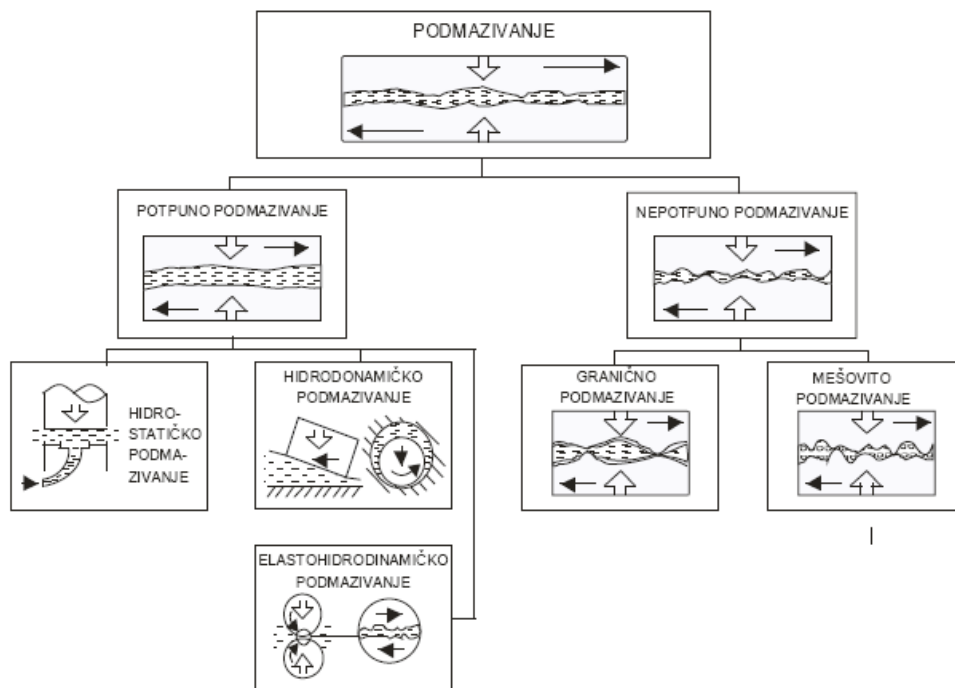
Potpuno podmazivanje se ostvaruje u uslovima postojanja sloja maziva čija je debljina dovoljna za potpuno razdvajanje kontaktnih površina. Za formiranje takvog sloja potrebno je u mazivu (u tečnom ili gasovitom stanju) obezbediti unutrašnji pritisak dovoljan da podnese spoljašnje opterećenje bez razaranja. Ovako podmazivanje praktično se realizuje na različite načine:

- a. Dovođenjem fluida pod pritiskom;
 - Hidrostaticko podmazivanje i
 - Gasno-staticko podmazivanje.
- b. Samogenerisanjem unutrašnjeg pritiska u fluidu:
 - Hidrodinamičko podmazivanje,
 - Elastohidrodinamičko podmazivanje i
 - Gasnodinamičko podmazivanje.

Nepotpuno podmazivanje nastaje u uslovima formiranja sloja maziva čija debljina nije dovoljna da onemogući direktan kontakt površina. Ono se ispoljava u dva vida kao:

- Granično podmazivanje i
- Mešovito podmazivanje.

Izneta klasifikacija mehanizama podmazivanja prikazana je šematski na slici 3.2.



Sl.3.2 Mehanizmi podmazivanja

Pri graničnom podmazivanju uljni film je nedovoljan da onemogući tribološku interakciju mikroneravnina kontaktnih površina. Međutim, adsorbovani veoma tanki sloj maziva (5×10^{-9} do 10^{-8} m) značajno umanjuje pojavu adhezionih veza (mikrozavarenih spojeva) mikroneravnina u procesu relativnog kretanja. S obzirom da je smicajna otpornost maziva znatno manja od smicajnog napona adhezionih veza i da je broj adhezionih veza redukovana, granično podmazivanje odlikuje znatno manji koeficijent trenja i stepen habanja u odnosu na suvo trenje.

Režim mešovitog podmazivanja predstavlja kombinaciju graničnog i hidrodinamičkog podmazivanja i nastaje pri debljini sloja maziva u granicama od 10^{-6} do 10^{-8} m.

Mešovito podmazivanje je prelazni oblik od potpunog ka graničnom podmazivanju. Ono nastaje kada debljina sloja nije dovoljna da potpuno razdvoji frikционе površine, zbog čega se dešava mestimičan dodir njihovih neravnina, slika 3.2.

Pri mešovitom podmazivanju spoljašnje opterećenje se prenosi jednim delom preko sloja maziva, a jednim delom direktno preko dodirnih elemenata frikcionih površina. Samim tim trenje nastaje kao rezultat unutrašnjeg otpora koji se javlja u tečnosti i mehaničkog otpora usled smicanja mikroneravnina u kontaktu.

Hidrostaticko, hidrodinamičko i elastohidrodinamičko podmazivanje u praksi se najviše koriste. U tabeli 3.1 dato je poređenje hidrostatickog, hidrodinamičkog i elastohidrodinamičkog podmazivanja vezano za debljinu sloja maziva i vrednost koeficijenta trenja.

Tabela 3.1. Poređenje različitih vrsta potpunog podmazivanja

Vrste potpunog podmazivanja	Debljina sloja maziva u μm	Koeficijent trenja -
HSP	5 do 10	10^{-6} do 10^{-3}
HDP	1 do 10	10^{-3} do 10^{-2}
EHDP	0.1 do 1.0	10^{-3} do 10^{-2}

3.1.1 Hidrostatičko podmazivanje HSP

Podrazumeva takav vid podmazivanja kod koga se pritisak u sloju maziva neophodan da frikzione površine uvek drži potpuno razdvojene, postiže pomoću nekog spoljašnjeg izvora. To znači da se moć nošenja maziva kod ove vrste podmazivanja realizuje pomoću posebnih uređaja, tzv. hidrostatičkih sistema. Pomoću ovih uređaja se obezbeđuju unapred određene tribološke karakteristike koje dati tribomehanički elementi moraju da imaju u toku svog rada.

Pošto su kontaktne površine pri HSP potpuno razdvojene, ovo podmazivanje se odlikuje malom silom trenja i veoma niskim intenzitetom habanja, čak i u slučaju kada frikcionni elementi počinju relativno kretanje, tj. pri brzini jednakoj nuli.

Za realizaciju HSP neophodan je zaseban sistem podmazivanja pomoću koga se obezbeđuje dovođenje maziva u ležaj i održavanje potrebnog pritiska. To samo po sebi zahteva odgovarajuća tehnička rešenja relativno složene konstrukcije, zbog čega takav način podmazivanja ima visoku cenu.

3.1.2 Hidrodinamičko podmazivanje HDP

Se realizuje pomoću oblika kontaktnih površina i njihovog relativnog kretanja. Spregnute površine moraju da imaju tačno unapred određenu formu tako da se, zahvaljujući njihovom obliku, pri relativnom kretanju generiše pritisak u mazivom sloju. Taj pritisak nastaje samo u slučaju kada se podmazivani elementi relativno kreću, ali kada miruju onda njihove površine imaju direktan, neposredan, kontakt. Minimalan sloj maziva kod ove vrste podmazivanja ima debljinu mnogo veću od zbira maksimalnih neravnina obe frikzione površine, tako da se opterećenje sa jednog na drugi spregnuti element prenosi upravo preko takvog sloja maziva

Otpor kretanju kod HDP se javlja kao posledica unutrašnjeg trenja u sredstvima za podmazivanje. Tribološki procesi su funkcija reoloških svojstava maziva i razmatraju se uz pomoć zakona mehanike fluida, najčešće kao problemi strujanja viskoznog fluida.

Hidrodinamičko podmazivanje se koristi kod mnogih vrsta i različitih konstrukcija kliznih ležaja. Pri tome se za proračun njihovih triboloških i ostalih karakteristika koristi teorija hidrodinamičkog podmazivanja.

3.1.3 Elastohidrodinamičko podmazivanje EHDP

Predstavlja vid potpunog podmazivanja i standardno se definiše kao podmazivanje pri kome su trenje i debljina filma za podmazivanje određeni elastičnim svojstvima materijala elemenata u kontaktu, kao i reološkim svojstvima sredstva za podmazivanje.

Elastohidrodinamičko podmazivanje se koristi u slučajevima kada na spregnutim površinama mašinskih elemenata deluju visoki specifični pritisci. Tipični primeri za takvo stanje jesu tzv. viši kinematički parovi i za uslove koji tada vladaju važe Hercovi zakoni.

Visoki pritisci na kontaktnim površinama izazivaju elastične deformacije površinskih slojeva materijala, što značajno utiče na promenu geometrije dodirnih površina. Osim promene geometrijskih karakteristika, visoki pritisci veoma mnogo utiču i na promenu viskoznosti mazive tečnosti.

Tako složeno stanje pri EHDP znači da su tribološke karakteristike sistema određene elastičnim svojstvima materijala frikcionih elemenata, hidrodinamičkim efektima i reološkim svojstvima maziva, istovremeno.

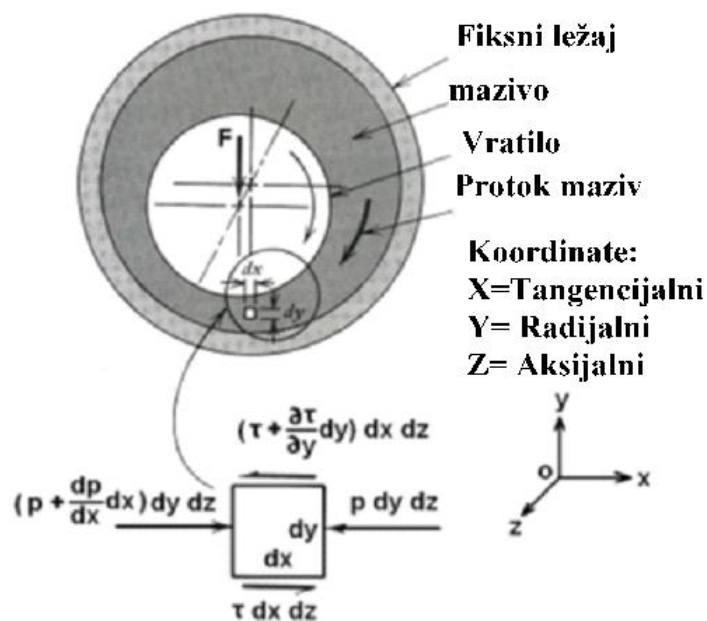
Teza Bošama Tauera o hidrodinamičkom ponašanju kliznih ležaja iz 1880.-tih kao i njegove opservacije privukli su pažnju ozborna Reynoldsa da izvrši teorijsku analizu. To je dovelo do fundamentalne jednačine za hidrodinamičko podmazivanje. Time je postavljena jaka osnova kao i baza za projektovanje hidrodinamičkih podmazivih kliznih ležaja.

U svojoj teorijskoj analizi, Reynolds je izneo sledeće pretpostavke:

- Fluid je njutonovski
- Fluid je nestišljiv
- Viskoznost je konstantna tokom celog sloja
- Pritisak ne varira u aksijalnom pravcu
- Ležaj i osovina se protežu u beskonačno u z pravcu, tj. nema toka maziva u z pravcu
- Pritisak filma je konstantan u y pravcu. Otud pritisak zavisi samo od x koordinate
- Brzina čestice maziva u filmu zavisi samo od koordinanti x and y
- Efekat sile inercije i gravitacije se zanemaruje
- Fluid ima laminaran tok

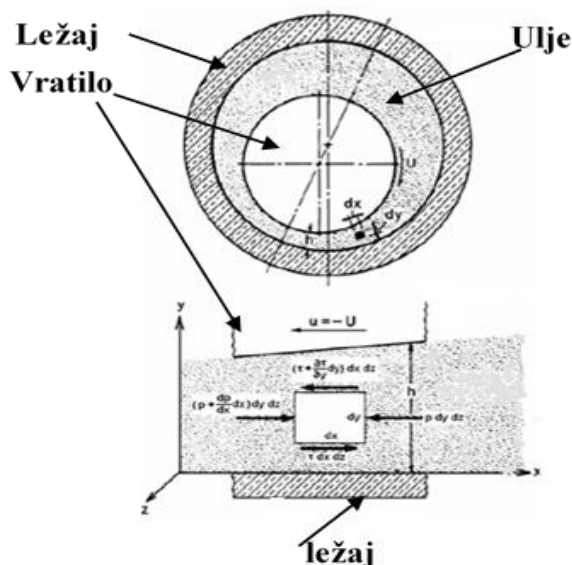
3.2. Reynoldsova jednačina

Kao što je prikazano na slici 3.3, sile koje deluju na fluidni delić visine dy , širine dx , brzine u , i gradijenta brzine od dna do vrha du se uzimaju u obzir.



Sl. 3.3 Sile pritiska i viskoziteta koje deluju na element maziva. (Samo su x komponentne prikazane)

Za ravnotežu sila u x pravcu deluju na fluidni element prikazan je na slici 3.4.



Sl. 3.4 Sile pritiska i viskoznosti koje deluju na jedan element maziva. (Samo su x komponente prikazane)

$$-p dy dz + \tau dx dz + \left(p + \frac{dp}{dx} dx\right) dy dz - \left(\tau + \frac{d\tau}{dy} dy\right) dx dz = 0 \quad (3.1)$$

što se redukuje na

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (3.2)$$

Jednačina za apsolutnu viskoznost je data kao

$$\eta = \frac{F \cdot h}{A \cdot U} \quad (3.3)$$

gde je: η -koeficijent dinamičke viskoznosti (Ns/m²), F - opterećenje (N), h -debljina uljnog sloja (m).
 gde su parcijalni izvodi upotrebljeni pošto brzina u zavisi i od x i od y . Zamenom:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\partial \tau}{\partial y} = \frac{\partial(\eta \frac{\partial u}{\partial y})}{\partial y} = \eta \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3.4)$$

Pregrupisavanjem članova, dobijamo:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx} \quad (3.5)$$

Držanje x kao konstante i integrisanje dva puta s obzirom na y daje:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{dp}{dx} y + C_1 \right) \quad (3.6)$$

$$u = \frac{1}{\eta} \left(\frac{dp}{dx} \frac{y^2}{2} + C_1 y + C_2 \right) \quad (3.7)$$

Gde je: u - linearna brzina tečnosti (m/sec), C_1 , C_2 su konstante integrala Reynoldsove jednačine.

Pretpostavka da nije bilo omaški između maziva i graničnih površina daje granične uslove koji omogućuju da se C_1 i C_2 mogu oceniti: $u=0$ na $y=0$, $u=U$ na $y=h$, stoga:

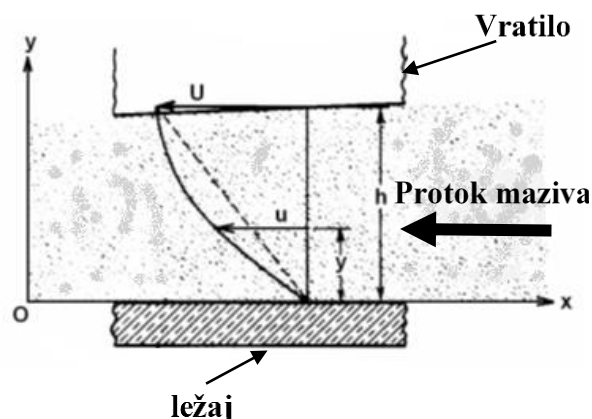
$$C_1 = \frac{\eta \cdot U}{h} - \frac{h}{2} \frac{dp}{dx} (y^2 - h \cdot y) + \frac{U}{h} y, \quad C_2 = 0 \quad (3.8)$$

Zamenom vrednosti C_1 i C_2 u jednačini, dobija se:

$$U = \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \frac{dp}{dx} (y^2 - h \cdot y) + \frac{U}{h} y, \quad (3.9)$$

$$\frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \frac{dp}{dx} \text{ je paraboloni deo, } \frac{U}{h} y \text{ je linearni deo}$$

Distribucija brzine podmazivanja mazivnog sloja na slici 3.5 sastoji se iz dva člana sa desne strane.



Sl. 3.5 Distribucija brzine u uljnom filmu

Na mestu gde je pritisak na maksimumu, a gradijent brzine je linearan $dp/dy=0$.

Neka zapremina maziva po jedinici vremena koja teče preko onog dela koji sadrži element na slici 3.3 bude Q_f . Za jediničnu širinu u z pravcu

$$Q_f = \int_0^h U dy = \int_0^h \left(\frac{1}{2\eta} \cdot \frac{dp}{dx} (y^2 - h \cdot y) + \frac{U}{h} y \right) dy = \frac{Uh}{2} - \frac{h^3}{12\eta} \frac{dp}{dx} \quad (3.10)$$

Za bilo koju nestišljivu tečnost, protok mora biti ista za sve poprečne preseke što znači da diferencijacijom jednačine 3.10 u odnosu na x i jednačenjem sa nulom: mora biti isti za sve preseke, što znači da:

$$\frac{dQ_f}{dx} = \frac{U}{2} \cdot \frac{dh}{dx} - \frac{d}{dx} \left(\frac{h^3}{12\eta} \cdot \frac{dp}{dx} \right) = 0 \xrightarrow{\text{yields}} \frac{U}{2} \cdot \frac{dh}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\frac{h^3}{12\eta} \cdot \frac{dp}{dx} \right) \quad (3.11)$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{h^3}{\eta} \cdot \frac{dp}{dx} \right) = 6 \cdot U \cdot \frac{dh}{dx} \quad (3.12)$$

Ovo je klasična Rejnoldsova jednačina za jednodimenzionalni tok. Ona važi za duge ležaje. Kod kratkih ležaja, tok u pravcu z ili krajnje curenje moraju se uzeti u obzir. Slična situacija daje Rejnoldsovu jednačinu za dvodimenzionalne tokove:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{h^3}{\eta} \cdot \frac{dp}{dx} \right) + \frac{d}{dz} \left(\frac{h^3}{\eta} \cdot \frac{dp}{dz} \right) = 6 \cdot U \cdot \frac{dh}{dx} \quad (3.13)$$

Po pravilu, tri forme graničnih uslova kružnice se koriste za rešavanje Rejnoldsove jednačine Raimondi A.A., Boyd J. Khurmi R. S[61]. U slučaju dugih ležaja, $B/D > 2$, pritisak se ne menja u aksijalnom pravcu (z -osa), tj. nema izlaženje ulja sa strane. Stoga ako zanemarimo termin toka aksijalnog pritiska, vidimo da se jednačina 3.13 svodi na:

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{h^3}{\eta} \cdot \frac{dp}{dz} \right) = 6 \cdot U \cdot \frac{dh}{dx} \quad (3.14)$$

Što je klasična Rejnoldsova jednačina za jednodimenzionalni tok. Ovu jednačinu su rešili Sommerfield i Gumbel.

U slučaju kratkih ležaja ($B/D < 1/4$), celokupna količina ulja koja uđe u ležaj izlazi bočno. Pod tim uslovom tok aksijalnog pritiska u z pravcu dominiraće nad kružnim tokom u x – pravcu. Takođe, 'h' nije obično funkcija od z (samo funkcija od x). Stoga se Rejnoldsova jednačina može napisati:

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{dp}{dz} \right) = 6 \cdot U \frac{dh}{dx} \frac{\eta}{h^3} \quad (3.15)$$

Ovo je poznato kao Ocvirkova jednačina. Ako se granični uslovi uzmu da su

- Kod $z = 0$, $dp/dz=0$ (simetrija oko $z = 0$),
- Kod $z = \pm B/2$, $p = 0$, onda se jednačina (3.15) može izraziti kao,

$$p = 3 \cdot U \cdot \frac{\eta}{h^3} \cdot \left(z^2 - \frac{U^3}{4} \right), \quad (3.16)$$

gde su: p - pritisak sloja (Mpa), U - površinska brzina vratila (m/s), h - promenljiva debljina sloja (m), x - koordinata u pravcu kretanja, z - koordinata u aksijalnom pravcu, η – koeficijent dinamičke

viskoznosti maziva (Pas), B - aksijalna dužina ležaja (m). Za konačnu dužinu ležaja $B/D = 1$ je rešena ovim radom Krsmanović V., Mitrović R [65].

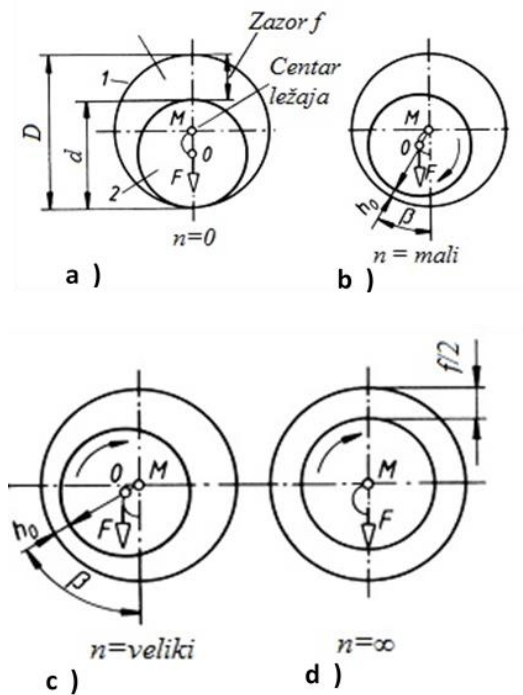
3.3. Hidrodinamičko podmazivanje radijalnih kliznih ležaja

Napred opisani model hidrodinamičkog plivanja biće razmotren na radijalnom kliznom ležaju. Pod dejstvom spoljašnjeg opterećenja - sile F rukavac vratila u stanju mirovanja ($n=0$) dodiruje posteljicu duž zajedničke izvodnice dvaju cilindara slika 3.6,a. S obzirom da zazor u ležaju iznosi $f=D-d$, to se osa rukavca O i osa posteljice C nalaze ekscentrično na rastojanju $e = f/2$. Zazor između rukavca i posteljice ima klinasti oblik, a celokupni prostor ispunjen je uljem.

Kada vratilo počne da se okreće, javljaju se otpori trenja u smeru suprotnom od smera okretanja vratila. U početku je to polutečno trenje, a kasnije prelazi u mešovito trenje. Slično napred opisanom modelu hidrodinamičkog plivanja, rukavac zahvata prijanjajuće ulje i sabija ga u klinasti zazor. Pritisak u sloju ulja se povećava tako da se vratilo podiže i pomera u stranu slika 3.6,b. Sa povećanjem brzine klizanja, odnosno broja obrtaja rukavca, udeo polutečnog trenja se smanjuje, a povećava udeo tečnog trenja. Kada brzina klizanja bude dovoljno velika između rukavca i posteljice stvara se dovoljna debljina uljnog sloja h_0 , tako da mešovito trenje prelazi u tečno trenje slika 3.6,c. Ekscentričnost između rukavca i posteljice se smanjuje i iznosi $e = f/2 - h_0$. Učestanost obrtanja u trenutku prelaza iz mešovitog u tečno trenje naziva se **granični broj obrtaja** n_{gr} , a brzina klizanja - **granična brzina klizanja** v_{gr} .

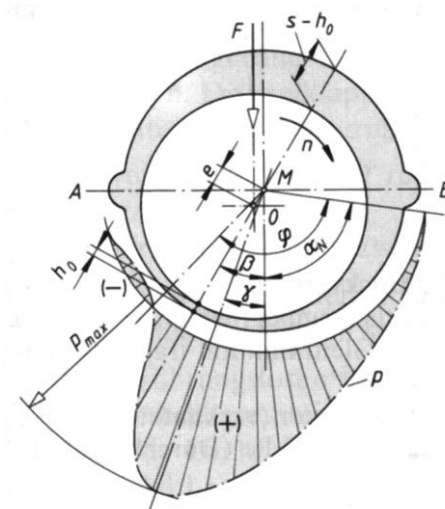
Zbog promene položaja rukavca, menja se i napadna tačka spoljašnje radijalne sile F . Ovoj sili suprotstavlja se rezultujuća sila pritiska ulja na rukavac. Između ovih sila uspostavlja se dinamička ravnoteža, tako da rukavac "pliva" na sloju ulja, odnosno na ovaj način ostvaruje se **hidrodinamičko plivanje** vratila.

Daljim povećanjem brzine klizanja ekscentričnost se smanjuje, tako da kad $v \rightarrow \infty$ ekscentričnost teži nuli $e \rightarrow 0$, slika. 3.6,d.



Sl. 3.6 Šematski prikaz položaja rukavca vratila u stanju mirovanja (a) i sa porastom broja obrtaja (b, c, d)

Na slici 3.7 prikazana je raspodela pritiska u nosećem sloju ulja za radijalni klizni ležaj sa kružno cilindričnim oblikom posteljice, koji je opterećen konstantnom silom F . U samoj posteljici obično su izrađeni i žlebovi za dovod ulja. Pritisak u klinastom sloju ulja javlja se odmah iza žleba E , a zatim se povećava i dostiže svoj maksimum nešto ispred mesta sa minimalnom debljinom uljnog filma h_0 . Iza ove tačke posmatrajući u smeru okretanja vratila pritisak zatim opada, tako da iza mesta sa minimalnom debljinom uljnog filma ima vrednost nula, a ponekad može da se javi i podpritisak ulja. Ukupno područje nosećeg uljnog filma nalazi se na obimu obuhvaćenom uglom φ . Ukoliko je ovo područje veće, veća je i nosivost ležaja.



Sl. 3.7 Raspodela pritiska u uljnom sloju po obimu rukavca

Kanali za dovod ulja **ne smeju** biti postavljeni u zoni gde se ostvaruje noseći uljni sloj, jer bi to narušilo stvaranje pritiska u uljnom sloju.

U principu važi da je hidrodinamičko plivanje lakše ostvariti ukoliko su manji opterećenje F i zazor f , i ukoliko su veći radna broj obrtaj n i viskoznost ulja η .

Raspodela pritiska po dužini ležaja zbog bočnog isticanja ulja je takav da najveći pritisak vlada na sredini ležaja, dok prema ivicama opada do nule. Napred prikazanu raspodelu imaju samo klizni ležaji odgovarajuće tačnosti izrade i kod kojih je postignuta zadovoljavajuća paralelnost osa rukavca i posteljice.

3.4. Materijali kliznih ležaja

3.4.1. Opšte napomene

Klizni ležaj čini jedan tribološki sistem, čiji su osnovni elementi materijal rukavca, materijal posteljice i sredstvo za podmazivanje. Hidrodinamički podmazivani ležaji rade u prelaznim periodima sa mešovitim trenjem, dok ležaji podmazivani mašću uvek rade sa mešovitim trenjem. Izbor materijala kliznog ležaja i maziva ima odlučujuću ulogu za uspešno funkcionisanje ležaja. Pravilnim izborom materijala rukavca i posteljice moguće je smanjiti otpore klizanju i zadovoljiti zahteve u pogledu statičke čvrstoće i dinamičke izdržljivosti. U tom smislu od značaja je poznavanje sledećih antifrikcionih i ostalih merodavnih svojstava ležišnih materijala:

- otpornost na habanje;
- koeficijent trenja;
- posobnost brze razrade, odnosno međusobno prilagođavanje kliznih površina (prilagodljivost pri uhodavanju);
- kompatibilnost sa mazivom, odnosno sposobnost stvaranja nosećeg sloja maziva;
- sposobnost apsorbovanja stranih čestica (Strane čestice, koje prodiru u ležaj neposredno ili preko maziva, mogu da oštete ležaj. Njihov uticaj je međutim slabiji kada je posteljica mekša, pa mogu biti utisnute u nju.);
- otpornost prema koroziji;
- čvrstoća i izdržljivost;
- koeficijent provođenja toplote;
- koeficijent linearnog širenja na toploti;
- otpornost protiv zaribavanja;
- ponašanje u kritičnim periodima rada (Iz bilo kog razloga može doći do nedovoljnog podmazivanja praćeno povećanjem otpora trenja i habanjem. Od bitnog značaja je da ležaj podnese takve uslove rada u kraćem vremenskom periodu bez oštećenja i razaranja).

Kod ležaja koji rade uvek sa tečnim trenjem antifrikciona svojstva površinskih slojeva rukavca i posteljice su od sekundarnog značaja. Tada materijali kliznog para moraju imati dovoljnu čvrstoću i izdržljivost da prime pritisak nosećeg uljnog sloja i dovoljnu otpornost na kavitaciono razaranje. U tom smislu, telo posteljice se izrađuje od materijala dovoljne čvrstoće, a zatim se presvlači slojem antifrikcionog materijala.

Nema realnog materijala koji može da zadovolji sve napred navedene zahteve istovremeno. Zbog toga se zavisno od radnih uslova bira odgovarajuća kombinacija materijala rukavca i posteljice.

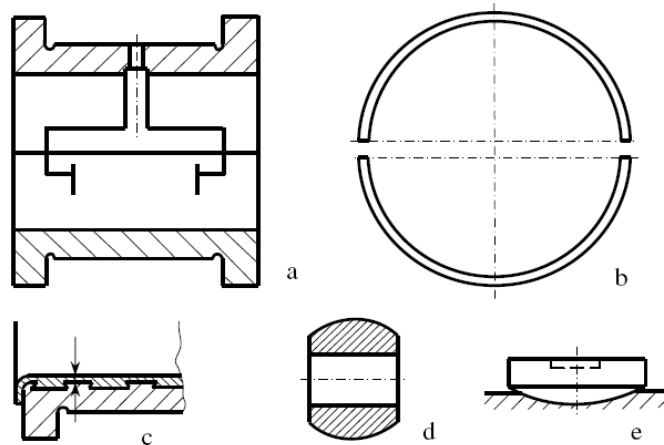
3.4.2. Materijali rukavaca

Otpor klizanju je manji, ukoliko je veća razlika tvrdoće spregnutih kliznih površina. Opšta je preporuka da površina rukavca bude sa 3...5 puta većom tvrdoćom od tvrdoće površine posteljice. Rukavci odnosno vratila se najčešće izrađuju od čelika. Moraju biti visokog kvaliteta površinske hrapavosti i dovoljne tvrdoće koja se kreće do 64 HRC (810 HV). Kod vratila koja su izrađena od ugljeničnih čelika, pogodno je da klizne površine rukavaca budu termički ili termohemijski otvrdnute. U tom smislu primenjuje se cementacija i nitriranje, a dobre rezultate daje i plameno i indukciono kaljenje. Od legiranih čelika treba izbegavati čelike legirane niklom, jer je nikl sklon ka zaribavanju. Bolje rezultate pokazuju čelici legirani hromom. Po pravilu klizne površine rukavaca se bruse i glačaju. Poželjno je da klizne površine budu hromirane zbog slabo izražene sklonosti hroma u odnosu na zaribavanje. Galvanski nanešene presvlake hroma (do 0,3 mm) moraju kasnije biti brušene i polirane. Pogodno je da debljina hromom bude do 20 μ m.

3.4.3. Materijali za izradu posteljica

Za izradu posteljica koriste se nečelični materijali i to sivi liv, legure obojenih metala, sinterovani materijali i nemetali.

Posteljice mogu biti izrađene iz jednog dela, od materijala zadovoljavajuće čvrstoće i izdržljivosti i sa dobrim antifrikcionim karakteristikama. Pretežno se koriste sivi liv, CuSn i CuSnZn legure. Ove posteljice su debelo zidne i izrađuju se od vučenih cevi ili šipki, a zatim presuju u telo ležaja, slika 3.8.



Sl. 3.8 Posteljice kliznih ležaja: a) dvodelna debelih zidova sa obodima, b) dvodelna tankih zidova, c) prevlake od meke legure, d) samopodesiva posteljica radijalnog ležaja, e) samopodesiva posteljica aksijalnog ležaja

Klizne površine se presvlače tankim slojem legure sa dobrim antifrikcionim svojstavima. Kod jako odgovornih kliznih ležaja mogu na klizne površine posteljice biti nanešena 3 pa i više sloja različitih antifrikcionih svojstava.

Za izradu posteljice koriste se sledeći materijali:

a) Sivi liv, koji se primenjuje sa i bez na kliznim površinama. Bez primenjuje se za manje brzine klizanja $v=0,1...0,3m/s$. Zbog velike tvrdoće kliznih površina osetljiv je na prodor stranih tela, a nije pogodan za udarna opterećenja. Rukavci moraju biti kaljeni ili cementirani, i brušeni. Za slabija opterećenja koriste se *SL 150* i *SL 200*, a za jača opterećenja *SL 250* i *SL 300*.

b) Sinterovani materijali (metalokeramički materijali), omogućili su razvoj samopodmazujućih kliznih ležaja, koja imaju jako veliku primenu na mestima gde podmazivanje nije moguće ili je jako skupo. Ležišne čaure izrađuju se presovanjem praha od mešavine *Fe*, *Cu*, *Sn*, *Zn* i *Pb* sa i bez dodatka grafita. Ovako presovani deo se zatim zagreva na $750...1000\text{ }^{\circ}C$ pri čemu se zrna međusobno lepe odnosno spajaju sinterovanjem. Čaura postaje vrlo čvrsta i prelazi u poroznu, sunderastu masu. Poroznost se kreće i do 35%. Potapanjem u ulje, pore se pune i ulje ostaje u samoj posteljici. U toku rada usled zagrevanja ulje dolazi u ležaj i podmazuje ga. Po prestanku rada, usled kapilarnog delovanja, ulje se ponovo vraća nazad i popunjava pore. Posteljice od sinterovanih materijala lako podnose kritične uslove rada, imaju manju čvrstoću od metalnih posteljica i osetljive su na udarna opterećenja. Primenuju se za manje brzine klizanja ($v < 1\text{ }m/s$), na primer kod mehanizama sa oscilatornim kretanjem.

c) Legure kalaja. Kalaj se legira sa olovom, bakrom i antimonom. Ranije je ova legura bila poznata pod nazivom "beli metal". Ima izvanredne antifrikciona svojstva. Dosta je mek pa se koristi samo kao presvlaka posteljice izrađene od bronzne ili čelika. Legure kalaja odlikuju se dobrom prilagodljivošću pri uhodavanju, sposobnošću apsorpcije stranih tela i dobrom

otpornošću na habanje. Primenuju se za brzine klizanja do 60 *m/s* i radne temperature do 110 °C. Nanose se u tankim slojevima debljine 0.1...3mm. Zbog visoke cene kalaja, ova legura je dosta skupa.

d) Legure cinka. Najvažniji legirajući elementi osim cinka su aluminijum i bakar. Cink ima nizak koeficijent trenja, ali su mu ostale antifrikcione karakteristike skromne, pa se koristi u manjoj meri. Cink, a i njegove legure nisu skupi.

e) Legure olova. Olovo se legira sa bakrom, kalajem i cinkom. Zbog svoje plastičnosti, lako podnosi netačnosti pri izradi ležaja. Dobro podnosi prelazne periode u toku rada, ali ima slabu otpornost na habanje. Primenuje se kod kliznih ležaja vagonskih osovin.

f) Legure bakra. Najviše se koriste bronzes koje sadrže preko 50% bakra, ostatak su drugi legirajući elementi. Dodavanjem mekih metala, kao što su olovo, kalaj, cink, aluminijum, poboljšavaju se antifrikciona svojstva. Primenuju se za jaka i udarna opterećenja. Zbog relativno visoke tvrdoće ovih legura, rukavci vratila moraju biti termički obrađeni i brušeni. Zahteva se i visoka tačnost u pogledu paralelnosti osa posteljice i rukavca. Legure bakra imaju slabu moć apsorpcije stranih tela, što zahteva dobru zaštitu od prodora spoljne nečistoće i dobro podmazivanje. Dobro provode toplotu, čime se obezbeđuje odgovarajuća termička stabilnost ležaja.

Najveću primenu za izradu posteljica imaju sledeće bakarne legure:

- **Kalajna bronza** koja sadrži 5...14% kalaja. Poseduje odlična antifrikciona svojstva. Dodavanjem fosfora (kalajno-fosforna bronza) povećava se prionljivost ulja, što omogućuje ovim posteljicama znatnu nosivost i pri mešovitom trenju i rad pri povišenim radnim temperaturama.
- **Olovna bronza** koja sadrži 10...20% olova. To je meka legura, koja je u velikoj meri neosetljiva na visoke pritiske na ivicama posteljice, koji su posledica netačnosti pri izradi ili savijanja vratila odnosno rukavca. Nema dobru otpornost na habanje, dobro podnosi kritične uslove rada i primenuje se za manje brzine klizanja. Kod posteljica od olovne bronzes nije neophodna termička obrada rukavca.
- **Kalajno-olovna bronza** sadrži 5...14% kalaja i 3...25% olova. Olovo poboljšava radnu sposobnost u kritičnim uslovima rada kao i prilagodljivost pri uhodavanju, ali i smanjuje otpornost na habanje.
- **Aluminijumska bronza** sadrži do 10% aluminijuma i u manjim količinama nikl, mangan, gvožđe i druge elemente. Ima odličnu otpornost na habanje i otpornost prema koroziji, kao i dobru čvrstoću, pa se primenuje kod naizmerno promenljivih opterećenja.

- **Crveni liv** je legura bakra kalaja i cinka. Ima nižu cenu od kalajnih legura, ali i nešto slabija antifrikciona svojstva. Sa 10% kalaja, 4% cinka i 1% olova, crveni liv uspešno zamenjuje skupe legure kalaja. Koristi se kao presvlaka kliznih površina posteljica izrađenih od drugih materijala.
- U Tabeli 3.2 data su svojstva uobičajenijih metalnih materijala posteljica ležaja.

Tabela 3.2 Svojstva legure beli metal za klizne ležaje

Oznaka materijala	Tvrdoća HB	Karakteristične oblasti i primeri primene	Dopuštene vrednosti					
			p_d N/mm ²	v m/s	$(p \cdot v)_d$	T °C	ψ 10 ⁻³	
Beli metal	<i>L.Sn 89</i> <i>L.Sn 80</i> <i>L.Sn 80 Pb</i>	24,5 27	parne turbine, turbogeneratori, motori SUS, alatne mašine, veliki elektromotori reduktori	20	60	20	110	0,4 .. 1
	<i>L.PbSn 9 Cd</i> <i>L.PbSn 6 Cd</i>	28 26	parne turbine, klipne i alatne mašine, elektromotori srednjih snaga	20	15	20	110	
	<i>L.PbSn 10</i>	23	traktori, turbo, valjaoničke i alatne mašine	15	12	10	110	
	<i>L.PbSn 5</i>	22	pumpe, mlinovi, ventilatori, valjaoničke mašine	5	5	6	110	

g) **Aluminijum** sa dodatkom bakra, gvožđa, cinka, mangana, kalaja i drugih metala primenjuje se takođe za izradu ležišnih čaura, ali samo ukoliko je i sam ležaj izrađen od lakih metala. Na taj način i telo ležaja i sama čaura imaju približno iste termičke dilatacije, čime se izbegavaju moguće deformacije u toku rada.

h) **Plastične mase** koriste se pre svega kod ležišnih čaura koje rade bez podmazivanja ili uz nedovoljno podmazivanje. Imaju mali koeficijent trenja i teže se u toku razrade prilagođavaju obliku rukavca. Od plastičnih masa za izradu posteljica koriste se termoplastični i termoreaktivni materijali.

Posteljice od **poliamida** imaju dobra antifrikciona svojstva, dobru otpornost na habanje i lako se spajaju sa metalom. Nedostaci poliamida su velika higroskopnost, velika toplotna dilatacija i niski koeficijent provođenja toplote. Mogu se podmazivati mineralnim uljem, a podnose radne temperature i do 100 °C. Za lakše radne uslove mogu da se primene i bez podmazivanja.

Plastične mase na bazi **politetrafluoretilena** (PTFE) imaju mali koeficijent trenja, veliku otpornost na habanje, a postojeane su prema vodi, naftinim derivatima, kiselinama i bazama. Koriste se kao presvlake kliznih površina posteljica izrađenih od drugih materijala. Pogodna su za ležaje koji se ne podmazuju. Kod višeslojnih ležišnih čaura koriste se kao jedan od slojeva, zajedno sa slojem od kalajnih legura.

Tekstolit je termoreaktivni plastični materijal. To je masa sa platnom natopljena formaldehidnim smolama i presovana pod pritiskom od 100 MPa pri temperaturi od 150...180 °C. Primena kod ležaja sa jakim opterećenjima pri nižim učestanostima obrtanja, za radne temperature do 80 °C.

i) Ugalj-grafit je kompozitni materijal koji se sastoji od 20% naftnog koksa, 60% drugih oblika koksa i 20% prirodnog grafita, čađi, katrana i punitelja na bazi fenolnih i epoksidnih smola. To je krut i porozan materijal koji je hemijski stabilan u mnogim agresivnim tečnim i gasnim sredinama. Antifrikciona svojstva zavise od materijala rukavca. Dodatkom bakra, srebra, bronz, kalaja i drugih materijala poboljšavaju mu se mehaničke karakteristike. Primenjuje se sa i bez podmazivanja, a podnosi vrlo visoke radne temperature (do 600 °C).

j) Guma - prirodna i sintetička koristi se kod ležaja koja rade u vodi i drugim sredinama kod mašina u hemijskoj industriji. Podmazivanje se najčešće izvodi vodom pri čemu se koeficijent trenja kreće u granicama $\mu=0.01...0.005$. Maksimalna vrednost brzine klizanje je $v \leq 35 \text{ m/s}$, a maksimalna radna temperatura 80°C. Klizni ležaji sa gumenom posteljom dobro podnose udarna i vibraciona opterećenja i bešumni su.

3.5. Nosivost radijalnih kliznih ležaja

Pri definisanju konstrukcionih i radnih parametara treba razlikovati dve grupe veličina. U prvu spadaju veličine koje su zadane ili ih bira konstruktor, kao što su:

- Opterećenje,
- Učestanost obrtanja,
- Dimenzije ležaja,
- Zazor,
- Dimenzije kućišta,
- Vrsta materijala,
- Hrapavost površine ležaja i rukavca,
- Vrsta maziva i
- Viskoznost na standardnoj temperaturi.

U drugoj grupi su tzv. Zavisne veličine koje konstruktor ne može direktno da kontroliše:

- Nosivost,
- Relativna ekscentričnost,
- Dozvoljena najmanja debljina sloja maziva,
- Efektivna viskoznost,
- Koeficijent trenja,

- Protok maziva i
- Porast temperature usled trenja.

Nosivost ležaja predstavlja najveću silu koju može da prenese ležaj, za predviđeni radni vek, a da pri tome ne bude prekoračena dozvoljena temperatura u ležaju, da ne dođe do nedozvoljenog habanja i zapreminskog razaranja materijala kliznog para, a pri hidrodinamičkom podmazivanju još i da debljina mazivog sloja ne bude manja od dozvoljene vrednosti.

Kod ležaja koja rade sa mešovitim trenjem u toku rada dolazi do habanja kliznih površina. S obzirom da je rukavac izrađen od čelika to se mahom haba posteljica ležaja. Debljina pohabanog sloja može biti merodavna za određivanje nosivosti ležaja. Intenzitet habanja kliznih površina u velikoj meri zavisi od površinskog pritiska između posteljice i rukavca, tako da njegova vrednost ni u kom slučaju ne bi trebala biti veća od dozvoljenog površinskog pritiska. Pored toga intenzitet habanja zavisi od niza drugih faktora kao što su na primer hrapavost kliznih površina, uslovi podmazivanja, agresivnost radne sredine, brzina klizanja, temperature, materijala posteljice i dr.

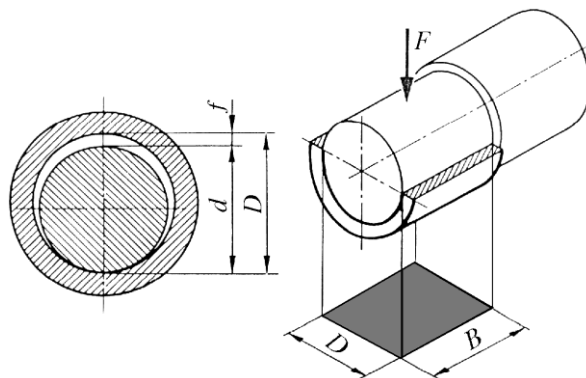
Tok proračuna radijalnih kliznih ležaja:

- Dimenzije ležaja: d - prečnik ležaja; D - prečnik posteljice; B - dužina rukavca odnosno ležaja
- Konstrukciona karakteristika: $\varphi = B/D = 0,2...1...(1,5)$

$\varphi = 0,5...1$ - brzohodi manje opterećeni ležaji

$\varphi = 0,3...0,7$ - optimalna nosivost.

- Opterećenje ležaja F



Sl. 3.9 Specifično opterećenje radijalnog kliznog ležaja

- Specifično opterećenje ležaja, slika 3.9.

$$p = \frac{F}{B \cdot D} \leq p_{doz} \quad (3.17)$$

- Apsolutni zazor ležaja: $f = D - d$

- *Relativni zazor ležaja*

$$\psi = \frac{f}{d} = \frac{D-d}{D} \quad (3.18)$$

Izabrana vrednost za ψ može se ostvariti nekim od sledećih naleganja *H7/a8, H7/b8, H7/c8, H7/d8, H7/e8, H6/f6, H7/f7, H5/g4, H5/g6, H7/g6*.

- *Brzina klizanja za minutni broj obrtaja n*

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} \quad (3.19)$$

- *Minimalna debljina uljnog filma:*

$$h_0 = \frac{D \cdot \psi}{2} \cdot (1 - \varepsilon) \geq h_{0 \min} \quad (3.20)$$

Vrednosti $h_{0 \min}$ za $R_z \leq 4 \mu\text{m}$ i malo odstupanje oblika i položaja kliznih površina određuju se iz Tabela.(3.3).

Tabela 3.3. Dozvoljene vrednosti debljine uljnog filma $h_{0 \min}$ u μm

Prečnik rukavac d (mm)		Brzina klizanja (m/s)				
iznad		-	1	3	10	30
do		1	3	10	30	-
24	63	3	4	5	7	10
63	160	4	5	7	9	12
160	400	6	7	9	11	14
400	1000	8	9	11	13	16
1000	2500	10	12	14	16	18

- *Relativna debljina uljnog filma:*

$$\delta = \frac{h_0}{f/2} = \frac{h_0}{\psi \cdot d/2} \quad (3.21)$$

- *Ekscentričnost:*

$$e = \frac{f}{2} - h_0 \quad (3.22)$$

- *Relativna ekscentričnost:*

$$\varepsilon = \frac{e}{f/2} = 1 - \delta \quad (3.23)$$

- *Karakteristika nosivosti ležaja (Sommerfeldov broj - bezdimenziona veličina):*

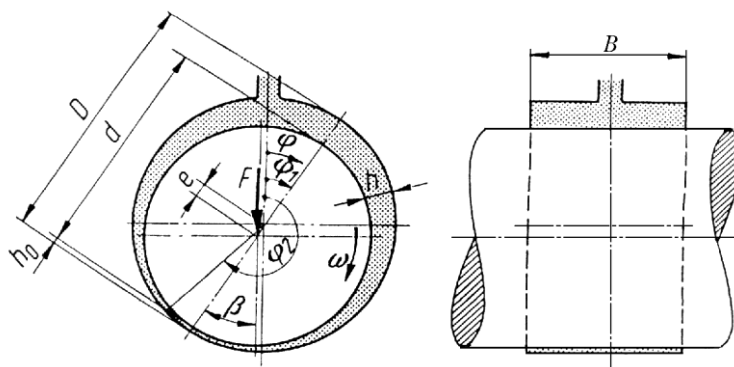
$$S_0 = \frac{p \cdot \psi^2}{\eta \cdot \omega} \quad (3.24)$$

(p u N/m^2 ; η – koeficijent dinamičke viskoznosti ulja na radnoj temperaturi u $\text{Pa} \cdot \text{s} = \text{N} \cdot \text{s/m}^2$; ω – ugaona brzina u s^{-1})

Somerfeldov (Sommerfeld) broj omogućuje da se klizni ležaji uporede u pogledu brzohodosti i nosivosti, odnosno predstavlja **karakteristiku nosivosti ležaja**. Zavisno od vrednosti Somerfeldovog broja S_0 klizni ležaji su razvrstani u tri grupe:

- $S_0 \leq 1$ - brzohodi lako opterećeni klizni ležaji;
- $S_0 > 1 \dots 3$ - srednje opterećeni klizni ležaji;
- $S_0 > 3$ - teško opterećeni klizni ležaji.

Somerfeldov broj je i pokazatelj stabilnosti vratila. Za $\varphi = B/D = 1$ i $S_0 = 1$ ekscentričnost iznosi $e = f/2$ - $h_0 = f/4$ gde je h_0 debljina uljnog filma slika 3.10. U ovom slučaju je pritisak u hidrodinamički ostvarenom uljnom sloju još uvek mali tako da i relativno mala sila može da izvede vratilo iz ravnoteže. Prema tome vrednost $S_0 = 1$ je granična između stabilnog rada ležaja ($S_0 > 1$) i nestabilnog rada ležaja ($S_0 < 1$). Zbog toga za vrednosti Somerfeldovog broja $S_0 < 1$, treba ležaj da ima dva ili više noseća klina, ili da ležaj bude izveden izsegmenata. Za $S_0 < 0,7$ postoji opasnost od rezonance pri broju obrtaja $n/2$, tako da to područje treba izbegavati.



Sl. 3.10 Skica radijalnog hidrodinamičkog kliznog ležaja

- Merodavna karakteristika trenja je odnos između koeficijenta trenja μ i relativnog zazora ψ tj. μ/ψ . Zavisni od relativne ekscentričnosti ε i konstrukcione karakteristike $\varphi = B/D$. Za praktične proračune može se usvojiti:

$$\text{za } S_0 < 1, \quad \frac{\mu}{\psi} = \frac{3}{S_0} \quad (3.25)$$

$$\text{za } S_0 > 1, \quad \frac{\mu}{\psi} = \frac{3}{\sqrt{S_0}} \quad (3.26)$$

- Gubici energije usled trenja. Zbog savlađivanja otpora trenja u ležaju određena količina mehaničke energije pretvara se u toplotu. Snaga potrebna za savlađivanje otpora trenja P_G u W iznosi:

$$P_G = F \cdot \mu \cdot v, \quad (3.27)$$

gde je: F - sila opterećenja ležaja u N; μ - koeficijent trenja koji se određuje prema izrazima (3.25) i (3.26); v - brzina klizanja u m/s.

- *Odvođenje toplote prirodnim hlađenjem ležaja.* Jednostavni ležaji sa pojedinačnim podmazivanjem mašću ili podmazivani uljem preko raznih mazalica odnosno pomoću prstena hlade se prirodnim putem. Količina toplote Q_0 u W, koju ležaj predaje okolini, proporcionalna je površini kućišta ležaja i određuje se prema:

$$Q_0 = k_c \cdot A \cdot (\vartheta_L - \vartheta_0) \quad (3.28)$$

gde je: k_c - koeficijent prelaza toplote u $W/(m^2K)$; A - površina kućišta ležaja kroz koju se odvodi toplota u okolnu sredinu u m^2 ; ϑ_L - radna temperatura ležaja, koja ne prelazi 70...100 °C; ϑ_0 - temperatura okoline, koja za normalne radne uslove iznosi 20 °C.

