



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА
УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

Сандра Н. Гајевић

**РАЗВОЈ И ОПТИМИЗАЦИЈА АЛУМИНИЈУМСКИХ
НАНОКОМПОЗИТА ЗА ИЗРАДУ ТРИБОЛОШКИХ
ЕЛЕМЕНАТА**

докторска дисертација

Крагујевац, 2021.



UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC
FACULTY OF ENGINEERING
UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC

Sandra N. Gajević

**DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF ALUMINUM
NANOCOMPOSITES FOR PRODUCTION OF
TRIBOLOGICAL ELEMENTS**

Doctoral Dissertation

Kragujevac, 2021

Мојој мајци, која би се радовала

ИДЕНТИФИКАЦИОНА СТРАНИЦА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ
Аутор
Име и презиме: Сандра Гајевић (девојачко Величковић)
Датум и место рођења: 26. 07. 1989. године у Крагујевцу
Садашње запослење: Асистент на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу
Докторска дисертација
Наслов: Развој и оптимизација алуминијумских нанокомпозита за израду триболошких елемената
Број страница: 144
Број слика: 73
Број библиографских података: 224
Установа и место где је рад израђен: Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Научна област (УДК): 669.71:620.178(043.3)
Ментор: др Блажа Стојановић, ванр. проф. Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Оцена и одбрана
Датум пријаве теме: 05. 04. 2017. године
Број одлуке и датум прихватања теме докторске дисертације: IV-04-702/15, 11. 07. 2017. године
Комисија за оцену научне заснованости теме и испуњености услова кандидата:
<ol style="list-style-type: none"> 1. Др Блажа Стојановић, ванр. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Машинске конструкције и механизација; 2. Др Ненад Марјановић, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Машинске конструкције и механизација; 3. Др Мирослав Бабић, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Производно машинство, Индустијски инжењеринг; 4. Др Александар Венцл, ред. проф., Универзитет у Београду Машински факултет, ужа научна област: Технологија материјала - трибологија; 5. Др Зорица Ђорђевић, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Машинске конструкције и механизација;
Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације:
<ol style="list-style-type: none"> 1. Др Александар Венцл, ред. проф., Универзитет у Београду Машински факултет, ужа научна област: Технологија материјала - трибологија; 2. Др Ненад Милорадовић, ванр. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Машинске конструкције и механизација; 3. Др Родољуб Вујанац, ванр. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Машинске конструкције и механизација; 4. Др Иван Милетић, ванр. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Машинске конструкције и механизација; 5. Др Милош Матејић, доцент, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Машинске конструкције и механизација;
Датум одбране дисертације:

ЗАХВАЛНИЦА

Искрену захвалност дугујем свом ментору др Блажи Стојановићу, ванредном професору, на подршци, указаном поверењу и саветима које ми је пружио током израде ове дисертације.

Захваљујем се сарадницима и руководиоцима Лабораторија у којима је спроведен део одређених експерименталних испитивања.

Институту Винча, посебно др Илији Бобићу, који је произвео материјале у оквиру пројекта ТР 35021 „Развој триболошких микро/нано двокомпонентних и хибридних самоподмазујућих композита“, Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. Захвалност тадашњем руководиоцу пројекта др Мирославу Бабићу, редовном професору, који ми је омогућио да се прикључим тиму истраживача на поменутом пројекту.

Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Центру за трибологију, доцентима др Драгану Џунићу и др Марку Пантићу, Лабораторији за обраду метала и трибологију, редовном професору др Богдану Недићу, Лабораторији за обраду деформисањем и машинске материјале, редовном професору др Вукићу Лазићу и лаборанту Слободану Тимотијевићу.

Машинском факултету Универзитета у Београду, Лабораторији за трибологију у којој су сва триболошка испитивања реализована, колеги Филипу Вучетићу. Велику захвалност професору др Александру Венцлу без чијих савета и подршке реализација триболошких испитивања не би била могућа.

Технолошко-металуришком факултету Универзитета у Београду, Лабораторији у оквиру катедре за неорганску хемијску технологију, професору др Ђорђу Јанаћковићу.

Предузећима која су учествовала у обради контактних елемената за експериментална испитивања: Тадић алати из Крагујевца, IMW институт и MIND group doo из Лужница, и FLUIDOTENIC D.O.O. из Врњачке Бање.

Најсрдачније се захваљујем члановима Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације, редовном професору др Александру Венцлу, ванредном професору др Ненаду Милорадовићу, ванредном професору др Родољубу Вујанцу, ванредном професору др Ивану Милетићу и доценту др Милошу Матејићу, који су својим саветима и сугестијама допринели квалитету дисертације.

Такође, морам да искористим прилику да се захвалим свим професорима и колегама са катедре за Машинске конструкције и механизацију, посебно доценту др Ненаду Костићу, Славици Миладиновић и куми Јасмини Благојевић.

Велику захвалност дугујем свом оцу Ненаду, брату Александру, сестри Ирени и ужој фамилији јер су били уз мене и пружали огромну подршку током рада.

Најзад, посебну захвалност дугујем свом супругу Марку на разумевању, мотивацији и безусловној подршци од првог дана истраживања.

*Аутор
Сандра Гајевић*

Резиме рада:

При развоју и производњи нових материјала и елемената експеримент има значајну улогу. Приступ експерименталном истраживању не може се замислити без употребе дизајна експеримента чијом применом се приступа систематском начину планирања експеримента, извођењу и интерпретацији резултата експеримената.

За потребе овог рада су развијени, а у раду су анализирани нови нанокompозити са А356 основом ојачани SiC и Al_2O_3 наночестицама различитих величина и садржаја. У оквиру испитивања одређене су и приказане физичке и механичке карактеристике нанокompозита. У раду су спроведена триболошка испитивања применом дизајна експеримента за прву серију материјала који до тренутка производње нису били предмет ранијих истраживања. Нанокompозити су произведени са малим масеним садржајем ојачавајућих наночестица применом модификованог компокастинг процеса. Остварени експериментални резултати првом серијом материјала указали су на правац и ток развоја нанокompозита са новим садржајем ојачавача. Друга фаза истраживања нанокompозита је усмерена на триболошка испитивања јер се првом серијом материјала доказало да није остварено значајно побољшање у механичким и триболошким карактеристикама нанокompозита. Извршена је анализа похабаних површина нанокompозита што је од великог значаја за практичну примену ових материјала. Применом оптимизационих метода извршена је вишекритеријумска оптимизација и одређена оптимална комбинација фактора којом се постижу најбоље карактеристике нанокompозита. На основу експерименталних истраживања остварених у овој дисертацији може се закључити да су остварена побољшања у механичким и триболошким карактеристикама нанокompозита у поређењу са основном легуром.

Подручје примене алуминијумских нанокompозита непрекидно се шири с обзиром на комбинацију својстава која се могу постићи додавањем различитих ојачавача. Добијене карактеристике развијених нанокompозита омогућавају њихово коришћење при моделирању и напонску анализу различитих машинских елемената у CAD софтверу. Извршена је нумеричка анализа зупчастих парова и установљено је да се максималне вредности еквивалентног напона јављају у подножју зубаца спрегнутих зупчаника. Применом нанокompозита за израду зупчастог пара може се постићи већи пренос снаге у односу на зупчасти пар израђен од основне легуре, затим смањује се појава иницијалних прслина, маса преносника, и ниво буке и вибрације у зупчастим преносницима мањих снага, а повећава се њихова отпорност на хабање.

Кључне речи: нанокompозит, алуминијум, планирање експеримента, оптимизација, хабање, трење, зупчасти пар.

Abstract:

The experiment has a significant role in the development and production of new materials and machine elements. An approach to experimental research cannot be imagined without design of experiment usage, which represents a systematic way of planning an experiment, performing and interpreting the experiments results.

For the purposes of this thesis, new nanocomposites with A356 base reinforced with *SiC* and *Al₂O₃* nanoparticles of different sizes and contents were developed and analyzed. Within this research, the physical and mechanical characteristics of nanocomposites were determined and presented. Tribological tests were performed using the design of experiment for the first series of materials that were not the subject of previous research, in today's literature sources, until the time of production. Nanocomposites were produced with a low mass content of reinforcing nanoparticles using a modified compocasting process. The achieved experimental results with the first series of materials indicated the direction and course of development of nanocomposites with a new content of reinforcements. The second phase of nanocomposite research is focused on tribological tests because the first series of materials didn't proved the significant improvement in the mechanical and tribological characteristics of nanocomposites is achieved. The analysis of worn surfaces of nanocomposites was performed, which is of great importance for the practical application of these materials. By applying optimization methods, multicriteria optimization was performed and the optimal combination of factors was determined for which gives the nanocomposites of the best characteristics. Based on the experimental research achieved in this dissertation, it can be concluded that improvements have been made both in the mechanical and tribological characteristics of nanocomposites compared to the base alloy.

Application field of aluminum nanocomposites is constantly expanding due to the combination of properties that can be achieved by adding different reinforcements. The obtained characteristics of the developed nanocomposites enable their usage in modeling and stress analysis of various machine elements in *CAD* software. Stress analysis of gear pairs was performed and it was concluded that the maximum values of equivalent stress occur at the base of the teeth of the coupled gears. The use of nanocomposites for the production of gear pair can achieve a higher power transmission compared to the gear pair made of base alloy, then reduces the occurrence of initial cracks, gear mass, and noise and vibration levels in gears of lower power, and increases their wear resistance.

Key words: nanocomposite, aluminum, design of experiment, optimization, wear, friction, gear pair.

Садржај

Списак слика.....	i
Списак табела	iv
Списак скраћеница и страних израза	vi
Списак ознака	vii
1. УВОД.....	1
2. ТЕОРИЈСКЕ ПОСТАВКЕ	4
2.1. Композитни материјали.....	4
2.2. Преглед начина производње нанокompозита са металном основом	7
2.2.1. Металургија праха.....	8
2.2.2. Механичко млевење	9
2.2.3. Ливење.....	11
2.2.4. Ливење у полуочврслom стању	13
2.2.5. Процес умешавања трењем	14
2.3. Преглед стања истраживања алуминијумских нанокompозита у свету.....	15
2.4. Примена алуминијумских нанокompозита у индустрији	21
3. ТЕХНОЛОГИЈА ДОБИЈАЊА И ФИЗИЧКО МЕХАНИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ИСПИТИВАНИХ МАТЕРИЈАЛА	25
3.1. Поступак производње алуминијумских нанокompозита	26
3.1.1. Избор основе, ојачавача и поступка производње нанокompозита.....	26
3.1.2. Механичко легирање.....	27
3.1.3. Тиксокастинг поступак	27
3.1.4. Компокастинг поступак	27
3.2. Одређивање карактеристика храпавости контактних површина	28
3.2.1. Основни појмови и дефиниције храпавости контактне површине	28
3.2.2. Припрема узорака.....	30
3.2.3. Уређај за испитивање храпавости	34
3.2.4. Параметри храпавости	34
3.3. Одређивање механичких карактеристика нанокompозита	38
3.3.1. Теоријске основе поступака макроутискивања.....	38
3.3.2. Уређај за мерење макротврдоће.....	39
3.3.3. Теоријске основе поступка наноутискивања.....	40
3.3.4. Уређај за наноутискивање	44
3.3.5. Резултати испитивања макротврдоће.....	46
3.3.6. Резултати испитивања нанотврдоће	48
4. ПЛАН ТРИБОЛОШКИХ ИСПИТИВАЊА	53

4.1. Теоријске основе о методама	53
4.1.1. Дизајн експеримента	53
4.1.2. Тагучијева метода планирања експеримента	55
4.1.3. Методологија резултујућих површина.....	59
4.1.4. Вештачке неуронске мреже.....	60
4.1.5. Генетски алгоритам.....	61
4.1.6. Техника оптимизације ројева честица.....	61
4.1.7. Сива релациона анализа	62
4.2. Избор фактора, нивоа и плана експеримената	64
4.3. Опрема за триболошка испитивања	67
4.3.1. Контактни елементи.....	69
5. ПРВА ФАЗА ТРИБОЛОШКИХ ИСПИТИВАЊА.....	71
5.1. Резултати и анализа триболошких карактеристика нанокompозита $A356/SiC$	72
5.1.1. Тагучи анализа.....	72
5.1.2. Сива релациона анализа	78
5.1.3. Анализа механизма хабања $A356/SiC$ нанокompозита на основу <i>SEM</i> и <i>EDS</i> анализе.....	80
5.2. Резултати и анализа триболошких карактеристика нанокompозита $A356/Al_2O_3$..	83
5.2.1. Моделирање и оптимизација помоћу резултујућих површина (<i>RSM</i>).....	84
5.2.2. Моделирање и резултати коришћењем вештачке неуронске мреже (<i>ANN</i>)...	88
5.2.3. Резултати добијени помоћу генетског алгоритма (<i>GA</i>) и оптимизације ројева честица (<i>PSO</i>).....	90
5.2.4. Анализа механизма хабања $A356/Al_2O_3$ нанокompозита на основу <i>SEM</i> и <i>EDS</i> анализе.....	92
5.3. Изводи прве фазе истраживања	97
6. ДРУГА ФАЗА ТРИБОЛОШКИХ ИСПИТИВАЊА.....	98
6.1. Производња нанокompозита	98
6.2. Параметри храпавости	98
6.3. Резултати испитивања микротврдоће	98
6.4. Триболошко испитивање нанокompозита $A356/SiC$	102
6.4.1. Анализа резултата добијених помоћу Тагучи L_8 матрице	102
6.4.2. Анализа резултата добијених помоћу Тагучи L_{27} матрице	105
6.5. Анализа механизма хабања нанокompозита	111
6.6. Анализа резултата друге фазе истраживања	116
7. ПРИМЕНА ИСПИТИВАНИХ МАТЕРИЈАЛА КОД ЗУПЧАСТИХ ПАРОВА.....	117
7.1. Избор елемената за примену испитиваних материјала	118
7.2. Аналитички прорачун цилиндричних зупчастих парова	119
7.3. Израда <i>CAD</i> модела цилиндричних зупчастих парова	121

7.3.1. Геометријске карактеристике зупчастих парова.....	121
7.4. Нумеричка анализа спрегнутих зупчаника.....	122
8. ЗАКЉУЧАК.....	127
ЛИТЕРАТУРА.....	131

Списак слика

Слика 2.1 Композитни материјали: а) честицама ојачани, б) и в) влакнима ојачани, г) структурни	5
Слика 3.1 Алгоритам истраживања	25
Слика 3.2 Површинска храпавост са параметрима	29
Слика 3.3 Уређај за припрему узорака MetaServ 250	30
Слика 3.4 Изглед површине нанокompозита са садржајем ојачавача од: а) 0,2 mas.% SiC, б) 0,3 mas.% SiC, в) 0,5 mas.% SiC и г) основне легуре	31
Слика 3.5 Изглед површине нанокompозита са садржајем ојачавача од: а) 0,2 mas.% Al ₂ O ₃ , б) 0,3 mas.% Al ₂ O ₃ , в) 0,5 mas.% Al ₂ O ₃ и г) основне легуре	32
Слика 3.6 Изглед површине нанокompозита са садржајем ојачавача од: а) 0,2 mas.% Al ₂ O ₃ , б) 0,3 mas.% Al ₂ O ₃ , в) 0,5 mas.% Al ₂ O ₃ и г) основне легуре	33
Слика 3.7 Профили храпавости узорака нанокompозита а) A356/0,2 mas.% SiC, б) A356/0,3 mas.% SiC и в) A356/0,5 mas.% SiC	35
Слика 3.8 Профили храпавости узорака нанокompозита а) A356/0,2 mas.% Al ₂ O ₃ б) A356/0,3 mas.% Al ₂ O ₃ и в) A356/0,5 mas.% Al ₂ O ₃	36
Слика 3.9 Профили храпавости узорака нанокompозита а) A356/0,2 mas.% Al ₂ O ₃ б) A356/0,3 mas.% Al ₂ O ₃ и в) A356/0,5 mas.% Al ₂ O ₃	37
Слика 3.10 Профил храпавости A356 легуре	38
Слика 3.11 Шематски приказ при мерењу Викерс тврдоће а) утискивача и б) отиска ..	39
Слика 3.12 Уређај „WPM Leipzig“ за мерење макротврдоће.....	40
Слика 3.13 Геометрија утискивача а) Беркович б) Викерс и в) Кнуп пирамида	41
Слика 3.14 Шематски приказ геометрије контакта кроз тест наноиндентације	41
Слика 3.15 Карактеристичан изглед криве утискивања	41
Слика 3.16 Пројектоване површине отисака утискивања код Викерсове и Берковичеве пирамиде за исте дубине утискивања	44
Слика 3.17 Наноиндентер а) изглед наноиндентера произвођача CSM и б) шема система за остваривање силе и вођење утискивача у наноиндентеру.....	45
Слика 3.18 Трагови наноутискивања у A356 легуру	49
Слика 3.19 Оптички микрографи трагова наноутискивања у нанокompозите а) A356/0,2 mas.% SiC, б) A356/0,3 mas.% SiC и в) A356/0,5 mas.% SiC	49
Слика 3.20 Оптички микрографи трагова наноутискивања у нанокompозите са Al ₂ O ₃ ојачавачем а) 0,2 mas.% (30 nm), б) 0,3 mas.% (30 nm), в) 0,5 mas.% (30 nm), г) 0,2 mas.% (100 nm), д) 0,3 mas.% (100 nm) и њ) 0,5 mas.% (100 nm)	50
Слика 3.21 Дијаграми наноутискивања нанокompозита са SiC ојачавачем и основне легуре.....	51
Слика 3.22 Дијаграми наноутискивања нанокompозита са Al ₂ O ₃ ојачавачем (30 nm) и основне легуре	51
Слика 3.23 Дијаграми наноутискивања нанокompозита са Al ₂ O ₃ ојачавачем (100 nm) и основне легуре	51
Слика 4.1 Концепција робусног дизајна	57
Слика 4.2 Ток спровођења GRA анализе.....	63
Слика 4.3 Пример избора утицајних фактора при испитивању и излаза који из таквих испитивања могу произаћи	65
Слика 4.4 Алгоритам експерименталног плана триболошких испитивања	66
Слика 4.5 Трибометар TPD 95	67
Слика 4.6 Модел контактнoг пара	68

Слика 4.7 Графички приказ тренутних вредности нормалне силе, коефицијента трења, температуре мазива и ваздуха.....	68
Слика 4.8 Скенирајући електронски микроскоп са <i>EDS</i> -ом	69
Слика 4.9 Шематски приказ диска са основним димензијама.....	69
Слика 4.10 Димензије блока према ASTM G 77 стандарду	70
Слика 5.1 Фотографски приказ контактнoг пара приликом испитивања.....	71
Слика 5.2 Графици <i>S/N</i> односа за интензитет хабања а) главни ефекти и б) интеракције	74
Слика 5.3 Графици <i>S/N</i> односа за коефицијент трења а) главни ефекти и б) интеракције	75
Слика 5.4 Дијаграмски приказ зависности интензитета хабања од а) садржаја ојачавача и оптерећења, б) брзине клизања и оптерећења и в) садржаја ојачавача и брзине клизања	77
Слика 5.5 Равански дијаграмски приказ зависности коефицијента трења од: а) садржај ојачавача SiC и брзине клизања и б) брзине клизања и оптерећења.....	78
Слика 5.6 Похабана површина: а) основне легуре A356 и б) нанокompозита са 0,5 mas.% SiC	80
Слика 5.7 Резултати <i>EDS</i> анализе у трагу хабања нанокompозита са 0,5 mas.% SiC	81
Слика 5.8 Блок дијаграм поступка за испитивање и анализу	83
Слика 5.9 Двoдимензионални дијаграм зависности интензитета хабања и а) садржај ојачавача и брзина клизања, б) садржај ојачавача и оптерећење, в) садржај ојачавача и величина честица, г) брзина клизања и оптерећење, д) брзина клизања и величина честица и њ) оптерећење и величина честица.....	86
Слика 5.10 Трoдимензионални дијаграмски приказ зависности интензитета хабања од фактора: а) садржаја ојачавача и брзине клизања, б) садржаја ојачавача и оптерећења, в) садржаја ојачавача и величине честица, г) брзине клизања и оптерећења, д) брзине клизања и величине честица и њ) оптерећења и величине честица.....	87
Слика 5.11 Архитектура неуронске мреже	88
Слика 5.12 Коефицијент регресије добијен помоћу ANN	89
Слика 5.13 Дијаграмски упоредни приказ резултата.....	90
Слика 5.14 Похабана површина: а) нанокompозита са 0,2 mas.% Al ₂ O ₃ , б) нанокompозита са 0,3 mas.% Al ₂ O ₃ , и в) нанокompозита са 0,5 mas.% Al ₂ O ₃ са величином честица од 100 nm.....	92
Слика 5.15 Похабана површина нанокompозита A356/0,5 mas.% Al ₂ O ₃ са просечном величином честица а) од 30 nm и б) од 100 nm	93
Слика 5.16 <i>EDS</i> анализа нанокompозита A356/0,5 mas.% Al ₂ O ₃ са просечном величином честица од 100 nm	95
Слика 5.17 <i>EDS</i> анализа нанокompозита A356/0,5 mas.% Al ₂ O ₃ са просечном величином честица 30 nm	96
Слика 6.1 Уређај за мерење микротврдоће.....	99
Слика 6.2 Дијаграм вредности микротврдоће свих испитиваних материјала.....	100
Слика 6.3 Главни ефекти <i>S/N</i> односа за интензитет хабања	103
Слика 6.4 Дијаграмски приказ зависности интензитета хабања од а) садржаја ојачавача mas.% SiC и оптерећења, б) садржаја ојачавача mas.% SiC и брзине клизања и в) оптерећења и брзине клизања	104
Слика 6.5 Графици <i>S/N</i> односа за интензитет хабања а) главни ефекти и б) интеракције	107
Слика 6.6 Дијаграмски приказ зависности интензитета хабања од а) садржаја ојачавача mas.% SiC и оптерећења, б) садржаја ојачавача mas.% SiC и брзине клизања и в) оптерећења и брзине клизања	108

