



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА
УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

Милан Р. Буквић

**УТИЦАЈ ДОДАВАЊА УГЉЕНИЧНИХ
НАНОЦЕВИ У МАЗИВО НА РАДНЕ
КАРАКТЕРИСТИКЕ ПУЖНИХ
ЗУПЧАСТИХ ПРЕНОСНИКА**

докторска дисертација

Крагујевац, 2026.



UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC

FACULTY OF ENGINEERING
UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC

Milan R. Bukvić

**THE INFLUENCE OF THE ADDITION OF
CARBON NANOTUBES TO THE
LUBRICANT ON THE PERFORMANCE
OF WORM GEAR TRANSMISSIONS**

Doctoral Dissertation

Kragujevac, 2026

Аутор
Име и презиме: Милан Буквић
Датум и место рођења: 23.07.1976. године у Ужицу
Садашње запослење: официр Војске Србије на служби у Београду
Докторска дисертација
Наслов: Утицај додавања угљеничних нанопеви у мазиво на радне карактеристике пужних зупчастих преносника
Број страница: 197
Број слика: 118
Број библиографских података: 157
Установа и место где је рад израђен: Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Научна област (УДК): Машинско инжењерство
Ментор: др Блажа Стојановић , редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Број Одлуке и датум прихватања теме докторске дисертације: IV-04-92/4, 21.02.2024. године

ЗАХВАЛНИЦА

Научноистраживачки рад сам започео још приликом писања пројектног и дипломског рада на Војнотехничкој академији у Београду. Кроз каријеру и различите облике усавршавања сам се изграђивао и унапређивао знања поред многих стручних и веома образованих људи, али прекретница је засигурно била када сам упознао професора Блажу.

Огромну захвалност дугујем свом ментору др Блажи Стојановићу, редовном професору Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, на људском и колегијалном приступу, изузетној подршци, усмерењима, критикама и постављеним роковима, које сам добијао током израде докторске дисертације и писања бројних радова.

Захвалан сам установама и руководиоцима лабораторија у којима сам извршио експериментална испитивања и који су ми обезбедили бројне узорке материјала за испитивање, а пре свега редовном професору др Александру Венцу са Машинског факултета Универзитета у Београду, уједно члану комисије за оцену и одбрану докторске дисертације. Без њихове несебичне помоћи, великог стрпљења у раду са мном и огромног научног знања, ова дисертација не би угледала светло дана.

Посебно се захваљујем власницима и директорима предузећа, у којима су израђени елементи и извршене монтаже пужних преносника снаге и то: покојном Драгану Грујићу, власнику предузећа V.A.G PRO-RED GROUP DOO из Београда и др Рату Нинковићу из предузећа RAR DOO из Београда. Велику захвалност дугујем колегама са Војнотехничког института у Београду, пуковнику Брзић Саши, Драгани Прокић, Мирјани Крстовић и Теодори Станчић, инжењерима у лабораторији за испитивање материјала.

Велика захвалност свим члановима комисије за оцену и одбрану докторске дисертације, редовном професору др Слободану Савићу, редовном професору, др Ивану Милетићу, ванредном професору Милошу Матејићу и доценту др Сандри Гајевић, на критичком осврту и корисним саветима и сугестијама.

Огромно хвала на свему колеги Александру Скулићу („хвала ти друже“) и колегама и пријатељима, Саши Милојевићу, Славици Миладиновић, Николи Коматини и Стефану Чукићу са Факултета инжењерских наука у Крагујевцу.

Родитељи и брат су увек били уз мене, отац се вероватно и са неба радује.

Највећу захвалност дугујем својој супрузи Душици, што ме је трпела све ове године, што ми је несебично помагала у научном истраживању, била подршка и преузимала све обавезе око деце, док сам ја често одсуствовао од куће због испитивања и дуго у ноћ писао бројне редове ове дисертације и научних радова. Наша деца, Ленка, Раде и Дуле су расли, док је тата писао и увек су имали разумевања за оно што тата ради. Хвала вам, децо.

Дисертацију поклањам супрузи и деци.

Аутор Милан Буквић

Резиме

Докторска дисертација је обухватила анализу утицаја угљеничних наноцеви (CNT), као адитива у течним мазивима, на радне карактеристике пужних зупчастих преносника снаге, са посебним нагласком на смањење трења, повећање отпорности на хабање, унапређење термичке стабилности, смањење буке и вибрација и повећање степена искоришћења. Истраживање је обухватило теоријски и експериментални део, при чему су припремљена мазива са различитим концентрацијама CNT од 0 %, 0,1 %, 0,2 %, 0,5 %, 1,0 % и 2,0 % масеног удела (мас.%), која су испитивана у лабораторијским условима, симулирајући реалне радне режиме. Испитивани су губици снаге, степен искоришћења, величина хабања, интензитет буке и вибрација, као и температура контактних површина. Паралелно је анализиран утицај материјала пужног пара, који чине челични пуж у комбинацији са пужним зупчаником од цинк-алуминијумске бронзе ZA-12 и калајне бронзе CuSn14, а теоријски део је обухватио механизме деловања CNT адитива, формирање функционалних нанослојева и микроструктурне промене контактних површина. Резултати показују да је оптимална концентрација CNT адитива 1,0 мас.%. Тада се остварује најнижа величина хабања и највећи степен искоришћења, уз најмањи пораст температуре мазива и редукацију вибрација и буке. Комбинација челичног пужа 20CrMo5 и пужног зупчаника од ZA-12 бронзе показала је боље карактеристике у односу на CuSn14 бронзу и комерцијално уље за зупчасте преноснике Reduktol Super ISO VG 460, са већим степеном искоришћења, нижим хабањем и нижим интензитетом буке и вибрација, осим при екстремним оптерећењима, када је забележено делимично погоршање карактеристика услед локалног прекида слоја мазива. Механизми побољшања укључују формирање стабилних слојева мазива, продирање CNT адитива у неравнине на површини метала, а примена статистичке методе, полиномске регресије, омогућила је идентификацију оптималне концентрације и предвиђање радних карактеристика са високим коефицијентом детерминције ($R^2 > 0,95$). Добијени резултати показују да је комбинација мазива са 1,0 мас.% CNT и пужног зупчаника од ZA-12 бронзе у спрези са челичним пужем, оптимална за већину радних режима, чиме се остварује значајно унапређење експлоатационих карактеристика. Добијени резултати представљају значајан научни и практични допринос развоју напредних наномазива, оптимизацији пужних преносника и широј примени у механичким системима који раде у условима високог трења и оптерећења.

Кључне речи: наноцеви, пужни преносник, степен искоришћења, хабање, бука, вибрације, температура, бронза, оптимизација.

Abstract

The doctoral dissertation includes an analysis of the impact of carbon nanotubes (CNTs) as additives in liquid lubricants on the performance characteristics of worm gear power transmissions, with a particular emphasis on reducing friction, increasing wear resistance, enhancing thermal stability, reducing noise and vibrations, and increasing efficiency. The research comprised both theoretical and experimental sections. Lubricants were prepared with varying CNT concentrations of 0%, 0.1%, 0.2%, 0.5%, 1.0%, and 2.0% by weight (wt.%) and tested under laboratory conditions simulating real-world operating regimes. Parameters investigated included power losses, efficiency, wear magnitude, noise and vibration intensity, and contact surface temperatures. Parallel to this, the influence of the worm pair material was analyzed, consisting of a steel worm in combination with worm gears made of zinc-aluminum bronze (ZA-12) and tin bronze (CuSn14). The theoretical part covered the mechanisms of CNT additive action, the formation of functional nanolayers, and microstructural changes of the contact surfaces. The results indicate that the optimal CNT concentration is 1.0 wt.%. At this level, the lowest wear rate and highest efficiency are achieved, along with the smallest lubricant temperature rise and a reduction in vibrations and noise. The combination of the 20CrMo5 steel worm and the ZA-12 bronze gear showed superior characteristics compared to CuSn14 bronze and the commercial gear oil Reduktol Super ISO VG 460, exhibiting higher efficiency, lower wear, and lower noise and vibration intensity, except under extreme loads, where a partial degradation of performance was noted due to local lubricant film breakdown. Improvement mechanisms include the formation of stable lubricant films and the penetration of CNT additives into surface asperities. The application of statistical methods, specifically polynomial regression, enabled the identification of the optimal concentration and the prediction of operating characteristics with a high coefficient of determination ($R^2 > 0,95$). The findings demonstrate that the combination of lubricant with 1.0 wt.% CNT and a ZA-12 bronze gear coupled with a steel worm is optimal for most operating regimes, leading to a significant enhancement of operational characteristics. These results represent a substantial scientific and practical contribution to the development of advanced nanolubricants, the optimization of worm gears, and broader application in mechanical systems operating under high friction and load conditions.

Key words: carbon nanotube additives, worm gear drive, efficiency, wear, noise, vibrations, temperature, bronze, optimization.

САДРЖАЈ

СПИСАК СЛИКА	i
СПИСАК ТАБЕЛА.....	v
СПИСАК ОЗНАКА	vii
СПИСАК СКРАЋЕНИЦА	xi
1. УВОД.....	1
2. ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ДИСЕРТАЦИЈЕ	5
2.1. Предмет рада.....	5
2.2. Циљ рада.....	6
2.3. Методологија израде рада.....	7
2.4. Хипотезе рада.....	7
3. ПРИКАЗ ДОСАДАШЊИХ ИСПИТИВАЊА СТЕПЕНА ИСКОРИШЋЕЊА, ХАБАЊА, БУКЕ, ВИБРАЦИЈА И ПРОМЕНЕ ТЕМПЕРАТУРЕ ПУЖНИХ ПРЕНОСНИКА СНАГЕ.....	9
3.1. Степен искоришћења пужних преносника снаге	10
3.2. Термичко понашање пужних преносника снаге.....	13
3.3. Вибрације и бука пужних преносника снаге	15
3.4. Примена наноадитива у мазивима и хабање пужних преносника снаге.....	17
4. ПУЖНИ ПРЕНОСНИЦИ СНАГЕ	24
4.1. Појам, намена и карактеристике пужних преносника снаге	24
4.2. Конструкција, геометрија и начини спрезања пужних преносника снаге	26
4.3. Динамичке величине пужних преносника снаге	32
4.4. Радне карактеристике пужних преносника снаге.....	36
4.4.1 Степен искоришћења пужних преносника снаге	36
4.4.2 Хабање пужних преносника снаге	37
4.4.3 Бука код пужних преносника снаге	42
4.4.4 Вибрације пужних преносника снаге	43
4.4.5 Промена температуре пужних преносника снаге.....	45
4.5. Основе трибологије пужних преносника снаге	49
5. МАЗИВА СА НАНОАДИТИВИМА	60
5.1. Основни појмови о мазивима	60
5.2. Појам, порекло и намена мазива са наноадитивима	62
5.3. Врсте и карактеристике мазива са наноадитивима и класификација наночестица.....	62
5.4. Механизми дејства CNT код примене мазива са наноадитивима.....	65

5.4.1. Ефекат котрљања наночестица	66
5.4.2. Ефекат слоја мазива са наночестицама на површини.....	66
5.4.3. Ефекат попутне неравнина на површинама.....	67
5.4.4. Ефекат глечања површина.....	67
5.5. Утицај концентрације, величине, облика и агрегације наночестица на карактеристике мазива са наночестицама	68
5.5.1. Концентрација наночестица у мазиву	68
5.5.2. Величина и облик наночестица у мазиву	71
5.5.3. Стабилност и агрегација наночестица у мазиву	73
5.6. Методе испитивања мазива са наночестицама	75
6. ПЛАН И СПРОВОЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСПИТИВАЊА.....	77
6.1. Опис мерне опреме за испитивање пужног преносника снаге	77
6.2. Испитивање степена искоришћења	79
6.3. Мерење буке пужног преносника снаге	80
6.4. Мерење вибрација пужног преносника снаге.....	81
6.5. Мерење температуре пужног преносника снаге.....	82
6.6. Мерење масе, хабања и хрпавости делова пужног преносника снаге.....	83
6.7. Одређивање карактеристика примењеног пужног преносника снаге	91
6.8. Одређивање геометријских карактеристика пужног преносника снаге	98
6.9. Уља за подмазивање пужног преносника снаге	99
6.10. План експерименталних истраживања.....	113
7. РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА.....	116
7.1. Резултати испитивања степена искоришћења, буке, вибрација и промене температуре пужног преносника снаге	117
7.2. Резултати испитивања хабања и хрпавости делова пужног преносника снаге	125
8. АНАЛИЗА И ДИСКУСИЈА ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА.....	135
8.1. Анализа резултата степена искоришћења пужног преносника снаге	135
8.2. Анализа резултата испитивања буке пужног преносника снаге.....	140
8.3. Анализа резултата испитивања вибрација пужног преносника снаге	145
8.4. Анализа резултата испитивања промене температуре пужног преносника снаге	150
8.5. Анализа резултата испитивања хабања и хрпавости делова пужног преносника снаге	154
9. ОПТИМИЗАЦИЈА И МОДЕЛ ПРЕДВИЂАЊА СТЕПЕНА ИСКОРИШЋЕЊА ПУЖНОГ ПРЕНОСНИКА СНАГЕ	160
9.1. Појам, методе и технике оптимизације	160
9.2. Теоријска основа, примена и значај полиномске регресије	161

9.3. Примена полиномске регресије за оптимизацију степена искоришћења пужног преносника снаге	162
9.4. Интервалне оцене оптималног процента адитива	171
10. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА	173
ЛИТЕРАТУРА	179
ПРИЛОЗИ.....	190
Прилог 1. Приказ пужног преносника снаге коришћеног у експерименту ...	190
Прилог 2. Модел пужног преносника снаге коришћеног у експерименту у различитим погледима и пресецима	191
Прилог 3. Дијаграми профила храпавости испитиваних плочица од челика 20CrMo5 и дискова од калајне бронзе CuSn14 и цинк–алуминијум бронзе ZA-12	192

СПИСАК СЛИКА

Слика 3.1	Распрострањеност механичких преносника снаге према врстама	9
Слика 4.1	Пужни пар [54].....	24
Слика 4.2	Облици пужних парова: цилиндрични и глободни [54]	25
Слика 4.3	Пужни пар са (а) левом и (б) десном завојницом пужа [54].....	25
Слика 4.4	Уздужни пресек пужног преносника снаге [56]	27
Слика 4.5	Врсте пужева: (а) једнозавојни пуж и (б) вишезавојни пуж [9]	28
Слика 4.6	Геометријске величине цилиндричног пужа [9].....	29
Слика 4.7	Геометријске величине пужног зупчаника: а) аксијални пресек пужног зупчаника, б) попречни пресек пужног зупчаника [9]	31
Слика 4.8	Аксијални пресек и кинематска равна пужног пара [55].....	33
Слика 4.9	Осно растојање елемената пужног пара [60]	34
Слика 4.10	Приказ елемената пужног преносника снаге [60].....	34
Слика 4.11	Силе које делују на бокове пужа и пужног зупчаника [9]	36
Слика 4.12	Адхезионо хабање снимљено електронским микроскопом [5].....	38
Слика 4.13	Приказ гребања на контактним површинама [60]	39
Слика 4.14	Абразивно хабање снимљено електронским микроскопом [60].....	40
Слика 4.15	Приказ питинга на површини пужа [60].....	41
Слика 4.16	Приказ уређаја за мерење буке на испитном столу [32]	43
Слика 4.17	Положаји сензора (сонди) уређаја за мерење вибрација [70].....	45
Слика 4.18	Термографички приказ пужног преносника снаге	46
Слика 4.19	Оштећење на боковима пужа и пужног зупчаника [60].....	46
Слика 4.20	Стрибеков дијаграм [79]	52
Слика 4.21	Шематски приказ хидростатичког подмазивања [3]	53
Слика 4.22	Шематски приказ хидродинамичког подмазивања [3]	54
Слика 4.23	Шематски приказ режима еластохидродинамичког подмазивања [3]	55
Слика 4.24	Шематски приказ мешовитог подмазивања [3]	56
Слика 4.25	Шематски приказ граничног подмазивања [3, 5]	57
Слика 5.1	Процес добијања наномазива [92].....	63
Слика 5.2	Приказ угљеничних наноцеви: (а) макроскопски изглед, (б) снимак електронским микроскопом, (в) молекулска структура [96]	64
Слика 5.3	Шематски приказ ефекта котрљања наночестица [92]	66
Слика 5.4	Шематски приказ слоја мазива са наночестицама [92].....	66
Слика 5.5	Шематски приказ попутне неравнина на површина [92]	67
Слика 5.6	Шематски приказ ефекта глачања површина [92].....	68
Слика 5.7	Микроскопски прикази различитих форми CNT адитива у мазивима [45]	69
Слика 5.8	Шематски приказ врста контаката наночестица и површине на основу облика наночестица: (а) тачкасти контакт, (б) линијски контакт, (в) површински (планарни) контакт [113]	73
Слика 6.1	Испитни уређај АТ200 са пратећом опремом: електромотор (1); постоље (2); динамометар на улазу (3); полуга (4); електромагнетна кочница (5); динамометар на излазу (6); полуга (7); пужни преносник (8); управљачки модул (9)	77
Слика 6.2	Блок дијаграм испитног уређаја АТ200: електромотор (1); пуж (2); пужни зупчаник (3); електромагнетна кочница (4); управљачки модул (5) [121]	78
Слика 6.3	Динамометар са полугом	78
Слика 6.4	Електромагнетна кочница са динамометром	78
Слика 6.5	Управљачки модул	79
Слика 6.6	Инструмент за мерење нивоа буке TROTEC BS06	81
Слика 6.7	Инструмент за мерење вибрација VB-8216SD.....	81
Слика 6.8	Начин постављања сонде виброметра на пужни преносник снаге	82
Слика 6.9	Термовизијска камера FLUS IR-895	82
Слика 6.10	Мерење температуре пужног преносника снаге: (а) термовизијска камера FLUS IR-	

895 постављена на сталку и усмерена на тачку мерења температуре, (б) приказ места мерења температуре.....	83
Слика 6.11 Вага за мерење масе PS 1000.R2	84
Слика 6.12 Ултразвучна када Vabsonic SB-4LDD.....	85
Слика 6.13 Приказ трибометра TPD 95 са мерним уређајима и дијагностичком опремом	85
Слика 6.14 Приказ испитивања диска од калајне бронзе CuSn14 и плочице од челика 20CrMo5 (Џ.4321) на трибометру TPD 95.....	86
Слика 6.15 Изглед дискова од бронзе и плочица од челика након испитивања на трибометру TPD 95	86
Слика 6.16 Шематски приказ рада трибометра TPD-95.....	88
Слика 6.17 Приказ прикупљања резултата испитивања силе трења, коефицијента трења и температуре уља за узорак диска од бронзе ZA-12	88
Слика 6.18 Приказ мерења храповости диска од бронзе ZA-12 уређајем TR-200.....	89
Слика 6.19 Скица мерења храповости површина.....	91
Слика 6.20 Пуж израђен од челика 20CrMo5	93
Слика 6.21 Пужни зупчаник израђен од калајне бронзе CuSn14	93
Слика 6.22 Пужни зупчаник од бронзе ZA-12	97
Слика 6.23 Изглед кућишта испитиваног пужног преносника снаге.....	97
Слика 6.24 Дијаграм промене кинематске вискозности у функцији обртног момента T_2 преносника са пужним зупчаником од бронзе CuSn14, за различита мазива, при улазној угаоној брзини од 1500 min^{-1}	107
Слика 6.25 Дијаграм промене кинематске вискозности у функцији обртног момента T_2 преносника са пужним зупчаником од бронзе CuSn14, за различита мазива, при улазној угаоној брзини од 2000 min^{-1}	107
Слика 6.26 Дијаграм промене кинематске вискозности у функцији обртног момента T_2 преносника са пужним зупчаником од бронзе CuSn14, за различита мазива, при улазној угаоној брзини од 2500 min^{-1}	108
Слика 6.27 Дијаграм промене кинематске вискозности у функцији обртног момента T_2 преносника пужним зупчаником од бронзе ZA-12, за различита мазива, при улазној угаоној брзини од 1500 min^{-1}	112
Слика 6.28 Дијаграм промене кинематске вискозности у функцији обртног момента T_2 преносника са пужним зупчаником од бронзе ZA-12, за различита мазива, при улазној угаоној брзини од 2000 min^{-1}	112
Слика 6.29 Дијаграм промене кинематске вискозности у функцији обртног момента T_2 преносника са пужним зупчаником од бронзе ZA-12, за различита мазива, при улазној угаоној брзини од 2500 min^{-1}	113
Слика 7.1 Изглед приказа праћења резултата испитивања триболошког пара челик-бронза CuSn14 за мазиво са 0 мас.% CNT адитива	127
Слика 7.2 Изглед приказа праћења резултата испитивања триболошког пара челик-бронза CuSn14 за мазиво са 0,5 мас.% CNT адитива	127
Слика 7.3 Изглед приказа праћења резултата испитивања триболошког пара челик-бронза CuSn14 за мазиво са 2,0 мас.% CNT адитива	128
Слика 7.4 Дијаграм промене коефицијента трења током испитивања диска од калајне бронзе CuSn14 и плочице од челика 20CrMo5 применом мазива са различитим масеним уделом CNT адитива	129
Слика 7.5 Дијаграм промене коефицијента трења током испитивања диска од цинк–алуминијум бронзе ZA-12 и плочице од челика 20CrMo5 применом мазива са различитим масеним уделом CNT адитива.....	129
Слика 7.6 Дијаграм промене температуре мазива током испитивања диска од калајне бронзе CuSn14 и плочице од челика 20CrMo5 применом мазива са различитим масеним уделом CNT адитива	131
Слика 7.7 Дијаграм промене температуре мазива током испитивања диска од цинк–алуминијум бронзе ZA-12 и плочице од челика 20CrMo5 применом мазива са различитим масеним уделом CNT адитива	132
Слика 7.8 Приказ диска од бронзе ZA-12 са обележеним местима по ободу диска на којима је	

Слика 8.27 Фотографије пужних зупчаника снимљене помоћу микроскопа LEICA M205 A..	158
Слика 8.28 Фотографије уз увећање а–ђ приказују површине хабања пужног зупчаника након испитивања и трагове мазива са различитом концентрацијом CNT адитива; а) 0,1 мас.% CNT; б) 0,2 мас.% CNT; в) 0,5 мас.% CNT; г) 1,0 мас.% CNT; д) 2,0 мас.% CNT; њ) 0 мас.% CNT	159
Слика 9.1 Једначине полиномске регресије за пужни преносник са пужним зупчаником од CuSn14, при улазном броју обртаја од 1500 min ⁻¹ за пет вредности излазних обртних момената	165
Слика 9.2 Једначине полиномске регресије за пужни преносник са пужним зупчаником од CuSn14, при улазном броју обртаја од 2000 min ⁻¹ за пет вредности излазних обртних момената	166
Слика 9.3 Једначине полиномске регресије за пужни преносник са пужним зупчаником од CuSn14, при улазном броју обртаја од 2500 min ⁻¹ за пет вредности излазних обртних момената	167
Слика 9.4 Једначине полиномске регресије за пужни преносник са пужним зупчаником од ZA-12, при улазном броју обртаја од 1500 min ⁻¹ за пет вредности излазних обртних момената	168
Слика 9.5 Једначине полиномске регресије за пужни преносник са пужним зупчаником од ZA-12, при улазном броју обртаја од 2000 min ⁻¹ за пет вредности излазних обртних момената	169
Слика 9.6 Једначине полиномске регресије за пужни преносник са пужним зупчаником од ZA-12, при улазном броју обртаја од 2500 min ⁻¹ за пет вредности излазних обртних момената	170
Слика П 3.1 Дијаграм профила храпавости диска од бронзе CuSn након испитивања у мазиву са 0 мас.% CNT адитива.....	192
Слика П 3.2 Дијаграм профила храпавости диска од бронзе ZA-12 након испитивања у мазиву са 0 мас.% CNT адитива.....	192
Слика П 3.3 Дијаграм профила храпавости челичне плочице након испитивања у мазиву са 0 мас.% CNT адитива	193
Слика П 3.4 Дијаграм профила храпавости диска од бронзе CuSn14 након испитивања у мазиву са 0,2 мас.% CNT адитива.....	193
Слика П 3.5 Дијаграм профила храпавости диска од бронзе ZA-12 након испитивања у мазиву са 0,2 мас.% CNT адитива.....	194
Слика П 3.6 Дијаграм профила храпавости челичне плочице након испитивања у мазиву са 0,2 мас.% CNT адитива	194
Слика П 3.7 Дијаграм профила храпавости диска од бронзе CuSn14 након испитивања у мазиву са 1,0 мас.% CNT адитива.....	195
Слика П 3.8 Дијаграм профила храпавости диска од бронзе ZA-12 након испитивања у мазиву са 1,0 мас.% CNT адитива.....	195
Слика П 3.9 Дијаграм профила храпавости челичне плочице након испитивања у мазиву са 1,0 мас.% CNT адитива	196
Слика П 3.10 Дијаграм профила храпавости диска од бронзе CuSn14 након испитивања у мазиву са 2,0 мас.% CNT адитива.....	196
Слика П 3.11 Дијаграм профила храпавости диска од бронзе ZA-12 након испитивања у мазиву са 2,0 мас.% CNT адитива.....	197
Слика П 3.12 Дијаграм профила храпавости челичне плочице након испитивања у мазиву са 2,0 мас. 0% CNT адитива	197

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 4.1 Геометријске вредности цилиндричног пужа [9]	30
Табела 4.2 Геометријске вредности пужног зупчаника [9]	32
Табела 6.1 Основне техничке карактеристике трибометра TPD 95 примењене у експерименту	87
Табела 6.2 План испитивања хабања и храпавости.....	89
Табела 6.3 Основне техничке карактеристике профилометра TR-200	90
Табела 6.4 Механичке карактеристике челика 20CrMo5 (Џ.4321) према стандардима EN 10084 и DIN 17210 [127].....	92
Табела 6.5 Механичке карактеристике калајне бронзе CuSn14 према стандардима EN 1982 и DIN 17662[129].....	94
Табела 6.6 Механичке карактеристике цинк-алуминијум бронзе ZA-12 (RAR12) [131]	95
Табела 6.7 Преглед геометријских величина пужног преносника снаге добијених прорачуном	99
Табела 6.8 Емпиријске вредности вискозности глицеролског базног мазива са CNT адитивима на температурама од 40 °C и 100 °C.....	101
Табела 6.9 Вредности фактора радних услова KA [60].....	103
Табела 6.10 Кинематска вискозност мазива за различите режиме рада пужног преносника са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14	104
Табела 6.11 Прорачунате температуре мазива за различите режиме рада пужног преносника са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14	105
Табела 6.12 Измерене температуре мазива за различите режиме рада пужног преносника са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14	106
Табела 6.13 Кинематска вискозност мазива за различите режиме рада пужног преносника са пужним зупчаником од цинк-алуминијум бронзе ZA-12.....	109
Табела 6.14 Прорачунате температуре мазива за различите режиме рада пужног преносника са пужним зупчаником од цинк-алуминијум бронзе ZA-12	110
Табела 6.15 Измерене температуре мазива за различите режиме рада пужног преносника са пужним зупчаником од цинк-алуминијум бронзе ZA-12	111
Табела 6.16 План експерименталних истраживања	114
Табела 7.1 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 0 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14.....	118
Табела 7.2 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 0,1 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14 ..	118
Табела 7.3 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 0,2% мас.%CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14 ...	119
Табела 7.4 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 0,5 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14 ..	119
Табела 7.5 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 1,0 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14 ..	120
Табела 7.6 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 2,0 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14 ..	120
Табела 7.7 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за уље Reduktol Super ISO VG 460 за пужни преносник са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14.....	121
Табела 7.8 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 0 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од цинк-алуминијум бронзе ZA-12	121
Табела 7.9 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 0,1 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од цинк-алуминијум бронзе ZA-12	122
Табела 7.10 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 0,2 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од цинк-алуминијум бронзе ZA-12	122
Табела 7.11 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 0,5 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од цинк-алуминијум бронзе ZA-12	123

Табела 7.12 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 1,0 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од цинк-алуминијум бронзе ZA-12	123
Табела 7.13 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 2,0 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од цинк-алуминијум бронзе ZA-12	124
Табела 7.14 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за уље Reduktol Super ISO VG 460 за пужни преносник са пужним зупчаником од цинк-алуминијум бронзе ZA-12	124
Табела 7.15 Преглед смањења масе пужног зупчаника од калајне бронзе CuSn14 услед хабања	125
Табела 7.16 Преглед смањења масе пужног зупчаника од цинк-алуминијум бронзе ZA-12 услед хабања.....	126
Табела 9.1 Промена степена искоришћења при промени излазног обртног момента, применом пужног зупчаника од бронзе CuSn14 при улазном броју обртаја од 1500 min^{-1}	162
Табела 9.2 Промена степена искоришћења при промени излазног обртног момента, применом пужног зупчаника од бронзе CuSn14 при улазном броју обртаја од 2000 min^{-1}	163
Табела 9.3 Промена степена искоришћења при промени излазног обртног момента, применом пужног зупчаника од бронзе CuSn14 при улазном броју обртаја од 2500 min^{-1}	163
Табела 9.4 Промена степена искоришћења при промени излазног обртног момента, применом пужног зупчаника од бронзе ZA-12 при улазном броју обртаја од 1500 min^{-1}	163
Табела 9.5 Промена степена искоришћења при промени излазног обртног момента, применом пужног зупчаника од бронзе ZA-12 при улазном броју обртаја од 2000 min^{-1}	163
Табела 9.6 Промена степена искоришћења при промени излазног обртног момента, применом пужног зупчаника од бронзе ZA-12 при улазном броју обртаја од 2500 min^{-1}	164
Табела 9.7 Просечне вредности масеног удела адитива и интервалне оцене за комбинације пужних зупчаника са калајном бронзом CuSn14 и цинк-алуминијум бронзом ZA-12.....	171

СПИСАК ОЗНАКА

α_L	Коефицијент топлотне проводљивости
α_n	Угао нагиба основног профила
γ	Специфична тежина
γ_m	Угао нагиба завојнице пужа на средњем цилиндру
ε_β	Коефицијент спрезања зуба зупчаника по ширини
η	Степен искоришћења пужног преносника
η_z	Степен искоришћења пужа
η'_z	Степен искоришћења пужног зупчаника
ϑ_0	Температура околине
$\Delta\vartheta_M$	Повећање температуре зубаца у спреси
ϑ_s	Радна температура мазива
μ_g	Коефицијент трења граничног слоја
μ_M	Динамичка вискозност
μ_z	Коефицијент трења пужног пара
ρ	Густина
ρ_F	Густина базног флуида
ρ_{NP}	Густина наночестице
τ_g	Напон смицања граничног слоја
σ_t	Напон на граници течења
σ_{Hm}	Средња вредност контактнoг напрезања
σ_{Hlim}	Гранични дозвољени контактни напон
ω_1	Улазна угаона брзина
ω_2	Излазна угаона брзина
a	Осно растојање
a_0, a_1, a_2	Коефицијенти добијени методом најмањих квадрата
A, B, C	Константе при одређивању вискозности мазива
A	Површина која се хаба
A_G	Меродавна површина кућишта преносника
A_R	Површина пужног пара
b_{2R}	Ширина контактне површине пужног пара
b_2	Ширина пужног зупчаника
b_{2H}	Ширина венца пужног зупчаника

c	Концентрација CNT адитива
c_k	Коефицијент преноса топлоте
d_1	Пречник основне кружнице пужа
d_2	Пречник основне кружнице пужног зупчаника
d_{a1}	Пречник темене кружнице пужа
d_{a2}	Пречник темене кружнице пужног зупчаника
d_{e2}	Спољашњи пречник пужног зупчаника
d_{f1}	Пречник подножне кружнице пужа
d_{f2}	Пречник подножне кружнице пужног зупчаника
d_{m1}	Пречник средње кружнице пужа
d_{m2}	Пречник средње кружнице пужног зупчаника
d_w	Очекивано хабање
E	Модул еластичности
e_a	Лучна ширина међузубља
F_1	Улазна сила пужног преносника
F_2	Излазна сила пужног преносника
F_{a1}	Аксијална сила на пужу
F_{a2}	Аксијална сила на пужном зупчанику
F_{bn}	Нормална сила на боку зупца
F_{r1}	Радијална сила на пужу
F_{r2}	Радијална сила на пужном зупчанику
F_{t1}	Обимна сила на пужу
f_t	Коефицијент термичког оптерећења
F_{t2}	Обимна сила на пужном зупчанику
F_{tr}	Сила трења
g	Убрзање земљине теже
h_m	Дебљина слоја мазива
h	Висина зупца
h_a	Темена висина зупца
h_f	Подножна висина зупца
H	Тврдоћа мекшег материјала (пужног зупчаника)
HB	Тврдоћа по Бринелу
HR	Тврдоћа по Роквелу
HV	Тврдоћа по Викерсу

i	Радни преносни однос
I_h	Интензитет хабања
k_{ab}	Коефицијент абразивног хабања
k_{ad}	Коефицијент адхезионог хабања
k_G	Коефицијент прелаза топлоте
KV	Ударна жилавост
L	Дужина пужа
L_h	Пређени пут
l_k	Дужина полуге на електромагнетној кочници
l_p	Дужина полуге на динамометру
L_{pr}	Дужина вредновања профила
m_n	Модул у нормалном пресеку
m_t	Чеони модул пужног зупчаника
m	Аксијални модул
Δm	Промена масе
n_1	Број обртаја пужног вратила
n_2	Број обртаја вратила пужног зупчаника
p	Притисак у зони контакта
P_1	Снага на улазном вратилу пужног преносника
P_2	Снага на излазном вратилу пужног преносника
P_{1max}	Максимална улазна снага
P_{1nom}	Номинална улазна снага
P_G	Губици снаге преносника
P_{LZP}	Губици снаге у лежајевима и заптивкама
p_n	Корак у нормалној равни
p_a	Аксијални корак
P_z	Губици снаге пужног пара
P_{zp}	Ход завојнице пужа
q	Пужни број
r	Полупречник наноцеви
R^2	Коефицијент детерминације
$R_{\rho 0,2}$	Напон течења
R_a	Средње аритметичко одступање профила
R_e	Напон течења мекшег материјала

R_m	Затезна чврстоћа
s	Пређени пут
s_a	Дебљина зупца
S_H	Коефицијент сигурности против разарања бокова зубаца зупчаника
S_{Hmin}	Минимална вредност коефицијента сигурности против разарања бокова зубаца зупчаника
S_T	Температура у зони спрезања пужа и пужног зупчаника
T_1	Улазни обртни момент пужног преносника снаге
T_2	Излазни обртни момент пужног преносника снаге
ΔV	Промена запремине
V_z	Брзина седиментације
x	Коефицијент померања профила
z_1	Број зубаца (завојница) пужа
z_2	Број зубаца пужног зупчаника

СПИСАК СКРАЋЕНИЦА

AFM	енгл. <i>Atomic Force Microscopy</i> , микроскопија на бази међуатомских сила
BN@C-OA	енгл. <i>Boron Nitride@Carbon – Oleic Acid</i> , адитив бор нитрид са наносом угљеника
CAD	енгл. <i>Computer-Aided Design</i> , рачунарски подржан дизајн
CAE	енгл. <i>Computer-Aided Engineering</i> , рачунарски подржана инжењерска анализа
CNN	енгл. <i>Convolutional Neural Networks</i> , конволуционе неуронске мреже
CNT	енгл. <i>Carbon Nanotube Electron Microscopy</i> , угљеничне наноцеви
EDX	енгл. <i>Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy</i> , енергетски дисперзивна рендгенска спектроскопија
EP/ER	енгл. <i>Extreme Pressure/Extreme Resistance</i> , ознаке мазива за екстремне притиске и температуре
FEA	енгл. <i>Finite Element Analysis</i> , метода коначних елемената
FFT	енгл. <i>Fast Fourier Transform</i> , Фуријеове трансформације
FTIR	енгл. <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> , инфрацрвена спектроскопија преко Фуријеових трансформација
HDPE	енгл. <i>High-Density Polyethylene</i> , политетилен велике густине
MNCS	енгл. <i>Metal–Nitride Composite Structures</i> , металнитрид композитна структура
MWCNT	енгл. <i>Multi-Walled Carbon Nanotubes</i> , вишеслојне угљеничне наноцеви
RMS	енгл. <i>Root Mean Square</i> , метода средње вредности квадратног корена
RS	енгл. <i>Raman spectroscopy</i> , раман спектроскопија
TEM	енгл. <i>Transmission Electron Microscopy</i> , трансмисиони електронски микроскоп
TGA	енгл. <i>Thermogravimetric Analysis</i> , термогравиметријска анализа
SEM	енгл. <i>Scanning Electron Microscopy</i> , скенирајући електронски микроскоп
SVM	енгл. <i>Support Vector Machine</i> , метод потпорних вектора
SWCNT	енгл. <i>Single-Walled Carbon Nanotube</i>), једнослојне угљеничне наноцеви
XRD	енгл. <i>X-ray Diffraction</i> , метода рендгенске дифракције

1. УВОД

Развој машинских система и њихова примена у индустрији намећу потребу за константним унапређењем радних карактеристика свих компонената, а посебно оних које су директно изложене оптерећењима. Такви су и пужни зупчasti преносници, који, због својих специфичних радних услова, захтевају посебну пажњу у избору одговарајућих мазива. Пужни зупчasti преносници представљају важан елемент у механичким системима за пренос снаге и својом компактном конструкцијом и могућношћу обезбеђивања високих преносних односа налазе широку примену у различитим индустријским гранама. Ово их чини предметом бројних истраживања у области побољшања њихових радних карактеристика [1, 2].

Основна улога мазива је смањење трења и хабања између покретних делова пужних зупчastих преносника. Њиховом применом се продужава радни век ових уређаја и обезбеђује висок степен искоришћења [3].

Развој нанотехнологије, у области напредних материјала, омогућио је примену наноцеви као адитива мазива, што је довело до нових могућности за унапређење њихових реолошких карактеристика. На тај начин могу се постићи мањи коефицијент трења, већа отпорност на хабање и продужен век трајања делова у контакту. Између различитих типова наноматеријала, угљеничне наноцеви се издвајају као посебно ефикасне због своје изузетне механичке чврстоће, отпорности на повишене температуре и специфичне површинске структуре. Ове особине им омогућавају да на металним површинама формирају заштитне нанослојеве — који смањују трење и спречавају директан контакт металних површина, што резултира мањим хабањем и већом поузданошћу система у пужним преносницима снаге [4].

Примена наноматеријала, посебно угљеничних наноцеви, у мазивима за пужне преноснике представља значајан корак у правцу повећања степена искоришћења и поузданости ових система. Пужни преносници су специфични по томе што током рада долази до израженог клизања између контактних површина зупчаника, што изазива високе вредности силе трења и интензивно хабање. Због тога је правилан избор и унапређење мазива од пресудног значаја за њихов радни век и степен искоришћења [5]. Додавањем угљеничних наноцеви у базно уље могуће је формирати заштитни слој на површинама у контакту. Он се понаша као клизни слој који смањује директан метални додир током рада. На тај начин долази до смањења коефицијента трења, смањеног загревања и губитака енергије, као и до мањег оштећења зубаца зупчаника [6].

Осим смањења хабања, присуство наноцеви у мазиву доприноси и бољем одвођењу топлоте, чиме се одржава стабилније термичко понашање у кућишту пужног преносника. То директно утиче на дужи радни век делова и продужава време до отказа појединих делова.

Примена ових наноадитива захтева пажљиву контролу концентрације и хомогености дисперзије у мазиву. Неправилна расподела може довести до супротног ефекта — повећаног трења или прекида слоја мазива на металним површинама. Због тога су истраживања усмерена на оптимизацију формулација и методе дисперзије наноцеви у уљима која се користе у пужним преносницима снаге. Иако су резултати досадашњих истраживања веома охрабрујући, примена угљеничних наноцеви у мазивима и даље је у развоју. Кључни изазови односе се на одређивање оптималне концентрације наноцеви, постизање њихове равномерне расподеле у базном уљу и обезбеђивање дуготрајне стабилности добијених нанофлуида [7]. Мазива обogaћена угљеничним наноцевима могу

се користити у зупчастим преносницима снаге у индустрији енергетике, рударства, транспортних система, металургије и машиноградње, где тежишно смањују абразивно хабање, површински замор и гребање (енгл. *scoring*) делова машина и уређаја.

Циљ ове докторске дисертације јесте свеобухватно проучавање утицаја додавања угљеничних наноцеви у мазива на експлоатационе карактеристике пужних зупчастих преносника. Истраживање је обухватило експерименталну процену смањења трења, повећања отпорности на хабање и унапређења отпорности на повишене температуре пужног преносника снаге. У том контексту, припремљени су узорци мазива са различитим садржајем угљеничних наноцеви. Триболошка својства пужног преносника снаге испитивана су у контролисаним лабораторијским условима, који симулирају реалне радне ситуације пужних преносника, уз посебан нагласак на промене оптерећења и температуре током рада.

Поред експерименталног дела, у оквиру истраживања, извршена је и теоријска анализа механизма деловања угљеничних наноцеви на контактним површинама пужног пара. Посебна пажња посвећена је њиховој способности да иницирају стварање заштитних слојева и утичу на микроструктурне промене површина у контакту. Такође су размотрени параметри који одређују ефикасност наноцеви — као што су морфологија, димензије, као и потенцијални проблеми који се односе на њихову стабилност и тенденцију ка агрегацији унутар мазива.

Значај овог истраживања огледа се у потенцијалу за развој напредних типова мазива, која могу значајно унапредити поузданост и продужити век трајања пужних зупчастих преносника. Таква побољшања имају директан економски ефекат кроз смањење трошкова одржавања и потрошње енергије, што доприноси већем степену искоришћења индустријских постројења. Поред практичне вредности, резултати овог рада пружају и теоријску основу за даље истраживање примене нанотехнологије у трибологији, са могућношћу проширења на друге типове механичких система који раде у условима појаве великих оптерећења и повећаних коефицијената трења. С обзиром на сложеност и интердисциплинарност теме, дисертација обједињује знања из више области — машинства, науке о материјалима и нанотехнологије — чиме се обезбеђује целовит приступ анализи и оптимизацији својстава мазива и њиховог утицаја на триболошке карактеристике пужних преносника.

Преглед релевантне литературе обухвата анализу савремених истраживања која се баве применом угљеничних наноцеви у различитим типовима мазива, као и разматрање постојећих теоријских приступа опису трења и хабања код пужних зупчастих преносника. У оквиру методолошког дела, детаљно су представљени поступци припреме и карактеризације наномодификованих мазива, као и експерименталне технике које се користе за мерење триболошких параметара и анализу стања контактних површина после изведених испитивања.

Уводни део рада упућује на савремене изазове у области степена искоришћења и трајности пужних преносника снаге, са посебним нагласком на улогу напредних мазива и нанотехнолошких адитива у смањењу губитака снаге, минимизацији степена хабања и оптимизацији термичких параметара система. Увод такође поставља концептуалне оквире и дефинише кључне појмове, истовремено формулишући циљеве и истраживачке задатке који усмеравају систематско испитивање овог сложеног проблема.

Преглед досадашњих истраживања у области губитака снаге, хабања, степена искоришћења, буке, вибрација и промена температуре пужних преносника снаге показује да је у научној литератури успостављена богата база података, која илуструје зависност ових параметара од радних услова и својстава мазива. Испитивања указују на то да критичну улогу у одређивању ефикасности система имају угаона брзина, величина

механичког оптерећења и карактеристике мазива. Од великог значаја је и праћење термичког понашања у циљу предвиђања хабања и потенцијалне појаве термичких поремећаја.

У следећем поглављу је приказан детаљан осврт на пужне преноснике снаге, имајући у виду да они представљају сложене конструкционе елементе, чији рад директно одређују геометријски параметри као што су угао нагиба завојнице, модул, пречник и завршна обрада. Разумевање динамике рада ових преносника, у контексту унутрашњих и спољашњих оптерећења, као и значаја правилног подмазивања и термичке стабилности, представља основу за имплементацију наноадитива и повећање степена искоришћења.

Досадашња истраживања су показала да мазива са применом нанотехнологије, нарочито она обogaћена угљеничним наноцевима, имају изразито повољан утицај на смањење трења и хабања, повећање носивости и стабилност вискозности у широком температурном опсегу. Концентрација, облик, величина и састав примењених наноадитива су у директној вези са карактеристикама мазива и радним карактеристикама пужних преносника снаге за чије се подмазивање користе.

План и спровођење експерименталних испитивања пружио је систематски приступ који укључује избор материјала, оптималну концентрацију CNT адитива, контролу радних услова и примену савремених техника и процедура мерења губитака снаге, хабања, буке, вибрација и температурних промена. Применом прецизне опреме за мерење реолошких параметара и термичког понашања, омогућено је добијање поузданих и репродуктивних резултата који одражавају стварне радне услове.

Резултати експерименталних испитивања показали су јасне и статистички значајне зависности губитака снаге, степена искоришћења, буке, вибрација и хабања од концентрације CNT адитива, радне температуре, угаоне брзине и оптерећења пужног преносника снаге.

Анализа и дискусија добијених резултата детаљно приказују механизме који стоје иза уочених ефеката, укључујући формирање просторне мреже CNT, агрегацију и оријентацију честица у пољу контакта елемената преносника снаге. Добијени резултати, упоређени са литературом, потврђују предности наноадитива у смањењу губитака снаге, хабања, буке и вибрација, као и у очувању стабилности радних параметара система под различитим условима оптерећења.

Оптимизација и предвиђање степена искоришћења изведена је кроз развој статистичког модела који омогућава одређивање оптималних параметара концентрације CNT адитива ради постизања најбољих радних карактеристика. Такав модел пружа основу за минимизацију губитака снаге и хабања, уз максимизацију степена искоришћења пужних преносника, омогућавајући системско унапређење радних карактеристика и дуговечности.

Закључна разматрања истичу да примена CNT адитива у мазивима значајно доприноси смањењу трења, хабања и губитака снаге, али и смањењу буке и вибрација и утврђена је оптимална концентрација мас.% CNT за постизање максималне оптимизације радних карактеристика пужног преносника снаге. Предложени модели и добијени експериментални подаци пружају добру основу за даље пројектовање, оптимизацију и примену енергетски ефикасних и дуготрајних пужних преносника снаге у индустријским системима. Такође, закључни део истраживања усмерен је на формулисање препорука за практичну примену добијених резултата, као и на идентификацију могућих праваца даљег рада, у области оптимизације састава мазива и проширења примене наноматеријала у различитим триболошким системима.

Литература коришћена у раду представља свеобухватну основу за разумевање интеракција између материјала, наноструктура и радних параметара пужних преносника снаге. Одабрани радови обухватају, како теоријске и експерименталне студије о трибологији, машинским елементима и наноматеријалима, тако и анализе утицаја CNT адитива на физичко-хемијска својства мазива, стабилност дисперзије, термичку отпорност и пренос енергије у машинским компонентама. Литература такође обухвата радове који испитују механизме смањења трења и хабања, оптимизацију вискозности и степена искоришћења, као и моделирање понашања наномазива у условима различитих оптерећења и температура. Ова изборна база омогућава систематско повезивање претходних истраживања са циљевима рада и прецизирање експерименталног приступа, пружајући научну основу за комплексно испитивање утицаја CNT адитива на радне карактеристике пужних преносника.

Анализа доступне научне литературе показује да до сада није систематски разматран нити експериментално и теоријски обрађен утицај додавања угљеничних наноцеви у мазиво, на радне карактеристике пужних преносника снаге, у условима и опсегу примене који су предмет истраживања ове дисертације.

2. ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Предмет рада

Предмет ове докторске дисертације је идентификација и утврђивање оптималних количина угљеничних наноцеви у мазиву на радне карактеристике пужних преносника снаге, у циљу оптимизације интензитета хабања, степена искоришћења, термичког понашања пужних преносника, интензитета буке и вибрација, при различитим радним условима (броју обртаја и оптерећењу).

Зупчасти преносници снаге чине врсту механичких преносника снаге, широко заступљену у индустрији. Њихова примарна функција огледа се у преносу кретања и обртног момента са једног вратила на друго, при чему се врши трансформација угаоне брзине и обртног момента у различите величине посредством непосредног контакта профила зубаца. Ови преносници могу бити конфигурисани у широком спектру геометријских и конструкционих варијанти, што обухвата различите просторне оријентације улазних и излазних вратила, варијације у облику, профилу и димензијама зубаца, као и велики опсег вредности обртних момента, угаоних брзина, преносних односа и применљивих материјала. Једна од посебних врста зупчастих преносника снаге су пужни преносници снаге.

У технолошким системима најчешће се примењују пужни парови са цилиндричним или глобоидним пужем. Код цилиндричних пужних парова темене и подножне површине пужа имају облик кружних цилиндара, док су темена и подножја пужног зупчаника усклађена са профилем пужа и формирају геометрију кружних торуса. Насупрот томе, код глобоидних пужних парова и пуж и пужни зупчаник имају темене и подножне површине у облику сегмената кружних торуса, који су међусобно прецизно прилагођени, како би се постигла оптимална контактна геометрија и ефикасан пренос снаге.

Пужне преноснике карактерише израженија појава губитака снаге у односу на већину других типова зупчастих преносника. Ово као последицу има повећано претварање механичке енергије у топлотну и њено одавање у околину. Ова појава проистиче из већег броја зубаца који истовремено ступају у контакт, као и из интензивнијег трења у зони спрезања. Управо услед ових повишених топлотних оптерећења и сложене контактне механике, конструкциона пракса захтева употребу комбинација материјала са различитим механичким карактеристикама — пре свега са различитим тврдоћама и отпорношћу на смицање. Пошто је код већине метала напрезање при смицању у значајној корелацији са тврдоћом, савремена техничка решења најчешће предвиђају да се пужни зупчаник израђује од калајних или алуминијумских бронзи, док је пуж израђен од каљеног конструкционог челика.

За подмазивање пужних парова традиционално се примењују минерална уља, која поред повољне цене, обезбеђују низак коефицијент трења и задовољавајућу отпорност контактних површина на хабање. У употреби су и синтетичка уља која пружају напредније термичке и триболошке карактеристике. Развој нанотехнологије омогућио је производњу читавог спектра наноцеви металних и неметалних материјала које, захваљујући својим димензијама, могу продирати у микропукотине и неравнине контактних површина и у значајној мери утицати на триболошко понашање система. Употреба наноадитива у мазивима може изменити интензитет хабања у контактної зони, утицати на смањење појаве разарања бокова зубаца, редуковати губитке снаге или побољшати одвођење топлоте из зона контакта.

Смањење енергетских губитака у пужним преносницима условљено је оптималним избором геометријских параметара, материјала елемената пужног пара, врсте мазива, режима подмазивања и радних услова. Стога је од суштинског значаја поуздано утврдити у којој мери наведени фактори утичу на степен искоришћења, динамику хабања и температурне промене током рада.

Применом напредних оптимизационих метода неопходно је идентификовати најповољније комбинације материјала за израду пужа и пужног зупчаника и врсти мазива, које би, уз непромењену геометрију елемената и константне радне услове, омогућиле остварење највишег степена искоришћења, поузданости и радног века пужних преносника.

2.2. Циљ рада

Циљ ове докторске дисертације јесте свеобухватно истраживање примене мазива са додатком адитива на бази угљеничних наноцеви (CNT) у подмазивању пужних преносника снаге, као систематска анализа њиховог утицаја на кључне радне карактеристике пужног пара. Посебна пажња је посвећена испитивању утицаја CNT адитива на хабање елемената пужног преносника, губитке снаге који настају услед трења и вискозних отпора, на промене температуре у зонама контакта и интензитет буке и вибрација у различитим радним режимима одређеним бројем обртаја и нивоом оптерећења. Истраживања се спроводе поређењем са комерцијалним уљем за зупчасте преноснике, с циљем прецизног утврђивања доприноса CNT честица побољшању укупних карактеристика система.

Изучавање триболошког понашања пужних преносника, укључујући механизме трења, облике и динамику хабања, степен искоришћења, термичко понашање, као и спектар и амплитуде буке и вибрација од кључног је значаја за развој нових генерација индустријских мазива и конструкционих материјала. Увођење угљеничних наноцеви, као функционалних наночестица, у структуру мазива представља један од перспективнијих праваца развоја модерне триболошке технологије, с обзиром на њихове изузетне механичке, термичке и хемијске карактеристике. Угљеничне наноцеви имају потенцијал да редукују губитке услед трења, стабилизују температуру у зони контакта, формирају заштитни филм на површинама зубаца и на тај начин продуже животни век пужних преносника снаге.

У оквиру ове дисертације, посебан акценат је стављен на разумевање сложене интеракције између подмазивања, оптерећења и кинематских параметара у пужним преносницима, који су познати по израженом клизању, високом коефицијенту трења и значајном порасту температура контактних површина. Управо због тога, примена напредних наноадитива представља рационалан приступ, не само у повећању степена искоришћења, већ и у смањењу негативних последица термичког оптерећења, као што су деградација мазива, микроповршинска оштећења, снижење носивости и појава нестабилних вибрационих стања.

Значај истраживања огледа се у томе што добијени резултати могу послужити као основ за формулисање нових генерација мазива са унапређеним триболошким својствима, као и за пројектовање конструкционих решења и избора материјала (нпр. CuSn и ZA легура). Ови материјали у комбинацији са CNT адитивима ће обезбедити већи степен искоришћења, мање хабање и стабилнији рад у дуготрајним условима експлоатације. У ширем научном контексту, дисертација доприноси развоју знања у области трибологије, нанотехнологије, машинских материјала, пружајући нове увиде у механизме интеракције наноцеви и металних површина у условима реалних оптерећења.

2.3. Методологија израде рада

Имајући у виду сложеност и мултидисциплинарност предмета истраживања, у оквиру докторске дисертације коришћене су аналитичке, експерименталне и статистичке методе.

Аналитичке методе су коришћене при прорачунима величина код пужног преносника, који се односе на израчунавање губитака снаге у озубљењу, лежајевима и заптивним елементима, као и приликом израчунавања коефицијента трења. Поред наведеног, ове методе имају своју пуну примену и код праћења повећања температуре појединих елемената пужног преносника, као и буке и вибрација преносника у целини.

Експерименталном методом је практично сагледано понашање елемената пужног преносника, са аспекта промене кључних физичких и хемијских величина, при промени параметара дефинисаних планом експеримента. Сам експеримент је реализован на уређају GUNT AT 200, инсталираном у Центру за испитивање механичких преносника, Факултета инжењерских наука, Универзитета у Крагујевцу, а тежиште је било на употреби мазива са различитом концентрацијом адитива угљеничних наноцеви. Испитивање које је обављено на пужном преноснику снаге и мазивима је вршено променом режима рада, односно променом угаоне брзине и оптерећења улазног вратила пужног преносника. Посебно је применом експеримента анализиран интензитет хабања, пре свега пужног зупчаника. Мерена је промена масе и визуелно су посматране промене структуре површинског слоја (појава рисева, бразди и сл.) на зупцима пужног зупчаника, што је реализовано на Војнотехничком институту у Београду. Други део испитивања је извршен у Лабораторији за трибологију на Машинском факултету у Београду, у циљу експерименталног одређивања коефицијента трења и хрпавости површина испитиваних дискова и плочица, који су израђени од идентичних материјала као и пужни преносник снаге.

Коришћењем статистичке методе извршена је детаљна анализа и обрада резултата добијених експерименталном методом кроз следеће:

- сагледавање извршених истраживања из области степена искоришћења и хабања пужних преносника снаге,
- одређивање фактора и величина који директно и индиректно утичу на губитке и самим тим на степен искоришћења пужног преносника снаге,
- дефинисање параметара који су у непосредној вези са интензитетом хабања бокова зубаца пужног зупчаника,
- оптимизација у циљу одређивања оптималне концентрације CNT адитива у базном мазиву којом се остварују максимални ефекти, односно највеће вредности степена искоришћења пужног преносника снаге.

2.4. Хипотезе рада

Основне хипотезе предложене докторске дисертације настале су као резултат детаљног проучавања досадашњег истраживања у области примене различитих адитива у виду угљеничних наноцеви и других адитива нанометарске величине у мазивима пужних зупчастих преносника снаге. Реализација докторске дисертације заснива се на следећим полазним хипотезама:

- Применом експеримента могуће је одредити утицајне факторе (врста материјала елемената пужног преносника, врста примењених наноадитива у

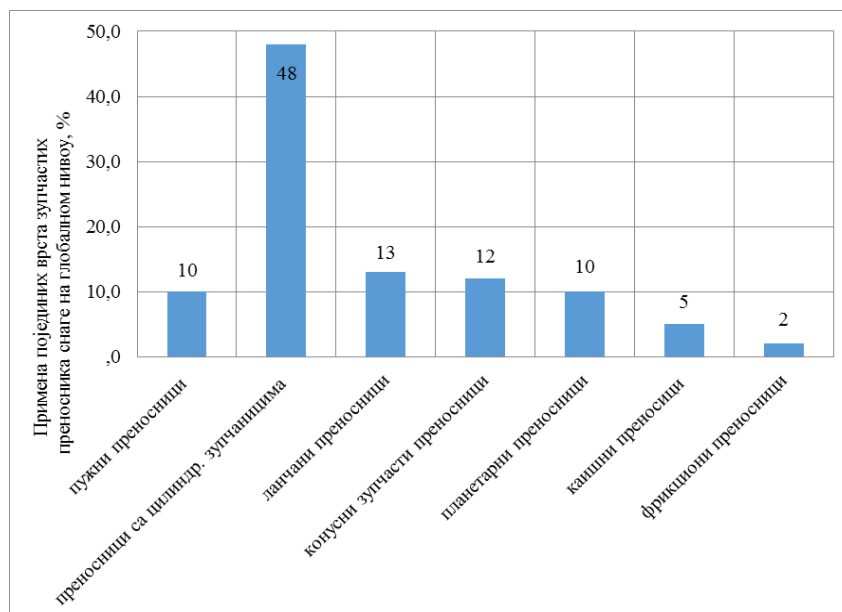
уљу за подмазивање, улазна угаона брзина и оптерећење) на губитке снаге, степен искоришћења, хабање, промену температуре, интензитета буке и вибрација пужног преносника.

- Изабрани утицајни фактори делују на губитке снаге, степен искоришћења, хабање, промену температуре, интензитета буке и вибрација пужног преносника.
- Одговарајућом методом оптимизације могуће је одредити оптималну комбинацију утицајних фактора који ће дати захтеване карактеристике.
- Примена савремене опреме за испитивање пужних преносника пружа могућност избора нових материјала за израду пужног зупчаника, избор одговарајућих мазива са различитим уделом адитива у виду угљеничних наноцеви и избор различитих улазних брзина вратила и оптерећења зупчастих преносника.
- Остварени резултати ће пружити даља усмерења за примену нових материјала за израду пужних зупчаника, али преваходно за примену одговарајућих адитива мазива у виду угљеничних наноцеви, који ће се у будућности користити за подмазивање пужних преносника.

3. ПРИКАЗ ДОСАДАШЊИХ ИСПИТИВАЊА СТЕПЕНА ИСКОРИШЋЕЊА, ХАБАЊА, БУКЕ, ВИБРАЦИЈА И ПРОМЕНЕ ТЕМПЕРАТУРЕ ПУЖНИХ ПРЕНОСНИКА СНАГЕ

У системима за пренос снаге где се осе вратила мимоилазе, пужни преносници се често користе као решење за постизање великог преносног односа у компактном простору. Преносни однос је најчешће у опсегу од 20 до 300 [8], али у појединим случајевима може бити и већи. За разлику од већине других зупчастих преносника, код којих се контакт одвија комбинацијом котрљања и клизања, код пужног преносника пренос кретања се заснива скоро искључиво на клизању између површина у захвату. Због тога је способност преноса оптерећења ограничена, док треће има доминантан утицај на укупан степен искоришћења. Посебан изазов представља подмазивање, јер се услед израженог клизања слој мазива непрестано помера и уклања са контактних зона. Као последица, долази до повећања температуре у тачки спрезања. Ово представља ограничење у раду преносника и пре него што се достигну његове механичке границе оптерећења.

Пужни преносници налазе широку примену у системима где је неопходно обезбедити тих и поуздан рад, компактне димензије, способност пригушивања ударних оптерећења и минималне захтеве за одржавањем. У ранијим истраживањима често се истицала њихова могућност самокочења, односно брзог заустављања без додатних механизма, али је касније утврђено да ова особина није поуздана у свим условима рада. Наиме, у статичком стању, пужни зупчаник може тешко да покрене пуж ако је угао навоја мали, што ствара привид ефекта самокочења. Међутим, када је преносник изложен ударима или вибрацијама — што је у пракси врло често — тај ефекат се губи и може доћи до обртања правца преноса кретања (енгл. „*back-driving*“). Према подацима из литературе, пужни преносници чине приближно десет процената свих механичких система за пренос снаге [9], што је илустровано дијаграмом на слици 3.1.



Слика 3.1 Распрострањеност механичких преносника снаге према врстама

3.1. Степен искоришћења пужних преносника снаге

Многобројни истраживачи су проучавали различите факторе који утичу на губитке снаге у пужним преносницима снаге, а већина тих истраживања потврђена је експерименталним резултатима.

Мађар (Magyar) и коаутори [10] су у свом истраживању развили свеобухватан поступак прорачуна који омогућава одређивање коефицијента трења у зупцима пужних преносника, при чему се његове вредности локално мењају дуж контактне линије. Приказан је и начин формирања бездимензионих Стрибекових кривих на основу тако добијених локалних коефицијената трења, што омогућава поуздано праћење њихових промена током вишеслојних симулација. Поређење резултата добијених симулацијом са експерименталним мерењима показало је веома добро слагање у границама вредности коефицијента трења зубаца зупчаника од 0,01. Аутори сматрају да се даљим унапређењем прорачунског алгорита може постићи већа тачност и поузданост резултата. Поред тога, реализовано је конструисање кривих које јасније раздвајају гранично и хидродинамичко подмазивање, користећи податке добијене тродимензионалним мерењима храпавости. Очекивања су да ће достигнућа рада допринети већем степену подударности између теоријских и експерименталних резултата.

Маутнер (Mautner) и коаутори [11] су у оквиру спроведеног истраживачког пројекта извршили експериментална мерења степена искоришћења пужних преносника већих димензија. Испитивана је комбинација челичног пужа и бронзаног пужног зупчаника са међусобним растојањем оса од 315 mm. Циљ испитивања био је да се добију поуздани подаци о носивости и степену искоришћења овог типа преносника. У раду је приказан ток експерименталних активности и представља карактеристичне резултате тестирања, при чему је утврђено да укупан степен искоришћења пужног преносника може достићи вредност од око 96 %. Иако је дошло до постепеног повећања оштећења контактних површина, није забележен значајан утицај на степен искоришћења. Примена мазива са нижом вискозношћу (ISO VG 220) резултирала је нешто нижим вредностима степена искоришћења у поређењу са подмазивањем уљем вискозности ISO VG 460 (разлика до 1 %).

Милтеновић и коаутори [12] спровели су експериментална испитивања пужног преносника под екстремним радним условима користећи специјализовану мерну опрему. Испитиван је пужни пар типа ZI-DIN 3975 са осним растојањем од 30 mm и преносним односом 40, при чему је пуж био постављен испод пужног зупчаника. Пуж је израђен од цементираног челика 16MnCr5, док је пужни зупчаник произведен од центрифугално ливене бронзе са никлом (CuSn12Ni2-C-GCB). На вратилу пужа уграђена су два куглична лежаја са косим додиром типа 7302 BEP, а на вратилу пужног зупчаника по два једноредна радијална куглична лежаја типа 6007 2RS1 и 6302 2RS1. Испитивања су извршена при улазној брзини пужа од 5000 min^{-1} и различитим нивоима оптерећења ($T_2 = 10 - 22 \text{ Nm}$), уз примену синтетичког уља високе вискозности (Klübersynth GH 6-1500). Током експеримента измерене су вредности степена искоришћења преносника, које су се кретале у опсегу од 0,52 – 0,71, при чему су веће вредности забележене за виша оптерећења. Поред мерења, аутори су извршили прорачун губитака снаге у лежајевима, заптивкама и контакту зубаца зупчаника, чиме је одређена расподела укупно доведене снаге у преносник. На основу анализе закључено је да од укупне снаге која се преноси са електромотора на излазно вратило, корисна снага на излазном вратилу износи 64 %, губици снаге у контакту зубаца чине 27 %, а губици у лежајевима и заптивкама 9 %.

Радосављевић и коаутори [13] анализирали су губитке снаге и факторе који утичу на њихову учесталост у пужном редуктору. Истраживање је обухватило губитке који

настају у контакту зубаца пужа и пужног зупчаника, у лежајевима и заптивкама, као и губитке услед мешања уља током преноса силе. За различите верзије пужног редуктора, израчунавање губитака снаге је извршено на напредном уређају GUNT AT200 на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу, који је коришћен као основа за мерење преноса снаге. Потпуни губици су одређени у складу са експерименталним планом који је обухватао варирање броја улазних обртаја, излазног момента и врсте уља. Рад је имао за циљ експерименталну потврду теоријских претпоставки да различити фактори доприносе губицима у пужном редуктору.

Стојановић и коаутори [14] у свом истраживању пружају детаљан увид у факторе који утичу на степен искоришћења пужних редуктора и износе експериментално потврђене закључке о оптимизацији њихових радних параметара. Основни допринос рада огледа се у систематском испитивању утицаја угаоне брзине пужног преносника, вискозности уља и различитих оптерећења на степен искоришћења једноступених пужних редуктора. Експерименти показују да су се вредности степена искоришћења кретале у опсегу од $n = 0,48 - 0,57$ при улазном броју обртаја од 1500 min^{-1} и ниско вискозном уљу. Повећање периферне брзине и употреба уља средње и високе вискозности је довело до значајног пораста степена искоришћења, у интервалу од 0,50 до 0,59. Резултати показују да већа угаона брзина олакшава формирање уљног филма између контактних површина зубаца, што директно утиче на смањење губитака снаге. Применом уља веће вискозности обезбеђује се филм довољне дебљине за подмазивање, што је посебно значајно при већим температурама и оптерећењима и резултује већим степеном искоришћења редуктора. На основу добијених резултата, аутори закључују да оптимизација вискозности уља и радне брзине пужа представља кључни фактор за побољшање карактеристика пужних редуктора, док оптерећење и температура такође имају значајан, али секундарни утицај. Рад истиче значај експерименталног праћења радних карактеристика редуктора у реалним радним условима за квалитетно предвиђање степена искоришћења и губитака снаге, што представља основу за будућа истраживања и индустријску примену.

Миџацију (Micasiu) и коаутори [15] су у свом раду анализирали укупни степен искоришћења пужних преносника, тако што су испитивали утицај геометријских параметара, режима подмазивања и радних услова на губитке снаге. Развијен је модел за процену степена искоришћења који укључује трење, клизање и промене у контакту између пужа и пужног зупчаника. Добијени резултати показали су који фактори највише утичу на пад степена искоришћења и како се он може побољшати оптимизацијом конструкције и подмазивања. Аналитички добијени резултати били су близу експериментално одређених вредности, што делимично потврђује предложени модел представљен у раду. Процењена вредност степена искоришћења по математичком моделу износила је 0,59, док су експериментални резултати показали интервале 0,46–0,28 и 0,52–0,28. Упоредивањем добијених података утврђена је разлика степена искоришћења од 0,14–0,3, односно 23–50 % између аналитичког прорачуна и експерименталних мерења. Таква разлика произилази из толеранција у изради уређаја, могућих грешака при мерењу и трења на контактним површинама компоненти. На основу резултата закључено је да квалитет машина и елемената уређаја значајно утиче на аналитички прорачун степена искоришћења, те да израчуната вредност у фази пројектовања представља приближну оцену, при чему је стварни укупни степен искоришћења редовно нижи од теоријски прорачунате вредности.

Добрева (Dobрева) и *Павлов (Pavlov)* [16] су представили теоријску анализу цилиндричних пужних преносника са акцентом на њихов степен искоришћења. Главни циљ истраживања био је идентификовати могућности за избор пужних преносника који обезбеђују највећи степен искоришћења већ у раној фази пројектовања, уз поштовање

постављених, на основу дефинисаног пројектног задатка. За потребе оптимизације испитана су различита својства пужних преносника, укључујући триболошке, кинематске, геометријске параметре и параметре чврстоће. Кључни критеријум анализа био је максималан степен искоришћења преносника. Примењене су научне методе које омогућавају систематско испитивање утицаја сваке групе критеријума. Добијени резултати прорачуна организовани су у базу података, а графички прикази омогућавају визуализацију зависности између триболошких, кинематских, геометријских карактеристика и карактеристика чврстоће. Резултати указују на промене степена искоришћења у зависности од вредности модула и преносног односа. Уочава се да утицај преносног односа на степен искоришћења има знатно већу улогу у односу на утицај угаоне брзине пужног вратила. Примена нижих преносних односа (до $i = 26$) доводи до оптималних вредности степена искоришћења, при чему је посебно уочена тенденција наглог повећања степена искоришћења при смањењу преносног односа. Анализа резултата показује да се најразноврсније кинематске могућности добијају при коришћењу преносних односа у распону од 10 до 26, уз задржавање веома добрих вредности степена искоришћења, већих од 0,8. На основу анализе резултата, идентификоване су најпогодније области примене пужних преносника према изабраном критеријуму оптимизације, као и кључне препоруке за практичну примену у пројектовању.

Рау (Rai) и *Барман (Barman)* [17] своје истраживање фокусирају на смањење губитака снаге у пужним механизмима применом методе симулираног отпуштања (енгл. *Simulated Annealing - SA*). Применом ове методе добијен је оптимални модел пужног преносника који надмашује резултате раније коришћених техника оптимизације. Анализа показује да је коефицијент трења код *SA* метода нижи у односу на резултате добијене претходним техникама диференцијалне еволуције (енгл. *Differential Evolution – DE*), оптимизације ројем честица (енгл. *Particle Swarm Optimization – PSO*) и генетским алгоритмом (енгл. *Genetic Algorithm - GA*), док је завојни угао пужа већи, што доприноси вишем степену искоришћења. Процент смањења губитака снаге кретао се од 22,98 % до 78,02 %, што значајно продужава радни век оптимизованог зупчастог пара. Ови резултати потврђују да *SA* метод пружа боље карактеристике у минимизацији губитака снаге пужних редуктора и омогућава постизање оптималног дизајна са значајно побољшаним степеном искоришћења.

Нгујен (Nguyen) и коаутори [18] су анализирали кључне факторе који утичу на степен искоришћења пужних преносника применом *Taguchi* и симетричне *quasi-D* оптималне методе. Фактори као што су кинематска вискозност уља, коефицијент трења, угаона брзина, преносни однос, излазни момент и модул систематски су проучавани како би се одредио оптималан скуп параметара за постизање максималног степена искоришћења при пројектовању, производњи и раду пужних редуктора. Развијене квадратне регресионе једначине за најзначајније факторе показале су високу тачност и добру прилагођеност подацима, што омогућава поуздано предвиђање степена искоришћења. Експериментални модели коришћени су за процену и поређење утицаја сваког фактора, показујући које промене највише доприносе побољшању степена искоришћења. Главни закључци рада су да се степен искоришћења пужних преносника може значајно повећати избором одговарајућих параметара, да су кинематска вискозност уља и коефицијент трења међу најкритичнијим факторима и да предложене регресионе једначине и експериментални системи омогућавају, како побољшање постојећих редуктора, тако и развој нових производа са већим степеном искоришћења.

Скулић и коаутори [19] су се бавили анализом утицаја различитих фактора на губитке снаге и степен искоришћења код пужних преносника. Испитивања су спроведена на специјализованом уређају GUNT AT200, при чему су коришћени једностепени пужни

редуктори са преносним односом $i = 18$. Током тестирања примењена су уља различитих вискозности (*ISO VG220*, *ISO VG460* и *ISO VG680*), а њихов утицај на степен искоришћења је систематски праћен. Вредности степена искоришћења одређене су за различите угаоне брзине и излазне моменте (оптерећења). Експериментална испитивања показала су утицај улазне угаоне брзине, вискозности уља и оптерећења на степен искоришћења пужних редуктора, што је довело до следећих закључака: вредности степена искоришћења кретале су се у интервалу од 0,48–0,57 при улазној угаоној брзини $n_1 = 1500 \text{ min}^{-1}$ и вискозности уља $220 \text{ mm}^2/\text{s}$, при чему је утврђено да се веће вредности постижу са порастом излазног момента, односно оптерећења. Са повећањем угаоне брзине олакшано је формирање стабилног уљног филма између контактних површина зубаца, што доводи до виших вредности степена искоришћења. Тако је, при уљу вискозности *ISO VG460* и брзини $n_1 = 2000 \text{ min}^{-1}$, степен искоришћења био у опсегу од 0,50–0,58, а при повећању брзине на $n_1 = 2500 \text{ min}^{-1}$ вредности су порасле до 0,51–0,59. Сличан тренд повећања уочен је и код уља *ISO VG220* и *ISO VG680*. Употреба уља веће вискозности доводи до повећања степена искоришћења преносника снаге, што је последица стабилнијег и дебљег уљног филма између зубаца, нарочито при већим температурама и оптерећењима. Са порастом угаоне брзине и оптерећења побољшава се формирање уљног филма и смањује трење, што доводи до већег степена искоришћења. Уља веће вискозности показала су боље резултате, јер обезбеђују стабилнији контактни слој под већим термичким и механичким оптерећењима. На основу тога, оптимални услови за постизање високог степена искоришћења пужног преносника снаге постижу се избором адекватне вискозности уља у складу са угаоном брзином и оптерећењем пужног преносника.

3.2. Термичко понашање пужних преносника снаге

Температура пужних преносника снаге значајно зависи од врсте и вискозности употребљеног мазива, јер мазива различитих својстава различито утичу на трење и одвођење топлоте у зони контакта зубаца. Са повећањем оптерећења и угаоне брзине пужа расте интензитет трења, што доводи до повећања температуре, нарочито у случају недовољне подмазаности или употребе уља ниже вискозности. Поред тога, избор материјала зупчаника и пужа (на пример, комбинација челичног пужа и бронзаног пужног зупчаника) утиче на проводљивост топлоте и отпорност на хабање, па самим тим и на стабилност термичког понашања током рада.

Пашхолд (Paschold) и коаутори [20] приказују истраживање чији се основни допринос огледа у развоју и имплементацији нове симулационе методе за прорачун степена искоришћења преносника снаге и топлотне равнотеже код пужних преносника снаге, која је успешно интегрисана у програм *WT plus* (софтверска платформа за симулацију преноса снаге) [20]. Овом методом омогућено је прецизније одређивање губитака снаге који настају услед трења у контакту зубаца, као и анализирање топлотних процеса који утичу на стабилност рада пужног зупчаника. Рад пружа свеобухватан приступ, јер обједињује аналитичке и нумеричке моделе за комплексан прорачун губитака снаге, уз истовремено формирање термичке мреже која омогућава прецизну симулацију топлотних токова у систему. Посебан значај рада лежи у томе што је извршена аутоматизација процеса формирања термичке мреже (нодализације), што омогућава брже и тачније моделирање различитих конфигурација пужних преносника без потребе за ручном интервенцијом. У поређењу са експерименталним резултатима из индустријске праксе и истраживачких лабораторија, показано је изузетно поклапање резултата, чиме је потврђена веродостојност и практична вредност предложене методе. Најважнији закључак рада јесте да се развијени модел може користити као поуздан алат у фази пројектовања пужних преносника, јер омогућава предвиђање стварног степена

искоришћења и расподеле топлоте у систему још у раним фазама развоја. На тај начин се може оптимизовати избор материјала, геометрије и уља за подмазивање, што директно доводи до смањења губитака снаге, продужетка века употребе и успоравања пораста температуре.

Рад *Тошића* и коаутора [8] представља свеобухватну нумеричку анализу прелазног термичког еластохидродинамичког контакта у пужним преносницима снаге, при чему су идентификовани кључни утицаји геометрије и услова подмазивања на понашање контактних површина. Утврђено је да ови преносници имају издужену елиптичну зону контакта са малим односом елиптичности, што доводи до смањеног уношења уља и повећаног бочног тока у делу зупца ближем корену, а самим тим и до мање дебљине уљног филма. Истраживање показује да се стабилнији филм може постићи побољшањем простора између зубаца у попречном правцу, што утиче на равномернију расподелу уља и топлоте у зони захвата. Анализом термичког понашања уочено је да пуж остаје хладнији у односу на пужни зупчаник, што се објашњава ефикаснијим одвођењем топлоте конвекцијом. Може се закључити да нумерички приступи представљају неопходан алат за прецизно разумевање и оптимизацију триболошких механизма у пужним преносницима, док будућа истраживања рад усмерава ка моделирању мешовитог подмазивања и хабања уз примену алгоритама машинског учења, ради убрзаног и поузданијег пројектовања [8, 21].

Карабакак (Karabacak) и коаутори [22] су у истраживању представили примену методе дубоког учења, конкретно конволуционе неуронске мреже (CNN), у анализи термовизијских снимака прикупљених експериментом под различитим оптерећењима и брзинама, што омогућава интелигентно и поуздано препознавање отказа. За поређење, CNN је трениран и на подацима вибрација и звука, где су резултати показали значајно мању тачност у дијагностици (83,3 % и 81,7 %), док је модел заснован на термовизијским снимцима постигао тачност од 100 %. Ови резултати указују на високу применљивост термовизијских метода за поуздано и економично праћење стања пужних преносника, смањење трошкова мерења и одржавања, као и развој интелигентних система предиктивног одржавања, чиме се значајно повећава степен искоришћења преносника снаге, њихова поузданост и радни век у индустријској примени.

Тица и коаутори [23] су у свом раду спровели аналитичка и експериментална истраживања термичког понашања пужних преносника снаге и одредили корелације између излазног обртног момента, температуре уља у кућишту пужног преносника и температуре зупчаника, како би омогућили поуздан рад и оптимизацију степена искоришћења преносника снаге. Утврђено је да повећање излазног обртног момента T_2 са 10 Nm на 22 Nm доводи до пораста температуре уља до 55 °C, као и до повећања температуре зупчаника, што директно утиче на губитке снаге и степен искоришћења. Рад показује линеарну корелацију између излазног обртног момента и повећане температуре уља и зупчаника и истиче значај контроле вискозности уља, оптимизације услова подмазивања и управљања термичким условима рада. Ови резултати омогућавају инжењерима да планирано смање губитке снаге, повећају степен искоришћења преносника и минимизирају ризик од отказа, чиме рад пужних преносника постаје поузданији и енергетски оптимизован.

Ли (Li) и коаутори [24] су у свом истраживању анализирали како различити геометријски параметри зубаца (као што су профил, висина, дебљина и угао) утичу на температуру која се развија током више циклуса узајамног захватања код пужних зупчаника. Његов главни допринос је у томе што уводи адаптивни итеративни алгоритам, који омогућава прецизније и ефикасније предвиђање температурних поља током реалног, вишецикличног рада, што раније није било систематски истражено за пужне

зупчанике. У односу на сличне радове, студија се издваја комбинацијом параметарске анализе и напредног нумеричког модела, који директно повезује геометрију зубаца са термомеханичким понашањем, омогућавајући инжењерима да оптимизују конструкцију пужних преносника ради мањег загревања и веће поузданости.

3.3. Вибрације и бука пужних преносника снаге

Проучавање појаве и промене вибрација и буке код пужних преносника снаге у зависности од материјала њихових делова, врсте мазива и режима рада има велики значај за оптимизацију њихових радних карактеристика и повећање степена искоришћења. Анализа параметара вибрације омогућава идентификацију узрока повећаног хабања, повећаних вибрација и губитака снаге, што доприноси развоју конструкцијских и технолошких решења са побољшаним карактеристикама. Добијени резултати представљају основу за прецизније моделирање динамичког понашања пужних преносника и примену напредних метода дијагностике и предиктивног одржавања. Осциловање појединих елемената преносника снаге, које изазива пораст вибрација доводи до фретинг хабања, те се исто може редуковати применом мазива са адекватним адитивима који повећавају дебљину мазивог споја [25].

Шмерингајова (Šmeringajová) [26] у раду описује конципирање методологије убрзаних динамичких испитивања зупчаника и стварање материјалних услова за њихову примену, а са циљем добијања података о понашању преносника у различитим радним условима. Убрзани тестови омогућавају стицање информација о карактеристикама, носивости редуктора, степена искоришћења и утицају технолошких параметара производње, врсте мазива и конструкционих модификација на динамику рада преносника. Рад има значајан допринос у области истраживања поузданости и оптимизације зупчаних преносника, јер развијена методологија омогућава скраћивање времена испитивања уз очување релевантности резултата. Резултати истраживања указују на важност систематског праћења динамичког понашања у различитим условима подмазивања и оптерећења. То омогућава идентификацију критичних фактора, посебно буке и вибрација, који утичу на степен искоришћења и трајност система и представља основ за даље унапређење пројектовања, технологије и одржавања пужних и других типова преносника снаге.

Баршикар (Barshikar) и коаутори [27] су у свом истраживању реализовали анализу пужног преносника снаге у оквиру индустријске мешалице типа *ribbon blender*, применом методе коначних елемената (FEA) у програмском пакету ANSYS 18.0. Циљ истраживања био је идентификовање слабијег елемента у пару пуж–пужни зупчаник, одређивање природних фреквенција и анализа деформација у различитим условима оптерећења. Геометрија навојног пужа, пужног зупчаника, као и пратећих делова попут вратила и лежајева, моделирана је у програму ProE-5, при чему су челик и бронза одабрани као материјали конструкционих елемената. Добијени резултати показали су да су деформације пужног зупчаника веће од деформација пужа. Природна фреквенција система је већа од радне фреквенције, што указује на стабилност рада преносника. Истраживање такође показује да пужни зупчаник подлеже бржем хабању и да анализа модела има кључну улогу у надгледању вибрација и раној дијагностици отказа. Рад има значајан допринос у области проучавања динамичког понашања и поузданости пужних преносника, па резултати могу послужити као основа за унапређење дизајна, избор материјала и примену ефикаснијих метода одржавања индустријских система.

Бенабид (Benabid) и коаутори [28] су реализовали експеримент са циљем да се испита веза између примене технике реверзног инжењеринга у производњи пужних преносника и виброакустичке анализе њиховог рада. У оквиру истраживања развијени

су оригинални динамички модели са осам степени слободе, конструисано је експериментално постоље за мерења, успостављен је ланац мерења вибрација и формирана база података за аквизицију сигнала. Значај рада огледа се и у развоју поступка израде нестандартних пужних зупчаника и пужева уз примену реверзног инжењеринга и у примени виброакустичке дијагностике за предвиђање и откривање отказа. Резултати показују да анализа вибрација омогућава идентификацију различитих индикатора и постојање дефеката код пужних и пратећих елемената. Примена методе класификације SVM (енгл. *Support Vector Machine*) омогућава поуздано одређивање и предвиђање оштећења система. Истраживање пружа нова сазнања о улози реверзног инжењеринга и пројектовања процеса у производњи нестандартних пужних преносника, као и о значају виброакустичке анализе у систематском праћењу стања и превентивној дијагностици индустријских машина.

Акерблом (Akerblom) и коаутори [29] су приказали да су резултати мерења буке и вибрација, након поновног склапања пужних преносника снаге, показали значајне варијације, које могу бити узроковане утицајем помоћног редуктора, променама преднапрезања лежајева или различитим динамичким својствима кућишта, што захтева даља истраживања. Утврђено је да грубља површина зупчаника повећава буку за 1–2 dB. Шири зупчаници са $\varepsilon_\beta = 1,8$ смањују буку за око 5 dB. Повећање или смањење храпавости површина утиче на нивое буке за 1–3 dB, грешке у поравнању еволвенте немају значајан ефекат, а грешке угла навоја од 37 μm повећавају буку за 1–3 dB, док смањење увијања смањује буку за 3–5 dB. Истраживање пружа критичне увиде у утицај геометријских и конструкционих параметара зупчаника на акустичке и вибрационе карактеристике, омогућавајући развој тихих и ефикасних преносних система.