Koeficijent prelaza toplote za normalne radne uslove, kada nema strujanja vazduha ili kada je strujanje vrlo malo, kreće se u granicama $k_c=(15...20) W/(m^2K)$.

Ako je brzina strujanja vazduha $v_0 > 1,2 m/s$, koeficijent prelaza toplote k_c određuje se prema:

$$k_c = 7 + 12 \cdot \sqrt{v_0}, \quad (3.29)$$

gde je v_0 u m/s, a k_c u $W/(m^2K)$.

Odvođenje toplote zračenjem u okolnu sredinu shodno izrazu (3.28) proporcionalno je površini kućišta A . Površina kućišta pak zavisi od konstrukcionog izvođenja ležaja i proporcionalna je veličini rukavca vratila $\pi \cdot d \cdot B$. Na osnovu empirijskih podataka mogu se prihvatiti sledeće preporuke:

za lake ležaje

$$\frac{A}{\pi \cdot d \cdot B} = 5...6 \quad (3.30)$$

za teže ležaje

$$\frac{A}{\pi \cdot d \cdot B} = 6...7 \quad (3.31)$$

za vrlo teške ležaje

$$\frac{A}{\pi \cdot d \cdot B} = 8...9,5 \quad (3.32)$$

- *Odvođenje toplote prinudnim hlađenjem ležaja.*

Kod jako opterećenih kliznih ležaja, koja rade sa visokom učestanošću obrtanja, gubici energije su znatni, pa je prirodno hlađenje preko kućišta nedovoljno. Zbog toga je neophodno dodatno hlađenje ležaja, što se izvodi preko otvorenog cirkulacionog podmazivanja pri čemu se ulje hladi i ponovo vraća u ležaj. Kod još težih radnih uslova ulje odgovarajuće temperature se pod pritiskom ubrizgava direktno između kliznih površina.

Količina toplote Q_P u W koja se preko maziva odnosno hlađenjem odvede iz ležaja iznosi:

$$Q_P = \rho \cdot c \cdot q \cdot ((\vartheta_i - \vartheta_u)), \quad (3.33)$$

gde je: ρ – gustina ulja ($\rho = 900 \text{ kg/m}^3$); c – specifična toplota ulja, koja iznosi $c = 2000 \text{ J/(m}^3\text{K)}$; q – protok ulja u m^3/s ; v_i - temperatura ulja na izlazu u $^\circ\text{C}$; v_u - temperatura ulja na ulazu u $^\circ\text{C}$.

Po pravilu se uzima da je $(v_i - v_u) = 20 \text{ K}$. Protok ulja u zoni hidrodinamičkog pritiska određuje se prema:

$$q = D^3 \cdot \psi \cdot \omega \cdot k_{qt} \quad (3.34)$$

Bezdimenzioni koeficijent protoka K_{qt} u zoni hidrodinamičkih pritiska određuje se zavisno od relativne ekscentričnosti ε prema sedićem izrazu:

$$K_{qt} = \frac{1}{4} \cdot \left[\left(\frac{B}{D} \right) - 0.223 \cdot \left(\frac{B}{D} \right)^3 \right] \cdot \varepsilon \quad (3.35)$$

gde je: B -dužina ležaja u pravcu ose rukavca u m, D -prečnik posteljice odnosno ležaja u m.

- *Termička stabilnost ležaja*

U početku rada, zbog savlađivanja otpora trenja u ležaju, određena količina mehaničke energije pretvara se u toplotu pa se temperatura ležaja naglo povećava, pri čemu se zagreva ne samo klizni par, već i kućište ležaja. Povećanje temperature ležaja zbog odvođenja toplote u okolnu sredinu teče sporije, dok se najzad posle izvesnog vremena (3...5 časova) ne ustali. U ustaljenom (stacionarnom) stanju postoji ravnoteža između generisane i odvedene količine toplote, odnosno ležaj dobija svoju stacionarnu temperaturu.

Stacionarna temperatura ne sme da prekorači određenu granicu, jer pri tome dolazi do pojava koje narušavaju normalni rad ležaja. To su pre svega dilatacije i deformacije rukavca i ležaja, promena zazora, smanjenje viskoznosti maziva, itd. Stacionarna radna temperatura ležaja iznosi 50 do 60 $^\circ\text{C}$, ređe se kreće u granicama 70 do 80 $^\circ\text{C}$, a samo izuzetno i preko 100 $^\circ\text{C}$. Kod cirkulacionog podmazivanja granična radna temperatura je $v_{L\text{lim}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Za stacionarno stanje potrebno je da gubici snage P_G , određeni prema izrazu (3.27), budu jednaki količini toplote koja se odvodi prirodnim putem $P_G = Q_0$, ako je u pitanju prirodno hlađenje, odnosno, ako je u pitanju prinudno hlađenje ležaja:

$$P_G = Q_0 + Q_P \quad (3.35)$$

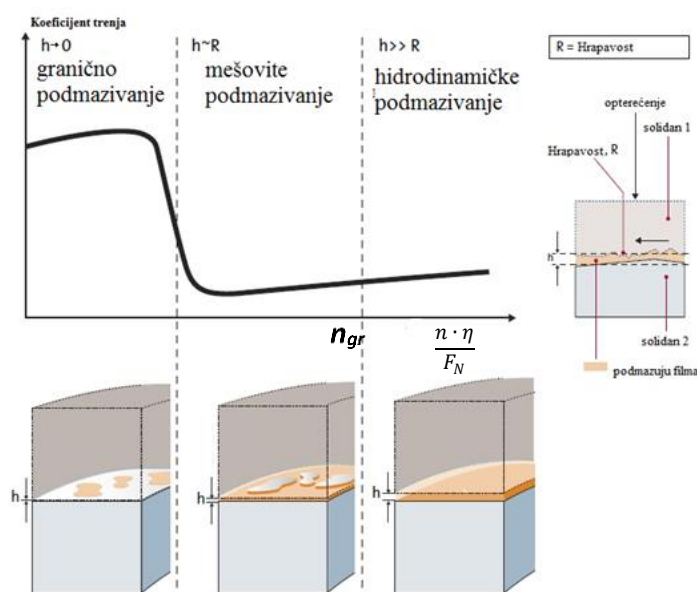
- *Uslovi hidrodinamičkog plivanja.*

U radu ležaja sa hidrodinamičkim podmazivanjem uočavaju se tri karakteristične faze: pokretanje, ustaljen radni režim i zaustavljanje. Koeficijent trenja i gubici snage na trenje su različiti u svakoj od ovih faza. U prvom trenutku pokretanja vratila slika 3.11 koeficijent trenja ima najveću vrednost – koeficijent trenja mirovanja. Površine vratila i posteljice su u dodiru, ali su obložene tankim (graničnim) slojem maziva, tako da se u ležaju ostvaruje granično, a zatim mešovito trenje. Sa povećanjem relativne obimne brzine v koeficijent trenja naglo opada i dostiže minimum u trenutku kada se rukavac odvoji od posteljice, odnosno kada počinje hidrodinamičko plivanje.

Relativna obimna brzina koja odgovara tom trenutku naziva se granična brzina v_{gr} , a odgovarajuća učestanost obrtanja je granična učestanost obrtanja n_{gr} . Uslovi hidrodinamičkog plivanja su obezbeđeni ukoliko je radna učestanost obrtaja veća od granične odnosno $n > n_{gr}$. Granična učestanost obrtaja određuje se približno prema:

$$n_{gr} = \frac{F \cdot 10^{-7}}{\eta \cdot C_{gr} \cdot V_L}, \quad (3.36)$$

gde je: F - opterećenje ležaja u N; η - koeficijent dinamičke viskoznosti na radnoj temperaturi; V_L - zapremina ležaja $V_L = B \cdot \pi \cdot d^2 / 4$ u m^3 ; C_{gr} - konstanta koja se kreće u granicama $p < 1 \text{ N/mm}^2, C_{gr} < 1$; $1 \text{ N/mm}^2 \leq p \leq 10 \text{ N/mm}^2, 1 \leq C_{gr} \leq 8$; $p > 10 \text{ N/mm}^2, C_{gr} > 8$



Sl. 3.11 Stribekova kriva

3.6. Maziva

Od pravilnog izbora maziva, u najvećoj meri, zavise osnovna radna svojstva ležaja: njegova nosivost, stabilnost, preciznost (tačnost vođenja vratila) i trajnost (dužina radnog veka).

Uloga maziva je višeznačna. U prvom redu ono smanjuje gubitke na trenje, a time i intenzitet habanja kliznih površina. Mazivo sprečava veliko povećanje temperature ležaja u radu na dva načina: zbog manjeg trenja smanjuje se količina energije koja se pretvara u toplotu, a stalnim proticanjem maziva kroz ležaj direktno se odvodi toplota i snižava temperatura. Sloj maziva u ležaju može takođe da ima amortizaciono dejstvo te tako smanjuje vibracije i mogućnost "ispadanja" ležaja, tj. gubljenja dinamičke stabilnosti. Mazivom se, osim toga, odvede iz ležaja produkti habanja, a služi i kao zaštita od korozije.

U kliznim ležajima primenjuju se najčešće *tečna maziva - ulja*, izuzetno i neke druge tečnosti, pa i voda, dok se kod manjeg broja ležaja koriste *konzistentna maziva - masti*. U savremenim

mašinama primenjuju se kao mazivo vazduh i neki drugi *gasovi*. U posebnim slučajevima mogu kao mazivo da služe i *čvrsta tela*, na primer *grafiti molibdendisulfid*.

Maziva ulja dele se, u zavisnosti od osnovne sirovine i načina proizvodnje, u dve osnovne grupe: *mineralna i sintetska*.

Mineralna ulja dobijaju se destilacijom ili rafinacijom nafte, a *sintetska* hemijskim postupkom sinteze više organskih materija.

Sintetska ulja, u odnosu na mineralna, imaju veću termičku stabilnost, dakle veći temperaturni dijapazon primene, ali su im proizvodni troškovi još uvek visoki.

Od ostalih tečnosti kao mazivo može da služi voda ili neka druga tečnost koja se koristi u radnom procesu, a ne sme da se meša sa uljem.

Aditivi (dodaci) su hemijska sredstva koja se mešaju sa mazivim uljima u cilju poboljšanja nekih njihovih svojstava. Tako postoje aditivi za povećanje indeksa viskoznosti, za snižavanje temperature stinjanja, za sprečavanje penjenja, za zaštitu od korozije, za smanjenje habanja kliznih površina, itd.

U *konzistentna ili polutečna maziva* spadaju tehničke masti, parafini i vazelini. Tehničke masti se dobijaju disperzijom sredstva za zgušćavanje u mineralnom ili sintetskom ulju. Zgušćivači mogu biti sapunske ili nesapunske osnove.

Masti se primenjuju pretežno kod kotrljajnih ležaja, a kod kliznih ležaja onda kada konstrukciono rešenje ne omogućuje primenu ulja ili kada je potrebno zaštititi ležaj od prodiranja nečistoće iz okolne sredine. Masti ispoljavaju veći otpor trenja pri kretanju i zato nisu pogodne za veće broj obrtaj .

Kao *gasovito mazivo* najčešće se primenjuje vazduh, a zatim azot, helijum, kiseonik, vodonik, ugljendioksid.

U ležajima mašina i motora kod kojih je radni fluid neki gas, može se taj isti gas primeniti i kao mazivo za ležaje, na primer kod gasnih turbina, kompresora za vazduh i gasove, kod parnih turbina, kod propelernih merača protoka gasova i slično. U svim ostalim oblastima mašinstva, na primer kod mašina alatki, mernih uređaja, računskih mašina, koristi se kao mazivo sredstvo skoro isključivo vazduh.

Od *čvrstih maziva* najviše se primenjuju grafit i molibdendisulfid koji zbog svoje lamelaste strukture imaju male smicajne napone, odnosno mali koeficijent trenja. Molibdendisulfid se koristi u suvom stanju, a grafit sa vodom.

Čvrsta maziva pogodna su za visoke radne temperature, za korodivne i radioaktivne sredine i za rad u uslovima vakuma. Nisu pogodna za velike brzine klizanja.

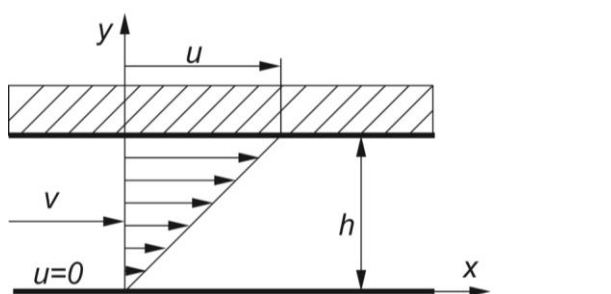
3.6.1 Trenje u fluidima

Fizička svojstva maziva su: viskoznost, indeks viskoznosti, gustina, tačka paljenja, tačka stišnjavanja, isparljivost, emulzivna svojstva, sposobnost rastvaranja gasova i izdvajanja gasova, stvaranje pene, konzistencija i penetracija masti, tačka kapanja, izdvajanje ulja iz masti, boja, specifična toplota i toplotna provodljivost i druge.

U slučaju kada su klizne površine ležaja potpuno razdvojene mazivom, tako da nema odgovarajućeg kontakta ni na vrhovima najviših neravnina, onda će otpor relativnom kretanju zavisiti skoro isključivo od svojstva prisutnog maziva i to prvenstveno od njegove viskoznosti. Viskoznost je svojstvo fluida da se suprotstavlja promeni oblika koji zauzima, a izražava se intenzitetom tangenčnih napona između slojeva koji se relativno pomeraju.

Da bismo došli do zakonitosti kojima se pokoravaju sile unutrašnjeg trenja, posmatraćemo laminarno proticanje tečnosti. Laminarno kretanje je takvo kretanje tečnosti kod kojeg zamišljeni slojevi klize jedan po drugom, ali tako da tečnost iz jednog sloja ne prelazi u drugi.

Posmatramo tečnost koja se nalazi između dve jednake i paralelne ploče slika 3.12. Donja ploča je nepokretana $U = 0$, a gornja se kreće u odnosu na donju brzinom U .



Sl. 3.12 Tok fluida između paralelnih ploča

Kretanje gornje ploče izaziva kretanje tečnosti između ploča. Granični dodirni sloj između gornje ploče i tečnosti kreće se istom brzinom kao i gornja ploča. Sloj tečnosti uz nepokretnu ploču je nepokretan. Ostali slojevi se kreću brzinama koje su srazmerne udaljenosti sloja od nepokretne ploče.

Gornja pokretna ploča povlači za sobom dodirni sloj tečnosti, a taj sloj povlači susedni donji sloj i tako redom. Najviši sloj tečnosti ima najveću brzinu, a niži slojevi sve manje brzine.

Na osnovu eksperimentalnih podataka, Isak Njutn je došao do zaključka da sila unutrašnjeg trenja F pri laminarnom proticanju zavisi od:

- vrste tečnosti
- površine ploča (A)
- brzine pokretne ploče (U)
- rastojanja između ploča (h)

Tangentni napon smicanja u ravnima paralelnim sa pločama upravo je proporcionalan gradijentu brzine po normali na pravac kretanja tečnosti (Njutnov zakon).

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (3.37)$$

Faktor proporcionalnosti η naziva se koeficijent dinamičke viskoznosti ili češće dinamička viskoznost. Tečnosti kod kojih je koeficijent dinamičke viskoznosti nezavisan od gradijenta brzine po normali na pravac kretanja zovu se Njutnovske tečnosti i kod njih je dinamička viskoznost η jedna od osnovnih fizičkih konstanti.

Jedinica dinamičke viskoznosti u SI sistemu je Ns/m^2 ili $\text{Pa}\cdot\text{s}$. Pošto je ovo velika jedinica, često se izražava u milipaskal sekundama $\text{mPa}\cdot\text{s}$.

Uticaj temperature na promenu viskoznosti može se izraziti uslovnom jedinicom koja se naziva indeks viskoznosti. To je broj koji pokazuje tendenciju promene viskoznosti sa promenom temperature.

Umesto dinamičke viskoznosti u tehničkoj praksi se kao tehnička karakteristika maziva definiše kinematska viskoznost ν kao odnos dinamičke viskoznosti i gustine tečnosti $\nu = \eta/\rho$, čija je merna jedinica m^2/s .

3.6.2. Gustina ulja

Gustina je odnos mase i zapremine ulja: $\rho = m/V$. Određuje se na temperaturi od $15\text{ }^\circ\text{C}$ i izražava se u (kg/m^3) ili (g/cm^3) . Gustina se neznatno menja sa porastom pritiska, ali se znatno menja sa promenom temperature, jer se promenom temperature menja zapremina tečnosti. Gustina većine ulja na $15.5\text{ }^\circ\text{C}$ varira od 860 do $950\text{ kg}/\text{m}^3$ (prosečna vrednost može se uzeti kao $900\text{ kg}/\text{m}^3$). Gustina na bilo kojoj drugoj temperaturi (temperaturama) može se dobiti iz sledeće relacije, tj.

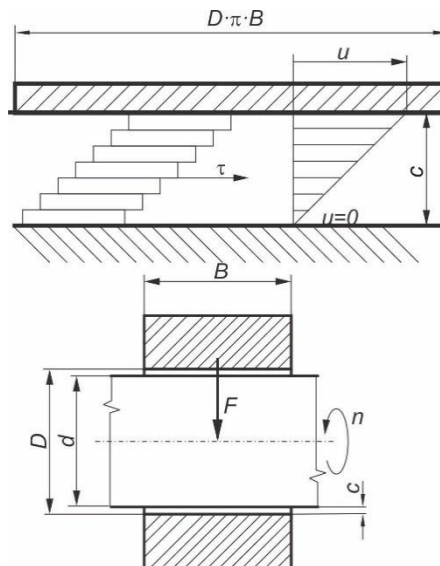
$$\rho = 0.89 - 0.00063 \cdot (T_0 - 15.5) \quad (3.38)$$

gde je $\rho_{15.5}$ - gustina ulja na $15.5\text{ }^\circ\text{C}$.

3.7. Petrofova jednačina za trenje ležaja

Godine 1883. Petrof je objavio rad o trenju ležaja zasnovan na uprošćenim pretpostavkama:

- Nema ekscentričnosti između ležaja i rukavca vratila i zato nema „klinaste akcije“ kao na slici 3.13.
- Uljani sloj nije sposoban da podrži opterećenje.
- Nema toka maziva u aksijalnom pravcu.



Sl. 3.13 Laminarni tok fluida u prostoru zazora kliznog ležaja

Na osnovu slike 3.12, izraz za moment viskoznoeg trenja se izvodi razmatranjem čitavog cilindričnog uljanog sloja kao „tečnog bloka“ na koji deluje sila F . Iz Njutnovog zakona viskoznosti:

Ako je sačinjena pretpostavka da je gradijent promene brzine ili gradijent napona smicanja konstantan, onda je $du/dy = u/c$ i jednačina (3.37) postaje:

$$\tau = \eta \cdot \frac{u}{y} \quad (3.39)$$

za

$$u = \omega \cdot r \quad (3.40)$$

gde je: ω - ugaona brzina (1/sec), r poloprečnik vratila (m)

i

$$\tau = \frac{F_t}{A}, \quad (3.41)$$

gde je: F_t - sila trenja (N), A - površina kućišta ležaja (m^2).

Iz jednačina (3.39), (3.40) i (3.41) sila trenja se može izvesti kao:

$$F_t = \tau \cdot A = \frac{\eta \cdot u}{c} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot B = \frac{\eta \cdot \omega \cdot r}{c} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot B \quad (3.42)$$

gde je: c - veličina zazora (μm), B - širina ležaja (m).

Moment trenja je onda:

$$M_t = F_t \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot \frac{r^3 \cdot B}{c} \cdot \eta \cdot \omega \quad (3.43)$$

gde je M_t - moment trenja (Nm)

Opterećenje ležaja (normalna sila) može se izraziti na drugi način:

$$M = \mu \cdot F \cdot r \quad (3.44)$$

Onda jednačine (3.43) i (3.44) daju koeficijent trenja i pritisak ležaja, respektivno, kao:

$$\mu \cdot F \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot \frac{r^3 \cdot B}{c} \cdot \eta \cdot \omega \xrightarrow{\text{yields}} \mu = 2 \cdot \pi \cdot \frac{r^3 \cdot B}{c \cdot F \cdot r} \cdot \eta \cdot \omega \quad (3.45)$$

Ako je specifično opterećenje ležaja:

$$p = \frac{F}{2 \cdot r \cdot B} \quad (3.46)$$

gde je p - specifično opterećenje ležaja (Pa). Onda se koeficijent trenja može predstaviti kao Petrofov zakon:

$$\mu = 2 \cdot \pi \cdot \frac{r^2 \cdot B}{c} \cdot \frac{\eta \cdot \omega}{2 \cdot p \cdot r \cdot B} = \pi \cdot \frac{r}{c} \cdot \frac{\eta \cdot \omega}{p} \quad (3.47)$$

3.8. Habanje

Pod pojmom habanje, ili trošenje, podrazumeva se skup pojava izazvanih trenjem koje se mogu opisati kao razaranje, u smislu odvajanja pojedinih čestica materijala, koje se dešava u kontaktnim slojevima tribomehaničkog sistema. Takve čestice nazivaju se opštim imenom – produkti habanja.

Sam akt razaranja je ograničen na malu zapreminu materijala, ali je pri tome važno da ona u toku frikcije biva fizički udaljena iz zone trenja. Na taj način dolazi do postepenog smanjenja dimezija i promene oblika, jednog ili oba elementa frikcionog para u pravcu normalnom na površinu trenja, tj. dolazi do pojave istrošenosti.

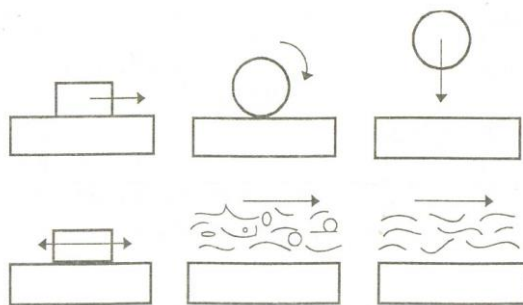
Postoji veliki broj hipoteza pomoću kojih se, sa različitih aspekata i sa manje ili više uspeha, objašnjava mehanizam habanja. U svakom slučaju to je složen proces jer diskretan dodir i dinamički karakter trenja uzrokuju različite načine razaranja materijala i njegovo udaljavanje iz zone kontakta. Moguće je, na primer, čisto mehaničko razaranje lomljenjem pojedinih elementa hrapavosti, ili brazdanje mekšeg materijala tvrđim mikroelementima, razaranje može da nastane i usled adhezije, zatim usled abrazivnog delovanja ishabanih ili u mazivu postojećih čvrstih čestica, zatim usled erozije, oksidacije, itd. Koji će oblik stvaranja produkata habanja egzistirati u konkretnom slučaju, to zavisi od mnogih činioca.

U tabeli 3.4 prikazana je klasifikacija habanja koja se najčešće koristi.

Tabela 3.4 Klasifikacija mehanizama habanja

Priroda kontakta	Vrsta kretanja	Vrsta mehanizma habanja			
		Interakcija preko opterećenja		Interakcija preko opterećenja i materijala	
		Zamorno	Abrazivno	Adhezivno	Tribo hemijsko
Čvrsta tela sa ili bez maziva (metal/metal; metal/nemetal; nemetal/nemetal)	Klizanje	0	0	0	0
	Kotrljanje	0	0	0	0
	Udar	0	0	0	0
	Oscilatorno	0	0	0	0
Čvrsta tela i tečnosti	Tečenje	0	0	0	0
Čvrsta tela i tečnosti ispunjene abrazivom	Tečenje sa abrazivom	0	0		0

U njoj je prikazana veza između mehanizma nastanka, kinematičkih karakteristika kretanja i opštih svojstava materijala tribomehaničkog sistema, a na slici 3.14 njihov šematski prikaz.



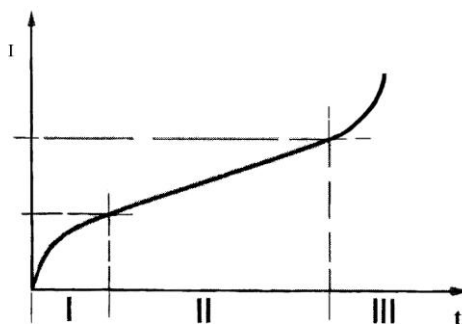
Sl. 3.14 Šema kretanja elemenata tribomehaničkih sistema

Koji od mehanizma habanja je bio dominantan, najlakše se zaključuje po prirodi oštećenja na kontaktnim površinama (tabela 3.5).

Tabela 3.5 Priroda oštećenja na kontaktnim površinama

Mehanizmi habanja	Pojave na pohabanim površinama
Zamorno	mikropukotine, jamice
Abrazivno	ogrebotine, brazde
Atheziona	mikrokonusi, ljupe, jamice
Tribohemijsko	produkti reakcije (filmovi i čestice)

Međutim, bez obzira na različita gledišta na mehanizam nastanka procesa habanja postoji potpuna saglasnost da pri habanju čvrstih tela uvek postoje tri karakteristične faze čija zakonitost može šematski da se prikaže krivom na slici 3.15. Ovu zakonitost dinamike habanja koja važi za sve tribomehaničke sisteme bez izuzetka, ustanovio je V.F. Lorenc 1934. godine.



Sl. 3.15 Zavisnost intenziteta habanja od vremena rada frikcionog para

Naime, kako se pokazalo, habanje u početnom periodu rada tribomehaničkog sistema teče veoma burno. To se dešava zbog toga što je kontakt površina diskretan a realna površina dodira veoma mala, pa se javljaju veoma visoki pritisci koji dovode do intenzivnog plastičnog defromisanja mikro neravnina i razaranje materijala. Početni period se naziva i prva faza habanja ili period prilagođavanja-naleganja frikcionih elemenata.

Po završetku faze prilagođavanja intenzitet habanja se smanjuje, proces se stabilise i tada nastaje druga faza. Ona odgovara eksploatacionom periodu rada tribomehaničkog sistema. Tokom ovog perioda habanje je najmanje i u praksi treba težiti da nagib krive na slici 3.15 u tom intervalu bude minimalan i da njeno trajanje bude što je moguće duže.

Treća faza se karakteriše pojačanim habanjem, slično prvoj fazi, ali proces razaranja je takav da teži tzv. katastrofskom habanju. Ulaskom u ovaj period praktično prestaje funkcionalnost tribomehaničkog sistema, javlja se zaribavanje i havarija. Zbog toga je razumljiva težnja da se ona izbegne.

Za procenu istrošenosti postoje različiti izrazi, ali se svi oni svode na četiri osnovna pokazatelja. To su linearno trošenje I_{hL} , zapreminsko trošenje I_{hV} , maseno ili gravimetrijsko trošenje I_{hG} i energetska trošenje I_{hE} . Ove veličine se definišu sledećim izrazima:

$$I_{hL} = \frac{h}{s} \quad (3.48)$$

$$I_{hV} = \frac{V}{s} \quad (3.49)$$

$$I_{hG} = \frac{m}{s} \quad (3.50)$$

$$I_{hE} = \frac{V}{F_t s} \quad (3.51)$$

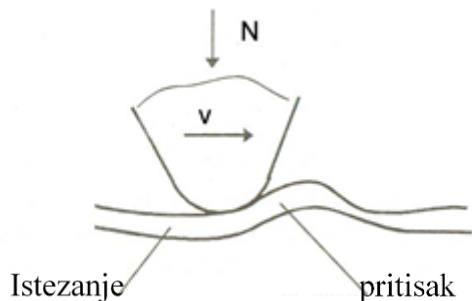
gde su: h – visina sloja materijala odstranjenog habanjem, s – put klizanja, V – zapremina pohabanog materijala, m – masa pohabanog materijala, F_t – sila trenja. Često se linearna, zapreminska i masena pohabanost nazivaju – linearnim, zapreminskim, odnosno, masenim intenzitetom habanja.

3.8.1 Zamorno habanje

Zamorno habanje postoji u svim tribomehaničkim sistemima i u svim uslovima kontakta njihovih elemenata. Fizička suština razaranja čestica materijala, tj. stvaranja produkata habanja, sastoji se u tome što se pri relativnom kretanju površina u kontaktu, vrhovi tvrdih neravnina kreću kroz sloj materijala manje tvrdoće. Tom prilikom ispred ovih neravnina javlja se naprezanje na pritisak, a iza njih – na istezanje, slika 3.16. Tokom vremena ovakvo dvosmerno naizmjenično naprezanje sloja sa manjom tvrdoćom ponavlja se u ciklusima, sve dok traje proces trenja. Usled takvog stanja nastaje zamor materijala, u njemu se najpre javljaju prsline, a kasnije nastaje razaranje i odvajanje čestica.

Pri zamornom habanju, odvajanje čestica iz zone kontakta je posledica delovanja opterećenja sa velikim brojem ciklusa. Broj ciklusa koji dovodi do razaranja materijala zavisi od njegovih mehaničkih svojstava, uslova trenja, opterećenja, brzine i drugih parametara. Pri tome se smatra da

su zamor i razaranje prvenstveno posledica delovanja tangencijalnih naprezanja. Odvajanje čestica nastaje pri naprezanjima čije amplitude ne prelaze granicu elastičnosti. Prisustvo maziva u zoni kontakta smanjuje naprezanja i promene mikrodeformacija, a samim tim usporava proces obrazovanja prslina.



Sl. 3.16. Šema nastanka zamornog habanja

Zapremina pohabanog materijala posle n ponovljenih kontakata, posle n ciklusa, na putu jednakom prečniku pege dodira d iznosi:

$$V_i = n \cdot \Delta V \quad (3.52)$$

gde je: ΔV – zapremina ishabanog materijala sa realne površine kontakta nastalog na putu jednakom prečniku pege dodira i to pri jednom ostvarenom kontaktu, n – broj ciklusa koji dovodi do razaranja materijala zavisi od njegovih mehaničkih svojstava, uslova trenja, opterećenja, brzine i drugih parametara.

3.8.2 Abrazivno habanje

Abrazivno habanje je najčešći mehanizam trošenja elemenata tribomehaničkog sistema. Kako je utvrđeno, čak više od 50% produkata habanja u industriji spadaju i posledica su ove vrste habanja. Ono nastaje usled kretanja vrhova neravnina tvrdih tela kroz površinski sloj manje tvrdoće. Tom prilikom dolazi do mikrorezanja i trajnih deformacija kontaktnih slojeva, nastaje razaranje i odvajanje čestica materijala i njihovo odstranjivanje iz zone trenja.

Postoji veći broj podela abrazivnog habanja, ali je najpogodnija klasifikacija na tzv. tri osnovna tipa abrazivnog habanja.

Prvi tip abrazivnog habanja nastaje usled udara tvrdog tela o površinu manje tvrdoće. Ovaj tip habanja se javlja najčešće pri transportu rastresitih tvrdih materijala, kao što su kamen, šljunak, razne rude, itd. Tom prilikom površina manje tvrdoće se izrazito više haba, ona se prekriva jamicama manjih ili većih dimenzija koje su nastale usled razaranja i odvajanja produkata habanja iz zone trenja.

Drugi tip abrazivnog habanja nastaje usled pojave izrazito visokih pritisaka u zoni kontakta elemenata tribomehaničkog sistema. To je slučaj koji se javlja, na primer, prilikom mlevenja i lomljenja većih komada tvrde rude, uglja i sličnih materijala u mlinovima sa valjcima ili kuglama.

Treći tip abrazivnog habanja se javlja pri relativno malim pritiscima u zoni kontakta. On nastaje kada jedan element tribomehaničkog sistema klizi po drugom, ali bez spoljašnjeg opterećenja, tj. samo usled sopstvene težine. Ovaj tip abrazivnog habanja je tipičan za slučaj klizanja rastresitog tereta niz neku površinu (na primer, šljunka, peska i sl.).

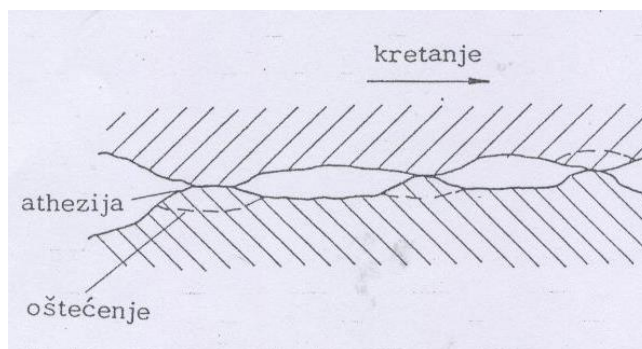
Veličina čestica ishabanog materijala pri abrazivnom habanju, po pravilu je uvek veća od čestica koje nastaju pri drugim vrstama habanja. Ishabane površine imaju vidljive brazde, kanale ili jamice manjih ili većih dimenzija. Upravo takva slika istrošene kontaktne površine je poslužila kao osnovni model za proračun parametara habanja. Međutim, stvarni oblik neravnina pri abrazivnom habanju se razlikuje od ovakvih modela. Stoga se u praksi za proračun zapremine produkata abrazivnog habanja najčešće koristi jednostavan izraz:

$$V = K_a \frac{F_N}{HB} \quad (3.53)$$

gde je K_a – tzv. abrazivna konstanta, čija vrednost zavisi od uslova ostvarivanja kontakta i određuje se eksperimentalno, F_N – opterećenje i HB – tvrdoća materijala mekšeg elementa tribomehaničkog sistema.

3.8.3 Adhezivno habanje

Adhezivno habanje je jedno od vrlo čestih vrsta habanja. Ono se javlja uvek kada postoje uslovi za neposredan kontakt, i to ne samo kod suvih nego i kod podmazanih površina. Adhezija je proces sjedinjavanja metala kao rezultat kompleksnog uticaja trenja i deformacija pri temperaturama nižim od temperature rekristalizacije. U takvim uslovima stvara se čvrst spoj na mestima dodira vrhova neravnina kontaktnih elemenata. Zbog relativnog kretanja dolazi do odvajanja materijala obično po dubini jednog od elemenata slika 3.17.



Sl. 3.17. Šema nastanka adhezionog habanja

Prvi izraz za proračun količine ishabanog materijala postavljen je tek 1953. godine i to na osnovu adhezione teorije trenja. To je učinio Dž.F.Arčard polazeći od pretpostavke da je kontakt čvrstih tela diskretan, da su elementarne realne površine kontakta kružnog oblika i da imaju isti prečnik veličine $2r$. On je takođe pretpostavio da sve ishabane čestice nastale na putu klizanja jednakom $2r$ uvek imaju oblik polusfere, zapremine:

$$\Delta V_i = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \quad (3.54)$$

Zbog toga će ukupna zapremina produkata habanja na jedinicu dužine puta iznositi

$$\Delta V = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot n}{3} \quad (3.55)$$

gde je n – broj ostvarenih kontakata (broj frikcionih veza) na putu klizanja. Pod uslovom da je spoljašnje opterećenje podjednako raspoređeno na sve kontaktne elemente, to opterećenje će iznositi:

$$F_N = \sigma_T \cdot \pi \cdot r^2 n \quad (3.56)$$

gde je σ_T - napon tečenja materijala manje tvrdoće. Iz prethodnih izraza dobija se da je zapremina produkata habanja:

$$\Delta V = \frac{F_N}{3 \cdot \sigma_T} \quad (3.57)$$

Međutim, ispravno smatrajući da na svim kontaktima ipak neće doći do pojave habanja, Arčard je uveo konstantu K kojom je uzeo u obzir verovatnoću pojave razaranja adhezionih veza. Tako je dobio izraz za ukupnu zapreminu produkata habanja nastalih na putu s u obliku:

$$V = K \cdot \frac{F_N}{3 \cdot \sigma_T} \cdot s \quad (3.58)$$

Konstanta K jeste tzv. koeficijent adhezivnog habanja. Kao i koeficijent trenja, ona je takođe bezdimenziona veličina i određuje se eksperimentalno.

Najpoznatiji model habanja, često referenciran kao Arčardov zakon habanja je :

$$V = K \cdot \frac{F_N}{H} \cdot s, \quad (3.59)$$

gde je: V - zapremina produkata habanja (m^3), K - bezdimenzioni koeficijent habanja, F_N - normalno opterećenje (N), H - tvrdoća mekše kontaktne površine (Pa), s - put klizanja (m).

Formula do koje je došao Arčard nije univerzalna i može da se primeni približno, samo za drugu fazu habanja i to u slučaju kada je intenzitet habanja relativno mali. Ali, bez obzira na to ograničenje ovaj izraz ima svoje prednosti: on je jednostavan i omogućava da se bez složenih merenja skupom opremom dođe do podataka o procesu habanja.

3.8.4 Tribohemijsko habanje

Zamorno, abrazivno i atheziona habanje nastaju skoro isključivo kao posledica interakcije kontaktnih elemenata. Dinamička interakcija između kontaktnih elemenata i sredine definiše proces tribohemijskog habanja. U procesu trenja zbog reakcije sa okolinom dolazi do modifikacije kontaktnih slojeva koji se ciklično stvaraju i razaraju.

Tribohemijsko habanje nastupa najčešće pri radu tribomehaničkih sistema u hemijski agresivnim sredinama. Važno je napomenuti da intenzitet reakcije raste sa porastom temperature, odnosno da se na taj način ubrzava stvaranje slojeva koji se kasnije razaraju i ponovo obnavljaju.

3.8.5 Tehnike merenja habanja

Postoje direktne i indirektne tehnike merenja habanja:

- Vizuelno i taktilno ispitivanje,
- Merenje dimenzionalnih promena,
- Merenje težine,
- Profilometrija,
- Radiografija
- Analiza maziva radi nalaženja čestica habanja (spektroskopija),
- Nadgledanje rada i nivoa buke.

Indirektne metode merenja habanja daju habanja u korelaciji sa promenljivom veličinom kao što su porast sile, porast temperature, hrapavost površina i integritet, vibracije i zvučna (akustična) emisija. Izbor određene metode zavisi od željene tačnosti i fizičkih ograničenja sistema kao što su veličina i lakoća demontaže.

3.8.6. Specifični faktor habanja k

Iz modela habanja (3.59), često referenciranog kao Arčardov zakon habanja dobija se:

$$\frac{V}{s} = K \cdot \frac{F_N}{H}, \quad (3.60)$$

gde je V - zapremina materijala otklonjenog kao rezultat habanja [m^3], F_N - radijalna sila na ležaju (N), s - ukupan put klizanja (m), H - tvrdoća kontaktne površine mekšeg materijala (HV).

Koeficijent habanja K se određuje prema:

$$K = \frac{H \cdot V}{F_N \cdot s} \quad (3.61)$$

Pošto se zapremina pohabanog materijala V može proceniti iz gubitka mase w i gustine ρ , koeficijent habanja K se takođe može izraziti kao:

$$K = \frac{H \cdot w}{F_N \cdot s \cdot \rho} \quad (3.62)$$

U cilju izračunavanja bolje je upotrebiti uopšten Archardov zakon habanja koji se dobija deljenjem jednačine 3.60 sa kontaktnom površinom A .

$$\frac{V}{s \cdot A} = \frac{K}{H} \cdot \frac{F}{A} \xrightarrow{yields} \left\{ h = \frac{V}{A}, k = \frac{K}{H}, p = \frac{F}{A}, s = v \cdot t \right\} \xrightarrow{yields} h = k \cdot p \cdot v \cdot t \quad (3.63)$$

gde je: k – specifični faktor habanja (specifična zapreminska stopa habanja) (m^3/Nm), p - specifično opterećenje ležaja (Pa), v - brzina klizanje (m/sec), t - vreme klizanje (sec). U ovoj disertaciji je izračunato k da bi se utvrdio intenziteta habanja i količina materijalnog gubitka u odnosu na promenu puta klizanja.

Teškoća u korišćenju ovih zakona je nepoznati koeficijent habanja k koji zavisi od mnogih faktora kao što su pritisak, temperature, brzina, površinska tvrdoća, materijali, tip i količina maziva. Stoga se specifični faktor habanja se određuje eksperimentalnim ispitivanjem.

3.8.7. Intenzitet habanja

Uticajne veličine na habanje posteljice ležaja su:

- Hrapavost površina definisana kao srednje aritmetičko odstupanje profila Ra ,
- Specifično opterećenje ležaja p ,
- Brzina klizanja v ,
- Kinematska viskoznost maziva η ,
- Put klizanja s ,
- Tvrdoća rukavca vratila H_r
- Tvrdoća posteljice ležaja H_l .

Na osnovu dimenzijske analize, korišćenjem Bakimgemove teorije, uspostavljene su tri bezdimenzione grupe koje određuju linearni intenzitet habanja u obliku:

$$I_h = \frac{V}{s} = f\left(\frac{Ra \cdot p}{v \cdot \eta} \cdot \frac{H_r}{H_l}\right) \quad (3.64)$$

što znači da linearni intenzitet habanja zavisi od bezdimenzione grupe $(Ra \cdot p / v \cdot \eta)$ koja određuje habanje i odnosa tvrdoće rukavca vratila i posteljice ležaja kao parametra.

Moguće je izračunati intenzitet habanja preko specifični faktor habanja k iz jednačina (3.60) i (3.64) tj:

$$I_h = k \cdot F_N \quad (3.65)$$

gde je: I_h - intenzitet habanje (m^2), k - specifični faktor habanja (m^3/Nm).

Habanje materijala može da se opiše gubitkom mase posteljice ležaja i intenzitetom habanja ali su istraživanja utvrdila da je intenzitet habanja mnogo pogodniji jer uzima u obzir primenjeno opterećenje, i tvrdoću kontaktnih površina, specifičnog faktora habanja k , koji će koristiti za merenje promene intenziteta gubitka materijala.

3.9 Hrapavost metalnih površina

Površine mašinskih delova su obavezno, u većoj ili manjoj meri, neravne tj. hrapave. Mikro geometrija površina ima dominantan uticaj na uslove kontakta površina a time i na tribološke pojave u mašinskim delovima. Topografski izgled površina morao bi da se posmatra u trodimenzionalnom obliku. Međutim, u praksi, najčešće se analiza površina svodi na površinske preseke odnosno dve dimenzije.

Pod hrapavošću površina čvrstih tela podrazumevaju se neravnine čije je međsobno rastojanje relativno malo (od 2 do 800 μm) a visine mogu biti veoma različite (od 0.0 do 400 μm).

Osnovni numarički parametri hrapavosti određuju se prema standardizovanim propisima (ISO, SRPS), tzv. sistemom M, polazeći od srednje linije profila. Srednje linija profila seče profil tako da na referentnoj dužini ukupan zbir površina profila na obe strane srednje linije bude približno jednak. Standaranom SRPS EN ISO 4287 utvrđeni su pojmovi i definisani parametri hrapavosti površina industrijskih proizvoda, prvenstveno u metaloprerađivačko industriji. Najčešće primenjivani parametri hrapavosti su srednje aritmetičko odstupanje profila od srednje linije (R_a), srednja visina neravnina (R_z), maksimalna visina neravnina (R_y) i srednje kvadratno odstupanje profila (R_q).

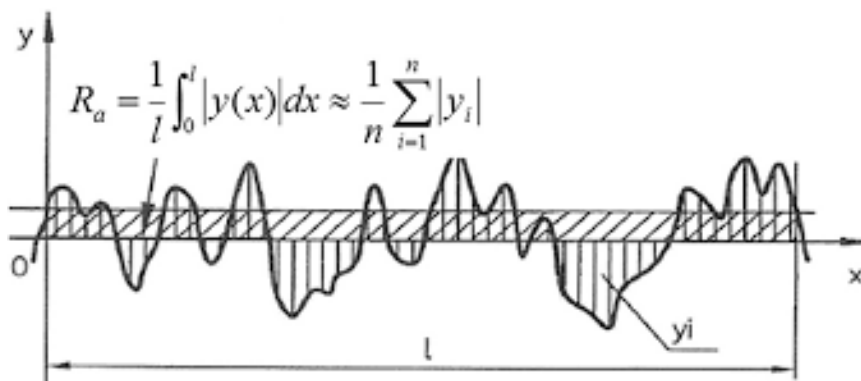
3.9.1 Srednje aritmetičko odstupanja profila R_a

Srednje aritmetičko odstupanja profila R_a predstavlja srednju aritmetičku apsolutnu vrednost odstupanja svih tačaka efektivnog profila od srednje linije u granicama referentne dužine sl. 3.18

$$Ra_i = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx, \quad i = 1, \dots, n - \text{ broj izvršenih merenja} \quad (3.66)$$

$$Ra = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (3.67)$$

gde y_i je vertikalno rastojanje od srednje linije do tačke podataka(μm).



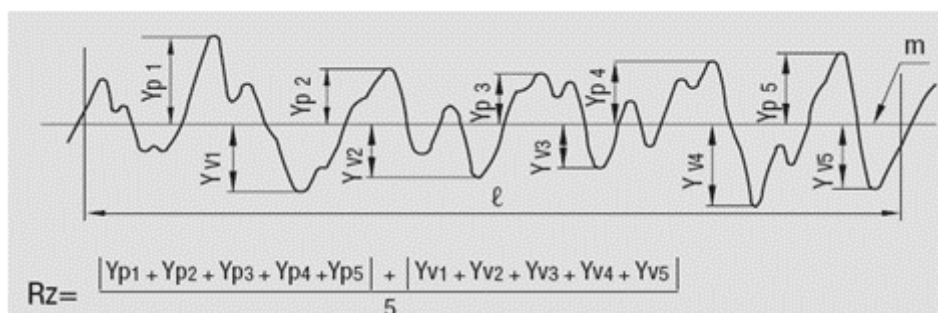
Slika 3.18 Određivanje parametra hrapavosti R_a

3.9.2 Srednja visina neravnina R_z

Srednja visina neravnina R_z predstavlja razliku između srednje aritmetički vrednosti visina pet najviših i srednje aritmetički vrednosti visinu pet najnižih tačaka profila u granicama referente dužine, kada visine tih 10 tačaka mere od proizvoljne prave, paralelne sa srednjom linijom profila, koja ne seče profil sl 3.19

$$R_z = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 Y_{Pi} - \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 Y_{Vi} = \frac{(Y_{P1}+Y_{P2}+Y_{P3}+Y_{P4}+Y_{P5})-(Y_{V1}+Y_{V2}+Y_{V3}+Y_{V4}+Y_{V5})}{5} \quad (3.68)$$

gde je Y_{Pi} i Y_{Vi} (μm) najviši vrh, i najniže dolina respektivno.

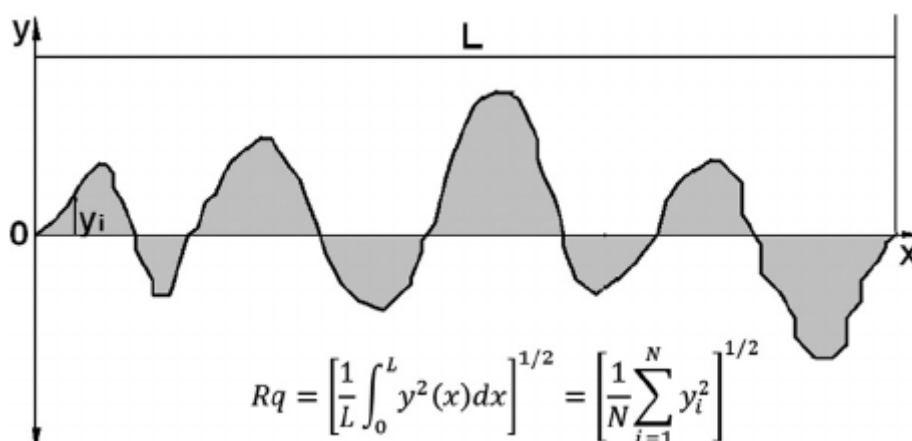


Sl. 3.19 Određivanje parametra hrapavosti R_z .

3.9.3 Srednje kvadratno odstupanje profila R_q ,

Srednje kvadratno odstupanje profila R_q je kvadratni koren aritmetičke sredine kvadrata odstupanja profila (Y_i) od srednje linije, sl. 3.20.

$$R_q = \left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N Y_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.69)$$

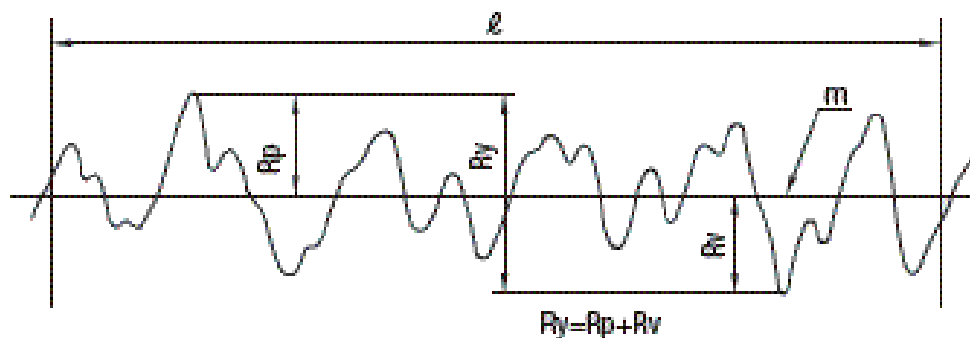


Sl. 3.20 Određivanje parametra hrapavosti R_q .

3.9.4. Maksimalna visina neravnina profila R_y

Maksimalna visina neravnina profila R_y je zbir visine R_p najvišeg vrha od srednje linije i dubine R_v najdublje doline od srednje linije, sl. 3.21.

$$R_y = R_p + R_v \quad (3.70)$$



Sl. 3.21 Određivanje parametra hrapavosti R_y .

3.10 Primena veštačke neuronske mreže u definisanju analitičkih zavisnosti izmernih parametara

Veštačka neuronska mreža (ANN) je jedan oblik implementacije sistema veštačke inteligencije, koji predstavlja sistem koji se sastoji od određenog broja međusobno povezanih procesora ili čvorova, ili procesnih elemenata koje nazivamo veštačkim neuronima.

Telo neurona naziva se čvor ili jedinica. Svaki od neurona ima lokalnu memoriju u kojoj pamti podatke koje obrađuje. Podaci koji se obrađuju su lokalni podaci kao i oni koji se primaju preko veze. Podaci koji se ovim kanalima razmenjuju su obično numerički.

Arhitektura neuronske mreže predstavlja specifično povezivanje neurona u jednu celinu. Struktura neuronske mreže se razlikuje po broju slojeva. Prvi sloj se naziva ulazni, a poslednji izlazni, dok se slojevi između nazivaju skriveni slojevi. Najčešće ih ima tri. Prvi sloj, tj. ulazni je jedini sloj koji prima podatke iz spoljašnje sredine, sledeći (skriveni) prosleđuje relevantne podatke do trećeg (izlaznog) sloja. Na izlazu trećeg sloja dobijamo konačan rezultat. Složenije neuronske mreže imaju više skrivenih slojeva. Slojevi su međusobno potpuno povezani.

