



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ



мр Нада В. Бојић, дипл. инж. маш.

**ИСТРАЖИВАЊЕ КОНСТРУКЦИОНО –
ТРИБОЛОШКИХ ПАРАМЕТАРА РАДИЈАЛНИХ
КЛИЗНИХ ЛЕЖАЈА СА ГРАФИТОМ СА АСПЕКТА
ОПТИМАЛНЕ ОСНОВНЕ ФУНКЦИЈЕ**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ментор:

Проф. др Драган Милчић

НИШ, 2016.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING



M.Sc. Nada V. Bojić

**RESEARCH OF STRUCTURAL - TRIBOLOGICAL
PARAMETERS OF RADIAL SLIDING BEARINGS
WITH GRAPHITE FROM THE ASPECT OF OPTIMAL
KEY FUNCTIONS**

DOCTORAL DISSERTATION

Mentor:

Prof. PhD Dragan Milčić

NIŠ, 2016.

РЕЗИМЕ

Докторска дисертација обухвата експерименталне и нумеричке методе да би се предвидело понашање клизних лежаја са графитом у реалним експлоатационим условима. Применом експерименталних истраживања, извршила се идентификација парцијалних утицаја појединих конструкционих параметара клизних лежаја са графитом, као и њихове корелационе зависности. Путем експерименталних метода одређени су и параметри реалних експлоатационих оптерећења и извршена је валидација методологије развоја.

За симулацију експлоатационог понашања клизних лежаја са графитом користиле су се нумеричке методе. Термо - механичка анализа се радила применом софтвера ANSYS. Извршено је поређење нумеричких резултата добијених симулацијом у софтверу са резултатима који су добијени експериментално. Научни допринос дисертације огледа се у дефинисаној методологији развоја клизних лежаја са графитом, идентификацији доминантних конструкционих параметара клизних лежаја са графитом са аспекта триболошких карактеристика, термо-механичкој анализи комплексног склопа лежишне чауре – бронза/графит, експерименталним истраживањима триболошких карактеристика клизних лежаја са графитом и експерименталној валидацији методологије развоја клизних лежаја са графитом.

Кључне речи: клизни лежаји са графитом, експериментална истраживања, нумеричке методе.

ABSTRACT

Ph.D. thesis includes experimental and numerical methods in order to predict the behavior of graphite slide bearings in the real exploitation conditions. Applying some experimental researches, identification of partial impact of certain design parameters of the sliding bearings with graphite was carried out, as well as their mutual correlations. By means of certain experimental methods the real loading exploitation parameters were determined and the validation of development methodology was carried out.

Numerical methods were used to simulate the behavior of the exploitation sliding bearings with graphite. Thermo-mechanical analysis was performed, using ANSYS FEA software. The numerical results obtained by software simulation were compared with the results obtained by conducted experiments. Scientific contribution of the dissertation is reflected in the following: in defined methodologies of development of sliding bearings with graphite, identification of the dominant design parameters of the sliding bearings with graphite in terms of tribological properties, in thermo-mechanical analysis of a complex assembly reservoir sleeve - bronze / graphite, in experimental investigation of tribological properties of graphite sliding bearings and in experimental validation of the development methodology of sliding bearings with graphite.

Key words: sliding bearing with graphite, experimental research, numerical methods.

ЗАХВАЛНОСТ АУТОРА

Пре свега велику захвалност дугујем свом ментору професору др Драгану Милчићу због усмеравања мојих интереса према теми ове дисертације, због савета који су ми знатно олакшали конципирање рада, остављајући ми потпуну ауторску слободу.

Посебну захвалност дугујем својој професоки др Вери Николић Станојевић на несебичној помоћи, непроцењивим саветима, разумевању, подршци и стрпљењу током низа година заједничког рада као и током израде ове докторске дисертације.

Др Милану Банићу, дипл.маш.инж., др Мирославу Мијајловићу дипл.маш.инж, мр Слободану Јовановићу, дугујем велику захвалност за помоћ током израде докторске дисертације, а посебно бих се захвалила на разумевању Маши и Мини Банић, Лени Мијајловић, којима сам “узимала” време за играње.

Хвала члановима комисије, који су предано, одговорно и критички приступили уобличавању ове докторске дисертације.

Свако ауторско дело је без сумње барем делом и колективно дело. То важи и за ову докторску дисертацију, која свакако не би била могућа без помоћи и подршке мојих колега са “Клизних лежаја“ Фасил а.д из Ариља. Велику захвалност дугујем свом колеги Милићу Оцокољићу, који ми је својим знањем и моралном подршком помогао, да не посустанем и да ова дисертација угледа светлост дана.

Мојим другарима, Радиши Лукићу маш. техн., и Жељку Ђурчићу маш.техн., хвала јер су ми обезбедили значајну техничку и другарску подршку.

Искрену захвалност упућујем Божу Ђурђевићу дипл.инж. маш., Младену Котлајићу дипл. инж. маш., Милошу Ђорђевићу дипл.инж.маш., Обраду Стојићу дипл.инж. мет. на саветима и омогућавању услова за истраживање и израду дисертације.

Захвалност дугујем Слободану Јевтићу дипл.маш.инж., директору Синтера из Ужица који ми је ставио на располагање податке с којима располажу, те стрпљиво у више наврата одговарао на моја питања.

Хвала породици Чукић, др Рајку, др Јелени мојој “сестри близнакињи”, и Бојани дипл.психол., који су ми увек помагали и били прави пријатељи у сваком тренутку.

Марији Александровић дипл.маш.инж., Горану Манојловићу дипл.маш.инж.мастер и Дарку Симановићу дипл.мен.инф. велико хвала, јер ми је пуно значила њихова пријатељска и стручна подршка.

Хвала свим мојим пријатељима што су ту уз мене, упркос томе што сам их често запостављала због посла.

Највећу захвалност дугујем мојој породици. Хвала вам што сте ме увек подржавали и веровали у мене. Без вас не би било ове дисертације, нити било ког мог успеха. Хвала на охрабрењу које сте ми пружали кад бих посустала и радовању сваком мом успеху.

Хвала свима који су ми помогли.
мр Нада Бојић, дипл.инж.маш.

Уместо предговора

Упорност - кључ ка успеху

Имати идеју и знање и у крањем случају бити сналажљив је веома важно. Ево примера из историје који у потпуности подкрепљује горе наведену тврдњу. Џон Весли Хајат изумео је клизни лежај за који је знао да савршено одговара точковима железничких вагона. Вероватно је и одговарао, међутим, железничке компаније нису биле заинтересоване да купе и и имплементирају овај производ. Били су уверени да науљени стари лежајеви осовине сасвим добро функционишу као лежишта железничких точкова.

Будући да једино значајно предузеће, које се бави производњом точкова, није намеравало да купи његов изум, Хајат је одустао и јефтино продао своје предузеће младићу по имену Алфред Слоун.

Слоун је продао клизне лежајеве предузећу које се тек појавило на аутомобилском тржишту и којем су били потребни тако издржљиви клизни лежајеви како би се доскочило изрованим путевима. Тако се Слоун обогатио снабдевајући деловима предузеће Хенрија Форда, пре него што је прекршио још неколико правила и на крају завладао аутомобилским тржиштем као власник предузећа Генерал Моторс.

(Извор: Infogo.biz)

Садржај

1. УВОД	14
1.1 Општа разматрања	14
2. ПРЕГЛЕД СТАЊА ИСТРАЖИВАЊА И ИДЕНТИФИКАЦИЈА ПОДРУЧЈА ИСТРАЖИВАЊА	21
3. СТУДИЈА И АНАЛИЗА ПОСТОЈЕЋИХ КОНСТРУКЦИЈСКИХ РЕШЕЊА РАДИЈАЛНИХ КЛИЗНИХ ЛЕЖАЈА СА ГРАФИТОМ	37
3.1. Избор носећег материјала лежаја	37
3.1.1. Калајна бронза	40
3.1.2. Избор чврстог средства за подмазивање - графита	41
3.2. Избор тачности димензија лежаја.....	44
3.3. Прорачун самоподмазујућег радијалног лежаја.....	45
3.4. Конструкцијска решења радијалних клизних лежаја са графитом	50
4. ТЕОРИЈСКА ИДЕНТИФИКАЦИЈА ДОМИНАНТНИХ КОНСТРУКЦИОНО- ТРИБОЛОШКИХ ПАРАМЕТАРА РАДИЈАЛНИХ КЛИЗНИХ ЛЕЖАЈА СА ГРАФИТОМ	57
4.1. Радијална сила	57
4.2. Коефицијента трења.....	59
4.3. Температура.....	61
4.4. Брзина клизања.....	63
4.5. Пречник, број и покривеност графитним ламелама	64
5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ ТРИБОЛОШКИХ ПАРАМЕТАРА РАДИЈАЛНИХ КЛИЗНИХ ЛЕЖАЈА.....	66
5.1. Циљ експерименталних истраживања	66
5.2. Радно место за експериментална истраживања самоподмазујућег лежаја.....	66
5.2.1. Радна машина.....	67
5.2.2. Радни комади	68

5.2.3. Опрема	77
5.2.4. Мерни систем.....	80
5.3. Технолошки режими	83
5.4. Експериментално одређивање коефицијента трења и температуре	83
6. ТЕРМО-МЕХАНИЧКА АНАЛИЗА КАРАКТЕРИСТИКА РАДИЈАЛНИХ КЛИЗНИХ ЛЕЖАЈА СА ГРАФИТОМ ПРИМЕНОМ МЕТОДЕ КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА	88
6.1 Трење и фрикционо загревање.....	89
6.2 Апроксимација геометрије.....	92
6.3 Термичка анализа	96
7. ЗАКЉУЧАК	99
8. ЛИТЕРАТУРА.....	106
9. ПРИЛОЗИ	116

Списак слика

Слика 1. Радијални лежај	15
Слика 2. Релативно покретне површине.....	15
Слика 3. Хексагонална решетка графита, Generalic [81]	41
Слика 4. Механичка чврстоћа графита SGL	42
Слика 5. Електрична отпорност графита SGL.....	42
Слика 6. Топлотна проводљивост графита SGL.....	42
Слика 7. Топлотно ширење графита SGL.....	42
Слика 8. Специфична топлота графита SGL.....	43
Слика 9. Пример клизног лежаја са графитом	49
Слика 10. Развијена површина чауре са ламелама графита	50
Слика 11. Самоподмазујућа чаура са ламелама графита	51
Слика 12. Самоподмазујућа чаура са венцом и ламелама графита	51
Слика 13. Самоподмазујућа чаура са венцом на средини чауре и ламелама графита	52
Слика 14. Самоподмазујућа чаура са венцом и стегом и ламелама графита.....	52
Слика 15. Самоподмазујућа чаура са венцом, ламелама графита и повећањем дебљине зида чауре	52
Слика 16. Нисконапонска лончаста пећ	53
Слика 17. Континуално ливење.....	54
Слика 18. Сечење абразивном тестером.....	54
Слика 19, Обрада чауре резањем.....	54
Слика 20. Бушење рупа у чаури	54
Слика 21. Утискивање ламела графита.....	55
Слика 22. Методологија развоја радијалних клизних лежаја са графитом.	56
Слика 23. Општа зависност r и v вредности за самоподмазујући клизни лежај.....	58

Слика 24. Избор врсте радијалног лежаја.....	58
Слика 25. Струг Потисје Ада, РА-С30.....	67
Слика 26 . Чаура ϕ 50/40x40, пречник графита 8 mm, покривеност 20%.....	69
Слика 27. Чаура ϕ 50/40x40, пречник графита 8 mm, покривеност 30%.....	70
Слика 28. Чаура ϕ 50-40x40, пречник графита 10мм, покривеност 20%.....	71
Слика 29. Чаура ϕ 50/40x40, пречник графита 10 mm, покривеност 30%.....	72
Слика 30. Чаура ϕ 50-40x40, пречник графита 12мм, покривеност 20%.....	73
Слика 31. Чаура ϕ 50/40x40, пречник графита 12 mm, покривеност 30%.....	74
Слика 32. Калибрациона крива за Sn при таласној дужини од 317,502nm	75
Слика 33. Вратило.....	77
Слика 34. Склоп алата	78
Слика 35. Носач завртња.....	78
Слика 36. Горњи додатак сензора	79
Слика 37. Доњи додатак сензора.....	79
Слика 38. Горњи носач.....	79
Слика 39. Доњи носач.....	80
Слика 40. Шематски приказ мерне конфигурације.....	81
Слика 41. Мерна конфигурација	82
Слика 42. Мерна конфигурација - детаљ.....	82
Слика 43. Радијално оптерећење 1539,6 N.....	85
Слика 44. Коефицијент трења $\mu = 0.023$	86
Слика 45. Температура мерена термопаром код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_1500 износи $T = 31.5^{\circ}C$	86
Слика 46. Температура мерена код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_1500, $T = 43.5^{\circ}C$..	87

Слика 47. Контактни притисак у чаури без графита и са 30% покривености графитом.....	92
Слика 48. Шематски приказ алгоритма нумеричког прорачуна	93
Слика 49. Модел оптерећења и гранични услови.....	94
Слика 50. Командни интерфејс преко кога је задата команда за прорачун генерисања топлоте услед трења.	96
Слика 51. Термичка анализа у временском домену.	96
Слика 52. Контактни топлотни флуks код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_3000.....	98
Слика 53. Дијаграм контактнoг топлотног флуksа.....	97
Слика 54. Температура добијена термичком анализом код самоподмазујућег лежаја 12_30_265_1500.....	98
Слика 55. Радијално оптерећење 1500.8 N.....	116
Слика 56. Коефицијент трења $\mu = 0.039$	116
Слика 57. Радијално оптерећење 1394.5 N	117
Слика 58. Коефицијент трења $\mu = 0.079$	117
Слика 59. Радијално оптерећење 2958 N.....	118
Слика 60. Коефицијент трења $\mu = 0.045$	118
Слика 61. Радијално оптерећење 2772.3 N.....	119
Слика 62. Коефицијент трења $\mu = 0.055$	119
Слика 63. Радијално оптерећење 2967N	120
Слика 64. Коефицијент трења $\mu = 0.09$	120
Слика 65. Радијално оптерећење 1445,8 N	121
Слика 66. Коефицијент трења $\mu = 0.011$	121
Слика 67. Радијално оптерећење 1407.7 N.....	122
Слика 68. Коефицијент трења $\mu = 0.099$	122

Слика 69. Температура мерена термопаром код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_1500 износи $T = 26^{\circ}C$	123
Слика 70. Температура мерена термопаром код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_1500 износи $T = 43^{\circ}C$	123
Слика 71. Температура мерена термопаром код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_3000 износи $T = 37.5^{\circ}C$	124
Слика 72. Температура мерена термопаром код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_3000 износи $T = 43.7^{\circ}C$	124
Слика 73. Температура мерена термопаром код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_3000 износи $T = 54.8^{\circ}C$	125
Слика 74. Температура мерена термопаром код самоподмазујућег лежаја 12_20_265_1500 износи $T = 34.9^{\circ}C$	125
Слика 75. Температура мерена термопаром код самоподмазујућег лежаја 12_30_265_1500 износи $T = 94.7^{\circ}C$	126
Слика 76. Температура мерена код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_1500, $T = 26.7^{\circ}C$	126
Слика 77. Температура мерена код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_1500, $T = 33.8^{\circ}C$	127
Слика 78. Температура мерена код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_3000, $T = 37.8^{\circ}C$	127
Слика 79. Температура мерена код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_3000, $T = 43.4^{\circ}C$	128
Слика 80. Температура мерена код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_3000, $T = 54^{\circ}C$...	128
Слика 81. Температура мерена код самоподмазујућег лежаја 12_20_265_1500 $T = 34.7^{\circ}C$	129
Слика 82. Температура мерена код самоподмазујућег лежаја 12_30_265_1500, $T = 93.2^{\circ}C$	129
Слика 83. Контактни топлотни флуks код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_1500.....	130
Слика 84. Контактни топлотни флуks код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_1500.....	130

Слика 85. Контактни топлотни флуks код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_1500.....	131
Слика 86. Контактни топлотни флуks код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_3000.....	131
Слика 87. Контактни топлотни флуks код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_3000.....	132
Слика 88. Контактни топлотни флуks код самоподмазујућег лежаја 12_20_265_1500.....	132
Слика 89. Контактни топлотни флуks код самоподмазујућег лежаја 12_30_265_1500.....	133
Слика 90. Температура добијена термичком анализом код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_1500.....	133
Слика 91. Температура добијена термичком анализом код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_1500.....	134
Слика 92. Температура добијена термичком анализом код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_1500.....	134
Слика 93. Температура добијена термичком анализом код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_3000.....	135
Слика 94. Температура добијена термичком анализом код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_3000.....	135
Слика 95. Температура добијена термичком анализом код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_3000.....	136
Слика 96. Температура добијена термичком анализом код самоподмазујућег лежаја 12_20_265_1500.....	136

Списак табела

Табела 1. Карактеристике мазива.....	41
Табела 2. Основне врсте полимерних материјала за лежаје.....	44
Табела 3. Одређивање r_v вредности.....	45
Табела 4. Приближне вредности фактора хабања K	47
Табела 5. Пример технолошког поступка за израду чауре са графитом ϕ 10.....	53
Табела 6. Основне карактеристике полимерних материјала за самоподмазујуће лежаје....	60
Табела 7. Чауре ϕ 50/40x40	68
Табела 8. Хемијски састав CuSn 12 и утицај легирајућих елемената.....	75
Табела 9. Механичке особине CuSn12, (стандард SRPS.C.D2.300) [89].	76
Табела 10. Физичке особине CuSn 12, (стандард SRPS.C.D2.300)	76
Табела 11. Графитна маст која се користила за уходавање лежаја.....	77
Табела 12. Компоненте мерне конфигурације	81
Табела 13. Механичка својства EN10050 E295 у побољшаном стању.....	83
Табела 14. Услови за термичку обраду EN10050 E295.....	83
Табела 15. Резултати добијени експерименталним истраживањима.....	87
Табела 16. Параметри коришћени за симулацију преноса топлоте.....	95
Табела 17. Преглед резултата добијених применом експерименталне и нумеричке методе.....	98

Списак појмова, термина, ознака

μ	- коефицијент трења,
F_{μ}	- сила трења, N,
F_N	- нормална сила, N,
d	- унутрашњи пречник чуре, mm,
H	- висина чауре, mm,
n	- проценат покривености чауре графитом, %,
A	- површина графита, mm ² ,
L_{max}	- максимална дужина чауре, mm,
m	- растојање од ивице чауре до осне линије графита у првом реду, mm,
a	- висина чауре, mm,
l	- растојање од осне линије графита до ивице графита у наредном реду, mm,
j	- број растојања између редова,
k	- растојање осе графита до осе графита последњег реда, mm,
x^0	- угао између два суседна графита у првом реду, °,
y^0	- угао између два суседна графита у наредном реду, °,
r	- укупан број графитних ламела који се утискује у чауру,
n	- број редова по висини чауре,
g	- пречник графитне ламеле, mm,
f_b	- препоручена толеранција за спољашњи пречник чауре,
H_7	- препоручена толеранција за унутрашњи пречник чауре,
L	- укупна дужина развијене чауре, mm,
B	- висина чауре, mm,
a	- растојање од почетка висине до осне линије ламеле графита у првом реду,

	mm,
b	- осно растојање између две ламеле графита у првом и другом реду по висини, mm,
c	- растојање од почетка развијене дужине до осне линије ламеле графита у другом реду дужини, mm,
d	- растојање од почетка развијене дужине до осне линије ламеле графита у првом реду по дужини, mm,
s	- корак, mm/o,
n	- број обртаја, min^{-1} ,
\bar{b}	- дебљина зидова графитних постељица, mm,
A	- површина, mm^2 ,
l	- дужина, mm,
d	- пречник, mm,
p	- притисак, Pa ,
F	- сила, N,
v	- брзина, m/s,
v_{izl}	- излазна брзина, m/s,
v_{doz}	- дозвољена брзина, m/s,
T	- тренутна температура, °C ,
ΔT	- пораст температуре, °C ,
C	- целокупна термичка отпорност дисипацији топлоте са површине, °Cms/N,
I_h	- интензитет хабања, mm/1000 часова рада,
K	- фактор хабања, m^2/N ,
t	- радни век, h,
h	- вредност линеарног хабања,
ϑ_0	- температура околине, °C ,
k	- коефицијент одвођења топлоте кроз постељицу, J/Km^2 ,
A	- унутрашња површина постељице, mm,
pv	- pv карактеристика
R_m	- затезна чврстоћа, N/mm^2 ,

R_p	- конвенционални напон течења, N/mm^2 ,
A	- издужење %,
HB	- тврдоћа 10/1000,
	- запреминска маса, kg/m^3 ,
	- коефицијент температурног истезања $10^{-6} / K$,
	- топлотна проводљивост W/mK ,
	- специфична електрична проводљивост $m/\Omega mm^2$,
	- пермеабилност $\mu 100$,
	- скупљање %,
	- подручје топљења $^{\circ}C$,
$F_{\mu}(t)$	- сила трења у функцији времена, N ,
$F_n(t)$	- нормално оптерећење у функцији времена, N ,
$\mu(t)$	- коефицијент трења у функцији времена,
$M_{tr}(t)$	- момент трења у функцији времена, Nm ,
$F_r(t)$	- радијална сила у функцији времена, N ,
L	- крак растојања, mm ,
q_t	- брзина промене генерисане топлоте по јединици контактне површине, J/m^2
p	- контактни притисак, Pa ,
Δv	- релативна брзина клизања, m/s ,
\dot{Q}	- генерисана топлота по јединици запремине, J/m^3 ,
K	- топлотна проводљивост, W/mK ,
ρ	- густина, kg/m^3 ,
C	- специфична топлота, J/kgK ,
q	- укупна генерисана топлота, J ,
$FHTG$	- фактор дисипације,
τ	- фрикциони напон, Pa ,
q_s, q_b	- топлота претворена на страни вратила и топлота претворену на страни лежаја, J ,

FWGT

- фактор расподеле топлоте
- Štefan–Bolcmanova константа, W/m^2K^4
- Специфични топлотни капацитет челика, J/kgK
- Коефицијент проводљивости челика, W/mK
- Коефицијент конвективног преноса топлоте са челика на ваздух, W/m^2K
- Специфични топлотни капацитет бронзе, J/kgK
- Коефицијент проводљивости бронзе, W/mK
- Коефицијент конвективног преноса топлоте са bronze на ваздух, W/m^2K .

1. УВОД

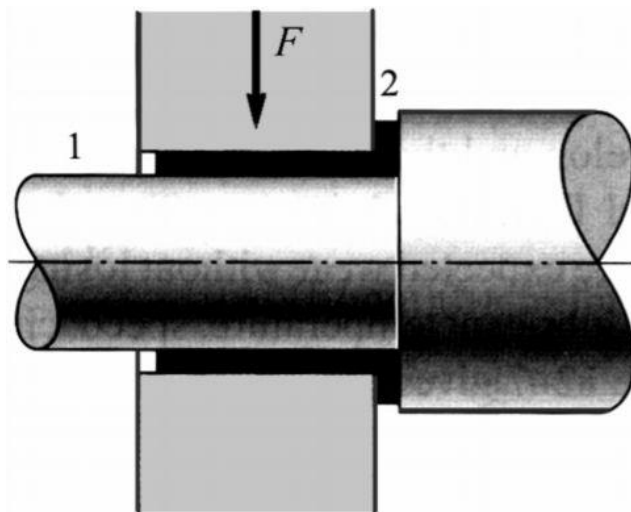
1.1 Општа разматрања

Наука о конструисању још увек у процесу конструисања не укључује довољно и триболошке аспекте конструисања. Неопходни услов исправног конструисања су трибологија и триболошки аспекти конструисања. При процесу конструисања основно је извршити адекватан избор материјала, мазива и система подмазивања, који се жели конструисати, а затим утврдити које су му радне и триболошке карактеристике.

Клизни лежаји имају велику примену у тешкој машиноградњи, код млинова, турбина, дробилица, ваљаоничких и ковачких машина, преса, редуктора итд. Истраживања извршена последњих година довела су до значајног усавршавања клизних лежаја. Основна предност клизних лежаја огледа се у њиховој носивости, односно радном веку. Ако се код клизног лежаја обезбеде услови хидродинамичког пливања, онда он има скоро неограничени радни век. Ово је нарочито битно код рада са високом учестаношћу обртања, где котрљајни лежаји због ограничене носивости и ограниченог радног века не могу да се примене. Са друге стране тенденција развоја савремених машина огледа се у сталном побољшању њихових перформанси. То је махом повезано са повећањем оптерећења, брзине и бројева обртаја уз истовремено смањење димензија и тежине. Овакав тренд развоја указује да у будућности треба очекивати већу примену клизних лежаја. На то указују и истраживања која се врше у овој области.

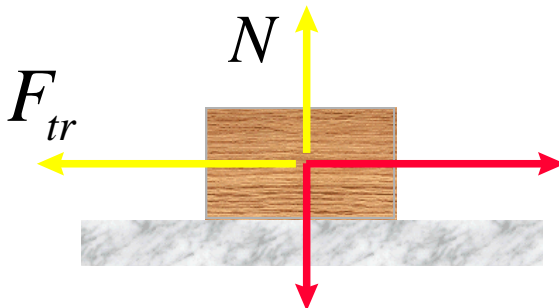
У циљу појашњења предмета истраживања у овој глави ће прво бити дате опште напомене о клизним лежајевима и њиховој примени. Клизни лежаји су машински склопови, који се најчешће уграђују у ослонце вратила и осовина. Међусобна покретљивост делова у додиру и пренос оптерећења код клизних лежаја остварује се посредством клизања када покретна површина рукавца клиза по непокретној површини лежаја Nikolić [1]. Лежаји који се разматрају у овој докторској дисертацији спадају у групу радијалних клизних лежаја, а то значи да преносе попречне силе.

Основни и најважнији део клизног лежаја јесте клизни пар који чине: Рукавац вратила (1) и лежајна постељица (2) код радијалних лежаја приказани су на (слици 1).



Слика 1. Радијални лежај

Да би се појаснило стање на додиру рукавца и лежаја биће дато неколико општих напомена у вези трења између две релативно покретне површине. Додир две релативно покретне површине машинских делова између којих дејствују отпори клизања представља клизни спој. При клизању рукавца по лежају ствара се трење (слика 2). Трење се увек јавља при релативном кретању тела која се додирију. Mitrović [2].



Слика 2. Релативно покретне површине

Математички, трење се може представити као:

$$F_{tr} = \mu \cdot N, \quad (1)$$

где је:

F_{tr} - сила трења

N - нормална сила, којом подлога делује на тело које се креће

μ - коефицијент трења,

Трење проузрокује одговарајући отпор, хабање додирних површина и загревање делова. Како би се трење смањило додирне површине код већине клизних лежаја се подмазују. Сврха подмазивања је да спречи директни контакт између површина у релативном кретању. Прве основе трења дао је Charles Augustin Coulomb (1736 – 1806) 1781 године . На стање у клизном споју највише утиче коефицијент трења и зависи од карактеристика материјала и храпавости додирних површина. С' обзиром да не постоје идеално глатке површине, већ се свака површина састоји од великог броја испупчења и удубљења различитих величина, код сваког лежаја постоји трење.

У циљу смањења трења на додирним површинама клизних лежаја користе се различите врсте мазива помоћу којих се раздвајају, потпуно или делимично додирне површине. У овој докторској дисертацији разматрају се клизни лежаји који се подмазују графитом, који представља чврсто мазиво.

Избор материјала лежајне чауре од пресудног је значаја за радни век лежаја и читаве машине када се због нестационарних услова погона или других разлога не може постићи хидродинамичко подмазивање. Међутим и код лежајева са стационарним условима долази до граничног и евентуалног сувог трења код покретања и заустављања машине. Ови материјали морају имати добра антифрикциона својства, при краткотрајном раду лежаја на суво не смеју допустити заривавање, морају се добро углачати. Поред тога, потребно је да имају мали коефицијент трења, отпорност према хабању, као и својство да не изазивају велико хабање другог клизног елемента, способност подношења великих специфичних притисака како на нормалним тако и на повишеним температурама, релативно добра пластичност (мека метална основа) како би се могло извршити потребно прилагођавање површини рукавца (односно изравнале микро и макро неравнине и површинске грешке) и тиме обезбедио што равномернији распоред оптерећења по површини лежаја, способност основе да прими похабане тврде делиће и сачува рукавац од већег хабања, способност доброг одвођења топлоте, отпорност према корозији.

Радни век машина и различитих механизма битно зависе од правилног избора и примене мазива. Лоше одабрано мазиво или његова погрешна примена је узрок ненормалном, убрзаном трошењу површина које су у контакту и појава трајних оштећења. Основни критеријуми избора мазива у овој тези графита је специфичност рада клизног

лежаја: брзина и облик кретања, радијално оптерећење, температура итд. Како је хабање елемената последица трења, а трење представља отпор релативном кретању, основна улога графита је да смањи тај отпор. Графит се може дефинисати као материјал који смањује трење, али осим тога испуњава и неке сасвим одређене и строго постављене захтеве. Односно мора да подмазује површине (да имају својства самоподмазивости), али уједно мора да има способност хлађења, заштиту од корозије, и да буде термички стабилан. Без ових особина графит не би могао задовољити сложене захтеве клизних лежаја са графитом. Графит, због своје ламеласте структуре има мале смицајне напоне, односно мали коефицијент трења, зато је погодан за високе радне температуре, за кородивне и радиоактивне средине и за рад у условима вакума.

Код лежаја који се подмазују графитом температура лежаја се у почетку рада нагло повећава, услед чега се загрева не само клизни пар већ и кућиште лежаја, што се догађа и код других врста клизних лежаја. При каснијем раду повећање температуре због одвођења топлоте у околну средину тече спорије, док се после неког времена неустали. У устаљеном стању постоји равнотежа између произведене и одведене топлоте, односно лежај добија своју стационарну температуру. Код стационарног стања потребно је да губици снаге услед загревања буду једнаки збиру одведених топлота природним и принудним путем.

Разлике у износу коефицијента топлотног ширења између лежајне легуре и материјала рукавца не смеју бити велике (како не би битно утицало на величину зазора) Miltenović [3]. Познато је да овим бројним захтевима најбоље одговарају легуре са нехомогеном структуром. Зато структуру антифрикционих легура одликује постојање меке основе по којој су распоређене веома тврде честице, које служе као носећи материјал. Избор врсте легуре у неком одређеном случају врши се на основу специфичног притиска и обимне брзине рукавца. Осим тога, за избор материјала значајни су и температурни услови као и његова цена. Класични лежајни материјали су:

- бронза
- бели метал,
- бронза + ламеле графита

Не постоји материјал који удовољава свим овим захтевима, али бронза у комбинацији са графитом представља бољи лежајни материјали од осталих, који се примењују само за специјалне сврхе. Лежајна чаура од бронзе у комбинацији са графитом спада у групу самоподмазујућих лежаја.

Основно својство самоподмазујућих лежаја јесте да не захтевају посебно подмазивање и одржавање током рада. Појам самоподмазивости графита објашњава се тиме што кристали графита захтевају сасвим мале тангенцијалне силе да би се померили. На површини метала, графит је у стању да образује орјентисану скраму која замењује средство за подмазивање. То одређује области примене: на местима где су мазива неефикасна, односно на местима изложеним ниским или високим температурама или у реактивној средини, где се флуиди за подмазивање не могу користити због могућности контаминације производа или средине, где је примена уобичајених мазива непогодна због немогућности одржавања. Самоподмазујући клизни лежаји указују на низ предности и омогућавају знатне уштеде како у одржавању, тако и у средствима за подмазивање. Приликом коришћења, графит формира танак филм на обе додирне површине који је веома отпоран на ударе и који се задржава и у позицији мировања. Код самоподмазујућих лежаја постоје четири основне врсте материјала који задовољавају захтеве за израду истих, као:

- полимерни материјали који представљају најзначајнију и најшире коришћену врсту материјала за производњу самоподмазујућих лежаја;
- графитни материјали са различитим додацима за примену при повишеним температурама, изнад оних које не могу да задовоље полимерни материјали;
- филмови чврстих мазива на бази угљеника, графита и молибдендисулфида у комбинацији са металним и неметалним материјалима као подлогом. Овакве комбинације су погодне када се захтева низак коефицијент трења;
- керамика и кермет за израду лежаја која се примењује у областима високих радних температура (преко 400°), било да се користе за производњу комплетних лежаја или само превлаке на металној подлози.

Код самоподмазујућих клизних лежаја, лежајне чауре се најчешће израђују од основног материјала високог квалитета са улошцима (ламелама) од графита који хомогено пријањају на површину заузимајући 25 % чауре. Улошци од графита утичу како на смањење коефицијента трења тако и на смањење хабања. Наведени улошци израђени су под високим притиском и састављени су од графита и формалдехидне смоле. У зависности од потреба користе се графитни улошци, који могу бити разврстани у неколико група. У овој тези вршиће се истраживања на радијалним клизним лежајима са графитом GF1 који има одличну отпорност на корозију и рад на температури до 400⁰С. Приликом истраживања у дисертацији ће се користити лежаји са различитим пречником графитних уложака и различитим процентом покривености лежаја, а истраживање конструкционо-триболошких параметара ће се вршити са аспекта оптималне основне функције.

Висока интеграција мултифизичких софтверских алата и знатан пораст могућности процесирања савремених рачунарских система омогућили су да се процес конструисања у виртуелном развоју производа заснива на симулацији реалних оптерећења и услова.

За детаљнији прорачун и у циљу узимања у обзир свих утицајних фактора у пољу клизног лежаја који је ослабљен ламелама графита, за истраживања у овој тези користиће се нумеричке методе које се базирају на методи коначних елемената.

Карактеристике софтвер-а за нумеричку анализу конструкција омогућавају да се изврши детаљна анализа термо-механичких карактеристика чак и најсложенијих машинских елемената и склопова, па тако и лежаја са графитом, који су посебни због своје конструкције. Ово истраживање је усмерено на идентификацију термо-механичких карактеристика и могућих узрока појаве нежељеног хабања у експлоатацији клизних лежаја са графитом. Тенденције у савременој машинској индустрији су повећање чврстоће, експлоатационих карактеристика и трајности делова, уз истовремено смањење трошкова израде. С обзиром да се због тога уводе нови материјали, потребно је испитати понашање клизних лежаја са графитом са становишта хабања. Узроци хабања клизних лежаја могу се поделити на механичке, термичке и остале. Механички узроци су обично стохастичке природе и јављају се услед грешака при производњи, несавршености материјала и уграђених компоненти. Термички узроци су посебно интересантни и недовољно истражени, те ће се ово истраживање усмерити на детаљнију анализу клизних

лежаја са графитом и услед термичких узрока.

Предмет ове докторске дисертације биће анализа конструкционо – триболошких параметара радијалних клизних лежаја са графитом са аспекта оптималне основне функције. Разумевање овог феномена захтева познавање бројних утицајних параметара који потичу из различитих области инжењерства: конструисање, технологија, трибологија, термотехника, механика и др.

За истраживање у раду користитиће се експерименталне и нумеричке методе. Применом експерименталних истраживања, извршиће се идентификација парцијалних утицаја појединих конструкционих параметара клизних лежаја са графитом, као и њихове корелационе зависности.

Нумеричке методе ће се користити за симулацију експлоатационог понашања клизних лежаја са графитом. Термо-механичка анализа ће се радити применом софтвера ANSYS. Биће извршено поређење нумеричких резултата добијених симулацијом у софтверу са резултатима који су добијени експериментално.

Поред низа добрих особина, клизни лежаји се примењују само у одређеним подручјима. Да би се повећала примена клизних лежаја у дисертацији ће се урадити оригинална методологија развоја радијалних клизних лежаја са графитом. Тенденција развоја савремених машина огледа се у сталном побољшању перформанси клизних лежаја. То је углавном повезано са применом нових материјала, повећањем оптерећења, брзине и бројева обртаја уз истовремено смањење димензија и тежине. Овакав тренд развоја указује да у будућности треба очекивати већу примену клизних лежаја.

Предмет истраживања у овој докторској дисертацији биће само радијални самоподмазујући клизни лежаји.

2. ПРЕГЛЕД СТАЊА ИСТРАЖИВАЊА И ИДЕНТИФИКАЦИЈА ПОДРУЧЈА ИСТРАЖИВАЊА

Упоредо са налажењем могућности практичне примене клизних лежаја, дефинисања технолошких и других параметара, текла су и теоријска истраживања, нарочито, процеса трења и хабања. У данашње време чине се све већи напори у циљу откривања законитости у процесу динамике трења и хабања, као и откривању нежељених појава у раду клизних лежаја како би се узеле у обзир при прорачуну и конструкцији и по могућству свеле на минимум.

Процес трења као најчешћи физички феномен изазва многе негативне ефекте у производним системима и конструктор покушава да их сведе на минимум. Један од основних параметара који карактерише процес трења вратила и клизне чауре јесте коефицијент трења. Мерење овог коефицијента може се остварити применом експерименталне методе. Duriš [4] и Labašova [5] су експерименталним испитивањима дошли до вредности коефицијента трења за клизни пар алуминијум - челик. Вредност коефицијента трења је нагло смањена са 0,8 на 0,1. Испитивања су рађена на Tribotestor М '89. Кориговани су улазни параметри: брзина клизања и оптерећење.

Применом горе наведене методе Labašova [6] и [7] је у своја два рада испитивала коефицијент трења за бронзу (CuZn25Al6) са убаченим графитним ламелама. Добијени резултати показали су да се коефицијент трења смањује са повећањем нормалног оптерећења. Нека истраживања коефицијента трења у клизном зглобу су вршена на чаури од месинга, алуминијума и полиамида за одабрана оптерећења. Duriš [8] је уочио да је највећи пад у величини коефицијента трења уочен код изолатора од алуминијума. Смањење коефицијента трења је забележено око 82% за изолатор од месинга и око 72% за изолатор од полиамида.

Израда и ремонт склопа лежишта и њихова монтажа и демонтажа често је јефтинија него ремонт и монтажа вратила. У тим случајевима лежишта морају имати добра технолошка својства за делове лежаја добијене ливењем, ниску температуре топљења, високу тачност, мало скупљање, велику чистоћу површина при ливењу. Мићић [9] је извршио поређење појединих елемената важних за лежај који су увези са утицајем две

различите технологије израде лежаја – наливање, односно наваривање меког клизног слоја на основу високе чврстоће (челик). Дата је анализа експерименталних резултата за две производне технологије, и то: макро и микроструктуре, тврдоће, порозности, споја белог метала и челика, као и појава сегрегација. Осим тога, праћен је и утицај већег броја претапања белог метала и технологије производње полазног материјала на квалитет наварених лежаја. Материјал постељице мора да има могућност одвођења топлоте, да величина коефицијента топлотног ширења буде блиска са коефицијентом топлотног ширења вратила и кућишта лежаја и да при загревању у току рада задржи стабилност физичко - механичких особина.

Stott [10] је показао да температуре могу да имају значајан утицај на степен хабања (оштећења) металних компоненти. Клизањем клипа, у условима у којима топлота трења има мали утицај на површинске температуре, уопштено постоји прелаз из јаког хабања на благо хабање. То се дешава због производње и задржавања оксида и делимично оксидираних честица крхотина метала на контакту носећих клизних површина. У овом раду даје се преглед неких од главних налаза опсежних програма истраживања у развоју као што су заштита слојева на хабање, укључујући и модел који је уско везан за посматрани ефекат температуре на хабање. Quaglini [11] предлаже нумеричка истраживања трења топлоте развијене у клизним лежајевима под високим брзинама и утицајем релевантног пораста температуре на механичке карактеристике уређаја. Модел лежишта се креира тродимензионалним коначним елементима и трење топлотне енергије се моделује кроз термални извор стављањем на површини клизног лежаја, са интензитетом у зависности од коефицијента трења, притиска контакт и брзине. Поступак може да помогне у прелиминарним студијама за избор лежајног материјала прерачунавајући њихову термичку стабилност и за процену промене конструктивних изолационих особина клизних лежајева због топлоте трења.

Marinković [12] је извршио бројна експериментална истраживања, која су усмерена на одређивање "pv" карактеристике, температуре и трења. Експерименти са порозним металним лежајевима показују да вредности температуре и коефицијента трења постају сталне између пола сата рада у оквиру одговарајућег оптерећења. Приказани резултати показују да садржај С (Графита) у синтерованој бронзи као носећем материјалу има велики утицај на трење, хабање и температуру у чврстом мазиву.

Избор материјала за израду клизног лежаја зависи од режима експлоатације и то пре свега од величине и карактера специфичног притиска и брзине клизања. Zeren [13] је истраживао лежајни материјал који у основи садржи калај у сувим условима клизања. Низак садржај антимоноа Sb (7%) познат је као САЕ 12 и легура Sn-Sb-Cu има широку примену у аутомобилској индустрији. Карактеристике хабања и трења одређене су обзиром на путању клизања, брзину клизања, оптерећење. За разумевање триболошких догађаја користиле су се методе скенирања електронским микроскопом (SEM) и рентгенска метода енергетског-растера (EDXS). Сврха овог испитивања је да се испитају триболошка својства већ постојеће легуре које се користе у тешким радним условима. Испитивања су рађена у условима сувог клизања, јер упркос присуству филма мазива, под тешким радним условима сувог клизања с' времена на време може се појавити локално хабање.

Equey [14] је анализирао улогу легуре, микроструктуре и храпавости подлоге на понашање хабања и трења оловне и безоловне калајне бронзе. Ефекат хабања повезан је са формирањем оловног оксида. Када се формира такав слој на оловним бронзама, хабање бива јаче него у случају безоловне бронзе. Ипак, присуство олова у легури је неопходан али не и довољан услов за добијање мазивог слоја.

Sonam-ov [15] истраживачки рад је усмерен на развој новог материјала за индустријску примену. Из прегледа литературе, утврђено је да је уобичајен лежајни материјал (бабит и бронза) доводи до високе стопе хабања, као и високог коефицијента трења. Данас се пуно користи PTFE (политетрафлуоретилен), као материјал лежишта који је самоподмазујући и тежи да смањи коефицијент трења, али проблем са PTFE јесте да је подложна високом хабању, што може смањити додавањем погодних пунила. У раду је варирано је оптерећење, клизно растојање, клизна брзина и садржај пуниоца. Представљена је компаративна анализа три композита (PTFE, PTFE + 25% С и PTFE + 35% С) која показује како се својства PTFE могу побољшати додавањем садржаја пунила. Резултати показују да варирањем различитих параметара као што су оптерећење, брзина и клизно растојање PTFE са садржајем угљеника 35% имају боље перформансе хабања. Код самоподмазујућих клизних лежаја међусобна покретљивост делова у додиру и преношење оптерећења остварује се посредством клизања, када рукавац клиза по постељици лежаја. Раздвајање рукавца и постељице, односно спречавање

њиховог непосредног додира и хабања постиже се подмазивањем графитом. Како је хабање елемената последица трења, а трење представља отпор релативном кретању, основна улога графита је да смањи тај отпор. Због тога је урађено експериментално испитивање самоподмазујућих лежаја са 20 и 30 % покривености графитом, које показује да се са повећањем процента покривености графита смањује трење Војић [16].