У свом истраживању *Лимани (Lamani)* и коаутори [30] истичу да је дијагностика отказа зупчаника предмет интензивних научних испитивања, а да анализа вибрационог сигнала представља ефикасан метод за рану детекцију оштећења ротирајућих механизма, с обзиром на то да вибрациони сигнал кућишта преносника носи карактеристичне индикаторе отказа. Свака механичка јединица има специфичан „фреквентни потпис“ у спектру вибрација, који указује на зоне напона и прекомерне енергије, док праћење трендова мерења на различитим позицијама омогућава предвиђање потенцијалних проблема. Предности оваквог приступа обухватају продужавање века трајања опреме, повећање времена рада без отказа и оптимизацију управљања и планирања одржавања. Вибрациона анализа омогућава идентификацију неправилног поравнања, неуравнотежености, механичких губитака, ексцентричности вратила, хабања и ломова зубаца и лежајева, што представља основу за побољшање поузданости и степена искоришћења индустријских система.

Буквић и коаутори [31] су поставили циљ да испитају утицај угљеничних наноцеви (CNT) као адитива у мазивима на радне карактеристике пужних зупчаника у индустријским системима изложеним високим оптерећењима, обртним моментима и температурама, код пужних преносника снаге. Истраживање је обухватало лабораторијска испитивања пужног зупчаника са различитим концентрацијама CNT адитива у уљу, уз мерења степена искоришћења, вибрација и нивоа буке како би се проценио њихов утицај на радни учинак. Експериментални резултати показују да оптимизоване концентрације CNT смањују вибрације са 5,83 m/s^2 на 2,56 m/s^2 (за 56 %) и смањују ниво буке са 87,5 dB на 77,2 dB (за 12 %), а при концентрацији до 1 % мас. CNT. Прекорачење овог прага доводи до смањења степена искоришћења и повећања буке и вибрација. Рад потврђује да примена CNT адитива омогућава триболошку оптимизацију пужних зупчаника, смањењем вибрација и буке у индустријском окружењу, што представља значајан допринос побољшању карактеристика и ергономије радних система.

Букур (*Vicur*) и коаутори [32] су се у раду бавили анализом и утврђивањем карактеристика пужних преносника снаге, при чему је један од основних критеријума рада одређивање буке коју он производи. Поређење добијених података о нивоу буке и вибрација код пужних редуктора представља важан показатељ нивоа бешумности у њиховом раду. Ово је посебно значајно имајући у виду специфичну конструкцију пужа. У раду су аутори приказали експерименталне резултате мерења нивоа буке и вибрација током рада пужног преносника снаге, израђеног од комбинације материјала челик–бронза, подмазиваних уљем Т90, са преносним односом $i = 47$. Значај рада огледа се у детаљној анализи акустичких и вибрационих карактеристика пужних преносника снаге. То доприноси њиховој оптимизацији у погледу степена искоришћења, трајности и смањења буке у раду, посебно у применама које захтевају прецизан и тих рад механичких система.

У истраживању, које је спровео *Баршикар (Barshikar)* и коаутори [33], анализирани су вибрационе и акустичке карактеристике пужних мењача, који представљају битне компоненте у индустријским системима. Пошто је материјал пужног зупчаника мекши од материјала пужа, овај део је подложен оштећењима као што су хабање, тачкасто оштећење и лом зубаца, што захтева континуирано праћење његовог стања. Аутори су експериментално испитали утицај лома зубаца, оштећења лежаја и промене оптерећења на амплитуду и статистичке параметре вибрација и буке у фреквентном домену, користећи OR34 FFT анализатор (преносни уређај за мерење и анализу вибрација помоћу брзе Фуријеове трансформације FFT) и NVGate софтвер [33] (омогућава снимање, обраду и визуализацију вибрација и буке у реалном времену). Показано је да се појавом оштећења повећава амплитуда вибрација и ниво буке и мењају фреквентни параметри, што потврђује да анализа вибрација и буке представља ефикасну методу за рану дијагностику и повећање поузданости пужних преносника снаге.

Хи (He) и коаутори [34] су експериментално утврдили да синергијско додавање ZnO и Si₃N₄ наночестица значајно смањује трење и хабање услед формирања стабилног заштитног трибофилма. Аутори показују да комбиновани нанослој побољшава носивост контактних површина и омогућава равномернију расподелу притиска, што резултира повољнијим условима подмазивања. Рад се издваја у односу на слична истраживања тиме што његови резултати повезују микроскопске триболошке промене са мерљивим смањењем вибрација и буке на макроскопском нивоу. Истраживање јасно наглашава да редукција трења и хабања доводи до стабилнијег динамичког понашања пужног преносника, што је посебно релевантно за примену у пужним преносницима.

3.4. Примена наноадитива у мазивима и хабање пужних преносника снаге

Истраживања у области примене наноадитива у мазивима за пужне преноснике снаге показала су изузетан значај у контексту унапређења њихових радних и енергетских карактеристика. Интеграција наночестица у базна мазива, нарочито у еколошки прихватљиве системе засноване на глицеролу, довела је до значајног побољшања триболошких својстава кроз смањење коефицијента трења, интензитета хабања и радне температуре у зони контакта зубаца пужног пара. Наночестице, као што су угљеничне наноцеве, графен, алуминијум-оксид и бор-нитрид, делују као микроносачи топлоте и активни модификатори површине, формирајући стабилан заштитни филм који обезбеђује побољшану хидродинамичку стабилност и равномернију расподелу оптерећења. Емпиријски резултати потврђују да примена наномазива доприноси продужетку радног века пужних редуктора, повећању механичке и енергетске ефикасности, као и смањењу укупних губитака услед трења. Синергијски ефекат

наночестица [7] унутар мазивне структуре представља основу за развој нове генерације „паметних“, адаптивних и еколошки одрживих мазивних система и тиме отвара простор за даље истраживање и оптимизацију ових решења у савременим индустријским применама.

Ку (*Qu*) и коаутори [35] су у раду успоставили теоријски модел динамичког подмазивања пужног зупчаника типа ZC1, при чему је изведена формула за дискретизацију хидродинамичког подмазивања ради прорачуна степена искоришћења пужног пара. На основу спроведених прорачуна конкретних примера, утврђено је да степен искоришћења износи 84,25 % при углу пужа $\varphi_1 = 90^\circ$. Значај рада огледа се у развоју дискретног модела хидродинамичког подмазивања цилиндричног пужа. Као такав представља значајан допринос истраживањима у области подмазивања и служи као основа за оптимизацију конструкционих и радних параметара пужних преносника. Закључак рада указује да предложени модел омогућава прецизније одређивање степена искоришћења и представља поуздан теоријски оквир за побољшање пројектовања и карактеристика пужних преносника снаге.

Јусеф (*Yousef*) и коаутори [36] су у свом истраживању приказали да, иако се примена нанотехнологија све више шири, и даље постоји баријера између нанотехнологије и машинских елемената. Циљ рада је њено превазилажење додавањем угљеничних наноцева (CNT) у зупчанике од ацеталног полимера (цилиндричне са правим и косим зубима, конусне и пужне). Применом адхезивног мазива, уз додатак нанокомполитне структуре са 0,02 мас.% CNT, добијена је равномерна дисперзија без дефеката. Испитивањем отпорности на хабање при 1420 min^{-1} и обртном моменту од 4 Nm утврђено је да додавање CNT-а значајно повећава издржљивост, нарочито код косозубих, конусних и пужних зупчаника. Значај рада огледа се у успешном повезивању нанотехнологије са машинским елементима и доказивању да нанокомполити могу знатно побољшати радне карактеристике зупчастих преносника снаге.

У свом раду су Умутлу (*Ümütli*) и коаутори [37] представили методу за откривање појаве питинга у пужним преносницима снаге применом вештачких неуронских мрежа (ANN). Истраживање је засновано на анализи вибрационих сигнала прикупљених током рада преносника, при чему су развијени алгоритми машинског учења способни да препознају и класификују ране фазе оштећења површине зубаца. Значај рада огледа се у развоју поузданог и аутоматизованог система дијагностике, који омогућава правовремено откривање питинга без потребе за скупом и сложенем опремом. Постигнућа студије показују да примена неуронских мрежа значајно повећава тачност и брзину откривања отказа у односу на класичне методе анализе вибрација. Закључак рада указује да интеграција вештачке интелигенције у системима за надзор стања пужних преносника представља ефикасан приступ за продужетак њиховог радног века, смањење трошкова одржавања и унапређење поузданости машинских система.

Ху (*He*) и коаутори [38] су у свом раду систематизовали категорије и механизме подмазивања најчешће коришћених наноадитива. У раду су детаљно представљена најновија достигнућа у примени MNCS (енгл. *Metal–Nitride Composite Structures*, метал-нитрид композитна структура) као адитива у уљним и воденим базама. Приказана је употреба порозних MNCS као нове генерације мазивних адитива, уз анализу експерименталних резултата и карактеристика подмазивања. Значај овог рада огледа се у томе што пружа свеобухватан увид у развој и потенцијал MNCS у области трибологије, наглашавајући њихову способност да унапређују степен искоришћења и поузданост машинских система. Истраживање показује да MNCS представљају перспективан правац у развоју будућих еколошки прихватљивих и високоефикасних мазива, која могу знатно смањити губитке снаге и продужити век трајања техничких система.

Менг (Meng) и коаутори [39] у овом испитивању су припремили наноадитив BN (енгл. *bor nitride*, бор-нитрид) обложен угљеничним слојем (енгл. BN@C, *Boron Nitride@Carbon*) применом нове хидротермалне методе. Као матрични материјал коришћени су чисти BN нанолистићи, а као извор угљеника — глукоза. Добијени BN@C показао је изузетна својства подмазивања као адитив за мазива. Ради испитивања триболошких својстава, BN@C је модификован олеинском киселином као сурфактантом (површински активна супстанца која се користи за модификацију површине наноадитива како би се побољшала његова дисперзија у уљу), а испитивања трења изведена су на уређају MRS-10A са четири кугле. Захваљујући стабилној дисперзији, веома малој величини честица и присуству угљеничног површинског слоја, адитив BN@C-OA (енгл. *Boron Nitride@Carbon – Oleic Acid*), показао је знатно побољшане карактеристике подмазивања. Посебно је значајно што је BN@C-OA могао да продре у површински слој између површина, где је дошло до међуслојног клизања, које је унапредило антифрикциона и антихабајућа својства. Значај рада огледа се у развоју новог приступа синтези нанокомполитних адитива са облогом, који побољшавају триболошке карактеристике наночестица у уљним мазивима.

Дабис (Dabees) и коаутори [40] су у свом раду испитивали механичка својства MWCNT/HDPE нанокомполита (енгл. *Multi-Walled Carbon Nanotubes*, вишеслојне угљеничне наноцеви и енгл. *High-Density Polyethylene*, политетилен велике густине), са посебним фокусом на отпорност на хабање и жилавост, користећи Таберов метод абразије. Испитивања су показала да се губици, услед хабања, смањују са повећањем удела наноцеви до концентрације од 1,5 мас.%. Даљим повећањем долази до преласка материјала из дуктилног (могућност значајне деформације без лома) у крт облик и долази до смањења жилавости. При обртном моменту од 5 Nm побољшање отпорности на хабање било је константно са растом наноадитива, док је при 10 Nm карактеристика узорка са 2,5 мас.% наноадитива била лошија услед повећане кртости. Добра дисперзија наноцеви и развијена међуфазна повезаност допринеле су ефикаснијем преносу оптерећења и побољшаним механичким својствима материјала. Значај рада огледа се у развоју нових нанокомполитних материјала са повећаном тврдоћом, отпорношћу на хабање и термичком стабилношћу, што их чини погодним код зупчастих преносника. Као коначни закључак, MWCNT/HDPE нанокомполити са 2 мас.% наноадитива издвојили су се као перспективан материјал, захваљујући уједначеној дисперзији, побољшаној чврстоћи, жилавости и отпорности на хабање.

Сривјас (Sriviyas) и коаутори [41] су кроз свеобухватан прегледни рад приказали механизме деловања наноцеви као адитива у мазивима, својства наноцеви у погледу њихових облика, дужина, пречника, стабилности и склоности ка агломерацији. Важан сегмент рада представљају приказани и обрађени резултати бројних истраживача, добијени триболошким испитивањима различитих наноадитива и у различитим експерименталним условима. Значај овог рада се огледа и у свеобухватном прегледу истраживања из области примене наноадитива у уљима за подмазивање у аутомобилским моторима, чиме се доприноси развоју енергетски ефикаснијих, еколошки прихватљивијих и поузданијих система моторног подмазивања.

Дау (Dai) и коаутори [42] су реализовали испитивање усмерено на анализу утицаја наноцеви на триболошке карактеристике у условима подмазивања уљем. У оквиру прегледа посебна пажња посвећена је хемијским, физичким и морфолошким параметрима наноцеви, а који су испитани кроз статистичка поређења ради утврђивања њиховог утицаја на трење и хабање. На основу прикупљених података из литературе анализирани су механизми подмазивања који укључују наноцеви, чиме је омогућено дубље разумевање начина на који оне побољшавају триболошке карактеристике мазива. Значај овог рада огледа се у томе што не представља само допуну постојећег знања, већ

пружа темељно разумевање процеса подмазивања на нанонивоу. То омогућава рационално пројектовање и развој наномазива са супериорним триболошким карактеристикама. Интеграција експерименталних и теоријских сазнања представља основу за стварање ефикаснијих, еколошки прихватљивијих и дуготрајнијих система подмазивања.

Бирлеану (Birleanu) и коаутори [43] су у раду испитали утицај додавања наноцеви TiO_2 у моторно уље на триболошка својства мазива, кроз мерења коефицијента трења и хабања при различитим концентрацијама адитива и температурама. Резултати показују да наноцеви значајно побољшавају носивост, смањују трење и хабање. Њихова оптимална концентрација доводи до најбољих антифрикционих и антихабајућих карактеристика, захваљујући стварању танког трибофилма. Рад се издваја по систематичном испитивању више концентрација адитива и применом анализе површина, што омогућава поуздану процену ефекта наноцеви. Закључак је да уље са додатком TiO_2 наноцеви има значајно побољшана триболошка својства и представља перспективно решење за повећање ефикасности и издржљивости машинских компоненти.

Венцл и Богнар (Vognár) [4] спровели су експериментално истраживање које је имало за циљ да испита вискозност нанофлуида на бази глицерола који садрже 0,1, 0,2, 0,5 и 1,0 мас.% MWCNT. Вискозност мазива чистог глицерола и глицерола са адитивима MWCNT је добијена на различитим температурама и брзинама смицања. Испитан је утицај количине наноцеви, температуре и брзине смицања на вискозност. Утврђено је да вискозност свих испитаних мазива експоненцијално опада са порастом температуре. Вискозности се такође повећавају, при сталној температури, са повећањем брзине смицања, али је то очигледно само при нижим угаоним брзинама (до 150 rpm). Количина MWCNT-а је показала приметан утицај на вискозност, без обзира на примењену брзину смицања. Сва испитана мазива показују трендове експоненцијалног раста вискозности са повећањем количине MWCNT-а. Вискозности нанофлуида са мањом количином MWCNT-а (0,1 и 0,2 мас.%) приближно су једнаке вискозности глицерола, док остали нанофлуиди показују значајно веће вискозности, нарочито на нижим температурама. Напон смицања је линеарно пропорционалан примењеној брзини смицања код глицерола, што потврђује да је он њутновски флуид. Са друге стране, нанофлуиди који садрже MWCNT показују неџутновско, псеудопластично понашање, такође зависно од температуре.

Мухамед (Mohamed) и коаутори [44] су рад усмерили на развој нанокомпонитног мазива ради смањења трења и хабања између контактних површина као што су делови мотора, брегасте осовине, зупчаници и лежајеви. У раду су испитиване триболошке и реолошке карактеристике новоразвијених наномазива уз примену аутоматизованог триболошког уређаја за испитивање мазива и масти. Калцијумска маст са различитим концентрацијама наноцеви титанијум-диоксида и угљеничних наноцеви (TiO_2/CNT) у распону од 0,5 до 4 мас.% успешно је припремљена и тестирана на различитим температурама. Проучени су морфологија и хемијски састав површина након хабања, као и механизми хабања под различитим оптерећењима. Значај овог истраживања огледа се у развоју ефикаснијих мазива која могу знатно смањити губитке услед трења у механичким системима. Достигнућа рада показују да је оптимална концентрација TiO_2/CNT наноадитива 3 мас.%, при чему је смањење хабања износило 72,3 %, а смањење коефицијента трења око 60 %. Истовремено је забележено повећање вискозности за 48,2 % и смицајног напона за 74,2 %. Као закључак, студија доказује да примена TiO_2/CNT наноадитива у мастима значајно побољшава њихова триболошка својства и представља перспективан правац за развој напредних наномазива у аутомобилској и машинској индустрији.

Чебатина (Chebattina) и коаутори [45] су спровели експеримент са циљем да испитају утицај величине вишеслојних угљеничних наноцеви (MWCNT) као адитива за уље у зупчаницима, ради побољшања триболошких својстава. Пошто дуге, нетретиране наноцеви имају тенденцију стварања кластера, што смањује стабилност дисперзије, оне су пажљиво обрађене у кугличном млину, ради скраћивања дужине пре додавања у мазиво. Електронска микроскопија и Раманова спектроскопија коришћене су за испитивање утицаја процеса млевења на структуру и величину MWCNT честица, након чега су дуге и скраћене наноцеви распршене у EP 140 уљу за зупчанике у концентрацији од 0,5 мас.%. Стабилност дисперзије процењена је применом технике расејања светлости, док су антихабајућа, антифрикциона и особине под екстремним притиском тестиране на уређају са четири кугле. Значај овог рада огледа се у развоју стабилнијих и ефикаснијих наномазива за примену у зупчастим преносницима снаге. Скраћене MWCNT честице значајно побољшавају отпорност на хабање, смањују трење и повећавају издржљивост мазива под високим оптерећењем.

Истраживање триболошких својстава два типа мазивих уља — Mobil Gear 627 и парафинског минералног уља — са додатком вишеслојних угљеничних наноцеви (MWCNT) у различитим концентрацијама (0,1; 0,5; 1 и 2 мас.%) спровели су *Калил (Khalil)* и коаутори [46]. Испитивања трења и хабања изведена су на уређају са четири кугле у складу са стандардима ASTM D-2783, ASTM D-2596 и ASTM D-5183, ради процене антихабајућих својстава и коефицијената трења. Резултати су показали да додавање MWCNT наноцеви базним уљима значајно побољшава њихова триболошка својства. Испитивања су показала смањење хабања за 68 % у односу на уље Mobil Gear 627 и 39 % у односу на парафинско уље, док је трење смањено за 57 % и 49 % у истом поређењу. Морфолошке и елементне анализе површина после хабања, спроведене SEM (енгл. *Scanning Electron Microscopy*, скенирајући електронски микроскоп) и EDX (енгл. *Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy*, енергетски дисперзивна рендгенска спектроскопија) методама, потврдиле су формирање уљног филма који садржи елементе наноцеви. Значај овог рада огледа се у доказаној ефикасности MWCNT наноадитива у побољшању подмазивања и продужетку радног века уљних система. Као закључак, резултати истраживања потврђују да оптимално дозирање MWCNT наноцеви значајно унапређује антифрикциона и антихабајућа својства индустријских мазива, што их чини перспективним за примену у високооптерећеним зупчаницима и лежајевима.

Халелфадл (Halefadi) и коаутори [47] у овом раду представљају експериментално истраживање реолошких својстава нанофлуида на бази воде који садрже угљеничне наноцеви (CNT) великог односа дужине и пречника. Испитиван је утицај концентрације честица и температуре на вискозност нанофлуида, при чему је утврђено да се нанофлуиди са већим садржајем честица понашају као течности са смањењем вискозности при повећању брзине смицања, док се при нижем садржају честица понашају њутновски. Такође је показано да температура утиче на вискозност и нанофлуида и базне течности, али да је релативна вискозност нанофлуида при великим брзинама смицања независна од температуре. Процењена је и просечна максимална величина агломерата, која се добро слаже са резултатима добијеним SEM методом. Значај овог рада огледа се у томе што реолошка анализа омогућава увид у структуру и присуство агломерата у нанофлуидима, што доприноси бољем разумевању њихових топлотних својстава.

Марино (Marino) и коаутори [48] у свом истраживању приказују резултате о стабилности нанодисперзија са хемијски модификованим наноадитивима као што су угљенични наноматеријали, метали и нанокомпозити. На стабилност највише утичу величина, концентрација наноцеви и вискозност базног уља. Сферне наночестице мање од 20 nm показале су стабилност дужу од два месеца. Хемијски модификоване

наночестице значајно смањују хабање и трење формирањем заштитних филмова на површини. Рад има значај јер повезује структуру и модификацију наночестица са њиховим триболошким понашањем и стабилношћу, доприносећи развоју ефикаснијих еколошких наномазива.

Корнелио (Cornelio) и коаутори [49] у свом раду истражују триболошка својства угљеничних наноцеви (једнослојних и вишеслојних) модификованих карбоксилном киселином, када се користе као адитиви у мазивима у различитим концентрацијама (0,01 и 0,05 мас.%) под условима котрљања и клизања у трибометру са двоструким диском. Испитивања су извршена при 5 % клизања и притисцима од 0,8 и 1,1 GPa. Резултати показују да присуство угљеничних наноцеви значајно смањује коефицијент трења и интензитет хабања површина у контакту. Значај рада огледа се у потврди ефикасности CNT као триболошких адитива, што доприноси развоју наномазива са побољшаним карактеристикама и дуговечношћу под различитим условима оптерећења.

Сафарова (Safarova) и коаутори [50] се у свом раду фокусирају на испитивање једнослојних угљеничних наноцеви (енгл. *SWCNT, Single-Walled Carbon Nanotube*) помоћу различитих микроскопских метода. За многе истраживаче је важно познавање основних параметара SWCNT, посебно пречника и дужине појединачне наноцеви или снопа наноцеви, као и броја наноцеви у снопу. За одређивање ових параметара коришћене су методе трансмисионе електронске микроскопије (енгл. *TEM*) и скенирајућим електронским микроскопом (енгл. *SEM, Scanning Electron Microscopy*). Значај рада лежи у пружању прецизних података о морфологији SWCNT, што је кључно за њихову примену у нанотехнологији и развоју напредних материјала.

Рад *Чанга (Changa)* и коаутора [51] истиче значај нанотехнологије у савременој науци, посебно у примени наноцеви метал-оксида које налазе употребу у каталитичким процесима, оптоелектронским материјалима, сензорима, заштити животне средине и биомедицини. Међутим, аутори указују да све већа примена наноцеви доводи до њиховог доспевања у животну средину, што изазива забринутост због потенцијалне токсичности и утицаја на живи свет. Иако су спроведена бројна истраживања и даље постоје нејасноће у погледу механизма токсичног деловања ових материјала. У раду се, кроз примере наноцеви CuO и ZnO, анализирају фактори као што су величина, површинске карактеристике, растворљивост и путеви излагања, који посредују токсичне ефекте. У закључку, рад доприноси бољем разумевању токсичности наноцеви метал-оксида и наглашава потребу за безбеднијом и контролисаном применом ових материјала у различитим областима науке и индустрије.

Буквић и коаутори [52] у свом раду истражују и анализирају примену нанотехнологије у унапређењу триболошких својстава мазива која се користе у индустријским постројењима, аутомобилској индустрији и другим системима за пренос снаге. Пораст потребе за смањењем трења, хабања и губитака снаге довео је до развоја читаве породице побољшаних мазива са наноадитивима, при чему се посебно истичу CNT као адитиви који значајно унапређују триболошке карактеристике — смањују коефицијент трења и хабање контактних елемената, успоравају пораст температуре и повећавају стабилност уљног филма. Рад приказује резултате истраживања и примене нанокомпонентних адитива у мазивима, као и делимичну компаративну анализу постојећих радова у овој области. Значај рада огледа се у систематизацији знања о утицају CNT на побољшање карактеристика машина и смањење губитака снаге, али и у указивању на негативне утицаје наноцеви на животну средину и здравље људи, као и на економске изазове њихове примене. У закључку, рад доприноси разумевању потенцијала и ограничења нанотехнолошких адитива у савременој индустријској пракси и представља основу за будућа истраживања у области еколошки прихватљивих и

ефикасних мазива.

Досадашња истраживања пужних преносника утврдила су да додаток угљеничних наноцеви у мазиво побољшава кључне радне карактеристике. Адитиви CNT, делујући као нано-лежајеве и додатно ојачавајући уљни филм, смањују коефицијент трења, што директно води ка вишем степену искоришћења. Истовремено, долази до умањења амплитуда вибрација и нивоа буке, док ефикасније одвођење топлоте у условима примене ових адитива, резултира нижим радним температурама и смањењем хабања. Међутим, ове користи су строго условљене постизањем стабилне, хомогене дисперзије наноцеви, јер њихова повећана концентрација доводи до агломерације и појачаног таложења, што нарушава реолошке карактеристике мазива. Дакле, оптимизација концентрације CNT адитива представља претпоставку за остваривање њиховог пуног потенцијала као мултифункционалног адитива за напредна мазива.

4. ПУЖНИ ПРЕНОСНИЦИ СНАГЕ

4.1. Појам, намена и карактеристике пужних преносника снаге

Пужни преносници снаге представљају механизме који омогућавају пренос обртног момента између вратила који се међусобно мимоилазе под углом од 90° . Овај тип механичког преносника снаге одликује се способношћу остваривања великог преносног односа уз релативно миран и стабилан рад, иако је карактеристичан по појави повећаног загревања и нижем степену искоришћења у односу на друге зупчасте преноснике.

Функционални принцип пужног пара заснива се на аналогји са навојним механизмом, при чему се пренос снаге и кретања реализује путем клизног контакта између пужа (пужног завртња) и пужног зупчаника. Пуж је облика завртња чији су зупци спирално обавијени око цилиндричног језгра, док пужни зупчаник својим профилисаним зупцима захвата део површине тог језгра, обезбеђујући континуирану кинематску везу између елемената пара. Са конструкционог становишта, пужни зупчаник може се посматрати као половина навртке која, уместо транслационог кретања карактеристичног за навојне спојеве, остварује ротацију око сопствене осе. На тај начин (слика 4.1), пужни пар представља типичан клизни спој у коме доминира релативно кретање површина у додиру, односно интензивно клизање [53, 54].



Слика 4.1 Пужни пар [54]

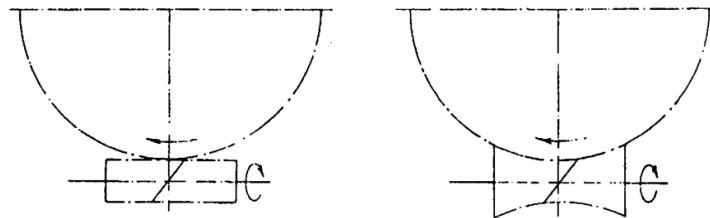
Да би се обезбедили повољни триболошки услови рада, неопходно је да материјали у контакту поседују различите механичке карактеристике — један елемент се израђује од тврђег, а други од мекшег материјала. У пракси се пуж најчешће производи од челика који се након машинске обраде подвргава термичкој обради (каљењу и брушењу) ради постизања високе тврдоће и глатке површине. Пужни зупчаник, с друге стране, најчешће се израђује од калајне бронзе, материјала који се одликује изузетним својствима отпорности на хабање, добрим коефицијентом трења и стабилним понашањем у условима повишених температура.

Основна намена пужних преносника снаге огледа се у постизању великих преносних односа при компактним димензијама конструкције, што их чини погодним за примену у системима са ограниченим просторним условима. Због карактеристичног начина захватања зубаца, пужни преносници обезбеђују мирно и тихо функционисање, што их чини изузетно погодним за примену у прецизним и хибридним погонима. Поред тога, способност самокочења код одређених конструкционих решења омогућава њихову

примену у механизмима који захтевају стабилност положаја при престанку деловања погонске силе. У техничкој пракси, пужни преносници снаге налазе широку примену у аутоматизацији, транспортним системима, подизним уређајима и разноврсним индустријским машинама [55, 56].

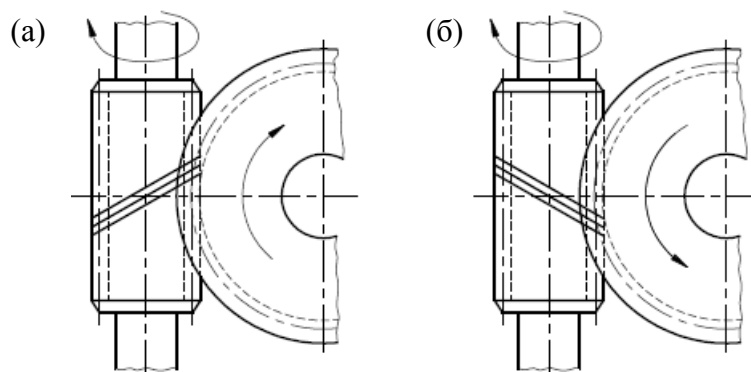
Пужни преносници могу бити изведени са једним почетком навоја (моноспирални пужеви) или са више навоја (полиспирални пужеви), при чему број почетака директно не утиче на кинематске и динамичке карактеристике преноса. У стандардној конфигурацији, пуж делује као погонски елемент, док су обрнути режими рада, у којима пуж делује као гоњени елемент, изузетно ретки и технички ограничени због могућности појаве самокочења. Избор броја зубаца пужног зупчаника мора бити извршен тако да се осигура стабилан клизни пренос без појаве нежељеног самоблокирања [53].

Према геометријској конфигурацији активних површина, пужни парови се деле на цилиндричне и глобоидне (слика 4.2). Код цилиндричних пужних парова контакт се остварује дуж линије додира, најчешће на једном или два зупца пужног зупчаника, што условљава релативно ограничену носивост. Насупрот томе, код глобоидних пужних парова кинематске површине пужа и зупчаника су просторног облика и међусобно се уклапају у већој мери, чиме се повећава број зубаца у контакту, смањује специфични притисак и побољшава укупна носивост система. Иако глобоидни пужни парови имају добре механичке и триболошке карактеристике, њихова практична примена је ограничена због изузетне сложености геометрије и технолошких захтева у процесу израде, посебно у делу профилисања пужа и његовог тачног уклапања са зупчаником [54, 57].



Слика 4.2 Облици пужних парова: цилиндрични и глобоидни [54]

Смер спирале пужа (леви или десни) и правац његове ротације представљају међусобно повезане параметре, који у комбинацији одређују кинематски смер кретања излазног вратила. Тиме се унапред дефинише логика преноса снаге и усмеравање момента у механичком систему. При ротацији пужа, који је фиксиран у аксијалном правцу, правац обртања пужног зупчаника одређен је како смером ротације самог пужа, тако и геометријском оријентацијом његове завојнице (слика 4.3).



Слика 4.3 Пужни пар са (а) левом и (б) десном завојницом пужа [54]

Употребом пужног пара могуће је остварити изузетно висок преносни однос,

који се, у зависности од конструкционих параметара, креће у интервалу од приближно 5 до 50, а у посебним случајевима и до 300. Овако значајна редукација броја обртаја омогућава генерисање великих обртних момената на пужном зупчанику, при релативно малим улазним моментима које обезбеђује погонска машина. Због тога је конструкционо решење пужног преносника знатно компактније у односу на цилиндричне и коничне парове зупчаника. Висока носивост овог типа преносног механизма постиже се захваљујући истовременом ангажовању већег броја зубаца у спрези, као и квалитетном уходавању и ефикасном подмазивању контактних површина зубаца у спрегнутом пару.

Основне карактеристике пужних парова су следеће [58]:

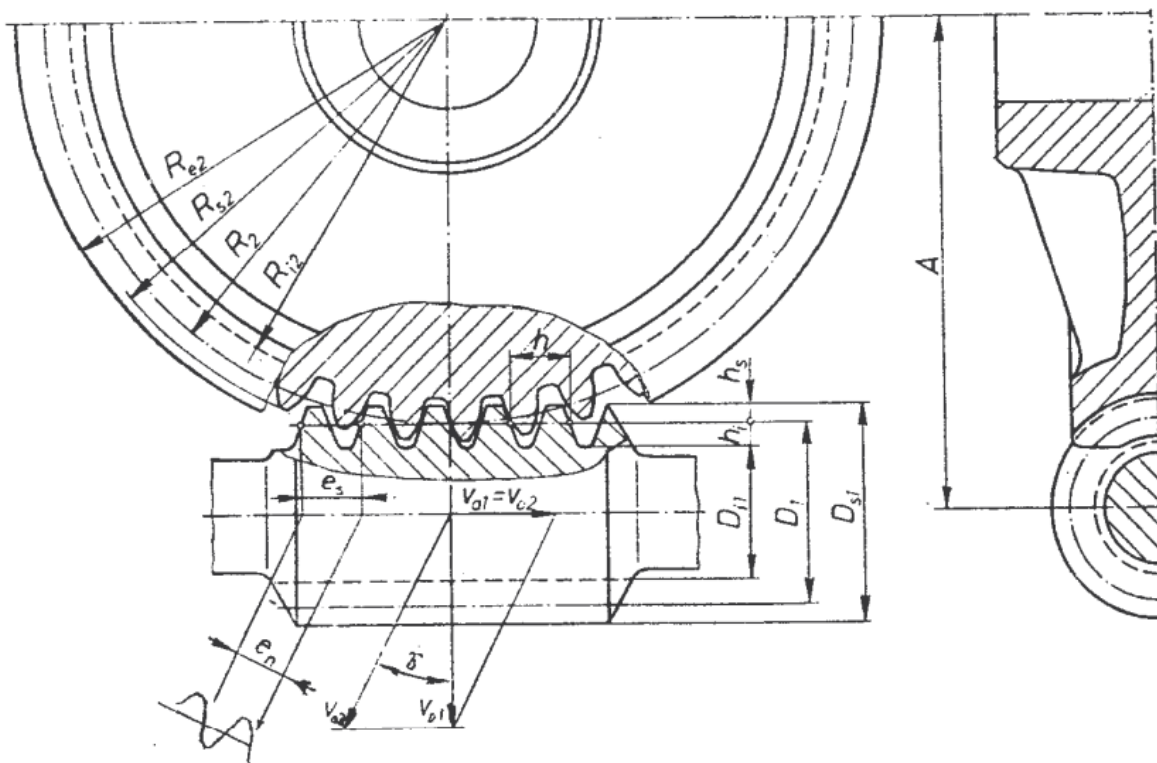
- омогућавају постизање изузетно високих преносних односа у оквиру једноступеног преноса и то у режиму редукације најчешће од 5 до 50, док се у случају мултипликације преносни однос креће у границама од 5 до 15;
- захваљујући линијском карактеру контакта између спрегнутих бокова зубаца, који је праћен израженим релативним клизањем, долази до смањења унутрашњих динамичких оптерећења у систему, што резултира ефикасним пригушењем вибрација, чиме се повећава његова стабилност, поузданост и трајност у условима континуираног оптерећења;
- истовремено укључивање већег броја зубаца у процес преноса оптерећења, односно вишеструка спрега, доприноси значајном повећању носивости пужних преносника, што омогућава равномернију расподелу сила дуж контактних површина и смањује локална напрезања;
- степен искоришћења пужних преносника се, у зависности од режима рада, креће у интервалу од приближно 0,5 код мултипликатора до око 0,9 код редукационих конфигурација, где је варијабилност у степену искоришћења условљена доминантним утицајем трења клизања у зони контакта завојнице и зубаца, као и карактеристикама подмазивања и конструкционим решењем преносног механизма;
- изражено клизање између зубаца у зони спрезања представља ограничавајући фактор који условљава максималне бројеве обртаја и снагу коју пужни преносник може пренети;
- најчешће се примењују у погонима где угаона брзина не прелази приближно 3000 min^{-1} , уз осна растојања мања од 160 mm, што произилази из конструкционих и термодинамичких ограничења механизма;
- пужни механизам може бити изведен са левом или десном оријентацијом завојнице, што омогућава промену смера ротације пужног зупчаника без потребе за било каквим конструкционим модификацијама.

4.2. Конструкција, геометрија и начини спрезања пужних преносника снаге

Теоријски посматрано, контакт између завојнице пужа и зубаца пужног зупчаника остварује се дуж линије, док се у реалним условима рада, услед еластичних деформација материјала под оптерећењем, овај контакт проширује у уску али релативно издужену површину додира. Захваљујући томе, специфични контактни притисак у зони спрезања остаје умерен, што доприноси стабилности и дуготрајности рада преносног механизма. Под одговарајућим условима експлоатације — који подразумевају адекватан избор мазива, довољну брзину клизања и прецизно склопљен преносни систем — између контактних површина може се формирати континуални слој мазива, који омогућава

појаву хидродинамичког подмазивања. Овај повољан режим подмазивања карактеристичан је за брзоходне пужне преноснике са високим степеном тачности обраде завојнице пужа и зубаца пужног зупчаника. Насупрот томе, спороходни пужни преносници најчешће функционишу у условима делимичног, односно полуоквашеног подмазивања, где је контакт метал – метал делимично присутан [56].

Уздужни пресек пужа може се посматрати као идеализована форма зупчасте полуге (слика 4.4), чијим би се праволинијским, односно транслаторним кретањем могло постићи ротационо померање пужног зупчаника. Сукцесивни положаји такве замишљене зупчасте полуге, током њеног померања, представљају геометријску аналогију стварном процесу обртања пужа и кретања његових завојака. На овој концептуалној релацији заснива се анализа кинематске спреге између пужа и пужног зупчаника. Профили зубаца у уздужном пресеку, приказани на слици 4.4, својим обликом одговарају еволвентним профилима који су карактеристични за класичне цилиндричне зупчанике.



Слика 4.4 Уздужни пресек пужног преносника снаге [56]

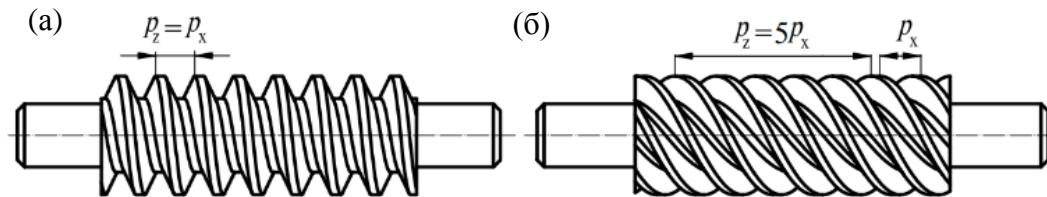
Основни геометријски параметри пужног преносника обухватају корак навоја p_z , пречник средње кружнице пужа d_{m1} и угао нагиба завојнице пужа на средњем цилиндру γ_m . Ови параметри су међусобно функционално повезани изразом који дефинише кинематски однос између геометрије пужа и карактеристика његовог кретања.

$$\operatorname{tg} \gamma_m = \frac{p_z}{\pi \cdot d_{m1}} \quad (4.1)$$

Број зубаца (завојница) пужа, означен као z_1 , директно зависи од захтеваног преносног односа и обично се креће у интервалу од једног до шест почетака навоја. У складу са тим, корак навоја p_z представља z_1 пута већу вредност у односу на аксијални

корак p_x (слика 4.5). Ова веза има суштински значај за дефинисање кинематских параметара пужног преносника, јер број навоја непосредно утиче на брзину преноса, степен искоришћења и контактне услове између завојнице и зубаца пужног зупчаника [9].

$$p_z = z_1 \cdot p_x \quad (4.2)$$



Слика 4.5 Врсте пужева: (а) једнозавојни пуж и (б) вишезавојни пуж [9]

Слично као код основног профила зубаца цилиндричних зупчаника, аксијални корак p_x пужа дефинише се као производ броја π и аксијалног модула пужа. Ова зависност представља основу за геометријско обликовање навојног профила, јер обезбеђује усклађеност између корака завојнице и параметара модула, што је од кључног значаја за правилан захват и кинематску прецизност пужног преносника.

$$p_x = \pi \cdot m \quad (4.3)$$

Аксијални модул m_x представља фундаментални геометријски параметар пужа који има кључну улогу у процесу пројектовања, кинематске анализе и контроле профила навоја. Његов значај је подједнако изражен у конструкционом, технолошком и функционалном аспекту рада пужног преносника снаге. Код цилиндричних пужева чија пројекција осе под правим углом пресеца осу пужног зупчаника, аксијални модул је идентичан чеоном модулу пужног зупчаника m_t , што се математички изражава релацијом $m = m_t$. Такво поравнање модула обезбеђује геометријску усаглашеност елемената пужног пара, стабилан контакт зубаца и повољну расподелу оптерећења у зони захвата. Са становишта стандардизације, вредности аксијалног модула су дефинисане у оквиру стандарда DIN 3976, која обезбеђује унификацију димензионисања и конструкциону међузаменивост пужних преносника у индустријској примени [9].

Основни конструкциони параметар пужа представља пужни број q , који се дефинише као однос његовог референтног (номиналног) пречника и аксијалног модула. Овај бездимензиони параметар има кључну улогу у геометријском обликовању пужа, јер непосредно утиче на кинематске односе, облик завојнице и општа механичка својства пужног преносника.

$$q = \frac{d_{m1}}{m} \quad (4.4)$$

где су:

q – пужни број,

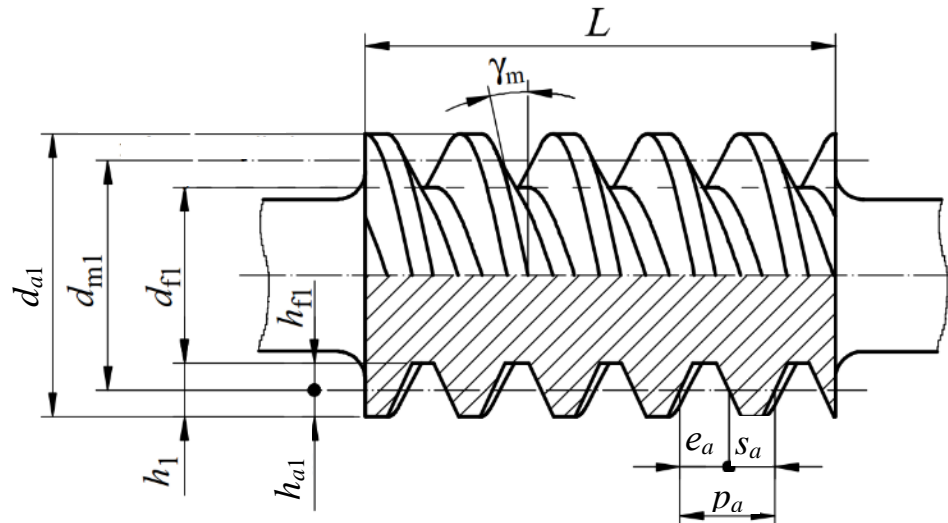
d_{m1} – пречник средње кружнице пужа,

m – аксијални модул.

Повећањем пужног броја q долази до пропорционалног раста референтног пречника пужа и ширине венца пужног зупчаника. Истовремено, вредност угла навоја се смањује, што произилази из релације дефинисане једначином (4.1), према којој је овај

угао у обрнутој зависности од величине пужног броја.

Потпуна дефиниција геометријских параметара навоја пужа заснива се на димензијама приказаним на слици 4.6 и табели 4.1. Ове димензије представљају кључне конструкционе елементе који одређују профил навоја и кинематске карактеристике у пару пуж–пужни зупчаник. Прецизно одређивање ових параметара представља основу за правилно пројектовање, ефикасан пренос момента и поуздан рад пужног преносника [9].



Слика 4.6 Геометријске величине цилиндричног пужа [9]

где су:

d_{m1} – пречник средње кружнице пужа,

d_{f1} – пречник подножне кружнице пужа,

d_{a1} – пречник темене кружнице пужа,

h_{f1} – подножна висина зупца,

h_{a1} – темена висина зупца,

h_1 – висина зупца,

γ_m – угао нагиба завојнице пужа на средњем цилиндру,

e_a – лучна ширина међузубља,

s_a – дебљина зупца,

p_a – аксијални корак,

L – дужина пужа.

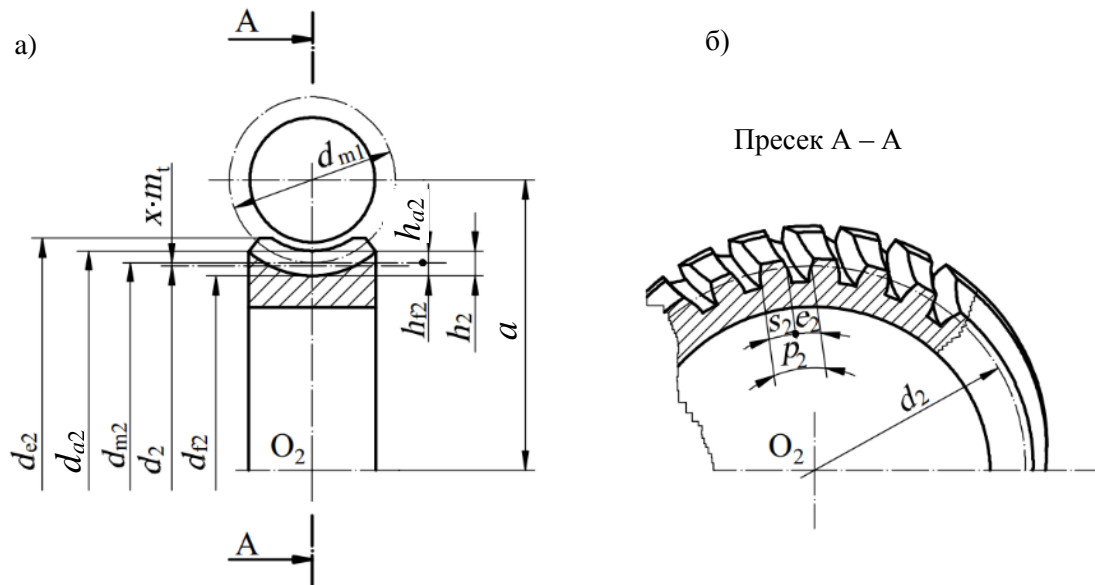
Табела 4.1 Геометријске вредности цилиндричног пужа [9]

Редни број	Назив геометријске величине	Математички израз
1.	Подножна висина зупца	$h_{f1} = m(h_{f1}^* + c_{f1}^*)$
2.	Темена висина зупца	$h_{a1} = h_{a1}^* \cdot m$
3.	Висина зупца	$h_1 = h_{a1} + h_{f1}$
4.	Пречник средње кружнице пужа	$d_{m1} = m \cdot q$
5.	Пречник темене кружнице пужа	$d_{a1} = d_{m1} + 2h_{f1}$
6.	Пречник подножне кружнице пужа	$d_{f1} = d_{m1} - 2h_{f1}$
7.	Дебљина зупца	$s_a = s_a^* \cdot p_a$
8.	Лучна ширина међузубља	$e_a = p_a - s_a$
9.	Дужина пужа	$L \geq 2 \sqrt{\left(\frac{d_{e2}}{2}\right)^2 - \left(a - \frac{d_{a1}}{2}\right)^2}$

Кључне геометријске карактеристике пужног зупчаника идентификоване су на слици 4.7, док табела 4.2 приказује све аналитичке изразе који дефинишу облик његовог профила. За разлику од пужа, који се геометријски може сматрати еквивалентним зупчастој летви, пужни зупчаник, слично свим цилиндричним зупчаницима, омогућава примену профилног помака. Вредност овог помака дефинише се као половина разлике између пречника средње кружнице пужног зупчаника d_{m2} и пречника основне кружнице пужног зупчаника d_2 , чиме се обезбеђује геометријска компатибилност, оптимална расподела оптерећења и стабилан контакт зубаца у систему пуж–пужни зупчаник [9].

$$x \cdot m_t = \frac{d_{m1} - d_2}{2} \quad (4.5)$$

где је x коефицијент померања профила пужног зупчаника.



Слика 4.7 Геометријске величине пужног зупчаника: а) аксијални пресек пужног зупчаника, б) попречни пресек пужног зупчаника [9]

где су:

d_{m2} – пречник средње кружнице пужног зупчаника,

d_{a2} – пречник темене кружнице пужног зупчаника,

d_{f2} – пречник подножне кружнице пужа,

d_2 – пречник подеоне кружнице пужног зупчаника,

d_{e2} – спољашњи пречник пужног зупчаника,

x – коефицијент померања профила,

h_{a2} – темена висина зупца пужног зупчаника,

h_{f2} – подножна висина зупца,

h_2 – висина зупца,

e_2 – ширина међузубља (чеони пресек),

s_2 – дебљина зупца (чеони пресек),

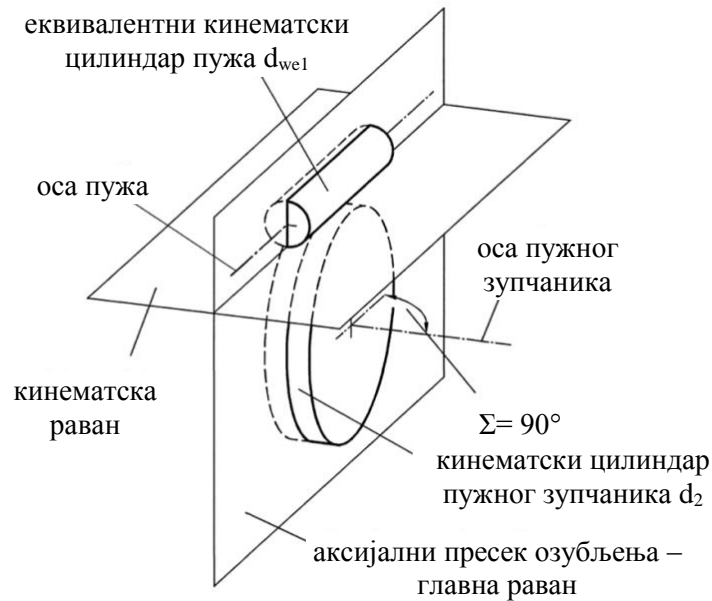
p_2 – подеони корак.

Табела 4.2 Геометријске вредности пужног зупчаника [9]

Редни број	Назив геометријске величине	Математички израз
1.	Чеони модул пужног зупчаника	$m_t = m$
2.	Угао нагиба завојнице на средњем цилиндру	$\beta_m = \gamma_m$
3.	Пречник средње кружнице пужног зупчаника	$d_{m2} = 2a - d_{m1} = d_2 + 2xm_t$
4.	Пречник темене кружнице пужног зупчаника	$d_{a2} = d_{m2} + 2h_{a2}$
5.	Пречник подножне кружнице пужног зупчаника	$d_{f2} = d_{m2} - 2h_{f2}$
6.	Пречник подеоне кружнице пужног зупчаника	$d_2 = m_t \cdot z_2$
7.	Спољашњи пречник пужног зупчаника	$d_{e2} \approx d_{a2} + m_t$
8.	Подножна висина зупца	$h_{f2} = m_t h_{f2}^* + c_{f2}^*$
9.	Темена висина зупца	$h_{a2} = h_{a2}^* \cdot m_t$
10.	Висина зупца	$h_2 = h_{a2} + h_{f2}$
11.	Подеони корак	$p_2 = pm_t$
12.	Лучна ширина међузубља (чеони пресек)	$e_2 = s_x = pm_x/2$
13.	Дебљина зупца (чеони пресек)	$s_2 = p_2 - e_2$

4.3. Динамичке величине пужних преносника снаге

Ротационо кретање пужа око сопствене осе може се, са кинематског становишта, еквивалентно посматрати као транслаторно кретање дуж његове уздужне осе. У анализи кинематских карактеристика пужног пара посебан значај имају главна равна и кинематска равна система (слика 4.8). Главна равна пужног пара дефинише се као равна нормална на осу пужног зупчаника, у којој се налази и уздужна оса самог пужа. Ова равна представља аксијални пресек озубљења и служи као основа за геометријско и кинематско дефинисање међусобног односа елемената преносног механизма [59].



Слика 4.8 Аксијални пресек и кинематска раван пужног пара [55]

Кинематска раван представља заједничку тангентну површину која додирује еквивалентни кинематски цилиндар пужа и кинематски цилиндар пужног зупчаника, при чему она одређује просторну зону у којој се остварује контакт и пренос кретања између ова два елемента пужног механизма.

Најмање могуће растојање између оса пужа и пужног зупчаника дефинише се као осно растојање, означено симболом a (слика 4.9). Ова величина представља један од кључних геометријских параметара пужног пара, јер непосредно утиче на кинематске односе, степен искоришћења преносника снаге и компактност укупне конструкције [60].

Осно растојање пужног пара одређује се као збир полупречника средњих цилиндара пужа, d_{m1} и пужног зупчаника, d_{m2} .

$$a = \frac{d_{m1} + d_{m2}}{2} = m_x \frac{q + z_2 + 2x}{2} \quad (4.6)$$

где су:

d_{m1} – пречник средње кружнице пужа,

d_{m2} – пречник средње кружнице кружног зупчаника,

m – аксијални модул пужа,

q – пужни број,

z_2 – број зубаца пужног зупчаника.

Ова дефиниција представља основни геометријски критеријум за правилно позиционирање елемената преносног механизма, обезбеђујући тачно усклађивање завојница и зубаца ради ефикасног преноса обртног момента и минимизације губитака услед трења.

Осно растојање пужног пара, приказано на слици, може се такође дефинисати као збир пречника контакта пужа, d_{we1} и пречника основне кружнице пужног зупчаника, d_2 .

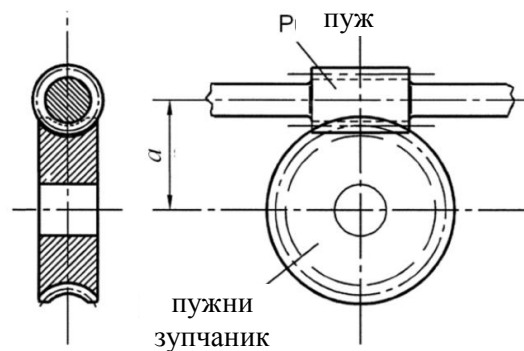
$$a = \frac{d_{we1} + d_2}{2} \quad (4.7)$$

где су:

d_{we1} – пречник контакта пужа,

d_2 – пречник основне кружнице пужног зупчаника.

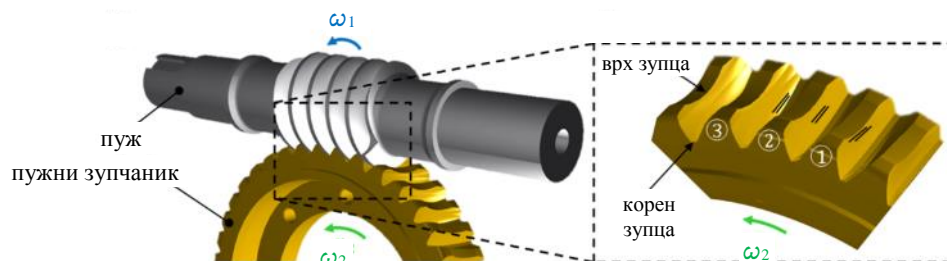
Ова методологија омогућава прецизно геометријско одређивање размештаја елемената у преносном механизму, што је од кључног значаја за оптимизацију контакта завојница и зубаца, ефикасан пренос обртног момента и смањење кинематских губитака [60].



Слика 4.9 Осно растојање елемената пужног пара [60]

Преносни однос пужног преносника снаге i дефинише се као однос угаоних брзина гоњеног и погонског елемента (ω_1 и ω_2), како је приказано на слици 4.10. Сходно томе, преносни однос u карактерише се као однос између броја зубаца пужног зупчаника z_2 и броја зубаца (завојница) пужа z_1 . У стандардним конструкционим решењима пуж се користи као погонски елемент, што резултира тиме да преносни однос потпуно одговара зупчастом односу [53, 56].

$$u = i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{z_1}{z_2} \quad (4.8)$$



Слика 4.10 Приказ елемената пужног преносника снаге [60]

Сила која делује у зони контакта пужа и пужног зупчаника делује на референтни пречник пужа и корачни пречник пужног зупчаника. У случају када су осе пужа и пужног зупчаника постављене под правим углом, обимна сила на пужном зупчанику F_{t2} једнака је аксијалној сили на пужу F_{a1} .

$$F_{t2} = \frac{2T_2}{d_{m2}} \approx F_{a1} \quad (4.9)$$

где је T_2 обртни момент пужног зупчаника.

Из слике 4.11 је очигледно да је аксијална сила на пужном зупчанику F_{a2} реакција обимне силе на пужу F_{t1} , док је аксијална сила на пужу F_{a1} реакција аксијалне силе на пужном зупчанику F_{t2} .

$$F_{a2} \approx F_{t1} \quad F_{a1} \approx F_{t2} \quad (4.10)$$

Очигледно је и да су радијалне силе F_{r1} и F_{r2} међусобне реакције и да су једнаке по величини. За одређивање њихове вредности, потребно је констатовати да у тачки С (слика 4.11) нормално на навој пужа и бокове пужног зупчаника, делују нормалне силе F_{bn1} (на пужу) и F_{bn2} (на пужном зупчанику), које су међусобне реакције. Ове нормалне силе изазивају силе трења $\mu \cdot F_{bn1}$ и $\mu \cdot F_{bn2}$ у правцу угла нагиба завојнице пужа на средњем цилиндру γ_m (слика 4.11, пресек С–С). Резултанте ових нормалних сила и сила трења R_1 и R_1 нагнуте су у односу на нормалне силе под углом трења ρ .

Сада није тешко извести изразе за вредности сила F_{bn1} и F_{bn2} , које су нормалне на бокове пужа и пужног зупчаника.

$$F_{bn2} = F_{bn1} = F_{t2} \frac{\cos \rho}{\cos \alpha_n \cos(\gamma_m + \rho)} = \frac{F_{r2}}{\sin \alpha_n} \quad (4.11)$$

$$F_{r1} = F_{r2} = F_{t2} \frac{\operatorname{tg} \alpha_n \cos \rho}{\cos(\gamma_m + \rho)} = F_{t1} \frac{\operatorname{tg} \alpha_n \cos \rho}{\sin(\gamma_m + \rho)} \quad (4.12)$$

где су:

F_{bn1} – нормална сила на пужу,

F_{bn2} – нормална сила на пужном зупчанику,

F_{r1} – радијална сила на пужу,

F_{r2} – радијална сила на пужном зупчанику,

F_{t1} – обимна сила на пужу,

F_{t2} – обимна сила на пужном зупчанику,

F_{a1} – аксијална сила на пужу,

F_{a2} – аксијална сила на пужном зупчанику,

ρ – угао трења,

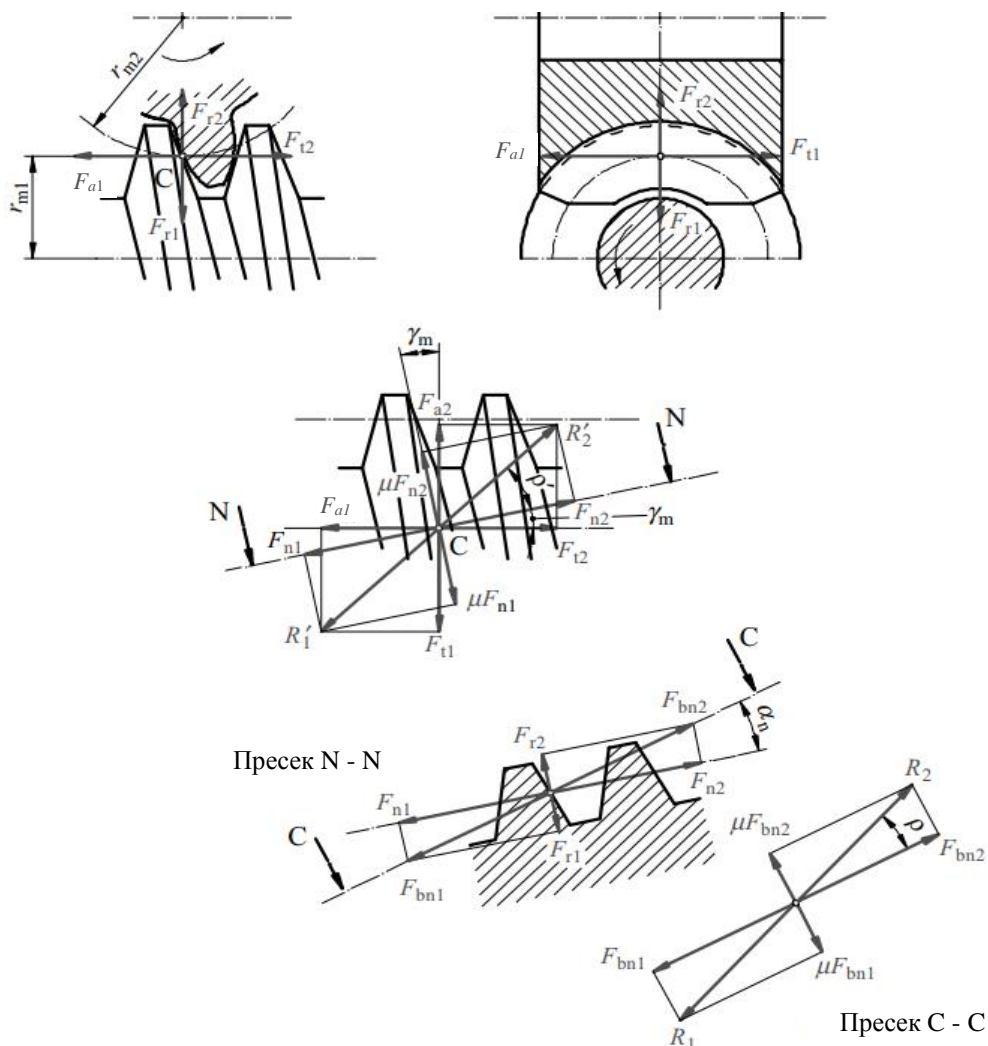
μ – коефицијент трења,

α_n – угао нагиба основног профила,

γ_m – угао нагиба завојнице пужа на средњем цилиндру.

Када је пуж погонски елемент, његова обимна сила F_{t1} усмерена је супротно од његове обимне брзине, слично као код других преносника снаге и једнака је аксијалној сили на пужном зупчанику F_{a2} , која је усмерена супротно. Обимна сила на пужном зупчанику F_{t2} делује у смеру његове обимне брзине и једнака је аксијалној сили на пужу

F_{a1} усмереној супротно.



Слика 4.11 Силе које делују на бокове пужа и пужног зупчаника [9]

4.4. Радне карактеристике пужних преносника снаге

Основне радне карактеристике пужних преносника снаге су степен искоришћења, хабање, бука, вибрације, температура. Оптимално пројектовани пужни преносници омогућавају висок степен искоришћења уз минимизацију хабања и акустичких или вибрационих негативних ефеката. Контрола и анализа ових параметара представљају веома битне аспекте за продужавање радног века, побољшање поузданости и очување триболошке стабилности пужних механизма.

4.4.1 Степен искоришћења пужних преносника снаге

За пужни преносник снаге у коме пуж представља погонски елемент, снага на вратилу пужног зупчаника P_2 (излазна снага) увек је мања од снаге на пужном вратилу P_1 (улазна снага) за износ укупних губитака снаге P_G . Ови губици укључују губитке у зони контакта зубаца P_Z , губитке услед празног хода P_0 , губитке у лежајевима P_L и губитке настале услед трења у системима заптивања P_{ZP} [9, 54].

$$P_2 = P_1 - P_G \tag{4.13}$$

$$P_G = P_Z + P_0 + P_L + P_{ZP} \quad (4.14)$$

Степен искоришћења се увек дефинише као однос излазне и улазне снаге [9, 61].

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_G}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_G} \quad (4.15)$$

Ако је пужни зупчаник погонски елемент, степен искоришћења се дефинише следећом једначином [9, 62].

$$\eta' = \frac{P_1}{P_2} = \frac{P_2 - P_G}{P_2} = \frac{P_1}{P_2 + P_G} \quad (4.16)$$

Степен искоришћења пужних преносника снаге, у поређењу са осталим врстама зупчастих преносника, има ниже вредности, што је последица специфичне геометрије захвата и природе трења у контакту радних површина. Са смањењем међусобног растојања оса преносних елемената и порастом преносног односа, долази до израженијег смањења укупног степена искоришћења. Процена губитака снаге, који представљају кључни параметар у одређивању степена искоришћења пужног преносника, врши се у складу са стандардом DIN 3996. Губици снаге у спреси зупчаника P_P дефинише се на основу степена искоришћења пужног преносника, при чему се узимају у обзир појединачне вредности степена искоришћења, η_z за погонски пуж и η'_z за пужни зупчаник [9, 63].

$$\eta_z = \frac{P_1 - P_P}{P_1} = 1 - \frac{P_P}{P_1} \Rightarrow P_P = P_1(1 - \eta_z) \quad (4.17)$$

4.4.2 Хабање пужних преносника снаге

Хабање у пужним преносницима снаге представља процес прогресивног губитка материјала, између контактних површина пужа и пужног зупчаника. Интензитет овог процеса се повећава под дејством високих контактних напона, ниских радних брзина, и повећаних температура радних површина [64]. С обзиром на честу присутност ових услова у пужним преносницима, хабање може прећи критичну границу, што се огледа у виду губитка масе зупчаника, оштећењу врхова зубаца, редукацији дебљине зубаца у корену и повећању зазора између пужа и пужног зупчаника, што директно утиче на функционалну поузданост и радни век преносника снаге [65, 66].

Запремина похабаног материјала у условима клизања без и са граничним подмазивањем зоне контакта елемената пужног преносника V израчунава се Холм Арчардовом (*Holm Archard*) једначином [65].

$$V = k_{ad} \frac{F \cdot s}{3\sigma_t} \quad (4.18)$$

где су:

V – запремина похабаног материјала,

k_{ad} – коефицијент адхезионог хабања и

σ_t – напон на граници течења.

Увидом у једначину 4.18, може се констатовати да се све величине могу директно измерити, осим коефицијента хабања. С обзиром на његову специфичност, коефицијент хабања се одређује експериментално за различите комбинације материјала и радне услове. Изведени закључак указује на то да је запремина похабаног материјала директно условљена дужином пута клизања и интензитетом оптерећења, док се смањује са порастом напона течења мекшег материјала у контакту.

Однос величине хабања и пута клизања или извршеног рада означава се као интензитет хабања. Интензитет хабања се може изразити јединицама за мерење дужине, површине, запремине и масе, те сходно томе постоји линијски интензитет хабања, површински интензитет хабања, запремински интензитет хабања, масени или гравиметријски интензитет хабања и енергетски интензитет хабања. Следећим једначина су приказани запремински I_v и масени I_m интензитет хабања [65].

$$I_v = \frac{\Delta V}{s} \quad (4.19)$$

$$I_m = \frac{\Delta m}{s} \quad (4.20)$$

где су:

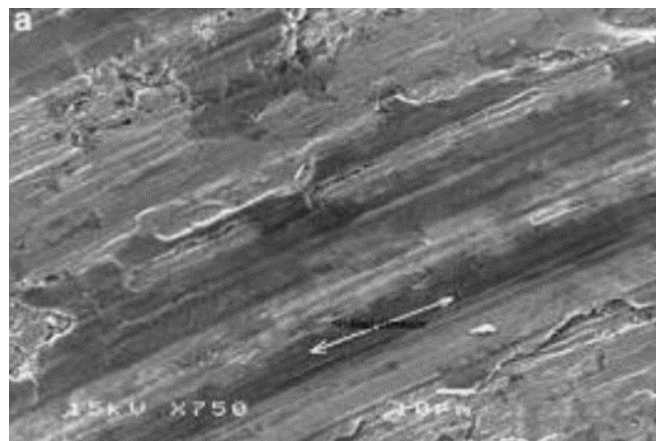
ΔV – промена запремине,

Δm – промена масе,

s – пређени пут.

Код пужних преносника снаге су доминантни адхезионо и абразивно хабање. Хабање услед површинског замора је умерено заступљено, док су у мањој мери заступљени хабање као последица корозије и хабање као последица оксидације. Фретинг хабање и ерозивно хабање се ретко и занемарљиво јављају код пужних преносника снаге, док кавитационо хабање практично не постоји [65].

Адхезионо хабање се јавља на контактним површинама (слика 4.12), као што су бокови зубаца пужа и пужног зупчаника, где је интензивно трење клизања.



Слика 4.12 Адхезионо хабање снимљено електронским микроскопом [5]

До појаве адхезионог хабања долази у ситуацијама када уљни филм нема довољну

дебљину и носивост, да у потпуности раздвоји контактне површине, односно када су услови подмазивања у домену граничног или мешовитог подмазивања. У таквим условима успоставља се директан метални контакт између микронеравина, што доводи до формирања адхезионих спојева, њиховог накнадног кидања и прогресивног уклањања материјала са контактних површина. Последица овог процеса је појава задирања, локалног загревања и убрзаног оштећења зубаца. Код зупчаника постоје три вида адхезионог хабања: углачавње (енгл. *polishing*), изједање (енгл. *mild scuffing*) и рибање (енгл. *severe scuffing*).

Због наведених разлога, код пужних преносника снаге, при пројектовању пужа и пужног зупчаника, примењује се принцип комбиновања материјала различитих отпорности на хабање. Овај приступ има за циљ да се умањи интензитет адхезионих процеса у зони контакта и да се смањи склоност ка задирању и убрзаном оштећењу металних површина. Применом материјала различитих механичких својстава и различите отпорности на хабање обезбеђују се повољнији услови клизања, при чему се елемент са већом тврдоћом и носивошћу, односно пуж, израђује од челика, док се пужни зупчаник израђује од легура мање тврдоће, као што су калајне или алуминијумске бронзе. Оваква комбинација материјала доприноси стабилнијем формирању слоја мазива, смањењу коефицијента трења и усмеравању хабања на компоненту која је конструкционо и технолошки погоднија за замену.

Гребање (енгл. *scoring*) представља динамичан и високоинтензиван облик адхезивног хабања који се карактерише наглим уклањањем материјала са активних контактних површина зубаца услед прекида слоја мазива и директног контакта две металне површине. Морфолошки, овај процес се испољава у виду линеарних оштећења, пруга, бразда и одвајања материјала, оријентисаних у смеру релативног кретања. У иницијалној фази гребање се манифестује као ситне и површинске огреботине, које прелазе у дубље трагове и површинска оштећења већег интензитета (слика 4.13). Оштећење може бити локално или захватити целокупну зону контакта зубаца у спреси. Уколико се у раној фази експлоатације спроведе адекватна интервенција, попут смањења оптерећења или смањења храпавости површина, процес се може стабилизovati. У супротном, гребање постаје прогресиван, настаје убрзана деградација и коначно, отказ пужног преносника.



Слика 4.13 Приказ гребања на контактним површинама [60]

Абразија представља веома изражену врсту хабања пужних преносника снаге, при чему се процењује да је више од 50 % укупних оштећења услед хабања изазвано абразијом. До абразивног хабања долази када тврђи материјал клизи преко мекшег, услед чега настаје браздање и резање површинског слоја мекшег материјала [65].

У случају пужних преносника снаге, абразивно хабање се јавља у два основна облика.

Први облик подразумева абразију (слика 4.14) насталу услед клизања тврђе површине пужа по релативно мекшој површини пужног зупчаника. Други облик абразије последица је присуства ситних тврдих честица у контакту, које делују као треће тело у зони контакта. Ове честице могу потицати од продуката хабања или од различитих примеса присутних у мазиву, при чему додатно убрзавају деградацију контактних површина.

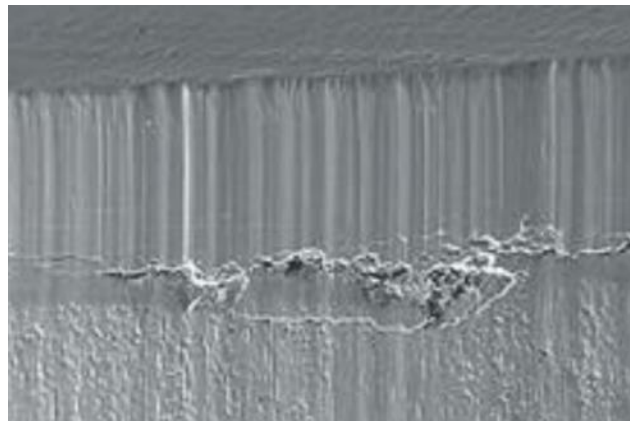
Запремина похабаног материјала услед абразивног хабања је представљена следећом једначином.

$$V = k_{ab} \frac{F \cdot s}{H} \quad (4.21)$$

где су:

k_{ab} – коефицијент абразивног хабања и

H – тврдоћа мекшег материјала (пужног зупчаника).



Слика 4.14 Абразивно хабање снимљено електронским микроскопом [60]

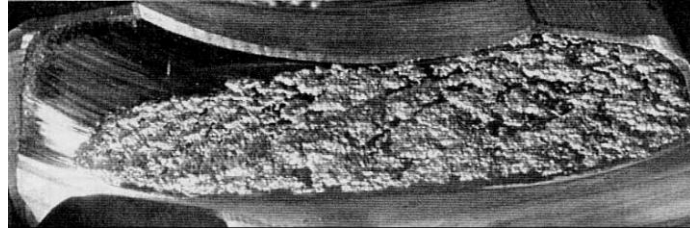
Површински замор материјала представља врсту хабања која настаје услед деловања променљивих и цикличних оптерећења, чија вредност и учестаност превазилазе границе издржљивости материјала. Ова врста хабања повезана је са појавом поновљених напрезања у површинском слоју материјала, који је изложен клизању и/или котрљању у условима директног или индиректног контакта [66].

Код пужних преносника снаге, иако доминира клизање у зони контакта пужа и пужног зупчаника, присутна су и локална циклична напрезања настала услед преноса оптерећења дуж контактне линије. Под утицајем таквих напрезања долази до иницирања микропукотина у површинском слоју материјала, које се са повећањем броја радних циклуса постепено шире, што резултује појавом љуштења (pitting) и одвајањем честица материјала са контактних површина.

Оштећења услед површинског замора посебно су изражена код елемената који раде у условима доброг подмазивања и високих контактних притисака, при чему мазиви слој смањује адхезивно и абразивно хабање, али не елиминише утицај цикличних напрезања. У пужним преносницима снаге, дуготрајно излагање променљивим оптерећењима при великим угаоним брзинама улазног вратила може, након одређеног броја радних циклуса, довести до заморног оштећења и прогресивног одвајања материјала са површине пужног зупчаника, који је најчешће израђен од мекшег материјала.

Док је класично хабање последица трења и клизања, питинг представља специфичну врсту хабања, где долази до оштећења површина услед замора материјала (слика 4.15) који

се манифестује појавом ситних удубљења или јамица на контактним површинама зупца, насталих услед понављаних цикличних контактних напрезања. Сам термин питинг потиче од енглеске речи *pit* (јамица) и стандардно се користи у међународној литератури [5].



Слика 4.15 Приказ питинга на површини пужа [60]

Са становишта механизма настанка, динамике развоја, морфологије оштећења и утицаја на век трајања и оперативну поузданост пужних преносника, питинг се класификује на иницијални и прогресивни. Иницијални питинг настаје у почетној фази рада, односно током периода уходавања преносника и типичан је за зупчанике израђене од материјала ниже тврдоће или оне који нису подвргнути термичкој обради, на пример пужне зупчанике израђене од бронзе. Карактерише га појава ограниченог броја микројамица на контактної површини или у њеној непосредној подповршинској зони. Узрок ове појаве је локална концентрација контактних напона на врховима микронеравнина, што доводи до прогресивног издвајања ситних честица материјала.

Како процес уходавања напредује, врхови неправилности се постепено уклањају, контактна површина се повећава, а оптерећење се распоређује равномерније, чиме се зауставља настанак нових јамица. Потпуно елиминисање иницијалног питинга у пракси није могуће, али се његова учестаност и интензитет могу значајно редуковати оптимизацијом геометрије спрезања и високом прецизношћу израде зубаца зупчаника. Контрола ове појаве врши се кроз коефицијент сигурности против разарања бокова зубаца зупчаника, где се коефицијент сигурности S_H дефинише као однос граничног дозвољеног контактног напона σ_{Hlim} и средње вредности контактног напона σ_{Hm} . За одржавање поузданости и дуготрајности пужног преносника, овај коефицијент мора бити једнак или већи од минимално захтеване вредности S_{Hmin} , чиме се спречава превремено формирање пукотина и деградација контактних површина [9].

$$S_H = \frac{\sigma_{Hlim}}{\sigma_{Hm}} \geq S_{Hmin} \quad (4.22)$$

где су:

S_H – коефицијент сигурности против разарања бокова зубаца зупчаника,

S_{Hmin} – минимална вредност коефицијента сигурности против разарања бокова зубаца зупчаника,

σ_{Hlim} – гранични дозвољени контактни напон,

σ_{Hm} – средња вредност контактног напрезања.

За пужне преноснике снаге, минимално прихватљив коефицијент сигурности против разарања бокова зубаца зупчаника S_{Hmin} се конвенционално усваја као 1,0 [9], при чему ова вредност произлази из практичног искуства и експлоатационих података. Ова вредност коефицијента сигурности обезбеђује довољан ниво сигурности у циљу спречавања

формирања микропукотина и удубљења на контактним површинама зубаца.

Деградиција или прекидање слоја мазива на контактним површинама пужних преносника снаге доводи до непосредног контакта две металне површине, што резултира појавом више типова хабања. Најрепрезентативнији и истовремено најкритичнији међу њима је процес познат под називом гребање (енгл. *scoring*), који подразумева интензивно адхезивно оштећење услед термомеханичке интеракције контактних површина. У стручној литератури англосаксонског подручја ова појава се означава и појмовима енгл. *cold welding*, *seizing* или *galling*, који у суштини описују исту физичку појаву — локално заваривање микронеравнина и накнадно одвајање материјала са активних површина зубаца.

Мерење хабања методом анализе промена масе представља стандардни поступак за праћење хабања мањих компоненти. Основни принцип ове методе лежи у поређењу масе елемената пре и након дефинисаног периода експлоатације. Пре сваког мерења, елементи се морају пажљиво очистити, испрати и осушити како би се елиминисали сви производи хабања који могу утицати на резултате. Овај приступ је суштински интегралног типа, јер омогућава квантитативну оцену укупног хабања елемената, пружајући објективне податке о деградицији материјала током рада [5].

Интензитет хабања представља меру количине материјала уклоњеног са јединице номиналне контактне површине током одређеног пута трења и најчешће се изражава као масени губитак по јединици површине. У случајевима када је потребно дефинисати линеарни интензитет хабања, неопходно је увести претпоставку о равномерном хабању у односу на површину трења или идентификовати друге законитости расподеле хабања које произилазе из конкретних радних услова.

Конверзија масеног губитка насталог хабањем у линеарни облик приказа врши се применом одговарајућег математичког односа који повезује масу уклоњеног материјала са геометријским и физичким параметрима контактне површине. Ова трансформација омогућава прецизнију интерпретацију резултата испитивања хабања у контексту реалних радних услова, јер линеарни параметри, у поређењу са масеним, пружају директнији увид у дубину и распрострањеност локалне деградиције површине пужног преносника, при чему је могуће применити следећу формулу [3, 5]:

$$I_h = \frac{Q}{A \cdot \gamma \cdot L} \quad (4.23)$$

где су:

I_h – интензитет хабања,

Q – маса похабаног материјала,

A – површина која се хаба,

γ – специфична тежина материјала и

L – пређени пут.

У појединим случајевима, мерење промене масе елемента представља довољно поуздану основу за потпуно карактерисање процеса хабања. Овај приступ омогућава директну и једноставну процену степена материјалне деградиције. На тај начин, мерење масе може послужити као свеобухватан индикатор интензитета и динамике хабања, без потребе за сложенијим геометријским или микроструктурним анализама.

4.4.3 Бука код пужних преносника снаге

Проучавање буке код пужних преносника снаге има изузетан значај у контексту

повећања њиховог степена искоришћења, поузданости и радног века, јер повишен ниво емисије буке представља индикатор динамичких неравнотежа, хабања и недостатака у процесу подмазивања. Бука која настаје током рада резултат је сложене интеракције више фактора, међу којима доминантну улогу имају геометријска тачност профила пужа и пужног зупчаника, квалитет налегања зубаца пужа и пужног зупчаника, микрогеометрија контактних површина, као и својства примењеног мазива [69]. Посебно је значајан утицај вискозности и триболошких карактеристика мазива, јер оне одређују дебљину хидродинамичког филма и стабилност подмазивања, што директно утиче на ниво генерисане буке. Поред тога, фактори као што су угаона брзина, оптерећење и температура рада могу довести до промена у фреквенцијском спектру вибрација и тиме условити повећање нивоа буке [70].

Глобална тенденција ка смањењу нивоа индустријске буке резултирала је увођењем строгих регулаторних оквира и стандарда који дефинишу дозвољене акустичке параметре у радном окружењу. Процена интензитета буке, како свих машинских система у ширем смислу, тако и пужних преносника снаге, заснива се на примени N-кривих, које представљају функционалну зависност нивоа звучног притиска (у децибелима) од фреквенцијског опсега. У складу са захтевима стандарда ISO 10816/20816 могуће је сагледати спектралну расподелу фреквенција и идентификовати потенцијалне изворе вибрација, као што су неправилности у геометрији зубаца, неуједначеност оптерећења или недовољна хидродинамичка стабилност мазива пужног преносника снаге. Посебна пажња посвећује се условима мерења — висини микрофона (слика 4.16), растојању од кућишта преносника, као и режиму рада (празан ход, различити нивои оптерећења) — како би се обезбедила репрезентативност резултата. На тај начин, акустичка анализа постаје, не само средство процене ергономије и безбедности у раду, већ и дијагностички инструмент за откривање структурних и триболошких недостатака пужних преносника снаге [29, 30].



Слика 4.16 Приказ уређаја за мерење буке на испитном столу [32]

4.4.4 Вибрације пужних преносника снаге

Испитивање вибрација пужних преносника снаге има важну улогу у процени њихове динамичке стабилности, конструкционе прецизности и трајности појединих елемената, јер вибрације директно одражавају механичке неравнотеже, неуједначено оптерећење и потенцијалне триболошке недостатке у контакту пуж–пужни зупчаник. Потреба за овим испитивањима произилази из захтева за повећањем степена искоришћења, продужетком животног века преносника и смањењем акустичког и вибрационог утицаја на радно окружење. Ова испитивања су уско повезана са испитивањима буке [33]. Методе испитивања укључују мерења у реалним радним условима, при чему се користе

акцелерометри и виброметри постављени на кључне тачке кућишта и осовинских лежајева, а подаци се обрађују у временском и фреквенцијском домену, како би се идентификовали доминантни спектрални састави и резонантне фреквенције. При анализи се обично разматрају фактори као што су угаона брзина, оптерећење, температура рада и триболошке особине подмазивања, јер они значајно утичу на интензитет и карактер вибрација. Таква систематска процена омогућава дијагностиковање конструкционих и експлоатационих недостатака, унапређење конструкције преносника и обезбеђење њихове усаглашености са нормативним захтевима у погледу сигурности, поузданости и радне ергономије [31, 70].

Вибрације, као показатељи механичких и конструкционих својстава, омогућавају идентификацију неисправности, процену експлоатационог стања и оптимизацију рада преносника. У пужним преносницима снаге, осцилације настају услед: нелинеарног контакта пужа и пужног зупчаника, неуравнотежености ротационих компоненти и променљивих оптерећења и услова трења [28, 29, 33].

Вибрације се могу мерити у различитим правцима [70]:

- Аксијално – дуж осе пужа.
- Радијално – нормално на осу пужа.
- Тангенцијално – дуж обима пужног зупчаника.