Slojevi komuniciraju tako što se izlaz svakog neurona iz prethodnog sloja povezuje sa ulazima svih neurona narednog sloja. Znači, svaki čvor ima nekoliko ulaza i jedan izlaz. Jačina veza kojom su neuroni povezani naziva se težinski faktor (weight).

Značaj neuronskih mreža je u tome da mogu paralelno da obrađuju podatke, čije komponente su nezavisne jedne od drugih. Istovremeno radi više procesorskih jedinica, da bi rezultati njihove obrade prešli na sledeće jedinice (neurone). Procesorske jedinice u jednoj neuronskoj mreži su jednostavne i mogu obavljati samo jedno ili eventualno nekoliko računarskih operacija i međusobno su povezani tako da u jednoj neuronskoj mreži postoji mnogo više veza nego procesorskih jedinica. Broj ovih veza između neurona predstavlja snagu neuronske mreže. Težinski koeficijenti veza (težine veza) su koeficijenti koji su dodeljeni u svakom trenutku vezama neuronske mreže.

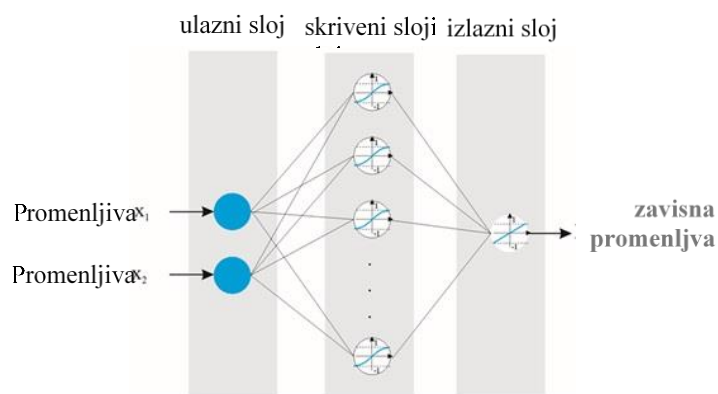
Neuronske mreže se koriste u situacijama kada nisu poznata pravila prema kojima bi bilo moguće dovesti u vezu ulazne i izlazne podatke iz željenog sistema.

Neuronske mreže se ne programiraju, već se treniraju, tako da je potrebno dosta vremena za njihovo obučavanje, pre nego što počnu da se koriste.

Koeficijenti veza između neurona podešavaju na osnovu ulaznih podataka, tako da neuroni „uče“ preko primera i poseduju sposobnost za generalizaciju posle unetog primera. Obučavanje se vrši tako što se ažuriraju težinski koeficijenti da bi se sledeći put dobio izlaz bliži zadatoj vrednosti. Kada se obučavanje završi, težinski koeficijenti ostaju isti i mreža se može primeniti za predviđeni zadatak.

Tipična troslojna ANN za modeliranje odnosa između dve ulazne (nezavisne) i jedne izlazne (zavisne) varijabile je prikazana na slici 3.22.

Svaki neuron u skrivenom sloju, ima bias podešavanje, prima ulazni signal (informaciju) od ulaznih neurona i procesira ih lokalno preko aktivacione funkcije (f) i stvara izlaz koji se može videti kao odraz lokalne informacije koja je smeštena u konekcijama. Izlazni signali svakog neurona u skrivenom sloju se posle toga šalju u izlazni neuron kao ulazni signali preko konekcija gde se ti signali aktivacije mogu ponovo transformisati uz pomoć nelinearne aktivacione funkcije za generisanje izlaza. Međutim, u većini slučajeva kombinacija nelinearnih i linearnih aktivacionih funkcija u skrivenom i izlaznom sloju je dovoljna za moć aproksimacije univerzalne funkcije.



Sl. 3.22 Troslojni ANN model za uspostavljanje odnosa između varijabili

Matematički rečeno, predviđanje zavisne promenljive uz pomoć troslojnog ANN modela je datog na slici 3.14, može se dobiti sledećom matematičkom relacijom:

$$\hat{y} = g\left[\sum_{j=1}^n v_j \cdot f\left(\sum_{i=1}^3 w_{ij} \cdot x_i + b_j\right) + b_k\right] \quad (3.71)$$

$$\hat{y} = g\left(\sum_m w \cdot f\left(\sum_n V \cdot X + B\right) + b_{ok}\right), \quad (3.72)$$

gde su:

w_{ij}, v_j - skupovi težina iz ulaznih do skrivenih neurona i iz skrivenih do izlaznih neurona;

b_j, b_k - bias skrivenih neurona i izlaznih neurona, respektivno;

f, g - aktivacione funkcije u skrivenom i izlaznom sloju, respektivno,

V, W - matrice težine između ulaznog i skrivenog sloja i skrivenog i izlaznog sloja, respektivno;

B - bias matrica skrivenih neurona;

b_{ok} - je bias izlaznog neurona;

X - vektor ulaznih parametara;

\hat{y} - ANN predviđanje.

Svaki koeficijent težine u matricama težine određuje stepen važnosti date konekcije dok aktivaciona funkcija kontroliše amplitude izlaza neurona. Transferna funkcija u skrivenom sloju je najčešće sigmoidna funkcija čija je opšta forma:

$$y_j = \frac{2}{1 + e^{-2(b_j + \sum_{n=i}^n w_{ij} \cdot x_i)}} - 1, \quad (3.73)$$

gde je x_i ulaz iz i -tog neurona iz prethodnog sloja. Kako bismo uspostavili tačnu relaciju između zavisnih i nezavisnih varijabli, podesive parametre koji čine matrice težine i biasa, treba odrediti u procesu poznatom kao obučavanje ANN. Podesivi parametri su početno nasumično dodeljeni i određeni su predstavljanjem trenirajućim ulaznim-izlaznim parovima za ANN. Obučavanje jedne ANN je problem optimizacije gde se traži minimum na površini greške u multi-dimenzionalni prostor definisan podesivo Echávarri J et al [59]. Obično, kriterijum optimizacije koji se koristi za obučavanje ANN je srednja kvadratna greška (MSE) između eksperimentalne (targetovane) y , i ANN procenjene vrednosti (predviđanje), za isti par ulaznih- izlaznih vrednosti. Stoga, za raspoloživi skup podataka obučavanja (N_{tr}), eksperimentalno dobijenih, određivanje matrica težine i bias, process obučavanja ANN zahteva minimizaciju MSE:

$$MSE = \frac{1}{N_{tr}} \cdot \sum_{k=1}^{N_{tr}} (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad (3.74)$$

Za izabrani ANN model, obučavanje je neprekidan proces, koji se ponavlja sve dok se razlike između predviđenih i targetovanih (eksperimentalnih) vrednosti ne nađu ispod prethodno definisanog praga. Mora se zapaziti da process obučavanja ANN pod konstantnim inicijalnim uslovima vodi do različitih krajnjih vrednosti podesivih parametara što može rezultirati u tome da dva ANN modela sa istom arhitekturom mogu imati drastično različite modelne kapacitete Rajendrany T., Rajendrany I. [60].

Kako bismo povećali brzinu konvergencije tokom stvarnog procesa obučavanja ANN, ulazni-izlazni parovi podataka treba da se normalizuju (skaliraju). Normalizacija podataka nije obavezan korak ali je skoro uvek preporučen. Normalizacija podataka do raspona (a, b) može se izvesti preko sledeće jednačine:

$$p_n = (b - a) \cdot \frac{p_i - p_{min}}{p_{max} - p_{min}} + a, \quad (3.75)$$

gde p_n i p_i predstavljaju normalizovane i prvobitne (sirove) podatke, a p_{min} i p_{max} su minimalne i maksimalne vrednosti sirovih podataka. Normalizacija podataka u opsegu $[-1, 1]$ je uobičajena u slučajevima kada su hiperbolične tangentne aktivacione funkcije korišćene u skrivenom sloju, a u rasponu $[0,1]$ kada se sigmoidne aktivacione funkcije koriste u skrivenom sloju.

Najčešće korišten algoritam za obučavanje ANN je backpropagation, razvijen nezavisno od strane naučnika: Paul Werbos (1974), David Parker (1984/1985), i David Rumelhart, Ronald Williams, i drugih (1985). Backpropagation uči šeme poredeći izlaz neuronske mreže sa željenim izlazom i računa greške za svaki čvor u mreži. Neuronska mreža podešava težine veza prema vrednostima greške dodeljenim za svaki čvor. Izračunavanje počinje od izlaznog sloja, preko skrivenih slojeva, prema ulaznom sloju. Nakon modifikacije parametara, na mrežu se dovode novi ulazi. Obučavanje se prekida tek kada mreža bude u stanju da daje izlaze sa zadovoljavajućom tačnošću. U tom cilju izvestan broj parova ulaznih-izlaznih podataka koji nisu prethodno bili predstavljeni ANN modelu, koriste se za namene testiranja. Zavisno od date aplikacije i slučaja, odnos broja podataka u obuci i skupovima testova može značajno varirati. Međutim, uobičajeno je da se oko 70-90% raspoloživih podataka koriste za namene obučavanja ANN, a preostali za testiranje ANN modela.

Performansa predviđanja datog ANN modela je visoko zavisna ne samo od algoritma obučavanja ANN i njenih parametara već i od njene arhitekture, tj. broja skrivenih slojeva i s njima povezanih neurona kao i kombinacije korišćenih aktivacionih funkcija u tim slojevima. Pošto se uveliko dešavalo da je ANN model koji ima samo jedan skriveni sloj sposoban da aproksimira bilo koju proizvoljnu funkciju do date tačnosti, problem arhitekture ANN se može reducirati na nalaženje "optimalnog" broja skrivenih neurona. Iako to može biti vremenski zahtevan zadatak, sledeća razmatranja se moraju uzeti u obzir pri traganju za adekvatnom arhitekturom ANN modela:

- premalo neurona u skrivenom sloju može dovesti do nedovoljne adekvatnosti a previše neurona do preterane adekvatnosti Karnik SR et al. [89],
- što je više skrivenih neurona, to je ekspresivnija snaga ANN modela,
- za izvestan broj aplikacija, broj skrivenih neurona je skoro pet puta viši od broja ulaznih neurona,
- gornja granica broja skrivenih neurona može se odrediti ako se uzme u obzir da ukupni broj težina i biasa u ANN ne prelazi broj podataka za obučavanje Sha W., Edwards KL. [90],
- uopšte, broj neurona u svakom skrivenom sloju zavisi od složenosti funkcije koja se aproksimira,
- pošto je nerealistično i veoma vremenski zahtevno analizirati izvestan broj različitih projektovanih ANN, za izbor se može primeniti metoda Tagučī, klasično projektovanje eksperimenta (DOE) ili primeniti metaheuristički optimizacioni pristup.

Konačno, obučeni i statistički verifikovani modeli ANN mogu se koristiti za predviđanje izlaza kada se unesu novi ulazni podaci. Štaviše, nakon što su identifikovane relacije između nezavisnih i zavisnih varijabli, može se sprovesti sveobuhvatna analiza dejstva nezavisnih varijabli na zavisne varijable (performanse) kao što se mogu formulisati i rešavati problemi optimizacije a koji se tiču određenja vrednosti zavisne varijable kako bi se postigla minimalna, maksimalna ili ciljna vrednost performanse.

4. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE TRIBOLOŠKIH PARAMETARA RADIJALNIH HIDRODINAMIČKI PODMAZIVANIH KLIZNIH LEŽAJA

U okviru ove disertacije izvršeno je istraživanje tribološkog ponašanja kliznog ležaja u uslovima hidrodinamičkog podmazivanja sa izabranim uljem. Za potrebe eksperimentalnog istraživanja je razvijen ispitni uređaj za ispitivanje triboloških karakteristika kliznih ležaja. Ispitivanje kliznih ležaja od belog metala, legure na bazi kalaja (TEGOTENAX V840) u uslovima hidrodinamičkog podmazivanja je urađeno na probnom stolu za ispitivanje obrtnih elemenata na Mašinskom fakultetu Univerzitetu u Nišu na Katedri za mašinske konstrukcije, razvoj i inženjering.

Eksperimentalna ispitivanja u okviru ove disertacije su se vršila u cilju određivanja koeficijenta trenja, određivanja intenziteta habanja i promene hrapavosti površine posteljice ležaja usled habanja, i na kraju je izvršeno ispitivanje mikrostrukture posteljice ležaja primene skenirajućeg elektronskog mikroskopa (SEM) i EDX u cilju razumevanja triboloških pojava. Određivanje koeficijenta trenja je vršeno za dva slučaja: za nestabilno stanje i stabilno stanje ležaja, kada je temperatura ležaja ustaljena.

Promene hrapavosti kontaktnih površina posteljice ležaja je praćena za četiri označena položaja na ležaju kako bi se proučile promene hrapavosti svakog položaja i na taj način se odredila ukupna promena hrapavosti tokom eksperimentalnog testa.

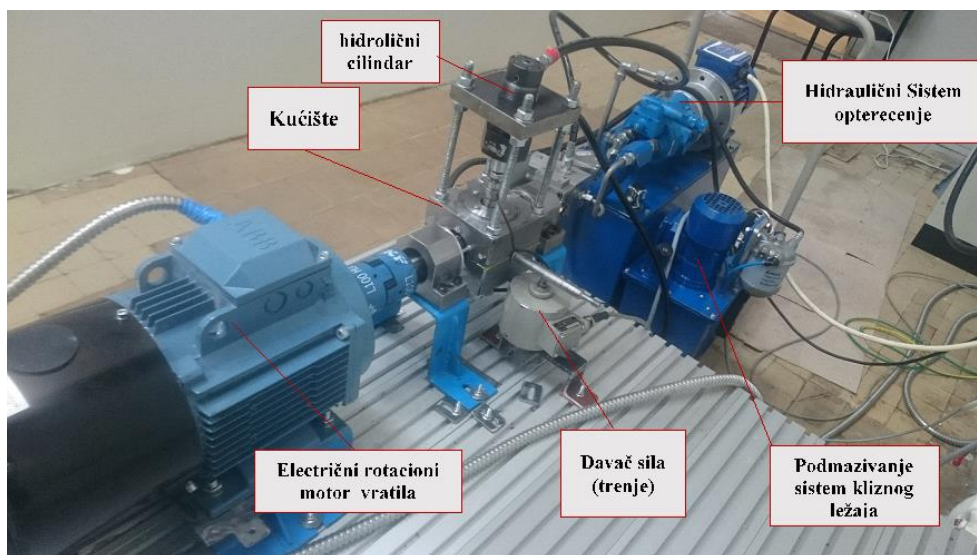
4.1 Opis uređaja za ispitivanje

Ispitni uređaj za ispitivanje kliznih ležaja je razvijen na Mašinskom fakultetu u Nišu specijalno za ovo istraživanje triboloških karakteristika kliznih ležaja[14]. Na slici 4.1 prikazan je probni sto za ispitivanje obrtnih mašinskih elemenata, u ovom slučaju prilagođen za ispitivanje kliznih ležaja.

Probni sto za ispitivanje kliznih ležaja hidrodinamički podmazivanih se sastoji od tri glavna sistema: pogonski sistem, hidraulički sistem za ostvarivanje opterećenja kliznog ležaja i hidraulični sistem za podmazivanje kliznog ležaja.

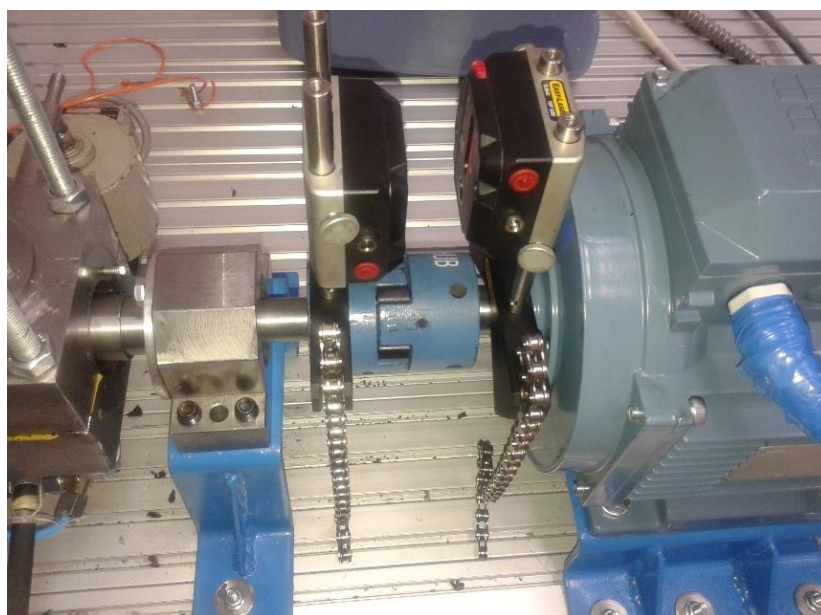
4.1.1 Pogonski sistem (DS)

Pogonski sistem pogoni vratilo. Pogonski sistem ispitnog uređaja se sastoji od asinhronog indukcionog motora (ABB, 400 V, 50 Hz, 3 KW, 1460 min⁻¹) koji je elastičnom spojnicom spojen sa vratilom. Vratilo je oslonjeno na dva kotrljajna ležaja, a ispitni uzorak - klizni ležaj je montiran između ta dva ležaja. Motor je opremljen sa encoder-om E720 za brojanje broja obrtaja motora.



Sl. 4.1 Probni sto za ispitivanje kliznih ležaja

Wireless/Point laser je korišćen za balansiranje vratila ispitnog uređaja sa vratilom motora kao što je prikazano na slici 4.2.



Sl. 4.2 Balansiranje vratila ispitnog uređaja sa vratilom motora

4.1.2 Hidraulički sistem za opterećivanja ležaja (HLS)

Za opterećenje ispitne čaure kliznog ležaja korišćen je hidraulički sistem za ostvarivanje opterećenja. Hidraulički sistem za opterećenje kliznog ležaja sastoji se iz sklopa elektromotora i pumpe (EM - 0.75 KW, 380 V, 1420 min⁻¹, 50 Hz; pumpa EATON PVQ10) koji je montirana na rezervoar od 30 l.

Dva hidraulična priključka postoje na hidrauličnom cilindru (H i L), koji omogućavaju vezu sa hidrauličnom pumpom i rezervoarom. Radna tečnost je ulje ISO VG 32. Hidraulični priključak H je

ulazni otvor hidrauličnog napajanja pod visokim pritiskom, a hidraulični priključak L je izlazni otvor vraćanja ulja u rezervoar. Hidraulični cilindar je u kontaktu sa senzorom radijalne sile (HBM U9C/10kN) smeštenim ispod njega. Dakle, hidraulični cilindar preko senzora sile ostvaruje opterećenje na ispitnu čauru kliznog ležaja.

4.1.3 Sistem podmazivanja ispitnog uzorka kliznog ležaja (LS)

Ispitni uzorak klizni ležaj je hidrodinamički podmazivan. Sistem podmazivanja dostavlja ulje za podmazivanje ležaja. Sistem podmazivanja sadrži sklop elektromotora i pumpe (ELP) (elektromotor: 1450 o/min, 90 W, 220 V, 50 Hz; pumpa AMGP-03C) montiranog na hidraulični rezervoar od 10 l. Ulje se dostavlja od ELP do kućišta ležaja preko hidrauličnih priključaka **e**, **f** i **g**, kao što je prikazano na slici 4.3. Hidraulični priključak **e** je za ulaz ulja u kućište ispitnog ležaja dok su priključci **f** i **g** veza sa rezervoarom mazivog ulja. Za nadgledanje pritiska ulja, sistem za podmazivanja poseduje jedan manometar postavljen na ulaznom vodu ulja. Ulje ISO VG 32, je korišćeno za podmazivanje ispitnog kliznog ležaja.

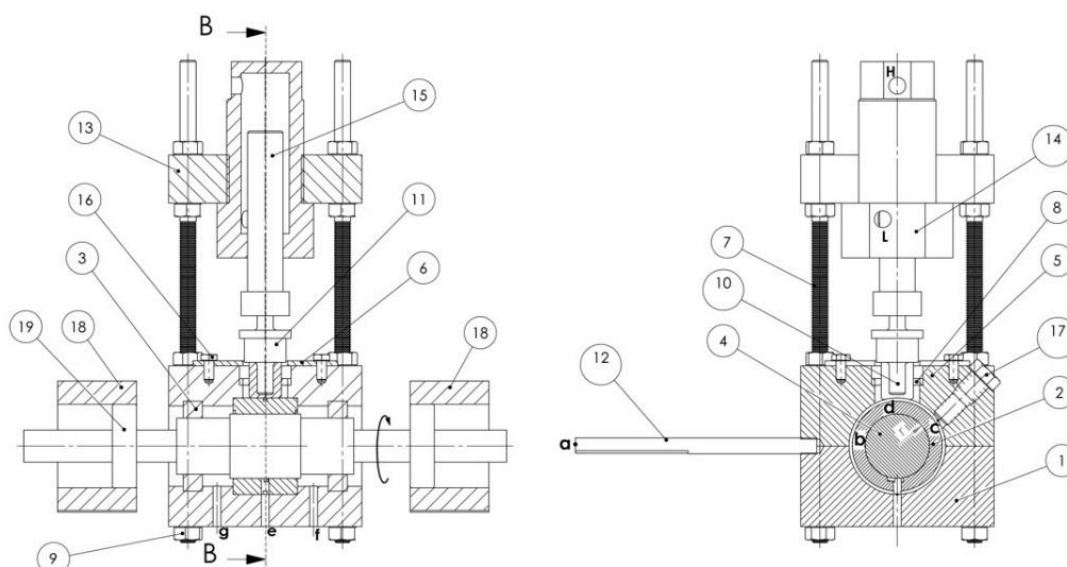
4.1.4 Sistem za ispitivanje kliznih ležaja

Za ispitivanje kliznih ležaja hidrodinamički podmazivanih razvijen je na Mašinskom fakultetu u Nišu ispitni uređaj. Za modeliranje ispitnog uređaja korišćen je CAD sistem Solid Works. U prilogu A disertacije, prikazani su crteži delova ispitnog uređaja.

Na slici 4.3 prikazana je posteljica kliznog ležaja (2) montirana na rukavac vratila (4) koji je radijalno i aksijalno fiksiran gornjim (5) i donjim (1) nosačem ispitnog uređaja. Kroz otvor gornjeg nosača (5) preko senzora sile (11), osovinice (10) se prenosi statička sila koja je indukovana hidrauličnim sistemom za opterećivanje i prenosi. Intenzitet sile se meri senzorom sile (11).

Obimna sila koja predstavlja frikcionu silu ležaja se meri pomoću poluge (12) koja je postavljena normalno na osu ležaja i senzor sile. Temperatura ležaja meri se termopar tip K (17). Rukavičasti termoparovi su smešteni unutar izbušenih otvora. Aktivni deo termopara je u kontaktu (region c) sa spoljnom površinom čaure. Pretpostavlja se da, pod tipičnim radnim uslovima, tačka maksimalne temperature ležaja je blizu temperature mernih tačaka.

Gornji i donji nosači su napravljeni od čelika. U sistemu za ispitivanje kliznih ležaja koji su hidrodinamički podmazivani su ugrađeni zaptivači (3,8) koji sprečavaju curenje ulja tokom rada sistema. Gornji i donji nosač ispitnog uređaja su pričvršćeni specijalno konstruisanom zavrtnajskom vezom (7,9).



ab	ruka sile davača	1	Donji nosač	11	Sila davač (senzor)
c	dodirna površina između termopar i čaure	2	čaura	12	arm
d	dodirna površina između čaure i radijalne snabdevanje opterećenja	3	Semering (zabtiivač vratila)	13	podrška cilindar
e	ulaz čaura mazivo	4	Vratila	14	cilinder
g, f	Izlaz čaura mazivo	5	Gomji nosač	15	klip
H	ulaz hidrodinamička pritisak za radijalno opterećenje	6	Gomji poklopac semering	16	Šraf (screw ISO 4017-M6X12-N)
L	izlaz hidrodinamička pritisak za radijalno opterećenje	7	navoj	17	termopar
		8	Zabtiivač sila davač	18	kuglicni lezaj kućešta
		9	Navrtka (Hexagon Nut ISO4032-M10-W-N)	19	kuglicni lezaj (ball bearing SKF-6304-8,SI,NC,8_68)
		10	radijalni snabdevanje opterećenje		

Sl. 4.3 Šema alata razvijenog za testiranje kliznih ležaja konfiguracija

4.2 Merni sistem

Merni sistem je tako projektovan i izveden da se može meriti više parametara prilikom testiranja nekog kliznog ležaja tj. ispitivanja triboloških svojstava željenog materijala posteljice kliznog ležaja.

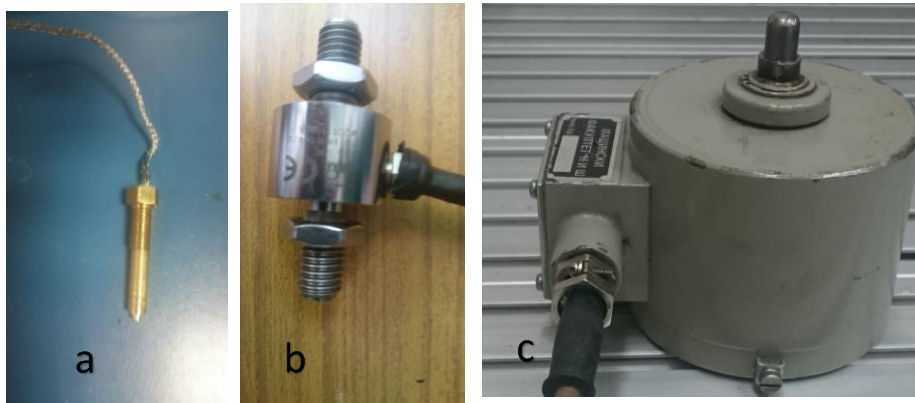
4.2.1 Termopar za merenje radne temperature

Radna temperatura ležaja je merena termoparovima u delu kućišta (17) na slici 4.3; ovi termoparovi su bili locirani u čauri. Tačka merenja je bila locirana na spoljnoj površini gornjeg ležišta (C) na slici 4.3. Pretpostavljalo se da, pod tipičnim radnim uslovima, tačka maksimalne temperature ležaja je blizu tačke merenja temperature.

4.2.2 Senzor sile za merenje radijalnog opterećenja

Prvi senzor sile (slika 4.4a) je korišćen za određivanje opterećenja ležaja koji je razvio cilindrični deo hidraulični sistem opterećenja (11) na slici 4.3. Prema specifikacijama, senzor sile imao je sledeće karakteristike: opseg merenja od 0 do 10 KN, bar, 1mV/V.

Drugi senzor sile (slika 4.4b) je bio korišćen za merenje sile reakcije usled momenta trenja u kliznom ležaju kao i kotrljajnim ležajima na koje se oslanja vratilo kao što je prikazano na slici 4.1 (davač sila trenje). Senzor sile je imao sledeće karakteristike: opseg merenja od 0 do 500 N, bar, 2m V/V.



Sl.4.4 Prenosnici korišćeni u merenju, a) termopar tip K, b) senzor sile za merenje radijalnog opterećenja ležaja, c) senzor sile za merenje sile reakcije uzrokovane momentum trenja

4.3 Metoda određivanja koeficijenata trenja

Koeficijent trenja i opterećenje kao funkcija vremena u dodiru dva realna tela je povezan Kulonovim jednačinama:

$$F_f(t) = \mu(t) \cdot F_N(t) \quad (4.1)$$

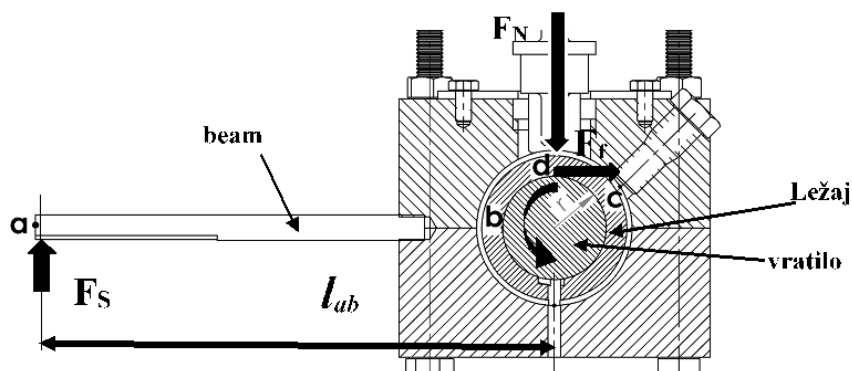
Kao funkcija vremena momenat trenja se izračunava kao proizvod normalne sile F_s (sile reakcije usled momenta trenja - izmerena sa senzorom sile) i dužine poluge l_{ab} između centra čaure i kontaktne tačke senzora sile (slika 4.5).

$$M_f(t) = F_s(t) \cdot l_{ab} = F_f(t) \cdot r \quad (4.2)$$

Na osnovu slike 4.5 i jednačina (4.1) i (4.2):

$$\mu(t) = \frac{M_f(t)}{r \cdot F_N(t)} = \frac{F_s(t) \cdot l_{ab}}{r \cdot F_N(t)} \quad (4.3)$$

gde je: M_f – momenat trenja [Nm], F_s - senzor sile reakcije [N], l_{ab} - dužina poluge [m]. Frakcionalna vrednost jednačine (4.3) programirana je na softverskom Lab VIEW programu da izračuna vrednost prelaznog koeficijenta trenja.



Sl. 4.5 Šema merenja sile trenja

4.4 Kontrola habanja ležaja

Habanje ležaja je važan pokazatelj njegovog kvaliteta, rezultat je delovanja određenih faktora koji se javljaju u radu kliznog ležaja.

Moguće habanje ležaja se određuje na osnovu trošenja i vremena rada ležaja. Dakle, u radu je na kraju svakog eksperimenta vršeno merenje ispitnog uzorka. Razlikom mase ispitnog uzorka pre i nakon ispitivanja određen je maseni stupanj habanja.

Razlika mase ispitnog uzorka pre i nakon ispitivanja merena je pomoću vage tačnosti 0,001 g tipa PRJ 1200-3N, proizvođača *Kern & Sohn GmbH* (Njemačka), (Slika 4.6).



Sl. 4.6 Vaga za merenje mase PRJ 1200-3N proizvođača *Kern & Sohn GmbH*

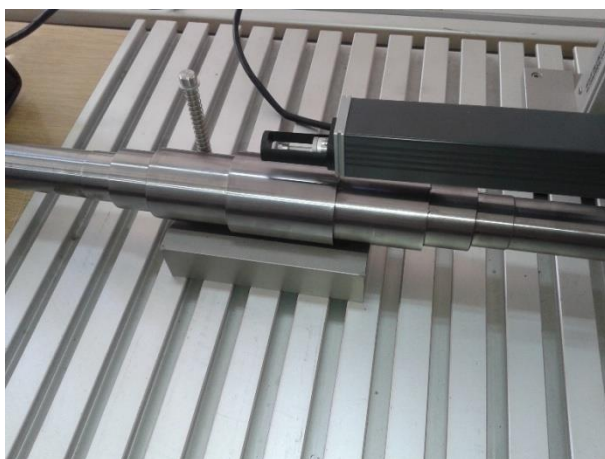
4.5 Merenje hrapavosti površina vratila i površina posteljice ležaja

Hrapavost obrađenih površina vratila i unutrašnje površine posteljice ležaja, u okviru ove disertacije, je merena pomoću mernog uređaja MITUTOYO SURFTEST SJ 301. Na uređaju je moguće odabrati različite merne funkcije, podesiti uslove merenja a mogu se odabrati parametri hrapavosti koje korisnik želi da prati. Rezultati merenja se mogu preneti na računar putem RS232 veze. Merenje i prikaz rezultata merenja može odgovarati DIN, ISO, ANSI ili JIS standardima.

Hrapavost – spoljna površina vratila i unutrašnja površina ležaja se meri posle svakog test procesa kao što je prikazano na slikama 4.7 i 4.8.



Sl. 4.7 Merenje hrapavosti jedne površine ležaja uz pomoć SURFTEST SJ-301, Mitutoyo



Sl. 4.8 Merenje hrapavosti jedne površine vratila uz pomoć SURFTEST SJ-301, Mitutoyo

4.6 Uticajni parametri prilikom ispitivanja na ispitnom uređaju

Uticajni faktori za rad kliznog ležaja hidrodinamički podmazivanog uz mirno opterećenje i stalni pogon, definisani su na osnovu sledećih parametara [64]

- F - opterećenje ležaja,
- n - broj obrtaja ispitnog uzorka,
- d - prečnik ležaja,

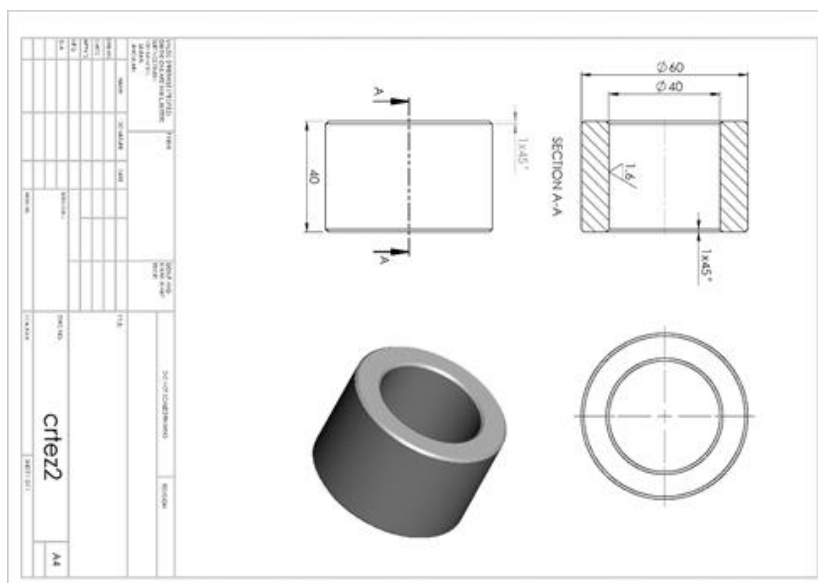
- D – unutrašnji prečnik posteljice,
- B - dužina rukavca odnosno ležaja,
- s - debljina sloja belog metala,
- materijal ispitnog uzorka posteljice ležaja,
- materijal rukavca vratila,
- hrapavost površine posteljice ležaja (Ra , Rz),
- hrapavost površine rukavca vratila,
- tvrdoća površine vratila.

4.7 Ispitni uzorci korišćeni u eksperimentu

Za ispitivanje su korišćena 4 ispitna uzorka ležaja, koji su dobijena nanošenja sloja belog metala tehnikom plazma metalizacije na čeličnu čauru od nerđajućeg čelika AISI 440C. Dimenzije ispitnih uzoraka kliznih ležaja su bile sledeće kao što je prikazano na slici 4.9:

- unutrašnji prečnik posteljice ležaja $D=40^{+0.05}$ mm,
- širina posteljice ležaja $B= 40$ mm,
- spoljni prečnik posteljice ležaja $D_s=60$ mm,
- relativni zazor ležaja $f=0.025$ mm,
- debljina sloja belog metala 3 mm,

Posteljica kliznog ležaja je od legure belog metala na bazi kalaja – Tegothenax V840 čiji su hemijski sastavi uzoraka (WM) prikazani na tabeli 4.1. Mehanička i fizička svojstva ležaja su data u tabeli 4.2.



Sl.4.9 Dimenzije uzoraka ležaja korišćenih u testu

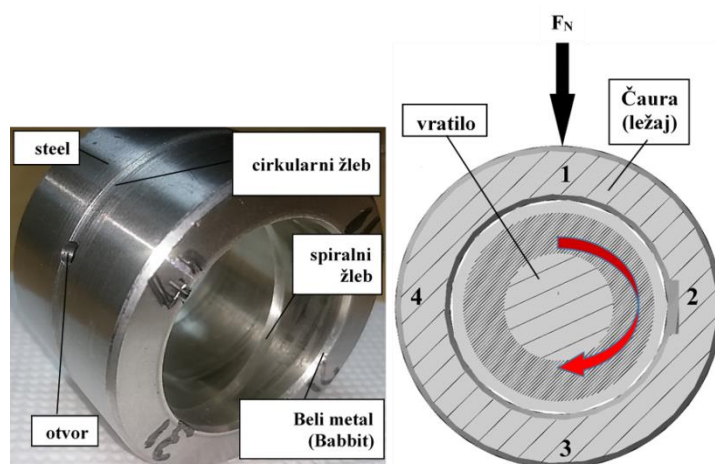
Tabela 4.1 Hemijski sastav materijala čaure AISI 440C i posteljice - beli metal TEGOTENAX V840

TEGOTENAX V840 (big sticks), in TKL NOVA TVORNICA KLIZNIH LEZAJEVA (SLIDING BEARING MANUFACTURING), CROATIA											
WM	Sn	Sb	Cu	As	Bi	Ni	Pb	Cd	Fe	Al	Zn
Stvarna vrednost%	88.7	7.6	3.7	0.009	0.002	0.003	0.008	0.010	0.009	0.000	0.002
Legura je bez olova i bez kadmijuma u skladu sa RoHS Regulacija (EU-Directive 2002/95/EC)											
AISI 440C	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S	-	-	-
	1.2	1	1	1	18	0.75	0.04	0.03	-	-	-
Mehaničke zahteve nekretnina za materijal u žarene uslovom da 1) AS2837 - 1986 440C i 2) ASTM A276-98b 440C											

Tabela 4.2 Mehanička i fizička svojstva ležaja

Legura beli metal na bazi kalaja – TEGOTENAX V840			Vratilo (AISI 440C)	
Tvrdoća	HB 10/250/180 (DIN ISO 4384 part 2)		20 [°C]	23
			50 [°C]	17
			100 [°C]	10
			150 [°C]	8
Young´s modulus	E	56500 [N/mm ²]	200(GPa)	
Gustina	ρ	7400 [kg/m ³]	7650(kg/m ³)	
Niža tačka topljenja	T_{lm}	233 [°C]	1038-1204°C	
Poisson koeficijent	ν	0.33	0.27-0.30	
Gornja tačka topljenja	T_{hm}	360[°C]	760°C	
Temperatura livenja	T_c	440 [°C]	1538-1604°C	

Unutrašnji deo ležaja opisan na slici 4.10 je napravljen od belog metala. U ležaju je izbušen otvor dimenzije $r = 1.5$ m u radijalnom pravcu zbog podmazivanja. Kružni žleb je takođe napravljen na spoljnoj površini čaure (širine 2 mm, dubine 0.5 mm) kako bi se osiguralo da mazivo ulje stigne do radijalnog otvora. Takođe, je urađen na unutrašnjoj površini spiralni žleb (širine 2 mm, prosečne dubine 30 μ m) kako bi se poboljšao proces podmazivanja između vratila i posteljice. Na svakom uzorku su označene četiri mesta na kojima se nakon svakog eksperimenta meri hrapavost površine čaure, kao što je prikazano na slici 4.10.



Sl. 4.10 Ležajna čaura koja se koristi u eksperimentu

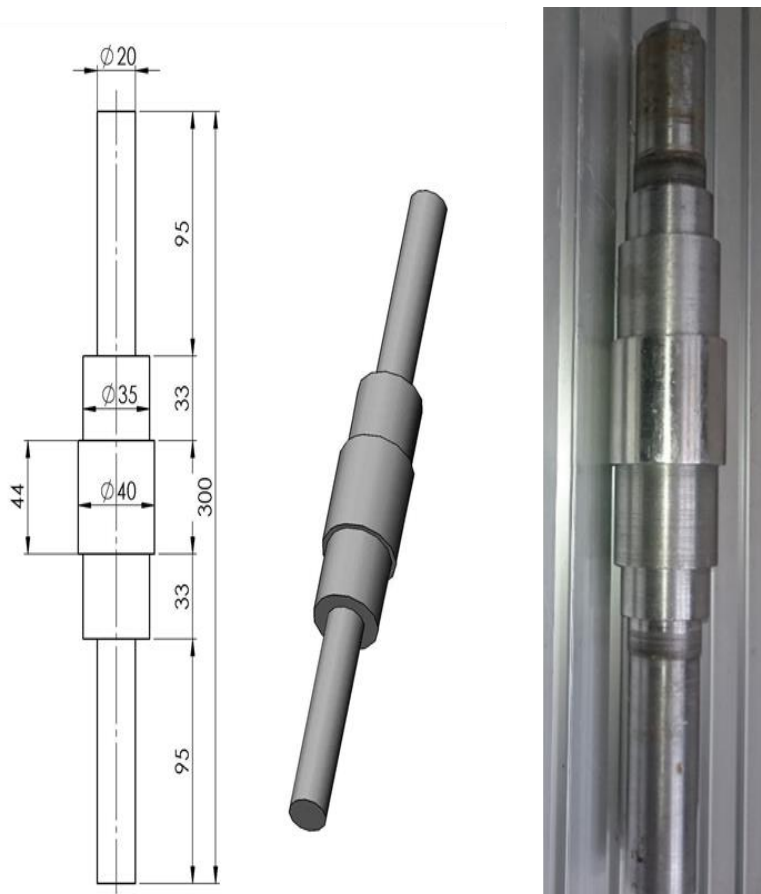
Za sva četiri uzorka je pre ispitivanja izmerena vrednost srednjeg aritmetičkog odstupanja mikroprofila Ra kliznih površina i njihove mase (tabela 4.3.).

Tabela 4.3 Srednje aritmetičko odstupanje mikroprofila Ra za ležaj i vratilo i njihove mase

No. ležaj	Masa (g)	Ra_1 (μm)	Ra_2 (μm)	Ra_3 (μm)	Ra_4 (μm)	Ra_v (μm)	(Ravnost) Straightness [mm]
0	482.86	0.55	0.44	0.48	0.38	0.4625	-
1	482.77	0.41	0.44	0.98	0.54	0.5925	-
2	482.35	0.36	0.37	0.22	0.35	0.325	-
3	481.92	0.31	0.36	0.51	0.35	0.3825	-
Vratilo	1936.37	0.24	0.25	0.21	0.22	0.23	0.026

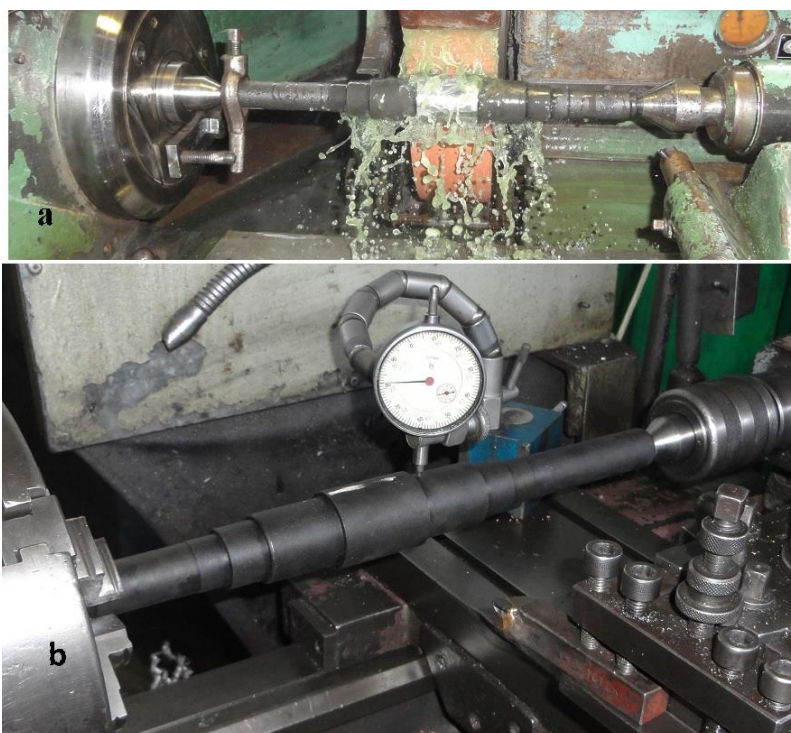
4.8 Vratilo korišćeno u eksperimentu

Za eksperimentalni uređaj, vratilo je napravljeno od nerđajućeg čelika AISI 440C čiji je hemijski sastav vratila prikazan na tabeli 4.1. Dimenzije vratila date su na slici 4.11.



Sl. 4.11 Oblik i dimenzije vratilo korišćenog u eksperimentu

Izvršena je termička obrada vratila – površinsko kaljenje, a zatim rukavac, deo vratila koji je u dodiru sa posteljom ležaja, obrađen brušenjem. Neke faze izrade vratila prikazane su na slici 4.12. Srednje aritmetičko odstupanje mikroprofila vratila je izmereno i dato u Tabeli 4.3.



Sl. 4.12 Izrada vratila brušenjem (a), provera centričnosti vratila (b)

4.9 Ulje za podmazivanje

Korišćeno je ulje za podmazivanje tipa ISO VG 32 [62]. Ono je optimalno legirano industrijsko ulje sa visokim nivoom performanse i sa širokim opsegom primene u čitavoj industriji. Karakteriše ga dobro ponašanje u pogledu viskoznosti i temperature, visoka otpornost na starenje i pouzdana zaštita od korozije. Pogodno je za podmazivanje vakuumskih pumpi (pumpi sa rotacionom lopaticom, difuznih pumpi, turbo pumpi) gde se traže mineralna ulja kao i za magličasto podmazivanje i kućište kolenastog vratila. U tabeli 4.4 su prikazane karakteristike ulja ISO VG 32.

Tabela 4.4 Karakteristike ulja ISO VG 32 korišćenog u eksperimentima

Karakteristike	Jedinica	Podaci	Standard
Gustina na 15°C	kg/m ³	875	EN ISO 12185
Viskozitet na 40°C	mm ² /s	32,7	DIN 51 562
Viskozitet na 100°C	mm ² /s	5,4	DIN 51 562
Indeks viskoznosti VI		98	DIN ISO 2909
Tačka paljenja (COC)	°C	220	DIN ISO 2592
Tačka stinjanja	°C	-24	DIN ISO 3016
FZG-Test A/8,3/90 stepen učitavanja oštećenja		12	DIN 51 354

4.10 Eksperimentalni plan za ispitivanje kliznih ležaja

Najznačajniji parametri ispitivanja obuhvataju broj obrtaja vratila n , odnosno brzinu klizanja v i radijalnu silu (opterećenje) F_N . Oba parametra su podjednako važni parametri za testiranje kliznih ležaja. Opterećenje ležaja u literaturi daje se najčešće kao specifično opterećenje ležaja, znači opterećenje preračunato na projekciju klizne površine kao što se može videti u jednačini (3.46)

opisanoj u poglavlju 3. Zato je veoma bitno uskladiti parametre opterećenja ležaja sa geometrijskim parametrima ležaja saglasno karakteristikama materijala ležaja koji se ispituje.

Eksperimenti u okviru ove disertacije su vršeni pod normalnim opterećenjem $F_N = 1000-4000$ N, sa brojevima obrtaja $n=1000-3000$ min⁻¹ i u stanju tečnog klizanja. Izabrani parametri za ispitivanje kliznih ležaja su dati u tabeli 4.5.

Testovi su se vršili u trajanju od 1 sata za merenje koeficijenta trenja i promenu temperature, a u trajanju od 5 sati za merenje promene habanja i hrapavosti. Pritisak mazivog ulja primenjenog na testiran ležaj je bio 4 bara. Test se vrši tek kada se obezbedi tečno podmazivanje kliznog ležaja odnosno ostvari hidrodinamičko plivanje ležaja.

Vrednosti parametara ispitivanja su se uvek držale pod kontrolom tokom svih testova. Svaki test se ponavljao najmanje tri puta. Ponavljanje je potrebno kako bi tokom statističke obrade podataka dobili verodostojnije podatke merenja tokom eksperimenta. Za statističku obradu podataka je korišćen softver Microsoft Office Excel.