Слика 6.7 Коефицијент регресије добијен помоћу <i>ANN</i>	110
Слика 6.8 Упоредни приказ резултата остварених експериментом и <i>ANN</i> предвиђањем	110
Слика 6.9 Уређај за <i>SEM</i> анализу	111
Слика 6.10 Уређај „JSM-5800“	111
Слика 6.11 Похабана површина: а) основне легуре <i>A356</i> , б) нанокмпозита са 1,5 мас.% <i>SiC</i> и в) нанокмпозита са 2 мас.% <i>SiC</i>	112
Слика 6.12 Похабана површина: а) основна легура <i>A356</i> , б) нанокмпозита са 1,5 мас.% <i>SiC</i> и в) нанокмпозита са 2 мас.% <i>SiC</i>	113
Слика 6.13 <i>EDS</i> анализа <i>A356</i> легуре	114
Слика 6.14 <i>EDS</i> анализа <i>A356/1,5 мас.% SiC</i> нанокмпозита.....	115
Слика 6.15 <i>EDS</i> анализа <i>A356/2 мас.% SiC</i> нанокмпозита.....	115
Слика 7.1 Дијаграми у зависности од преносног односа и улазне снаге зупчастог пара од: а) алуминијума и б) челика	120
Слика 7.2 Апроксимирани облик профила зупца	121
Слика 7.3 Експортирани профил међузубља	122
Слика 7.4 Генерисани пар цилиндричних зупчаника са правим зупцима коришћењем експортираног међузубља.....	122
Слика 7.5 Мрежа коначних елемената зупчастог пара.....	123
Слика 7.6 Поље еквивалентног напона код зупчастог пара са преносним односом 2 од челика а) $a_d = 45 \text{ mm}$, б) $a_d = 50 \text{ mm}$, и алуминијумске легуре, односно нанокмпозита в) $a_d = 45 \text{ mm}$ и г) $a_d = 50 \text{ mm}$	124
Слика 7.7 Поље еквивалентног напона код зупчастог пара са преносним односом 2,5 од челика а) $a_d = 45 \text{ mm}$, б) $a_d = 50 \text{ mm}$, и алуминијумске легуре, односно нанокмпозита в) $a_d = 45 \text{ mm}$ и г) $a_d = 50 \text{ mm}$	125

Списак табела

Табела 2.1 Триболошке особине нанокompозита са основом алуминијума произведених металургијом праха.....	16
Табела 2.2 Триболошке особине нанокompозита са основом алуминијума произведених поступком ливења мешањем.....	17
Табела 2.3 Триболошке особине нанокompозита са основом алуминијума произведених процесом умешавања трењем.....	19
Табела 3.1 Хемијски састав А356 легуре.....	26
Табела 3.2 Параметри храпавости А356 легуре и нанокompозита А356/SiC са величином ојачавача од 50 nm.....	34
Табела 3.3 Параметри храпавости за нанокompозите А356/Al ₂ O ₃ са величином ојачавача од 20-30 nm.....	34
Табела 3.4 Параметри храпавости за нанокompозите А356/Al ₂ O ₃ са величином ојачавача око 100 nm.....	35
Табела 3.5 Скале тврдоће по Викерсу и одговарајућа оптерећења.....	40
Табела 3.6 Типови и просторни распореди мерења наноиндентером.....	46
Табела 3.7 Резултати тврдоће по Викерсу HV10.....	46
Табела 3.8 Резултати наноутискивања (O&P).....	48
Табела 4.1 Стандардна табела за избор Тагучијевих ортогоналних матрица.....	56
Табела 4.2 Улазни фактори и њихови нивои.....	65
Табела 5.1 Улазни фактори и њихови нивои са кодираним вредностима.....	72
Табела 5.2 Експериментални резултати са стварним вредностима фактора.....	72
Табела 5.3 Резултати S/N односа експеримената.....	73
Табела 5.4 Резултати анализе за S/N однос „Мање је боље“.....	73
Табела 5.5 Резултати ANOVA анализе интензитета хабања и коефицијента трења.....	76
Табела 5.6 Резултати сиве релационе анализе на основу експерименталних података..	79
Табела 5.7 Табела S/N односа за GRG.....	79
Табела 5.8 Резултати ANOVA за GRG.....	79
Табела 5.9 Улазни фактори и њихови нивои.....	83
Табела 5.10 Експериментални резултати за нанокompозит са Al ₂ O ₃ ојачавачем.....	84
Табела 5.11 Коефицијенти регресије.....	85
Табела 5.12 Анализа варијансе за интензитет хабања.....	85
Табела 5.13 Експерименталне и предвиђене вредности интензитета хабања.....	89
Табела 5.14 Резултати предвиђања минималне вредности интензитета хабања применом PSO, GA и ANN методе.....	91
Табела 5.15 Поређење резултата са експерименталним вредностима и одређивање грешке RSM модела.....	91
Табела 6.1 Параметри храпавости основне легуре и нанокompозита.....	98
Табела 6.2 Резултати мерења тврдоће по Викерсу.....	99
Табела 6.3 Улазни фактори и њихови нивои са кодираним вредностима.....	102
Табела 6.4 Ортогонална матрица L ₈ са експерименталним резултатима.....	102
Табела 6.5 Резултати анализе за S/N однос „мање је боље“.....	102
Табела 6.6 Резултати ANOVA анализе интензитета хабања.....	103
Табела 6.7 Улазни фактори и њихови нивои са кодираним вредностима.....	105
Табела 6.8 Ортогонална матрица L ₂₇ са експерименталним резултатима.....	106
Табела 6.9 Резултати анализе за S/N однос „Мање је боље“.....	106
Табела 6.10 Резултати ANOVA анализе интензитета хабања.....	108
Табела 6.11 Резултати потврде експеримената за интензитет хабања.....	109

Табела 7.1 Геометријске карактеристике цилиндричних зупчаника са правим зупцима
..... 120

Списак скраћеница и страних израза

Adj MS	Прилагођена средња вредност квадрата (<i>Adjusted mean squares</i>)
Adj SS	Прилагођен збир квадрата (<i>Adjusted sums of squares</i>)
AFM	Микроскопија атомских сила (<i>Atomic Force Microscopy</i>)
ANN	Вештачке неуронске мреже (<i>Artificial Neural Network</i>)
ANOVA	Анализа варијансе (<i>Analysis of Variance</i>)
ASTM	Америчко удружење за тестирања и материјале (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
CMNC	Наноконтрозити са керамичком основом (<i>Ceramic Matrix Nanocomposites</i>)
CMC	Контрозити са керамичком основом (<i>Ceramic Matrix Composite</i>)
CNT	Угљенична нановлакна (<i>Carbon Nanotubes</i>)
CoF	Коефицијент трења (<i>Coefficient of friction</i>)
DF	Број степени слободе (<i>Degrees of Freedom</i>)
DoE	Планирање експеримента (<i>Design of Experiments</i>)
EDS	Енергетско-дисперзивна спектроскопија (<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>)
FEA	Метода коначних елемената (<i>Finite Element Analysis</i>)
FESEM	Скенирајући електронски микроскоп са емисијом поља (<i>Field Emission Scanning Electron Microscope</i>)
G	Графен (<i>Graphene</i>)
GA	Генетски алгоритам (<i>Genetic Algorithm</i>)
GNP	Нанографен (<i>Graphene Nanoplatelets</i>)
Gr	Графит (<i>Graphite</i>)
GRA	Сива релациона анализа (<i>Grey relation analysis</i>)
MMC	Контрозити са металном основом (<i>Metal Matrix Composite</i>)
MMNC	Наноконтрозити са металном основом (<i>Metal Matrix Nanocomposites</i>)
OM	Оптички електронски микроскоп (<i>Optical Microscopy</i>)
PMC	Контрозити са полимерном основом (<i>Polymer Matrix Composite</i>)
PMNC	Наноконтрозити са полимерном основом (<i>Polymer Matrix Nanocomposites</i>)
PSO	Оптимизација ројева честица (<i>Particle Swarm Optimization</i>)
QC	Карактеристика квалитета (<i>Quality Characteristic</i>)
RSM	Методологија резултујућих површина (<i>Response Surface Methodology</i>)
SEM	Скенирајући електронски микроскоп (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)
Seq SS	Збир квадрата (<i>Sequential sums of squares</i>)
SPM	Микроскопија скенирајућом сондом (<i>Scanning Probe Microscopy</i>)
STM	Скенирајући тунелски микроскоп (<i>Scanning Tunneling Microscope</i>)
S/N	Сигнал/шум (<i>Signal/Noise</i>)
TEM	Трансмисиона електронска микроскопија (<i>Transmission Electron Microscopy</i>)
WR	Интензитет хабања (<i>Wear rate</i>)
XRD	Метода дифракције X-зрака (<i>X-Ray Diffraction</i>)

Списак ознака

β	Константа која зависи од геометрије утискивача
γ_i	Сива релациона оцена
δ	Грешка
ε	Константа која зависи од типа утискивача
η	Укупан средњи S/N однос
η_i	S/N однос у i -том експерименту у ортогоналном низу
$\hat{\eta}_{i,opt}$	Средњи S/N однос за i -ти фактор на оптималном нивоу
ξ_i	Сиви релациони коефицијент
φ	Коефицијент разлике
ω	Интензитет честица
Δ_{0i}	Апсолутна вредност разлике
Δ_{min}	Најмања апсолутна вредност разлике
Δ_{max}	Највећа апсолутна вредност разлике
A	Површина отиска
A_p	Пројектована површина отиска
B	Емпиријски одређени параметар (једначина 3.8)
c_p, c_g	Константе
c_1, c_2, \dots, c_8	Константе
d	Дијагонала отиска
EIT	Инструментални модул еластичности
E^*	Модул еластичности
F	Сила утискивања
F	Статистичка (Фишера) вредност
F_{max}	Максимална сила
F_n	Нормална сила (оптерећење)
H	Тврдоћа материјала
h	Број скривених слојева
h_c	Контактна дубина
h_f	Емпиријски одређени параметар (једначина 3.8)
h_p	Дубина отиска након растерећења
h_{max}	Максимална дубина утискивања
h_r	Тангентна дубина отиска
HIT	Инструментална тврдоћа
HRC	Тврдоћа по Роквелу
HV	Тврдоћа по Викерсу
k	Број излаза при GRA анализи
L	Референтна дужина профила
$L_n(X^z)$	Тагучи ознака матрице
M	Фактор сигнала
m	Емпиријски одређени параметар (једначина 3.8)
$mas. \%$	Масени садржај ојачавача у композиту

$\max y_i(k)$	Највећа експериментална вредност за k -ти излаз
$\min y_i(k)$	Најнижа експериментална вредност за k -ти излаз
n	Број експеримената
N_{in}	Број неурона у улазном слоју
N_{out}	Број неурона у излазном слоју
N_1, N_2, \dots, N_i	Број неурона у сваком скривеном слоју
p	Број фактора који значајно утичу на карактеристике квалитета
P	Вредност вероватноће
Pr	Процентуални утицај
R	Коефицијент регресије
R_a	Средње аритметичко одступање профила
R_{max}	Максимална висина неравнина
R_p	Средња висина испупчења профила на дужини оцењивања
R_q	Средње квадратно одступање профила на дужини оцењивања
R_v	Средња висина удубљења профила на дужини оцењивања
R_z	Средња висина неравнина
r_p, r_g	Случајне вредности из интервала (0, 1)
S	Варијанса (мера одступања карактеристика од \bar{y})
S	Контактна крутост
s	Пређени пут
$T6$	Поступак термичке обраде
v	Брзина клизања
v_i	Брзина честица
w_k	Тежински коефицијент
X	Број нивоа фактора
x_i	Позиција честица
$x_{x,i}$	Тренутна позиција честице
$x_0(k)$	Референтна нормализована вредност
y	Одговор/излаз (<i>Response</i>)
y_i	Посматрана i -та вредност излаза
\bar{y}	Просечна вредност посматраних вредности (излаз)
y^0	Жељена вредност излаза
z	Број фактора
$zap. \%$	Запремински садржај ојачавача у композиту

1. УВОД

Данашњи конструкциони захтеви са аспекта повећања радног века, смањења масе и цене производа остварују се константним развојем и применом нових материјала. Иновативни инжењерски производи често захтевају примену мултифункционалних материјала са широким опсегом различитих особина. Такву технолошку потражњу је тешко задовољити употребом једнофазних материјала. Да би се постигли захтевани технолошки циљеви, прибегава се синергијском комбиновању материјала са различитим техничко-технолошким својствима. Овакве потребе се решавају развојем нових материјала. Композитни материјали су најчешће направљени од одређене основе и једног или више ојачавача који могу бити у облику честица, кратких или дугих влакана. Употреба композитних материјала је пре свега условљена њиховим побољшаним физичко-механичким и триболошким особинама у поређењу са својствима основног материјала. Побољшање особина могуће је остварити у густини, дуктилности, модулу еластичности, затезној чврстоћи, тврдоћи, отпорности на хабање, коефицијенту трења, деформабилности, тоplotној и електричној проводљивости [1-5]. На овај начин инжењерима се обезбеђује већа слобода при конструисању, могућност комбиновања карактеристика материјала и њихово прилагођавање захтевима који нису били остварљиви употребом конвенционалних монолитних материјала.

Развој композитних материјала и технологија пројектовања, које се заснивају на њиховој примени, убрајају се у најважније напретке у историји материјала [1]. Од почетка примене композита око 1950. године па све до данас, евидентна је успешна употреба ових материјала у аутомобилској, ваздухопловној, свемирској и у многим другим индустријама [6]. У току развоја композитних материјала, код појединих композита јављао се проблем у хомогености и дуктилности, а затим и у жилавости, тврдоћи и крутости. Превазилажење поменутих проблема остварено је развојем хибридних композита који у свом саставу поред основног материјала садрже два или више ојачавача. На овај начин побољшавају се својства класичних композита, као што су ниска жилавост, недовољна крутост и висока цена производње. Наведена својства имали су композити који у свом саставу имају ојачаваче на микронивоу, а због проблема који су се јављали, истраживања су настављена и усмерена на композите са ојачавачима на нанонивоу.

Наноккомпозитом се назива материјал који у свом саставу поред основног материјала има бар једну компоненту чија је димензија мања од 100 nm. То су материјали високих перформанси који имају специфичне комбинације својстава и јединствене могућности при пројектовању па се сматрају материјалима XXI века. Данас, наноккомпозити нуде могућности за развој нових технологија у свим секторима индустрије, а поред тога су и еколошки прихватљиви [3].

Развој савремених технологија базира се на употреби компоненти што мањих величина, а њихово даље смањење има веома важну улогу у развоју "нано технологија". Нано технологија је препозната као нова технологија XXI века, због научне конвергенције физике, хемије, биологије, материјала и инжењерства на нанонивоу и важности контроле материје на нанонивоу у готово свим технологијама [7].

Последњих деценија истраживања у области нанонаука, технологија и материјала постали су централно поље научно-техничке делатности. Интересовање за наноструктуре и њихове примене повећава се у области електронских уређаја, ефективним оптоелектронским уређајима, био-сензорима, фотодетекторима, соларним ћелијама, наноуређајима и плазмонским структурама. Уочено је да само смањењем величине без промене у самој супстанци материјали могу показати промене у својствима као што су: електрична проводљивост, изолацијско понашање, еластичност, чврстоћа, различите боје и веће карактеристике реактивности које саме супстанце не показују на микро или макро нивоу. Интеракције на интерфејсима фаза постају у великој мери побољшане како димензије достижу ниво нанометра што је веома важно за побољшање особина материјала [3, 8].

Нанотехнологија је област истраживања у оквиру које се анализирају материјали и системи чије структуре и компоненте показују нове, значајно побољшане физичке, хемијске и биолошке особине, феномене и процесе. Догађаји који су означили почетак развоја нанотехнологије десили су се почетком 80-их година двадесетог века, осмишљени су скенирајући тунелски микроскопи (*Scanning Tunneling Microscopes, STM*) и микроскопи атомских сила (*Atomic Force Microscopes, AFM*) [8]. Тиме су омогућене експерименталне технике и методе неопходне за мерење и манипулацију наноструктурама. Микроскопија скенирајућом сондом (*Scanning Probe Microscopy, SPM*) отворила је нови свет нанотехнологије којим је омогућено посматрање и манипулација појединачних атома и молекула на чврстим површинама. Нанотехнологија се константно развија широм света како би променила и утицала на квалитет живота у будућности. Фасцинантни свет наноматеријала и њихових различитих примена постаје део нашег живота. Процењује се да је данас нанотехнологија на сличном нивоу развоја као што је рачуарска/информациона технологија била педесетих година прошлог века [7, 8].

Из доступне инжењерске литературе и научних радова може се уочити да су нанокомполити атрактивни материјали за истраживаче, како са практичног тако и са теоријског аспекта, због могућих комбинација потребних особина. Последње три деценије, улажу се велики напори коришћењем знања о нанотехнологији и нанонауци да би се произвели наноматеријали са потребном, унапред дефинисаном функционалношћу.

Повећана потражња нанокомполитних материјала у индустрији указује на њихову велику примену у будућности, а то за научнике и инжењере представља велики изазов. Употреба наноматеријала снажно утиче на развој ауто индустрије, авио индустрије, индустрије прехранбених производа, медицине и фармације, као и на развој материјала за разне инжењерске елементе. Са инжењерског становишта наноскала је изузетно мала, па се многи алати који се рутински користе у микропроизводњи не могу користити за нанопроизводњу. Мотивација у нанонауци је да се између осталог покуша схватити понашање материјала када је величина узорка близу атомских димензија.

Иако постоји велики потенцијал за употребу нанокомполита са металном основом у различитим областима, њихову већу употребу успорава велика цена производње, проблеми у производњи великих и комплексних делова, као и њихове повећане крутости.

Испитивања у оквиру ове докторске дисертације усмерена су ка новим нанокомполитним материјалима који су произведени модификованим компокастинг поступком. Поред теоријске анализе очекиваних карактеристика нанокомполита, материјали су направљени и експериментално проверени. Савремена истраживања се не могу замислити без употребе дизајна експеримента. Планирање експеримента је веома моћан алат у експериментално статистичким истраживањима сложених система или процеса. Добрим планирањем могу се скратити време извођења и смањити трошкови

експеримената, а у циљу добијања што већег броја информација са одговарајућом интерпретацијом резултата.

Поглавље два овог рада даје теоријске основе о наноконструктивним материјалима, њихову класификацију и разматра поступке производње наноконструктивних материјала. У овом поглављу дат је преглед литературе о алуминијумским наноконструктивима. На основу прегледа литературе наноконструктива, дат је и кратак осврт на потенцијалне примене ових материјала у разним индустријама.

У оквиру поглавља три објашњен је поступак производње испитиваних алуминијумских наноконструктива, као и начин припреме узорка за експериментална испитивања. Описани су поступци припреме наноконструктивних узорка и коришћени уређаји за експериментална испитивања. Резултати испитивања храпавости приказани су помоћу основних параметара храпавости и за сваки материјал дата је по једна крива профила храпавости. У другом делу овог поглавља дати су резултати механичких карактеристика наноконструктива.

Поглавље четири даје кратак осврт на основе дизајна експеримента, као увод у триболошка испитивања наноконструктива. Укратко су описане методе које су коришћене за обраду и анализу експерименталних резултата и оптимизацију триболошких карактеристика. Приказан је уређај на којем је урађено триболошко испитивање наноконструктива, као и димензије контактних елемената. На крају овог поглавља је извршен избор фактора значајних за поменуто испитивање.

Резултати триболошких испитивања добијени у првој фази истраживања приказани су у поглављу пет. Обрада, анализа и дискусија експерименталних резултата подељена је према врсти садржаја ојачавача, а према претходно усвојеном плану експеримента. На основу изведених закључака, оптималне варијанте фактора, направљене су смернице за другу фазу истраживања наноконструктива са новим оптимизованим масеним садржајем ојачавача. На основу тога, поглавље шест представља другу фазу истраживања, тачније испитивање наноконструктива који су произведени на основу остварених резултата прве фазе истраживања. Приказана је процедура испитивања, у овом поглављу, као и у претходним поглављима за прву серију наноконструктива. На крају овог поглавља је дата оптимална варијанта изабраних фактора са правцем даљих истраживања.

Посебан нагласак у поглављу седам јесте на анализи потенцијалне примене наноконструктива оптималних карактеристика. На основу истраживања других научника и остварених резултата добијен наноконструктив је коришћен код цилиндричних зупчаника са правим зупцима. Дата је анализа и дискусија резултата примене наноконструктива са предностима које поседују зупчани парови од алуминијумских наноконструктива.

У последњем поглављу осам приказане су оптималне комбинације масеног садржаја ојачавача наноконструктива за сваку серију материјала. Наведени су и правци даљег истраживања који уз помоћ дизајна експеримента, а у комбинацији са другим методама оптимизације олакшавају и убрзавају ток истраживања.

2. ТЕОРИЈСКЕ ПОСТАВКЕ

Потреба за смањењем масе делова у аутомобилској и ваздухопловној индустрији константно расте, док се важност принципа лаких конструкција захтева у циљу побољшања енергетске ефикасности и одрживости. Интензиван развој лаких материјала са најбољим комбинацијама крутости, чврстоће и жилавости остаје значајан изазов у науци и инжењерству материјала. Последњих деценија, пратећи брз развој науке и технологије, алуминијум и његове легуре постали су део константног истраживања и усавршавања. Њихова практична примена за разне конструкцијске делове стално се повећава захваљујући ниској густини, високој чврстоћи и дуктилности. Стварање нових материјала (композита) заснованих на алуминијуму са побољшаним триболошким и механичким карактеристикама пружа одговор многим захтевима индустрије. Опште је познато да један материјал никада није био довољан да у потпуности одговори захтевима индустрије и свим проблемима који се пред њега постављају. Зато се користе композитни материјали који представљају мешавину два или више материјала који се не растварају један у другом. У аутомобилској и ваздухопловној индустрији применом композитних материјала се поред смањења масе утиче и на смањење потрошње горива чиме се смањује емисија штетних гасова, побољшава заштита животне средине и квалитет живота становништва [8-13]. Развој и истраживање композитних материјала је веома заступљено у Србији, чему сведочи велики број научних радова [4, 5, 11-18].