Један од пресудних фактора који одређују избор антифрикционог материјала је његова чврстоћа и дефицитарност. Пред материјале за лежаје се постављају захтеви у смислу: високе отпорности на хабање лежаја, а са њим и спрегнутог вратила при различитим брзинама клизања и специфичним притисцима Војић [17] и др. Због оваквих захтева који се стављају пред клизни лежај Khoddamuadex [18] је развио нову групу политетрафлуороетилена (PTFE) на бази композитних материјала за наношење на клизни лежај. Појачана је новоразвијена T-401 Tribaloi легура, која има бољу дуктилност у поређењу са конвенционалном легуром Tribaloi. Од новог композита испитана су механичка и триболошка својстава, као и отпорност на корозију. Отпорност на хабање свих развијених пластичних композита је много већа него код чистог PTFE са веома ниским коефицијентима трења. Међу развијеним композитима, мешавина 40% пластичне + 15% T-401 + 45% бронза даје најбољу комбинацију особина.

Идеалан материјал за клизне лежаје би био онај материјал који лако апсорбује абразивне честице, а при нарушавању контакта ослобађа се од њих. Универзалне особине у том смислу имају композитни материјали, еластомери и полимери. Suresha [19] је у овом раду, експериментално истраживао композитне материјале под различитим оптерећењима и клизним брзинама тестирањем помоћу Pin-on-Disc. Утицај два неорганска пунила, силицијум карбид честице и графита, на хабање стакленог материјала ојачаног епокси композитом под сувим условима клизања. Повећањем оптерећења и клизних брзина, забележен је веће хабање. Вредности коефицијента трења расту са накнадним повећањем оптерећења/брзине клизања. Примећено је да графит испуњен G-E композитом показује нижи коефицијент трења од друга два композита без обзира варијације у оптерећењу/клизања брзине.

Самоподмазујући клизни лежаји указују на низ предности и омогућавају знатне уштеде како у одржавању, тако и у средствима за подмазивање. Приликом коришћења

бронзане чауре са графитом, графит формира танак филм на обе додирне површине који је веома отпоран на ударе и који се задржава и у позицији мировања. Користе се код делова изложеним великим оптерећењем и малим брзинама. Ru-Tie [20] је анализирао утицај процента графита на композитне материјале коришћењем металургије праха. Ефекат садржаја графита на триболошке (клизне) особине проучавали су коришћењем UMT - 2MT TRIBO метара. Оптималне особине просечног коефицијента трења, максимални коефицијент трења, амплитуда коефицијента трења и отпорност на хабање може се постићи са садржајем графита до $\sim 3\%$. Одговарајући садржај графита и тврдоћа су два најважнија фактора за постизање доброг квалитета филма за подмазивање на дотрајалим површинама. Када је присутна висока температура у лежајевима, додаје се графит као додатак да одржи добре клизне особине. Међутим, графит смањује чврстоћу лежаја. Никл може повећати отпор бронзе, када се дода графит, али прахови никла имају јаку тенденцију ка сегрегацији током мешања Cambronero [21].

Jones [22] је проучавао механички учинак лица заптивке критично зависи од трибологије материјала заптивке. У овом истраживању је испитана трибологија материјала лица заптивке под условима сувог контакта. Показало се да развој контактеног филма карбон-графита, зависи од pv (притисак \times брзине) ових заптивних материјала.

Suresha [23] је у својој експерименталној студији, испитивао суво клизно хабање и понашање хабања два абразивна тела која су направљена од графита и ојачана епокси композитом. Графитни - материјал ојачан епокси композитом је коришћен као референтни материјал. Експерименти хабања су спроведени помоћу pin-on-disc трибометра за испитивање под сувим условима контакта. Губитак масе је одређен у функцији клизних брзина за оптерећења од 25, 50, 75, и 100 N на сталном клизним растојању од 6000 m. Експерименти хабања два абразивна тела извршена су у више пролаза користећи силицијум карбид (SiC). Испитивани су ефекти растојања абразије и различитих оптерећења. Такође су утврђене и обим абразивног хабања и специфичне истрошености у функцији примењеног нормалног оптерећења и растојања абразије. Резултати показују да је у ситуацијама сувог хабања, при повећаном оптерећењу и брзини клизања, забележено веће хабање. Одличне карактеристике хабања су добијене са графитом који садржи угљен-епокси као пунилац. Механизми хабања композита су испитивани користећи

испитивање електронским микроскопом. Утврђено је да је хабање графит - епокси композита углавном због микропрслина и механизма лома влакана. Утврђено је да механизам микропрслине био изазван прогресивно површинским оштећењем. Такође је примћено да се хабање угљен-епокси композитом редукује додавањем графитног пунила, у којој су доминирали механизми хабања микропробијања / микросечења уместо микропрслине.

Због крутости графита лежаји треба да имају једноставну конфигурацију. Нове технологије прате развој и употребу нових материјала, нарочито композитних, који се данас сматрају веома значајним материјалима, који задовољавају високе стандарде модерне технологије Rakowski [24]. Самоподмазујући клизни лежаји не захтевају посебно подмазивање и одржавање током рада. Таква особина самоподмазујућег лежаја, одређује области примене, тако да се они користе: у реактивним срединама, на местима где су мазива неефикасна, односно на местима изложеним високим или ниским температурама и на местима, где се флуиди за подмазивање не могу користити.

У последњих неколико година, развијено је неколико нових чврстих мазива као и концепт модерног подмазивања како би се постигла боља мазивост и дужи век хабања у захтевним триболоким применама. Већина традиционалних чврстих мазива су направљена у облику метала, керамике. Они се успешно користе у различитим инжењерским апликацијама. Недавно је до напретка таложења танког филма технологија је довела до синтезе нових генерација самоподмазујућих облога са композитима користећи дупле / вишеслојне површинске третмане. Donnet [25] је разматрао разумевање механизма подмазивање како традиционалних и нових чврстих мазива, са посебним нагласком на методама чврстих мазива у праксама. Fushchich [26] је објавио резултате у којима испитује дејство никла и фосфора на особине графит - бронзе прашкастих материјала под високим притиском (до 20 МПа) , при знатним клизним брзинама (1-2 m / s). Утврђено је да је Cu-Ni -РС графит бронза оптималног састава има коефицијент трења 0.028-0.045 и могу радити све до 150 ° С, у наведеним условима.

Многи истраживачи су покушали да побољшају триболошке карактеристике мазива да се смањи коефицијенти трења и хабања. Један од приступа је једноставно употреба адитива на бази лубриканта како би променили своје особине. Недавно, су се појавиле наночестице као нове врсте адитива због своје величине, облика и других

особина. Нано лубрикант је нова врста инжењеринг мазива од наночестица. Lee [27] је користио графитне наночестице како би се створила нано мазива са побољшаним триболошким својствима и карактеристикама подмазивања. Да би се истражиле физичке и триболоке особине нано мазива коефицијент трења и температура коришћен је Pin- on-Disc. Резултати показују да када се упореде фиксне плоче обложене сировинама и нано мазивима, плоча обложена нано мазивом која садржи графит наночестице има нижи коефицијент трења и мање хабање. Ови резултати указују да адитиви од графит наночестица побољшавају својства подмазивања.

Yang [28] је предложио нову формулацију самоподмазујућег премаза за потенцијалну примену у широком опсегу радне температуре. Како би се смањило трење у кретању машинских склопова у широкој употреби су самоподмазујући премази. Међутим, триболошке особине ових премаза битно зависе од одржавања температуре. На основу ефективног опсега температуре мазива, самоподмазујући премази развијени у прошлости су подељени у три групе: ниска температура мазива премаз (од $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до собне температуре), умерена температура мазива (од собне температуре до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$) и превлачење високе температуре мазива ($> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$). Идеје о могућим начинима да се прошири опсег температурног функционисања самоподмазујућим премаза представљени су као: хибридизован триболошким премаз.

Harlin [29] је истраживао утицај топографије површине PVD превлаке на тенденцију почетног преноса материјала и фрикционе карактеристике у сувим клизним контактним условима. Резултати показују да резултат топографије пресвучене површине PVD јако зависи од топографије подлоге материјала.

Због великог броја утицајних параметара неопходних за прорачун као и важности и значаја улежиштења код машинских система сврсисходна је примена рачунара при конструисању радијалних и аксијалних клизних лежаја Milčić [30] и Milošević [31] су представили софтвер који је развијен за прорачун и моделирање радијалних хидродинамичких клизних лежаја. Програм омогућава лаку проверу носивости радијалних клизних лежаја, проверу испуњености услова хидродинамичког пливања као и проверу термичке стабилности односно прорачун радне температуре лежаја, као и повезивање модула за прорачун лежаја са CAD програмом (Autodesk Inventor) где се добија виртуелни модел стандардних клизних лежаја. Wang [32] је урадио , анализу и моделирање

коэффицијента трења код клизног лежаја. На основу сиве теорије система, испитивани су ефекти ротационе брзине и оптерећења на коэффициент трења код клизних лежајева. Степен сиве релационе анализе показује да оптерећење има још значајнији утицај на коэффициент трења у поређењу са ротационим брзином. На основу сиве теорије система Ваомиг [33] је, предложио методу сиве релационе анализе која се користи за анализу утицаја различитих параметара на момент трења код клизног лежаја. На основу сиве релационе анализе урађен је је вишедимензионални сиви модел GM (1, N, D) за трење обртног момента код клизног лежаја. Узимајући основну Al -легуру клизног лежаја као пример, израчунати резултати показују да, у поређењу са другим утицајним факторима, коэффициент трења, оптерећење, температура и брзина ротације имају већи утицај на момент трења лежаја.

Marinković [34] је представио структурну оптимизацију радијалних порозних клизних лежаја која су сложено оптерећени. Ова структурна анализа је урађена за свако од наведених оптерећења појединачно, као и за сложено оптерећење ових лежаја. Анализа је обављена методом коначних елемената (МКЕ) у модулу за структурну анализу софтвера CATIAV5R11. У другом делу рада дата је параметарска оптимизација порозног клизног лежаја, узимајући у обзир еластичне деформације чауре лежаја на основу резултата МКЕ анализе.

Једначине коначних елемената развио је и Kennedy [35] за проучавање површинске температуре које произилазе из генерисања топлоте услед трења у клизним системима. Ове једначине укључују утицај брзине покретних делова. Програм се користи за проучавање површинске температуре у два различита клизна система: сувим или граничним подмазаним клизним лежајевима. Користећи програм постигнути су добри резултати у поређењу аналитичких предвиђања и експерименталних мерења температуре. Програм је коришћен за проучавање утицаја различитих параметара материјала на површинске температуре у два клизна система.

Коришћењем методе коначних елемената Starostin [36] је анализирао температуре услед трења у подмазаним или обложеним лежајима. Анализа је урађена за различите материјале чауре, за танке, тврде, отпоране на хабање обложене лежајеве, различитих геометрија и граничних услова. Анализе показују да топлотна проводљивост облога или материјал за облагање је највиталнији термални параметар који контролише температуру.

Поред варијације дизајна, близина извора хлађења је од пресудног значаја за регулацију температуре у систему.

Трењем чврстих тела ослобађа се топлота. Температура лежаја је показатељ који указује на присуство неподвижених спољњих извора топлоте, односно оштећење лежаја, подмазаност лежаја, адекватност оптерећења, броја обртаја, брзину клизања и др. Ослобођена топлота може загрејати неко мазиво до температуре паљења. Да се то не би догодило, топлотни процес је симулиран у обичном лежају узимајући у обзир кретање вратила. Аутори Starostin [37], [38], [39], [40], [41], Vasilieva [42], Kondakov [43] и Tilmann [44] развили су алгоритам који се показао ефикасним за термалну дијагностику услед трења.

Термичка анализа је један од важнијих параметара у дијагностици отказа клизних лежајева. Загревање лежаја најчешће је узроковано бројем обртаја, оптерећењем лежаја и трењем у лежају. Осим наведених параметара, отказ система хлађења и спољњи извори топлоте лежаја такође узрокују загревање лежаја. Војић [45] и Radila [46] су помоћу термопарова мерили температуру лежаја и дошли до закључка да највећи утицај на повећање температуре имају пораст броја обртаја вратила и радијалног оптерећења на клизни лежај. Изненађујуће је било то што се максималне температуре нису десиле на ивици лежаја где се очекивала минимална дебљина филма већ у средини лежишта.

Хабање клизних лежаја представља процес непожељног постепеног прогресивног губитка материјала постелице када на њега механички дејствује друго тело(вратило), које се јавља као резултат трења. Величина хабања је одређена следећим параметрима: карактером кретања(клизањем), оптерећењем (статичким и динамичким), величином притиска између контактних површина, брзином узајамног кретања додирних површина, брзином осциловања, начином довода, количином и квалитетом мазива. Vonny [47] циљ је био да испита утицај параметара нормалне контактне силе, брзине осциловања и удаљености клизања на триболошке карактеристике. Тестови су изведени под условима подмазивања. Значајно повећање хабања је виђено као повећано оптерећење. Дошло се до закључка да се са повећањем брзине осциловања повећа и коефицијент трења и ниво хабања. Janjarasjitt [48].

Anderson [49] је показао да трење, подмазивање, и хабање имају јак утицај на перформансе и понашање механичких система. Овај рад се бави различитим моделима

трења за клизне контакте који раде под различитим условима. Модели су погодно представљени за различите ситуације, у зависности од типа контакта. Prasad-ова [50] истраживања се односе на утицај неких параметара испитивања као што су примењена оптерећења и клизна брзина. Истражена су својства брзине хабања, температура трења и коефицијент трења у сувим и уљем подмазаним условима. Дискутована је одговорност пробе хабања у погледу специфичних карактеристика као што су оптерећења, подмазивање и тенденција пуцања различитих микросастојака од ливеног гвожђа. Такође је спроведено испитивање хабања површина, подповршинске области и остатака честица да би се разумели оперативни механизми хабања.

Patel [51] је истраживао перформансе храпавог порозног клизног лежаја са две паралелне стране коришћењем магнетног флуида као подмазивача и одређеном брзином клизања. Одговарајућа Рејнолдсова једначина је стохастички усредњена у односу на случајни параметер храпавости који карактерише храпавост. Са гледишта погодних граничних услова ова једначина је решена да би се добио распоред притисака који долази из рачунања носивости. Поред тога, трење на клизачу је такође рачунато. Израчунати резултати су представљени графички и указују на то да магнетни флуидни подмазивач побољшава перформансе носећег система. Негативно закошена храпавост даље повећава ионако увећану носивост због магнетизације. Овај ефекат постаје израженији када је укључена варијанса. Мада, порозност, брзина клизања и стандардна девијација смањују носивост, овај негативан ефекат може бити минимизован магнетним флуидом као подмазивачем у случају негативно закошених неравнина. Поред тога, трење остаје непромењено.

Kawakame [52] је користећи апарат pin-on-disc истраживао отпорност на хабање полимера и полимера са адитивима, разматране су променљиве: нормално оптерећење, брзина и релативна влажност ваздуха у тестовима хабања. Различити полимерни материјали садрже чврста мазива унутар своје микроструктуре. Испитиване су самоподмазујуће карактеристике композита PTFE + графит. Закључак о отпорности на хабање полимера и композита је његова велика зависност животне средине (релативне влажности) и нормалног оптерећења. Варијације уочене у релативној влажности ваздуха од 50 до 70%, могу дуплирати изгубљени волумен хабања и, сходно томе, да удвоструче стопу хабања.

У раду клизних лежајева присутно је трење полуоквашених површина или полутечно трење управо због нетачности обраде рукавца вратила и постелице, неправилно решених канала за подмазивање, због појава променљивих или великих оптерећења. Yuan [53] је на основу кратког прегледа истраживања који се односе на обрасце микро-канала за триболошке сврхе, урадио експерименте који су намењени за проучавање ефеката оријентације жљебова на перформансе трења. Експериментални подаци указују на то да вертикални или паралелни жљебови са клизним правцем имају снажан утицај на перформансе трења клизних површина, а добра особина нормалне или паралелне оријентације може да замени контакт под различитим условима.

Guida [54] је испитивао параметре сувог трења на контролном систему колица-клатно. Коришћен је геометријски приступ за анализу утицаја трења на лежај. Закључк је да су односи који омогућавају да се процени како параметри трења лежајева утичу на перформансе контролног система колица-клатно.

Filipović [55] је показао да смањење вискозности уља у лежају утиче директно на смањење минимално потребне дебљине уљног филма и смањење отпора кретања рукавца у лежају, али само до једне границе. После тога долази до повећања удела мешовитог трења, присутности неравнина на лежајном склопу и деформација склопа, што исто тако води ка значајном повећању механичких губитака. Због тога је важно извршити избор уља за подмазивање, чија карактеристика вискозности има што мање промене у подручју радне температуре у мотору, уз одговарајуће вредности вискозности.

Како је трење данас неизоставни део сваког процеса па и клизних лежајева, било би корисно имати уређај који би мерио трење између појединих материјала. Управо такав уређај је трибометар. Он мери трење између два материјала у различитим динамичким ситуацијама где се може мењати температура испитивања, нормална сила на подлогу, релативна брзина између узорака, односно могу се мењати сви параметри који утичу на трење у стварном процесу. Ozcaras-ови [56] тестови хабања лежајева вршени су коришћењем нове машине. На машини су тестирана понашања три врсте узорака . То су биле бронзе на бази калаја и олова RB-1 , RB-7 RB-4. Тестови хабања вршени су под оптерећењем од 10, 20 и 40 N и клизним брзинама 0,5 m/s користећи узорак у облику прстена. По завршетку тестова мерени су , тежине узорака, израчунати су вредности коефицијенти трења, рађена су оптичка и SEM испитивања и на крају хабања

окарактерисана је конвенционална легура која ће се користити користити за клизни лежај. Savaskan [57] је тестирао трење и хабање легуре AL-25Zn-3Cu-3Si на трибометру променом притиска и брзине клизања. Видео је да се коефицијент трења легуре повећава се са клизном брзином, али се смањује са повећањем притиска до 1,5 MPa, изнад које је смер обрнут. Ипак, температуре и обим хабања легуре се константно повећавао са повећањем притиска и брзине клизања. Pawlak [58] је на експерименталним студијама порозности само-подмазујућих клизних лежајева са шестостраним Бор нитридом (X-BN) као адитивом измерио коефицијенте трења праха матрице (X-BN, + уље), при променљивим оптерећењима од 1.05-2.0 MPa и клизним брзинама од 1.35 и 2.5 m /s. Утврђено је да се додавањем микро-честице уља смањује коефицијент трења око два пута у односу на самоподмазујуће лежајеве који су подмазани само уљем.

Дуг радни век, висок учинак и триболошко понашање подмазаних клизних лежајева су у блиској вези са одабраним конструкцијским и триболошких параметрима. Главни циљ процеса конструисања је да развије клизни лежај, који ће бити у стању да испуни одређену спецификацију перформанси, у оквиру којих су и триболошки параметри. Наука још увек није пронашла директан начин да се то уради. У поређењу са пројектовањем других машинских елемената, поступак пројектовања и прорачуна подмазаних клизних лежајева је необичан и по томе што теорија не може директно бити примењена у циљу добијања најоптималнијег решења када је у питању њихова конструкција. При ремонту опреме, која има клизне лежајеве неопходно је детаљно снимити обим оштећења трибоелемената уређаја који се ремонтују и добро проучити режиме рада. Нинковић [59] је обратио пажњу на избор зазора лежаја, начин подмазивања поготово могућност нестанка мазива, дебљине зида лежаја, размотрио проблем прилагодљивости и способности апсорпције нечистоћа као и аспект корозије, извршио процену температурског режима рада лежаја на бази брзине клизања и притиска, а затим проверио способности ношења и отпорности на хабање изабраног материјала. Рас [60] је покушао да дефинише смернице за избор одређених параметара подмазани клизних лежајева и да укаже на њихов значај, пре свега, са становишта триболошких карактеристика.

Поузданост представља вероватноћу да ће систем успешно обавити задату функцију, без отказа. Отказ или квар је престанак способности елемента да обавља своју

функцију. Најчешћи узрочници оштећења и отказа су хабање, пластична деформација и лом. Пластична деформација и лом су оштећења у функцији чврстоће, док је хабање најчешћа појавна манифестација код клизних лежаја. Док је Kim [61] показао ефекат могућих оштећења лежаја током сеизмичке побуде који се испитује кроз испитивање динамичког понашања једноставног прелаза ослонца моста. Правилни аналитички модели су развијени, што може да симулира реално сеизмичко понашање моста пре и после оштећења лежаја. Оштећени лежајеви су моделован као клизни елеменат са одговарајућим трењем између надградње и врха пристаништа. Разне вредности коефицијената трења испитивале се се провером ефекта оштећених лежајева у оквиру широког спектра убрзања земљине теже. Установљено је да глобална сеизмичка понашања моста значајно утичу на појаву оштећења лежаја. Оштећења лежајева треба да буду укључена за постизање рационалне сеизмичке процене безбедности . Циљеви Рас-овог [62] истраживања били су да се предложи методологија праћења стања и поступак дијагностике оштећења и отказа клизних лежаја. Senatore [63] је представио могућност коришћења неуронских мрежа за анализу развоја коефицијент трења у случају клизних лежајева. Истраживано је неколико неметалних лежајних материјала, са водом и емулзијом као лубриканима. Резултати показују да се неуронске мреже могу успешно користити за предвиђање коефицијента трења од развоја током одржавања лежаја. На овај начин радни век лежаја може се предвидети са већом тачношћу, што доводи до превенције кvara механичких система .

Žeželj [64] је симулирао критичне случајеве за различите комбинације материјала и мазива. Истраживање је вршено моделно на прилагођеном Timken - уређају па су добијени резултати успоређени са реално динамички оптерећеним лежајем. Подаци за номинално оптерећење показали су доста добро поклапање, док су за највећи момент трења знатно већи код реалног лежаја. Оваква се разлика тумачи као последица различитих услова подмазивања код моделног и реалног испитивања. Дијаграм промене момента трења за исту комбинацију материјала и мазива је квалитативно сличан потврђујући иницијалне претпоставке за моделно испитивање.

Ling and Saibel [65] су извели студију отказа лежајева услед термалног оштећења клизних површина у контакту. Оштећења су предвидели да се догоде када клизна површина достигне рекристализациону температуру метала. Критеријум отказа је изражен као функција површинске брзине, оптерећења и времена.

Gecim и Winer [66] су урадили термичку анализу ротирајућег цилиндра изложеног грејању на одређеној површини, док је остатак површине подвргнут хлађењу. Парцијалне диференцијалне једначине и гранични услови су решени коришћењем коначних Fourier - ових трансформација. Слична анализа је изведена од стране Patula [67].

Bishop и Etlles [68] су анализирали термоеластичну интеракцију вратила у пластичној чаури. Топлота трења је израчуната као производ коефицијента трења, контактеног притиска и брзине клизања. У тој студији, сматрало се да се вратило проширило радијално према споља услед пораста температуре. Ширење чауре је занемарено, јер пораст температуре није знатан. Bishop и Etlles сматра да пораст температуре зависи пре свега од оптерећења, брзине. Ulysee and Khonsari [69] су дали опште услове прелаза топлоте и хлађења код цилиндра. Они су добили аналитички израз решења стабилног стања, коришћењем Fourier -ова трансформација методе.

Dufrane and Kannel [70] су извели студију термоеластичне интеракције вратила са лежајем. Лежајеви које су били ван погона релативно дуго су посебно осетљиви због недостатка адекватне количине мазива у контакт зони. Рад лежаја је од нарочите важности и нађено је да ће се брзо десити пратеће смањење оперативног . Dufrane and Kannel су обавили низ експеримената како би утврдили ефекат сувог трења који је довео до оштећења. Експериментални резултати су показали да обично у року од 30 секунди долази до оштећења на већини вратила лежајева уколико раде у сувим условима. Једнодимензионалне термална и термоеластична анализа је изведена како би се проценило време конвулзија као функције оперативних параметара. Линеарни аналитички израз је изведен у вези услова рада лежајева и времена. Ова линеарна једначина важи само за врло кратко време прелазних. Иако је дало добре резултате који су одговарали експерименту, то је нешто рестриктивно и није прецизно понашање система.

Khonsari and Kim [71], су били инспирисани обављеним послом од стране Dufrane and Kannel, су урадили анализу 2-D а коначних елемената за проучавање термоеластичног понашања вратила лежајева. Они су развили два модела, један са усклађеним вратилом и лежајем и други са аксијалним одступањем. Фактор расподеле топлоте је израчунат на основу односа површина контакта вратила и лежаја. Резултати су показали да конвулзије имају тенденцију "поравњања" са повећањем времена. Овај нелинеарни израз пажљиво бележи физику смањења зазора са временом.

Hazlett and Khonsari [72,73] су наставили истраживања како би стекли додатно разумевање понашања вратила изложеног вибрацији. Они су развили термомеханички модел помоћу коначних елемената у софтверском пакету ANSYS. Термичка анализа је прво урађена за проучавање ефекта грејања трењем на контактної површини чауре и читавој површини вратила. Резултати термичке анализе су послужили као топлотна оптерећења за решавање термоеластичног модела. Оперативни зазор је моделиран за контакт елемената коришћењем елемента библиотеке ANSYS. Ови елементи ступају на снагу само ако постоји контакт између вратила и лежаја.

Положај ових елемената се користи да би се пронашле варијације зазора и контактних сила током времена. Момент трења је представљен као основа за конвулзије. Када трење премаши граничну вредност, претпоставља се да ће лежај вибрирати. На основу резултата термомеханичком анализе, Hazlett and Khonsari су утврдили да је оштећење вратила у лежају нелинеарно са временом.

Wang, Congy, Cusano [74,75] су урадили термичку анализу која је слична поступку анализе извођења Hazlett and Khonsari. Расподела топлоте између вратила и лежаја је урађена итеративно поређењем површинске температуре радијалних и акисијалних модела. Овај модел топлотне поделе је утврђен како би се подударао са резултатима делова метода које су користили Hazlett and Khonsari. Зрачење је такође узето у обзир у термичкој анализи. Када су зазори су ниски (0,05 мм - 0,5 мм), отказ настаје због вибрације осовине у лежаја.

У скорије време, Wang [76] извршио преглед објављених резултата на (TIS). У подмазаним осовинама лежајева, пронађено је да је смањење уља директан узрок вибрације. Смањење уља доводи до пораста температуре у подручју контактних тачака које су изазвале појаву вибрација. Други фактори који утичу на процес вибрација су квалитет површине и хемијског састава, храпавост површине и микроструктура осовине и чауре. Термички индуковане вибрације (TIS) могу да се јаве у околностима у којима постоји поремећај у стабилном раду осовине лежаја.

Lacey and Kawamura [77] извео студију о ефектима поремећаја протока мазива у ваздухопловним гаснотурбинским лежајевима. Ови лежајеви су дужни да раде са мало или без уља под тешким условима рада, као што су они наишли током лета полетања, слетања и изненадног маневрисања. Прекид протока уља обично траје 15 до 30 секунди. Лежајеви

авиона мотора не траже само да раде под тим условима рада, већ и да настави нормалан рад када се ток мазива поново успостави. Иако је ова студија урађена да се побољшају перформансе котрљајућих лежајева у авионским моторима, то је конструкторима дало инспирацију да развију и ураде сличну студију на клизним лежајевима.

Наиме аутори су били инспирисали за проучавање ефеката поремећаја протока у осовини лежајева који настају услед блокаде, загађивача ваздуха. Термички индукована вибрација није појава ограничена на лежајеве који раде под сувим или граница подмазују условима. Такође може се појавити и у лежајевима који раде у потпуно подмазиван стању. Овај феномен су разматрали Pascovici, Khonsari and Jang [78]

Jang, Khonsari and Pascovici [79] су вршили свеобухватну анализу и експерименталну студију о термодинамичким (TRD) вибрацијама у осовини лежајева. Осовина је направљена од полиамида и лежај је направљен од стакла ојачано епоксидном смолом. Теоријска анализа TRD је урађена да би се одредио топлотни утицај на подмазивање. Термичко ширење осовине и њеног прекорачења у чаури је одређено употребом стандардне 2-D једначине кондукције топлоте.

На основу датог прегледа истраживања у области клизних лежајева, неминовно се намеће потреба да се детаљније анализирају клизни лежаји са графитом, као средством за подмазивање. Резултати и анализе кључних параметара код поменутих клизних лежаја, до којих ће се доћи у овој докторској дисертацији, треба да доведу до стварања подлоге за даља научна истраживања у овој области.

3. СТУДИЈА И АНАЛИЗА ПОСТОЈЕЋИХ КОНСТРУКЦИЈСКИХ РЕШЕЊА РАДИЈАЛНИХ КЛИЗНИХ ЛЕЖАЈА СА ГРАФИТОМ

У току процеса конструисања машина није могуће избећи елементе који се додирују и крећу, а један од најчешће коришћених елемената су клизни лежаји. Како би се извршио правилан избор и обезбедили најбољи услови рада, неопходно је познавати предности и недостатке присутне код овог типа лежаја. Клизни лежаји имају веома сложен прорачун и одступање стварних вредности од прорачунских, што додатно отежава избор и саму конструкцију лежаја. Код клизних лежаја није могуће одредити једноставна мерила за њихов прорачун и промена било ког параметра лежаја може битно да измени услове његовог рада.

Конструкција клизног лежаја зависи највише од конструктора и због тога се од њега тражи познавање теорије подмазивања чврстим мазивима. Услед непрекидног раста трошкова одржавања, даје се све већи значај примени самоподмазујућих клизних лежаја. Пратећи тај тренд неопходно је развијати клизне елементе без одржавања. Како би конструктор дошао до оптималног решења при конструисању користи се следећим смерницама:

- Избор носећег материјала од кога ће бити изливена чаура (бронза) у зависности од намене клизног лежаја. Одређивање поступка ливења чауре (ливена у песку, у кокили, центрифугално ливена, непрекидно (континентално) ливена у зависности од намене клизног лежаја).
- Избор чврстог средства за подмазивање - графита
- Избор тачности димензија и облика лежаја
- Прорачун самоподмазујућег радијалног лежаја

3.1. Избор носећег материјала лежаја

Избор материјала за израду клизног лежаја зависи од режима експлоатације и то од: специфичног притиска и величине и карактера брзине клизања. Приликом доношења одлуке о избору материјала посебно се води рачуна о прорачуну конструкције лежаја,

увећању зазора, о искошењима која се јављају при експлоатацији и монтажи, а посебан акценат се ставља на начин довођења мазива. Сам избор материјала за лежај зависи од својстава материјала рукавца, квалитетом обраде радног рукавца, врстом његове термичке обраде. Често се догађа да је израда, ремонт и монтажа вратила скупље него израда и ремонт делова склопа лежаја и њихова монтажа и демонтажа, тада избор материјала делова радних парова мора обезбедити дужи радни век вратила у поређењу са лежајем. Материјали за лежајеве морају испунити следеће захтеве:

- мали коефицијент трења при раду са вратилима од челика, термички необрађеним и обрађеним;
- могућност одвођења топлоте
- стабилност физичко-механичких особина при загревању за време рада; стабилност димензија при монтажи, подешавању, пресовању и експлоатацији у различитим срединама
- висока отпорност на хабање лежишта а с њим и спрегнутог вратила при различитим брзинама клизања и специфичним притисцима;
- велика отпорност при различитим по величини и правцу статичких, динамичких и цикличких оптерећења;
- отпорност на ударе при експлоатацији и монтажи, као и могућност пригушења вибрација;
- способност рада без подмазивања - самоподмазивање
- отпорност на корозију
- способност да не варнички за време рада,
- да има добра технолошка својства, мисли се на обрадивост резањем, а код делова лежишта добијених ливењем, ниску температуру топљења, високу тачност, мало скупљање,
- цена.

Захтеви који се постављају пред материјале за клизне лежајеве су комплексни и многобројни, тако да ниједан од коришћених материјала не одговара у потпуности на

захтеве који се постављају. У сваком случају избор материјала је једно компромисно решење конструктора пред захтевима и могућностима.

Рађена су бројна истраживања материјала и са аспекта применљивости идеалан материјал би требао да буде лак, жилав, јак, а уз наведене особине постоји и тежња да цена материјала буде што је могуће нижа. Поједини метали и њихове легуре су близу испуњења свих ових захтева, али не у потпуности. Решење овог проблема и постизање најбољег материјала, било би да се комбинују два материјала са комплементарним особинама. Овакав композитни материјал би требао да има комбиноване предности од којих је састављен. *Композитни материјали* састоје се од два или више различитих материјала, који су чврсто међусобно повезани. Овакви материјали попримају својства материјала другачија од њихових појединих компоненти. Они омогућавају флексибилност у дизајну, лаку израду делова сложене геометрије, лаки су, отпорни на удар, отпорни на замор услед коришћења и имају добру хемијску отпорност. Класификација композита може се вршити према различитим критеријумима: према врсти матрице, врсти и облику ојачавајуће фазе, према расподели конституената и на крају према функцији. Постоје бројне поделе композитних материјала, а најчешћа класификација композитних материјала је према облику ојачавајуће фазе:

- композити са честицама уграђеним у матрице имају најдужу примену, због тога што се добијају на најједноставнији начин и представљају најчешће случајан распоред честица неких материјала распоређених унутар основног материјала матрице.
- влакнима ојачани композити, (где влакна могу бити кратка или непрекидна). Ови композити се састоје од веома јаких влакана која су убачена у матрицу од слабијег материјала.
- слојевити композити - ламинати који се састоје од више слојева истих или различитих материјала. Основни циљ код ових композита је да се комбинацијом особина слојева добије материјал са жељеним механичким особинама.

Механичке и хемијске особине композита добијају се из три извора: матрице, ојачања и матрица - влакно међуспоја. У експлоатацијским условима, карактеристике

композита нису само у функцији процеса и материјала, већ на њих утичу радни услови. Посебно су значајни за делове који су у некој врсти трибомеханичких система, чије је функционисање повезано са релативним кретањем елемената у контакту од којих су најпознатија самоподмазујућа клизна лежишта.

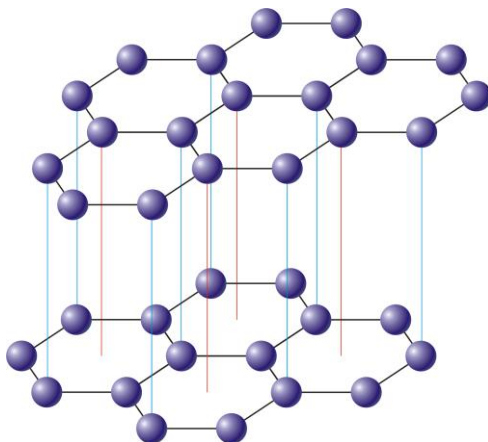
У овој дисертацији истраживања ће бити усмерена на радијални самоподмазујући клизни лежај, који се састоји од чауре израђене од калајне бронзе ($CuSn 12$) и чврстог средства за подмазивање (ламела графита).

3.1.1. Калајна бронза

Калајна бронза представља легуру бакра и калаја, код којих највећи садржај калаја не иде преко 20%. Због изузетне отпорности према корозији, високе тврдоће и чврстоће, као и велике отпорности према хабању, калајне бронзе налазе примену у машиноградњи. Калај у легури калајне бронзе утиче на повећање њене чврстоће и истовремено опадање пластичности. С' обзиром на основну технолошку намену калајне бронзе се деле на бронзе за ливење и бронзе за обраду деформацијом. Бронзе за ливење имају својство доброг испуњавања калупа, али су уједно веома отпорне према хабању и корозији што их чини посебно погодним за израду клизних лежаја. Може се рећи да је код калајне бронзе остварена погодна комбинација добре корозионе отпорности, обрадивости и механичких својстава. Калајне бронзе за ливење имају у свом саставу додаток фосфора, који има улогу дезоксидатора ради одстрањивања врло кртих укључака облика оксида калаја SnO . Да би се побољшала својстава калајне бронзе се термички обрађују путем хомогенизационог жарења ради отклањања унутрашњих напона. Ова легура се одликује добром ливкошћу и малим скупљањем које износи $<1\%$. Највећа затезна чврстоћа је за калајну бронзу са око 12% калаја. Код самоподмазујућег клизног лежаја чаура се лије у ливници, поступком непрекидног ливења при коме се калајна бронза непрекидно и равномерно улива из лонца у метални калуп који је са једне стране хлађен водом. Калајна бронза се у облику очврслог металног производа извлачи са друге стране калупа. Коришћењем овог поступка постиже се велика уштеда материјала и времена. Одливак од калајне бронзе се обрађује технологијом обраде резањем, где се врши финализација одливака, а као финални производи излазе лежајне чауре. Коџовски [80].

3.1.2. Избор чврстог средства за подмазивање - графита

Графит има структуру која је најприближнија идеалној хексагоналној решетки и имају слободне валенце којима се вежу на слободне валенце метала, приказано на (слици 3).



Слика 3. Хексагонална решетка графита, Generalic [81].

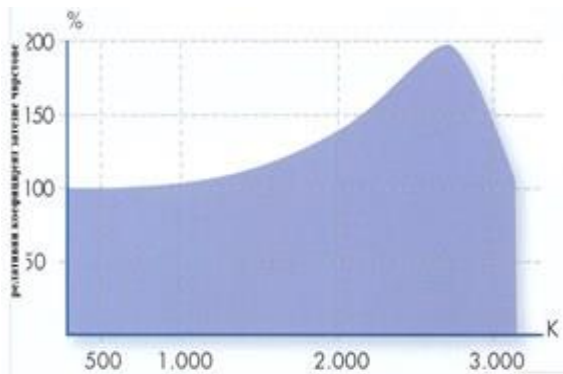
Неке од карактеристика мазива дате су у табели 1.

Табела 1. Карактеристике мазива

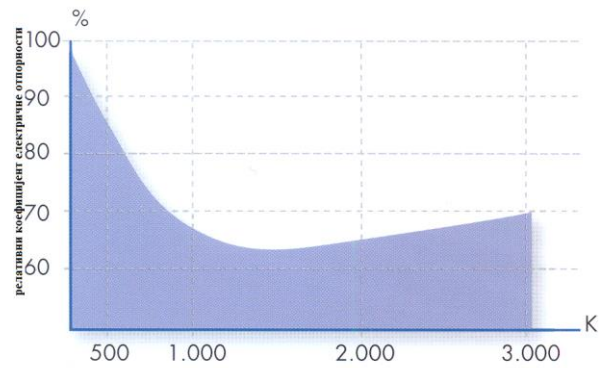
Карактеристика	MoS ₂	Графит	PTFE
Адхезија	Добра	Средња	Ниска
Тврдоћа	Мала	Мала	Мала
Највећа радна температура,	300	600	260
Заштита од корозије	Средња	Добра	Добра
Хемијска стабилност	Добра	Врло добра	Врло добра
Подмазивање у вакуму	Врло добро	Слабо	Добра
Отпорност на радијацију	Добра	Добра	Слаба
Коефицијент трења	0,03-0,1	0,1	0,1-0,2
Ефикасност подмазивања при великом оптерећњу	Врло добра	Добра	Слаба
Ефикасност подмазивања при малом оптерећњу	Добра	Добра	Изванредна
Боја	Црна	Црна	Безбојно/бела
Густина	4,8	2,2	2,2
Оксидационо/деградациони продукти	MO ₂ SO ₂	CO ₂ CO ₂	C ₂ F ₄
Кристална структура	Хексагонална	Хексагонална	Делимично кристала, молекули ланчани полимери

Графит је густине од 2,1 - 2,3 gr /cm³, црне боје, сјајан, мек, проводи електрицитет и одликује се својством анизотропије . Атоми унутар слојева графита међусобно су везани јаким ковалентним везама, али су сами слојеви повезани slabим Ван дер Валсовим везама, што им омогућава да слојеви могу лако "клизити" један преко другог, тако да се графит отире Lide [82], Budavari [83].

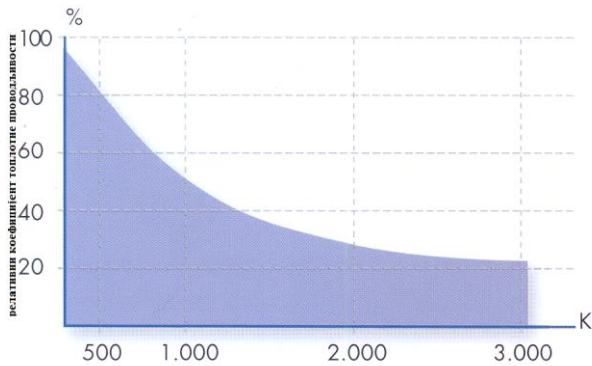
Због своје структуре имају велику моћ адхезије. Синтетички графит се добија од петрол кокса. За разлику од природног љуспастог графита, индустријски графит се састоји од великог броја малих кристала који су усмерени у свим правцима у простору, па им се правац слојева не може одредити, због тога што је код сваког кристала тај правац различит. Облик и величина честица графита битно утичу на особине композита. Ако су финије честице графита, већа површина честица ће се обложити везивом што ће утицати на повећање чврстоће композита. Неке карактеристика графита Katalog Graphite Specialties [84] приказане су на (сликама 4-8).



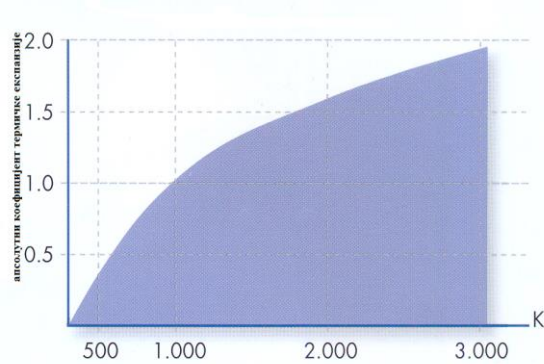
Слика 4. Механичка чврстоћа графита SGL



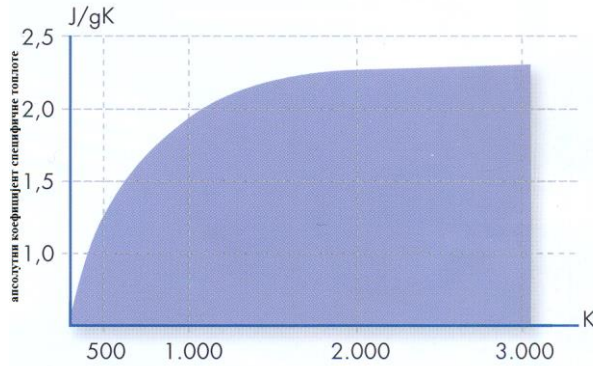
Слика 5. Електрична отпорност графита SGL



Слика 6. Топлотна проводљивост графита SGL



Слика 7. Топлотно ширење графита SGL



Слика 8. Специфична топлота графита SGL

Термичке особине графита су врло значајне код коришћења графита на високим температурама. Топлотно ширење графита је веће управно на слојеве. **Електрична проводљивост** графита се заснива на структури графита и електронским везама унутар хексагоналне решетке. Од кристалне уређености и присутних дефеката у структури зависи електрична проводљивост графита. Ако су у структури синтетичког графита присутне велике шупљине, смањује се густина, која директно утиче на електричну проводљивост. **Компресија графита** - Природни кристални графит указује на много веће сабијање у односу на синтетички графит, што је последица зависности сабијања од кристалне решетке. После пресовања, услед специфичне слојевите структуре графита, отпресак показује еластично ширење у правцу пресовања, а знатно веће управно на правац пресовања због чега се повећава порозност.