Za akviziciju podataka u okviru eksperimentalnih ispitivanja triboloških karakteristika kliznog ležaja, koristi se personalni računar opremljen odgovarajućim hardverom (merno-upravljački interfejs) u sprezi sa softverom razvijenim u LabVIEW okruženju. Merni softver je razvijen korišćenjem LabVIEW

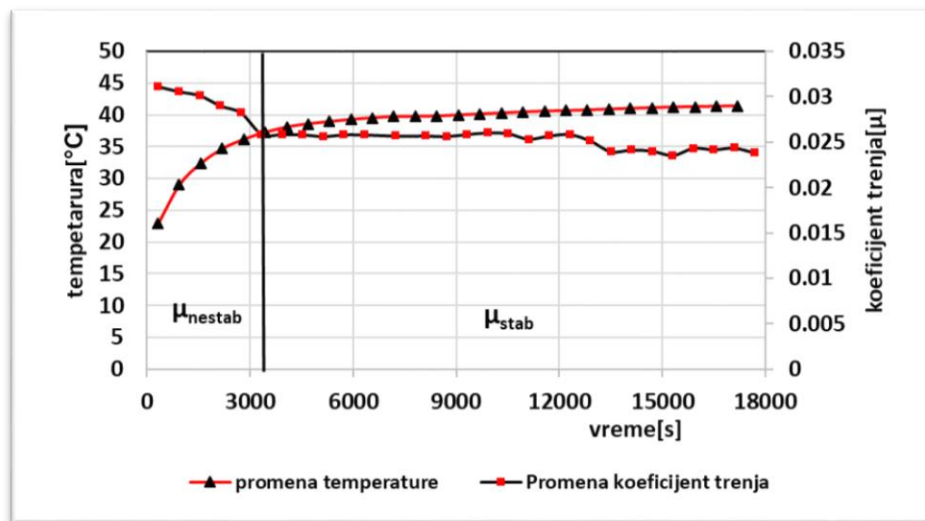
Tabela 4.5 Definisani parametri za ispitivanje kliznih ležaja

Materijal posteljice ležaja	Broj obrtaja vratila n [min ⁻¹]	Brzina klizanja v [m/sec]	Opterećenje ležaja F_N [N]	$p=F_N/(D \cdot b)$ [MPa]
Beli metal na bazi kalaja Tegotenax V840	1000	2.09	1000	0.625
			2000	1.25
			3000	1.875
			4000	2.5
	2000	4.2	1000	0.625
			2000	1.25
			3000	1.875
			4000	2.5
	3000	6.3	1000	0.625
			2000	1.25
			3000	1.875
			4000	2.5

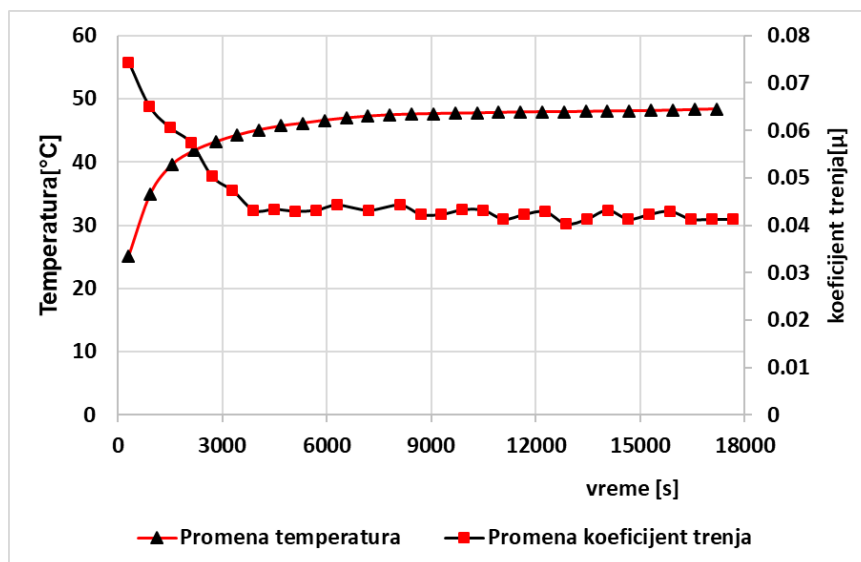
5. Rezultati i diskusija

5.1 Frikciono ponašanje

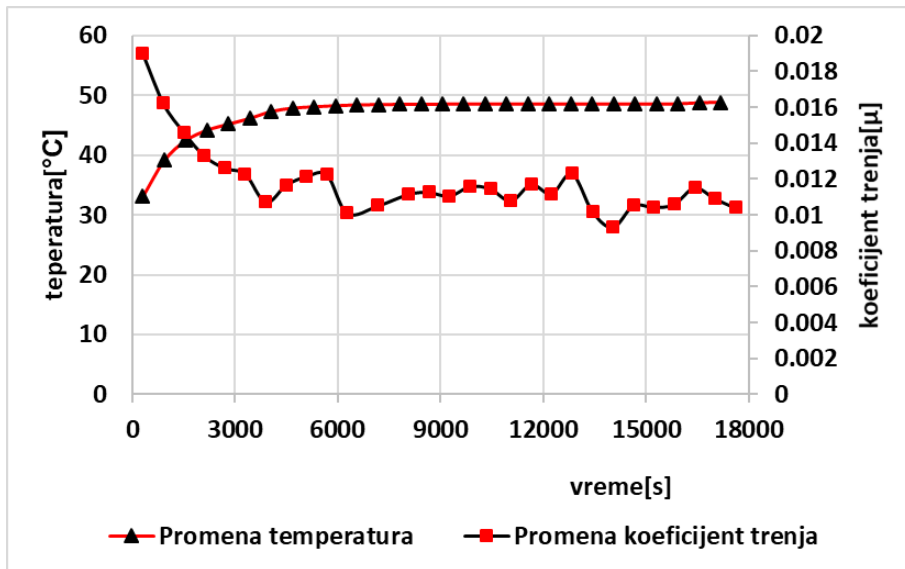
Na osnovu plana eksperimenta, datog u tabeli 4.5, izvršena su ispitivanja na probnim uzorcima kliznih ležaja sa prethodno definisanom geometrijom. Podaci dobijeni merenjem tokom eksperimenta su obrađeni programom Microsoft Office Excel-om. Na slikama od 5.1 do 5.12 su prikazane promene temperature i koeficijenta trenja sa promenom radijalnog opterećenja ležaja $F_N = 1000-4000$ N, i broja obrtaja $n = 1000-3000$ min⁻¹. Izvedena su 12 različita eksperimenta, a svaki je u proseku trajao oko 5 sati (18000 s).



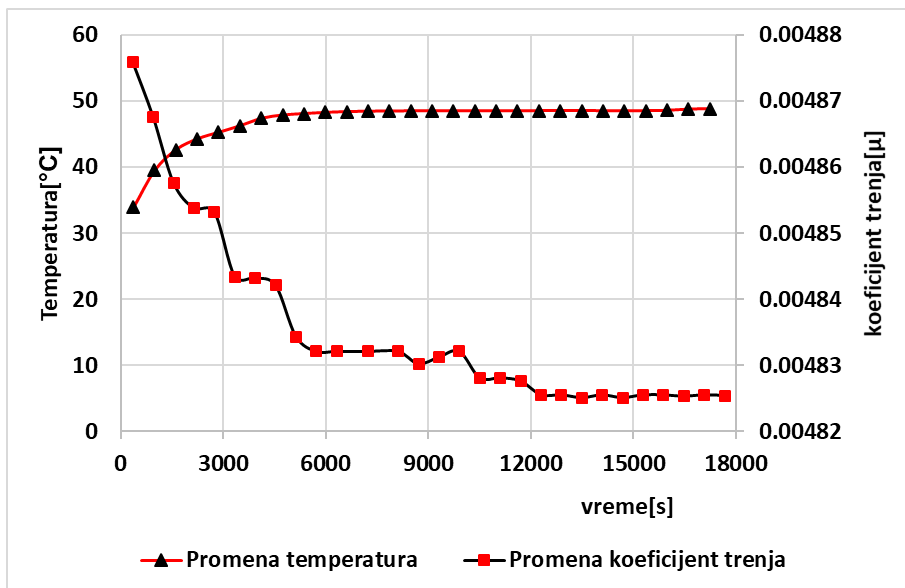
Sl. 5.1 Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme sa prosečnim radijalnim opterećenjem od 1000 N i brojem obrtaja 1000 min⁻¹



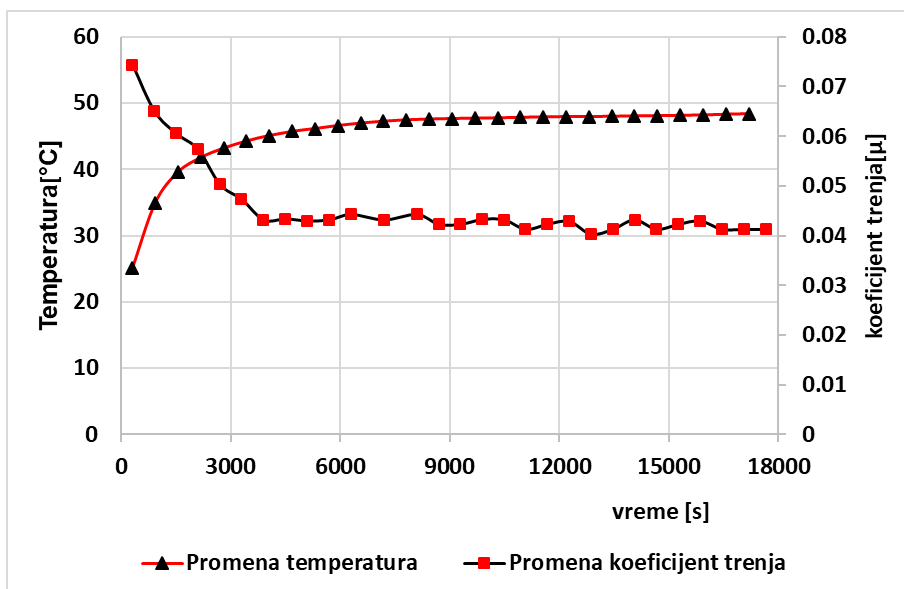
Sl. 5.2 Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radijalnim opterećenjem od 2000 N, brojem obrtaja 1000 min⁻¹,



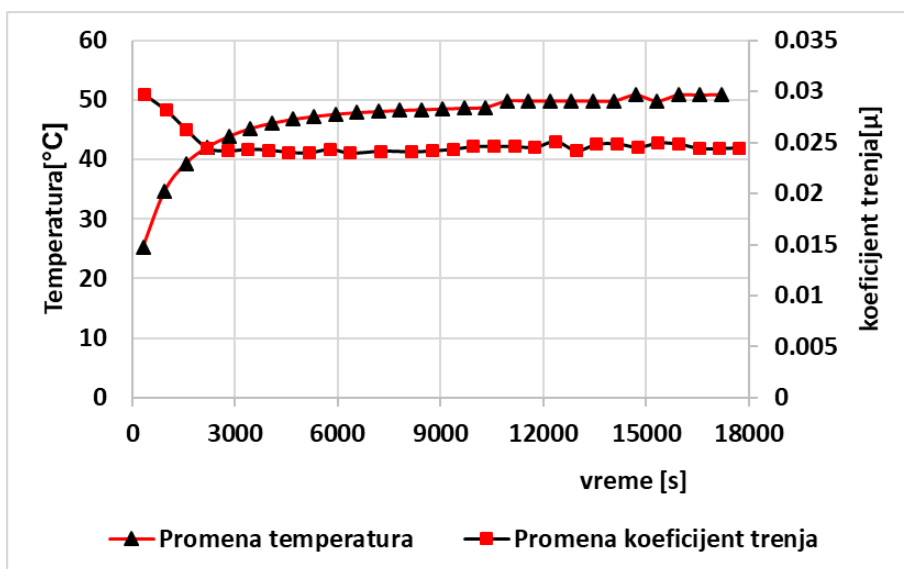
Sl. 5.3 Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radijalnim opterećenjem od 3000 N, broj obrtaja 1000 min^{-1} ,



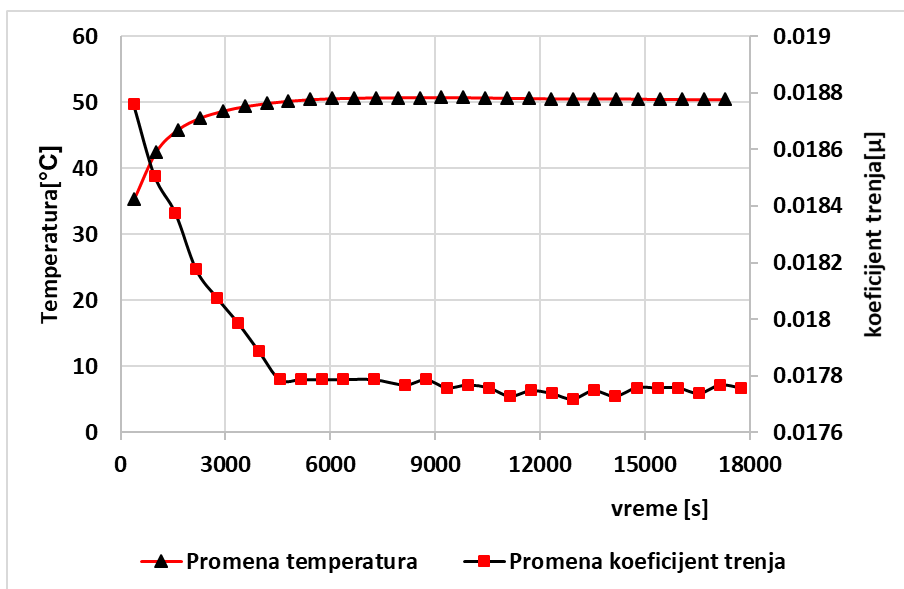
Sl. 5.4 Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radijalnim opterećenjem od 4000 N, broj obrtaja 1000 min^{-1}



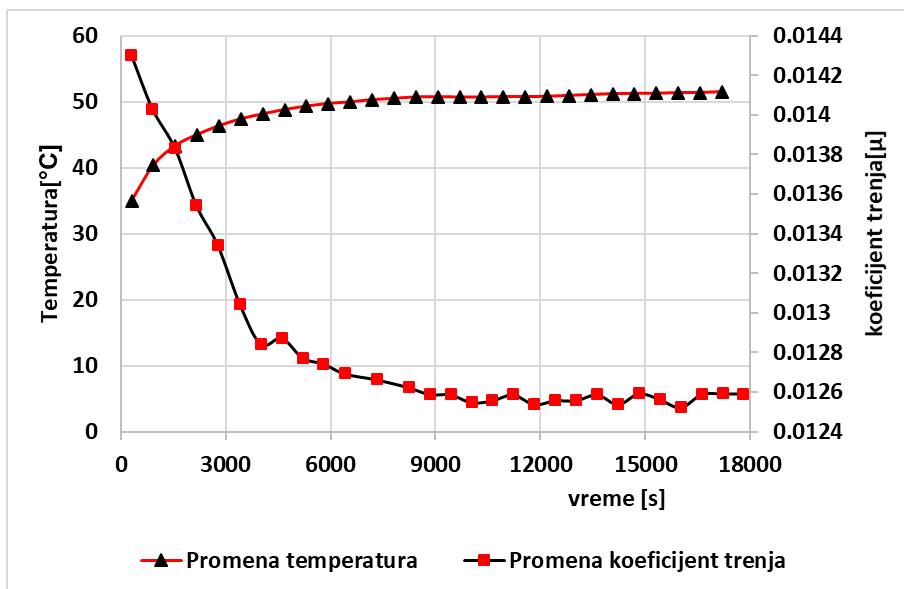
Sl. 5.5 Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radialnim opterećenjem od 1000 N, brojem obrtaja 2000 min^{-1}



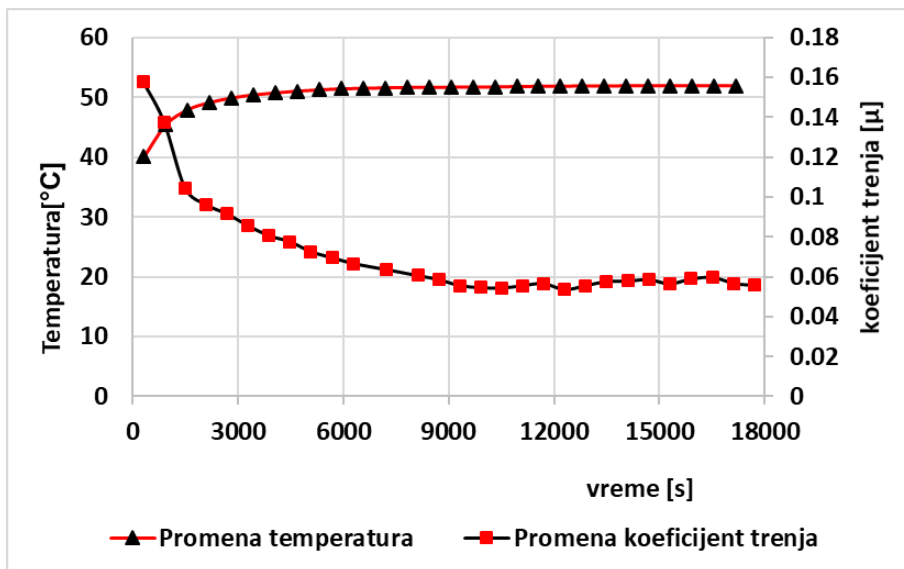
Sl. 5.6 Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radialnim opterećenjem od 2000 N, brojem obrtaja 2000 min^{-1}



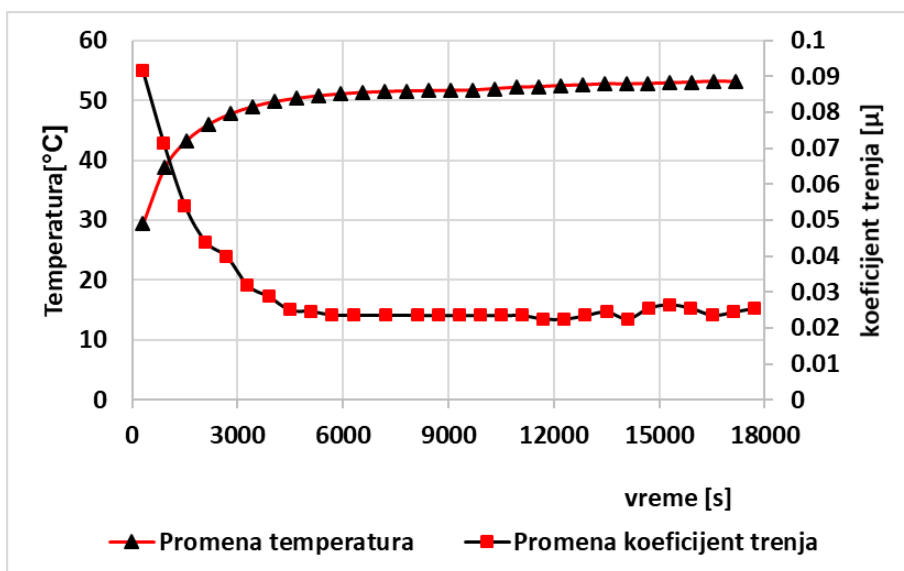
Sl. 5.7 Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radialnim opterećenjem od 3000 N, brojem obrtaja 2000 min⁻¹



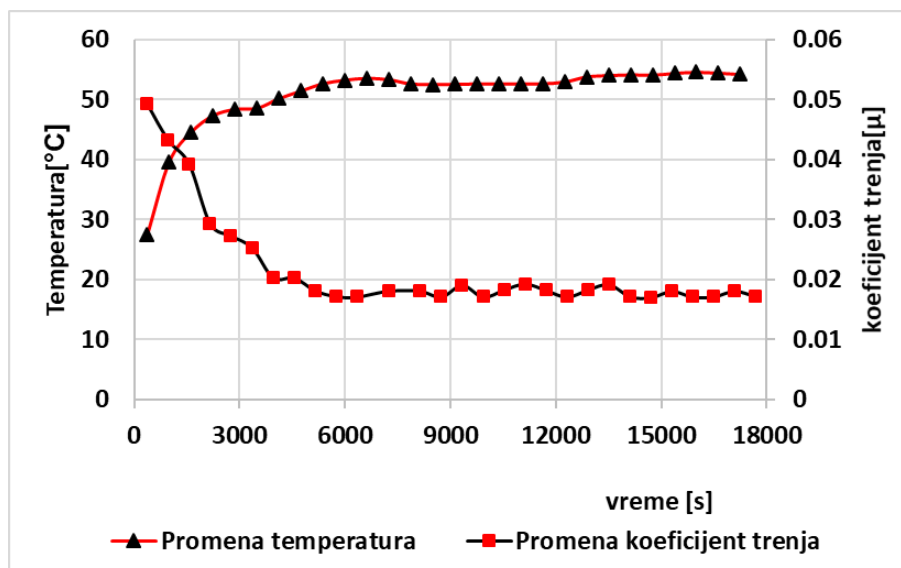
Sl. 5.8 Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radialnim opterećenjem od 4000 N, brojem obrtaja 2000 min⁻¹



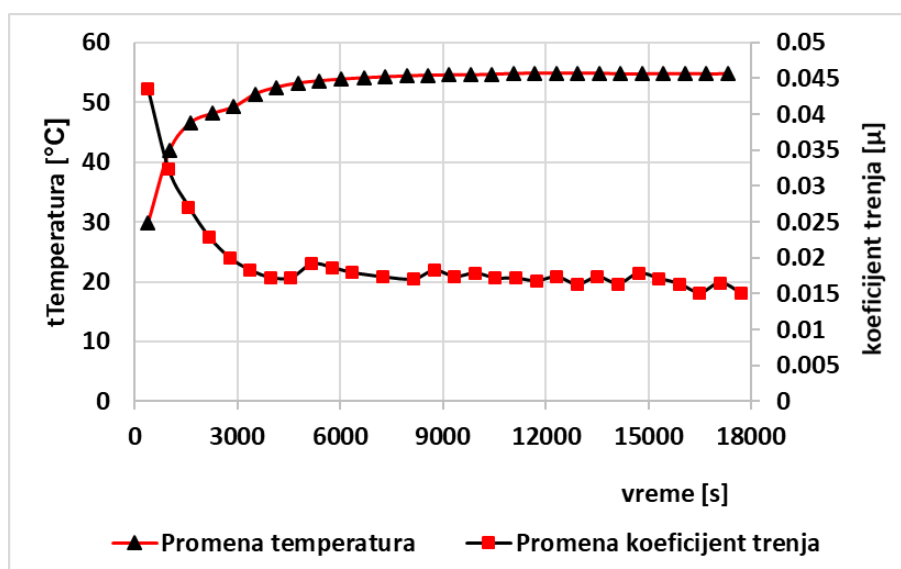
Sl. 5.9 Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radialnim opterećenjem od 1000 N, brojem obrtaja 3000 min^{-1}



Sl. 5.10 Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radialnim opterećenjem od 2000 N, brojem obrtaja 3000 min^{-1}



Sl. 5.11 Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radialnim opterećenjem od 3000 N, brojem obrtaja 3000 min⁻¹



Sl. 5.12 Promena koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme pod prosečnim radialnim opterećenjem od 4000 N, brojem obrtaja 3000 min⁻¹,

Sa prethodnih slika se mogu uočiti dve zone, zone stabilnog i zona nestabilnog stanja ležaja. U zoni nestabilnog stanja temperatura ležaja se povećava sa vremenom, dok u drugoj zoni, zoni stabilnog stanja temperatura ležaja je približno konstantna.

5.1.1 Frikciono ponašanje u procesima nestabilnih i stabilnih stanja

Prethodne slike ilustruju uticaj različitih vrednosti opterećenja ležaja i različitih broj obrtaja vratila na promenu temperature ležaja i na koeficijent trenja. Trenje klizanje dovodi do porasta temperature maziva usled trenja vratila sa mazivom i povremeno sa posteljicom ležaja. Kao što smo ranije pomenuli, prosečan koeficijent trenja je direktno proporcionalan dinamičkoj viskoznosti ulja (η) (videti jednačinu 3.47), dok porast temperature ulja dovodi do pada dinamičke viskoznosti što

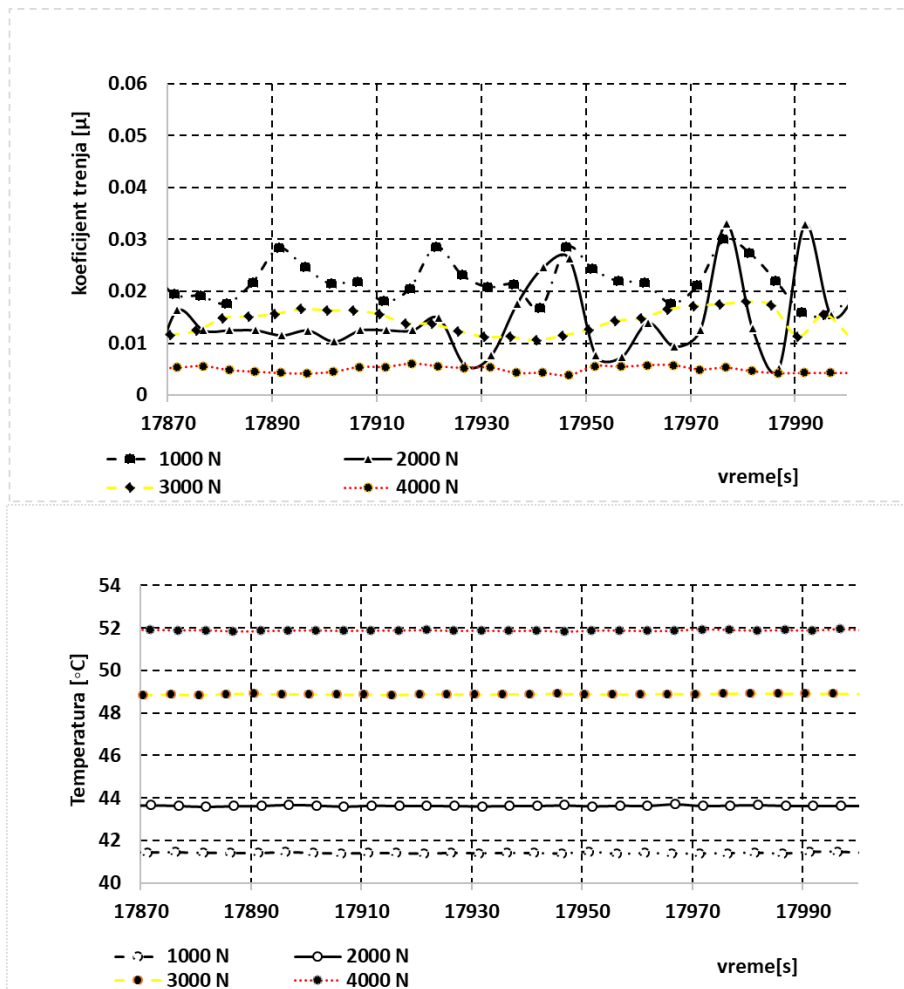
sigurno dovodi do pada koeficijenta trenja. Ovo predstavlja nestabilno stanje koje traje sve dok se ne postigne termička ravnoteža. Sa prethodnih slika se zaključuje da se uslovi ravnoteže postižu tek za 3000-4500 s za sve eksperimente, dok temperatura ulja u uslovima ravnoteže ne prelazi interval (38-55°C). Vreme neophodno da se dostigne stanje termičke ravnoteže zavisi od radijalnog opterećenja, broja obrtaja vratila, viskoznosti ulja i temperature okoline.

Promena koeficijenta trenja i temperature za sve eksperimente je prikazana u Tabeli 5.1. To znači da viskoznost ulja opada sa porastom temperature, a koeficijent trenja je direktno proporcionalan viskoznosti tako da koeficijent trenja opada u zoni nestabilnog stanja, a ostaje skoro stabilan u zoni stabilnog stanja što se vidi iz prethodne tabele. Najveće vrednosti koeficijenta trenja javile su se tokom termički nestabilnog stanja koje se javlja u periodu 3000-4500s od početka operacije, dok su se najniži koeficijenti trenja javili na temperaturnoj ravnoteži za klizne ležaje i mazivno ulje, tj. u stabilnom stanju kao što je prikazano u Tabeli 5.1.

Tabela 5.1 Stabilno i nestabilno stanje temperature i promena koeficijenta trenja sa promenljivim opterećenjima i rotacionom brzinom

Učestanost obrtanja n [min ⁻¹]	Radijalno opterećenje F_N [N]	Promena koeficijenta trenja u nestabilnom stanju μ_{unst} [-]	Prosečna vrednost koeficijenta trenja u stabilnom stanju [-]	Ukupna prosečna vrednost koeficijenta trenja [μ_{tot}]	Početna temperatura [°C]	Krajnja temperatura [°C]	Trajanje nestabilnog stanja [s]
1000	1000	0.0311 do 0.0224	0.0224	0.0259	22.8	41.4	0-3329
	2000	0.021 do 0.0145	0.0145	0.0168	28.29	43.63	0-3601
	3000	0.0138 do 0.0139	0.0139	0.0118	28.57	48.88	0-3750
	4000	0.007 do 0.0051	0.0051	0.0048	33.89	51.89	0-3931
2000	1000	0.05 do 0.0394	0.0394	0.0459	26.66	48.52	0-3683
	2000	0.039 do 0.0225	0.0225	0.0278	25.34	49.74	0-3868
	3000	0.023 do 0.0153	0.0153	0.0178	27.02	50.4	0-4108
	4000	0.016 do 0.0133	0.0133	0.0148	36.26	51.89	0-4137
3000	1000	0.12 do 0.059	0.059	0.0713	27.6	51.89	0-3958
	2000	0.051 do 0.0248	0.0248	0.0307	28.31	53.05	0-4194
	3000	0.035 do 0.021	0.0210	0.0217	29.59	54.19	0-4367
	4000	0.028 do 0.014	0.0140	0.0192	40.89	54.81	0-4383

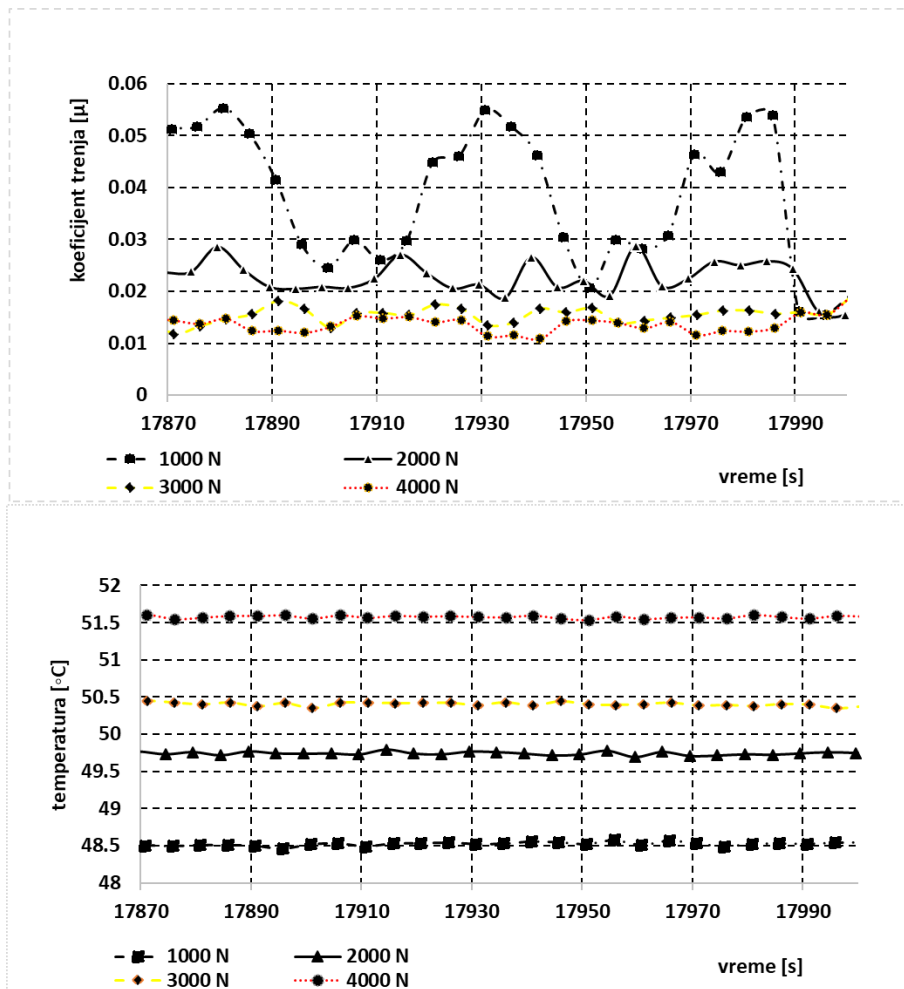
Slika 5.13 pokazuje promenu koeficijenta trenja i temperature u odnosu na vreme, za operaciju u stabilnom stanju pod radijalnim opterećenjem od 1000, 2000, 3000 i 4000 N, pri broju obrtaja od 1000 min⁻¹. Temperatura ležaja ostaje konstantna dok koeficijent trenja varira u malom intervalu. Npr. pri opterećenju od 1000 N temperatura ležaja je 41.4 °C, a prosečna vrednost koeficijenta trenja je μ_{av} = 0.0224. Koeficijent trenja pokazuje slično ponašanje i za ostala radijalna opterećenja od 2000, 3000 i 4000 N pri konstantnoj broj obrtaj od 1000 min⁻¹, i to: 0.0145, 0.0139, i 0.005, respektivno. Temperatura ležaja ostaje približno konstantna na 43.63, 48.88 i 51.89 °C, respektivno.



Sl. 5.13 Promena temperature ležaja i koeficijenta trenja pri broju obrtaja 1000 min^{-1} za različita opterećenja u stabilnom stanju

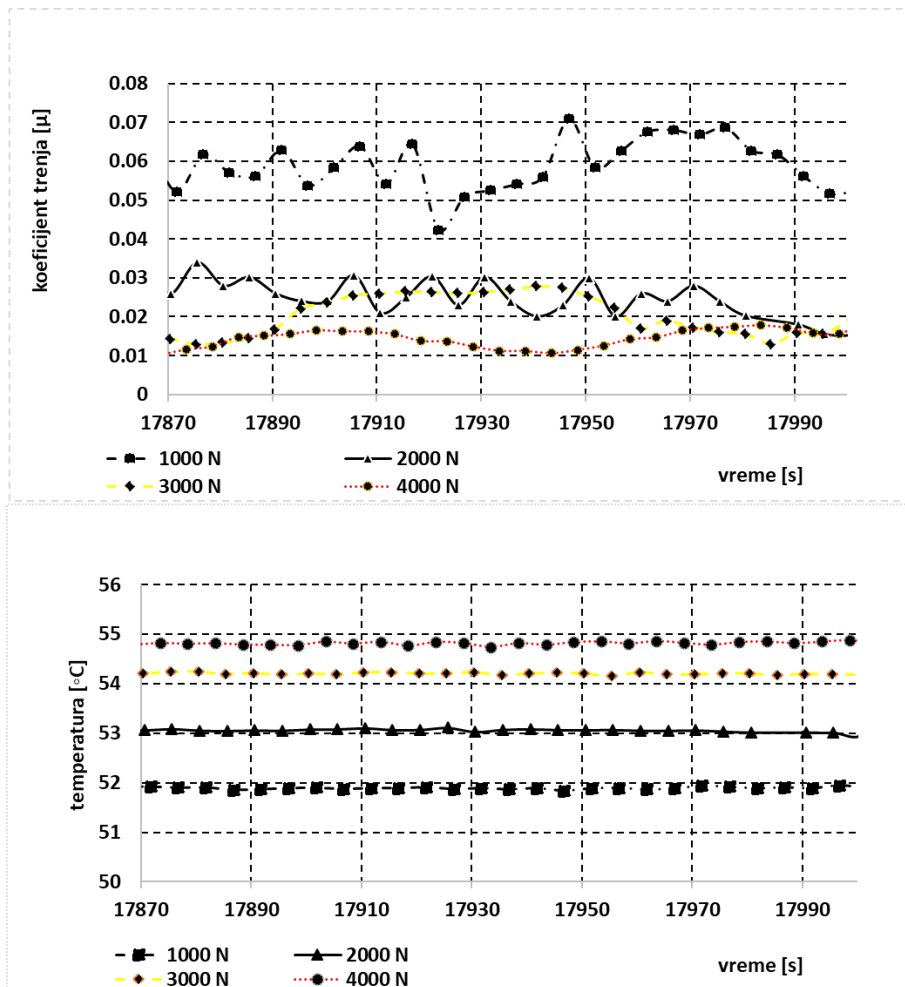
Na slici 5.14 data je promena temperature ležaja i koeficijenta trenja, za slučaj radijalnog opterećenja 1000, 2000, 3000 i 4000 N i pri broj obrtaj od 2000 min^{-1} , Koeficijent trenja ima približno konstantne prosečne vrednosti 0.0394, 0.0225, 0.0153 i 0.0133, respektivno, a temperatura ležaja ostaje konstantna 48.52, 49.74, 50.4 i 51.89 °C, respektivno. Najveće vrednosti temperature i koeficijenta trenja su registrovane pri broju obrtaja vratila od 3000 min^{-1} kao što je prikazano na slici 5.15. Maksimalna prosečna vrednost temperature uočena pri radijalnom opterećenju 4000 N koja dostiže 54.81 °C, a maksimalna prosečna vrednost koeficijenta trenja 0.0594 javlja se pri radijalnom opterećenju od 1000 N.

Jasno je da je koeficijent trenja u procesu stabilnog stanja mnogo stabilniji, manje oscilira u vrednostima pri porastu radijalnog prosečnog opterećenja. To je sigurno povezano sa stabilnošću i konstantnom temperaturom.

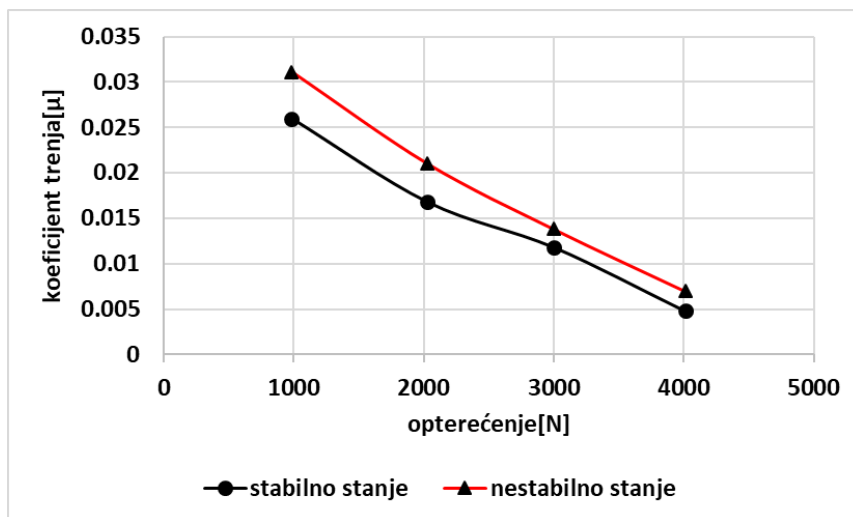


Sl. 5.14 Promena temperature ležaja i koeficijenta trenja pri broju obrtaja 2000 min^{-1} za različita opterećenja u stabilnom stanju

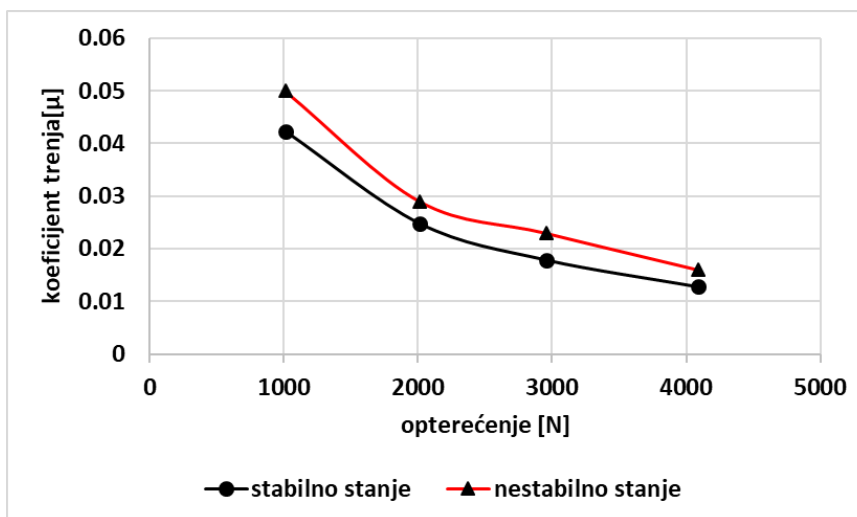
Vrednosti koeficijenta trenja koje su se javile tokom operacije nestabilnog procesa su veće od vrednosti koeficijenta trenja koje su se javile tokom procesa stabilnog stanja kao što se vidi na slikama 5.16, 5.17 i 5.18. Slike pokazuju promenu koeficijenta trenja u odnosu na radialno opterećenje u procesima stabilnih i nestabilnih stanja.



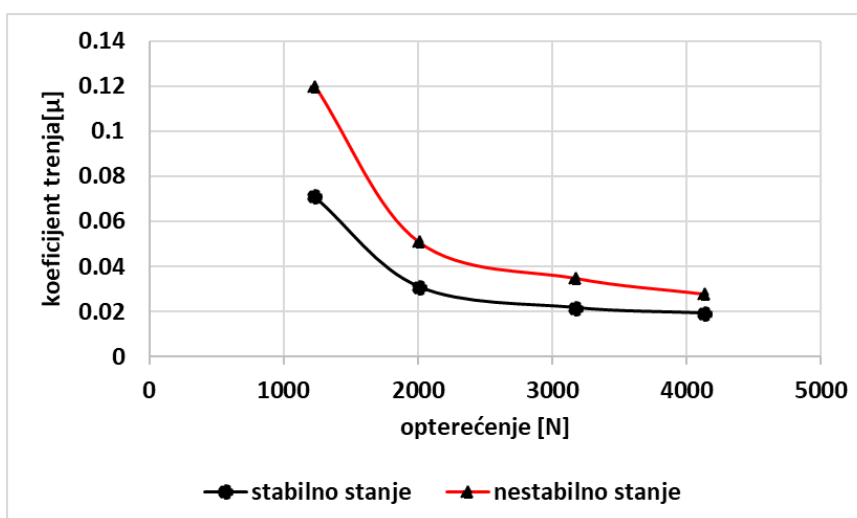
Sl. 5.15 Promena temperature ležaja i koeficijenta trenja pri broj obrtaj 3000 min^{-1} za različita opterećenja u stabilnom stanju



Sl. 5.16 Promena koeficijenta trenja za slučaj procesa stabilnog i nestabilnog stanja pri broju obrtaja 1000 min^{-1}



Sl. 5.17 Promena koeficijenta trenja za slučaj procesa stabilnog i nestabilnog stanja pri broju obrtaja 2000 min^{-1}



Sl. 5.18 Promena koeficijenta trenja za slučaj procesa stabilnog i nestabilnog stanja pri broju obrtaja 3000 min^{-1}

5.1.2 Gubici snage usled trenja u procesima nestabilnih i stabilnih stanja kod kliznih ležaja

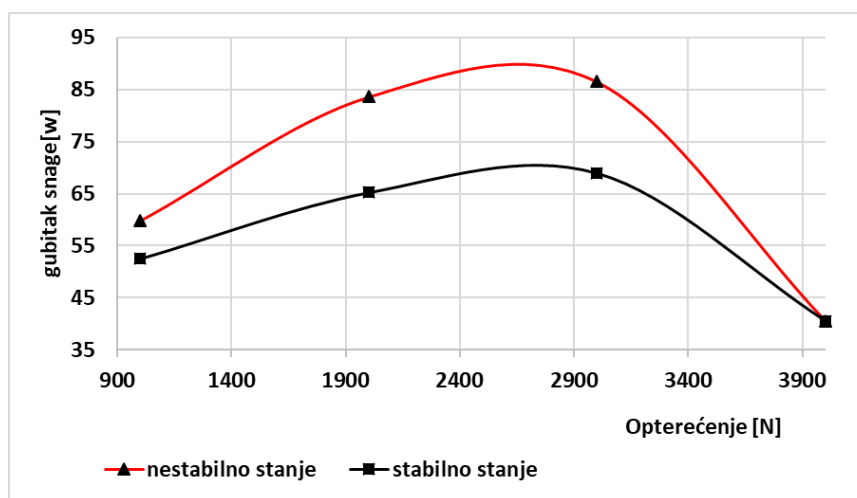
Zbog savlađivanja otpora trenja u ležaju određena količina mehaničke energije pretvara se u toplotu. Na osnovu eksperimentalnih parametara koji su korišćeni za sprovođenje eksperimenata i na osnovu dobijenih koeficijenata trenja sračunati su gubici snage usled trenja dati u tabeli 5.2. Slika 5.19 pokazuje funkciju snage trenja (gubitak snage usled trenja) sa pozitivnim nagibom koji opisuje snagu trenja kao funkciju specifičnog opterećenja (radijalne sile), rastuću snagu trenja sa povećanjem vertikalnog opterećenja do postizanja opterećenja od 2800 N slika 5.19, a zatim se smanjuje snaga trenja bez obzira na povećanje vertikalnog opterećenja tj, negativni deo nagib. U oba slučaja, tj. i kod stabilnih i nestabilnih stanja, koeficijent trenja je bio relativno visok pri

opterećenjima ležaja 1000 N i 2000 N u poređenju sa relativno niskim koeficijentom trenja za slučaj opterećenja 3000 N i 4000 N, kao što se vidi u tabeli 5.2.

Ove relativno niske vrednosti koeficijenata trenja pokazuju da je ležaj radio u uslovima potpunog podmazivanja (gde pada gubitak trenja), a ne u uslovima mešovito ili graničnog podmazivanja (Stribeckova kriva 3.7). Prosečni gubici snage usled trenja u situaciji stabilnog stanja su uvek bili niži od prosečnih gubitaka snage usled trenja kod nestabilnih stanja, zbog više temperature ulja što dovodi do niže viskoznosti, tj. niskog koeficijenta trenja.

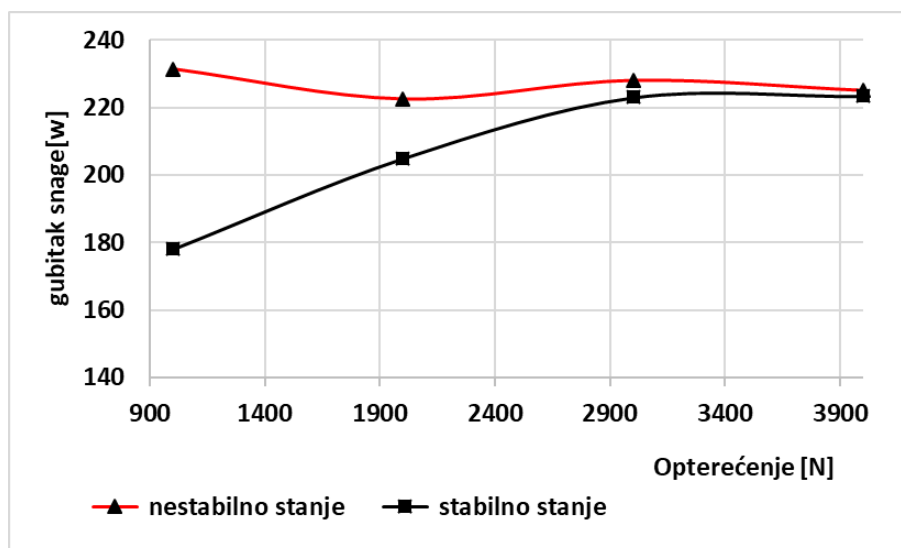
Tabela 5.2 Operacioni parametri korišćeni za skup eksperimenata trenja za stabilne i nestabilne procese

Broj obrtaja n [o/min]	Brzina klizanja $v=d \cdot \pi \cdot n/60$	Radijalno opterećenje F_N [N]	Prosečan koeficijent trenja u nestabilnom stanju μ_{nestab} [-]	Prosečan koeficijent trenja u stabilnom stanju μ_{stab} [-]	ukupna prosečna vrijednost koeficijenta trenja μ_{ukup} [-]	Prosečna snaga trenja u nestabilnom stanju P_{luns} [W]	Prosečna snaga trenja u stabilnom stanju P_{lst} [W]	Ukupna prosečna snaga trenja in P_{lukup} [W]
						$P_{loss} = \mu \cdot F_N \cdot v$		
1000	2.09	1000	0.0286	0.0251	0.0259	59.774	52.459	54.131
	2.09	2000	0.02	0.0156	0.0168	83.6	65.208	70.224
	2.09	3000	0.0138	0.011	0.0118	86.526	68.97	73.986
	2.09	4000	0.00485	0.004	0.0048	40.128	40.128	40.128
2000	4.2	1000	0.0551	0.0424	0.0459	231.42	178.08	192.78
	4.2	2000	0.0265	0.0244	0.0278	222.6	204.96	207.48
	4.2	3000	0.0181	0.0177	0.0178	228.06	223.02	224.28
	4.2	4000	0.0134	0.0133	0.0148	225.12	223.44	215.04
3000	6.3	1000	0.10394	0.059	0.0713	654.822	371.7	449.19
	6.3	2000	0.0483	0.0239	0.0307	608.58	301.14	386.82
	6.3	3000	0.0318	0.0178	0.0217	601.02	336.42	410.13
	6.3	4000	0.0247	0.0171	0.0192	622.44	430.92	483.84



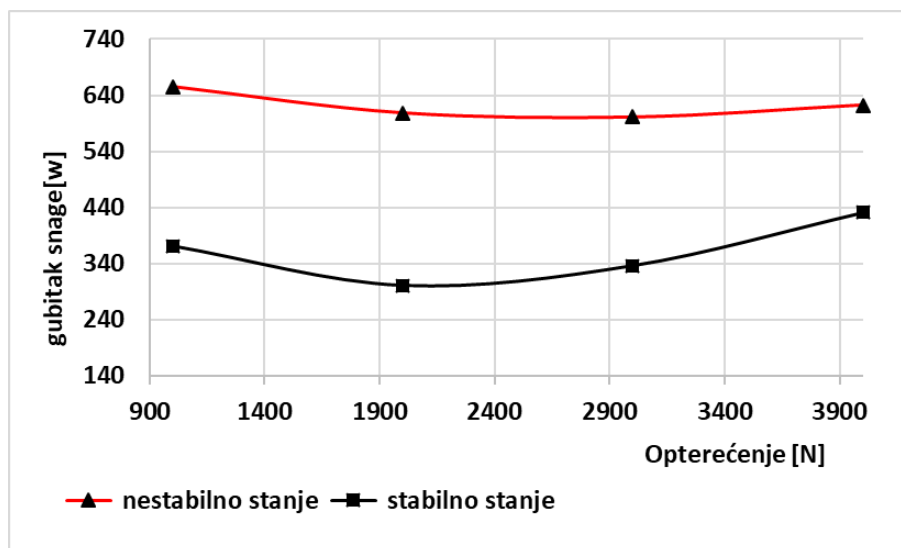
Sl. 5.19 Komparativna analiza gubitka snage kod stabilnih i nestabilnih procesa kod ležaja od belog metala pri učestanosti obrtanja od 1000 min^{-1}

Povećanje koeficijenta trenja sa povećanjem brzine klizanja može se javiti usled promene u stopi smicanja koje mogu uticati na karakteristike viskoziteta materijala za podmazivanje. Povećanjem brzine klizanja povećava se trenje usled uvećanja tangencijalnog napona (τ) između vratila i uljnog sloja, tj. Za isti vremenski period t uvećava se smicanje uljnog sloja sa povećanjem broja obrtaja koji dovodi do povećanja snage trenja slika 5.19.



Sl. 5.20 Komparativna analiza gubitka snage usled trenja kod stabilnih i nestabilnih procesa pri učestanosti obrtanja od 2000 min^{-1}

Povećanje brzine klizanja stvara više trenja usled povećanja put klizanja za isti period vremena na kojem se vrši trenje kod smicanja uljnog sloja. Ovaj efekat je očigledan na obe slike 5.20 i 5.21, gde se koeficijent trenja stalno povećava kada se broj obrtaj povećava, iako se koeficijent trenja smanjuje sa rastućim opterećenjem za obe situacije (stabilno i nestabilno stanje), mada ima veću vrednost kod nestabilnog stanja nego kod stabilnog stanje za sva radijalna opterećenja. Efekat specifičnog radijalnog opterećenja na prosečni koeficijent trenja u nestabilnom stanju bio je jači nego kod stabilnog stanja za sve radijalna opterećenja (1000-4000 N).