Циљ мерења је одређивање амплитуда, фреквенцијских компоненти и модалних облика вибрација, што омогућава идентификацију извора неисправности и предвиђање потенцијалних проблема у експлоатацији.

Методe мерења вибрација пужних преносника могу се поделити на две основне категорије: контактне методе и бесконтактне методе [28, 70].

Контактне методе подразумевају директно достављање сензора на површину пужног преносника. Оне пружају висок ниво прецизности, али захтевају пажљиву монтажу да би се избегли паразитни сигнали. Основни уређаји за мерење су [28]:

- Пиезоелектрични акцелерометри. Мере динамичко убрзање у широком фреквенцијском опсегу (нпр. 0,5 Hz – 20 kHz).
- Сензори вибрација. Региструју вибрације у реалном времену и могу се интегрисати у сложеније мерне системе.
- Струјни трансформатори вибрација. Применљиви за анализу осцилација у специфичним компонентама преносника.

Бесконтактне методе омогућавају мерење вибрација без директног контакта са компонентом, чиме се избегава додатно оптерећење и потенцијално изобличење сигнала. Основни уређаји за мерење су:

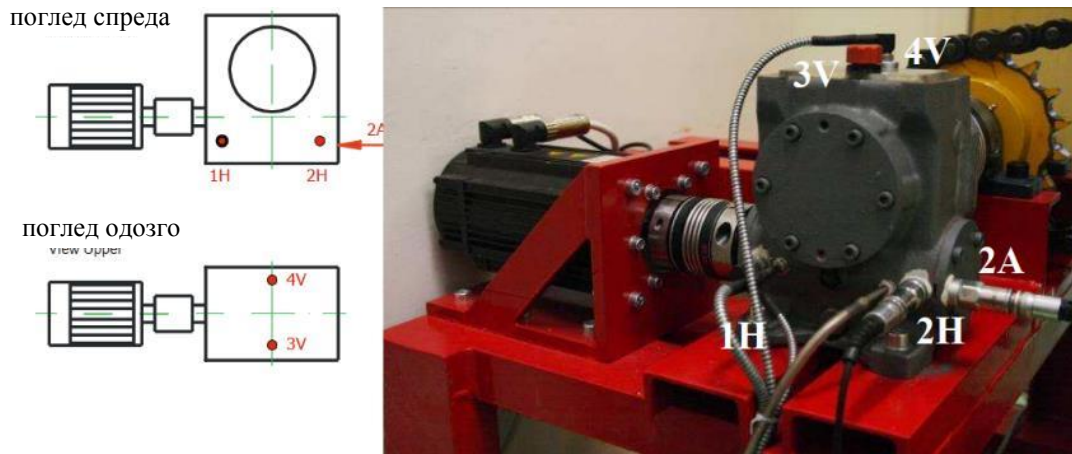
- Ласерски доплерски виброметар. Мери брзину и померање вибрирајућих елемената са високом прецизношћу.
- Оптички и видео анализатори. Омогућавају визуализацију модалних облика вибрација и идентификацију резонантних фреквенција.

Стандардни поступци мерења вибрација обухватају:

- Калибрацију сензора. Виброметри се калибришу у складу са ISO 16063 стандардом за мерење вибрација.
- Избор тачака мерења. Најчешће се мере вибрације на: улазном и излазном лежишту, средњем делу пужа и кућишту преносника.
- Избор режима рада, што подразумева констатне вредности или промене брзине, оптерећења или покретања и заустављања пужног преносника.

- Обрада података, која се може спровести кроз Фуријеову анализу за спектралне компоненте, примена RMS методе којом се одређује снага измерених вибрација и анализу модалних облика и идентификацију извора вибрација.

Очитавање вредности вибрација у великој мери зависи од начина и места постављања сензора уређаја за мерење вибрација (слика 4.17).



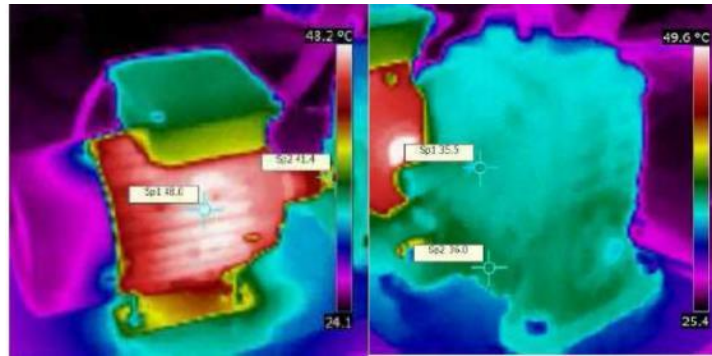
Слика 4.17 Положаји сензора (сонди) уређаја за мерење вибрација [70]

4.4.5 Промена температуре пужних преносника снаге

У пужним преносницима, губици снаге се трансформишу у топлоту, што резултира порастом радне температуре, деградацијом физичко-хемијских својстава мазива и смањењем његове ефикасности у подмазивању контактних површина. Ови ефекти директно утичу на смањење предвиђеног радног века преносника. Због тога је одржавање температуре, у оквиру дозвољених граница, критично за поуздан рад система. Процена температурног коефицијента сигурности зависи од метода примене мазива, при чему се разликују услови подмазивања распршивањем и подмазивања бућкањем, јер сваки метод одређује различите термичке и триболошке карактеристике контакта радних површина [20].

Испитивање температурних промена код пужних преносника снаге представља суштински аспект у анализи њихових термичких и експлоатационих карактеристика, будући да температура значајно утиче на ефикасност преноса, стабилност подмазивања и трајност елемената у контакту. С обзиром на то да у зони спрезања пужа и пужног зупчаника долази до знатног пораста температуре, континуирано праћење температурних параметара омогућава рано откривање појава као што су прегревање, термичка деформација и деградација мазива. Потреба за оваквим мерењима произилази из захтева за унапређењем поузданости, оптимизацијом подмазивања и смањењем енергетских губитака током рада [23].

Методe испитивања температурних промена обухватају употребу контактних и бескотактних система мерења. У прву групу спадају: термопарови, платинасти отпорни термометри и термоелектрични сензори, који се постављају на кључне позиције као што су лежајеви, кућиште и зона контакта пуж–пужни зупчаник. Бескотактне методе обухватају примену инфрацрвених пирометара, инфрацрвених термовизијских камера и оптичких влакана са термосензитивним врхом, што омогућава визуализацију термичких поља и идентификацију локалних „врућих тачака“ (слика 4.18). У циљу постизања високе прецизности, мерења се спровode у реалним радним условима, како при празном ходу тако и при различитим оптерећењима, уз континуирано бележење података и њихову обраду у специјализованом софтверу за анализу термалних података.



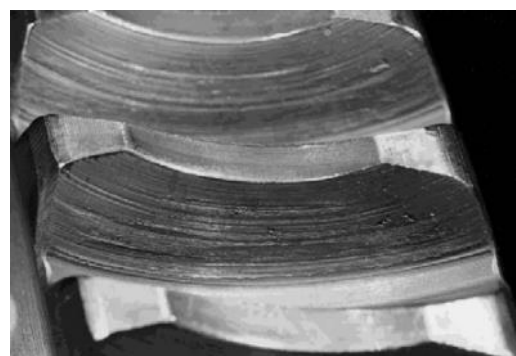
Слика 4.18 Термографички приказ пужног преносника снаге на испитном столу [72]

Анализа резултата обухвата статистичку обраду измерених вредности, спектралну анализу температурних осцилација и мапирање топлотних токова у систему, чиме се одређује степен пораста температуре, стабилност режима подмазивања и идентификују критичне зоне прегревања. Комбиновањем више метода — термовизијске анализе, сензорске термометрије и симулација преноса топлоте у CAD/CAE окружењима — добијају се свеобухватни подаци који омогућавају прецизну дијагностику и оптимизацију пужних преносника снаге.

Током процеса спрезања између бочних површина зубаца пужа и пужног зупчаника долази до израженог релативног клизања, услед чега се значајан део механичке енергије трансформише у топлотну. Ослобођена топлота се потом, преко конструкције кућишта, преноси на околину, чиме се успоставља термички баланс система. За правилан и поуздан рад пужног преносника од кључног је значаја постизање термичке стабилности, односно стања у којем је количина топлоте која се предаје околини једнака енергији генерисаној трењем током рада. Уколико ова равнотежа није обезбеђена, долази до континуираног пораста радне температуре, што доводи до нарушавања стабилности подмазивања, деградације експлоатационих услова, па и оштећења делова пужног преносника (слика 4.19). Повећана температура узрокује промену вискозности и смањење мазивих својстава уља, што последично може довести до интензивног хабања, оштећења зубаца и деградације заптивача. Систематским мерењем радне температуре утврђује се степен термичког оптерећења и процењује способност преносника снаге да одржи стабилан и безбедан термодинамички режим током дуготрајне експлоатације [60].



а) оштећења на боку зупца пужа



б) оштећења на боку зупца пужног зупчаника

Слика 4.19 Оштећење на боковима пужа и пужног зупчаника [60]

Степен сигурности пужног преносника у односу на термичко оптерећење дефинише се на основу његове способности да одржи стабилан топлотни режим током рада, односно да обезбеди да температура у зони спрезања пужа и пужног зупчаника остане унутар дозвољених граница [60].

$$S_T = \frac{\vartheta_{slim}}{\vartheta_s} \geq S_{Tmin} = 1,1 \quad (4.24)$$

где су:

ϑ_{slim} – критична температура уља и

ϑ_s – радна температура уља.

Овај параметар представља меру термичке поузданости система и заснива се на односу између стварно остварене и граничне дозвољене температуре елемената преносника. Виши степен сигурности указује на бољу термичку стабилност и ефикасније одвођење топлоте, док нижи степен упозорава на потенцијалну опасност од прегревања, деградације мазива и повећаног хабања контактних површина. Одређивање овог параметра врши се применом термичке анализе у реалним радним условима, уз мерење температуре у зонама највећег оптерећења — на пужу, пужном зупчанику, лежајевима и кућишту. Резултати мерења служе за верификацију термичког модела и израчунавање коефицијента сигурности у односу на загревање, што омогућава процену експлоатационе поузданости и оптимизацију конструкције пужног преносника.

Према стандарду DIN 3996 [71], радна температура мазива ϑ_s се одређује аналитичким поступком који заснива прорачун вредности на равнотежи између генерисане топлоте услед трења у спреси пужа и пужног зупчаника и топлоте која се преноси и одаје преко кућишта у околину, чиме се дефинише стабилан термички режим рада пужног преносника [60].

$$\vartheta_s = \vartheta_0 + \frac{1}{k_G \cdot A_G} \cdot P_G \quad (4.25)$$

где су:

ϑ_0 – температура околине,

k_G – коефицијент прелаза топлоте,

A_G – меродавна површина кућишта преносника и

P_G – губици снаге преносника.

Коефицијент прелаза топлоте k_G представља параметар који у значајној мери одређује термичко понашање пужних преносника снаге, а његова вредност зависи од више међусобно повезаних фактора — конструкционе конфигурације преносника снаге, режима рада, услова струјања ваздуха око кућишта и угаоне брзине пужног вратила. Зависност овог коефицијента од осног растојања има изразито нелинеаран карактер, односно код преносника мањих димензија (осно растојање у опсегу од 50 mm до 65 mm) регистроване су веће вредности коефицијента прелаза топлоте услед интензивнијег одавања температуре. Са повећањем осног растојања долази до постепеног смањења вредности k_G , али се при већим растојањима и при већим бројевима обртаја преносника снаге (преко 1000 min⁻¹) поново уочава његов пораст, што се може приписати убрзаном струјању ваздуха и појачаном преносу топлоте конвекцијом. Поред тога, неопходно је разграничити понашање преносника са и без допунског система хлађења вентилатором, јер преносници опремљени вентилатором показују и до 30 % већи коефицијент прелаза топлоте у поређењу са онима који се хладе природном конвекцијом. Разлика између ова два типа система постаје све

израженија са порастом осног растојања и броја обртаја вратила пужа, што указује на снажан утицај комбинације геометријских и кинематских параметара на укупну термичку ефикасност пужних преносника снаге.

Препоручљиво је да се вредности критичне температуре мазива одреде на основу података наведених у техничкој документацији или каталогу произвођача, јер су ти параметри експериментално верификовани и прилагођени специфичним карактеристикама изабраног уља. Уколико такви подаци нису доступни, дозвољено је приближно одређивање критичне температуре применом емпиријских односа заснованих на познатим физичко-хемијским својствима мазива и условима експлоатације пужног преносника снаге и може се приближно узети [60]:

- за минерална уља $\vartheta_{Slim} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$,
- за полиалфаолефин $\vartheta_{Slim} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$,
- за полигликол $\vartheta_{Slim} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ до $120 \text{ }^\circ\text{C}$.

Током процеса спрезања, услед дејства трења, долази до загревања спрегнутих зубаца пужног пара. Као последица тога, температура пужног пара је виша у односу на температуру уља у кућишту и то за разлику $\Delta\vartheta_M$. Другим речима, важи следећи однос [23].

$$\vartheta_M = \vartheta_S + \Delta\vartheta_M \quad (4.26)$$

Повећање температуре зубаца у спреси, означено као $\Delta\vartheta_M$, условљено је губицима снаге који настају унутар пужног пара, означеним са P_Z . У складу са одредбама стандарда DIN 3996 [71], наведена температурна разлика се одређује према следећем изразу:

$$\Delta\vartheta_M = \frac{P_Z}{\alpha_L \cdot A_R} \quad (4.27)$$

где су:

P_Z – губици снаге у пужном пару,

α_L – коефицијент топлотне проводљивости и

A_R – површина пужног пара.

Вредности губитака снаге у пужном пару P_Z одређене су експерименталним путем као функција оптерећења. Прецизније, ови губици се могу израчунати као разлика између укупних губитака снаге у пужном преноснику и губитака који се јављају у лежајевима и заптивкама P_{LZP} , према изразу:

$$P_Z = P_1(1 - \eta_Z) - P_{LZP} \quad (4.28)$$

У складу са одредбама стандарда DIN 3996 [71], коефицијент топлотне проводљивости α_L дефинише се као функција улазне угаоне брзине ω_1 . Ова зависност се изражава кроз следећи математички однос, који омогућава прецизну квантитативну процену интензитета преноса топлоте у пужном зупчаничком пару [23, 73].

$$\alpha_L = c_k(1940 + 15 \cdot \omega_1) \quad (4.29)$$

Коефицијент c_k има вредност $c_k = 1$ у случају потпуног потапања пужног зупчаника у уљу, док у случају потапања пужа у уљу ова вредност износи $c_k = 0,8$ [23, 73].

Површина која учествује у процесу хлађења пужног пара, означена као A_R ,

одређује се у зависности од ширине b_{k2R} и пречника средњег круга d_{m2} контактне површине, у складу са препорукама из литературе [71].

$$A_R = b_{k2R} \cdot d_{m2} \cdot 10^{-6} \quad (4.30)$$

Један од кључних параметара који одређују термичко понашање пужних преносника снаге јесте њихов топлотни капацитет, који представља способност система да апсорбује и пренесе генерисану топлоту без нарушавања стабилности рада. Овај параметар се дефинише преко максималне улазне снаге коју преносник може да поднесе, а да при томе не дође до термичког преоптерећења или преласка дозвољене радне температуре у зони спрезања пужа и пужног зупчаника [60, 72].

Максимална улазна снага се одређује према изразу:

$$P_{1max} = P_{1nom} \cdot f_t \quad (4.31)$$

где је f_t коефицијент термичког оптерећења, који представља способност пужног преносника да одведе температуру, док P_{1nom} представља номиналну улазну снагу пужног преносника.

За поуздан рад пужног преносника од изузетне важности је одржавање температуре мазива у кућишту у оквиру дозвољених граница [74]. Прекомерно термичко оптерећење доводи до деградације мазива, што резултира интензивираним хабањем пужног преносника, прегревањем кућишта, оштећењем заптивача вратила, као и повећаним ризиком од оштећења пужа и пужног зупчаника. Прецизно познавање температуре мазива ϑ_S представља један од основних параметара при пројектовању и експлоатацији пужног преносника [75]. Температура мазива остаје релевантан фактор и у контексту губитака снаге пужног преносника. Вискозност подмазујућег средства има директан утицај на температуру кућишта у коме је смештено мазиво [76, 77].

4.5. Основе трибологије пужних преносника снаге

Трибологија, као мултидисциплинарна научна област која обједињује принципе механике, физике и хемије у проучавању појава трења, хабања и поступака подмазивања, има централну улогу у анализи поузданости и степена искоришћења пужних преносника. Савремена истраживања у овој области усмерена су ка унапређењу триболошких карактеристика спрегнутих делова и склопова, оптимизацији подмазивања и развоју еколошки прихватљивих мазива, која омогућавају продужен век трајања машинских система [3].

Вискозност је основна физичка карактеристика флуида за подмазивање. Она одређује величину отпора којом се течност супроставља, одупире кретању. Настаје као резултат деловања међумолекуларних сила у флуиду. Што су ове силе више изражене то је и вискозност већа. Течности које се при струјању покорављају наведеном закону називају се њутновски флуиди. Њихова основна карактеристика је линеарна зависност напона смицања (τ) и градијента брзине смисања (du/dy) [65].

Са порастом температуре вискозност течних мазива опада, а при снижавању температуре расте. До овакве промене долази због тога што се при порасту температуре течност шири, молекули се брже крећу и удаљавају једни од других са последицом опадања међумолекуларних веза, а тиме и величине вискозности. При снижавању температуре догађа се обратно [66].

Мазива која карактерише нелинеарна зависност између напона на смицање и градијента брзине, односно код којих вискозност не остаје стална величина при задатој

температури и притиску спадају у групу нењутновских флуида. То значи да се вискозност мења не само под утицајем температуре и притиска, већ и са променом брзине смицања. Имајући у виду наведено, код ових мазива уведен појам привидне вискозности, као величине вискозности за тачно одређени градијент брзине смицања. Материје које се понашају као нењутновски флуиди могу да се разврставају у следеће групе: бингамове флуиде, псеудопластике, дилатантне течности, тиксотропни флуиди и високоеластични флуиди [66].

Према досадашњим истраживањима [16, 19, 20], степен искоришћења пужних преносника директно је условљена вискозношћу и хемијским саставом употребљеног мазива, као и микрогеометријом контактних површина у зони спрезања. Аутори у својим експерименталним радовима [23, 84] наглашавају да вискозност мазива утиче не само на дебљину уљног филма, већ и на промену температуре мазива, што посредно дефинише укупне енергетске губитке.

Са становишта експлоатације пужних преносника, разликују се два основна вида подмазивања: потпуно и непотпуно подмазивање. У режиму потпуног подмазивања контактне површине пужа и пужног зупчаника су у потпуности раздвојене уљним филмом, што омогућава минималан коефицијент трења и стабилан термички баланс система. Насупрот томе, код непотпуног подмазивања долази до делимичног контакта површина услед недовољне дебљине уљног филма, што повећава интензитет хабања и термичко оптерећење у зони спрезања. Према резултатима истраживача [84], оптималан избор вискозности и модификација базног уља адитивима омогућава прелазак из непотпуног у стабилнији режим потпуног подмазивања, чиме се значајно повећава степен искоришћења и продужава радни век пужног преносника.

Врсте потпуног подмазивања су следеће [3, 5]:

- Хидростатичко подмазивање (HSP) – са течним мазивом.
- Гасостатичко подмазивање (GSP) – са гасовитим мазивом.
- Хидродинамичко подмазивање (HSP) – са течним мазивом.
- Гасодинамичко подмазивање (GDP) – са гасовитим мазивом.
- Реодинамичко подмазивање (RDP) – са полутечним мазивом.
- Еластохидродинамичко подмазивање (EHSP) – са течним и полутечним мазивом.

Од наведених врста подмазивања најширу примену имају хидродинамичко, хидростатичко и еластохидродинамичко подмазивање у бројним индустријским погонима и другим машинским системима.

Са аспекта геометрије контактних површина, природа додира између елемената у преносницима снаге представља један од кључних параметара који одређује триболошке, механичке и термичке карактеристике система. Контакт између површина је класификован у две основне категорије – конформан и неконформан додир, при чему сваки од ових типова контакта има различите импликације по напрезања, хабање и губитке снаге [5].

У случају конформног додира, контактне површине имају сличне или комплементарне облике, односно значајан део њихових геометрија се поклапа у зони додира. Овај тип контакта карактеристичан је за спрегнуте елементе са великом контактном површином, као што су лежишта клизног типа и пужни преносници снаге. У таквим условима контактни притисак је релативно мали због велике површине расподеле оптерећења, што резултира смањеним локалним напрезањима и већом стабилношћу уљног филма. Међутим, због повећане контактне површине и релативног клизања, код конформних контаката често се јављају значајнији губици енергије услед трења и повећано

генерисање топлоте. За овакве услове додир карактеристично је хидродинамичко и хидростатичко подмазивање [5, 76].

Супротно томе, неконформан додир подразумева контакт између површина које имају различите геометријске облике, при чему се додир остварује у ограниченој зони – најчешће у виду тачке или линије. Такав контакт је типичан за ваљкасте, кугличне и цилиндричне зупчасте преноснике, где се оптерећење концентрише у уској области, што доводи до високих контактних притисака и потребе за изузетно прецизним подмазивањем. Код неконформног контакта хидродинамички филм је танак, а услед микронеравнина површина могу настати зоне локалног пластичног деформисања и микрохабања. С друге стране, због мале контактне површине, трење је мање, па је степен искоришћења често већи у односу на конформне контакте. За ову врсту контакта типичан је режим еластохидродинамичког подмазивања, који обезбеђује стабилан уљни филм између контактних површина [3].

У пужним преносницима, као специфичном облику зупчастих преносника снаге са израженим релативним клизањем, присутан је делимично конформан додир, где облик пужа и пужног зупчаника омогућава велики број истовремених контактних линија.

Непотпуно подмазивање настаје у условима када се између контактних површина не формира потпун и континуалан уљни филм, већ долази до делимичног контакта површина. Ова појава се јавља у ситуацијама када су: релативне брзине кретања мале, вискозност уља недовољна за формирање стабилног филма, оптерећења висока, или је температура у зони контакта повишена, што доводи до смањења вискозности и разарања уљног филма [84].

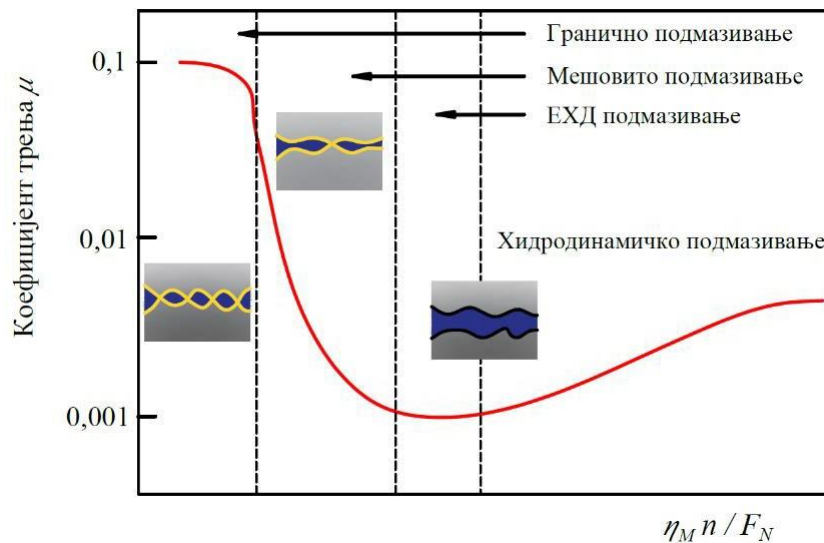
Основне две врсте непотпуног подмазивања су [5, 77]:

1. Гранично подмазивање (GP) – јавља се када је дебљина уљног филма приближна висини храпавости површина. У овом режиму доминирају хемијске и физичке интеракције између адитива у мазиву и контактних површина, што доводи до формирања заштитног слоја који смањује директан контакт и хабање.

2. Мешовито подмазивање (MP) – представља прелазни облик између потпуног и граничног подмазивања. Део оптерећења преноси уљни филм, док преостали део носе микроскопске неравнине површина. У овом режиму и механички и хемијски механизми заштите делују истовремено, па је стабилност и трајност подмазивања у великој мери зависна од својстава мазива и микрогеометрије површина.

Коначно, непотпуно подмазивање представља критичан режим рада у триболошким системима као што су пужни преносници, где комбинација високих притисака и релативно ниских брзина често доводи до услова граничног или мешовитог подмазивања [5, 78].

Могућност реализације специфичних облика или типова подмазивања условљена је како конструкционим решењима, тако и радним параметрима преносника снаге, укључујући радну брзину, оптерећење и термичко понашање, што се најдетаљније илуструје Стрибековим дијаграмом (слика 4.20) [79]. Он представља експериментално дефинисану функцију у којој је коефицијент трења μ зависан од динамичке вискозности μ_M , броја обртаја n и нормалног оптерећења F_N . При томе се наведени услови трења карактеришу кроз бездимензијски параметар (Стрибеков број) $\eta_M n / F_N$.



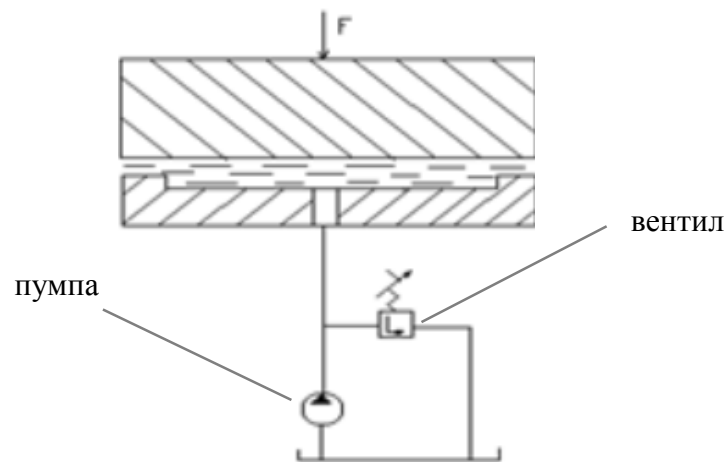
Слика 4.20 Стрибеков дијаграм [79]

На основу дијаграма приказаног на слици 4.20, може се закључити да се режим хидродинамичког подмазивања може успешно остварити у релативно широком интервалу вредности бездимензијског параметра $\eta_M n / F_N$. Са становишта триболошких карактеристика, посебно коефицијента трења, оптималан режим подмазивања се постиже у области у којој вредност наведеног параметра одговара минимуму криве коефицијента трења [79, 80].

Међутим, у условима када је геометријска неравнина контактних површина упоредива са дебљином уљног филма, долази до преклапања механизма граничног и хидродинамичког подмазивања, при чему се успоставља мешовити режим подмазивања. Такав режим се, такође, може јавити у случајевима нарушавања континуитета уљног филма, услед деловања ударних оптерећења. Израженија храпавост површине, нарочито при нижим оптерећењима, додатно погодује појави овог феномена [3, 81].

Хидростатичко подмазивање представља најједноставнију врсту потпуног подмазивања које омогућава изузетне карактеристике у условима високе прецизности и малих толеранција, али захтева сложену конструкцију, контролу радних параметара и висок степен поштовања експлоатационих услова (слика 4.21). За разлику од хидродинамичког режима, где се притисак у филму генерише услед хидродинамичког ефекта при релативном померању површина, у хидростатичком систему стабилан слој мазива обезбеђује пумпа која континуално доводи флуид под одговарајућим притиском у подмазивану зону [84]. На овај начин се успоставља стабилна и носећа уљна подлога која у потпуности раздваја контактне површине и тиме елиминише директан контакт и ризик од адхезионог хабања [3].

Основна намена хидростатичког подмазивања је обезбеђивање високог степена тачности, стабилности и поузданости у раду прецизних механичких система. Овај принцип се најчешће примењује у конструкцији прецизних лежајева, вретена алатних машина, клизних вођица, као и у системима за позиционирање и мерење где је потребно остварити минималне толеранције и вибрациону стабилност. Способност одржавања уљног филма и у условима малих или нултих брзина чини овај тип подмазивања посебно погодним за примену у системима са честим стартним и зауставним циклусима, као и у уређајима код којих је континуитет подмазивања критичан за функционалност [5].



Слика 4.21 Шематски приказ хидростатичког подмазивања [3]

Предности хидростатичког подмазивања огледају се у изузетној стабилности носећег филма, високој крутости система и минимизацији трења и хабања. Потпуно раздвајање контактних површина омогућава рад без ризика од граничног трења, чиме се значајно продужава експлоатациони век елемената и повећава поузданост у раду. Додатно, могућност прецизног регулисања притиска и протока мазива омогућава фино подешавање радних услова у складу са специфичним захтевима примене, што овај систем чини изузетно погодним за савремене мехатронске уређаје.

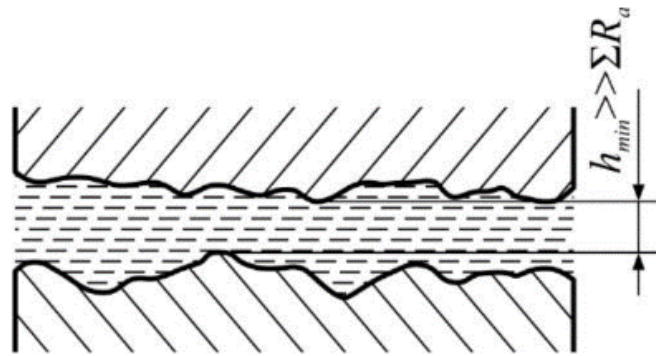
Ипак, хидростатички системи нису лишени ограничења. Њихова конструкциона и функционална сложеност условљава повећане трошкове производње, одржавања и енергетске потрошње. Потреба за спољним извором притиска захтева примену додатних хидрауличких компоненти као што су пумпе, вентили и филтери, што повећава масу и просторну заузетост система. Истовремено, осетљивост на контаминацију мазива захтева високо ефикасне системе филтрације и редовно техничко одржавање, јер присуство нечистоћа може нарушити интегритет уљног филма и изазвати озбиљна оштећења контактних површина. Уколико дође до прекида у снабдевању мазивом или пада притиска испод пројектованих вредности, систем може прелазно прећи у гранични режим трења, што доводи до повећаног хабања и потенцијалног отказа.

Хидродинамичко подмазивање је врста потпуног подмазивања код које притисак у уљном филму настаје као последица хидродинамичких сила које се јављају услед клизања или ротације површина. Ове силе доводе до формирања уљног филма чија дебелина варира дуж контактне зоне, чиме се успоставља потпуно раздвајање чврстих површина и обезбеђује минимално трење и хабање [3, 82].

Суштина хидродинамичког подмазивања огледа се у равнотежи између генерисаног притиска у уљном филму и спољашњег оптерећења које делује на систем. Уколико су брзина кретања, вискозност мазива и геометрија површина адекватно одабрани, остварује се стабилан радни режим у којем се контактне површине у потпуности раздвајају флуидним филмом [84]. Овај режим је од посебног значаја у машинским елементима као што су клизни и котрљајни лежајеви, клипови, вратила и турбински лежајеви, где је континуитет подмазивања од кључне важности за поузданост и дуготрајност система [5].

Примарна намена хидродинамичког подмазивања јесте обезбеђивање ефикасног смањења трења и хабања у системима са континуалним релативним кретањем између површина, при чему је шематски приказ ове врсте подмазивања приказан на слици 4.22, где h_{min} представља минималну дебелину уљног филма. Овај тип подмазивања омогућава стабилан рад при великим брзинама, високим оптерећењима и захтевима за дуготрајним

радним веком. Због тога је хидродинамички принцип широко заступљен у конструкцији ротирајућих машина, пумпи, компресора, као и у многим системима транспортне и енергетске индустрије.



Слика 4.22 Шематски приказ хидродинамичког подмазивања [3]

Предности хидродинамичког подмазивања огледају се у способности да се обезбеди потпуно раздвајање контактних површина без потребе за спољашњим доводом притиска, чиме се систем поједностављује и постиже висока поузданост у раду. Овај режим карактерише изузетно ниски коефицијент трења, висок степен искоришћења и минимално хабање површина. Поред тога, стабилност уљног филма доприноси апсорпцији вибрација и равномерној расподели оптерећења, што позитивно утиче на динамичку стабилност целокупног система.

Ипак, хидродинамичко подмазивање има и своја ограничења. Његов ефикасан рад условљен је постојањем релативног кретања, односно довољне брзине за генерисање притиска у уљном филму. У почетним фазама покретања и при заустављању машине, када је брзина недовољна, долази до делимичног или потпуног нарушавања флуидног филма, што може довести до преласка у мешовити или гранични режим трења. Поред тога, избор адекватног мазива (у погледу вискозности и термичке стабилности) и прецизна геометрија контактних површина представљају критичне факторе за правилно функционисање овог режима подмазивања [3].

Еластохидродинамичко подмазивање представља сложен режим флуидног подмазивања, који се јавља у условима високих контактних притисака и релативно малих површина додира, типичних за елементе као што су котрљајни лежачеви, зупчасти парови, брегасти механизми и други системи са концентрисаним оптерећењима. За разлику од класичног хидродинамичког подмазивања, где се деформације контактних површина могу занемарити, у еластохидродинамичком режиму те деформације постају суштински фактор у успостављању и одржавању стабилног уљног филма. Под дејством високих притисака, површине у додиру се еластично деформишу, при чему долази до повећања стварне контактне површине и прерасподеле притиска унутар уљног филма. Истовремено, високи притисци узрокују значајан пораст вискозности мазива, што омогућава формирање изузетно танког, али стабилног и носећег филма који спречава директан контакт две металне површине [5].

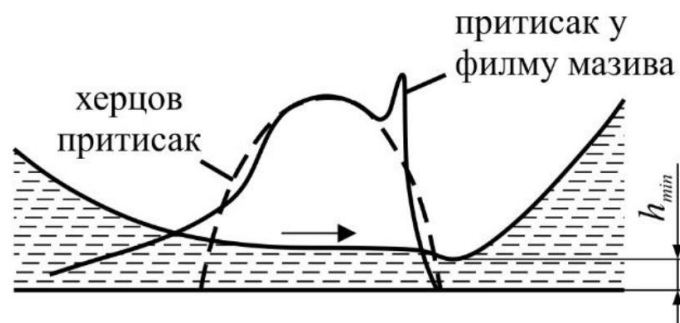
Основни механизам еластохидродинамичког подмазивања може се објаснити на основу две хипотетичке врсте додира које описују различите геометријске услове контакта [3]:

1. Линијски додир – карактеристичан је за контакт између цилиндричних површина (нпр. ваљчићи лежачева или контакт између зубаца у зупчастом пару). У овом случају,

контактна зона има издужени облик и може се посматрати као тракаста област у којој се притисак распоређује по приближно параболичној криви дуж линије додира. Дебљина уљног филма је релативно равномерна у централном делу контакта, али нагло опада према ивицама зоне, где може доћи до преласка у режим мешовитог подмазивања.

2. Елиптични додир (додир у тачки) – јавља се у додиру сферних површина, као што је случај код кугличних лежајева или куглице у контакту са стазом лежаја. Контактна површина има елиптичан облик, а расподела притиска је тродимензионална, са највећом вредношћу у централном делу контакта. У овом режиму дебљина уљног филма зависи од комбинације геометријских, материјалних и динамичких параметара, а понашање филма је сложеније него код линијског контакта, услед веће концентрације напрезања у централној зони.

Обе ове хипотетичке врсте додира се описују применом Херцове теорије еластичног контакта, која представља основу за разумевање механичког понашања контактних површина под оптерећењем. Херцова област дефинише зону стварног контакта (слика 4.20) између две еластичне површине када је оптерећење мање од границе пластичне деформације. У тој области, контактни притисак се распоређује по карактеристичној параболичној криви, са највећом вредношћу у центру контакта и нулом на ивицама. Величина и облик Херцове области зависе од материјалних својстава машинског елемента (модула еластичности и Поасоновог коефицијента), геометрије контактних површина и величине спољашњег оптерећења [83].



Слика 4.23 Шематски приказ режима еластохидродинамичког подмазивања [3]

Са становишта триболошких својстава, Херцова област представља простор у којем се остварује највећи притисак и где долази до критичних промена у својствима мазива. У овој зони, вискозност мазива се знатно повећава, што омогућава његову способност да поднесе изузетно висока оптерећења без губитка континуитета филма. Истовремено, еластичне деформације контактних површина доприносе равномернијој расподели притиска и смањују локална напрезања, чиме се повећава носивост и стабилност система. Уколико притисак пређе критичну вредност, долази до прекида уљног филма и преласка у мешовити или гранични режим подмазивања, што може изазвати хабање и оштећење површина.

Предности еластохидродинамичког подмазивања огледају се у способности преносника снаге да одржи стабилан уљни филм при изузетно великим оптерећењима и брзинама. Овај режим обезбеђује минималан коефицијент трења, продужава радни век компоненти и повећава степен искоришћења. Еластичне деформације контактних површина омогућавају прилагођавање условима оптерећења и равномернију расподелу притиска, што у великој мери умањује ризик од локалних отказа и заморног хабања [84].

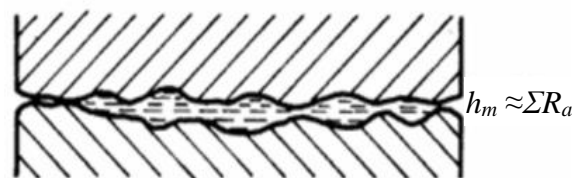
С друге стране, овај режим подмазивања захтева примену високо специјализованих мазива са прецизно дефинисаним реолошким и термодинамичким својствима, способних да

задрже високу вискозност и стабилност под екстремним условима притиска и температуре. Такође, системи у којима се остварује еластохидродинамички режим захтевају изузетно чисто радно окружење, јер присуство микрочестица или нечистоћа може пореметити интегритет филма и изазвати површинска оштећења у Херцовој зони [3, 85].

Еластохидродинамичко подмазивање представља један од најсофистициранијих и најзначајнијих режима подмазивања у савременој трибологији. Његов механизам заснован на сложеној интеракцији еластичних деформација, вискозних својстава мазива и Херцове контактне механике омогућава стабилно, дуготрајно и енергетски ефикасно функционисање машинских елемената под екстремним условима рада. Управо из тог разлога, овај режим подмазивања има кључну примену у свим системима где су прецизност, отпорност на хабање и поузданост рада од пресудног значаја за карактеристике и трајност целокупног механичког склопа.

Мешовито подмазивање представља прелазни режим који се јавља између граничног и флуидног (хидродинамичког или еластохидродинамичког) подмазивања. У овом режиму долази до делимичног раздвајања контактних површина слојем мазива, док поједини микроврхови неравнина остају у непосредном контакту. Као последица тога, укупан отпор при релативном кретању настаје комбинованим дејством вискозног трења у уљном филму и трења на местима додира површина. Мешовити режим се обично јавља у прелазним условима рада – током покретања, заустављања или при наглим променама оптерећења и брзине, када дебљина уљног филма није довољна да у потпуности раздвоји контактне површине.

Мешовито подмазивање обезбеђује прихватљив ниво заштите површина у условима када није могуће одржати потпуни слој мазива, при чему је дебљина слоја мазива h_m приближно једнака средњем аритметичком одступању суме средњих аритметичких одступања профила ΣR_a (слика 4.24). Овај режим има практичну примену у великом броју машинских система, као што су клизни лежајеве, клипови и цилиндри мотора, водилице алатних машина и зупчasti преносници, где се током рада јављају променљиви радни услови и неминовне промене у дебљини уљног филма. Мешовито подмазивање омогућава континуитет рада система, смањење хабања и ублажавање последица контактне оптерећења у фазама прелаза између различитих режима трења.



Слика 4.24 Шематски приказ мешовитог подмазивања [3]

Мешовито подмазивање се може класификовати према степену развијености уљног филма и интензитету контакта површина на:

1. Прелазно мешовито подмазивање, које се јавља при иницијалном покретању или заустављању када се постепено формира или разграђује уљни филм. У овом случају контакт између неравнина је израженији, а удео граничног трења већи.
2. Стабилизовано мешовито подмазивање, које се остварује у стационарним условима рада када се успоставља делимичан баланс између флуидних и граничних компоненти трења. Овај режим је карактеристичан за системе у којима је дебљина уљног филма упоредива са висином храпавости површине.

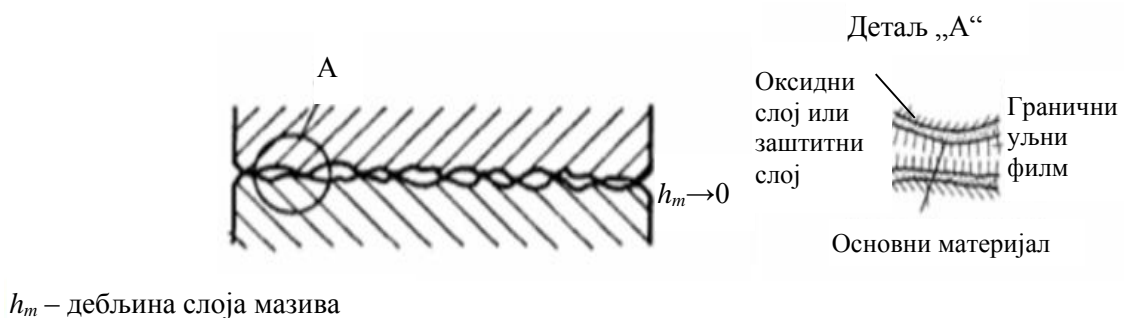
Понашање система у овом режиму може се квантификовати помоћу Стрибековог дијаграма (слика 4.17), где у централном делу криве, који одговара мешовитом режиму, долази до постепеног смањења коефицијента трења са порастом дебљине уљног филма и преласка у флуидни режим.

Главна предност мешовитог подмазивања лежи у његовој прилагодљивости променљивим условима рада. Овај режим омогућава да се одржи делимично раздвајање контактних површина чак и при неповољним условима као што су ниске брзине, висока оптерећења или недовољан довод мазива. Захваљујући присуству танког уљног филма, смањује се ризик од појачаног хабања, док се истовремено омогућава ефикасно одвођење топлоте из зоне контакта. Поред тога, мешовити режим омогућава поступан прелаз између граничног и хидродинамичког подмазивања, чиме се избегавају нагле промене у коефицијенту трења и повећава стабилност рада [3].

Ипак, мешовито подмазивање праћено је и одређеним ограничењима. Због делимичног контакта неравнина, јавља се повећано локално напрезање које може довести до пластичних деформација, микроставаривања и површинског хабања. Такође, нестабилност дебљине филма и осетљивост на промене вискозности мазива или радне температуре могу довести до преласка у непожељни гранични режим трења. У случајевима непотпуне или неправилне дистрибуције мазива, долази до повећаног коефицијента трења и смањења степена искоришћења. Поред тога, контрола овог режима подмазивања је сложена, јер зависи од великог броја међусобно повезаних параметара – храпавости, вискозности, брзине, оптерећења и температуре.

Мешовито подмазивање има изузетан практични значај, јер представља најчешћи реални режим трења у зупчастим преносницима снаге. Иако није идеалан у погледу степена искоришћења и заштите од хабања, овај режим представља компромисно решење које омогућава стабилан рад у широком опсегу услова. Његово разумевање и контрола имају суштински значај у пројектовању савремених триболошких система, посебно у пужним преносницима снаге где се комбинују висока оптерећења, променљиве брзине и ограничена количина мазива.

Гранично подмазивање представља врсту подмазивања које се јавља у условима када је дебљина уљног филма недовољна да у потпуности раздвоји контактне површине, те долази до директног додира микронеравнина и доминације адхезионих и молекуларних сила у зони контакта. У пужним преносницима снаге овај режим је од посебног значаја, јер се у тим системима често јављају комбинације ниских брзина клизања, високих специфичних оптерећења и повишених температура услед израженог клизно-котрљајног односа у контакту између пужа и пужног зупчаника. У таквим условима, формирање стабилног хидродинамичког филма је отежано или немогуће, па се подмазивање ослања на хемијски активне компоненте мазива које формирају заштитни гранични слој на металним површинама (слика 4.22).



Слика 4.25 Шематски приказ граничног подмазивања [3, 5]

Основна намена граничног подмазивања у пужним преносницима снаге јесте обезбеђивање минималног трења и заштите површина од адхезионог и абразивног хабања у условима када су динамички услови неповољни за развој флуидног филма. У овом режиму, ефекат подмазивања не произилази из вискозних сила у течном филму, већ из формирања танког, чврсто везаног хемијског или физичког слоја на контактним површинама. Тај слој, најчешће дебљине неколико нанометара, настаје реакцијом адитива из мазива (нпр. цинк-дитиофосфата, фосфора, сумпора или хлора) са металном подлогом [80, 82], при чему се формирају метални сулфиди, фосфиди или оксиди који смањују адхезију и спречавају директан контакт металних површина.

Величина трења у режиму граничног подмазивања одређује се полазећи од општег теоријског концепта трења, где укупно трење између површина у условима граничног подмазивања представља збир сила потребних за смицање у формираном граничном слоју и сила смицања које настају у зонама директног контакта површина.

$$F_T = \alpha \cdot A_r \cdot \tau_m + (1 - \alpha) \cdot A_r \cdot \tau_g \quad (4.32)$$

где су:

α – коефицијент који представља део стварне површине додира елемената,

A_r – укупна реална површина додира,

τ_m – напон смицања метала,

τ_g – напон смицања граничног слоја.

Сила нормална на површине је дефинисана изразом,

$$F_N = A_r \cdot p_o \quad (4.33)$$

Имајући у виду наведено коефицијент трења је приказан следећом једначином.

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} = \alpha \mu_m + (1 - \alpha) \mu_g \quad (4.34)$$

где су:

μ_m – коефицијент трења спрегнутих елемената,

μ_g – коефицијент трења граничног слоја и

p_o – номинални контактни притисак.

За вредност $\alpha = 1$ у додиру су чисте контактне површине, док се за $\alpha = 0$ трење одвија само у граничном слоју.

Гранично подмазивање у пужним преносницима може се систематизовати према природи заштитног слоја и механизму његовог формирања као [5, 84]:

1. Физичко адсорпционо гранично подмазивање – карактерише га стварање слабо везаног заштитног слоја услед поларне адсорпције молекула мазива на контактну површину. Овај облик подмазивања јавља се при нижим температурама и умереним оптерећењима, а стабилност уљног филма зависи од поларности и хемијског састава базног уља.

2. Хемијско (реакционо) гранично подмазивање – представља доминантан облик у

пужним преносницима, где се под дејством повишених температура и притисака адитиви из мазива хемијски везују за металну подлогу и стварају заштитне филмове високе отпорности. Ови филмови имају улогу у смањењу коефицијента трења и заштити од површинске деградације, посебно у условима интензивног клизања и повремених ударних оптерећења.

Основна предност граничног подмазивања у пужним преносницима снаге јесте његова способност да обезбеди поуздано функционисање у условима у којима је хидродинамички филм нестабилан или не може да се формира. Захваљујући употреби адитива против хабања (енгл. *anti-wear* – *AW*) и адитива за екстремне притиске (енгл. *extreme pressure* – *EP*), гранично подмазивање омогућава очување површина и спречава појаву микрозаваривања и „зарибавања“. Поред тога, овај режим подмазивања пружа већи степен искоришћења у иницијалним фазама рада и при ниским брзинама, када вискозно трење није доминантно.

У пужним преносницима, где клизање представља значајну компоненту укупног трења, гранично подмазивање омогућава стабилан рад и продужава век трајања елемената упркос високим термичким и механичким напрезањима. Присуство хемијских заштитних слојева додатно смањује температуру у зони контакта и ограничава губитке услед трења, што је од посебног значаја код дуготрајног или континуалног рада пужних редуктора.

Са друге стране, гранично подмазивање има одређена ограничења и недостаци су најизраженији у погледу стабилности и поузданости у променљивим условима. Пошто заштитни слојеви настају реакцијом на контактним површинама, њихово формирање и одржавање зависе од температуре, притиска и састава мазива, што може довести до неравномерности у подмазивању. Прекомерна термичка оптерећења могу изазвати деградацију адитива и оштећење заштитног филма, што резултира повећаним коефицијентом трења, убрзаним хабањем и падом степена искоришћења преносника. Додатни проблем представља могућност хемијске корозије металних површина услед присуства активних адитива, као и осетљивост на контаминацију мазива. Такође, гранични режим подмазивања не омогућава потпуно елиминисање металног контакта, што у дуготрајном раду може довести до повећаног оштећења површина и акумулације топлоте у зони додира.

Гранично подмазивање у пужним преносницима снаге представља критичан и често доминантан режим трења, нарочито у условима високе контактне температуре, ниских брзина и великих оптерећења. Његов степен искоришћења у великој мери зависи од квалитета мазива и избора адитива који омогућавају формирање стабилних заштитних филмова на металним површинама. Иако овај режим не обезбеђује идеалну раздвојеност контактних површина, он има суштинску улогу у обезбеђивању поузданости и дуговечности пужних преносника, нарочито у условима када су флуидни режими подмазивања непостојани. Сходно томе, правилно пројектовање, избор мазива и контрола радних параметара представљају кључне факторе у постизању оптималног степена искоришћења и заштите у условима граничног подмазивања [5, 80].

5. МАЗИВА СА НАНОАДИТИВИМА

5.1. Основни појмови о мазивима

Мазива представљају било коју материју којом се раздвајају, потпуно или делимично, површине тела у релативном кретању, у циљу смањења трења и хабања. Поред ових основних функција, мазива имају и друге битне функције од којих се издвајају: одвођење топлоте, заптивање, пренос снаге и кретања, амортизација удара и вибрација [65].

Са становишта техничке примене и физичко–хемијских својстава, мазива се могу систематизовати према више критеријума. Мазива се углавном деле према функцији, агрегатном стању, саставу и/или пореклу и намени [66].

Према функцији постоје две основне групе и то конструкциона и технолошка мазива. Будући да се конструкциона мазива сматрају саставним конструкционим елементом машине, њихов адекватан избор врши се већ у фази пројектовања, упоредо са дефинисањем осталих материјала и техничких параметара система. Технолошка мазива представљају битну компоненту у обради метала деформисањем и резањем, где је њихова примарна улога ефикасно подмазивање и хлађење алата и материјала који се обрађује. Како су она интегрални део самог производног процеса, њихов избор се врши већ у фази дефинисања процеса, како би се осигурала оптимална обрада [66].

Према агрегатном стању мазива се деле на гасовита, течна, полутечна и чврста, при чему могу бити различита по свом пореклу и саставу. Гасовита мазива обухватају ваздух, инертне гасове попут азота и хелијума, те поједине паре флуида, који се примењују за постизање минималног отпора при екстремним радним условима. Према пореклу и хемијском саставу, течна мазива се класификују на минерална уља добијена рафинацијом нафте и њених деривата, синтетичка уља и уља биљног, а у мањем обиму, животињског порекла. Полутечна мазива представљају претежно различите течне масти. Последњу групу чине чврста мазива која уопштено могу бити органског и неорганског порекла и различитог састава [66].

Према намени, мазива се разврставају у индустријска (за машинске системе, редукторе, компресоре, лежајеве), транспортна (за моторе и преноснике), и специјална (за високе или ниске температуре, вакуум, ваздухопловство и др.). Оваква класификација омогућава рационалан избор мазива у зависности од услова рада, захтеваних триболошких карактеристика и специфичних функционалних захтева система, чиме се обезбеђује поузданост, дуговечност и висок степен искоришћења машинских елемената [5, 86].

У практичној примени пужних преносника снаге, као доминантна средства подмазивања користе се течна мазива на минералној бази, која обезбеђују стабилан филм и адекватну заштиту контактних површина. Синтетичка уља, као и полутечна и чврста мазива, примењују се ређе, углавном у специјализованим условима рада или при високим захтевима за термооксидациону стабилност и смањење трења. Са аспекта функционалних карактеристика, течна мазива за пужне преноснике могу се класификовати у две основне категорије: уља која садрже адитиве за побољшање носивости и стабилности у условима оптерећења и уља за екстремне притиске (EP/ER), намењена за рад у зонама интензивног контакта, где је потребна додатна заштита од хабања и површинских оштећења [87].

Уља са адитивима за побољшање носивости и стабилности представљају специјализована комерцијална минерална уља која садрже додатак 3–10 % масних уља и служе као модификатори трења и као носиоци адитива против оксидације, корозије и пенушања. Ова уља обезбеђују стабилност вискозности и заштиту контактних површина у стандардним радним условима, при чему се значајно смањује ризик од прекида уљног

филма и локалног хабања. Супротно томе, уља за екстремне притиске (EP/ER) су такође базирана на минералним уљима, али садрже специфичне EP адитиве који формирају заштитне хемијске слојеве на металним контактним зонама, обезбеђујући поуздану заштиту зупчаника и других елемената пужног преносника од адхезионог и абразивног хабања. Међутим, потребно је обратити пажњу на потенцијалне негативне ефекте ових адитива, као што су корозија бакра, погоршање механичких својстава заптивних елемената и друге нежељене реакције, што захтева пажљив избор адитивног пакета и контролу радних услова. Минерална уља се у пракси користе за радне температуре до око 130 °C, где одржавају оптималне триболошке карактеристике [87, 88].

У савременој пракси, за пужне преноснике се примењују и синтетичка уља, посебно у условима повишених радних температура које могу достићи и до 370 °C. Синтетичка уља карактеришу широка термичка стабилност, повећани индекс вискозности и значајно побољшане триболошке карактеристике како на ниским, тако и на високим температурама. Додатне предности укључују ниску токсичност, минималну испарљивост и побољшану биоразградивост, што их чини еколошки прихватљивијим у поређењу са минералним мазивима. Основна предност синтетичких уља је њихова способност да обезбеде стабилност рада и поузданост преносника у широком температурном интервалу, при одржавању задовољавајућих карактеристика вискозности, заштите од хабања и корозије, чиме се значајно продужава радни век пужних система [88].

Адитиви у мазивима представљају хемијска једињења која се у мањим концентрацијама додају базним уљима, ради побољшања њихових физичко-хемијских, реолошких и триболошких својстава, као и ради проширења поља примене у различитим радним условима. Њихова основна намена јесте повећање ефикасности и стабилности мазива, смањење трења и хабања, заштита металних површина од корозије и оксидације, као и обезбеђивање стабилности вискозности у широком температурном опсегу. Адитиви омогућавају да мазива задрже своја функционална својства у условима екстремних притисака, високих температура, присуства влаге или контаминаната, те имају кључну улогу у продужавању радног века и поузданости машинских система [87, 89].

Према својој функцији и механизму деловања, адитиви се могу поделити на више основних група. Адитиви за побољшање реолошких својстава обухватају модификаторе вискозности, који омогућавају стабилан вискозни одговор при променама температуре. Адитиви против хабања и адитиви за екстремне притиске формирају заштитне слојеве на металним површинама, спречавајући адхезионо и абразивно хабање у условима високих контактних напрезања. Антиоксиданти и инхибитори корозије успоравају или спречавају оксидационе и електрохемијске процесе, који доводе до деградације мазива и оштећења металних површина. Детерџенти и дисперзанти обезбеђују чистоћу система спречавајући таложење нерастворљивих продуката и формирање наслага. Поред тога, користе се и антипенушави адитиви, адитиви за разлагање емулзија, побољшивачи адхезије, као и боје и маркери, ради контроле и идентификације мазива [87, 89].

Према хемијском саставу и пореклу, адитиви могу бити органског, неорганског или органометалног типа, при чему се органометални адитиви (попут цинк-дитиофосфата или молибденових деривата) издвајају по изузетној ефикасности у условима граничног и мешовитог подмазивања. Савремени трендови у развоју адитива усмерени су ка еколошки прихватљивим, безфосфорним и безсумпорним формулацијама које задржавају високу трибохемијску активност уз минималан утицај на животну средину. Систематизација адитива према функцији, структури и пољу примене омогућава њихову рационалну употребу и синергијско деловање у саставу модерних мазива, чиме се значајно унапређују карактеристике, поузданост и степен искоришћења машинских система [86].

5.2. Појам, порекло и намена мазива са нанoadитивима

Термин нанотехнологија, или краће нанотехника, потиче од две грчке речи: $\nu\acute{\alpha}\nu\omicron\varsigma$ (нанос), што значи патуљак, и $\tau\epsilon\chi\nu\acute{\iota}\kappa\omicron\varsigma$ (техникос), у значењу вешт или вешто изведен. У најширем смислу, нанотехнологија се може дефинисати као инжењерство на изузетно малој, нанометарској размери. Она обухвата интердисциплинарно поље које истражује, развија и примењује структуре, уређаје и системе чије су димензије у распону од атомских и молекулских до макромолекулских размера, односно до приближно 100 nm. Ово подручје представља спој физике, хемије, биологије и инжењерства материјала, усмерен ка контроли и манипулацији материјом на атомском нивоу, са циљем стварања нових функционалних материјала и технологија са изузетним физичким, хемијским и механичким својствима [87, 90].

Највероватније најстарији индустријски наноматеријал представља црни угљеник (енгл. *carbon black*), који је дуго имао кључну улогу у развоју технолошких материјала са специфичним физичко-хемијским својствима. Његова синтетичка алтернатива, високо дисперзна силицијумска киселина, позната као „бела чађ“ (енгл. *white carbon black*), коју је конципирао немачки научник Хари Клопфер (нем. *Harry Kloepper*) 1942. године, који је радио за немачку компанију „Degussa AG“ (данас позната као „Evonik Industries“). У академском смислу, овај историјски моменат означава почетак систематског развоја функционалних наноструктурних материјала у индустријској производњи, што је представљало темељ за каснија истраживања у области нанотехнологије и инжењерства материјала. Фулеренима се у научној литератури придаје посебан значај још од њиховог открића 1985. године, када су означили почетак интензивног интересовања у индустрији мазива за материјале чије су честице мање од 100 nm. Управо је појава фулеренских наноструктура представљала прекретницу у схватању улоге наноматеријала у трибосистемима [87].

Нанoadитиви представљају савремене функционалне честице чија величина варира у нанометарском опсегу (обично 1–100 nm) и које се додају базним мазивима са циљем побољшања триболошких и физичко-хемијских својстава. Основна намена нанoadитива у мазивима за пужне преноснике снаге је смањење трења и хабања, повећање носивости контактних зона, побољшање термичке и оксидационе стабилности мазива и формирање заштитних нанослојева на металним површинама, што је од посебног значаја у условима високих специфичних оптерећења и комбинације клизања и котрљања у пужним преносницима [6, 52].

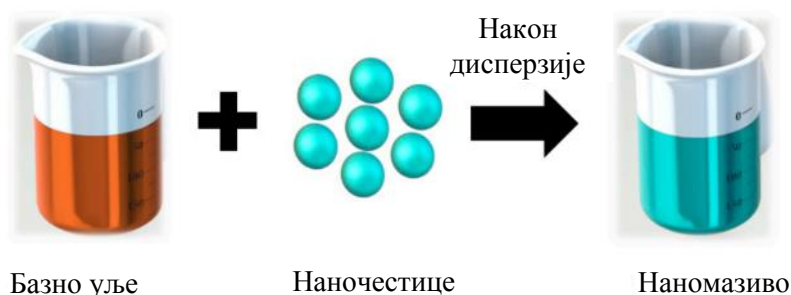
Примена нанoadитива код пужних преносника снаге омогућава смањење локалних температура, продужавање радног века пужа и пужног зупчаника и повећање степена искоришћења преносника. Нанoadитиви могу деловати као чврсти филмови (енгл. *solid lubricants*), који механички попуњавају неравнине и као хемијски активни слојеви, који реагују са металном површином формирајући стабилне наноструктуре отпорне на хабање. Такође, нанoadитиви могу побољшати дистрибуцију оптерећења и енергетску апсорпцију у контактної зони, смањујући вибрације и ударне ефекте карактеристичне за пужне преноснике [87, 88].

5.3. Врсте и карактеристике мазива са нанoadитивима и класификација наночестица

Према пореклу и типу, нанoadитиви се могу поделити на органске, неорганске и композитне. Неоргански нанoadитиви, као што су оксиди метала (Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO), дисулфиди (MoS_2 , WS_2) и бор-нитрид (BN), омогућавају формирање чврстих и термички стабилних филмова на контактним површинама. Органски нанoadитиви, укључујући

функционализоване угљеничне наночестице (графен, угљеничне нанопеве), могу улазити у хемијску интеракцију са металом и мазивом, смањујући адхезивно трење и повећавајући век употребе. Композитни наноадитиви комбинују механичке и хемијске механизме деловања и омогућавају синергијски ефекат, што је посебно корисно у условима променљивих оптерећења и температура [7, 91].

У лабораторијским испитивањима, синтеза наномазива може се изводити једностапеном или двостепеном методом. У оквиру једностапене методе, наномазива се формирају директно кроз хемијски процес, док двостепена метода подразумева два раздвојена корака: први корак обухвата синтезу наноматеријала у облику сувог праха, било физичким или хемијским поступцима, док други корак подразумева њихову дисперзију у базном уљу коришћењем техника мешања, са или без додатака дисперганаса или сурфактаната [30]. Илустрација процеса синтезе наномазива приказана је на слици 5.1, и она визуализује кључне кораке који омогућавају контролу величине и расподеле наночестица у уљној матрици, што је пресудно за постизање оптималних триболошких својстава [52, 92].



Слика 5.1 Процес добијања наномазива [92]

На основу хемијског састава, наночестице могу бити класификоване као: металне, метал-оксидне, сулфидне, нанокompозити, угљеничне наночестице и ретка и драгоцене једињења [93].

Металне наночестице се карактеришу малом величином честица, високом специфичном површином, ниском тачком топљења и малом граничном чврстоћом при смицању. Због тих својстава, оне показују изузетна триболошка својства и способност саморегенерације површине, када се користе као адитиви у мазивима. У ову групу спадају наночестице метала као што су бакар (Cu), бизмут (Bi), калај (Sn), гвожђе (Fe), никл (Ni), алуминијум (Al), паладијум (Pd), кобалт (Co) и цинк (Zn) [52, 94].

Механизам подмазивања металних наночестица може се класификовати у три основне категорије [96]:

(а) променом површинских својстава долази до формирања трибофилмова који раздвајају контактне површине, чиме се постиже побољшано триболошко деловање,

(б) наночестице делују као микросферични лежајеви, котрљајући се између две површине у контакту, што доводи до смањења трења и хабања,

(в) под утицајем топлоте и притиска током рада, наночестице улазе у зону хабања, при чему ова појава има карактер аутономног поправљања или синтеровања површине.

Различити метални оксиди нашли су широку примену као адитиви у мазивима, међу којима се најчешће користе TiO_2 , CuO , ZnO , Al_2O_3 , Fe_3O_4 и ZnAl_2O_4 . Механизам подмазивања наночестица металних оксида у великој мери је аналоган оном код металних наночестица и заснива се на више међусобно повезаних триболошких механизма.

Ови механизми обухватају:

(а) ефекат котрљања, при чему наночестице делују као нано-лежајеве који смањују трење између контактних површина,

(б) ефекат синтеровања и самопоправке, током кога се наночестице под дејством топлоте и притиска уносе у зону хабања и регенеришу оштећене површине,

(в) формирање трибофилмова, који представљају заштитни слој између трећих површина, чиме се додатно смањује трење и продужава радни век система.

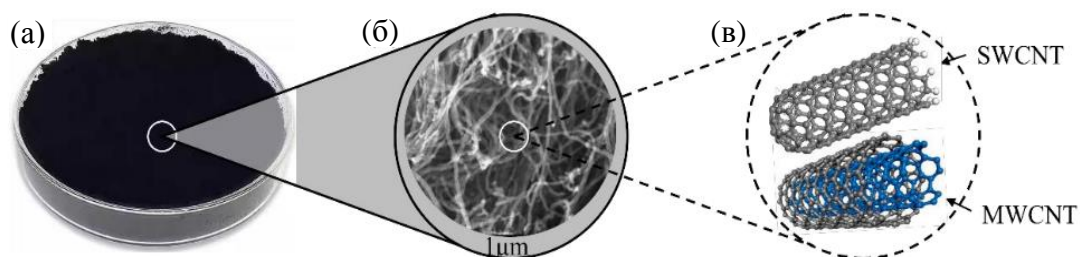
Захваљујући овим синергијским ефектима, наночестице металних оксида делују као високо ефикасни функционални адитиви, који побољшавају стабилност, носивост и укупна триболошка својства мазивих система у условима повећаних оптерећења.

Метални сулфиди већ деценијама заузимају значајно место као чврсти и течни адитиви у мазивима, међу којима се најчешће користе MoS_2 , WS_2 , FeS и CuS . Истраживања су показала да наноструктурисани MoS_2 у течним мазивима ствара филм, који је знатно ефикаснији од микроструктурисаног, што се приписује мањој величини честица, која омогућава смањено трење и бољу покретљивост унутар контактне зоне [96]. Овај филм делује као заштитни трибослој, који не само да смањује механичку интеракцију између контактних површина, већ и побољшава стабилност и издржљивост мазивог слоја.

Угљеничне наноцеви се у трибологији издвајају по својој једнодимензионалној цилиндричној структури и значајној дужини, што им омогућава да делују као котрљајућа тела између контактних површина. За разлику од металних наночестица, које смањују трење и хабање првенствено кроз формирање трибофилмова, сабијање материјала у зони контакта и ефекат самопоправке, угљеничне наноцеви доприносе и структурној стабилности нанофилма на већем простору контакта, обезбеђујући дугорочно смањење трења чак и под цикличним оптерећењима.

Угљеничне наноцеви су састављене искључиво од атома угљеника, а у зависности од морфологије деле се на једнослојне (енгл. *SWCNT* - *Single-Walled Carbon Nanotube*) и вишеслојне (енгл. *MWCNT* - *Multi-Walled Carbon Nanotube*) наноцеви.

Како је приказано на слици 5.2, угљеничне наноцеви поседују издужену цевасту морфологију на макроскопском нивоу, са дужином у распону од неколико микрометара до више центиметара, док су пречници у оквиру нанометарске скале. Овај изузетно висок однос дужине и пречника представља један од кључних фактора који одређују њихова механичка и реолошка својства у композитним системима [52].



Слика 5.2 Приказ угљеничних наноцеви: (а) макроскопски изглед, (б) снимак електронским микроскопом, (в) молекулска структура [96]

На молекуларном нивоу, једнослојне угљеничне наноцеви (*SWCNT*) грађене су од

једног слоја атома угљеника распоређених у континуалну хексагоналну решетку, која подсећа на савијени лист графена. Насупрот њима, вишеслојне угљеничне наноцеви (MWCNT) се састоје од више концентричних цилиндарских слојева угљеника, међусобно повезаних мета-сродним везама, које обезбеђују стабилност и еластичност структуре.

У поређењу са метал-оксидним наноцевима, чија триболошка активност такође укључује роловање, формирање заштитних слојева и синтеровање, угљеничне наноцеви показују већу механичку издржљивост и флексибилност, што омогућава бољу адаптацију на микротопографију контактних површина и стабилније триболошке карактеристике у условима променљивих температуре и притисака.

С друге стране, метални сулфиди (MoS_2 , WS_2 , FeS , CuS) делују као вишеслојне структуре са смањеним коефицијентом трења, посебно у микротопографским угловима, али су осетљивији на високе температуре и оксидативне услове. Угљеничне наноцеви комбинују физичко котрљање и структурну подршку са високом термичком стабилношћу и хемијском инертношћу, што их чини мултифункционалним наномазивима, погодним за сложене и екстремне трибосистеме [92, 97].

Укратко, разлика угљеничних наноцеви у односу на остале наноматеријале лежи у:

- једнодимензионалности и формирању нанофилма који пружа структурну подршку,
- већој механичкој и термичкој издржљивости у поређењу са металним или метал-оксидним наноцевима и
- способности адаптације на микротопографију и дугорочног смањења трења и хабања.

Ретка и драгоцене једињења представљају перспективну класу наноматеријала за примену као адитиви у мазивима или као додатни агенси у другим наночестицама, ради побољшања триболошких својстава. Ова група материјала обухвата оксиде, фосфате, сулфиде и друге комплексне форме елемената из групе ретких једињења, који се карактеришу високом хемијском стабилношћу, отпорношћу на оксидацију и јединственим електронским својствима, што их чини погодним за примену у сложеним трибосистемама [92].

5.4. Механизми дејства CNT код примене мазива са наноадитивима

Наночестице, када се користе као адитиви у мазивима, имају потенцијал да значајно смање трење и хабање и повећају носивост механичких елемената. Истраживања механизма подмазивања представљају кључни параметар за разумевање триболошких својстава наномазива и омогућавају оптимизацију њихове примене у различитим индустријским системима.

До сада идентификовани механизми дејства наночестица укључују [52, 92]:

- ефекат котрљања или ефекат кугличног лежаја (енгл. *ball bearing effect*),
- формирање заштитног филма на површини,
- ефекат поправке (енгл. *mending effect*) и
- ефекат полирања (енгл. *polishing effect*).

Ови механизми се најчешће групишу у две основне категорије:

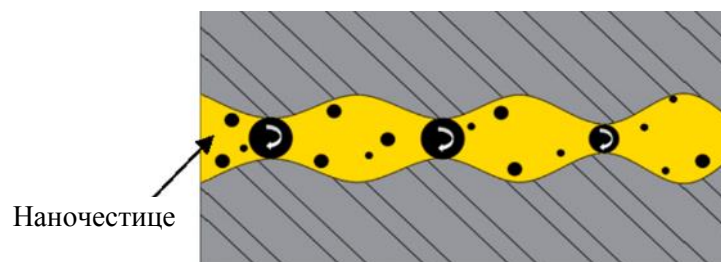
1. Директно дејство наночестица на побољшање подмазивања, које обухвата котрљање између контактних површина и формирање стабилних заштитних трибофилмова;

2. Побољшање контактних површина делова, које се огледа у полирању и самопоправци микро - дефеката, што доводи до повећане хомогености контактеног слоја и смањења локалних напона [98].

5.4.1. Ефекат котрљања наночестица

Ефекат котрљања представља један од кључних механизма дејства наночестица у трибологији. Сферичне или готово сферичне наночестице котрљају се између контактних површина, претварајући трење клизања у комбинацију трења клизања и трења котрљања, чиме се смањује укупни коефицијент трења и побољшава носивост контактних делова. Ово је визуелно потврђено микроскопским анализама наночестица у трибосистемама, где је примећено формирање стабилног котрљајућег слоја између контактних елемената [99].

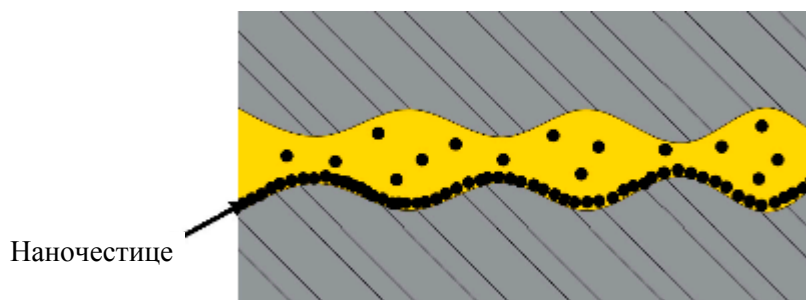
Истраживања показују да наночестице са угљеничним или дијамантним слојевима, као и наночестице металних оксида, могу ефективно деловати као микроскопски лежачеви, смањујући директан контакт и штитећи површине од локалних оштећења (слика 5.3). Притом SEM анализе и трибометарска испитивања потврђују да присуство сферичних наночестица омогућава формирање нанофилмова који равномерно распоређују контактне напоне, док истовремено делује и као механизам самопоправке микро-дефеката на површини [52, 92].



Слика 5.3 Шематски приказ ефекта котрљања наночестица [92]

5.4.2. Ефекат слоја мазива са наночестицама на површини

Формирање слоја мазива са наночестицама на површинама у контакту представља један од механизма подмазивања у трибологији. Наночестице имају тенденцију да на трећим површинама формирају аморфни, стабилни слој, који делује као заштитни нанофилм и значајно утиче на триболошко понашање контактних површина [99], а што се визуелно може представити на слици 5.4.



Слика 5.4 Шематски приказ слоја мазива са наночестицама [92]

Трибофилм, заједно са материјалом у зони непосредно испод површине, одређује коефицијент трења, интензитет хабања и носивост контактних елемената. Формирање овог

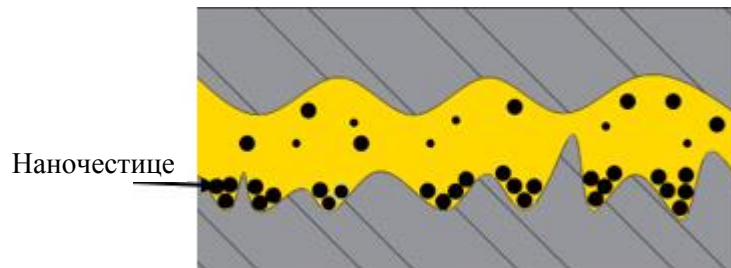
филма може бити резултат хемијске реакције између подлоге и наночестица у датим радним условима или процеса трибосинтеровања [100]. Експериментални резултати показују да наноконтрополи, као што су графен или графен појачан металним наночестицама, формирају трибофилмове који полирају контактну површину, смањују њену храпавост и повећавају укупну издржљивост трибосистема [52].

Формирање заштитног филма има позитиван ефекат на век трајања делова у контакту, при чему је механичка чврстоћа филма критична за услове ниских фреквенција оптерећења, док је његова пластичност и еластичност од пресудног значаја при високофреквентним динамичким оптерећењима. Овај механизам такође доприноси смањењу трења и хабања, омогућавајући формирање слојева који омекшавају контакте (појачавају еластичност) и побољшавају клизање површина.

Формирање и својства трибофилмова могу се анализирати савременим аналитичким техникама као што су: SEM анализа са спектроскопијом енергетски дисперзивних X зрака (SEM/EDS), X зрачна фотоелектронска спектроскопија (XPS) и Раман спектроскопија, што омогућава прецизно испитивање структуре, дебљине и хемијског састава заштитног филма [92].

5.4.3. Ефекат попуне неравнина на површинама

Ефекат попуне неравнина на површинама се заснива на депоновању наночестица на трећим површинама, чиме се компензује губитак материјала и смањује укупни интензитет хабања [99], што је илустровано на слици 5.5.



Слика 5.5 Шематски приказ попуне неравнина на површина [92]

Током овог процеса, наночестице се акумулирају у зони хабања, попуњавајући микрожлебове, пукотине и површинске неправилности, чиме се постепено обнавља иницијална геометрија површине. На тај начин, наночестице делују као самоорганизујући заштитни агенси, који омогућавају континуирано обнављање и стабилизацију трибосистема током експлоатације [52].

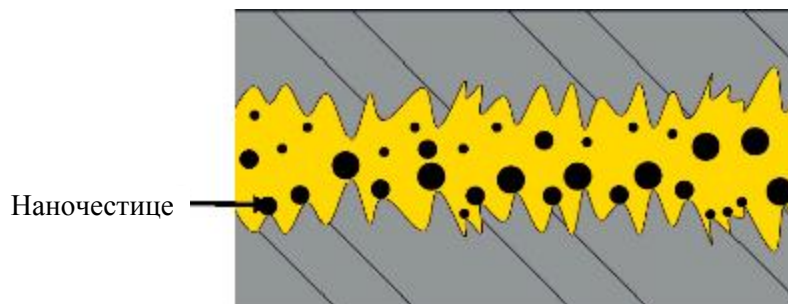
Бројна истраживања су потврдила да се овај механизам јавља код различитих врста наноматеријала, укључујући угљеничне наночестице, металне наночестице и наноконтрополи, при чему је посебно истакнута ефикасност графенских и сребром модификованих наночестица, које показују способност формирања саморегенеративних нанофилмова на контактним површинама [6, 7, 41, 92].

Анализе површина помоћу SEM/EDS пружају директне доказе о овом механизму, омогућавајући визуализацију депонованих наночестица и њиховог утицаја на реконфигурацију површине [92, 101].

5.4.4. Ефекат глачања површина

Ефекат глачања подразумева смањење храпавости површина у контакту путем

контролисаног наночестичног абразивног деловања, чиме се површина углачава и побољшава њена триболошка стабилност [102], што је илустровано на слици 5.6.



Слика 5.6 Шематски приказ ефекта глачања површина [92]

Наночестице оксида метала, као што су TiO_2 и Al_2O_3 , показују изузетну ефикасност у овом механизму, посебно када постоје у мешовитим фазама или као нанокмозити, што омогућава истовремено попуњавање микро-дефеката и изглађивање врхова микронеравнина на трећим површинама. Овај процес доводи до смањења локалних контактних напона и побољшања хомогености слоја мазива, чиме се повећава стабилност филма под оптерећењем [52].

У целини, ефекат глачања делује као допунски механизам у односу на претходно наведене ефекте, доприносећи смањењу трења, побољшању интегритета површина и продужавању века трајања трибосистема. Овај механизам има посебан значај у развоју наномазива са оптимизованим површинским интеракцијама, где наночестице делују као активни агенси за фино прилагођавање микротопографије контактних површина [103].

Ипак, бројна истраживања указују да прекомерно смањење храпавости, испод критичне вредности, може довести до повећања адхезивног трења и хабања, услед пораста стварне контактне површине и појачаних адхезивних интеракција [104].

5.5. Утицај концентрације, величине, облика и агломерације наночестица на карактеристике мазива са наноадитивима

Мазива са наноадитивима представљају напредну категорију мазива, која комбинују базно средство са функционалним наночестицама ради побољшања триболошких својстава. Карактеристике као што су концентрација, величина и облик наночестица одлучују о формирању заштитног филма, смањењу трења и повећању носивости контаката. Поред тога, стабилност дисперзије и контрола агломерације наночестица критични су за одржавање дуготрајности и поузданости наномазива у условима рада.

5.5.1. Концентрација наночестица у мазиву

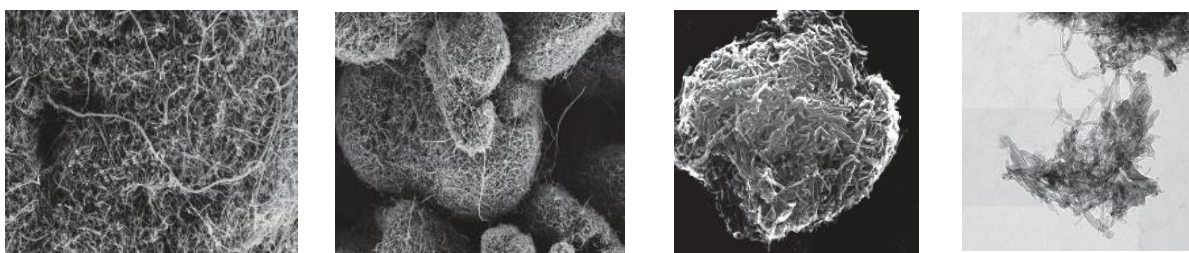
Наночестице у мазивима карактеришу се низом својстава која утичу на њихову функционалност. Један од основних параметара је концентрација наночестица, која одређује број и густину честица присутних у базном уљу. Величина наночестица, утиче на њихову способност да продиру у микронеравнине контактних површина. Облик наночестица може варирати од сферичних и цевастих до ламеларних структура, што утиче на тип интеракције са трећим површинама. Поред тога, стабилност наночестица у базном медијуму је важан параметар, повезан са дисперзијом, агломерацијом и површинским својствима наночестица, који одређује њихово понашање током дуготрајне употребе [92].

Концентрација наночестица је параметар који непосредно утиче на триболошке карактеристике наномазива примењених у пужним преносницима снаге, где су услови рада специфични услед високог трења клизања, великих контактних притисака и релативно малих брзина окретања. Управо због тога, избор и оптимизација концентрације наночестица имају кључну улогу у повећању степена искоришћења, продужавању радног века, смањењу губитака снаге, хабања, буке и вибрација у овим преносницима снаге [41, 92].

Истраживања показују да додавање наночестица у базна мазива може значајно смањити трење и хабање у зони контакта пужа и пужног зупчаника, али да повећање концентрације не доводи увек до линеарног побољшања триболошких својстава. Прекомерна количина наночестица може довести до повећања вискозности мазива, нарушавања стабилности дисперзије и појаве агломерата који утичу на неравномерно подмазивање [106]. Не постоји универзална оптимална вредност концентрације – чак и при садржајима наночестица мањим од 1 мас.% или већим од 2 мас.% ефекат на смањење трења и хабања не мора бити пропорционалан [91].

Проучавање концентрације наночестица у контексту пужних преносника је значајно, јер оптимизација омогућава дефинисање концентрације која обезбеђује највећи степен искоришћења преноса снаге, уз минимално загревање и губитке услед трења. Одређивање оптималне вредности спроводи се систематским испитивањем параметара као што су коефицијент трења, температура у зони контакта и интензитет хабања зупчастих површина, при различитим концентрацијама наночестица у дефинисаној количини базног мазива [106]. На основу резултата оваквих испитивања могуће је прецизно идентификовати концентрацију која пружа најповољнији однос између побољшања триболошких својстава и очувања стабилности нанофлуида.

Експериментални резултати различитих истраживања указују на постојање оптималне концентрације наночестица при којој се постиже највеће смањење трења и хабања у пужним преносницима. Уочено је да се најбољи резултати остварују при ниским концентрацијама, обично у распону од 0,1 мас.% до 1 мас.%, где наночестице формирају заштитни трибофилм на контактним површинама, чиме се спречава адхезивно и абразивно хабање. При већим концентрацијама ефекат се често смањује, због појаве слепљивања наночестица и повећаног унутрашњег отпора при струјању мазива [52]. Одређивање оптималне количине CNT зависи и од вискозности, поларности и типа базног мазива (синтетичка, биљна или глицеролска основа) [107]. Микроскопски прикази различитих форми CNT адитива у мазивима су дати на слици 5.7.



Слика 5.7 Микроскопски прикази различитих форми CNT адитива у мазивима [45]

На концентрацију наночестица у базном мазиву у значајној мери утиче и врста и особине базног мазива. У циљу спровођења експерименталних истраживања и освајања нових мазива, врло је битно користити базну компоненту која има непромењен састав, није оптерећена другим адитивима и примесима, доста безбедна у раду и широко је распрострањена на тржишту. Узимајући у обзир наведене критеријуме, глицерол се намеће

као врло прихватљива базна компонента за развој нових генерација мазива.

Укупне погодности и предности примене глицерола као базне компоненте мазива са CNT адитивима су следеће [92]:

1. Хемијска компатибилност са CNT

Глицерол је поларно и вискозно течност, што омогућава добру дисперзију наноцеви. Код минералних или синтетичких уља, CNT имају тенденцију да више агломеришу (агломерација – процес када се наночестице спајају и формирају веће форме, што смањује њихову дисперзију и ефикасност у смањењу трења и хабања) јер су углавном неполарни, што отежава стабилно нано-микро подмазивање. Стабилна дисперзија је кључна, јер ако се CNT следе или слегну, губи се ефекат смањења трења и хабања.

2. Висок вискозитет и формирање филма

Глицерол има природно вишу вискозност од многих синтетичких уља при собној температури, што помаже у формирању уљног филма оптималне дебљине између зубаца. Адитиви CNT додатно појачавају носивост и формирање филма, па комбинација вискозности глицерола и механичких својстава CNT даје оптимизовано мазиво за висока оптерећења.

3. Термичка стабилност и хигроскопност

Глицерол може поднети промене температуре у радном опсегу зупчаника, посебно када је појачан CNT адитивима. Иако су хигроскопни (упијају воду), CNT помажу у заштити металних површина од директног контакта и хабања, па се негативни ефекти влаге ублажавају.

4. Синергија са наноадитивима

Адитиви CNT у глицеролу стварају самоподмазујући слој који додатно смањује трење. Код минералних уља или синтетичких базних уља, CNT понекад не формирају стабилан слој, јер хемијска интеракција са базом није оптимална. Дакле, глицерол са адитивима CNT даје максимални ефекат смањења трења и хабања, што је критично за прецизне и оптерећене зупчасте преносе.