У композитним материјалима са ојачавајућом фазом у облику честица, носећи конституент је матрица која повезује, прашкасти материјал, па се због тога зове и везиво. Везивни материјали могу се сврстати у два основна типа: термореактивне и термопластичне. Код **термопластичних полимера** поступак загревања и хлађења, може се понављати више пута, што омогућава лако обликовање и накнадну поправку композита. Композити са термопластичном матрицом имају већу жилавост и отпорност на удар. Термопластични полимери су скупљи од термореактивних полимера и имају ниже механичке особине и подложни су дејству влаге што у великој мери утиче на промену димензија и особина композита. Представници термопластичних везива су полиамид, полиетаретаркетон, полибутилентерефталат, полиетилен. **Термореактивни** полимери се користе у производњи композита као везивни материјали. Представници

термореактивних полимера међу којима је и фенолформалдехидна смола, која се користила код графитних ламела, дати су у табели 2.

Табела 2. Основне врсте полимерних материјала за лежаје

	Термопласти	Термореактивне смоле
Врста и назив материјала	Полиетилен Полиацетали Полиамиди PTFE Полиамиди	Епокси Полиестри Феноли Силикони Полиамиди
Пуниоци и ојачивачи	За побољшање механичких својстава: Стаклена вуна, азбест, текстилна влакна, графит За смањење трења: Молибдендисулфид, птфе, фрафит За повећање топлотне проводљивости: Бронза, угљеник/графит	

Високозност, способност адхезије са пуниоцем, температура потпуног умрежавања, скупљање за време умрежавања, садржај испарљивих материја термичком третману су основне карактеристике свих полимера, које се користе као везивни материјал. Карактеристика почетног очвршћавања смоле је главна карактеристика фенолформалдехидних смола значајна за процес производње композита. На одређеној температури смола прелази у тестато стање, а касније у гумирано стање. Везиво не сме потпуно очврснути, да би се постигло потпуно и хомогено облагање честица, али мора имати довољну пластичност како би се пресовао до захтеваних облика високих густина. У композитима ојачаних честицама (графитним ламелама) као везивни материјал користи се фенолформалдехидна смола. Фенолформалдехидне смоле се одликују постојаношћу на влагу, имају добре механичке особине у композиту, незапаљиве су и термостабилне до 200°C, Jau Lee [85], Lin [86].

3.2. Избор тачности димензија лежаја

Захтевани склоп, који дефинише величину зазора између пречника рукавца вратила и пречника отвора чауре лежаја, битно утиче на радни век лежаја. Уколико је постављен већи захтев за тачношћу склопа утолико и величина зазора мора бити мања. Дебљина зида чауре, услови подмазивања, тачност њихове монтаже, такође утичу на величину зазора. У склопу лежаја пожељни су увећани зазори када на радне површине лежаја продиру нечистоће, па се тако могу избећи потешкоће у раду лежаја. Смањење зазора за време рада некад се доводи у везу с тим, што масивно кућиште спречава ширење чауре лежаја које је

постављено у њему, што има за последицу да се при повећању запремине чауре од температурног ширења, њен унутрашњи пречник смањује.

При већим дужинама додира лежаја и вратила одступање од саосности, искошења и нетачност монтаже брже изазивају деформацију вратила а тиме и брже хабање оба дела, него при малим дужинама. Због тога је у тим случајевима такође неопходно увећати зазор. Прашина и абразивне честице, које у процесу рада доспевају на радне површине, при малом зазору могу изазвати заривавање, услед чега радни зазор лежаја мора бити увећан. Довољно подмазивање радних површина при циркулацији, због којих се зазори неопходно повећавају, може смањити разлику у ширењу оба елемента. Неопходно увећање зазора у циљу компензације нетачности монтаже условљено је тиме што се при малим зазорима вратило које је постављено у делимично нетачно монтираном лежају, деформише и као резултат тога имамо повећано хабање радних површина лежаја и рукавца што може довести и до лома вратила. Да би подмазивање било правилно мора постојати одређен зазор између рукавца и лежаја (постељице) и одређен релативни зазор. Препоручују се толеранције налегања H/d , H/e , H/f и H/g .

3.3. Прорачун самоподмазујућег радијалног лежаја

Познато је да су број обртаја односно обимна брзина и оптерећење, величине које у многоме утичу на конструкцију лежаја. Како би се одредиле вредности pv , све величине ће се приказати табеларно, табела 3.

Табела 3. Одређивање pv вредности

Карактеристичне величине лежаја	Димензије
A (површина) $l \cdot d$ (дужина · пречник)	m^2
p (притисак) F/A (сила/површина)	N/m^2
v (брзина) $u \cdot dn$ (пречник · број обртаја)	m/s
$p \cdot v_{iz}$ $p \cdot v$ (притисак · брзина)	$Pa \cdot m/s$

Где мора бити задовољен услов да је:

$$pv_{iz} < pv_{doz}, \quad (2)$$

Температура површине лежаја због по правилу, слабе топлотне проводљивости полимерних материјала је друга величина на коју се мора обратити пажња при

конструкцији. У општем случају та температура је одређена: температуром околине T_0 , порастом температуре ΔT и тренутном температуром на сваком појединачном месту додира неравнина спрегнутих површина T_1 . Данас се усваја да се температура на површини лежаја може са довољном тачношћу одредити коришћењем следећег израза.

$$T = T_0 + \Delta T, \quad (3)$$

Пораст температуре ΔT је пропорционалан генерисаној топлоти

$$\Delta T = C \cdot \mu \cdot p \cdot v, \quad (4)$$

где је: C – константа за сваки склоп лежишта и представља целокупну термичку отпорност дисипацији топлоте са површине. Константа се одређује експериментално и приближне вредности које се препоручују у литератури могу бити у границама од $0.8 \cdot 10^{-3}$ до $1.6 \cdot 10^{-3}$, $^{\circ}\text{Cms/N}$.

Искуство показује да ће при одговарајућем избору pv вредности за неки материјал и температура бити у дозвољеним границама. Површине клизних лежаја које су приликом кретања у међусобном контакту, са временом мењају и своја својства (геометрија, величина и својства површинских слојева). Величина промена зависи од: материјала елемената који су у контакту, услова оптерећења, конструкције, утицаја околине итд. Хабање клизних лежаја представља прогресивни процес губитка материјала елемената лежаја који су у непосредном контакту и налазе се у релативном кретању. Величина хабања првенствено је одређена: притиском између контактних површина, температурним условима, оптерећењем, клизањем, и др. Клизни лежај се сматра неисправним: када постане нефункционалан, када је још функционалан, али није способан да обави своју функцију и када услед оштећења постане непоуздан за даљу употребу. Како не би дошло до оваквих нежељених појава, при процесу конструисања мора се узети у обзир интензитет хабања. Интензитет хабања се израчунава на основу обрасца:

$$I_h = K \cdot pv, [m/s] \quad (5)$$

Како је то велика јединица користе се $[mm/1000]$ часова рада.

K - представља фактор хабања.

Ова величина се утврђује експериментално за посматрани материјал и индицира осетљивост материјала на хабање. Вредности величина K је стална за поједине врсте материјала у области дозвољених p и v и као таква дата је у табели 4, IMP [87].

Табела 4. Приближне вредности фактора хабања K

Врста материјала	Вредност фактора $K \times 10^{-5}, \frac{m^2}{N}$
PTFE	60
PTFE са пуниоцем	0,08—0,2
PTFE са пуниоцем/ метална основа	0,03-0,08
Полиамид	1,9
Полиамид са графитом	0,4—0,6

Укупно радијално хабање, може се израчунати на основу израчунате вредности интензитета хабања и жељеног радног века и мора бити мање од дозвољеног. Ако се унапред пропише дозвољена вредност хабања, из дате једначине може се одредити радни век:

$$L_h = \frac{1}{3600} \cdot \frac{h}{Kpv}, \quad (6)$$

где је:

h — вредност линеарног хабања,

L_h — радни век, час.

pv вредности се мењају, за повишене температуре и повремени рад. pv вредност опада са порастом температуре околине, док при повременим раду лежишта, дозвољена pv вредност расте у зависности од учестаности рада. Само за константну вредност фактора хабања K , величина хабања показује линеарну зависност од pv вредности, тојест само у случајевима када се природа хабања не мења током рада. Основне врсте хабања које се јављају код самоподмазујућих лежишта атхезионо и абразивно хабање. Да би се повећала отпорност на хабање, рукавце вратила треба хромирати, уколико је рад лежаја у корозивној средини, рукавци вратила се израђују од нерђајућег челика IMP [87], ИТР [88].

Прорачун броја графитних ламела ради се према следећој формули:

$$(d \cdot \pi \cdot H \cdot n) / A = br. \text{grafita} , \quad (7)$$

где је:

d - унутрашњи пречник чуре,

H - висина чауре,

n - проценат покривености чауре графитом,

A - површина графита.

Максимална дужина чауре одређује се:

$$L_{\max} = 1.5 \cdot d , \quad (8)$$

где је:

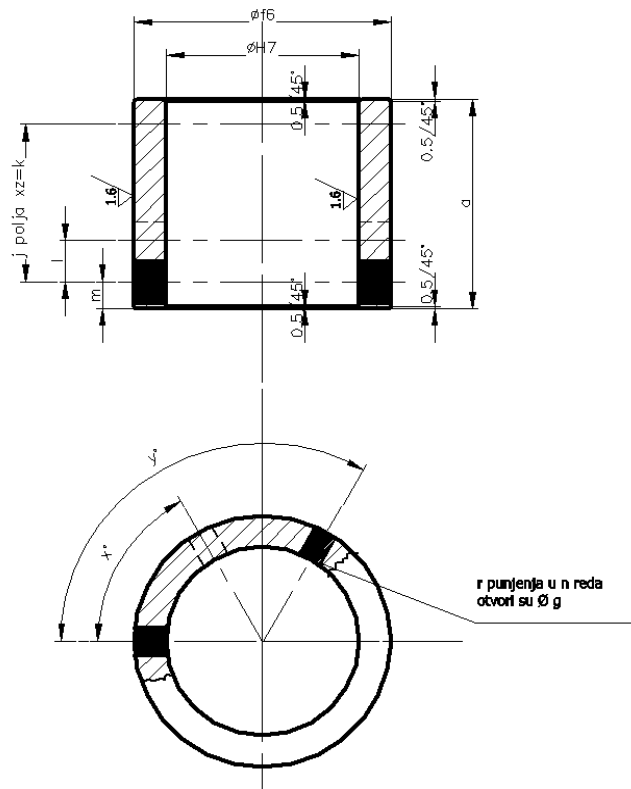
d - унутрашњи пречник чауре.

Лежајне чауре су најважнији делови самоподмазујућег лежаја и имају облик шупљих танких цилиндара. Према облику могу бити једноделне и дводелне, а према дебљини танкозидне и дебелозидне. Једноделне дебелозидне чауре израђују се од *Си* легура, чије се ивице обрађују обарају ради лакше монтаже. Ове чауре се пресовањем уграђују у једноделне клизне лежаје. Тело лежајне чауре се израђује од материјала довољне издржљивости и чврстоће у чије се отворе утискују ламеле графита које имају изузетна антифрикциона својства. После одређеног периода рада, долази до критичног обима хабања, што условљава комплетну промену чауре. Предност коришћења самоподмазујућих лежаја са графитом огледа се и у уштеди скувих антифрикционих материјала.

Самоподмазујући клизни лежаји могу конструкционо бити изведени као једноделни и дводелни. Једноделни лежаји, иако су доста једноставни, користе се у случају када постоји могућност да се вратило са стране увуче у лежај или да се лежај навуче на вратило. Док се дводелни лежаји постављају тамо где је немогуће поставити једноделне. Конструкција ових лежаја омогућава лакши преглед и поправку. Дводелни лежаји имају дводелну постелицу, која је уздуж расечена тако да се при склапању полутке могу радијално приближити и међусобно спојити. Најчешће су са ободима на оба краја цилиндра који обезбеђују центрирање једне полутке у односу на другу. Уколико се уграђују у зидове чија је крутост довољна, постелица може бити и танких зидова.

Самоподмазујуће чауре су израђене од основног материјала бронзе са улошцима (ламеллама) од графита који хомогено пријањају на површину заузимајући предвиђени проценат покривености (у употреби 25 %) чауре. Разлика у тврдоћи између клизног елемента и контраматеријала би требало да буде максимално 100 НВ. Оптимални услови се постижу окаљеним и обрушеним контра материјалом.

Лежаји треба да имају једноставну конфигурацију, због крутости графита, а пожељно је да буду без прирубница. Када су наведени услови испуњени приступа се конструисању клизног лежаја, (слика 9).



Слика 9. Пример клизног лежаја са графитом

где је:

m - растојање од ивице чауре до осне линије графита у првом реду

a - висина чауре

l - растојање од осне линије графита до ивице графита у наредном реду

j - број растојања између редова, $z = 1$

k - растојање осе графита до осе графита последњег реда

x^0 - угао између два суседна графита у првом реду

y^0 - угао између два суседна графита у наредном реду

r - укупан број графитних ламела који се утискује у чауру

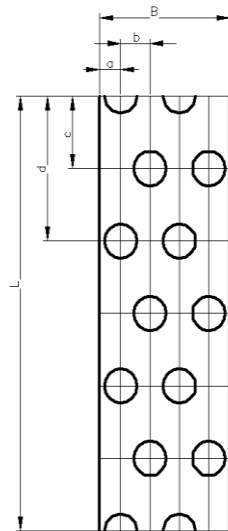
n - број редова по висини чауре

g - пречник графитне ламеле

$f\delta$ - препоручена толеранција за спољашњи пречник чауре

$H7$ - препоручена толеранција за унутрашњи пречник чауре

Како би се што боље разумео распоред графитних ламела дата је развијена површина чауре са ламелама графита на (слици 10).



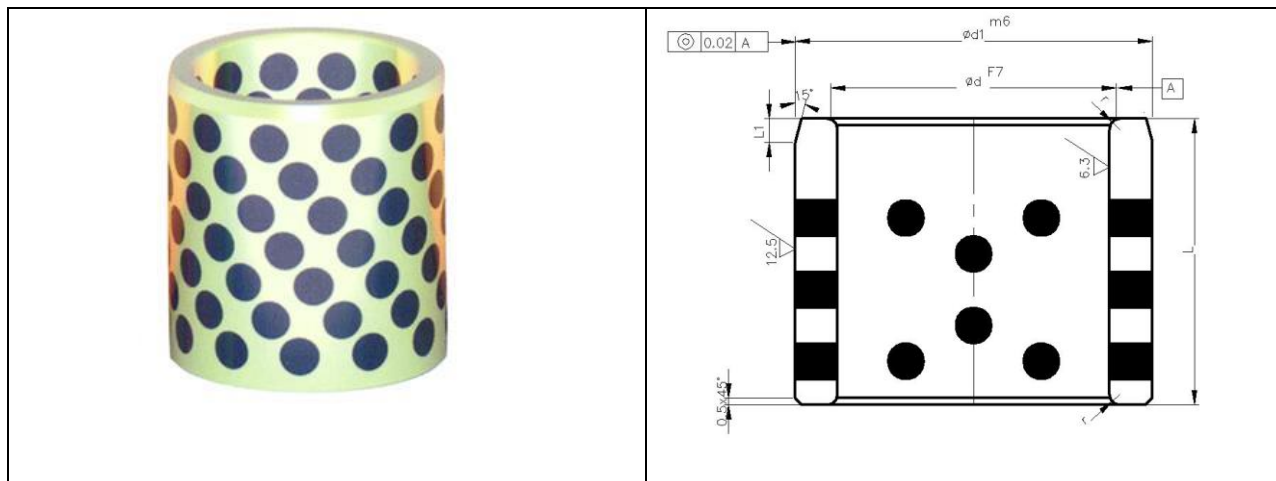
Слика 10. Развијена површина чауре са ламелама графита

Где је: L - укупна дужина развијене чауре, B - висина чауре, a - растојање од почетка висине до осне линије ламеле графита у првом реду, b - осно растојање између две ламеле графита у првом и другом реду по висини, c - растојање од почетка развијене дужине до осне линије ламеле графита у другом реду по дужини, d - растојање од почетка развијене дужине до осне линије ламеле графита у првом реду по дужини.

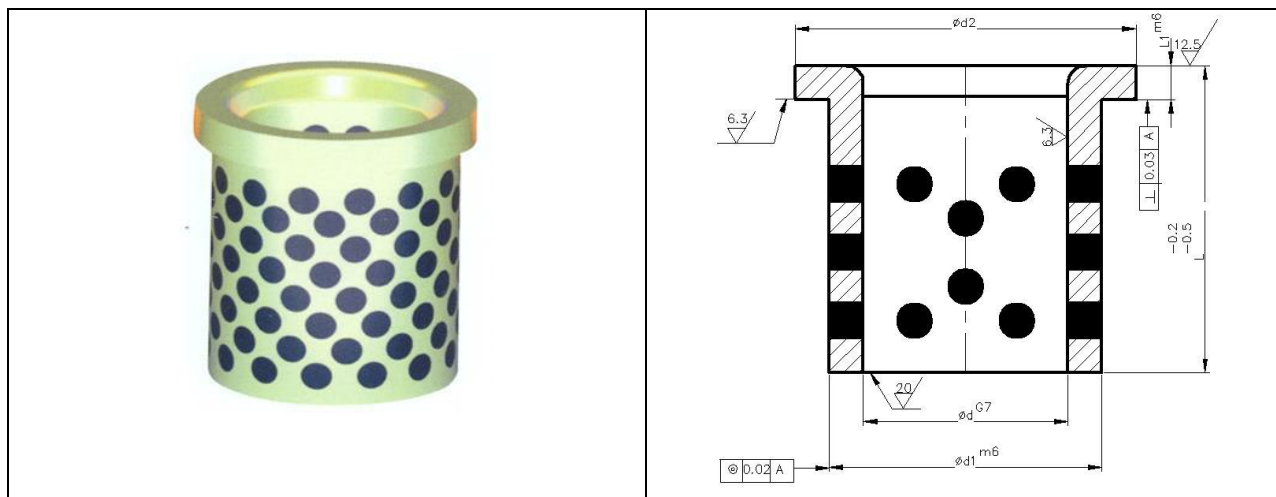
3.4. Конструкцијска решења радијалних клизних лежаја са графитом

Брзина клизања, радни век, карактер деловања спољашњег оптерећења, експлоатациони услови, могућност израде и одржавања су најутицајнији фактори при конструисању радијалних клизних лежаја са графитом. Врло често се задатак

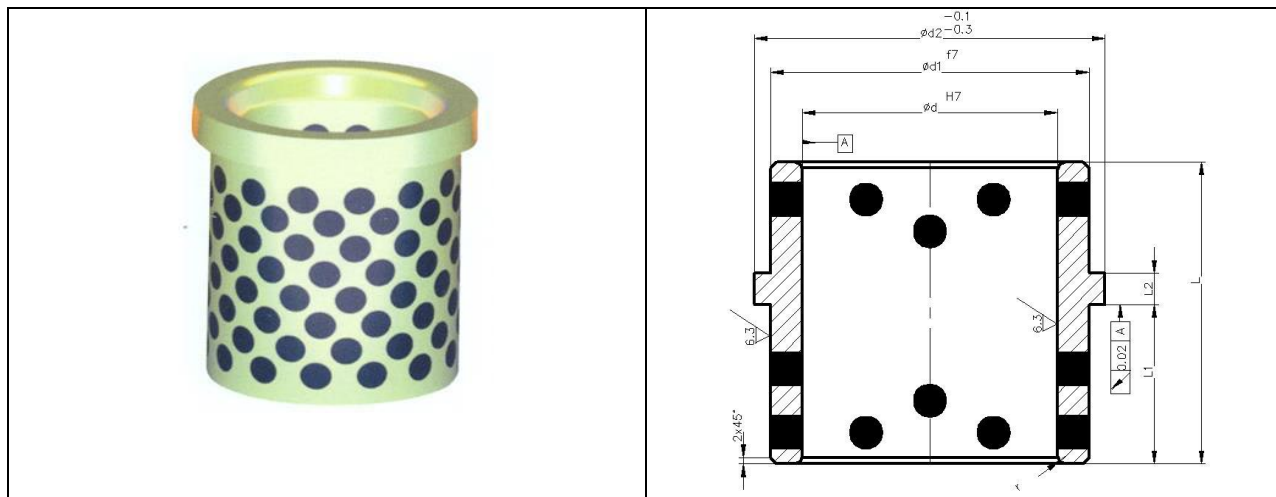
конструктора своди на избор одговарајућег типа лежаја и прорачун носивости, зато што већ постоје стандардима дефинисани облици чаура који су констукционо разрађени и испуњавају горе наведене услове. Неке од тих чаура приказане су на (сликама 11-15).



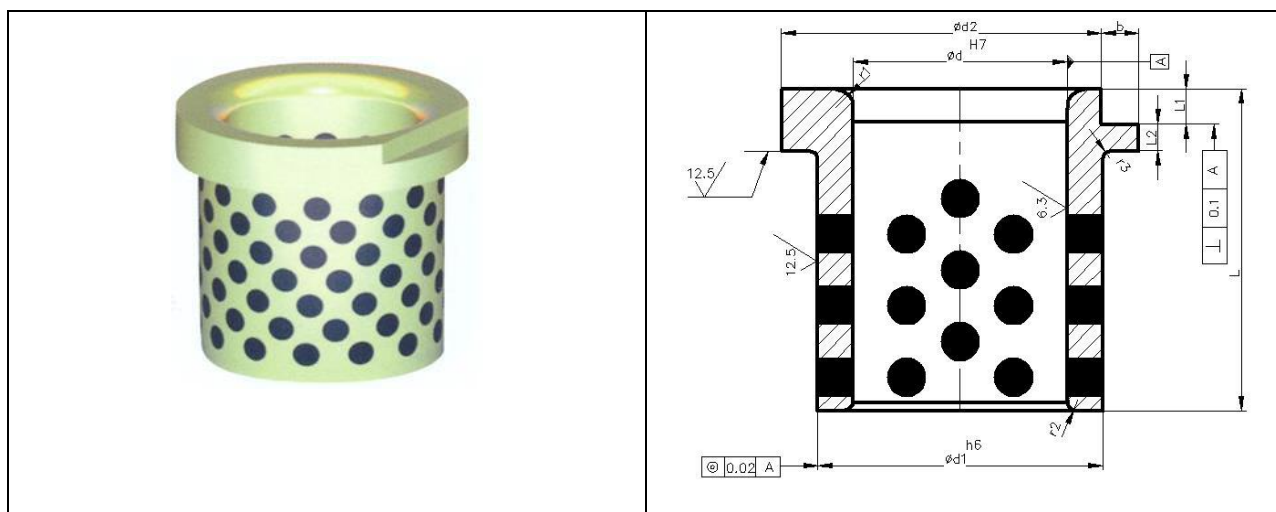
Слика 11. Самоподмазујућа чаура са ламелама графита



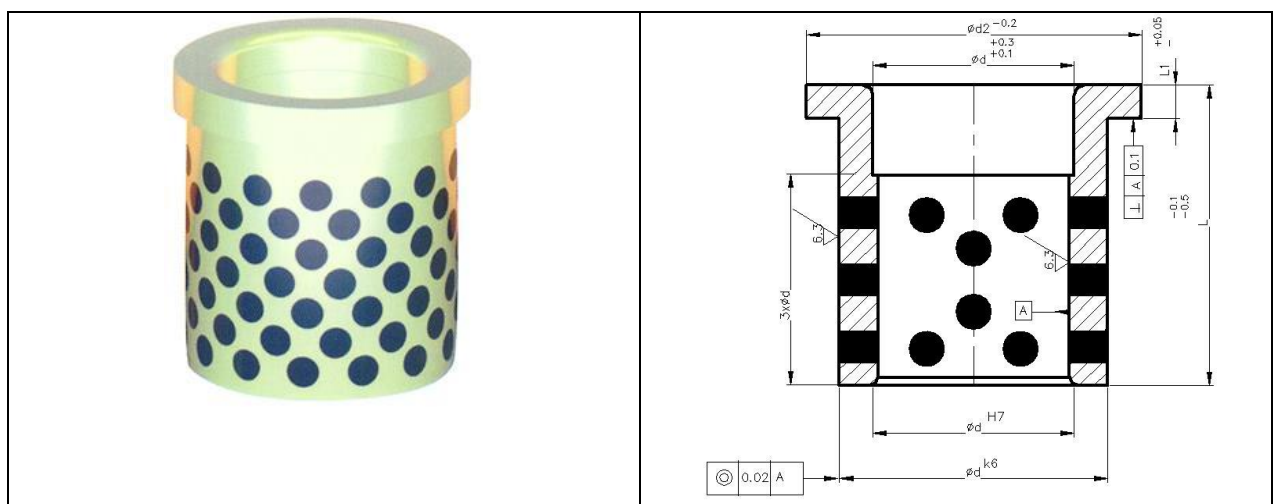
Слика 12. Самоподмазујућа чаура са венцом и ламелама графита



Слика 13. Самоподмазујућа чаура са венцом на средини чауре и ламелама графита



Слика 14. Самоподмазујућа чаура са венцом и стегом и ламелама графита



Слика 15. Самоподмазујућа чаура са венцом, ламелама графита и повећањем дебљине зида чауре

Након конструисања, ради се технолошка документација, лансирају се радни налози, ради се контрола и контрола квалитета, након чега се приступа процесу производње клизног лежаја. Пример технолошког поступка добијања самоподмазујућег клизног лежаја дат је у табели 5.

Табела 5. Пример технолошког поступка за израду чауре са графитом ϕ 10 mm.

Ред. Бр	Операција	Машина	Режим обраде		Алат и прибор	Мерно средство
			s mm/o	n min ⁻¹		
1.	Припремак ϕ 51/ ϕ 39,6 ^{+0,1} х41	Универзални струг	0.1	400	Бошт:0-073	Помично мерило
2.	Избушити отворе за графит ϕ 9.6 разврнути ϕ 10 ^{-0.02}	Бушилица			Бургија ϕ 9.6 развртач ϕ 10 ^{0.02}	
3.	Поставити графит	Бушилица				
4.	Између шиљака обрадити на ϕ 50.3 ^{+0.05}	Универзални струг	0.1	500		Помично мерило
5.	Комад поставити између шиљака и поравнати чауру са обе стране на меру 40(равнати до шиљака)	Универзални струг	0.08	600	Нож F-0.05, F-0.05 леви	Микрометар
6.	Обрадити отвор на меру 40 (радити у чаури)	Универзални струг	0.05	500	Бошт:0-073	Микрометар
7.	Обрадити ивице 0.5/45 ⁰	Универзални струг		180		
8.	Обрусити споља на меру ϕ 50	Бр. Шиљци			трн	Компаратер

Процес настанка самоподмазујућих лежаја приказан је на (сликама 16-21).



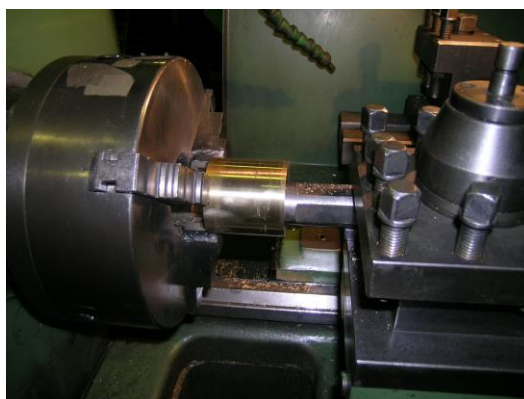
Слика 16. Нисконапонска лончаста пећ



Слика 17. Континуално ливење



Слика 18. Сечење абразивном тестером



Слика 19. Обрада чауре резањем

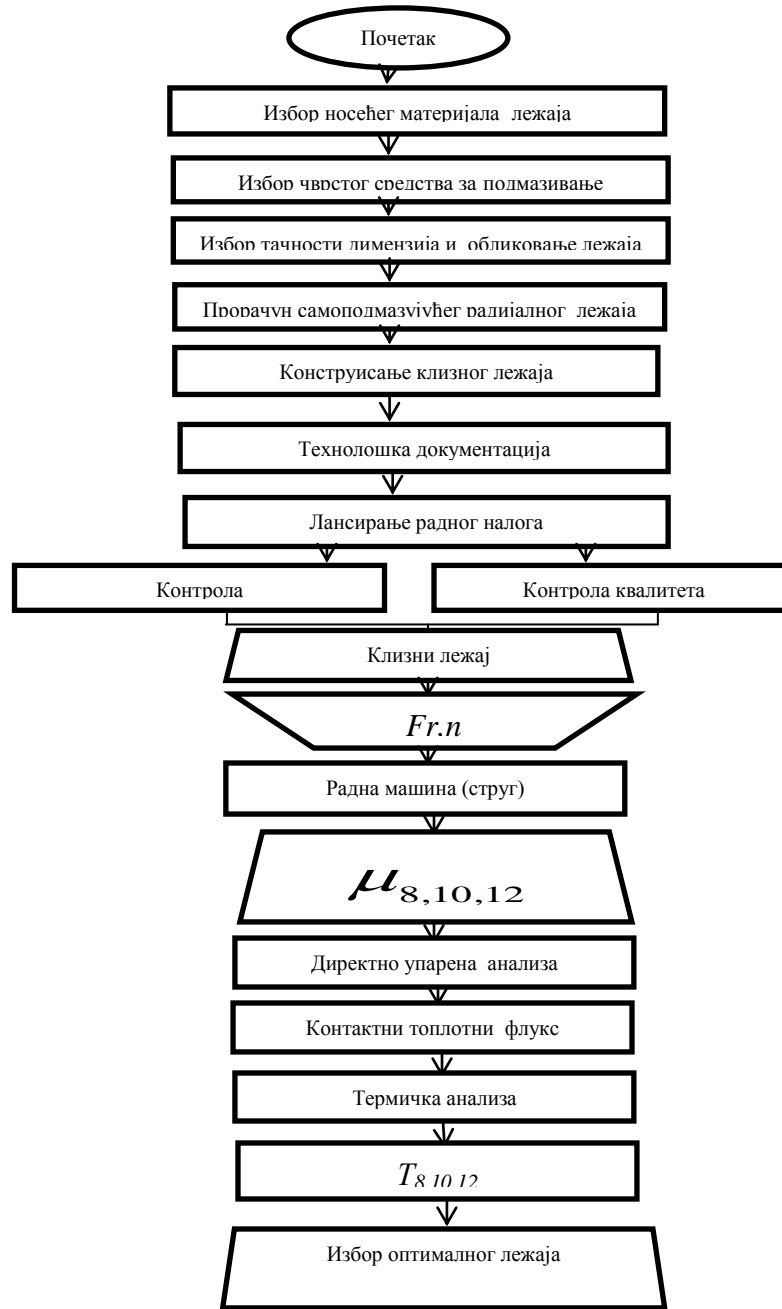


Слика 20. Бушење рупа у чаури



Слика 21. Утискивање ламела графита

Самоподмазујући лежаји са 25% покривености и одређеним пречником графитних ламела су коришћени до сада у пракси. Међутим, у овој дисертацији испитивани су лежаји са 20 и 30% покривености и различитим пречницима графитних ламела. На конструкционо извођење самоподмазујућег лежаја највећи утицај имају интензитет радијалне силе и број обртаја, чије се вредности задају радној машини, како би се добио експериментални коефицијент трења. Добијена вредност коефицијента трења, радијална сила и број обртаја унешени су у директно упарену анализу у временском домену. Резултат директно упарене анализе је генерисани топлотни флуks. Упросечен контактни топлотни флуks је унешен као гранични услов у термичку анализу у временском домену и добијено је температурно поље лежаја. Поређењем вредности коефицијента трења и температуре за 20 и 30% покривености чауре са различитим пречницима графитних ламела добија се оптималан лежај. Оптималан лежај је онај који има најмањи коефицијент трења и најмању температуру. На (слици 22.) је приказана шема методологије развоја радијалних клизних лежаја са графитом.



Слика 22. Методологија развоја радијалних клизних лежаја са графитом.

Основни циљ конструисања јесте да за техничке проблеме налази оптимална решења, а да при том производ буде конкурентан на тржишту. Поред горе приказаних радијалних клизних лежаја са графитом постоје и други специфични облици, у зависности од произвођача до произвођача, али навођење тих података је онемогућено због заштите ауторских права фирме.

4. ТЕОРИЈСКА ИДЕНТИФИКАЦИЈА ДОМИНАНТНИХ КОНСТРУКЦИОНО-ТРИБОЛОШКИХ ПАРАМЕТАРА РАДИЈАЛНИХ КЛИЗНИХ ЛЕЖАЈА СА ГРАФИТОМ

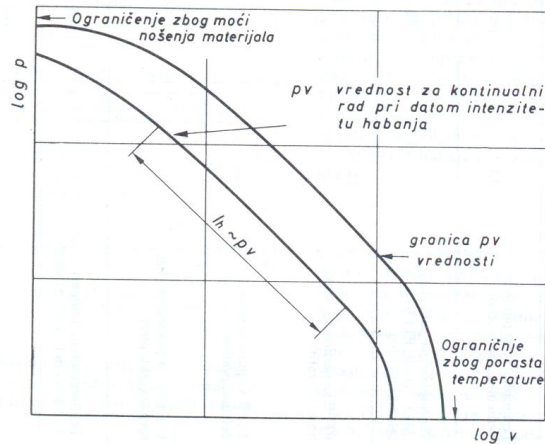
Међу доминантним конструкцијско триболошким параметрима радијалних клизних лежаја са графитом, треба издвојити: радијалну силу, коефицијент трења, температура, брзина клизања, пречник, број и покривеност графитним ламелама, и др.

4.1. Радијална сила

Деловање радијалне силе, на клизни лежај, манифестује се преко промене површине контакта. Што је веће оптерећење то је већа и сила потребна за раскидање међумолекуларних веза. Међусобна веза оптерећења, параметара фриксионог контакта и количине генерисане топлоте је врло сложена. По неком правилу укупна сила трења расте са оптерећењем, зато што расте реална површина контакта. Међутим, то правило не важи код јединичне силе трења и коефицијента трења који опадају. Постоје два разлога, зашто се то дешава:

- коефицијент трења и специфична сила трења зависе од реалног притиска, чија се вредност врло мало мења са порастом оптерећења. По правилу коефицијент трења се смањује са порастом оптерећења, а самим тим смањује тежњу метала ка стварању топлоте на контакту.
- раст стварне површине контакта је спорији од оптерећења

Повећано оптерећење, захтева и неопходно смањење зазора, јер то повећава носећу површину лежаја и снижава јединични притисак. Од оптерећења и брзине клизања зависи интензитет хабања, па се као критеријум при конструисању и прорачуну самоподмазујућих лежаја узима p_v вредност за изабрани материјал (слика 23).



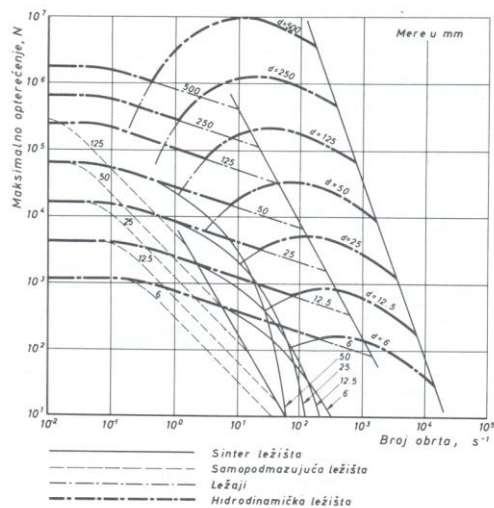
Слика 23. Општа зависност p и v вредности за самоподмазујући клизни лежај

При томе се може разликовати:

- pv вредност за континуални рад при неком дефинисаном фактору хабања, гранична pv вредност изнад које је пораст хабања висок, услед приближења граници еластичности материјала или као последица термичких ефеката.

Код графитних лежаја рукавци вратила се неће оштетити чак ни при високом оптерећењу, специфичном притиску и високој температури. Што објашњавају мале величине коефицијената трења метала по графиту.

Поузданост, исправност рада и основне триболошке особине у великој мери зависе од правилног избора клизних лежаја за дату намену и услове рада. Оптимални избор зависи од више фактора од којих су оптерећење и број обртаја основни. На (слици 24) дате су препоруке за прелиминаран избор врсте радијалног лежаја.



Слика 24. Избор врсте радијалног лежаја

На (слици 24) дате су препоруке за оквирни избор врсте радијалног лежаја. Постоје три основне групе лежаја и то: самоподмазујући, синтеровани и хидродинамички лежаји. Криве на (слици 24) засноване су на искуству у нормалној инжењерској пракси и дате су за најчешће коришћена решења. Криве се односе на избор статички оптерећених лежаја за дати број обртаја и пречник рукавца. У овом случају рађен је прорачун са номиналним радним веком од 10 000 часова, за рад при нормалној температури околине. За назначени број обртаја и пречник рукавца, оптерећења су максимална. Смањењем оптерећења и броја обртаја постиже се дужи век трајања. Ове криве се односе на лежаје са дужином једнаком пречнику.

4.2. Коефицијента трења

Трење представља отпор парова површина два тела при њиховом релативном кретању, изазван клизањем, котрљањем или клизно-котрљајним кретањем. Релативном кретању тела супротставља се трење. Спољашње трење је трење које се јавља на додирним површинама два тела и оно не зависи од површине додирних површина. Ово трење се разликује од унутрашњег трења, које настаје при релативном кретању елемената унутар запремине чврстих тела Nikolić [1]. Како је спољашње трење у директној вези са променом положаја тела у контакту, зависно од величине релативног померања разликују се два основна вида трења, и то:

- статичко трење (трење при мировању),
- кинетичко трење (трење при кретању)

Гледано са стране кинематике разликује се трење клизања и трење котрљања. Како је предмет ове дисертације клизни лежај (самоподмазујући) то ће се пажња усмерити на трење клизања које се јавља када се тела у контакту релативно крећу под дејством силе. Основне величине које карактеришу спољашње трење јесу коефицијент трења и сила трења. При граничном релативном померању јавља се максимална тангенцијална сила отпора која се зове статичка сила трења. Након достизања граничног померања, вредност реактивне силе нагло пада и режим трења постаје стабилан са константном брзином клизања. Промене силе трења и коефицијента трења могу да буду велике.

Подела трења може да се изврши и од стања у коме се налазе контактне површине. Сходно томе постоји: суво, гранично и течно трење. Суво трење је случај када се контакт фриксионих површина остварује директно, без присуства мазива. Гранично трење, представља случајеве када између контактних површина налази одређен слој мазива и његова је дебљина мања од максималне висине неравнина. Док је код течног трења тај слој већи од свих неравнина.

У трибологији је познато да величина коефицијента трења код полимерних материјала, за разлику од метала, у великој мери зависи од оптерећења, храпавости површина и брзине клизања. У супротном са порастом оптерећења може доћи до пада коефицијента трења, повећање храпавости и велике брзине доводе до његовог раста, посебно ако су велике брзине узрок пораста радне температуре. Вредност коефицијента трења се креће у распону од нуле па до један (0-1). У табели 6. дате су приближне вредности коефицијента трења за материјале који се најчешће користе IMP [87].

Табела 6. Основне карактеристике полимерних материјала за самоподмазујуће лежаје

Материјал	Дозвољено оптерећење N/mm^2	Дозвољена радна температура °C	Коефицијент трења	Област примене
Термопласти без пуниоца	10	100	0,1-0,45	где је подмазивање тешко остварљиво
Термопласти са пуниоцима	10-14	100-130	0,15-0,35	Исто као претходни само за виша оптерећења
PTFE са пуниоцем	2-7	250	0,05-0,35	Када се захтева низак коефицијент трења и незнатно хабање
PTFE са пуниоцем на челичној подлози	140	280	0,05-0,3	За лежишта у ваздухопловству
Полиамиди са пуниоцем и без њега		300	0,4-0,6 без пуниоца 0,1-0,3 са пуниоцем	За неподмазиване лежаје
Термоактивни полимери мат. ојачани	35	200	0,1-0,4	За лежаје подмазана водом
Угљеник/графит	1,4-2	350-500 угљеник 350	0,1-0,25	За лежаје изложене води, корозији, киселинама, повишеним радним температурама

Коефицијент трења може да се мења и на другачији начин јер на његову вредност, поред оптерећења, истовремено утичу и други фактори, као што су: материјал, величина спољашњег атмосферског притиска и др. Притисак у комбинацији са брзином клизања

има највећи утицај на параметре трења итд. На основу претходног може се закључити да ће количина генерисане топлоте, поред утицаја нормалног оптерећења, зависити и од коефицијента трења који ће имати утицај на нормално оптерећење.

4.3. Температура

Свако повећање трења доводи до повишене температуре лежаја, што изазива промену особина клизног слоја који је у контакту са рукавцем и то од носивости самог слоја до промене коефицијента трења, што би на крају изазвало и разарање самог лежаја. Повишена температура може да буде или последица генерисања топлоте, или услова у којима се контакт одвија. Иако се не може оспорити чињеница да би са порастом температуре дошло до бољег прилагођавања клизног слоја рукавцу, ипак би укупан ефекат пораста температуре био негативан због опадања механичких карактеристика слоја, тј. смањења његове носивости. С обзиром да се мора рачунати да је дименциона стабилност једна од важних карактеристика лежаја, виша температура била би узрок промени димензија. Ограничавајући фактор у примени самоподмазујућих лежаја јесте температура површине лежишта због слабе топлотне проводљивости полимерних материјала. Уопштено та температура је одређена температуром околине T_0 , порастом температуре као резултатом развоја топлоте изазване трењем ΔT и тренутном температуром на сваком појединачном месту додира неравнина спрегнутих површина. Усваја се да се температура на површини лежишта са довољном тачношћу може одредити коришћењем једначине 9.

$$T = T_0 + \Delta T, \quad (9)$$

Пораст температуре ΔT је пропорционалан генерисаној топлоти, једначина 10.

$$\Delta T = C \cdot \mu \cdot p \cdot v, \quad (10)$$

где је C - целокупна термичка отпорност дисипацији топлоте са површине. Приближне вредности које се препоручују у литератури могу бити у границама од $0,8 \cdot 10^{-3}$ до $1,6 \cdot 10^{-3}$, $^{\circ}Cms/N$. Вредности температуре и коефицијента трења постају сталне између пола сата рада клизног лежаја у оквиру одговарајућег оптерећења Marinkovic [11]. Уколико оптерећење остаје константно са порастом температуре, тада услед лошијих механичких особина материјала, генерисање топлоте тежи сталном опадању.