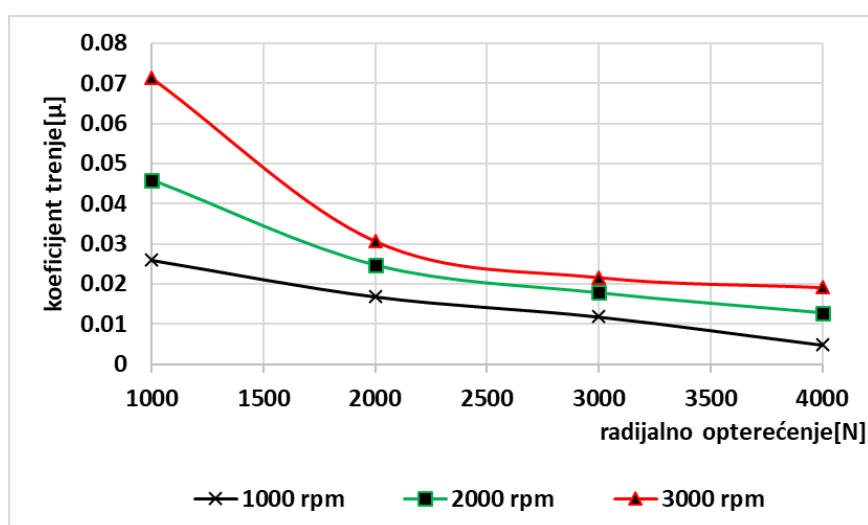


Sl. 5.21 Komparativna analiza gubitka snage usled trenja kod stabilnih i nestabilnih procesa pri učestanosti obrtanja od 3000 min^{-1}

Slike 5.19, 5.20 i 5.21 ukazuju da su uslovi podmazivanja pri učestanosti obrtanja od 1000 min^{-1} i 2000 min^{-1} i radijalnom opterećenju od 1000 N i 2000 N predstavljaju granično do mešovitog podmazivanja usled relativno visokog prosečnog koeficijenta trenja dok su drugi slučajevi rada ležaja u eksperimentalnim uslovima ispitivanja odgovarali potpunom podmazivanju tj, hidrodinamičkom podmazivanju.

5.1.3 Frikciono ponašanje pri promeni radijalnog opterećenja i učestanosti obrtanja

Na slici 5.22 data je promena koeficijenta trenja u funkciji radijalnog opterećenja za brojeve obrtaja rukavca vratila definisanog planom eksperimenta (1000 , 2000 i 3000 min^{-1}), dok je na slici 5.23 data promena koeficijenta trenja u funkciji broja obrtaja za opterećenja ležaja definisana planom eksperimenta (1000 , 2000 , 3000 i 4000 N).

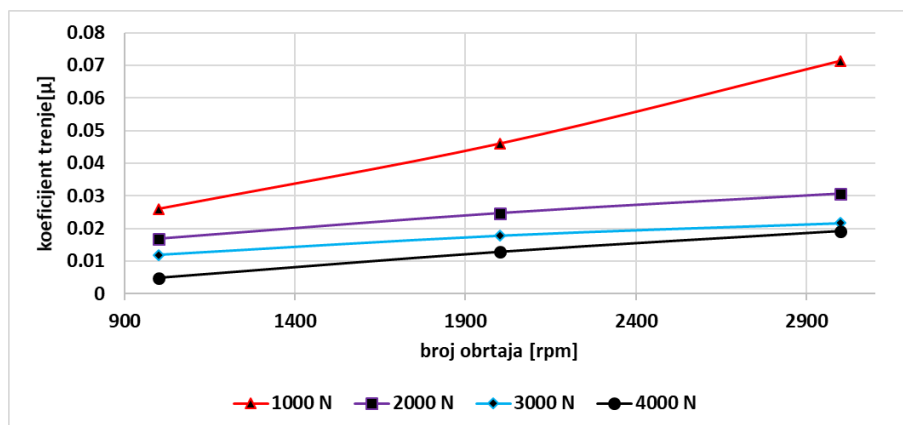


Sl. 5.22 Promena prosečnog totalnog koeficijenta trenja u funkciji opterećenja ležaja za različite učestanosti obrtanja

Pri eksperimentalnom ispitivanju kliznog ležaja napravljenog od belog metala na kalajnoj osnovi uočeno je da prosečna vrednost koeficijenta trenja opada pri povećanju radijalnog opterećenja za slučaj svih učestanosti obrtanja. Najveća vrednost koeficijent trenja 0.07 se dogodila pri opterećenju od 1000 N i broju obrtaja 3000 min^{-1} , dok se najniža vrednost koeficijenta trenja 0.023 javili pri najvećem opterećenju, tj. 4000 N i broju obrtaja vratila od 1000 min^{-1} .

Promena vrednosti koeficijenta trenja poprima oblik konvergirajućih krivih prema rastućem radijalnom opterećenju pri rastućim učestanostima obrtanja vratila od 1000, 2000 i 3000 min^{-1} kao što je prikazano na slici 5.22. Trenje između vratila, posteljice ležaja i maziva izaziva temperaturni porast maziva što rezultira u opadanju napona na smicanje maziva, što sa svoje strane, dovodi do snižavanja viskoziteta i otud snižavanja koeficijenta trenja kao što je prikazano u jednačini 3.47.

Slika 5.23 prikazuje odnos između koeficijenta trenja i broja obrtaja vratila. Na slici se jasno uočava da se koeficijent trenja μ povećava sa povećanjem broja obrtaja vratila i to za sve slučajeve opterećenja ležaja.



Sl.5.23 Promena prosečnog totalnog koeficijenta trenja u funkciji broja obrtaja za različita opterećenja ležaja

Zavisnost između koeficijenta trenja i broja obrtaja rukavca vratila je takozvana Stribekova zavisnost. Na početku obrtanja između rukavca vratila i posteljice javlja se mešovito trenje, pa je koeficijent trenja veliki. Sa povećanjem broja obrtaja smanjuje se koeficijent trenja, tako da najmanju vrednost ima u trenutku ostvarivanja hidrodinamičkog plivanja – tečnog trenja.

Daljim povećanjem broj obrtaja iznad n_{gr} , što je slučaj eksperimentalnog istraživanja u ovoj disertaciji, povećava se i koeficijent trenja, što je posledica otpora trenja koji se javlja u samom ulju. U tabeli 5.3 date su vrednosti koeficijenta trenja za uslove eksperimentalnog ispitivanje ležaja, za izabrane vrednosti opterećenja ležaja i učestanosti obrtanja.

Tabela 5.3 Prosečne vrednosti koeficijenta trenja dobijene eksperimentalnim istraživanjem

Opterećenje ležaja (F_N) [N]	Učestanost obrtanja n [min ⁻¹]	Ukupan prosečan koeficijent trenja (μ_{avuku}) [-]
1000	1000	0.0259
	2000	0.0459
	3000	0.0713
2000	1000	0.0168
	2000	0.0247
	3000	0.0307
3000	1000	0.0118
	2000	0.0178
	3000	0.0217
4000	1000	0.0048
	2000	0.0128
	3000	0.0192

5.2 Upoređenje eksperimentalnih i analitičkih rezultata vrednosti koeficijenata trenja dobijenih primenom Raimondovih i Boidovih dijagrama

Raimond i Boid su dobili numeričko rešenje Rejnoldsove jednačine 3.13 i redukovali je na formu dijagrama koja daje rešenja za klizne ležaje svih veličina. Svi dijagrami se baziraju na bezdimenzionalnim parametrima kao funkcijama ležaja ili Somerfildov broj S koji je takođe bezdimenzionalna veličina. U ovom radu se koristi jedan od Raimondovih i Boidovih dijagrama, koji omogućuje određivanje koeficijenta trenja kod radijalnih kliznih ležaja hidrodinamički podmazivanih.

U sledećem primeru, je prikazano određivanje analitičke vrednosti koeficijenta trenja uz pomoć Raimondi i Bojdovih dijagrama.

Primer:

Korišćeno ulje ima dinamičku viskoznost $\eta = 28.37$ mPas na 40 °C,

Radijalno opterećenje $F_N = 1000$ N

Prečnik ležaja $d = 40$ mm

Dužina posteljice ležaja $l = B = 40$ mm

Specifično opterećenje ležaja $p = \frac{F_N}{l \cdot d} = \frac{1000}{40 \cdot 40} = 0,625$ MPa

Učestanost obrtanja $n = 1000 \text{ min}^{-1} = 1000/60 = 16.7 \text{ s}^{-1}$

Poluprečnik rukavca vratila ($r=d/2$) = 20 mm,

Konstrukciona karakteristika ležaja - odnos $l/d = 40/40 = 1$

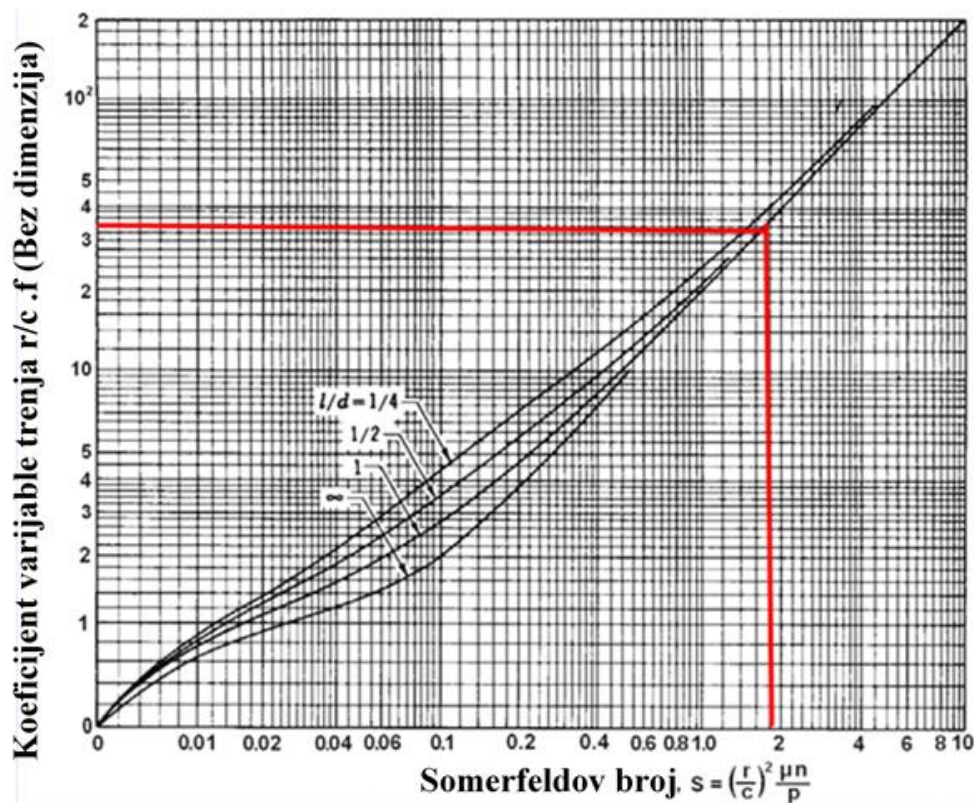
Zazor ($c=(D-d)/2$) = 0.0125 mm,

Sommerfeld broj $S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \cdot \left(\frac{\eta \cdot n}{p}\right) = \left(\frac{20}{0.0125}\right)^2 \cdot \left(\frac{28.37 \cdot 10^{-3} \cdot 16.7}{0.625 \cdot 10^6}\right) = 1.97$

Sa dijagrama na sl. 5.24 za Somerfeldov broj $S = 1,97$ i $l/d=1$, dobija se

$$f = \mu = 38,2 \cdot \frac{c}{r} = 38,2 \cdot \frac{0,0125}{20} = 0,023875:$$

Primeri rešenja za druge slucajeve dati su u prilogu D.



Sl. 5.24 Dijagram Raimonda i Bojda za određivanje koeficijenta trenja hidrodinamički podmazivanih kliznih ležaja

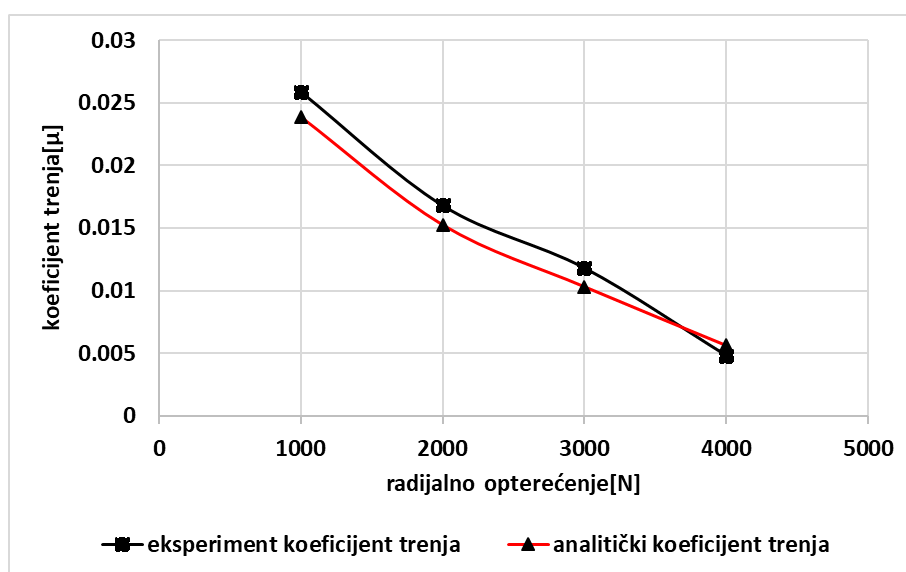
Tabela 5.4 obuhvata eksperimentalne i analitičke rezultate u svrhu poređenja.

Tabela 5.4 Eksperimentalni i analitički rezultati vrednosti koeficijenta trenja

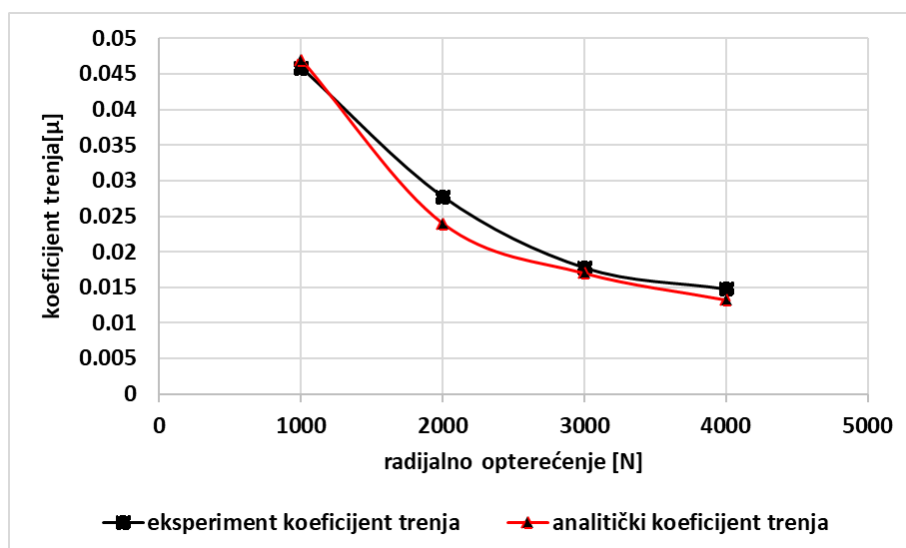
Broj obrtaja [min ⁻¹]	Opterećenje [N]	Specifično opterećenje ležaja p [MPa]	Sommerfield broj S	Koeficijent trenja eksperimentalni μ_{ex}	Koeficijent trenja analitički μ_{an}	$Er = \text{ABS}(\mu_{an} - \mu_{ex}) / (\mu_{an} \cdot 100)$ %
1000	1000	0.625	1.97	0.0259	0.023875	8.4816754
	2000	1.25	0.96	0.0168	0.01525	10.1639344
	3000	1.875	0.64	0.0118	0.0103125	14.4242424
	4000	2.5	0.485	0.0048	0.00562	14.5907473
2000	1000	0.625	3.8	0.0459	0.047	2.3404255
	2000	1.25	1.92	0.0278	0.024	15.8333333
	3000	1.875	1.3	0.0178	0.017	4.7058824
	4000	2.5	0.93	0.0148	0.01325	11.6981132
3000	1000	0.625	4.7	0.0713	0.063	13.1746032
	2000	1.25	2.9	0.0307	0.03475	11.6546763
	3000	1.875	1.8	0.0217	0.02	8.5
	4000	2.5	1.3	0.0192	0.018	6.6666667

Tabela 5.4 pokazuje da postoji razlika u vrednosti koeficijenta trenja dobijenog analitički i eksperimentalno; to je bilo očekivano, a razlozi se mogu utvrditi uključujući i sledeće:

- Netačnost Raimondi i Bojdovih raspoloživih dijagrama
- Raimondi i Bojdovi dijagrami ne uzimaju u obzir promene u koeficijentu trenja u nestabilnom stanju,
- Vrednosti koeficijenta trenja dobijene iz praktičnih eksperimenata koje su uključene u Tabelu 5.4 u stvari su vrednosti prosečnog koeficijenta trenja dobijenih u toku pet sati trajanja eksperimenta,
- Senzori sile korišćeni u eksperimentima imaju specifičnu tačnost skopčanu sa njihovim tehničkim specifikacijama. To takođe utiče na tačnost podataka iz eksperimentalnih rezultata.

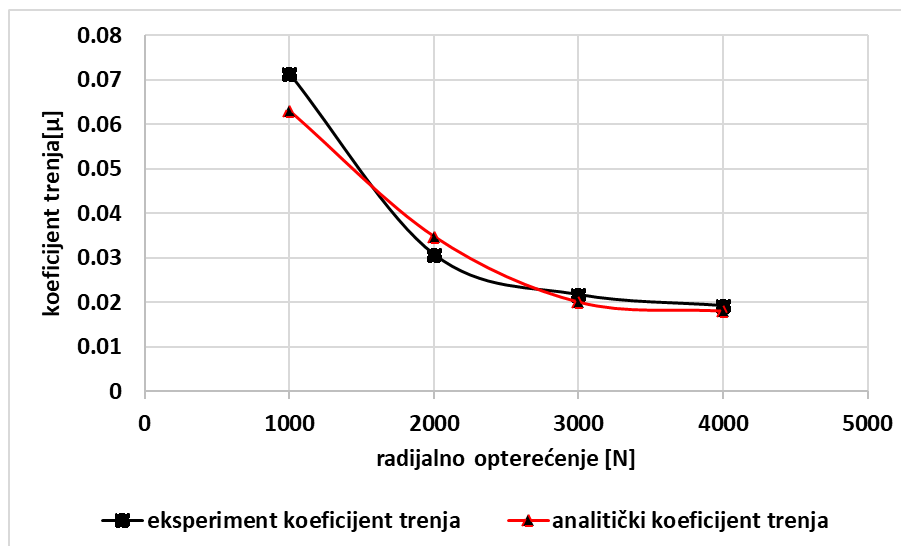


Sl. 5.25 Poređenje koeficijenta trenja dobijene eksperimentalno i analitički, 1000 o/min



Sl. 5.26 Poređenje koeficijenta trenja dobijene eksperimentalno i analitički, 2000 o/min

Pa ipak, podaci poređenja eksperimentalnih rezultata sa analitičkim rezultatima su prihvatljivi. Greška nije premašila 16% u najgorim slučajevima. Slike 5.25, 5.26 i 5.27 pokazuju uporedo promene koeficijenta trenja dobijene analitički, korišćenjem dijagramima Raimondija i Bojda i dobijene eksperimentalnim ispitivanjem.

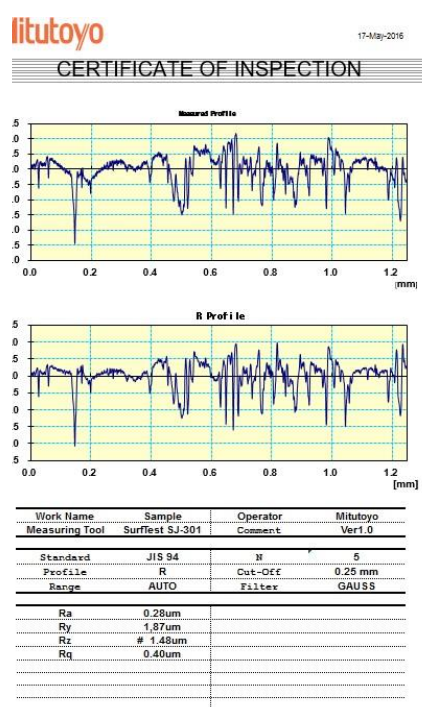
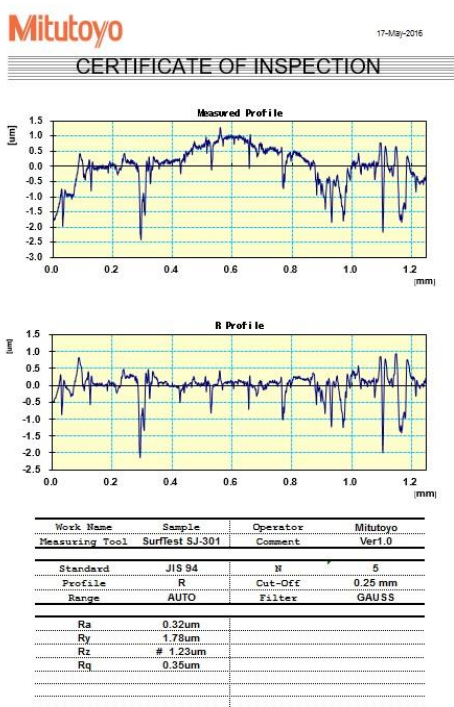


Sl. 5.27 Poređenje koeficijenta trenja dobijene eksperimentalno i analitički, 3000 o/min

5.3 Promena hrapavosti površina posteljice ležaja

Površinske hrapavosti posteljica ispitnih uzoraka kliznih ležaja, koje su korišćene u eksperimentu, su određivane pre početka i posle završetka ispitivanja pomoću uređaja za merenje hrapavosti *SURFTEST SJ301, Mitutoyo*.

Na slici 5.28 dati su izmereni profili hrapavosti sa određenim parametrima hrapavosti za rukavac vratila (A) i posteljicu ležaja (B) u jednom od 4 definisana položaja, respektivno.



Sl. 5.28 Površinska hrapavost vratila (A) i testiranog ležaja (čaura) (B)

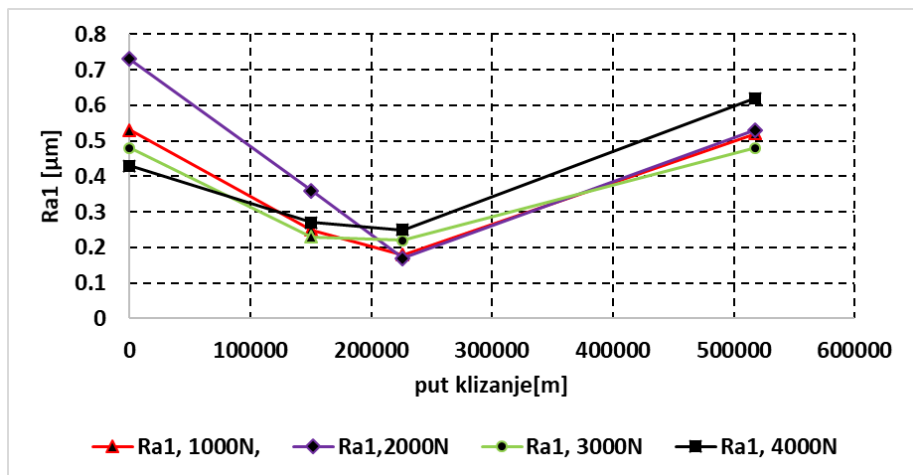
U tabeli 5.5 su dati merenjem utvrđeni parametar hrapavosti. Kao što smo ranije pomenuli, na svakom uzorku posteljice označena su četiri položaja u kojima su praćene promene hrapavosti unutrašnje površine čaura.

Tabela 5.5 Parametar hrapavosti vratila i ležaja

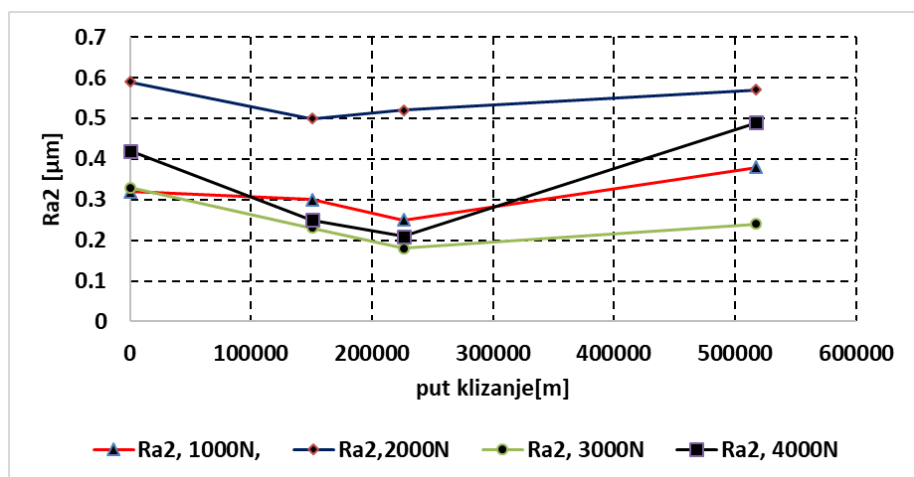
Parametri hrapavosti u μm	Rukavac vratila	Posteljica ležaja
R_a	0.32	0.28
R_z	1.23	1.48
R_y	1.78	1.87
R_q	0.35	0.40

Hrapavost površine na 4 specifična položaja je izmerena posle svakog testa (posle 5 sati rada) pri radijalnom opterećenju od 1000N, 2000N, 3000N i 4000N, pri brojem obrtaju 1000 min^{-1} , 2000 min^{-1} i 3000 min^{-1} i uslovima podmazivanja.

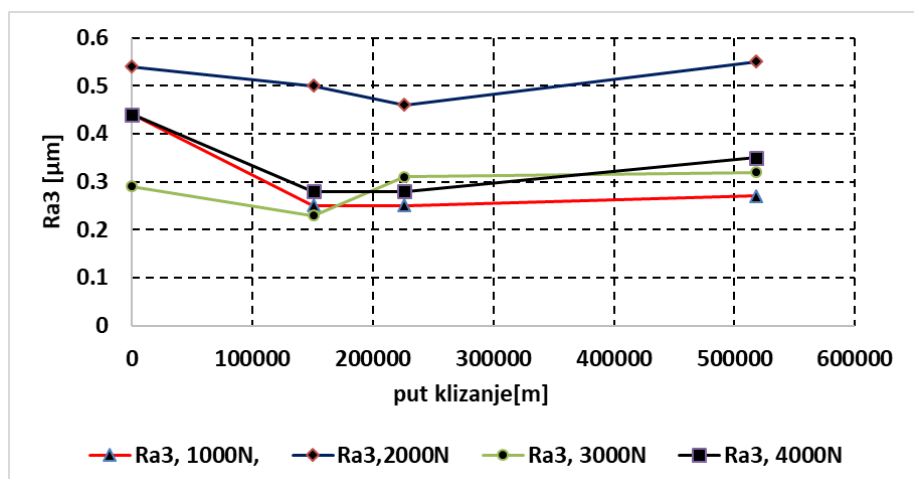
Promena površinske hrapavosti posteljice ležaja se meri u položajima posteljice ležaja označenim sa 1, 2, 3 i 4 (sl. 4.10). Merenje parametara hrapavosti R_a i R_z se vrši uz pomoć SURFTEST SJ-301. Na slikama 5.29, 5.30, 5.31 i 5.32, respektivno date su promene površinske hrapavosti R_a u funkciji puta klizanja za pozicije definisane na posteljici ležaja 1, 2, 3 i 4 posle svakog seta ispitivanja.



Sl. 5.29 Promena površinske hrapavosti posteljice ležaja Ra u funkciji puta klizanja za definisani položaj merenja 1 (sl. 4.10)



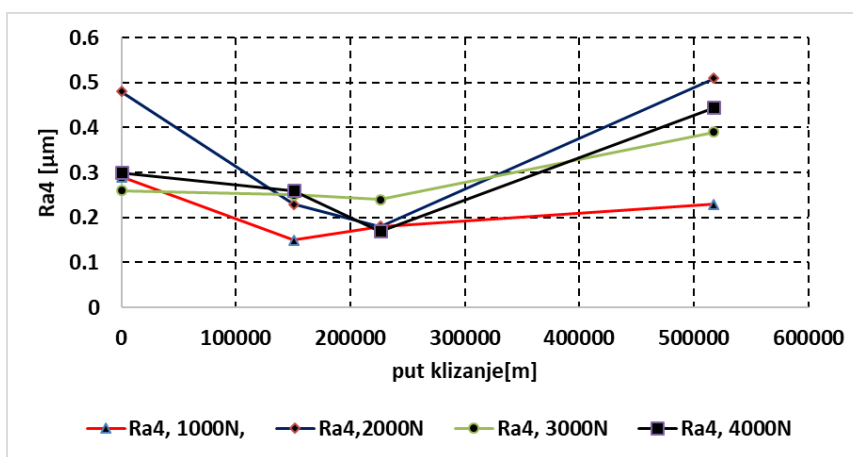
Sl. 5.30 Promena površinske hrapavosti posteljice ležaja Ra u funkciji puta klizanja za definisani položaj merenja 2 (sl. 4.10)



Sl. 5.31 Promena površinske hrapavosti posteljice ležaja Ra u funkciji puta klizanja za definisani položaj merenja 3 (sl. 4.10)

Najveći pad u hrapavosti (Ra) se dogodio na položaju 1 (slika 5.29) u odnosu na poziciju 4 (slika 5.32). Dok su opadanja na položaju 2 (slika 5.30) i položaju 3 (slika 5.31) neznatna, možda je razlog za položaj 1 u njenom direktnom i neprekidnom kontaktu sa ivicom vratila.

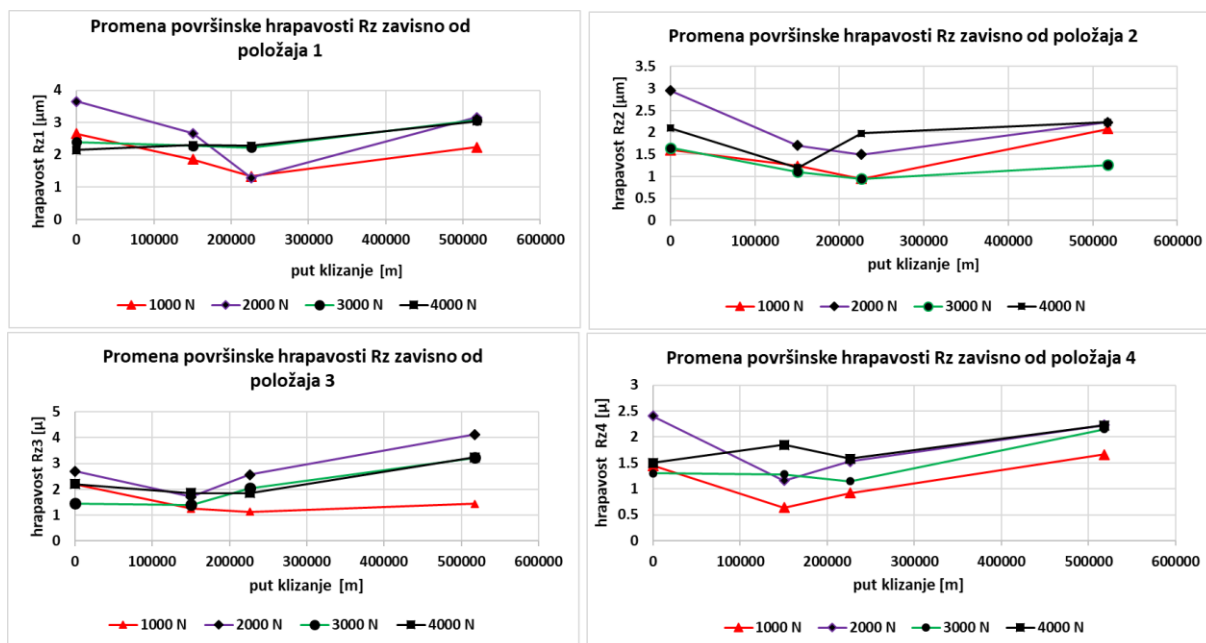
Nastavak rotacije na dužim rastojanjima dovodi do povećanja hrapavosti za sve pozicije, značajna degradacija površine hrapavosti u položaju 1, a zatim položaju 4, dok se malo povećava prosečna hrapavost u položaju 2 i 3, što se može pripisati pravcu brzine rotacije vratila i smeru udara opterećenja, tj. udara maksimalnog hidrodinamičkog pritiska, koji dovodi do oštećenja položaja 1 i 4.



Sl. 5.32 Promena površinske hrapavosti posteljice ležaja Ra u funkciji puta klizanja za definisani položaj merenja 4 (sl. 4.10)

Promene vrednosti parametra površinske hrapavosti Rz posteljice ležaja prikazane su na slici 5.33. Uopšte, na svim pozicijama obeleženim 1, 2, 3 i 4 hrapavosti površina materijala kliznih ležaja Rz smanjuje sa povećanjem kliznog puta i normalnog opterećenja čak i kada je klizni put oko (15000-22600) m, nakon čega počinje da se povećava a najveći skok površinske hrapavosti Rz se pojavljuje na pozicijama 1 i 3 na 3.04 i 3.23 μm za opterećenje 4000 N i na rastojanju 51780 m, dok je za pozicije 2 i 4 površinska hrapavost blaga.

Tabela 5.6 prikazuje upoređivanje statističkih eksperimentalnih rezultata prilikom varijacije hrapavosti Ra i Rz . Kao što je prikazano u tabeli, odnos parametara hrapavosti Ra i Rz je približno $Rz \approx 6 \cdot Ra$.



Sl. 5.33 Promena površinske hrapavosti posteljice ležaja Rz u funkciji puta klizanja za definisane položaje merenja 1, 2, 3 i 4 (sl. 4.10)

Tabela 5.6 Upoređivanje statističkih eksperimentalnih rezultata prilikom varijacije hrapavosti Ra i Rz.

Ležišna čaura	Put klizanje (m)	0		150480		226080		517680		Prosek hrapavost (μm)	
		Ra ₁ (μm)	Rz ₁ (μm)	Ra ₁ (μm)	Rz ₁ (μm)	Ra ₁ (μm)	Rz ₁ (μm)	Ra ₁ (μm)	Rz ₁ (μm)	Ra ₁ prosek	Rz ₁ prosek
0	Opterećenje (N)										
	1000	0.53	2.65	0.25	1.86	0.18	1.33	0.52	2.24	0.37	2.02
	2000	0.73	3.65	0.36	2.66	0.17	1.29	0.53	3.12	0.45	2.69
	3000	0.48	2.4	0.23	2.27	0.22	2.22	0.48	3.01	0.35	2.49
1	4000	0.43	2.15	0.27	2.29	0.25	2.28	0.62	3.04	0.39	2.44
		Ra ₂ (μm)	Rz ₂ (μm)	Ra ₂ (μm)	Rz ₂ (μm)	Ra ₂ (μm)	Rz ₂ (μm)	Ra ₂ (μm)	Rz ₂ (μm)	Ra ₂ prosek	Rz ₂ prosek
	1000	0.32	1.6	0.3	1.24	0.25	0.95	0.38	2.08	0.3125	1.4675
	2000	0.59	2.95	0.5	1.7	0.52	1.5	0.57	2.23	0.545	2.095
2	3000	0.33	1.65	0.23	1.1	0.18	0.95	0.24	1.26	0.245	1.24
	4000	0.42	2.1	0.25	1.2	0.21	1.98	0.49	2.23	0.3425	1.8775
		Ra ₃ (μm)	Rz ₃ (μm)	Ra ₃ (μm)	Rz ₃ (μm)	Ra ₃ (μm)	Rz ₃ (μm)	Ra ₃ (μm)	Rz ₃ (μm)	Ra ₃ prosek	Rz ₃ prosek
	1000	0.44	2.2	0.25	1.248	0.25	1.128	0.27	1.44	0.3025	1.504
3	2000	0.54	2.7	0.5	1.703	0.46	2.561	0.55	4.121	0.5125	2.77125
	3000	0.29	1.45	0.23	1.404	0.31	2.0385	0.32	3.22	0.2875	2.02975
	4000	0.44	2.2	0.28	1.862	0.28	1.862	0.35	3.23	0.3375	2.2895
		Ra ₄ (μm)	Rz ₄ (μm)	Ra ₄ (μm)	Rz ₄ (μm)	Ra ₄ (μm)	Rz ₄ (μm)	Ra ₄ (μm)	Rz ₄ (μm)	Ra ₄ prosek	Rz ₄ prosek
3	1000	0.29	1.45	0.15	0.64	0.18	0.92	0.23	1.66	0.2125	1.1675
	2000	0.48	2.4	0.23	1.16	0.18	1.53	0.51	2.23	0.35	1.83
	3000	0.26	1.3	0.25	1.28	0.24	1.15	0.39	2.15	0.285	1.47
	4000	0.3	1.5	0.26	1.85	0.17	1.58	0.445	2.22	0.29375	1.7875

5.4 Analiza habanja

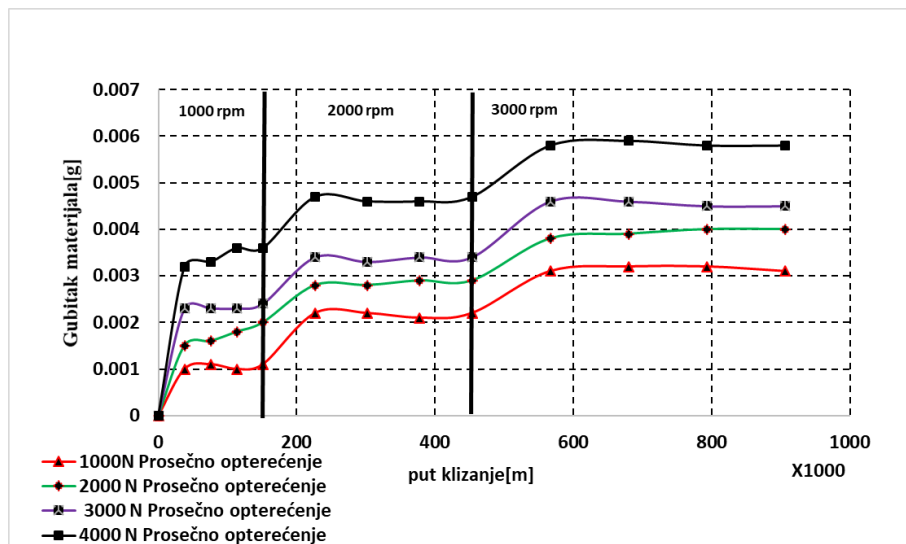
U okviru disertacije ispitivano je i habanje ležaja u uslovima ispitivanja sa različitim opterećenjima ležaja 1000, 2000, 3000 i 4000N u funkciji puta klizanja (0-905988)m, i sa varijacijom brojom obrtaja rukavca vratila od 1000, 2000 i 3000 min⁻¹. Intenzitet habanja se procenjuje preko gubitka mase materijala posteljice ležaja. Dakle, u radu je na kraju svakog eksperimenta izvršeno merenje ispitnog uzorka. Razlika izmerene mase ispitnog uzorka pre i nakon ispitivanja daje veličinu masenog habanja.

5.4.1 Rezultati lokalnog gubitka materijala

Tri zone nestabilnog stanja i tri zone stabilnog stanja prikazane su na slici 5.34. Prva zona nestabilnog stanja ima nagla povećanja habanja u odnosu na put klizanja za sva prosečna radijalna opterećenja (1000-4000) N, a vrednost gubitka materijala je oko 0.001, 0.0015, 0.0023 i 0.0032 g, respektivno.

Prvo nestabilno stanje gubitka materijala (habanje) se pojavljuje od početka operacije do pristupa prvom stabilnom stanju, procenjeno je na 37800 m puta klizanja, učestanosti obrtanja od 1000 min⁻¹. Druga distanca prve zone stabilnog stanja je 113400 m puta klizanja; prosečni gubitak materijala u prvom stabilnom procesu habanja je 0.00105, 0.0017, 0.0023, 0.0034 g u uslovima radijalnog opterećenja 1000-4000 N, respektivno, i pri učestanosti obrtanja od 1000 min⁻¹. Uzrok brzog gubitka materijala na početku rada tj.prvog nestabilnog stanja može biti usled uhodavanja vratila i čaure.

Pri izmenjenoj učestanosti obrtanja od 1000 do 2000 min⁻¹ stiže se do druge zone nestabilnog stanja. Procenjen je put klizanja odne dodruge na 75600 m. Vrednosti gubitka materijala u drugoj zoni nestabilnog stanja iznosi približno 0.0022, 0.0028, 0.0034, 0.0047 g pod (1000-4000) N prosečnim radijalnim opterećenjem, respektivno. Put klizanja druge stabilne zone je 226800 m. prosečni gubitak materijala u drugom stabilnom procesu habanja je 0.0021, 0.0028, 0.0033 i 0.0046 g u uslovima radijalnog opterećenja 1000-4000 N, respektivno, i pri učestanosti obrtanja od 2000 min⁻¹. Konačno, treća zona nestabilnog stanja je ona kod koje se menja učestanost obrtanja vratila sa 2000 na 3000 min⁻¹. Put klizanja treće nestabilne zone je 113097 m, iza koje sledi treća zona stabilnog stanja procesa habanja čiji je put klizanja 339291 m. prosečni gubitak materijala u trećem procesu habanja stabilnog stanja je 0.0031, 0.0039, 0.0046, 0.0058 g pod (1000-4000)N prosečnim radijalnim opterećenjem, respektivno, kako je prikazano na slici 5.34. Jasno je da se gubitak materijala povećava sa povećanjem radijalnih sila i kliznih brzina u odnosu na povećanu kliznu distancu, ali je efekat klizne brzine vratila veći od radijalnog opterećenja.



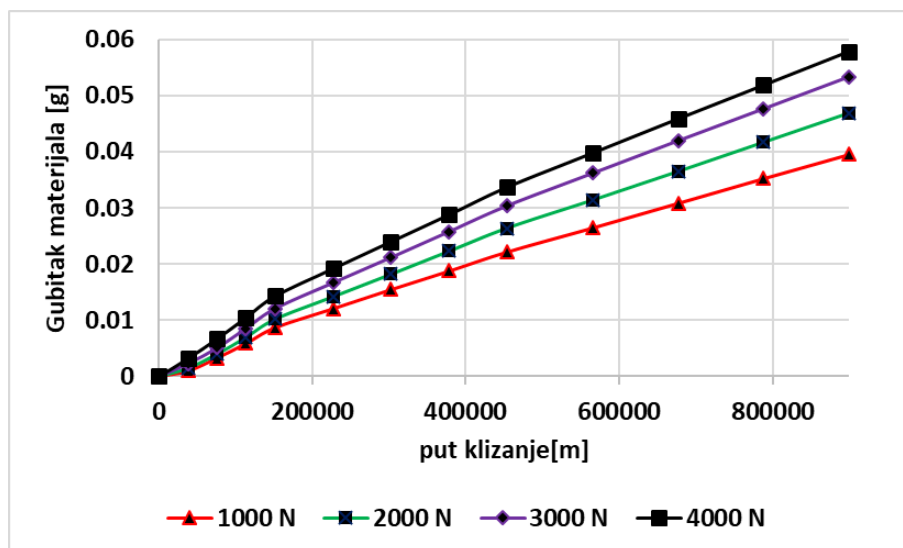
Sl. 5.34 Odnos između lokalnog gubitka težine i put klizanje

5.4.2 Ukupan gubitak materijala

Na slici 5.35 data je funkcionalna zavisnost habanja odnosno gubitak materijala posteljice ležaja u funkciji kliznog rastojanja (puta klizanja).

Da bismo objasnili ukupan gubitak materijala pri različitim radijalnim opterećenjima i rotacionim brzinama duž ukupne distance eksperimenata a koji je procenjen na 9×10^5 m, što je prikazano na slici 5.35, da gubitak materijala se povećava sa povećanjem puta klizanja za sva radijalna opterećenja ležaja. Takođe, gubitak materijala posteljice ležaja odnosno habanje opada sa opadanjem radijalnog opterećenja ležaja. To ukazuje na činjenicu da je radni vek posteljice ležaja od belog metala na bazi kalaja - Tegotenax (V840) veći pri nižim opterećenjima ima duži radni vek u poređenju sa ležajem od legure belog metala tipa WM-2 i WM-5 koje je proučavao Zeren A. [16].

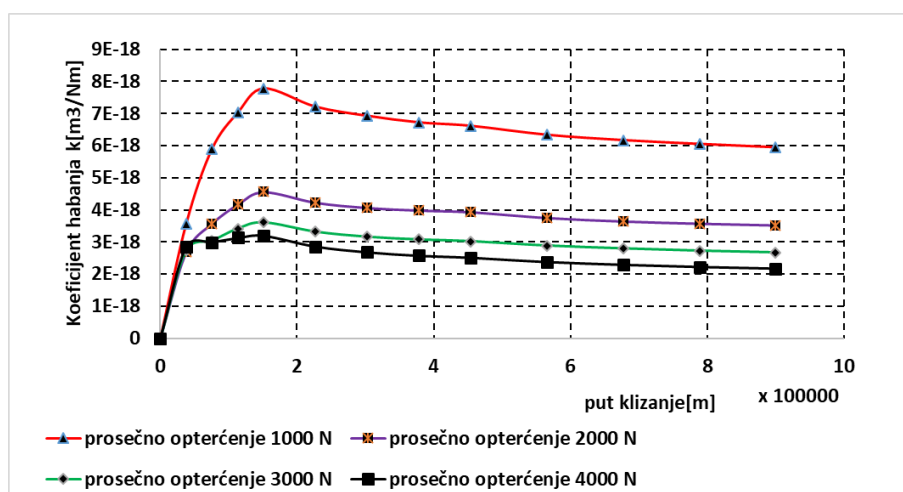
Na početku eksperimentalnih testova, nagib krivih gubitka materijala veći nego u preostalom delu, tj od 0 do 151200 m, eksperimentalnog procesa prikazan na slici 5.35 ukazuje na to da je količina gubitka materijala veća na početku procesa usled neprekidnog gubitka materijala sve do uspostavljanja stanja kompatibilnosti između kontaktne površine vratila i čaure.



Sl.5.35 Ukupak gubitak materijala u odnosu na put klizanje

5.4.3 Promena intenziteta habanja

Promena intenziteta habanja tj, specifične stope habanja k u odnosu na put klizanja ležaja u uslovima brzina klizanje 1000, 2000 i 3000 min^{-1} unutar opsega različitih opterećenja od 1000 N, 2000 N, 3000 N i 4000 N sumarno je data na slici 5.36. Intenzitet habanja na početku eksperimenta ima veliki pozitivni gradijent, do postizanja maksimalne vrednosti. Najviše vrednosti intenziteta habanja tj, specifične stope habanja su 7.7×10^{-18} , 4.5×10^{-18} , 3.6×10^{-18} i $3.13 \times 10^{-18} [\text{m}^3/\text{Nm}]$ za opterećenja ležaja 1000 N, 2000 N, 3000 N i 4000 N, respektivno, a put klizanje je 151200 m. Nastavljanjem testiranja nakon 151200 m, dolazi do prelaza sa visoke specifične stope habanja k na niže i stabilnu specifičnu stopu habanja. Prosečne vrednosti specifične stope habanja k su 3.39×10^{-18} , 3.7×10^{-18} , 2.9×10^{-18} , $2.4 \times 10^{-18} [\text{m}^3/\text{Nm}]$ prema 1000 N, 2000 N, 3000 N i 4000 N radijalnog opterećenja, respektivno.

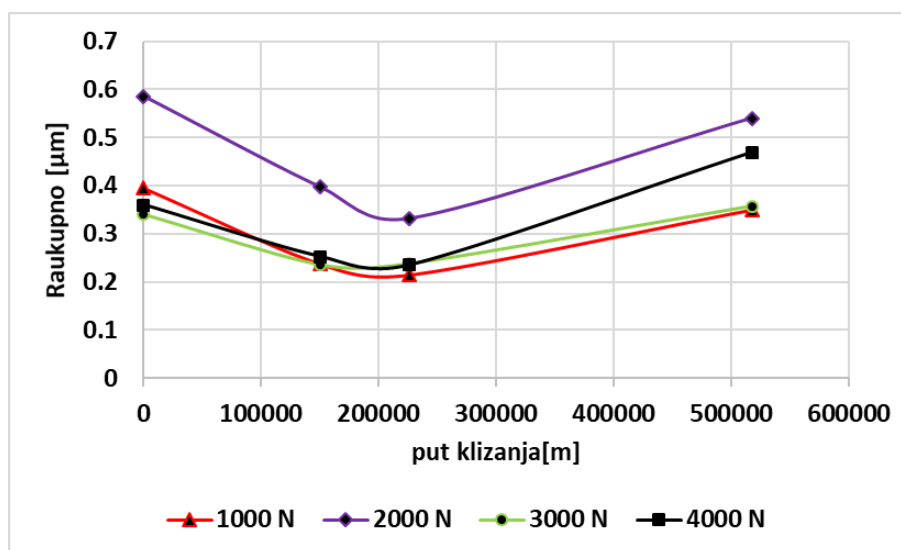


Sl. 5.36 Promena intenziteta habanja u funkciji puta klizanja

Uočava se da povećanje opterećenja dovodi do opadanja specifične stope habanja k (jednačina 3.60).

Jasno je sa slike 5.36 da, kako povećanje u opterećenju vodi ka nižoj specifičnoj stopi habanja, ono dostiže stabilno stanje rano, dok je nizak prelazni period kada je prelazni period ograničen u slučajevima kada je opterećenje 4000 N.

Ukupna prosečna površinska hrapavost za svaki uzorak određena je kao funkcija puta klizanja kako se prikazuje na slici 5.37. Očigledno je da je efekat početne prosečne hrapavosti na promenu prosečne hrapavosti u funkciji puta klizanja jeste slab. Pored toga, moguće je zapaziti sa slike 5.36 i 5.37 da postoji obrnuti odnos između specifične stope habanja i promene prosečne hrapavosti gde se specifična stopa habanja povećava kao što se put klizanja povećava u početnom testu, obrnuto se dešava sa prosečnom hrapavošću kontaktne površine koja opada sa povećanjem puta klizanja, kao što smo ranije napomenuli. To se objašnjava rotacijom vratila koja na početku operacije dovodi do grebanja vrhova kontaktne površine. To se javlja u režimu mešovitog trenja.



Sl. 5.37 Ukupna prosečna hrapavost kao funkcija puta klizanja pod različitim radijalnim opterećenjima

5.5 Ispitivanje mikrostrukture posteljice ležaja pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa

Skenirajući elektronski mikroskop (SEM) je vrsta elektronskog mikroskopa koji proizvodi slike uzorka skeniranjem površine fokusiranim snopom elektrona. Elektroni komuniciraju sa atomima u uzorku, proizvodeći različite signale koji sadrže informacije o površinskoj topografiji i sastavu uzorka. Elektronski zrak se skenira u šemu raster skeniranja, a položaj grede se kombinuje sa detektovanim signalom kako bi se napravila slika. SEM može postići rezoluciju bolju od 1 nanometar.

Trodimenzionalne slike visoke rezolucije koje proizvodi SEM pružaju topografske, morfološke i kompozicionalne informacije što ih čini neprocenjivim u raznim naukama i industrijskim aplikacijama uključujući kontaktne površine.