5. Економичност

Глицерол је широко доступан, јефтин и једноставан за припрему мазива са наноадитивима. Синтетичка уља са одговарајућим својствима (дисперзија CNT, вискозитет, стабилност) су скупља и комплекснија за формулацију.

6. Еколошки и здравствени аспект

Са аспекта биокомпатибилности глицерол је нетоксичан и биоразградив, док многи минерални или синтетички базни флуиди садрже штетне адитиве или ароматске угљоводонике. Безбедност при раду са глицеролом је већа, због мање опасности од пожара и контаминације, што је важно у индустријским погонима и прехранбеној индустрији. На крају, употреба глицерола има мањи негативан утицај по околину и олакшава усаглашавање са стандардима заштите животне средине.

Са друге стране, ту су и потешкоће и недостаци примене глицерола као базне компоненте мазива са CNT адитивима [92]:

1. Ограничена термичка стабилност при изразито великим оптерећењима

Иако је глицерол хемијски стабилан при умереним температурама, при дуготрајном раду и повишеним температурама и великим оптерећењима у контактної зони пужних преносника може доћи до термичке деградације, што утиче на својства подмазивања и стабилност CNT дисперзије.

2. Компатибилност са металним површинама

Присуство CNT адитива у глицеролу може изазвати непожељне трибохемијске реакције са одређеним легурама пужних преносника, што може резултирати микрохабањем или накупљањем трибофилма који није у потпуности заштитни.

3. Ограничење у погледу степена искоришћења

Због високог вискозитетног отпора глицерола и могуће агломерације CNT, поједина смањења трења могу бити са мањим степеном искоришћења него код синтетичких базних уља, посебно при већим брзинама окретања пужа.

4. Потешкоће у стандардизацији и контролисаној производњи

Производња наномазива на бази глицерола са равномерно диспергованим CNT је технички изазовна, захтева прецизну контролу температуре и времена мешања, што отежава индустријску примену у пужним преносницима снаге.

5.5.2. Величина и облик наночестица у мазиву

Величина наночестица представља параметар који директно утиче на триболошке карактеристике наномазива, укључујући системе са угљеничним наночевима за пужне преноснике снаге. Мање честице лакше продиру у контактну зону, формирају заштитни слој и обезбеђују редукацију трења и хабања. Овај ефекат је у великој мери зависан од односа површина - обим наночестица, као и од њихове чврстоће, који индиректно условљавају триболошке карактеристике [108].

Наночестице се према величини деле на:

1. Велике наночестице (преко 100 nm)

У овом опсегу, смањење величине наночестица обично се прати повећањем чврстоће, у складу са класичним Хол–Печовим законом (енгл. *Hall–Petch law*), који описује појаву да се чврстоћа материјала повећава са смањењем величине зрна, јер границе зрна делују као баријере за кретање дефеката у кристалној решетки, чиме се ограничава њихово клизање и повећава отпор материјала према пластичној деформацији. Висока чврстоћа ових наночестица може довести до абразивног дејства на контактне површине, ако је чврстоћа наночестица већа од чврстоће материјала пужа и пужног преносника [52]. Тако, уље са великим, тврдим наночестицама може проузроковати микро удубљења и огреботине на пужу или пужном зупчанику, посебно при недовољној стабилности дисперзије [92, 108].

2. Средње наночестице (10–100 nm)

Ово је најчешће коришћени опсег за наномазива, јер омогућава довољно високу чврстоћу за формирање трибофилма, али без претеране абразивности. Средње величине наночестица обезбеђују оптималан компромис између механичке стабилности и способности продирања у микроканале контакта [92].

3. Мале наночестице (<10 nm)

У овом опсегу јавља се феномен инверзног Хол–Печовог закона, где смањење величине наночестица доводи до смањења чврстоће. Такве честице су мекше, али имају већу способност адсорпције на металним површинама и формирања танког, једноличног трибофилма. Међутим, превише мале честице могу бити склоне агломерацији и поновном спајању у току рада, што смањује ефикасност подмазивања [92].

Однос дужине и пречника (L/R) CNT представља кључни параметар који диктира њихово понашање у течним мазивима и крајњи триболошки ефекат у пужним преносницима. Типичне вредности L/R у литератури се крећу од неколико десетина до неколико хиљада. На пример MWCNT са пречником 5–50 nm и дужинама 0,5–10 μm дају $L/R \approx 10\text{--}2000$, док су SWCNT редом мањег пречника $\sim 0,8\text{--}2$ nm и често виших L/R

вредности, при чему ове вредности имају директан утицај на дисперзију, агломерацију, носивост и механизам подмазивања [109].

Када је L/R умерено велик (реда величине стотина), CNT могу деловати као ефективни „нано-ролери“ или структурални елементи који доприносе формирању континуираног заштитног филма и повећавају носивост контакта, што смањује коефицијент трења и хабање у пужним преносницима. Истовремено, већи L/R изазива склоност ка међусобном заплитању и агломерацији, што смањује стабилност дисперзије у поларним медијумима као што је глицерол. [49].

Код поларних, вискозних база попут глицерола, практична препорука заснована на емпиријским студијама је да се користе MWCNT дужине у опсегу приближно $0,5\text{--}5\ \mu\text{m}$ (L/R у стотинама за типичне пречнике), јер такав опсег обезбеђује компромис између добре механичке интеракције и задржавања прихватљиве дисперзије; дуже нанопеви ($>10\ \mu\text{m}$) и/или екстремно високи L/R често захтевају функционализацију или сурфактанте, да би се спречила агломерација [109].

За пужне преноснике препоручује се коришћење MWCNT са L/R реда величине стотина (дужине око десетина стотих μm до неколико μm , пречника неколико до десетина nm) у ниским концентрацијама и уз примену средства за дисперзију, након чега се очекује побољшање носивости и смањење трења без губитка стабилности мазива на бази глицерола [110].

Облик наночестица представља такође битан параметар који одређују ефикасност наномазива, нарочито у применама попут пужних преносника снаге. Различите геометријске конфигурације – сферне, цилиндричне, листасте, игличасте и цевасте – показују различите способности формирања заштитног трибофилма, структурне стабилности и интеракције са контактним површинама [111].

Најзаступљенији облици наночестица у својству адитива у мазивима су следећи:

1. Сферне наночестице

Сферне наночестице представљају најчешће коришћен облик у наномазивима, због њихове једнолике расподеле напрезања и лакоће кретања у контактної зони. Оне делују као микроскопски лежајеви, омогућавајући делимичну трансформацију трења клизања у трење котрљања, чиме се значајно смањује укупан коефицијент трења и хабање. Међутим, због ограничене контактне површине са металним материјалом, ефекат механичке заштите ових наночестица може бити мање изражен у односу на честице са већом издуженошћу или слојевитом структуром [92].

2. Цилиндричне и цевасте наночестице

Цилиндричне и цевасте наночестице, као што су угљеничне нанопеви, одликују се високим односом дужине и пречника, као и великом специфичном површином. Њихова једнодимензионална структура омогућава ефикасну расподелу оптерећења у контактної зони, чиме се смањују локални пикови притиска и повећава стабилност подмазивања. Предности овог облика огледају се у способности формирања издржљивог трибофилма који делује као заштитни слој или микроваљак између контактних површина, што смањује трење и продужава век трајања елемената пужног преносника. Међутим, њихова склоност ка агломерацији, посебно у вискозним базним течностима као што је глицерол, представља изазов у постизању стабилне и хомогене дисперзије [107].

3. Листасте наночестице

Листасти облици наночестица (попут графена и дисулфид молибдена — MoS_2) показују изузетну способност смањења трења због своје слојевите структуре. Они формирају филмове, који се састоје од више слојева способних да клизе један преко другог,

чиме се остварује низак коефицијент трења и побољшана заштита површина. Истраживања су показала да додавање графена са лиснатим наночестицама у базно уље може смањити трење и до 80 %, а хабање за 33 %. Ограничења овог облика огледају се у могућности ломљења листића под високим оптерећењем и зависности ефикасности од оријентације наночестица у контактної зони [52, 92].

4. Игличaste наночестице

Игличaste наночестице карактерише способност да продру у микронеравнине и микроканале контактних површина, што доприноси смањењу локалног трења и побољшању заптивености. Међутим, издужени облик може изазвати локално повећање абразивности, ако је тврдоћа наночестица већа од тврдоће контактнoг материјала, што може довести до микроскопских оштећења [92, 106].

Облик наночестица утиче на неколико кључних аспеката триболошког понашања [112]:

- Формирање трибофилма: цилиндричне и листасте честице ефикасно формирају заштитне филмове, док сферне и игличaste омогућавају равномерно попуњавање микропукотина.
- Стабилност дисперзије: облик одређује тенденцију ка седиментацији - сферне честице су најстабилније, док цевасте и листасте захтевају употребу стабилизатора и механичку дисперзију.
- Механичка ефикасност и абразивност: чврстоћа наночестица мора бити у складу са тврдоћом контактних површина, јер превелика разлика може изазвати огреботине и деформације.

Најбољи резултати се постижу комбинацијом сферних и цевастих наночестица, које обезбеђују баланс између стабилности, носивости и ефикасности подмазивања. Лиснате наночестице су погодне за примене где је кључно смањење трења, док игличaste могу допринети побољшаној заштити микрозона, уз опрез у дозирању, ради избегавања абразивних ефеката.

Облик наночестица има суштински утицај на начин њиховог деловања у зони контакта. Сферичне наночестице остварују тачкасти контакт са површином при оптерећењу, што омогућава делимично „ролинг“ деловање и смањење трења. Насупрот њима, листићи остварују линијски контакт, док наноплочиче формирају површински контакт, што омогућава равномернију расподелу оптерећења и ефикасније формирање заштитног трибофилма. Различити облици наночестица, према томе, одређују доминантан механизам подмазивања, тачкасти, линијски или површински контакт, што директно утиче на редукцију трења и хабања у наномазивима за пужне преноснике снаге, према шематском приказу на слици 5.8.



Слика 5.8 Шематски приказ врста контаката наночестица и површине на основу облика наночестица: (а) тачкасти контакт, (б) линијски контакт, (в) површински (планарни) контакт [113]

5.5.3. Стабилност и агломерација наночестица у мазиву

Да би се постигла стабилна структура наномазива намењених подмазивању пужних

преносника снаге, неопходно је обезбедити потпуну и хомогену дисперзију наночестица у базном уљу. Стабилност дисперзије наночестица представља сложену функцију више параметара, пре свега величине честица, густине и вискозности базног уља. Међу овим параметрима, величина наночестица има пресудан значај, јер она одређује динамику седиментације, степен агломерације и интеракцију између наночестица и молекула глицерола као базне компоненте мазива [92].

Стабилност дисперзије се одређује на основу стопе седиментације наночестица, која се може математички израчунати применом Стоуксовог закона (енгл. *Stokes' Law*). Према овом закону, брзина седиментације сферне честице у вискозној течности дата је изразом [114]:

$$V_z = \frac{2(\rho_{NP} - \rho_F)gr^2}{9\mu} \quad (5.1)$$

где су:

V_z – брзина седиментације,

r – полупречник наночестице,

ρ_{NP} – густина наночестице,

ρ_F – густина базне течности,

μ – динамички вискозитет базне течности и

g – убрзање земљине теже.

На основу наведене једначине може се закључити да је брзина седиментације директно пропорционална квадрату полупречника наночестице r^2 , док је обрнуто пропорционална вискозности течности μ . Сходно томе, смањење величине наночестица или повећање вискозности базне течности (што је карактеристично за глицерол) доводи до повећане стабилности суспензије и успореног таложења наночестица [108]. Примена Стоуксовог закона у прорачуну седиментације пружа користан теоријски основ за пројектовање и оптимизацију формулација наномазива, посебно у системима где је дуготрајна стабилност од критичног значаја за радну поузданост.

Истраживања су показала да наномазива која садрже наночестице мањих пречника (до 10 nm) постижу боље антихабајуће карактеристике и смањују трење у односу на оне са већим честицама, захваљујући повећаном односу површине и запремине и интензивнијој интеракцији у зони контакта [92].

Ова појава проистиче из Вандервалсових интеракција, односно слабијих међумолекулских сила које делују између суседних наночестица. Код угљеничних наноцеви, које поседују изразито развијену површину, ове силе изазивају спонтано привлачење и међусобно увезивање наноцеви у снопове. Последице, настају агломерати који се теже равномерно распоређују у вискозној бази као што је глицерол, што доводи до смањене ефикасности подмазивања и могућег локалног повећања трења [92, 113].

Иако се за постизање потпуно хомогене дисперзије често примењују сложене методе, као што су ултразвучна дисперзија, површинска функционализација или додавање сурфактаната, постоје и једноставније технике, које могу успорити процес агломерације и продужити стабилност наномазива у лабораторијским или експлоатационим условима. Један од најефикаснијих приступа је периодично ручно мешање мазива током складиштења, или непосредно пре примене. Ручно мешање, иако

енергетски неинтензивно, омогућава поновну дистрибуцију наночестица у базној течности и успорава њихово таложење. Додатно, механичко мешање на ниским брзинама, уз повремено загревање мазива до 40 °С до 50 °С, смањује вискозност глицерола и подстиче боље дисперговање CNT унутар мазива [115].

Стабилност дисперзије угљеничних наноцеви у глицеролским мазивима одређена је равнотежом између површинске енергије наноцеви и вискозности базне течности. Вандервалсове интеракције, иако релативно слабе појединачно, укупно производе снажан агломерациони ефекат који може нарушити ефикасност подмазивања. Једноставним поступцима, као што су периодично ручно мешање, благо загревање, или употреба благих сурфактаната, могуће је практично ублажити овај ефекат и продужити стабилност наномазива без примене скупе опреме. Такве методе су посебно значајне у примени еколошки прихватљивих мазива у пужним преносницима снаге, где је стабилност дисперзије предуслов за дуготрајну и поуздану експлоатацију.

5.6. Методе испитивања мазива са наночестицама

Укључивање угљеничних наноцеви (CNT) као адитива у мазива уводи нове изазове и захтеве у методологији испитивања, јер је неопходно не само проценити триболошке параметре (трење, хабање), већ и анализирати стабилност дисперзије, агломерацију наночестица, микро-структуру формираног трибофилма и међуинтеракције у систему мазиво – површина. Притом се све методе испитивања могу сврстати у две групе: класичне методе и напредне методе са аналитичким техникама.

1. Класичне триболошке методе

Тест на уређају са четири кугле (енгл. *four-ball test*) је једна од најраспрострањенијих метода која омогућава оцену хабања при испитивању мазива с адитивима. Тест се изводи тако што три челичне кугле стоје у конусној поставци, а четврта кугла ротира преко њих под оптерећењем. Мазиво са CNT адитивом се налази у контактної зони, где се мери коефицијент трења и величина хабања. Метода омогућава одређивање степена хабања и својстава мазива при високим притисцима. Тест је прилагођен за испитивање различитих концентрација CNT и типова наночестица (SWCNT, MWCNT). Могуће је анализирати трагове хабања микроскопски (SEM, оптички микроскоп) и измерити дубину и ширину хабања. Метода даје релативну оцену између различитих базних уља и адитива [116].

Тест на трибометру, игла на диску или кугла на диску (енгл. *pin on disk / ball on disk*) се реализује под контролисаним притиском и брзином, где се мазиво са CNT адитивима налази у контактної зони. Метода обезбеђује праћење промене коефицијента трења током времена. Може симулирати услове клизања који више одговарају реалним контактима у пужним преносницима. Даје могућност праћења формирања трибофилма и локалне деформације површине. У односу на претходну методу, лакше је контролисати температурне услове и подесити различита оптерећења, што омогућава испитивање динамичких промена [108].

Метода микроскопске и микроструктурне анализе (SEM, TEM, AFM, профилометрија) се реализује након триболошких испита, тако што се површине анализирају микроскопски. Анализа SEM омогућава визуализацију топографије површине, расподеле CNT и присуства агломерата. Анализа TEM (*Transmission Electron Microscopy*) пружа информације о унутрашњој структури наноцеви, дужини, пречнику и могућој деформацији након трења. Анализа AFM (*Atomic Force Microscopy*) омогућава мерење микрорелефа и детекцију нанометарских промена у површини. Профилометрија омогућава квантитативну анализу ширине и дубине хабања [117].

Реолошка и термофизичка испитивања обухватају мерење вискозитета, топлотне проводљивости и температурне стабилности мазива. Метода омогућава да се на основу

динамичког и кинематског вискозитета процени способност формирања уљног филма у контакту. Термалном анализом (TGA, DSC) открива се стабилност CNT и могуће деградације базног мазива. Испитивањем топлотне проводљивости и специфичне топлоте показује се способност мазива да елиминише топлоту и одржи контактну површину [118].

Испитивање стабилности дисперзије и агломерације представља методу којом се прати седиментација и врши визуелна анализа, у циљу мерења величине агломерата. Ова метода квантификује агломерацију CNT и предвиђа стабилност наномазива. Оптичка микроскопија, која је техника у склопу ове методе, омогућава праћење морфологије наночестица и појаву снопова, док техника ултразвучне спектроскопије омогућава праћење распада агломерата у реалном времену.

2. Напредне методе са аналитичким техникама

Спектроскопске методе (Raman, XRD, FTIR) пружају могућност анализе хемијске структуре и интегритета CNT. Raman спектроскопија обезбеђује детекцију дефеката и функционализације CNT. Метода XRD идентификује кристалне фазе мазива и анализира структурне стабилности. Метода FTIR утврђује хемијске интеракције CNT са базним мазивом или сурфактантом [119, 120].

Непосредни мониторинг и напредни сензори пружају континуирано мерење трења, температуре и дебљине трибофилма током рада. Омогућава праћење динамичких промена у контакту, као и детекцију локалних агломерата и промена у расподели CNT током рада. Ово је важна метода за пужне преноснике, где радни услови могу изазвати повећане локалне промене температура и брзина.

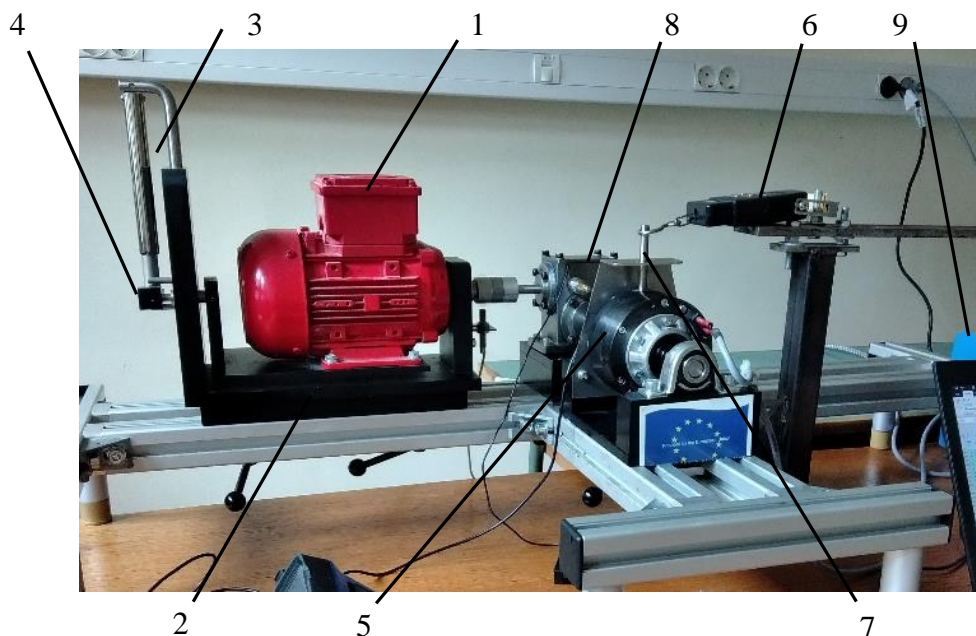
6. ПЛАН И СПРОВОЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСПИТИВАЊА

Циљ експерименталних испитивања пужног преносника снаге, у овој докторској дисертацији, је да се утврди утицај различитих врста мазива на његове радне карактеристике, као што су степен искоришћења, температура, бука и вибрације преносника снаге и хабање контактних површина. Променом састава мазива, посебно увођењем адитива попут угљеничних наноцеви, тежи се побољшању триболошке карактеристике и смањењу губитака снаге. Сврха ових испитивања је оптимизација избора мазива ради повећања поузданости, трајности и укупног степена искоришћења пужних преносника снаге у реалним условима рада.

Експерименти су реализовани из два сегмента. Први део испитивања је реализован у Центру за испитивање механичких преносника на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. Други део испитивања је реализован кроз испитивања на трибометру у лабораторији Катедре за технологију материјала на Машинском факултету Универзитета у Београду.

6.1. Опис мерне опреме за испитивање пужног преносника снаге

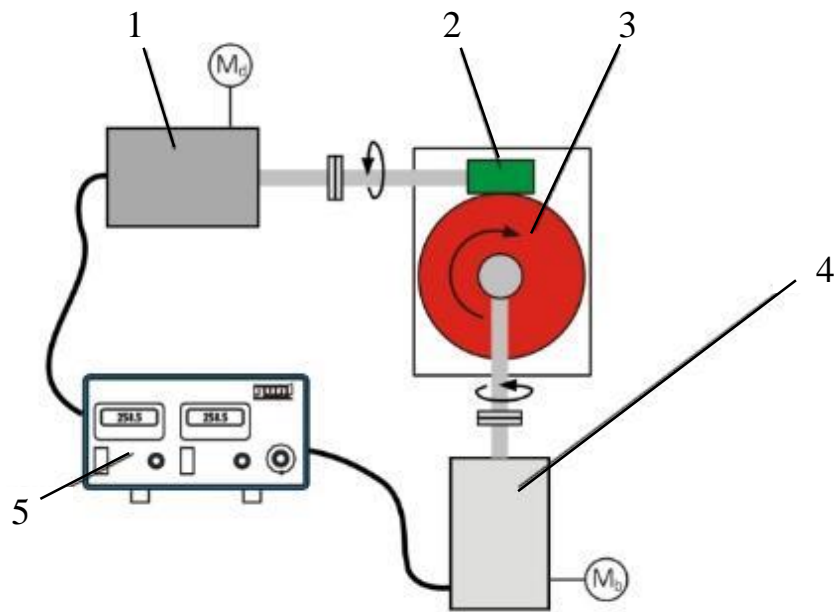
Испитивања на пужном преноснику снаге у Центру за испитивање механичких преносника снаге на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу реализована су на испитном столу G.U.N.T. AT 200 (слика 6.1). Испитни сто је намењен за испитивање коаксијалних и пужних редуктора. Димензије испитног стола су 1060×600×420 mm, а маса је 35 kg.



Слика 6.1 Испитни уређај AT200 са пратећом опремом: електромотор (1); постоље (2); динамометар на улазу (3); полуе (4); електромагнетна кочница (5); динамометар на излазу (6); полуе (7); пужни преносник (8); управљачки модул (9)

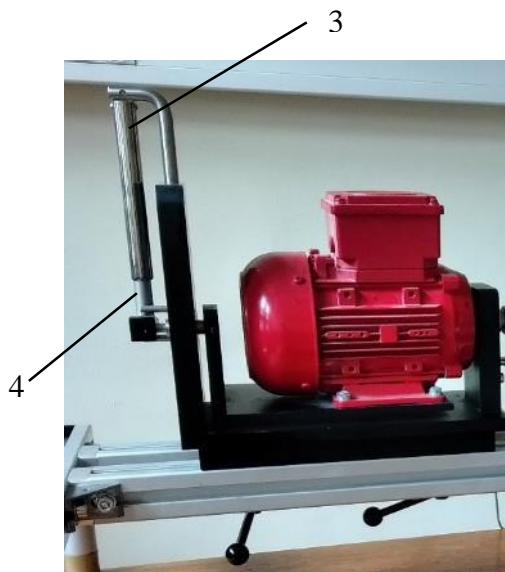
У циљу јаснијег приказа експерименталне опреме на слици 6.2 је приказан блок

дијаграм испитног стола датог на слици 6.1.

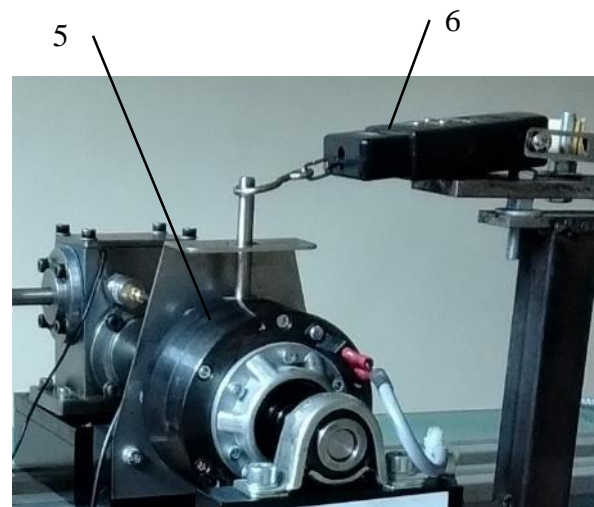


Слика 6.2 Блок дијаграм испитног уређаја AT200: електромотор (1); пуж (2); пужни зупчаник (3); електромагнетна кочница (4); управљачки модул (5) [121]

Вредност улазног обртног момента електромотора мери се индиректно, уз помоћ динамометра (3) који је постављен са фронталне стране кућишта и полуге (4) дужине 50 mm (слика 6.3). Када полука заузме хоризонталан положај, на динамометру се читава сила која уравнотежује систем, а положај инструмента се фиксира завртњем након постизања жељене вредности. Мерна скала динамометра омогућава читавање сила до максималне вредности од 25 N.



Слика 6.3 Динамометар са полугом



Слика 6.4 Електромагнетна кочница са динамометром

Регулација обртног момента на излазном вратилу пужног преносника снаге реализује се применом електромагнетне кочнице (5) приказане на слици 6.4. Овај

елемент је постављен на дводелно постоље, чија конструкција омогућава лаку адаптацију помоћу стезних полуга са ручицама и прикључење различитих типова редуктора (слика 6.4). Постоље кочнице је, преко система стезних полуга, фиксирано за главни рам уређаја, при чему је омогућено њено транслаторно померање дуж рама, уз обезбеђење спајања канцастим спојницама са излазним вратилом пужног преносника снаге. Вертикално померање елемената испитног стола је омогућено постављањем различитих уметака и подлошки, чиме се обезбеђује оптимално спајање свих елемената и саосност свих вратила електромотора, пужног преносника снаге и електромагнетне кочнице. Интензитет кочионе силе се одређује уз помоћ динамометра (6), који је спрегнут са полугом дужине 100 mm и служи за прецизно мерење оптерећења током рада система.

Регулација брзине ротације електромотора реализује се коришћењем управљачког модула (9) (слика 6.5). Бесконтактни индуктивни сензор померања, који региструје угаону брзину вратила, је уграђен на излазно вратило електромотора, док се жељене вредности подешавају потенциометром смештеним на контролном модулу. Интензитет кочионе силе се такође контролише путем истог модула, при чему се регулисањем јачине електричне струје омогућава постизање максималног кочионог момента од 10 Nm. Број обртаја и јачина електричне струје се приказују дигитално. Управљачки модул поседује два потенциометра и то један за регулисање броја обртаја излазног вратила електромотора (1), у опсегу $0 - 3000 \text{ min}^{-1}$ и други за регулисање јачине електричне струје (2) на електромагнетној кочници у опсегу $0 - 0,37 \text{ A}$, чиме се директно управља оптерећењем на излазном вратилу пужног преносника снаге. За случај опасности или других непредвиђених ситуација управљачки модул поседује прекидач (3) за тренутни прекид рада комплетног модула и једновремени прекид рада испитне станице. Управљачки модул је димензија $420 \times 450 \times 180 \text{ mm}$, а маса је 5 kg [31].



Слика 6.5 Управљачки модул

6.2. Испитивање степена искоришћења

Једна од кључних величина, чија се промена прати током експеримента у различитим радним условима, је степен искоришћења. Степен искоришћења пужног преносника снаге се добија као однос излазне и улазне снаге, при чему су математички изрази за његово израчунавање приказани у каталогу за уређај GUNT AT200 [121].

Улазна снага пужног преносника снаге P_1 се израчунава као производ улазног обртног момента T_1 и угаоне брзине улазног вратила ω_1 , према следећој једначини:

$$P_1 = T_1 \cdot \omega_1 \quad (6.1)$$

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{60} \quad (6.2)$$

где се наведене величине изражавају у следећим јединицама: P_1 [W], T_1 [Nm], ω_1 [s⁻¹] и n_1 [min⁻¹]. Величина n_1 представља улазну угаону брзину.

При томе се улазни обртни момент електромотора добија као производ силе која се читава на динамометру (3) и дужине полуге (4) у тренутку када се постигне уравнотежење полуге, односно када се полука нађе у хоризонталном положају. Улазни обртни T_1 момент је приказан формулом:

$$T_1 = F_1 \cdot l_p \quad (6.3)$$

где l_p представља дужину полуге на динамометру постављеном на улазно вратило електромотора, а изражава се у mm.

Услед механичких и топлотних губитака насталих у механичком преноснику снаге, снага на излазном вратилу је мања у односу на снагу на улазном вратилу за величину наведених губитака. Снага на излазном вратилу се добија према формули:

$$P_2 = T_2 \cdot \omega_2 \quad (6.4)$$

$$\omega_2 = \frac{\pi \cdot n_2}{60} \quad (6.5)$$

где се наведене величине изражавају у следећим јединицама: P_2 [W], T_2 [Nm], ω_2 [s⁻¹] и n_2 [min⁻¹]. Величина n_2 представља излазну угаону брзину.

Из наведеног произилази да се обртни момент на излазном вратилу добија као производ кочионе силе F_2 очитане на динамометру (7) који се поставља на полуку електромагнетне кочнице (6) и дужине полуге на електромагнетној кочници l_k , што је приказано у следећој једначини:

$$T_2 = F_2 \cdot l_k \quad (6.6)$$

где l_k представља дужину полуге на електромагнетној кочници, а изражава се у mm.

Једна од кључних величина, чија је промена посматрана током експеримента, је степен искоришћења пужног преносника снаге. Наиме, степен искоришћења се прорачунава из односа снаге на излазном вратилу пужног преносника снаге и снаге на улазном вратилу, према следећем изразу:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (6.7)$$

Прорачун степена искоришћења је изведен из претходних величина, односно на основу измерених улазних и излазних сила F_1 и F_2 , да би потом био приказан у форми табеларног прегледа у програмском пакету *Microsoft Excel*, за обе комбинације материјала пужног пара, за све врсте примењеног мазива и све режиме рада током експеримента.

6.3. Мерење буке пужног преносника снаге

Бука је током испитивања мерена инструментом за мерење нивоа буке (звучног притиска) TROTEC BS06 који је приказан на слици 6.6. Овај уређај прецизно детектује звук у мерном опсегу од 40 dB до 130 dB (31,5 Hz до 8 kHz), уз резолуцију од 0,1 dB, време читавања од 125 ms, за примену у температурном опсегу од 0 °C до 40 °C, уз тачност мерења ±3,5 dB. Уређај се одликује могућношћу приказивања максималне,

минималне и средње измерене вредности током мерног циклуса, поседује аутоматско позадинско осветљење екрана, има ергономски дизајн, као и заштиту од спољних утицаја (ветра и слично), што у лабораторијским условима није од великог значаја [122].



Слика 6.6 Инструмент за мерење нивоа буке TROTEC BS06

Уређај за мерење буке је, током свих циклуса експеримента, постављен на хоризонталну површину испитног стола на удаљености 300 mm од пужног преносника снаге. Током експеримента је инструмент изолован од свих осталих извора звука у лабораторији, осим буке коју је стварала опрема током мерења.

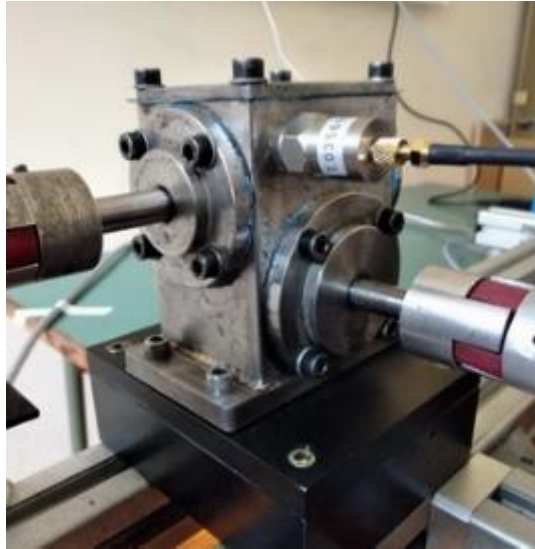
6.4. Мерење вибрација пужног преносника снаге

Мерење вибрација је вршено уређајем виброметром VB-8216SD, приказаним на слици 6.7. Виброметар врши мерење убрзања вибрација у опсегу од $0,5 \text{ m/s}^2$ до $199,9 \text{ m/s}^2$, уз резолуцију од $0,1 \text{ m/s}^2$, време читавања од 1 s, за примену у температурном опсегу од $0 \text{ }^\circ\text{C}$ до $50 \text{ }^\circ\text{C}$, уз тачност мерења од $\pm 5 \%$ [123].



Слика 6.7 Инструмент за мерење вибрација VB-8216SD

Виброметар је постављен на хоризонталну површину испитног стола на удаљености 400 mm од пужног преносника снаге, при чему је сонда виброметра током целокупног експеримента постављена на исту позицију на пужном преноснику снаге, приближно, што је приказано на слици 6.8 [31].



Слика 6.8 Начин постављања сонде виброметра на пужни преносник снаге

6.5. Мерење температуре пужног преносника снаге

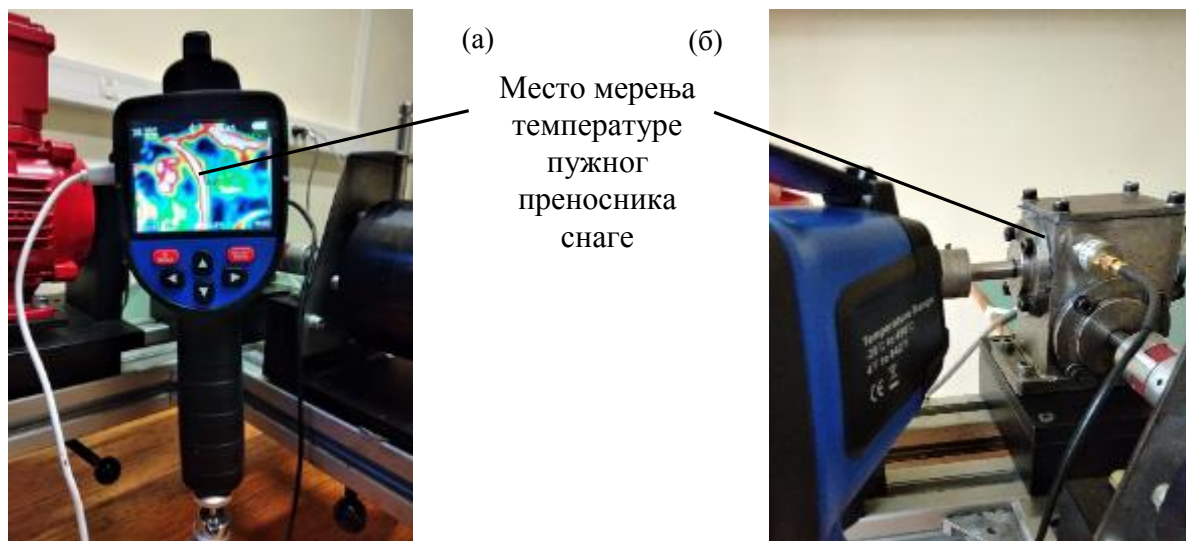
Температура пужног преносника снаге је мерена термовизијском камером FLUS IR-895 (слика 6.9). Намена ове камере је бесконтактно мерење и визуализација температуре површина, откривање прегревања електричних инсталација, мотора, лежајева и механичких компоненти, проналажење топлотних губитака, контрола у истраживању и развоју, као и у лабораторијским условима. Основне карактеристике су: инфрацрвена резолуција 120×160 пиксела, приказна LCD резолуција 320×240 пиксела, видно поље $25^\circ \times 26^\circ$, термална осетљивост $0,07^\circ\text{C}$, температурни опсег -20°C до $+450^\circ\text{C}$, тачност мерења $\pm 2\%$ вредности или 2°C [124].



Слика 6.9 Термовизијска камера FLUS IR-895

Мерење температуре термовизијском камером је вршено постављањем камере на сталак и њеним усмеравањем у исту тачку на пужном преноснику снаге током целокупног експеримента, како би мерни услови били идентични, што је приказано на слици 6.10. Температура је мерена у зони заптивача на кућишту пужног преносника, где је начелно читавана највиша температура на читавом пужном преноснику снаге, не рачунајући покретне делове преносника снаге, у виду улазног и излазног вратила пужног

преносника снаге. Ова тачка је изабрана за референтно мерење, између осталог и због тога што представља тачку на кућишту преносника снаге, на којој се очитава температура најприближније температури мазива у преноснику снаге [31].



Слика 6.10 Мерење температуре пужног преносника снаге: (а) термовизијска камера FLUS IR-895 постављена на сталку и усмерена на тачку мерења температуре, (б) приказ места мерења температуре

6.6. Мерење масе, хабања и хrapавости делова пужног преносника снаге

Мерење губитака масе делова пужног преносника снаге (пужног зупчаника и пужа) током испитивања има кључан значај за процену њихове отпорности на хабање. Ови губици директно указују на ефикасност подмазивања и квалитет употребљених мазива. Подаци о промени масе омогућавају поређење различитих материјала преносника снаге, различитих мазива и радних услова у реалним експлоатационим режимима. Испитивање се најчешће врши прецизним мерењем пре и после одређеног броја радних циклуса. Добијени резултати служе за оптимизацију конструкције и избора мазива, ради продужетка радног века преносника.

У циљу утврђивања интензитета хабања елемената пужног преносника снага, вршено је мерење масе пужа и пужног зупчаника пре и на крају циклуса испитивања са сваком, од укупно 7 врста мазива. Мерења масе су вршена на ваги PS 1000.R2 приказаној на слици 6.11. Максимална маса која се може мерити на ваги је 1000 g, а минимална маса 20 mg. Тачност ваге је 1 mg, време стабилизације приликом мерења је 2 s, а температура околине у којој се користи вага је од +10 °C до +40 °C [125].

Имајући у виду да је пуж израђен од цементираног челика, а пужни зупчаник од две врсте бронзе, током испитивања је дошло до незнатног смањења масе пужа, док су, што је и очекивано, смањења масе пужног зупчаника услед хабања била знатно већа. Тиме је интензитет хабања делова пужног преносника снаге током експеримента, праћен тежишно кроз смањење масе пужног зупчаника. Непосредно пре мерења извршено је уравнотежење ваге. Мерења су вршена тако што је свака маса мерена 3 пута, након чега је узимана средња вредност измерене масе.



Слика 6.11 Вага за мерење масе PS 1000.R2

Битно је истаћи да је, непосредно пре мерења масе, сваки пут вршено испуштање искоришћеног мазива, демонтажа и расклапање пужног преносника снаге, чишћење и прање свих делова, а потом и ултразвучно испирање делова. Наведено чишћење и испирање вршено је уклањањем остатака мазива са свих површина, ради припреме пужног преносника снаге за наредни циклус испитивања са новим мазивом, али и да би се што тачније измерила маса пужа и пужног зупчаника.

За ултразвучно испирање делова је коришћена ултразвучна када *Vabsonic SB-4LDD* приказана на слици 6.12. Намењена је професионалној употреби, опремљена механичким тајмером који омогућава подешавање трајања рада до 30 минута, као и грејачем и термостатом за регулисање температуре течности до 60°C. Унутрашња запремина уређаја износи 4 литра, дубина резервоара 150 mm, а снага каде је 480 W [126]. Снажан ултразвучни генератор ултразвучне каде, у комбинацији са пиезо претварачима, обезбеђује равномерно ширење и одговарајућу густину ултразвучних таласа, који током процеса прања темељно чисте све површине делова пужног преносника снаге. Прање је вршено у циклусима од по 15 минута уз постизање температуре од 60°C.

За детерцентни раствор у кади је коришћен *DURcleaner*, концентровано течност средство за одмашћивање делова. Најпре је припремљен раствор средства *DURcleaner* и воде (дејонизоване или деминерализоване) у концентрацији од 10 %. Након загревања раствора на потребну температуру 60 °C, делови пужног преносника снаге су потопљени у ултразвучну каду и започет је процес прања. По завршетку поступка, раствор је замењен када је постао замућен, након чега је ултразвучно прање поновљено. По окончању чишћења, делови су испрани чистом водом и осушени убрисом и ваздухом из вентилатора.



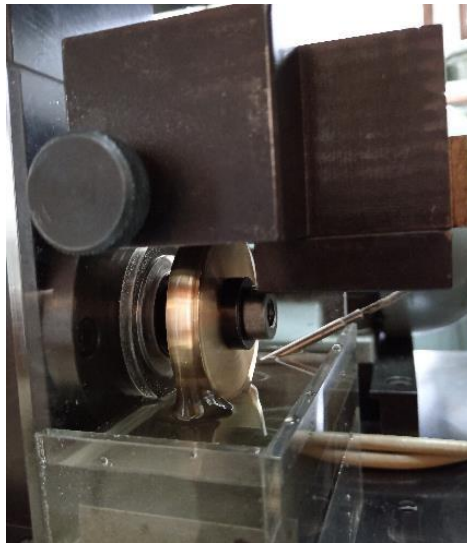
Слика 6.12 Ултразвучна када Vabsonic SB-4LDD

Експериментално испитивање степена искоришћења, буке, вибрација, промене температуре и хабања пужног преносника снаге изведено је у Центру за испитивање механичких преносника на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. За експерименте је коришћен једностепени пужни преносник са осовинским растојањем од 31 mm. Преносник је монтиран на уређај намењен испитивању степена искоришћења зупчастих преносника снаге [31].

Испитивања хабања и хрпавости материјала пужних зупчаника изведена су у моделским условима користећи рачунарски подржан трибометар TPD-95, опремљен контактном геометријом „блок-диск“, у Лабораторији за трибологију Машинског факултета у Београду (слика 6.13). Трибометар омогућава систематско проучавање триболошких особина различитих материјала под променљивим радним условима, како у присуству мазива, тако и у сувом трењу, а његове карактеристике су приказане у табели 6.1. Конфигурација „блок - диск“ ствара контактну линију која репрезентује стварне услове контакта између зубаца пужа и пужног зупчаника (слика 6.14).

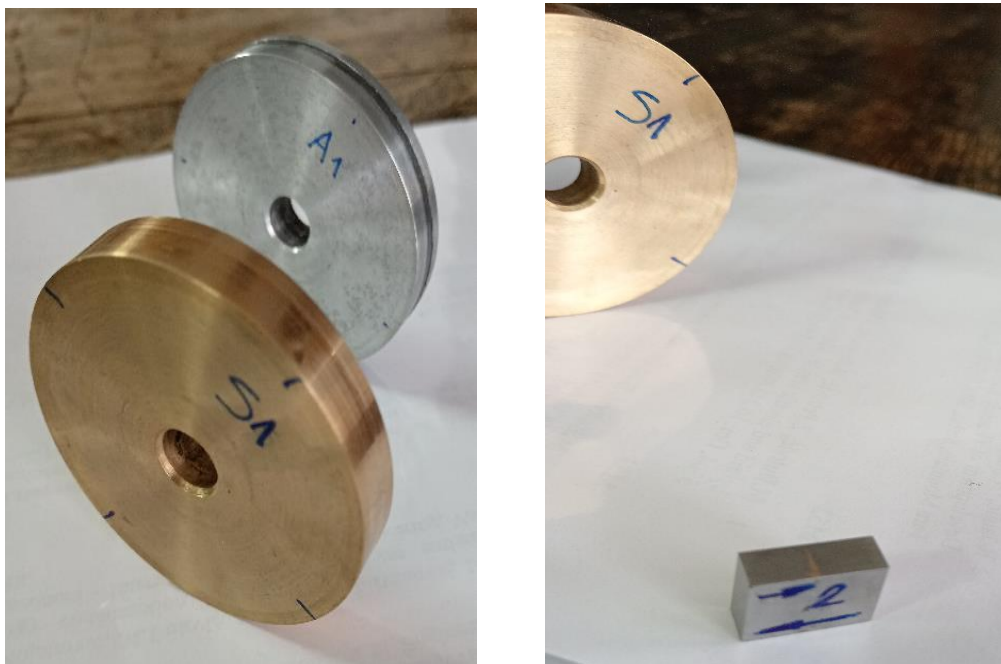


Слика 6.13 Приказ трибометра TPD 95 са мерним уређајима и дијагностичком опремом



Слика 6.14 Приказ испитивања диска од калајне бронзе $CuSn14$ и плочице од челика $20CrMo5$ (Џ.4321) на трибометру TPD 95

Позиционирањем блока и диска уз одговарајућа подешавања обезбеђује се контролисан и непосредан контакт између испитиваних површина, омогућавајући прецизна мерења триболошких параметара. На слици 6.15 приказани су дискови и плочице, након реализованих испитивања, према плану испитивања, приказаном у табели 6.2. Укупно је испитивано 4 диска од калајне бронзе $CuSn14$ и 4 диска од цинк-алуминијум бронзе ZA-12. Плочице су израђене од челика $20CrMo5$, за испитивање у комбинацији са сваким појединачним бронзаним диском.



Слика 6.15 Изглед дискова од бронзе и плочица од челика након испитивања на трибометру TPD 95

Табела 6.1 Основне техничке карактеристике трибометра TPD 95 примењене у експерименту

Произвођач	Српско триболошко друштво
Примена	Одређивање триболошких карактеристика у условима клизања сувих или подмазиваних површина
Изразне величине	Коефицијент трења, пређени пут, величина хабања, температура мазива, контактна температура
Димензије узорка	Блок: 5,5 × 16 × 12 mm Диск: Ø 55,5 × 10 mm, пречник отвора Ø 10 mm
Врста контакта	По површини
Технички подаци	Нормална сила: до 300 N Температура: собна Брзина клизања: 0,46 m/s

Материјали употребљени за триболошка испитивања су плочице од цементираног челика 20CrMo5 (С.4321) димензија 5,5×16×12 mm и дискови од калајне бронзе CuSn14 и цинк–алуминијумске бронзе ZA-12 димензија Ø 55,5×10 mm, пречник отвора Ø 10 mm.

Плочице су површинске тврдоће од 57,8 HRC, док су дискови површинске тврдоће 92 HB од калајне бронзе CuSn14 и 148 HB од цинк–алуминијумске бронзе ZA-12.

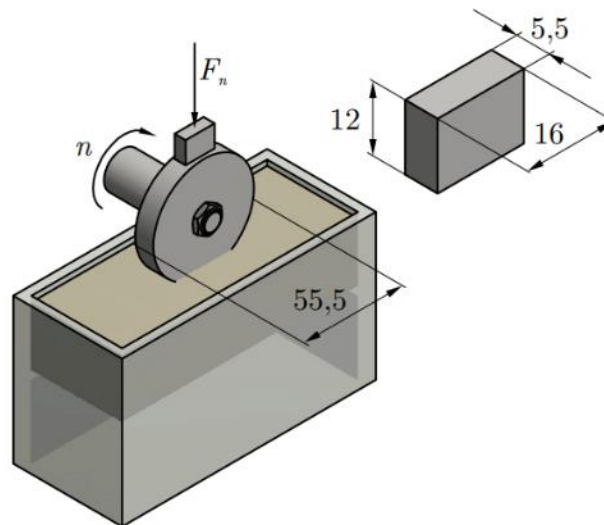
Подмазивање контактних површина извршено је применом мазива на бази глицерола са CNT адитивима у процентима 0,1 мас.%, 0,2 мас.%, 0,5 мас.%, 1,0 мас.% и 2,0 мас.%.

Испитивања су реализована у условима линијског контакта и чистог клизања. Триболошки систем је чинио ротирајући диск и стационарна плочица (блок), као што се види на сликама 6.14 и 6.16. Подмазивање је обезбеђено потапањем ротирајућег прстена у уљни резервоар (слика 6.16), док је хлађење мазива остварено природном циркулацијом околног ваздуха. Након завршетка испитивања, похабане контактне површине блокова анализирани су помоћу оптичког микроскопа и скенирајућег електронског микроскопа.

Саставни делови трибометра TPD-95 су [88]:

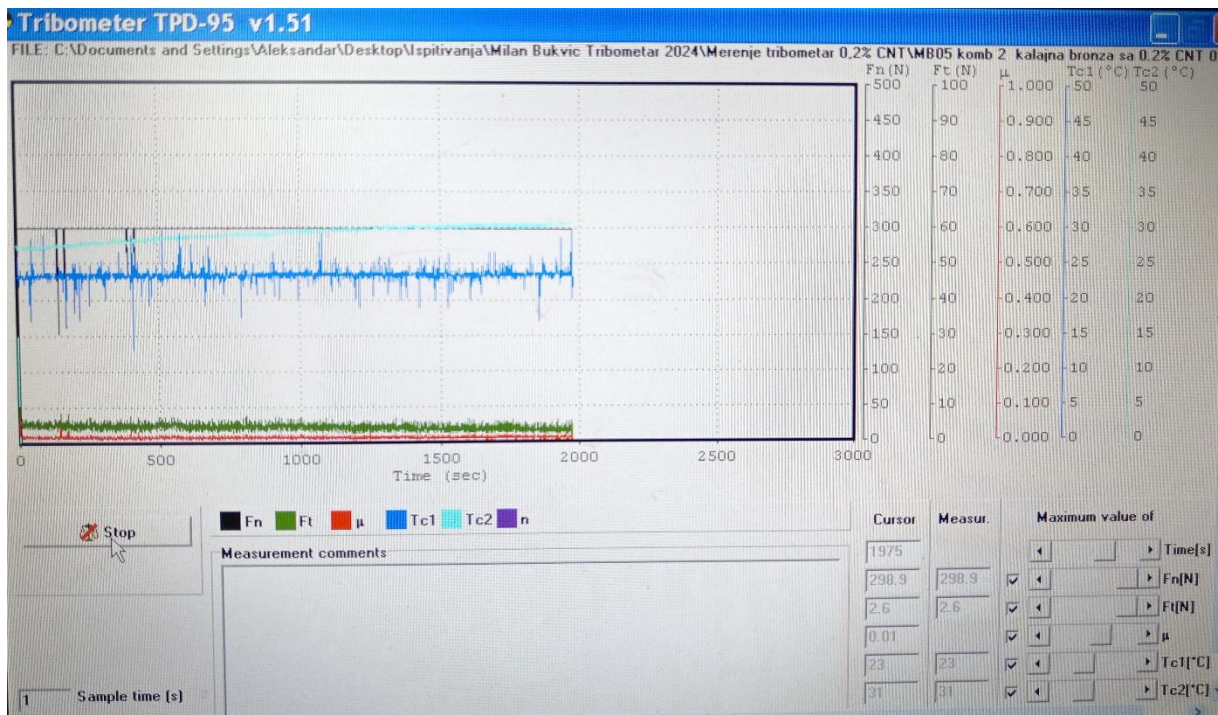
- Погонски систем, који обухвата електромотор, каишни преносник и варијатор, омогућавајући подешавање брзине клизања у интервалу од 0,1 m/s до 5 m/s.
- Систем за задавање оптерећења, састављен од система полуга и тегова, који дозвољава постизање оптерећења до 450 N.
- Систем за подмазивање, који се састоји од посуде испуњене мазивом до одређеног нивоа; диск делимично уроњен у мазиво својим ротационим кретањем доводи мазиво у зону контакта (слика 6.16).

- Мерни систем, који обухвата стандардну мерну и рачунарску опрему, обезбеђујући прецизну евалуацију триболошких параметара.



Слика 6.16 Шематски приказ рада трибометра TPD-95

Мерења су вршена за сваку појединачну комбинацију челичне плочице и бронзаног диска и за сва мазива са различитим процентима CNT адитива. Време мерења, по циклусу испитивања, за сваку мерну комбинацију је износило 2000 s, при нормалној сили од 300 N и температури околине од $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Угаона брзина диска је 160 min^{-1} , а брзина клизања је 0,46 m/s. За приказ резултата коришћен је софтвер TRIBOMETER TPD-95 v1.51, при чему је један од добијених резултата приказан на екрану на слици 6.17.



Слика 6.17 Приказ прикупљања резултата испитивања силе трења, коефицијента трења и температуре уља за узорак диска од бронзе ZA-12

Табела 6.2 План испитивања хабања и храпавости

Улазни број обрађаја, n , min^{-1}	Нормална сила, F_n , N	Време циклуса мерења, t , h	Триболошки пар	Концентрација CNT адитива у мазиву, мас.%				
				0,1 мас.%	0,2 мас.%	0,5 мас.%	1,0 мас.%	2,0 мас.%
160	300	2000	челик 20CrMo5/ калајна бронза CuSn14	*	*	*	*	*
			челик 20CrMo5/ цинк- алуминијум бронза ZA- 12	*	*	*	*	*

Храпавост контактних површина мерена је методом контактне профилometriје употребом уређаја за мерење храпавости TR-200, како је приказано на слици 6.18, у потпуности у складу са захтевима стандарда ISO 4288 [137].



Слика 6.18 Приказ мерења храпавости диска од бронзе ZA-12 уређајем TR-200

Профилометар TR-200 обезбеђује све услове за прецизно и поуздано мерење храпавости површина, а његове карактеристике су приказане у табели 6.3. Помоћу овог уређаја могуће је испитивати најразличитије површине материјала, што га чини погодним за широк спектар примене у индустријским и лабораторијским условима. Уређај омогућава мерење до 13 различитих параметара површине, а добијени резултати се могу пренети на рачунар, ради даљих анализа и документације. Ово је посебно корисно при серијским мерењима, као што су улазна контрола испоручених делова, или када се уређај користи за праћење квалитета сопствених производа у погонским лабораторијама.

Табела 6.3 Основне техничке карактеристике профилометра TR-200

Мерни параметри	$R_a, R_z, R_q, R_t, R_p, R_{max}, R_m, R_{3z}, S, S_m, S_k, t_p, P_c$
Профили	Нефилтрирани примарни профил (P -профил), профил храпавости (R -профил) и крива удела материјала (Tr -крива) представљају основне параметре за анализу површинске текстуре, који омогућавају свеобухватну оцену геометрије и квалитета испитиване површине.
Повећање профила	$V_v: 200 \times - 20000 \times; V_h: 20 \times, 50 \times, 200 \times$
Стандарди	Према ISO/ DIN/ JIS/ ANSI (бира се у менију)
Мерна подручја	$R_a, R_q: 0,01 - 40,0 \mu\text{m}; R_z, R_p, R_t, R_{3z}: 0,02 - 80 \mu\text{m}, S_m, S: 2 - 4000 \mu\text{m}; t_p: 1 - 100 \% (\% R_y)$
Резолуција	$0,001 \mu\text{m} / 0,04 \mu\text{inch}$ (по избору)
Тачност	Класа 2 према DIN 4772
Граничне таласне дужине	$0,25 \text{ mm} / 0,8 \text{ mm} / 2,5 \text{ mm}$
Сензор, мерни принцип	Стандардни модел TS100, индуктивно, дијамантска игла, радијус $5 \mu\text{m}$ (опционо $2 \mu\text{m}$).
Радна температура	Од $0 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+40 \text{ }^\circ\text{C}$

Дужина узорковања l_p износи $0,25 \text{ mm}$, док је дужина вредновања профила дефинисана као $L_{pr} = 7 \cdot l_{pr}$, односно $1,75 \text{ mm}$. Мерење површинске храпавости извођено је нормално на правац финалне механичке обраде узорака, чиме је обезбеђена репрезентативност и метролошка поузданост добијених параметара.

За потребе анализе издвојен је карактеристични параметар - средње аритметичко одступање оцењеног профила од средње линије R_a , који описује микрогеometriју површине.

Овај показатељ представља најшире примењив параметар храпавости у инжењерској пракси [137]. Он се дефинише као аритметичка средња вредност апсолутних одступања тачака испитиваног профила у односу на средњу линију профила. Средња линија се најчешће одређује методом најмањих квадрата на основу скупа измерених координата, иако се може формирати и применом стандардизованих филтера. Уколико се измерени профил описује функцијом $z = f(x)$ у односу на средњу линију профила, а L_p представља дужину вредновања профила, тада се параметар R_a дефинише се следећом једначином користећи стандард ISO 21920-3:2021 [138]:

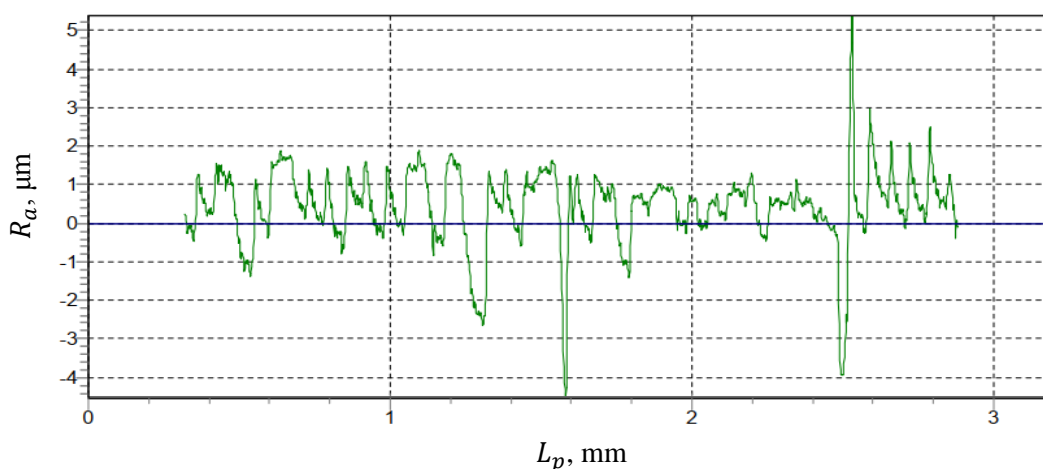
$$R_a = \frac{1}{L_p} \int_1^{L_p} |z(x)| dx \quad (6.8)$$

Ипак, потребно је нагласити да се наведена релација односи на континуалну

функцију $f(x)$. У реалним условима мерења храпавости контактних површина профил није непрекидан, већ је описан дискретним низом измерених тачака $z_i(x)$. Сходно томе, параметар R_a се у дискретном облику представља као [136]:

$$R_a = \frac{1}{L_p} \sum_{i=1}^N |z_i(x)| \quad (6.9)$$

при чему N означава укупан број дискретних мерних тачака, распоређених у оквиру дужине вредновања профила L_p . Контактни профилометар, употребљен у овом истраживању, врши евалуацију профила на основу скупа од 3500 дискретних тачака измерених унутар дефинисане дужине вредновања. На слици 6.19 је приказана скица мерења параметра храпавости R_a на дужини вредновања профила од 3 mm.



Слика 6.19 Скица мерења храпавости површина

6.7. Одређивање карактеристика примењеног пужног преносника снаге

У експерименту су коришћена два цилиндрична пужна пара идентичних геометријских карактеристика. Пуж представља погонски елемент и постављен је изнад пужног зупчаника под углом од 90° , у симетричном распореду у односу на лежајеве. Пуж је израђен од цементираног челика 20CrMo5, који је термички обрађен и брушен, при чему су пужеви истих димензија и истог материјала коришћени за оба пужна пара. Пужни зупчаници су израђени од две врсте бронзе и то, калајне бронзе CuSn14 и цинк алуминијумска бронза ZA-12 (RAR12). Механичке карактеристике пужа и две врсте пужних зупчаника су приказане у табелама 6.4, 6.5 и 6.6.

Челик 20CrMo5 представља легирани конструкциони челик са значајним садржајем хрома и молибдена, који омогућава побољшане механичке особине у поређењу са угљеничним челиком. Ова легура се одликује високом чврстоћом, жилавошћу и отпорношћу на заморно оптерећење, чиме је погодна за примену у компонентама које подлежу динамичким и ударним оптерећењима.

У практичној примени, 20CrMo5 се користи за осовине, зупчанике, клипове, делове трансмисија и друге елементе под оптерећењем, где је потребан оптималан однос између чврстоће и пластичности. Механичка својства челика могу се значајно модификовати термичком обрадом каљењем и отпуштањем, што омогућава контролу границе течења, чврстоће на затезање и жилавости. Таква комбинација легуре и термичке

обраде чини челик 20CrMo5 погодним за примену у високонапонским и машинским системима где су механичка стабилност и отпорност на замор кључни критеријуми [128]. Пуж израђен од наведеног челика, коришћен у експерименту, је приказан на слици 6.20.

Табела 6.4 Механичке карактеристике челика 20CrMo5 (Ћ.4321) према стандардима EN 10084 и DIN 17210 [127]

Карактеристике	Ознака величине, јединице	Вредност (стандардна)	Напомена
Хемијски састав	-	C: 0,17 – 0,22 % Mn: 1,10 – 1,40 % Cr: 1,00 – 1,30 % Si ≤ 0,40 % P ≤ 0,025 % S ≤ 0,035 %	Према стандарду DIN EN 10084
Густина	P, kg/m ³	≈ 7850	-
Модул еластичности	E, GPa	210	-
Напон течења (основни материјал, без цементације)	R _{p0,2} , MPa	350 – 500	Зависи од стања термичке обраде
Затезна чврстоћа	R _m , MPa	600 – 800	Стање пре обраде
		900 – 1100	После цементације и каљења
Тврдоћа после цементације	HV / HRC	58 – 62 HRC (≈ 700 – 800 HV)	Површинска зона после цементације
Тврдоћа језгра	HB	180 – 250	После цементације и отпуштања
Дубина цементираног слоја	mm	0,8 – 1,2	Типична вредност за дубину ефективног слоја (550 HV)
Ударна жилавост (језгро)	KV, J	35 – 45 (на +20 °C)	Измерено на Charpy V узорку
Температура каљења	°C	820 – 860	У уљу
Температура отпуштања	°C	150 – 200	После каљења, ради смањења унутрашњих напрезања



Слика 6.20 Пуж израђен од челика 20CrMo5

Легура CuSn14 представља висококалајну бронзу која се одликује великом отпорношћу на хабање и корозију, уз релативно ограничену пластичност. Због својих физичко-механичких својстава, ова легура налази примену у компонентама које захтевају поуздан рад под термичким и механичким напорима, као што су опружни елементи, лежајеви, клизни прстенови, зупчаници и делови изложени ударним оптерећењима.

Својства CuSn14 могу се даље модификовати путем термичке обраде жарењем, што омогућава повећање жилавости материјала, док хладна деформација резултује побољшаном чврстоћом. Ова комбинација легуре и контролисаних обрада чини CuSn14 погодним за примену у захтевним машинским и индустријским системима где је потребан баланс између издржљивости, корозионе отпорности и механичке стабилности [130].

Пужни зупчаник који је израђен од калајне бронзе и коришћен у експерименту је приказан на слици 6.21 [31].



Слика 6.21 Пужни зупчаник израђен од калајне бронзе CuSn14

Табела 6.5 Механичке карактеристике калајне бронзе CuSn14 према стандардима EN 1982 и DIN 17662[129]

Карактеристике	Ознака величине / јединице	Вредност (стандардна)	Напомена
Хемијски састав	-	Cu: 85,0 – 86,5 % Sn: 13,0 – 15,0 % Pb ≤ 0,05 % Zn ≤ 0,2 % P ≤ 0,05 % Fe ≤ 0,1 %	Према EN 1982
Густина	ρ , kg/m ³	≈ 8800	На 20 °C
Модул еластичности	E, GPa	100 – 110	-
Напон течења	R _{p0,2} , МПа	180 – 350	
Затезна чврстоћа	R _m , МПа	350 – 550	Зависи од стања (ливено, хладно деформисано, жарено)
Издужење	A ₅ , % A ₅ – издужење узорка, величине 5 дужина пречника узорка, пре лома на тесту истезања	5 – 15	Веће код жарених стања
Тврдоћа	НВ	90 – 150	У зависности од стања и деформације
Ударна жилавост	KV, J/cm ²	6 – 12	Средње вредности, добра жилавост за бронзе
Температура топљења	°C	910 – 1020	Зависи од садржаја Sn
Топлотна проводљивост	W/m·K	50 – 60	На собној температури
Електрична проводљивост	% IACS енгл. IACS - <i>International Annealed Copper Standard</i>	6 – 9	У поређењу са чистим бавром
Коефицијент линеарног ширења	10 ⁻⁶ /K	17 – 18	20°C – 300 °C

Легуре на бази цинка и алуминијума, познате као ZA легуре, представљају групу материјала која комбинује повољне механичке и триболошке особине (табела 6.6), омогућавајући широки спектар њихове примене у компонентама под оптерећењем, као што су пужни зупчаници, лежајеви, клизни прстенови, зупчаници и други елементи који раде при граничном подмазивању. Легура ZA-12 се издваја као једна од најчешће коришћених због оптималног односа између тврдоће, чврстоће и отпорности на хабање, уз задовољавајућу могућност машинске обраде.

Табела 6.6 Механичке карактеристике цинк-алуминијум бронзе ZA-12 (RAR12) [131]

Карактеристике	Ознака величине / јединице	Вредност (стандардна)	Напомена
Хемијски састав	-	Al: 9,0 – 14,0 % Cu: 0,5 – 1,5 % Mg: 0,01 – 0,03 % Pb ≤ 0,004 % Cd ≤ 0,003 % Sn ≤ 0,002 % Fe ≤ 0,075 % Zn остатак	-
Густина	ρ , kg/m ³	≈ 6030	-
Модул еластичности	E, GPa	82 – 83	-
Напон течења	R _{p0,2} , МПа	≈ 317	-
Затезна чврстоћа	R _m , МПа	≈ 450	За ливење у калупу
Издужење	A ₅ , % A ₅ – издужење узорка, величине 5 дужина пречника узорка, пре лома на тесту истезања	≈ 4,7	Клизање при прекиду
Тврдоћа	НВ	≈ 95 – 115	За добру термичку обраду/ливење
Ударна жилавост	KV, J/cm ²	25 – 29	-
Температура топљења	°C	377 – 432	-
Топлотна проводљивост	W/m·K	113 – 120	-
Електрична проводљивост	% IACS енгл. IACS - <i>International Annealed Copper Standard</i>	28,3	У поређењу са чистим бакром
Коефицијент линеарног ширења	10 ⁻⁶ /K	13,4	При ниским температурама

Механичка својства ЗА легура значајно зависе од садржаја алуминијума у легури, који се креће у границама 8 % – 27 %. Повећање удела алуминијума прати раст тврдоће и затезне чврстоће, уз истовремено смањење издужења. Ова тенденција је присутна и при повишеним температурама, при чему долази до благог смањења затезне чврстоће и повећања издужења. Повећан садржај алуминијума директно доприноси повећању отпорности на хабање, што је кључно за компоненте које раде при граничном подмазивању и високим контактним оптерећењима.

Легуре ЗА поседују и друге значајне предности у односу на класичне бакарне легуре:

- Смањена густина у поређењу са калајном бронзом, што резултира мањом масом компоненти.
- Нижа температура ливења, што омогућава лакше и економичније производне процесе.
- Висока тврдоћа у комбинацији са одличним могућностима машинске обраде, омогућавајући постизање високих радних карактеристика без додатних технолошких ограничења.
- Економичност производње, где се трошкови смањују за 25% – 50 % у поређењу са калајном бронзом и за 40 % – 75 % у односу на алуминијумске легуре.

Међутим, ЗА легуре имају и одређена ограничења и недостатке у поређењу са калајном бронзом:

- Смањена отпорност на високе температуре (>100 °C), што ограничава примену у термички интензивним окружењима.
- Мања пластичност и жилавост у односу на CuSn легуре, што може бити критично код компоненти под ударним и цикличким оптерећењима.
- Склоност ка појави прелина при локализованом оптерећењу, ако се не обезбеди адекватно подмазивање или контролисана топлотна обрада.

Области примене ЗА легура, са посебним освртом на ЗА-12 су следеће: машински делови са високим контактним оптерећењем, пужни зупчаници, клизни прстенови, лежајеви и кућишта механизма, делови изложени корозији у морској води, захваљујући отпорности легуре на оксидацију и хабање, компоненте за аутоматизацију у индустрији и електро-механичке уређаје као што су опружни елементи, зупчаници и делови прецизних механизма.

Пужни зупчаник који је израђен од цинк–алуминијум бронзе ЗА-12 (RAR12) и коришћен у експерименту је приказан на слици 6.22.



Слика 6.22 Пужни зупчаник од бронзе ZA-12

Кућиште пужног преносника снаге израђено је као заварена конструкција од угљеничног челика, при чему сам материјал кућишта нема посебан утицај на радне карактеристике пужног преносника снаге (слика 6.23) [31].



Слика 6.23 Изглед кућишта испитиваног пужног преносника снаге

У оквиру докторске дисертације спроведена су систематска истраживања усмерена на поређење карактеристика пужних парова са елементима израђеним од калајне бронзе CuSn14 и цинк-алуминијум легуре ZA-12. Један од циљева ових испитивања био је процена утицаја материјала на радне карактеристике пужних преносника, са посебним освртом на степен искоришћења, интензитет хабања, појаву вибрација и буке, као и промене температуре у контактним зонама током експеримента.

Истраживања су усмерена ка разумевању начина на који својства изабраних легура одређују триболошко понашање пужних парова, са циљем проучавања њиховог утицаја на степен искоришћења, стабилност и дуговечност механичког система. Поредиће традиционалну калајну бронзу и савременију цинк-алуминијум бронзу,

студија има за циљ да идентификује материјалне аспекте који директно утичу на оптимизацију зупчастог пара, смањење трења и хабања, као и на побољшање радних карактеристика преносника при различитим режимима рада, односно различитим брзинама и оптерећењима.

Материјали који су коришћени у процесу израде компоненти пужног преносника снаге су пажљиво одабрани, како би се обезбедила оптимална комбинација механичких, триболошких и термичких својстава. Пре свега, цементиран челик и две врсте бронзе, као примарни конструкциони материјали, набављени су од предузећа „RAR DOO“ из Београда, која је обезбедила материјале у складу са важећим стандардима квалитета и техничким спецификацијама. Избор ових материјала омогућио је испитивање карактеристика пужног преносника у условима реалног оптерећења и различитих режима рада, уз посебан нагласак на отпорност на хабање, степен искоришћења и ограничење буке и вибрација.

Производња пужног преносника реализована је у предузећу „V.A.G. PRO-RED GROUP DOO“ из Београда, која је обезбедила прецизну израду компоненти према техничким цртежима и порачунима. Поступак производње је такав да гарантује стандардизоване геометријске и материјалне карактеристике сваке компоненте, чиме се обезбеђује поновљивост резултата и тачност експерименталних испитивања.

Део заптивних елемената и еластичних компоненти спојница, који представљају критичан сегмент за ефикасно подмазивање, очување триболошких својстава пужног пара, али и за ублажавање буке и вибрација обезбедило је предузеће „Termoplast“ из Београда. Применом ових заптивача омогућено је континуирано одржавање контакта мазива у критичним зонама, смањење губитака снаге услед трења и стабиловање радне температуре, што има директан утицај на карактеристике преносника у експерименталним условима.

Целокупни процес набавке материјала, производње компоненти и интеграције заптивних елемената остварен је тако да обезбеди комплетан и репрезентативан систем за испитивање, омогућавајући дубинску анализу утицаја различитих материјала на радне карактеристике пужног преносника снаге. Овај приступ омогућио је не само процену триболошких и механичких својстава материјала, већ и систематско испитивање њиховог утицаја на степен искоришћења, хабање, вибрације, буку и промене температуре у различитим режимима рада, што представља основни сегмент дисертације.

6.8. Одређивање геометријских карактеристика пужног преносника снаге

За обе комбинације пужа и пужног зупчаника, односно за различите врсте пужних зупчаника, коришћени су пужни преносници снаге идентичних димензија. Прорачун геометријских величина и моделирање пужног преносника снаге је реализовано у програмском пакету за табеларне прорачуне и CAD софтверу.

Резултати извршених прорачуна представљени су у табели 6.7, која систематски приказује добијене вредности и омогућава њихову даљу анализу у контексту постављених истраживачких циљева [88].

Табела 6.7 Преглед геометријских величина пужног преносника снаге добијених прорачуном

Величина	Ознака	Јединица	Вредност
Тип пужа	-	-	ZI
Број зубаца пужа	z_1	-	1
Број зубаца пужног зупчаника	z_2	-	18
Осно растојање	a	mm	31
Преносни однос	i	-	18
Аксијални модул	m	mm	2
Модул у нормалном пресеку	m_n	mm	1,993
Ход завојнице пужа	P_{zp}	mm	6,2832
Угао завојнице пужа на средњем цилиндру	γ_m	°	4,7636
Угао алата	α_0	°	20
Пужни број	q	-	12
Коефицијент померања профила	x	-	0,5
Пречник средње кружнице пужа	d_{m1}	mm	24
Пречник средње кружнице пужног зупчаника	d_{m2}	mm	38
Пречник подеоне кружнице пужа	d_1	mm	26
Пречник подеоне кружнице пужног зупчаника	d_2	mm	36
Пречник темене кружнице пужа	d_{a1}	mm	28
Пречник темене кружнице пужног зупчаника	d_{a2}	mm	42
Пречник подножне кружнице пужа	d_{f1}	mm	19,2
Пречник подножне кружнице пужног зупчаника	d_{f2}	mm	33,2
Спољашњи пречник пужног зупчаника	d_e	mm	44
Дужина пужа	L	mm	30
Ширина пужног зупчаника	b_2	mm	18
Ширина пужног зупчаника	b_{2H}	mm	20
Растојање између ослонаца	l_1	mm	70

У Прилогу 1 су приказани технички цртежи на основу којих је израђен пужни преносник снаге, узимајући у обзир и величине наведене у табели 6.7.

У циљу квалитетнијег визуелног приказа испитиваног преносника снаге, пужног преносника, у Прилогу 2 су приказани модели пројектованог и израђеног пужног преносника снаге у различитим погледима и пресецима.

6.9. Уља за подмазивање пужног преносника снаге

Подмазивање пужног пара је реализовано потапањем пужа и пужног зупчаника, на тај начин што је ниво мазира прелазио изнад линије контакта зубаца пужа и пужног зупчаника, како би се обезбедило оптимално подмазивање. Имајући у виду конструкцију

пужног преносника и међусобан распоред његових елемената, наливање мазива је вршено скидањем горњег поклопца кућишта и наливањем око 55 ml мазива.

Комерцијално уље за зупчасте преноснике Reduktol Super ISO VG 460 произвођача рафинерије нафте Модрича је коришћено као референтно мазиво, ради поређења са радним карактеристикама добијеним применом мазива на бази глицерола са CNT адитивима.

Уље Reduktol Super ISO VG 460 припада групи вискозних индустријских мазива, намењених подмазивању затворених зупчастих преносника, а његове карактеристике у потпуности су усклађене са критеријумима стандарда ISO 12925-1. Ова спецификација одређује домен техничке примене уља за зупчасте редукторе, као и прописане вискозитетне разреде и функционалне захтеве, који гарантују стабилан рад механизма под променљивим оптерећењем. Формулација Reduktola Super ISO VG 460 заснована је на минералним базним уљима високог индекса вискозности, која су додатно обogaћена адитивима отпорним на екстремне притиске. Ови EP адитиви, базирани на фосфорним и сумпорним једињењима, при повишеним притисцима и температурама, хемијски реагују са металним контактним површинама, стварајући заштитни слој који значајно умањује хабање. На тај начин се подржава ефикасан рад зупчастих парова у условима граничног или мешовитог подмазивања, где би без адитива дошло до убрзаног оштећења. Једно од кључних својстава овог уља је изузетна отпорност на термичку и оксидациону деградацију. Комбинација квалитетне базне компоненте и ефикасних стабилизатора спречава настајање наслага, смањује брзину распадања уља на високим температурама и одржава стабилност вискозности током продуженог рада. Ово обезбеђује равномерно подмазивање, смањене губитке снаге и дужи експлоатациони век критичних делова редуктора. Вискозни разред 460 одабран је са циљем формирања поузданог подмазујућег филма при већим оптерећењима и умереним до ниским обртним брзинама, чиме се обезбеђује сигуран рад механизма и у условима ударних и променљивих динамичких напрезања.

Мазива на бази глицерола са различитим концентрацијама адитива угљеничних наноцеви, у распону од 0 мас.%, 0,1 мас.%, 0,2 мас.%, 0,5 мас.%, 1,0 мас.% и 2,0 мас.%, обезбеђена су од стране Катедре за технологију материјала Машинског факултета у Београду. Ова серија узорака представља резултат заједничког истраживачког рада реализованог у сарадњи са научницима из више релевантних институција у Србији и Мађарској, чиме је омогућено интегрисање националних и међународних научноистраживачких капацитета у домену развоја напредних еколошких мазива.

Технологија добијања наведених глицеролских мазива модификованих CNT адитивима заснива се на применама мање сложених и контролисаних метода дисперзије наноматеријала у поларној бази, при чему се обезбеђује хомогена расподела наночестица у читавој запремини мазива. Као доминантна једноставнија техника у добијању оваквих нанофлуида користи се механичко, ручно или магнетно мешање високе ефикасности и по потреби, краткотрајна употреба ултразвучне методе, којом се превазилазе агломерациони ефекти карактеристични за угљеничне наноструктуре.

Чување добијених узорака захтева примену процедура које гарантују конзистентност хемијског и структурног стања мазива током времена. Уобичајена пракса подразумева чување узорака у тамним, херметички затвореним стакленим или пластичним посудама, како би се минимизирали процеси оксидације и контаминације, што је током експеримента и урађено. Складиштење је обављено на стабилној собној температури, без излагања директном светлу или топлотним изворима који би могли утицати на реолошка и термохемијска својства глицеролске базе или на стабилност CNT

дисперзије.

На овај начин припремљена и очувана мазива представљала су репрезентативан материјал за систематска триболошка испитивања, омогућавајући анализу утицаја концентрације CNT адитива на радне карактеристике пужног преносника снаге.

У циљу смањења агломерације угљеничних наноцеви у бази вршено је механичко мешање, ради одржавања хомогености суспензије. Одржавање стабилне температуре током чувања и припреме мазива је такође помагало да се смањи седиментација и задржи вискозност мазива.

На основу доступних истраживања формирана је табела 6.8 са експерименталним вредностима вискозности глицеролског базног уља са CNT адитивима на температурама од 40 °C и 100 °C. Стандардизоване су методе за одређивање вискозности мазива са додатком CNT адитива, за различите групе концентрације CNT адитива и то: ниске до 0,2 мас.%, средње до 1,0 мас.% и високе 2,0 мас.% CNT и више [132 -134].

Табела 6.8 Емпиријске вредности вискозности глицеролског базног мазива са CNT адитивима на температурама од 40 °C и 100 °C

Уље, концентрација CNT	Вискозност при 40 °C, mPa·s	Вискозност при 100 °C, mPa·s	Коментар	Метода мерења вискозности
0 мас.%	780 – 820	180 – 200	Чисти глицерол	Метода капиларног вискозиметра (ASTM D445)
0,1 мас.%	795 – 835	185 – 205	Мало повећање вискозности услед CNT	
0,2 мас.%	810 – 860	190 – 215	Лагано појачано повећање вискозности	
0,5 мас.%	850 – 900	200 – 230	Видљив утицај CNT, формирање микромреже	Стабингер вискозиметар (ASTM D7042)
1,0 мас.%	920 – 980	220 – 260	Вискозност значајно порасла, боља стабилност филма	
2,0 мас.%	1050 – 1150	250 – 310	Висока густина, могући ризик од агломерације	Ротациони реометар
Уље Reduktol Super ISO VG 460	414 – 506	–	Уље високог вискозитета за тешке услове рада и оптерећења	-

Кинематска вискозност ν у интервалу температура од приближно 0,1 °C до 100 °C може се аналитички интерполирати на основу познатих вредности кинематске вискозности испитиваног мазива на 40 °C и 100 °C. Прорачун се спроводи применом одговарајуће корелационе једначине која повезује температурну зависност вискозности са референтним тачкама унутар наведеног топлотног опсега [60]:

$$\nu = 10^C - 0,7 \quad (6.10)$$

где је C константа која се одређује применом одговарајућег израза који дефинише њену вредност у зависности од одговарајућих параметара према следећем обрасцу [60]:

$$C = 10^{A \log(\nu+273)+B} \quad (6.11)$$

У оквиру једначине (6.11), параметри A и B представљају константе система чије се вредности утврђују применом одговарајућих аналитичких формула, сходно Валтеровој једначини [60]:

$$A = -13,129 \cdot \log\left(\frac{\log(\nu_{40}+0,7)}{\log(\nu_{100}+0,7)}\right) \quad (6.12)$$

$$B = \log(\log(\nu_{40} + 0,7)) - 2,496 \cdot A \quad (6.13)$$

Константе A , B и C служе као параметри за квантитативно одређивање кинематске вискозности уља на радним температурама, што је од кључне важности за прорачун губитака снаге у пужним преносницима.

Радна температура представља функцију више међусобно повезаних фактора, међу којима се посебно издвајају температура околине, радни режим преносника снаге (број обртаја и вредност обртног момента), као и вискозност примењеног мазива. Наведени параметри се заједнички разматрају у оквиру прорачуна радне температуре, у циљу добијања поуздане и реалне процене температурних промена у експлоатационим условима.

Радна температура је мерена термовизијском камером и то у зони заптивача на кућишту пужног преносника снаге, како је и приказано на слици 6.10 б. Измерена температура у наведеној зони је приближна температури уља, односно температури у зони контакта пужа и пужног зупчаника. Наведена температура је из наведених разлога меродавна за прорачун вискозности уља, као и за коефицијент трења пужног пара.

Радна температура уља ϑ_s у великој мери утиче на формирање уљног филма између зубаца пужа и пужног зупчаника. Пораст радне температуре доводи до смањења вискозности уља, што доводи до смањења дебљине уљног филма. Услед наведеног, настаје повећање коефицијента трења, што условљава пораст губитака снаге у спреси зубаца пужа и пужног зупчаника. Радна температура уља је приказана следећом једначином [60]:

$$\vartheta_s = \vartheta_0 + c_1 \cdot \left(\frac{T_2 \cdot K_A}{(a/63)^3}\right) + c_0 \quad (6.14)$$

где су:

ϑ_0 – температура околине,

c_0 – корекциони температурни коефицијент,

c_1 – коефицијент термичког оптерећења преносника,

T_2 – обртни момент пужног зупчаника,

K_A – фактор радних услова,

a – осно растојање.

Коефицијенти c_0 и c_1 су приказани следећим једначинама за случај када се кућиште преносника не хлади додатно вентилатором [60]:

$$c_0 = \frac{5,23}{100} \left(\frac{n_1}{60} + 0,28 \right)^{0,68} \cdot \left(\left| \frac{v_{40}}{100} - 2,203 \right| \right)^{0,0237} \cdot (a + 22,36)^{0,915} \quad (6.15)$$

$$c_1 = \frac{3,4}{100} \left(\frac{n_1}{60} + 0,22 \right)^{0,43} \cdot \left(10,8 - \frac{v_{40}}{100} \right)^{-0,0636} \cdot (a - 20,4)^{0,26} \cdot u^{-0,18} \quad (6.16)$$

Табела 6.9 Вредности фактора радних услова K_A [60]

Карактер промене обртног момента радне машине	Погонска машина			
	Електромотор	Турбомотор	Вишецилин. клипни мотор	Једноцил. клипни мотор
Равномеран	1	1,25	1,5	1,75
Са малим ударима	1,1	1,35	1,6	1,85
Са средњим ударима	1,25	1,5	1,75	2
Са јаким ударима	1,5	1,75	2	2,25
Подела радних машина према карактеру променљивости обртног момента:				
Равномерна промена	Електромотори, равномерно оптерећени транспортери, погон помоћног кретања код алатних машина, мешалице за материјале исте густине и мале вискозности.			
Са малим ударима	Турбокомпресори, центрифугалне пумпе, лифтови, лаке дизалице, мешалице за материјале исте густине и веће вискозности, неравномерно оптерећени транспортери.			
Са средњим ударима	Теже дизалице и кранови, погони главних кретања у алатним машинама, мешалице материјала неједнаке густине и велике вискозности, вишецилиндричне клипне пумпе, клипни компресори, лаки млинови са куглама, обртне пећи.			
Са јаким ударима	Багери, тешки млинови са куглама, дробилице, ваљаоничке машине, пресе за цигле и брикет, ваљаонички станови за хладно ваљање, машине за сечење и просецање лима, уређаји за бушење у нафтној индустрији.			