Међутим, коефицијент трења може да се мења са променом температуре, што зависи у великој мери од врсте материјала који чине фрикциони пар. Како би се смањило трење у кретању машинских склопова у широкој употреби су самоподмазујући премази. Међутим, триболошке особине ових премаза битно зависе од одржавања температуре. На основу ефективног опсега температуре мазива, развиле су се идеје о могућим начинима да се прошири опсег температурног функционисања самоподмазујућих премаза Yang [27]. Уколико постоје неравнине између рукавца и самоподмазујуће чауре, међусобни ударци тих неравнина имају за последицу стварање топлоте - и чаура и рукавац се загревају. При том и даље вреди закон очувања енергије: смањивање кинетичке енергије тела прелази у топлотну енергију тела. Такав учинак се може и искористити код шибице. Оне функционишу управо на том принципу: трењем главице она се загреје на температуру потребну да се смеса запали.

Повишена температура у клизним лежајима која је најчешће последица високих брзина може се предвидети нумеричким истраживањима. Поступак може да помогне у прелиминарним студијама за избор лежајног материјала прерачунавајући њихову термичку стабилност и за процену промене конструктивних изолационих особина клизних лежајева услед топлоте трења Quaglini [10].

Како се у овој дисертацији изучавају самоподмазујући лежаји са графитом, од посебног значаја је топлотна проводљивост, лежаја. Стабилније карактеристике слоја у контакту са рукавцем остварују се са повећањем топлотне проводљивости. Треба напоменути да је графит једна од ретких познатих супстанци које има скоро нула коефицијент термичког ширења. Графитни лежаји без подмазивања раде нормално са постојаним топлотним режимом када је $p \leq 15 N/mm^2$ и $v \leq 1 m/s$.

Када су вредности номиналне површине контакта веома мале, као у случају када се контакт остварује по линији или је у облику тачке, онда са сигурношћу може да се сматра да су реална површина додира A_r и номинална површина додира A_l једнаке. Такво стање у трибомеханичким системима увек има за последицу велико нагомилање унутрашње енергије у честицама, односно, генерисање топлоте на локалном нивоу. Уколико површина контакта расте, расте и количина топлоте.

4.4. Брзина клизања

Када се говори о трењу клизања при обртању, релативно кретање тела у контакту дешава се под дејством момента. Суво трење у пракси не постоји (увек постоји танки оксидациони слој). При мањим брзинама и већим оптерећењима делова при релативном клизању долази до местимичног пробијања граничног слоја – гранично трење. Повећањем брзине пробијања су све ређа, те се коначно гранични слојеви сасвим издигну и клизе један по другоме – мешовито трење. Даљим повећањем брзине клизања гранични слојеви захватају и повлаче за собом графит које улази између два гранична слоја – текуће трење. Повећање брзине клизања условљава пораст температуре лежаја, промену топографије контакта, промену механичких својстава материјала. При великим брзинама клизања долази и до загревања вратила, које премашује загревање елемената лежаја, због тога што кућиште лежаја више и лакше одводи топлоту. Истраживањима је утврђено да са порастом брзине клизања настајање топлоте може да се мења: може да расте, да опада или прво да расте па након достизања максимума да опада.

Површине клизних лежаја које су приликом кретања у међусобном контакту, са временом мењају и своја својства. Мења им се геометрија, величина, структура и својства површинских слојева. Хабање клизних лежаја представља прогресивни процес губитка материјала елемената лежаја који су у непосредном контакту и налазе се у релативном кретању. Suresha [18] је у својим истраживањима забележио веће хабање услед повећања клизних брзина, а самим тим и вредности коефицијента трења расте.

Код свих клизних лежајева, клизна брзина и притисак у лежају стоје у обрнутом односу, што је већа клизна брзина – притисак у лежају мора бити мањи. Такође и коефицијент трења зависиће од контактеног притиска, који ће зависти од брзине клизања, тврдоће, подмазивања и др.

4.5. Пречник, број и покривеност графитним ламелама

Последња операција у конструисању и технологији производње самоподмазујућих лежаја јесте прорачун и утискивање ламела графита, које се добијају поступком синтеровања. Синтеровање представља повезивање честица праха у чврсту масу. Механичка својства делова су углавном једнака, а неким случајевима и боља од производа истог хемијског састава који су израђени поступком ливења, ковања, обрадом резањем, обрадом деформисањем и др. Предности делова израђеним синтеровањем су: равномерна ситнозрнаста микроструктура, постиже се мала површинска храпавост, мали су губици материјала, постижу се тачније димензије делова него код већине поступака, велика производност, могућа је израда делова одређене порозности. Ламеларни графит се добија из три фазе: припрема мешавине од различитих конституената, консолидације мешавине прахова и добијање коначног производа применом термичког третмана.

На квалитет и механичке особине ламеларног графита директно утиче квалитет замешаности графитних честица са везивном материјом. Потребно је обезбедити да се свака честица графита обложи са танким филмом полимера. Довођењем топлоте врши се спајање честица графита са полимером, како би дошло до импрегнирања. Садржај везива у композиту одређује квалитет мешавине при производњи композита. Да би се сачувао материјал од напрезања у току процеса полимеризације, неопходно је обезбедити оптималан садржај везива. Величина и расподела честица графита који се користи као пунилац у композиту има једну од најважнијих улога. За добијање хомогене мешавине избор техника мешања графитних честица са везивом је веома битан. Да би се остварио најбољи могући контакт два различита материјала, користи се мешач са покретним лопатицама, одређена температура и време мешања. За добијање ламеларног графита поступком сабијања у одређеним алатима, под одређеним притиском, на хладно или топло, користи се хидраулична преса. Поступак пресовања праха у алатима, значајно утиче на квалитет отпреска, у зависности да ли се примењује поступак једностраног или двостраног сабијања. Боље карактеристике отпреска се добијају код двостраног пресовања.

У последњих неколико година, развијено је неколико нових чврстих мазива као и концепт модерног подмазивања како би се постигла боља мазивост и дужи век хабања у захтевним триболоким применама. Већина традиционалних чврстих мазива су

направљена у облику метала, керамике. Они се успешно користе у различитим инжењерским апликацијама. Недавно је до напретка таложења танког филма технологија је довела до синтезе нових генерација самоподмазујућих облога са композитима користећи дупле / вишеслојне површинске третмане. Donnet [24] је разматрао механизме подмазивања како традиционалних тако и нових чврстих мазива, са посебним нагласком на методама чврстих мазива у пракси.

Покривеност клизног лежаја ламелама графита има велики утицај како на дебљину самоподмазивог слоја, тако и на температуру и коефицијент трења. Број графитних ламела зависи од процента покривености и са повећањем процента покривености повећава се и број графитних ламела. Повећање пречника ламеле графита, као и броја графитних ламела доводи до смањења коефицијента трења и обрнуто са смањењем пречника графита и смањења броја ламела долази до повећања коефицијента трења. Већи број графитних ламела утиче на смањење коефицијента, разлог томе је већи број контактних тачака у којима долази до смицања графита и бољег подмазивања. Ru-Tie [19] је коришћењем металургије праха урадио анализу утицаја процента графита на композитне материјале. Показало се да се садржајем графита до ~3% могу постићи оптималне особине просечног коефицијента трења, максимални коефицијент трења, амплитуда коефицијента трења и отпорност на хабање. Два најважнија фактора за постизање филма за подмазивање доброг квалитета на дотрајале површине су: садржај графита и тврдоћа. Бројним истраживањима, потврдило се да је уобичајени лежајни материјали (бабит и бронза) доводе до високе стопе хабања, као и високог коефицијента трења. Као материјал лежишта који је самоподмазујући и тежи да смањи коефицијент трења пуно се користи PTFE, који је подложен високом хабању, што може смањити додавањем погодних пунила. Sonam – ов [14] је показао да је варирањем различитих параметара као што су: проценат графита, брзина клизања, оптерећење, најбољи резултати постижу код PTFE са највећим садржајем угљеника 35%. Што је већа покривеност (процент) угљеника то је лежај има мирнији и бољи рад.

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ ТРИБОЛОШКИХ ПАРАМЕТАРА РАДИЈАЛНИХ КЛИЗНИХ ЛЕЖАЈА

5.1. Циљ експерименталних истраживања

Експериментално испитивање модела (самоподмазујућег лежаја) представља једну допунску могућност да се дође до поузданих триболошких параметара. Ова испитивања добијају свој пун значај у случајевима када се због сложености проблема јављају тешкоће при теоријским, па и у нумеричком решавању задатака. Експериментално испитивање је интердисциплинарна област, где се тражи широко теоријско знање о материјалима, конструкцијама, осећај за понашање конструкција под оптерећењем, електротехници и тд. Поред наведеног неопходни су и добри лабораторијски услови, искусно помоћно особље разних образовних профила (стругари, технолози, електротехничари и др.) Лабораторијска опрема треба да има и допунске уређаје, који омогућавају аутоматизацију рада како у фази оптерећивања, тако у обради података и снимања.

Метода експерименталне анализе може се примењивати на оригиналним конструкцијама или на њиховим моделима у лабораторијским условима. У оквиру ове дисертације експериментално испитивање је рађено на самоподмазујућем клизном лежају у лабораторији Машинског факултета у Нишу. Циљ ових испитивања јесте идентификација парцијалних утицаја појединих параметара: пречника графитних ламела, клизне брзине, покривености и радијалне силе на коефицијент трења. Резултати добијени експерименталним истраживањем користе се, како би се предвидело понашање клизних лежаја са графитом у реалним експлоатационим условима.

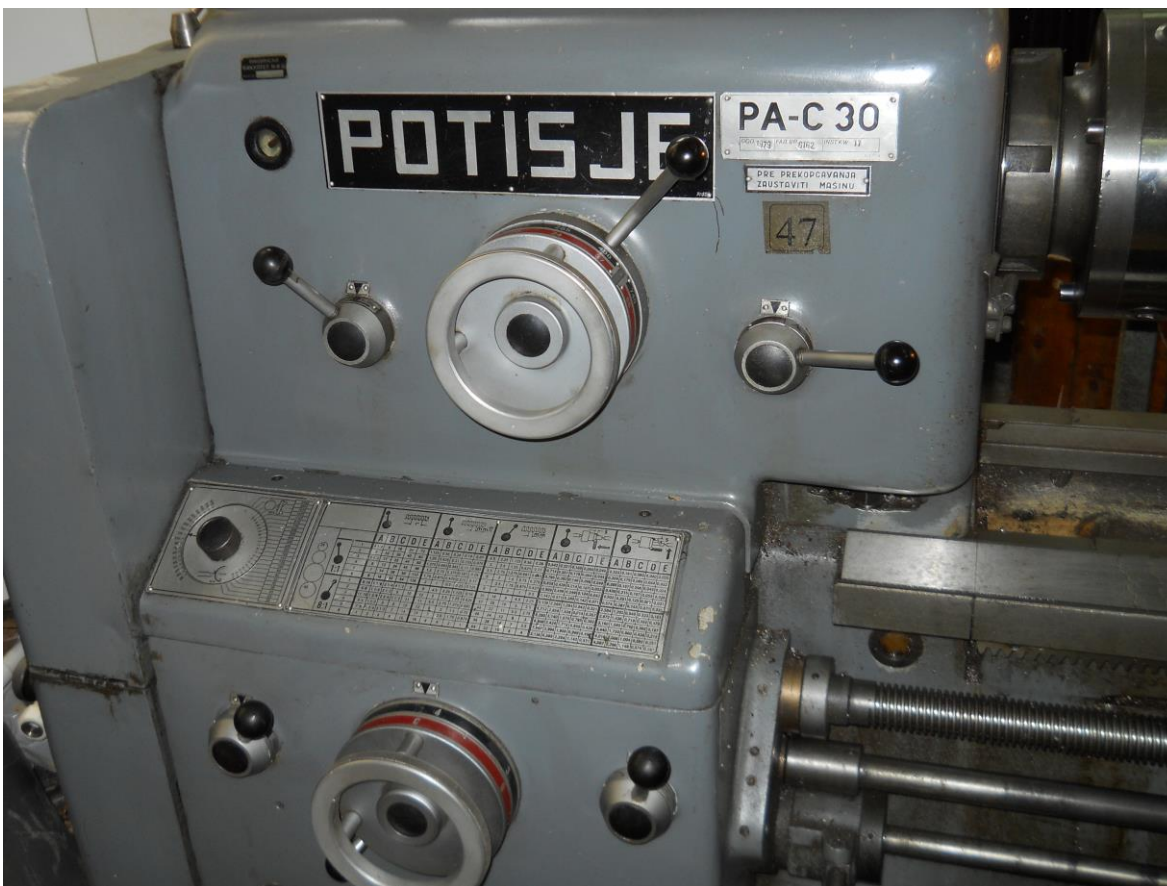
5.2. Радно место за експериментална истраживања самоподмазујућег лежаја

Радно место на коме су извршена експериментална истраживања обухвата:

- радну машину,
- радне комаде,
- опрему и
- мерни систем

5.2.1. Радна машина

У свету постоји низ специјализованих трибометара на којима се врше испитивања клизних лежаја . Циљ испитивања јесте симулирање триболошких процеса који се јављају у реалној конструкцији. Експериментална испитивања имају велику примену у току развоја нових мазива и материјала, како би се дошло до сазнања о њиховом квалитету у односу на постојеће производе. Међутим за испитивање самоподмазујућих лежаја је неопходан специјализовани трибометар, који у Србији не постоји. Како је код клизних лежаја присутан трибомеханички систем у коме се релативно кретање остварује клизањем, то радна машина треба да обезбеди ротационо кретање рукавца вратила на коме је монтиран самоподмазујући клизни лежај. Постављени захтеви експерименталних истраживања у циљу мерења обртног момента на лежају, захтевали су коришћење сензора обртног момента опсега до 100 Nm. Како је сензор обртног момента већих габарита, који мора да буде растерећен сопствене масе, како би се могао користити у ту сврху користио се струг на (слици 25).



Слика 25. Струг Потисје Ада, РА-С30

5.2.2. Радни комади

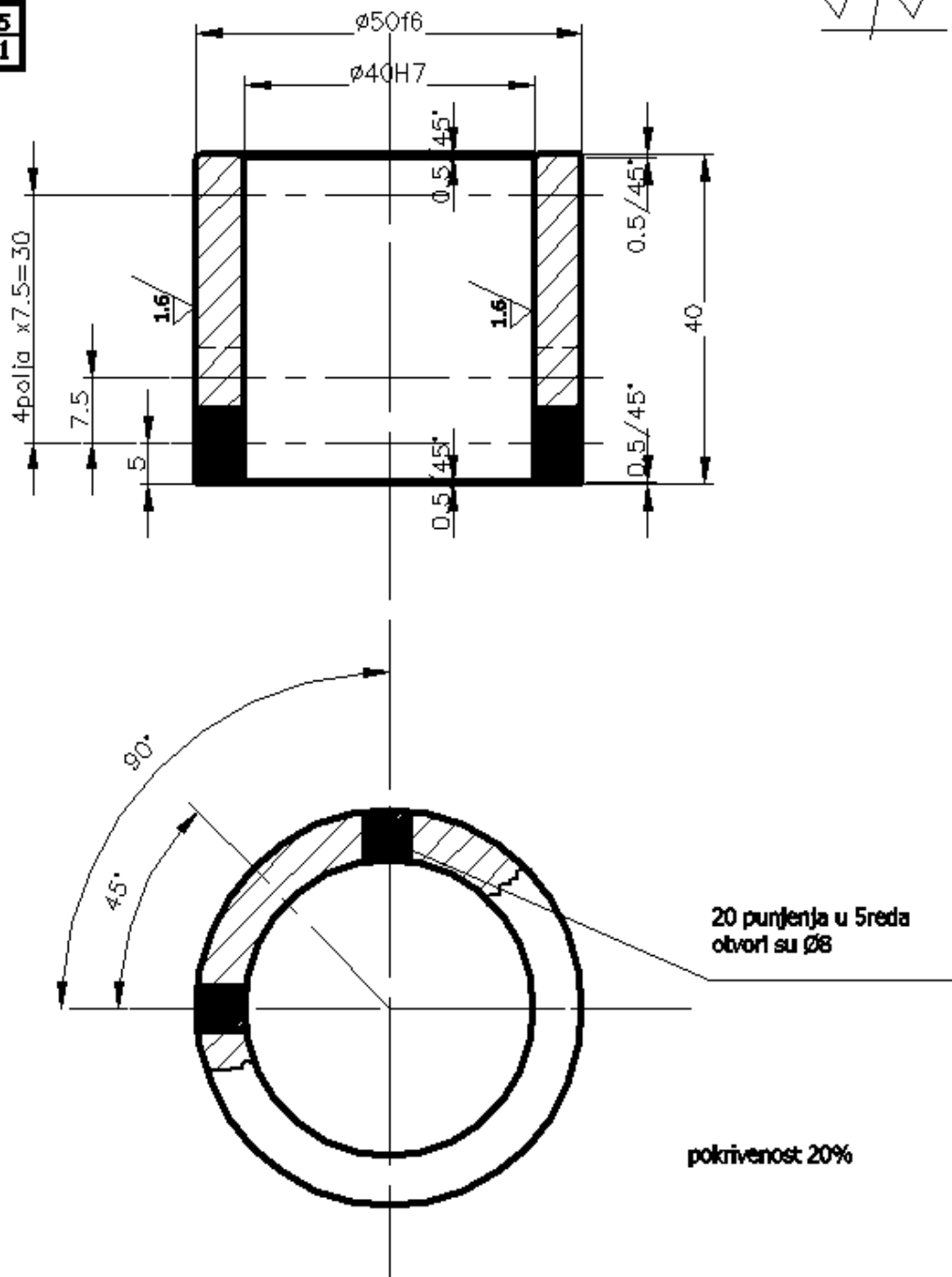
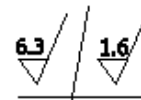
У експерименту су се користили самоподмазујући клизни лежаји, чија је постелица израђена од основног материјала (бронзе) високог квалитета са улошцима (ламелама) од графита, који хомогено пријањају на површину заузимајући 20 % и 30 % чауре. Хемијски састав $CuSn12$ и утицај легирајућих елемената одређен је спектрометријски у хемијској лабораторији Фасила, слика 32. За експериментална истраживања предвиђено је шест различитих самоподмазујућих клизних лежаја са графитом које су дате у табели 7.

Табела 7. Чауре $\phi 50/40 \times 40$

Чаура	Пречник графита, mm	Покривеност, %
$\phi 50/40 \times 40$	8	20
$\phi 50/40 \times 40$	8	30
$\phi 50/40 \times 40$	10	20
$\phi 50/40 \times 40$	10	30
$\phi 50/40 \times 40$	12	20
$\phi 50/40 \times 40$	12	30

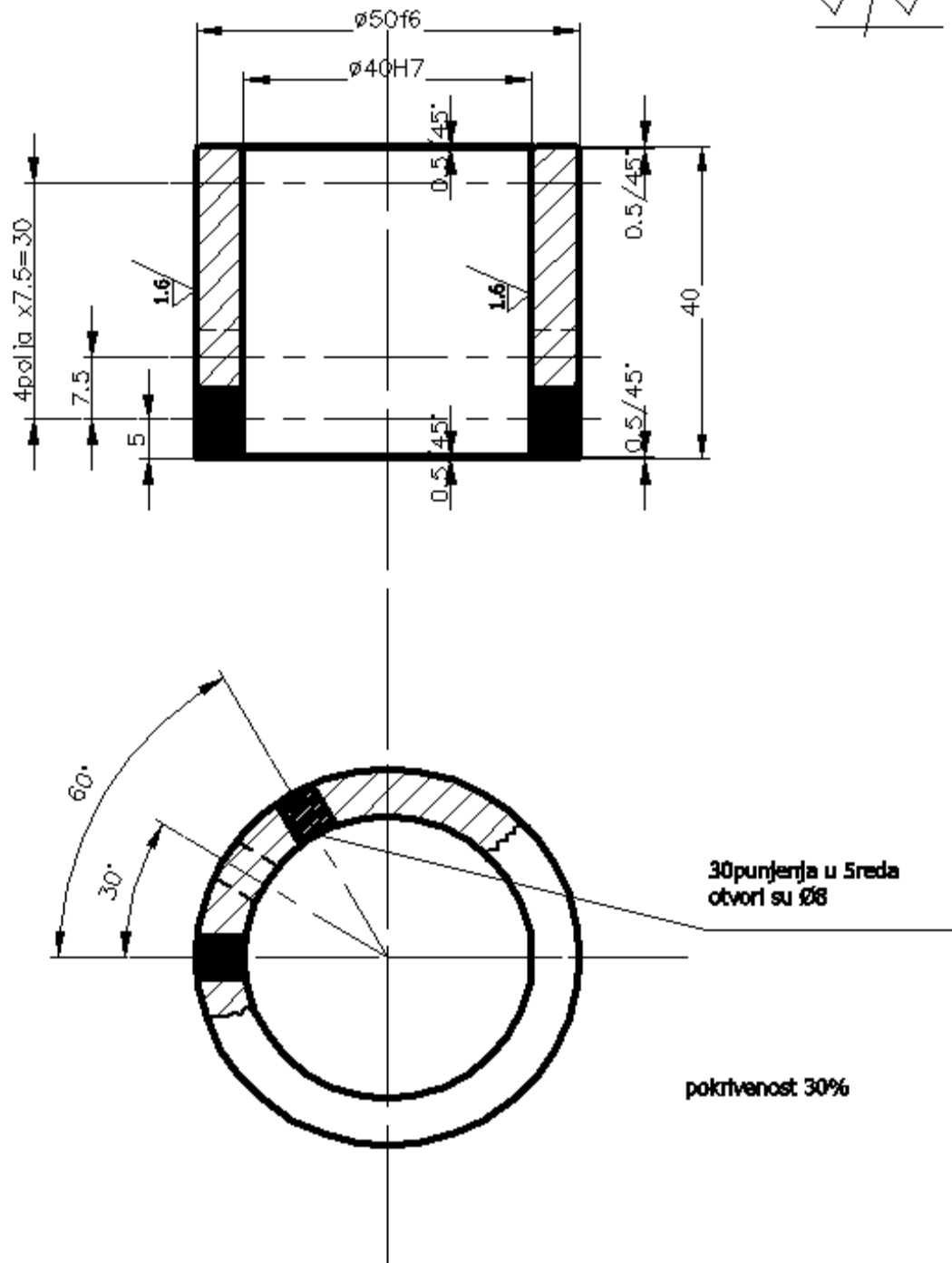
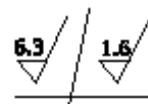
На (сликама 26-31) дати су технички цртежи самоподмазујућих лежаја, који су коришћене у експерименту.

$\varnothing 40H7$	+0.025 0
$\varnothing 50f6$	-0.025 -0.041



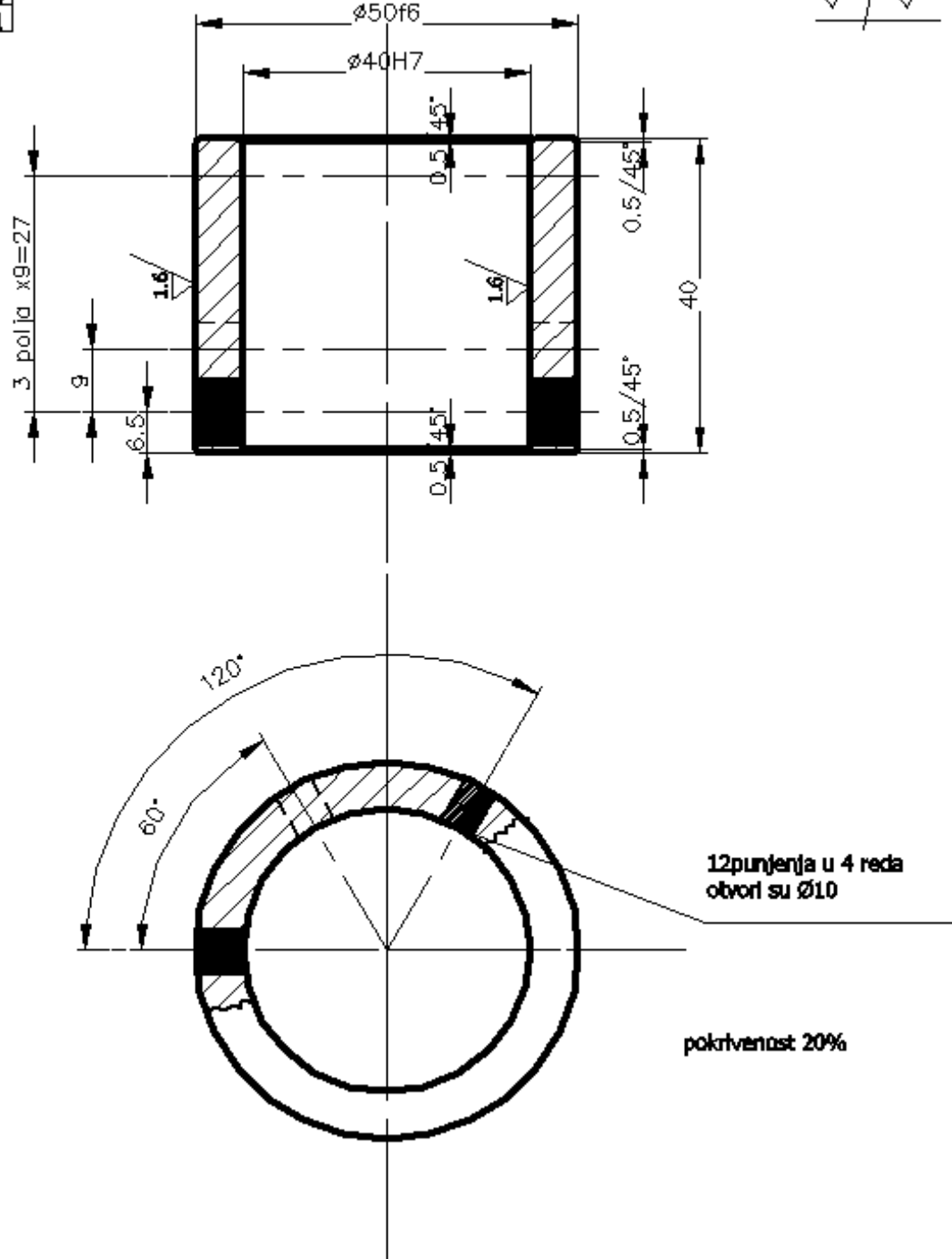
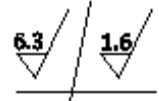
Слика 26 . Чаура $\varnothing 50/40 \times 40$, пречник графита 8 мм, покривеност 20%

$\varnothing 40H7$	+0.025
	0
$\varnothing 50f6$	-0.025
	-0.041



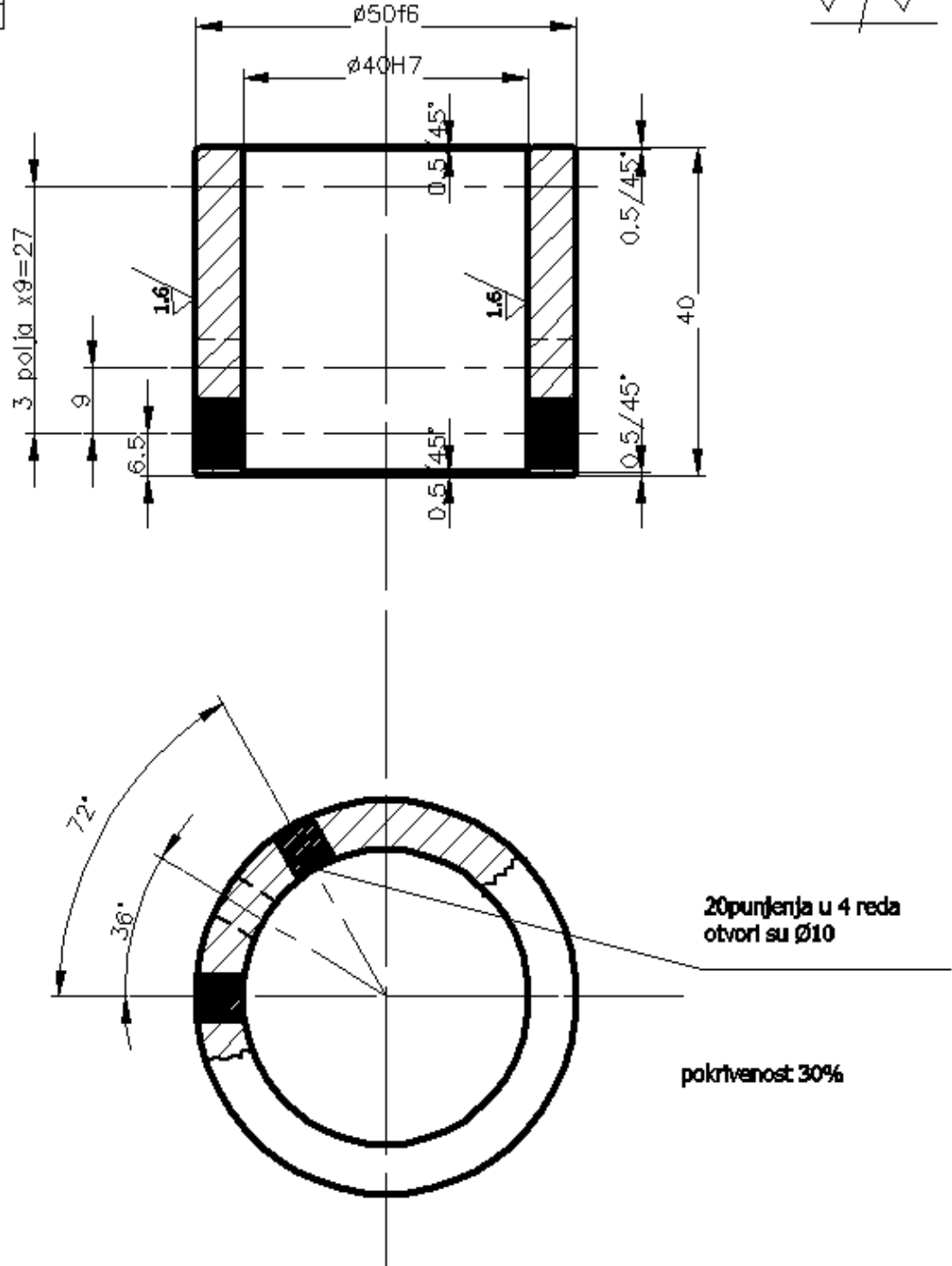
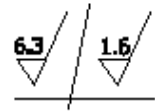
Слика 27. Чаура $\phi 50/40 \times 40$, пречник графита 8 мм, покривеност 30%

$\varnothing 40H7$	+0.025
	0
$\varnothing 50f6$	-0.025
	-0.041



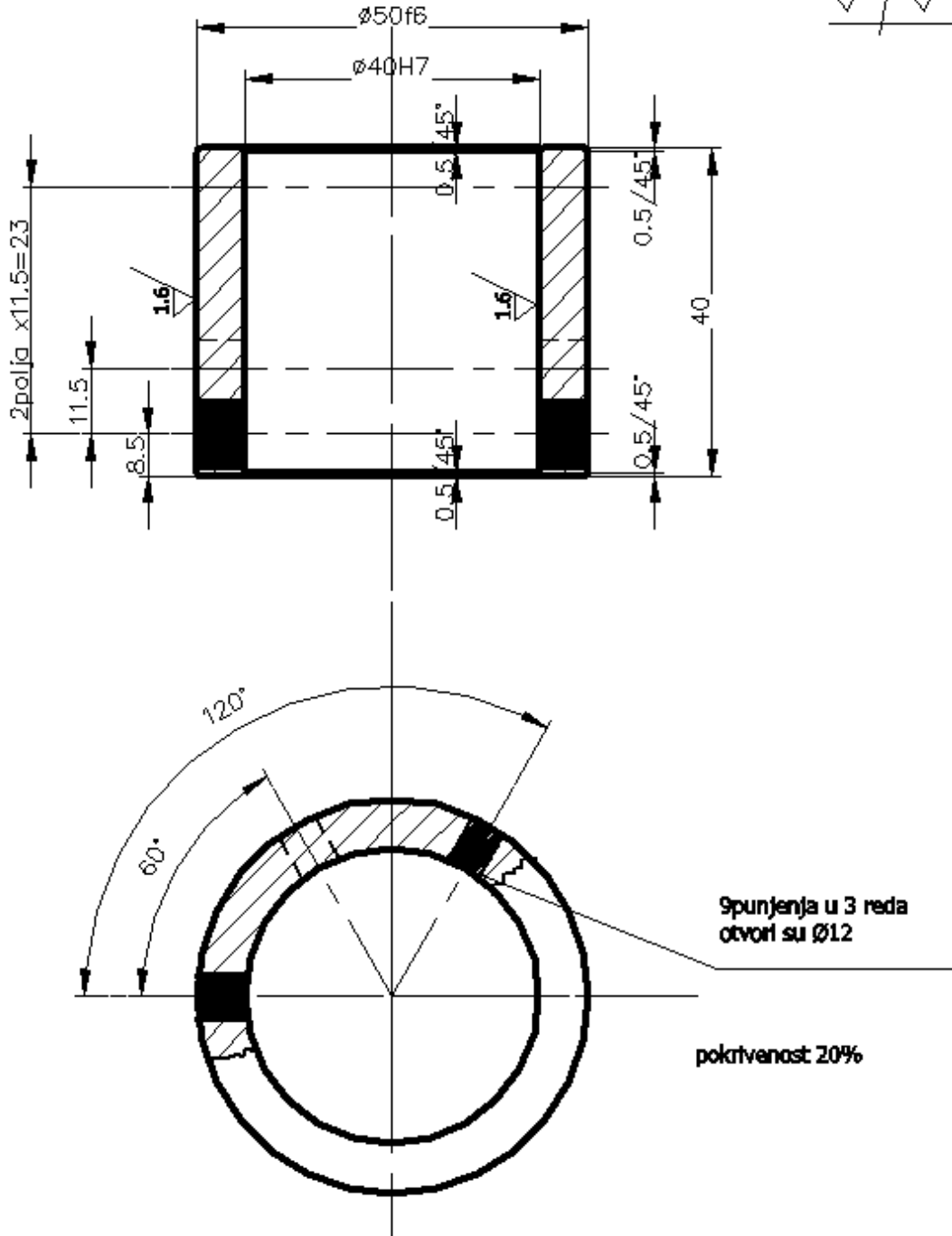
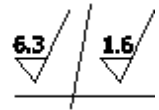
Слика 28. Чаура $\varnothing 50/40 \times 40$, пречник графита 10 мм, покривеност 20%

$\varnothing 40H7$	+0.025
	0
$\varnothing 50f6$	-0.025
	-0.041



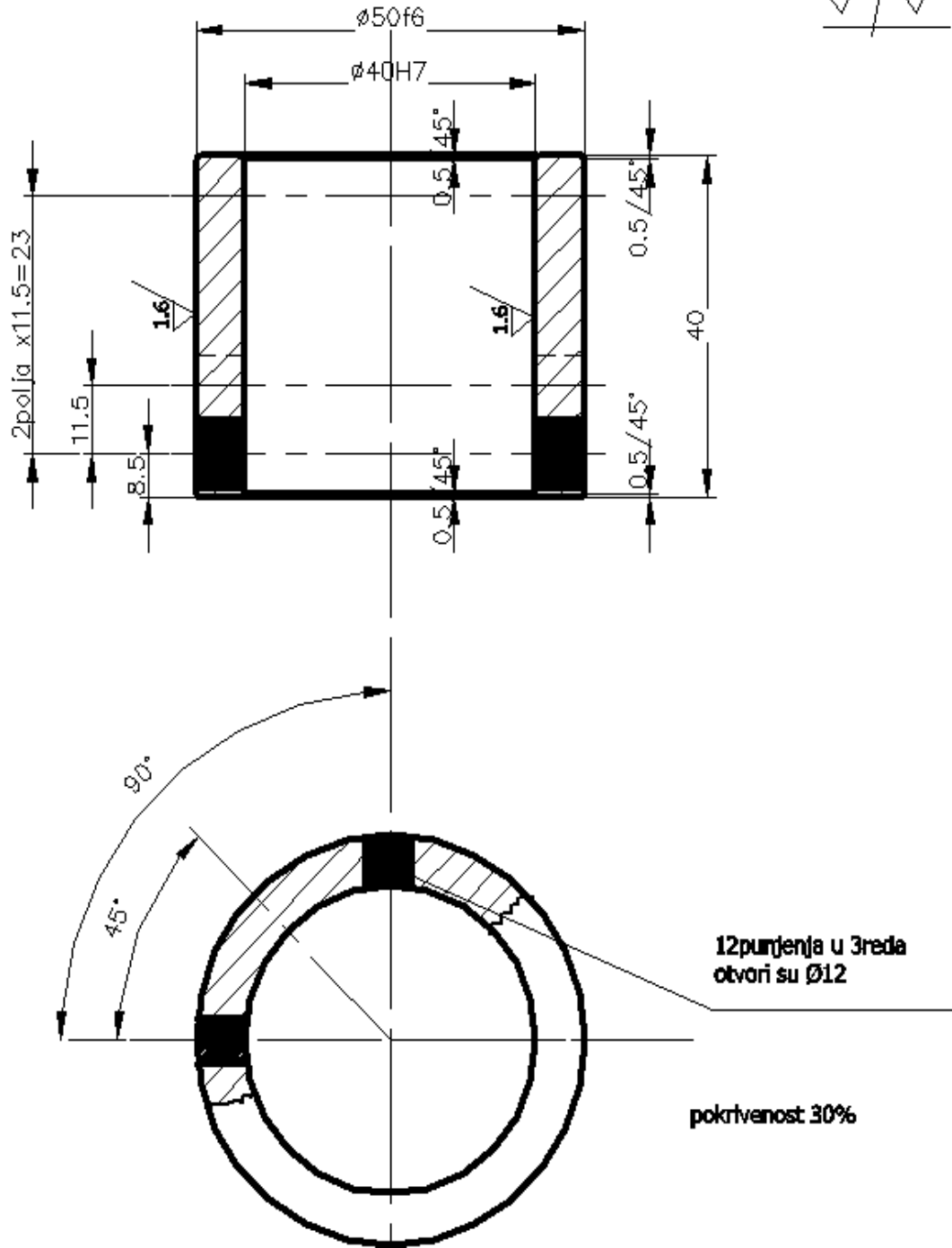
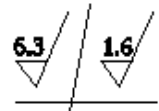
Слика 29. Чаура $\varnothing 50/40 \times 40$, пречник графита 10 мм, покривеност 30%

Ø40H7	+0.025
	0
Ø50f6	-0.025
	-0.041



Слика 30. Чаура $\varnothing 50/40 \times 40$, пречник графита 12 мм, покривеност 20%

Ø40H7	+0.025
	0
Ø50f6	-0.025
	-0.041

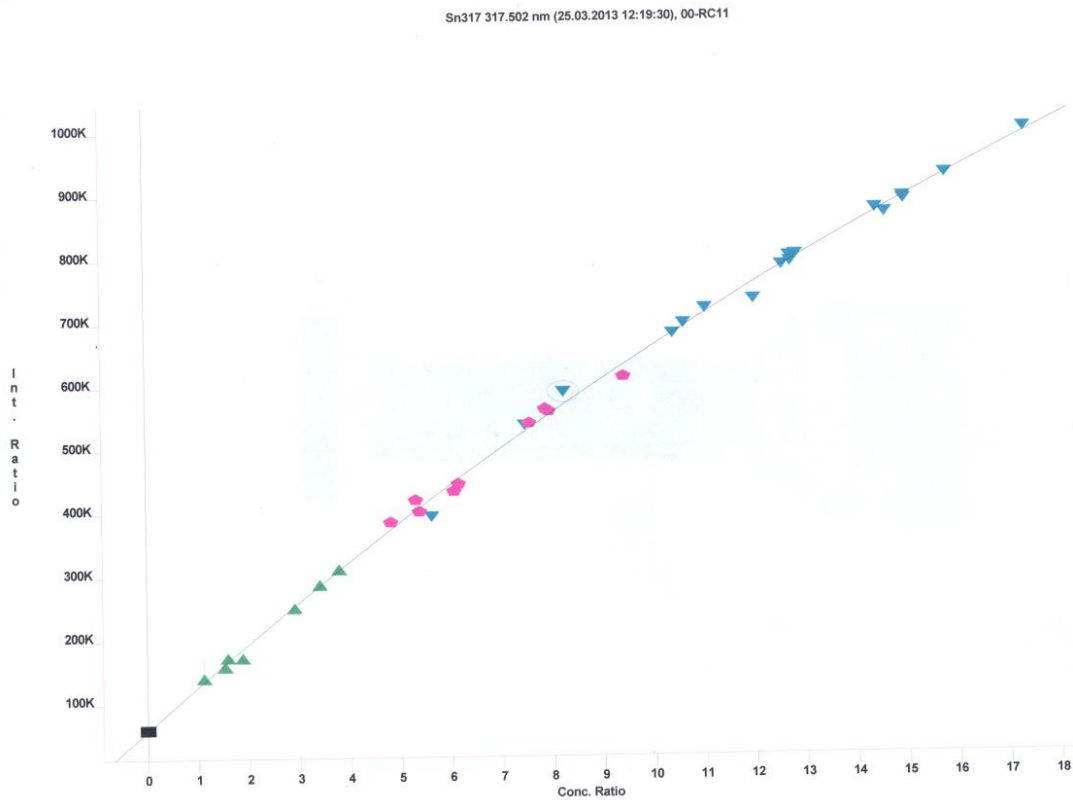


Слика 31. Чаура $\phi 50/40 \times 40$, пречник графита 12 мм, покривеност 30%

Хемијски састав $CuSn12$ и утицај легирајућих елемената одређен је спектрометријски у хемијској лабораторији Фасил а.д. у Ариљу (слика 32).

Табела 8. Хемијски састав $CuSn 12$ и утицај легирајућих елемената

Zn %	Pb %	Sn %	P %	Mn %	Fe %	Ni %	Si %	Mg %
0.150	0.290	12.618	0.006	<0.001	0.013	1.07	<0.001	0.000
Cr %	Te %	As %	Sb %	Cd %	Bi %	Ag %	Co %	Al %
<0.001	0.023	0.003	0.079	0.006	0.006	<0.001	<0.002	0.001
S %	Be %	Zr %	Au %	B %	C %	Ti %	Cu %	
0.003	0.000	0.001	0.005	0.000	<0.001	<0.000	85.731	



Слика 32. Калибрациона крива за Sn при таласној дужини од 317,502nm

У табелама 9. и 10. дате су механичке и физичке особине калајне бронзе *CuSn12*, које су добијене у механичкој лабораторији Фасил а.д., коришћењем стандарда SRPS.C.D2.300.

Табела 9. Механичке особине *CuSn12*, (стандард SRPS.C.D2.300) [89].