2.1. Композитни материјали

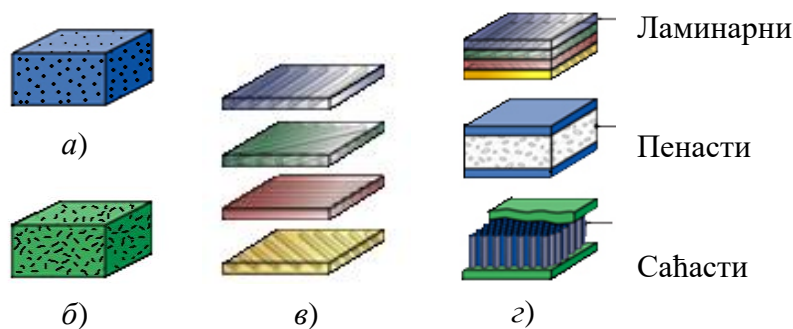
Развој композитних материјала је веома актуелан у свету иако постоје и користе се већ хиљадама година. Познато је да дрво представља природни композит у коме лигнит повезује дуга влакна целулозе. Такође, композитни материјали су цигла и бетон, који је састављен од честица песка или шљунка сједињених помоћу цемента. Композити са стакленим влакнима који се и данас доста употребљавају први су савремени композитни материјали произведени четрдесетих година XX века [14].

Композитни материјали се састоје од два или више различитих материјала (конституената), који су чврсто међусобно повезани. Такође, може се рећи да композитни материјали настају додавањем ојачавача основном материјалу у циљу побољшања одређених карактеристика то јест постизање жељених својстава. Полазни материјали имају међусобно различите особине и њиховом комбинацијом добија се потпуно нов материјал са новим и јединственим својствима. У зависности од намене композита бира се врста основног материјала, а затим и тип, врста и садржај ојачавача у циљу добијања бољих механичких, триболошких, хемијских или неких других карактеристика које су поседовали појединачни материјали. Компоненте се међусобно не мешају, нити растварају, тако да се унутар композита јасно разликују две или више фаза.

Композити који се користе као основни конструкциони материјал у авио и ауто индустрији састоје се од деформабилног метала основе, који поседује одговарајућу жилавост и омогућава лакшу обрадљивост, и крпе керамике као ојачавача, који поседује велику чврстоћу и термичку стабилност. Ови композити су познати као композити са металном основом (*Metal Matrix Composite, MMC*). Први ниво класификације композита је у зависности од материјала основе. Поред *MMC* постоје композити са полимерном основом (*Polymer Matrix Composite, PMC*), а када је основа керамичка реч је о композитима са керамичком основом (*Ceramic Matrix Composite, CMC*) [5, 14,15].

Композити се могу класификовати на различите начине и на основу више критеријума. Други ниво класификације је према облику ојачавача и могу бити:

- честицама ојачани композитни материјал (слика 2.1а);
- влакнима, која могу бити кратка или дуга, ојачани композитни материјал (слика 2.1б и в) и
- структурни композити: ламинарни композитни материјали и сендвич конструкције (слика 2.1г).



Слика 2.1 Композитни материјали: а) честицама ојачани, б) и в) влакнима ојачани, г) структурни [13]

Композити ојачани честицама имају најдужу примену и најједноставнији су за производњу. Трошкови њихове производње су нижи у односу на друге композите. Код композита ојачаним честицама димензије честица приближно су једнаке у свим смеровима, док се код композита ојачаним влакнима уочава велика разлика између дужине и пречника влакна. Структурни композити представљају комбинацију композита и хомогених материјала. Оријентација ојачања утиче на анизотропију својстава материјала. Изотропна својства имају композити код којих су честице равномерне распоређене. Влакнима ојачани композити могу имати анизотропна или изотропна својства и структурни композити имају само анизотропна својства [5, 15, 16].

Следећи критеријум за поделу композитних материјала је према облику димензија конституената и то на:

- макрокомпозитне материјале;
- микрокомпозитне материјале и
- нанокомпозитне материјале.

Потреба за коришћењем ојачавача на нанонивоу јавља се као решење како би се превазишли недостаци микрокомпозита. У недостатке се убраја отежана израда и обрада због побољшаних механичких карактеристика и нехомоген распоред честица ојачавача у материјалу основе [17-25].

Због њиховог потенцијала за превазилажење ограничења конвенционалних композита и монолитних материјала нанокомпозити су постали предмет многих

истраживања. У литератури су представљени као материјали будућности зато што поседују јединствена својства која им омогућавају да надмаше карактеристике микрокомпозита и других конвенционалних композита.

Када композитни материјал има ојачавач чија је бар једна димензија на нанометарској скали мања од 100 nm тада је реч о нанокомпозитима. Нанокомпозити су композитни материјали који се састоје од основног материјала и ојачавача нановеличина који се не растварају један у другом. Нанокомпозити се, према истој аналогiji као и остали композити, могу класификовати према врсти основног материјала у три различите категорије [26-29]:

- нанокомпозити са металном основом (*Metal Matrix Nanocomposites, MMNC*);
- нанокомпозити са полимерном основом (*Polymer Matrix Nanocomposites, PMNC*) и
- нанокомпозити са керамичком основом (*Ceramic Matrix Nanocomposites, CMNC*).

Истраживања, испитивања и примена нанокомпозита зависе од потреба и захтева индустрије. Најобимнија истраживања на основу броја објављених научних радова (по пресеку података из марта 2020. године) посвећена су нанокомпозитима са полимерном основом (974 000), одмах потом следе нанокомпозити са металном основом (919 000) и на крају нанокомпозити са керамичком основом (213 000).

Нанокомпозити са полимерном основом могу бити ојачани стакленим, карбонским или араמידним влакнима. Примена ових материјала је веома распрострањена о чему говори податак да се само са карбонским ојачавачем производи око 50% материјала код авиона Боинг 787 (*Boing 787*), и око 20% у структури авиона Ербас А380 (*Airbus A380*). *PMNC* могу се користити и при изградњи бродова и других превозних средстава [30, 31]. Генерално, циљ примене нанокомпозита са полимерном и металном основом је већа чврстоћа или тврдоћа, при чему су као основа композита често материјали који су дуктилни и мале густине. Када је циљ повећање отпорности композитних материјала на пропагацију прслине, користе се композити са керамичком основом. Ови материјали имају и високу отпорност на термичке промене и оксидацију. Показало се да су керамички нанокомпозити изузетно важни за будуће примене код делова који су изложени високим радним температурама. Зато се нанокомпозити са керамичком основом користе код резних алата, млазних мотора и балистичке заштите. Начин производње и примена композитних материјала зависи од врсте основног материјала и максималне температуре на којој се композитни материјал може употребити.

Као основни материјал, код нанокомпозита са металном основом користе се углавном лаки метали и то алуминијум, магнезијум, титанијум, бакар и легуре цинка [29]. Захваљујући својим dobrим особинама, као што су мала густина, добра термичка проводљивост и отпорност на корозију, релативно ниска цена производње и добра могућност рециклирања, алуминијум и његове легуре се најчешће користе као основа композита [32, 33]. Побољшање механичких и триболошких карактеристика алуминијумских композита врши се додавањем одговарајућих ојачавача и побољшавача [34]. Ојачавачи могу бити у облику честица, које могу бити прашкасте или дисперзионе реда величине 10 или 100 nm. Влакна, континуална и кратка, која се користе цилиндричног су облика, док честице могу бити сферичног, кубног, тетрагоналног, плочастог или неправилног облика, а најчешће су приближно еквиаксијалне.

Наноконтрозити ојачани честицама у великој мери се користе у аутомобилској индустрији због њихове способности да издрже високе температуре и притиске. Недостаци наноконтрозита са металном основом су нехомогеност дисперзија честица, слабе везе између основе и честица и агломерација наночестица. Код керамичких наночестица долази до промене њихових термичких карактеристика као последица раста површинске енергије и различитог међуатомског растојања. Такође, примена наночестица у контрозит доводи до технолошких потешкоћа у испитивању и великих трошкова производње наноконтрозита са металном основом. Разлог овоме је то што је потребно утрошити велику количину енергије како би се постигао равномерни распоред наночестица у основи контрозитног материјала.

Потреба да се превазиђу уочени недостаци чини да су истраживања и испитивања наноконтрозита и даље актуелна првенствено у поступку добијања и могућности варијације утицајних параметара. Предмет истраживања у оквиру ове докторске дисертације су наноконтрозити са алуминијумском основом па ће у наредним поглављима на њима бити већи акценат. Циљ овог рада је да се применом оптимизационих метода испита утицај одговарајућих ојачавача (врста, садржај и величина честица) и одреди оптимална комбинација параметара који дају најбоље карактеристике наноконтрозита.

2.2. Преглед начина производње наноконтрозита са металном основом

Из литературе се може уочити примена различитих поступака за добијање наноконтрозита са металном основом [25, 35, 36]. Правилан избор одговарајуће методе за производњу наноконтрозита је од великог значаја јер се тиме утиче како на својства наноконтрозита тако и на трошкове обраде и производње наноконтрозита. У наноконтрозитима са металном основом користе се различите врста ојачавача као што су карбиди, оксиди и нитриди. Поступци добијања наноконтрозита се могу класификовати на основу стања основа, које могу бити у течном или у чврстом стању током процеса добијања. У овом делу текста пажња ће бити усмерена на начине производње наноконтрозита са металном основом ојачаних наночестицама. Поступци добијања наноконтрозитних материјала могу се поделити у три групе:

- поступци добијања наноконтрозита у чврстом стању укључују различите технике умешавања трењем, металургије праха са модификацијама у корацима обраде, као што су, високоенергетско млевање помоћу куглица, топло пресовање, топло изостатичко пресовање, хладно пресовање, после чега следи поступак синтеровања и екструзија;
- поступци добијања наноконтрозита у течном стању укључују различите поступке ливења, као што су ливење мешањем, ливење истискивањем и
- получврсти раствор укључује технику реокастинга са варијантама као што су компокастинг или у комбинацији са ливењем истискивањем.

Међу поменутиим процесима, поступак производње наноконтрозита са металном основом у течном стању је најкоришћенији у смислу економичније производње (краће време обраде и нижа цена производње). Међутим, ефикасан довод и дисперзија наноојачавача у основи је и даље велики изазов за многе истраживаче.

2.2.1. Металургија праха

Једна од најчешће коришћених техника за добијања нанокompозита је металургија праха (*Powder Metallurgy*) која се остварује мешањем честица праха метала и керамике у дефинисаном низу корака. Први корак обухвата претварање основног материјала у честице праха, како би се прах основе и прах ојачавача (керамика) мешали у одговарајућем односу. Добијена мешавина се убацује у калуп и пресује са циљем постизања кохезивне структуре са димензијама које су блиске димензијама крајњег елемента. Пресовањем под високим температурама добија се финални производ. Код механичког мешања прахова препоручује се примена млевења помоћу куглица у циљу постизања бољих механичких карактеристика. Секундарне операције, као што су истискивање, термичка обрада, машинска обрада и друге, могу се применити после завршних фаза у овом поступку [15]. Поступак добијања нанокompозита путем металургије праха је веома скуп, али доводи до значајног побољшања карактеристика материјала, као што су чврстоћа и крутост [25].

Афхам (*Afkham*) и остали применом процеса металургије праха за добијање нанокompозита са ојачавачима од 25 мас.% алуминијум оксида (Al_2O_3) и силицијум карбида (SiC), установили су да продужено време млевења не утиче додатно на расподелу наночестица у металној основи коју чине прахови бакра и гвожђа. Карактеризацијом површина материјала, помоћу скенирајућег електронског микроскопа (*Scanning Electron Microscopy, SEM*), скенирајућег електронског микроскопа са емисијом поља (*Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM*) и методом дифракције X-зрака (*X-Ray Diffraction, XRD*) установљено је да су наночестице пре млевења биле агломерисане. У почетним фазама механичког млевења честице су делимично одвојене и уграђене у основу метала. Процес млевења, за све припремљене прахове, спроведен је при константној брзини обртања мешача од 250 min^{-1} , са предвиђеним временима (2, 6 и 24 h) и у атмосфери аргона. Однос куглица и одговарајуће мешавине износио је 5:1. Коришћене су кугле од каљеног челика са различитим пречницима од 5, 10 и 20 mm. У циљу смањења агломерације честица коришћено је као средство за контролу процеса 1,5 мас.% стеаринске киселине. На основу спроведеног испитивања закључили су да наночестице Al_2O_3 нису термодинамички стабилне када се налазе са бакарним прахом у процесу добијања нанокompозита. Са друге стране, наночестице SiC поседују већу термодинамичку стабилност са металима. Закључак је да високоенергетско механичко млевење наночестица Al_2O_3 и метала после дужег млевења може довести до реакције. Установљено је и да на расподелу наночестица не утиче ни врста керамичких честица ни време млевења. Закључак је да наночестице значајно утичу на просечну величину честица композитних прахова поготово код бакра [37].

Карењо Гаљардо (*Carreño-Gallardo*) и остали као основу су користили алуминијумску легуру ($Al2024$) са варијацијом концентрације ојачавача од 0 до 5 мас.% наночестице SiC које су равномерно распоређене у основи помоћу механичког млевења. Консолидовани материјали су синтетисани конвенционалним процесом металургије праха. Микроструктура нанокompозита која је утврђена помоћу трансмисионе електронске микроскопије (*Transmission Electron Microscopy, TEM*) која показује да су честице хомогено распоређене у легури што је доказано резултатима и побољшањем механичких својстава. Побољшане су чврстоћа и тврдоћа које су у директној функцији са садржајем честица. Производња нанокompозита је имала следеће параметре: време млевења је износило 2 и 5 h, однос масе прахова и куглица је био 5:1 и користили су аргон током млевења како би избегли прекомерну оксидацију метала. Припремљена маса је у цилиндрични челични калуп хладно пресована са 330 МПа. Добијени узорци су били

следећих димензија: пречника 5 mm и висине 10 mm. Производи су синтеровани без притиска у трајању од 3 h на 500 °C у атмосфери аргона. Неојачана легура је припремљена на исти начин ради поређења. После синтеровања, узорци су термички третирани коришћењем раствора који је топлотно третиран током 1 h при 495 °C и гашењем у води на собној температури. Овако припремљени узорци су подвргнути вештачком старењу, термичком обрадом Т6 у трајању од 12 h на 191 °C. На основу спроведених испитивања извели су закључак су да оптимално време млевења износи 2 h у поступку добијања нанокompозита [38].

2.2.2. Механичко млевење

Механичко млевење (*Mechanical Milling*) представља процес млевења или уситњавања смеше прахова различитим методама. Све ове методе се заснивају на истом принципу убацивања честица материјала у млин где се оне подвргавају високо-енергетском сударању са другим честицама и са додатим челичним куглама које убрзавају сам поступак. У зависности од врсте материјала од којих се добијају прахови користе се различити типови млинова. Најчешће коришћени су млинови са куглицама, вибрациони, вртложни и планетарни. Млинови са куглицама обично се користе за добијање ситних прахова. Главни циљеви поступка кугличног млевења су смањење честица праха и хомогенизација мешавине прахова у чврстом стању. Млин са куглицама може се дефинисати као цилиндрична комора са хоризонталном ротацијом око своје осе, а притом је делимично испуњена прахом и куглицама за млевење [5]. Убацивањем материјала основе и ојачавача у млин он се покреће на одређени временски период. У току рада се ослобађа енергија ударањем честица о честицу, честица о кугле, честица о зид млина и на тај начин честице се деформишу и мењају свој облик и величину. После одређеног времена и међусобних реакција честице мењају величину и смањују се на нановеличину. Овим поступком се добијају много мање и финије честице зрна у поређењу са честицама пре процеса [39, 40]. Због тога се овај поступак може користити како за уситњавање материјала основе, тако и за мешање прахова основог материјала и наночестица као ојачавача.

Механичко млевење представљено је у истраживању које су спровели Шерифи (*Sharifi*) и остали [22]. Произведени су алуминијумски нанокompозити механичким млевењем са топлим пресовањем као секундарном операцијом. Алуминијумски прах са просечном величином честица од 60 μm је млевен са различитим количинама нанопрахова (5, 10 и 15 mas.%) Al_2O_3 и алуминијум диборидом (AlB_{12}) са просечном величином честица у распону од 50 до 120 nm. Млевење куглицама трајало је 5 h без прекида, при ротацији ротора од 600 min^{-1} . Однос маса ојачавача и челичних кугли био је 10:1. Коришћене челичне куглице су направљене од хромираног челика пречника 20 mm. Процес млевења је изведен у аргонској атмосфери са циљем да се спречи оксидација. Сличан поступак приказан је у раду [41] где су као ојачавачи у алуминијумској основи коришћени Al_2O_3 и итријум оксид (Y_2O_3). Процес је спроведен у планетарном млину при 200 min^{-1} у трајању од 20 h. Куглице су пречника 16 mm, а однос куглица и честица материјала у млину је 10:1. Процес је спроведен под притиском од 750 МПа и као антиоксидант коришћен је аргон. По завршетку процеса формиране су наночестице пречника од 30 nm. На основу равномерне расподеле честица у основи и минималне порозности у композиту установљено је да су применом ове технике нанокompозити успешно произведени. Остварене су ближе вредности тврдоће нанокompозита и у појединачном и у хибридном ојачању без икаквих детекција у

реакцији међуфаза између основе и ојачавача. Њихов генерални закључак је да хибридни наноккомпозити показују боља механичка својства од наноккомпозита.

Производња и карактеризација алуминијумских наноккомпозита која је приказана у раду аутора Етриан (*Atrian*) и осталих [42], обухвата примену механичког млевења, а затим хладно пресовање и топлу екструзију. За постизање најбољег квалитета узорака наноккомпозита извршили су оптимизацију процеса екструзије анализом параметара као што су: брзина екструзије, температура, однос екструдирања, подмазивање и димензије. Прва фаза механичког млевења имала је за циљ постизање равномерне мешавине материјала, односно једнаку расподелу наночестица између алуминијумске основе микронске величине. Да би се спречило груписање наночестица оне су раздвојене применом ултразвучних таласа уз њихово претходно потапање у раствор етанола у трајању од 30 минута. После сушења, механичко млевење је обављено коришћењем уређаја за млевење са куглицама који је опремљен системом за водено хлађење. Коришћен је гас аргона како би се спречила оксидација праха, а да би се спречило хладно заваривање током млевења као средство за контролу процеса коришћено је 1 мас.% стеаринске киселине. Циљ ове процедуре је пречишћавање зрна честица Al основе и постизање хомогене расподеле SiC честица у основи. Време трајања млевења изабрано је тако да се смањи дуктилно понашање Al честица и учини га кртим то јест ближе кртој природи ојачавача SiC . После млевења прахови су подвргнути температури 400 °C у трајању од 120 минута како би се уклонила остала влага. Максимална количина праха коју су користили за хладно пресовање је била 70 g, што је резултовало узорцима у облику диска пречника 35 mm и висине око 30 mm. Хладно пресовани узорци су процесом врућег екструдирања претворени у узорке облика штапа пречника око 12 mm и дужине око 250 mm. Аутори су овим истраживањем приказали да се наноккомпозити могу успешно припремити овим поступком и закључили су да је релативна густина смањена за 1% при додавању 3 зар.% SiC наночестица. Са овим садржајем ојачавача уочена је равномерна расподела SiC наночестица која је резултирала побољшањем механичких карактеристика, као што су затезна чврстоћа, микротврдоћа, за око 50%.

Мусавијан (*Mousavian*) и остали применили су нови поступак млевења куглицама за производњу наноккомпозита са $A356$ основом и ојачавачем SiC честицама. Млевење куглицама честица SiC микронских величина је извршено у присуству праха гвожђа (Fe) и никла (Ni) са циљем смањења њихових величина. После 36 h млевења непрекидног ломљења кртих SiC честица праха долази до стварања вишеслојних SiC честица праха величине од 50 nm до 10 μm . Прах је затим убачен у полуочврсли растоп алуминијумске легуре за олакшану уградњу ситних SiC честица. Коначни композитни материјали су екструдирани на температури од 500 °C. Закључили су да мешавина праха $Ni-SiC$ после 36 h млевења куглицама има много нижу просечну величину честица са високом униформношћу у односу на произведене $Fe-SiC$ прахове. XRD анализом су показали да после млевења не долази до реакције између честица праха SiC -а и Fe , односно SiC -а и Ni . Анализом су открили да никл узрокује формирање зрна са високом сферичношћу, док се игличаста морфологија добија када се као агенс користи гвожђе. Уочено је да процес вреле екструзије потпуно мења микроструктуру композитних материјала што доводи до значајне фрагментације силиконских еутектичких фаза. Много боља расподела наночестица и субмикронских честица, са мањом агломерацијом, добија се када су прахови млевених $Ni-SiC$ уграђени у истопљени метал. Доказано је побољшање механичких карактеристика за око 55% за композите који садрже прах $Ni-SiC$ у поређењу са онима из екструдиране алуминијумске легуре [43].

Ел Деили (*El-Daly*) и остали су припремили алуминијумске наноккомпозите са наночестицама SiC (од 2,5 до 12,5 зар.%) као ојачавачима, применом енергетског

млевења са хладним пресовањем и синтеровањем на 550 °C у трајању од 1 h. Коришћен алуминијумски прах основе је био просечне величине од 60 μm (99,7 % чистоћа), а ојачавајуће честице SiC са просечном величином од 10 μm . У циљу производње праха SiC са просечном величином честица мањом од 70 nm примењен је процес млевења у високонапонском млину на собној температури и атмосфери аргона. Однос куглица и праха 20:1, а брзина окретања је 320 min^{-1} . Стварање наночестица SiC је остварено после 50 h млевења што је потврђено помоћу *ТЕМ* и *XRD* анализа. Даља припрема нанокомпозита се састојала од високоенергетског кружног млевења са односом куглица и масе честица од 10:1. Брзина окретања је 320 min^{-1} . Ове честице су мешане током 10 h у атмосфери аргона високе чистоће (99,99 %) како би се избегла оксидација елемената. Да би смањили хладно заваривање алуминијумског праха, експерименте су периодично заустављали на сваких 10 минута млевења. Тако припремљене честице су сабијене технологијом хладног пресовања под притиском од 650 МПа како би се добили узорци димензија 10 · 10 · 15 mm. Нанокомпозитни прах Al/SiC су накнадно синтеровали под вакуумом и при притиску од 50 МПа, на 550 °C током 1 h. Анализом микроструктуре материјала показали су хомогену расподелу наночестица, док порозност и прелине на интерфејсу Al/SiC нису откривене. Као резултат добро припремљених нанокомпозита је закључак аутора да су се механичке особине нанокомпозита значајно побољшале, док је Поасонов коефицијент нанокомпозита остао непромењен [44].