Фактор K_A зависи од радних услова, односно пре свега од карактеристика погонске машине, а његове вредности су приказане у табели 6.9.

На основу једначина од (6.11), (6.12), (6.13) и (6.14) добија се кинематска вискозност мазива коришћеног у експерименту, чије су вредности приказане у табелама 6.10 и 6.11.

Табела 6.10 Кинематска вискозност мазива за различите режиме рада пужног преносника са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14

Улазни број обротаја, n_1, min^{-1}	Излазни обртни момент, T_2, Nm	Кинематска вискозност, $\nu, \text{mm}^2/\text{s}$						
		0 мас. %	0,1 мас. %	0,2 мас. %	0,5 мас. %	1,0 мас. %	2,0 мас. %	Reduktol 460
1500	1,256	696,41	705,51	759,9	837,49	924,78	1058,18	431,3
	1,930	666,41	697,77	747,3	796,14	893,84	1010,82	403,9
	2,648	670,07	697,77	714,9	809,64	883,8	1022,41	400,99
	3,335	648,45	678,84	687,94	757,22	844,99	955,13	375,88
	4,038	607,68	664,15	673,08	732,55	812,7	923,49	352,65
2000	1,308	696,41	709,43	718,86	782,9	869	993,71	392,4
	1,943	641,43	682,58	710,97	774,23	859,3	982,5	382,4
	2,519	614,25	625,69	684,19	744,77	840,28	939,15	370,56
	3,369	604,42	618,99	665,8	740,67	830,97	933,9	360,19
	4,140	614,25	602,61	644,52	697,34	786,2	883,24	335,78
2500	1,385	637,95	682,58	722,84	787,29	883,8	999,37	392,4
	1,934	591,61	649,84	695,52	748,89	844,99	944,44	367,94
	2,585	573,01	609,1	641,06	693,56	773,34	863,91	335,78
	3,341	566,96	586,76	651,52	697,34	760,74	878,36	335,78
	4,078	552,19	536,53	601,17	660,59	756,59	835,85	319,88

С обзиром да је вискозност мазива у корелацији са температуром, у табелама 6.11 и 6.12 су приказане прорачунате и измерене вредности температуре мазива за све радне услове и сва коришћена мазива за пужни преносник са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14. Из наведених табела се уочава да су измерене вредности температура нешто више од прорачунатих температура (просечно 0,4 до 1,1 °C), у свим режимима рада и за сва мазива. Ово се може објаснити тиме што емпиријске формуле подразумевају константно оптерећење, равномерно хлађење и стандардне услове околине. У реалном систему поред варирања оптерећења, постоје и додатни губици, одвођење топлоте није константно и температура мазива у свим зонама није идентична. Поред наведеног, измерене вредности температуре у табели 6.11 су вредности на крају сваког периода мерења од 1,5 h. Вредности кинематске вискозности мазива у табели 6.10 су прорачунате за измерене вредности температуре мазива.

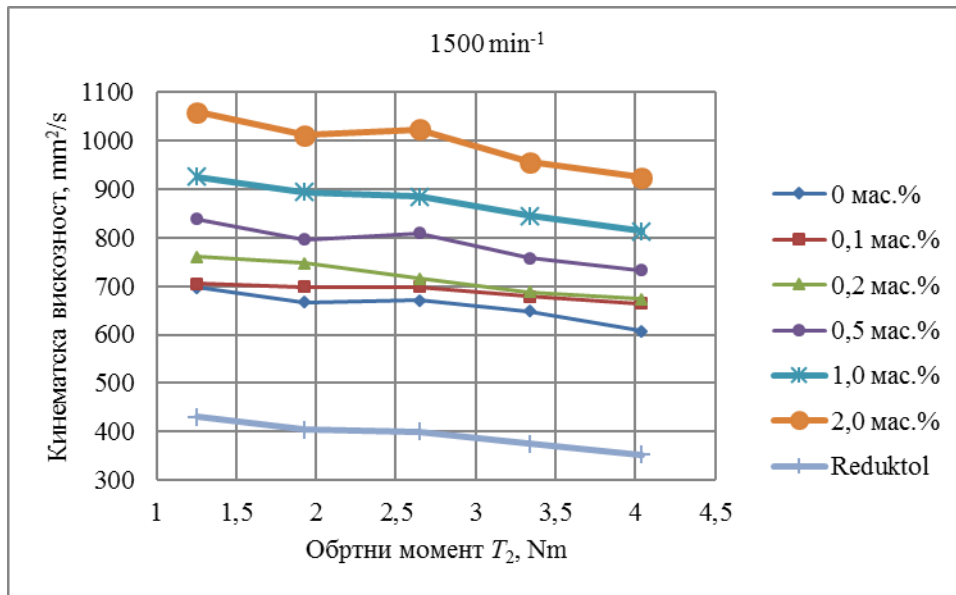
Табела 6.11 Прорачунате температуре мазива за различите режиме рада пужног преносника са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14

Улазни број обраћаја, n_1, min^{-1}	Изразни обртни момент, T_2, Nm	Измерена температура мазива, $t, ^\circ\text{C}$						
		0 мас. %	0,1 мас. %	0,2 мас. %	0,5 мас. %	1,0 мас. %	2,0 мас. %	Reduktol 460
1500	1,256	43,2	42,9	42	41,1	40,8	41	41,2
	1,930	43,6	43,1	42,3	42	41,4	41,8	42,1
	2,648	43,8	43,3	43,1	42,6	41,6	42,1	42,5
	3,335	44,1	43,6	43,4	43,1	42,4	42,8	43,2
	4,038	45,3	44	43,7	43,5	43,1	43,4	43,7
2000	1,308	43,5	42,8	42,6	42,3	41,9	42,1	42,5
	1,943	44,3	43,5	43,2	42,5	42,1	42,3	42,8
	2,519	45,1	44,8	43,9	43,2	42,5	43,1	43,3
	3,369	45,4	45,3	44,4	43,6	42,7	43,2	43,7
	4,140	45,7	45,5	45	44,4	43,7	44,2	44,7
2500	1,385	44,4	43,5	42,9	42,2	41,6	42	42,5
	1,934	45,8	44,4	43,6	43,1	42,4	43	43,4
	2,585	46,4	45,6	45,1	44,5	44	44,2	44,7
	3,341	46,6	46,3	45,8	44,8	44,3	44,6	44,9
	4,078	47,1	46,8	46,3	45,4	44,9	45,2	45,4

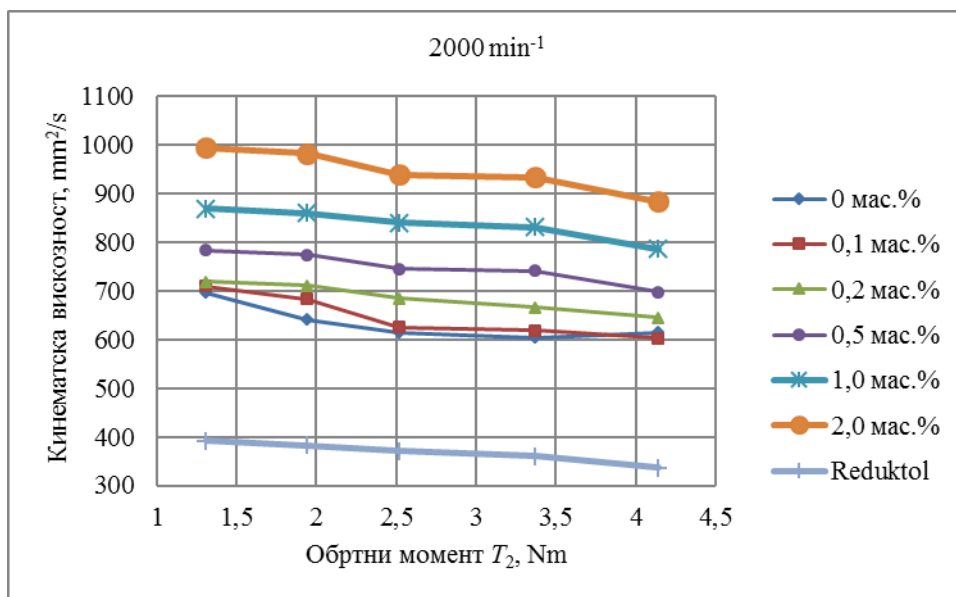
Табела 6.12 Измерене температуре мазива за различите режиме рада пужног преносника са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14

Улазни број обратаја, n_1, min^{-1}	Излазни обртни момент, T_2, Nm	Измерена температура мазива, $t, ^\circ\text{C}$						
		0 мас. %	0,1 мас. %	0,2 мас. %	0,5 мас. %	1,0 мас. %	2,0 мас. %	Reduktol 460
1500	1,256	43,2	43,7	42,8	41,7	41,4	41,8	42,1
	1,930	44,2	44,1	43,3	42,6	42,2	42,5	42,9
	2,648	44,7	44,4	43,9	43,3	42,5	42,8	43,2
	3,335	45,6	44,9	44,8	43,9	42,9	43,6	43,8
	4,038	46,8	45,7	45,3	44,2	43,7	44,1	44,4
2000	1,308	44,1	43,9	43,3	42,9	42,6	42,9	43,1
	1,943	44,8	44,4	43,8	43,2	42,9	43,3	43,5
	2,519	45,6	45,3	44,5	43,8	43,2	43,7	43,9
	3,369	46,3	46,1	45,2	44,1	43,7	44,2	44,2
	4,140	46,8	46,5	45,8	44,6	44,3	44,9	45,1
2500	1,385	45,2	44,3	43,6	42,8	42,4	42,9	42,9
	1,934	46,1	45,1	44,4	43,7	43,2	43,7	44,1
	2,585	46,8	46,3	45,3	45,1	44,6	45,1	45,4
	3,341	47,4	46,9	46,5	45,7	45,1	45,8	46
	4,078	47,9	47,2	47,1	46,2	45,7	46,4	46,3

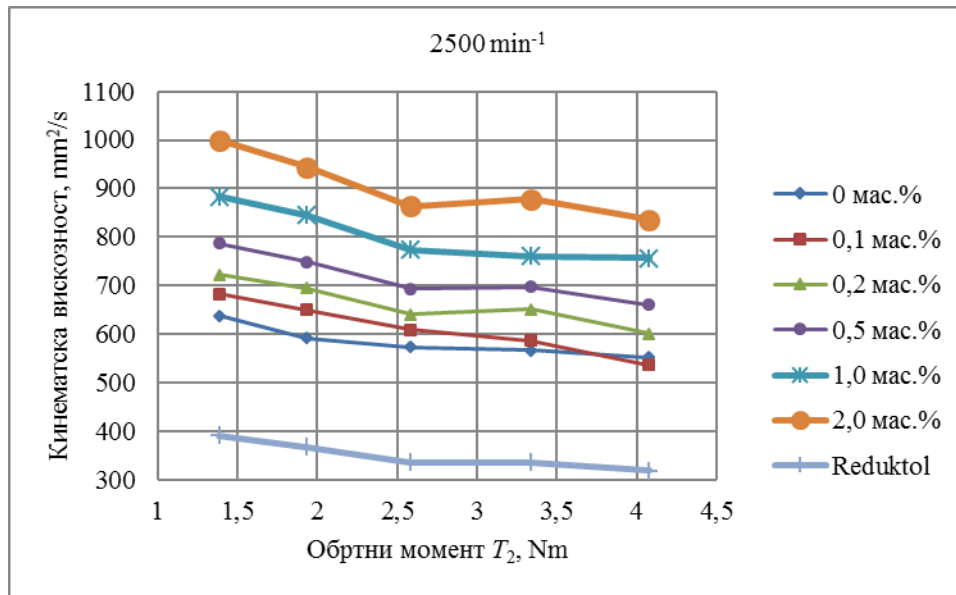
На дијаграмима 6.24, 6.25 и 6.26 су приказане зависности кинематске вискозности ν према обртном моменту на излазном вратилу пужног преносника снаге са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14, на основу резултата приказаних у табели 6.10.



Слика 6.24 Дијаграм промене кинематске вискозности у функцији обртног момента T_2 преносника са пужним зупчаником од бронзе CuSn14, за различита мазива, при улазној угаоној брзини од 1500 min⁻¹



Слика 6.25 Дијаграм промене кинематске вискозности у функцији обртног момента T_2 преносника са пужним зупчаником од бронзе CuSn14, за различита мазива, при улазној угаоној брзини од 2000 min⁻¹



Слика 6.26 Дијаграм промене кинематске вискозности у функцији обртног момента T_2 преносника са пужним зупчаником од бронзе CuSn14, за различита мазива, при улазној угаоној брзини од 2500 min^{-1}

Глицеролна мазива са додатком угљеничних наночестица у концентрацијама 0 мас.%, 0,1 мас.%, 0,2 мас.%, 0,5 мас.%, 1,0 мас.% и 2,0 мас.% показују широк дијапазон нових реолошких и триболошких својстава, што их чини погодним за употребу у компонентама које раде у условима граничног и мешовитог подмазивања, као што су пужни преносници снаге са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14.

Основно глицеролно мазиво без CNT адитива показује релативно високу кинематску вискозност, која се даљим додавањем CNT адитива континуирано повећава. Повећање CNT концентрације у опсегу од 0,1 мас.% до 2,0 мас.% доводи до [132]:

- јачања интеракција између честица адитива и базног флуида,
- формирања локалних структурних мрежа и
- повећања ефективне густине и отпора струјању.

Резултат тога је континуирани раст кинематске вискозности са порастом концентрације CNT адитива. При концентрацијама око 2,0 мас.%, уочава се и почетак нењутновског понашања, услед агломерације и структурисања [134]. Већа вискозност доводи до повећане дебљине хидродинамичког филма, односно обезбеђује бољу заштиту метала и смањује директан контакт пуж–пужни зупчаник. Истовремено оваква повећана вискозност изазива веће отпоре и самим тим смањује степен искоришћења.

Повећање механичког оптерећења у пужном преноснику снаге са пужним зупчаником од CuSn14 доводи до: интензивног локалног загревања мазива, услед клизно–котрљајућег контакта, смањења кинематске вискозности у складу са Аренијусовим законом (швед. *Svante Arrhenius*) [135] и смањења дебљине хидродинамичког филма, што је посебно критично код високих оптерећења и нижих брзина. У практичним условима, повећање нормалног оптерећења у пужним преносницима може смањити кинематску вискозност глицеролних нанофлуида за 5 % – 25 %, у зависности од температурних градијената и укупног нивоа оптерећења [134]. Ова појава је уско повезана са триболошким динамичким материјала CuSn14, који има високу отпорност на хабање, али и релативно високу осетљивост на температурне пикове. Дијаграми на сликама 6.24, 6.25 и 6.26 јасно указују да са порастом оптерећења долази до смањења вискозности мазива од 15 % до 20 % просечно. Са друге стране,

повећање CNT адитива у глицеролу од 0 мас.% до 2,0 мас.% повећава вискозност мазива за око 55 % у просеку.

Табела 6.13 Кинематска вискозност мазива за различите режиме рада пужног преносника са пужним зупчаником од цинк-алуминијум бронзе ZA-12

Улазни број обраћаја, n_1, min^{-1}	Изразни обртни момент, T_2, Nm	Кинематска вискозност, $\nu, \text{mm}^2/\text{s}$						
		0 мас.%	0,1 мас.%	0,2 мас.%	0,5 мас.%	1,0 мас.%	2,0 мас.%	Reduktol 460
1500	1,273	736,25	762,75	817,56	866,49	946,13	1064,29	450,82
	1,891	704,17	745,85	799,28	851,84	946,13	1070,44	440,93
	2,607	688,76	741,69	772,76	823,42	924,78	1034,17	421,93
	3,391	666,41	725,34	759,9	818,8	914,33	1016,59	412,79
	4,001	614,25	709,43	722,84	778,55	893,84	982,5	400,99
2000	1,327	724,02	741,69	759,9	814,2	893,84	1016,59	418,85
	1,903	659,15	717,33	743,15	778,55	888,81	993,71	412,79
	2,514	634,5	678,84	718,86	761,43	854,5	960,53	384,03
	3,369	627,66	686,34	710,97	774,23	844,99	955,13	389,58
	4,067	637,95	649,84	699,34	761,43	849,73	955,13	373,21
2500	1,541	659,15	709,43	747,3	814,2	904,01	1022,41	409,8
	1,922	604,42	653,38	734,94	791,7	893,84	1005,07	398,1
	2,571	591,61	629,07	687,94	744,77	835,61	944,44	373,21
	3,321	573,01	618,99	710,97	761,43	840,28	933,9	355,14
	4,026	585,33	562,44	655,06	697,34	790,55	873,51	350,18

Повећање концентрације CNT од 0 мас.% до 2,0 мас.% у мазиву за пужни преносник са пужним зупчаником од ZA-12 бронзе повећава кинематску вискозност, при чему најзначајнији раст настаје у опсегу од 0,5 мас.% до 1,0 мас.%, док веће концентрације могу изазвати делимично нелинеарно понашање услед агломерације (табела 6.13). Под повећаним оптерећењем кинематска вискозност опада, због локалног загревања и делимичне деградације структуралних мрежа, што мора бити узето у обзир приликом конструисања пужног преносника (дијаграми на сликама 6.27, 6.28 и 6.29). Бронза ZA-12 захтева довољан хидродинамички филм да се спречи гранично подмазивање, а оптимална концентрација CNT од око 1,0 мас.% обезбеђује баланс између вискозности и стабилности нанофлуида. Применом ових нанофлуида могу се смањити губици снаге и трење, уз задржавање адекватне заштите бронзе.

У табелама 6.14 и 6.15 су приказане прорачунате и измерене вредности температуре мазива за све радне услове и сва коришћена мазива за пужни преносник са пужним зупчаником од цинк-алуминијум бронзе ZA-12. Исте законитости у разлици између прорачунатих и измерених температура мазива су уочене и код овог

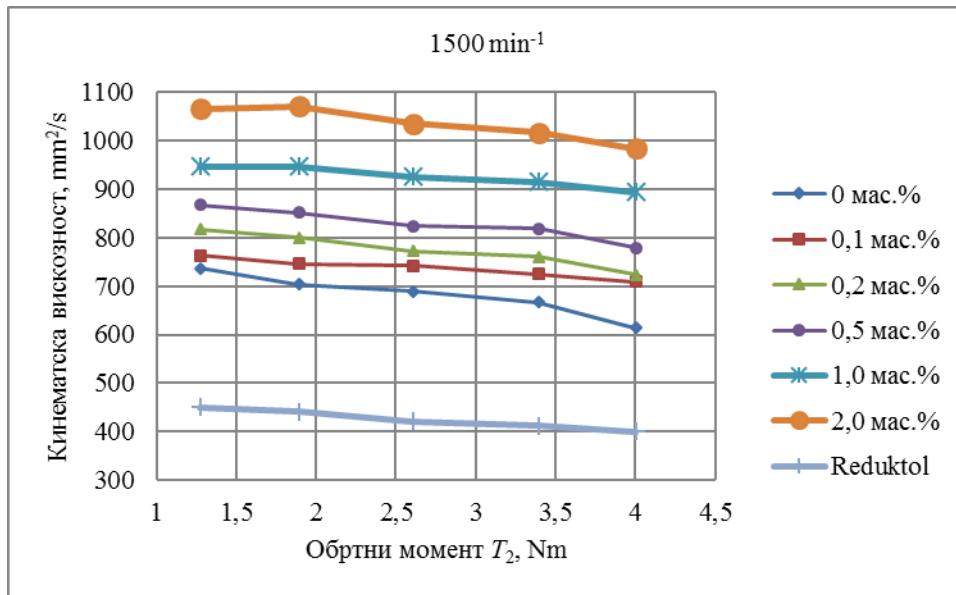
пужног преносника снаге, с тим што су измерене вредности температура мазива нешто више од прорачунатих температура мазива, просечно 0,5 до 0,9 °С). Притом се уочава да су прорачунате и измерене температуре мазива ниже при ипитивању пужног преносника са пужним зупчаником од цинк–алуминијум бронзе ZA-12, у односу на преносника снаге са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14.

Табела 6.14 Прорачунате температуре мазива за различите режиме рада пужног преносника са пужним зупчаником од цинк–алуминијум бронзе ZA-12

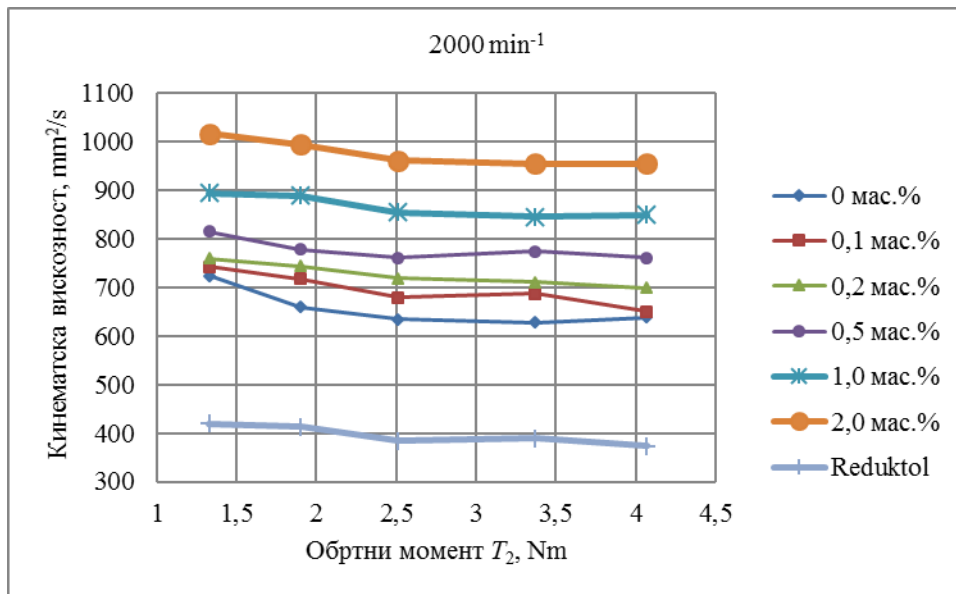
Улазни број обраћаја, n_1, min^{-1}	Изразни обртни момент, T_2, Nm	Измерена температура мазива, $t, ^\circ\text{C}$						
		0 мас. %	0,1 мас. %	0,2 мас. %	0,5 мас. %	1,0 мас. %	2,0 мас. %	Reduktol 460
1500	1,256	41,8	41,5	40,7	40,5	40,2	40,9	40,6
	1,930	42,6	41,9	41,1	40,8	40,4	41,2	40,9
	2,648	43	42,1	41,7	41,4	40,8	41,4	41,5
	3,335	43,6	42,4	42	41,8	41	41,7	41,8
	4,038	45,1	42,8	42,5	42,3	41,4	42,3	42,2
2000	1,308	42,1	42	41,8	41,6	41,4	41,7	41,6
	1,943	43,8	42,6	42,4	42,1	41,5	42,1	41,8
	2,519	44,5	43,6	43	42,8	42,2	42,7	42,8
	3,369	44,7	43,4	43,2	43	42,4	42,8	43,1
	4,140	44,9	44,4	43,5	43,2	42,7	43,1	43,3
2500	1,385	43,8	42,8	42,3	41,8	41,2	41,6	41,9
	1,934	45,4	44,3	42,6	42,1	41,4	41,9	42,3
	2,585	45,8	45	43,8	43,2	42,1	43	43,2
	3,341	46,4	45,3	44,2	42,8	42,5	43,2	43,9
	4,078	46,6	46,1	44,7	44,4	43,6	44,4	44,1

Табела 6.15 Измерене температуре мазива за различите режиме рада пужног преносника са пужним зупчаником од цинк–алуминијум бронзе ZA-12

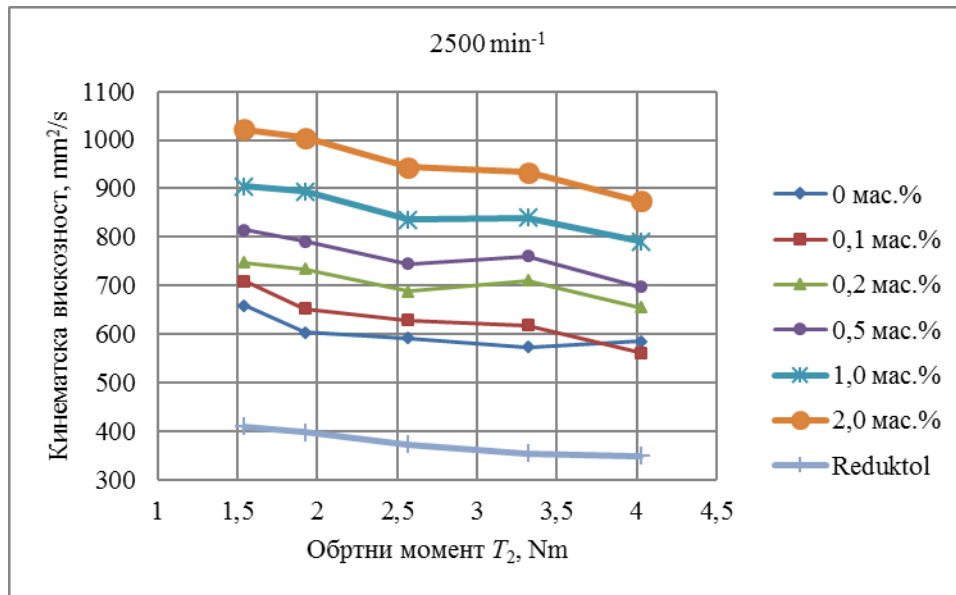
Улазни број обраћаја, n_1, min^{-1}	Излазни обртни момент, T_2, Nm	Измерена температура мазива, $t, ^\circ\text{C}$						
		0 мас. %	0,1 мас. %	0,2 мас. %	0,5 мас. %	1,0 мас. %	2,0 мас. %	Reduktol 460
1500	1,256	42,5	42,2	41,3	41,1	40,8	42,1	41,3
	1,930	43,2	42,6	41,8	41,5	41,1	41,6	41,5
	2,648	43,7	43	42,4	42,2	41,6	41,8	42,1
	3,335	44,2	43,3	42,9	42,4	41,9	42,1	42,4
	4,038	45,4	43,9	43,4	42,9	42,3	43,2	42,8
2000	1,308	42,9	43,2	42,4	42,3	41,8	42,2	42,3
	1,943	44,3	43,7	42,8	42,6	42,3	42,5	42,7
	2,519	44,9	44,1	43,5	43,3	42,9	43,4	43,6
	3,369	45,4	44,3	43,8	43,5	43,1	43,9	43,9
	4,140	46,1	44,9	44,3	44,1	43,8	44,2	44,7
2500	1,385	44,6	43,4	42,8	42,4	41,6	42,3	42,4
	1,934	45,7	44,6	43,1	42,7	42,1	42,5	42,8
	2,585	46,2	45,7	44,3	43,6	42,7	43,4	43,9
	3,341	46,8	45,9	44,7	43,9	43,2	43,8	44,4
	4,078	47,3	46,7	45,3	44,8	44,1	44,9	44,8



Слика 6.27 Дијаграм промене кинематске вискозности у функцији обртног момента T_2 преносника пужним зупчаником од бронзе ZA-12, за различита мазива, при улазној угаоној брзини од 1500 min⁻¹



Слика 6.28 Дијаграм промене кинематске вискозности у функцији обртног момента T_2 преносника са пужним зупчаником од бронзе ZA-12, за различита мазива, при улазној угаоној брзини од 2000 min⁻¹



Слика 6.29 Дијаграм промене кинематске вискозности у функцији обртног момента T_2 преносника са пужним зупчаником од бронзе ZA-12, за различита мазива, при улазној угаоној брзини од 2500 min^{-1}

Пужни преносници са пужним зупчаником од CuSn14 и ZA-12 бронзе показују различите захтеве у условима примене глицеролних нанофлуида са CNT адитивима у концентрацијама 0 мас.%, 0,1 мас.%, 0,2 мас.%, 0,5 мас.%, 1 мас.% и 2 мас.%, при чему је основна разлика у потребној кинематској вискозности за очување стабилног хидродинамичког филма. CuSn14 бронза, као чвршћа легура са већим модулом еластичности и отпорношћу на хабање, омогућава рад при нижим концентрацијама CNT без ризика од граничног контакта. Бронза ZA-12, као мекша легура, захтева већу кинематску вискозност, посебно у опсегу од 1,0 мас.% до 2,0 мас.% CNT, да би се спречило делимично клизање и повећано хабање. Додавање CNT систематски повећава кинематску вискозност нанофлуида, а најзначајнији ефекат јавља се у концентрацијама од 0,5 мас.% до 1,0 мас.%, док веће концентрације могу изазвати делимично нелинеарно понашање услед агломерације. Под повећаним оптерећењем кинематска вискозност опада због локалног загревања и делимичне деградације структурних мрежа CNT, што код ZA-12 бронзе има већи утицај због мање чврстоће метала. Са нижим концентрацијама CNT нанофлуиди омогућавају смањење унутрашњег трења и губитака снаге у оба пужна преносника. Код примене бронзе ZA-12 потребно је повећати концентрацију да би се одржао хидродинамички филм, док бронза CuSn14 пружа већи сигурносни фактор. Термичка стабилност и локално загревање такође утичу на кинематску вискозност, па мекше легуре као ZA-12 захтевају већи удео адитива за очување стабилности филма. Оптимална концентрација CNT око 1,0 мас.% пружа добар баланс између повећања вискозности, стабилности нанофлуида и смањења ризика од агломерације у оба пужна преносника. Основна разлика је у томе што ZA-12 бронза захтева пажљиво прилагођену кинематску вискозност за сигуран рад, док CuSn14 дозвољава флексибилнији опсег концентрација CNT, при сличним триболошким карактеристикама.

6.10. План експерименталних истраживања

Испитивање степена искоришћења пужног преносника реализовано је кроз различите режиме рада, применом уља са различитим концентрацијама CNT адитива.

План експерименталних истраживања осмишљен је кроз варирање три различите вредности улазног броја обртаја пужног пара: 1500 min^{-1} , 2000 min^{-1} и 2500 min^{-1} ; пет нивоа оптерећења задатих преко јачине електричне струје на електромагнетној кочници: 0,1 А, 0,125 А, 0,15 А, 0,175 А и 0,2 А; као и примену шест мазива са различитих концентрација CNT адитива од: 0 мас.%, 0,1 мас.%, 0,2 мас.%, 0,5 мас.%, 1,0 мас.% и 2,0 мас.%, уз контролу коришћењем комерцијалног уља за зупчасте преноснике Reduktol Super ISO VG 460, у трајању сваког циклуса мерења од 1,5 сата.

Непосредно пре почетка сваког сегмента експеримената, односно пре почетка мерења са новим мазивом, измерена је маса узорака пужа и пужног зупчаника, који су израђени од две врсте бронзе. Такође, извршена су пробна испитивања начина рада и утврђивање оптималне количине уља у преноснику, као и оцене степена искоришћења, како би се дефинисали режимски услови рада пужног пара.

Фаза уходавања пужног пара спроведена је сваки пут након замене мазива у трајању од 1,5 сата, при улазном броју обртаја од 500 min^{-1} и оптерећењу које одговара јачини електричне струје на електромагнетној кочници од 0,1 А, користећи мазиво на бази глицерола без CNT адитива. План експерименталних истраживања приказан је у табели 6.16.

Табела 6.16 План експерименталних истраживања

Улазни број обртаја, $n_1, \text{ min}^{-1}$	Јачина електричне струје, $I, \text{ A}$	Време циклуса мерења, $t, \text{ h}$	Уље Reduktol Super ISO VG 460	Концентрација CNT адитива у мазиву, мас.%					
				0 мас.%	0,1 мас.%	0,2 мас.%	0,5 мас.%	1,0 мас.%	2,0 мас.%
1500	0,1	1,5	*	*	*	*	*	*	*
	0,125	1,5	*	*	*	*	*	*	*
	0,15	1,5	*	*	*	*	*	*	*
	0,175	1,5	*	*	*	*	*	*	*
	0,2	1,5	*	*	*	*	*	*	*
2000	0,1	1,5	*	*	*	*	*	*	*
	0,125	1,5	*	*	*	*	*	*	*
	0,15	1,5	*	*	*	*	*	*	*
	0,175	1,5	*	*	*	*	*	*	*
	0,2	1,5	*	*	*	*	*	*	*
2500	0,1	1,5	*	*	*	*	*	*	*
	0,125	1,5	*	*	*	*	*	*	*
	0,15	1,5	*	*	*	*	*	*	*
	0,175	1,5	*	*	*	*	*	*	*
	0,2	1,5	*	*	*	*	*	*	*

На основу табеле 6.16 може се закључити да је експеримент спроведен кроз укупно 105 циклуса.

Променом јачине електричне струје на управљачкој јединици у интервалу од 0,1 А до 0,2 А, са кораком од 0,025 А, остварује се варијација кочионе силе на електромагнетној кочници, што директно утиче на величину оптерећења пужног преносника и излазни обртни моменат T_2 . План експеримента предвиђа уходавање у трајању од 1,5 h и исто време за сваки наредни ниво. Период уходавања је предвиђен након сваке замене мазива, јер постоји потреба да мазиво достигне радну температуру, као и да исто равномерно попуни све неравнине на површинама у контакту и формира стабилан трибофилм, пре него што се започну мерења.

Током експеримента врши се континуирано мерење обртних момената, на основу којих се одређује степен искоришћења пужног преносника, као и мерење буке, вибрација и температуре мазива, при чему се вредности евидентирају на сваких пет минута. Интензитет хабања се утврђује мерењем масе пужа и пужног зупчаника након сваке замене мазива, уз претходно темељно чишћење наведених елемената пужног преносника снаге од остатака мазива.

По завршетку првог циклуса испитивања, врши се замена елемената пужног пара, примењујући пужни зупчаник израђен од друге врсте бронзе, након чега се експеримент понавља. Ова процедура омогућава процену утицаја различитих конструкционих материјала на радне карактеристике пужног преносника.

Кључни сегмент експерименталног истраживања је утврђивање варијације губитака, степена искоришћења пужног преносника, интензитета хабања елемената пужног пара, као и буке, вибрација и температурних промена појединих компоненти, у зависности од концентрације CNT адитива у примењеном мазиву.

7. РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА

У овом поглављу су приказани резултати експерименталних испитивања радних карактеристика пужног преносника снаге у реалним условима. Њихова анализа омогућава поузданије тумачење хипотеза и потврду кључних претпоставки дисертације. Добијени резултати значајно доприносе остварењу укупног циља рада, повезујући теоријски оквир са стварним показатељима система.

Процес одређивања степена искоришћења пужног преносника снаге реализован је у складу са дефинисаним планом експеримента (табела 6.16), варирајући три различите вредности броја обртаја (1500 min^{-1} , 2000 min^{-1} и 2500 min^{-1}), седам типова уља (мазива на бази глицерола са процентом CNT адитива од 0 мас.%, 0,1 мас.%, 0,2 мас.%, 0,5 мас.%, 1,0 мас.% и 2,0 мас.%, као и комерцијалног уља за зупчасте преноснике, Reduktol Super ISO VG 460) и пет нивоа оптерећења (излазних обртних момената T_2). Током испитивања, на електромагнетној кочници је вршено подешавање излазног обртног момента T_2 , обухватајући све радне режиме и све врсте испитиваних мазива. Истовремено су евидентирани вредности улазног обртног момента T_1 , као и температуре пужног преносника и спољашње околине. Мерења су вршена на интервалима од пет минута, ради добијања просечних вредности. На основу прикупљених података за T_1 и T_2 , израчунате су просечне вредности укупног степена искоришћења преносника η према једначини 4.15.

Истовремено, са мерењем вредности обртних момената у истим временским оквирима, вршена су и мерења буке, вибрација и температуре, а након сваке замене мазива и пре почетка новог циклуса испитивања, мерене су масе пужа и пужног зупчаника, у циљу утврђивања њиховог хабања. Мерење буке и вибрација је вршено на сваких пет минута, током мерног периода од 90 минута, након чега је израчуната просечна вредност наведених величина. Мерење температуре на увек истом месту кућишта пужног преносника је такође вршено сваких 5 минута, након чега је израчунат пораст температуре од почетка до краја мерног периода, што је приказано променом температуре Δt .

Испитивања степена искоришћења, буке, вибрација и промене температуре пужног преносника снаге представљају комплексну анализу радних карактеристика пужног преносника под различитим условима оптерећења. Степен искоришћења омогућава квантитативну оцену ефективности преноса механичке енергије и идентификацију губитака услед трења, клизања и деформација контактних површина. Анализа буке пружа увиде у динамичке неравнотежности, резонанце и могуће неправилности у геометрији или подмазивању, док мерење вибрација омогућава детекцију периодичних и нестационарних осцилација, које указују на микропомаке и интеракције контактних површина. Пратеће мерење промена температуре омогућава евалуацију термичких ефеката трења, локалног загревања и стабилности кинематске вискозности мазива са CNT адитивима при различитим оптерећењима. Интеграција ових параметара омогућава свеобухватну карактеризацију степена искоришћења, трајности и поузданости пужног преносника, као и оптимизацију конструкционих и технолошких параметара за минимизацију губитака, вибрација и термичког напрезања.

У оквиру експерименталног истраживања хабања пужног преносника снаге, процес је тежишно анализиран на основу смањења масе пужа и тежишно масе пужног зупчаника, при чему су мерења вршена на крају сваког мерног циклуса, односно након замене сваког уља које се испитује. Испитивања су спроведена применом мазива са

различитим масеним уделима CNT адитива, што је омогућило процену утицаја концентрације наноадитива на интензитет хабања. Ради поређења, исти поступак је примењен и са комерцијалним уљем Reduktol Super ISO VG 460, као референтним мазивом. Поред масеног губитка, хабање је оцењивано и анализом хрпавости похабане површине дискова од калајне и цинк–алуминијумске бронзе, чиме је обухваћен утицај материјала на триболошко понашање система.

7.1. Резултати испитивања степена искоришћења, буке, вибрација и промене температуре пужног преносника снаге

У табелама 7.1 до 7.14 приказани су експериментални резултати мерења степена искоришћења, нивоа буке, вибрација и промене температуре. Резултати су најпре представљени за сваку појединачну комбинацију пужа и пужног зупчаника, односно за пужни преносник са пужем израђеним од челика и пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14 (табеле 7.1 до 7.7), а затим за пужни преносник са пужем од челика и пужним зупчаником од цинк–алуминијум бронзе ZA-12 (табеле 7.8 до 7.14).

За обе наведене врсте пужних зупчаника приказани су резултати за испитивана мазива на бази глицерола са различитим масеним уделима CNT адитива: 0 мас.%, 0,1 мас.%, 0,2 мас.%, 0,5 мас.%, 1,0 мас.% и 2,0 мас.%, као и за референтно минерално уље Reduktol Super ISO VG 460.

Свака табела садржи резултате добијене током мерног циклуса од 90 минута, при три улазне брзине пужног преносника. За сваку брзину приказано је пет нивоа оптерећења, дефинисаних јачином електричне струје на електромагнетној кочници, односно одговарајућим излазним обртним моментом пужног преносника.

Промена температуре Δt је, за сваки циклус, рачуната као разлика температуре на дефинисаном месту на пужном преноснику (слика 6.10 б) на крају циклуса и температуре на почетку циклуса.

Табела 7.1 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 0 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14

Улазни број обртаја, n_1 , min ⁻¹	Јачина електричне струје, I , А	Излазни обртни момент, T_2 , Nm	Мазиво на бази глицерола са 0 мас.% CNT адитива			
			Степен искоришћења, η	Бука, dB	Вибрације, m/s ²	Промена температуре, Δt , °C
1500	0,1	1,158096	0,403272	85,1	3,9	12,8
	0,125	1,727592	0,422929	85,5	4,1	13,9
	0,15	2,388476	0,438824	86,0	4,6	14,8
	0,175	3,078274	0,447052	86,5	5,1	16,0
	0,2	3,798018	0,466136	87,1	5,4	18,1
2000	0,1	1,254699	0,418639	86,1	4,4	14,3
	0,125	1,664602	0,435190	86,3	5,1	16,9
	0,15	2,224804	0,445233	86,4	5,5	17,6
	0,175	3,077242	0,468186	86,9	5,7	18,9
	0,2	3,886308	0,505669	87,4	5,8	19,2
2500	0,1	1,269104	0,427035	86,9	5,6	17,3
	0,125	1,927406	0,436591	87,0	5,9	19,5
	0,15	2,601198	0,453860	87,2	6,2	20,9
	0,175	3,400455	0,467094	87,4	6,4	21,3
	0,2	4,167184	0,491475	88,1	6,6	23,4

Табела 7.2 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 0,1 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14

Улазни број обртаја, n_1 , min ⁻¹	Јачина електричне струје, I , А	Излазни обртни момент, T_2 , Nm	Мазиво на бази глицерола са 0,1 мас.% CNT адитива			
			Степен искоришћења, η	Бука, dB	Вибрације, m/s ²	Промена температуре, Δt , °C
1500	0,1	1,251549	0,422094	78,6	2,6	11,4
	0,125	1,983685	0,454023	78,8	2,7	11,7
	0,15	2,635275	0,480056	79,3	2,8	12,5
	0,175	3,260017	0,506119	80,1	2,9	13,9
	0,2	4,011773	0,534401	80,2	3,1	14,5
2000	0,1	1,318670	0,454755	82,8	3,2	13,0
	0,125	1,837051	0,474787	83,0	3,3	13,9
	0,15	2,476250	0,495776	83,2	3,4	15,6
	0,175	3,376705	0,528272	83,7	3,5	15,9
	0,2	4,050497	0,558159	84,0	3,7	17,0
2500	0,1	1,369785	0,468302	83,1	4,6	14,1
	0,125	1,924308	0,482479	83,2	4,7	16,4
	0,15	2,449918	0,505655	83,5	5,1	17,2
	0,175	3,184635	0,548996	84,1	5,5	18,4
	0,2	3,888890	0,576131	84,3	5,7	21,9

Табела 7.3 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 0,2% мас.%CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14

Улазни број обртаја, n_1, min^{-1}	Јачина електричне струје, I, A	Излазни обртни момент, T_2, Nm	Мазиво на бази глицерола са 0,2 мас.% CNT адитива			
			Степен искоришћења, η	Бука, dB	Вибрације, m/s^2	Промена температуре, $\Delta t, ^\circ\text{C}$
1500	0,1	1,239157	0,448566	75,6	2,5	11,0
	0,125	1,920694	0,465274	76,0	2,6	11,5
	0,15	2,666254	0,487638	77,0	2,7	12,3
	0,175	3,391678	0,513955	77,4	2,7	13,6
	0,2	4,159956	0,558000	78,3	2,8	14,0
2000	0,1	1,289240	0,477496	81,8	3,1	12,5
	0,125	1,983168	0,489671	82,1	3,2	13,3
	0,15	2,571252	0,514296	82,9	3,3	14,8
	0,175	3,457766	0,544145	83,4	3,4	15,4
	0,2	4,151178	0,564024	83,7	3,4	15,7
2500	0,1	1,387856	0,471714	82,1	4,3	13,1
	0,125	1,896427	0,491373	82,5	4,4	14,1
	0,15	2,565056	0,520509	82,9	4,8	16,6
	0,175	3,287382	0,553057	83,5	5,0	17,1
	0,2	4,057209	0,5888467	83,8	5,5	19,3

Табела 7.4 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 0,5 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14

Улазни број обртаја, n_1, min^{-1}	Јачина електричне струје, I, A	Излазни обртни момент, T_2, Nm	Мазиво на бази глицерола са 0,5 мас.% CNT адитива			
			Степен искоришћења, η	Бука, dB	Вибрације, m/s^2	Промена температуре, $\Delta t, ^\circ\text{C}$
1500	0,1	1,251033	0,455725	73,1	2,4	9,7
	0,125	1,972326	0,475070	73,7	2,5	10,6
	0,15	2,699815	0,499965	74,4	2,6	11,3
	0,175	3,395808	0,539017	75,0	2,6	12,2
	0,2	4,175962	0,563512	75,8	2,7	13,5
2000	0,1	1,311442	0,485719	80,7	3,0	11,5
	0,125	2,003821	0,511831	81,2	3,1	11,9
	0,15	2,602747	0,548371	81,4	3,1	13,1
	0,175	3,465511	0,556610	82,1	3,2	13,7
	0,2	4,174929	0,593631	82,3	3,3	14,8
2500	0,1	1,400248	0,484422	81,9	4,2	11,3
	0,125	1,913982	0,506531	82,3	4,3	12,9
	0,15	2,587774	0,531033	82,7	4,6	15,2
	0,175	3,312165	0,568264	83,2	4,7	15,8
	0,2	4,06856	0,607307	83,6	5,3	17,8

Табела 7.5 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 1,0 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14

Улазни број обртаја, n_1, min^{-1}	Јачина електричне струје, I, A	Излазни обртни момент, T_2, Nm	Мазиво на бази глицерола са 1,0 мас.% CNT адитива			
			Степен искоришћења, η	Бука, dB	Вибрације, m/s^2	Промена температуре, $\Delta t, ^\circ\text{C}$
1500	0,1	1,296468	0,498653	72,2	2,0	9,0
	0,125	1,968712	0,511898	72,8	2,1	9,6
	0,15	2,715821	0,541077	73,1	2,2	10,5
	0,175	3,382642	0,595159	73,6	2,3	11,7
	0,2	4,034491	0,628856	74,4	2,3	12,5
2000	0,1	1,318154	0,517967	77,2	2,5	10,8
	0,125	2,032735	0,548813	78,1	2,6	11,1
	0,15	2,581578	0,587965	78,3	2,7	12,2
	0,175	3,396841	0,622521	78,5	2,8	12,3
	0,2	4,239468	0,643953	78,8	2,9	13,7
2500	0,1	1,420384	0,533561	80,1	3,5	10,2
	0,125	1,954255	0,556129	80,7	3,7	11,6
	0,15	2,627014	0,593370	81,3	3,8	14,4
	0,175	3,397357	0,635130	81,7	4,2	14,8
	0,2	4,13001	0,661958	82,2	4,5	16,2

Табела 7.6 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 2,0 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14

Улазни број обртаја, n_1, min^{-1}	Јачина електричне струје, I, A	Излазни обртни момент, T_2, Nm	Мазиво на бази глицерола са 2,0 мас.% CNT адитива			
			Степен искоришћења, η	Бука, dB	Вибрације, m/s^2	Промена температуре, $\Delta t, ^\circ\text{C}$
1500	0,1	1,317637	0,474216	74,6	2,3	9,4
	0,125	1,975940	0,493735	75,0	2,4	10,3
	0,15	2,716337	0,519163	75,3	2,5	10,8
	0,175	3,408716	0,570356	76,1	2,5	11,9
	0,2	4,057209	0,612053	76,5	2,6	13,0
2000	0,1	1,350165	0,495189	79,1	2,7	10,9
	0,125	2,051838	0,526754	80,1	2,9	11,6
	0,15	2,596035	0,578774	80,7	2,9	12,7
	0,175	3,415945	0,606835	81,1	3,0	13,3
	0,2	4,241534	0,635636	81,3	3,1	14,2
2500	0,1	1,433292	0,515595	81,6	3,8	11,0
	0,125	1,971293	0,538385	82,3	4,0	12,6
	0,15	2,643020	0,579918	82,6	4,3	14,6
	0,175	3,412331	0,596635	82,9	4,5	15,5
	0,2	4,105226	0,625558	83,6	5,1	17,2

Табела 7.7 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за уље Reduktol Super ISO VG 460 за пужни преносник са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14

Улазни број обртаја, n_1, min^{-1}	Јачина електричне струје, I, A	Излазни обртни момент, T_2, Nm	Уље Reduktol Super ISO VG 460			
			Степен искоришћења, η	Бука, dB	Вибрације, m/s^2	Промена температуре, $\Delta t, ^\circ\text{C}$
1500	0,1	1,288724	0,463683	73,9	2,5	10,0
	0,125	1,962516	0,480109	74,3	2,6	11,2
	0,15	2,714788	0,507323	74,8	2,7	11,8
	0,175	3,429111	0,546933	75,0	2,8	12,9
	0,2	4,034491	0,585473	75,9	2,9	14,3
2000	0,1	1,318154	0,478124	81,0	2,9	11,8
	0,125	2,032735	0,507946	81,9	3,0	12,8
	0,15	2,581578	0,543477	82,3	3,1	13,7
	0,175	3,396841	0,558598	83,0	3,1	14,0
	0,2	4,239468	0,586033	83,5	3,2	15,5
2500	0,1	1,420384	0,494015	82,5	4,1	11,7
	0,125	1,954255	0,524901	83,0	4,2	13,6
	0,15	2,627014	0,561022	83,3	4,4	15,7
	0,175	3,397357	0,585532	83,8	4,5	16,3
	0,2	4,13001	0,615189	84,1	4,8	18,5

Табела 7.8 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 0 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од цинк-алуминијум бронзе ZA-12

Улазни број обртаја, n_1, min^{-1}	Јачина електричне струје, I, A	Излазни обртни момент, T_2, Nm	Мазиво на бази глицерола са 0 мас.% CNT адитива			
			Степен искоришћења, η	Бука, dB	Вибрације, m/s^2	Промена температуре, $\Delta t, ^\circ\text{C}$
1500	0,1	1,262908	0,421264	83,9	3,8	12,1
	0,125	1,758933	0,431651	85,0	4,0	12,7
	0,15	2,416874	0,451204	85,2	4,4	13,8
	0,175	3,436085	0,470271	86,1	5,0	15,2
	0,2	3,814024	0,462065	86,8	5,2	17,1
2000	0,1	1,258261	0,432751	85,9	4,2	13,4
	0,125	1,683705	0,448663	86,1	4,8	15,8
	0,15	2,243908	0,511200	86,3	5,3	16,8
	0,175	3,100992	0,537193	86,7	5,5	17,7
	0,2	3,904896	0,518715	87,2	5,7	18,1
2500	0,1	1,290789	0,430437	86,8	5,8	16,7
	0,125	1,942328	0,442026	86,9	5,9	18,6
	0,15	2,601198	0,530710	87,1	6,0	19,2
	0,175	3,442432	0,549981	87,2	6,2	20,5
	0,2	4,184223	0,536181	87,7	6,4	21,6

Табела 7.9 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 0,1 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од цинк-алуминијум бронзе ZA-12

Улазни број обртаја, n_1, min^{-1}	Јачина електричне струје, I, A	Излазни обртни момент, T_2, Nm	Мазиво на бази глицерола са 0,1 мас.% CNT адитива			
			Степен искоришћења, η	Бука, dB	Вибрације, m/s^2	Промена температуре, $\Delta t, ^\circ\text{C}$
1500	0,1	1,269104	0,430439	76,0	2,4	10,8
	0,125	1,943928	0,485576	78,2	2,6	11,3
	0,15	2,612557	0,495211	80,0	2,7	11,8
	0,175	3,404586	0,524694	81,1	2,8	12,9
	0,2	4,034491	0,514705	82,9	2,9	13,7
2000	0,1	1,348100	0,469097	82,0	3,0	12,2
	0,125	1,824505	0,516446	83,1	3,2	12,9
	0,15	2,497935	0,543956	84,0	3,3	14,5
	0,175	3,350373	0,585238	85,2	3,4	14,8
	0,2	4,048948	0,572883	86,1	3,5	15,9
2500	0,1	1,371334	0,479114	84,1	4,2	13,3
	0,125	1,936184	0,537828	85,0	4,4	15,6
	0,15	2,454048	0,574046	86,1	4,5	16,4
	0,175	3,203223	0,598635	86,6	5,2	17,5
	0,2	3,870819	0,577572	87,2	5,4	20,6

Табела 7.10 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 0,2 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од цинк-алуминијум бронзе ZA-12

Улазни број обртаја, n_1, min^{-1}	Јачина електричне струје, I, A	Излазни обртни момент, T_2, Nm	Мазиво на бази глицерола са 0,2 мас.% CNT адитива			
			Степен искоришћења, η	Бука, dB	Вибрације, m/s^2	Промена температуре, $\Delta t, ^\circ\text{C}$
1500	0,1	1,249484	0,458976	73,5	2,3	10,3
	0,125	1,940831	0,520506	74,3	2,5	10,7
	0,15	2,685874	0,530622	75,7	2,6	11,4
	0,175	3,411814	0,549406	76,9	2,7	12,7
	0,2	4,161143	0,534895	77,4	2,7	13,6
2000	0,1	1,354325	0,494442	79,1	2,9	11,8
	0,125	1,983255	0,551740	81,0	3,1	12,7
	0,15	2,542338	0,594699	81,5	3,2	14,0
	0,175	3,469642	0,616825	83,0	3,3	14,5
	0,2	3,97046	0,594648	83,5	3,3	14,7
2500	0,1	1,457043	0,490586	81,1	4,2	12,4
	0,125	1,892813	0,562385	82,3	4,3	13,3
	0,15	2,556795	0,592989	82,6	4,6	15,8
	0,175	3,282735	0,612008	83,1	4,8	16,1
	0,2	4,044301	0,602421	83,5	5,2	18,0

Табела 7.11 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 0,5 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од цинк-алуминијум бронзе ZA-12

Улазни број обртаја, n_1, min^{-1}	Јачина електричне струје, I, A	Излазни обртни момент, T_2, Nm	Мазиво на бази глицерола са 0,5 мас.% CNT адитива			
			Степен искоришћења, η	Бука, dB	Вибрације, m/s^2	Промена температуре, $\Delta t, ^\circ\text{C}$
1500	0,1	1,273957	0,464195	70,1	1,5	9,8
	0,125	1,945994	0,537381	72,3	1,6	10,0
	0,15	2,611525	0,558018	73,3	1,8	10,6
	0,175	3,388580	0,592927	74,4	2,0	11,8
	0,2	4,154793	0,556197	75,0	2,3	12,5
2000	0,1	1,331578	0,469464	76,1	1,5	10,7
	0,125	2,019311	0,572737	78,1	1,7	12,0
	0,15	2,504647	0,611635	79,1	2,2	13,2
	0,175	3,442277	0,627008	81,2	2,4	13,4
	0,2	4,167184	0,606839	82,0	3,0	13,6
2500	0,1	1,380628	0,505354	78,1	3,4	11,7
	0,125	1,916564	0,576273	78,9	3,6	12,5
	0,15	2,604813	0,602585	80,4	4,0	14,8
	0,175	3,293578	0,620259	81,2	4,4	14,9
	0,2	3,810255	0,614687	82,1	4,7	16,8

Табела 7.12 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 1,0 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од цинк-алуминијум бронзе ZA-12

Улазни број обртаја, n_1, min^{-1}	Јачина електричне струје, I, A	Излазни обртни момент, T_2, Nm	Мазиво на бази глицерола са 1,0 мас.% CNT адитива			
			Степен искоришћења, η	Бука, dB	Вибрације, m/s^2	Промена температуре, $\Delta t, ^\circ\text{C}$
1500	0,1	1,307311	0,509640	67,7	1,3	9,1
	0,125	1,940314	0,607220	68,2	1,4	9,2
	0,15	2,659542	0,633166	70,0	1,6	9,7
	0,175	3,368444	0,662335	71,8	1,7	10,7
	0,2	4,012806	0,608601	73,2	1,8	11,4
2000	0,1	1,327447	0,515550	74,6	1,4	10,1
	0,125	2,012598	0,605023	75,6	1,5	11,2
	0,15	2,554214	0,659931	76,7	1,7	12,3
	0,175	3,364313	0,676507	77,8	1,9	12,9
	0,2	4,204359	0,633160	78,9	2,3	12,3
2500	0,1	1,373916	0,569225	77,1	2,4	10,9
	0,125	1,908303	0,635036	78,0	3,3	11,5
	0,15	2,600424	0,653910	79,1	3,6	13,6
	0,175	3,352954	0,681857	79,9	3,9	13,7
	0,2	4,121846	0,659306	81,0	4,2	15,5

Табела 7.13 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за мазиво са 2,0 мас.% CNT адитива за пужни преносник са пужним зупчаником од цинк-алуминијум бронзе ZA-12

Улазни број обртаја, n_1, min^{-1}	Јачина електричне струје, I, A	Излазни обртни момент, T_2, Nm	Мазиво на бази глицерола са 2,0 мас.% CNT адитива			
			Степен искоришћења, η	Бука, dB	Вибрације, m/s^2	Промена температуре, $\Delta t, ^\circ\text{C}$
1500	0,1	1,293371	0,473201	72,0	1,4	9,7
	0,125	1,806588	0,585283	73,1	1,6	10,2
	0,15	2,606362	0,615083	74,9	1,8	10,6
	0,175	3,344177	0,627510	76,0	2,2	11,7
	0,2	3,646222	0,588918	77,9	2,6	12,5
2000	0,1	1,343453	0,489558	77,1	1,7	10,9
	0,125	1,819496	0,576355	79,1	1,9	12,0
	0,15	2,511876	0,629852	80,1	2,1	13,2
	0,175	3,370509	0,644197	82,1	2,2	13,9
	0,2	4,184223	0,608285	83,9	2,3	13,4
2500	0,1	1,433292	0,548320	80,1	2,5	11,5
	0,125	1,971293	0,621425	82,0	3,6	12,2
	0,15	2,643020	0,635285	83,4	3,8	14,7
	0,175	3,412331	0,653713	84,1	4,0	14,8
	0,2	4,105226	0,633522	86,0	4,2	16,8

Табела 7.14 Степен искоришћења, бука, вибрације и промена температуре за уље Reduktol Super ISO VG 460 за пужни преносник са пужним зупчаником од цинк-алуминијум бронзе ZA-12

Улазни број обртаја, n_1, min^{-1}	Јачина електричне струје, I, A	Излазни обртни момент, T_2, Nm	Уље Reduktol Super ISO VG 460			
			Степен искоришћења, η	Бука, dB	Вибрације, m/s^2	Промена температуре $\Delta t, ^\circ\text{C}$
1500	0,1	1,244321	0,474245	73,1	2,1	9,9
	0,125	1,901591	0,542925	74,0	2,2	10,1
	0,15	2,655412	0,564942	74,9	2,4	10,7
	0,175	3,382384	0,567966	76,0	2,6	12,2
	0,2	4,184223	0,574622	77,1	2,7	12,6
2000	0,1	1,331062	0,501651	76,5	2,8	11,2
	0,125	1,978522	0,563157	78,8	2,9	12,1
	0,15	2,545436	0,604547	79,1	3,0	13,2
	0,175	3,487455	0,625556	79,9	3,1	13,7
	0,2	3,988023	0,605794	81,9	3,2	13,8
2500	0,1	1,479761	0,502456	80,0	4,0	11,7
	0,125	1,889715	0,576536	81,1	4,2	12,5
	0,15	2,539241	0,607830	82,0	4,3	14,9
	0,175	3,262599	0,623357	82,9	4,5	15,4
	0,2	4,046366	0,614699	83,2	4,7	16,9

7.2. Резултати испитивања хабања и храпавости делова пужног преносника снаге

У табелама 7.15 и 7.16 приказани су експериментални резултати мерења масе пужних зупчаника пужног преносника снаге, израђених од калајне бронзе CuSn14 и цинк–алуминијум бронзе ZA-12. Маса испитиваних пужних зупчаника мерена је након сваке замене мазива, односно укупно по седам пута за обе комбинације пужа и пужног зупчаника. Свако мерење масе вршено је по завршетку комплетног испитног циклуса, који обухвата испитивање при све три улазне брзине пужног преносника, а у оквиру сваке брзине са пет различитих нивоа оптерећења.

При сваком мерењу масе пужног зупчаника извршена су по три мерења и узета је средња вредност мерења. Одступања резултата мерења масе су се просечно кретала у опсегу $\pm 0,0012$ g. Редни бројеви мерења означавају мерења након сваког циклуса испитивања, у трајању од 15 сати за примењено мазиво.

Почетна маса пужног зупчаника од калајне бронзе CuSn14 пре испитивања је износила 224,691 g.

Табела 7.15 Преглед смањења масе пужног зупчаника од калајне бронзе CuSn14 услед хабања

Редни број мерења	Измерена маса пужног зупчаника, m , g	Смањење масе услед хабања, Δm , g	Удео смањења масе, ‰	Примењено мазиво
1.	224,557	0,134	0,596	0 мас.% CNT адитива
2.	224,438	0,119	0,530	0,1 мас.% CNT адитива
3.	224,334	0,104	0,463	0,2 мас.% CNT адитива
4.	224,242	0,092	0,410	0,5 мас.% CNT адитива
5.	224,170	0,072	0,321	1,0 мас.% CNT адитива
6.	224,072	0,098	0,437	2,0 мас.% CNT адитива
7.	223,970	0,102	0,455	Reduktol Super ISO VG 460

Укупно смањење масе на крају експеримента, за пужни зупчаник од калајне бронзе CuSn14, износило је 0,721 g и добијено је као разлика почетне масе зупчаника и масе измерене на крају последњег, седмог циклуса мерења.

Почетна маса пужног зупчаника од цинк–алуминијум бронзе ZA-12 пре испитивања је износила 153,451 g.

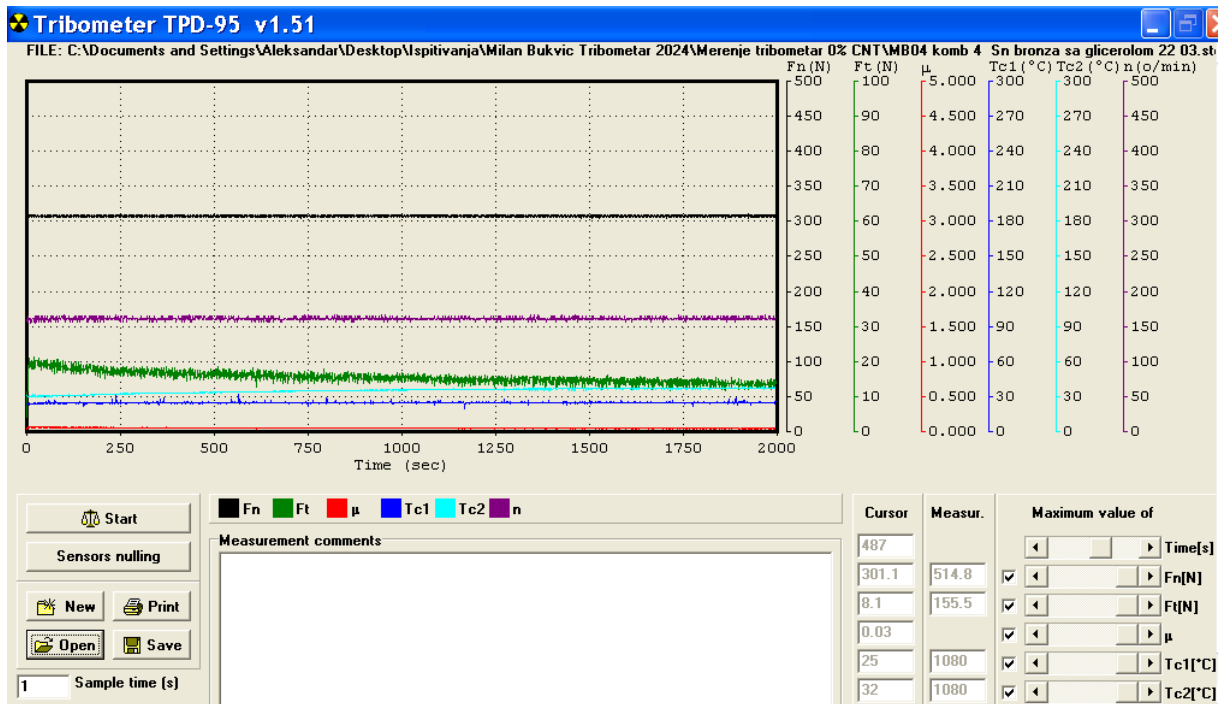
Табела 7.16 Преглед смањења масе пужног зупчаника од цинк–алуминијум бронзе ZA-12 услед хабања

Редни број мерења	Измерена маса пужног зупчаника, m , g	Смањење масе услед хабања, Δm , g	Удео смањења масе, ‰	Примењено мазиво
1.	153,377	0,074	0,482	0 мас. % CNT адитива
2.	153,314	0,063	0,411	0,1 мас. % CNT адитива
3.	153,265	0,049	0,319	0,2 мас. % CNT адитива
4.	153,226	0,039	0,254	0,5 мас. % CNT адитива
5.	153,195	0,031	0,202	1,0 мас. % CNT адитива
6.	153,152	0,043	0,281	2,0 мас. % CNT адитива
7.	153,105	0,047	0,307	Reduktol Super ISO VG 460

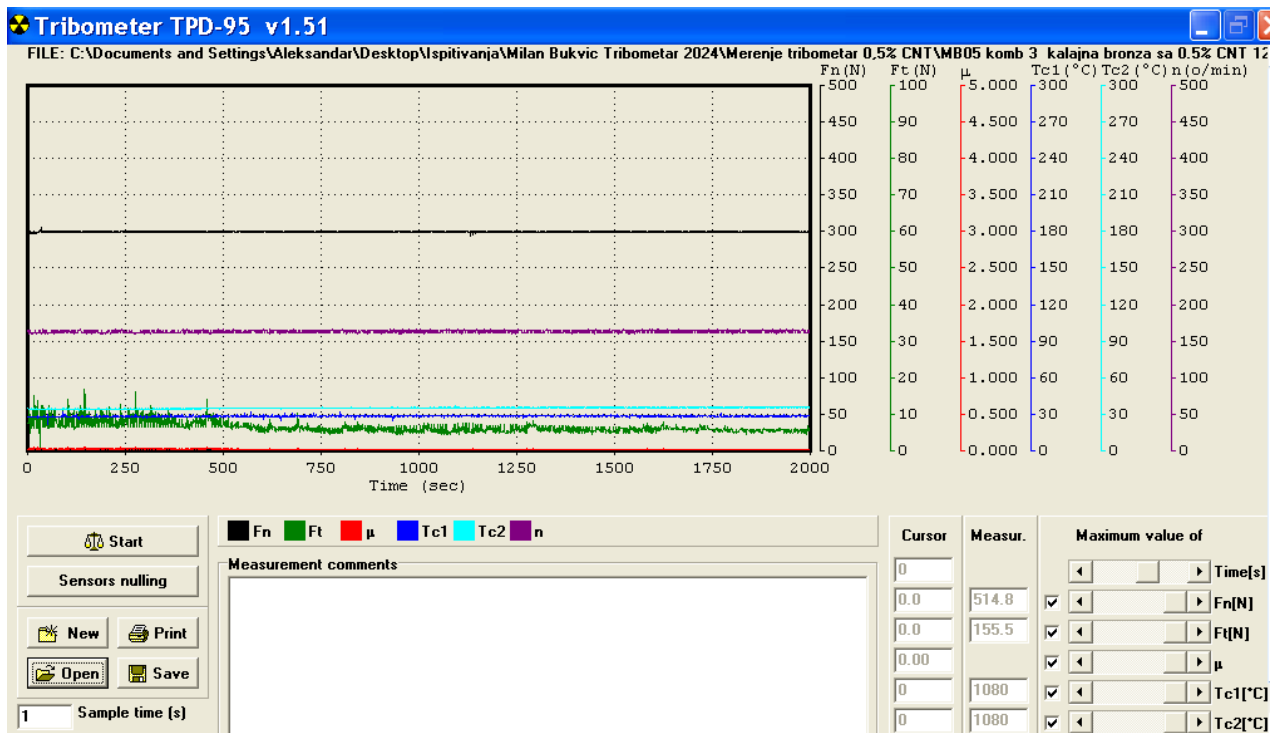
Укупно смањење масе на крају експеримента, за пужни зупчаник од цинк–алуминијум бронзе ZA-12, износило је 0,346 g и добијено је као разлика почетне масе зупчаника и масе измерене на крају последњег, седмог циклуса мерења.

Резултати испитивања хабања су најпре приказани у виду снимака дијаграма на којима су приказане промене вредности нормалне и тангенцијалне силе, степена искоришћења, температуре околине и температуре испитиваног мазива, за различите комбинације материјала дискова и плочица и примене мазива различитог масеног удела CNT адитива.

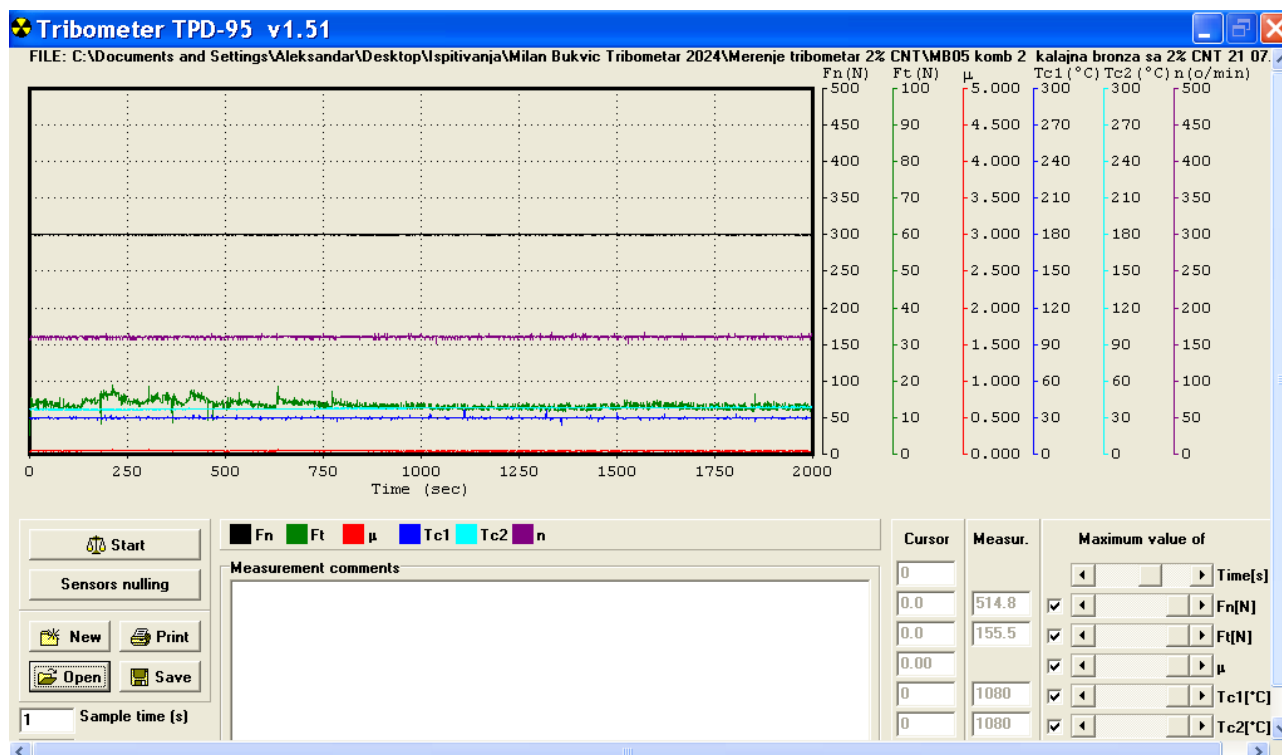
Резултати су приказани у програмском пакету TRD-95 v1.51 за укупно 48 комбинација триболошких парова челик–бронза и различитих мазива (4 диска од калајне бронзе CuSn14, 4 диска од цинк–алуминијум бронзе ZA-12 и 6 мазива са различитим процентом CNT адитива). Издвојено је, ради илустрације, неколико карактеристичних примера за поједине комбинације материјала и радне услове и приказано на сликама 7.1, 7.2 и 7.3.



Слика 7.1 Изглед приказа праћења резултата испитивања триболошког пара челик-бронза $CuSn14$ за мазииво са 0 мас.% CNT адитива



Слика 7.2 Изглед приказа праћења резултата испитивања триболошког пара челик-бронза $CuSn14$ за мазииво са 0,5 мас.% CNT адитива



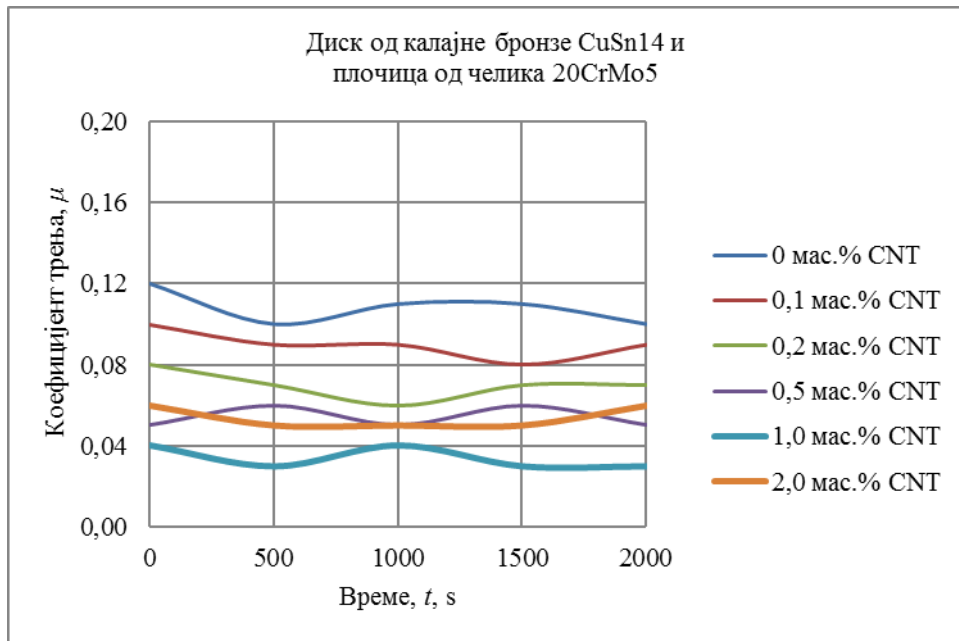
Слика 7.3 Изглед приказа праћења резултата испитивања триболошког пара челик-бронза CuSn14 за мазиво са 2,0 мас.% CNT адитива

На основу резултата добијених триболошким испитивањем, на дијаграмима на сликама 7.4 и 7.5 представљене су временске промене коефицијента трења за различите услове испитивања. Ове промене омогућавају јасније сагледавање утицаја различитих врста материјала дискова, као и различитих масених удела адитива угљеничних наноцеви у базном мазиву, на вредности коефицијента трења. Поређењем крива коефицијената трења могу се уочити најповољније концентрације адитива и проценити стабилност заштитног слоја мазива, током дефинисаног времена испитивања. Тако добијени резултати представљају поуздану основу за даље разматрање делотворности испитиваних мазива, у условима блиским стварној примени.

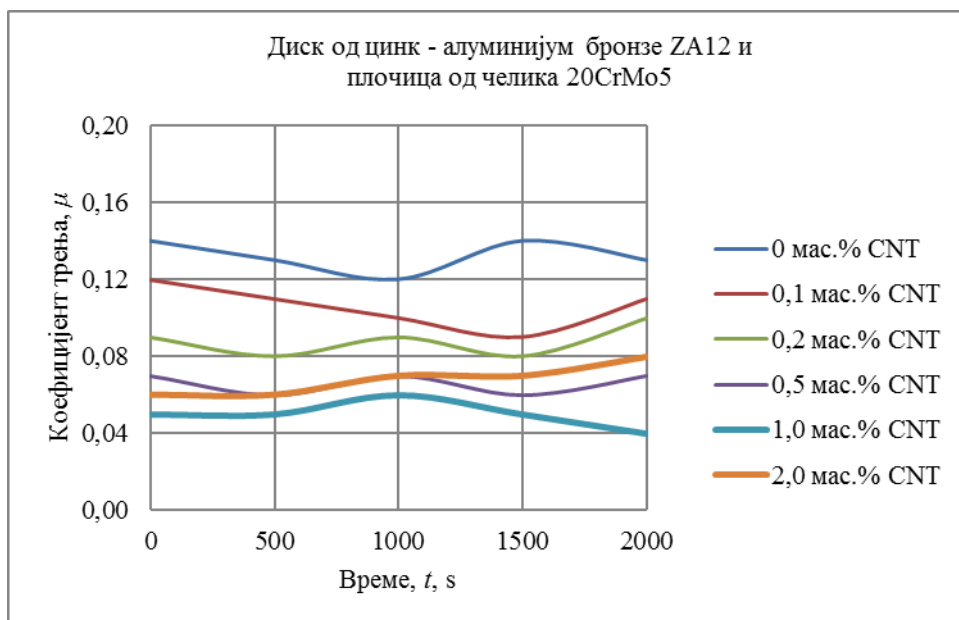
При испитивању триболошких карактеристика контактнoг пара калајног диска и челичне плочице може се уочити јасна тенденција смањења коефицијента трења са повећањем масеног удела угљеничних наноцеви (CNT) у мазиву на бази глицерола. Повећањем концентрације CNT адитива од 0 мас.% до 1,0 мас.% долази до снижавања просечне вредности коефицијента трења са приближно 0,11 на око 0,03, што представља укупно смањење од приближно 72 %. Ова значајна редукација трења резултат је више међусобно повезаних физичко-хемијских механизма унутар трибосистема. Међутим, даље повећање масеног удела CNT са 1,0% на 2,0% доводи до супротног ефекта, односно коефицијент трења расте на приближно 0,05. То је уједно близу вредности измерене и при примени мазива са 0,5% CNT. У односу на минималну вредност коефицијента трења од 0,03, наведени пораст коефицијента трења од 0,03 на 0,05 износи приближно 66 %. Овако значајна редукација трења пре свега је последица трибомеханичких механизма који се развијају у области микроконтаката између металних површина.

На оптималним концентрацијама адитива од око 1,0 мас.% CNT, угљеничне наноцеви делују као ефикасни носачи оптерећења у граничном и мешовитом режиму подмазивања. Захваљујући својој издуженој геометрији и високој структурној чврстоћи,

CNT се распоређују у слоју мазива и формирају наноструктурисани уљни филм који спречава директан контакт металних асперитета. На тај начин значајно се умањује адхезија – кључна компонента трења у граничном режиму. Поред тога, добро дисперговане CNT честице омогућавају делимичан прелаз из трења клизања у трење котрљања, јер се CNT честице понашају као нановаљци. Иако ове честице не функционишу као идеални ваљци, њихова геометрија омогућава смањење локалних отпора и равномерније преношење оптерећења кроз контактну зону [139].



Слика 7.4 Дијаграм промене коефицијента трења током испитивања диска од калајне бронзе CuSn14 и плочице од челика 20CrMo5 применом мазива са различитим масеним уделом CNT адитива



Слика 7.5 Дијаграм промене коефицијента трења током испитивања диска од цинк-алуминијум бронзе ZA-12 и плочице од челика 20CrMo5 применом мазива са различитим масеним уделом CNT адитива

Реолошка стабилност нанофлуида такође доприноси снижавању трења. Честице CNT повећавају отпорност филма мазива на локалне деформације, а глицерол као вискозни медиј одржава континуитет слоја под задатим оптерећењем и брзином клизања. Ови ефекти су, међутим, доминантно механичке природе, док се хемијски утицаји свode на основну интеракцију глицерола са оксидним слојем на металним површинама, што стабилизује базну структуру мазивог филма.

Даље повећање концентрације CNT честица на 2,0 мас.% доводи до супротног ефекта, односно коефицијент трења расте са минималне вредности 0,03 на око 0,05. Ова промена директно је условљена механичком деградацијом стабилности слоја мазива. На високим концентрацијама долази до агрегације наноцеви, што доводи до формирања неправилних агрегата. Уместо да делују као носачи оптерећења и микрoвалџи, агрегати постају локализоване механичке препреке које ремете хидродинамичку стабилност филма и стварају повећане тачке притиска у контактної зони. Механизам „ваљања“ постаје неефикасан, а све више микроскопских врхова храпавости са једне површине се директно судара, односно у директном је контакту са врховима друге површине, што резултира већим отпором кретању. Ремети се и стабилност микрофлуидних токова унутар танког филма мазива, па долази до неправилних локалних промена притиска, које додатно повећавају трење [7].

Посматрано у целини, триболошки систем показује карактеристично нелинеарно понашање, односно CNT честице могу драстично побољшати триболошке карактеристике, али само у опсегу у којем обезбеђују равномерну дисперзију и стабилан механички филм. Када њихов број прекорачи праг стабилности, механички ефекти агрегације постају доминантни и доводе до погоршања триболошких својстава. Ово потврђује да оптимизација концентрације CNT представља кључни параметар у развоју наноструктурираних мазива високих карактеристика [107].

Посматрајући добијене резултате триболошких испитивања са дијаграма на сликама 7.4 и 7.5, уочава се да је коефицијент трења нижи код калајне бронзе CuSn14 него код цинк-алуминијум бронзе ZA-12, пре свега због разлика у њиховој микроструктурној уједначености, крутости и механичком одзиву контактне зоне под оптерећењем. Бронза CuSn14 има релативно хомогену матрицу са малим варијацијама тврдоће и локалне крутости, што доводи до равномернијег распоређивања контактних напона и стабилније носивости у зони контакта. Ова стабилност омогућава да се контакт одвија у контролисаном граничном режиму, услед чега је профил тангенцијалне силе изузетно уравнотежен и континуиран. Другим речима, калајна бронза се током трења понаша механички предвидљиво: њена пластична деформација је равномерна, површински слој се постепено прилагођава оптерећењу, а контактни услови остају конзистентни током времена, што спречава појаву наглих прелаза између различитих механизма трења [130].

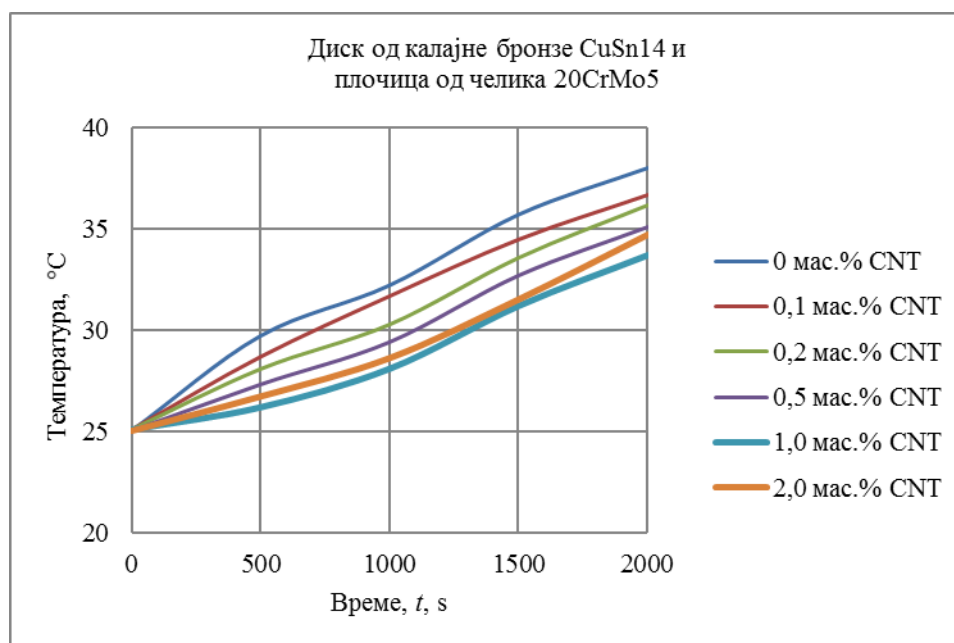
Супротно томе, цинк-алуминијум бронза ZA-12 има високу структурну хетерогеност, са зонама различите тврдоће, крутости и отпора пластичној деформацији. Интерметалне фазе унутар легуре делују као локалне „тврде тачке“ које преузимају оптерећење на малим површинама, изазивајући неравномерно распоређивање притиска у контакту. При проласку преко ових зона долази до честих микропромена у механизму трења: од локалног запињања између површина у контакту, до кртог одвајања делова површине, што се у механичком смислу манифестује као циклично накупљање и нагло ослобађање енергије. Овај процес генерише типично енгл. *stick-slip* понашање (трење између материјала не иде глатко већ се јавља лепљење и клизање материјала) са израженим скоковима у тангенцијалној сили. Како се контактна површина стално мења — понекад оптерећењем појединачних тврдих фаза, а понекад и њиховим ломљењем или

издвајањем — сила трења не може достићи стабилно стање, што резултира високим осцилацијама током читавог испитивања [140].