Za pripremu uzoraka za metalografiju korišćene su testere tipa Struers secotom-15 slika 5.38. Uzorci su sečeni aksijalno i po poprečnom preseku kao što prikazuje slika 5.39. Takođe su korišćene mašine za brušenje i poliranje tipa (Struers LaboPol-250 mm discs) slika 5.40.



Sl. 5.38 Priprema uzoraka za ispitivanje mikrostrukture - Rasecanje posteljice ležaja



Sl. 5.39 Aksijalno rasečena uzorci posteljice ležaja (a), radijalno rasečeni uzorci (b)



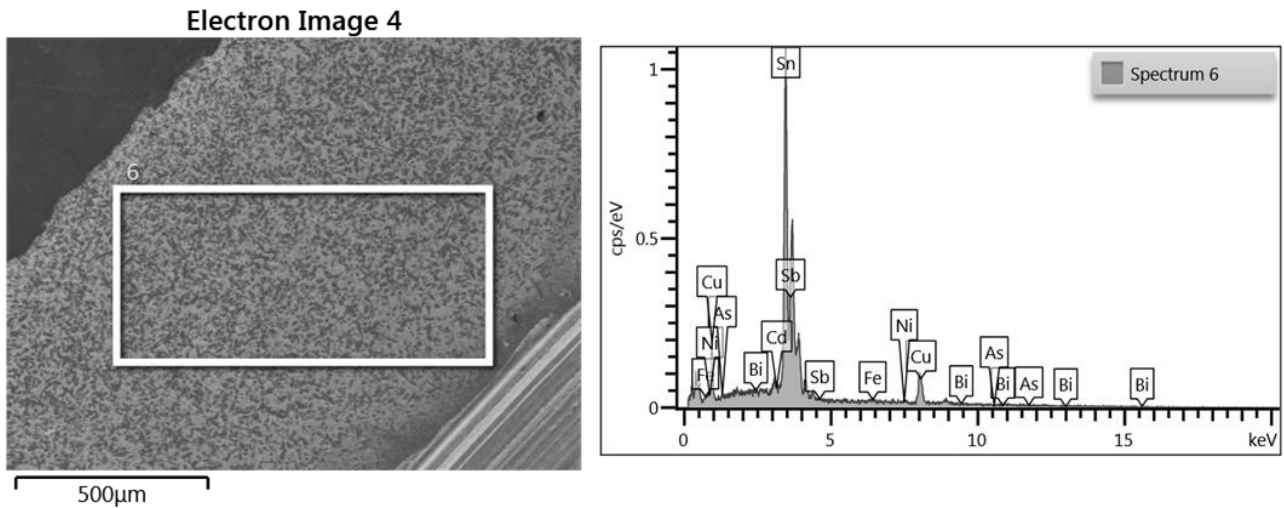
Sl. 5.40 Priprema uzoraka za ispitivanje mikrostrukture – Brušenje i poliranje uzoraka (Struers LaboPol-250 mm diskovi)

Mikrostruktura legure korišćene u eksperimentalnom istraživanju je ispitivana skenirajućim elektronskim mikroskopom (SEM) tipa JEOL-JSM-661OLV, slika 5.41. Cilj je bio da se bolje shvati tribološko ponašanje. Legura je pripremljena metalografskim tehnikama i podvrgnuta nagrivanju sa 4% HCL i etil alkoholom posle poliranja.



Sl. 5.41 SEM tipa JEOL-JSM-661OLV korišćeni mikroskop

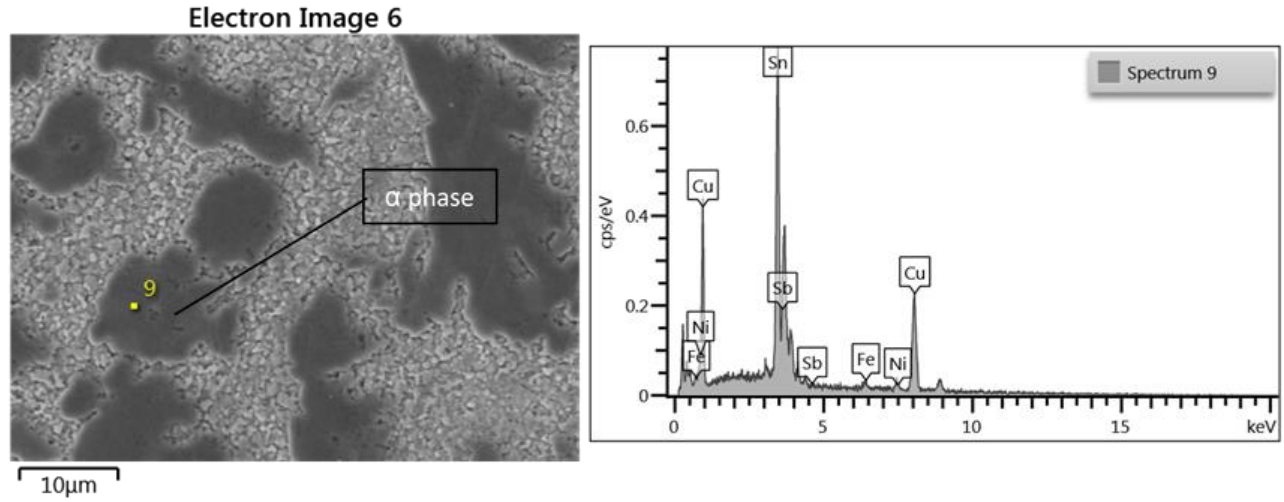
Na slici 5.42 prikazana je mikrostruktura poprečnog preseka uzorka posteljice ležaja u čistom stanju.



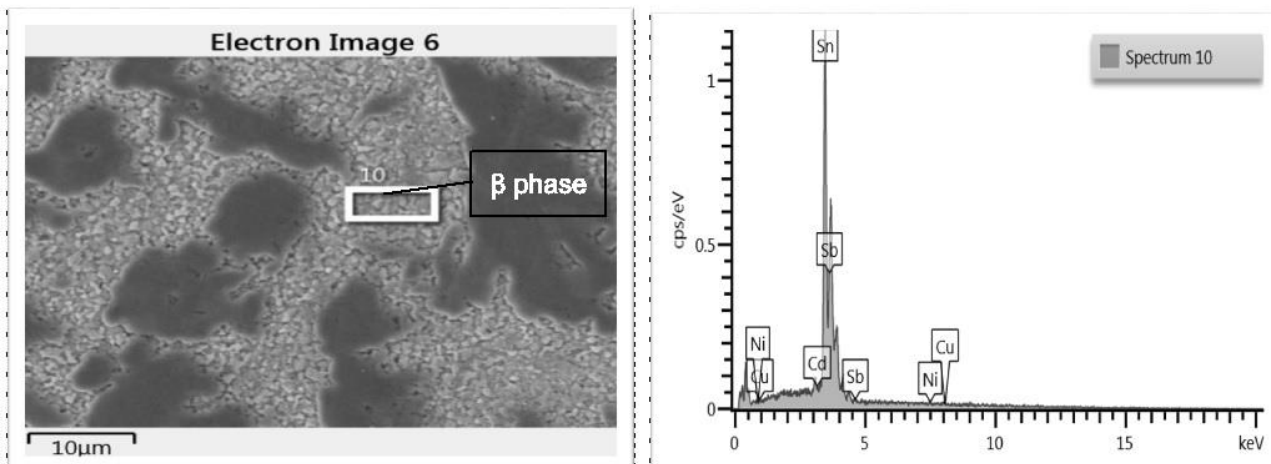
Sl. 5.42 Skenirajuća oblast sloja belog metale na posteljici ležaja i EDX spektar uzoraka legure Tegotenax (V840) u čistom stanju

Na slici 5.43 uočeno je da mikrostruktura babbitne legure Tegotenax (V840) α faze (rastvor solida anitomonija i bakra u kalaju) a slika 5.44 pokazuje β fazu (SbSn kubne kristale). Nikakve oksidne čestice se ne pokazuju u uzorcima. Struktura korišćene posteljice ležaja od belog metala pri velikom uvećanju (5000X) pokazuje da je glavna faza α velika, a zrno elastično sa veličine od 5 do 20 μm kao što je prikazano na slici 5.43. Dobijeni rezultati ukazuju na potpuno odsustvo gasne poroznosti u svim uzorcima; to objašnjava odsustvo naprslina na površini ležaja kao i nizak gubitak materijala pod različitim radijalnim opterećenjima i kliznim brzinama.

Slika 5.44 pokazuje povećanje u frakciji SbSn faze (β phase) koja zauzima najveći prostor u delu mikrostrukture. Pokazuje da u β fazama ponašanje visoke ugradivosti materijala ležaja na bazi kalaja, mogućnost povećanja trajnosti čaure korišćenjem babita veličine zrna β faze koje povećava opseg radnog veka ležaja napravljenog od legure .



Sl. 5.43 Mikrostruktura površine posteljice ležaja sa EDX spektrom za prisustvo α faze



Sl. 5.44 Mikrostruktura površine posteljice ležaja sa EDX spektrom za prisustvo β faze

5.6 Uspostavljanje analitičkih zavisnosti eksperimentalnih parametara ispitivanja kliznog ležaja u uslovima hidrodinamičkog podmazivanja

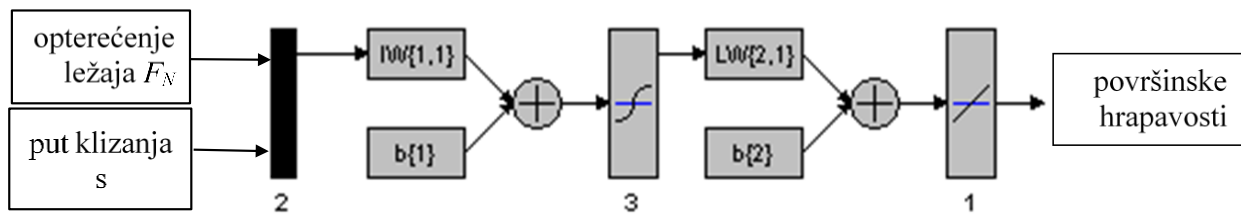
5.6.1 Razvoj modela veštačke neuronske mreže

Da bi se uspostavio matematički odnos zavisnosti eksperimentalnih parametara ispitivanja kliznog ležaja u uslovima hidrodinamičkog ispitivanja razvijeno je osam ANN modela između nezavisnih parametara kao što je put klizanja s i opterećenja ležaja F_N , sa podacima dobijenim u eksperimentalnom istraživanju kao što su: gubitak mase posteljice ležaja kao parametar habanja, površinska hrapavost posteljice ležaja, koeficijent trenja i temperatura zagrevanja ležaja i to:

- Model 1—koji dovodi u vezu F_N , s i μ
- Model 2—koji dovodi u vezu F_N , s i T_{total}
- Model 3—koji dovodi u vezu F_N , s i Δm_{total}
- Model 4—koji dovodi u vezu F_N , s i Δm_{local}
- Model 5—koji dovodi u vezu F_N , s i $R_{a1-local}$
- Model 6—koji dovodi u vezu F_N , s i $R_{a2-local}$
- Model 7—koji dovodi u vezu F_N , s i $R_{a3-local}$
- Model 8—koji dovodi u vezu F_N , s i $R_{a4-local}$

Na bazi modela 5 do 8 razvijen je jedan agregatski ANN model za procenu ukupne površinske hrapavosti.

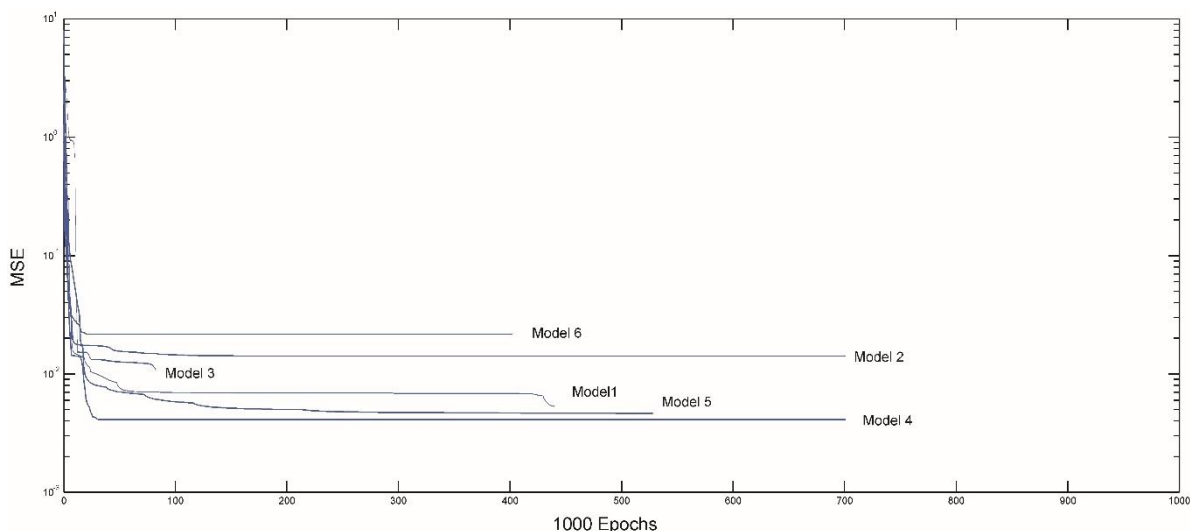
Arhitektura neuronske mreže je imala dva neurona u ulaznom sloju (za opterećenje ležaja F_N i put klizanja s) i jedan neuron u izlaznom sloju radi procene zavisne varijable i samo jedan skriven sloj, na slici 5.45.



Sl. 5.45 Arhitektura neuronske mreže

Za sve ANN modele je korišćena kombinacija linearne aktivacione funkcije i nelinearne sigmoidne aktivacione funkcije u izlaznom i skrivenom sloju, respektivno. Shodno tome, dobijeni eksperimentalni podaci su normalizovani u opsegu $[-1, 1]$. Tokom razvoja ANN modela, raspoloživ skup ulaznih/izlaznih podataka je nasumično podeljen na dva skupa: skup za obučavanje i skup za testiranje ANN modela mreže. Približno dve trećine raspoloživih podataka je korišćeno za ANN obučavanje, a ostatak se koristio za testiranje treniranih ANN modela mreže.

Za obučavanje ANN izabran je algoritam Levenberg-Marquardt zbog svoje visoke tačnosti i brze konvergencije. Kako bi se rešio problem konvergencije i sveo na minimum, kao i spora konvergencija, proces obučavanja ANN se ponovio nekoliko puta uz pomoć različitih početnih težina uspostavljenih metodom Nguyen-Widrow. Tokom procesa obučavanja ANN, iako je maksimalni broj iteracija obučavanja postavljen na 1000, uočeno je da je mnogo manje iteracija bilo dovoljno da bi se obučili ANN modeli, slika 5.46.



Sl. 5.46 Minimizacija srednja kvadratna greška (mean squared error MSE) tokom procesa obučavanja ANN

Naime, tokom procesa obučavanja uočeno je da ANN ima tendenciju da izgubi generalizaciju u slučaju dugotrajnog obučavanja izvan određenih granica u pokušaju da se minimizuje MSE. Pošto je cilj bio pronaći skup ANN težina i pragova kako bi modeli mogli imati značajno nizak i prag i

varijansu (totalnu grešku), proces obučavanja je prekinut u vreme kada je greška testiranja počela da se povećava.

Raspoloživi eksperimentalnih rezultati su korešćeni za treniranje ANN modela. Za proces treniranja su korišćene različite arhitekture ANN modela odnosno različit broj neurona u skvirenom sloju. Broj neurona u skvirenom sloju je verirao od 2 do 6., odnosno analizirano je treniranje sledećih ANN arhitektura: 2-2-1, 3-2-1, 2-3-1, 3-3-1, 2-4-1, 3-4-1, 2-5-1, 3-5-1, 2-6-1 i 3-6-1. Metodom probe i greške (trial and error) došlo se do zaključka da ANN modeli sa 3 ili 4 neurona daju zadovoljavjuće rezultate.

Po završetku procesa obučavanja, procenjena je performansa predviđanja obučanih ANN modela. U tom cilju je izračunata srednja apsolutna procentualna greška (*MAPE - Mean Absolute Percentage Error*) na sledeći način:

$$APE(\%) = \frac{1}{n} \cdot \sum_n \left| \frac{(\text{eksperimentalna vrednost} - \text{predviđena vrednost})}{\text{eksperimentalna vrednost}} \right| \cdot 100, \quad (5.1)$$

pri čemu je n broj podataka.

Tabela 5.7 sumarno prikazuje performansu predviđanja ANN modela uz pomoć podataka obučavanja i testiranja.

Može se zapaziti da su neke veće vrednosti MAPE logične posledice činjenice da imenilac jednačine MAPE označava vrednost površinske hrapavosti koja je prilično mala, tj. blizu nule. Može se tvrditi da ovi rezultati pokazuju da su razvijeni ANN modeli sposobni da pruže prilično tačna predviđanja unutar pokrivenog eksperimentalnog prostora podataka. Otud uticaj opterećenja ležaja i puta klizanja na gubitak materijala i površinsku hrapavost može da se proučava uz pomoć razvijenih ANN modela.

Tabela 5.7 Performanse predviđanja razvijenih ANN modela

ANN model	MAPE _{training} (%)	MAPE _{test} (%)
Model1	0.0054	0.0085
Model2	0.12	0.023
Model 3	1.32	0.7
Model 4	11.27	7.38
Model 5	8.71	12.83
Model 6	4.1	6.56
Model 7	8.11	6.39
Model 8	16.94	19.5

5.6.2 Analitička zavisnost koeficijenta trenja μ u funkciji učestanosti obrtanja n , opterećenja ležaja F_N i vreme klizanja t uz pomoć BP neuronske mreže

Imajući u vidu predloženje arihkture ANN modela, kao i prenosne funkcije se koriste u skvirenom i izlaznom sloja, matematičke relacije zavisnih i nezavisnih promenljivih može se

uspostaviti preko jednačine (3.65).kao su kroz proces treniranje ANN modela određene matrice težine između ulaznog i skrivenog, i skrivenog i izlaznog sloja, kao i matrice neurona, izvesti konkretne ANN jednačine za predikciju zavisne promenljive. Konačno, imajući u vidu da su za potrebe modeliranja korišćeni skalirani podaci u intervalu [1, -1], za predikciju realnih vrednosti neophodno je još izvršiti deskaliranje (denormalizaciju podataka) imajući u vidu jednačina (3.68).

Imajući u vidu prethodno navedeno, za ANN predikciju koeficijenta trenja se može koristiti jednačina 5.2-5.8.

$$\mu = \left[\frac{2}{1+e^{-2(X \cdot \omega_{\mu j i} + b_{\mu j})}} \right] \cdot \omega_{\mu k j} + b_{\mu o k} \quad (5.2)$$

$$\omega_{\mu j i} = \begin{bmatrix} -19.2812 & 38.5685 & 10.744 \\ -188.9431 & -229.3235 & 113.6099 \\ -0.7654 & -0.078622 & -0.066734 \\ -0.49 & 1.3739 & 0.030613 \\ -0.72585 & 0.5064 & 2.4732 \\ 21.6194 & -0.649 & 5.2741 \end{bmatrix}, \quad (5.3)$$

$$b_{\mu j} = \begin{bmatrix} -31.1102 \\ -29.8642 \\ -5.0284 \\ 2.5312 \\ 3.9689 \\ 4.7872 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$\omega_{\mu k j} = [-0.03344 \quad 0.032123 \quad 137.812 \quad -0.50758 \quad -1.8407 \quad 0.066395] \quad (6.5)$$

$$b_{\mu o k} = 139.2495, X [n, F_N, t] \quad (5.6)$$

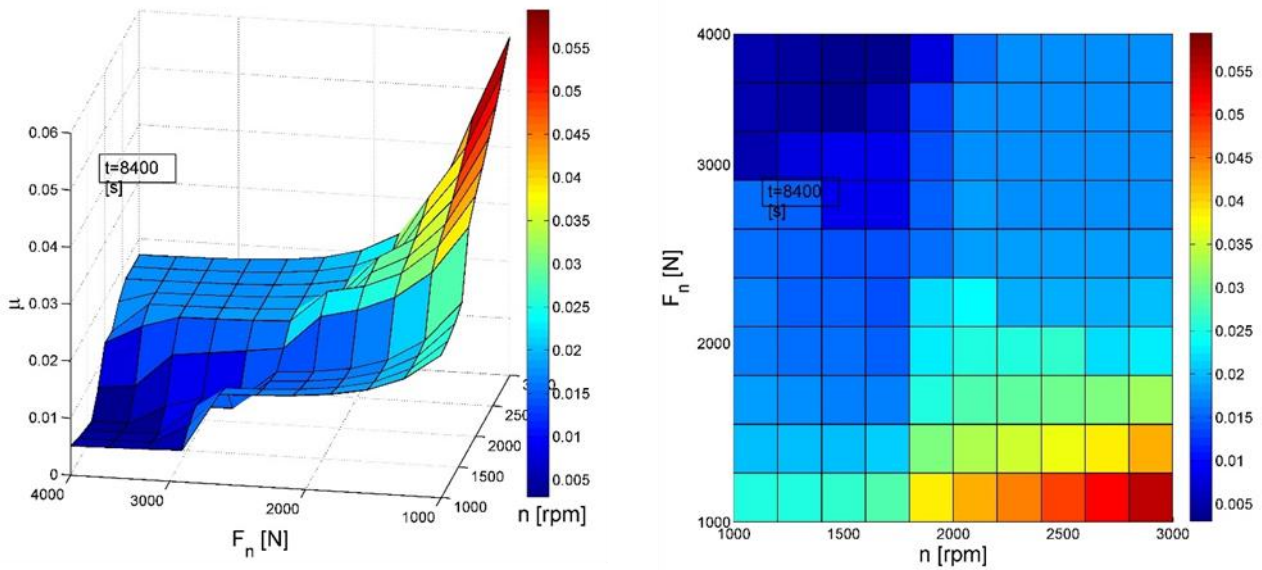
$$p_n = (b - a) \cdot \frac{(p_i - p_{\min})}{(p_{\max} - p_{\min})} + a \quad (5.7)$$

$$\mu^* = \frac{1}{2} \cdot (\mu + 1) \cdot (\mu_{\max} - \mu_{\min}) + 0.004825, \quad (5.8)$$

$$\mu_{\max} = 0.1579, \mu_{\min} = 0.004825 \quad (5.9)$$

Slika 5.47 pokazuje predviđanje koeficijenta trenja u funkciji opterećenja ležaja i učestanosti obrtanja za posteljicu ležaja od legure belog metal na kalajnoj osnovi Tegotenax V840. Predviđanje koeficijenta trenja posteljice kliznog ležaja urađenog od legure belog metala na kalajnoj osnovi je pokazalo da koeficijent trenja ima negativni gradijent sa povećanjem opterećenja ležaja.

Najveći koeficijenti trenja 0.151 se dobija pri opterećenju ležaja od 1072.3N i broja obrtaja 3000 min⁻¹, dok su se najniži koeficijenti trenja 0.0038 dobija pri najvećem opterećenju 4000N i broj obrtanja rukavca vratila od 1675.22 min⁻¹. Vrednosti promene koeficijenta trenja poprimaju oblik krive negativnog gradijenta pri povećanju opterećenja ležaja i opadanju broja obrtaja kao što je prikazano na slici 5.47.



Sl.5.47 Predviđanje koeficijenta trenja u funkciji opterećenja ležaja F_N i broj obrtanja uz pomoć BP neuronske mreže

Trenje klizanja između rukavca vratila, posteljice ležaja i maziva izaziva porast temperature maziva što rezultira u opadanju napona na smicanje maziva to dovodi do snižavanja viskoznosti maziva i otud opadanja koeficijenta trenja kao što je prikazano u jednačinama 3.47 (Petrofov zakon).

5.6.3 Analitička zavisnost temperature ležaja T u funkciji učestanosti obrtanja n , opterećenja ležaja F_N i vreme klizanja t uz pomoć BP neuronske mreže

Za promenu temperature ležaja T , ANN predikcija se može predstaviti jednačinama 5.10-5.5.15.

$$T = \left[\frac{2}{1 + e^{-2(X \cdot \omega_{Tji} + b_{Tj})}} \right] \cdot \omega_{Tkj} + b_{Tok} \quad (5.10)$$

$$\omega_{Tji} = \begin{bmatrix} 0.14709 & -0.050684 & -3.2784 \\ 0.013006 & -10.5495 & 0.15606 \\ 6.8313 & -1.5173 & -4.299 \\ 1.257 & -3.1377 & 0.63514 \\ 1.1106 & 2.5248 & 0.16236 \\ 1.2445 & -2.8887 & 0.40275 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

$$b_{Tj} = \begin{bmatrix} -5.8826 \\ 3.2506 \\ -12.6379 \\ -0.86234 \\ 2.7731 \\ 2.516 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

$$\omega_{Tkj} = [-103.2947 \quad -0.37979 \quad 0.94058 \quad 0.28968 \quad 0.42367 \quad 0.23692] \quad (5.13)$$

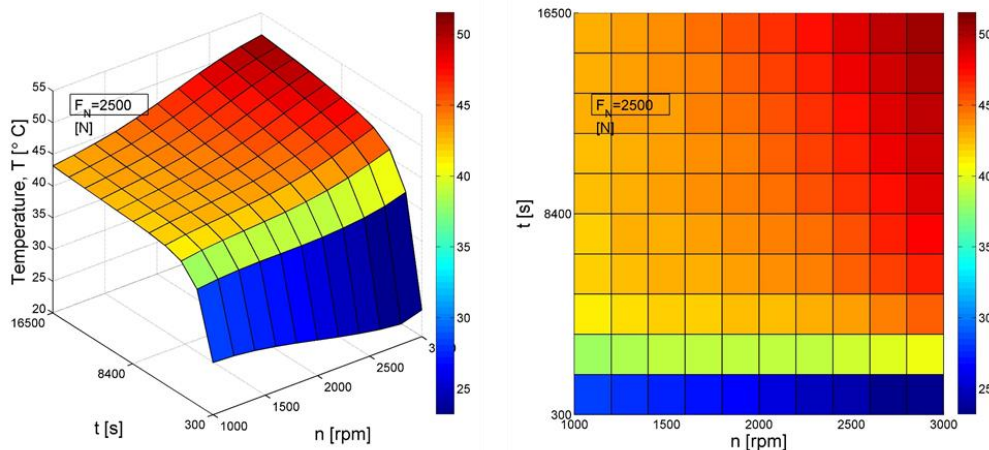
$$b_{Tok} = -102.0669, X [n, F_N, t] \quad (5.14)$$

$$T^* = \frac{1}{2} \cdot (\mu + 1) \cdot (T_{max} - T_{min}) + 55.87, \quad (5.15)$$

$$T_{max} = 0.1579, T_{min} = 22.87 \quad (5.16)$$

Slika 5.48 prikazuje predviđanje promene temperature za $F_N = 2500\text{N}$. Ova promena ima pozitivan gradijent sa povećanjem vremena klizanja i broja obrtaja. Jasno se može videti da temperatura ležaja T raste sa vremenom t kao što je prikazano na slici 5.48, dok toplota koja se razvija u ležaju izaziva povećanje temperature ulja. Kao što smo ranije pomenuli, koeficijent trenja je direktno proporcionalan dinamičkoj viskoznosti (η), a porast temperature ulja dovodi do opadanja dinamičke viskoznosti što sigurno dovodi do pada koeficijenta trenja.

Možemo razlikovati na slici 5.48 dve zone, zonu nestabilnog i zonu stabilnog stanja. U zoni nestabilnog stanja temperatura unutar sistema raste sa vremenom. Trajanje ove zone je procenjeno na oko 4000 s. Druga zona je stabilno stanje u kome temperatura ostaje približno konstantna – negde oko (41-54) °C.



Sl. 5.48 Predviđanje temperature ležaja T u odnosu na učestanost obrtanja n i klizno vreme t uz pomoć BP neuronske mreže

5.6.4 Analitička zavisnost ukupnog gubitka mase Δm_t u funkciji opterećenja ležaja F_N , put klizanja s i vreme klizanja t uz pomoć BP neuronske mreže

Za promenu ukupnog gubitka mase Δm_t tj, habanje, ANN predikcija se može predstaviti jednačinama 5.17-5.20.

$$\Delta m_t = \left[\frac{2}{1 + e^{-2(X \cdot \omega_{\Delta mtji} + b_{\mu j})}} \right] \cdot \omega_{\Delta mkj} + b_{\Delta mok} \quad (5.17)$$

$$\omega_{\Delta mtji} = \begin{bmatrix} 0.2175 & 0.38497 \\ 0.26991 & -3.1482 \\ 0.19026 & -0.14805 \\ 9.3631 & 0.1061 \end{bmatrix}, \quad b_{\Delta mtj} = \begin{bmatrix} -0.1878 \\ -2.5916 \\ 0.90946 \\ 7.9092 \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

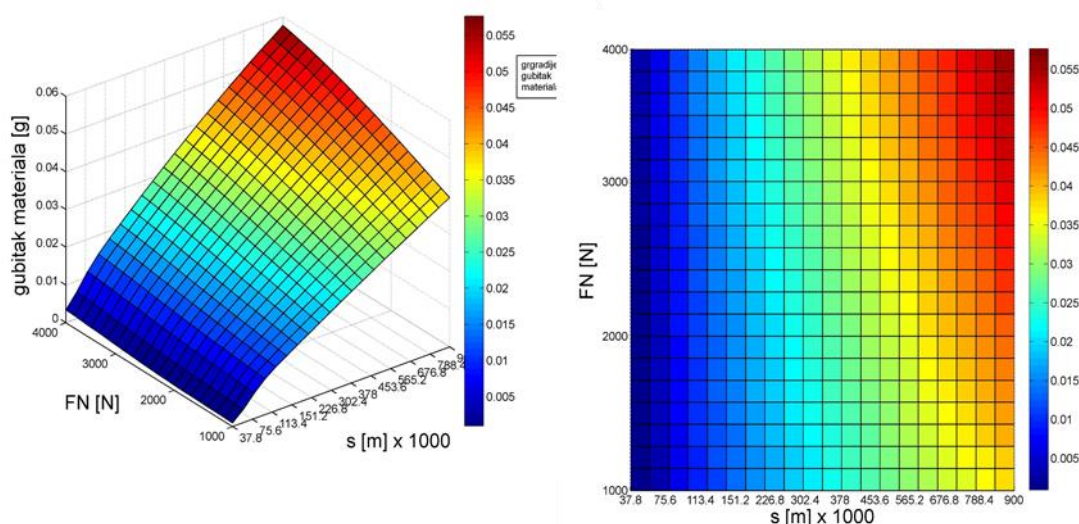
$$\omega_{\Delta m t k j} = [1.5773 \quad -0.016723 \quad 5.1328 \quad 0.05505] \quad (5.19)$$

$$b_{\Delta m t o k} = -3.4998, X [s, F_N, t] \quad (5.20)$$

$$\Delta m_t^* = \frac{1}{2} \cdot (\Delta m + 1) \cdot (\Delta m_{max} - \Delta m_{min}) + 0.001, \Delta m_{tmax} = 0.0579, \Delta m_{tmin} = 0.001 \quad (5.21)$$

Kod ukupnog gubitka mase, sabira se promena mase posle svakih 5 sati ispitivanja kako bi rezultati bili uporedivi.

Gubitak mase Δm_t ima pozitivni gradijent sa povećanjem puta klizanja i opterećenja za sva radijalna opterećenja kao što je prikazano na slici 5.49. Takođe, gubitak mase smanjuje sa opadanjem vrednosti opterećenja. To nam ukazuje da je radni vek ležaja od legure belog metala na kalajnoj osnovi Tegotenax (V840) veći pri manjim opterećenjima. Poređenja radi, ovaj ležaj ima duži radni vek od ležaja koji je takođe legura belog metala na istoj kalajnoj osnovi oznaka WM-2 i WM-5 [10].



Sl.5.49 Predviđanje ukupnog gubitka mase Δm_t u funkciji puta klizanje s i opterećenja F_N uz pomoć BP neuronske mreže

Na početku eksperimentalnih testova, nagib krive gubitka mase je veći od preostalog perioda eksperimentalnog procesa kao što je prikazano na slici 5.49. To nam ukazuje da je količina gubitka mase veća na početku procesa usled neprekidnog gubitka materijala sve dok se ne dostigne stanje kompatibiliteta između kontaktne površine rukavca vratila i posteljice ležaja.

5.6.5 Analitička zavisnost lokalnog gubitka mase Δm_t u funkciji opterećenja ležaja F_N i puta klizanja s uz pomoć BP neuronske mreže

Kod lokalnog gubitka materijala se meri promena gubitka materijala na svakih 5 sati kao što je prikazano na slici 5.50.

Promena lokalnog gubitka masa Δm_l tj, habanje, ANN predikcija se može predataviti jednačinama 5.22-5.26.

$$\Delta m_l = \left[\frac{2}{1+e^{-2(X \cdot \omega_{\Delta mlji} + b_{\mu j})}} \right] \cdot \omega_{\Delta mlkj} + b_{\Delta mok} \quad (5.22)$$

$$\omega_{\Delta mlji} = \begin{bmatrix} -43.0058 & 44.9839 \\ -0.45759 & -0.50676 \\ 0.48285 & 0.54614 \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

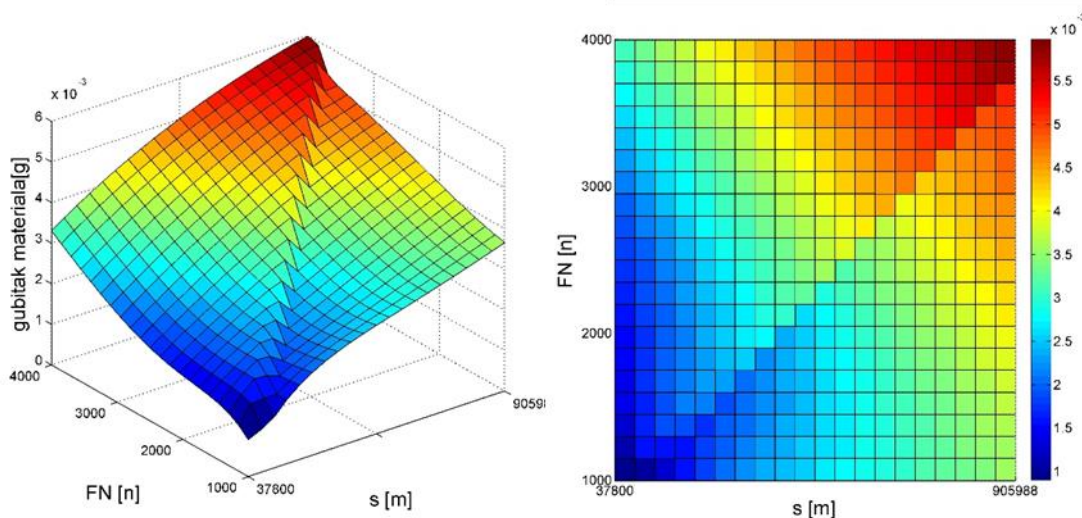
$$b_{\Delta mlj} = \begin{bmatrix} 5.9964 \\ -1.9146 \\ 1.7855 \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

$$\omega_{\Delta mlkj} = [0.11846 \quad -308.1403 \quad -215.1707] \quad (5.25)$$

$$b_{\Delta mlkj} = -91.6553, X [s, F_N, t] \quad (5.26)$$

$$\Delta m_l^* = \frac{1}{2} \cdot (\Delta m + 1) \cdot (\Delta m_{max} - \Delta m_{min}) + 0.001, \quad (5.27)$$

$$\Delta m_{lmax} = 0.0059, \Delta m_{lmin} = 0.001 \quad (5.28)$$



Sl.5.50 Predviđanje lokalnog gubitka mase u funkciji ukupnog puta klizanja s i opterećenja F_N uz pomoć BP neuronske mreže

5.6.6 Analitička zavisnost promena površinske hrapavosti položaja 1 u funkciji opterećenja ležaja F_N i puta klizanja s uz pomoć BP neuronske mreže

ANN predikcija površinske hrapavosti Ra u položaju 1 posteljice (sl. 4.10) se definiše korišćenjem jednačina 5.29-5.33.

$$Ra_1 = \left[\frac{2}{1+e^{-2(X \cdot \omega_{Ra_1kj} + b_{\mu j})}} \right] \cdot \omega_{Ra_1kj} + b_{\Delta mok} \quad (5.29)$$

$$\omega_{Ra_1ji} = \begin{bmatrix} 15.725 & 6.8102 \\ -7.173 & 0.58368 \\ -3.4333 & -0.59695 \end{bmatrix}, \quad (5.30)$$

$$b_{Ra_1j} = \begin{bmatrix} -5.5061 \\ -3.2296 \\ -2.7955 \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

$$\omega_{Ra_1kj} = [0.58126 \quad 0.1901 \quad 0.63441] \quad (5.32)$$

$$b_{Ra1ok} = 0.44012, X [n, F_N, t] \quad (5.33)$$

$$Ra_1 = \frac{1}{2} \cdot (Ra_1 + 1) \cdot (Ra_{1max} - Ra_{1min}) + 0.17, Ra_{1max} = 0.73, Ra_{1min} = 0.17 \quad (5.34)$$

5.6.7 Analitička zavisnost promena površinske hrapavosti položaja 2 u funkciji opterećenja ležaja F_N i puta klizanja s uz pomoć BP neuronske mreže

ANN predikacija površinske hrapavosti Ra u položaju 2 posteljice ležaja se se definiše korišćenjem jednačina 5.35-5.40.

$$Ra_2 = \left[\frac{2}{1+e^{-2(X \cdot \omega_{\Delta mlji} + b_{\mu j})}} \right] \cdot \omega_{Ra_2kj} + b_{\Delta mok} \quad (5.35)$$

$$\omega_{Ra_2ji} = \begin{bmatrix} -1.0916 & -0.3502 \\ 0.024108 & 0.72616 \\ -0.0065595 & -0.50746 \end{bmatrix}, \quad (5.36)$$

$$b_{Ra_2j} = \begin{bmatrix} 3.4415 \\ -0.74131 \\ 1.1102 \end{bmatrix} \quad (5.37)$$

$$\omega_{Ra_2kj} = [-84.9059 \quad -98.4446 \quad -224.2607] \quad (5.38)$$

$$b_{Ra2ok} = 203.0597, X [s, F_N] \quad (5.39)$$

$$Ra_2 = \frac{1}{2} \cdot (Ra_2 + 1) \cdot (Ra_{2max} - Ra_{2min}) + 0.18 \quad (5.40)$$

$$Ra_{2max} = 0.59, Ra_{2min} = 0.18 \quad (5.41)$$

5.6.8 Analitička zavisnost promena površinske hrapavosti položaja 3 u funkciji opterećenja ležaja F_N i puta klizanja s uz pomoć BP neuronske mreže

ANN predikacija površinske hrapavosti Ra u položaju 3 posteljice ležaja se se definiše korišćenjem jednačina 5.42-5.47.

$$Ra_3 = \left[\frac{2}{1+e^{-2(X \cdot \omega_{\Delta mlji} + b_{\mu j})}} \right] \cdot \omega_{Ra_3kj} + b_{\Delta mok} \quad (5.42)$$

$$\omega_{Ra_3ji} = \begin{bmatrix} -19.1142 & 74.3457 \\ -19.6697 & 2.7329 \\ -8.1846 & 43.6901 \end{bmatrix} \quad (5.43)$$

$$b_{Ra_3j} = \begin{bmatrix} 55.5783 \\ -25.4189 \\ -5.4611 \end{bmatrix} \quad (5.44)$$

$$\omega_{Ra_3kj} = [0.84364 \quad 200.4109 \quad -0.76084] \quad (5.45)$$

$$b_{Ra3ok} = 199.6812, X [s, F_N] \quad (5.46)$$

$$Ra_3 = \frac{1}{2} \cdot (Ra_3 + 1) \cdot (Ra_{3max} - Ra_{3min}) + 0.23 \quad (5.47)$$

$$Ra_{3max} = 0.55, Ra_{3min} = 0.23 \quad (5.48)$$

5.6.9 Analitička zavisnost promena površinske hrapavosti položaja 4 u funkciji opterećenja ležaja F_N i puta klizanja s uz pomoć BP neuronske mreže

ANN predikacija površinske hrapavosti Ra u položaju 4 posteljice ležaja se se definiše korišćenjem jednačina 5.49-5.54.

$$Ra_4 = \left[\frac{2}{1+e^{-2(X \cdot \omega_{\Delta mlji} + b_{\mu j})}} \right] \cdot \omega_{Ra_4kj} + b_{\Delta mok} \quad (5.49)$$

$$\omega_{Ra_4ji} = \begin{bmatrix} 3.4468 & 1.2137 \\ -5.9544 & -10.9853 \\ 31.9728 & 43.2145 \\ 3.1622 & -3.7566 \end{bmatrix} \quad (5.50)$$

$$b_{Ra_4j} = \begin{bmatrix} 3.6902 \\ -11.0155 \\ -11.3383 \\ 13.6201 \end{bmatrix} \quad (5.51)$$

$$\omega_{Ra_4kj} = [-0.51252 \quad -0.25619 \quad 0.42814 \quad 0.035357] \quad (5.52)$$

$$b_{Ra4ok} = 0.042787, X [s, F_N] \quad (5.53)$$

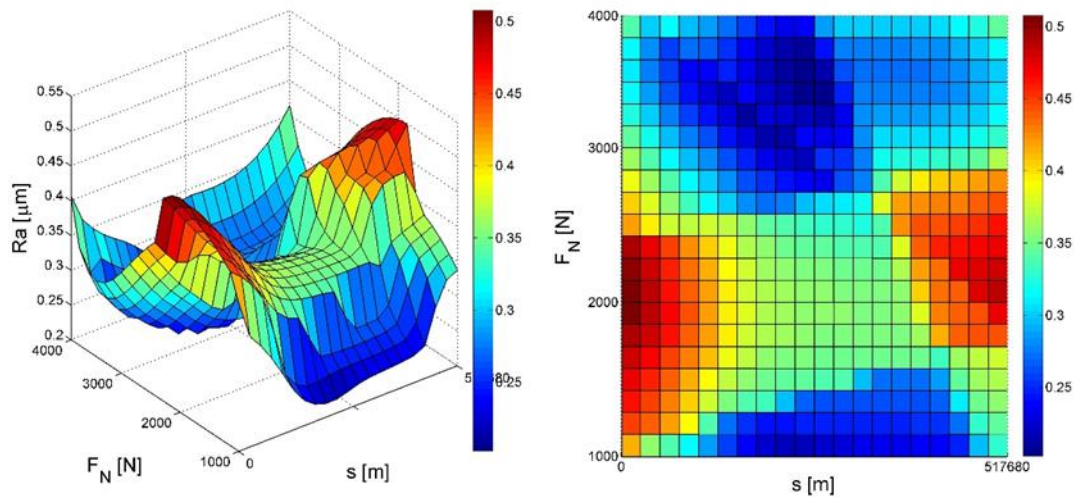
$$Ra_4 = \frac{1}{2} \cdot (Ra_4 + 1) \cdot (Ra_{4max} - Ra_{4min}) + 0.15 \quad (5.54)$$

$$Ra_{4max} = 0.51, Ra_{4min} = 0.15 \quad (5.55)$$

5.6.10 Analitička zavisnosti promena ukupne površinske hrapavosti Ra_{total} u funkciji opterećenja ležaja F_N i puta klizanja s uz pomoć BP neuronske mreže

Matematički model promene ukupne hrapavosti (slika 5.51) je izračunat prema prosečnoj promeni hrapavosti u četiri pozicije kao što su:

$$Ra_{total} = \frac{Ra_1 + Ra_2 + Ra_3 + Ra_4}{4} \quad (5.50)$$



Sl.5.51 Predviđanje ukupne hrapavosti u odnosu na kliznu brzinu i radijalno opterećenje F_N uz pomoć BP neuronske mreže

Simulacija je izvršena preko ANN za vrednosti koeficijenta trenja, temperature ulja podmazivanje, lokalno i ukupno habanje i hrapavost površina, korišćenjem slučajnih ulaznih vrednosti (brzina klizanja, vertikalno opterećenje i vreme klizanja), ali u eksperimentalnim uslovima rada, rezultati su bili zadovoljavajući, kao što je prikazano u tabeli 5.8.

Tabela 5.8 Simulacija vrednosti matematičkog modela

	Realni X	NormalizovanX	Denormalizacije ANN model		ANN model	
[F_N , n, t]	[1500,2500,730]	[-0.5,0,0.1358]	$\mu=-0.8805$		$\mu^*=0.013971$	
	[1700,1500,105]	[0.3,0.667,0.259]	$T=0.6478$		$T^*=49.24$	
[s, F_N]	[211438, 2650]	[-0.6 0.1]	$\Delta m_{\text{local}}=-0.293$		$\Delta m^*_{\text{local}}=0.002732$	
	[598230, 1600]	[0.3 -0.6]	$\Delta m_{\text{total}}=0.0525$		$\Delta m^*_{\text{total}}=0.030945$	
	[207072, 1300]	[-0.2 -0.8]	$R_1=-0.9147$	$R^*_1=0.1938$		$R^*_{\text{total}}=0.2959$
			$R_2=0.03215$	$R^*_2=0.3916$		
$R_3=-0.0324$			$R^*_3=0.3848$			
$R_4=-0.6462$			$R^*_4=0.2137$			

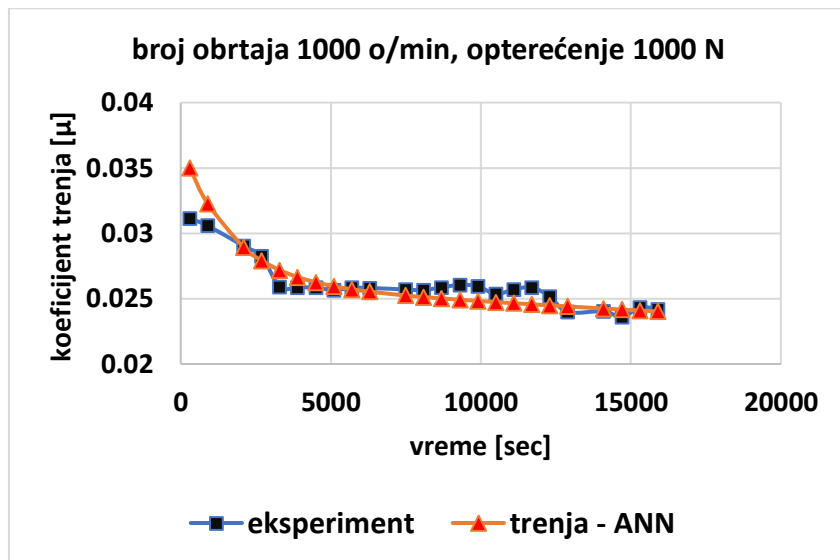
5.6.11 Srednje kvadratno odstupanje (MSE) između eksperimentalnih i vrednosti dobijenih ANN mrežom

U tabeli 5.9 dati su rezultati srednje kvadratne greške između eksperimentalno dobijenih vrednosti i rezultata dobijenih korišćenjem veštačke neuronske mreže ANN, gde su radijalno opterećenje i broj obrtaja ulazne vrednosti, a izlazne vrednosti su promena temperature, koeficijent trenja, promena lokalno i ukupno habanje i promena hrapavosti. Dobijeni rezultati su zadovoljavajući jer je odstupanje relativno malo. Zato se neuronska mreža ANN može usvojiti za predviđanje vrednosti koeficijenta trenja, temperature i habanja u proračunskim modeliranjima ležajeva.

Tabela 5.9 Srednja kvadratna greška između eksperimentalno dobijenih vrednosti i rezultata dobijenih korišćenjem veštačke neuronske mreže ANN.

<i>Promena temperatura t</i>						
Eksperimentalni uslovi	1000N, 1000 o/min	2000N, 1000 o/min	3000N, 1000 o/min	4000N, 1000 o/min	ukupno greška 1000 o/min	ukupna greška za T
Greška %	0.20817	1.100874	0.46291	0.971259	0.685803	0.759449
Eksperimentalni uslovi	1000N, 2000 o/min	2000N, 2000 o/min	3000N, 2000 o/min	4000N, 2000 o/min	ukupno greška za 2000 o/min	
Greška %	0.74824	0.796379	0.595307	0.811848	0.737944	
Eksperimentalni uslovi	error t, 1000N, 3000 o/min	error t, 2000N, 3000 o/min	error t, 3000N, 3000 o/min	error t, 4000N, 3000 o/min	ukupno greška za 3000 o/min	
Greška %	0.059592	0.886028	1.534614	0.938166	0.8546	
<i>Promena koeficijenta trenja</i>						
Eksperimentalni uslovi	1000 N, 1000 o/min	2000 N, 1000 o/min	3000 N, 1000 o/min	4000 N, 1000 o/min	ukupno greška za 1000 o/min	ukupno greška za μ
Greška %	2.8681	7.083961	7.682827	9.891223	6.881528	4.837908
Eksperimentalni uslovi	1000 N, 2000 o/min	2000 N, 2000 o/min	3000 N, 2000 o/min	4000 N, 2000 o/min	ukupno greška za 2000 o/min	
Greška %	3.842698	2.483848	1.415235	1.574875	2.329164	
Eksperimentalni uslovi	1000 N, 3000 o/min	2000 N, 3000 o/min	3000 N, 3000 o/min	4000 N, 3000 o/min	ukupno greška za 1000N, 3000 o/min	
Greška %	6.281739	5.779713	4.717945	4.432728	5.303031	
<i>Promena lokalno habanje</i>						
Eksperimentalni uslovi	1000N	2000N	3000N	4000N	Ukupno lokalne greške Δm_1	
Greška %	8.38055	7.460009	7.542141	5.279448	7.165537	
<i>Promena e ukupnog habanje</i>						
Eksperimentalni uslovi	1000 N	2000 N	3000 N	4000 N	Ukupno totalne greške Δm_{ukopno}	
Greška %	1.194426	1.769617	1.108914	1.378646	1.362901	
<i>Promena hrapavosti</i>						
Eksperimentalni uslovi	Položaj 1	Položaj 2	Položaj 3	Položaj 4	Ukupno greška hrapavosti R_a	
Greška %	8.7	4.05	8.111	16.94	9.45025	

Na slici 5.52, dat je detaljan primer razlike eksperimentalnih rezultata i predviđanja neuronskom mrežom ANN za koeficijent trenja u slučaju kada je radijalno opterećenje 1000 N i broj obrtaja 1000 o/min.



Sl. 5.52 Vrednosti koeficijenta trenja dobijenih eksperimenom i predviđanjem ANN za radialno opterećenje 1000 N i broj obrtaja 1000 o/min

Slika 5.52 pokazuje da je greška između eksperimentalnih i predviđenih vrednosti koeficijenta trenja na početku značajna, verovatno zbog nedostatka dodatnih podataka za predviđanje neuronske mreže ali i zbog nestabilnosti promene koeficijenta trenja na početku eksperimentalnog ispitivanja, dok je, nakon par minuta nakon početka eksperimenta, zanemarljiva.