2.2.3. Ливење

Ливење (*Casting*) представља процес добијања нанокомпозита који се изводи тако што се основни материјал загрева на температури већој од температуре топљења тог материјала, а затим се убацују честице ојачавача у основу и обавља се мешање смеше. Постоји више варијација поступка ливења, а неки од тих поступака су приказани у наставку. Ливење мешањем (*Stir casting*) представља процес који је врло сличан конвенционалном процесу ливења. Разлика је у томе што у ливењу са мешањем постоји лагано мешање истопљене легуре како би се постигла равномерна расподела ојачавача у основи. Компокастинг поступак (*Compcasting method*) сличан је поступку ливење мешањем, а главна разлика је у томе што је основа у полуочврслом стању, а не у течном стању и у суштини, то је варијанта реокастинг или тиксокастинг методе која се примењује за производњу композита [45-50].

Мјули (*Muley*) и остали су произвели алуминијумске хибридне нанокомпозите са ојачавачима од наночестица SiC и Al_2O_3 у једнаким односима (0,5; 1; 1,5 и 2 mas.%) применом поступка ливења мешањем. Просечна величина наночестица SiC је износила 25 – 50 nm, а Al_2O_3 је 40 nm. Наночестице су претходно загрејане ради ослобађања од влаге и побољшања квашљивости са основном легуром. Основна легура је на повишеној температури која је за око 10 – 20 °C изнад тачке топљења основног материјала истопљена, а затим су убачене наночестице. Мешање је изведено са мешачем од ниско угљеничног челика при константној брзини од 400 min^{-1} око 4, 5 min што је резултирало добром расподелом наночестица. Цео процес је изведен у окружењу аргона како би спречили оксидацију. Тврдоћа композита ојачаног са 2 mas.% наночестица SiC и Al_2O_3 износи 98 HV у односу на тврдоћу основног материјала која износи 84 HV. Примећено је и побољшање у затезној чврстоћи нанокомпозита од 39% у поређењу са алуминијумском основном. Повећањем садржаја ојачавача са 0,5 на 2 mas.% смањено је хабање нанокомпозита за око 80% [46].

Примену методе ливења мешањем уз помоћ ултразвучних таласа за добијање нанокомпозита са основном А356 и ојачавачима SiC приказали су Донтамсети

(Donthamsetty) и Бабу (*Babu*). Припрема нанокompозита се састоји од топљења основне легуре на температури од 700 °C, што је око 100 °C изнад температуре топљења (610 °C). Упркос чињеници да је густина наночестица *SiC* ближа густини легура алуминијума, с обзиром на површински напон отопљеног метала, наночестице теже ка површини у растопу пре него што се ултразвучном кавитацијом не изврши мешање отопљеног метала. Пре убацивања сонде у растоп, врши се мешање помоћу мешача брзином обртања од 750 min⁻¹ у трајању од 30 секунди. Произведени су нанокompозити различитих масених садржаја (0,1; 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5 mas.%) наночестица *SiC* са просечном величином од 50 nm. Време соникације је 6 минута за 0,1 mas.%, а затим је повећано за 6 минута на сваки раст од 0,1 mas.% ојачавача. Растоп је третиран 30 минута ултразвучним таласима. У тренутку када се наночестице *SiC* убаце у отопљени алуминијум вискозност алуминијумске легуре се повећа. Приликом продуктивне ултразвучне припреме коришћена је већа температура од 750 °C како би се осигурало да течност остане унутар калуца. Течност, на високој температури, са наночестицама се сипа у метални калуца, хлади се и поприма облик калуца то јест узорака за испитивање. На основу спроведеног истраживања закључили су да се отпорност на хабање нанокompозита *A356/0,5 mas.% SiC* побољшала са 53,735% и 47,04% при оптерећењу 30 N, 40 N, респективно, у поређењу са чистом алуминијумском легуром [47].

Испитивање отпорности на хабање алуминијумских нанокompозита произведених процесом ливења уз мешање су извршили Сарендран (*Surendran*) и остали [48]. Нанокompозити су произведени са различитим садржајем ојачавача од 1 до 2,5 mas.% *Al₂O₃* и просечном величином честица од 40 nm. Производња нанокompозита се врши у графитном лонцу конусног облика. Графит се користи зато што је он постојан на високим температурама и не изазива реакцију са алуминијумом на високим температурама. Основна легура је заједно са различитим саставом ојачавача растопљена на температури од 720 °C, а затим се употребом аргона врши дегасификација мешавине у трајању од 10 минута. Мешање се врши уз помоћ електромагнетне мешалице и циљ је постизања равномерних расподела честица. Струја је варијала од 30 до 70 А, док је напон био константан и износио је 220 V. Додат је магнезијум у отопљени метал како би се повећала квашливост између основе и ојачавача. Затим је снижена температура како би течност прешла у полуочврсло стање, сипала у шупљину калуца и пресовала током очвршћавања. Правилна припрема нанокompозита је потврђена анализом резултата хабања када је установљено да додавање наночестица у основу алуминијума утиче на повећање отпорности на хабање. Минимално хабање је постигнуто при додавању наночестица од 2,5 mas.% *Al₂O₃* у поређењу са резултатима добијеним за основну легуру и нанокompозита.

Ву (*Wu*) и остали су за добијање нанокompозита са *A356* основом и честицама *SiC* применили нови сложени поступак који се састоји од процеса растопљеног метала у комбинацији са млевењем куглицама и ултразвучном методом. Наночестице као ојачавач су биле β-*SiCp* са просечним пречником од 40 nm, док је чисти алуминијумски прах за припрему композитних гранула био са просечним пречником од 30 μm. За припрему нанокompозита су коришћене две главне процедуре експеримента, и то високоенергетско млевење куглицама за израду *Al/SiCp* композитних гранула и ливење мешавине за израду *MMNC*. Да би се спречила реакција честица *SiC* са отопљеним металом, наночестице *SiC* су претходно загреване 2 h на температуру 850 °C, ради уклањања влаге и гасова. Затим су наночестице са уделом од 6 mas.% *SiC* помешане са чистим *Al* прахом за производњу нано-*SiCp/Al* композитних гранула. Примењене брзине обртања мешача су износиле 150 min⁻¹ у трајању од 5 h, 200 min⁻¹ у трајању од 15 h и 300 min⁻¹ у трајању од 5 h, респективно. На основу хемијског састава *A356* легуре, уравнотежена количина *Al-24,5% Si* легуре, чист алуминијум и магнезијум су отопљени

у графитном лонцу. Композитне грануле $SiCp/Al$ предгрејане су на $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ пре додавања у отопљени метал. Механичко мешање је примењено када је легура потпуно истопљена, а затим се раствор хлади на $680\text{ }^{\circ}\text{C}$ и додају се загрејане композитне грануле. Када је процес мешања завршен припремљена маса се загрева до $720\text{ }^{\circ}\text{C}$ и одржава на тој температури 30 минута са циљем да се наночестице SiC равномерно распореде у отопљени метал. По завршетку обраде ултразвучним вибрацијама, отопљени композит сипа се у челични калуп под притиском од 60 МПа. Калуп је загрејан до $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Добијени су одливци у облику калуца пречника 30 mm и висине 100 mm. Анализирањем површина материјала уочене су добро распоређене наночестице без агломерације, што је резултирало побољшаним механичким карактеристикама нанокompозита. Уочено је повећање вредности затезне чврстоће за 19,5% и дилатације нанокompозита за 43,5% са повећањем садржаја SiC честица на 2 mas.%, у поређењу са А356 легуром. Овим резултатима је потврђено да се нанокompозити могу успешно припремити комбинацијом наведених метода [49].

Синг (*Singh*) и остали су извршили поређење механичких карактеристика нанокompозита произведених различитим процесима у течном стању. Користили су А16061 као основни материјал и варирали садржај ојачавача наночестица од 1 до 3 mas.% Al_2O_3 . За производњу нанокompозита коришћене су методе ултразвучног ливења мешањем и ултразвучног ливења гњечењем. Честице ојачавача су претходно загрејане до температуре од $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, а потом распоређене у отопљену основну легуру ради побољшања квашљивости и равномерне расподеле честица. Уочено је да су за добијање композита помоћу ултразвучног ливења гњечењем веома важни процесни параметри као конструкција, температура основе, праћење температуре основе, температура загревања честица и тако даље. Установљено је да су механичка својства као што су затезна чврстоћа, притисна чврстоћа и тврдоћа композита, произведених поступком ливења гњечењем већа од тврдоће композита произведених ултразвучним поступком ливења мешањем. Чврстоћа композита израђених ултразвучним поступком ливење мешањем (затезна и притисна), повећавају се са повећањем садржаја наночестица Al_2O_3 , али за већи садржај од 2 mas.% наночестица уочено је да се смањује затезна и притисна чврстоћа. Закључак је да ова констатација може бити и због агломерације наночестица при већем садржају истих [50]. Према истраживањима наведених аутора, примећује се да је 2 mas.% оптималан садржај керамичких наночестица за побољшање механичких и триболошких карактеристика нанокompозита произведених ливењем у односу на основни материјал.

2.2.4. Ливење у полуочврслном стању

Поступак ливења у полуочврслном стању је сличан поступку ливењу мешањем, са том разликом да се у овом поступку честице ојачавача додају и мешају у метал који је у полуочврслном стању. Карактеристично за ову методу је то што се полуочврсли метал мора интензивније мешати у односу на благо мешање код процеса ливења мешањем [45]. Производњу алуминијумских нанокompозита применом тиксокастинг процеса први су приказали Кандемир (*Kandemir*) и остали [51]. Тиксокастинг процес је друга варијанта реокастинг процеса. Овај процес се заснива на формирању метала у полуочврслном стању, а не у потпуно течном или чврстом стању. Користе се наночестице SiC и титанијум диборида (TiB_2) са просечном величином између 20 и 30 nm, које су најпре формиране у компактне прахове, а затим су компактно растопљени и третирани ултразвуком. Анализом микроструктура добијених материјала уочена је равномерна расподела наночестица у истопљеном металу. Чврстоћа нанокompозита је значајно побољшана са додавањем наночестица од само 0,8 mas.%. Нанокompозити су успешно произведени

тиксокастинг поступком са масеним садржајем наночестица између 0,65 и 0,70 мас.%. Уочено је да су се наночестице SiC често налазиле као кластери, док су наночестице TiB_2 углавном биле као појединачне честице у основи, што је највероватније због боље квашљивости TiB_2 наночестица у течном алуминијуму. Порозност у наноконструктивима $A356/SiC$ и $A356/TiB_2$ која је настала у процесу ливења наноконструктива значајно је смањена при 575 °C тиксокастинг процесом.

2.2.5. Процес умешавања трењем

Процес умешавања трењем (*Friction stir processing, FSP*) је поступак добијања наноконструктива у чврстом стању и користи се за површинску обраду алуминијумских конструктива, хомогенизацију алуминијумских легура добијених металургијом праха, металних конструктива и ливених легура алуминијума. Ова техника се заснива на заваривању трењем, са циљем да се добије површински слој без порозности, са хомогеном расподелом ојачавајућих честица у основи и снажним везивањем између ојачавача и основе. На тај начин се производи локализована модификација микроструктуре са специфичним површинским побољшањем особина метала [52]. Овај процес је нумерисан као метода за сједињавање наночестица друге фазе у микроструктуру и обликовање површинских конструктива у циљу побољшања механичких особина површине метала [53].

Мазехери (*Mazaheri*) и остали су применили нови приступак код умешавања трењем и користили пламени поступак са великим брзинама наношења [54]. За производњу конструктивних прахова користили су струготину легуре $A356$, као ојачавач прахова Al_2O_3 микро и нано величина са чистоћом од 99,9%. Струготине основне легуре су неправилног облика величине од 200 до 300 μm , док су честице микро и нано Al_2O_3 прахова приближно сферног облика са величином од 50 до 100 μm и од 20 до 40 nm, респективно. У циљу добијања конструктива $A356$ са 5 зар.% Al_2O_3 , извршили су механичко млевење у високоенергетском млину са куглицама у трајању од 12 h на собној температури, у атмосфери аргона. Однос тежине куглица и праха је 6:1, док је брзина окретања износила 300 min^{-1} . У процесу су додали стеаринску киселину 0,3 мас.% као средство за контролу процеса како би спречили прекомерно микроставаривање честица праха чија је укупна маса износила 200 g. После 12 h млевења, прахови су просејани како би се раздвојиле честице од 25 до 63 μm које су погодне за пламени поступак са великим брзинама наношења (*high-velocity oxy-fuel, HVOF*). Премази припремљени овом методом имају ниску порозност и високу тврдоћу. *HVOF* техником је могуће произвести густе премазе са супериорним механичким особинама у поређењу са другим методама термичког прскања. Анализом микроструктуре показали су да површински слојеви конструктива $A356/Al_2O_3$ имали добро распоређене честице Al_2O_3 у основи $A356$, као и да је остварена добра веза између њих. Вредности површинске микротврдоће за $A356-\mu Al_2O_3$ и $A356-nAl_2O_3$ су износиле око 90 и 110 HV, респективно, док је за узорке припремљене без Al_2O_3 честица и добијену легуру $A356$ износиле око 67 и 80 HV, респективно. Због Al_2O_3 ефекта очвршћавања честица површински слој конструктива је показао боља триболошка својстава у поређењу са коришћеном $A356-T6$ и узорцима без Al_2O_3 честица.

Ефекат наночестица титанијум оксида (TiO_2) процесом умешавања трењем на механичке и триболошке карактеристике легуре $A356$ истражили су Амедифард (*Ahmadifard*) и остали [55]. На средини радног комада направљен је жлеб који је затим испуњен ојачавајућим честицама просечне величине од 40 до 60 nm. На овај начин спречава се расипање честица из зоне умешавања трењем. Резултатима испитивања показали су да овај процес побољшава микротврдоћу и до 13% у односу на основну

легуру. Комбиновање ефеката овог процеса са равномерном расподелом наночестица TiO_2 може се побољшати тврдоћа и модул еластичности алуминијумских композита за око 52%, што је од 48 до 73 HV. Наноиндентацијом површине показали су да се нанотврдоћа и модул еластичности основног материјала могу побољшати за 10% и 6%, респективно. Док су се код алуминијумских композита нанотврдоћа и модул еластичности побољшали за 69% и 9% респективно, у односу на мерења код основног материјала.

Абаси (*Abbasi*) и остали су увели нову верзију методе *FSP* као методу за сједињавање наночестица са микроструктуром и обликовање површинских композита увођењем вибрација током обраде па одатле и сам назив методе обрада вибрационим трењем (*friction stir vibration processing, FSVP*) [53]. За експериментална испитивања коришћена је легура алуминијума *Al5052* дебљине 3 mm. Направљени површински жлебови, ширине 2 mm и дубине од 1,5 mm, су очишћени метанолом како би се уклонило уље и остаци. Жлеб на сваком примерку био је напуњен *SiC* наночестица просечне величине око 20 nm. Тежина праха за сваки примерак износила је 0,06 g. Анализиран је ефекат процеса умешавања трењем и процеса умешавања са вибрационим трењем на микроструктуру и механичка својства композита *Al5052*. Истраживањем су установили да присуство вибрација током процеса доводи до смањења величине зрна у зони мешања и повећава хомогеност расподеле честица. Резултати испитивања показују да су чврстоће и дуктилност обрађених узорака са умешавања трењем нижи од оних које се обрађују уз помоћ вибрација. Аутори тврде да је примена овог поступка прераде једноставна за примену и побољшава ефикасност процеса умешавања трењем.

Може се приметити да се током развоја нанокомпозита развијају и нове методе за њихову производњу са циљем постизања равномерне расподеле ојачавача у основи. Сваки нови поступак захтева одређене модификације у зависности од материјала основе и врсте ојачавача. Истраживачки рад везан за проналажење одговарајућег поступка за производњу нанокомпозита у смислу оправдане економичности, могућности примене за серијску производњу и постизање равномерне расподеле ојачавача у основи је у непрекидном развоју. Научници и истраживачи последњих година врше комбинацију различитих поступака како би остварили побољшања и то чине са више или мање успеха.

2.3. Преглед стања истраживања алуминијумских нанокомпозита у свету

У овом делу рада дат је преглед литературе металуршких и триболошких карактеристика нанокомпозита са алуминијумском основом. Анализирана су истраживања која су спроведена у условима клизања без подмазивања, у ваздуху и на собној температури. Разматране су чак и оне студије у којима нису били наведени сви услови испитивања (околина и његова температура), под претпоставком да су они изведени на собној температури. Преглед се даје кроз презентацију главних утицајних фактора као што су: материјал основе, врста, садржај и величина ојачавача и поступак производње. Поред тога, приказани су и услови испитивања и добијене вредности коефицијента трења и хабања, као и метода за карактеризацију материјала. Резултати су представљени табеларно. У табелама 2.1 и 2.2 дате су карактеристике нанокомпозита произведених поступком металургије праха [22, 56-66] и поступком ливења [67-78], респективно. У табели 2.3 дате су карактеристике нанокомпозита произведених поступком умешавања трењем [52, 54, 55, 79-83].

Табела 2.1 Триболошке особине нанокompозита са основом алуминијума произведених металургијом праха

Металургија праха				
Литература	[22]	[56]	[57]	[58]
Трибометар	Пин на диску	Пин на диску	Пин на диску	Пин на диску
Основа композита	Алуминијум (Al99,7)	2024 (AlCu4Mg1)	Алуминијум + 4,5 мас.% Cu	Алуминијум+ 12 мас.% Si
Ојачавач	Честице: Al ₂ O ₃ -AlB ₁₂	Честице: SiC + Gr	Честице: TiC	Честице: Al ₂ O ₃ ; TiO ₂ ; Al ₂ O ₃ + TiO ₂
Садржај ојачавача	5; 10 и 15 мас.%	5 мас.% SiC + 0; 5 и 10 мас.% Gr	0,5 – 7 мас.%	4 мас.% Al ₂ O ₃ ; 4 мас.% TiO ₂ ; 4 мас.% Al ₂ O ₃ + TiO ₂
Величина ојачавача	50 – 120 nm	SiC (100 nm); Gr (40 – 50 nm)	30 nm	Al ₂ O ₃ (50 nm); TiO ₂ (30 nm)
Контра-тело	Пин: AISI 52100 челик (780 HV)	Диск: EN31 челик	Диск: AISI 52100 челик (62 HRC)	Диск: челик (63 HRC)
Брзина клизања	0,08 m/s	1 m/s	200 min ⁻¹	0,078 mm/s
Оптерећење	5 – 20 N	10; 15; 20 и 25 N	10 и 20 N (0,13 и 0,25MPa)	5; 7,5; 10 и 12,5 N
Пут клизања	500 m	2500 m	1500 m	70 mm
Коеф. трења	0,30 – 0,55	/	≈ 0,3	/
Укупно хабање	0,02 – 0,14 mg/m	4,6 – 13,6 · 10 ⁻³ mg/m	2 – 25 · 10 ⁻³ mg/m	0,8 – 5,8 · 10 ⁻⁶ mg/m
Анализа	SEM; EDS; XRD	SEM; XRD	SEM; XRD	OM; SEM; AFM
Металургија праха				
Литература	[59]	[60]	[61]	[62]
Трибометар	Пин на диску	Пин на диску	Лопта-на-диску	Пин на диску
Основа композита	5083 (AlMg4,5Mn0,7)	6061 (AlMg1SiCu)	Al ₂ O ₃ нанопрах	Al 5252
Ојачавач	Честице: B ₄ C Влакна: CNT	Честице: Al ₂ O ₃ + TiC	Влакна: GNP + CNT	Честице: SiC
Садржај ојачавача	5 и 10 зар.% B ₄ C +5 зар.% CNT	2 мас.%	0,3 – 5 мас.% GNP + 0 и 1 мас.% CNT	2,1; 4,2 и 6 зар.%
Величина ојачавача	B ₄ C (5 μm); CNT (10 – 20 nm x 10 – 30 μm)	TiC (200 nm); Al ₂ O ₃ (40 – 50 nm)	GNP (6 – 8 nm × 5 μm); CNT (40 nm)	60 nm
Контра-тело	/	Диск: челик (62 HRC)	Лопта: Si ₃ N ₄	Диск: челик (62 HRC)
Брзина клизања	0,3 m/s	0,6; 0,9 и 1,2 m/s	10 mm/s	0,5 m/s
Оптерећење	10; 15 и 20 N	5; 7 и 10 N (0,6; 0,9 и 1,3 MPa)	5; 15; 25 и 35 N	15; 30 и 45 N (0,3; 0,6 и 0,9 MPa)
Пут клизања	500 m	1600 m	72 m	1000 m
Коеф. трења	0,5 – 0,9	0,26 – 0,33	0,40 – 0,65	≈ 0,35 – 0,8
Укупно хабање	0,024 – 1,1 mg/m	6 – 16 · 10 ⁻³ mm ³ /m	0,5 – 7,2 · 10 ⁻⁵ mm ³ /Nm	≈ 5,8 – 18 · 10 ⁻⁸ mm ³ /mmN
Анализа	SEM; EDS	SEM; EDS	SEM; XRD	SEM; EDS