У целини, калајна бронза CuSn14 омогућава стабилније механичко понашање у контакту, равномернију носивост и континуирани профил тангенцијалне силе, док цинк-алуминијум бронза ZA-12, због своје унутрашње микромеханичке хетерогености, неминовно показује нестабилан контакт и изражене осцилације трења.

Испитивањем термичких карактеристика трибосистема, који чине диск од калајне бронзе и челична плочица, уочава се тенденција смањења интензитета пораста температуре у контактної зони са повећањем масеног удела угљеничних наноцеви (CNT) у мазиву. Повећањем концентрације CNT адитива од 0 мас.% до 1,0 мас.% долази до значајног снижавања максималне радне температуре, при чему се температура у зони контакта на крају циклуса испитивања смањује са 38 °C на 33,7 °C, што представља укупну редукацију од 11,3 % (слика 7.6). Овако изражено смањење температуре указује на ефикасније одвођење топлоте и истовремено спорији раст температуре у контактної зони, као директну последицу побољшаних триболошких услова у систему.

Међутим, даље повећање масеног удела CNT адитива са 1,0 мас.% на 2,0 мас.% доводи до супротног ефекта, односно до поновног пораста температуре у контактної зони на вредност од 34,7 °C. Ове вредности су упоредиве са температурама измереним при примени мазива са 0,5 мас.% CNT. Наведени пораст температуре од 1 °C при повећању масеног удела CNT адитива на 2,0 мас.%, одговара релативном повећању температуре од око 3 % (слика 7.6). Овакво термичко понашање јасно указује на постојање оптималне концентрације CNT адитива, изнад које се позитивни ефекти на термичке карактеристике трибосистема постепено умањују.

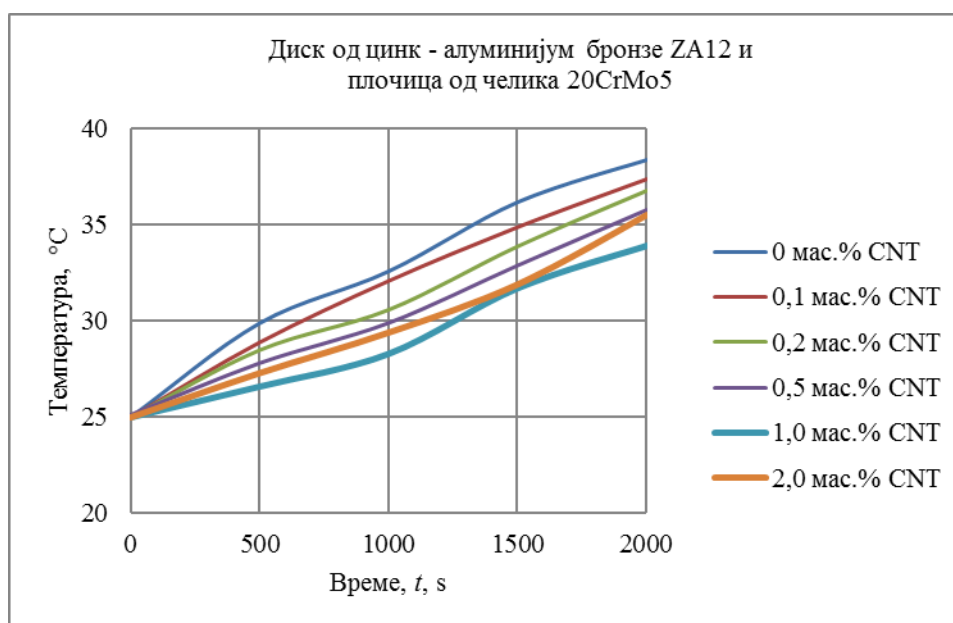


Слика 7.6 Дијаграм промене температуре мазива током испитивања диска од калајне бронзе CuSn14 и плочице од челика 20CrMo5 применом мазива са различитим масеним уделом CNT адитива

Смањење температуре у контактної зони, при оптималној концентрацији CNT адитива од око 1,0 мас.%, пре свега је резултат чињенице да угљеничне наноцеви, захваљујући својим својствима, доприносе ефикаснијем преносу и одвођењу топлоте из зоне микрконтаката ка околном уљном филму и маси контактних тела. Истовремено,

формирањем стабилног и континуалног уљног слоја, CNT честице значајно умањују директан контакт металних површина, чиме се смањују локална пластична деформација и адхезивна компонента трења, које представљају значајне изворе генерисања топлоте у граничном и мешовитом режиму подмазивања [140]. Насупрот томе, при већим концентрацијама CNT адитива, повећана склоност ка агрегацији наноцеви може довести до локалних поремећаја у структури уљног филма, повећања унутрашњег трења у самом мазиву и смањене ефикасности одвођења топлоте, што се у коначном исходу манифестује кроз поновни пораст температуре.

Идентична триболошка испитивања термичких карактеристика применом челичне плочице и диска од цинк-алуминијум бронзе указују да повећање концентрације угљеничних наноцеви (CNT) у мазиву до 1,0 мас.% смањује температуру са 38,4 °C на 33,9 °C, што представља редукују од 11,7 % (слика 7.7). Даље повећање концентрације CNT на 2,0 мас.% условљава поновни пораст температуре на 35,5 °C, односно релативно повећање од око 4,7 %. Ово указује, као и код испитивања дискова од калајне бронзе, на постојање оптималне концентрације адитива, изнад које се позитивни ефекти на редукују температуру постепено смањују.



Слика 7.7 Дијаграм промене температуре мазива током испитивања диска од цинк-алуминијум бронзе ZA-12 и плочице од челика 20CrMo5 применом мазива са различитим масеним уделом CNT адитива

Мање загревање трибосистема са диском од калајне бронзе у односу на цинк-алуминијум бронзу последица је веће термичке проводљивости калајне бронзе, која омогућава ефикасније одвођење топлоте из контактне зоне, као и формирање стабилнијег уљног филма који смањује директан контакт метал – метал и локално трење. Поред тога, повољнија микроструктура и мање адхезивно хабање калајне бронзе доприносе споријем порасту температуре.

Триболошка испитивања су у другом делу усмерена на испитивања храпавости површина. Храпавост је испитивана на површини челичних плочица, након испитивања у контакту са калајном бронзом CuSn14 и цинк-алуминијум бронзом ZA-12. Потом је испитивана храпавост дискова од наведене две врсте бронзе, тако што је мерена храпавост на четири места по ободу дискова, на удаљености од по 90° по ободу диска, како је приказано на слици 7.8.



Слика 7.8 Приказ диска од бронзе ZA-12 са обележеним местима по ободу диска на којима је мерена хrapавост

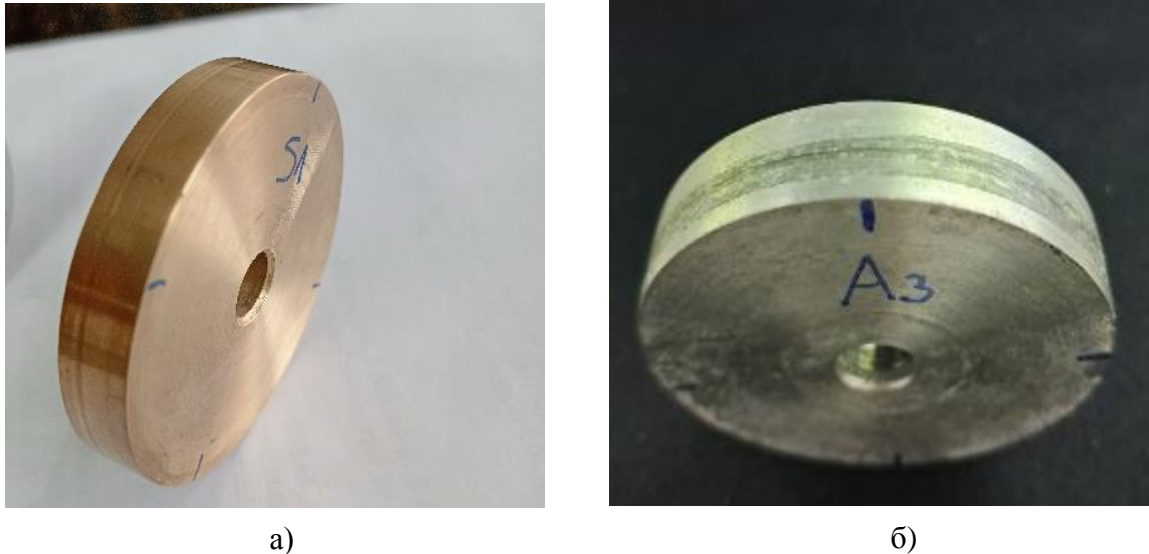
За квантитативну оцену микрогеометрије површина, као критичног фактора у триболошким и контактним системима, издваја се параметар средње аритметичко одступање профила од средње линије, означен као R_a и представљен у једначинама (6.8) и (6.9). Средња линија профила се најчешће одређује методом најмањих квадрата на основу скупа измерених координата, што минимизује утицај локалних аномалија и осигурава поузданост процене хrapавости. Овим параметром се обезбеђује стандардизована, упоредива и поуздана мера хrapавости површине, која је од фундаменталног значаја за проучавање контактних механизма, трења и хабања. На сликама П 3.1 до П 3.12, у Прилогу 3 ове дисертације, су приказани дијаграми промене фактора R_a , али и других параметара наведених у табели 6.3. Резултати су приказани за узорке који су испитивани у мазиву са 0 мас.% CNT, 0,2 мас.% CNT, 0,5 мас.% CNT, 1,0 мас.% CNT и 2,0 мас.% CNT.

Дијаграми профила хrapавости добијени након испитивања профилометром показују да дискови од цинк-алуминијум бронзе ZA-12 развијају знатно већу хrapавост у поређењу са дисковима од калајне бронзе CuSn14, када се користе у контакту са челичном плочицом у различитим мазивима, што се може објаснити комбинацијом микроструктурних и механичких карактеристика легура. Цинк-алуминијум бронза ZA-12, као хетерогена легура са интерметалним фазама различите тврдоће и отпорности на пластичну деформацију, током клизања према челичној површини, показује неравномерну локалну деформацију, честе микроромове међуметалних честица и прекомерно абразивно деловање, што резултира већим развијањем површинске хrapавости у односу на хомогену, жилаву и релативно пластичну бронзу CuSn14, код које контакт остаје механички стабилан и трибофилм континуиран [141].

Процент CNT у мазиву има директан утицај на ову динамику: чак и при малим концентрацијама (0,1 – 0,2 мас.%) CNT делују као микрочестице и полусамоподмазујуће честице, које редукују контактну адхезију, смичући локална испупчења, смањујући интензитет абразивне интеракције, што резултира смањењем величине R_a . Повећање концентрације CNT на 0,5 – 1,0 мас.% даје оптималан баланс између вискозног филма и механичке подршке наноцеви, што значајно смањује просечну хrapавост површине, док највећа концентрација од 2 мас.% понекад изазива агломерацију наноцеви и локалне неуједначености у мазиву, што може условно повећати R_a код ZA-12, али је ефекат код CuSn14 минималан, због њене уједначене и пластично стабилне микроструктуре. Сумарно посматрајући, већа хrapавост ZA-12 након испитивања и зависност R_a од концентрације CNT произилазе из комбинације њене структурне хетерогености,

различите отпорности на локалну деформацију и абразивног потенцијала међуметалних фаза, као и улоге наноцеви у модификацији контактне механике и трибофилма [7, 52, 142].

На сликама 7.9.а и 7.9.б приказани су трагови хабања после реализованих контролираних триболошких испитивања на трибометру, са циљем процене и упоређивања понашања различитих бронзаних легура у контакту са челичном плочицом под одређеним условима подмазивања.



Слика 7.9 Приказ трагова хабања а) диска од калајне бронзе $CuSn14$ и б) диска од цинк–алуминијум бронзе $ZA-12$

Конкретно, слика 7.9.а илуструје морфологију површине диска израђеног од калајне бронзе $CuSn14$, показујући релативно уједначене трагове хабања и конзистентну дистрибуцију микроабразивних знакова, што указује на стабилнији механички одзив контакта и бољу способност легуре да одржи континуиран трибофилм. Насупрот томе, слика 7.9.б приказује трагове хабања на диску од цинк-алуминијум бронзе $ZA-12$, код којег су видљиви интензивнији и неравномернији знаци абразивног дејства, локални микроломови интерметалних фаза и већа концентрација површинских дефеката. Ова упоредна анализа визуелно и квантитативно потврђује утицај микроструктурне хетерогености легуре на развој трага хабања, као и значај механичке стабилности контактне зоне за одржавање контролираног, предвидивог процеса трења и смањење површинске храпавости након експерименталних испитивања.

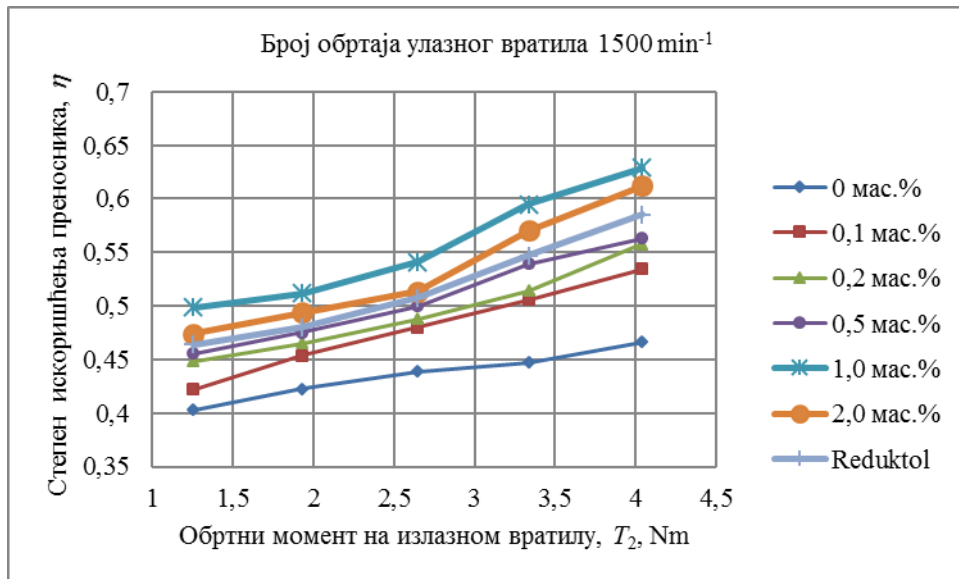
8. АНАЛИЗА И ДИСКУСИЈА ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА

Циљ анализе и дискусије резултата је свеобухватна процена утицаја мазива са CNT адитивима на радне карактеристике пужних преносника снаге. Циљ је утврђивање начина на који различите концентрације CNT адитива у глицеролним базним мазивима утичу на кинематску вискозност, степен искоришћења, губитке снаге, вибрације, буку и термичке промене током рада пужних преносника. Анализа резултата омогућава идентификацију оптималног односа адитива и базног мазива који обезбеђује максимални степен искоришћења, смањење трења и хабања, као и одржавање стабилног хидродинамичког филма, у условима реалног оптерећења. Дискусија постигнутих резултата омогућава критичко поређење ефеката наноцеви на различите легуре зупчаника (пужне зупчанике израђене од бронзи CuSn14 и ZA-12), пружајући увид у механизме интеракције наноцеви са радним површинама и динамичке одговоре система. Такође, ова анализа омогућава утврђивање граница применљивости нанофлуида, у смислу концентрације CNT, термичке стабилности и одржавања оптималне кинематске вискозности, што је кључно за дуговечност и поузданост преносника. Кроз ову дискусију могу се формулисати препоруке за практичну примену нанофлуидних мазива у индустријским пужним преносницима, као и за даљи развој материјала и адитива усмерених на побољшање степена искоришћења, смањење вибрација и буке и оптимизацију термичких карактеристика система [143].

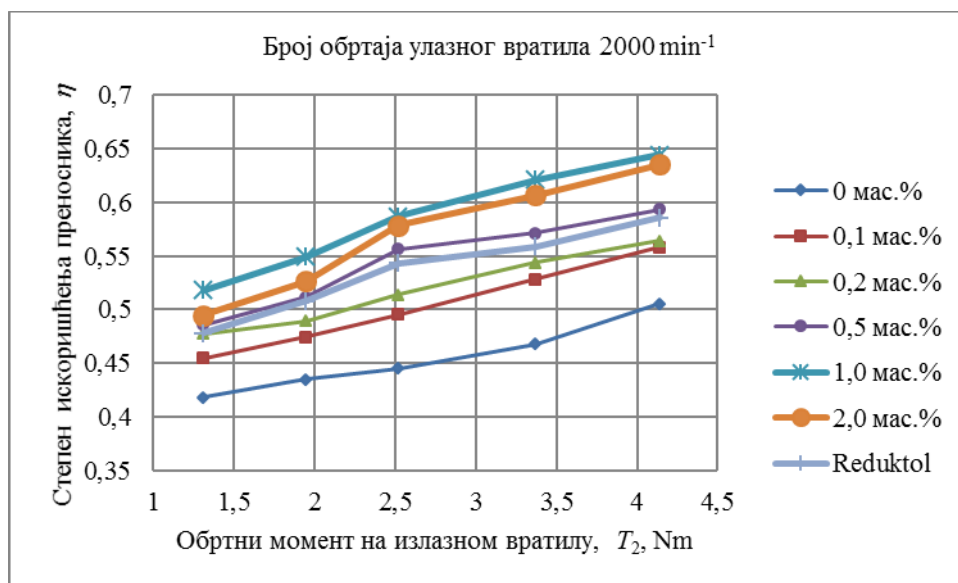
8.1. Анализа резултата степена искоришћења пужног преносника снаге

Анализа степена искоришћења пужног преносника показала је да концентрација CNT адитива у мазиву има кључан утицај на степен искоришћења пужног преносника снаге, при чему ће раст концентрације од 0 мас.% до 1,0 мас.% довести до смањења трења, стабилизације тангенцијалне силе и повећања степена искоришћења, док ће концентрација од 2 мас.% условно редуковати ове погодности због могуће агломерације наноцеви. Врста пужног зупчаника ће имати секундарни ефекат: дискови од цинк–алуминијум бронзе ZA-12 обезбеђују већи степен искоришћења у односу на калајне бронзе CuSn14, али ће при највећим оптерећењима доћи до погоршања радних карактеристика, односно до смањења степена искоришћења. Дијаграми треба да потврде да су адитиви кључни за оптимизацију триболошких карактеристика, док ће избор материјала утицати на стабилност и конзистентност резултата [84].

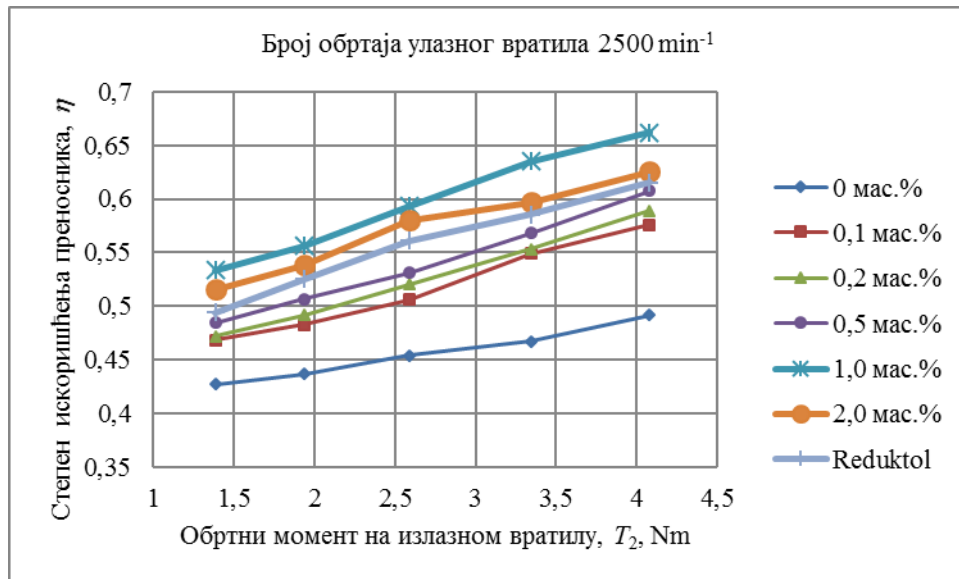
На дијаграмима, који су приказани на сликама 8.1, 8.2 и 8.3 приказане су зависности степена искоришћења пужног преносника снаге са пужом од челика и пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14, као функција излазног обртног момента. Испитивања су реализована при три различита броја обртаја улазног вратила 1500 min^{-1} , 2000 min^{-1} и 2500 min^{-1} , како би се анализирао утицај брзине на радне карактеристике преносника снаге. Утврђено је да је степен искоришћења зависан од типа и концентрације мазива, где су испитивана мазива са различитим масеним уделом CNT у опсегу од 0 мас.% до 2,0 мас.%, као и минерално уље Reduktol Super ISO VG 460. Дијаграми пружају визуелну и квантитативну оцену утицаја CNT адитива на степен искоришћења пужног преносника, показујући како оптималан садржај наноцеви може смањити трење и повећати степен искоришћења [31].



Слика 8.1 Зависност степена искоришћења од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе $CuSn14$ при улазном броју обртаја од 1500 min⁻¹



Слика 8.2 Зависност степена искоришћења од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе $CuSn14$ при улазном броју обртаја од 2000 min⁻¹

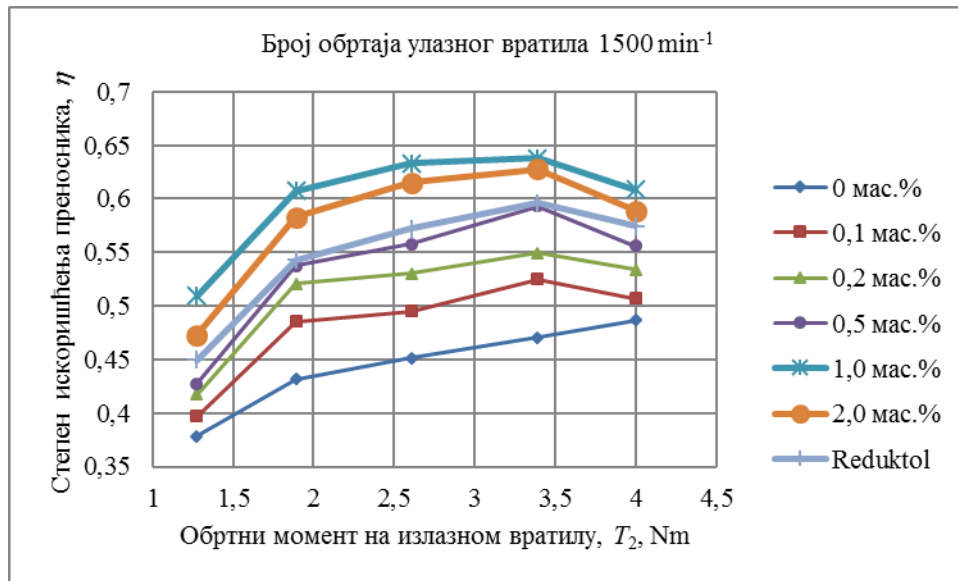


Слика 8.3 Зависност степена искоришћења од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе CuSn14 при улазном броју обртаја од 2500 min^{-1}

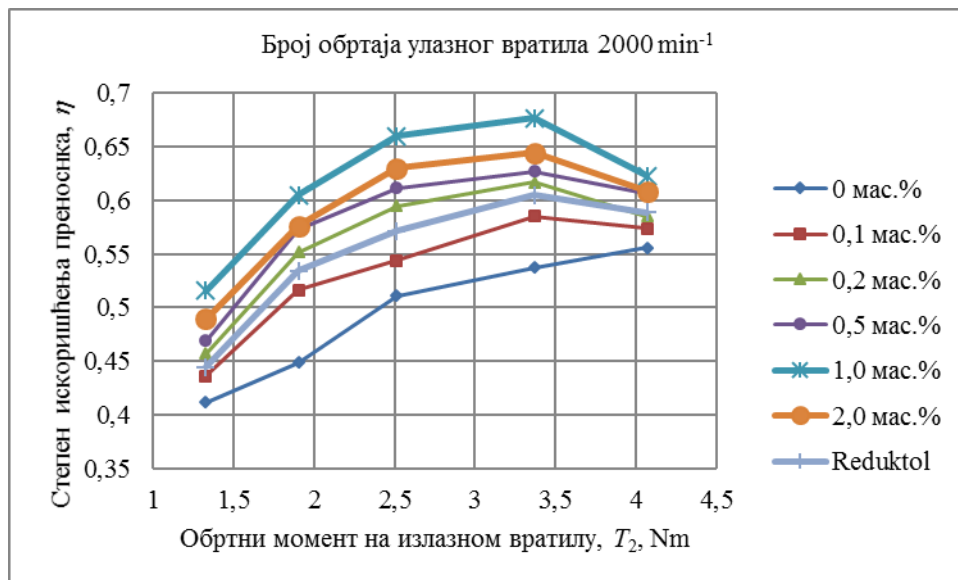
Са дијаграма приказаних на сликама 8.1, 8.2 и 8.3 јасно се уочава да са порастом оптерећења (обртног момента на излазном вратилу пужног преносника снаге) долази до повећања степена искоришћења пужног преносника, са пужним зупчаником од бронзе CuSn14, за све режиме рада (бројеве обртаја улазног вратила) и за сва примењена мазива са различитим процентом CNT адитива. Пораст степена искоришћења износи од 0,08 за мазиво на бази глицерола од 0 мас.% CNT адитива до 0,14 за мазиво са 1,0 мас.% CNT адитива.

Са триболошког аспекта, овакви резултати се могу објаснити повећаном способношћу трибофилма да поднесе контактна напрезања при већим оптерећењима: већи нормални притисак доводи до боље адаптације контактних микронеравина и формирања стабилнијег граничног филма, што редукује локално клизање, смањује адхезивно и абразивно хабање и омогућава ефикаснији пренос обртног момента [144]. Поред тога, присуство CNT адитива у мазиву утиче на механичку стабилност филма, смањује треће клизања на контакту, што се огледа у наведеном порасту степена искоришћења. Са друге стране, пораст оптерећења повећава носивост хидродинамичког филма између површина, јер раст притиска у контактної зони побољшава расподелу вискозног слоја мазива, смањује директан контакт две металне површине и доприноси конзистентнијем преносу силе смицања. Комбинација ових триболошких и хидрауличких ефеката објашњава експериментални тренд: већи обртни моменти и оптималан удео CNT адитива доводе до значајног повећања степена искоришћења пужног преносника.

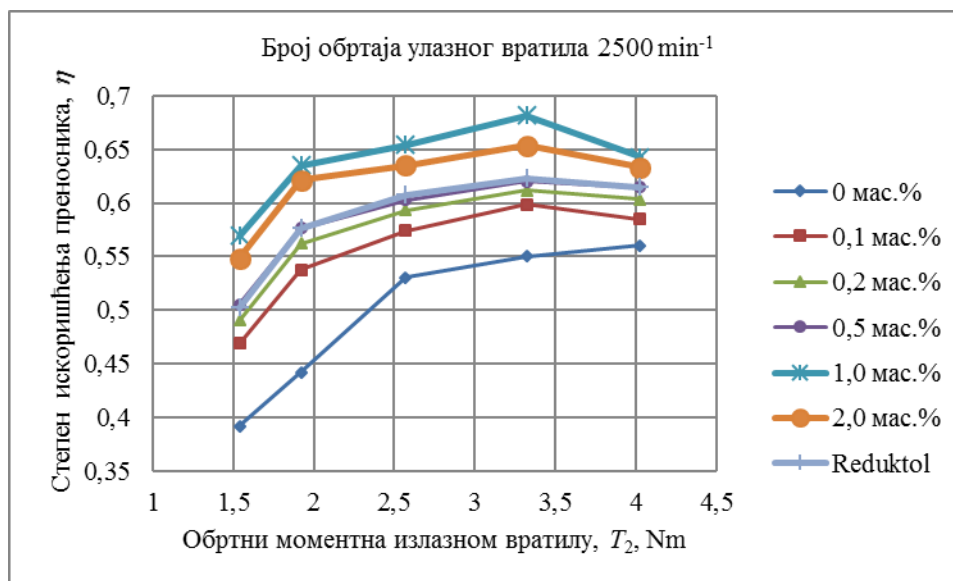
Дијаграми приказани на сликама 8.4, 8.5 и 8.6 приказују зависност степена искоришћења пужног преносника са челичним пужем и пужним зупчаником израђеним од цинк–алуминијум бронзе ZA-12 у односу на излазни обртни моменат T_2 , при различитим обртним брзинама улазног вратила од 1500 min^{-1} , 2000 min^{-1} и 2500 min^{-1} . Анализирани су радни услови за више врста мазива, формулисаних са различитим масеним уделима CNT адитива (0 мас.%, 0,1 мас.%, 0,2 мас.%, 0,5 мас.%, 1,0 мас.% и 2,0 мас.%), као и за комерцијално уље за зупчасте преноснике Reduktol Super ISO VG 460, при различитим нивоима оптерећења пужног преносника [31].



Слика 8.4 Зависност степена искоришћења од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе ZA-12 при улазном броју обртаја од 1500 min⁻¹



Слика 8.5 Зависност степена искоришћења од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе ZA-12 при улазном броју обртаја од 2000 min⁻¹



Слика 8.6 Зависност степена искоришћења од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе ZA-12 при улазном броју обртаја од 2500 min⁻¹

На дијаграмима на сликама 8.4, 8.5 и 8.6, који приказују промену степена искоришћења пужног преносника снаге са пужним зупчаником од цинк–алуминијум бронзе ZA-12, уочава се зависност слично као код пужног преносника снаге са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14, уз нешто више изражен раст степена искоришћења од 0,15 (са просечних око 0,41 на око 0,56) за мазиво са 0 мас.% CNT адитива, као мазиво са најслабијим карактеристикама, до 0,10 (са просечних око 0,52 на око 0,62, што износи око 36 %) за мазиво са 1,0 мас.% CNT адитива, као мазиво са најбољим карактеристикама. Поред тога степен искоришћења у овом случају је за 0,02 до 0,04 већи у односу на комбинацију пужног преносника са пужним зупчаником од калајне бронзе. Степен искоришћења пужног преносника снаге приликом примене комерцијалног уља за зупчасте преноснике Reduktol Super ISO VG 460, је на нивоу степена искоришћења пужног преносника снаге приликом примене мазива са 0,5 мас.% CNT адитива [31].

Виши степен искоришћења пужног преносника са пужним зупчаником од цинк-алуминијум бронзе ZA-12 у односу на калајну бронзу CuSn14 може се објаснити механичким и триболошким својствима легура при нижим и умереним оптерећењима. Бронза ZA-12 има већу тврдоћу и крутост у односу на бронзу CuSn14, што смањује пластичну деформацију контакта у зони пуж – пужни зупчаник и омогућава ефикаснији пренос момента без великог клизања. Такође, микронејуметалне фазе веће крутости у ZA-12 смањују локална укљештења и омогућавају стабилнији контакт при уобичајеним радним оптерећењима, што резултира нижим губицима снаге и већим степеном искоришћења. Насупрот томе, калајна бронза CuSn14, иако је пластично стабилнија, при овим условима омогућава благо „упијање“ оптерећења кроз локалну деформацију трибофилма, што узрокује мању ефикасност преноса момента и нижи степен искоришћења. Дакле, при нормалним режимима рада, комбинација веће крутости, тврдоће и оптималне микроструктурне хетерогености ZA-12 резултира бољим механичким преносом и вишим степеном искоришћења пужног преносника.

Овакав тренд повећаног степена искоришћења је присутан за све вредности оптерећења на излажном вратилу преносника снаге, осим за највеће оптерећење

приказано у плану експеримента у табели 6.16. Тада се уочава пад степена искоришћења у односу на претходно мање оптерећење, према плану експеримента.

Ово је последица, између осталог, разлике у термичкој отпорности легура. Калајна бронза има вишу температуру топљења и бољу отпорност на термичку деформацију, што јој омогућава да при екстремним контактним напорима и локалној топлоти задржи стабилнији трибофилм и пластичну носивост. Са друге стране, ZA-12 има нижу температуру течења и осетљивија је на локално загревање, што у условима високог оптерећења доводи до мекше и непотпуно стабилне контактне зоне, већег трења и микропробоја трибофилма. Као резултат, при максималним оптерећењима, пужни преносник са пужним зупчаником од бронзе CuSn14 задржава бољу механичку и триболошку ефикасност, док је бронза ZA-12 склонија смањењу степена искоришћења, услед термичких и механичких ограничења [145].

8.2. Анализа резултата испитивања буке пужног преносника снаге

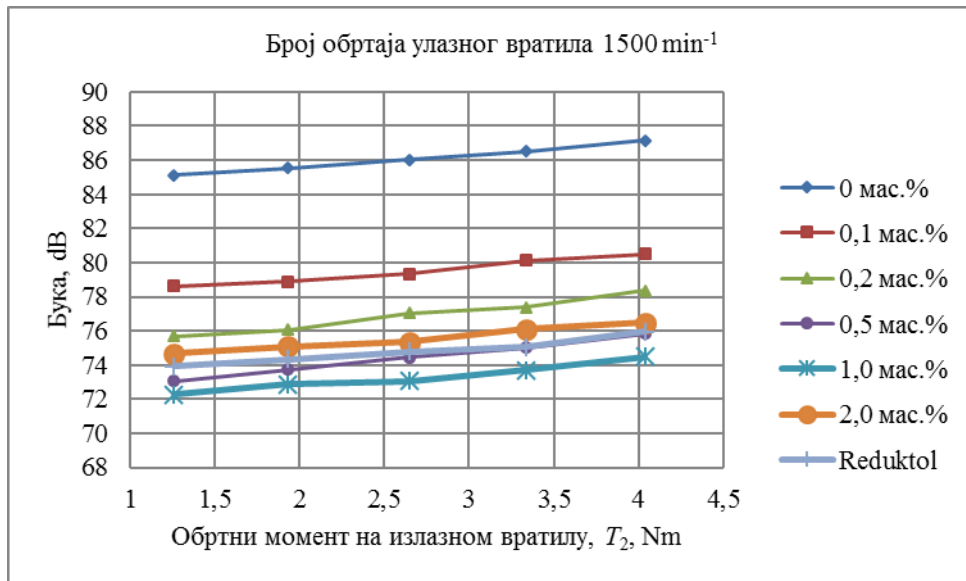
Резултати испитивања са аспекта промене буке се посматрају као индикатор локалних промена коефицијента трења, стабилности трибофилма и интеракције контактних површина у условима клизања. Адитиви CNT се третирају као фактор који може смањити адхезивно и абразивно хабање, редуковати локалне осцилације контакта и обезбедити уједначенији пренос силе смицања. Анализа добијених података има за циљ да идентификује оптималне комбинације материјала и концентрације адитива које минимизују ниво буке и побољшавају динамичку стабилност пужног преносника.

На дијаграмима на сликама 8.7, 8.8 и 8.9 приказане су експериментално добијене зависности нивоа буке од излазног обртног момента T_2 пужног преносника снаге са челичним пужем и пужним зупчаником израђеним од калајне бронзе CuSn14. Испитивања су спроведена при различитим бројевима обртаја улазног вратила, конкретно при 1500 min^{-1} , 2000 min^{-1} и 2500 min^{-1} , како би се обухватио шири опсег радних услова и динамичких оптерећења која утичу на генерисање виброакустичких феномена у систему.

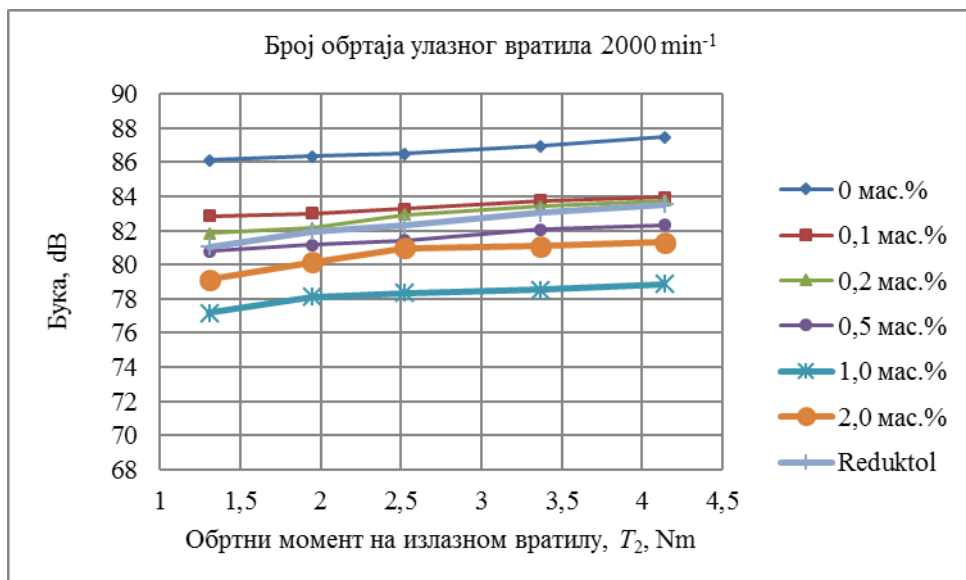
У анализу је укључен читав спектар примењених мазива формулисаних са различитим масеним уделима CNT адитива (0 мас.%, 0,1 мас.%, 0,2 мас.%, 0,5 мас.%, 1,0 мас.% и 2,0 мас.%), као и комерцијално уље за зупчасте преноснике Reduktol Super ISO VG 460, које је послужило као референтни медијум за поређење триболошког и виброакустичког понашања. Ова широка лепеза мазива омогућава свеобухватну процену утицаја наноструктурних адитива на механизме трења и хабања, а тиме и на акустичку стабилност пужног преносника.

Испитивања су обављена при различитим нивоима оптерећења излазног вратила, што омогућава детаљније сагледавање односа између повећања обртног момента и интензитета буке. Оваква анализа је од посебног значаја, јер пораст оптерећења обично доводи до повећаног контактнег притиска на површинама пужа и пужног зупчаника, што може резултовати променама у интензитету буке. Укључивање различитих брзинских режима додатно омогућава идентификацију потенцијалних резонантних појава и боље разумевање механизма који доводе до генерисања буке у пужним преносницима.

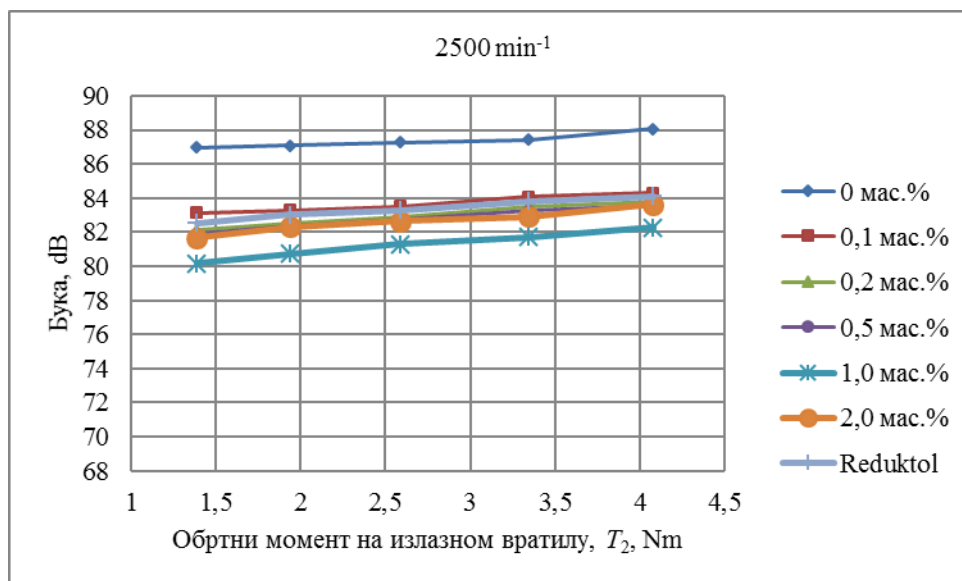
На тај начин, дијаграми на сликама 8.7–8.9 пружају систематичан и свеобухватан увид у међусобну повезаност параметара подмазивања, оптерећења, угаоне брзине вратила и нивоа буке, што представља важан корак у оптимизацији и смањењу буке код пужних преносника снаге.



Слика 8.7 Зависност буке од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе CuSn14 при улазном броју обртаја од 1500 min⁻¹



Слика 8.8 Зависност буке од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе CuSn14 при улазном броју обртаја од 2000 min⁻¹



Слика 8.9 Зависност буке од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе $CuSn14$ при улазном броју обртаја од 2500 min^{-1}

Дијаграми на сликама 8.7, 8.8 и 8.9. јасно приказују појаву смањења нивоа буке са додавањем CNT адитива у мазиво на бази глицерола. Притом је већ на режиму најмањег броја обртаја од 1500 min^{-1} веома изражено смањење буке за око 6 dB, одмах при додавању 0,1 мас. % CNT адитива. Ово се дешава услед формирања примарног нанотрибофилма, редукције адхезивних енгл. „*stick-slip*“ осцилација и уједначавања смицајног понашања уљног филма, чиме се потискују нискофреквентне вибрације које доминирају у укупној емисији буке пужних преносника [146].

Са даљим повећањем процента CNT адитива опада интензитет буке за око 2 dB до 3 dB, са сваким наредним мазивом. Ово је последица јачања носивости и структурне стабилности уљног филма, попуњавања топографских неравнина и редукције високофреквентних микровибрација. Најнижи ниво буке се бележи при испитивању пужног преносника снаге са мазивом од 1,0 мас. % CNT адитива, где ниво буке опада за чак 14 dB, односно пад од око 15 %, у односу на почетно мазиво са 0 мас. % CNT адитива. То је оптимална концентрација која обезбеђује најстабилније трење и најмање механичке осцилације [31].

При даљем повећању процента CNT адитива на 2,0 мас. % у базном мазиву, долази до погоршања радних карактеристика и повећања буке за око 3 dB, услед агрегације наноцеви, нарушавања континуитета уљног филма и појаве локалних ударних тачака, које повећавају вибрације. Разлике у укупном нивоу буке за следећу, вишу улазну угаону брзину пужног преносника снаге од 2000 min^{-1} су мање изражене, где ниво буке при употреби мазива без CNT адитива у односу на мазиво са 1,0 мас. % CNT адитива опада за око 9 dB, што је пад од око 11 %. Ту доминира хидродинамички режим и утицај граничног трења опада. За највишу улазну угаону брзину пужног преносника снаге од 2500 min^{-1} разлике у нивоу буке су још мање изражене, али и даље веома уочљиве, те износе око 7 dB, тако да је пад интензитета буке око 9 %.

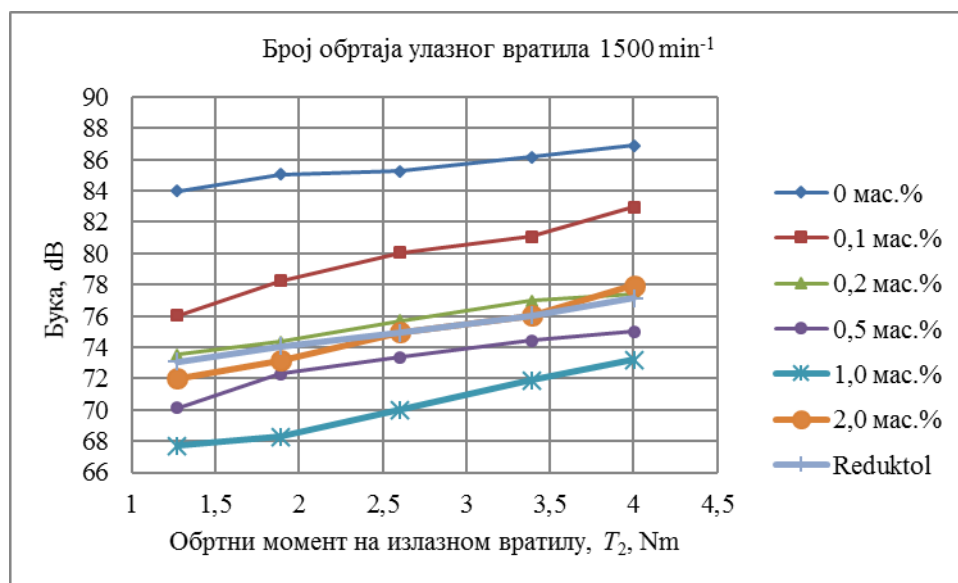
Интензитет буке пужног преносника при примени комерцијалног уља за зупчасте преноснике Reduktol Super ISO VG 460 је приближан интензитету буке приликом примене мазива са 0,2 мас. % и 0,5 мас. % CNT адитива у базном глицеролу, што показује да умерене концентрације CNT обезбеђују сличну стабилност трења, али да

комерцијално уље за зупчасте преноснике не достиже ниво редукције буке који остварује наномазиво са 1,0 мас.% CNT.

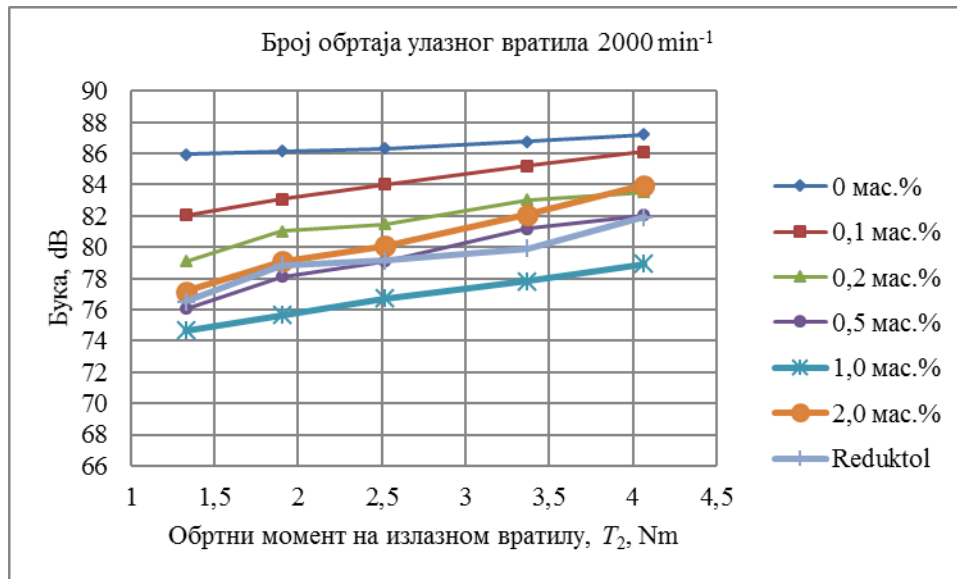
У оквиру анализе карактеристика буке пужног преносника снаге са челичним пужем и пужним зупчаником израђеним од цинк–алуминијумске бронзе ZA-12, посебно значајну улогу имају дијаграми на сликама 8.10, 8.11 и 8.12, који пружају увид у зависност нивоа генерисане буке од излазног обртног момента T_2 . Ови дијаграми, засновани на изведеним експерименталним истраживањима, обухватају мерења при обртним брзинама улазног вратила од 1500 min^{-1} , 2000 min^{-1} и 2500 min^{-1} .

Испитивања су извршена са истом комбинацијом мазива као код примене пужног зупчаника од калајне бронзе CuSn14. Специфична микроструктура легуре ZA-12 показује изражену осетљивост на тип и стабилност подмазујућег филма, услед чега промене у концентрацији CNT адитива могу имати мерљив утицај на механизме трења, хабања и емисију буке у контакту пужа и пужног зупчаника. Ови дијаграми представљају комплексан аналитички инструмент за дубинско разумевање међузависности радних карактеристика, процеса подмазивања и динамичких услова рада пужних преносника.

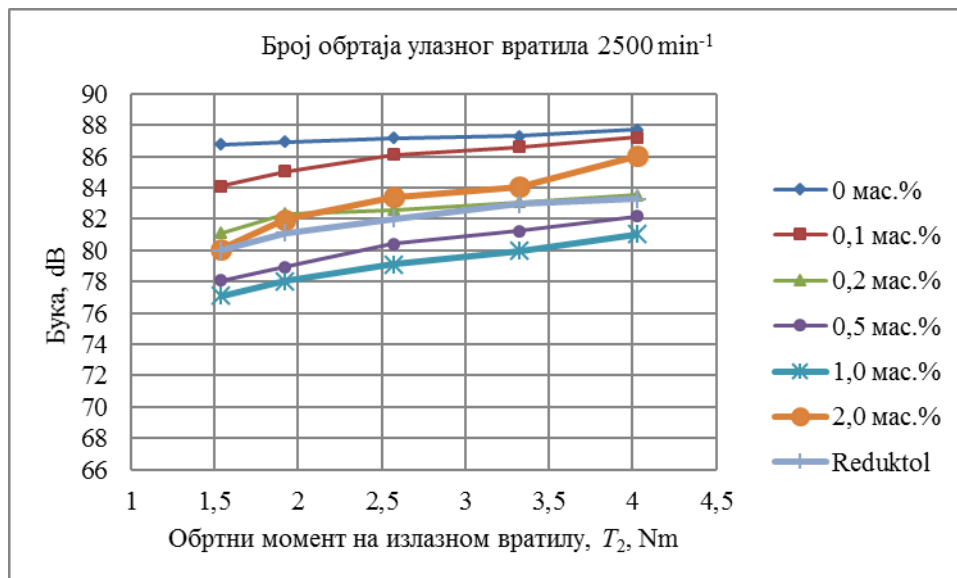
Овако структурирани резултати пружају добру основу за прецизну оптимизацију концентрације CNT адитива, избора мазива и материјала зупчастог пара.



Слика 8.10 Зависност буке од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе ZA-12 при улазном броју обртаја од 1500 min^{-1}



Слика 8.11 Зависност буке од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе ZA-12 при улазном броју обртаја од 2000 min^{-1}



Слика 8.12 Зависност буке од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе ZA-12 при улазном броју обртаја од 2500 min^{-1}

Интензитет буке код пужног преносника снаге са пужним зупчаником од цинк–алуминијум бронзе ZA-12 показује сличан тренд смањења буке са применом мазива у коме се повећава проценат CNT адитива. Попут претходне, и код ове редукторске комбинације највећи тренд смањења буке је при најнижем улазном броју обртаја од 1500 min^{-1} , где ниво буке између експеримента са применом мазива од 0 мас.% CNT адитива, у односу на примену мазива од 1,0 мас.% CNT адитива, опада за око 16 dB (смањење око 18 %), при чему је уочени тренд смањења буке израженији у односу на пужни преносник са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14. При улазном броју обртаја од 2000 min^{-1} бука опада за око 12 dB (смањење око 13 %), а при улазном броју

обртаја од 2500 min^{-1} бука за око 8 dB (смањење око 10 %), применом мазива од 1,0 мас.% CNT адитива, у односу на мазиво са 0 мас.% CNT адитива. Јасно се може закључити да бука наставља да пада и код ове комбинације са пужним зупчаником од цинк–алуминијум бронзе, само уз још већи интензитет [31].

Основна разлика у акустичком понашању две бронзе произилази из њихових механичких и триболошких својстава. Калајна бронза CuSn14 је стабилније структуре и мање подложна локалним пластичним деформацијама, па је бука углавном последица финих осцилација трења. Адитиви CNT у овом случају углавном стабилизују слој смицања и уједначавају контактне притиске, што доводи до умереног смањења буке. Насупрот томе, ZA-12 бронза има израженију микрогеометрију и већу склоност ка локалним удубљењима и краткотрајним ударним контактима, који представљају главни извор повишене емисије буке. Наноцеви овде имају знатно снажнији ефекат: попуњавају микронеравнине, носе део оптерећења и стабилизују промењиви контакт, условљен геометријом површине, чиме појачано смањују вибрације карактеристичне за бронзу ZA-12. Зато се код ове легуре бележи већи пад буке него код бронзе CuSn14, јер честице CNT у већој мери ублажавају њене израженије механичке и триболошке нестабилности [147].

8.3. Анализа резултата испитивања вибрација пужног преносника снаге

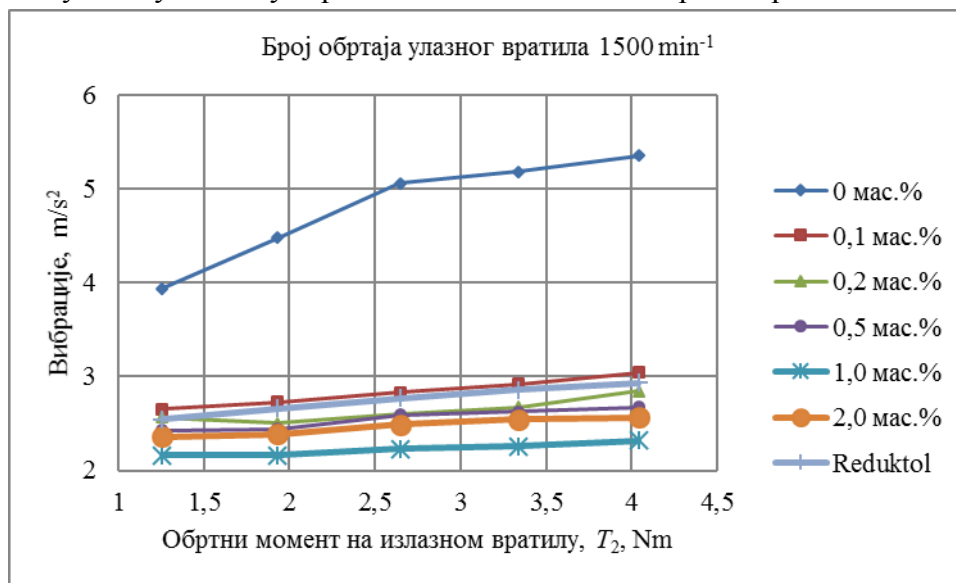
Анализа вибрација пужног преносника усмерена је пре свега на утицај мазива са различитим концентрацијама CNT адитива (од 0 до 2,0 мас.%) у бази глицерола, са циљем да се утврди како наноструктурне модификације уљног филма утичу на динамичку стабилност клизног контакта. Прате се промене вибрационих амплитуда као директан показатељ способности CNT адитива да редукују локалне осцилације трења, пригуше микродинамичке нестабилности и уједначе расподелу контактних притисака. Након процене ефекта мазива, анализира се улога материјала пужног зупчаника — калајне бронзе CuSn14 и цинк–алуминијум бронзе ZA-12 — чије различите механичке и триболошке карактеристике утичу на ниво вибрационе побуде. На овај начин омогућено је раздвајање примарног утицаја CNT адитива од утицаја структуралних својстава легура, што представља основу за идентификацију најповољније комбинације мазива и материјала у погледу минимизације вибрација пужног преносника.

Зависности вибрација од излазног обртног момента T_2 пужног преносника снаге са челичним пужем и пужним зупчаником израђеним од калајне бронзе CuSn14, детаљно су приказане на дијаграмима на сликама 8.13 до 8.15. Ови дијаграми представљају интегрисани експериментални приказ промена вибрација у условима рада при различитим обртним брзинама улазног вратила од 1500 min^{-1} , 2000 min^{-1} и 2500 min^{-1} , чиме се обухвата широк спектар режима рада, од умерених до динамички интензивних. Оваква разноврсност радних услова омогућава дубље разумевање механичког одзива преносника и идентификацију потенцијалних зона повећане вибрационе осетљивости.

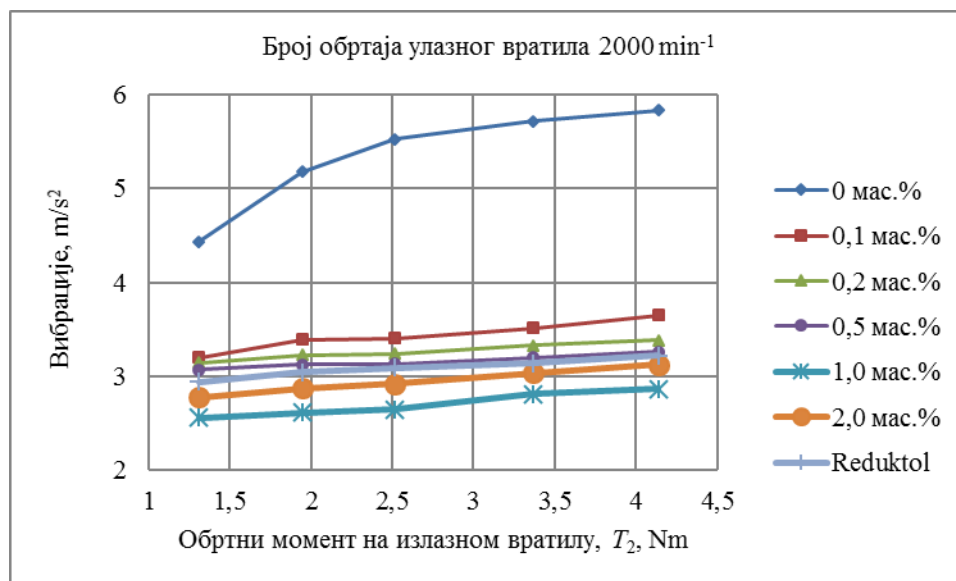
У оквиру испитивања примењена су мазива са различитим масеним уделима CNT адитива, у опсегу од 0 мас.% до 2,0 мас.%, као и минерално уље Reduktol Super ISO VG 460. Ова комбинација мазива омогућава поређење класичног модела подмазивања са напредним наноструктурним мазивима, који се одликују побољшаним триболошким својствима, као што су редукација граничног трења, повећање стабилности подмазујућег филма и смањење микроклизања у контактної зони. С обзиром на то да бронза CuSn14 поседује специфичне механичке и антифрикционе карактеристике, увођење CNT адитива може значајно изменити вибрационо понашање система, што се јасно огледа у оствареним резултатима.

Испитивање пужног преносника у различитим режимима рада преносника има

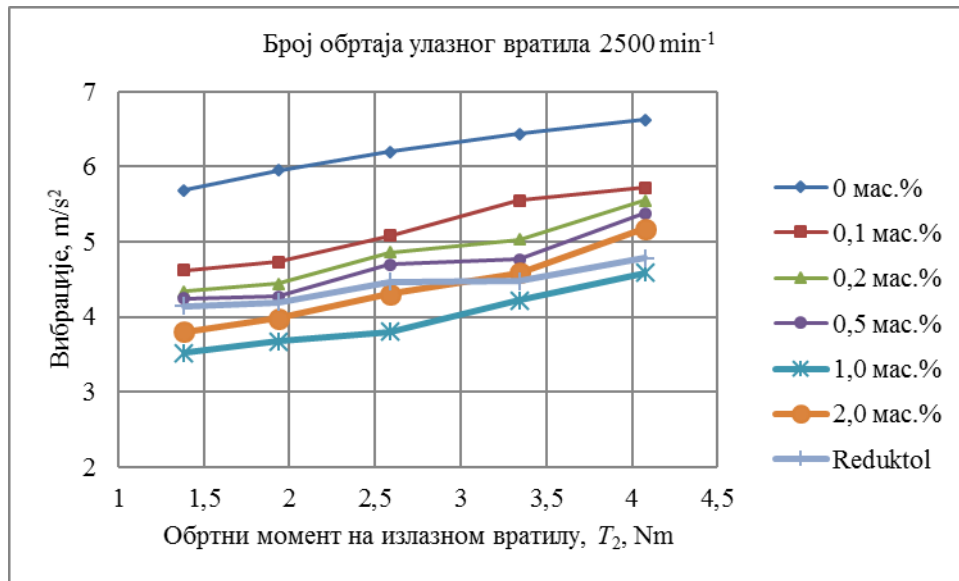
циљ да се утврди у којој мери оптерећење, угаона брзина и тип мазива утичу на динамичку стабилност и ниво вибрација. Пораст обртног момента T_2 уобичајено доводи до повећања контактнoг притиска између зупчаника и пужа, што резултује порастом вибрација. Мерење вибрација пужног преносника је извршено преко убрзања и изражено у јединицама m/s^2 , јер се тиме добија директан показатељ динамичког оптерећења преносника снаге, омогућавајући прецизну процену интензитета вибрација у широком фреквенцијском опсегу. Поред тога, убрзање је лако стандардизовати и калибрисати, што омогућава свеобухватну анализу термичких и динамичких параметара система.



Слика 8.13 Зависност вибрација од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе CuSn14 при улазном броју обртаја од 1500 min^{-1}



Слика 8.14 Зависност вибрација од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе CuSn14 при улазном броју обртаја од 2000 min^{-1}



Слика 8.15 Зависност вибрација од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе CuSn14 при улазног броју обртаја од 2500 min^{-1}

Сумирано, ови резултати пружају свеобухватан увид у комплексну међузависност радних карактеристика пужног пара, структурних карактеристика мазива, радног оптерећења и угаоне брзине вратила преносника.

Додавање CNT адитива у базно мазио у значајној мери утиче на смањење нивоа вибрација пужног преносника снаге са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn, на шта јасно указују дијаграми на сликама 8.13, 8.14 и 8.15, а што произилази из механизма стабилизације контактне зоне и уједначавања динамичког понашања клизног споја. При најмањој улазној брзини пужног преносника од 1500 min^{-1} настаје значајно смањење вибрација већ при додавању 0,1 мас. % CNT, када се вибрација смањује за $1,3 \text{ m/s}^2$ у односу на примену мазива са 0 мас. % CNT, што је последица формирања првог конзистентног нанотрибофилма, који повећава носивост мазивног слоја и пригушује микродеформације на површини зупчаника. Вибрације потом благо расту са повећањем оптерећења на електромагнетној кочници током мерног циклуса. Интензитет вибрација наставља да опада са додавањем CNT адитива у базно мазио, да би највећи ниво смањења вибрација био остварен са мазивом од 1,0 мас. % CNT адитива, где се вибрације смањују за око $1,8 \text{ m/s}^2$ (смањење за око 27 %) у односу на примену мазива са 0 мас. % CNT. Даље додавање CNT адитива додатно стабилизује клизни контакт, смањује варијабилност микродинамичких појава и уједначава расподелу контактних притисака [31].

Ниво вибрација приликом примене уља Reduktol Super ISO VG 460 је на нивоу вибрација између вибрација које се постижу при примени мазива са 0,2 мас. % и 0,5 мас. % CNT адитива, што потврђује да умерене концентрације CNT обезбеђују побољшану вибрациону стабилност у односу на стандардно индустријско мазио.

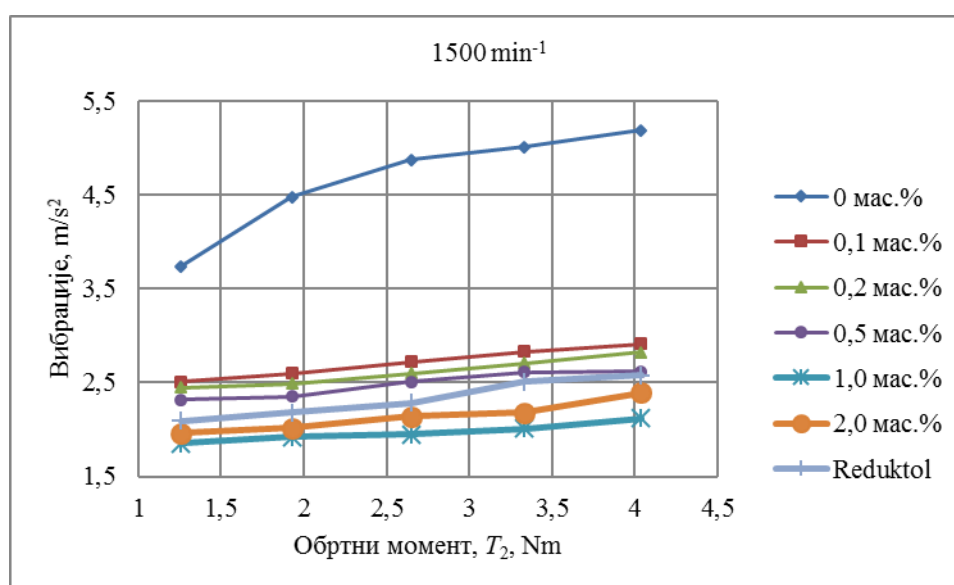
Даље повећање процента CNT адитива у мазиву на 2,0 мас. % доводи до повећања вибрација пужног преносника снаге, тако да је интензитет вибрација у овом случају приближно једнак нивоу вибрација пужног преносника уз примену мазива са 0,5 мас. % CNT. Повећање концентрације CNT на 2,0 мас. % доводи до погоршања вибрација услед агломерације наноцеви и нарушавања континуитета трибофилма, што ствара локализоване зоне неуједначеног притиска и интензивних ударних интеракција у контакту пуж–пужни зупчаник. Са триболошког аспекта, дискретне честице ремете

стабилан контакт површина, изазивајући краткотрајне клизна померања и неуједначене осцилације, што директно повећава амплитуду вибрација [148]. Као резултат, ниво вибрација при 2,0 мас.% CNT приближно се изједначава са оним при 0,5 мас.% CNT, јер се губи хомогеност и стабилност уљног филма.

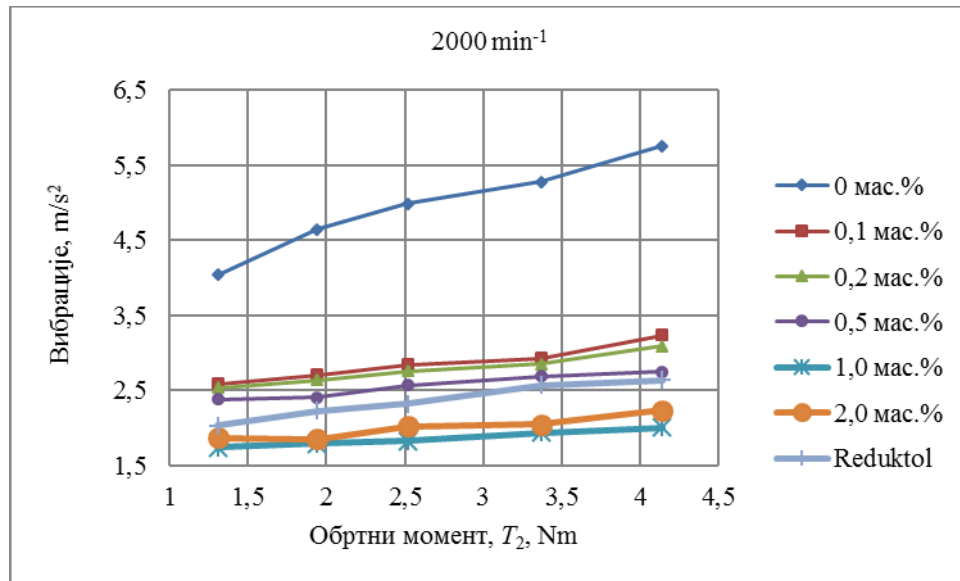
На дијаграмима на сликама 8.16, 8.17 и 8.18 илустроване су експериментално добијене зависности вибрација од излазног обртног момента T_2 пужног преносника снаге, чине челични пуж и пужни зупчаник од цинк–алуминијумске бронзе ZA-12. Ови дијаграми представљају графички приказ који омогућава анализу утицаја различитих брзинских режима на ниво вибрација при три различита броја обртаја улазног вратила од 1500 min^{-1} , 2000 min^{-1} и 2500 min^{-1} и различитим оптерећењима.

Испитивања су спроведена са мазивима која садрже различите масене уделе CNT адитива, у распону од 0 мас.% до 2,0 мас.%, уз коришћење и комерцијалног уља за зупчасте преноснике Reduktol Super ISO VG 460 као референтног мазива за поређење ефеката наноструктурних модификација. Наноцеви, познате по својој високој специфичној чврстоћи, топлотној проводљивости и способности да редукују гранично трење, могу значајно утицати на вибрационо понашање контакта пужа и пужног зупчаника. Дијаграми приказују да ли и у којој мери повећање концентрације CNT адитива доводи до стабилизације динамичког одзива и смањења амплитуде вибрација при растућем обртном моменту.

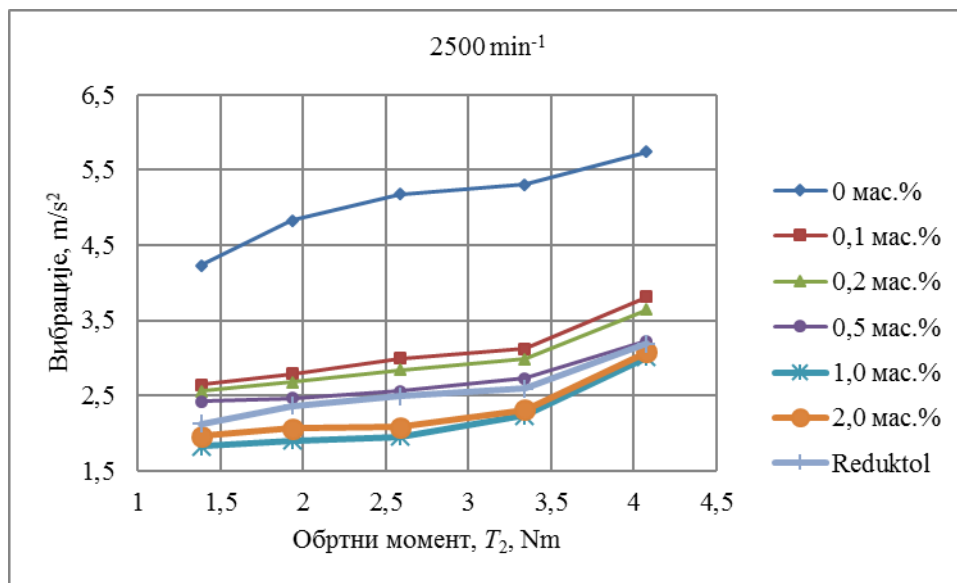
Обухваћени су различити режими рада преносника, који подразумевају промене оптерећења и угаоне брзине вратила, што омогућава идентификацију критичних радних услова под којима систем показује највећу вибрациону осетљивост. Познато је да легура ZA-12, услед свог двофазног металуршког састава и специфичних механичких својстава, може испољити различите триболошке и динамичке карактеристике у односу на класичне бронзе. Управо због тога је анализа вибрација у комбинацији са различитим типовима мазива од посебног значаја за разумевање различитих параметара на стабилност пужног преносника.



Слика 8.16 Зависност вибрација од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе ZA-12 при улазном броју обртаја од 1500 min^{-1}



Слика 8.17 Зависност вибрација од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе ZA-12 при улазном броју обртаја од 2000 min⁻¹



Слика 8.18 Зависност вибрација од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе ZA-12 при улазном броју обртаја од 2500 min⁻¹

Слични трендови промене вибрација се добијају и приликом испитивања пужног преносника снаге са пужним зупчаником од цинк–алуминијум бронзе ZA-12, при чему је у овом случају ефекат смањења вибрација израженији. Хемијски посматрано површине бронзе у контакту са глицеролним молекулима стварају адсорбовани слој, у коме CNT честице делују као структурни ојачавачи, побољшавајући вискозно-еластичне карактеристике филма и спречавајући локалне прекомерне деформације [149]. При најмањем броју обртаја улазног вратила смањење вибрација при примени мазива са 0,1 мас.% CNT у односу на мазиво са 0 мас.% CNT износи 1,4 m/s², а при примени мазива са 1,0 мас.% вибрације опадају и за чак 2,1 m/s² (смањење од око 37 %), услед појаве да

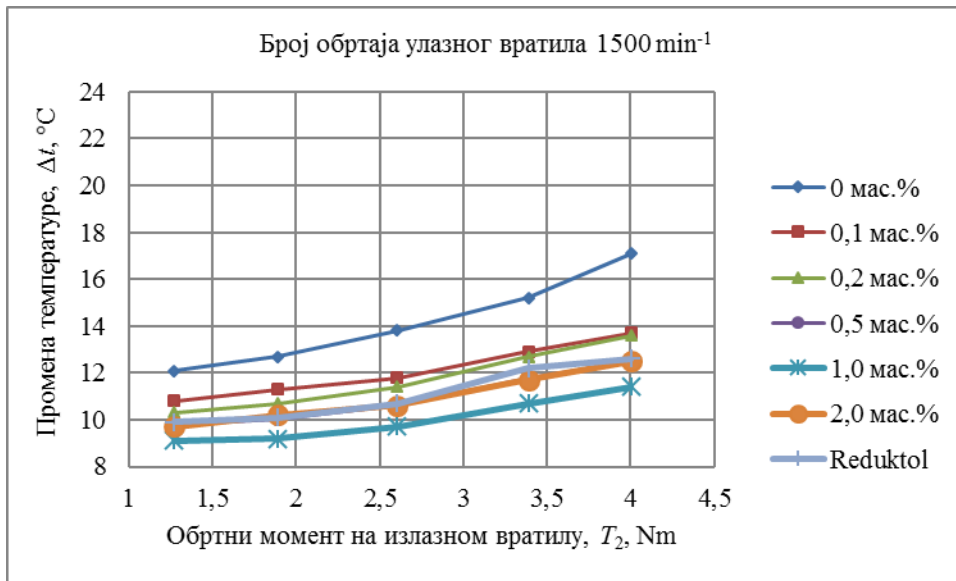
наноцеви више интегришу микронеравнине контактне површине. Међутим, наставак повећања удела CNT адитива у мазиву изазива повећање вибрација за око $0,2 \text{ m/s}^2$, док су вибрације при примени уља Reduktol Super ISO VG 460, у додатном порасту за још око $0,3 \text{ m/s}^2$ и долазе до нивоа вибрација као при примени мазива са $0,5 \text{ мас.}\%$ CNT адитива [31].

8.4. Анализа резултата испитивања промене температуре пужног преносника снаге

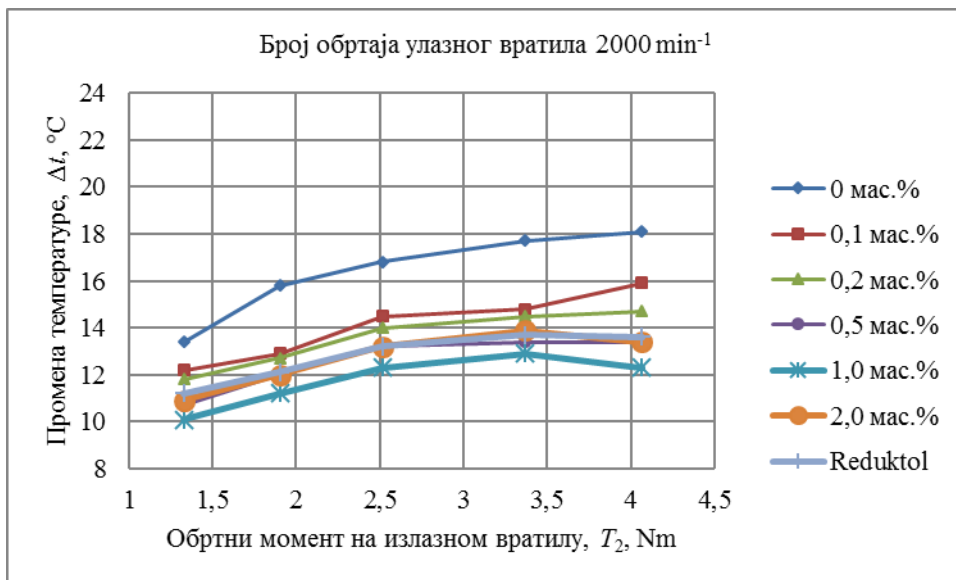
При испитивању пужног преносника снаге са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14 и цинк–алуминијум бронзе ZA-12, један од параметара који се прати је промена температуре контактне зоне у функцији концентрације CNT адитива у глицеролном мазиву. Ова анализа има за циљ да идентификује како наноструктурна модификација мазива утиче на топлотну стабилност и ефикасност дисипације топлоте у трибослоју, узимајући у обзир различите триболошке и механичке карактеристике обе легуре. Праћење температурних промена омогућава утврђивање оптималне комбинације мазива и материјала која минимизује локално загревање, смањује ризик од термичких деформација и обезбеђује стабилне услове рада пужног преносника при различитим оптерећењима и режимима рада.

Дијаграми на сликама 8.19, 8.20 и 8.21 представљају систематизован приказ зависности промене температуре пужног преносника снаге у односу на излазни обртни моменат T_2 , при чему је у анализи обухваћен преносник са челичним пужем и пужним зупчаником израђеним од калајне бронзе CuSn14. Овим дијаграмима обухваћена су експериментална мерења спроведена при угаоним брзинама улазног вратила од 1500 min^{-1} , 2000 min^{-1} и 2500 min^{-1} , што омогућава детаљно сагледавање утицаја промене улазног броја обртаја на термичко понашање система под различитим условима оптерећења. С обзиром на то да температура представља један од важнијих индикатора триболошке стабилности и ефикасности подмазивања у пужним преносницима, приказани резултати имају велику аналитичку вредност.

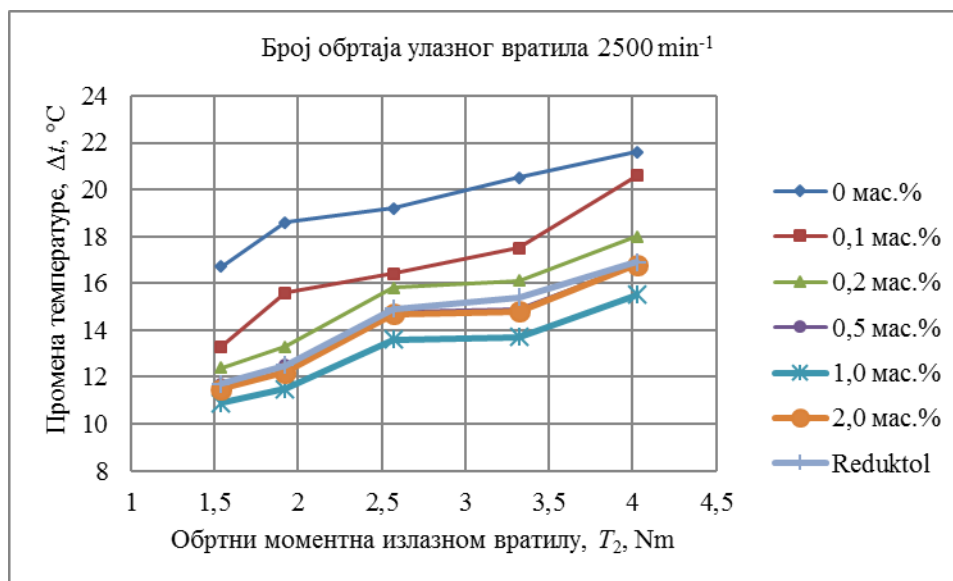
Посебна пажња у анализи усмерена је на различите режиме рада пужног преносника, при којима се врше промене оптерећења и обртне брзине вратила. Познато је да пораст обртног момента доводи до интензивнијег трења и повећаног загревања контактних површина, док виша угаона брзина може узроковати додатно загревање услед већих губитака у мазиву и бржег разарања подмазујућег филма. Анализирани дијаграми стога омогућавају идентификацију критичних радних услова у којима долази до наглашеног раста температуре, али и оних у којима одређене концентрације CNT адитива показују израженији стабилизујући ефекат.



Слика 8.19 Зависност промене температуре од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе CuSn14 при улазном броју обртаја од 1500 min⁻¹



Слика 8.20 Зависност промене температуре од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе CuSn14 при улазном броју обртаја од 2000 min⁻¹



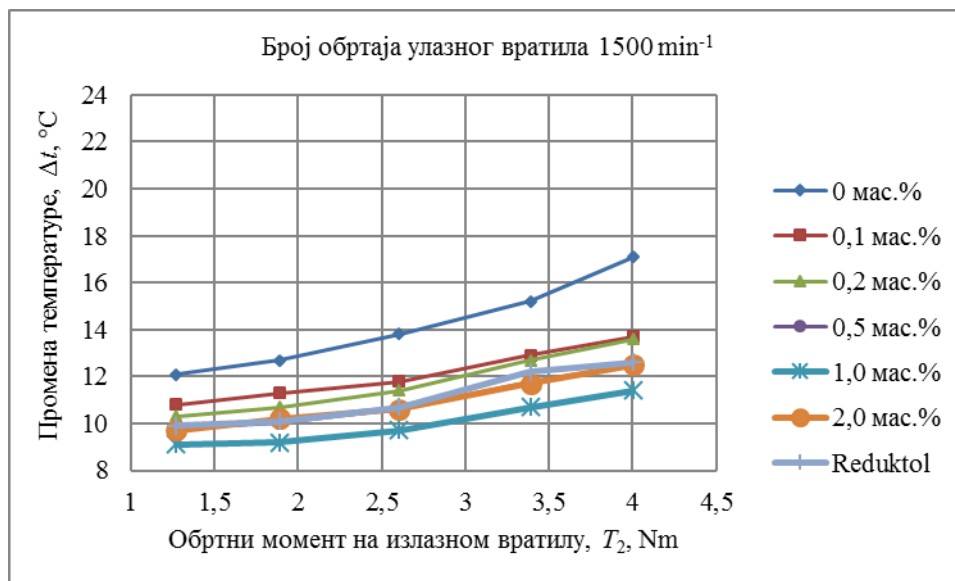
Слика 8.21 Зависност промене температуре од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе CuSn14 при улазном броју обраћања од 2500 min^{-1}

Претходни дијаграми графички приказују утицај примене мазива са различитим процентом CNT адитива на смањење промене температуре у оквиру сваког мерног циклуса од 90 минута. Већ се при улазној брзини од 1500 min^{-1} уочава да додавање 0,1 мас.% CNT адитива у мазио доводи до смањења величине Δt од око $2 \text{ }^\circ\text{C}$, у односу на примену мазива са 0 мас.% CNT адитива. Притом честице CNT у комбинацији са глицеролом и металном површином учествују у формирању адсорбованог слоја који повећава вискозно–еластичне карактеристике уљног филма, успоравајући топлотну проводљивост и спречавајући локално прегревање микроудубљења на површини зупчаника. Даље повећање процента CNT адитива условљава даље смањење промене температуре Δt , која највеће смањење остварује при употреби мазива са 1,0 мас.% CNT, којом приликом се вредност Δt смањује за око $4 \text{ }^\circ\text{C}$, што представља око 26 %, јер се енергија трења равномерно распоређује и претвара у мање термичке осцилације. С обзиром да промена температуре Δt , при овом најнижем броју обраћања улазног вратила, по мерном циклусу од 90 минута, износи у просеку $6,2 \text{ }^\circ\text{C}$, јасно је наведено смањење промене температуре Δt , што представља значајно достигнуће. Са дијаграма је уочљиво и да даље повећање процентуалног удела CNT адитива на 2,0 мас.% изазива повећање промене температуре која излази на вредност која одговара условима примене мазива са 0,5 мас.% CNT адитива. При овом проценту CNT адитива долази до појачане агломерације наноцеви, чиме се значајно повећава вискозност и унутрашњи отпори, доводећи до повећаног пораста температуре. Примена уља Reduktol Super ISO VG 460 је условила погоршање ове карактеристике промене температуре, тако да је иста порасла на вредност која одговара условима примене мазива са 0,2 мас.% и 0,5 мас.% CNT адитива, јер комерцијално уље за зупчасте преноснике не обезбеђује исти микрохомогени трибофилм, па долази до пораста локалних напона смицања и погоршања дисипације топлоте [150].