6. ZAKLJUČAK

Klizni ležaji imaju veliku primenu u teškoj mašinogradnji, kod mlinova, turbina, drobilica, valjaoničkih i kovačkih mašina, presa, reduktora itd. Relativno kretanje delova uz istovremeno prenošenje opterećenja kod kliznih ležaja ostvaruje se uz prisustvo trenja klizanja. Istraživanja izvršena poslednjih godina dovela su do značajnog usavršavanja kliznih ležaja. Osnovna prednost kliznih ležaja u odnosu na kotrljajne, ogleda se u njihovoj nosivosti i radnom veku. Ako se kod kliznog ležaja obezbede uslovi hidrodinamičkog plivanja, onda on ima skoro neograničeni radni vek. Ovo je naročito bitno kod rada sa visokim brojem obrtaja, gde kotrljajni ležaji zbog ograničene nosivosti i ograničenog radnog veka ne mogu da se primene. Sa druge strane tendencija razvoja savremenih mašina ogleda se u stalnom poboljšanju njihovih performansi. To je mahom povezano sa povećanjem opterećenja i učestanosti obrtanja rukavca vratila uz istovremeno smanjenje dimenzija i težine. Ovakav trend razvoja ukazuje da u budućnosti treba očekivati sve veću primenu kliznih ležaja. U tom pravcu su i sprovedena istraživanja u ovoj tezi.

Trenje, kao neizbežna pojava pri relativnom kretanju delova u kontaktu, je nepoželjno u ogromnoj većini elemenata i mašinskih sklopova i drugih mašinskih uređaja (sem kod: frikcionih prenosnika snage, presovanih spojeva, kočnica, frikcionih spojnika, frikcionog zavarivanja i zavarivanje trenjem sa mešanjem FSW gde je koristan proces). Pojava sile trenja pri klizanju i kotrljanju površina u kontaktu ne dovodi samo do nekorisnog utroška energije (pretvaranje izgubljene mehaničke energije u toplotnu), već usled istrošenja i razaranja površina, do mogućnosti značajnih oštećenja elemenata i sklopova i konačno, do otkazivanja rada mašine i postrojenja.

Predmet naučnog istraživanja u okviru ove disertacije je istraživanje triboloških svojstava kliznih ležaja izrađenih od legure belog metala na bazi kalaja u uslovima hidrodinamičkog podmazivanja za leguru TEGOTENAX V840 sa hemijskim sastavom 88,7 % Sn, 7,6 % Sb i 3,7 % Cu.

Istraživanje triboloških svojstava kliznih ležaja su vršena na originalno razvijenoj opremi za ispitivanje obrtnih elemenata na Mašinskom fakultetu u Nišu u Laboratoriji za mašinske konstrukcije, razvoj i inženjering. Ispitivani su radijalni klizni ležaji od legure belog metala na kalajnoj osnovi u uslovima hidrodinamičkog podmazivanja sa izabranim uljem SAE VG 32.

Na bazi sprovedenog eksperimentalnog istraživanja mogu da se izvedu sledeći zaključci:

- Koeficijent trenja s obzirom na radijalno opterećenje je najniži pri najvećem radijalnom opterećenju za svaku učestanost obrtanja rukavca vratila; opada ekstremno sa povećanjem opterećenja kliznog ležaja.
- Promena vrednosti koeficijenta trenja poprima oblik konvergirajuće krive pri povećanju opterećenja i pri povećanju broja obrtaja rukavca vratila. Koeficijent trenja se neznatno

povećava sa povećanjem broja obrtaja rukavca vratila za isto prosečno radijalno opterećenje. Koeficijent trenja pri najvećem opterećenju i najnižem broju obrtaja vratila ima najniže vrednosti. I obrnuto: najniže radijalno opterećenje i najviša brzina klizanja znače najviše vrednosti koeficijenta trenja.

- Vrednosti koeficijenta trenja za ispitivane radijalne klizne ležaje hidrodinamički podmazivane istih konstrukcionih parametara su izračunate i uz pomoć dijagrama Raimondija i Bojda, za vrednosti opterećenja ležaja i učestanosti obrtanja koje su korišćene u eksperimentalnom testu. Poređenje eksperimentalnih i analitičkih rezultata dobijenih korišćenjem dijagrama Raimondija i Bojda je pokazalo grešku od 2-16% u svim slučajevima.
- Kada je u pitanju istraživanje hrapavosti kontaktnih površina, na početku eksperimentalnog testa, parametri hrapavosti kontaktnih površina ispitivanih uzoraka R_a i R_z opadaju i manje su izmerene vrednosti u poziciji posteljice 1, a zatim 4 (sl. 4.10). Neprekidno klizanje je uzrok povećanja hrapavosti za sve položaje, značajnog propadanja (degradacije) hrapavosti površine u položaju 1, a posle položaja 4 dok se neznatno povećanja prosečne hrapavosti R_a i R_z javljaju na pozicijama 2 i 3.
- Rezultati testova habanja (lokalnog gubitka materijala) pokazuju tri zone nestabilnog stanja i tri zone stabilnog stanja, prema promeni učestanosti obrtanja rukavca vratila. Rezultati testova ukupnog gubitka materijala ukazuje na činjenicu da je radni vek posteljice ležaja od belog metala na bazi kalaja - Tegotenax (V840) veći pri nižim opterećenjima i da ima duži radni vek u poređenju sa ležajem od legure belog metala tipa WM-2 i WM-5. Promena intenziteta habanja je određena pod različitim uslovima a promena (tranzicija) je pronađena od visokog intenziteta habanja do stabilnog intenziteta habanja.
- ispitivanja mikrostrukture kliznog ležišta uz pomoć SEM i optičkog mikroskopa, u cilju proučavanja dejstvo mikrostrukture na tribiološka ponašanja legure beli metal na kalajnoj osnovi u uslovima hidrodinamičkog podmazivanja, pokazuje postojanje dve faze tj. α faze (rastvor solida antimona i bakra u kalaju) i β faze (SbSn kristali kubnog oblika). Dobijeni rezultati ukazuju na potpuno odsustvo gasne poroznosti u svim uzorcima. To objašnjava odsustvo naprsina na površini ležaja kao i nizak gubitak materijala pod različitim radijalnim opterećenjima i brzinama klizanja.
- Nelinearni modeli zavisnosti koeficijenta trenja, temperature ležaja, hrapavosti i gubitka mase posteljice ležaja izrađene od legure beli metal na kalajnoj osnovi Tegotenax V840 u funkciji radijalnog normalnog opterećenja i broja obrtaja (kliznog vremena i put klizanje) urađeni su pomoću veštačke neuronske mreže ANN. Rezultati testova pokazuju da dobro obučeni BP modeli neuronske mreže mogu precizno predvideti vrednosti koeficijenta trenja, temperaturu u

funkciji opterećenja, učestanost obrtanja i vremena klizanje, odnosno gubitak materijala i hrapavost u funkciji opterećenja i puta klizanja.

Najznačajniji doprinosi doktorske disertacije su:

- Originalna obimna eksperimentalna istraživanja triboloških svojstava kliznih ležaja (koeficijenta trenja i intenzitet habanja) od legure belog metala na bazi kalaja - TEGOTENAX V840 u uslovima hidrodinamičkog podmazivanja,
- Analiza termičkog ponašanja kliznih ležaja od legure belog metala - TEGOTENAX V840 u funkciji opterećenja ležaja i brzine klizanja.
- Analiza mikrostrukture materijala kliznog ležaja izrađenog od legure belog metala - TEGOTENAX V840 nakon izvršenih eksperimentalnih istraživanja.
- Razvijen model veštačke neuronske mreže za utvrđivanju analitičke zavisnosti eksperimentalnih parametara ispitivanja radijalnog kliznog ležaja u uslovima hidrodinamičkog podmazivanja.
- Utvrđena analitička zavisnost eksperimentalno dobijenih triboloških parametara radijalnog kliznog ležaja u uslovima hidrodinamičkog podmazivanja (koeficijenta trenja, temeperature ležaja, habanje i hrapavost posteljice ležaja u funkciji opterećenja ležaja i puta klizanja) primenom razvijenog modela veštačke neuronske mreže.
- Razvijeno tehničko rešenje ispitnog stola za ispitivanje radijalnih kliznih ležaja hidrodinamički podmazivanih.

Preporuke za dalji rad

Sledeće preporuke se predlažu za dalji rad:

- Numeričke simulacije promene temperature kliznog ležaja pod različitim uslovima opterećenja za radijalne klizne ležaje napravljene od legure belog metala na bazi kalaja – Tegotenax V840
- Numeričke simulacije promene intenziteta habanja pod različitim uslovima opterećenja za radijalne osovinske ležaje napravljene od legure belog metala na bazi kalaja – Tegotenax V840
- Razvijanje opreme za ispitivanje kliznih ležaja koje će omogućiti proučavanje dejstva promene temperature ulja na promenu koeficijenta trenja.
- Razvijanje opreme za ispitivanje kliznih i kotrljajnih ležaja koje će omogućiti ispitivanje u uslovima dinamičkih visokofrekventnih opterećenja.

LITERATURA

- [1] Marinković A., Lazović T., Stanković M., "EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF POROUS METAL BEARINGS", *15th International Conference on Experimental Mechanics*, Porto, Portugal, 22-27 July 2012.
- [2] Martin K. J, Parkins W. D, Jia H. "The Design and Development of a High-Speed Journal", *STLE*, 58th Annual Meeting, New York, 2003.
- [3] Bouyer J., Fillon M., "An Experimental Analysis of Misalignment Effects on Hydrodynamic Plain Journal Bearing Performances", *Journal of Tribology*, Vol. 124(2), pp.313-319, 2002. doi: 10.1115/1.1402180
- [4] Eman j. A., Kadim J. K., " Study of Tin Adding on Dry Sliding Wear Properties of Aluminum Alloys", *International Journal Metallurgical & Materials (IJMMSE)*, Vol. 3, Issue 1, 2013.
- [5] Holmberg K., Ronkainen H., Laukkanen A., Wallin K., "Friction and wear of coated surfaces — scales, modelling and simulation of tribomechanisms", *Surface & Coatings Technology*, 202 (4-7), 2007, pp.1034–1049.
- [6] Kakaš D., Terek P., Miletić A., Kovačević L., Vilotić M., Škorić B., Krumes D., "Friction and Wear of Low Temperature Deposited Tin Coating Sliding in Dry Conditions at Various Speeds " *Tehnički vjesnik*, vol. 20, 1, 27-33, 2013.UDC/UDK 620.178.16:621.793
- [7] Brito F.P. Miranda A.S.J. Bouyer, Fillon M., "Experimental Investigation of the Influence of Supply Temperature and Supply Pressure on the Performance of a Two Axial Groove Hydrodynamic Journal Bearing ", *ASME, JOURNAL OF TRIBOLOGY*, 129, P.P.98-105, 2007, DOI: 10.1115/1.2401206
- [8] Javorova J., Mazdrakova A., Andonov I., A. Radulescu, "Analysis of HD Journal Bearings Considering Elastic Deformation and Non-Newtonian Rabinowitsch Fluid Model", *Tribology in Industry*, Vol. 38, No. 2, P.P.186-196, 2016.
- [9] Evgeny K., Sergei B., G. Michel F., "THD Analysis of a Compliant Journal Bearing Considering Liner Deformation", *WORLD TRIBOLOGY CONGRESS Kyoto*, Japan, 2009
- [10] Hairong, W., Qinling, B., Shengyu, Z., Jun, Y., Weimin, L. "Friction and wear properties of Babbitt alloy 16-16-2 under sea water environment", *Journal of Tribology International*, 44 (10), p.1161–1167, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint>,
- [11] Feyzullahoglu E, Zeren A, Zeren M, "Tribological behaviour of tin-based materials and brass in oil lubricated conditions", *Materials and Design*, 29 ,714–720, 2008.
- [12] Adalet, Z., "Embedability behaviour of tin-based bearing material in dry sliding, *Materials and Design*, 28, pp. 2344–2350, 2007.

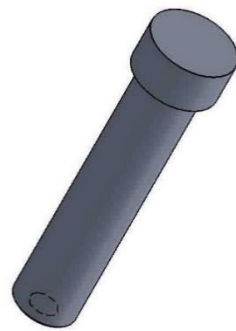
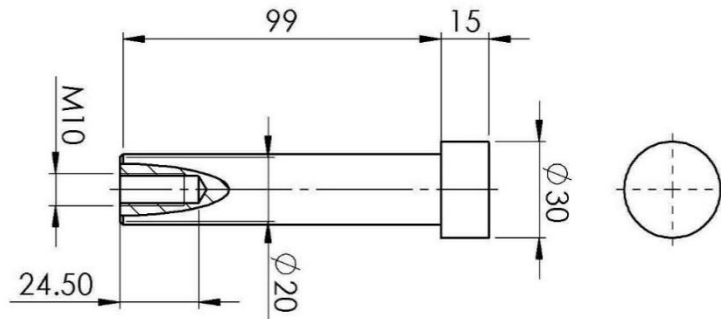
- [13] Zeren A., Feyzullahoglu E., Zeren M., "A study on tribological behaviour of tin-based bearing material in dry sliding", *Materials and Design*, vol. 28, 318–323, 2007.
- [14] Bojić N., Milčić D., Banić M., Milčić, M., "Effect of coverage of graphite on self-lubricating plain bearings, *14th International Conference on Tribology SERBIATRIB '15*, p. 309-313, 2015.
- [15] Ozsarac U. , Findik F., Durman M. " The wear behaviour investigation of sliding bearings with a designed testing machine ", *Materials and Design*, 28, 345–350, 2007.
- [16] Brockwell K., S DeCamillo, and W Dmochowski. Measured temperature characteristics of 152mm diameter pivoted shoe journal bearings with flooded lubrication. *Tribology Transactions*, 44(4):543–550, 2001.
- [17] Brockwell K, Dmochowski W, DeCamillo S., "An investigation of the steady-state performance of a pivoted shoe journal bearing with ISO VG 32 and VG 68 oils", *Tribology Transactions*, 47(4):480–488, 2004.
- [18] Y Tachi, S Ishihara, K Tamura, T Goshima, A. J. McEvily, "Predicting sliding wear behaviour of a tin-based white metal under varying pressure and speed conditions", *Journal of Engineering Tribology*, vol. 208-210, June 2005. DOI: 10.1243/135065005X34035
- [19] Arab A, Brito F P, Claro J C P, Gandjalikhan. S A, "An experimental study of the influence of loading direction on the thermohydrodynamic behaviour of twin axial groove journal bearing", *Engineering Tribology*, Vol. 225 Part J, 2011, DOI: 10.1177/1350650111401970
- [20] Ahmad M. A., Kasolang S., Dwyer-Joyce R.S., "Experimental study on the effects of oil groove location on temperature and pressure profiles in journal bearing lubrication *Tribology International*, vol.74, 79–86, 2014.
- [21] G. B. Daniel, K. L. Cavalca "Evaluation of the Thermal Effects in Tilting Pad Bearing", *International Journal of Rotating Machinery*, Article ID 725268, 17 pages, 2013. doi.org/10.1155/2013/725268
- [22] Amit C., Rakesh S. , Rajesh K., "Thermohydrodynamic analysis of elliptical journal bearing with different grade oils", *Tribology International*, 43, 1970–1977, 2010.
- [23] Adatepe, H., Bıyıklıoğlu, A., Sofuoğlu, H., 2011, An experimental investigation on frictional behavior of statically loaded micro-grooved journal bearing, *Elsevier Tribology International*, Vol 44, Issue 12, pp. 1942-1948.
- [24] Monmousseau P., Fillon M., Frene J., " Transient thermoelastohydrodynamic study of tilting-pad journal bearings - application to bearing seizure", *Journal of Tribology*, 120(2):319–324, 1998.

- [25] D M C Mc Carthy, S B Glavatskih," Assessment of polymer composites for hydrodynamic journal-bearing applications", *Lubrication Science*,Sweden 2009
- [26] D M C McCarthy, S B Glavatskih, A Byheden.," Influence of oil type on the performance characteristics of a two-axial groove journal bearing". *Lubrication Science*, Sweden 2009.
- [27] Labašová E. Ďuriš R.," Measurement of Tribological Parameters "*Advanced Materials Research*, Vols. 875-877, pp 496-499, 2014.
- [28] Labašová E.," The Dependence of the Friction Coefficient on the Size and Course of Sliding Speed", *Applied Mechanics and Materials*, (Volume 693), pp 305-310, December 2014.
- [29] Labašová, E., Vladimír, S. R.," The Evaluation of the Results of the Measurement of the Temperature in Sliding Joint by Thermocouple and Thermal Camera" *XXIX. DIDMATTECH*,EÖTVÖS LORÁND UNIVERSITY, FACULTY OF INFORMATICS, Budapest, 2016
- [30] Mičić, M., Đorđević, M., Đajić, G., "Svojstva ležaja proizvedenih nalivanjem i navarivanjem kliznog sloja belog metala", *MjoM, METALURGIJA - JOURNAL OF METALLURGY*, pp 225-236, 2002.
- [31] Equey S., Houriet A., Mischler S.," Wear and frictional mechanisms of copper-based bearing alloys", *Wear*, 273, 9–16, 2011.
- [32] Jones G.A., "On the tribological behaviour of mechanical seal face materials in dry line contact Part I. Mechanical carbon", *Wear*, 256, 415–432, 2004.
- [33] Bekir . U., Enver A., "Evaluation of effect of alloy elements in copper based CuSn10 and CuZn30 bearings on tribological and mechanical properties ", *Journal of Alloys and Compounds*, vol.489,262–268,2010
- [34] Chang-Gun L., Yu-Jin H., Young-Min C., Jae-Keun L., Choi C., Je-Myung O., "A study on the tribological characteristics of graphite nano lubricants", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing January*, Volume 10, Issue 1, pp 85-90, 2009.
- [35] Valkonen, A.; Juhanko, J. & Kuosmanen, P., "MEASUREMENT OF OIL FILM PRESSURE IN HYDRODYNAMIC JOURNAL BEARINGS ", *7th International DAAAM Baltic Conference*. 2010.
- [36] Singh P., Rana C. P., "Effect of Bearing Surface Texture on Journal Bearing Pressure Distribution ", *International Journal of Science and Research (IJSR)*, Volume 3 Issue 6, 2014
- [37] Francisco P. B., António S. M., José C. P. C.," The role of lubricant feed temperature on the performance of twin groove journal bearings: an experimental study", *Surface Science and Engineering*, Vol. 5, No. 4, 2011.

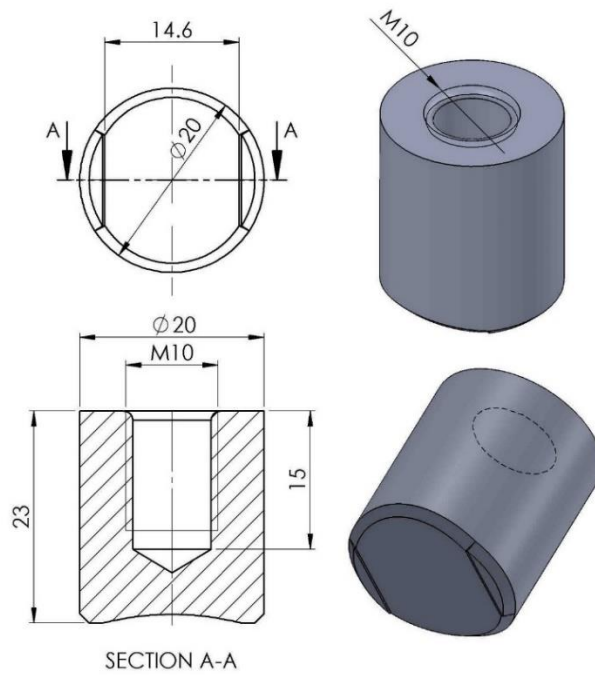
- [38] Adelina B., Gianni C., Filippo M., "Influence of surface wettability on friction and wear tests "Wear 222, 57–65, 1998.
- [39] Ashwin R., Wasim A., Surya P. M., Andrew H. C., Andreas A. P., William P. King, "Friction characteristics of microtextured surfaces under mixed and hydrodynamic lubrication ", *Tribology International*, 57, 170–176, 2013.
- [40] Marx S., Junghans, R., 1996, "Friction and wear of highly stressed thermoplastic bearings under dry sliding conditions", *Wear*, Vol. 193, pp. 253-260, 1996.
- [41] Mosleh M., Saka N., Suh, N., "A mechanism of high friction in dry sliding bearings", *Wear*, Vol. 252, pp. 1-8, 2002.
- [42] Echávarri O. J., E. de la Guerra Ochoa, E. Chacón Tanarro, P. Lafont Morgado, A. Díaz Lantada, J. M. Munoz, Guijosa, J. L. Muñoz Sanz, "Artificial neural network approach to predict the lubricated friction coefficient", *Lubrication Science*, 26:141–162, 2014.
- [43] Kumar T. R., Rajendran I., "Mass Loss Prediction of Newly Developed Aluminium-Based Alloys Using Artificial Neural Network", *Neural Network World*, 2/14, 129-142, 2012. DOI: 10.14311/NNW.2014.24.008
- [44] Ekka K. K., Chauhan S. R., Varun, "Dry Sliding Wear Characteristics of SiC and Al₂O₃ Nanoparticulate Aluminium Matrix Composite Using Taguchi Technique", *Arab J Sci Eng*, 40:571–581, 2015. DOI 10.1007/s13369-014-1528-2
- [45] Saravanan S. D., Senthilkumar M., "Prediction of Tribological Behaviour of Rice Husk Ash Reinforced Aluminum Alloy Matrix Composites Using Artificial Neural Network", *ISSN 1067_8212, Russian Journal of Non_Ferrous Metals*, Vol. 56, No. 1, pp. 97–106, 2015.
- [46] Panthi A., Balwanshi J., Chandravanshi A., " Design and Analysis of Hydrodynamic Journal Bearing using Raimondi and Boyd Chart", *IJCEM*, Volume 2, Issue 3, ,2015.
- [47] Mohamad Ali Ahmada*, Salmiah Kasolanga, R. S. Dwyer-Joyce, Aidah Jumahata, "The Effects of Oil Supply Pressure at different Groove Position on Temperature and Pressure Profile in Journal Bearing", *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 66:3, 113–119, 2014.
- [48] Hailing J., " , Toward a mechanical wear equation", *J. of Lubrication Technology ASME*, Vol. 105, pp. 212-220. 1983.
- [49] Hailing J., 1975, "Principles of Tribology", *Tinling Ltd*, Prescot, Merseyside.
- [50] Ivković, B., RAC A., "Revitalizacija obradnih sistema - mogući prilaz u industriji prerađivanja metala". *Beograd*, 1995.
- [51] Aberšek, B., Flašker, J. Vzdrževanje, "sistemi, strategije, procesi in optimiranje", *1. izd. Maribor*, Fakulteta za strojništvo, 2005.

- [52] Golchin A., Simmons G F., Glavatskih S B., "Break-away friction of ptfe materials in lubricated conditions", *Tribology International*, 48:54–62, 2012.
- [53] Golchin A., Simmons G F., Glavatskih S B., Prakash B., "Tribological behavior of polymeric materials in water lubricated contacts", *Journal of Engineering Tribology*, 2013.
- [54] David L., Gregory W. Sawyer, "Tribological behavior of peek components with compositionally graded peek/ptfe surfaces", *Wear*, 262:220–224, 2007.
- [55] Archard J.F., 'Contact and rubbing flat surfaces', *J. Appl. Phys.*, vol 24,981 (1953).
- [56] Holm R., "Electric Contacts", *Almqvist & Wiksells Boktryckeri AB*, Uppsala.
- [57] Cha M., Kuznetsov E., Glavatskih S B., 2013, "A comparative linear and nonlinear dynamic analysis of compliant cylindrical journal bearings", *Mechanisms and Machine Theory*, 64:80–92, 1946.
- [58] Kuznetsov E., Glavatskih S. B., Fillon M., "Thermo-hydro-dynamic analysis of compliant journal bearings considering liner deformation", *In World Tribology Congress*, page 216, Kyoto, Japan, 2009.
- [59] Echávarri J., d. la Guerra Ochoa E., Chacón Tanarro E., Lafont Morgado P., Díaz Lantada A., Muñoz-Guijosa J. M., Muñoz Sanz J. L., "Artificial neural network approach to predict the lubricated friction coefficient", *Lubrication Science*, 26:141–162, 2014.
- [60] . Rajendran T., Rajendran I, "Mass Loss Prediction of Newly Developed Aluminium-Based Alloys Using Artificial Neural Network" *Neural Network World*, 2/14, 129-142. 2012. **DOI:** 10.14311/NNW.2014.24.008
- [61] Khurmi R S, "A text book of machine design", Eurasia publishing house(P) ltd", New-Delhi, 2014. [ISBN 9788121925372](https://www.isbn-international.org/product/9788121925372)
- [62] <http://www.ravenol.de/en/products/usage/d/Product/show/p/ravenol-vakuumpumpenoel-iso-vg-32.html>
- [63] Aleksandar R., Vencel A., "Metalni materijali kliznih ležaja – Fizičko-mehanička I tribološka svojstva", *Mašinski fakultet Akademska misao*, Beograd, 2005.
- [64] Mitrović R.: „Klizni ležaji“, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, Srbija, 2003.
- [65] Krsmanović V., Mitrović R.: „Klizni i kotrljajni ležaji“, IV izdanje, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, Srbija, 2004.
- [66] Stamenković D., „Održavanje železničkih vozila“, Mašinski fakultet u Nišu, Niš, 2011.

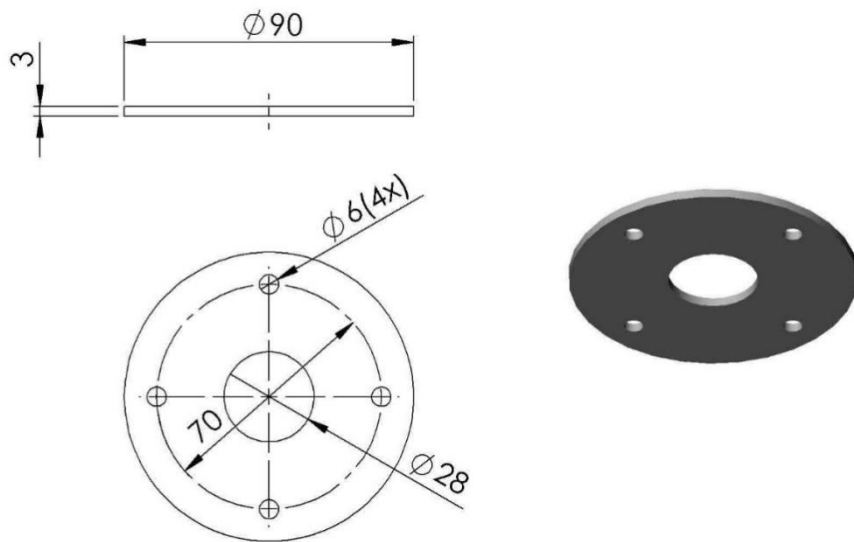
PRILOG A



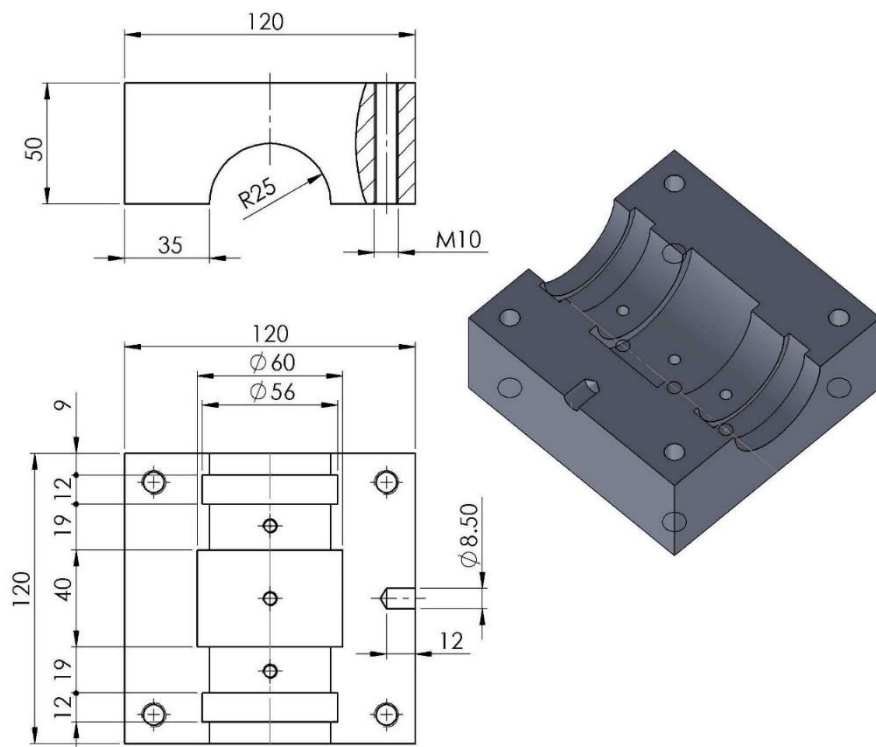
Sl. A1 Cilindar 1



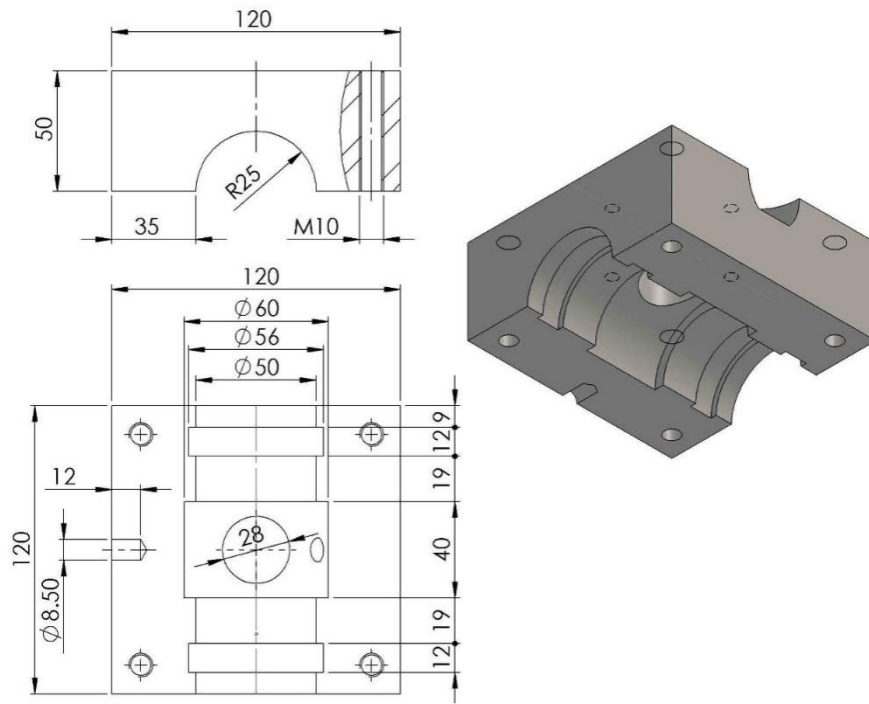
Sl. A2 Cilindrični oblik donjeg dela senzora



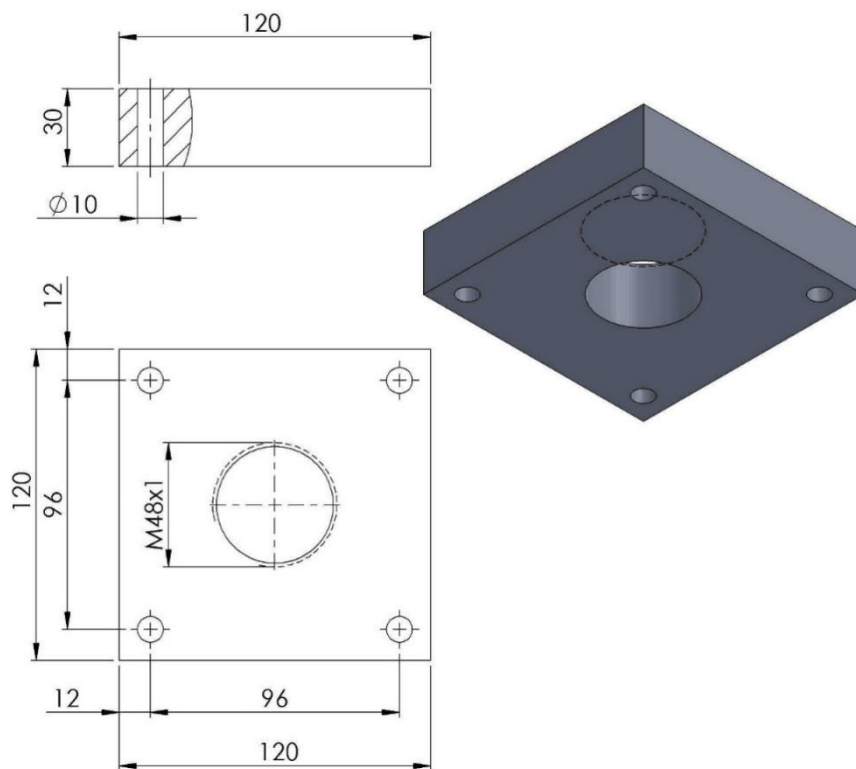
Sl. A3 Cover up semering



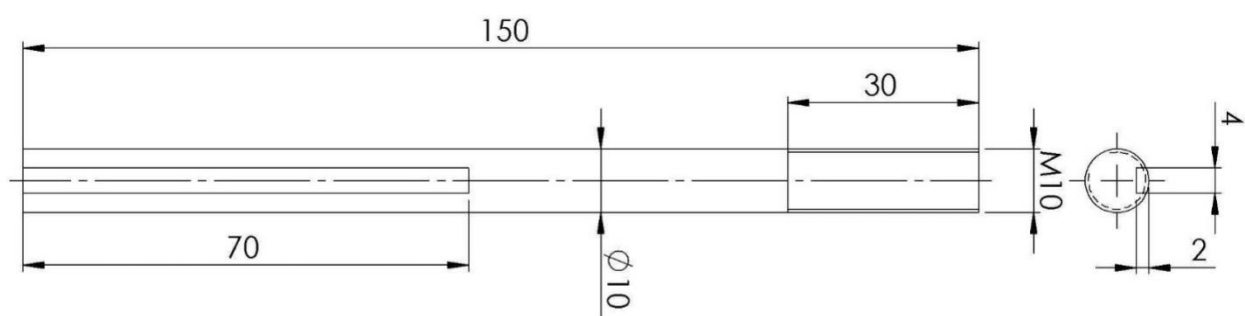
Sl. A4 Donji nosač



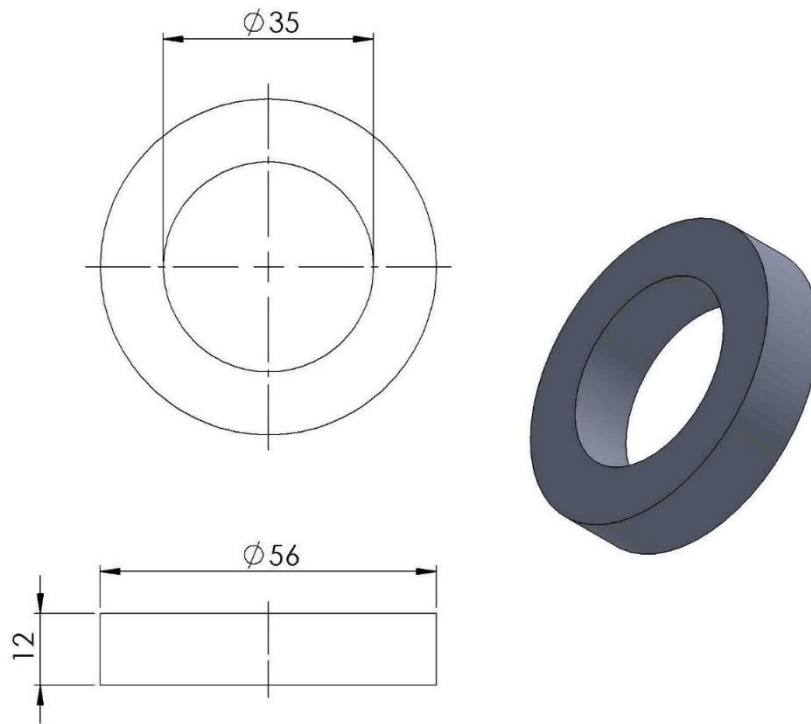
Sl. A5 Gornji nosač



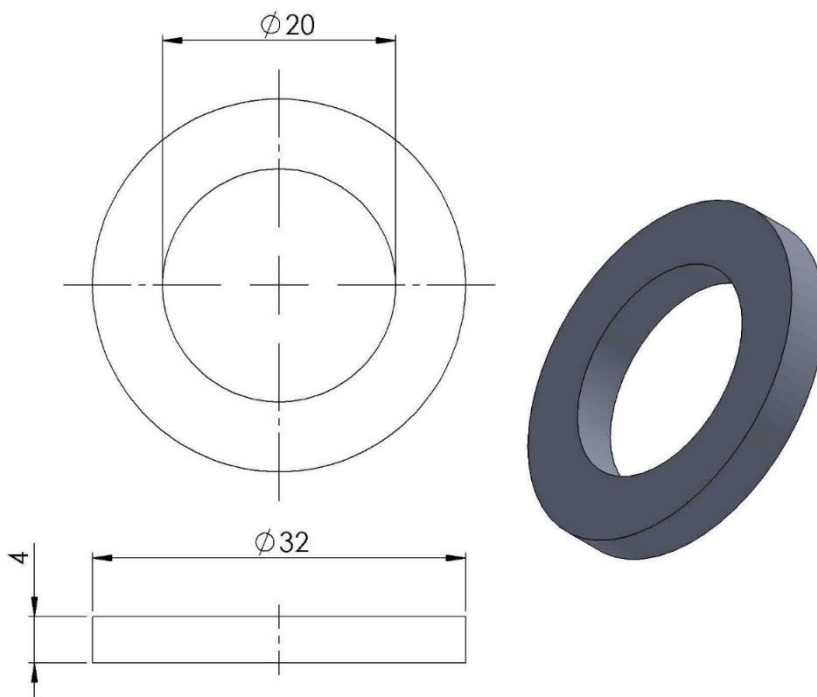
Sl. A6 Nosač zavrtanja



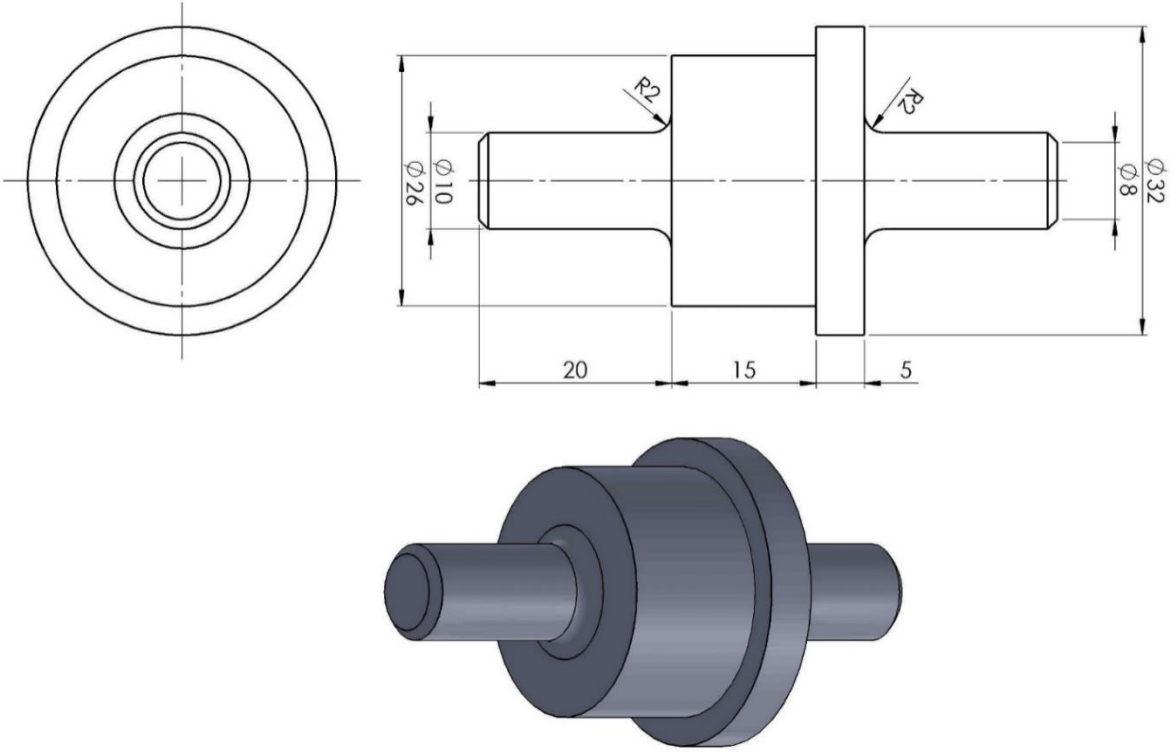
Sl. A7 rukav



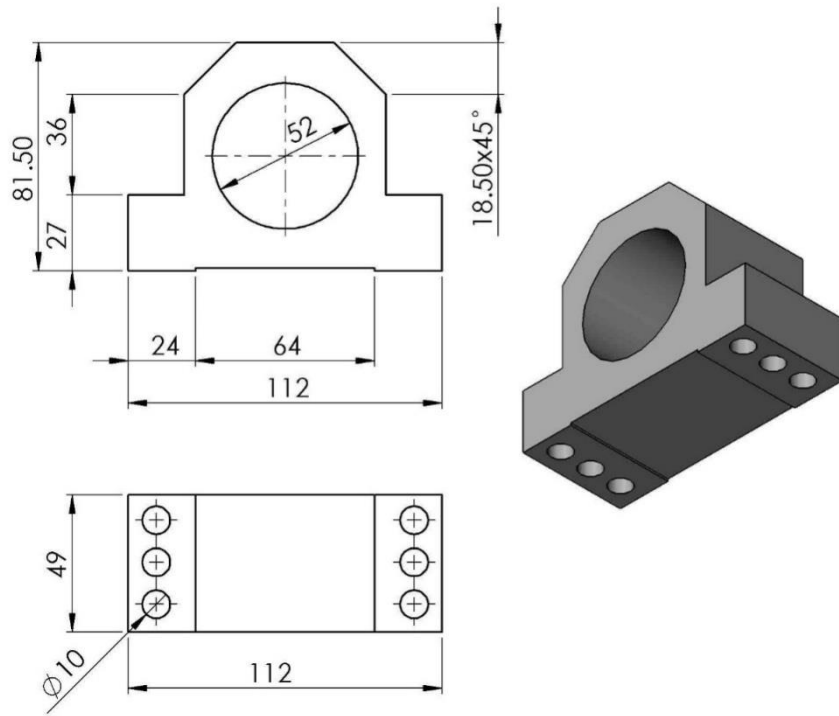
Sl. A8 Semering



Sl. A9 Semering 2



Sl. A10 Senzor SLDPRT



Sl. A11 Sklop

PRILOG B

Tabela PB Upoređivanje eksperimentalnih i analitičkih rezultata pomoću američkih grafikona

Eksperimentalni rezultati								Analički rezultati (Raimondi and BoydCHARTS)
set	čaura	klizno vreme [sec]	Broj obrtaj [o/min]	Linearna brzina V_j m/sec	opterećenje [N]	Prosek. Gubitak snage $P_{\text{loss}} = \mu \cdot F_N \cdot V_j$ [W]	Koeficijent trenja μ_{eksp} [-]	Koeficijent trenja μ_{ana} [-]
1	0	10-18000	1000	2.09	1178	63.27	0.026	0.021875
	1	32.3-18000			2028	100.8	0.0168	0.0125
	2	0-18000			3000	100.1	0.0118	0.0103125
	3	55.19-18000			3917	100.13	0.0048	0.0062

ISO VG 32, Kinematička viskoznost $[\text{mm}^2/\text{s} = \text{cst}]$ $40^\circ\text{C} = 32.5$, dinamički viskozitet $\text{est } 100^\circ\text{C} = 5.4$, gustina $15^\circ\text{C} = 0.873$.