Материјал	Затезна чврстоћа Rm N/mm ²	Конвенционални напон течења Rp N/mm ²	Издужење А %	Тврдоћа НВ 10/1000	Запреминска маса Kg/m ³
CuSn	280	150	5	95	8.6x10 ³

Табела 10. Физичке особине *CuSn 12*, (стандард SRPS.C.D2.300)

Коефицијент температурног истезања 10 ⁻⁶ /К	18.5
Топлотна проводљивост W/мК	54
Специфична електрична проводљивост $\frac{m}{\Omega mm^2}$	6.2
Пермеабилност $\mu 100$	0.99997-1.01
Скупљање %	1.5
Подручије топљења °C	830-1000

Наведени графитни улошци урађени су под високим притиском и састоје се од графита и формалдехидне смоле. Избор је детерминисан температуром радне зоне, присутношћу корозивних материјала, као и оптерећењем лежаја. Због чињенице да се самоподмазујући лежај израђује спајањем разнородних материјала, неопходно је вршити контролу квалитета основног материјала (бронзе), као и графитних ламела. Контрола бронзе је урађена методом испитивање без разарања, односно рубно пенетрантима према ISO-DIN 4386-3 [90]. Испитивања графитних ламела урађена су у Синтеру у Ужицу на узорку који је дефинисан стандардом (46/11) [91]. Карактеристике графита које се испитују мерењем су: тврдоћа и порозност. При испитивању дебљина ламеле графита треба да буде управна на слојеве ламеле графита, тако да се мерење тврдоће врши управно

на слојеве. У табели 11. дата је графитна маст, која се користила за уходавање лежаја, након његове израде.

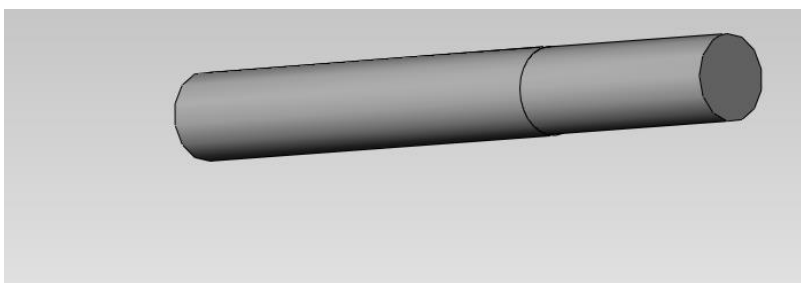
Табела 11. Графитна маст која се користила за уходавање лежаја

NLGI класа	NLGI 2
Ниво перформанси и одобрења	DIN 51502, KP2N-20, ISO 6743-9
Својства	Карактеристичне вредности
Кинематска вискозност на 40°C , mm^2/s	180
Тачка капања $^{\circ}\text{C}$	240
Промена пенетрације после 60 удараца на 25°C	280

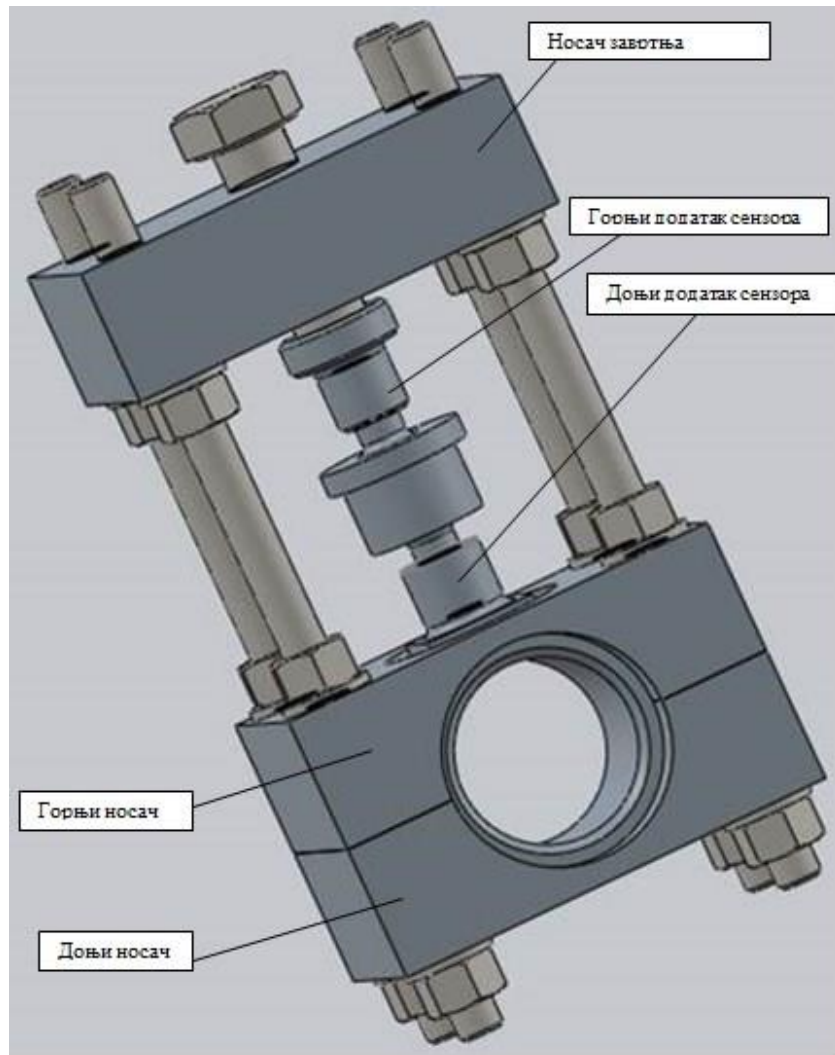
Графитна маст има огроман утицај на ток и обим абразивног трошења. Њен утицај се види само у периоду уходавања површина у контакту и релативном кретању, на тај начин што успорава процес атхезивног и абразивног хабања, смањујући количину издвојених абразивних честица.

5.2.3. Опрема

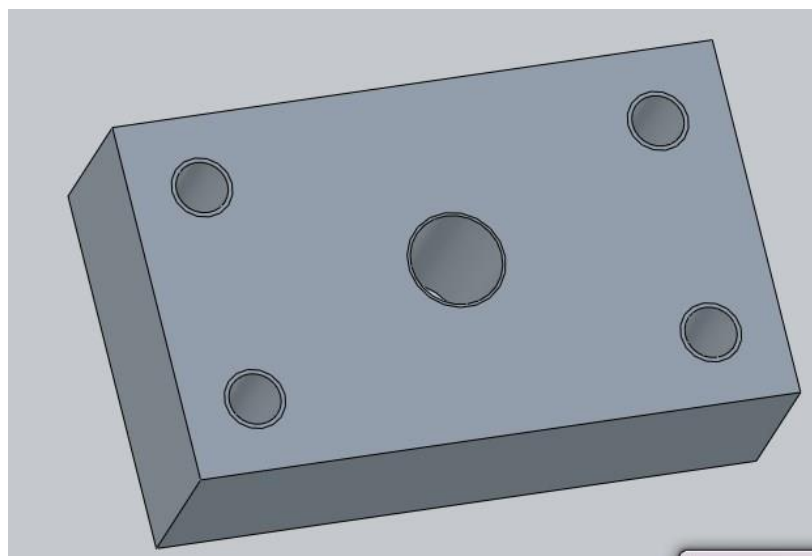
Опрема, која се користила при експерименталним истраживањима самоподмазујућих клизних лежаја, приказана је на (сликама 33-39).



Слика 33. Вратило



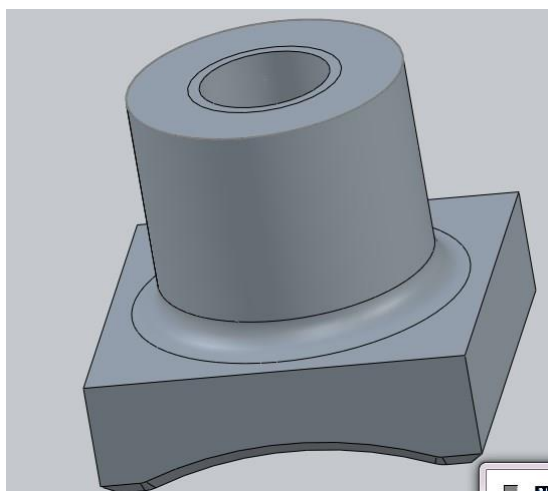
Слика 34. Склоп алата



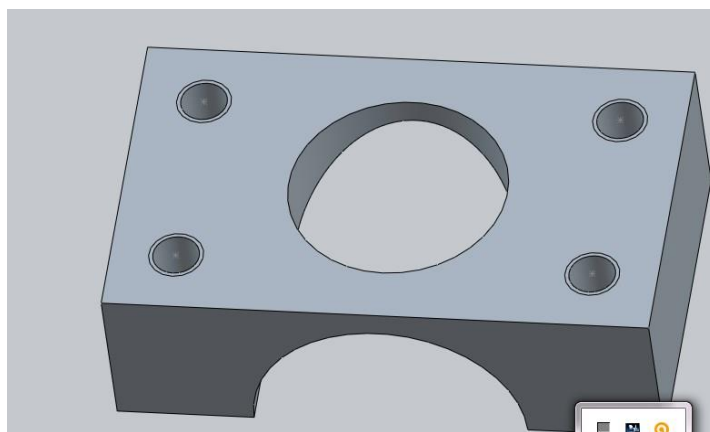
Слика 35. Носач завртња



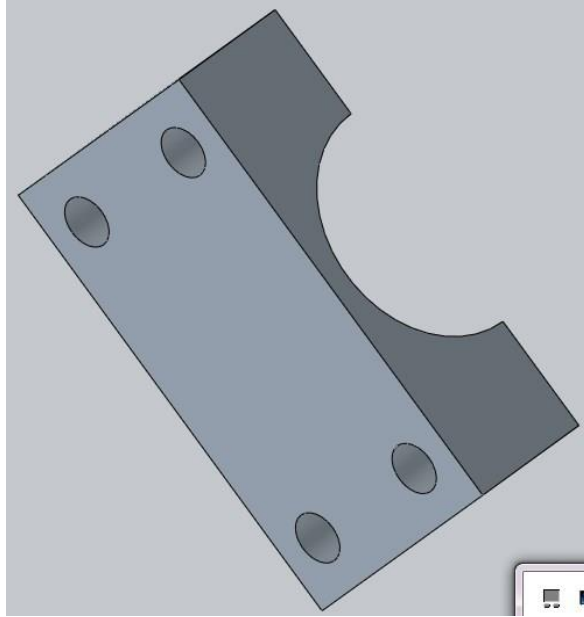
Слика 36. Горњи додаток сензора



Слика 37. Доњи додаток сензора



Слика 38. Горњи носач

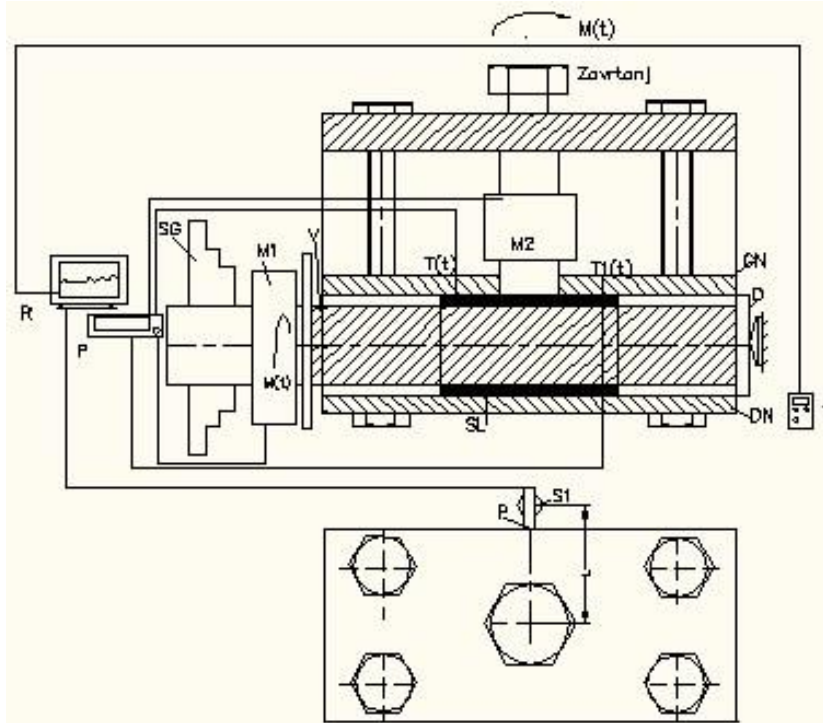


Слика 39. Доњи носач

који су конструисани и направљени, како би се омогућило мерење жељених физичких величина.

5.2.4. Мерни систем

Експериментална испитивања спроведена на самоподмазујућем лежају била су усмерена ка циљу: одређивања коефицијента трења и температуре при различитим клизним брзинама, различитим радијалним силама, различитом проценту покривености графитом и различитим пречницима графитних ламела. На (слици 40) приказана је шема мерне конфигурације за мерење величина неопходних за одређивање коефицијента трења на контакту самоподмазујућег лежаја и вратила.

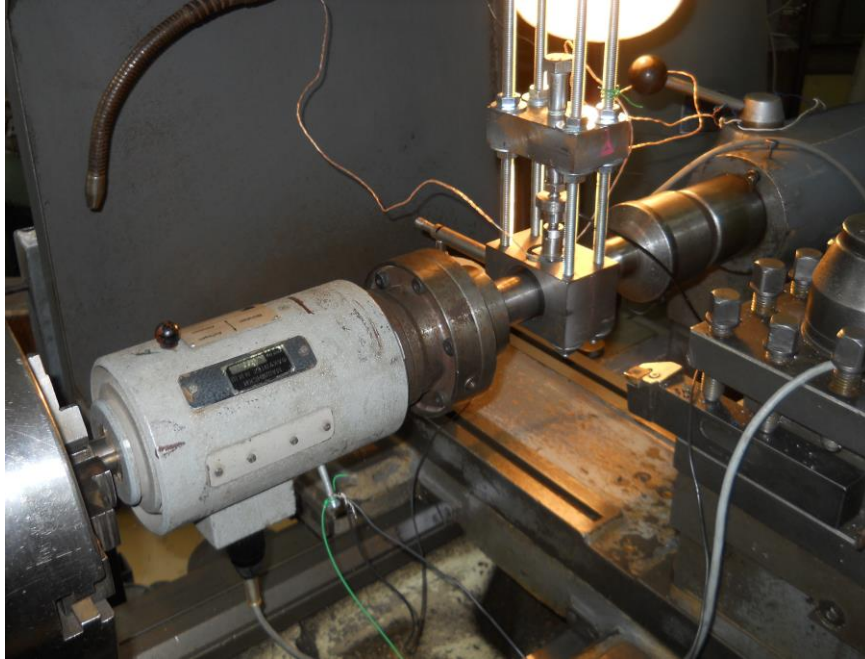


Слика 40. Шематски приказ мерне конфигурације

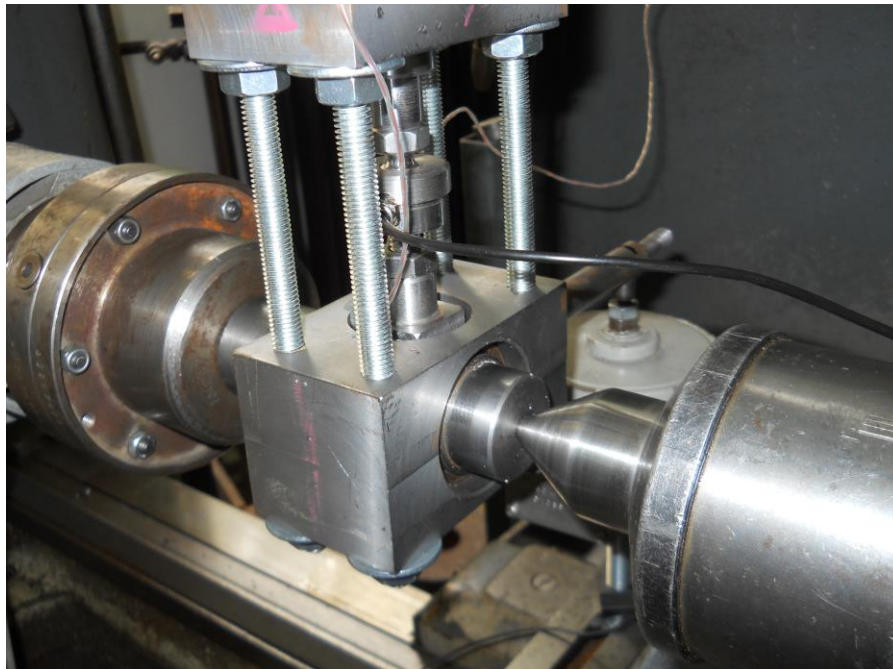
У табели 12. Дат је опис мерне конфигурације, а на сликама (41 и 42) мерно место са конфигурацијом.

Табела 12. Компоненте мерне конфигурације

R	Рачунарска јединица
P	Мерно – појачивачки уређај: National Instruments cDAQ-9178
SG	Стезна глава
M1	Сензор обртног момента: Hottinger Baldwin Messtechnik T1 (100 Nm)
V	Вратило
SL	Клизни лежај
T(t) и T1(t)	2 термопара типа К
M2 и S1	Сензор силе: Hottinger Baldwin Messtechnik S7M (500 N), сензор силе Hottinger Baldwin Messtechnik U9 (5 kN)
GN, DN	Горњи, доњи носач
D	Додатак сензора силе
P	Полуга дужине L
T	Термовизијска камера: FLIR E 50



Слика 41. Мерна конфигурација



Слика 42. Мерна конфигурација - детаљ

Конфигурација опреме била је прилагођена мерном систему. У табелама 13. и 14. дата су механичка својства и услови за побољшање челика E295 10050, који се користио за израду алата који се користио при приликом испитивања самоподмазујућег лежаја.

Табела 13. Механичка својства EN10050 E295 у побољшаном стању

Материјал	Затезна чврстоћа N/mm ²	Граница развлачења (0.2) N/mm ²	Издужење %	Сужење %
EN10050 E295	490-590	295	20(14)	-

Табела 14. Услови за термичку обраду EN10050 E295

t ⁰ C	t ⁰ C	t ⁰ C
Жарење	Каљење	Отпуштање
650-700	760-790	150-200

5.3. Технолошки режими

У најважније технолошке параметре спадају брзина клизања вратила v и радијална сила F_r . И један и други параметар су подједнако важни за испитивање клизних лежаја и важно је усагласити их, како међусобно, тако и са геометријским параметрима (чауре и графитних ламела). Избор геометрије алата са којим је могуће извршити испитивање самоподмазујућих чаура није циљ овог истраживања. До конкретних вредности технолошких параметара, које су дале оптималан коефицијент трења и температуру код самоподмазујућег лежаја дошло се након више сетова покушаја.

5.4. Експериментално одређивање коефицијента трења и температуре

Процеси трења и хабања представљају основни узрок губитака радне способности самоподмазујућих лежаја. Сила трења је основни параметар којим се квантифицира и мери процес трења, а за одређивање величине трења користи се коефицијент трења. Коефицијент трења је сложен триболошки параметар, који има стохастички карактер, услед бројних утицајних фактора. Па је због тога аналитички поступак одређивања коефицијента трења врло сложен. Због тога је примена експерименталне методе једноставнији поступак одређивања коефицијента трења. На слици 40. приказана је шема мерне конфигурације за мерење величина неопходних за одређивање коефицијента трења у контакту самоподмазујућег лежаја и вратила. Главно обртно кретање обезбеђује радна машина струг (SG) које преко сензора обртног момента (M1) и спојнице (S1) предаје

погонском вратилу (V). На рукавац вратила је постављен самоподмазујући лежај (SL) који је радијално и аксијално учвршћен горњим (GN) и доњим (DN) деловима носача. Кроз отвор горњег носача (GN) преко доњег додатка сензора силе (D), дејствује се на лежај радијалном силом која се индукује притезањем завртња, а интензитет силе се мери сензором силе (M2). Момент трења, мери се преко полуге (P) дужине $L = 150 \text{ mm}$, која је постављена управно на осу лежаја и круто везана за GN. Сензор S1 мери интензитет силе. Температура на самоподмазујућем лежају мери се термо паровима (T(t)) и (T1(t)) при чему термопар (T(t)) мери температуру на средини лежишне чауре, а (T1(t)) температуру при крају лежишне чауре (SL). Термовизијска камера (T) бележи површинске температуре склопа. Сви сензори, термопарови и термокамера повезани су са рачунарском јединицом (R) која врши аквизицију података.

При одређивању коефицијента трења полази се од Кулонове једначине којом се доводе у везу оптерећења и коефицијент трења у функцији времена на контакту два реална тела.

$$F_{\mu}(t) = \mu(t) \cdot F_{n(t)} \rightarrow \mu(t) = \frac{F_{\mu}(t)}{F_n(t)}, \quad (11)$$

Где су:

F_{μ} - сила трења,

F_n - нормално оптерећење.

При одређивању коефицијента трења пошло се од једначине (11). Сила трења се јавља услед релативног кретања вратила у односу на самоподмазујући лежај. Како је брзина транслярног кретања вратила сведена на нулу, сматра се да се сила трења јавља услед оптерећења (радијалне) силе и обртног момента. Минимална вредност обртног момента који изазива ротацију вратила, који савладава фрикционе отпоре контакта је момент трења, који је у функцији времена. Момент трења се добија као производ обимне силе у чаури и крака растојања.

$$M_{tr}(t) = F_r(t) \cdot L, \quad (12)$$

Коефицијент трења израчунат је преко услова једнакости момента трења у контакту чауре и вратила и момента којим цео систем делује на ослонац O2. Задатак

конструктора самоподмазујућих лежаја јесте да смањи коефицијент трења, како би се смањили непроизводни губици енергије, а истовремено смањило трење и хабање. Након избора технолошких параметара, започето је експериментално истраживање триболошких параметара код самоподмазујућег клизног лежаја.

Тип чауре који се користио у експерименталним истраживањима дат је ознаком:
XX_YY_ZZ_MM

Где је:

XX - пречник графитне ламеле

YY – проценат покривености чауре графитом

ZZ – клизна брзина

MM – вредност радијалне силе.

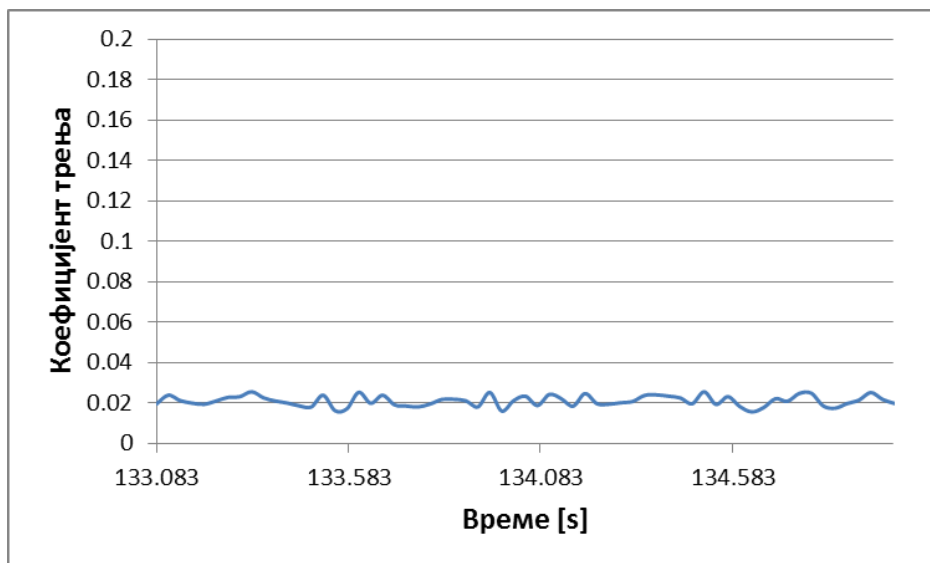
Добијени резултати при експерименталним истраживањима, приказани су дијаграмима у следећим примерима.

Пример 12_20_54_1500

На (сликама 43 и 44) дати су графици, који показују зависност коефицијента трења у зависности од промене пречника графитних ламела $\phi 12\text{ mm}$ при радијалној сили $Fr= 1500\text{ N}$, број обртаја 54 и покривености 20 %.



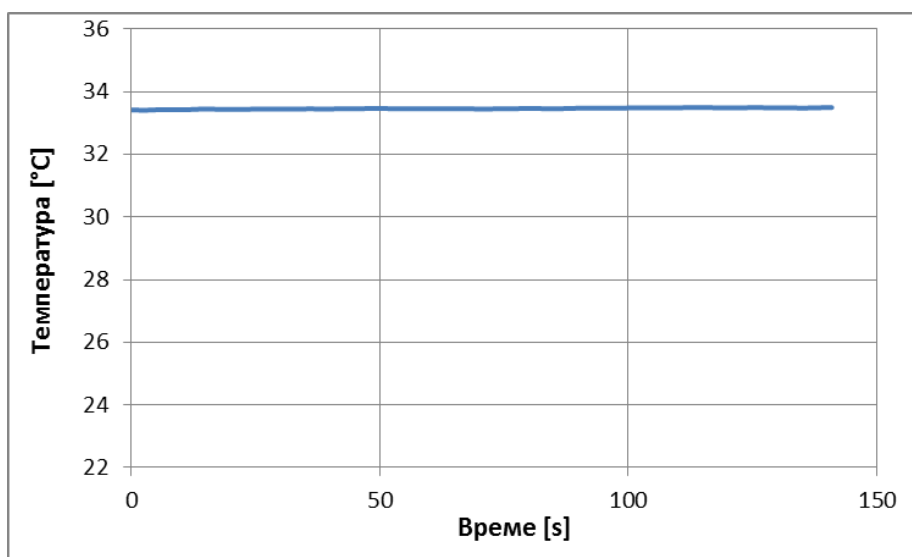
Слика 43. Радијално оптерећење 1539,6 N



Слика 44. Коефицијент трења $\mu = 0.023$

Пример 10_20_54_1500

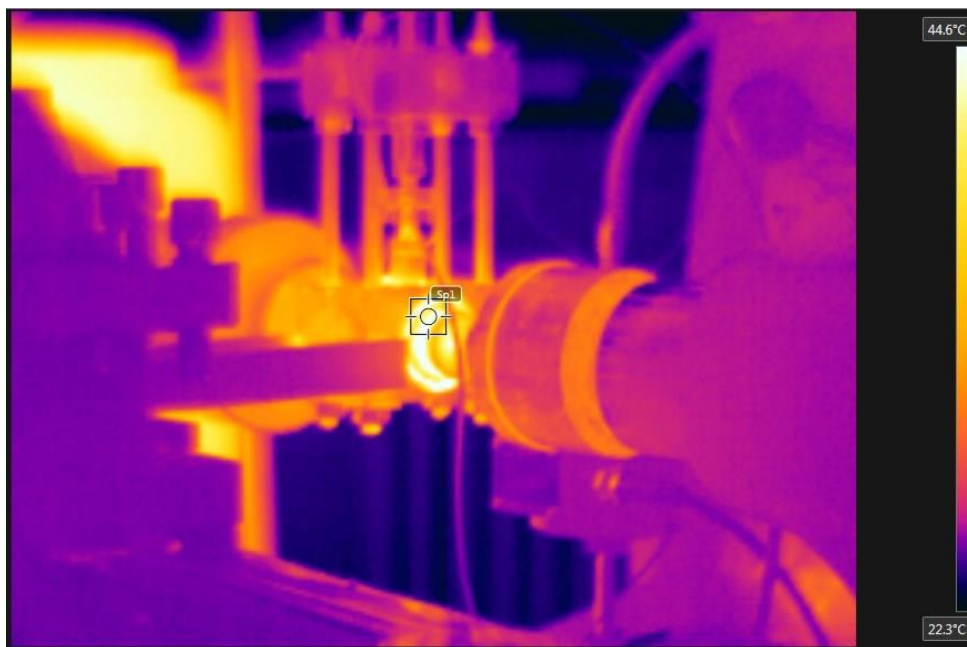
Мерење температуре код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_1500, коришћењем термопарова, (слика 45).



Слика 45. Температура мерена термопаром код самоподмазујућег лежаја ϕ 10_20_54_1500 износи $T = 31.5^{\circ}C$

Пример 8_20_54_1500

Мерење температуре код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_1500, термовизијском камером, (слика46).



Слика 46. Температура мерена код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_1500, $T = 43.5^{\circ}\text{C}$

Резултати добијени експерименталним истраживањима приказани су у табели 15.

Табела 15. Резултати добијени експерименталним истраживањима

Тип чауре	Коеф. трења	Температура
12_20_54_1500	0.023	$T=26^{\circ}\text{C}$
10_20_54_1500	0.039	$T=33.5^{\circ}\text{C}$
8_20_54_1500	0.079	$T=43^{\circ}\text{C}$
12_20_54_3000	0.045	$T=37.5^{\circ}\text{C}$
10_20_54_3000	0.055	$T=43.7^{\circ}\text{C}$
8_20_54_3000	0.09	$T=54.8^{\circ}\text{C}$
12_20_265_1500	0.011	$T=34.9^{\circ}\text{C}$
12_30_265_1500	0.099	$T=94.7^{\circ}\text{C}$

На основу добијених резултата експерименталним истраживањима код самоподмазујућих лежаја са 20 % покривености, види се да су се коефицијент трења и температура повећавали у два случаја: са повећањем вредности радијалне силе, као и са смањењем пречника графитних ламела. Поређењем 20% и 30% покривености, коефицијент трења и температура су се повећали са повећањем процента покривености, услед већег броја избушених отвора и постојања концентрације напона.

6. ТЕРМО-МЕХАНИЧКА АНАЛИЗА КАРАКТЕРИСТИКА РАДИЈАЛНИХ КЛИЗНИХ ЛЕЖАЈА СА ГРАФИТОМ ПРИМЕНОМ МЕТОДЕ КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА

Многи аутори су користили нумеричке симулације за проучавање генерисања топлоте у току трења два тела.

Vats и др. [92] су се бавили термичком анализом котрљајних лежаја и приказали су дистрибуцију температуре, топлоте и дисипацију топлоте кроз површину котрљајних лежаја. Алат који су користи за FEM анализу котрљајног лежаја је ANSYS.

Циљ Kushwaha [93] и др. анализе био је да се види колико се брзо дође до промене температуре у лежајевима. Симулација је показала да што је већа брзина ротације, брже систем достигне стабилно стање.

Kennedy [35] је за проучавање утицаја различитих параметара материјала на површинске температуре у два клизна система користио одређени софтвер. Постигнути су добри резултати у поређењу аналитичких предвиђања и експерименталних мерења температуре.

Starostin [36] је користио методе коначних елемената за анализу температуре услед трења у подмазаним или обложеним лежајима. Анализе показују да је топлотна проводљивост облога или материјала за облагање најутицајнији термички параметар који контролише температуру.

Термичку анализу ротирајућег цилиндра изложеног грејању на одређеној површини, док је остатак површине подвргнут хлађењу су урадили Gecim и Winer [66]. Они су парцијалне диференцијалне једначине и граничне услове решили коришћењем коначних Fourier -ових трансформација. Patula [67] је урадио сличну анализу

Bishop и Etlis [68] су сматрали да пораст температуре зависи пре свега од оптерећења, брзине. Они су анализирали термоеластичну интеракцију вратила у пластичној чаури. Топлота трења је израчуната као производ коефицијента трења, контактеног притиска и брзине клизања. Сматрало се да се вратило проширило радијално према споља услед пораста температуре. Ширење чауре је занемарено, јер пораст температуре није знатан.

Ulysee and Khonsari [69] су дали опште услове прелаза топлоте и хлађења код

цилиндра. Коришћењем методе Fourier -ове трансформације, добили су аналитички израз решења стабилног стања.

Khonsari and Kim [71], су урадили анализу 2-D а коначних елемената за проучавање термоеластичног понашања вратила лежајева. Они су развили два модела, један са усклађеним вратилом и лежајем и други са аксијалним одступањем. Фактор расподеле топлоте је израчунат на основу односа површина контакта вратила и лежаја. Резултати су показали да конвулзије имају тенденцију "поравњања" са повећањем времена.

Hazlett and Khonsari [72,73] су развили термомеханички модел помоћу коначних елемената у софтверском пакету ANSYS. Термичка анализа је прво урађена за проучавање ефекта загревања трењем на контактної површини чауре и читавој површини вратила. Резултати термичке анализе су послужили као топлотна оптерећења за решавање термоеластичног модела. Положај ових елемената се користи да би се пронашле варијације зазора и контактних сила током времена.. Када трење премаши граничну вредност, претпоставља се да ће лежај вибрирати. На основу резултата термомеханичке анализе, Hazlett and Khonsari су утврдили да је оштећење вратила у лежају нелинеарно са временом.

Wang, Congy, Cusano [74,75] су урадили термичку анализу која је слична поступку анализе извођења Hazlett and Khonsari. Расподела топлоте између вратила и лежаја је урађена итеративно поређењем површинске температуре радијалних и аксијалних модела.

Углавном су рађене термичке анализе на основу математичког модела генерисања топлоте.

6.1 Трење и фрикционо загревање

Трење настаје кад год два чврста тела клизе једно преко другог. У току тог процеса код клизног лежаја, рад силе отпора се претвара у топлоту, што проузрокује пораст температуре вратила и чауре. Механизам којим се врши та трансформација може да варира, зависно од услова клизања. Познато је да су трење чврстих тела и повезани фрикциони процеси, укључујући и фрикционо загревање, концентрисани у стварној зони контакта између два тела у релативном кретању. Већина аутора се управо слаже да се скоро сва енергија, која се губи при фрикционом контакту, трансформише у топлоту.

Пораст температуре вратила и лежаја настаје услед дисипације енергије, познате и као фриксионо загревање.

У случају кад два тела клизе једно преко другог, када се тело 1 креће брзином v_1 у односу на површину контакта и тело 2 се креће брзином v_2 у односу на исту површину контакта, брзина промене енергије, која се губи при клизном контакту, одређује се на основу силе трења и релативне брзине клизања.

Ако се претпостави да се ова сва енергија губи као топлота на клизним површинама у оквиру стварне површине контакта, онда је брзина промене генерисане топлоте по јединици контактне површине, q_t , дата једначином (13):

$$q_t = \mu \cdot p \cdot \Delta v, \quad (13)$$

где је μ коефицијент трења, p је контактни притисак и $\Delta v = v_2 - v_1$ је релативна брзина клизања.

Ова топлота, генерисана услед трења, се расподељује у оба тела у контакту, а расподела се може израчунати према Фуријеовом закону. Фуријеов закон провођења топлоте у изотропном чврстом телу, које се креће брзином v се може написати према једначини (14).

$$\nabla \cdot k \nabla T + \dot{Q} = \rho C \frac{dT}{dt} = \rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T \right), \quad (14)$$

где је \dot{Q} генерисана топлота по јединици запремине, k је топлотна проводљивост, ρ је густина и C је специфична топлота.

Пошто нема унутрашње генерисане топлоте за случај који се односи на овај рад, и када је k равномерна и константна, једначина (14) се може написати у облику датом једначином (15):

$$k \nabla^2 T = \rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T \right), \quad (15)$$

или скраћено:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\kappa} \frac{dT}{dt}, \quad (16)$$

где је $\kappa = \frac{k}{\rho C}$ топлотна дифузност.

Фрикционо загревање и резултујућа температура контакта могу имати значајан утицај на триболошко понашање и отказ клизних компоненти. Температуре на површини и у близини површине могу да постану довољно високе да проузрокују промене у структури и својствима клизајућих материјала, могу да изазову оксидацију површине или чак и топљење тела у контакту. Ови порасте температуре могу да буду разлог и за промене у понашању на трење и хабање материјала. Како би се нумеричким методама симулирало понашање лежаја у експлоатацији коришћен је софтверски пакет ANSYS. Генерисана топлота услед трења се у софтверском пакету ANSYS израчунава коришћењем фактора загревања и дата је једначином (17):

$$q = FHTG \cdot \tau \cdot v = FHTG \cdot \mu \cdot p \cdot v \quad (17)$$

где је q укупна генерисана топлота, $FHTG$ фактор дисипације који узима у обзир део фрикционе енергије претворен у топлоту, τ је фрикциони напон који зависи од контактне притиска и коефицијента трења и v је релативна брзина клизања. Током спроведених анализа сматрано је да је фактор дисипације једнак јединици, то јест претпоставља се да се сва енергија, која је генерисана при фрикционој интеракцији претворена у топлотну енергију. Генерисана топлота на двема површинама које су у фрикционој интеракцији, се дели према следећим једначинама (18) и (19).

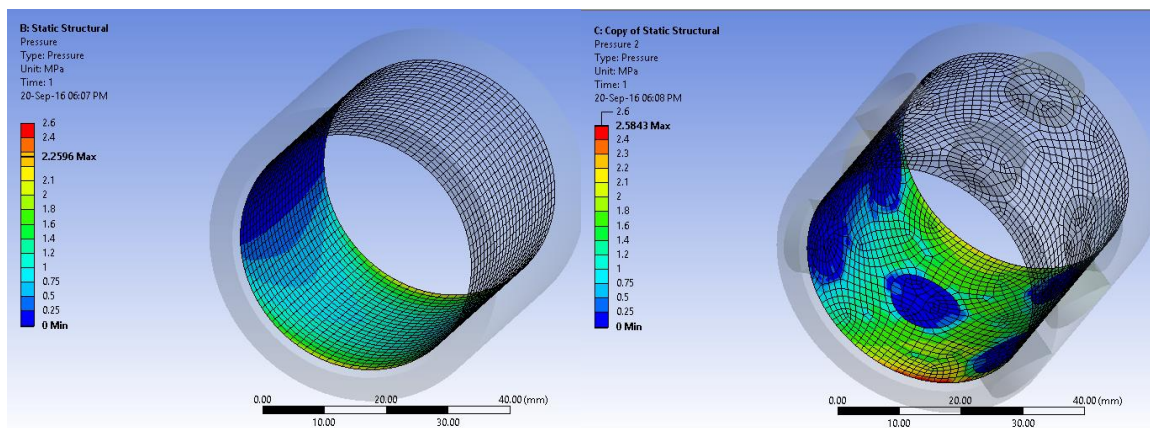
$$q_s = FWGT \cdot q, \quad (18)$$

$$q_b = (1 - FWGT) \cdot q, \quad (19)$$

где q_s и q_b топлота претворена на страни вратила и топлота претворена на страни лежаја, и $FWGT$ је фактор расподеле топлоте (колико је топлоте отишло у вратило, а колико у чауру). Анализа разматраних литературних извора наводи на закључак да је већина аутора у својим истраживањима чинила две претпоставке: прво да се укупна енергија, која је генерисана услед трења, претвара у топлоту, и друго, да се једнаки делови енергије преносе на оба тела у контакту.

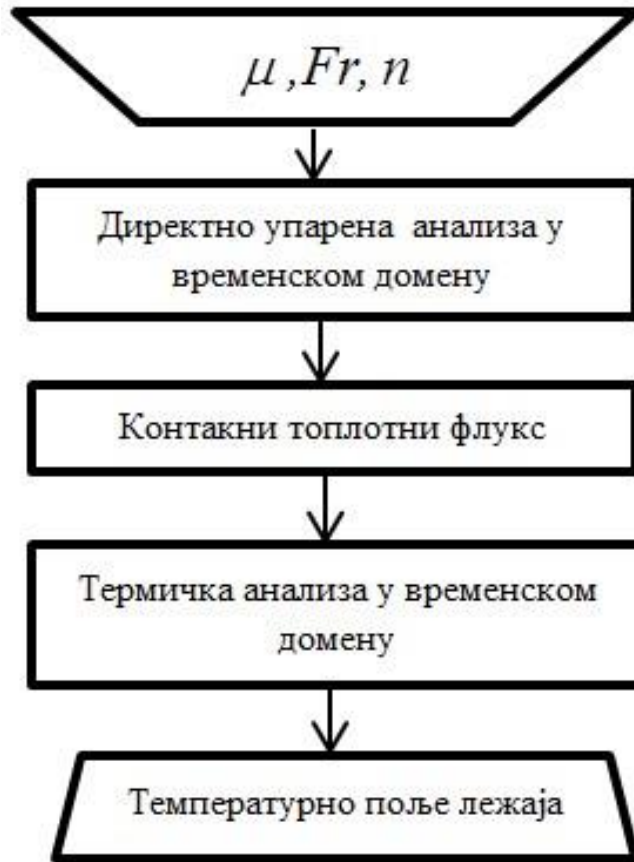
6.2 Апроксимација геометрије

На основу израза 17 може се закључити да количина генерисане топлоте не зависи директно од механичких својстава материјала, тј. зависи посредно од материјала у контакту преко коефицијента трења и контактнoг притиска. Уколико је коефицијент трења познат, да би се одредила количина генерисане топлоте потребно је одредити само контактни притисак. Контактни притисак зависи од материјала у контакту преко еквивалентног модула еластичности и Пуасоновог коефицијента. Уколико се погледа расподела контактнoг притиска код чауре израђене о бронзе и чауре израђене од бронзе са графитним умецима (слика 47) може се закључити да је наведена расподела веома слична. Дисконзитет који изазива постојање чауре не увећава значајно ниво контактних напона. Из наведених разлога, може се увести апроксимација да се занемари графит и да се сматра да је чаура израђена само од бронзе. Применом експериментално одређеног коефицијента трења за комбинацију материјал вратила челик и чаура израђена од бронзе са графитним умецима добијамо слично триболошко стање што оправдава уведену апроксимацију.



Слика 47. Контактни притисак у чаури без графита и са 30% покривености графитом

Апроксимација је уведена да би се поједноставио нумерички проблем и да би се омогућио да се проблем разматра без утицаја покривености легаја јер је наведени утицај већ узет преко вредности коефицијента трења.

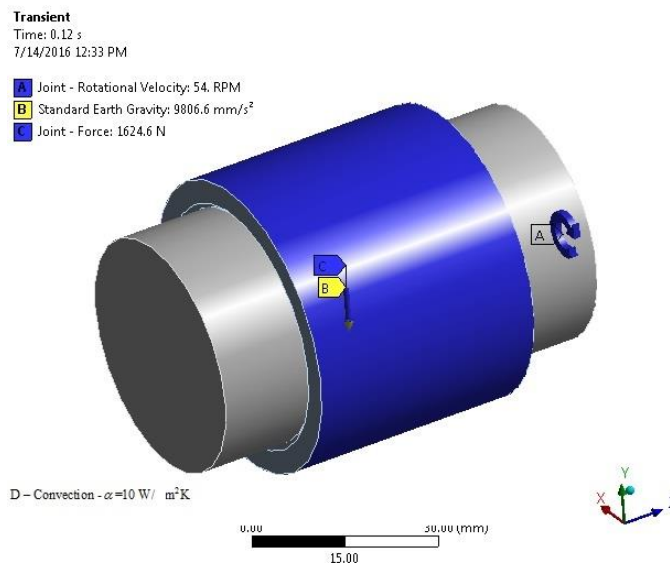


Слика 48. Шематски приказ алгоритма нумеричког прорачуна

Шематски приказ алгоритма нумеричког прорачуна приказан је на (слици 48). Улазни параметри у директно спрегнуту анализу у временском домену су коефицијент трења, радијална сила и број обртаја. Резултат директне упарене анализе је вредност генерисаног топлотног флуksа при номиналним радним условима. Наведени топлотни флуks је константан током времена што се и потврђује на основу дијаграма максималног топлотног флуksа (слика 53). Након почетног инервала (0 - 0.1 s) током кога је вредност радијалне силе и број обртаја достигао своју вредност из експерименталних истраживања, дијаграм је константан у временском интервалу 0.1- 0.12 s када радијална сила и број обртаја имају своје пуне вредности. Одређена вредност контактног топлотног флуksа је упросечена и искоришћена је као гранични услов у термичкој анализи у временском домену. На овај начин је могуће одредити температурно поље лежаја у било ком временском тренутку. Предност предложене процедуре је што се уз умерену употребу рачунарких ресурса и за релативно кратко време може одредити температура лежаја.