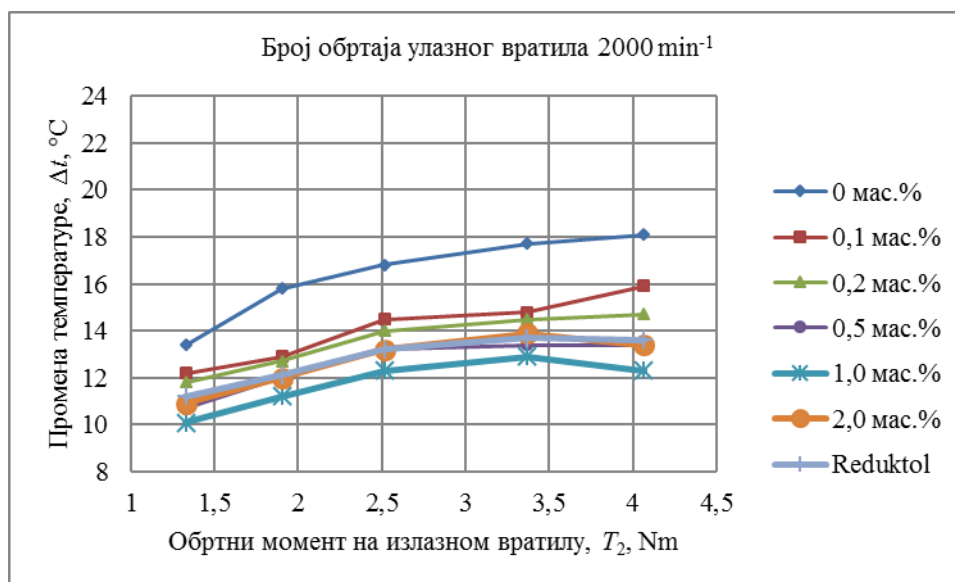
На овај начин оптимална концентрација CNT не само да стабилизује механичку и триболошку структуру контакта, већ и минимизира топлотне осцилације и губитке снаге у пужном преноснику.

Дијаграми на сликама 8.22, 8.23 и 8.24 пружају приказ зависности промене

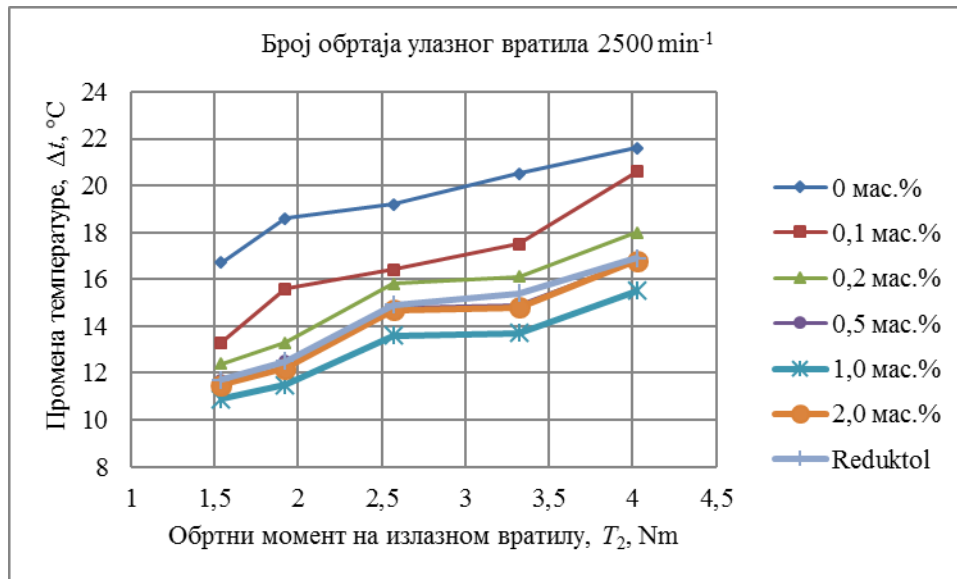
температуре пужног преносника снаге, на почетку и на крају сваког мерног циклуса од 1,5 h, у односу на излазни обртни моменат T_2 , где је у фокусу пужни зупчаник израђен од цинк-алуминијумске бронзе типа ZA-12. Ови дијаграми обухватају мерења спроведена при бројевима обртаја улазног вратила у опсегу од 1500 min^{-1} до 2500 min^{-1} , што омогућава анализу топлотног понашања преносника, кроз различите динамичке режиме рада. Увођење угљеничних наноцеви у базно мазиво има за циљ повећање стабилности подмазујућег филма, редукцију граничног трења и побољшање дисипације топлоте, што је од кључног значаја за смањење локалног загревања металних површина у контакту.



Слика 8.22 Зависност промене температуре од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе ZA-12 при улазном броју обртаја од 1500 min^{-1}



Слика 8.23 Зависност промене температуре од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе ZA-12 при улазном броју обртаја од 2000 min^{-1}



Слика 8.24 Зависност промене температуре од величине излазног обртног момента преносника са пужним зупчаником од бронзе ZA-12 при улазном броју обраћања од 2500 min⁻¹

Овај сет дијаграма такође обухвата различите режиме рада преносника, укључујући промене оптерећења излазног вратила и броја обраћања улазног вратила, што омогућава идентификацију критичних услова под којима долази до наглог пораста температуре.

Испитивање пужног преносника снаге са пужним зупчаником од цинк–алуминијум бронзе ZA-12 у условима коришћења мазива са додатком CNT адитива је показало сличне резултате као код примене калајне бронзе, осим што се уочава да посебно при највећој улазној брзини пужног преносника, долази до веома израженог смањења промене температуре, која износи $\Delta t = 1,8$ °C при примени мазива са 0,1 мас. % CNT адитива у односу на мазиво са 0 мас. % CNT адитива, као и просечно смањење $\Delta t = 4,8$ °C, односно 27 %, при примени мазива са 1,0 мас. % CNT адитива у односу на почетно мерење са мазивом од 0 мас. % CNT адитива. Већ овде се енергија трења равномерно расподељује и мање се претвара у локално загревање површина. Долази до побољшавања вискозно–еластичних особина уљног филма, спречавајући појаву локалних термичких „врућих тачака“ и микроудубљења [150, 151]. Даље повећање CNT адитива на вредност од 2,0 мас. %, изазива супротан ефекат, односно повећање промене температуре Δt , која достиже вредности као приликом примене мазива са 0,5 мас. % CNT адитива. Примена уља Reduktol Super ISO VG 460 такође погоршава радне карактеристике доводећи промену температуре Δt на ниво који је измерен при употреби мазива са 0,2 мас. % до 0,5 мас. % CNT адитива.

Ово указује да оптимална концентрација CNT адитива омогућава формирање стабилног трибофилма, који уравнотежавају механичке и триболошке интеракције, што резултује значајним редуцијама промена температуре током циклуса рада и побољшањем топлотне стабилности контакта.

8.5. Анализа резултата испитивања хабања и храпавости делова пужног преносника снаге

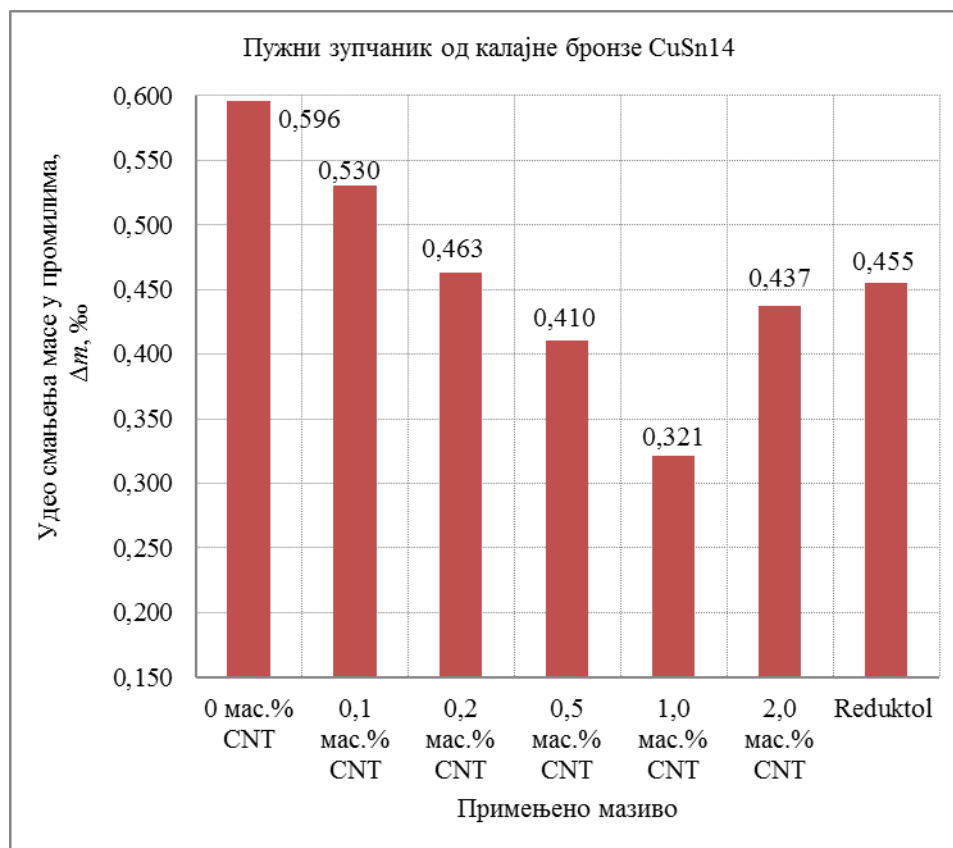
Смањење масе пужних зупчаника пужног преносника снаге израђеног од калајне

бронзе CuSn14 и од цинк–алуминијум бронзе ZA-12 услед хабања, представља кључни показатељ триболошке стабилности и радне поузданости пужног преносника снаге. Хабање пужног зупчаника директно одражава интеракцију контактних површина, ефективност подмазивања и механичку отпорност легуре на дуготрајно трење. Праћење промена масе током експерименталних испитивања омогућава квантитативну процену губитака материјала у зависности од примене различитих мазива, динамичких оптерећења и угаоне брзине вратила пужног преносника.

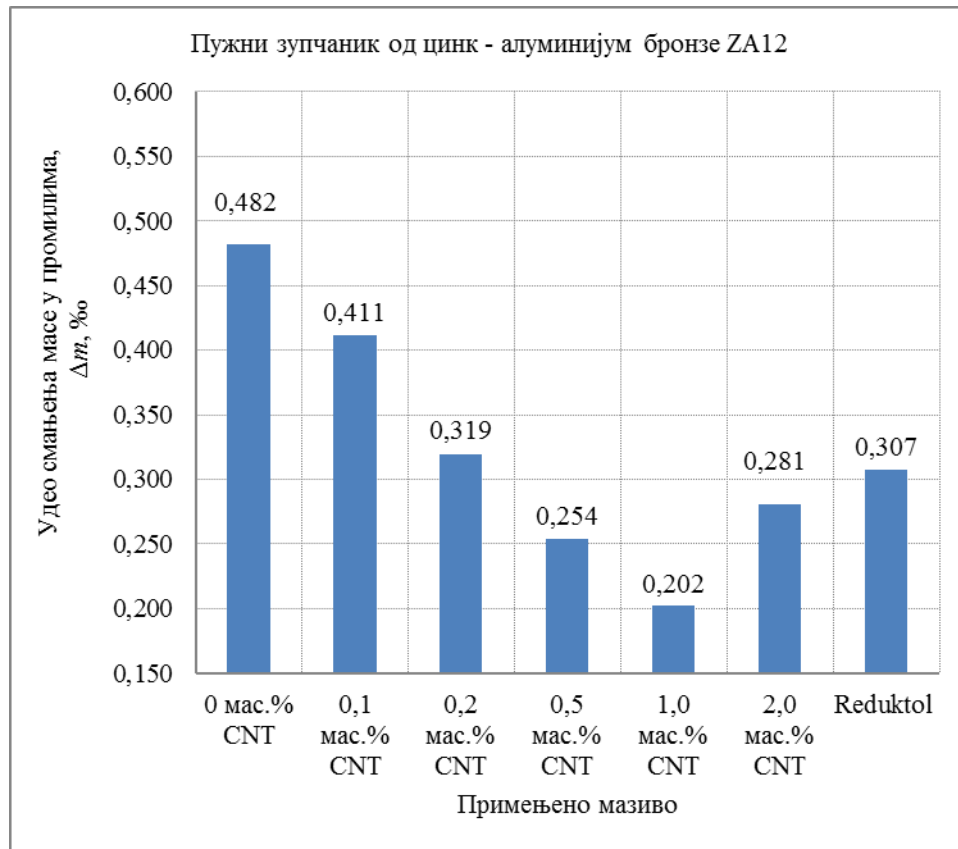
Експериментални подаци приказани у табелама 7.15 и 7.16 показују да се смањење масе пужног зупчаника по правилу повећава са повећањем обртног момента и обртне брзине улазног вратила. Увођење CNT адитива у мазива показало је значајан утицај на редукацију губитака масе, услед побољшања триболошких својстава мазива. Ови ефекти директно доприносе смањењу микродеформација и површинског хабања, што се огледа у мањем губитку масе пужног зупчаника.

Такође, анализом прегледа смањења масе могуће је идентификовати критичне радне услове при којима долази до појачаног абразивног или адхезивног хабања, што указује на потребу за корекцијом радних параметара или оптимизацијом састава мазива.

На сликама 8.25 и 8.26 су приказани дијаграми зависности удела смањења масе пужног зупчаника у промилима на крају циклуса мерења са појединим врстама мазива, што је у директној корелацији са интензитетом хабања пужних зупчаника у преноснику снаге.



Слика 8.25 Зависност удела смањења масе у промилима пужног зупчаника од бронзе CuSn14 од врсте примењеног мазива



Слика 8.26 Дијаграм зависности удела смањења масе у промилима пужног зупчаника од бронзе ZA-12 од врсте примењеног мазива

Паралелно са мерењем масе пужних зупчаника током експеримента, на крају сваког циклуса мерења, односно након завршетка испитивања са сваким појединим мазивом, мерене су масе и пужа преносника снаге, али имајући у виду да је исти израђен од челика његово хабање је било занемарљиво у односу на хабање пужног зупчаника, те исто није посебно приказано и анализирано у дисертацији.

Из табела 7.15 и 7.16, као и са дијаграма на сликама 8.25 и 8.26 уочава се систематско смањење промене (губитка) масе испитиваних пужних зупчаника пужног преносника снаге, које представља директан и поуздан квантитативни показатељ интензитета хабања у контакту пуж – пужни зупчаник. Губитак масе Δm је у тесној корелацији са доминантним триболошким механизмима, пре свега адхезионим и абразивним хабањем. Веће вредности Δm указују на интензивније локалне микродеформације, појаву микроставаривања и одвајање материјала са контактних површина.

Код пужног зупчаника израђеног од калајне бронзе CuSn14, измерени губитак масе креће се од 0,134 g, односно 0,596 % почетне масе зупчаника, при примени мазива без CNT адитива, до минималне вредности од 0,072 g (0,321 %) при употреби мазива са 1,0 мас.% CNT адитива. Наведено смањење губитка масе од преко 46 % јасно указује на значајан позитиван утицај CNT адитива на редукујућу хабања. Овај ефекат се може објаснити формирањем стабилног, наноструктурисаног трибофилма у контактної зони, који смањује директан контакт металних површина, повећава носивост мазивног филма и омогућава равномернију расподелу контактних притисака. Истовремено, CNT честице делују као микроојачивачи, испуњавајући површинске микронеравнине и редукујући концентрацију напона на врховима неравнина.

Даље повећање концентрације CNT адитива на 2,0 мас.% доводи до поновног пораста губитка масе, који износи 0,098 g (0,437 ‰), што указује на одступање од оптималних услова подмазивања. Овакво понашање се приписује агрегацији наноцеви, услед чега долази до нарушавања хомогености мазивног филма, повећања унутрашњих отпора и појаве локализованих зона повећаног притиска, које интензивирају хабање. При примени комерцијалног уља за зупчасте преноснике Reduktol Super ISO VG 460 измерен је губитак масе од 0,102 g (0,455 ‰), што указује на умерен ниво хабања у поређењу са наномодификованим мазивима и потврђује да конвенционално мазиво не може да обезбеди исту стабилност и заштиту контактних површина као мазиво са оптималним уделом CNT.

Сличан, али квантитативно повољнији тренд уочава се код пужног зупчаника израђеног од цинк–алуминијум бронзе ZA-12. У овом случају губитак масе се смањује са 0,074 g (0,482 ‰) при примени мазива без CNT адитива на минималних 0,031 g (0,202 ‰) при концентрацији од 1,0 мас.% CNT, што представља редукујућу хабања од приближно 58 %. Овако изражена редукација губитка масе указује на повољнију интеракцију између ZA-12 легуре и наномодификованог мазива, при чему се стабилан трибофилм лакше формира и дуже одржава током радног циклуса. Повећање концентрације CNT адитива на 2,0 мас.% резултира порастом губитка масе на 0,043 g (0,281 ‰), што је и даље значајно ниже у односу на почетне услове, али јасно указује на нарушавања оптималног режима подмазивања. Примена уља Reduktol Super ISO VG 460 доводи до губитка масе од 0,047 g (0,307 ‰), што је, као и у случају калајне бронзе, у интервалу вредности добијених за мазива са 0,2–0,5 мас.% CNT адитива.

Упоредна анализа добијених резултата недвосмислено показује да је губитак масе, односно интензитет хабања, систематски већи код пужног зупчаника од калајне бронзе CuSn14 у односу на пужни зупчаник од цинк–алуминијум бронзе ZA-12, при свим испитиваним условима подмазивања. Овакво понашање може се објаснити разликама у механичким, структурним и триболошким карактеристикама ових легура. Калајна бронза, са израженијом пластичношћу и мањом отпорношћу на локалне контактне притиске, склонија је интензивнијем адхезионом хабању и већим микродеформацијама површине. Насупрот томе, ZA-12 бронза, услед свог двофазног металуршког састава, већег садржаја алуминијума и присуства тврђих интерметалних фаза, испољава повећану отпорност на деформацију и бољу стабилност у условима израженог трења клизањем. Додатно, хемијска и структурна компатибилност ZA-12 легуре са CNT адитивима омогућава ефикасније адсорбовање и интеграцију наноцеви у трибофилм, што резултира нижим нивоом хабања у односу на калајну бронзу. Ови резултати потврђују да избор материјала пужног зупчаника, у комбинацији са оптималном концентрацијом CNT адитива, представља кључни фактор за повећање животног века и поузданости пужних преносника снаге.

Смањење масе елемената пужног преносника снаге је сагледано кроз хабање пужа, а нарочито пужног зупчаника, где су посебно визуелним прегледом и помоћу оптоелектронских уређаја посматране похабане површине. За преглед површина су коришћени микроскоп на Војнотехничком институту у Београду, применом микроскопа ознаке LEICA M205 A, произвођача Leica Microsystems GmbH, Wetzlar, Немачка, опремљеног DFC 295 камером и софтвером LAS 4.3.1 за прикупљање и обраду података.

Површине пужних зупчаника, након завршетка комплетних циклуса испитивања, подвргнуте су детаљној анализи, применом скенирајуће електронске микроскопије, са циљем идентификације доминантних механизма хабања и процене утицаја CNT адитива на микроструктурне промене у контактної зони. Микроструктурна анализа је открила присуство карактеристичних феномена хабања, укључујући изражене трагове

абразивног хабања у виду уздужних жлебова оријентисаних у правцу клизања, локализоване зоне пластичне деформације и појаве полирања површине.

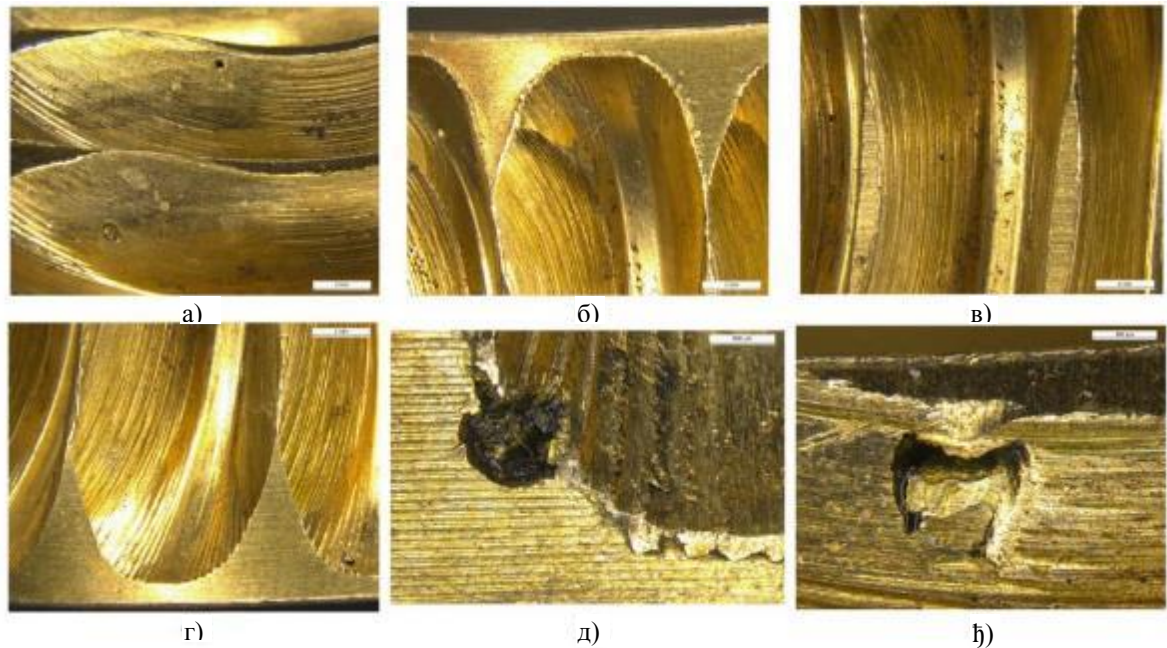
Упоредна анализа узорака подмазаних чистим глицеролом и узорака третираних глицеролом обогаћеним CNT адитивима показала је јасну редуцију интензитета и дубине трагова хабања са повећањем масеног удела CNT адитива у мазиву. Док су код узорака подмазаних базним глицеролом уочени груби, дисконтинуирани жлебови и локалне зоне одвајања материјала, код наномодификованих узорака површине су показивале знатно уједначенију топографију, са смањеним бројем оштрих ивица асперитета и мањом учесталости микропукотина. Ови резултати јасно указују на побољшану заштиту контактних површина услед присуства CNT адитива.

Посебно је значајно да CNT адитиви у контактної зони испољавају такозвани „ефекат нанолежајева“, при чему наноцеви делују као ваљчасти наноелементи који смањују коефицијент трења и ограничавају директан контакт металних површина између врхова површинских неравнина. Истовремено, CNT честице се адсорбују и механички утискују у микронеравнине површине, где доприносе формирању компактног и механички стабилног нанотрибофилма [151].

Посматране површине подмазане CNT-модификованим глицеролом показивале су мањи број структурних дефеката, редуковану појаву микропукотина и изражено уједначенију морфологију у односу на узорке без адитива. Ови микроструктурни докази су у директној вези са резултатима мерења масеног губитка, вибрација и температуре и потврђују да CNT адитиви играју кључну улогу у смањењу хабања, стабилизацији контактне зоне и побољшању укупних триболошких карактеристика пужног преносника снаге у условима граничног подмазивања. Примери хабања површина пужног зупчаника приказани су на сликама 8.27 и 8.28 [31].



Слика 8.27 Фотографије пужних зупчаника снимљене помоћу микроскопа LEICA M205 A



Слика 8.28 Фотографије уз увећање а–ђ приказују површине хабања пужног зупчаника након испитивања и трагове мазива са различитом концентрацијом CNT адитива; а) 0,1 мас.% CNT; б) 0,2 мас.% CNT; в) 0,5 мас.% CNT; г) 1,0 мас.% CNT; д) 2,0 мас.% CNT; њ) 0 мас.% CNT

Микроскопска анализа површина хабања указује да примена угљеничних нанотуби, као адитива у мазиву, директно утиче на триболошка својства пужног пара израђеног од челика и калајне бронзе. Посматрањем и анализом узорака уочава се да постепено повећање концентрације CNT адитива, све до 1,0 мас.% CNT (слика 8.28, фотографија г), доводи до одређеног степена редукције похабаности, иако тај напредак није радикалан већ се манифестује кроз благе промене у морфологији површине. Трагови абразије и микробразде постају нешто плићи и мање изражени, што указује на то да нанотуби ефикасно попуњавају микронеравнине стабилизују слој мазива између зубаца. Овај ефекат помаже у равномернијој расподели оптерећења, али површине и даље задржавају карактеристичне трагове деформације, својствене мекшим легурама бакра. Међутим, при концентрацији од 2,0 мас.% CNT (слика 8.28, фотографија д), долази до нарушавања позитивног тренда и поновног повећања интензитета хабања. Ово се објашњава презасићењем мазива, где вишак нанотуби формира чврсте агломерате, који врше ефекат секундарне абразије, чиме се механички оштећује већ формиран заштитни слој и повећава укупна деградација површина пужног зупчаника [150, 151].

9. ОПТИМИЗАЦИЈА И МОДЕЛ ПРЕДВИЂАЊА СТЕПЕНА ИСКОРИШЋЕЊА ПУЖНОГ ПРЕНОСНИКА СНАГЕ

9.1. Појам, методе и технике оптимизације

Оптимизација представља систематичан и методолошки утемељен процес тражења најповољнијих вредности параметара неког техничког система у односу на дефинисане критеријуме, било да је циљ повећање степена искоришћења, смањење енергетских губитака, продужавање радног века компоненти или очување ресурса. У машинском инжењерству, концепт оптимизације је од пресудног значаја у системима код којих триболошка својства директно условљавају функционалност и енергетску стабилност, а пужни преносници снаге представљају један од најзначајнијих примера таквих система [151].

Пужни преносници, као механизми у којима у односу на друге зупчасте преноснике снаге доминира трење клизањем, познати су по томе што имају нижи степен искоришћења у односу на већину других зупчастих преносника. Управо зато је истраживање мазива са различитим концентрацијама угљеничних наноцеви (CNT) важан правац развоја. Мазива са CNT адитивима у опсегу од 0 мас.% до 2,0 мас.% показала су значајно смањење трења и хабања, што доводи до повећања степена искоришћења преносника. Пошто различите легуре показују различит одзив на наномазива, неопходан је формалан и прецизан оптимизациони приступ.

Неопходно је истаћи да постоје многе методе и технике оптимизације, које се могу сврстати у следеће групе: аналитичке, нумеричке, регресионе, сурогат и метахеуристичке методе.

Аналитичке методе обухватају приступе који користе диференцијалне и интегралне технике за одређивање екстремума функција. Уколико је циљна функција глатка и математички изводљива, могуће је анализирати њене критичне тачке. У трибологији, такав приступ се користи када је зависност, као што је коефицијент трења од концентрације адитива, већ математички моделирана (нпр. полиномом) [152].

Пример примене ове методе је кад се оптимална вредност концентрације CNT адитива добија се из услова $dn/dc = 0$, где n представља степен искоришћења, а c концентрацију CNT адитива [153].

Нумеричке технике, попут Њутн-Рафсонове методе или метода коначних разлика, користе се када аналитичка решења нису доступна. Оне омогућавају брзо проналажење екстремума и могу се примењивати у симулацијама трења и топлотних појава у пужним преносницима.

Као једна од регресионих и сурогат-метода издваја се регресиона анализа која је од посебног значаја у експерименталној трибологији, јер омогућава изградњу модела на основу емпиријских података. У овој групи, полиномска регресија једна је од најчешће примењиваних метода. Сурогат-модел, као што су геостатистичка интерполација или RBF мреже, користе се када су подаци ограничени или скупљени у високо променљивим условима [154].

Метахеуристички алгоритми, као што су генетски алгоритми и оптимизација роја честица, су веома заступљени у оптимизацији мазива и наноматеријала. Они су посебно погодни када је простор параметара сложен, нелинеаран или са више локалних

екстремума. Примери укључују оптимизацију вискозности наномазива или оптимизацију дебљине филмова подмазивања под динамичким условима [155].

У контексту преносника са пужним зупчаницима од бронзе (CuSn14 и ZA-12), оптимизација се фокусира на одређивање комбинације параметара који минимизују трење и хабање, а максимизују степен искоришћења. Концентрација CNT адитива у мазиву један је од најосетљивијих параметара, јер:

- ниска концентрација не активира пуни триболошки ефекат CNT,
- умерене концентрације CNT најчешће дају најбољу равнотежу између подмазивања и вискозности,
- превисоке концентрације повећавају вискозност и уносе агломерате, што може негативно утицати на карактеристике.

Оптимизација оваквих зависности постаје не само корисна већ и неопходна, посебно када различите легуре бронзе дају различит одзив на исту CNT концентрацију.

9.2. Теоријска основа, примена и значај полиномске регресије

Полиномска регресија представља облик регресионог моделирања у којем се зависност између једне или више независних променљивих и одзивне величине описује полиномском функцијом одређеног реда. У најједноставнијем облику, регресија другог реда моделира зависност у облику квадратне криве, која је посебно погодна за појаве које имају оптимум (максимум или минимум) [156].

Зависност триболошких параметара од концентрације CNT адитива често показује карактеристику обрнуте U-криве, што полиномски модел врло ефикасно описује. У случају степена искоришћења η , модел обично има облик:

$$\eta = a_0 + a_1c + a_2c^2 \quad (9.1)$$

где је c концентрација CNT адитива, док су a_0, a_1, a_2 коефицијенти добијени методом најмањих квадрата.

Полиномска регресија је посебно корисна зато што омогућава:

- моделирање нелинеарних зависности које су типичне за наномазива,
- математичку интерпретацију оптималних параметара,
- једноставно диференцирање ради одређивања екстремума и
- лако уклапање у наредне оптимизационе технике (нпр. аналитичка оптимизација или метахеуристичко фино подешавање).

Иако ефикасна, полиномска регресија има одређена ограничења. Најпроблематичнији је енгл. *overfitting*, који се јавља при употреби полинома високог реда, као и непоуздана екстраполација изван опсега измерених података, а суштински представља ситуацију када статистички модел превише прецизно прати податке из скупа до те мере да почне да „учи“ и случајни шум, а не само стварну функционалну зависност. Такође, избор оптималног реда модела често захтева примену информационог критеријума [154].

Узимајући у обзир наведено, полиномска регресија, као модел који једноставно, аналитички и поуздано описује нелинеарне зависности, представља један од ефикаснијих приступа за идентификацију оптималног степена искоришћења пужног преносника при примени мазива у опсегу CNT адитива од 0 мас.% до 2,0 мас.%.

9.3. Примена полиномске регресије за оптимизацију степена искоришћења пужног преносника снаге

У оквиру експерименталних испитивања анализирана су два материјала пужног зупчаника, односно бронзе CuSn14 и ZA-12. Оба материјала су тестирана на три различита нивоа улазног броја обртаја од 1500 min^{-1} , 2000 min^{-1} и 2500 min^{-1} . За сваки ниво обртаја разматрано је пет радних оптерећења, која су изражена кроз различите вредности обртног момента. На овај начин је укупно анализирано тридесет случајева, односно за два материјала, три нивоа улазног броја обртаја у оквиру сваког материјала, као и пет различитих вредности обртног момента на излазном вратилу, за сваки од нивоа броја обртаја.

На нивоу сваког експерименталног случаја вршена је промена процента CNT адитива у мазиву. Коришћени су следећи проценти CNT адитива: 0 мас.%, 0,1 мас.%, 0,2 мас.%, 0,5 мас.%, 1,0 мас.% и 2,0 мас.%. За сваку од разматраних вредности експериментално је одређен степен искоришћења.

Уколико се посматрају експериментално добијени резултати, у сваком од наведених случајева, уочава се тренд раста степена искоришћења при повећању процента адитива, при чему се тај раст завршава при проценту адитива од 1,0 мас.%. При проценту адитива од 2,0 мас.% уочава се пад вредности степена искоришћења. Претпоставка је да се максимална вредност степена искоришћења постиже на интервалу између 1,0 мас.% и 2,0 мас.% адитива. Осим тога, како у сваком разматраном случају степен искоришћења при проценту адитива од 1,0 мас.% има већу вредност него при проценту адитива од 2,0 мас.%, сматра се да након достизања максималне вредности, степен искоришћења има постепено пад вредности до оне која је измерена на 2,0 мас.% адитива. Експериментално добијени подаци приказани су у табелама 9.1 до 9.6.

Табела 9.1 Промена степена искоришћења при промени излазног обртног момента, применом пужног зупчаника од бронзе CuSn14 при улазном броју обртаја од 1500 min^{-1}

Процент CNT адитива	Обртни момент 1	Обртни момент 2	Обртни момент 3	Обртни момент 4	Обртни момент 5
0 мас.%	0,403273	0,422929394	0,438824291	0,447052982	0,46613651
0,1 мас.%	0,422095	0,454023246	0,480056005	0,506119471	0,53440167
0,2 мас.%	0,448566	0,465274669	0,487638934	0,513955489	0,558000697
0,5 мас.%	0,455726	0,475070914	0,499965789	0,539017293	0,563512968
1,0 мас.%	0,498653	0,511898796	0,541077179	0,595159417	0,628856806
2,0 мас.%	0,474216	0,493735879	0,513405797	0,570356515	0,612053793

Табела 9.2 Промена степена искоришћења при промени излазног обртног момента, применом пужног зупчаника од бронзе $CuSn14$ при улазном броју обртаја од 2000 min^{-1}

Процент CNT адитива	Обртни момент 1	Обртни момент 2	Обртни момент 3	Обртни момент 4	Обртни момент 5
0 мас.%	0,41864	0,43519	0,445233	0,468187	0,505669
0,1 мас.%	0,454755	0,474787	0,495776	0,528273	0,55816
0,2 мас.%	0,477496	0,489671	0,514297	0,544146	0,564024
0,5 мас.%	0,485719	0,511832	0,55661	0,571546	0,593631
1,0 мас.%	0,517967	0,549058	0,587083	0,621201	0,644411
2,0 мас.%	0,49519	0,526754	0,578774	0,606835	0,635637

Табела 9.3 Промена степена искоришћења при промени излазног обртног момента, применом пужног зупчаника од бронзе $CuSn14$ при улазном броју обртаја од 2500 min^{-1}

Процент CNT адитива	Обртни момент 1	Обртни момент 2	Обртни момент 3	Обртни момент 4	Обртни момент 5
0 мас.%	0,427035	0,436592	0,45386	0,467094	0,491475
0,1 мас.%	0,468303	0,48248	0,505656	0,548996	0,576132
0,2 мас.%	0,471714	0,491374	0,520509	0,553058	0,588847
0,5 мас.%	0,484422	0,506531	0,531033	0,568265	0,607308
1,0 мас.%	0,533561	0,556129	0,593371	0,635131	0,661959
2,0 мас.%	0,515595	0,538386	0,579918	0,596635	0,625558

Табела 9.4 Промена степена искоришћења при промени излазног обртног момента, применом пужног зупчаника од бронзе $ZA-12$ при улазном броју обртаја од 1500 min^{-1}

Процент CNT адитива	Обртни момент 1	Обртни момент 2	Обртни момент 3	Обртни момент 4	Обртни момент 5
0 мас.%	0,378593	0,431651	0,451204	0,470272	0,486582
0,1 мас.%	0,397066	0,485577	0,495211	0,524695	0,507029
0,2 мас.%	0,417516	0,520507	0,530622	0,549407	0,53408
0,5 мас.%	0,427257	0,537381	0,558018	0,592927	0,556197
1,0 мас.%	0,50964	0,60722	0,633166	0,638172	0,608601
2,0 мас.%	0,473201	0,582661	0,615083	0,627511	0,588919

Табела 9.5 Промена степена искоришћења при промени излазног обртног момента, применом пужног зупчаника од бронзе $ZA-12$ при улазном броју обртаја од 2000 min^{-1}

Процент CNT адитива	Обртни момент 1	Обртни момент 2	Обртни момент 3	Обртни момент 4	Обртни момент 5
0 мас.%	0,411641	0,448664	0,511201	0,537194	0,556087
0,1 мас.%	0,436504	0,516446	0,543956	0,585239	0,5741
0,2 мас.%	0,456943	0,551741	0,594699	0,616825	0,585196
0,5 мас.%	0,469465	0,572738	0,611636	0,627009	0,606839
1,0 мас.%	0,515551	0,605024	0,659932	0,676507	0,622868
2,0 мас.%	0,489559	0,576355	0,629853	0,644197	0,608285

Табела 9.6 Промена степена искоришћења при промени излазног обртног момента, применом пужног зупчаника од бронзе ZA-12 при улазном броју обртаја од 2500 min^{-1}

Процент CNT адитива	Обртни момент 1	Обртни момент 2	Обртни момент 3	Обртни момент 4	Обртни момент 5
0 мас.%	0,391463	0,442026	0,53071	0,549981	0,560137
0,1 мас.%	0,468832	0,537829	0,574047	0,598635	0,584907
0,2 мас.%	0,490587	0,562386	0,592989	0,612009	0,6035
0,5 мас.%	0,505354	0,576274	0,602585	0,62026	0,614687
1,0 мас.%	0,569226	0,635037	0,65391	0,681858	0,642661
2,0 мас.%	0,54832	0,621426	0,635285	0,653713	0,633523

Како би се одредио оптималан проценат адитива, примењена је полиномска регресија и то на следећи начин:

- за већину случајева коришћен је полином другог степена и
- за мањи број случајева коришћен је полином трећег степена, тј. када је пружао бољу подударност са експерименталним подацима.

Другим речима, степен полинома је одабран према бољој вредности R^2 (коэффициент детерминације), при чему је циљ био да се избегне прекомерно прилагођавање подацима (енгл. *overfitting*).

Стога, полиномска функција има следеће облике:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (9.2)$$

за полином другог степена и

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (9.3)$$

за полином трећег степена.

У наведеним обрасцима проценат адитива је изражен кроз променљиву x , док је степен искоришћења изражен кроз променљиву y .

За извођење полиномске регресије примењен је програмски пакет *Microsoft Office Excel*. У наставку су графички приказане добијене вредности степена искоришћења, уз дату једначину полиномске регресије (функција), као и вредности R^2 .

Вредност R^2 је коэффициент детерминације и показује колико добро полиномска функција описује стварне податке. Притом R^2 може имати вредности између 0 и 1, где за вредност $R^2 = 0$ регресија уопште не објашњава варијацију података, док за вредност $R^2 = 1$ регресија савршено описује податке. Коэффициент детерминације се може приказати следећом једначином:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (9.4)$$

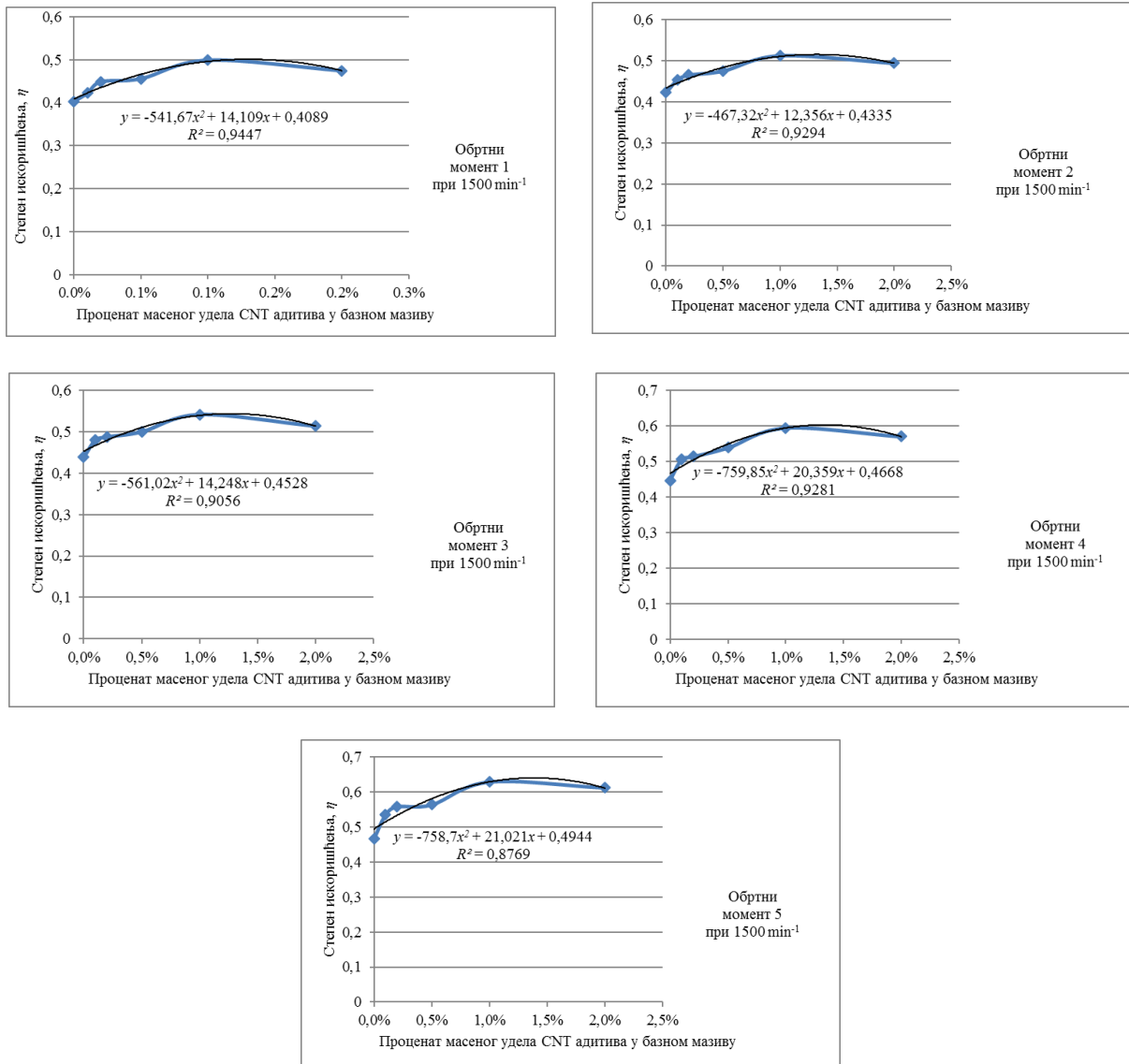
где су:

y_i – стварне вредности зависне променљиве,

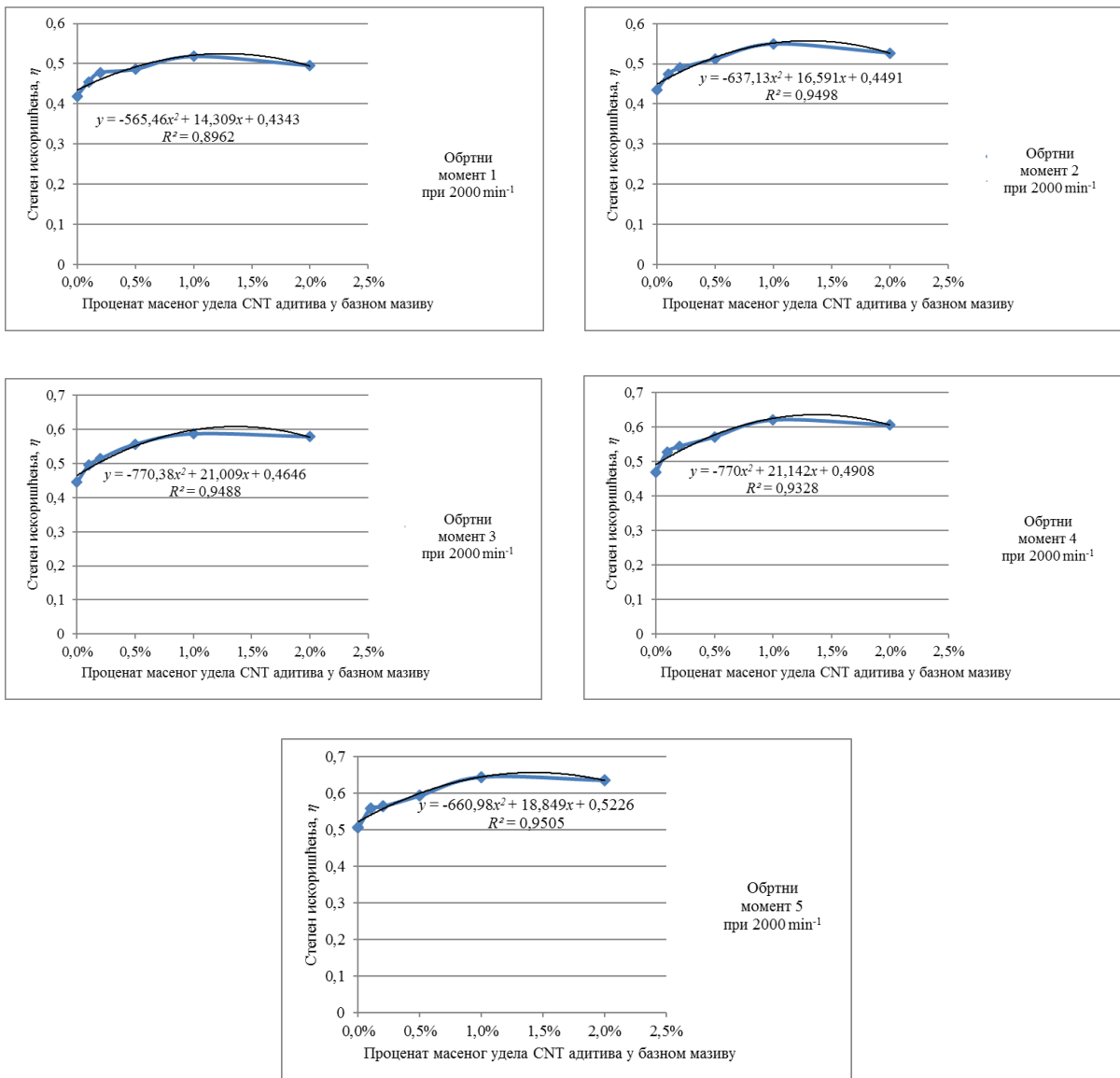
\hat{y}_i – предвиђене вредности полиномом,

\bar{y}_i – средња вредност свих y_i .

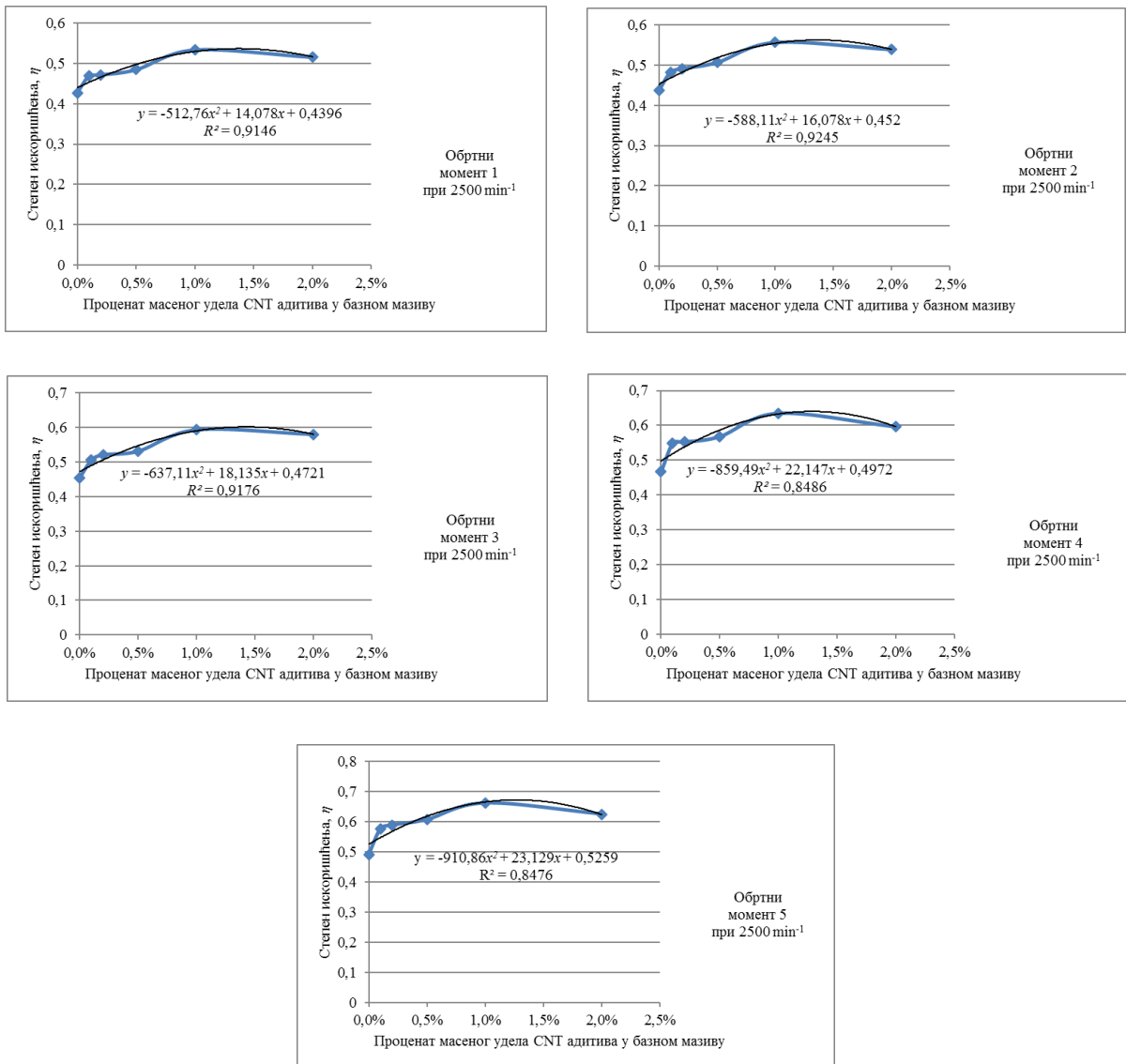
За материјал пужног зупчаника CuSn14, при вредностима броја обртаја од 1500 min^{-1} , графици су дати на слици 9.1, за 2000 min^{-1} на слици 9.2 и за 2500 min^{-1} на слици 9.3. За материјал пужног зупчаника ZA-12, при вредностима броја обртаја од 1500 min^{-1} графици су дати на слици 9.4, за 2000 min^{-1} на слици 9.5. и за 2500 min^{-1} на слици 9.6. Плавом линијом су повезане тачке које означавају експериментално одређене вредности коефицијента искоришћења за сваки разматрани проценат адитива, док црна линија показује тренд функције који је одређен применом полиномске регресије.



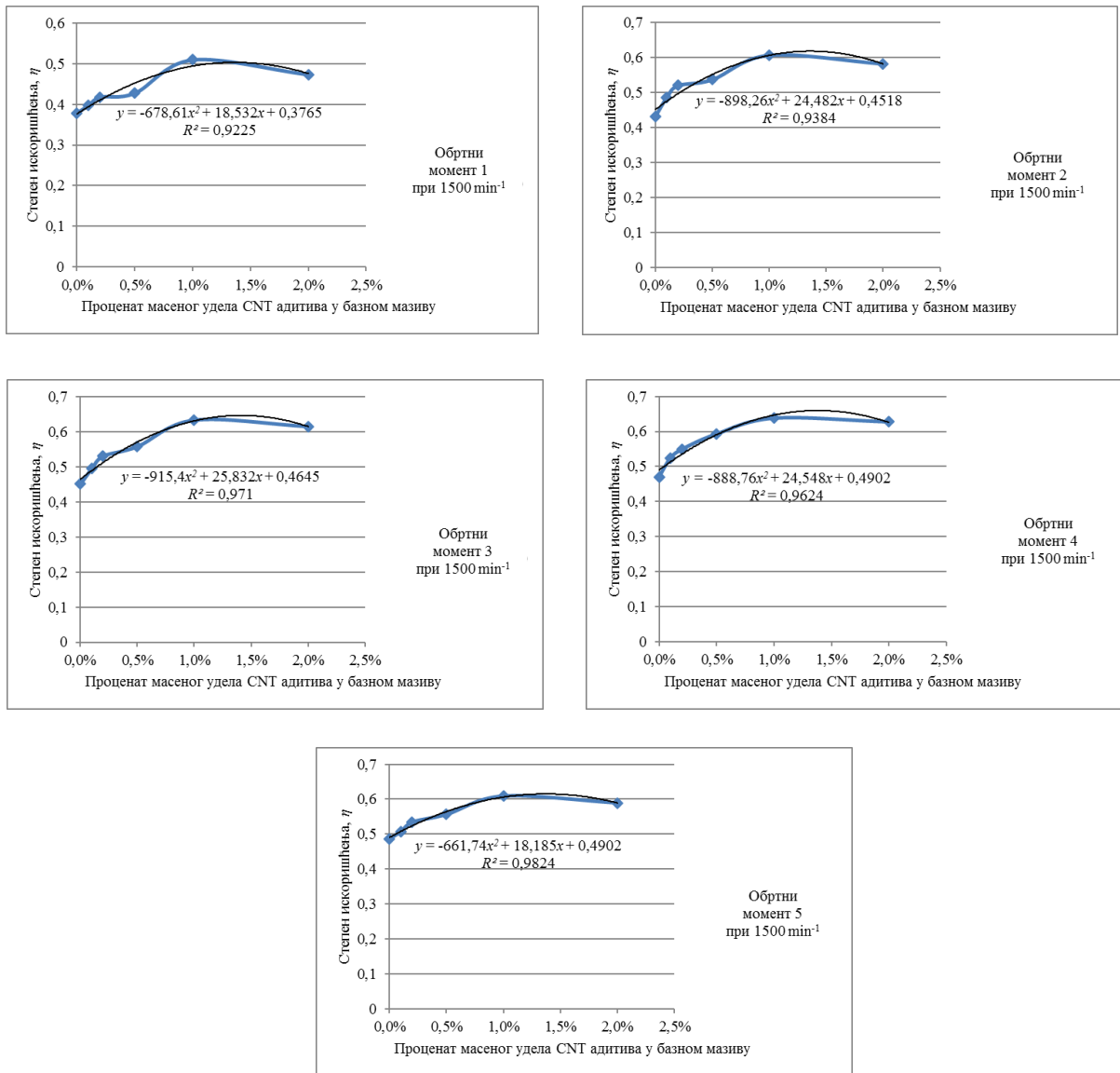
Слика 9.1 Једначине полиномске регресије за пужни преносник са пужним зупчаником од CuSn14, при улазном броју обртаја од 1500 min^{-1} за пет вредности излазних обртних момената



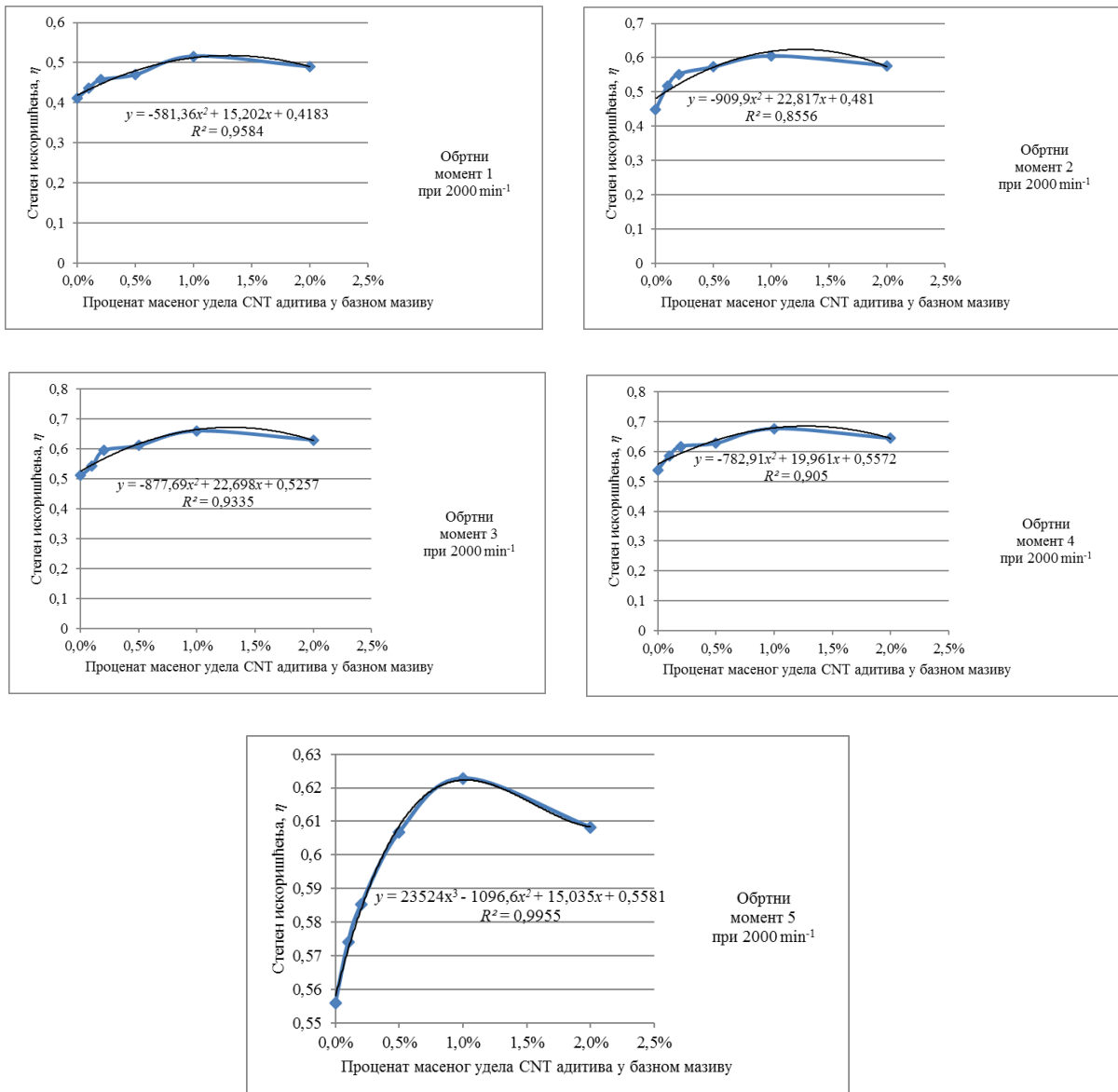
Слика 9.2 Једначине полиномске регресије за пужни преносник са пужним зупчаником од $CuSn14$, при улазном броју обртаја од 2000 min^{-1} за пет вредности излазних обртних момената



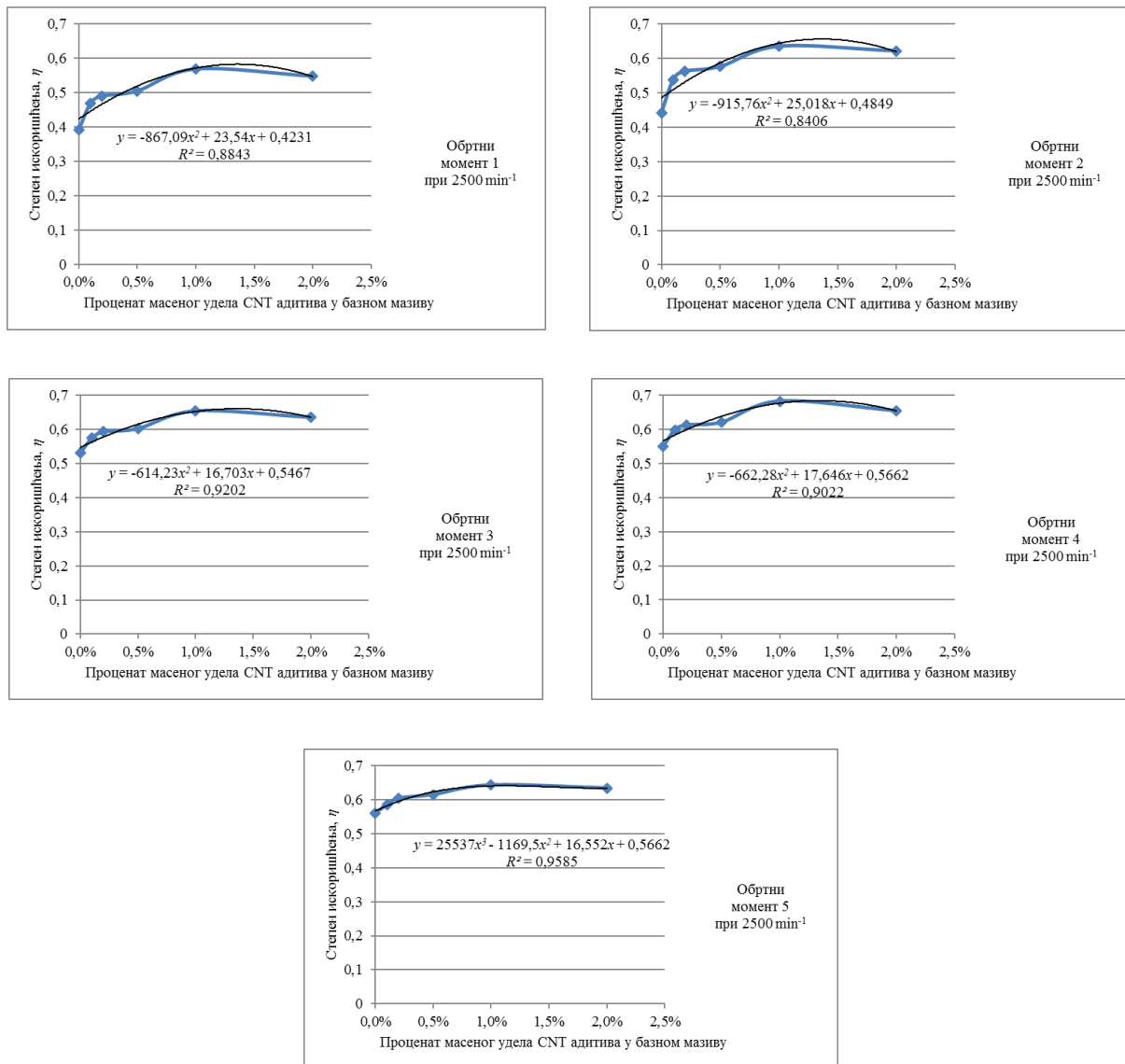
Слика 9.3 Једначине полиномске регресије за пужни преносник са пужним зупчаником од CuSn14, при улазном броју обртаја од 2500 min⁻¹ за пет вредности излазних обртних момената



Слика 9.4 Једначине полиномске регресије за пужни преносник са пужним зупчаником од ZA-12, при улазном броју обртаја од 1500 min⁻¹ за пет вредности излазних обртних момената



Слика 9.5 Једначине полиномске регресије за пужни преносник са пужним зупчаником од ZA-12, при улазном броју обртаја од 2000 min⁻¹ за пет вредности излазних обртних момената



Слика 9.6 Једначине полиномске регресије за пужни преносник са пужним зупчаником од ZA-12, при улазном броју обртаја од 2500 min⁻¹ за пет вредности излазних обртних момената

На основу графичког представљања анализираних функција може се јасно уочити да криве добијене применом полиномске регресије у великој мери прате тренд и распоред експериментално добијених вредности. Визуелна сагласност између регресионих кривих и експерименталних тачака указује на то да изабрани полиномски модели успешно описују зависност између посматраних променљивих у датом интервалу. Овакво поклапање није само квалитативне природе, већ се додатно потврђује и квантитативним показатељима статистичке поузданости модела.

Степен сагласности између експерименталних и теоријских вредности најбоље се огледа кроз вредности коефицијента детерминације R^2 , који представља меру објашњене варијанте зависне променљиве моделом регресије. У свим анализираним случајевима вредности R^2 су веће од 0,8, што указује на висок ниво корелације и добру прилагођеност

модела експерименталним подацима. Штавише, у већини посматраних случајева коефицијент детерминације прелази вредност од 0,9, што се у инжењерским и природним наукама сматра показатељем веома добре, односно одличне статистичке поузданости модела.

На основу наведеног, може се закључити да примењени полиномски регресиони модели на адекватан и поуздан начин описују понашање система и показују добро поклапање са експериментално добијеним подацима. Ово указује на њихову оправданост за даљу анализу, интерпретацију резултата и евентуалну примену у сврхе предвиђања. Такође, високе вредности коефицијента детерминације потврђују да изабрани степен полинома представља добар компромис између сложености модела и тачности апроксимације, без уочљивих индикација преоптерећења у оквиру анализираног скупа података.

9.4. Интервалне оцене оптималног процента адитива

Како се приказани полиномски модели заснивају на ограниченом броју експерименталних података (тачака), процењени оптимални проценат адитива има одређену статистичку несигурност. Због тога је потребно применити интервалне оцене (интервале поверења) како би се пружио опсег у ком се ова оптимална вредност потенцијално може кретати. На овај начин се добија на већој поузданости предложених модела.

У овом случају, интервалне оцене одређене су на стандардном нивоу ризика од 5 % ($\alpha = 0,05$). У табели 9.7. дата је просечна вредност за оба материјала пужног зупчаника при различитом броју обртаја, као и горња и доња граница интервалних оцена.

Табела 9.7 Просечне вредности масеног удела адитива и интервалне оцене за комбинације пужних зупчаника са калајном бронзом CuSn14 и цинк–алуминијум бронзом ZA-12

Угаона брзина, min ⁻¹	Интервална оцена	Пужни зупчаник бронза CuSn14	Пужни зупчаник бронза ZA-12
1500	Доња граница	1,27 %	1,35 %
	Просечна вредност	1,32 %	1,38 %
	Горња граница	1,38 %	1,40 %
2000	Доња граница	1,27 %	1,15 %
	Просечна вредност	1,35 %	1,25 %
	Горња граница	1,42 %	1,35 %
2500	Доња граница	1,27 %	1,17 %
	Просечна вредност	1,34 %	1,31 %
	Горња граница	1,42 %	1,44 %

На основу интервалних оцена, датих у табели 9.7, може се закључити да се оптималан проценат адитива за оба разматрана материјала налази у релативно уском опсегу, тј. између 1,15 мас.% и 1,44 мас.%. Ипак, уочава се да су за материјал CuSn14 добијене стабилније вредности, јер се оптималан опсег адитива за овај материјал налази у опсегу од 1,32 мас.% и 1,35 мас.%, уз мала одступања интервалних оцена (максимално до $\pm 0,08$ %). У случају материјала ZA-12 уочава се нешто већи распон (1,25 мас.% до 1,38 мас.%), што је израженије при вишим бројевима обртаја (максимално до $\pm 0,14$ %). Стога, уколико би се упоредила ова два материјала, може се закључити да већу

осетљивост на промену броја обртаја има ZA-12, док CuSn14 задржава готово константну вредност процента адитива у свим разматраним режимима рада.

Добијени распон оптималних вредности (1,15 мас.% – 1,44 мас.%) указује на добру конзистентност модела, али и на чињеницу да различити материјали пужних зупчаника различито реагују на промену концентрације CNT адитива. Материјал CuSn14 показује већи степен стабилности. Ово сугерише да је за калајну бронзу функционална зависност између концентрације CNT адитива и степена искоришћења равномернија и мање подложна варијацијама радног режима. Супротно томе, код легуре ZA-12 интервал оптималних вредности је шири, уз већа одступања, што указује на повећану осетљивост овог материјала на промене кинематских услова, нарочито при већим брзинама клизања.

Практично посматрано, овако добијени резултати имају више важних импликација. Прво, они омогућавају конструкторима и истраживачима да идентификују концентрацију CNT адитива која обезбеђује максималан степен искоришћења пужног преносника, уз минималне губитке услед трења. У пракси то значи да се интервал предвиђених вредности може користити као смерница за развој мазива која ће обезбедити најповољнији однос између механичког оптерећења, температуре у контакту и степен искоришћења пужног пара [157].

Друго, уско дефинисани интервали, попут оних за CuSn14, указују да је технологија подмазивања са CNT адитивима предвидљивија и стабилнија за овај материјал, што има директне импликације у погледу планирања одржавања, пројектовања радних режима и димензионисања термичких капацитета. Са становишта инжењерске праксе, ово значи да се за CuSn14 може очекивати поузданије одржавање оптималног режима подмазивања, мања осетљивост на промене броја обртаја и дужи век трајања пужног пара.

Са друге стране, шири интервали, као код бронзе ZA-12, представљају сигнал да овај материјал показује веће варијације у зависности од брзинских и оптерећења услова, што може довести до већих оперативних флукуација. Практично, то значи да легура ZA-12 захтева пажљивију контролу радних параметара како би се одржала стабилност подмазивања и спречила појава прекомерног хабања или пада степена искоришћења.

На крају, резултати полиномске регресије у овој примени не служе само као средство за математичку апроксимацију. Они су кључни инструмент за доношење техничких одлука јер омогућавају:

- предвиђање оптималног састава мазива,
- процену стабилности система при различитим радним условима,
- идентификацију материјала који обезбеђује већи степен робусности у погледу подмазивања,
- смањење експерименталних трошкова кроз моделско одређивање оптималних параметара и
- дугорочно планирање рада и одржавања пужних преносника.

На тај начин, овако добијени резултати представљају мост између статистичког моделирања и реалне инжењерске примене, омогућавајући да се оптимизација мазива, заснованих на CNT адитивима, спроведе истовремено прецизно, ефикасно и технички оправдано.

10. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

Истраживање спроведено у оквиру ове докторске дисертације представља свеобухватан научни допринос разумевању триболошких и енергетских аспеката рада пужних преносника снаге, као и могућностима унапређења њихових радних карактеристика применом нанотехнолошки модификованих мазива. Полазећи од фундаменталних принципа динамике пужних преносника снаге и сложених механизма хабања, који се јављају у контактним зонама пужа и пужног зупчаника, ова дисертација је пружила интегрални приступ анализи и оптимизацији механичког система на релацији мазиво – материјал – оптерећење – температура.

Прегледом литературе указано је на ограничења традиционалних мазива која се користе у пужним преносницима снаге. Ово је нарочито изражено у погледу способности одржавања подмазујућег филма у условима високих специфичних притисака и температура. Истовремено је уочено да материјали, посебно пужних зупчаника, имају значајну улогу у одређивању радних карактеристика пужног преносника, као и његовог укупног радног века. Однос између физичко–хемијских и реолошких особина мазива и физичко–хемијских својстава материјала у контакту представља комплексну динамичку међузависност. Њихово разумевање је неопходно за системско унапређење степена искоришћења пужних преносника.

Експериментални део дисертације обухватио је одређивање оптималних концентрација угљеничних наноцеви (CNT) у мазиву, карактеризацију материјала пужног преносника и контролу параметара као што су улазна угаона брзина преносника снаге, оптерећење и температура. Добијени резултати су статистички валидни и репрезентативни за реалне услове рада механичког преносника.

Употреба CNT адитива у глицеринским уљима показала се као изразито успешан приступ побољшању функционалности пужних преносника снаге. Угљеничне наноцеви, захваљујући својој издуженој морфологији, високој термичкој проводљивости и специфичној способности да формирају дисперзивну мрежу у мазиву, омогућиле су значајно смањење трења, хабања и губитака снаге. Експериментом је показано да се у зони контакта образује стабилнији и равномернији подмазујући филм. Ово доприноси смањењу буке и вибрација, чинећи рад преносника снаге динамички стабилнијим и ефикаснијим у виду већег степена искоришћења.

Испитивани су концентрациони нивои од 0 мас.%, 0,1 мас.%, 0,2 мас.%, 0,5 мас.%, 1,0 мас.% и 2,0 мас.% CNT у глицеролу. Важно је истаћи да је повећање концентрације CNT адитива имало позитиван утицај до извесне границе, после које долази до повећања вискозности, појачане агломерације и нарушавања хомогености мазива. Ово је у лабораторијским условима довело до пораста губитака снаге и повећане промене температуре, што указује да превисоке концентрације нанoadитива могу имати контрапродуктиван ефекат.

Детаљна анализа добијених резултата показала је да је концентрација од приближно 1,0 мас.% CNT адитива у мазиву оптимална за пужне преноснике снаге испитиване у оквиру дисертације. При овој вредности нанoadитива највише су дошле до изражаја следеће појаве: формирање стабилног нанофилма, настанак ефекта нанокотрљања, где CNT честице делују као микроскопски ваљчићи, смањујући клизно трење, попуњавајући микродепресије на површинама, смањујући локалне контактне напоне, пружајући раст микротврдоће мазивога слоја уз повећање отпорности на адхезивно хабање. Ова вредност представља оптималан баланс између: минимизације

трења, смањења хабања контактних површина, стабилизације температуре, смањења буке и вибрација, повећања степена искоришћења и очувања реолошке стабилности мазива. За концентрације ниже од 1,0 мас.% CNT адитива позитивни ефекти наноструктура нису били максимално изражени, док су за веће концентрације негативни ефекти агломерације и поремећаја у циркулацији мазива показали тенденцију да анулирају предности нанодисперзије.

Експерименталним истраживањима је утврђено да степен искоришћења пужног преносника снаге показује јасну и недвосмислену зависност од оптерећења, броја обртаја, материјала пужног зупчаника и састава примењеног мазива. За пужни преносник са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14 уочено је да са порастом оптерећења долази до повећања степена искоришћења у распону од приближно 0,08 за мазиво на бази глицерола без CNT адитива (0 мас.%) до око 0,14 за мазиво са 1,0 мас.% CNT адитива и то за све анализирани улазне угаоне брзине (1500 min^{-1} , 2000 min^{-1} и 2500 min^{-1}). Ови резултати јасно указују да повећање оптерећења, у комбинацији са адекватно формулисаним мазивом, доводи до стабилизације трибофилма и смањења губитака услед трења, што резултира ефикаснијим преносом обртног момента.

Код пужног преносника са пужним зупчаником израђеним од цинк–алуминијум бронзе ZA-12 уочен је сличан, али нешто израженији тренд повећања степена искоришћења. За мазиво без CNT адитива (0 мас.%) степен искоришћења, током испитивања, са порастом излазног обртног момента расте за око 0,15, од просечних вредности око 0,41 до приближно 0,56, док код мазива са 1,0 мас.% CNT адитива са порастом оптерећења, повећање степена искоришћења износи око 0,10, са приближно 0,52 на око 0,62. Упоредна анализа показује да је степен искоришћења пужног преносника са зупчаником од бронзе ZA-12 у целокупном опсегу ниских и умерених оптерећења већи за око 0,02 до 0,04, у односу на одговарајуће вредности добијене за комбинацију са калајном бронзом CuSn14. Такође је утврђено да је степен искоришћења при примени комерцијалног уља за зупчасте преноснике Reduktol Super ISO VG 460 на нивоу вредности постигнутих применом мазива са око 0,5 мас.% CNT адитива, што додатно потврђује ефикасност CNT адитива.

Међутим, при највећем анализираним оптерећењу од 4,1 Nm уочава се смањење степена искоришћења код пужног преносника са зупчаником од ZA-12, у односу на претходни ниво оптерећења од 3,4 Nm, што није случај код калајне бронзе CuSn14. Овакво понашање указује на ограничења термичке стабилности легуре ZA-12, чија нижа температура течења и повећана осетљивост на локално загревање доводе до дестабилизације трибофилма и повећаних губитака услед трења при екстремним контактним напорима. Насупрот томе, калајна бронза CuSn14 у овим условима задржава стабилнији триболошки одзив и повољнији степен искоришћења, захваљујући бољој отпорности на термичку деформацију и већој пластичној носивости контактне зоне.

Надаље се може поуздано закључити да додавање CNT адитива у мазиво на бази глицерола има изузетно повољан утицај на смањење емисије буке пужних преносника снаге, при чему је ефекат најизраженији у условима нижих улазних обртних брзина. За пужни преносник са пужним зупчаником од калајне бронзе CuSn14, већ при најнижем улазном броју обртаја од 1500 min^{-1} уочено је нагло смањење нивоа буке за око 6 dB након додавања свега 0,1 мас.% CNT адитива, док се при оптималној концентрацији од 1,0 мас.% CNT адитива остварује укупна редукција буке од приближно 14 dB, односно 15 %, у односу на базно мазиво без адитива. Са повећањем улазног броја обртаја на 2000 min^{-1} и 2500 min^{-1} разлике у нивоу буке се смањују, али остају јасно изражене и износе око 9 dB (11 %), односно око 7 dB (9 %), што указује на прелазак ка доминантнијем

хидродинамичком режиму подмазивања и смањеном утицају граничног трења. Код пужног преносника са пужним зупчаником од цинк–алуминијум бронзе ZA-12, тренд смањења буке је још израженији: при улазном броју обртаја од 1500 min^{-1} бележи се пад нивоа буке од чак 16 dB, што износи 18 % између мазива са 0 мас.% и 1,0 мас.% CNT адитива, док при 2000 min^{-1} и 2500 min^{-1} редукација износи око 12 dB (13 %) и 8 dB (10 %). Ови резултати јасно указују да CNT адитиви имају снажнији ефекат на смањење буке код легуре ZA-12, услед њене израженије микрогеометрије и веће склоности ка локалним контактним нестабилностима, које наноцеви ефикасно ублажавају попуњавањем микронеравнина и стабилизацијом контактеног притиска. Истовремено је утврђено да повећање концентрације CNT адитива на 2,0 мас.% доводи до поновног пораста буке за око 3 dB код обе комбинације пужног зупчаника, што се приписује агломерацији наноцеви и нарушавању континуитета подмазујућег филма. Поређењем са комерцијалним уљем за зупчасте преноснике Reduktol Super ISO VG 460 показано је да оно обезбеђује ниво буке приближан мазивима са 0,2–0,5 мас.% CNT адитива, али не достиже акустичке карактеристике наномазива са оптималном концентрацијом од 1,0 мас.% CNT адитива. Свеукупно, добијени резултати недвосмислено потврђују да оптимално формулисана наномазива са CNT адитивима представљају ефикасно средство за значајно смањење вибрација и буке пужних преносника снаге, при чему је њихов утицај посебно изражен код материјала са сложенијим триболошким и микроструктурним карактеристикама.

У погледу вибрационог понашања, утврђено је да CNT адитиви стабилизују контактну зону између пужа и пужног зупчаника, смањују амплитуду микродинамичких осцилација и уједначавају расподелу контактних притисака. Код пужног зупчаника од калајне бронзе CuSn14, при улазној брзини од 1500 min^{-1} , редукација вибрација достиже до $1,8 \text{ m/s}^2$, што представља 27 %, док је код цинк–алуминијум бронзе ZA-12 смањење вибрација још израженије и износи до $2,1 \text{ m/s}^2$ или 37 %, при оптималној концентрацији од 1,0 мас.% CNT адитива. Истовремено је показано да прекомерно повећање концентрације CNT адитива (2,0 мас.%) доводи до погоршања динамичког одзива услед агломерације наноцеви и дестабилизације трибофилма, док комерцијално уље за зупчасте преноснике Reduktol Super ISO VG 460 не достиже вибрационе карактеристике наномазива оптималне концентрације CNT.

Додавање CNT адитива у мазиво на бази глицерола значајно смањује промену температуре Δt пужних преносника снаге. За пужни зупчаник од калајне бронзе CuSn14, при 1500 min^{-1} , Δt се смањује за око 2 °C након додавања 0,1 мас.% CNT, док се при 1,0 мас.% остварује редукација од приближно 4 °C, што представља 26 %, у односу на базно мазиво са $\Delta t = 6,2 \text{ °C}$. Повећање адитива на 2,0 мас.% доводи до пораста Δt на ниво сличан мазиву са 0,5 мас.% CNT, услед агломерације наноцеви. Комерцијално уље за зупчасте преноснике Reduktol Super ISO VG 460 показује Δt сличан мазивима са 0,2–0,5 мас.% CNT. Код пужног зупчаника од цинк–алуминијум бронзе ZA-12 смањење Δt је још израженије: 1,8 °C за 0,1 мас.% CNT и 4,8 °C за 1,0 мас.% CNT, односно 27 %. Оптимални удео CNT (0,1–1,0 мас.%) формира стабилан трибофилм који равномерно распоређује енергију трења, побољшава вискозно-еластичне карактеристике филма и минимизује локалне термичке осцилације, што директно побољшава топлотну стабилност и енергетску ефикасност пужних преносника.

На основу свеобухватне анализе масеног губитка и SEM микроструктурних запажања, може се закључити да додавање CNT адитива у базно мазиво има изразито повољан утицај на смањење хабања пужних зупчаника пужног преносника снаге. Квантитативни резултати показују да је код пужног зупчаника од калајне бронзе CuSn14 губитак масе смањен са 0,134 g (0,596 % почетне масе) при мазиву без CNT адитива на

минималних 0,072 g (0,321 ‰) при концентрацији од 1,0 мас.% CNT, што представља редукацију хабања већу од 46 %. Још израженији ефекат остварен је код пужног зупчаника од цинк–алуминијум бронзе ZA-12, где је губитак масе редукован са 0,074 g (0,482 ‰) на 0,031 g (0,202 ‰), односно за приближно 58 %, при истој оптималној концентрацији CNT адитива. SEM анализа је потврдила да је наведено смањење хабања праћено значајним смањењем абразивних жлебова, као и смањењем густине површинских дефеката. Формирање стабилног нанотрибофилма, уз изражен „ефекат нанолежајева“, омогућило је смањење директног контакта металних површина, равномернију расподелу контактних притисака и ублажавање локалних микродеформација. Уочено је да даље повећање концентрације CNT адитива на 2,0 мас.% доводи до поновног пораста хабања код обе легуре (на 0,098 g код CuSn14 и 0,043 g код ZA-12), услед агрегације наноцеви и нарушавања хомогености мазивног филма, док комерцијално уље за зупчасте преноснике Reduktol Super ISO VG 460 постиже ниво заштите упоредив са мазивима средњих концентрација CNT (0,2–0,5 мас.%). Упоредна анализа јасно показује да ZA-12 бронза, захваљујући већој тврдоћи, двофазној микроструктури и повољнијој интеракцији са CNT адитивима, испољава систематски мањи интензитет хабања у односу на калајну бронзу CuSn14. Ови резултати недвосмислено потврђују да оптимална комбинација материјала пужног зупчаника и концентрације CNT адитива представља кључни фактор за повећање отпорности на хабање, продужетак радног века и унапређење укупних триболошких карактеристика пужних преносника снаге.

Наведени резултати представљају научни допринос, јер пружају прецизну смерницу за развој наномазива, што је од великог значаја за оптимизацију пужних преносника снаге у реалним инжењерским конструкцијама. Статистичком методом полиномске регресије су, у уским границама, утврђени распони оптималног процентуалног удела CNT адитива у мазиву у распону између 1,0 мас.% и 2,0 мас.% CNT адитива за обе комбинације бронзе пужног зупчаника.

Поред оптимизације мазива, истраживање је указало на критичну важност избора одговарајућег материјала бронзе за пужни зупчаник пужног преносника. Бронзе са додатком калаја или алуминијума показују различите карактеристике у погледу: отпорности на адхезионо и абразивно хабање, топлотне проводљивости, микроструктурне стабилности при повишеним температурама и интеракције са мазивима различите вискозности. Резултати испитивања су показали да калајна бронза има повољнији баланс отпорности на хабање и способност формирања стабилног контактнег филма у комбинацији са наномазивима. Калајна бронза је показала бољу отпорност на локално термичко омекшавање и већу уједначеност контактнег притиска током рада. Бронза са већим уделом алуминијума је показала вишу чврстоћу и израженију отпорност на површинска оштећења, али и повећану склоност ка адхезионом хабању, што није најповољније за контакт са челичним пужем у условима граничног подмазивања.