Табела 2.1 Наставак

Металургија праха				
Литература	[63]	[64]	[65]	[66]
Трибометар	Пин на диску	Лопта на диску	Пин на плочи	Пин на диску
Основа композита	Алуминијум (A199,7)	Алуминијум (A199,5)	Алуминијум (A199,99)	Алуминијум (A199,9)
Ојачавач	Влакна: CNT	Честице: SiC	Честице: SiC	Честице: TiO ₂ + CuO
Садржај ојачавача	0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 mas.%	4 zap.%	0; 0,5; 1; 1,5; 3; 5 и 10 mas.%	2,5 mas.% TiO ₂ + 2,5 mas.% CuO
Величина ојачавача	20-30 nm x 3-8 μm	SiC (40 nm)	SiC (40 nm)	TiO ₂ (30 nm); CuO (40 nm)
Контра-тело	Диск: EN31 челик (59 HRC)	Лопта: волфрам карбид	Плоча: челик	Диск: 52100 челик (62 HRC)
Брзина клизања	0,5 m/s	0,06 m/s	0,246 m/s	350 min ⁻¹
Оптерећење	0,1 – 0,5 kg	2,5; 5 и 10 N	10 N	30 N
Пут клизања	300 m	100 m	884 m	200; 400; 600; 800 и 1000 m
Коефицијент трења	≈ 0,07 – 0,62	≈ 0,2 – 1,7	/	0,27 – 0,575
Укупно хабање	≈ 2 - 52 mm ³ /kgm	Траг хабања 0,02 – 0,4 mm	0,002 – 0,011 mm ³ /m	2,5610 – 5 mm ³
Анализа	SEM	SEM; EDS; XRD	SEM; XRD; EDS	XRD; SEM; EDS

Табела 2.2 Триболошке особине нанокмпозита са основом алуминијума произведених поступком ливења мешањем

Ливење мешањем				
Литература	[67]	[68]	[69]	[70]
Трибометар	Пин на диску	Пин на диску	Пин на диску	Пин на диску
Основа композита	AA6061	A16061	A16061	A356 (AlSi7Mg)
Ојачавач	Честице: Al ₂ O ₃ ; Gr; Si ₃ N ₄	Честице: Al ₂ O ₃	Честице: SiC; B ₄ C	Честице: TiB ₂ ; TiO ₂
Садржај ојачавача	5 – 45 mas.%	1; 2 и 3 mas.%	SiC (0,5 и 1,5 mas.%); B ₄ C (1,5 mas.%)	0,5; 1,5; 3 и 5 zap.%
Величина ојачавача	Si ₃ N ₄ (50 nm)	/	SiC и B ₄ C (50 nm)	TiB ₂ (20 nm); TiO ₂ (20 nm)
Контра-тело	Диск: челик EN31	Диск: челик	Диск: челик	Пин: 100Cr6 челик (62 HRC)
Брзина клизања	1; 2 и 4 m/s	1,6 и 2,5 m/s	100; 300 и 500 min ⁻¹	1,5 m/s
Оптерећење	10; 20 и 30 N	10 и 20 N	10; 20 и 30 N	10 – 40 N (0,13 – 0,53 MPa)
Пут клизања	600 и 1000 m	1500 m	1000; 1500 и 2000 m	500 m
Коеф. трења	0,35 – 0,53	/	≈ 0,19 – 0,42	0,37 – 0,87
Укупно хабање	1,66 – 53 mg/km	0,768 – 3,997 · 10 ⁻³ mm ³ /m	≈ 2 – 13 · 10 ⁻³ mm ³ /m	2,7 – 5,3 · 10 ⁻³ mm ³ /m
Анализа	FESEM, EDS	/	FESEM, EDS, XRD	SEM, XRD

Табела 2.2 Наставак

Ливење мешањем				
Литература	[71]	[72]	[73]	[74]
Трибометар	Сфера на диску	Пин на диску	Пин на диску	Пин на диску
Основа композита	Алуминијум	7075 (AlZn5.56MgCu)	Al 6061	Al 7075
Ојачавач	Честице: $TiB_2 + Al_2O_3$	Честице: $Al_2O_3; SiC$	Честице: SiC	Честице: $Al_2O_3; SiC$
Садржај ојачавача	1 mas.% TiB_2 + 1 mas.% Al_2O_3	0,5; 1 и 1,5 mas.%	1,2 mas.%	2 mas.% Al_2O_3 ; 4 mas.% SiC
Величина ојачавача	TiB_2 (8 – 20 nm); Al_2O_3 (50 – 150 nm)	Al_2O_3 (40 – 45 nm); SiC (40 – 45 nm)	50 nm	Al_2O_3 (30 – 50 nm); SiC (5 – 10 μ m)
Контра-тело	Диск: SAE 440 нерђајући челик	/	Диск: челик (62 HRC)	Диск: челик EN 32
Брзина клизања	25 mm/s	1,5; 2,25 и 3 m/s	0,5 m/s	0,75 и 1,5 m/s
Оптерећење	700 МПа	35, 55 и 75 N	10; 20; 30 и 40 N	10; 20 и 30 N
Пут клизања	1500 m	1500; 2500 и 3500 m	1000 m	1000 m
Коеф. трења	0,36 – 0,38	/	$0,531 \pm 0,042$ $0,312 \pm 0,051$	/
Укупно хабање	$1,7 - 2,9 \cdot 10^{-6}$ mm^3/Nm	$1,3 - 5,2 \cdot 10^{-9}$ mm^3/m	$1,5 - 4,4 \cdot 10^{-3}$ g/Nm	$\approx 0,25 - 2,7 \cdot 10^{-3}$ g
Анализа	SEM, EDS, XRD, TEM	SEM	FESEM; EDS	/
Ливење мешањем/ Реактивно ливење / Поступак ливење гњечењем				
Литература	[75]	[76]	[77]	[78]
Трибометар	Пин на диску	Пин на диску	Пин на диску	Пин на диску
Основа композита	AA 2219	Al 6061	Алуминијум (Al99,3)	A356 (AlSi7Mg)
Ојачавач	Честице: $B_4C; MoS_2$	Честице: $TiC; Gr$	Честице: $Ti+Ni+W/TiCN/ W-C$	Влакна: $Gr + Al_2O_3$
Садржај ојачавача	2 mas.% B_4C ; 2 mas.% MoS_2	3 mas.% TiC ; 10 mas.% Gr	3 mas.% Ti + 3 mas.% Ni + 0,25 mas.% W 0,25 mas.% $TiCN$ 0,25 mas.% $W-C$	10; 15 и 20 zap.%
Величина ојачавача	B_4C (30 – 60 nm); MoS_2 (600 – 900 nm)	TiC (53nm); Gr (27 μ m)	Ti (100 μ m); Ni (20 μ m); W (50 nm); $TiCN$ и $W-C$ (30 nm);	Gr (0,05 \times 10 μ m); Al_2O_3 (3 \times 120 μ m)
Контра-тело	Диск: EN 31 челик (62 HRC)	Диск: челик	Диск: EN C45 челик	Диск: SUS 304 нерђајући челик
Брзина клизања	0,942 – 4,713 m/s	1,5 – 4,5 m/s	0,39 m/s	240; 360 и 480 min^{-1}
Оптерећење	10 – 50 N	40; 60 и 80 N	18 – 60 N	10; 30 и 50 N
Пут клизања	500 – 1500 m	/	350 m	1000; 3000 и 5000 m
Коеф. трења	/	/	/	0,52 – 0,62
Укупно хабање	$0,202 - 6,03 \cdot 10^{-3}$ mm^3/Nm	$\approx 1 - 1,8 \cdot 10^{-6}$ g/Nm	$4 - 37 \cdot 10^{-3}$ mm^3/m	$8 - 50 \cdot 10^{-6}$ mg/m
Анализа	XRD; SEM; EDS	SEM; EDS	SEM	SEM; EDS

Табела 2.3 Триболошке особине наноконтрозита са основом алуминијума произведених процесом умешавања трењем

Процес умешавања трењем				
Литература	[52]	[79]	[80]	[81]
Трибометар	Цилиндрични ротациони алат	Лопта-на-диску	Пин на диску	Пин на диску
Основа композита	A6061 (AlMg1SiCu)	A6061 (AlMg1SiCu)	8026	5083 (AlMg4,5Mn0,7)
Ојачавач	Честице: Cr + Al ₂ O ₃	Честице: Gr; G Влакна: CNT;	Честице: TiB ₂ ; Al ₂ O ₃ ; TiB ₂ + Al ₂ O ₃	Честице: Al ₂ O ₃ + Gr
Садржај ојачавача	/	/	40/60 мас. % TiB ₂ /Al ₂ O ₃	/
Величина ојачавача	50 nm	Gr (16 μm); CNT (30 – 50 nm × 10 – 20 μm); G (15 nm × 15 μm)	TiB ₂ (5 μm); Al ₂ O ₃ (70 nm)	Al ₂ O ₃ (80 nm); Gr (10 – 50 μm)
Контра-тело	Цилиндар: AISI 52100 челик	Лопта: Нерђајући челик	Диск: челик (60 HRC)	Диск: AISI 52100 челик (58 – 60 HRC)
Брзина клизања	0,14 m/s	0,5 mm/s	0,5 m/s	0,24 m/s
Оптерећење	10 N	5 N	15 N (0,37 МПа)	24,8 N
Пут клизања	1000 m	1 m	1200 m	950 m
Коефицијент трења	0,17	0,30 – 0,53	/	0,18 – 0,37
Укупно хабање	0,005 – 0,01 mg/m	3 – 8 · 10 ⁻⁵ mm ³ /m	2,0 – 6,8 · 10 ⁻³ mg/m	4,8 – 8,5 · 10 ⁻² mg/m
Анализа	SEM; EDS; XRD; TEM	SEM; EDS; XRD; TEM	OM; SEM; TEM	SEM
Процес умешавања трењем				
Литература	[54]	[55]	[82]	[83]
Трибометар	Пин на диску	Пин на диску	Пин на диску	Пин на диску
Основа композита	A356	A356	Al5083	A6061
Ојачавач	Честице: Al ₂ O ₃	Честице: TiO ₂	Честице: Al ₂ O ₃ + TiO ₂	Честице: Al ₂ O ₃
Садржај ојачавача	5 зар. %	/	25% Al ₂ O ₃ и 75% TiO ₂	15,36 зар. %
Величина ојачавача	50 – 100 μm; 20 – 40 nm	40 – 60 nm	Al ₂ O ₃ (80 nm); TiO ₂ (15 nm)	15 nm
Контра-тело	Пин: AISI 52100 челик (63 HRC)	Пин: AISI 52100 челик (63 HRC)	Диск: челик (58 HRC)	Пин: челик
Брзина клизања	0,14 m/s	0,2 m/s	1 m/s	0,07 mm/s
Оптерећење	10 N	10 N	20 N	15 N
Пут клизања	20 – 500 m	500 m	500 m	/
Коеф. трења	0,29	≈ 0,55 – 0,9	0,33 – 0,6	≈ 0,3 – 0,7
Укупно хабање	≈ 34,4 – 200 · 10 ³ mg/m	0,06 – 0,20 mg/m	0,28 – 0,58 mg/m	≈ 4,1 · 7,5 mg
Анализа	SEM; XRD; OM	OM; FESEM; EDS	SEM	SEM

Утицај на резултате има више фактора. Као металуршки фактори могу се посматрати врста ојачавача, његова величина и садржај у композиту, па све до начина производње који битно утиче на нанокompозит. Триболошке карактеристике зависе од врсте трибометра на ком је рађено испитивање (пин на диску, лопта на диску, ...) и услова под којим је испитивање извршено. Брзина клизања, врста контакта, смер клизања, избор контра тела и слично, разликују се од испитивања до испитивања и прилагођене су условима експлоатације нанокompозита. Већина ових испитивања је везана за индустрију па су подаци, или бар део њих, индустријска тајна. Зато је само долажење до података и њихова анализа изузетно отежана.

На пример, брзине клизања су биле у опсегу од 1 mm/s до неколико m/s, а примењена оптерећења од 0,1 МПа до неколико стотина МПа, а познато је да коефицијент трења и посебно хабање веома зависе од ових услова. Представљање услова и резултата тестирања је било униформно колико је то било могуће урадити.

Већина студија је спроведена од стране аутора из Индије и Ирана, а најчешћи коришћени процес за производњу нанокompозита је металургија праха. Ојачавачи у облику честица много су чешће коришћени од других врста ојачавача зато што је у већини случајева њихова производња јефтинија. Међу ојачавачима су превладале керамичке честице као што су Al_2O_3 , SiC , TiO_2 , TiB_2 и титанијум карбид (TiC), али су коришћени и графит и неки нови ојачавачи, као што су графен (G) и угљенична нановлакна (CNT).

Количина коришћених керамичких наночестица најчешће је била до 5%, али постоје и студије које су у својим истраживањима користиле и до 10% садржаја наночестица. Наведене количине су мање од количина које се користе код ојачавача на микронивоу, а оне могу имати вредност и до 20% [21, 34].

У већини триболошких истраживања, геометрија узорака и тип контакта су били равни и површински контакт, што указује на могуће примене ових материјала. Линијски и тачкасти контакти нису препоручљиви зато што у тим случајевима постоји могућност да контакт буде у подручју где нема наночестица (или са смањеном количином), посебно ако честице нису добро распоређене по површини.

Као стандардне методе за анализу и карактеризацију материјала коришћени су *SEM* и енергетско дисперзивна спектроскопија (*Energy Dispersive Spectroscopy, EDS*). Ове методе се користе и код микрокомпозита. Од новијих метода коришћен је трансмисијско електронска микроскопија (*Transmission Electron Microscopy, TEM*) због његових могућности да боље прикаже дешавања на нанонивоу.

Вредности коефицијента трења које су добијене у различитим истраживањима лакше су упоредиве од вредности хабања. Коефицијент трења је у условима без подмазивања мање зависан од услова испитивања као што су нормално оптерећење и брзина клизања. Вредност коефицијента трења је углавном била у распону од 0,2 до 0,6. Са повећањем оптерећења коефицијент трења у највећем броју случајева остаје исти [57, 60, 61, 78], али се могу јавити и случајеви када се он повећава [59] или опада [70]. Исто се дешава и са променом брзине клизања, тачније њеним повећањем, коефицијент трења је више или мање константан [60, 78]. Ово је у складу са класичном теоријом за понашање метала у условима клизања без подмазивања, која каже да је коефицијент трења независан од нормалног оптерећења и брзине клизања.

Повећање количине тврдих честица/ојачавача влакнима није значајно утицало на коефицијент трења, тако да је коефицијент остајао углавном константан [22, 78]. Само се у ретким случајевима повећава [70] или се благо смањује [59]. Овакво понашање

нанокомпозита није у корелацији са понашањем микрокомпозита, зато што се повећањем количине тврдох ојачавача у микрокомпозиту смањује коефицијент трења [84]. У микрокомпозиту се смањење коефицијента трења јавља са количинама већим од 15 до 20%, што би то могло бити објашњење овог феномена, јер је у анализираним нанокомпозитима количина тврдох ојачања била мања. С друге стране, утицај додавања графита/графена био је у корелацији са понашањем микрокомпозита [85] и додавање графита/графена смањило је коефицијент трења основне легуре [61, 79, 81].

Анализа резултата хабања је тешка и готово немогућа зато што су, нажалост, различити аутори водили истраживања под различитим условима. Такође, вредности хабања су често представљене на другачији начин, преко масе похабаног материјала, интензитета хабања или специфичног интензитета хабања. Могуће решење за поређење резултата била би конструкција мапа механизма хабања [86], као што је то случај са алуминијумским микрокомпозитима [87, 88].

Повећање нормалног оптерећења изазвало је веће хабање за сва анализирана истраживања [22, 56-61, 70, 72, 77, 78], што је било очекивано, а и у складу је са теоријом. С друге стране, не постоји опште правило како брзина клизања утиче на вредност хабања, то јест веће брзине клизања су повезане са благим повећањем [60] вредности хабања, његовим смањењем [72], или нису показале значајан утицај на вредност хабања [78].

Са повећањем количине тврдох честица/ојачања влакана, вредност хабања се углавном смањила [22, 57, 59, 61, 89], како се могло и очекивати и то је у корелацији са понашањем микрокомпозита [84], иако је било случајева када се хабање повећало [69, 70] или је више или мање константно [72]. Повећање вредности хабања може се приписати већој порозности [70], или одсуству ефекта подмазивања честица графита које су такође додате нанокомпозиту [81]. Генерално се може рећи да, почетно додавање графита/графена смањује вредност хабања основне легуре [56, 61, 76, 79], а даљим повећањем графита/графена овај ефекат је мање очигледан. Ово је такође у корелацији са понашањем микрокомпозита [84].

Још је теже направити преглед механичких карактеристика нанокомпозита са алуминијумском основом независно од начина приказа резултата (табеларно или дијаграмски). Литературни преглед механичких карактеристика биће представљен у поглављу резултати, као поређење резултата добијених у овој докторској дисертацији са резултатима других истраживања.

2.4. Примена алуминијумских нанокомпозита у индустрији

Потреба за напретком у индустрији је стална мотивација за истраживаче да усредсреде своја истраживања на развој и производњу материјала што бољих карактеристика. Глобална потреба за исплативим и прихватљивим квалитетним материјалима добрих особина довела је до промене у истраживању па се уместо монолитних сада развијају макро/микро и нанокомпозитни материјали. Ови материјали имају потенцијал да замене конвенционалне материјале у разним областима инжењерства (код израде машинских елемената, медицинских уређаја...) и у многим гранама индустрије почев од аутомобилске, авионске, војне, поморске, процесне, хемијске, транспортне и друге [90].

Лаки метали као што су алуминијум, магнезијум, бакар и њихове легуре најчешће су коришћени основни материјали у производњи композитних материјала. Добро је познато да су особине ових материјала повезане са величином, масеним уделом ојачавача, као и природом интерфејса између основе и ојачавача. Примена наночестица у композитима са металном основом привукла је пажњу истраживача због својих добрих физичких и хемијских особина, изотропности, као и мањих трошкова производње [7, 91].

Анализом досадашњих истраживања примећено је да се користи широк спектар различитих честица у алуминијумској основи композита. Главна предност употребе ојачавача на нанонивоу је у томе што се много боља својства могу постићи са мањим масеним садржајем ојачавача у односу на ојачаваче на микронивоу [32, 33]. Предности примене алуминијумских нанокompозита огледају се кроз побољшање следећих карактеристика: мала тежина, већа економичност, мањи ниво буке услед смањене тежине возила, смањена емисија штетних честица у атмосфери услед смањења потрошње горива, одлична комбинација механичких и триболошких карактеристика.

Примена алуминијумских легура у аутомобилској индустрији годинама се повећава. Делови који се израђују на бази алуминијумске легуре су: клипови, цилиндарске главе (глава мотора), блокови мотора, наплатци, усисне гране, клипњача, брегасте осовине, карданска вратила, елисе хеликоптера и израда кочионих дискова и добоша код аутомобила и возова [92, 93]. Употреба алуминијумских одливака у пољу аутомобилске индустрије праћена је развојем процеса ливења и термичке обраде. Велики напори се улажу у циљу унапређења механичких и триболошких карактеристика контролом микроструктуре, тачније унапређењем поступака добијања композита, третирањем металног растопа и термичком обрадом [4, 5, 15].

Прва примена нанокompозита у аутомобилској индустрији била је производња поклопца зупчато каишног преносника као дела мотора аутомобила Тојота Кемри (*Toyota Camry*) 1991. године [94]. Примена полимерних нанокompозита је присутна и код осталих делова аутомобила, као што су: поклопац мотора, црева за гориво, вентили за гориво, оквири врата, наслони седишта и тако даље. Употреба лаких материјала за производњу аутомобилских компоненти утиче на смањење тежине возила која изазива смањење потрошње горива, а самим тим и на емисију штетних гасова [95].

Интензивна истраживања нанокompозита са металном основом указују на потенцијалну примену код делова аутомобила, као што су: прстен клипа, клип, клипњача, кочиони дискови и добош кочице, брегаста осовина вратила и вентили [46, 96-101]. У наставку текста дат је кратак осврт на ова истраживања како би биле приказане комбинације материјала основе и наноојачавача за производњу нанокompозита код захтевних делова у аутомобилској индустрији.

Тирувнкадм (*Tiruvenkadam*) и остали су извршили испитивање хибридног алуминијумског нанокompозита и његову примену код цилиндра мотора анализирајући перформансе, сагоревање и емисионе карактеристике мотора. Циљ овог истраживања је био да клип од ливеног челика замене композитом. Произвели су хибридни композит са основом $Al6061$ и наноојачавачима цирконијум диоксид (ZrO_2), SiC и графит (Gr) са величином од 100 nm, 220 μm и 100 μm , респективно. Масени удео сваког ојачавача је износио 2,25 мас.%. Закључили су да је изабрана основа са комбинацијом ојачавача погодна за израду цилиндра на основу механичких и термичких својстава. Уочили су да је остварена хомогена структура материјала према спроведеној *SEM* анализи. Закључили су да се заменом материјала утиче на побољшање у виду смањења притиска у цилиндру, повећања ослобађања топлоте и смањења температуре издувних гасова. Додатно, се смањила емисија угљен монооксида, несагорелих угљеводоника и емисија дима, али је повећана емисија оксида азота [96].

Кавалио (*Carvalho*) и остали произвели су хибридни наноккомпозит са алуминијумском основом и ојачавачем *CNT* за израду клипног прстена [97]. Произведени су композити са различитим садржајем *CNT* помоћу методе металургије праха. Највећу отпорност на хабање имали су композити ојачани са 6 мас.% *CNT*, али се код њих јавио недостатак у виду механичких својстава. Због најбољег односа између механичких и триболошких својстава за производњу клипног прстена изабрали су наноккомпозит са садржајем ојачавача од 2 мас.% *CNT*.

Испитивање механичких и триболошких карактеристика наноккомпозита за израду клипњача извршили су Рамачандра (*Ramachandra*) и остали [98]. Наноккомпозит се састоји од алуминијумске легуре и ојачавача наночестица ZrO_2 величине 25 nm, добијеног методом металургије праха. Испитивање отпорности на хабање извршили су помоћу трибометра са контактном геометријом пин на диску. Анализом резултата закључили су да наноккомпозит има већу тврдоћу у односу на материјал основе, а уједно је повећана отпорност на хабање наноккомпозита.