Употреба само директне упарене анализе није рационална јер би за одређивање температуре лежаја у дужим временским интервалима било потребно и неколико месеци рачунарског времена. За разлику од других аутора који су математички одређивали контактни топлотни флуks, а онда тако одређени флуks користили у термичким симулацијама, по први пут је генерисани топлотни флуks услед трења код клизних лежајева одређен симулационим путем.

Нумеричка анализа је урађена у софтверу ANSYS Workbench као директно спрегнута структурно-термичка анализа у временском домену. Поставке анализе одражавају експерименталну поставку која је описана у претходном поглављу. Модел оптерећења и гранични услови су дефинисани коришћењем три зглоба да би се узела у обзир ротација вратила и применио притисак лежаја на вратило (слика 49). Пренос топлоте са модела на околину је дефинисан са свих површина са коефицијентом преноса топлоте $10 \text{ W/m}^2\text{K}$. Било је неопходно да се конвекција дефинише преко комадндног интерфејса пошто ANSYS Workbench тренутно не располаже графичким интерфејсом за корисника за директно структурно-термичко спрезање.



Слика 49. Модел оптерећења и гранични услови

Карактеристике материјала су дате у табели 16. Својства материјала су у току анализе сматрана константним пошто је време симулације било кратко (0.12 секунди) и очекиване температуре су биле испод $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Табела 16. Параметри коришћени за симулацију преноса топлоте

Параметар	Вредност
Štefan–Bolcmanова константа, W/m^2K^4	5.67×10^{-8}
Специфични топлотни капацитет челика, J/kgK	434
Коефицијент проводљивости челика, W/mK	60.5
Коефицијент конвективног преноса топлоте са челика на ваздух, W/m^2K	10
Специфични топлотни капацитет бронзе, J/kgK	385
Коефицијент проводљивости бронзе, W/mK	401
Коефицијент конвективног преноса топлоте са bronze на ваздух, W/m^2K	10

Да би се извршило директно спрезање топлотног и структурног поља, коришћен је коначни елемент SOLID 226, ANSYS [95] за генерисање мреже коначних елемената. Дискретни модел се састоји од 180783 чворова који чине 40691 коначни елеменат.

Контакт између вратила и лежаја је дефинисан као фриксиони контакт, са вредношћу коефицијента трења добијеном на основу напред описаних експерименталних истраживања. Контакт је моделиран помоћу ANSYS CONTA174 и TARGE17 елемената, који одговарају вратилу као ”контактној” површини и лежају као ”циљној” површини. Контакт је третиран као симетричан уз примену проширене Лагранжеве формулације. Крутост контактна је аутоматски ажурирана у свакој итерацији нумеричког решавања.

Извршена је и анализа утицаја величине коначног елемента на резултате симулације. Претпостављено је да резултати симулације не зависе од величине мреже, ако је разлика вредности еквивалентног напона и укупне деформације за две узастопне мреже мања од 3 %. Максимално ”изобличење” (skeweness) коначног елемента је било 0.63905, што указује на квалитет мреже коначних елемента и веродостојност резултата симулације. Анализа је извршена са фиксираним временским кораком од 0.005 s. Одређено је да је изабрани временски корак довољан да обезбеди неосетљивост резултата на његову величину. Нумеричке једначине су решаване пуном Њутновом методом.

Софтверу је задато да рачуна генерисану топлоту услед трења, преко командног интерфејса. Командни интерфејс, је приказан на (слици 50).

! Commands inserted into this file will be executed just after the contact region definition.
 ! The type number for the contact type is equal to the parameter "cid".
 ! The type number for the target type is equal to the parameter "tid".
 ! The real and mat number for the asymmetric contact pair is equal to the parameter "cid".

! The real and mat number for the symmetric contact pair(if it exists) is equal to the parameter "tid".

! Active UNIT system in Workbench when this object was created: Metric (m, kg, N, s, V, A)

! NOTE: Any data that requires units (such as mass) is assumed to be in the consistent solver unit system.

! See Solving Units in the help system for more information.

keyopt,cid,1,1

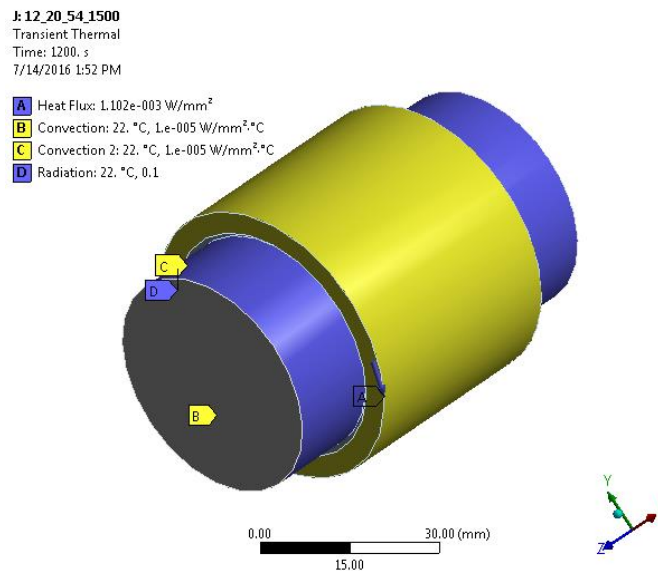
rmodif,cid,15,1 - **FHTG**

rmodif,cid,18,0,5 - **FWGT**

Слика 50. Командни интерфејс преко кога је задата команда за прорачун генерисања топлоте услед трења.

6.3 Термичка анализа

Дискретан модел је пребачен у термичку анализу у временском домену. Контактни флукс је упросечен и у термичкој анализи искоришћен као гранични услов. Модел и гранични услови приказани су на (слици 51).

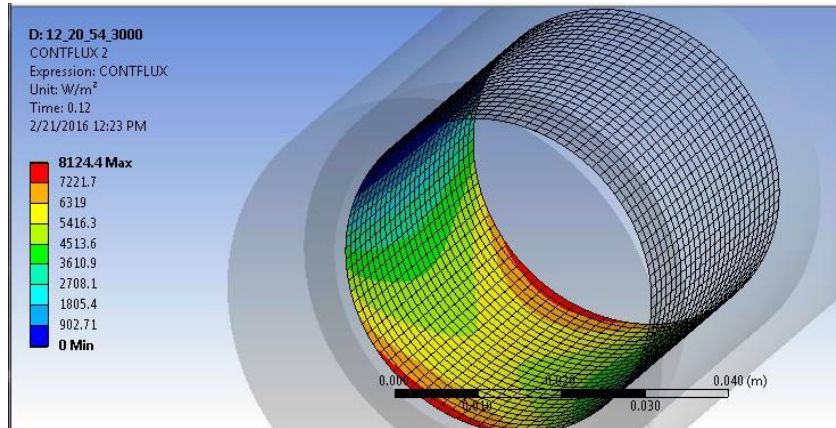


Слика 51. Термичка анализа у временском домену.

У наставку су приказани неки од резултата добијених наред описаном процедуром.

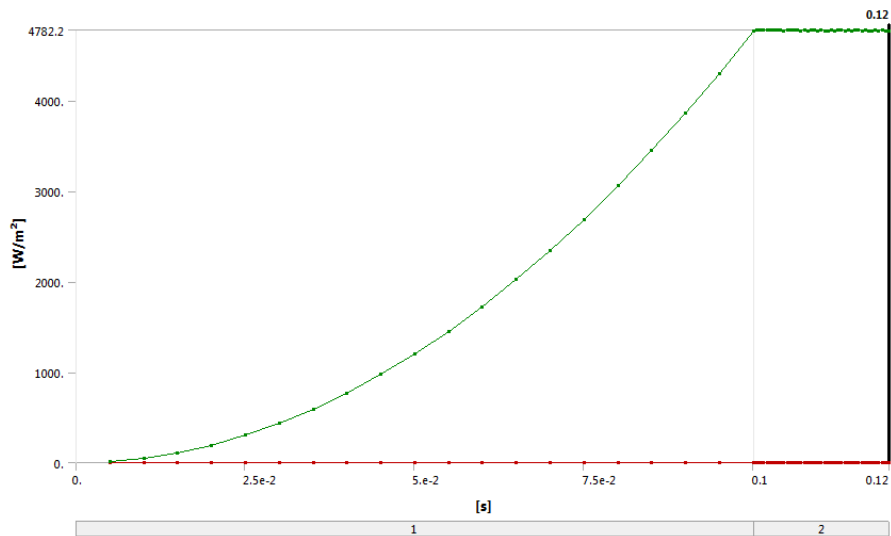
Пример 12_20_54_3000

Одређивање контактнoг топлoтнoг флукса код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_3000 примeнoм структурне анализe, (слика 52).



Слика 52. Контактни топлoтни флукс код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_3000

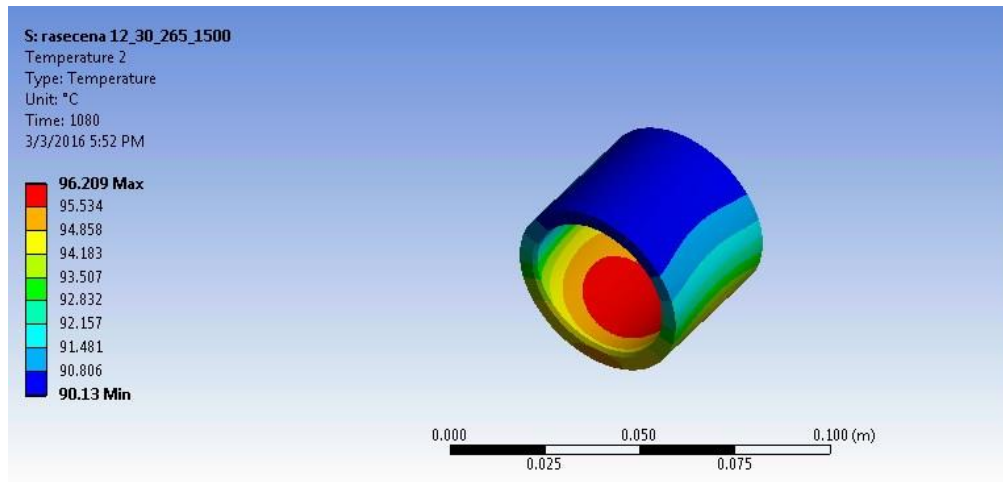
На (слици 53) приказан је дијаграм максималног контактнoг топлoтнoг флукса.



Слика 53. Дијаграм максималног контактнoг топлoтнoг флукса

Пример 12_30_265_1500

Одређивање температуре код самоподмазујућег лежаја 12_30_265_1500 примeнoм термичке анализe, (слика 54).



Слика 54. Температура добијена термичком анализом код самоподмазујућег лежача 12_30_265_1500

У табели 17. дат је преглед резултата добијених применом експерименталне и нумеричке методе.

Табела 17. Упоредни преглед резултата добијених применом експерименталног и нумеричког истраживања самоподмазујућих лежача различитих типова чаура.

Тип чауре	Коеф. трења	Температура добијена експерименталном методом	Температура добијена нумеричком методом	Средња вредност контактнoг топлотнoг флуksа	Максимална вредност контактнoг топлотнoг флуksа
12_20_54_1500	0,023	T=26 ⁰ C	T=28.9 ⁰ C	1102 W/m ²	2103 W/m ²
10_20_54_1500	0,039	T=33.5 ⁰ C	T=28.3 ⁰ C	1917.5 W/m ²	3575 W/m ²
8_20_54_1500	0,079	T=43 ⁰ C	T=45 ⁰ C	3698 W/m ²	7213 W/m ²
12_20_54_3000	0,045	T=37.5 ⁰ C	T=37.3 ⁰ C	4604 W/m ²	8124 W/m ²
10_20_54_3000	0,055	T=43.7 ⁰ C	T=38.6 ⁰ C	5911.3 W/m ²	9297 W/m ²
8_20_54_3000	0,09	T=54.8 ⁰ C	T=50.7 ⁰ C	8621.9 W/m ²	16219 W/m ²
12_20_265_1500	0,011	T=34.9 ⁰ C	T=30.5 ⁰ C	2538 W/m ²	4773 W/m ²
12_30_265_1500	0,099	T=94.7 ⁰ C	T=95.5 ⁰ C	22301 W/m ²	40483 W/m ²

Самоподмазујуће чауре су биле изложене различитим радним условима: - Исти број обртаја 54 min⁻¹, а различита радијална оптерећења 1500 N и 3000N. - Различити бројеви обртаја 54 min⁻¹ и 265 min⁻¹ иста радијална сила од 1500 N. - Различити пречници графитних ламела ϕ 12mm, ϕ 10mm, ϕ 8mm, различита радијална оптерећења 1500 N и 3000 N, различити бројеви обртаја 54 и 265 min⁻¹ и различита покривености 20 и 30 %. - Исти пречник графитних ламела, исти број обртаја и исто оптерећење, а различита покривеност од 20% и 30%. На основу вредности резултата наведених у табели 17, види се да се резултати и поред свих апроксимација јако добро поклапају са експериментом. С'обзиром да је урађено осам примера то не може бити случајност.

7. ЗАКЉУЧАК

Рад многих машина у нашем свакодневном животу зависи од контактних површина приликом кретања. Ове површине је потребно подмазивати како би се обезбедила трајност. Како би се достигли предвиђени параметри учинка машине трење, хабање и оштећења која се догађају треба смањити и без подмазивања. У самим почетцима развоја клизних лежаја при процесу конструисања углавном су се користила емпиријска знања о материјалима и основни аспекти моделирања замора материјала и механике. Али, због захтева за високим перформансама које модерна индустрија намеће за клизне лежајеве, емпиријско знање више није довољно. Клизни лежајеви су уопштено изузетно поуздане компоненте, али када откажу, главни узрок је често на површини, нпр. слабо подмазивање, трења, хабање, високе температуре услед трења, итд., где је знање о конструисању и трибологији веома важно. Због овога је истраживање, разумевање конструкционо триболошких параметара и развој иновативних триболошких решења постало тако важно у индустрији лежајева. На одређивање конструкционо триболошких параметара лежаја највише утичу :

Технолошки параметри: брзина клизања, број обртаја вратила, интензитет и карактер оптерећења, време трајања експеримента и др.

Триболошки параметри: коефицијент трења, избор средстава за подмазивање (чврсто мазиво - графит), хабање, дизајн лежаја и избор материјала и квалитет обрађених површина лежаја, повећање температуре.

Термодинамички параметри: коефицијент преноса топлоте.

У циљу добијања клизног лежаја са што бољим триболошким карактеристикама коришћен је графит који има највећу отпорност на високе температуре од свих познатих материјала. Не топи се при нормалном притиску, него сублимира, без претходног губљења чврстоће. Како повишена температура увек има негативне последице на клизни пар тако се обратила пажња на проценат графита (покривеност) и брзину клизања које утичу на ниво температуре у зони контакта.

Предмет ове дисертације јесте да пружи техничке податке који се могу користити као параметри при конструисању и подмазивању. За истраживање у раду коришћене су експерименталне и нумеричке методе.

Нумеричке методе су коришћене за симулацију експлоатационог понашања самоподмазујућих клизних лежаја. Термо механичка анализа је рађена применом ANSYS софтвера. Једно од најчешћих питања када МКЕ треба да реши проблем је "Колико су тачни резултати?" Увек се поставља исто питање. Аналитичар почетник уобичајено постављају то питање као " Оно што видим у експерименту, да ли ћу видети на екрану?" Аналитичари са искуством знају да је боље поставити питање "Да ли ћу на питање које сам поставио, добити прави одговор?" У многим случајевима, постојаће значајне разлике између експерименталног дела и МКЕ симулације. Теоретски, резултати се не морају разликовати. Па зашто, се већина резултата које добијају аналитичари не поклапа са експерименталним резултатима? Због тога што је тешко поставити довољно правих питања о перформансама структуре. Тако се и у овој докторској дисертацији резултати добијени експерименталном и нумеричком методом разликују за око 10 %.

Важно је знати колика је температура, код самоподмазујућих лежаја. Зашто? Повишена температура може да буде или последица генерисања топлоте, или услова у којима се контакт одвија. Физичка суштина процеса генерисања се заснива на трансформацији механичке у топлотну енергију на контакту тела која се релативно крећу, а оптерећена су неком силом и она је иста код свих облика њене примене. Спољњи извори топлоте лежаја узрокују загревање лежаја, али се лежај најчешће загрева услед повећаног трења, које треба смањити на најмању могућу меру. Са променом температуре коефицијент трења може да расте, да опада или на неки други начин да се мења, што зависи и од материјала од кога је направљен самоподмазујући лежај. Како се са повећањем трења клизног лежаја ослобађа топлота, то код покретних делова разних машина може доћи до прегревања. Утолико се више мора обратити пажња на међусобни утицај трења и температуре на клизни лежај. На основу обе методе испитивања изведени су следећи закључци:

При броју обртаја 54 min^{-1} и различитим радијалним оптерећењима 1500 N и 3000N коефицијент трења је мањи при сили од 1500 N. Због тога што са повећањем оптерећења расте и сила трења, јер расте реална површина контакта, самим тим повећавају се температура и коефицијент трења. Па је тако при сили од 1500 N, површина контакта мања, а самим тим температура и коефицијент трења су мањи него при дејству силе од 3000N. Величина коефицијента трења у великој мери зависи од оптерећења, брзине

клизања и хрпавости површина. Основне врсте хабања које се јављају код ових лежаја су атхезивно и абразивно хабање. Интезитет хабања зависи од оптерећења и брзине клизања, па се као критеријум при конструисању и прорачуну самоподмазујућих лежаја користи pv вредност за изабрани материјал. Поређења ради коришћени су примери 12_20_54_1500 и 12_20_54_3000 и одређена је њихова pv вредност. Код 12_20_54_1500 вредност је $pv = 0.11$, а код 12_20_54_3000 вредност је $pv = 0.20$. Теорија каже да у случајевима трења грубљих контактних површина и површина где у тачки додира владају велики притисци, количина топлоте која се ослобађа је већа, што условљава пораст коефицијента трења. Добијени резултати поклапају се са теоријом и у свим примерима расту температура и коефицијент трења при повећању оптерећења, односно неповољније резултате дају примери са оптерећењем од 3000N. Са аспекта оптималне функције лежаја пораст температуре самоподмазујућег лежаја, сматра се негативном појавом. Како би се смањило утицај повећаног оптерећења, неопходно је извршити смањење зазора, јер то повећава носећу површину лежишта и снижава јединични притисак, који утиче на вредности коефицијента трења и температуре.

При различитим бројевима обртаја 54 min^{-1} и 265 min^{-1} и радијалном силом од 1500 N коефицијент трења је мањи при 265 min^{-1} . Фрикционе особине графита су последица слабих веза између слојева који могу да клизе један преко другог, што има за последицу стварање танког филма графита на додирним радним површинама. Овако настао раздвајајући клизни слој спречава суво трење и метални додир, које је карактеристично за графитне лежаје. Под дејством оптерећења и већег броја обртаја у овом случају 265 min^{-1} , графит се брже “отире”- смиче и подмазује лежај, што за последицу има смањење коефицијента трења и температуре.

При различитим пречницима графитних ламела $\phi 12 \text{ mm}$, $\phi 10 \text{ mm}$, $\phi 8 \text{ mm}$, и при различитим радијалним оптерећењима 1500 N и 3000 N, различитим бројевима обртаја 54 и 265 min^{-1} и различитој покривености 20 и 30 %. Најмањи коефицијент трења се остварује код чауре са графитном ламелом пречника $\phi 12 \text{ mm}$. Површина покривености код чауре са пречником графита износи 1017.36 mm^2 . Што у поређењу са друга два пречника графитних ламела $\phi 10 \text{ mm}$ и $\phi 8 \text{ mm}$, заузима највећу површину бронзане чауре. Већи проценат (дебљина) мазива по теорији смањује коефицијент трења.

У прекси се самоподмазујући клизни лежаји производе са 25% покривености графитним ламелама. Истраживања у овој дисертацији између осталог кретала су се у правцу утицаја процента покривености графитним ламелама. Разматран је случај 12_20_265_1500 са 20% и 12_30_265_1500 са 30% покривености графитним ламелама. Показало се да најмању вредност температуре и коефицијента трења има чаура са 20 % покривености. Узрок пораста коефицијента трења код 30 % у односу на 20% покривености чауре графитним ламелама јесте, што она има највећи број избушених отвора који служе да би се у бронзану чауру убациле графитне ламеле (чврсто мазиво). Велики број отвора представља извор концентрације напона. Тако велики број графитних гнезда прекида ток напонских линија, а материјал може да прими само незнатно оптерећење и стога је његова чврстоћа незнатна. Услед мале чврстоће, јављају се деформације које доводе до бржег контакта вратила и чауре на појединим местима, што доводи до повећања коефицијента трења и температуре. Топлотни извори и понори проузоркују комплексно топлотно ширење, које ствара додатна топлотна оптерећења. Топлотна оптерећења такође утичу на крутост лежаја и индиректно мењају развијену топлоту на контактним површинама лежаја. Да би се повећала динамичка издржљивост самоподмазујућег лежаја, смањила могућност деформације и величина температуре и коефицијента трења препоручује се тренирање материјала. Тренирање се састоји у спором и постепеном повећању наизменичних напрезања све до границе замора. Па се на овај начин динамичка издржљивост материјала може повећати до 25%.

Бројним истраживањима дошло се до закључка да најбоље конструкционо триболошке параметре (најмањи коефицијент трења и ниску температуру има самоподмазујући лежај 12_20_265_1500. Мали коефицијент трења и ниске температуре које се добијају неће довести до микро заваривања неравнина, што за резултат има одсуство хабања површина, јер су лежајеви предвиђени за веће температуре. Што се поклапа са теоријом.

Ипак, експериментална испитивања имају и недостатке. Један од недостатака који утиче највише на резултате експерименталних испитивања јавља се у току процеса производње. Односно, при изради самоподмазујућих лежаја постоји операција утискивања графитних ламела у избушене отворе. Након ове операције изводи се стругарска обрада унутар бронзане чауре, како би се ламеле графита обрадиле тако да прате унутрашњи

пречник чауре. При тој операцији у контакту плочице стругарског ножа и графитне ламеле може доћи до: оштећења, микро крзања, појаве иницијалне прслине, хабања или лома графитне ламеле. Оштећење графитних ламела услед стругарске обраде се јавља најчешће због особина графита (његове слојевите структуре, крхкости и мале отпорности на хабање). Било који вид оштећења графитних ламела, доводи до могуће грешке при експерименталном испитивању, јер под дејством оптерећења у контакт долазе постелица и рукавац вратила, док неке од графитних ламела услед нарушавања геометрије при изради немају функцију чврстог средства за подмазивање. Узрок губитка способности подмазивања графитних ламела је тај што имају веома мали контакт са вратилом, немају могућност формирања графитног филма између вратила и постелице. Смањење графитног филма или његово делимично одсуство узрок је повећања трења и температуре.

На почетку ове дисертације претпостављене су димензије, оптерећења, бројеви обртаја које су модификоване кроз поступак "покушаја и грешки" док се није стекло оптимално решење. То значи да је, у процени оперативних и конструкционих триболошких параметара, потребно бити упознат са одређеним односима, који су, најчешће, резултат истраживања и искустава.

Дисертација представља покушај да се дефинишу смернице за избор одређених конструкционо триболошких параметара код радијалних клизних лежајева са графитом и да се укаже на њихов значај.

Главни циљ процеса конструисања јесте да развије клизни лежај, који ће бити у стању да испуни одређену спецификацију перформанси, у оквиру којих су конструкциони параметри најбитнији. Нажалост, наука не даје директан начин како да се то постигне. У поређењу са другим поступцима конструисања и прорачуна броја графитних ламела за подмазивање самоподмазујућих лежајева необично је то, што се теорија не може директно применити у циљу добијања конструкције, али се може утврдити да ли ће изабрано решење бити у стању да носи потребно оптерећење под одређеним условима. Последица овога јесте да се пракса и теорија на одређени начин противе једна другој. Теорија каже да се највећа носивост самоподмазујућег лежаја постиже са бесконачно танким филмом графита, док са друге стране, пракса показује да храпавост актуелних површина, као и деформације, имају битан утицај на носивост лежаја.

Допринос дисертације огледа се у:

- великом броју експерименталних истраживања урађеним на легури бронзе и графитним ламелама.
- дефинисана је методологија развоја радијалних клизних лежаја са графитом,
- идентификацији доминантних конструкционих параметара самоподмазујућих радијалних клизних лежаја са графитом са аспекта триболошких карактеристика,
- извршена су експериментална истраживања триболошких карактеристика радијалних клизних лежаја са графитом са различитим пречницима графитних ламела и са различитим степеном покривености,
- урађена је апроксимација модела самоподмазујућих радијалних клизних лежаја са графитом моделом лежаја чија је постелица израђена од калајне бронзе.
- развијена је нова метода за процену температурног поља самоподмазујућих радијалних клизних лежаја са графитом применом FEA термо - механичке анализе.

На тему подмазивања клизних лежаја у протеклих пола века било је бројних истраживања. Међутим, поред знања о раду самоподмазујућих лежаја са теоријског аспекта, неопходно је добити више информација на основу којих конструктор може да одабере поуздане почетне вредности. То указује на отварање нових праваца истраживања као и њихову већу примену. Основни правци будућег рада и истраживања су:

- Модерни лежајеви конструисани су на основу високо софистицираног триболошког знања, од избора материјала до дизајна у њиховој геометрији и завршним површинама. У потребно триболошко знање спадају софистицирани рачунарски модели и детаљни лабораторијски експерименти. Развој нових софистицираних рачунарских модела како би рачунски одређена количина генерисане топлоте на контакту површина које се међусобно крећу могла бити искоришћена за препоруку оптималних технолошких параметара.

- Развој нових мазива (под утицајем топлоте ослобођене трењем може доћи до паљења мазива код појединих машина. Чешћи је случај да се под утицајем топлоте ослобођене трењем, запали мазиво. Ефикасна заштита од оваквих паљења остварује се правилним избором мазива и редовним подмазивањем уређаја и машина. Истраживачи на Универзитету Virginia Commonwealth направили су у Августу 2014. нову структурну варијанту графита названу пентаграфен. Који се састоји из веома танких слојева чистог графита чија је структура, инспирисана пентагоналном шемом.) Овај новооткривени

материјал је динамички, термално и механички стабилан и као такав очекује се да ће овај материјал наћи широку примену даљим истраживањима у побољшању конструкционо триболошких параметара самоподмазујућих лежаја.

- Побољшање карактеристика графитне масти, која се користи за уходавање лежаја.

- Експериментална истраживања како на легурама бакра као основном материјалу у који се убацују ламеле графита, тако и на другим легурама. Истраживања се односе на истраживање утицајних параметара код поменутих легура.

- Истраживање могућности промене технолошких отвора и углова између графитних ламела у постељници самоподмазујућег лежаја, са циљем смањења коефицијента трења.

8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Vera Nikolić, Mašinski elementi teorija, proračun, primeri, Univerzitet u Kragujevcu- Mašinski fakultet, Kragujevac 2004.
- [2] Krsmanović V., Mitrović R.: Klizni i kotrljajni ležaji. Peto izdanje. Zavod za udžbenike i Mašinski fakultet, Beograd.
- [3] Vojislav Miltenović, Mašinski elementi, Univerzitet u Nišu- Mašinski fakultet, Niš 2002.
- [4] R Đuriš, E Labašová Experimental Determination of the Coefficient of Friction in Rotational Sliding Joint Applied Mechanics and Materials, 2013 - Trans Tech Publ.
- [5] Eva Labašová , 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.
- [6] E Labašová The Size of the Friction Coefficient Depending on the Size and Course of Normal Load Applied Mechanics and Materials, 2014 - Trans Tech Publ.
- [7] Eva Labašová, Measurement of the Tribology Characteristics in Sliding Joint, American International Journal of Contemporary Research Vol. 2 No. 8; August 2012.
- [8] Eva Labašová, Rastislav Ďuriš , Measurement of Tribological Parameters, Advanced Materials Research (Volumes 875 - 877), pp 496-499, February 2014.
- [9] Mičić, M., Đorđević, M., Đajić, G., Svojstva ležaja proizvedenih nalivanjem i navarivanjem kliznog sloja belog metala, MJoM METALURGIJA - JOURNAL OF METALLURGY, pp 225-236.
- [10] Stott, F., H., (2002). High-temperature sliding wear of metals Original Research Article Tribology International, Volume 35, Issue 8, pp 489-495.
- [11] Virginio Quaglini, Massimiliano Bocciarelli, Emanuele Gandelli & Paolo Dubini, Numerical Assessment of Frictional Heating in Sliding Bearings for Seismic Isolation, Journal of Earthquake Engineering, Volume 18, Issue 8, 2014.

- [12] Aleksandar Marinković, Tatjana Lazović, Miloš Stanković, EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF POROUS METAL BEARINGS, 15th International Conference on Experimental Mechanics, PAPER REF: 2718.
- [13] Zeren, A., (2007). Embeddability behaviour of tin-based bearing material in dry sliding Original Research Article Materials & Design, Volume 28, Issue 8, pp 2344-2350.
- [14] S. Equey, A. Houriet, S. Mischler, Wear and frictional mechanisms of copper-based bearing alloys, Wear 273 (2011) 9–16.
- [15] Sonam M. Gujrathi, Prof. L.S. Dhamande and Prof. P.M. Patare, Wear Studies on Polytetrafluoroethylene (PTFE) Composites: Taguchi Approach, Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science, Vol. 3, No. 2, June 2013.
- [16] Nada Bojic, Dragan Milčić, Milan Banic, Effect of coverage of graphite on self-lubricating plain bearings, Serbiantrib '15, May 13-15, Belgrade, p.p 309-313.
- [17] Nada Bojić, Dragan Milčić, Istraživanje termo - mehaničkih karakteristika kliznih ležaja sa grafitom, "Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications" COMETA 2012, East Sarajevo - Jahorina, (2012), 28. - 30. Novembar, pp 347-354, ISBN 978-99938-655-5-1.
- [18] Khoddamzadeh, A., Liu, R., Wu, X., (2009). Novel polytetrafluoroethylene (PTFE) composites with newly developed Tribaloy alloy additive for sliding bearings Original Research Article Wear, Volume 266, Issues 7-8, pp 646-657.
- [19] B. Suresha, G. Chandramohan, J. N. Prakash, V. Balusamy and K.Sankaranarayananasamy, The Role of Fillers on Friction and Slide Wear Characteristics in Glass-Epoxy Composite Systems, Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, Vol. 5, No.1, pp 87-101, 2006.
- [20] Liu Ru-Tie, Xiong Xiang, Chen Fu-Sheng, Lu Jin-zhong, Hong Li-Ling, Zhang Yi-Qing, Tribological performance of graphite containing tin lead bronze–steel bimetal under reciprocal sliding test, Tribology International Volume 44, Issue 2, February 2011, Pages 101–105.
- [21] L. E. G. Cambronero, P. Sánchez, J. M. Ruiz-Román, J. Pous and F. A. Corpas, Radial Crushing Strength of Bronze with Nickel-Graphite Additions, DOI:

- 10.1002/3527607277.ch51, *Materials Development and Processing - Bulk Amorphous Materials, Undercooling and Powder Metallurgy*, Volume 8, 2006, ISBN: 9783527607273.
- [22] G.A. Jones, On the tribological behaviour of mechanical seal face materials in dry line contact Part I. Mechanical carbon, *Wear* 256 (2004) 415–432.
- [23] B. Suresha, Siddaramaiah, Kishore, S. Seetharamu, P. Sampath Kumaran, Investigations on the influence of graphite filler on dry sliding wear and abrasive wear behaviour of carbon fabric reinforced epoxy composites Original Research Article *Wear*, Volume 267, Issues 9-10, 9 September 2009, pp 1405-1414.
- [24] Rakowski, W.A., Zimowski, S., (2006). Polyesterimide composites as a sensor material for sliding bearings, *Composites Part B: Engineering*, Volume 37, Issues 2-3, pp 81-88.
- [25] C Donnet, A Erdemir, Historical developments and new trends in tribological and solid lubricant coatings, *Surface and Coatings Technology*, Volumes 180–181, 1 March 2004, Pages 76–84.
- [26] O. I. Fushchich, V. T. Varchenko ,Effect of alloy components on the performance characteristics of antifriction graphite-bronze powder material, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, September 2008, Volume 47, Issue 9-10, pp 557-562.
- [27] Chang-Gun Lee, Yu-Jin Hwang, Young-Min Choi, Jae-Keun Lee, Cheol Choi, Je-Myung Oh, A study on the tribological characteristics of graphite nano lubricants, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, January 2009, Volume 10, Issue 1, pp 85-90.
- [28] Jun-Feng Yang, Yan Jiang, Jens Hardell, Braham Prakash, Qian-Feng Fang Influence of service temperature on tribological characteristics of self-lubricant coatings: A review, *Frontiers of Materials Science*, March 2013, Volume 7, Issue 1, pp 28-39.
- [29] Harlin, P., Bexell, U., Olsson, M., (2009). Influence of surface topography of arc-deposited TiN and sputter-deposited WC/C coatings on the initial material transfer tendency and friction characteristics under dry sliding contact conditions Original Research Article *Surface and Coatings Technology*, Volume 203, Issue 13, pp 1748-1755.

- [30] Milčić Dragan, Milošević Vojkan, Mijajlović Miroslav: Automatization of Radial Journal Bearings Design Process, Proceedings / The Fifth International Symposium about Forming and Design in Mechanical Engineering — KOD 2008, Novi Sad, 15-16 April, 2008. — Novi Sad: Faculty of Technical Sciences, pp. 141 – 148, ISBN 978-86-7892-104-9.
- [31] Milošević Vojkan, Milčić Dragan, Mijajlović Miroslav: Softver za proračun i modeliranje radijalnih kliznih ležaja, XIV konferencija YU INFO 2008, Simpozijum o računarskim naukama i informacionim tehnologijama, Zbornik radova na CD, Kopaonik, Srbija, 2008, ISBN 978-86-85525-03-2.
- [32] Bao Min Wang, Jin Xin Xu, Fei Zhu, Zai Xin Wu, Analysis and Models for the Friction Coefficient of a Sliding Bearing, Applied Mechanics and Materials (Volumes 395 - 396), September 2013, pp 826-830.
- [33] Wang Baoming, Xu Jinxin, Chen ShengSheng, Wu Zaixin, Modeling and Analyzing for the Friction Torque of a Sliding Bearing Based on Grey System Theory, TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering Vol. 12, No. 8, August 2014, pp. 6009 ~ 6016.
- [34] Marinković, A., (2005). Structural Optimization of Journal Porous Metal Bearing, FME Transaction VOL. 33, No 1, 2005 ▪ 31.
- [35] Kennedy Jr. F.E. Surface temperature in sliding systems - a finite element analysis, ASME, J. Lubr. Technol., Vol.103 (1981), pp. 90-96.
- [36] Starostin N.P., Kondakov A.S. Thermal diagnostics of friction in cylindrical connections: II. Computation experiments and generalization, Journal of engineering physics and thermophysics, V. 75, No5 (2002), pp. 1159-1164.
- [37] N. P. Starostin, A. S. Kondakov, M. A. Vasil'eva Thermal diagnostics of friction in self-lubricating radial plain bearings of swinging movement. Part 2. Accounting for shaft mobility in the mathematical model, Journal of Friction and Wear, December 2010, Volume 31, Issue 6, pp 449-452.

- [38] Starostin N.P. , Kondakov A.S. Boundary inverse problems of heat exchange for sliding bearing control and diagnostics, *Inverse Problems in Engineering*, Vol. 7 (1999), pp. 565-580.
- [39] Starostin N.P. , Kondakov A.S. , Vasilieva M.A. Thermal diagnostics of friction in self-lubricating radial slide bearings of swinging movement. Algorithm of determining the friction of heat generation power, *Journal of Friction and Wear*, V.29, №28 (2007), pp. 351-360.
- [40] Starostin N.P. , Kondakov A.S. , Vasil'eva M.A. Thermal diagnostics of friction in self-lubricating radial plain bearings of swinging movement. Part 2. Accounting for shaft mobility in the mathematical model, *Journal of Friction and Wear*, V.31, №6 (2010), pp. 449-452.
- [41] Starostin N.P., Kondakov A.S., Vasilieva M.A., Restoration of friction power in radial sliding bearing of the oil and gas inventory, *Machines and Apparatuses of Chemical Plants. Machines and Apparatuses of Oil and Gas Industry Journal issues: 3/2013*, Pages: 312-333.
- [42] N. P. Starostin, A. S. Kondakov, M. A. Vasilieva Identification of friction heat generation in sliding bearing by temperature data. *Inverse Problems in Science and Engineering Volume 21, Issue 2, 2013*.
- [43] Starostin N.P. , Tikhonov A.G. , Morov V.A., Kondakov A.S. Calculation of tribotechnical parameters in sliding bearings, *YSC SB RAS Publ., Yakutsk, 1999*.
- [44] Tillmann A.R. , Borges V.L. , Guimarães G. , Lima e Silva A.L.F., Lima E Silva S.M.M. Identification of temperature-dependent thermal properties of solid materials, *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.*, V.30, № 4 (2008), pp. 269-278.
- [45] Nada Bojić, Dragan Milčić, Milan Banić, Miroslav Mijajlović, Ružica Nikolić, Radial force impact on the friction coefficient and temperature of the self-lubricating plain bearing, *Facta Universitatis - Series Mechanical Engineering*, прихваћен рад.

- [46] Kevin Radila, Michelle Zeszotekb, An Experimental Investigation into the Temperature Profile of a Compliant Foil Air Bearing, *Tribology Transactions* Volume 47, Issue 4, 2004.
- [47] K. Bonny, P.De Baets, Y. Perez, J. Vleugels, B. Lauwers, (2010). Friction and wear characteristics of WC–Co cemented carbides in dry reciprocating sliding contact, *Wear* 268, Issues 11-12, pp 1504-1517.
- [48] S. Janjarasjitt, H. Ocak, K.A. Loparo, “Bearing condition diagnosis and prognosis using applied nonlinear dynamical analysis of machine vibration signal”, *Journal of Sound and Vibration* 317 (2008) 112–126.
- [49] Andersson, S., Söderberg, A., Björklund, S., (2007). Friction models for sliding dry, boundary and mixed lubricated contacts, *Tribology International*, Volume 40, Issue 4, pp 580-587.
- [50] Prasad, B.K., (2011). Sliding wear response of a grey cast iron: Effects of some experimental parameters, *Tribology International*, Volume 44, Issue 5, pp 660-667.
- [51] Patel N.D., Deheri G., Efekat hrapavosti površine na performanse klizećeg poroznog ležaja sa dve paralelne strane, magnetnim fluidom i brzinom klizanja, *Journal of Serbian Society for Computational Mechanics* 2011, vol. 5, br. 1, str. 104-118.
- [52] Marcelo Kawakame, Jose Divo Bressan, Study of wear in self-lubricating composites for application in seals of electric motors, *Journal of Materials Processing Technology* 179 (2006) 74–80.
- [53] Yuan, S., Huang, W., Wang, X., (2011). Orientation effects of micro-grooves on sliding surfaces, *Tribology International*, Volume 44, Issue 9, pp 1047-1054.
- [54] D. Guida, F. Nilvetti, C.M. Pappalardo, Dry friction of bearings on dynamics and control of an inverted pendulum, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Volume 38 Issue 1, pages 80-94, January 2010.
- [55] Filipović, I., Bibić, Dž., (2010). Utjecaj viskoznosti ulja na funkcionalne veličine kliznih ležajeva motora s unutarnjim izgaranjem, *Goriva i maziva* 49, 4 pp 334-351.