Dinamički viskozitet = Kinematička viskoznost X gustina

$$\eta = v \cdot \rho = 32.50 \cdot 0.873 = 28.37 \text{ mPas}$$

$$p = \frac{F}{l \cdot d} \text{ (očigledan pritisak)}$$

$$n = 1000 \text{ o/min} = 1000/60 = 16.7 \text{ rps}$$

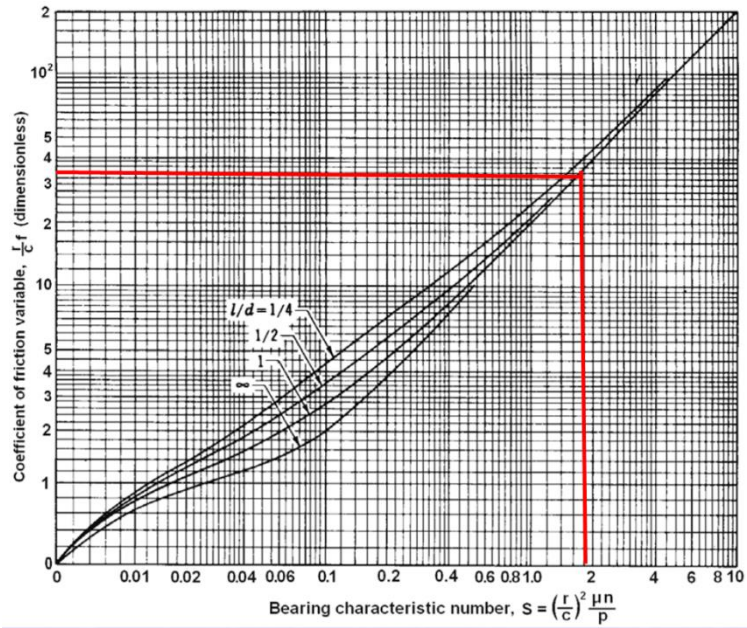
$$1. \quad F = 1000 \text{ N}$$

$$p = \frac{1000}{40 \cdot 40} = 0.625 \text{ MPa}$$

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \cdot \left(\frac{\eta \cdot n}{p}\right) = \left(\frac{20}{0.0125}\right)^2 \cdot \left(\frac{28.37 \cdot 10^{-3} \cdot 16.7}{0.625 \cdot 10^6}\right) = 1.97, \text{ grafikon za koeficijent trenja varijable slika}$$

B1.

$$\left(\frac{r}{c}\right) \cdot f = 38.2, f = 38.2 \cdot \left(\frac{0.0125}{20}\right) = 0.023875$$



Sl. B1šema promene koeficint trenje uz Raimondi and Boyd

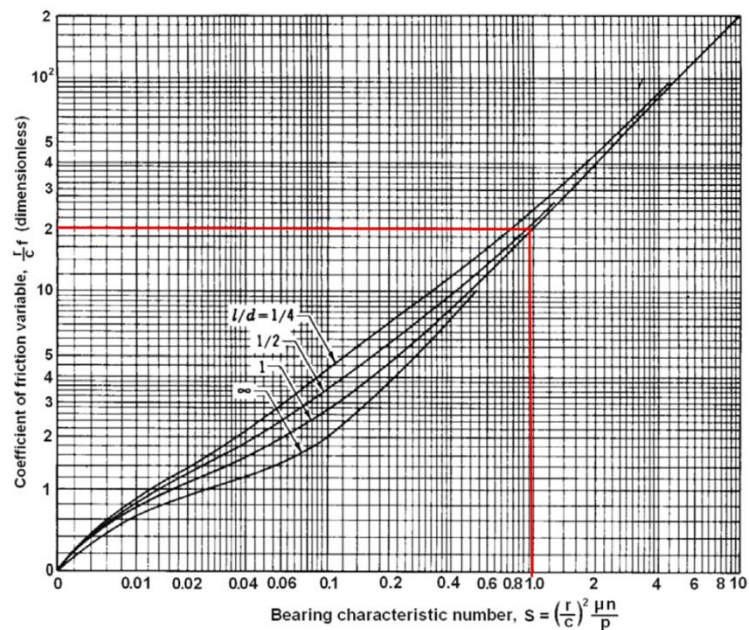
2. $F = 2000 \text{ N}$

$$\text{Za } p = \frac{2000}{40 \cdot 40} = 1.2675 \text{ MPa}$$

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \cdot \left(\frac{\eta \cdot n}{p}\right) = \left(\frac{20}{0.0125}\right)^2 \cdot \left(\frac{28.37 \cdot 10^{-3} \cdot 16.7}{1.2675 \cdot 10^6}\right) = 0.96, \text{ grafikon za koeficijent trenja varijable slika}$$

B2.

$$\left(\frac{r}{c}\right) \cdot f = 24.4, f = 24.4 \cdot \left(\frac{0.0125}{20}\right) = 0.0152$$



Sl. B2šema promene koeficint trenje uz Raimondi and Boyd

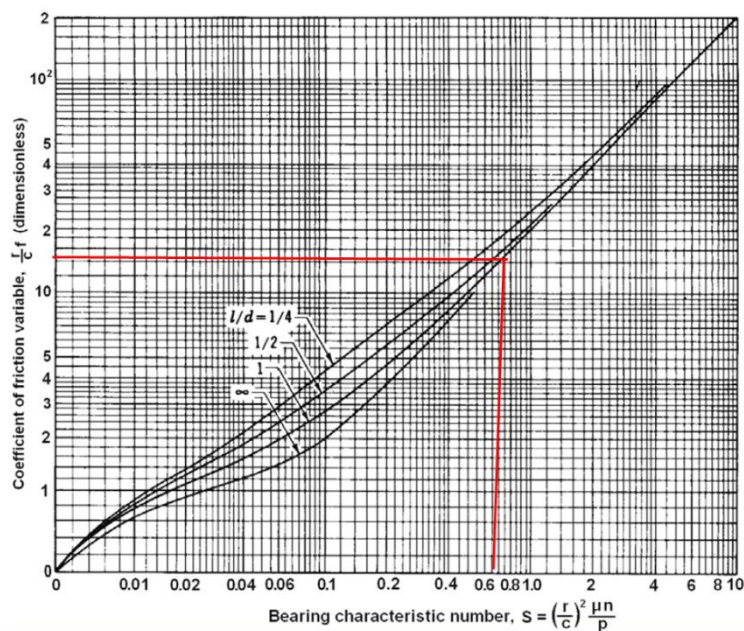
3. Za $F=3000$ N, $n=1000$ o/min

$$p = \frac{3000}{40 \cdot 40} = 1.875 \text{ MPa}$$

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \cdot \left(\frac{\eta \cdot n}{p}\right) = \left(\frac{20}{0.0125}\right)^2 \cdot \left(\frac{28.37 \cdot 10^{-3} \cdot 16.7}{1.875 \cdot 10^6}\right) = 0.64, \text{ grafikon za koeficijent trenja varijable slika}$$

B3.

$$\left(\frac{r}{c}\right) \cdot f = 16.5, f = 16.5 \cdot \left(\frac{0.0125}{20}\right) = 0.0103$$



Sl. B3šema promene koeficijent trenje uz Raimondi and Boyd

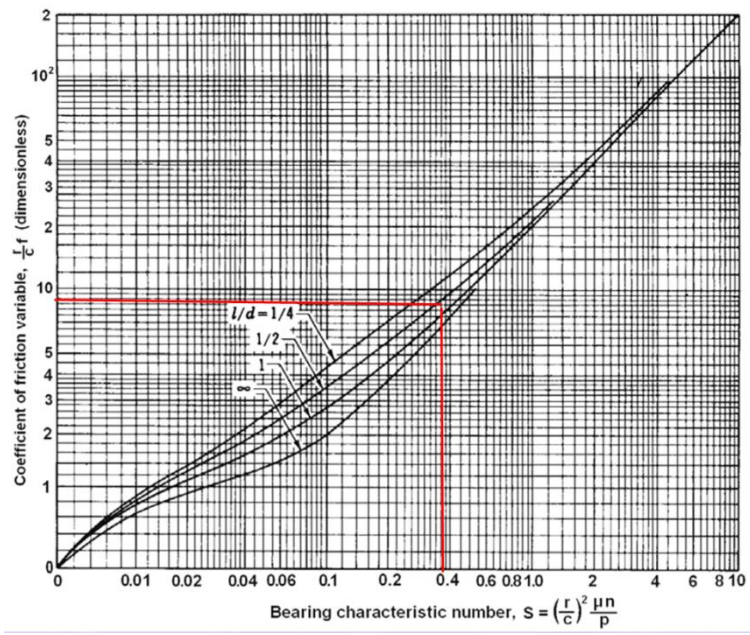
4. Za $F=4000$ N, $n=1000$ o/min

$$p = \frac{4000}{40 \cdot 40} = 2.5 \text{ MPa}$$

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \cdot \left(\frac{\eta \cdot n}{p}\right) = \left(\frac{20}{0.0125}\right)^2 \cdot \left(\frac{28.37 \cdot 10^{-3} \cdot 16.7}{2.5 \cdot 10^6}\right) = 0.485, \text{ grafikon za koeficijent trenja varijable}$$

slika B4.

$$\left(\frac{r}{c}\right) \cdot f = 8.992, f = 8.992 \cdot \left(\frac{0.0125}{20}\right) = 0.00562$$



Sl. B4šema promene koeficint trenje uz Raimondi and Boyd

PRILOG C

Tabela PC Upoređivanje eksperimentalnih i analitičkih rezultata pomoću američkih grafikona

Eksperimentalni rezultati								Analitički rezultati (Raimondi and BoydCHARTS)
set	čaura	klizno vreme [sec]	Broj obrtaj [o/min]	Linearna brzina V_j m/sec	opterećenje [N]	Prosek. Gubitak snage $P_{\text{loss}} = \mu \cdot F_N \cdot v_j$ [W]	Koeficijent trenja μ_{eksp} [-]	Koeficijent trenja μ_{ana} [-]
1	0	0-18000	2000	4.2	1046	164.22	0.0459	0.047
	1	0-18000			2015	209.03	0.0248	0.024
	2	76.4-18000			3349	193.24	0.0179	0.017
	3	130.97-18000			4089	236.99	0.0128	0.0125

ISO VG 32 , , Kinematička viskoznost [$\text{mm}^2/\text{s} = \text{cst}$] $40^\circ\text{C}=32.5$, dinamički viskozitet $\text{cst } 100^\circ\text{C}=5.4$, gustina $15^\circ\text{C}=0.873$.

dinamički viskozitet = Kinematička viskoznost X gustina

$$\eta = v \cdot \rho = 32.50 \cdot 0.873 = 28.37 \text{ mPas}$$

$$p = \frac{F}{l \cdot d} \text{ (očigledan pritisak)}$$

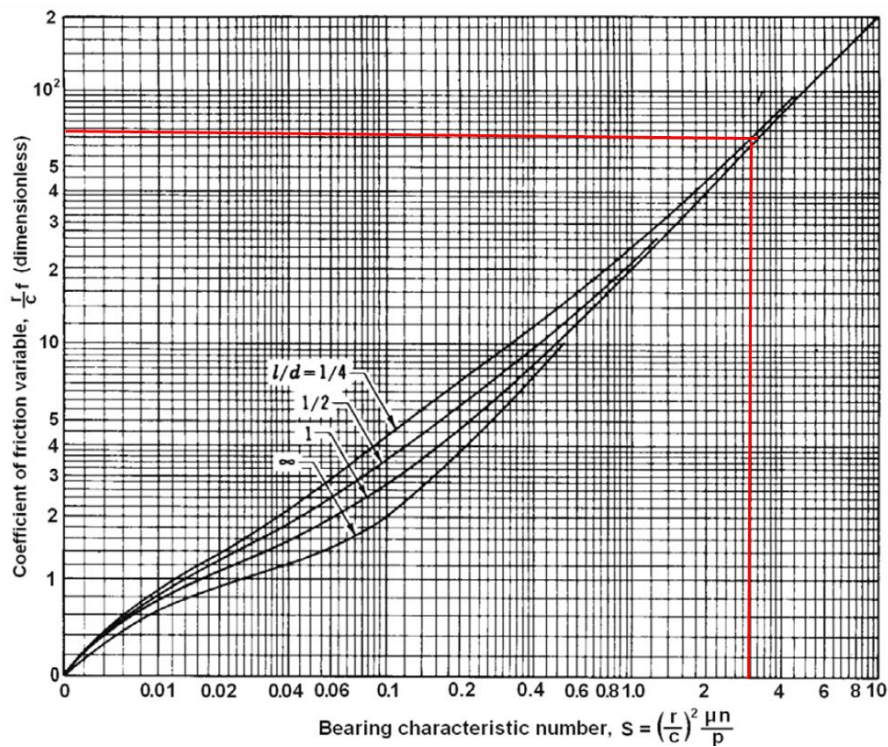
$$n = 2000 \text{ o/min} = 2000/60 = 33.3 \text{ rps}$$

$$F = 1000 \text{ N}$$

$$p = \frac{1000}{40 \cdot 40} = 0.625 \text{ MPa}$$

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \cdot \left(\frac{\eta \cdot n}{p}\right) = \left(\frac{20}{0.0125}\right)^2 \cdot \left(\frac{28.37 \cdot 10^{-3} \cdot 33.3}{0.625 \cdot 10^6}\right) = 3. \text{ grafikon za koeficijent trenja varijable slika C1.}$$

$$\left(\frac{r}{c}\right) \cdot f = 75.2, f = 75.2 \cdot \left(\frac{0.0125}{20}\right) = 0.047$$



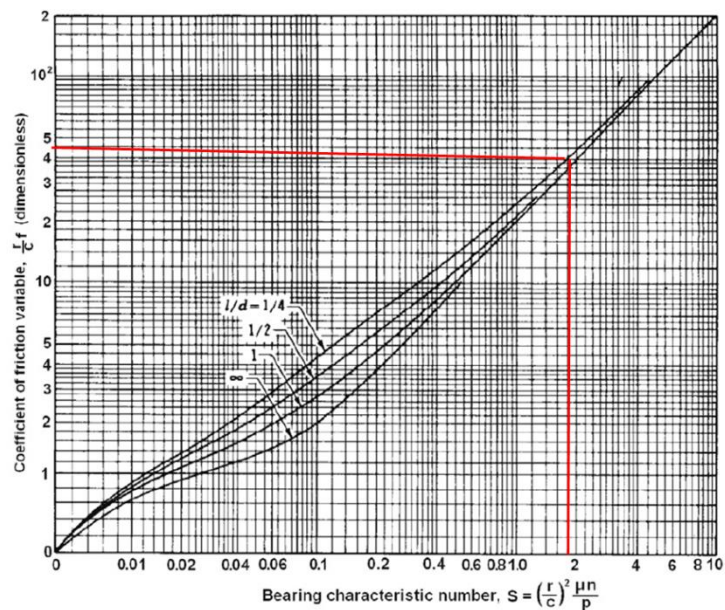
Sl. C1 šema promene koeficijent trenje uz Raimondi and Boyd

2- Za $F=2000$ N

$$p = \frac{2000}{40 \cdot 40} = 1.2675 \text{ MPa}$$

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \cdot \left(\frac{\eta \cdot n}{p}\right) = \left(\frac{20}{0.0125}\right)^2 \cdot \left(\frac{28.37 \cdot 10^{-3} \cdot 33.3}{1.2675 \cdot 10^6}\right) = 1.92 \text{ grafikon za koeficijent trenja varijable slika C2.}$$

$$\left(\frac{r}{c}\right) \cdot f = 38.4, f = 38.4 \cdot \left(\frac{0.0125}{20}\right) = 0.024$$



Sl. C2 šema promene koeficijent trenje uz Raimondi and Boyd

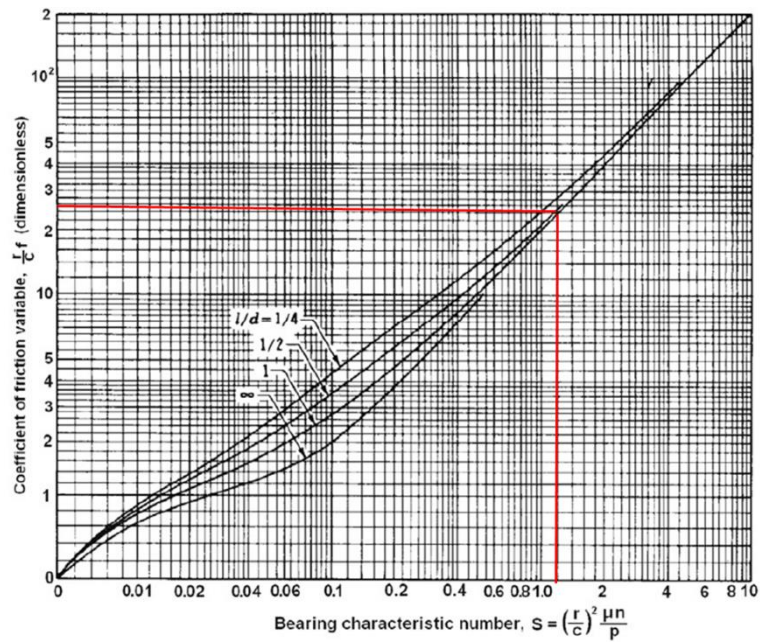
F=3000 N

$$P = \frac{3000}{40 \cdot 40} = 1.875 \text{ MPa}$$

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \cdot \left(\frac{\eta \cdot n}{p}\right) = \left(\frac{20}{0.0125}\right)^2 \cdot \left(\frac{28.37 \cdot 10^{-3} \cdot 33.3}{1.875 \cdot 10^6}\right) = 1.3, \text{ grafikon za koeficijent trenja varijable slika}$$

C3.

$$\left(\frac{r}{c}\right) \cdot f = 27.2, f = 27.2 \cdot \left(\frac{0.0125}{20}\right) = 0.017$$



Sl. C3 šema promene koeficijent trenje uz Raimondi and Boyd

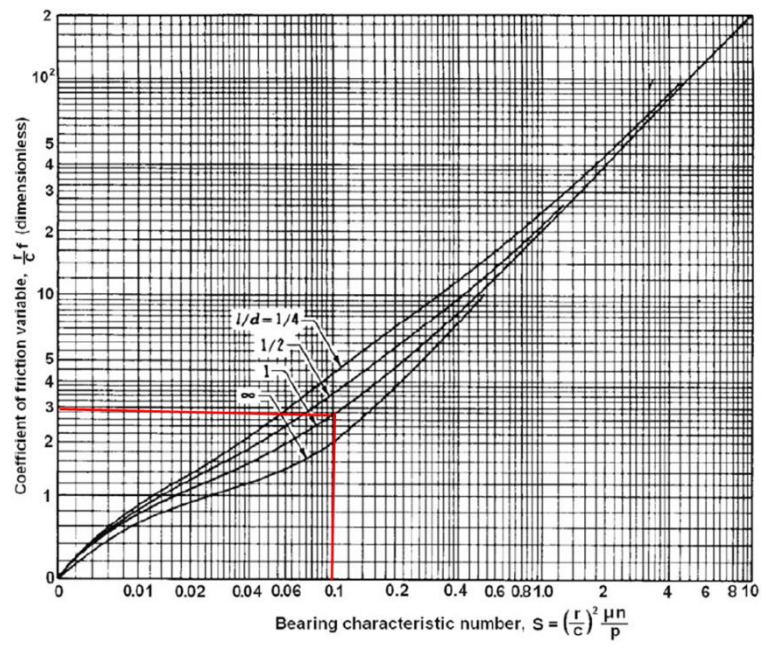
1. F=4000 N

$$p = \frac{4000}{40 \cdot 40} = 2.5 \text{ MPa}$$

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \cdot \left(\frac{\eta \cdot n}{p}\right) = \left(\frac{20}{0.0125}\right)^2 \cdot \left(\frac{28.37 \cdot 10^{-3} \cdot 33.3}{2.5 \cdot 10^6}\right) = 0.93, \text{ grafikon za koeficijent trenja varijable slika}$$

C4.

$$\left(\frac{r}{c}\right) \cdot f = 21.2, f = 21.2 \cdot \left(\frac{0.0125}{20}\right) = 0.0132$$



Sl. C4 šema promene koeficint trenje uz Raimondi and Boyd

PRILOG D

Tabela PD Upoređivanje eksperimentalnih i analitičkih rezultata pomoću američkih grafikona

Eksperimentalni rezultati								Analički rezultati (Raimondi and BoydCHARTS)
set	čaura	klizno vreme [sec]	Broj obrtaj [o/min]	Linearna brzina V_j m/sec	opterećenje [N]	Prosek. Gubitak snage $P_{\text{loss}} = \mu \cdot F_N \cdot V_j$ [W]	Koeficijent trenja μ_{eksp} [-]	Koeficijent trenja μ_{ana} [-]
1	0	0-18000	3000	6.3	1143	0.071	287.31	0.063
	1	90.39-18000			2006	0.031	264.13	0.0375
	2	61.83-18000			3168	0.0217	259.45	0.02
	3	76.9-18000			4129	0.0192	288.74	0.018

ISO VG 32, Kinematička viskoznost [$\text{mm}^2/\text{s} = \text{cst}$] $40^\circ\text{C} = 32.5$, dinamički viskozitet $\text{cst } 100^\circ\text{C} = 5.4$, gustina $15^\circ\text{C} = 0.873$.

dinamički viskozitet = Kinematička viskoznost X gustina

$$\eta = v \cdot \rho = 32.50 \cdot 0.873 = 28.37 \text{ mPas } 40^\circ\text{C}$$

$$p = \frac{F}{l \cdot d} \text{ (očigledan pritisak)}$$

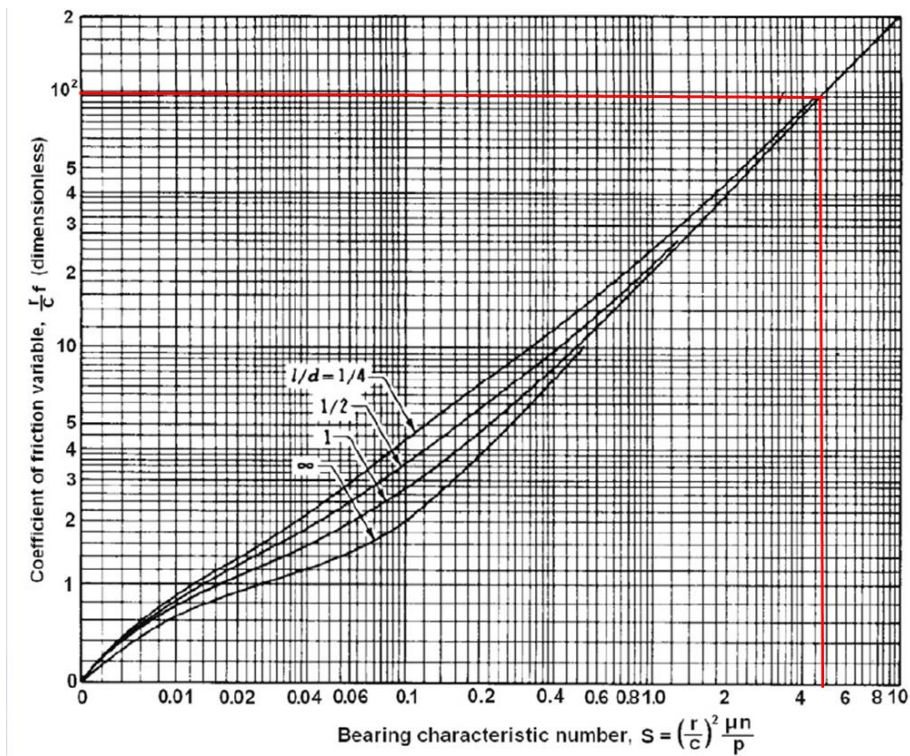
$$n = 3000 \text{ o/min} = 3000/60 = 50 \text{ rps}$$

$$1 - F = 1000 \text{ N}$$

$$P = \frac{1000}{40 \cdot 40} = 2.5 \text{ MPa} = 0.625 \text{ MPa}$$

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \cdot \left(\frac{\eta \cdot n}{p}\right) = \left(\frac{20}{0.0125}\right)^2 \cdot \left(\frac{28.37 \cdot 10^{-3} \cdot 50}{0.625 \cdot 10^6}\right) = 4.7, \text{ grafikon za koeficijent trenja varijable slika D1.}$$

$$\left(\frac{r}{c}\right) \cdot f = 100.8, f = 100.8 \cdot \left(\frac{0.0125}{20}\right) = 0.063$$



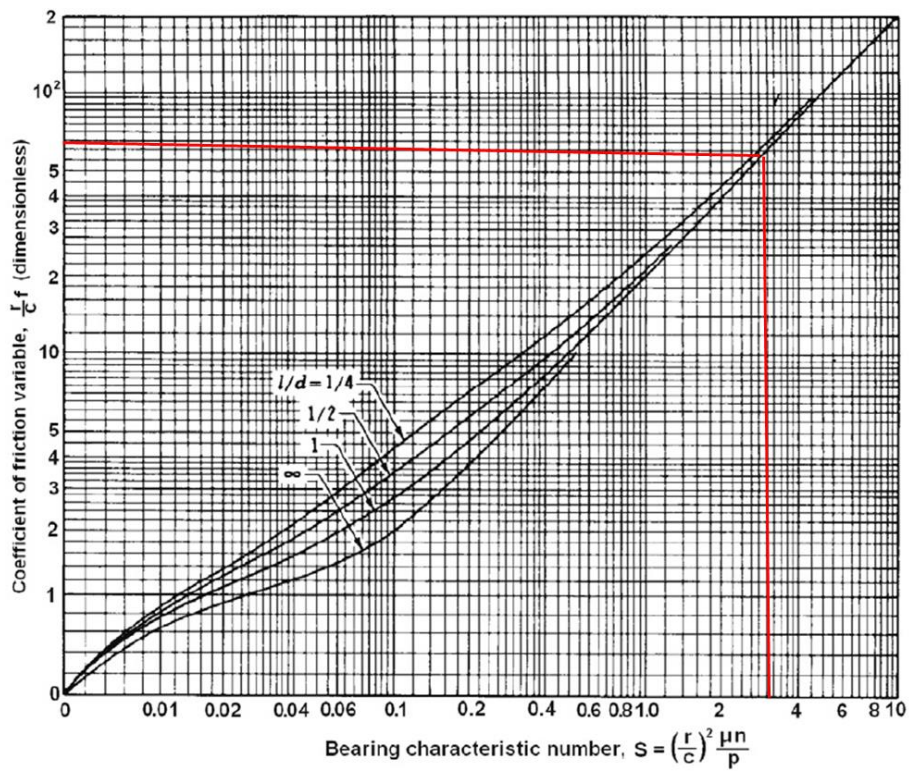
Sl. D1 Šema promene koeficijent trenje uz Raimondi and Boyd

2- Za $F=2000$ N

$$p = \frac{2000}{40 \cdot 40} = 1.2675 \text{ MPa}$$

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \cdot \left(\frac{\eta \cdot n}{p}\right) = \left(\frac{20}{0.0125}\right)^2 \cdot \left(\frac{28.37 \cdot 10^{-3} \cdot 50}{1.2675 \cdot 10^6}\right) = 2.9, \text{ grafikon za koeficijent trenja varijable slika D2.}$$

$$\left(\frac{r}{c}\right) \cdot f = 55.6, f = 55.6 \cdot \left(\frac{0.0125}{20}\right) = 0.0347$$



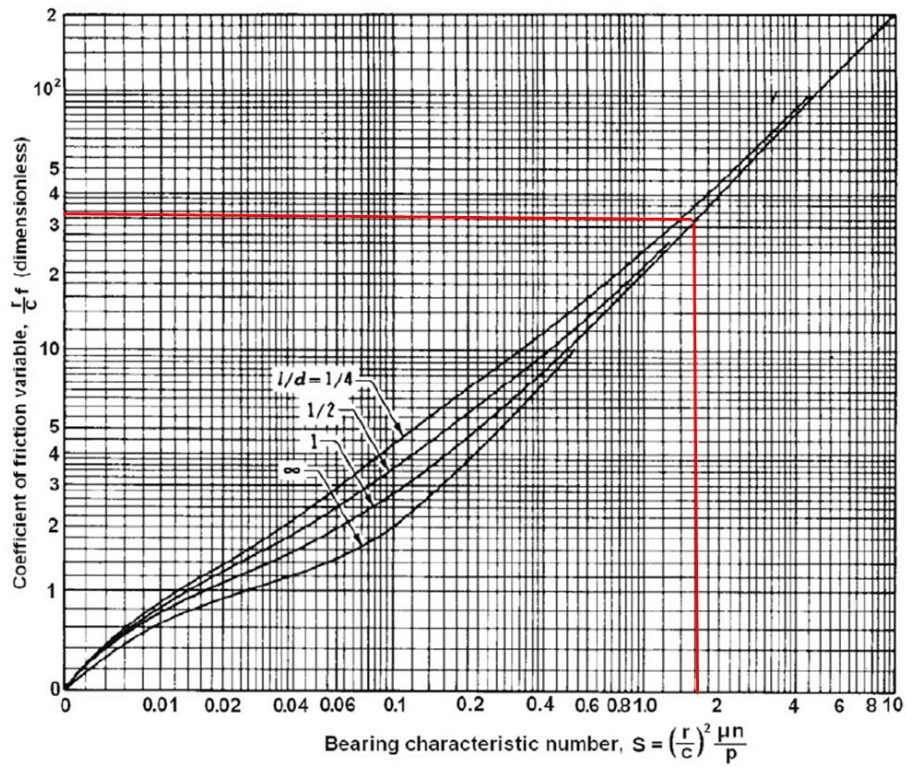
Sl. D2 Šema promene koeficijent trenje uz Raimondi and Boyd

3- Za $F=3000$ N

$$p = \frac{3000}{40 \cdot 40} = 1.875 \text{ MPa}$$

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \cdot \left(\frac{\eta \cdot n}{p}\right) = \left(\frac{20}{0.0125}\right)^2 \cdot \left(\frac{28.37 \cdot 10^{-3} \cdot 50}{1.875 \cdot 10^6}\right) = 1.8, \text{ grafikon za koeficijent trenja varijable slika D3.}$$

$$\left(\frac{r}{c}\right) \cdot f = 32, f = 32 \cdot \left(\frac{0.0125}{20}\right) = 0.02$$



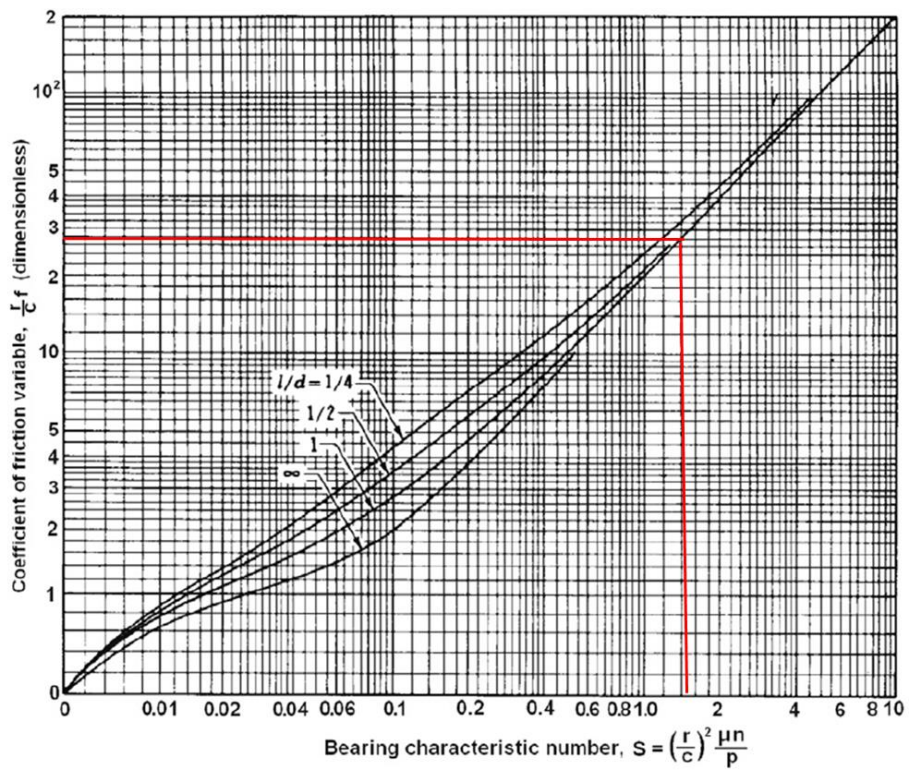
Sl. D3 Šema promene koeficijent trenje uz Raimondi and Boyd

$$F=4000 \text{ N}$$

$$p = \frac{4000}{40 \cdot 40} = 2.5 \text{ MPa}$$

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \cdot \left(\frac{\eta \cdot n}{p}\right) = \left(\frac{20}{0.0125}\right)^2 \cdot \left(\frac{28.37 \cdot 10^{-3} \cdot 50}{2.5 \cdot 10^6}\right) = 1.3, \text{ grafikon za koeficijent trenja varijable slika D4.}$$

$$\left(\frac{r}{c}\right) \cdot f = 28.8, f = 28.8 \cdot \left(\frac{0.0125}{20}\right) = 0.018$$



Sl. D4 Šema promene koeficint trenje uz Raimondi and Boyd

Изјава 1.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

„Истраживање триболошких својстава радијалних клизних лежаја израђених од легуре белог метала на бази калаја – Tegotenax V840“

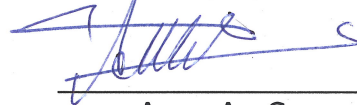
која је одбрањена на Машинском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу,

Потпис аутора дисертације:



Амир Ал-Саммарраие

Изјава 2.

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

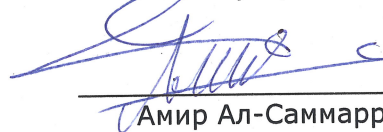
Наслов дисертације:

„Истраживање триболошких својстава радијалних клизних лежаја израђених од легуре белог метала на бази калаја – Tegotenax V840“

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао/ла за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу, _____

Потпис аутора дисертације:



Амир Ал-Саммарраие

Изјава 3:

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

„Истраживање триболошких својстава радијалних клизних лежаја израђених од легуре белог метала на бази калаја – Tegotenax V840“

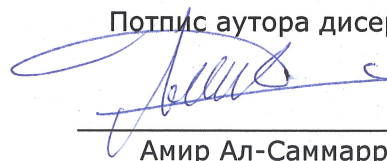
Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство **(CC BY)**
2. Ауторство – некомерцијално **(CC BY-NC)**
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде **(CC BY-NC-ND)**
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима **(CC BY-NC-SA)**
5. Ауторство – без прераде **(CC BY-ND)**
6. Ауторство – делити под истим условима **(CC BY-SA)⁴**

У Нишу, _____

Потпис аутора дисертације:



Амир Ал-Саммарраие

⁴ Аутор дисертације обавезан је да изабере и означи (заокружи) само једну од шест понуђених лиценци; опис лиценци дат је у наставку текста.

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Презиме, име једног родитеља и име	AL-SAMMARRAIE, MUSTAFA AMIR
Датум и место рођења	06/08/1962, BAGDAD-IRAK

Основне студије

Универзитет	Академија за ваздухопловство и противваздушну одбрану, СФР Југославија
Факултет	Машински одсек
Студијски програм	Ваздухопловно машинство
Звање	Машински инжењер
Година уписа	1982
Година завршетка	1985
Просечна оцена	8.7

Мастер студије, магистарске студије

Универзитет	Универзитет у Београду
Факултет	Машински факултет
Студијски програм	Аерокосмотехника
Звање	Дипломирани инжењер машинства
Година уписа	1985
Година завршетка	1987
Просечна оцена	7.8
Научна област	Аерокосмотехника
Наслов завршног рада	Механика лета и аеродинамика

Докторске студије

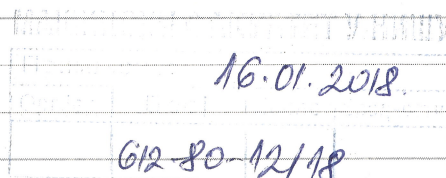
Универзитет	Универзитет у Нишу
Факултет	Машински факултет
Студијски програм	Машинско инжењерство
Година уписа	2012
Остварен број ЕСПБ бодова	144
Просечна оцена	9.6

НАСЛОВ ТЕМЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов теме докторске дисертације	ИСТРАЖИВАЊЕ ТРИБОЛОШКИХ СВОЈСТАВА РАДИЈАЛНИХ КЛИЗНИХ ЛЕЖАЈА ИЗРАЂЕНИХ ОД ЛЕГУРЕ БЕЛОГ МЕТАЛА НА БАЗИ КАЛАЈА - TEGOTENAX V840
Име и презиме ментора, звање	Драган Милчић, редовни професор
Број и датум добијања сагласности за тему докторске дисертације	8/20-01-004/17-013, У Нишу 15.05.2017. године

ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Број страна	149
Број поглавља	6
Број слика (шема, графика)	92
Број табела	19
Број прилога	4



**ПРИКАЗ НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КАНДИДАТА
који садрже резултате истраживања у оквиру докторске дисертације**

Р. бр.	Аутор-и, наслов, часопис, година, број волумена, странице	Категорија
1	<p>Al-Sammorraie Amir, Effect of Counterface Materials and sliding time on Friction Coefficient and wear behaviour of Brass alloy CuZn40 under Dry Sliding Contact, SYLWAN., 158(12). ISSN 0039-7660, pp. 90-103. http://sylwan.ibles.org/syl/index.php/archive/part/158/12/1/?currentVol=158</p> <p>Проблематика хабања услед трења је од изузетног значаја због негативног ефекта на тачност клизних делова. Велики број истраживача истраживали су ову област како би установили узроке и факторе који утичу на губитак материјала. Садашњи рад представља покушај да се проучи утицај типа материјала на коефицијент трења и интензитет хабања легуре месинга CuZn40 у условима сувог контакта за различита нормална оптерећења (8N, 15N и 22N), брзине клизања (95, 250 и 350)min⁻¹ и временски интервал (0-720 s). Експериментална истраживања трења клизања извођена су на триботметру чивија на диску (PIN-ON-DISC) у условима сувог контакта. Интензитет хабања и сила трења су мерени истовремено током клизања месинга CuZn60 са пет различитих материјала чивије, каљених челика (300, 340, 395, 500 и 600) kg/mm² са пречником 200 mm. Експериментални резултати показују да тип материјала у великој мери утиче на интензитет хабања и коефицијент трења. Вредност коефицијента трења зависи од тврдоће диска, где повећање тврдоће доводи до повећања коефицијента трења. Пад вредности коефицијента трења не значи и смањење стопе хабања.</p>	M23
2	<p>Amir Al-Sammorraie, Dragan Milčić, Milan Banić, Experimental investigation of the influence of sliding distance on coefficient of friction and lubrication temperature changes of tin-based plain Journal bearing, (pismo urednika časopisa FACTA UNIVERSITATIS, Series: MECHANICAL ENGINEERING, (рад ће бити публикован у наредном периоду-писмо уредника часописа).</p> <p>У раду су дата експериментална истраживања утицаја пута клизања на радне карактеристике клизног лежаја 60x40x40 mm израђеног од легуре бели метал на бази калаја у условима хидродинамичког подмазивања. Температура лежаја и коефицијент трења лежаја одређивани су у односу на пут клизања и очитани притисак уља на испитном столу. Вредности притиска у експерименту су биле од 0,74 до 2,54 МПа, учестаност обртања вратила је од 1000 до 2000 min⁻¹. Истраживана је промена коефицијента трења на почетку рада тј у условима нестационарног стања, док се не постигне стационарна температура лежаја. Даља истраживања коефицијента трења у стационарном стању лежаја указују на значајно смањење коефицијента трења. У раду су дати и резултати губитка снаге услед трења и у нестационарном и стационарном стању.</p>	M24
3	<p>Amir Al-Sammorraie, Dragan Milčić, Milan Banić, Miodrag Milčić, Tribological behaviour of tin-based materials -TEGOTENAX V840 in oil lubricated conditions, 13th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering - DEMI 2017, Banja Luka, pp.619-624.</p> <p>Овај рад истражује експериментално ефекат клизног растојања, брзину обртања вратила и нормално оптерећење на трење, храпавост површине на унутрашњој површини лежаја и хабања клизног лежаја од белог метала на бази калаја –TEGONENAX V840 у условима подмазаног контакта са вратилом од нерђајућег челика, за шта је конструисан и направљен испитни сто. Експерименти су изведени у условима различитих оптерећења и различите брзине. Резултати показују да се стопе хабања повећавају са повећањем брзине клизања и нормалног оптерећења. Такође је утврђено да се коефицијент трења повећава са повећањем брзине клизања и смањује се с повећањем нормалног оптерећења. Такође је утврђено да се храпавост мења са путем клизања на унутрашњој површини лежаја.</p>	M33
4	<p>Amir AL-SAMMARRAIE, Dragan MILČIĆ, Milan BANIC, Sulaiman E. AL-BASAQR, Sabah M. SALIH, COMPARABILITY OF EXERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY OF THE EFFECT RADIAL LOAD AND ROTATION SPEED ON FRICTION COEFFICIENT OF RADIAL PLAIN BEARING UNDER LUBRICANT CONDITIONS USING RAIMONDI AND BOYD'S CHARTS, 8 th International Scientific Conference - Research and development of mechanical elements and systems - IRMES 2017, Trebinje, September 2017, pp. 53-58.</p> <p>Овај рад даје део резултата експерименталног истраживања радијалних клизних лежаја хидродинамички подмазиваних од легуре бели метал на калајној основи. Приказани су резултати ефекта учестаности обртања вратила и нормалног оптерећења на коефицијент трења лежаја. Експерименти су изведени под условима хидродинамичког подмазивања, у условима нормалног оптерећења 1000-4000 N и учестаности обртања вратила 1000-3000 min⁻¹. Резултати показују да се коефицијент трења повећава са повећањем брзине клизања и смањује се с повећањем нормалног оптерећења белог метала на бази калаја. Експериментални измерени коефицијенти трења упоређени су са вредностима коефицијената трења добијених применом графикаона Раимонди и Боида, и утврђено је да постоји разлика у вредностима која износи 6-13%.</p>	M33
5	<p>Amir Al-Sammorraie, Dragan Milčić, Milan Banić, Goran Radenković, Miodrag Milčić, Experimental Investigation of Tribological Behavior of Journal Bearing Coated by Babbitt Alloys Tegotenax (V840), IX International Conference “Heavy Machinery-НМ 2017”, Zlatibor, 28 June – 1 July 2017, pp. D.13-D.20.</p> <p>У овом раду су дати резултати истраживања радијалног клизног лежаја хидродинамички подмазиваног од легуре бели метал на калајној основи - TEGOTENAX V840. У раду је најпре дат опис опреме за експериментално испитивање радијалних клизних лежаја хидродинамички подмазиваних која је развијена на Машинском факултету у Нишу. Експерименти су изведени са нормалним оптерећењем од 3000-4000 N, учестаношћу обртања рукавца вратила од 2000-3000 min⁻¹ и условима хидродинамичког подмазивања. Резултати показују да коефицијент трења клизних лежајева благо расте са повећањем брзине клизања и</p>	M33

	значајно смањује при порасту нормалног оптерећења, док температура лежаја расте док се не постигне стационарно стање. Такође је утврђено да се храпавост постелице лежаја, на посебно дефинисаним положајима постелице, мења са путем клизања, као и да се стопа хабања повећава са повећањем брзине клизања и нормалног оптерећења.	
6	Amir AL-SAMMARRAI , Dragan MILČIĆ, Milan BANIĆ, The Effect of sliding time on state of the Lubrication Temperature and coefficient of friction of Radial Plain Bearing Made from An Alloy of Tin -TEGOTENAX V840, THE SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE TRANSPORT AND LOGISTICS - TIL 2017, Niš, Serbia 25 - 26 May 2017, pp.168-174. Експериментално истраживање утицаја температуре уља на радне карактеристике клизног лежаја је урађена белом металу на бази калаја димензија $D \times d \times B = 60 \times 40 \times 40$ мм. Бројни експерименти су изведени са различита статичка оптерећења од 1045 до 3601 N и две различите вредности учестаности обртања вратила (1000 и 2000 min^{-1}) коришћењем специјално развијене опреме за испитивање радијалних клизних лежаја хидродинамички подмазиваних. Мерена је температура лежаја и коефицијент трења у односу на време клизања. Дати су резултати промене коефицијента трења у функцији времена рада лежаја до постизања стационарне температуре уља. Резултати овог истраживања показују значајно смањење коефицијента трења од стартовања до стационарног стања.	M33
7	Amir Al-Sammarrāie, Dragan Milčić, Milan Banić, Miodrag Milčić, TRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF RADIAL PLAIN BEARING MADE OF TiNBASED WHITE METAL ALLOY -TEGOTENAX V840, 15th International Conference on Tribology, Kragujevac, Serbia, 17 19 May 2017, pp. 258-266. У овом раду дата су експериментална истраживања утицаја пута клизања, учестаности обртања рукавца вратила и оптерећења на коефицијент трења, храпавост површине постелице лежаја и интензитет хабања. Истраживања су рађена са клизним лежајем од белог метала на бази калаја - TEGOTENAX V840 у условима хидродинамичког подмазивања на специјално развијеном испитном столу. Експерименти су изведени са нормалним оптерећењем $1000, 1500$ и 2000 N и учестаношћу обртања $750, 1000, 1500 \text{ min}^{-1}$. Резултати показују да се интензитет хабања постелице лежаја повећава са повећањем брзине клизања и нормалног оптерећења. Такође је установљено да коефицијент трења расте са повећањем брзине клизања и опада са повећањем нормалног оптерећења. Такође је утврђено да се храпавост мења са путем клизања.	M33

ИСПУЊЕНОСТ УСЛОВА ЗА ОДБРАНУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кандидат испуњава услове за оцену и одбрану докторске дисертације који су предвиђени Законом о високом образовању, Статутом Универзитета и Статутом Факултета.

ДА НЕ

Кандидат је дипломирани машински инжењер, има одобрену тему докторске дисертације (Одлука Научно-стручног већа за техничко-технолошке науке, бр 8/20-01-008/17-019, од 30.11.2017.), објавио је већи број научних радова и поднео докторску дисертацију одговарајуће садржине, обима и квалитета у складу са одобреном темом докторске дисертације.

ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кратак опис појединих делова дисертације (до 500 речи)

На самом почетку докторске дисертације кандидата Amir M. Al-Sammarrāie, дипл. маш. инж. дати су подаци о дисертацији на српском и енглеском језику, Захвалност аутора, Садржај дисертације, Списак слика, Списак табела, Списак појмова, термина и ознака. Иза тога следи текст дисертације, изложен на 132 странице формата А4 и подељен у 6 поглавља, а на самом крају је наведена цитирана литература са 65 библиографске јединице. На самом крају су дата 4 Прилога.

У уводном поглављу је најпре објашњен предмет истраживања – радијални клизни лежај хидродинамички подмазиван, а затим су наведени мотиви за израду дисертације и њени циљеви.

У другом поглављу је описано стање истраживања, односно преглед литературе на пољу истраживања радијалних клизних лежаја са аспекта триболошких својстава: коефицијента трења, хабања, губитака снаге услед трења, у функцији различитих материјала клизних лежаја и средства за подмазивање клизних лежаја.

У трећем поглављу су дати појмови везани за триболошка својства клизних лежаја, подмазивање, мазива, хабање и технике мерења интензитета хабања, храпавост и параметри храпавости површина, прорачун носивости радијалних клизних лежаја хидродинамички подмазивани, који су неопходни за даљи ток дисертације. Како је за успостављање аналитичке зависности измерених параметара коришћена метода вештачке интелигенције – вештачка неуронска мрежа, то су у овом поглављу дате основе примене ове методе.

У четвртном поглављу дат је опис опреме која је коришћена за експериментално испитивање триболошких параметара радијалних хидродинамички подмазиваних клизних лежаја. Најпре је дат опис развијеног испитног стола за испитивање клизних лежаја који су хидродинамички подмазивани, који обухвата: систем за испитивање клизних лежаја, систем за подмазивање клизног лежаја, хидраулични систем за оптерећивање лежаја и погонски систем. Затим је дат опис мерног система и начин мерења силе трења, односно рачунања коефицијента трења, као и опрема за мерење интензитета хабања постелице лежаја и храпавости површине постелице лежаја. За испитивање су коришћена 4 испитна узорка лежаја, који су добијени наношењем слоја белог метала техником плазма металације на челичну чауру од нерђајућег челика AISI 440C. Димензије испитних узорка клизних лежаја су:

унутрашњи пречник постелице лежаја $D = 40^{+0.05}$ mm,
ширина постелице лежаја $B = 40$ mm,

спољни пречник постелице лежаја $D_s=60$ mm,
релативни зазор лежаја $f=0.025$ mm,
дебљина слоја белог метала 3 mm,

Постелица клизног лежаја је од легуре белог метала на бази калаја – Tegotenax V840. Дате су карактеристике хемијског састава и механичке карактеристике материјала постелице лежаја. Измерени су параметри храпавости рукавца вратила и постелице лежаја. Коришћено уље за подмазивање је ISO VG 32.

На крају поглавља дати су параметри испитивања. За аквизицију података у оквиру експерименталних испитивања триболошких карактеристика клизног лежаја, користи се персонални рачунар опремљен одговарајућим хардвером (мерно-управљачки интерфејс) у спрези са софтвером развијеним у LabVIEW окружењу.

У петом поглављу су дати резултати и дискусија резултата експерименталног испитивања триболошких параметара радијалних клизних лежаја хидродинамички подмазиваних. У првом делу овог поглавља дати су резултати промене коефицијента трења и температуре лежаја у функцији времена у условима испитивања радијалног оптерећења лежаја (1000, 2000, 3000 и 4000 N) и учестаности обртања рукавца вратила (1000, 2000, 3000 min^{-1}). Као резултат експерименталног истраживања дати су и губици снаге услед трења у процесима нестабилних и стабилних стања испитиваних клизних лежаја. Потом је дато упоређење експерименталних и аналитичких резултата вредности коефицијената трења добијених применом Раимондових и Боидових дијаграма. Мерена је храпавост површина постелице лежаја у 4 дефинисана положаја након сваког сета испитивања. Промене површинске храпавости Ra и Rz су дате у функцији пута клизања за дефинисане положаје мерења. У оквиру дисертације испитиван је и интензитет хабања лежаја у условима испитивања са различитим оптерећењима лежаја 1000, 2000, 3000 и 4000N у функцији пута клизања (0-905988) m, и са варијацијом бројем обртања рукавца вратила од 1000, 2000 и 3000 min^{-1} . Хабање је процењивано преко губитка масе материјала постелице лежаја. Испитивана је микроструктура легуре коришћене у експерименталном истраживању скенирајућим електронским микроскопом (SEM) типа JEOL-JSM-6610LV.

Да би се успоставила математичка зависности експерименталних параметара испитивања клизног лежаја у условима хидродинамичког подмазивања (губитак масе постелице лежаја као параметар хабања, површинска храпавост постелице лежаја, коефицијент трења и температура загревања лежаја), у функцији независних параметара као што је пут клизања и оптерећења лежаја, коришћена је вештачка неуронска мрежа.

У шестом поглављу дата су закључна разматрања. Дат је допринос дисертације и указано на могуће правце даљих истраживања.

ВРЕДНОВАЊЕ РЕЗУЛТАТА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ниво остваривања постављених циљева из пријаве докторске дисертације (до 200 речи)

Предмет научног истраживања у оквиру ове дисертације је истраживање триболошког понашања клизних лежаја израђених од легуре белог метала на бази калаја TEGOTENAX V840 у условима хидродинамичког подмазивања. Циљ овог рада је “одређење триболошких својстава хидродинамички подмазиваних клизних лежаја” како би се побољшао њихов рад на великим машинама и то смањењем губитка снаге и негативног утицаја на околину док би се, истовремено, повећала поузданост машина. Постављени циљеви у пријави дисертације су остварени и то:

- Развој испитног стола за истраживање триболошких својстава клизних лежаја.
- Истраживање триболошких параметара клизних лежаја од легуре белог метала (TEGOTENAX V840).
- Лабораторијско испитивање клизних лежаја од легуре белог метала (TEGOTENAX V840) у условима хидродинамичког подмазивања.
- Истраживање зависности промене коефицијента трења у функцији оптерећења лежаја у условима различитих брзина клизања.
- Истраживање зависности величине хабања у функцији различитих оптерећења и различитих брзина клизања.
- Истраживање зависности температуре лежаја у условима различитих брзина клизања и различитих нивоа оптерећења клизних лежаја од легуре белог метала TEGOTENAX V840.
- Испитивање храпавости контактне површине лежаја у функцији оптерећења лежаја и различитих брзина клизања.
- Упоређивање експериментални резултата коефицијента трења са вредностима коефицијената трења добијених применом дијаграма Раимондија и Бојда.
- Примена вештачке неуронске мреже (АНН), за добијање аналитичких зависности коефицијента трења, температуре, интензитета хабања и храпавости лежаја у функцији радијалног оптерећења лежаја и пута клизања заснованих на експерименталним подацима.

Вредновање значаја и научног доприноса резултата дисертације (до 200 речи)

Докторска дисертација кандидата Amir M. Al-Sammargaie, дипл. маш. инж. садржи више оригиналних доприноса и решења у области истраживања хидродинамички подмазиваних радијалних клизних лежаја од легуре белог метала на бази калаја – TEGOTENAX V840. Део резултата, непосредно проистеклих или везаних за ову дисертацију већ је верификован публикавањем у рангираним часописима из уже научне области којој припада тема докторске дисертације, као и у Зборницима са међународних конференција. Научни доприноси докторске дисертације се пре свега огледа у следећем:

- Оригинална обимна експериментална истраживања триболошких својстава клизних лежаја (коефицијента

трења и интензитета хабања) од легуре белог метала на бази калаја - TEGOTENAX V840 у условима хидродинамичког подмазивања,

- Анализа термичког понашања клизних лежаја од легуре белог метала - TEGOTENAX V840 у функцији оптерећења лежаја и брзине клизања.
- Анализа микроструктуре материјала клизног лежаја израђеног од легуре белог метала - TEGOTENAX V840 након извршених експерименталних истраживања.
- Развијен модел вештачке неуронске мреже за утврђивању аналитичке зависности експерименталних параметара испитивања радијалног клизног лежаја у условима хидродинамичког подмазивања.
- Утврђена аналитичка зависност експериментално добијених триболошких параметара радијалног клизног лежаја у условима хидродинамичког подмазивања (кофицијента трења, температуре лежаја, интензитет хабања и храпавост постелице лежаја у функцији оптерећења лежаја и пута клизања) применом развијеног модела вештачке неуронске мреже.
- Развијено техничко решење испитног стола за испитивање радијалних клизних лежаја хидродинамички подмазиваних.

Оцена самосталности научног рада кандидата (до 100 речи)

Кандидат је испољио изузетан ниво самосталности у раду, анализи научних сазнања у области истраживања (машински елементи, трибологија, клизни лежаји), иницирању нових истраживања и оригиналност у осмишљавању научних и стручних решења. Резултати спроведених истраживања су публиковани на конференцијама и у часописима из уже научне области којој припада тема докторске дисертације и потврђују да је кандидат оспособљен за самостални научни рад.

ЗАКЉУЧАК (до 100 речи)

На основу изложене анализе докторске дисертације и увидом у публиковане научне радове кандидата, чланови Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације констатују да поднета докторска дисертација у потпуности одговара теми прихваћеној од стране Наставно-научног већа Машинског факултета у Нишу и да представља оригиналан и вредан допринос области конструкција и испитивања клизних лежаја, и предлажу Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Нишу да рад кандидата Amir M. Al-Sammaraie, дипл.маш. инж. под називом:

ИСТРАЖИВАЊЕ ТРИБОЛОШКИХ СВОЈСТАВА РАДИЈАЛНИХ КЛИЗНИХ ЛЕЖАЈА ИЗРАЂЕНИХ ОД ЛЕГУРЕ БЕЛОГ МЕТАЛА НА БАЗИ КАЛАЈА - TEGOTENAX V840

прихвати као докторску дисертацију и кандидата позове на усмену јавну одбрану.

КОМИСИЈА

Број одлуке НСВ о именовању Комисије	8/20-01-008/17-019	
Датум именовања Комисије	30.11.2017.	
Р. бр.	Име и презиме, звање	Потпис
1.	Др Драган Милчић, редовни професор Машинске конструкције (Научна област)	председник Машински факултет Универзитета у Нишу (Установа у којој је запослен)
	Др Радивоје Митровић, редовни професор Опште машинске конструкције (Научна област)	члан Машински факултет Универзитета у Београду (Установа у којој је запослен)
3.	Др Душан Стаменковић, редовни професор Саобраћајно машинство (Научна област)	члан Машински факултет Универзитета у Нишу (Установа у којој је запослен)
	Др Бобан Анђелковић, редовни професор Машинске конструкције (Научна област)	члан Машински факултет Универзитета у Нишу (Установа у којој је запослен)
5.	Др Милан Банић, доцент Машинске конструкције (Научна област)	члан Машински факултет Универзитета у Нишу (Установа у којој је запослен)

Датум и место:

11.01.2018.

у Нишу, Београду