Алуминијумски наноккомпозит са основом *A356* и ојачавачима *CNT* се може применити за израду кочионих дискова и добоша. Сандарам (*Sundaram*) и Махамани (*Mahamani*) су произвели овакав наноккомпозит помоћу методе ливења уз мешање [99]. Триболошка испитивања су извршили на трибометру са контактном геометријом пин на диску. Анализирањем резултата микротврдоће показали су да се са повећањем садржаја ојачавача (од 2 до 8 зар.%) у основној легури повећава тврдоћа наноккомпозита. Установили су да најбоље механичке карактеристике поседује наноккомпозит са 8 зар.% *CNT* чија је вредност микротврдоће већа у поређењу са микротврдоћом сивог лива који је конвенционални материјал за израду кочионих дискова. Анализиран наноккомпозит поседује мањи интензитет хабања и коефицијент трења који се убрајају у повољне триболошке карактеристике материјала кочионог диска. Повећање тврдоће наноккомпозита са повећањем вредности ојачавача у алуминијумској основи установили су и Рана (*Rana*) и остали [100]. Они су вршили испитивање наноккомпозита са *SiC* ојачавачима који се користи за израду брегасте осовине. Поступком ливења произвели су наноккомпозите са масеним садржајем ојачавача од 1 до 4 мас.% *SiC* са величином честица од 40 nm у *Al* основи. До побољшања механичких и триболошких карактеристика алуминијумских наноккомпозита дошли су и Мјули (*Muley*) и остали [46]. *LM6* легуру су ојачали наноојачавачима *SiC* и Al_2O_3 у односима 0,5; 1,0; 1,5 и 2 мас.% применом поступка ливење уз мешање. На основу добијених резултата закључили су да се такав композит може применити у аутомобилској индустрији за израду кочионих дискова.

Преглед примене хибридни наноккомпозита са алуминијумским основама *A356* и *Al7075* у аутомобилској индустрији дали су Данабал (*Dhanabal*) и остали [101]. Приказали су коришћење различитих типова наноојачавача, као и различите поступке за добијање наноккомпозита, тачније ливење уз мешање и ливење под притиском. Истраживањем карактеристика произведених материјала дошли су до закључака који ојачавачи наноккомпозита поседују најбоље карактеристике за израду следећих делова: клипа $SiC-Al_2O_3$, Al_2O_3 , *TiC*, *Gr*, молибден дисулфид (MoS_2), клипног прстена Al_2O_3-Gr , добош кочице TiB_2-SiC , вратило *SiC*, брегаста осовина $SiC-CNT$, Al_2O_3-TiC и вентили Al_2O_3 .

Истраживање карактеристика алуминијумских наноккомпозита са ојачавачима Al_2O_3 и *SiC* за израду цилиндра мотора извршили су Дарнли (*Dearnley*) и остали [102]. Ојачавачи величина мањих од 100 nm наносени су на зид цилиндра применом две методе и то плазма прскањем и магнетним наносењем. Упоредили су резултате тврдоће зида цилиндра после оба примењена поступка и дошли до закључка да је тврдоћа

цилиндра већа после поступка наношења нанокompозита у поређењу са тврдоћом саме основе.

Алуминијумски нанокompозити са комбинацијом ојачавача бор карбидом (B_4C) и SiC [103], као и ојачавачима силицијум диоксидом (SiO_2), SiC и TiO_2 [104] се испитују како би били примењени за израду вратила, зупчаника, појединих делова ракета, делова авиона, делова аутомобила. У наведеним радовима истраживачи су закључили да новонастали нанокompозити поседују добре механичке и триболошке карактеристике, много боље у односу на основни материјал и да се може користити као замена за челик јер може поднети велика ударна оптерећења [103, 104].

Испитивања нанокompозита са алуминијумском основом за израду зупчаника редуктора велике прецизности је извршио Реди (*Reddy*) [105]. Циљ његовог истраживања био је да се смање бука и вибрације самог редуктора заменом зупчаника, а тим се утицало и на масу целог редуктора. За основу композита је изабрана легура алуминијума 7020, док су за ојачаваче коришћене наночестице Al_2O_3 . Одливак нанокompозита је добијен методом ливења, а затим је обрађен како би се добио зупчаник одговарајућих димензија. Анализом вибрација доказали су да зупчаник направљен од нанокompозита има мањи ниво буке и вибрације него зупчаник направљен од челика и легуре бакра.

Главни разлози за пораст потражње нанокompозита је повећана производња аутомобила и потражња за лаким материјалима. Очекује се да ће се њихова примена у структурним и погонским деловима повећати јер композити делују као добра замена за конвенционалне металне делове. Велики значај се даје смањењу тежине возила управо због побољшања економичности потрошње горива, побољшања перформанси возила и смањења емисије штетних гасова па се у наредним годинама предвиђа повећање потражње и примене нанокompозита како у аутомобилској тако и у другим гранама индустрије [95].

Последњих година, истраживања су показала да се наночестице могу наћи у води, ваздуху, земљишту и самим тим у телима животиња и људи. Опште је познато да су наночестице нуспродукти сагоревања нафте и других једињења угљоводоника, при заваривању и у издувним гасовима. Ови резултати су довели до дебате о токсичности и утицају нанокompозита на животну средину. Наночестице у људско тело доспевају удисањем, апсорпцијом преко коже и гутањем. Болести које се могу јавити су запаљење дисајних путева, бронхитис, астма, карцином плућа, неуродегенеративне болести, кардиоваскуларне болести, карцином јетре, Паркинсонова болест, Алцхајмерова болест, Кронова болест и друге. Због свих ових опасности треба посветити доста пажње заштити људи и животне средине током израде, транспорта, руковања, употребе, одлагања отпада и рециклаже делова и машина које у себи имају нанокompозите [16, 95, 106].

Истраживања у оквиру ове дисертације усмерена су на алуминијумске нанокompозите ојачане честицама SiC и Al_2O_3 . У прегледу литературе, уочена је потенцијална примена нанокompозита са ојачавачима SiC и Al_2O_3 за израду брегастих осовина, кочионих дискова, вратила, вентила, цилиндра мотора и зупчаника. Такође, 2017. године када су произведени испитивани нанокompозити установљено је да не постоје истраживања нанокompозита који у свом саставу имају мали садржај ојачавача, као ни испитивања триболошких карактеристика у условима подмазивања.

3. ТЕХНОЛОГИЈА ДОБИЈАЊА И ФИЗИЧКО МЕХАНИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ИСПИТИВАНИХ МАТЕРИЈАЛА

Основни проблеми који се јављају при производњи нанокompозита произилазе из чињенице да наночестице теже груписању у кластере због њихове лоше квашливости у растопима основних легура. Керамичке наночестице, независно од врсте и величине, показују тенденцију формирања кластера коју је веома тешко избећи током процеса њиховог додавања у металне растопе. Образовање кластера неповољно утичу на својства нанокompозита. Превазилажење овог недостатка од великог је значаја, па се последњих година интензивно ради на проналажењу адекватног поступка и одређивању оптималних вредности параметара за производњу нанокompозита. Могуће је комбиновање различитих поступака за развој нанокompозита у циљу добијања хомогене дисперзије наночестица у металној основи [47, 49, 107].

Основни задатак ове докторске дисертације јесте триболошка карактеризација алуминијумских нанокompозита произведених модификованим поступком и избор нанокompозита за израду триболошких елемената са оптималним карактеристикама применом статистичких метода. На слици 3.1 је приказана шема испитивања по којој је изведено истраживање у овој дисертацији.



Слика 3.1 Алгоритам истраживања

3.1. Поступак производње алуминијумских нанокompозита

3.1.1. Избор основе, ојачавача и поступка производње нанокompозита

Алуминијумска легура *A356* је изабрана за основу нанокompозита. Ова легура има добру ливкост и поседује добре механичке особине, велику жилавост, отпорност на корозију и притисак. Алуминијумске легуре са силицијумом као основним легирајућим елементом нашле су велику индустријску примену. Због поседовања ових карактеристика користе се за израду различитих елемената и делова, као што су: одливци у ваздухопловној индустрији, делови машина, делови шасија камиона, компоненте авиона и ракета и другим конструкционим деловима који захтевају високу чврстоћу. Добре механичке карактеристике омогућавају лакшу машинску обраду и добру заварљивост. Према садржају силицијума разликују се подеутектичке (8-10% *Si*), еутектичке (11-13% *Si*) и надеутектичке (17-24% *Si*) легуре [108].

Основни материјал за производњу нанокompозита је подеутектичка *Al-Si* легура EN *AlSi7Mg0,3*. Хемијски састав коришћене легуре је дат у табели 3.1. Њене механичке карактеристике се побољшавају применом термичке обраде, посебно *T6* поступком.

Табела 3.1 Хемијски састав *A356* легуре [109]

Хемијски елемент	<i>Si</i>	<i>Cu</i>	<i>Mg</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Zn</i>	<i>Ni</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i>
Процентуални удео (mas.%)	7,20	0,02	0,25	0,01	0,18	0,01	0,02	0,11	Остатак

Термичка обрада одливака специфичан је процес и захтева његово прецизно извођење јер су одливци осетљиви на услове обраде. Избор врсте термичке обраде зависи од природе легуре. Термичком обрадом називају се процеси који се састоје од загревања одливка до критичних температура, држање на тој температури одређено време, а затим хлађење тачно дефинисаним начином и брзином. Да би се остварили одговарајући циљеви потребно је дефинисати режиме термичке обраде на основу полазних карактеристика одливака и жељених механичких карактеристика које одливак треба да испуњава по завршетку термичке обраде [108].

Примена термичке обраде на *A356* легуру, као и на нанокompозите којима је *A356* основа, подразумева растворно жарење у трајању од 8 h на температури од 525 °C, затим каљење у води температуре 30 °C до собне температуре. Потом следи природно старење од 5 h на ваздуху или вештачко старење (преципитација), у трајању од 8 h на температури од 165 °C. Циљ примене термичке обраде је: повећање тврдоће и смањење жилавости, те добијање оптималне комбинације чврстоће и жилавости и уклањање заосталих напона.

Жељени нанокompозит добијен је применом следећих поступака. Пре компокастинг поступка, урађен је пред поступак - механичко легирање честица струготине, добијених стругарском обрадом шипки од *A356* легуре, са наночестицама ојачавача. За производњу су коришћени различити масени садржаји (0,2; 0,3 и 0,5 mas.%) и величине ојачавача Al_2O_3 честица од 20-30 nm и 100 nm, као и ојачавача *SiC* честица величина око 50 nm. Наночестице се пре поступка легирања испирају у етил алкохолу и загревају на температуру до 400 °C са циљем ослобађања од евентуалних хемијских нечистоћа и влаге. Струготина *A356* легуре се испира у трихлоретилену, а затим у етил алкохолу ради одмашћивања. Примењено је механичко легирање које се разликује од

претходних код којих су се микропрахови метала (*Al*, *Cu*, *Mg*) и прах наноојачавача сједињавали, а затим се механички уситњавали.

3.1.2. Механичко легирање

Применом механичког легирања наночестица ојачавача пре њихове инфилтрације у полуочврсли растоп *A356* легуре смањује се постојање већих кластера током компокастинг поступка [110]. Механичким легирањем долази до хладног заваривања наночестица на површину честица струготине уз њихово истовремено уситњавање. Тако се добија смеша микронске величине. Током инфилтрације и накнадног мешања при компокастинг поступку, долази до отапања честица струготине и наночестице остају у маси основе. На тај начин добија се боља расподела честица у растопу основне легуре. Механичко легирање се изводи помоћу миксера *Turbula Type 2TC Mixer* са тродимензионалним ексцентричним кретањем при брзини од 500 min^{-1} . У радни простор уређаја уноси се посуда од нерђајућег челика у коју се додаје тачно дефинисана количина струготина, праха ојачавача за сваку од коришћених врста и величина прахова. Додају се и куглице од алумине пречника од 10-14 mm у односу 60:40 и у тежинској размери 5:1 у односу на количину струготина и праха. Време трајања овог поступка је 60 минута за сваку фракцију струготина-нанопрахови смеша.

3.1.3. Тиксокастинг поступак

Примењена варијанта тиксокастинг поступка састоји се из две фазе. Прва фаза је механичко мешање полуочврслог растопа *A356* легуре у интервалу између солидус и ликвидус температуре (област полуочврслог стања), а друга фаза је топло пресовање узорака ради смањења порозности. Прва фаза тиксокастинг поступка врши се помоћу апаратуре која је претходно описана [109]. Легура *A356* се топи у електро отпорној пећи и прегрева на $650 \text{ }^\circ\text{C}$ ради чишћења шљаке. Растоп се хлади у пећи (брзина хлађења $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$) до температуре $620 \text{ }^\circ\text{C}$. На овој температури почиње мешање брзином од 500 min^{-1} , које траје 2 минута. Ово мешање има за циљ хомогенизацију полуочврслог растопа легуре. Растоп се затим уз исту брзину мешања, хлади у пећи до планиране радне температуре од $610 \text{ }^\circ\text{C}$ која је одржавана константном ($610 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$) помоћу регулатора до краја мешања. По достизању жељене температуре, брзина мешања полуочврслог растопа *A356* легуре повећава се на 600 min^{-1} . Изотермско мешање траје 10 минута. Полуочврсли растоп се излива у челичну кокилу претходно загрејану на $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Добијени одливци су димензија $30 \text{ mm} \cdot 20 \text{ mm} \cdot 120 \text{ mm}$. Од одливака се машински праве узорци димензија $30 \text{ mm} \cdot 20 \text{ mm} \cdot 5 \text{ mm}$, који се подвргавају топлом пресовању. Топло пресовање врши се помоћу алата од специјалног топлоотпорног челика на температури од $470 \text{ }^\circ\text{C}$. Притисак пресовања је 250 МПа. Добијени узорци су димензија $30 \text{ mm} \cdot 17 \text{ mm} \cdot 6 \text{ mm}$.

3.1.4. Компокастинг поступак

Компокастинг поступак се изводи на лабораторијском нивоу применом апаратуре која је детаљно описана у техничком решењу [109]. Применом компокастинг поступка добија се серија нанокомпозита са основом од *A356* легуре:

- *A356* + 0,2; 0,3; и 0,5 % *SiC*, величине око 50 nm;
- *A356* + 0,2; 0,3; и 0,5 % *Al₂O₃*, величине 20-30 nm;
- *A356* + 0,2; 0,3; и 0,5 % *Al₂O₃*, величине око 100 nm.

Компокастинг поступак се састоји од две фазе. Прва фаза се изводи применом исте апаратуре, као код тиксокастинг поступка. Састоји се од примене полуочврслог растопа, инфилтрације наночестица ојачавача, изотермског мешања полуочврслог растопа композита и изливања у предгрејану челичну кокилу. Због жеље да се упореде структурне и механичке особине добијених материјала процес је извођен са истим параметрима процеса независно од садржаја и врсте ојачавача. У другој фази врши се топло пресовање узорака ради смањења порозности.

Припрема растопа до инфилтрације, механички легираног шпона А356 легуре наночестицама, иста је као у случају тиксокастинг поступка, све до достизања температуре од 620 °С. После тога се, без промене температуре, смањује брзина мешања на 250 min⁻¹ и вршена је инфилтрација млевене смеше, у трајању од 3 минута, а независно од масених садржаја наночестица. По завршеној инфилтрацији врши се кратко изотермско, хомогенизационо мешање полуочврсле композитне масе у трајању од 3 минута при брзини обртаја мешача од 500 min⁻¹. Затим се врши смањивање температуре брзином од 5 °С/min до постизања радне температуре од 610 °С. По достизању ове температуре, брзина мешања је повећана на 600 min⁻¹. У изотермском режиму и без промене брзине, врши се мешање у трајању од 15 минута. Изливањем у предгрејану (на 500 °С) челичну кокилу добијају се одливци нанокомпозита димензија 30 mm · 20 mm · 120 mm. Из овако добијених одливака механички се израђују узорци мањих димензија (30 mm · 20 mm · 5 mm), који се потом подвргавају топлом пресовању. Користе се исти параметри топлот пресовања и добијају узорци истих димензија, као у случају тиксокастинг поступка.

Термичка обрада добијених узорака се врши по Т6 режиму који се састоји од 5 h растварајућег загревања на температури од 540 °С, са накнадним каљењем у води. Касније се врши вештачко старење које се састоји од загревања узорака на 160 °С у трајању од 6 h и каљења у води [110].

3.2. Одређивање карактеристика храпавости контактних површина

3.2.1. Основни појмови и дефиниције храпавости контактне површине

Квалитет обрађене површине у великој мери утиче на експлоатациона својства и на радни век машинских делова. Површинска храпавост функционалних површина машинског елемента је тачно дефинисана на цртежу и у корелацији је са облашћу његове примене. Опште је познато да активна површина машинских елемената по завршеној обради никад није апсолутно глатка. Бројне неравнине настале су као резултат претходних и завршних обрада. Оне могу имати различите геометријске параметре и изазвати веће или мање неправилности у раду машинских елемената. Облик, висина и правац простирања неравнина на обрађеној површини зависи од више фактора, од којих су најважнији: режим обраде, услови хлађења, подмазивање алата за резање, хемијски састав и микроструктура обрађиваног материјала, геометрије алата, типа и стања машине алатке [111, 112]. Постоје различите врсте одступања од теоретске површине при чему се разликују: макрогеометријска одступања, валовитост обрађене површине и микрогеометријска одступања. Макрогеометријска одступања и валовитост обрађене површине спадају у одступања геометријског облика. Микрогеометријска одступања или

микронеравнине настају при обради као резултат дејства резне ивице алата на обрађену површину и пластичних деформација обрађиваног материјала. Микронеравнине одређују храпавост обрађене површине. По стандарду SRPS M.A1.020 храпавост представља скуп неравнина које образују рељеф површине и које се посматрају у границама договореног исечка, при чему су елиминисане грешке облика и валовитост. Постоје три основна параметра храпавости, а то су:

- R_{max} - максимална висина неравнина која представља растојање између доње и горње линије профила,
- R_a - средње аритметичко одступање профила које се дефинише као:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i), \quad (3.1)$$

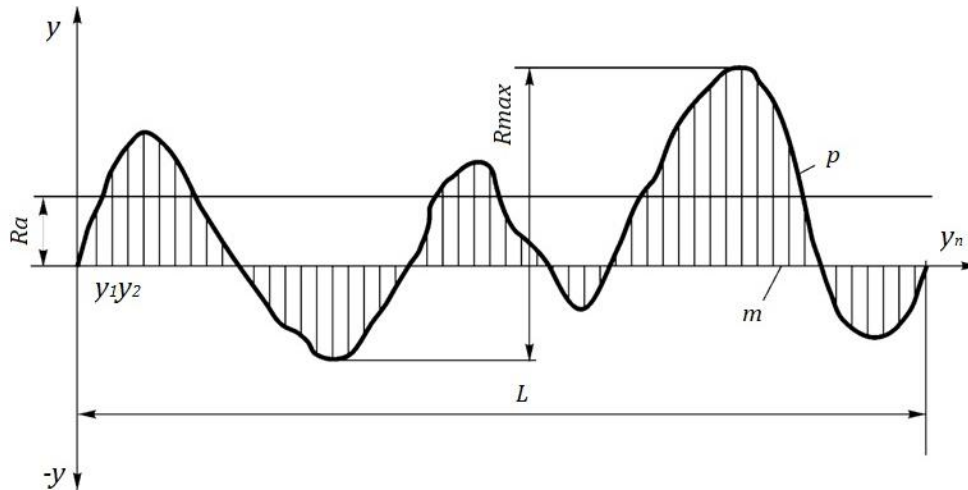
где су:

n – број подеока на референтној дужини,
 y_i – дужина i -тог подеока.

- R_z - средња висина неравнина која се добија помоћу једначине 3.2 (при чему је n број мерења на n врхова и n најнижих удубљења на изабраној референтној дужини):

$$R_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |H_{max i}| - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |H_{min i}|. \quad (3.2)$$

На слици 3.2 је дат приказ површинске храпавости са основним параметрима који је дефинишу.



Слика 3.2 Површинска храпавост са параметрима [112]

Референтна дужина профила, величина L на слици 3.2, је минимална дужина одсечка профила површине неопходна за поуздано дефинисање основних параметара храпавости. Линија стварних неравнина површине, односно профил, означен је са p , а средња линија профила је представљена са m .

Површинска храпавост је подељена на 12 квалитета који се називају класе и означавају се са N1, N2..., N12. Класа је одређена вредношћу средњег аритметичког одступања профила чије су вредности дефинисане стандардом SRPS M.A1.020. Да би се квалитет одређене површине назначио на цртежима се користе кукице. Облик кукице указује на начин обраде површине, а број указује на квалитет обрађене површине.

3.2.2. Припрема узорака

Припрема узорака од нанокompозита и основне легуре A356 за триболошка испитивања подразумева припрему контактнoг пара по ASTM G 77 стандарду [113]. Прво се врши грубо сечење добијених отпресака на димензије приближне димензијама узорака дефинисане стандардом за триболошка испитивања. Отпресци материјала за испитивање се обрадом глодања доводе на тражене димензије, а затим се брушењем и полирањем остварује одређена хrapавост контактних површина.