- [56] Ozsarac, U., Findik, F., Durman, M., (2007). The wear behaviour investigation of sliding bearings with a designed testing machine *Materials & Design*, Volume 28, Issue 1, pp 345-350.
- [57] Savařkan, T., Bican, O., (2010). Dry sliding friction and wear properties of Al–25Zn–3Cu–3Si alloy, *Tribology International*, Volume 43, Issue 8, pp 1346-1352.
- [58] Pawlak, Z., Kaldonski, T., Pai, R., Bayraktar, E., Oloyede, A., (2009). A comparative study on the tribological behaviour of hexagonal boron nitride (h-BN) as lubricating micro-particles—An additive in porous sliding bearings for a car clutch, *Wear*, Volume 267, Issues 5-8, pp 1198-1202.
- [59] Ninković Rato, Babić Miroslav, Postupak dizajniranja kliznih ležaja od RAR – Legura, Osmo Internacionalna konferencija o tribologiji 8. - 10. Oktobar 2003., Beograd, Srbija str. 335-339.
- [60] A. RAC, A. VENCL, Tribological and Design Parameters of Lubricated Sliding Bearings, *Tribology in industry*, Volume 27, No. 1&2, 2005.
- [61] Sang-Hyo Kim, Ho-Seong Mha, Sang-Woo Lee, Effects of bearing damage upon seismic behavior of a multi-span girder bridge Original Research Article *Engineering Structures*, Volume 28, Issue 7, June 2006, Pages 1071-1080.
- [62] Rac, A., Vencl, A. (2005). Oštećenja i otkazi metalnih kliznih ležaja, *Tehnička dijagnostika*, vol. 4, br. 2, str. 59-69.
- [63] Adolfo Senatore, Alessandro Ruggiero, Vasile Palade, Sorin Ciortan, Neural networks based study of friction coefficient variation in sliding bearings, the annals of university “DUNĂREA DE JOS“ of galati fascicle VIII, 2007 (XIII), ISSN 1221-4590 *Tribology*.
- [64] Dragan Źeželj, Stjepan Risović, Źeljko Maruřić, Study of Processes in Critical Operating Conditions of Sliding Pairs, *Strojarstvo* **50** (1) 37-42 (2008), ISSN 0562-1887 UDK 621.822.1:621.892.
- [65] Ling F. F. and Saibel E. Thermal aspects of galling of dry metallic surfaces in sliding contact. *Wear*, 1958, 1, 80-91.
- [66] Gecim B. and Winer W. O. Steady State Temperature in a Rolling Cylinder Subject to

- Surface Heating and Convective Cooling. ASME Journal of Tribology, 1984, 106, 120-127.
- [67] Patula E. H. Steady State temperature Distribution in a Rotating Roll Subject to Surface Heat Fluxes and Convective Cooling. ASME Journal of Tribology, 1981, 103, 36-41.
- [68] Ulysee P. and Khonsari M. M. Thermal Response of Rolling Components Under Mixed Boundary Conditions: An Analytical Approach, ASME Journal of Heat Transfer, 1993, 115, 857-865.
- [69] Bishop J.L. and McC. Ettles C.M. The seizure of journal bearings by thermoelastic mechanisms. Wear, 1982, 79, 37-52.
- [70] Dufrane K. and Kannel J. Thermally induced seizures of journal bearings. ASME Journal of Tribology, 1989, 111, 288-92.
- [71] Khonsari M.M. and Kim H.J. On thermally induced seizure in journal bearings. ASME Journal of Tribology, 1989, 111, 661-7.
- [72] Hazlett T.L. and Khonsari M.M. Finite element model of journal bearing undergoing rapid thermally induced seizure. Tribology International, 1992a, 25, 177-82.
- [73] Hazlett T.L. Thermoelastic behavior of journal bearing undergoing seizure – a finite element study. M.S. Thesis, University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pennsylvania, 1990.
- [74] Wang H., Conry T.F. and Cusano C. Effects of Cone/Axle Rubbing Due to Roller Bearing Seizure on the Thermomechanical Behavior of a Railroad Axle. ASME Journal of Tribology, 1996, Vol.118, pp.311-319.
- [75] Wang H., Axle Burn-off and Stack-up Force Analyses of a Railroad Roller Bearing using the Finite Element Method. Ph.D. Thesis, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Illinois at UrbanaChampaign, 1996, p 35, pp.140-147. 75 1.
- [76] Wang Q., Seizure Failure of journal-bearing conformal contacts. Wear, 1997, 210, pp.8-16.
- [77] Lacey S. and H. Kawamura H., Bearings for Aircraft Gas Turbine Engines (Part 1), NSK Technical Journal – Motion and Control, 1998, 5, pp. 1-8.
- [78] Pascovici M.D., Khonsari M.M. and Jang J.Y., On the Modeling of Thermomechanical

- Seizure. ASME Journal of Tribology, 1995, 117, 744-7.
- [79] Jang J.Y., Khonsari M.M. and Pascovici M.D., Thermohydrodynamic Seizure: Experimental and Theoretical Analysis. ASME Journal of Tribology, 1998, 120, 8-15.
- [80] Blagoje Kočovski, Metalurgija legura obojenih metala, Bor, 1996.
- [81] E.Generalic, <http://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=grafit>.
- [82] Lide David R.. ed. (2006). CRC Handbook of Chemistry and Physics (87th ed.). Boca Raton, FL: CRC Press. 0-8493-0487-3.
- [83] Susan Budavari, ed. (2001). The Merck Index: An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals(13th ed.). Merck Publishing. ISBN 0911910131.
- [84] Katalog Graphite Specialties SGL CARBON GmbH.
- [85] Wen-Jau Lee, Kuo-Chun Chang and I-Min Tseng Properties of phenol-formaldehyde resins prepared from phenol-liquefied lignin, Journal of Applied Polymer Science, Volume 124, Issue 6, pages 4782–4788, 15 June 2012.
- [86] Ruihang Lin, Jin Sun, Chao Yue, Xiaobo Wang, Dengyu Tu, Zhenzhong Gao ,Study on preparation and properties of phenol-formaldehyde-chinese fir liquefaction copolymer resin, Maderas, Cienc. tecnol. vol.16 no.2 Concepción mayo 2014 Epub 19-Mar-2014.
- [87] Inženjersko mašinski priručnik IMP, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd 1987.
- [88] Inženjersko tehnički priručnik, Mašinski elementi projektovanje u šest knjiga, četvrta knjiga, Izdavačko preduzeće RAD 1976.
- [89] Стандард SRPS.C.D2.300.
- [90] Стандард ISO-DIN 4386-3.
- [91] Стандард (46/11).
- [92] Peeyush Vats, B.C. Sharma, Sumit Sharma, Heat transfer through journal bearing: a case study, ijret: International Journal of Research in Engineering and Technology eISSN: 2319-1163 | pISSN: 2321-7308.
- [93] Ambeprasad S. Kushwaha, Atul B. Wankhade , Dinesh E. Mahajan , Darshan K. Thakur ,

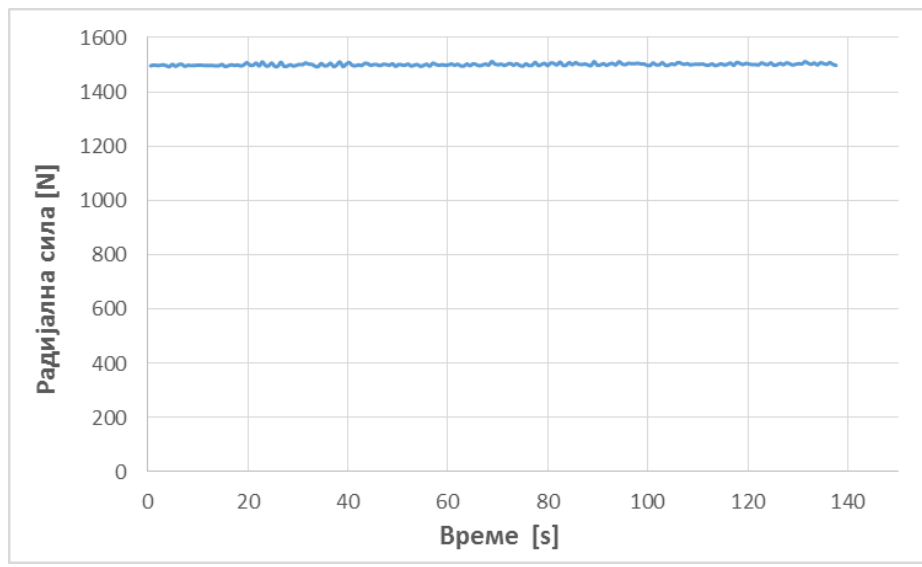
Analysis of the Ball Bearing considering the Thermal (Temperature) and Friction Effects, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN: 2248-9622 National Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology (VNCET-30 Mar'12), pp.115-120.

- [94] Bhusan B., Modern Tribology Handbook Volume One Principles of Tribology, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, USA, 2001.
- [95] ANSYS theory manual

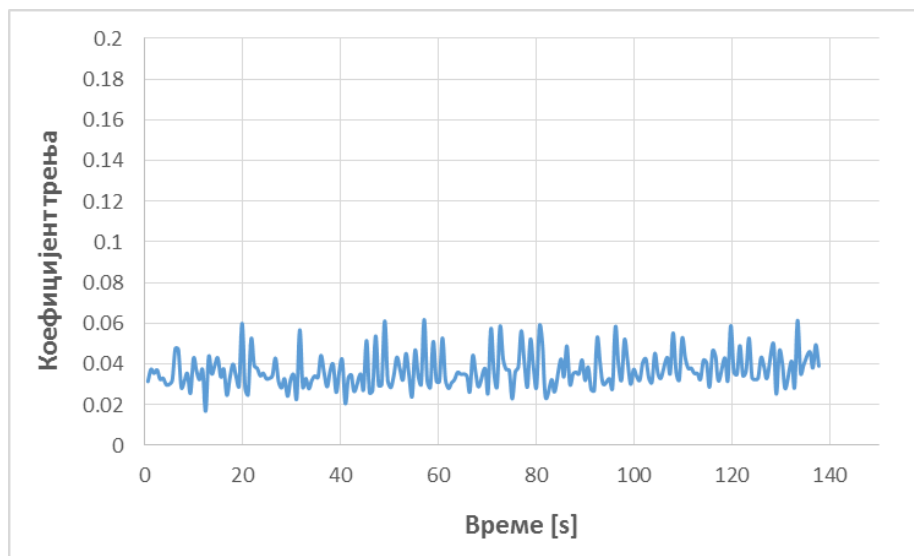
9. ПРИЛОЗИ

Пример 10_20_54_1500

На (сликама 55 и 56) дати су графици, који показују зависност коефицијента трења у зависности од промене пречника графитних ламела $\phi 10\text{ mm}$ при радијалној сили $Fr = 1500\text{ N}$, број обртаја 54 и покривености 20 %.



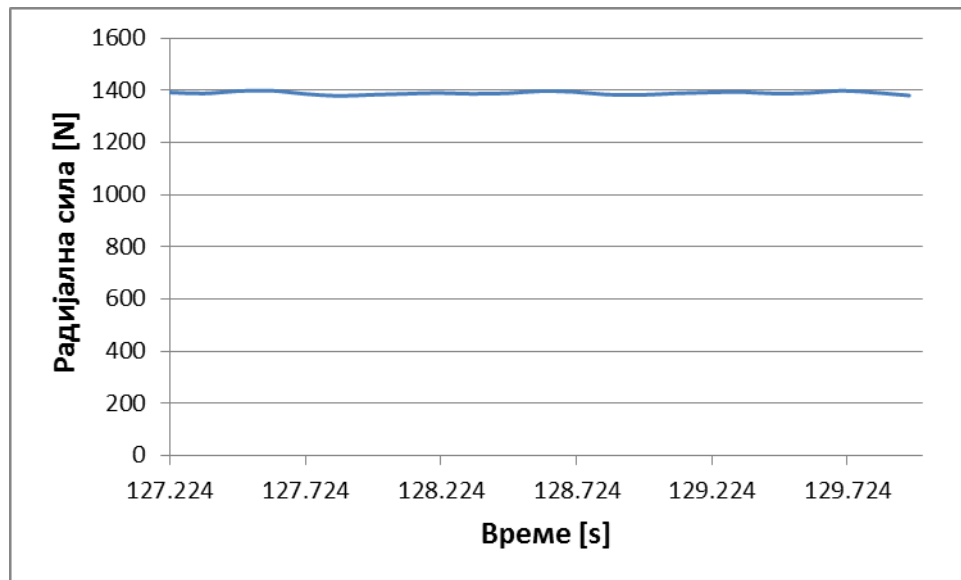
Слика 55. Радијално оптерећење 1500.8 N



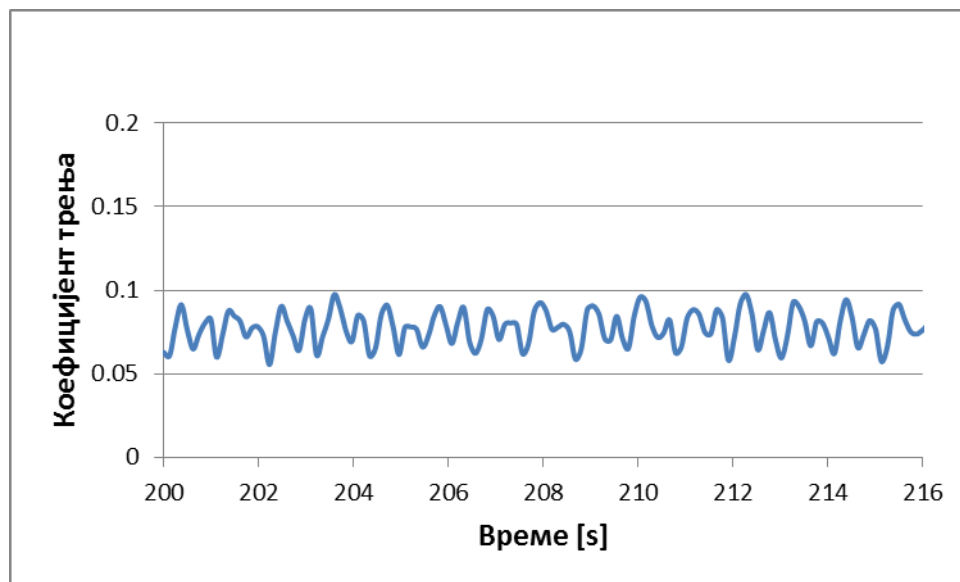
Слика 56. Коефицијент трења $\mu = 0.039$

Пример 8_20_54_1500

На (сликама 57 и 58) дати су графици, који показују зависност коефицијента трења у зависности од промене пречника графитних ламела $\phi 8$ mm при радијалној сили $Fr = 1500$ N, број обртаја 54 и покривености 20 %.



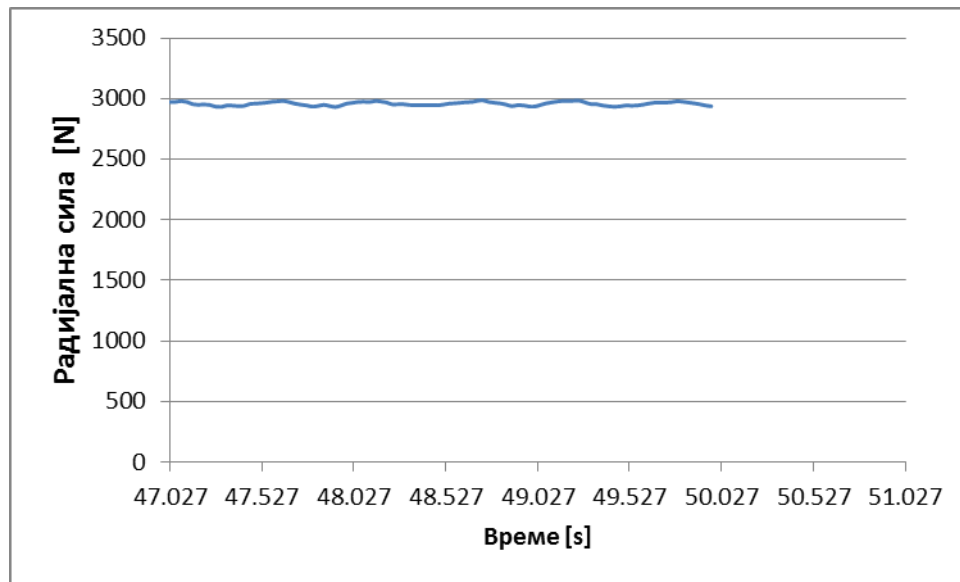
Слика 57. Радијално оптерећење 1394.5 N



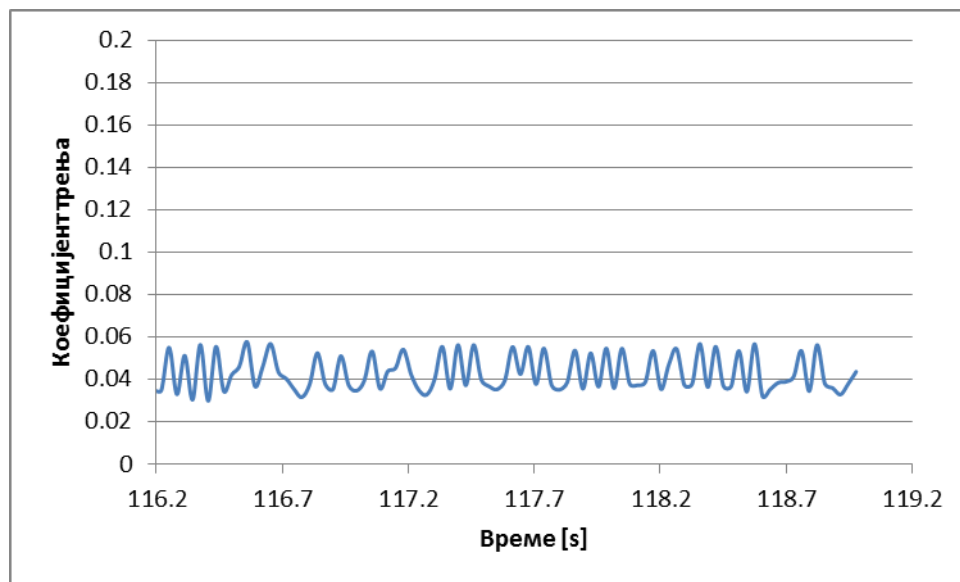
Слика 58. Коефицијент трења $\mu = 0.079$

Пример 12_20_54_3000

На (сликама 59 и 60) дати су графици, који показују зависност коефицијента трења у зависности од промене пречника графитних ламела $\phi 12$ mm при радијалној сили $Fr = 3000$ N, број обртаја 54 и покривености 20 %.



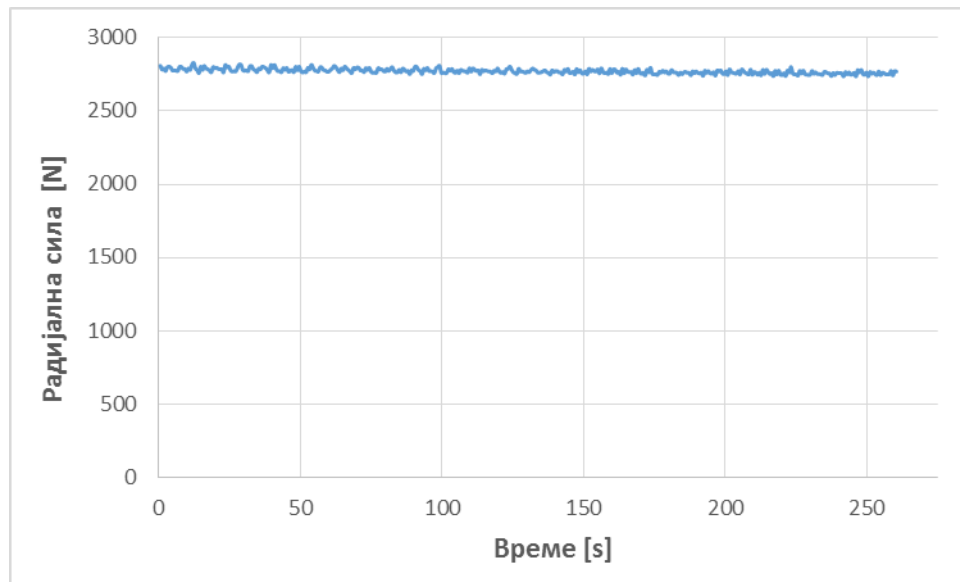
Слика 59. Радијално оптерећење 2958 N



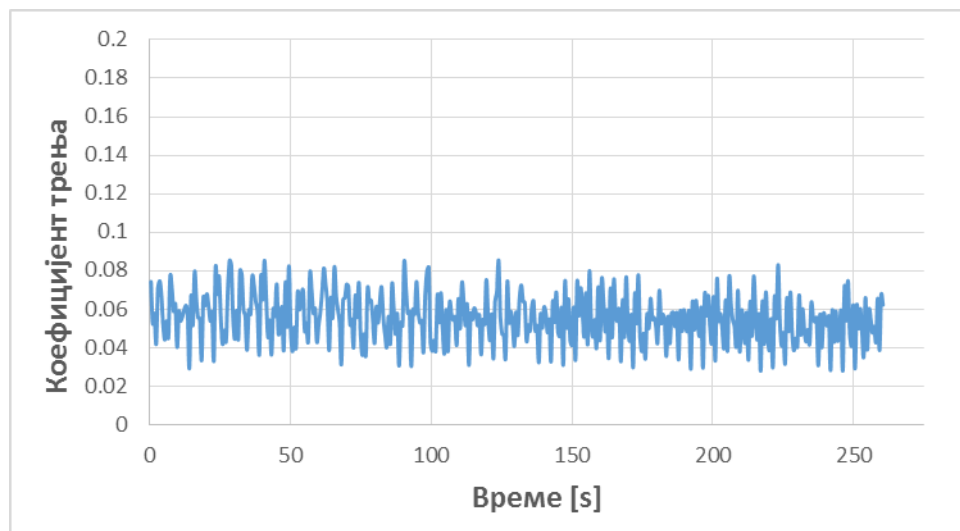
Слика 60. Коефицијент трења $\mu = 0.045$

Пример 10_20_54_3000

На (сликама 61 и 62) дати су графици, који показују зависност коефицијента трења у зависности од промене пречника графитних ламела $\phi 10\text{ mm}$ при радијалној сили $Fr = 1500\text{ N}$, број обртаја 54 и покривености 20 %.



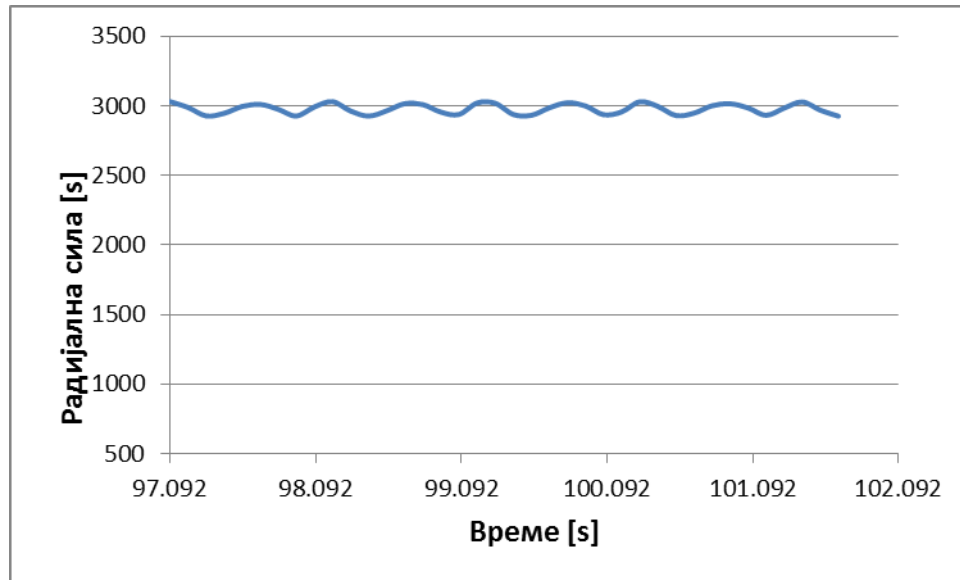
Слика 61. Радијално оптерећење 2772.3 N



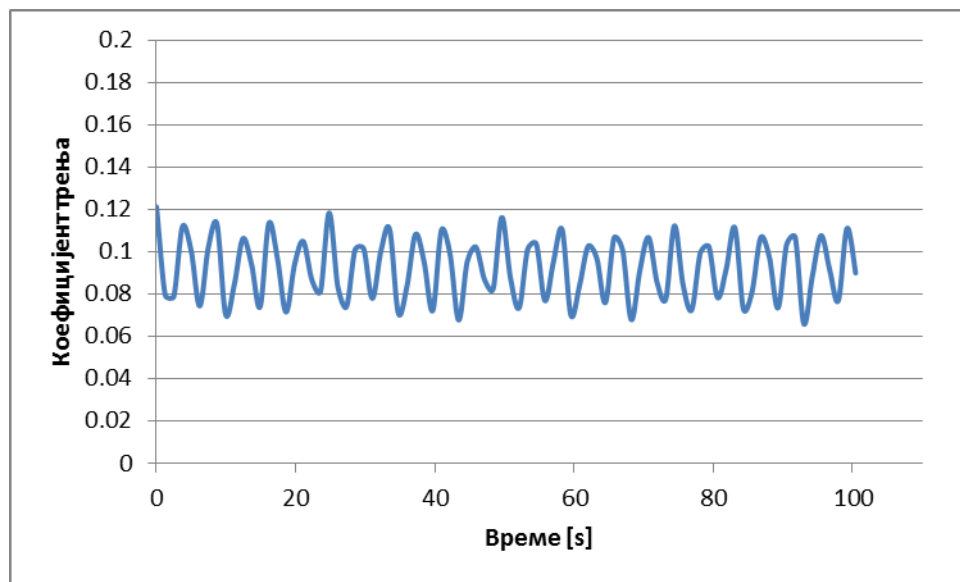
Слика 62. Коефицијент трења $\mu = 0.055$

Пример 8_20_54_3000

На (сликама 63 и 64) дати су графици, који показују зависност коефицијента трења у зависности од промене пречника графитних ламела $\phi 8 \text{ mm}$ при радијалној сили $F_r = 3000 \text{ N}$, број обртаја 54 и покривености 20 %.



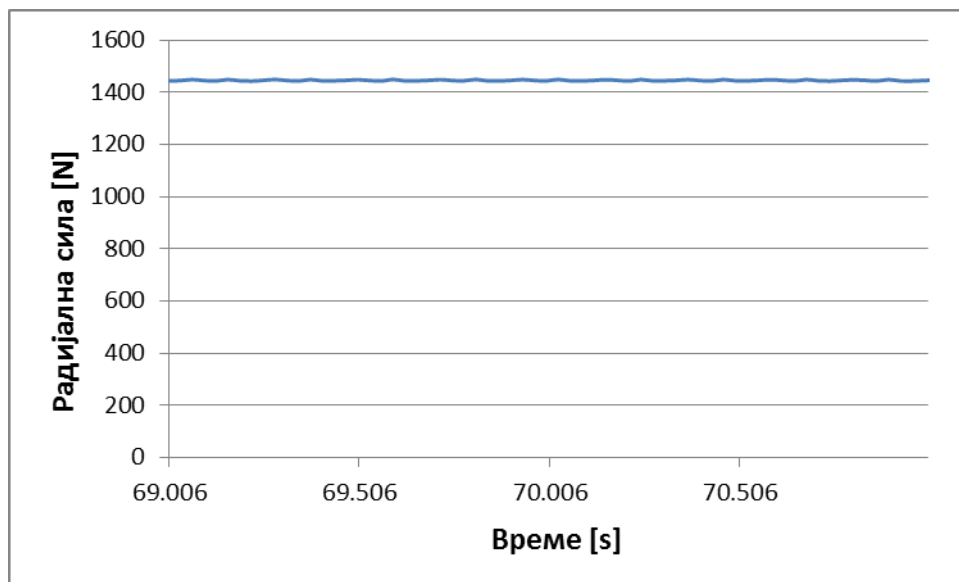
Слика 63. Радијално оптерећење 2967N



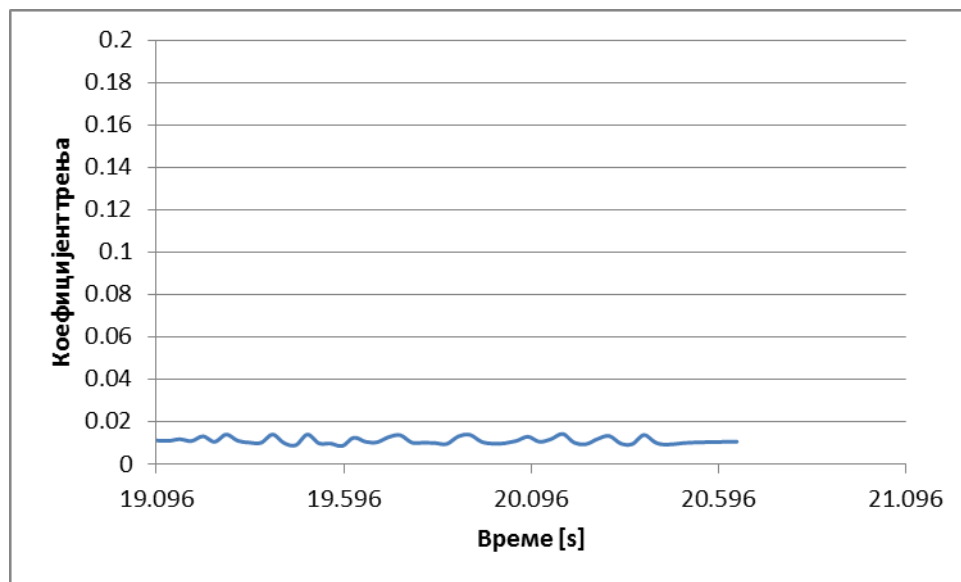
Слика 64. Коефицијент трења $\mu = 0.09$

Пример 12_20_265_1500

На (сликама 65 и 66) дати су графици, који показују зависност коефицијента трења у зависности од промене пречника графитних ламела $\phi 12$ mm при радијалној сили $F_r = 1500$ N, број обртаја 265 и покривености 20 %.



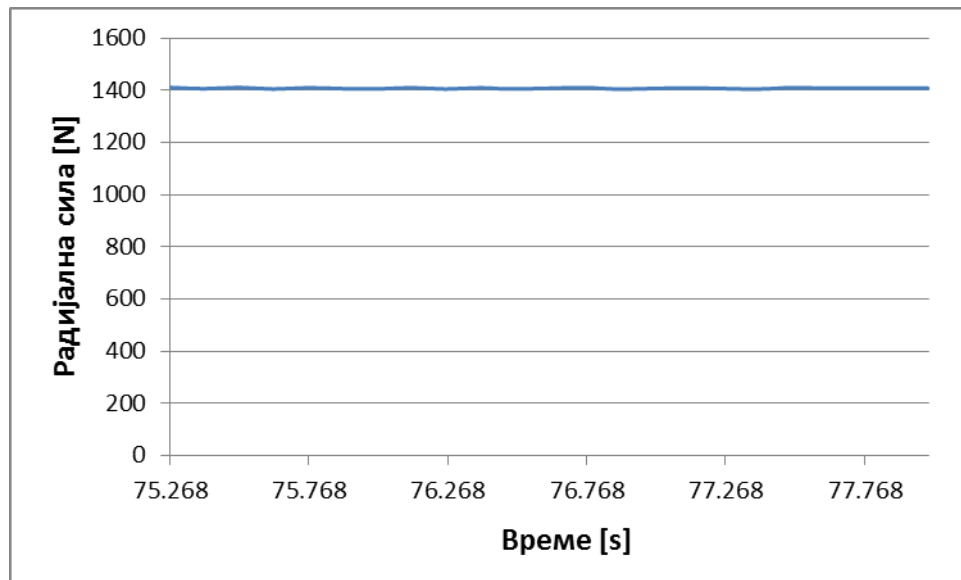
Слика 65. Радијално оптерећење 1445,8 N



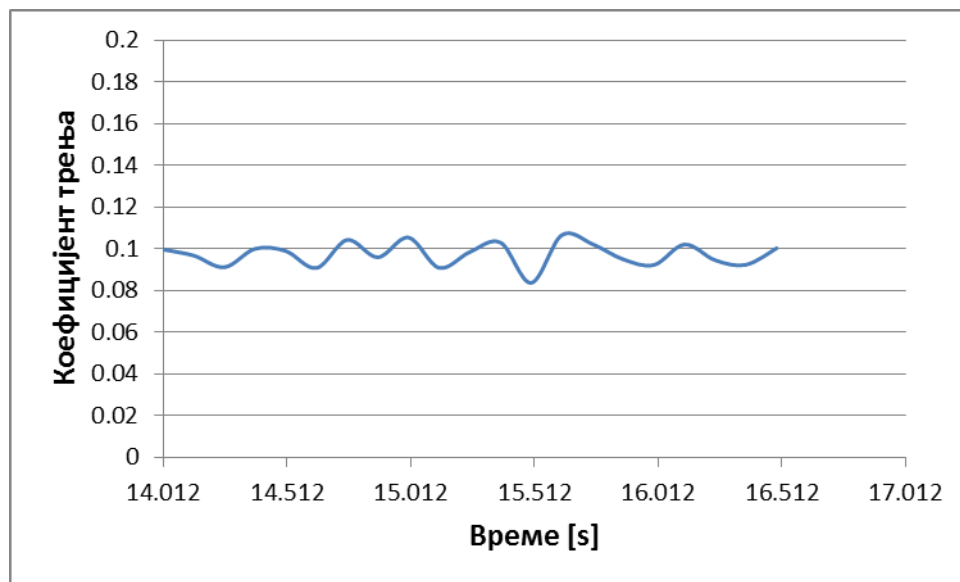
Слика 66. Коефицијент трења $\mu = 0.011$

Пример 12_30_265_1500

На (сликама 67 и 68) дати су графици, који показују зависност коефицијента трења у зависности од промене пречника графитних ламела $\phi 12$ mm при радијалној сили $F_r = 1500$ N, број обртаја 265 и покривености 30 %.



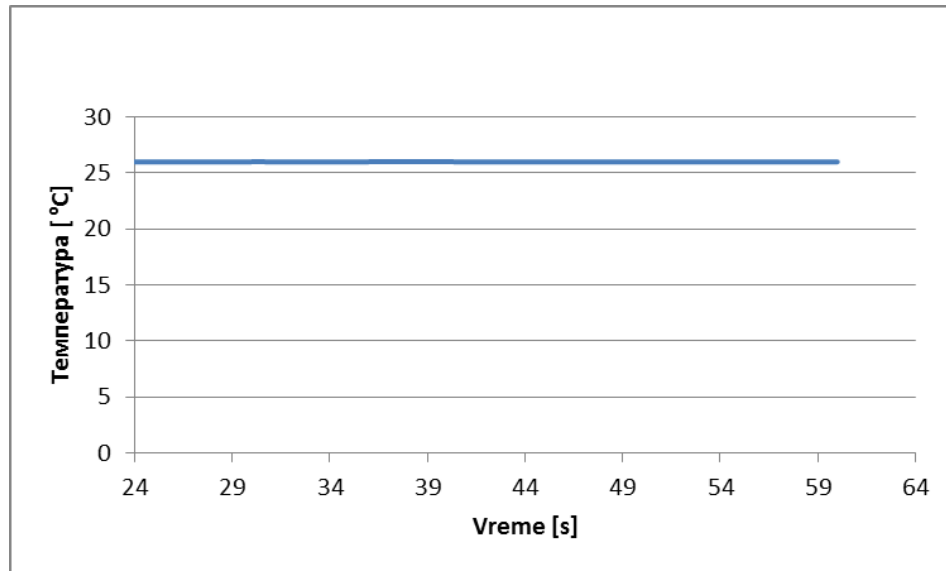
Слика 67. Радијално оптерећење 1407.7 N



Слика 68. Коефицијент трења $\mu = 0.099$

Пример 12_20_54_1500

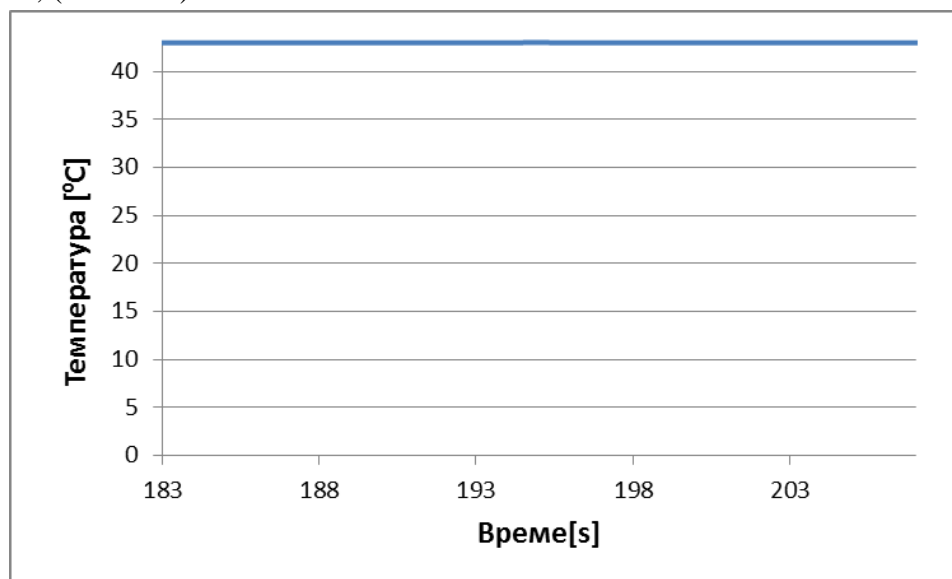
Мерење температуре код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_1500, коришћењем термопарова, (слика 69).



Слика 69. Температура мерена термопаром код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_1500 износи $T = 26^{\circ}C$

Пример 8_20_54_1500

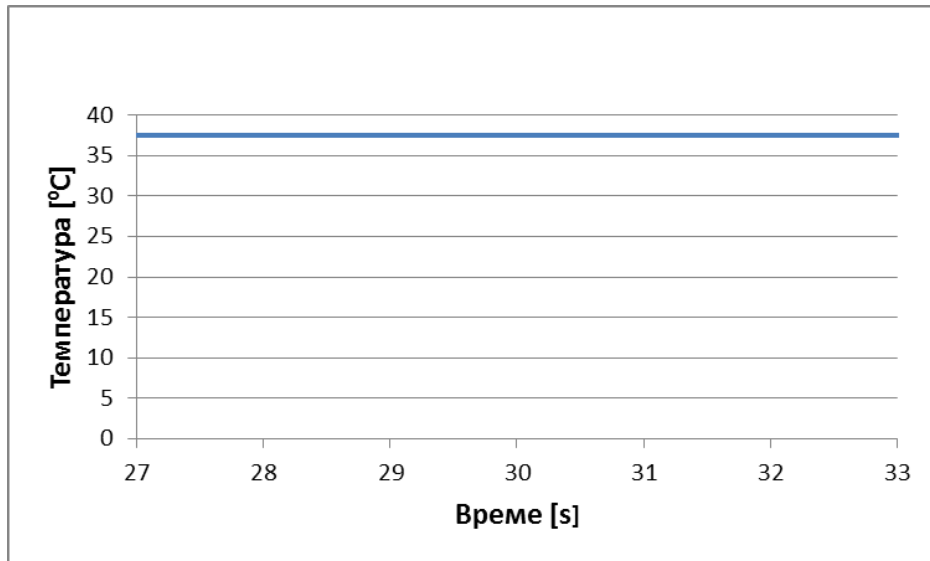
Мерење температуре код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_1500, коришћењем термопарова, (слика 70).



Слика 70. Температура мерена термопаром код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_1500 износи $T = 43^{\circ}C$

Пример 12_20_54_3000

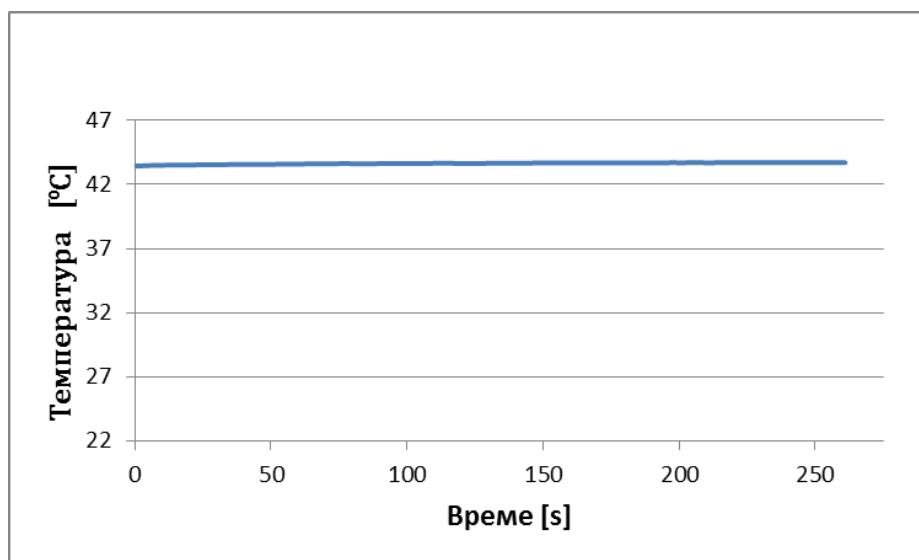
Мерење температуре код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_3000, коришћењем термопарова, (слика 71).



Слика 71. Температура мерена термопаром код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_3000 износи $T = 37.5^{\circ}\text{C}$

Пример 10_20_54_3000

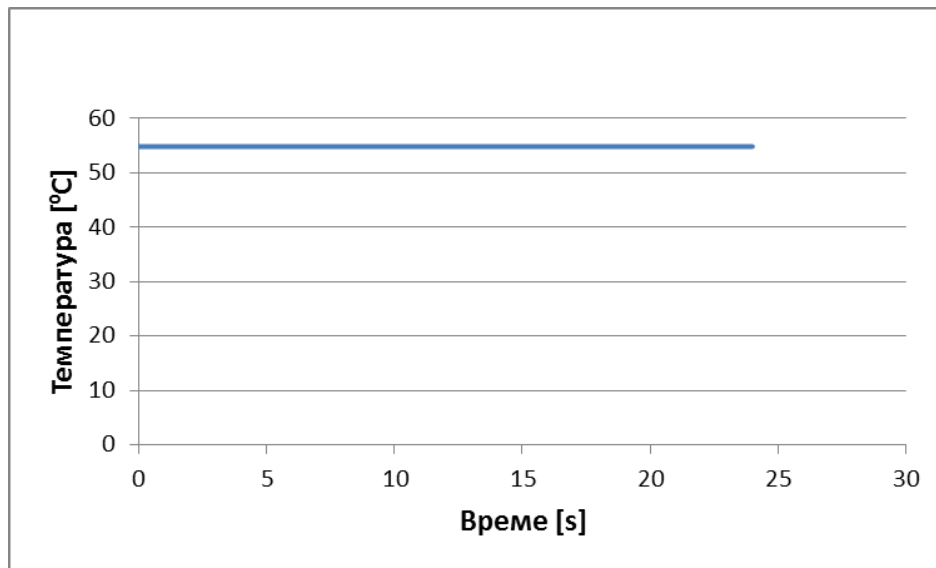
Мерење температуре код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_3000, коришћењем термопарова, (слика 72).



Слика 72. Температура мерена термопаром код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_3000 износи $T = 43.7^{\circ}\text{C}$

Пример 8_20_54_3000

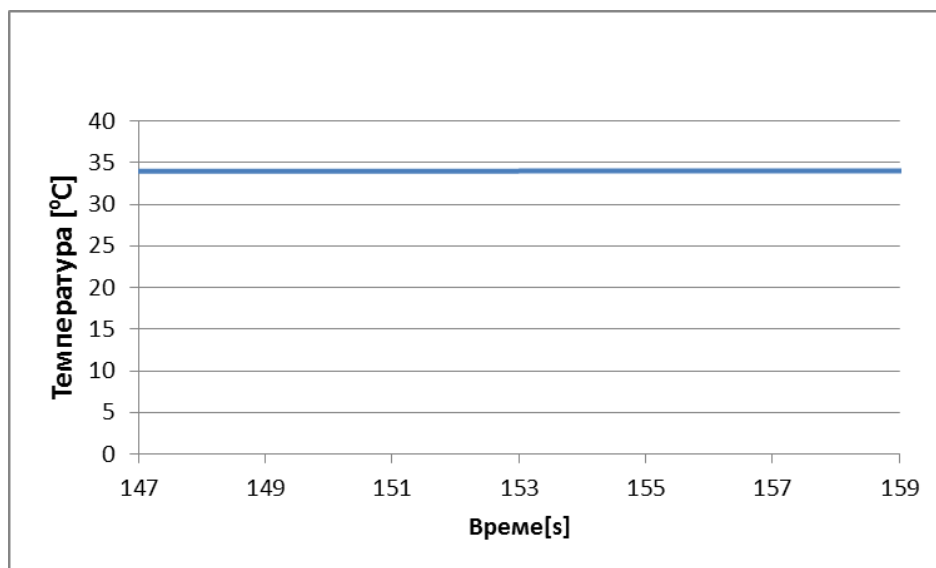
Мерење температуре код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_3000, коришћењем термопарова, (слика 73).