Резултати су показали да је бронза ZA-12 остварила боље резултате у већини анализираних параметара, укључујући:

- већи степен искоришћења, услед мањег унутрашњег клизног отпора и бољег усклађивања са мазивом са CNT адитивима,
- нижи интензитет хабања, захваљујући већој микроструктуралној хомогености и већем уделу међуметалних фаза, које доприносе отпорности на адхезију,
- смањен ниво буке и вибрација, као последица стабилнијег контактнег пара и мањег таласног одступања током ротације и

- спорији пораст температуре, услед бољег одвођења температуре и квалитетније формирање и одржавање мазивог слоја.

Наведена цинк–алуминијум бронза ZA-12 је у односу на калајну бронзу CuSn14 показала слабије резултате једино при највећем оптерећењу, када је дошло до опадања радних карактеристика: јачих убрзања вибрација, повишене температуре контакта и делимичног оштећења уљног филма, услед прекорачења носивости мазива са CNT адитивима.

Комбинација калајних и алуминијумских бронзи и мазива са CNT адитивима је надмашила радне карактеристике комерцијалног уља за зупчасте преноснике Reduktol Super ISO VG 460 већ при средњим и благо високим процентима CNT адитива у мазиву, односно мазива са 0,5 мас.% и 1,0 мас.% CNT адитива у мазиву на бази глицерола показују боље карактеристике у односу на наведено комерцијално уље за зупчасте преноснике.

На основу спроведених анализа и интервалних оцена оптималних концентрација CNT адитива, може се закључити да се ефекат нанодитива на радне карактеристике пужних преносника јасно разликује у зависности од материјала пужних зупчаника. За калајну бронзу CuSn14 утврђен је релативно ужи и стабилан опсег оптималних концентрација адитива (од 1,32 до 1,35 мас.% CNT), са минималним варијацијама у различитим режимима рада, што указује на висок степен стабилности функционалне зависности између концентрације CNT адитива и степена искоришћења. Супротно томе, легура ZA-12 показује нешто шири опсег оптималних вредности (од 1,25 до 1,38 мас.% CNT) и израженије одступање при већим бројевима обртаја, што указује на већу осетљивост овог материјала на промене кинематских и термичких услова рада.

Добијени резултати имају важност са више практичних аспеката. Прво, идентификовани интервали оптималних концентрација омогућавају прецизно формулисање мазива која обезбеђују максималан степен искоришћења пужног преносника уз минималне губитке услед трења и хабања. Друго, ужи и предвидљиви интервали за бронзу CuSn14 указују на већу робусност система и могућност стабилнијег одржавања оптималног режима подмазивања, мању осетљивост на промене броја обртаја и продужење животног века пужног пара. Са друге стране, шири интервали за бронзу ZA-12 захтевају већу контролу радних параметара, како би се одржала стабилност подмазивања и спречила појава прекомерног хабања или промена степена искоришћења.

На крају, примена полиномске регресије као модела оптимизације није само статистички инструмент, већ пружа практичну основу за доношење технички оправданих одлука, укључујући: предвиђање оптималног састава мазива, процену стабилности система при различитим радним условима, избор материјала елемената преносника снаге са унапређеним механичким својствима, смањење експерименталних трошкова и дугорочно планирање рада и одржавања пужних преносника. На тај начин, резултати овог истраживања чине мост између математичког моделирања и инжењерске праксе, омогућавајући прецизну, ефикасну и технички оправдану оптимизацију мазива на бази CNT адитива.

Добијени резултати указују на бројне правце за наставак научног рада, као што су:

- развој хибридних наномазива са комбинованим CNT, графенским и металним наноцевима,
- испитивање дугорочне стабилности дисперзија у условима циклуса загревања и хлађења,

-
- симулација контактних поља применом нумеричких модела и машинског учења,
 - развој нових бронзаних легура оптимизованих за рад са наномазивима и
 - увођење дигиталних близанаца (енгл. *digital twins*) за праћење стања пужних преносника у реалном времену.

Ова дисертација потврђује да је интеграција нанотехнологије, машинских елемената и машинских материјала од кључног значаја за развој унапређене генерације пужних и других зупчастих преносника, као и нове генерације мазива, који би обезбедили мање губитке, већи степен искоришћења, дужи век употребе и већу отпорност на екстремне радне температуре. Комбинација оптималног мазива са CNT адитивима и пажљиво одабране легуре бронзе, пружа основу за значајно унапређење карактеристика и поузданости пужних преносника снаге.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Витас, Д., Трбојевић, М.: *Машински елементи III четврто издање*, Научна књига, Београд, 1978.
- [2] Стојановић, Б., Благојевић, М.: *Механички преносници*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
- [3] Ивковић, Б., Рац, А.: *Трибологија*, Југословенско друштво за трибологију, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1995.
- [4] Bognár, G., Vencl, A.: *Experimental investigation of viscosity of glycerol based nanofluids containing carbon nanotubes*, Tribology in Industry, 41(2), 267-273, 2019, DOI: 10.24874/ti.2019.41.02.12.
- [5] Танасијевић, С.: *Основи трибологије машинских елемената*, Научна књига, Београд, 1989.
- [6] Zhai, W., Srikanth, N., Kong, L. B., Zhou, K.: *Carbon nanomaterials in tribology*, Carbon, 119, 150-171, 2017, DOI: 10.1016/j.carbon.2017.04.027.
- [7] Zhao, J., Huang, Y., He, Y., Shi, Y.: *Nanolubricant additives: A review*, Friction, 9(5), 891-917, 2021, DOI: 10.1007/s40544-020-0450-8.
- [8] Тошић, М., Larsson, R., Stahl, K., Lohner, T.: *Thermal elastohydrodynamic analysis of a worm gear*, Machines, 11(1), 89, 2023, DOI: 10.3390/machines11010089.
- [9] Jelaska, D. T.: *Gears and gear drives*, John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, United Kingdom, 2012.
- [10] Magyar, B., Sauer, B., Horák, P.: *Tribological investigation of K type worm gear drives*, Acta Polytechnica Hungarica, 9(6), 233-252, 2012.
- [11] Mautner, E. M., Sigmund, W., Stemplinger, J. P., Stahl, K.: *Efficiency of worm gearboxes*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 230(16), 2952-2956, 2016, DOI: 10.1177/0954406215602286.
- [12] Miltenović, Đ., Banić, M., Miltenović, A., Tica, M.: *Power losses and efficiency of worm gears in extreme operating conditions*, In 3th International Scientific Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications (COMETA 2016), East Sarajevo, Jahorina, B&H, 7-9 December, 169-176, 2016.
- [13] Radosavljević, S. Z., Stojanović, B. Ž., Skulić, A. D.: *Determination of power losses in worm gear reducer*, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 393 (1), 012050. IOP Publishing, 2018.
- [14] Stojanović, B., Vencl, A., Skulić, A., Miladinović, S., Gajević, S.: *Influence of materials on the efficiency of worm gear transmission*, In Proceedings of the 6th International Scientific Conference "COMETA 2022", East Sarajevo, B&H, RS 17th–19th November, 2022, 402-409, University of East Sarajevo, Faculty of Mechanical Engineering, 2022.
- [15] Micăciu, A., Vușcan, I., Panc, N.: *Evaluation of Overall Efficiency of Devices with Worm Gear*, Applied Mechanics and Materials, 808, 9-14, 2015, DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.808.9.

- [16] Dobreva, A., Pavlov, P.: *Energy efficiency of worm gear drives*, Proceedings of the 32nd DAAAM International Symposium, 0110-0116, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-33-4, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria, 2021, DOI: 10.2507/32nd.daaam.proceedings.016.
- [17] Rai, P., Barman, A. G.: *Design optimization of worm gear drive with reduced power loss*, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 635 (1), 012015, IOP Publishing, 2019, DOI:10.1088/1757-899X/635/1/012015.
- [18] Nguyen, H. L., Nguyen, K. N., Le, M. M.: *Estimation and Optimization of Worm Drive Efficiency using Taguchi and Symmetric Quasi-D Optimal Methods*, Tribology in Industry, 44 (1), 34, 2023, DOI: 10.24874/ti.1396.10.22.01
- [19] Skulić, A., Stojanovic, B., Radosavljević, S.: *Experimental determination of worm gearing efficiency*, Applied Engineering Letters, 4(4), 115-119, 2019, DOI: 10.18485/aeletters.2019.4.4.2.
- [20] Paschold, C., Sedlmair, M., Lohner, T., Stahl, K.: *Efficiency and heat balance calculation of worm gears*, Forschung im Ingenieurwesen, 84 (2), 115-125, 2020, DOI: 10.1007/s10010-019-00390-1.
- [21] Liou, J. J., Rakuff, S.: *The development of worm drives*, International VDI Conference on Gears 2017, Garching/Munich (VDI-Berichte 2294, 2017, VDI Verlag GmbH), Power Transmission Engineering, 38-43, 2018.
- [22] Karabacak, Y. E., Gürsel Özmen, N., Gümüsel, L.: *Worm gear condition monitoring and fault detection from thermal images via deep learning method*, Eksploatacja i Niezawodność, 22(3), 544-556, 2020, DOI: 10.17531/ein.2020.3.18.
- [23] Tica, M., Miltenović, D., Banić, M., Miltenović, A.: *Permissible temperatures and thermal stability of worm gears*, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, 15(3), 61, 2017.
- [24] Li, K., Xu, W., Liu, Y., Qin, D.: *Effect of Tooth Geometry on Multi-cycle Meshing Temperature of POM Worm Gears: Parametric Study via an Adaptive Iteration Algorithm*, Chinese Journal of Mechanical Engineering, 38(1), 32, 2025, DOI: 10.1186/s10033-025-01194-x.
- [25] Танасијевић, С.: *Триболошки исправно конструисање*, Монографија, Машински факултет Крагујевац, 2004.
- [26] Šmeringaiová, A. *Study vibration of worm gear boxes*, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1199, (1), 012012, IOP Publishing, 2021, DOI:10.1088/1757-899X/1199/1/012012.
- [27] Barshikar, R., Baviskar, P., Patil, M. M., Dube, A. S., Dhore, V. J.: *Model analysis of worm gear pair system using finite element analysis*, 29, (2), 1-15, 2024, DOI: 10.59441/ijame/186684.
- [28] Benabid, Y., Mansouri, S.: *Dynamics study and diagnostics with vibration analysis from worm gear manufactured by reverse engineering techniques*, Journal of Vibroengineering, 18(7), 4458-4471, 2016, DOI: 10.21595/jve.2016.17203.
- [29] Akerblom, M.: *Gear noise and vibration: a literature survey*, 2001.
- [30] Lamani, G. S., Ranalkar, N. G., Pawar, O. P., Patil, S. V.: *Vibration analysis of worm and worm wheel gear box*, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), 7, 81-84, 2018.

- [31] Bukvić, M., Vencl, A., Milojević, S., Skulić, A., Gajević, S., Stojanović, B.: *The Influence of Carbon Nanotube Additives on the Efficiency and Vibrations of Worm Gears*. *Lubricants*, 13(8), 327, 2025, DOI: 10.3390/lubricants13080327.
- [32] Bucur, B., Bolos, V.: *Experimental research on noise and vibration level of gearbox using worm face-gear with reverse tapered pinion*, The 5th Edition of the Interdisciplinarity in Engineering International Conference “Petru Maior” University of Tîrgu Mureş, Romania, 170, Elsevier Limited, 2011.
- [33] Barshikar, R., Baviskar, P., Ghongade, H., Dond, D., Bhadre, A.: *Investigation of parameters for fault detection of worm gear box using denoise vibration signature*, *Int. J. of Applied Mechanics and Engineering*, 28(4), 43-53, 2023, DOI: 10.59441/ijame/176513.
- [34] He, Q., Li, A., Wang, Z., Zhang, Y., Kong, L., Yang, K.: *Tribological behavior of ZnO-Si₃N₄ nanoparticles-based lubricating grease*, *Journal of Experimental Nanoscience*, 13(1), 231-244, 2018, DOI: 10.17531/ein.2020.3.18.
- [35] Qu, D., Zhang, C., Xu, J., Zhang, R., Zhang, S.: *Research of Theoretical Model and Transmission Efficiency of ZCl Worm Dynamic Lubrication*, *Advances in Engineering Research*, 149, 2nd International Conference on Mechanical, Electronic, Control and Automation Engineering (MECAE 2018).
- [36] Yousef, S., Osman, T. A., Abdalla, A. H., Zohdy, G. A.: *Wear characterization of carbon nanotubes reinforced acetal spur, helical, bevel and worm gears using a TS universal test rig*. *JOM, The Minerals, Metals & Materials Society*, 67(12), 2892-2899, 2015, DOI: 10.1007/s11837-014-1268-5.
- [37] Ümütlü, R. C., Ozturk, H., Kiral, Z.: *Pitting detection in a worm gearbox using artificial neural networks*. *INTER-NOISE Congress and Conference Proceedings*, 253(6), 2718-2726, Institute of Noise Control Engineering, 2016.
- [38] He, T., Chen, N., Fang, J., Cai, G., Wang, J., Chen, B., Liang, Q.: *Micro/nano carbon spheres as liquid lubricant additive: Achievements and prospects*, *Journal of molecular liquids*, 357, 119090, 2022, DOI: 10.1016/j.molliq.2022.119090.
- [39] Meng, F. S., Li, Z., Ding, H. H., Hu, J. S., Wang, W. J., Guo, J., Liu, Q. Y.: *Study on the preparation and tribological properties of BN@ C-OA nano-additive lubricants*, *Wear*, 474, 203876, 2021, DOI: 10.1016/j.wear.2021.203876.
- [40] Dabees, S., Tirth, V., Mohamed, A., Kamel, B. M. *Wear performance and mechanical properties of MWCNT/HDPE nanocomposites for gearing applications*. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 2476-2488, 2021, DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.09.129.
- [41] Srivivas, P. D., Charoo, M. S.: *A Review on Tribological Characterization of Lubricants with Nano Additives for Automotive Applications*, *Tribology in Industry*, 40(4), 594-623, 2018, DOI: 10.24874/ti.2018.40.04.08.
- [42] Dai, W., Kheireddin, B., Gao, H., Liang, H.: *Roles of nanoparticles in oil lubrication*, *Tribology international*, 102, 88-98, 2016, DOI: 10.1016/j.triboint.2016.05.020.
- [43] Birleanu, C., Pustan, M., Cioaza, M., Molea, A., Popa, F., Contiu, G.: *Effect of TiO₂ nanoparticles on the tribological properties of lubricating oil: an experimental investigation*. *Scientific Reports*, 12(1), 5201, 2022, DOI: 10.1038/s41598-022-09245-2.

- [44] Mohamed, A., Ali, S., Osman, T. A., Kamel, B. M.: *Development and manufacturing an automated lubrication machine test for nano grease*, Journal of Materials Research and Technology, 9(2), 2054-2062, 2020, DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.12.038.
- [45] Chebattina, K. R. R., Srinivas, V., Rao, N. M.: *Effect of size of multiwalled carbon nanotubes dispersed in gear oils for improvement of tribological properties*, Advances in Tribology, 2018(1), 2328108, 2018, DOI: 10.1155/2018/2328108.
- [46] Khalil, W., Mohamed, A., Bayoumi, M., Osman, T. A.: *Tribological properties of dispersed carbon nanotubes in lubricant*, Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures, 24(7), 479-485, 2016, DOI: 10.1080/1536383X.2016.1188804.
- [47] Halefadi, S., Estellé, P., Aladag, B., Doner, N., Maré, T.: *Viscosity of carbon nanotubes water-based nanofluids: Influence of concentration and temperature*, International Journal of Thermal Sciences, 71, 111-117, 2013, DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2013.04.013.
- [48] Marino, F., del Rio, J. M. L., Lopez, E. R., Fernandez, J.: *Chemically modified nanomaterials as lubricant additive: Time stability, friction, and wear*, Journal of Molecular Liquids, 382, 121913, 2023, DOI: 10.1016/j.molliq.2023.121913.
- [49] Cornelio, J. A. C., Cuervo, P. A., Hoyos-Palacio, L. M., Lara-Romero, J., Toro, A.: *Tribological properties of carbon nanotubes as lubricant additive in oil and water for a wheel-rail system*, Journal of Materials Research and Technology, 5(1), 68-76, 2016, DOI: 10.1016/j.jmrt.2015.10.006.
- [50] Safarova, K., Dvorak, A., Kubinek, R., Vujtek, M., Rek, A.: *Usage of AFM, SEM and TEM for the research of carbon nanotubes*, Modern Research and Educational Topics in Microscopy, Formatex, 2, 513-519, 2007.
- [51] Chang, Y. N., Zhang, M., Xia, L., Zhang, J., Xing, G.: *The toxic effects and mechanisms of CuO and ZnO nanoparticles*, Materials, 5(12), 2850-2871, 2012, DOI:10.3390/ma5122850.
- [52] Bukvić, M., Gajević, S., Skulić, A., Savić, S., Ašonja, A., Stojanović, B.: *Tribological application of nanocomposite additives in industrial oils*. Lubricants, 12(1), 6, 2024, DOI: 10.3390/lubricants12010006.
- [53] Огњановић М.: *Машински елементи, уџбеник*, Машински факултет, Београд, 2014.
- [54] Ристивојевић, М., Стаменић, З., Митровић, Р.: *Машински елементи 2, уџбеник*, Машински факултет, Београд, 2022.
- [55] Niemann, G., Winter, H.: *Maschinenelemente III: zweite Auflage*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1986.
- [56] Витас, Д., Трбојевић, М.: *Машински елементи 3, уџбеник*, Машински факултет, Београд, 1978.
- [57] Вуковић, В., Вуковић, М., Кнежевић, И., Бојанић, М.: *Основе машинства, уџбеник*, Универзитет за пословни инжењеринг и менаџмент, Бања Лука, 2015.
- [58] Глигорић, Р.: *Машински елементи, уџбеник*, Пољопривредни факултет, Нови Сад, 2015.
- [59] Митровић, Р., Ристивојевић, М., Росић, Б.: *Машински елементи 1, уџбеник*, Машински факултет, Београд, 2021.

- [60] Милтеновић, Ђ.: *Истраживање термичке стабилности и хабања пужних преносника (докторска дисертација)*, Универзитет у Бањој Луци, Машински факултет, 2017.
- [61] Стојановић, Б., Благојевић, М.: *Механички преносници I*, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2021.
- [62] Милтеновић, В.: *Машински елементи – облици, прорачун и примена*, Машински факултет, Ниш, 2009.
- [63] Honkalas, R., Deshmukh, B., Pawar, P.: *A review on design and efficiency improvement of worm and worm wheel of a gear motor*. Journal of Physics: Conference Series 1969(1), 012023, IOP Publishing, 2021, DOI:10.1088/1742-6596/1969/1/012023.
- [64] Танасијевић С., Вулић А.: *Механички преносници – планетарни преносници и варијатори*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2006.
- [65] Рац, А.: *Основе трибологије*, Машински факултет у Београду, Београд, 1991.
- [66] Рац, А.: *Мазива и подмазивање машина*, Машински факултет у Београду, Београд, 2007.
- [67] Николић, В. *Машински елементи*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2004.
- [68] Dudás, I.: *The theory and practice of worm gear drives*, Butterworth - Heinemann, Penton Press Kogan Page Ltd, London, UK, 2005.
- [69] Hubner, C., Predki, W., Jarchow, F.: *Noise Emission of Worm Gears*, VDI BERICHTE, 1665, 811-838, 2002.
- [70] Vojtko, I., Kočiško, M., Šmeringaiová, A., Adamčík, P.: *Vibration of worm gear boxes*, Applied Mechanics and Materials, 308, 45-49, 2013, DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.308.45.
- [71] DIN 3996: *Tragfähigkeitsberechnung von ZylinderSchneckengetrieben mit sich rechtwinklig kreuzenden Achsen*, September/2012.
- [72] Ismon, M. B., Zaman, I. B., Ghazali, M. I.: *Condition monitoring of variable speed worm gearbox lubricated with different viscosity oils*, Applied Mechanics and Materials, 773, 178-182, 2015, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.773-774.178.
- [73] Miltenović, A., Tica, M., Banić, M., Miltenović, Đ.: *Prediction of temperature distribution in the worm gear meshing*, Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering, 18(2), 329-339, 2020, DOI: 10.22190/FUME180120016M.
- [74] Miltenović, A., Banić, M., Vitković, N., Simonović, M., Perić, M., Rangelov, D.: *Investigation of the Influence of Contact Patterns of Worm-Gear Sets on Friction Heat Generation during Meshing*, Applied Sciences, 14(2), 738, 2024, doi.org/10.3390/app14020738.
- [75] Roth, P., Hein, M., Stahl, K.: *Scuffing load capacity calculation of worm gears*, Forschung im Ingenieurwesen, 86(3), 503-511, 2022, DOI: 10.1007/s10010-021-00504-8.
- [76] Karabacak, Y. E., Gürsel Özmen, N., Gümüsel, L.: *Worm gear condition monitoring and fault detection from thermal images via deep learning method*, Eksploatacja i Niezawodność, 22(3), 544-556, 2020, DOI: 10.17531/ein.2020.3.18.

- [77] Erol, S. S., Pecht, M.: *Condition monitoring of a worm-type gearbox in terms of tribo-prognostics through vibro-thermal analysis*, Proceedings of the Romanian Academy Series A-Mathematics Physics Technical Sciences Information Science, 22(1), 83-90, 2021.
- [78] Zheng, Y., Huang, H., Chen, Y., Peng, D., Chen, Z.: *Simulation and Experiment of Worm Gear Thermal Deformation and Transmission Error*, International Conference of Fluid Power and Mechatronic Control Engineering (ICFPMCE 2022), 333-346, Atlantis Press, 2022, DOI: 10.2991/978-94-6463-022-0_29.
- [79] Fernandes, C. M., Martins, R. C., Seabra, J. H.: *Coefficient of friction equation for gears based on a modified Hersey parameter*, Tribology International, 101, 204-217, 2016, DOI: 10.1016/j.triboint.2016.03.028.
- [80] Ивковић, Б.: *Речник триболошких термина*, Српско триболошко друштво. Машински факултет, Крагујевац, 2011.
- [81] Совиљ, Б., Јешић, Д., Совиљ-Никић, И.: *Идентификација и методе мерења триболошких карактеристика материјала*, Савремена пољопривредна техника, 36(3), 295–305, 2010.
- [82] Ивковић, Б.: *Продуктивност и трибологија у индустријским системима*, 8. међународна конференција о трибологији, 8(10), 347–350, Београд, Србија, 2003.
- [83] Stojanovic, B., Ivanović, L.: *The Influence Of Lubricant Viscosity On The Efficiency And Power Loss Of The Worm Gear*, Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal Of Engineering, XXI, 2, 2023.
- [84] Skulić, A., Bukvić, M., Gajević, S., Miladinovic, S., Stojanovic, B.: *The influence of worm gear material and lubricant on the efficiency and coefficient of friction*, Tribology and Materials, 3, (1), 2024, 5-23, 2024, DOI: 10.46793/tribomat.2024.001.
- [85] Dobrev, A. D. V., Mollova, G.: *Advanced Design Optimization Procedures*, In Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering (ICOME 2022), 15, 131, Springer Nature, 2023, DOI: 10.2991/978-94-6463-152-4_15.
- [86] Gresham, R. M., Canter, N. M., Zabawski, E. S., Zou, M.: *Lubrication and lubricants*, Kirk-Othmer Encyclopedia Of Chemical Technology, 1-77, 2000, DOI: 10.1002/0471238961.1221021802151519.a01.pub3.
- [87] Mang, T., & Dresel, W.: *Lubricants and lubrication*, John Wiley & Sons, WILEY-VCH GmbH, Weinheim, 2007.
- [88] Скулић, А.: *Идентификација оптималних вредности степена искористићења пужних зупчастих преносника (докторска дисертација)*, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2023.
- [89] Spikes, H.: *Friction modifier additives*, Tribology letters, 60(1), 5, 2015, DOI: 10.1007/s11249-015-0589-z.
- [90] Pongrac, P.: *Nanocijevi*, (doctoral dissertation), University of Zagreb, Faculty of Science, Department of Chemistry, 2021.
- [91] Garcia Tobar, M., Contreras Urgiles, R. W., Jimenez Cordero, B., Guillen Matute, J.: *Nanotechnology in lubricants: A systematic review of the use of nanoparticles to reduce the friction coefficient*, Lubricants, 12(5), 166, 2024, DOI: 10.3390/lubricants12050166.
- [92] Jason, Y. J. J., How, H. G., Teoh, Y. H., Chuah, H. G.: *A study on the tribological*

- performance of nanolubricants*. Processes, 8(11), 1372, 2020, DOI: 10.3390/pr8111372.
- [93] Rahman, M. M., Islam, M., Roy, R., Younis, H., AlNahyan, M., Younes, H.: *Carbon nanomaterial-based lubricants: review of recent developments*, Lubricants, 10, 281, 2022, DOI: 10.3390/lubricants10110281.
- [94] Shaon, F., Rana, A. A., Masum, S. M., Ullah, M. A., Karim, M. M.: *Surface-capped copper nanoadditive for improvement of base oil properties*, Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research, 54(1), 1-10, 2019, DOI: 10.3329/bjsir.v54i1.40725.
- [95] Bhaumik, S., Prabhu, S., Karpurapu, V., Uppala, N.: *Extreme pressure property of Carbon Nano Tubes (CNT) based nanolubricant*, Journal of Chemical Engineering and Materials Science, 4(8), 123-127, 2013, DOI: 10.5897/JCEMS2013.0163.
- [96] Chen, Y., Renner, P., Liang, H.: *Dispersion of nanoparticles in lubricating oil: A critical review*, Lubricants, 7(1), 7, 2019, DOI:10.3390/lubricants7010007.
- [97] Rabaso, P., Ville, F., Dassenoy, F., Diaby, M., Afanasiev, P., Cavoret, J., Le Mogne, T.: *Boundary lubrication: Influence of the size and structure of inorganic fullerene-like MoS₂ nanoparticles on friction and wear reduction*, Wear, 320, 161-178, 2014, DOI: 10.1016/j.wear.2014.09.001.
- [98] Lee, K., Hwang, Y., Cheong, S., Choi, Y., Kwon, L., Lee, J., Kim, S. H.: *Understanding the role of nanoparticles in nano-oil lubrication*, Tribology letters, 35(2), 127-131, 2009, DOI: 10.1007/s11249-009-9441-7.
- [99] Peng, D. X., Kang, Y., Hwang, R. M., Shyr, S. S., Chang, Y. P.: *Tribological properties of diamond and SiO₂ nanoparticles added in paraffin*. Tribology international, 42(6), 911-917, 2009, DOI: 10.1016/j.triboint.2008.12.015 .
- [100] Gulzar, M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Varman, M., Zulkifli, N. W. M., Mufti, R. A., Zahid, R.: *Tribological performance of nanoparticles as lubricating oil additives*, Journal of Nanoparticle Research, 18(8), 223, 2016, DOI: 10.1007/s11051-016-3537-4.
- [101] Marlinda, A. R., Thien, G. S. H., Shahid, M., Ling, T. Y., Hashem, A., Chan, K. Y., Johan, M. R.: *Graphene as a lubricant additive for reducing friction and wear in its liquid-based form*, Lubricants, 11(1), 29, 2023, DOI: 10.3390/lubricants11010029.
- [102] Sidh, K. N., Jangra, D., Hirani, H.: *An experimental investigation of the tribological performance and dispersibility of 2D nanoparticles as oil additives*, Lubricants, 11(4), 179, 2023, DOI: 10.3390/lubricants11040179.
- [103] Koshy, C. P., Rajendrakumar, P. K., Thottackkad, M. V.: *Evaluation of the tribological and thermo-physical properties of coconut oil added with MoS₂ nanoparticles at elevated temperatures*, Wear, 330, 288-308, 2015, DOI: 10.1016/j.wear.2014.12.044.
- [104] Wu, H., Menezes, P.: *Advances in Water-Based Nanolubricants*, 220, MDPI-Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2024, DOI: 10.3390/books978-3-7258-2800-5.
- [105] Gao, X., Fang, W., Li, W., Wang, P., Khan, K., Tang, Y., Wang, T.: *Effects of multidimensional carbon-based nanomaterials on the low-carbon and high-performance cementitious composites: a critical review*, Materials, 17(10), 2196, 2024, DOI: 10.3390/ma17102196.
- [106] Zhu, Y., Zhang, H., Li, N., & Jiang, Z.: *Preparation, Characterization, and Lubrication*

- Performances of Water-Based Nanolubricant for Micro Rolling Strips*, *Materials*, 17(2), 516, 2024, DOI: /10.3390/ma17020516.
- [107] Htwe, Y. Z. N., Al-Janabi, A. S., Wadzer, Y., Mamat, H.: Review of tribological properties of nanoparticle-based lubricants and their hybrids and composites, *Friction*, 12(4), 569-590, 2024, DOI: 10.1007/s40544-023-0774-2.
- [108] Waqas, M., Zahid, R., Bhutta, M. U., Khan, Z. A., Saeed, A.: *A review of friction performance of lubricants with nano additives*, *Materials*, 14(21), 6310, 2021, DOI: 10.3390/ma14216310.
- [109] Mohd Nurazzi, N., Asyraf, M. M., Khalina, A., Abdullah, N., Sabaruddin, F. A., Kamarudin, S. H., Sapuan, S. M.: *Fabrication, functionalization, and application of carbon nanotube-reinforced polymer composite: An overview*, *Polymers*, 13(7), 1047, 2021, DOI: 10.3390/polym13071047.
- [110] Jansson, N.: *Carbon nanostructures as lubricant additives* (Master's thesis, NTNU), Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Natural Sciences, Oslo, 2021.
- [111] Opia, A. C., Hamid, M. K. A., Syahrullail, S., Johnson, C. A. N., Rahim, A. B., Abdulrahman, M. B. J. E.: *Nano-particles additives as a promising trend in tribology: a review on their fundamentals and mechanisms on friction and wear reduction*, *Evergreen Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*, 8, 4, 777–98, 2021, DOI: 10.5109/4742121.
- [112] Maharaja, K., Vijayan, S. N., Karthik, S.: *Tribological effect of size, shape and structure of nanoparticle in lubricant oil—a review*, *International conference on systems, science, control, communication, engineering and technology (ICSSCET 2016)*, 730-734, 2016.
- [113] Akbulut, M.: *Nanoparticle-based lubrication systems*, *J. Powder Metall. Min*, 1(1), 1-3, 2012, DOI: 10.4172/2168-9806.1000e101.
- [114] Markus, A. A., Parsons, J. R., Roex, E. W. M., De Voogt, P., Laane, R. W. P. M.: *Modeling aggregation and sedimentation of nanoparticles in the aquatic environment*, *Science of the Total Environment*, 506, 323-329, 2015, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.11.056.
- [115] Birkin, P. R., Barber, J. L.: *Particle induced surface erosion—Tumbling and direct impact; a high-speed electrochemical, acoustic and visual study*, *Wear*, 428, 147-153, 2019, DOI: 10.1016/j.wear.2019.02.011.
- [116] Hacısalihoğlu, İ., Yıldız, F., & Çelik, A.: *Tribocorrosion behavior of plasma nitrided Hardox steels in NaCl solution*, *Tribology International*, 120, 434-445, 2018, DOI: 10.1016/j.triboint.2018.01.023.
- [117] Salah, N., Abdel-Wahab, M. S., Alshahrie, A., Alharbi, N. D., Khan, Z. H.: *Carbon nanotubes of oil fly ash as lubricant additives for different base oils and their tribology performance*, *RSC advances*, 7(64), 40295-40302, 2017, DOI: 10.1039/c7ra07155h.
- [118] Walvekar, R., Singh, A., Khalid, M., Gupta, T. C. S. M., Wong, W. Y.: *Thermophysical properties of deep eutectic solvent-carbon nanotubes (DES-CNT) based nanolubricant*, *Journal of Thermal Engineering*, 6(2), 53-64, 2020.
- [119] Kubiak, K. J., Boncel, S., Marek, A., Gapiński, B., Runka, T., Jędrysiak, R., Mathia, T. G.: *Towards the superlubricity of polymer–steel interfaces with ionic liquids and carbon nanotubes*, *Tribology International*, 191, 109203, 2024,

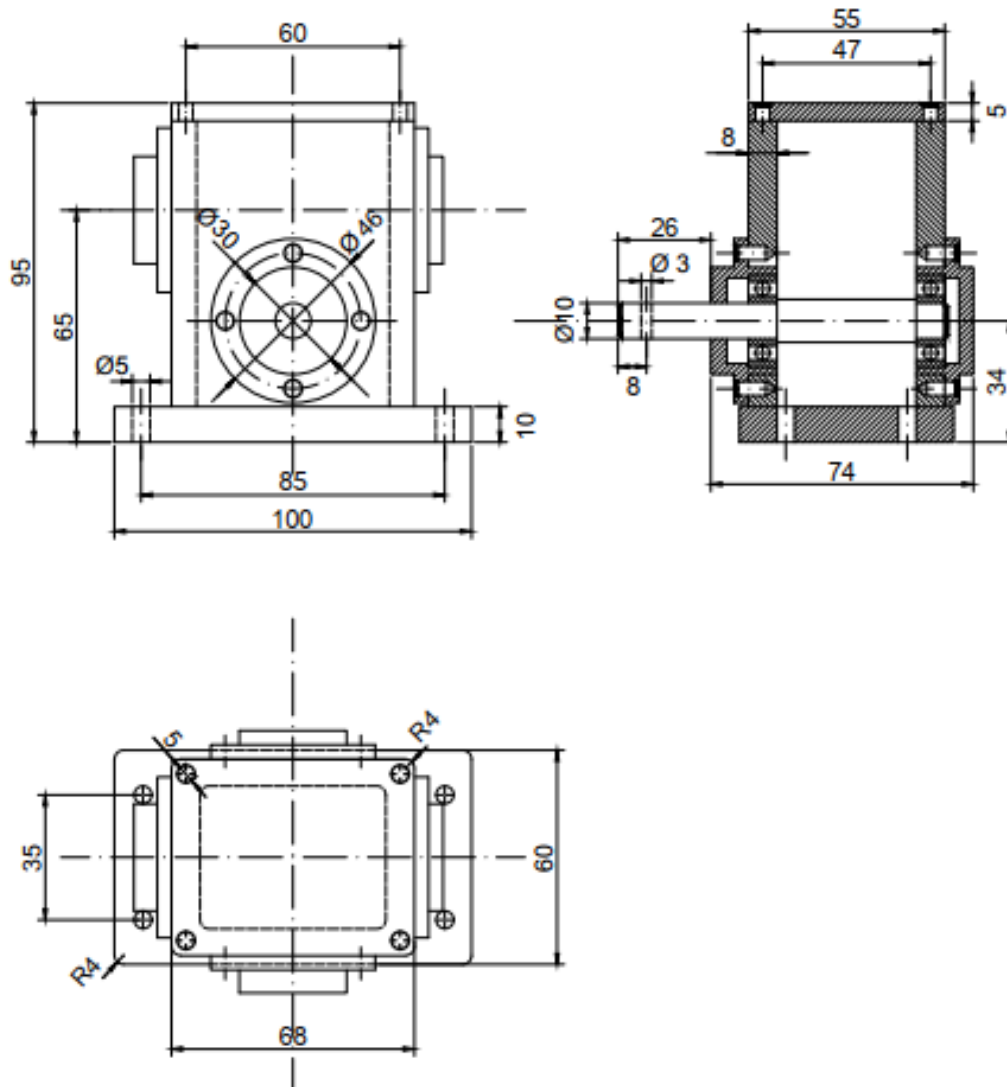
- DOI: 10.1016/j.triboint.2023.109203.
- [120] Jiang, Z., Sun, Y., Liu, B., Yu, L., Tong, Y., Yan, M., Li, W.: Research progresses of nanomaterials as lubricant additives. *Friction*, 12(7), 1347-1391, 2024, DOI: 10.1007/s40544-023-0808-9.
- [121] GUNT. Experiment Instructions, AT200 Apparatus for Determination of Gear Efficiency, 2011.
- [122] Упутство за употребу инструмента за мерење нивоа буке TROTEC BS06, TRT-BA-BS06-TC-001-EN, TROTEC GmbH & Co. KG, Grebbener Str. 7, 52525 Heinsberg, Deutschland.
- [123] Упутство за употребу инструмента за мерење вибрација VB-8216SD, LUTRON ELECTRONIC.
- [124] Каталог за термовизијску камеру FLUS IR-895.
- [125] Упутство за употребу ваге за мерење масе PS 1000.R2 Precision Balance, WL-212-0022, radwag.com.
- [126] Каталог за ултразвучну каду Vabsonic SB-4LDD.
- [127] Стандарди EN 10084 и DIN 17210.
- [128] St, I. J.: *Mechanical Properties And Eddy Currents In 20CrMo5 Low-Temperature Tempering Of Various Durations*, *Machines. Technologies. Materials*, 11(2), 53-56, 2017.
- [129] British Standards Institution, *Copper and Copper Alloys: Ingots and Castings*, British Standards Institution, 1999.
- [130] Chauhan, R. D., Bharti, P. K.: *A review of tribological excellence of bronze alloys*. *Discover Applied Sciences*, 7(4), 283, 2025, doi.org/10.1007/s42452-025-06610-4.
- [131] Нинковић, Р., Бабић, М.: *Поступак дизајнирања клизних лежајева од RAR-легура*, Осма интернационална конференција о трибологији, 8.–10, Београд, 2003.
- [132] Sadri, R., Ahmadi, G., Togun, H., Dahari, M., Kazi, S. N., Sadeghinezhad, E., Zubir, N.: *An experimental study on thermal conductivity and viscosity of nanofluids containing carbon nanotubes*, *Nanoscale research letters*, 9(1), 151, 2014, DOI:10.1186/1556-276X-9-151.
- [133] Dağdır, K., Bilen, K.: *Experimental investigation of usage of POE lubricants with Al₂O₃, graphene or CNT nanoparticles in a refrigeration compressor*, *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 14(1), 1041-1058, 2023, DOI: 10.3762/bjnano.14.86.
- [134] Khoswan, I., Abusafa, A., Odeh, S.: *The effect of carbon nanotubes on the viscosity and surface tension of heat transfer fluids - A review paper*, *Energies*, 17(22), 5584, 2024, DOI: 10.3390/en17225584.
- [135] Esfe, M. H., Motallebi, S. M., Toghraie, D.: *Optimal viscosity modelling of 10W40 oil-based MWCNT (40 %)-TiO₂ (60 %) nanofluid using Response Surface Methodology (RSM)*, *Heliyon*, 8(12), 2022, DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11944.
- [136] Димић, А. Р.: *Утицај облика профила и уходавања зубаца на површинску носивост цилиндричних зупчастих парова (докторска дисертација)*, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд, 2021.

- [137] ISO, E. 4288 - Geometrical product specifications (GPS) - surface texture: profile method-rules and procedures for the assessment of surface texture. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1996.
- [138] De Chiffre, L.: *Industrial survey on ISO surface texture parameters*, CIRP Annals: Manufacturing Technology, 48(3), 74-77, 1999.
- [139] Dassenoy, F., Joly-Pottuz, L., Martin, J. M., Mieno, T.: *Carbon nanotubes as advanced lubricant additives*, Carbon Nanotubes, 222, 237-238, 2006, DOI: 10.1007/1-4020-4574-3_46.
- [140] Seenappa, Sharma, K.V: *Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of some zinc based alloys*, International Journal of Materials Science, 6(1), 57-64, 2011.
- [141] Kowalski, M., Górny, K., Bernat, S., Stachowiak, A., Wernik, J., Zwierzycki, W.: *Tribological Performance of Bronze Engineering Materials with Environmentally Friendly Lubricants Under Starved Lubrication Conditions*, Materials, 18(14), 3283, 2025, DOI: 10.1007/s40544-022-0667-9
- [142] Aher, A. S., Pandey, V. K.: *Insight on the Effect of Nanoparticles addition in Oil Lubrication: A Review*, Tribology in Industry, 45(3), 2023, DOI: 10.24874/ti.1437.01.23.05
- [143] Marquis, F. D. S., Chibante, L. P. F.: *Improving the heat transfer of nanofluids and nanolubricants with carbon nanotubes*. Jom, 57(12), 32-43, 2005.
- [144] Saleem, M. S., Khan, M. S., & Khan, S.: *A review on tribological performance of nano based bio-lubricants and its applications*. GRD J. Eng, 6(7), 21-32, 2021.
- [145] Poornima, S. N., Shantha, V.: *Exploring Nano-Graphene in Bio-Lubricants: Innovative Approaches to Reduce Friction and Wear Engineering Systems*. Letters in High Energy Physics, 2024.
- [146] Poornima, S. N., & Shantha, V.: *Rheological Insights and Optimization of Bio Nano Lubricants in Tribological Systems*. Nanotechnology Perceptions 20 (S12), 262-274, 2024.
- [147] Poornima, S. N., & Shantha, V.: *Tribological Properties of Bio-Nano Lubricants: A Study on Friction, Wear, and Lubrication Efficiency*, Letters in High Energy Physics, 2024.
- [148] Стојановић, Б. Ж.: *Триболошко понашање хибридних композита са А356 матрицом (докторска дисертација)*. Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2013.
- [149] Матејић, М. С.: *Нови приступ пројектовању и оптимизацији циклоидних преносника снаге (докторска дисертација)*. Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2019.
- [150] Rahim, K. A., Najah Saud, S.: *Optimization of Wear and Friction in N150 Mineral Engine Oil Modified with MWCNT/ZnO Hybrid Nanoparticles Using One-Way Anova and Experimental Design*. Optimization of Wear and Friction in N 150, 2024, DOI: 10.2139/ssrn.4884180.
- [151] Zhao, Z., Luo, S., Zhao, X., Zhang, J., Li, S., Luo, Y., Dai, J.: *A novel interpolation method for soil parameters combining RBF neural network and IDW in the Pearl River Delta*. Agronomy, 14(11), 2469, 2024, DOI: 10.3390/agronomy14112469.

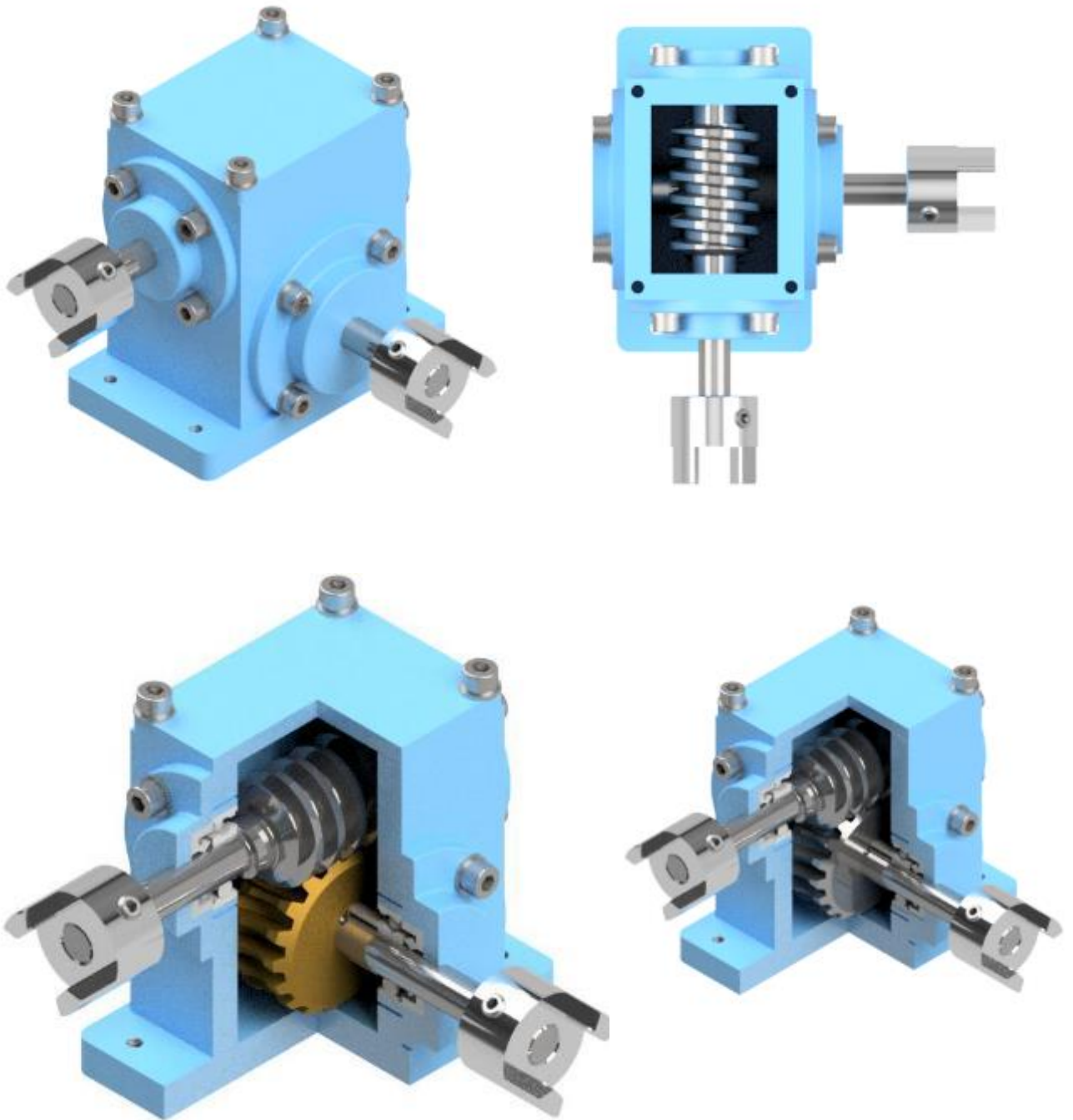
-
- [152] Seresht, R. J., Jahanshahi, M., Toubi, F.: *Applying the multiple linear regressions and Taguchi design method for controlled fabrication of carbon nanotubes in solution. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 18(2), 148-159, 2010, DOI: 10.1080/15363830903586492.
- [153] Ostertagová, E.: *Modelling using polynomial regression*, *Procedia engineering*, 48, 500-506, 2012, DOI: 10.1016/j.proeng.2012.09.545.
- [154] Heiberger, R. M., Neuwirth, E.: *Polynomial regression. In R through excel: a spreadsheet interface for statistics, data analysis, and graphics*, 269-284, New York, NY: Springer New York, 2009, DOI: 10.1007/978-1-4419-0052-4.
- [155] Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., Ye, K.: *Probability & statistics for engineers & scientists ninth edition*, Prentice Hall, 2012.
- [156] Meeker, W. Q., Hahn, G. J., Escobar, L. A.: *Statistical intervals: a guide for practitioners and researchers. John Wiley & Sons*, 84(1), 2017, DOI: 10.1002/9781118594841.
- [157] Гајевић, С. Н.: *Развој и оптимизација алуминијумских нанокмозита за израду триболошких елемената (докторска дисертација)*, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2021.

ПРИЛОЗИ

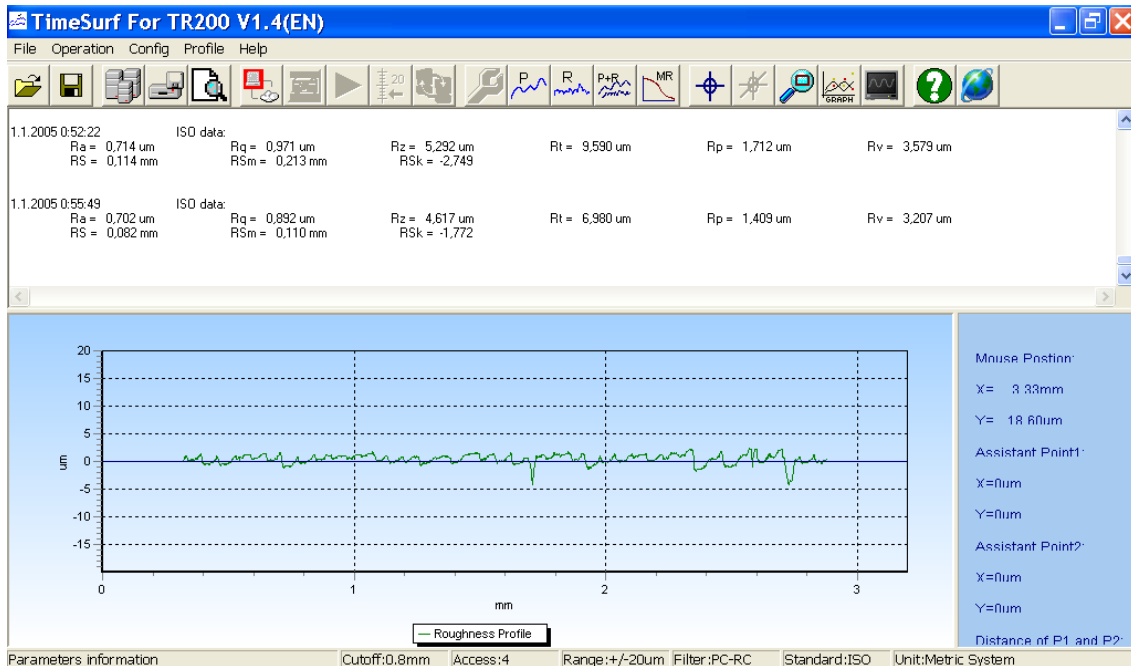
Прилог 1. Приказ пужног преносника снаге коришћеног у експерименту



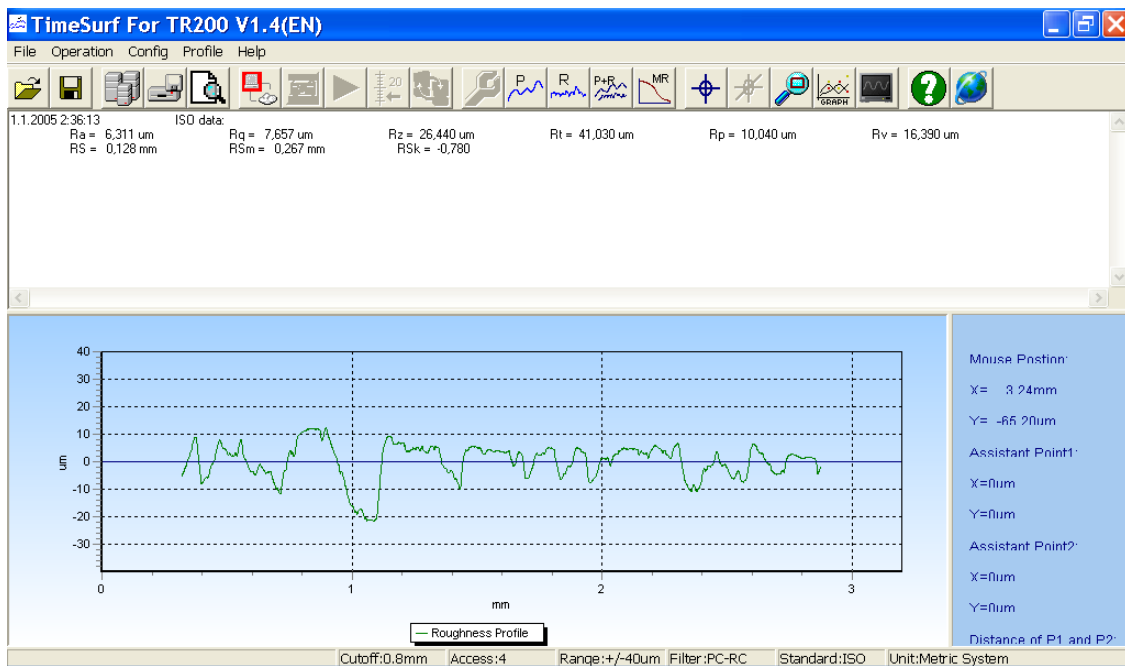
Прилог 2. Модел пужног преносника снаге коришћеног у експерименту у различитим погледима и пресецима



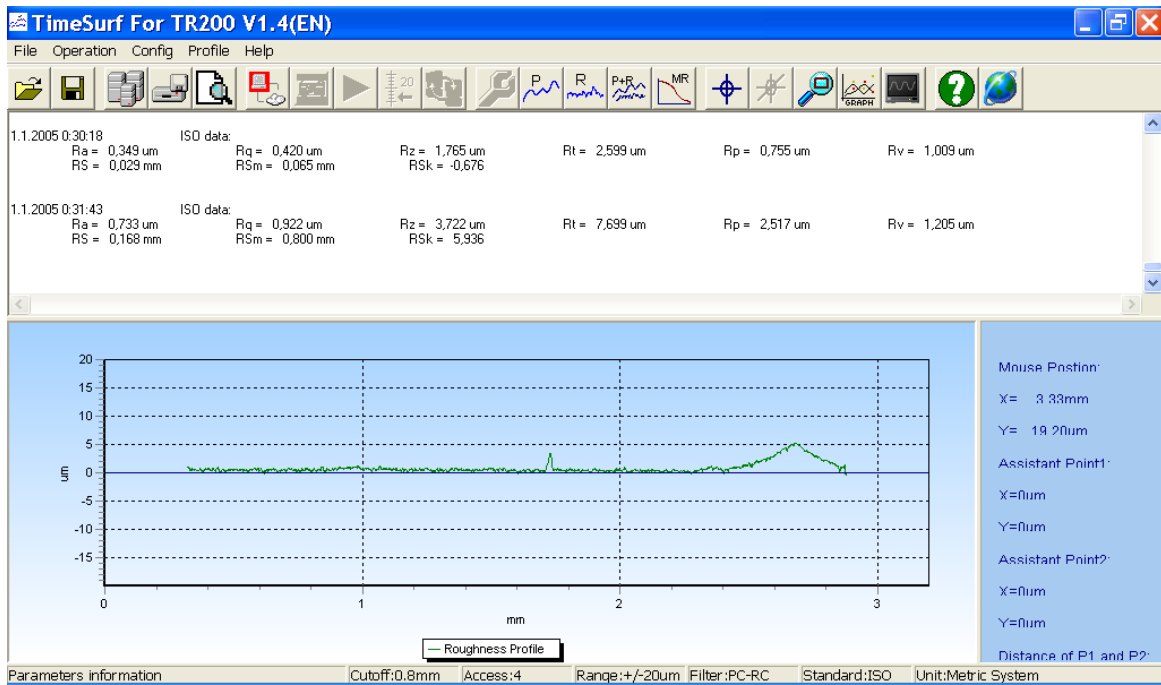
Прилог 3. Дијаграми профила храпавости испитиваних плочица од челика 20CrMo5 и дискова од калајне бронзе CuSn14 и цинк-алуминијум бронзе ZA-12



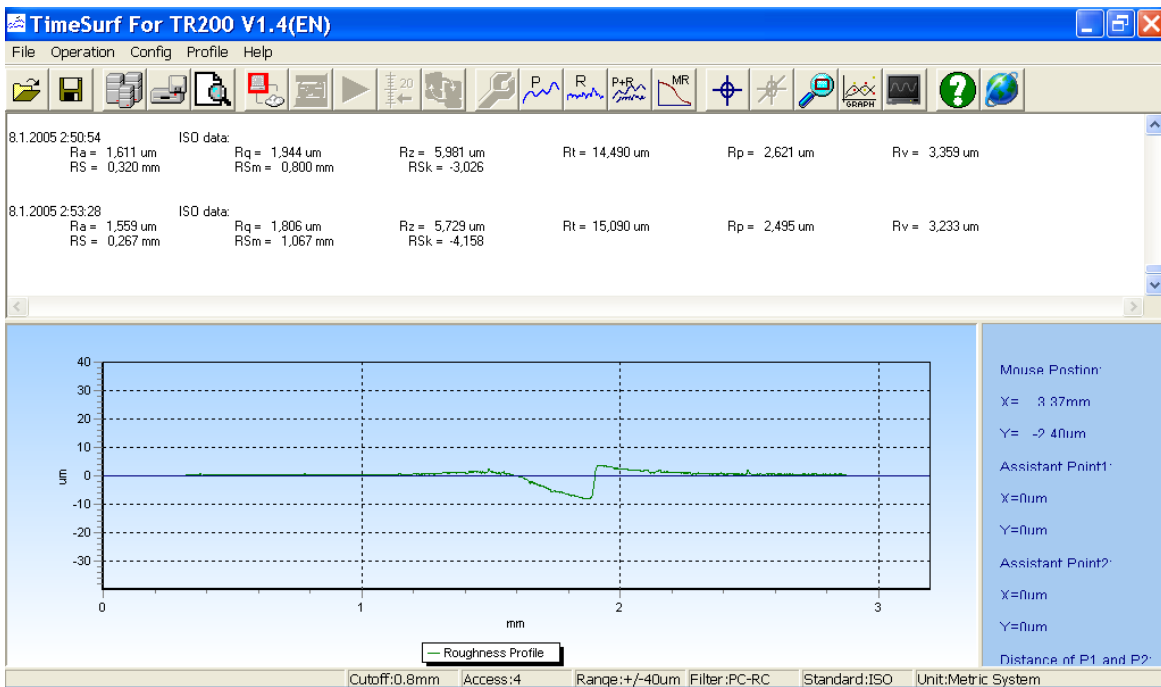
Слика П 3.1 Дијаграм профила храпавости диска од бронзе CuSn након испитивања у мазиву са 0 мас.% CNT адитива



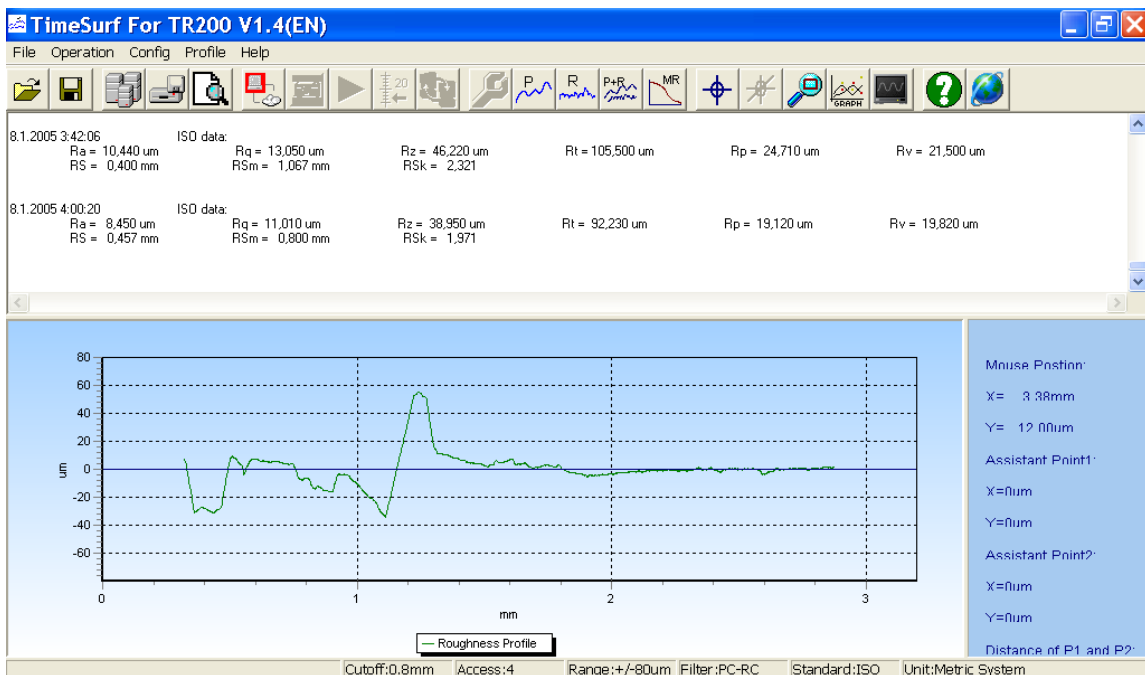
Слика П 3.2 Дијаграм профила храпавости диска од бронзе ZA-12 након испитивања у мазиву са 0 мас.% CNT адитива



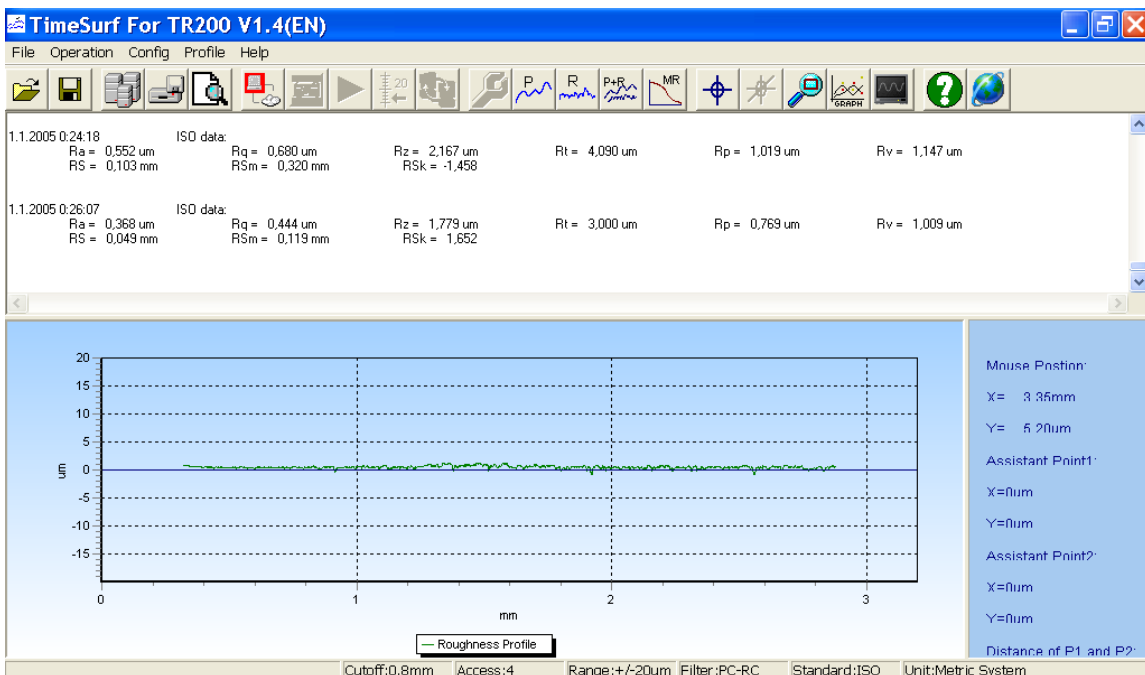
Слика П 3.3 Дијаграм профила хрпавости челичне плочице након испитивања у мазиву са 0 мас.% CNT адитива



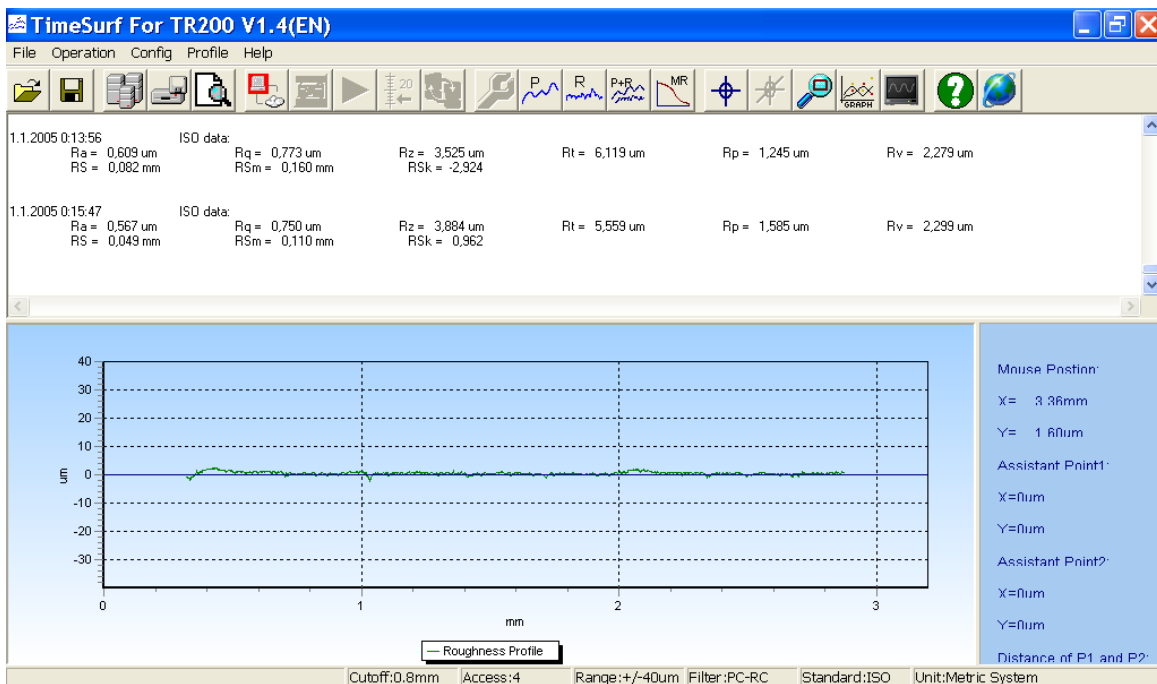
Слика П 3.4 Дијаграм профила хрпавости диска од бронзе CuSn14 након испитивања у мазиву са 0,2 мас.% CNT адитива



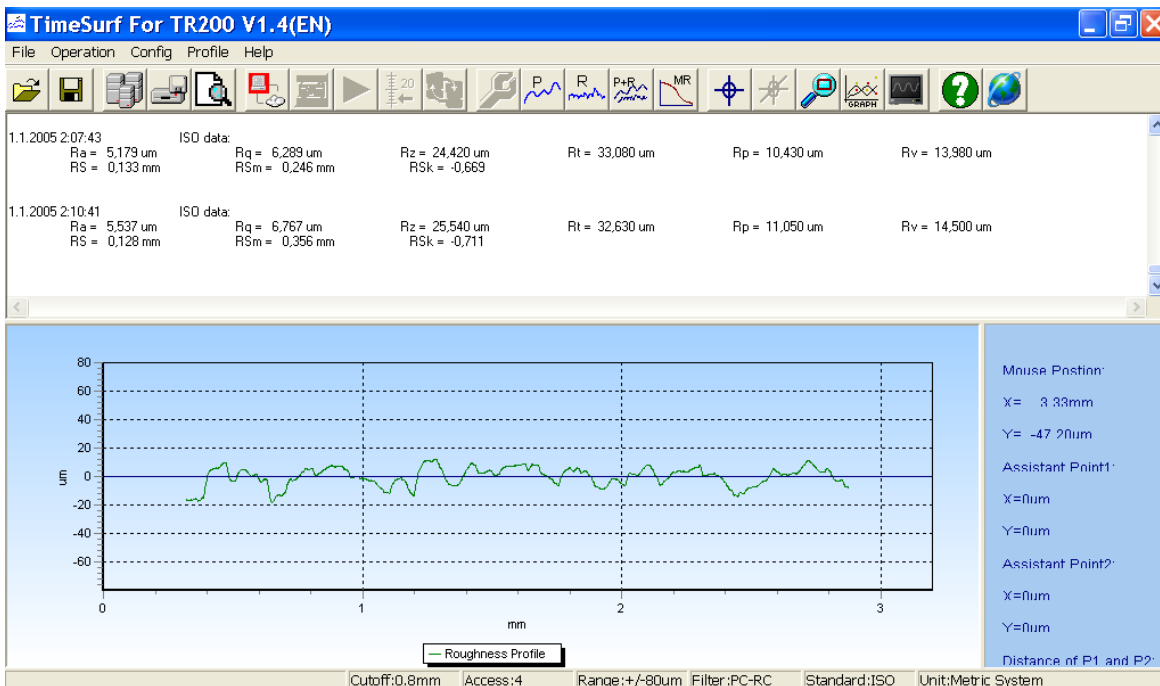
Слика П 3.5 Дијаграм профила хрпавости диска од бронзе ZA-12 након испитивања у мазиву са 0,2 мас.% CNT адитива



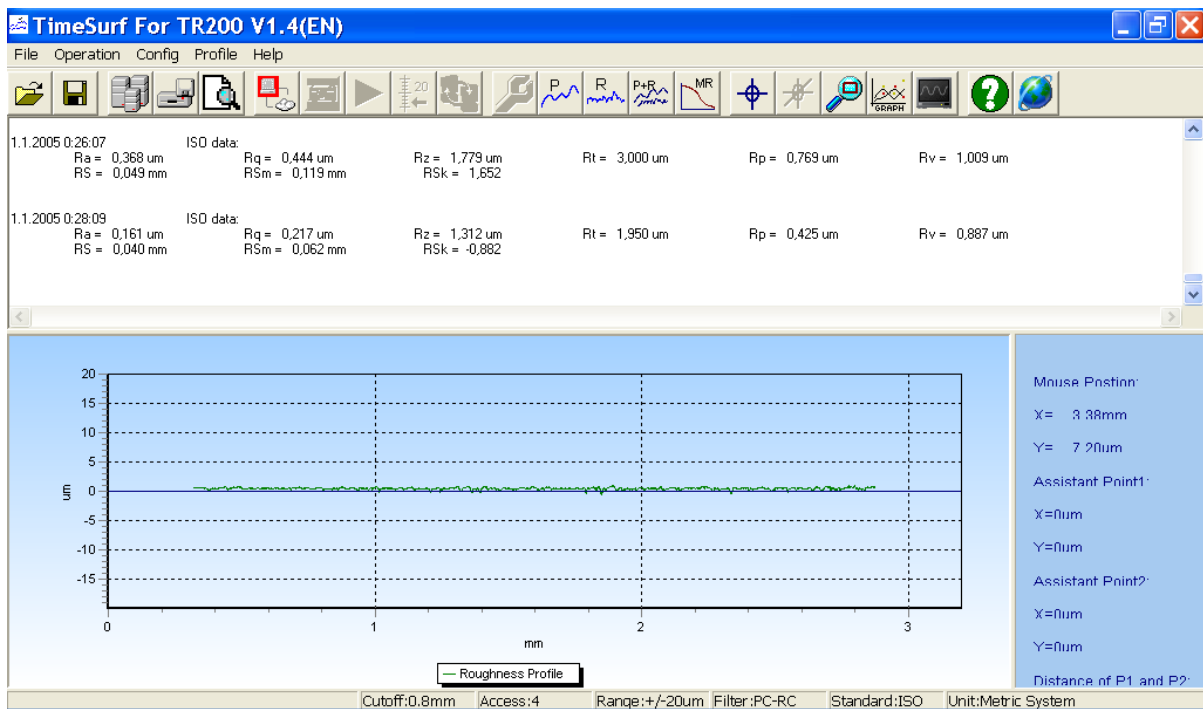
Слика П 3.6 Дијаграм профила хрпавости челичне плочице након испитивања у мазиву са 0,2 мас.% CNT адитива



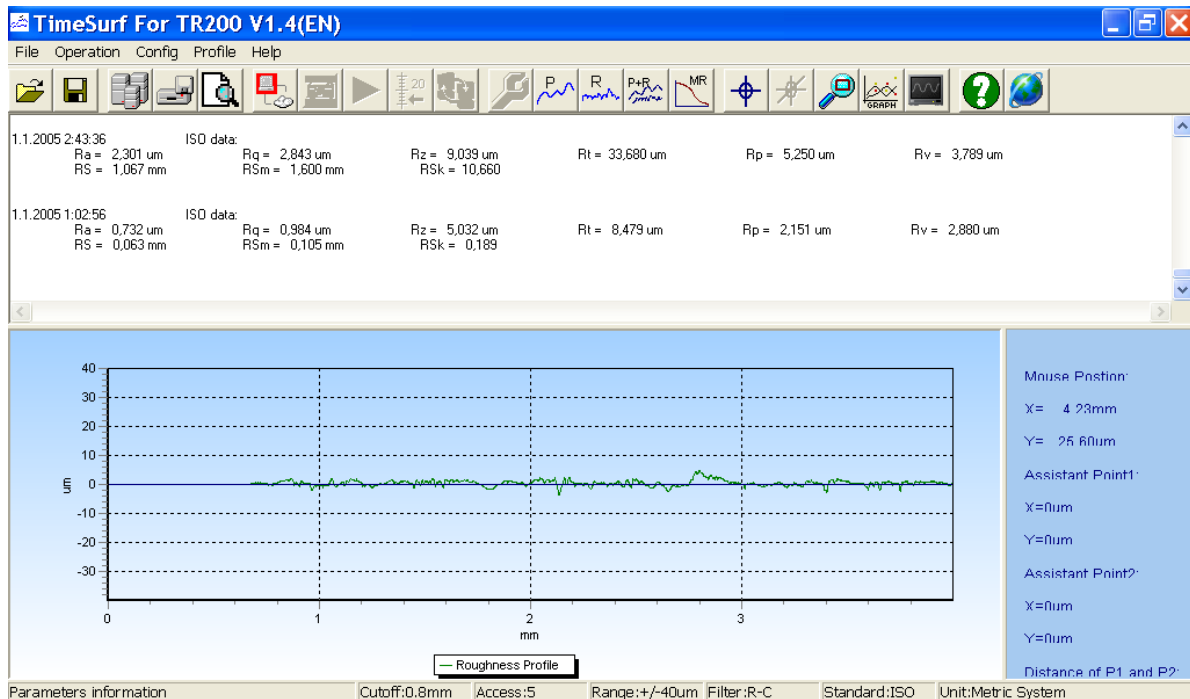
Слика П 3.7 Дијаграм профила храповости диска од бронзе $CuSn14$ након испитивања у мазиву са 1,0 мас.% CNT адитива



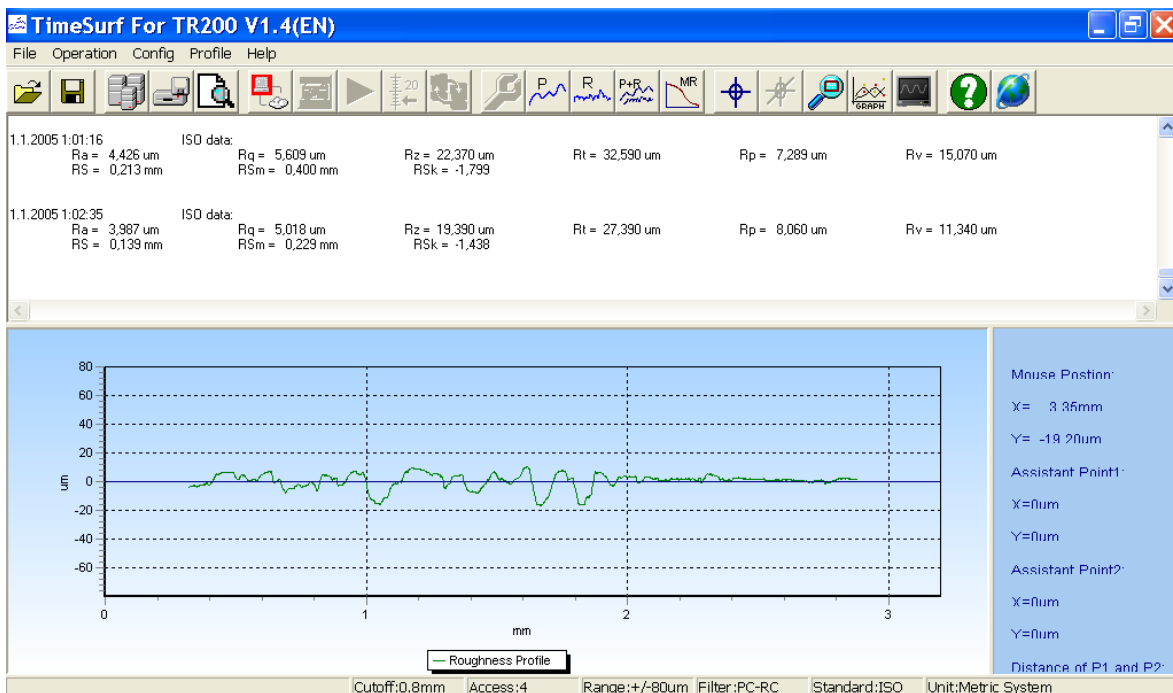
Слика П 3.8 Дијаграм профила храповости диска од бронзе ZA-12 након испитивања у мазиву са 1,0 мас.% CNT адитива



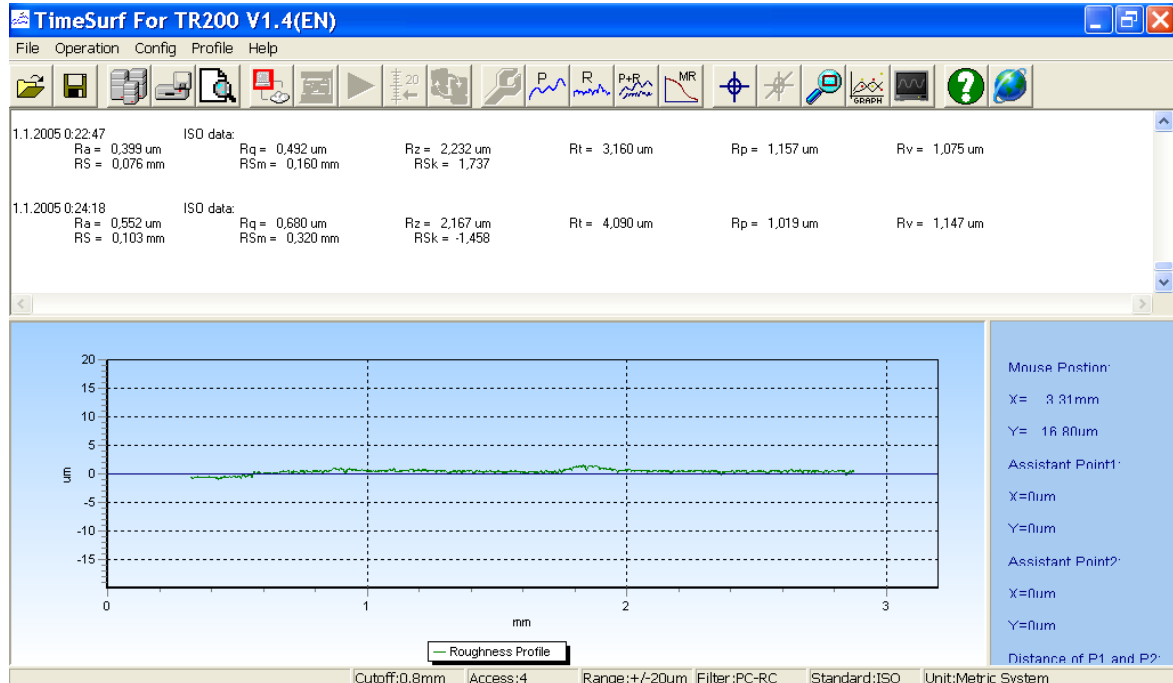
Слика П 3.9 Дијаграм профила хрпавости челичне плочице након испитивања у мазиву са 1,0 мас.% CNT адитива



Слика П 3.10 Дијаграм профила хрпавости диска од бронзе CuSn14 након испитивања у мазиву са 2,0 мас.% CNT адитива



Слика П 3.11 Дијаграм профила хрпавости диска од бронзе ZA-12 након испитивања у мазиву са 2,0 мас.% CNT адитива



Слика П 3.12 Дијаграм профила хрпавости челичне плочице након испитивања у мазиву са 2,0 мас. 0% CNT адитива

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Милан Буквић је рођен 23.07.1976. године у Ужицу. Основну школу „Нада Матић“ завршио је у Ужицу 1991. године са одличним успехом.

Техничку школу „Радоје Марић“ у Ужицу, смер електротехника, занимање електротехничар погона, завршио је са врло добрим успехом.

Дипломирао је на Војнотехничкој академији у Београду 21.09.2000. године из предмета Оклопна борбена возила са темом „Електричне и електромеханичке трансмисије борбених возила“ са оценом 9 (девет) и стекао звање дипломираног машинског инжењера за моторе и моторна возила, а 30.09.2000. године промовисан у официра техничке службе. Просечна оцена у току студија је била 7,70.

Докторске студије уписао је у октобру 2017. године на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу на студијском програму Машинско инжењерство. Положио је све испите предвиђене наставним планом и програмом са просечном оценом 9,67 и тако стекао услов за пријаву теме докторске дисертације.

Завршио је три нивоа војног последипломског усавршавања и то: Основни командно – штабни курс 2012. године, Командно – штабно усавршавање 2017. године и Генерал – штабно усавршавање 2025. године.

Професионалну каријеру, градио је на бројним дужностима у Војсци Србије, од командира на дужностима у техничким радионицама и складиштима материјалних резерви, до дужности референта, начелника одсека и команданта у више логистичких јединица. Тренутно је на дужности начелника одсека у Управи за логистику (J-4) Генералштаба Војске Србије.

Аутор је или коаутор 35 научно-истраживачких радова, од чега је 12 радова на SCI листи, уз тренутни h-индекс 10.

Ожењен је и отац троје деце.

ИЗЈАВА АУТОРА О ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Изјављујем да докторска дисертација под насловом:

**УТИЦАЈ ДОДАВАЊА УГЉЕНИЧНИХ НАНОЦЕВИ У МАЗИВО НА РАДНЕ
КАРАКТЕРИСТИКЕ ПУЖНИХ ЗУПЧАСТИХ ПРЕНОСНИКА**

представља *оригинално ауторско дело* настало као резултат *сопственог истраживачког рада*.

Овом Изјавом такође потврђујем:

- да сам *једини аутор* наведене докторске дисертације,
- да у наведеној докторској дисертацији *нисам извршио повреду* ауторског нити другог права интелектуалне својине других лица,

У Крагујевцу, 27.02.2026 године,



потпис аутора

**ИЗЈАВА АУТОРА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Изјављујем да су штампана и електронска верзија докторске дисертације под насловом:

**УТИЦАЈ ДОДАВАЊА УГЉЕНИЧНИХ НАНОЦЕВИ У МАЗИВО НА РАДНЕ
КАРАКТЕРИСТИКЕ ПУЖНИХ ЗУПЧАСТИХ ПРЕНОСНИКА**

истоветне.

У Крагујевцу, 27.02.2026, године,



потпис аутора

ИЗЈАВА АУТОРА О ИСКОРИШЋАВАЊУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ја, Милан Буквић,

дозвољавам

не дозвољавам

Универзитетској библиотеци у Крагујевцу да начини два трајна умножена примерка у електронској форми докторске дисертације под насловом:

**УТИЦАЈ ДОДАВАЊА УГЉЕНИЧНИХ НАНОЦЕВИ У МАЗИВО НА РАДНЕ
КАРАКТЕРИСТИКЕ ПУЖНИХ ЗУПЧАСТИХ ПРЕНОСНИКА**

и то у целини, као и да по један примерак тако умножене докторске дисертације учини трајно доступним јавности путем дигиталног репозиторијума Универзитета у Крагујевцу и централног репозиторијума надлежног министарства, тако да припадници јавности могу начинити трајне умножене примерке у електронској форми наведене докторске дисертације путем *преузимања*.

Овом Изјавом такође

дозвољавам

не дозвољавам¹

¹ Уколико аутор изабере да не дозволи припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци, то не искључује право припадника јавности да наведену докторску дисертацију користе у складу са одредбама Закона о ауторском и сродним правима.

припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од следећих *Creative Commons* лиценци:

- 1) Ауторство
- 2) Ауторство - делити под истим условима
- ③ Ауторство - без прерада
- 4) Ауторство - некомерцијално
- 5) Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима
- 6) Ауторство - некомерцијално - без прерада²

У Крагујевцу, 27.02.2026 године,



потпис аутора

² Молимо ауторе који су изабрали да дозволе припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци да заокруже једну од понуђених лиценци. Детаљан садржај наведених лиценци доступан је на: <http://creativecommons.org.rs/>