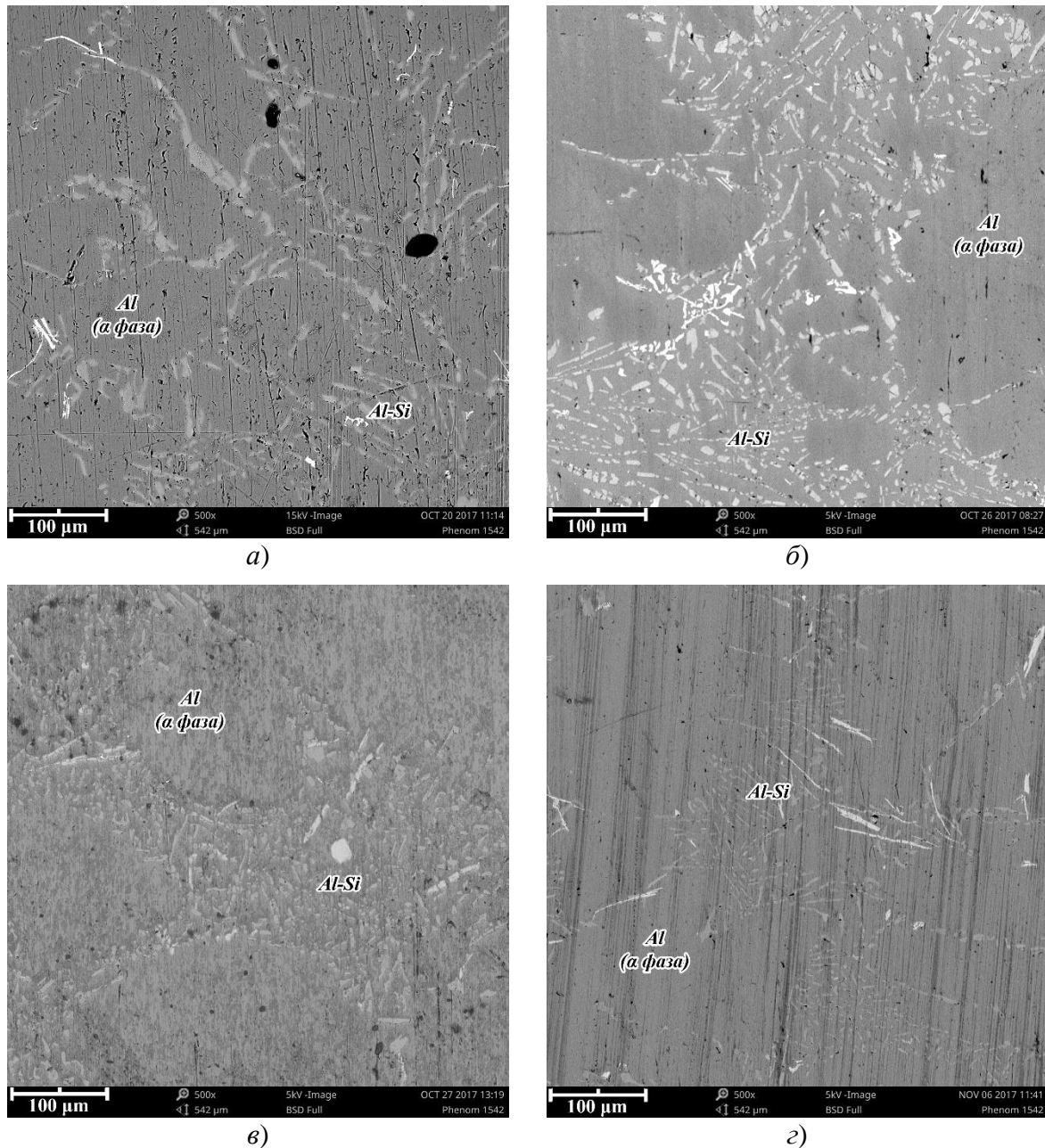
Испитивања механичких карактеристика на наноиндентеру захтевају минималну хrapавост површина што подразумева примену обраде полирања површина. Поступак брушења изводи се обрадом контактних површина, брусним папирима финоће 1000, 2000 и 3000 са величинама абразивних зрна од 18,3 μm , 10,3 μm и 8,4 μm , респективно. На слици 3.3 приказан је коришћен уређај, за припрему површина, који се налази на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу у Центру за трибологију. Полирање контактних површина је извршено емулзијом са абразивним зрнима од 1 μm .



Слика 3.3 Уређај за припрему узорака MetaServ 250

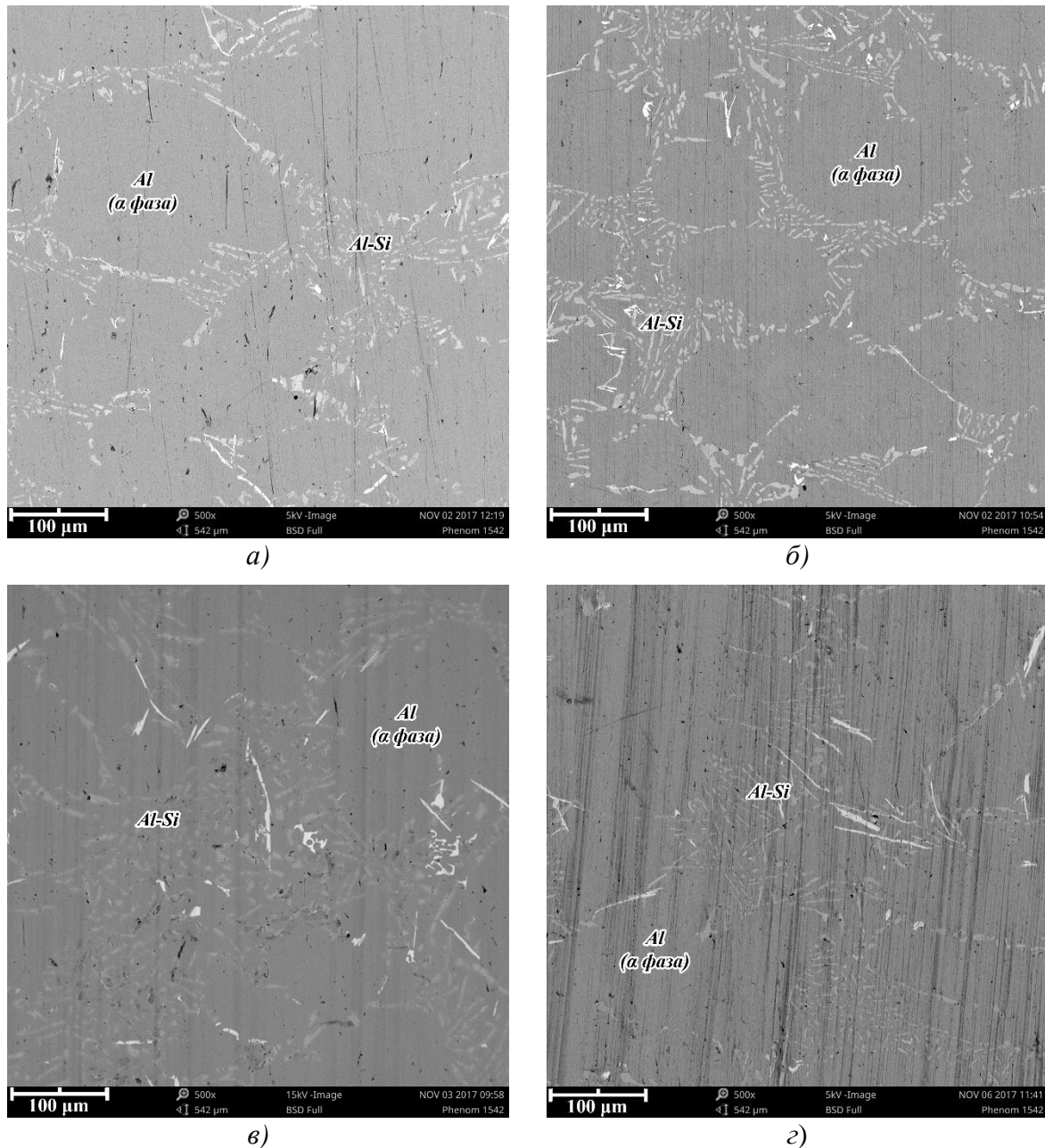
Овај уређај пружа могућност дефинисања брзине обртаја од 50 до 500 min^{-1} . Време трајања од 1 до 99 min и пружа могућност обраде са хлађењем помоћу довода воде млазницом. Хлађење водом приликом брушења и полирања спречава загревање површина које може утицати на микроструктуру и механичке карактеристике материјала. На уређају постоји одвод који омогућава лако чишћење остатка похабаног материјала водом. Све ове могућности олакшавају припрему материјала и омогућавају припрему површина на одређену класу хrapавости. Пре испитивања хrapавости, површине свих узорака (блокова) се чисте 70% алкохолем.

На сликама од 3.4 до 3.6 дати су изгледи површина припремљених материјала за наредна испитивања. Структуру нанокompозита чини структура основне легуре A356 у којој су распоређене наночестице ојачавача. Наночестица ојачавача у алуминијумској основи представљају посебну фазу, па је потребно сагледати како наночестице утичу на везу са алуминијумском основом. Резултати испитивања структуре нанокompозита са основом A356 легуре и ојачавачима SiC честицама величине око 50 nm је приказано на слици 3.4.



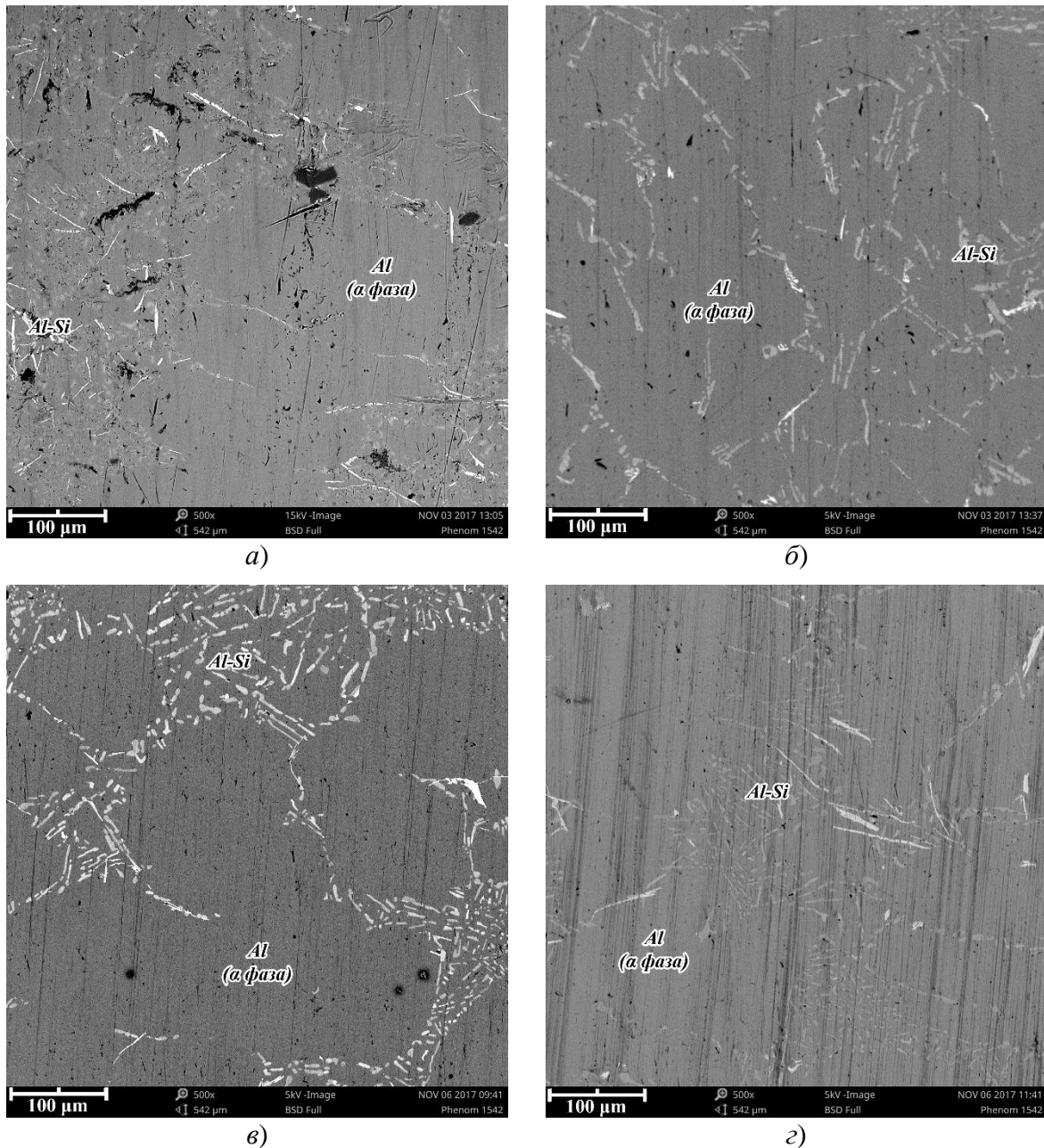
Слика 3.4 Изглед површине нанокompозита са садржајем ојачавача од:
 а) 0,2 мас.% SiC, б) 0,3 мас.% SiC, в) 0,5 мас.% SiC и г) основне легуре

На приказаним микроструктурама нанокompозита са SiC ојачавачем (слика 3.4а, б и в) и основне легуре (слика 3.4г) уочава се присуство еутектичког силицијума (Al-Si). Резолуција приказаних слика је са истим увећањем х500. Микроструктуру легуре А356 карактерише присуство великих глобуларних честица α фазе (Al) и влакнасте и нодуларне честице еутектичког силицијума. Микроструктуре приказаних нанокompозита са ојачавачем SiC у поређењу са основном легуром су врло сличне. Показано је да није дошло до хемијске реакције при везивању ојачавача са основном легуром. Слично запажање је приказано у истраживању [114]. Анализом микроструктуре су закључили да се честице SiC ојачавача налазе у близини честица еутектичког силицијума и да су равномерно распоређене у основној легури.



Слика 3.5 Изглед површине нанокompозита са садржајем ојачавача од:
 а) 0,2 mas.% Al_2O_3 , б) 0,3 mas.% Al_2O_3 , в) 0,5 mas.% Al_2O_3 и г) основне легуре

Изражено присуство еутектичког силицијума ($Al-Si$) примећено је код микроструктуре нанокompозита са ојачавачем Al_2O_3 и величином честица од око 20-30 nm (слика 3.5а, б и в) у односу на основну легуру (слика 3.5г). Микроструктура нанокompозита са 0,3 mas.% Al_2O_3 указује на финија зрна дендричне структуре иако је за A356 легуру карактеристична грубо зрнаста структура са великим примарним честицама α фазе. Остваривање влакнастих честица еутектичког силицијума могуће је применом хемијске модификације основне легуре. Успешну хемијску модификацију основне легуре A356 применом стронцијума (0,03 mas.% Sr) на морфологију еутектичког силицијума извршена је у истраживању [115]. Модификацијом структуре композита постигли су побољшање у механичким својствима композита.



Слика 3.6 Изглед површине нанокompозита са садржајем ојачавача од:
 а) 0,2 мас.% Al_2O_3 , б) 0,3 мас.% Al_2O_3 , в) 0,5 мас.% Al_2O_3 и г) основне легуре

Посматрањем микроструктуре нанокompозита са ојачавачем Al_2O_3 и величином честица од око 100 nm (слика 3.6а, б и в) јасно се уочавају светлија поља, бела или светло сива у зависности од контраста, која представљају еутектички силицијум ($Al-Si$). За мала црна поља у облику тачкица по површинама претпоставља се да су у питању поре или зарези остали од претходне обраде. Микрошупљине се могу видети само код нанокompозита А356/0,2 мас.% Al_2O_3 (слика 3.6а). Распоред еутектичког силицијума код нанокompозита са 0,5 мас.% Al_2O_3 (слика 3.6б) је сличан као код основне легуре (слика 3.6г) на којима се јасно уочавају α фазе (Al) и распоред еутектичког силицијума. На основу микроструктуре може се закључити да се ради о дендридној структури која је релативно уједначена. Може се установити да није дошло до хемијске реакције између ојачавача Al_2O_3 и алуминијумске основе.

3.2.3. Уређај за испитивање храпавости

Испитивање храпавости припремљених контактних површина узорка за испитивања извршена је на компјутеризованом мерном уређају Talusurf6 на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу у Лабораторији за обраду метала и трибологију. Овај уређај омогућава комплексно дефинисање стања контактних површина са великим спектром могућности, као што су:

- мерење основних као и допунских параметара храпавости и валовитости;
- приказ резултата мерења на екрану, меморисање и штампање;
- статистичка обрада резултата измерених параметара храпавости и
- просторно скенирање површине.

Мерења параметара храпавости површина контактних су типа јер се изводе кретањем врха мерне игле по површини чија се храпавост одређује. Врх мерне игле у сталном је контакту са површином узорка примењеном силом од 0,5 N. Максимална вредност њеног хоризонталног кретања износи 120 mm, док је радијус врха игле 2 μm . Резултати мерења се преузимају помоћу програма „Serial Port Terminal”, а затим се обрађују помоћу софтвера који служи за статистичку обраду података. Коришћењем овог мерног система добијају се информације о почетној микрогеометрији површина испитиваних материјала које се представљају преко основних параметара храпавости. Поред основних параметара уређај пружа могућност и одређивања великог броја других параметара, тачније допунских параметара. Профилометар поседује могућност конструисања „3D“ приказа површина које се испитују, на основу више паралелних мерења по испитиваној површини. За дефинисање храпавости анализираних нанокмпозита поред поменутих основних параметара (R_{max} , R_a , R_z) изабрани су и средње квадратно одступање профила на дужини оцењивања R_q , средња висина испупчења профила на дужини оцењивања R_p и средња висина удубљења профила на дужини оцењивања R_v .

3.2.4. Параметри храпавости

У табелама од 3.2 до 3.4 су приказани параметри храпавости површина узорка (блокова). Површинска храпавост на свим узорцима је мерена дуж исте референтне дужине од 4 mm. Поред основних параметара приказани су и профили храпавости за све испитиване материјале (за једну површину узорка од сваке врсте материјала).

Табела 3.2 Параметри храпавости A356 легуре и нанокмпозита A356/SiC са величином ојачавача од 50 nm

Материјал	R_{max} , μm	R_a , μm	R_z , μm	R_q , μm	R_v , μm	R_p , μm
A356	0,47	0,036	0,41	0,046	0,35	0,11
A356/0,2 mas.% SiC	0,39	0,048	0,36	0,060	0,19	0,20
A356/0,3 mas.% SiC	0,53	0,054	0,54	0,074	0,31	0,22
A356/0,5 mas.% SiC	0,56	0,060	0,46	0,076	0,27	0,29

Табела 3.3 Параметри храпавости за нанокмпозите A356/Al₂O₃ са величином ојачавача од 20-30 nm

Материјал	R_{max} , μm	R_a , μm	R_z , μm	R_q , μm	R_v , μm	R_p , μm
A356/0,2 mas.% Al ₂ O ₃	0,34	0,033	0,35	0,042	0,16	0,18
A356/0,3 mas.% Al ₂ O ₃	2,0	0,07	2,1	0,17	1,4	0,6
A356/0,5 mas.% Al ₂ O ₃	0,99	0,047	0,99	0,082	0,72	0,27

Табела 3.4 Параметри храповости за наноконтропозите $A356/Al_2O_3$ са величином ојачавача око 100 nm

Материјал	$R_{max}, \mu m$	$R_a, \mu m$	$R_z, \mu m$	$R_q, \mu m$	$R_v, \mu m$	$R_p, \mu m$
$A356/0,2 \text{ mas.}\% Al_2O_3$	1,3	0,09	1,3	0,13	0,9	0,4
$A356/0,3 \text{ mas.}\% Al_2O_3$	3,13	0,108	2,99	0,189	2,60	0,53
$A356/0,5 \text{ mas.}\% Al_2O_3$	0,66	0,055	0,54	0,076	0,25	0,41

На основу добијених вредности за изабране параметре храповости конструише се профил храповости. За конструисање профила храповости дуж референтне дужине користе се измерене вредности висина профила (1150 тачака). На слици 3.7 су дати графички прикази профила храповости наноконтропозита са $A356$ основном ојачаним наночестицама 0,2; 0,3 и 0,5 mas.% SiC .



а)



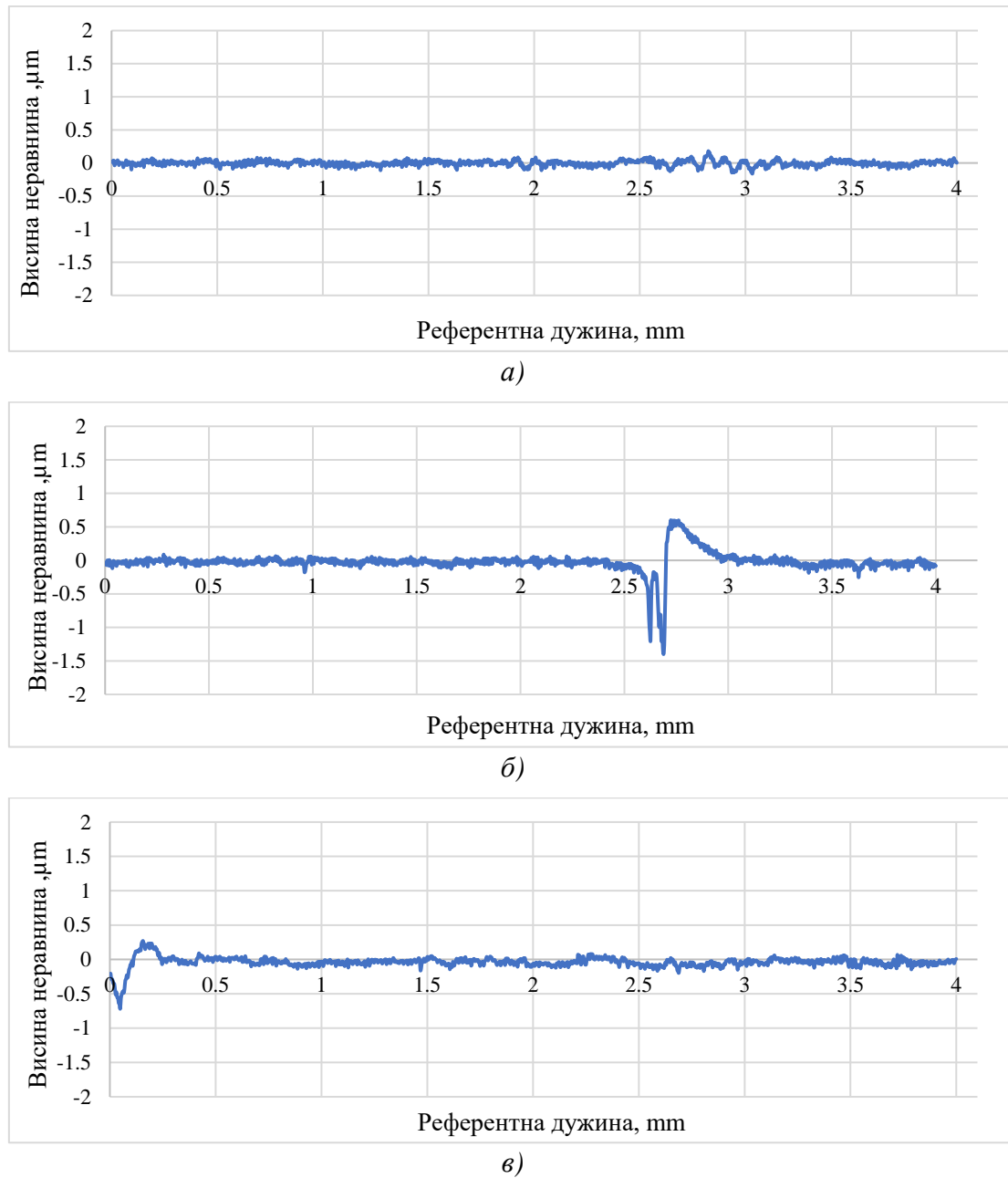
б)



в)

Слика 3.7 Профили храповости узорака наноконтропозита а) $A356/0,2 \text{ mas.}\% SiC$, б) $A356/0,3 \text{ mas.}\% SiC$ и в) $A356/0,5 \text{ mas.}\% SiC$

Графички приказ профила храпавости нанокompозита са масеним садржајем 0,2; 0,3 и 0,5 мас.% Al_2O_3 дати су на слици 3.8. Просечна величина честица ојачавача Al_2O_3 налази се у границама од 20 до 30 nm.