Слика 73. Температура мерена термопаром код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_3000 износи $T = 54.8^{\circ}C$

Пример 12_20_265_1500

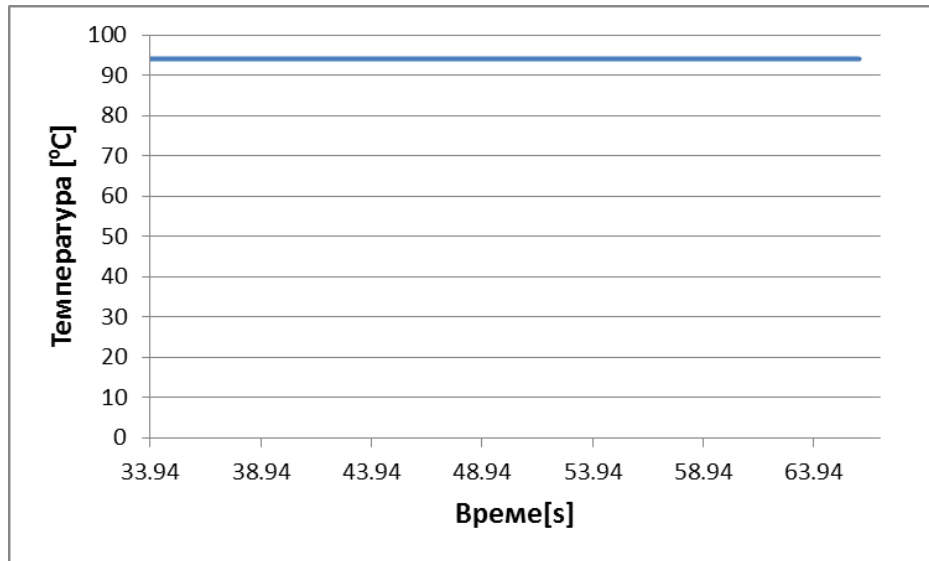
Мерење температуре код самоподмазујућег лежаја 12_20_265_1500, коришћењем термопарова, (слика 74).



Слика 74. Температура мерена термопаром код самоподмазујућег лежаја 12_20_265_1500 износи $T = 34.9^{\circ}C$

Пример 12_30_265_1500

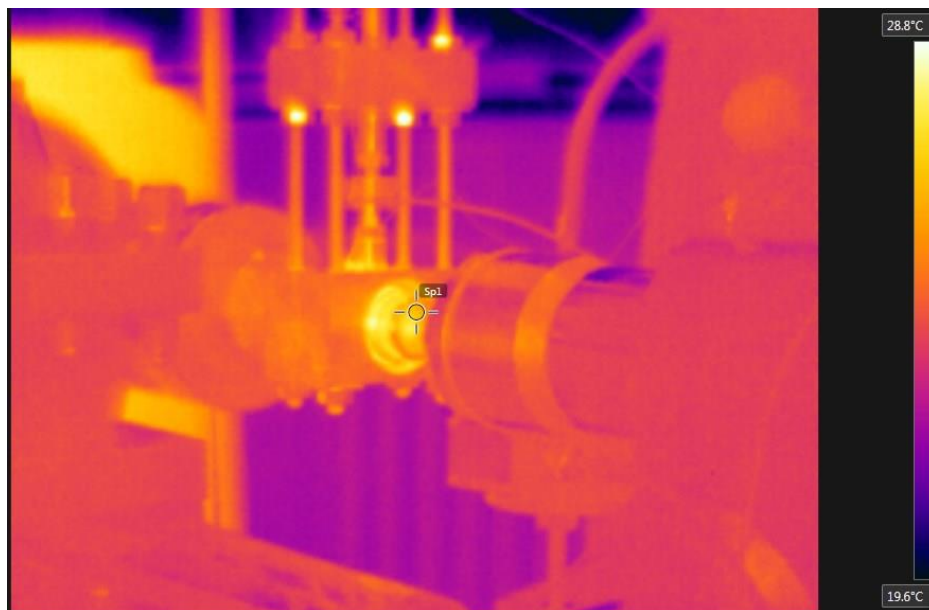
Мерење температуре код самоподмазујућег лежаја 12_30_265_1500, коришћењем термопарова, (слика 75).



Слика 75. Температура мерена термопаром код самоподмазујућег лежаја 12_30_265_1500 износи $T = 94.7^{\circ}\text{C}$

Пример 12_20_54_1500

Мерење температуре код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_1500, термовизијском камером, (слика 76).



Слика 76. Температура мерена код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_1500, $T = 26.7^{\circ}\text{C}$

Пример 10_20_54_1500

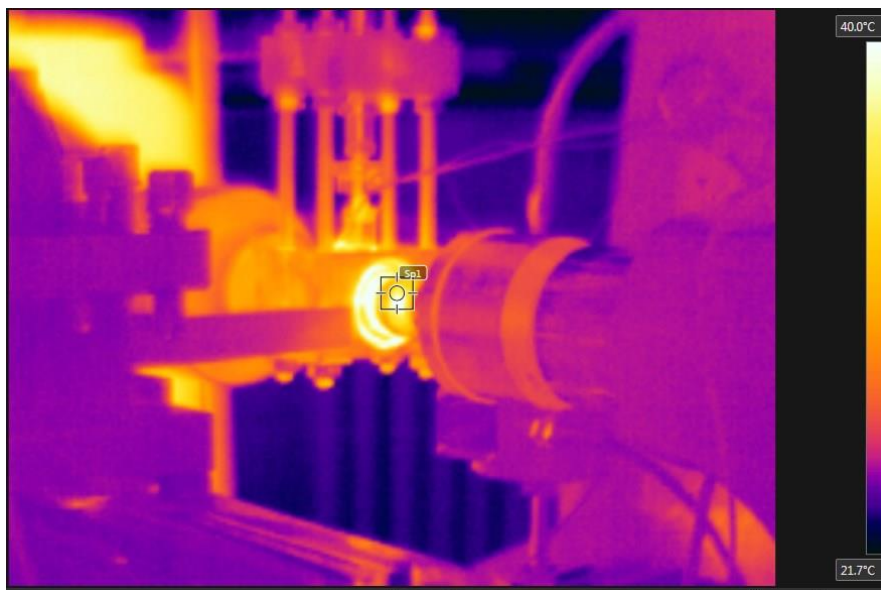
Мерење температуре код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_1500, термовизијском камером, (слика 77).



Слика 77. Температура мерена код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_1500, $T = 33.8^{\circ}\text{C}$

Пример 12_20_54_3000

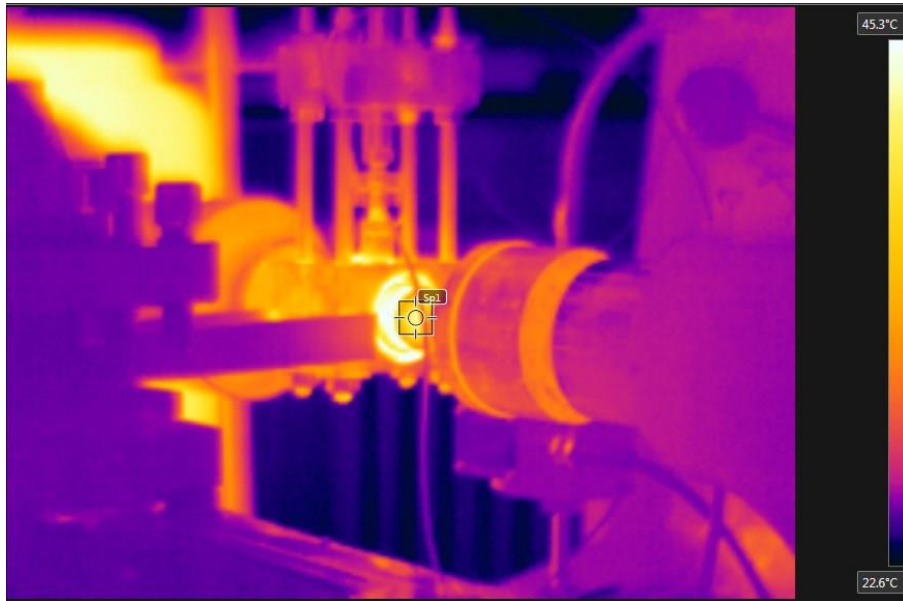
Мерење температуре код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_3000, термовизијском камером, (слика 78).



Слика 78. Температура мерена код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_3000, $T = 37.8^{\circ}\text{C}$

Пример 10_20_54_1500

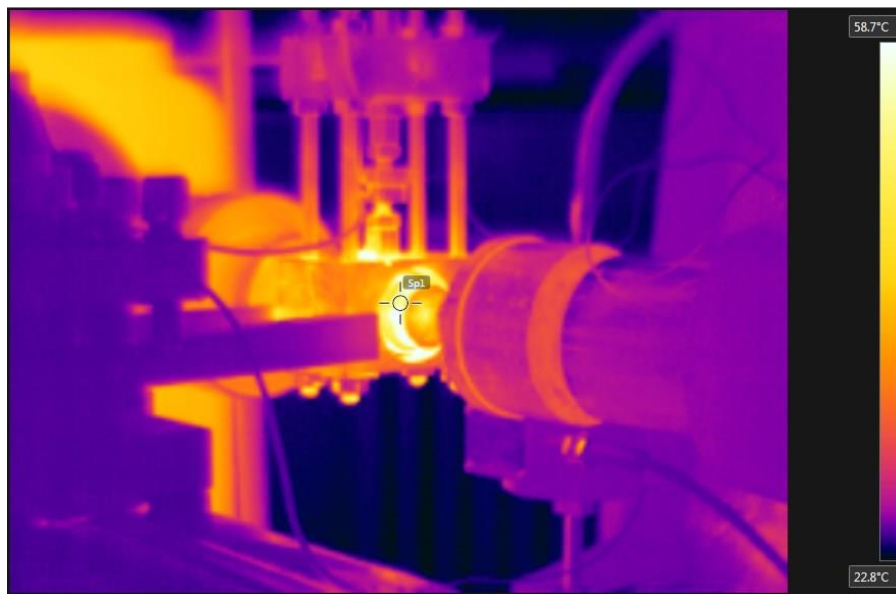
Мерење температуре код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_1500, термовизијском камером, (слика 79).



Слика 79. Температура мерена код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_3000, $T = 43.4^{\circ}\text{C}$

Пример 8_20_54_3000

Мерење температуре код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_3000, термовизијском камером, (слика 80).



Слика 80. Температура мерена код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_3000, $T = 54^{\circ}\text{C}$

Пример 12_20_265_1500

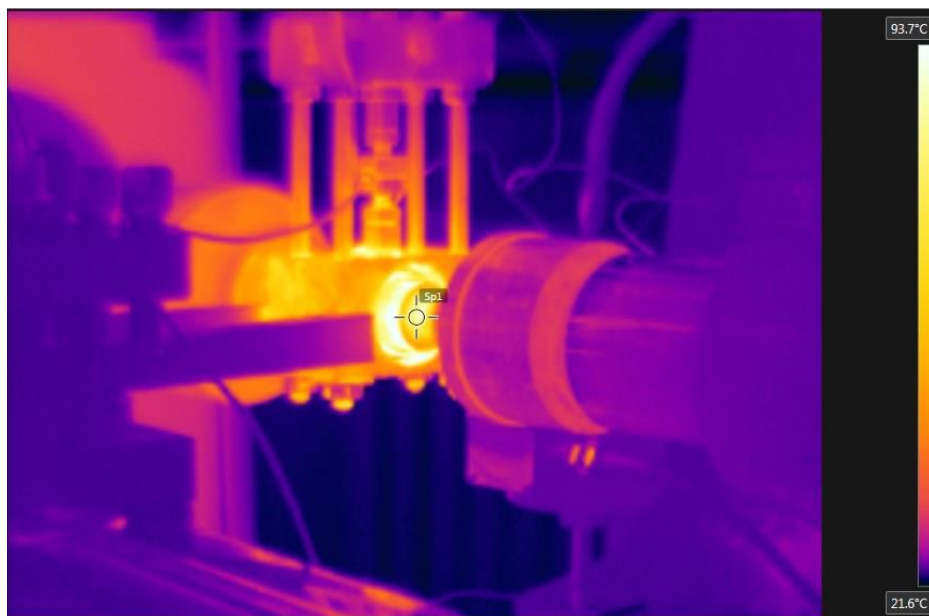
Мерење температуре код самоподмазујућег лежаја 12_20_265_1500, термовизијском камером, (слика 81).



Слика 81. Температура мерена код самоподмазујућег лежаја 12_20_265_1500 $T = 34.7^{\circ}\text{C}$

Пример 12_30_54_3000

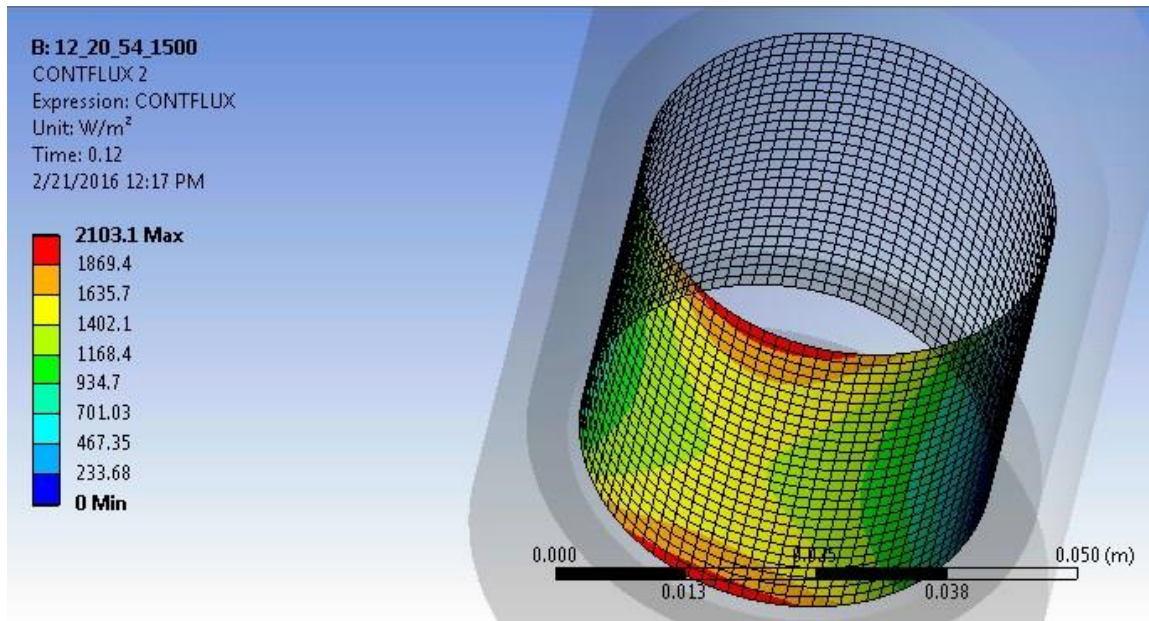
Мерење температуре код самоподмазујућег лежаја 12_30_54_3000, термовизијском камером, (слика 82).



Слика 82. Температура мерена код самоподмазујућег лежаја 12_30_265_1500, $T = 93.2^{\circ}\text{C}$

Пример 12_20_54_1500

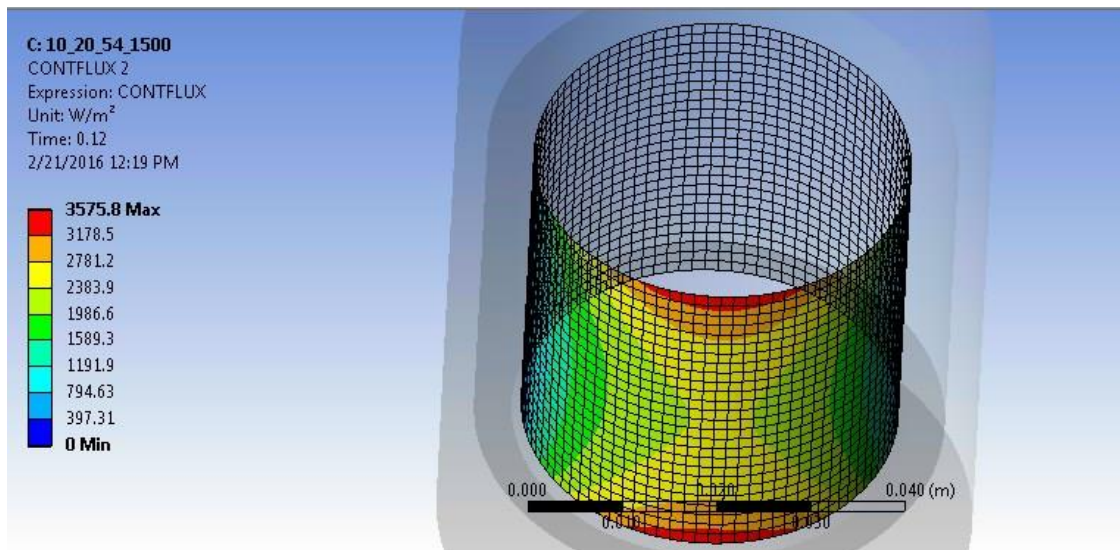
Одређивање контактнoг топлoтнoг флукса код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_1500 (слика 83).



Слика 83. Контактни топлотни флукс код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_1500

Пример 10_20_54_1500

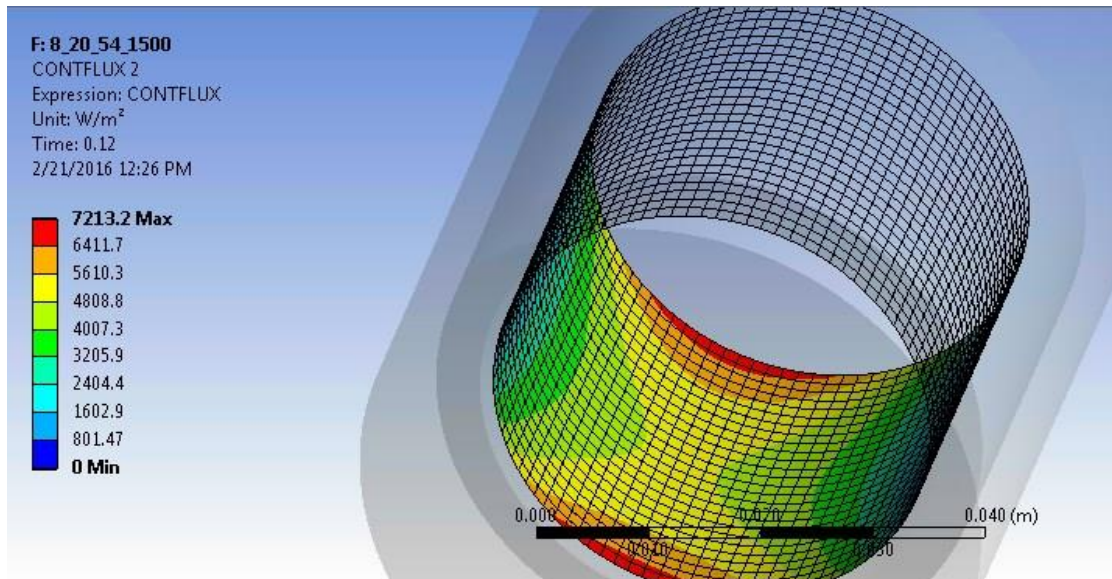
Одређивање контактнoг топлoтнoг флукса код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_1500 (слика 84).



Слика 84. Контактни топлотни флукс код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_1500

Пример 8_20_54_1500

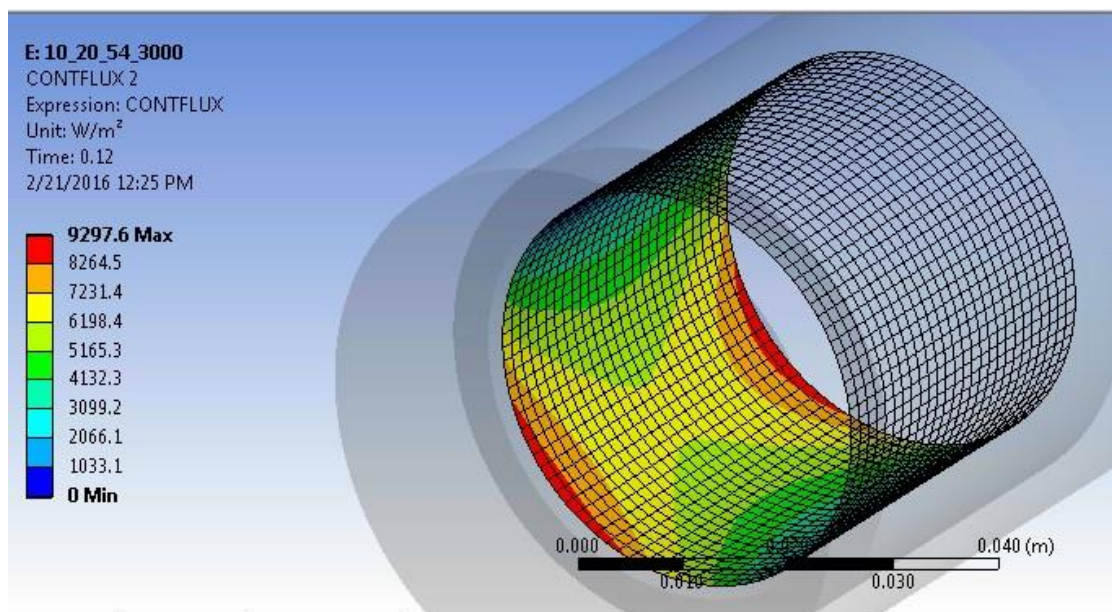
Одређивање контактнoг топлoтнoг флукса код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_1500 (слика 85).



Слика 85. Контактни топлотни флукс код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_1500

Пример 10_20_54_3000

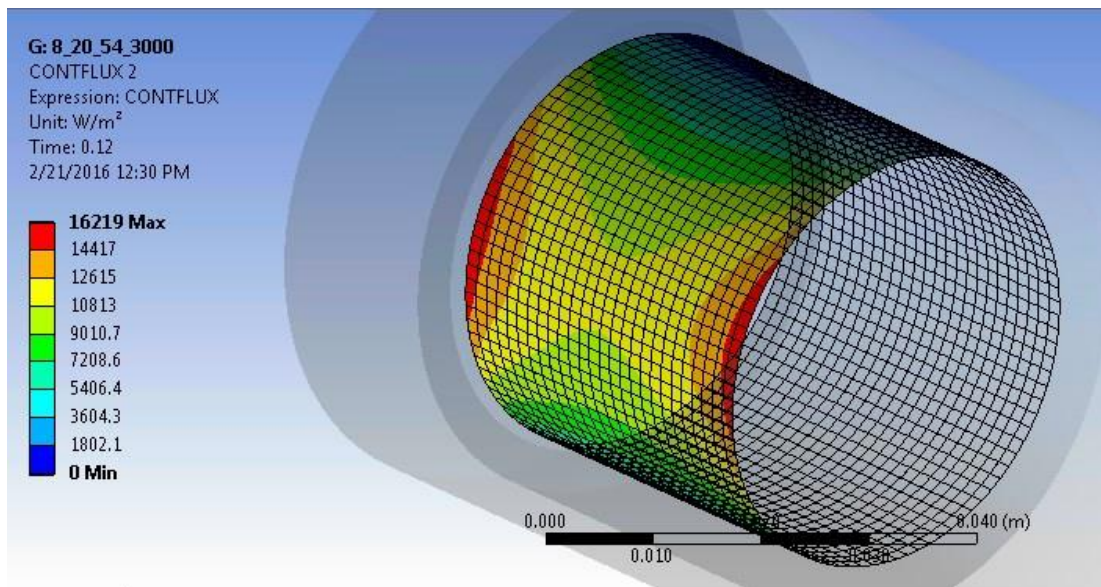
Одређивање контактнoг топлoтнoг флукса код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_3000 (слика 86).



Слика 86. Контактни топлотни флукс код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_3000

Пример 8_20_54_3000

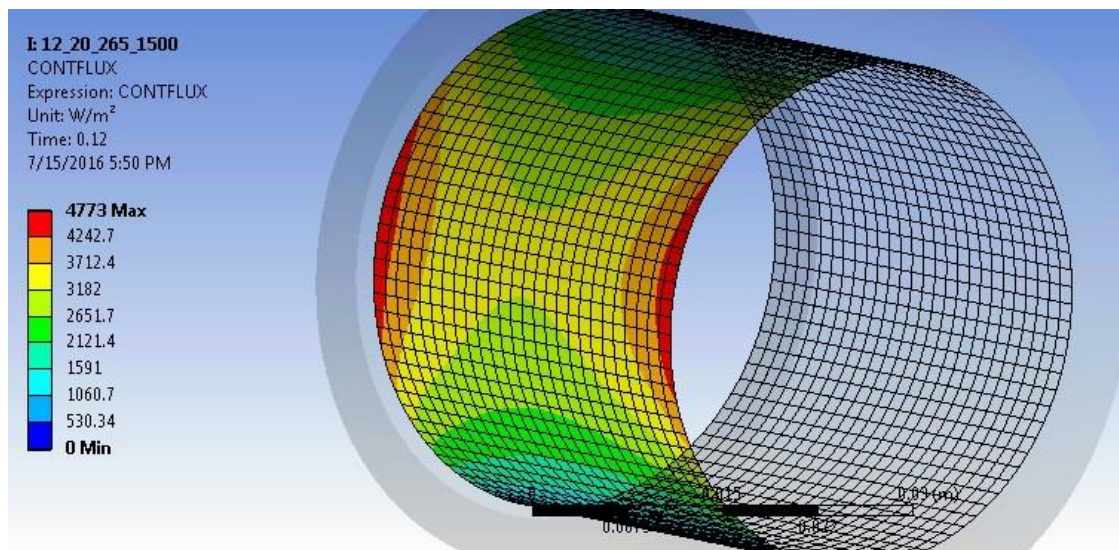
Одређивање контактнoг топлотнoг флуksа код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_3000 (слика 87).



Слика 87. Контактни топлотни флуks код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_3000

Пример 12_20_265_1500

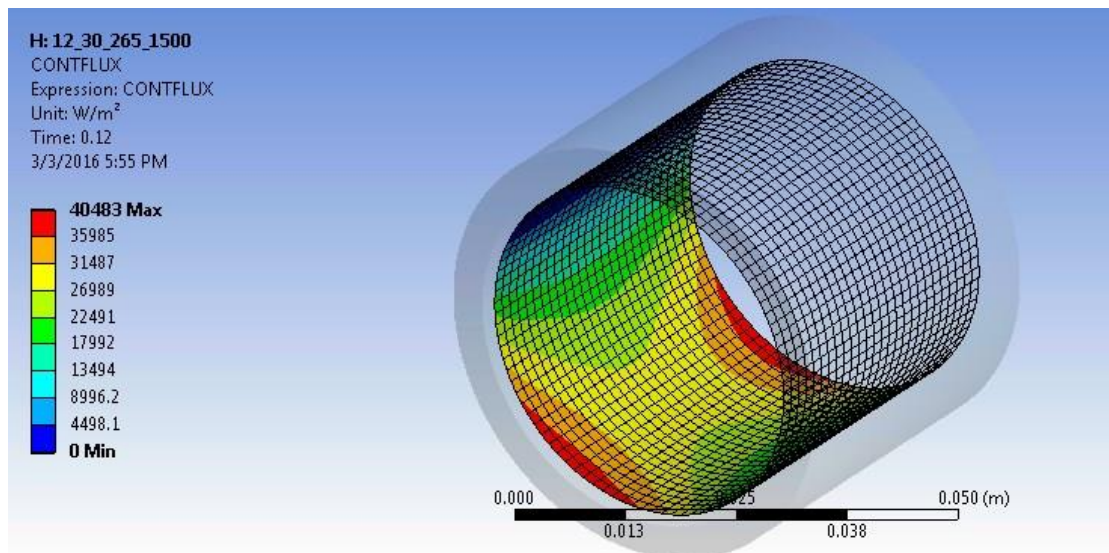
Одређивање контактнoг топлотнoг флуksа код самоподмазујућег лежаја 12_20_265_1500 (слика 88).



Слика 88. Контактни топлотни флуks код самоподмазујућег лежаја 12_20_265_1500

Пример 12_30_265_1500

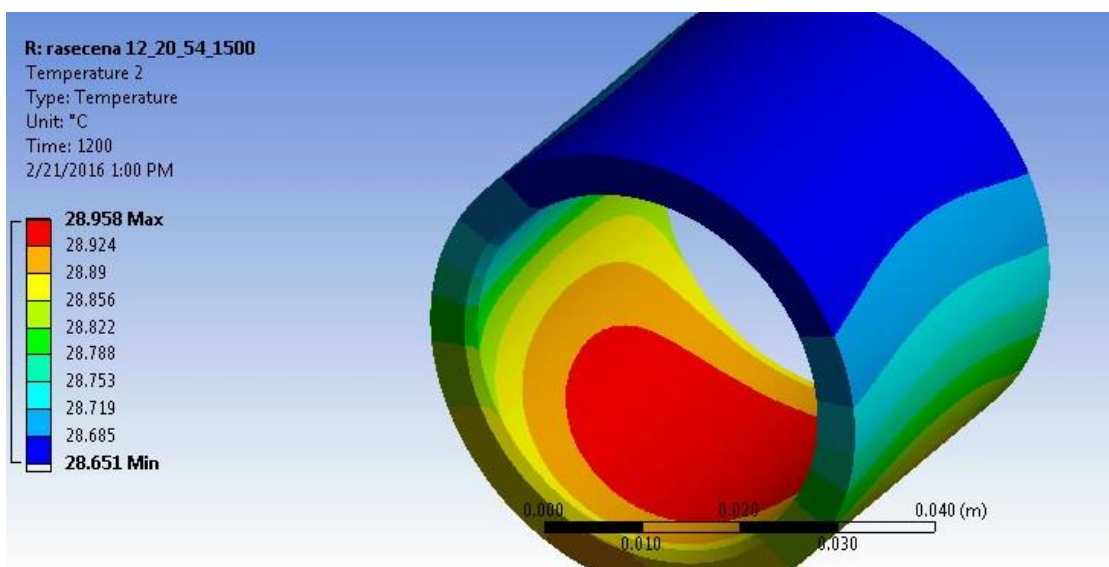
Одређивање контактнoг топлoтнoг флукса код самоподмазујућег лежаја 12_30_265_1500 (слика 89).



Слика 89. Контактни топлoтни флукс код самоподмазујућег лежаја 12_30_265_1500

Пример 12_20_54_1500

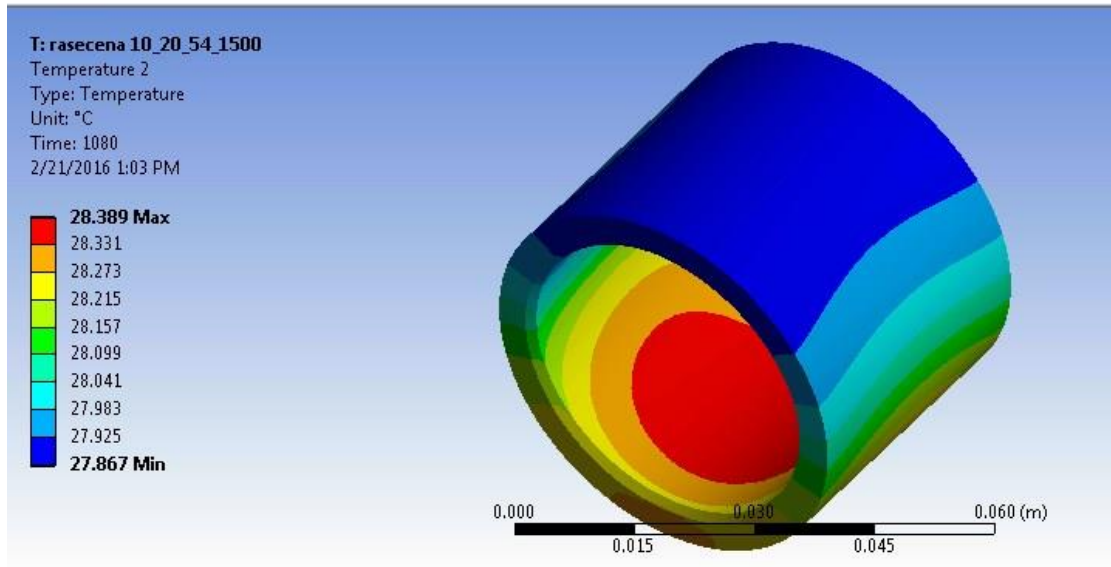
Одређивање температуре код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_1500 (слика 90).



Слика 90. Температура добијена термичком анализом код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_1500

Пример 10_20_54_1500

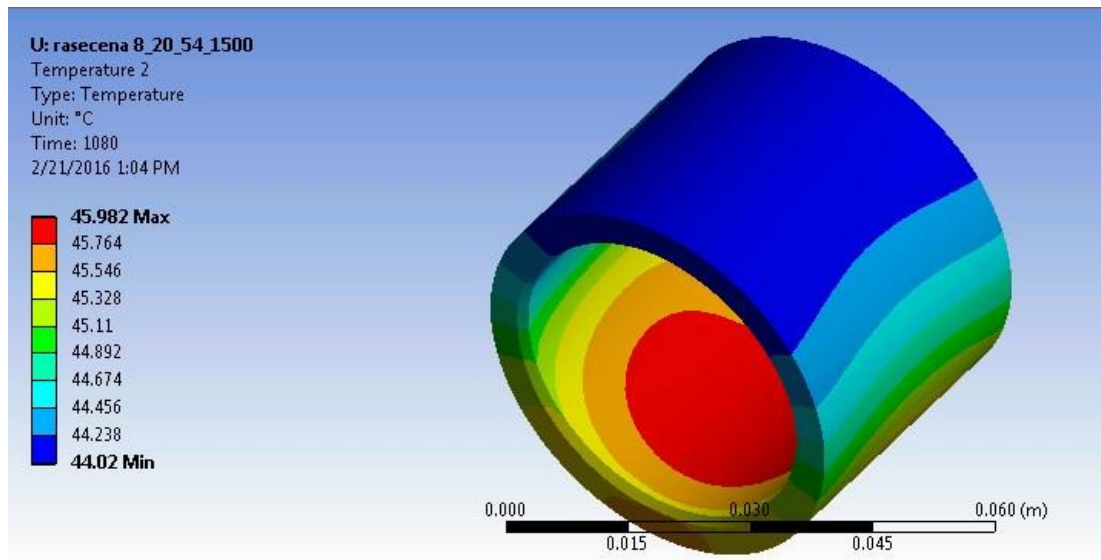
Одређивање температуре код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_1500 (слика 91).



Слика 91. Температура добијена термичком анализом код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_1500

Пример 8_20_54_1500

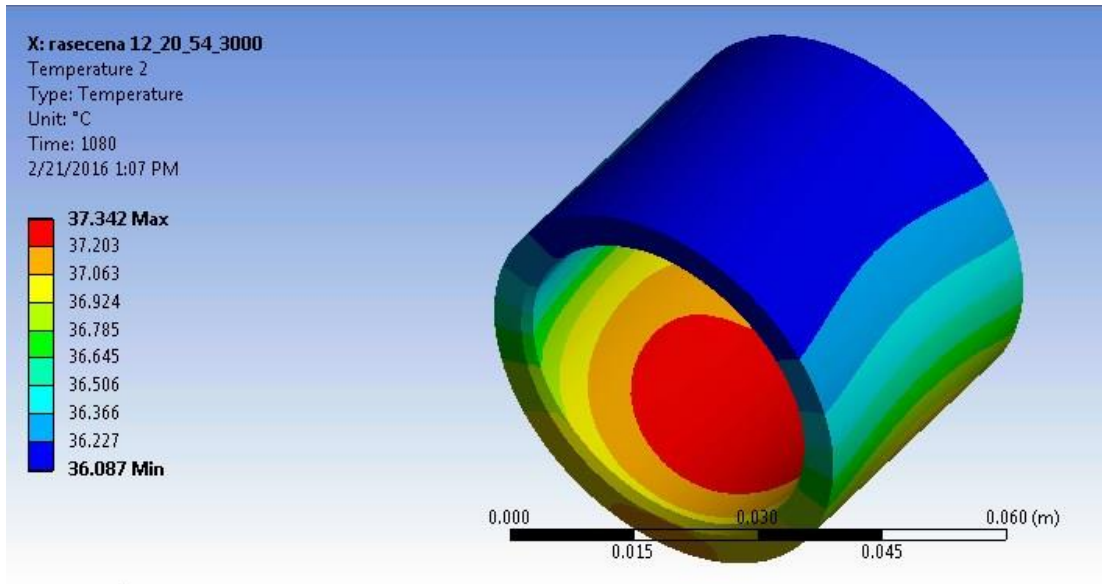
Одређивање температуре код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_1500 (слика 92).



Слика 92. Температура добијена термичком анализом код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_1500

Пример 12_20_54_3000

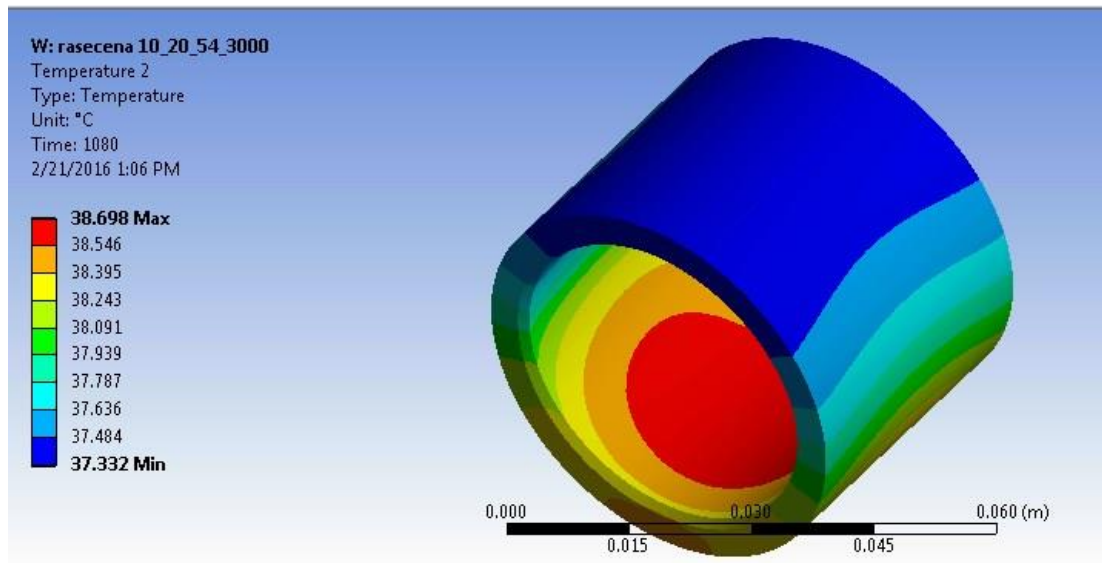
Одређивање температуре код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_3000 (слика 93).



Слика 93. Температура добијена термичком анализом код самоподмазујућег лежаја 12_20_54_3000

Пример 10_20_54_3000

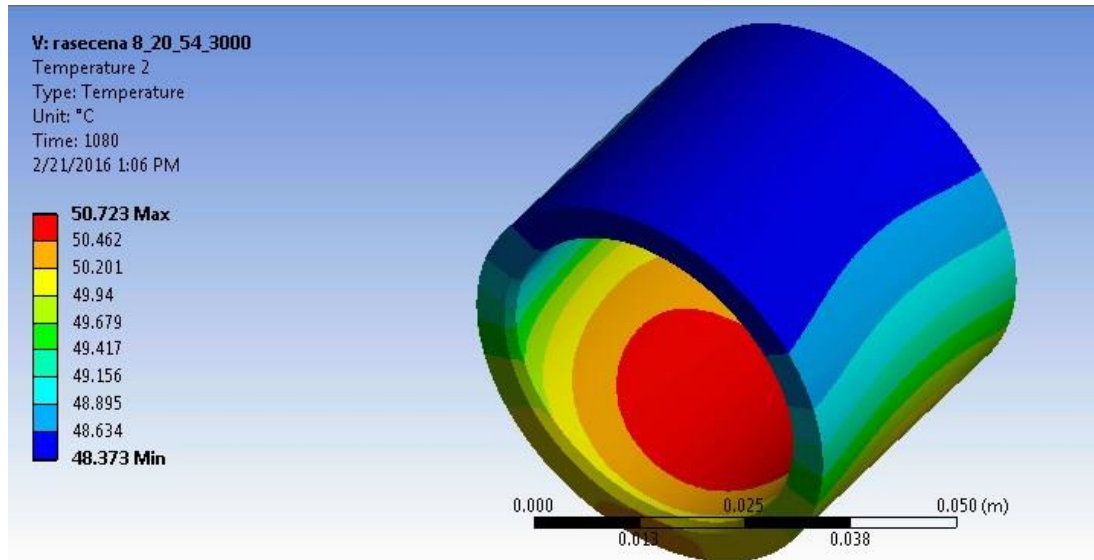
Одређивање температуре код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_3000 (слика 94).



Слика 94. Температура добијена термичком анализом код самоподмазујућег лежаја 10_20_54_3000

Пример 8_20_54_3000

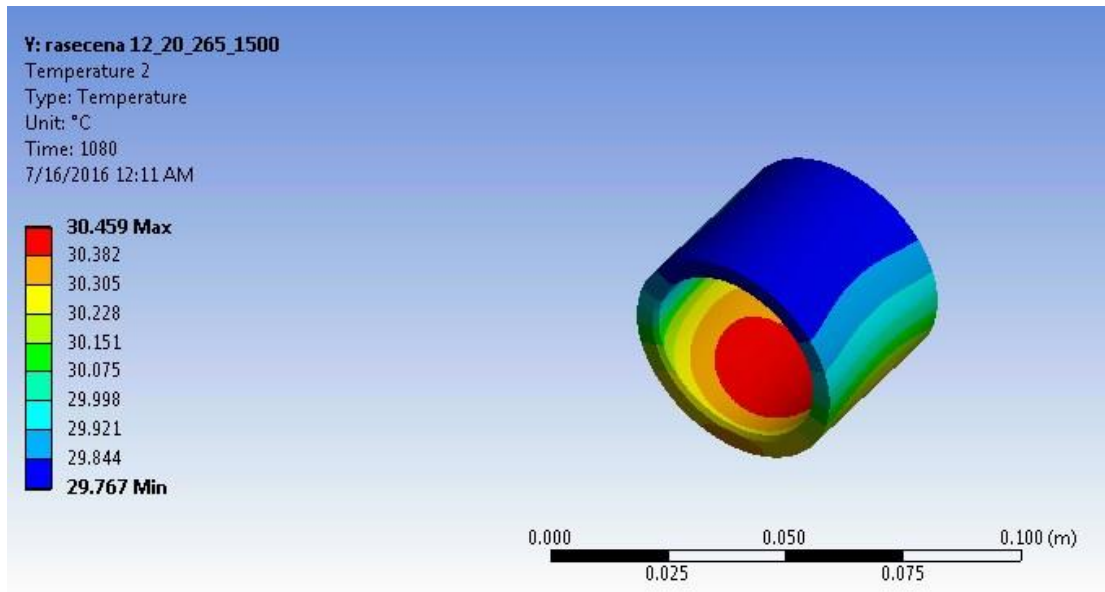
Одређивање температуре код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_3000 (слика 95).



Слика 95. Температура добијена термичком анализом код самоподмазујућег лежаја 8_20_54_3000

Пример 12_20_265_1500

Одређивање температуре код самоподмазујућег лежаја 12_20_265_1500 (слика 96).



Слика 96. Температура добијена термичком анализом код самоподмазујућег лежаја 12_20_265_1500