Слика 3.8 Профили храпавости узорака нанокompозита а) A356/0,2 мас.% Al_2O_3 б) A356/0,3 мас.% Al_2O_3 и в) A356/0,5 мас.% Al_2O_3

Испитивањем површинске храпавости измерена је вредност од 2 μm за максималну висину неравнине чији се положај боље уочава на профилу храпавости (слика 3.8б). На слици 3.9 су дати графички прикази профила храпавости нанокompозита са масеним садржајем 0,2; 0,3 и 0,5 мас.% Al_2O_3 и просечном величином честица око 100 nm.



а)



б)



в)

Слика 3.9 Профили хрпавости узорака нанокмпозита а) $A356/0,2 \text{ mas.}\% \text{ Al}_2\text{O}_3$
 б) $A356/0,3 \text{ mas.}\% \text{ Al}_2\text{O}_3$ и в) $A356/0,5 \text{ mas.}\% \text{ Al}_2\text{O}_3$

На слици 3.10 је приказан графички приказ профила хрпавости $A356$ легуре. Површине свих узорака припремљене су на исти начин, што подразумева да је стални редослед примене брусних папира поменуте гранулације, исте емулзије и са приближним временом брушења и полирања свих обрађених површина.



Слика 3.10 Профил хрпавости А356 легуре

Анализом дијаграма приказаних на сликама од 3.7 до 3.10 може се закључити да нема значајних разлика у профилима хрпавости, а уочава се и да се пикови неравнина налазе у границама од приближно $\pm 0,5 \mu\text{m}$. Уочени су и пикови који су достигали приближно $2,5 \mu\text{m}$, а који се лако могу уочити и на профилима хрпавости. Ово се може преписати неком од зареза који је остао од претходне обраде, а примењеном припремом није скинут довољан слој материјала како не би било оваквих пикова.

3.3. Одређивање механичких карактеристика нанокompозита

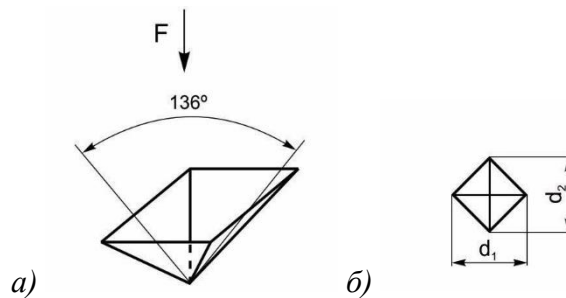
Механичке карактеристике испитиваних материјала одређују се експерименталним поступцима. На вредности механичких карактеристика свих композита и на макро и на микроноивоу утицај имају секундарне фазе [116, 117]. У наставку ће бити приказане теоријске основе поступка одређивања тврдоће на макро и наноноивоу, затим уређаји на којима се изводи ово испитивање и резултати механичких карактеристика испитиваних нанокompозита.

3.3.1. Теоријске основе поступака макроутискивања

Тврдоћа се дефинише као отпор продирању страног тврђег тела у материјал. Тврдоћа, дакле представља отпорност материјала према продирању неког другог тела, знатно тврђег тела, а може се изразити и као отпорност материјала на пластичну деформацију [118]. Одређивање тврдоће могуће је применом статичких, динамичких и специјалних метода. Код статичких метода сила испитивања која делује на утискивач постепено расте од нуле до максималне вредности. Код динамичких испитивања сила на утискивачу остварује се ударом, или се пак тврдоћа одређује на основу еластичног одскока утискивача од површине која се испитује. У статичке методе спадају следеће: Бринел (*Brinell*, *HBS*, *HBW*) метода, Викерс (*Vickers*, *HV*) метода, Роквел (*Rockwell*, *HRC*) метода, и Кнуп (*Knoop*, *HK*) метода. У динамичке методе убрајају се следеће: Полди (*Poldy*, *HP*) метода, Склероскопска метода (по Шору (*Shore*, *HSh*)) и Дуроскопска метода, *HD*.

Викерсова тврдоћа (*HV*) дефинише се као однос силе којом се делује на дијамантски утискивач и површине отиска утискивача на површини предмета чија се тврдоћа одређује. Утискивач је израђен од дијаманта у облику правилне четворостране

пирамиде са углом при врху $136^\circ \pm 0,5^\circ$. Странице утискивача морају бити подједнако нагнуте према оси, тако да линија везе између супротних страница не буде дужа од 0,002 mm. Врх и површине дијамантског утискивача морају бити правилно обрађене. На слици 3.11 приказана је шема утискивања пирамиде и отиска након утискивања.



Слика 3.11 Шематски приказ при мерењу Викерс тврдоће а) утискивача и б) отиска [118]

Тврдоћа по Викерсу се израчунава према изразу:

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 1,854 \cdot \frac{F}{d^2}, \quad (3.3)$$

где су:

$$A = \frac{d^2}{2 \cdot \cos 22^\circ} = \frac{d^2}{2 \cdot \sin 68^\circ} \quad (3.4)$$

F – сила утискивања у daN,

A – површина отиска у облику четворостране пирамиде са квадратном осном у mm^2 ,

d – дијагонала отиска у mm, рачуна се као $d = (d_1 + d_2)/2$.

Генерално, у радовима је одређивање тврдоће по Викерсу широко прихваћено јер омогућава непрекидна мерења тврдоће за дато оптерећење. Испитивање тврдоће по Викерсу је дефинисано ASTM стандардом E92-72 [119].

3.3.2. Уређај за мерење макротврдоће

Мерење макротврдоће извршено је на уређају „WPM Leipzig“ (слика 3.12), произведеног у Немачкој, који се налази на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу у Лабораторији за обраду деформисањем и машинске материјале. Утискивање пирамиде у површину материјала се врши помоћу полуге на коју делују тегови масе од 5 до 100 kg и тако се постиже оптерећење од 5; 10; 20; 30; 50 или 100 daN. После утискивања врши се читавање димензије отиска помоћу микроскопа који је уграђен у апарат за мерење тврдоће.

Мерењем тврдоће по Викерсу могуће је измерити тврдоћу свих материјала, од најмекших до најтврђих. Величина силе утискивања зависи од врсте и дебљине материјала, као и од величине тврдоће која се очекује. Треба напоменути да се смањивањем силе утискивања повећава расипање резултата, посебно код испитивања микротврдоће.



Слика 3.12 Уређај „WPM Leipzig“ за мерење макротврдоће

Препоруке за избор силе приликом оптерећења са ознакама тврдоће дате су у табели 3.5. Према стандардима постоје препоруке за оптималну силу утискивања која за челик износи 30 daN, док за алуминијум и његове легуре износи 10 daN.

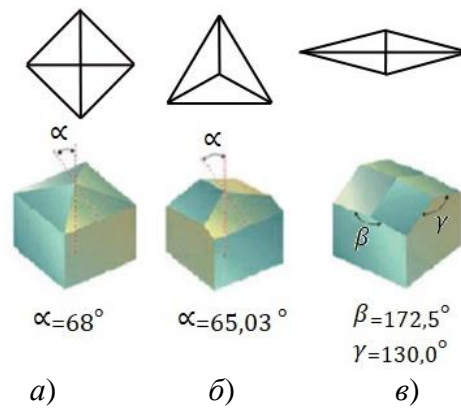
Табела 3.5 Скале тврдоће по Викерсу и одговарајућа оптерећења

Нивои сила F, N	Ознаке тврдоће	Назив	Тип мерења
$49 \leq F < 980$	$\geq HV5$	Макротврдоћа	Уопштена
$1,961 \leq F < 49$	HV0,2 до <HV5	Тврдоћа ниских оптерећења	Танки узорци
$0,098 \leq F < 1,961$	HV0,01 до <HV0,2	Микротврдоћа	Појединих фаза у микроструктури

Применом сила врло малих интензитета ова метода пружа могућност одређивање тврдоће танких лимова, цементираних и нитрованих површина, заштитних превлака, као и одређивање тврдоће појединих зрна у поликристалном материјалу.

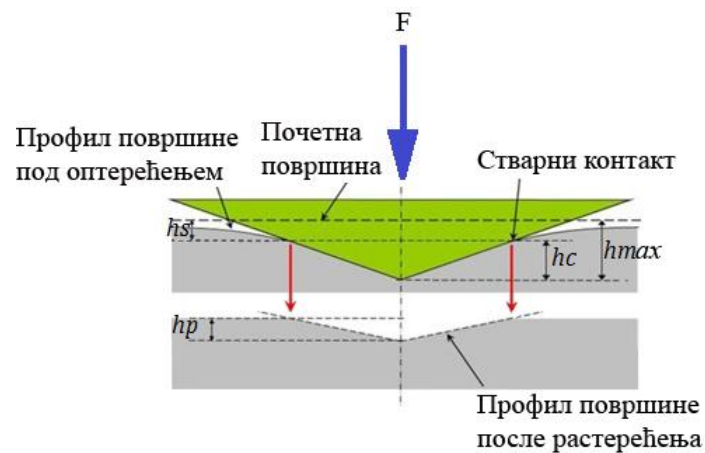
3.3.3. Теоријске основе поступка наноутискивања

Одређивање нанотврдоће материјала је последњих година веома заступљено због изучавања материјала са ојачавачима на нанонивоу, као и изучавања отпорности на лом танких превлака разних врста. Метод одређивања механичких карактеристика своди се на поступак утискивања. Утискивачи се најчешће израђују од дијаманта због његове велике тврдоће и модула еластичности чиме се минимализује утицај утискивача на измерене вредности продирања. У зависности од намене бира се тип утискивача за мерење тврдоће који може бити Берковичева (*Berkovich*) тространа пирамида или четворострана Викерсова (*Vickers*) и Кнупова (*Knoop*) пирамида, слика 3.13.

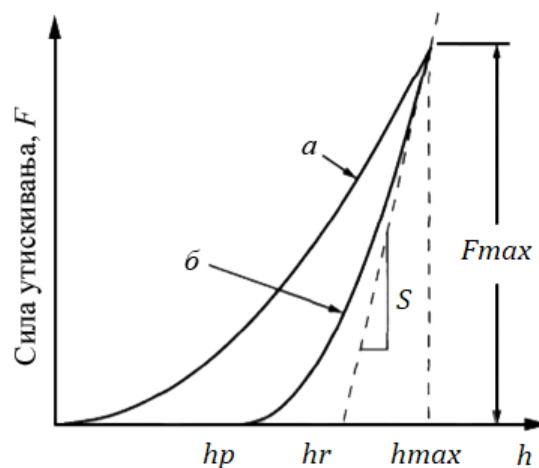


Слика 3.13 Геометрија утискивача а) Беркович б) Викерс и в) Кнуп пирамида [120]

На слици 3.14 је приказана геометрија контакта током испитивања наноутискивањем. Мерењем се добијају дијаграми зависности силе утискивања од дубине утискивања помоћу којих се могу прорачунати вредности за тврдоћу и модул еластичности, слика 3.15. Тврдоћа и модул еластичности прорачунавају се стандардним поступком према методи Оливер (*Oliver*) и Фар (*Pharr*) [121].



Слика 3.14 Шематски приказ геометрије контакта кроз тест наноиндентације



Слика 3.15 Карактеристичан изглед криве утискивања [121]

На слици 3.15 је приказан дијаграм зависности силе утискивања од дубине утискивања, при чему је са h_{max} означена дубина утискивања при максималној вредности силе F_{max} . На слици 3.14 приказане су следеће величине које се јављају и на дијаграму на слици 3.15. Контактна дубина (h_c) дефинише се као дубина утискивања под дејством силе утискивања. Дубина отиска након растерећења је означена h_p и представља трајну дубину отиска, док h_s означава почетну дубину при контакту. Максимална дубина утискивања је означена са h_{max} , а са h_r означена је тангентна дубина отиска. Сила утискивања означена је са F , а максимална сила утискивања са F_{max} . На основу нагиба тангенте почетног дела фазе растерећења израчунава се контактна крутост S .

Приликом испитивања наноутискивањем разликују се две фазе (слика 3.15) и то: фаза оптерећења (крива a) током које се делује силом (утискивање) и фаза растерећења (крива b). Коса испрекидана линија представља тангенту на почетни период фазе растерећења и помоћу ње се може одредити вредност контактне крутости. На основу овакве криве могу се анализирати и одредити тврдоћа и модул еластичности и добити информације о развоју деформације (са криве оптерећења) тачније о развоју пластичне деформације и фазној трансформацији или лому.

Мерење нанотврдоће дефинише се као количник максималне силе утискивања и површине отиска, ова вредност представља средњу вредност притиска који материјал може да поднесе под дејством неког оптерећења и може се изразити као [121]:

$$H = \frac{F_{max}}{A}, \quad (3.5)$$

где је:

A – површина насталог отиска у материјалу. На основу криве утискивања за мерење површине отиска неопходна је контактна дубина h_c .

Према почетном делу криве растерећења, редуковани модул еластичности се може изразити преко почетне вредности контактне крутости, $S = dF/dh$. Контактна крутост може се изразити помоћу контактне површине и модула еластичности:

$$S = 2\beta \cdot \sqrt{\frac{A}{\pi} \cdot E_r}, \quad (3.6)$$

где су:

E_r – редуковани модул еластичности који се рачуна као:

$$E_r = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}, \quad (3.7)$$

β – константа чија вредност зависи од геометрије утискивача ($\beta = 1,034$ за Берковичеву пирамиду),

E – модул еластичности материјала који се испитује,

E_i – модул еластичности утискивача,

ν – Поасонов коефицијент материјала који се испитује и

ν_i – Поасонов коефицијент утискивача.

Према овој методи, крива растерећења није линеарна па се рачуна на основу израза:

$$F = B \cdot (h - h_f)^m, \quad (3.8)$$

где су B , m и h_f емпиријски одређени параметри. Крутост при растерећењу одређује се у тренутку максималне дубине продирања утискивача $h = h_{max}$, тако да је израз за контактну крутост представљен следећом једначином:

$$S = \left(\frac{dF}{dh} \right)_{h=h_{max}} = B \cdot m \cdot (h_{max} - h_f)^{m-1}. \quad (3.9)$$

Површина отиска настала при утискивању Берковичеве пирамиде је у функцији дубине продирања и дата је изразом:

$$A_c = 24,56 \cdot h_c^2. \quad (3.10)$$

Међутим, сваки утискивач поседује у стварности заобљење врха које се мора узети у разматрање. Зато се претходна једначина мора проширити и као таква више одговара кривој утискивања:

$$A_c = 24,56 \cdot h_c^2 + C_1 \cdot h_c^1 + C_2 \cdot h_c^{1/2} + C_3 \cdot h_c^{1/4} + \dots + C_8 \cdot h_c^{1/128}, \quad (3.11)$$

где су C_1 до C_8 константе. Постоје и истраживања која избегавају примену једначина (3.11) са константама јер је њихово одређивање релативно комплексно. Код њих се користе изрази у којима се пројекција контактне површине директно одређује на основу дубине контакта h_c .

Контактна дубина која зависи од контактне крутости, највећег оптерећења, највеће дубине продирања и геометрије утискивача изражене преко геометријске константе ε , може се одредити на основу једначине:

$$h_c = h_{max} - \varepsilon \cdot \frac{F_{max}}{S}. \quad (3.12)$$

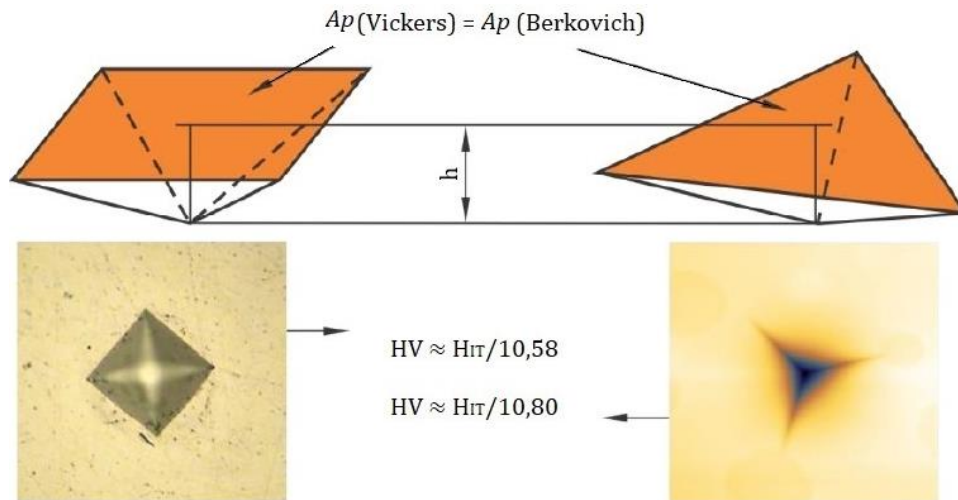
Ако је утискивач Берковичева пирамида онда ε константа износи 0,75. Инструментална тврдоћа за поменути утискивач се израчунава на основу пројектоване површине отиска, и то:

$$HV = \frac{F}{A_p}, \quad (3.13)$$

где је:

A_p – пројектована површина отиска утискивања [15].

Пошто се тврдоћа рачуна на основу пројектоване површине може се рећи да готово и не постоји разлика између Викерсове и Берковичеве пирамиде за исту дубину утискивања (слика 3.16). Тврдоћа која се израчунава на основу пројектоване површине отиска назива се инструментална тврдоћа *НИТ*. У случају малих оптерећења користи се тространа Берковичева пирамида јер се код ње лакше постиже оштар врх. Код великих сила утискивања користи се Викерсова четворострана пирамида, и ту се огледа разлика између ове две методе мерења тврдоће. Материјал утискивача је углавном дијамант јер се тако умањују утицај утискивача на измерене вредности продирања.



Слика 3.16 Пројектоване површине отисака утискивања код Викерсове и Берковичеве пирамиде за исте дубине утискивања [122]

На основу слике 3.16, може се закључити да су вредности између инструменталне тврдоће (HIT) и тврдоће (HV) измерене по Викерсовој и Берковичевој методи приближно једнаке.

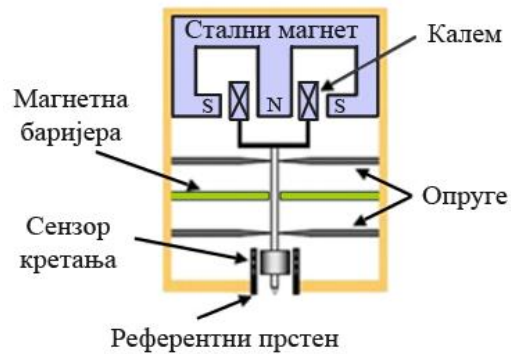
3.3.4. Уређај за наноутискивање

Развој наноматеријала условио је развој инструмената као што је наноиндентер који користе екстремно мала оптерећења и дубине утискивања. Овим инструментима се могу применити силе од микроњутна до неколико милињутна и дубине мерења до неколико нанометара. Површинска храпавост анализираних узорака је изузетно важна код испитивања узорака, због технике коју користи уређај микро/нано индентер (*Micro/Nano Indentation Tester*, MHT/NHT). Сва механичка својства испитиваног материјала израчунавају се под претпоставком да је површина узорка равна. Опште је познато да ни једна површина није савршено равна и свака има одређену храпавост. Храпавост се мора узети у обзир приликом планирања експеримента зато што има снажан ефекат на расипање резултата у инструменталном испитивању узорака. Стога, глатке и добро полиране површине неопходне су за поновљиве и поуздане резултате. Мора се напоменути и то да полирање може изазвати неке заостале напоне на површини узорка ако узорак није адекватно припремљен. Заостали напон настао "тврдим" полирањем може имати негативан утицај на процену тврдоће на наноскали [123]. Зато је припрема узорака у овом истраживању била иста за све испитиване материјале.

За потребе овог рада, одређивање механичких карактеристика нанокompозита и алуминијумске легуре извршено је на уређају „*Nanoindenter & Micro Scratch Tester*“ (слика 3.17a), који се налази у Центру за трибологију Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. Овај уређај је компјутерски подржан и поседује оптичке микроскопе који омогућавају увећања од $\times 5$, $\times 20$, $\times 40$ и $\times 100$. Постављен је на антивибрационом столу ради изолације од вибрација из околине, а истовремено служи и за нивелацију уређаја.



а)



б)

Слика 3.17 Наноиндентер а) изглед наноиндентера произвођача CSM и б) шема система за остваривање силе и вођење утискивача у наноиндентеру

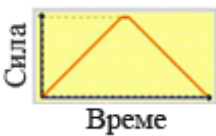

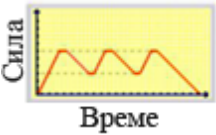

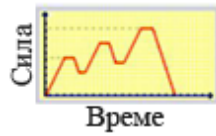

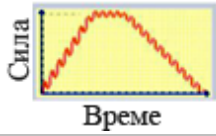
Уређај за наноутискивање у свом саставу има електромагнетни калем за померање утискивача (слика 3.17б). За контролисање вертикалног померања утискивача задужен је сензор кретања који је смештен близу врха индентера. Ради осигурања вертикалног кретања осовине утискивача и у циљу спречавања извијања током утискивања у уређају су смештене две опруге. За изолацију узорка и врха утискивача од деловања електромагнетног поља насталог помоћу калема служе магнетне баријере. Контакт са површином узорка чије се карактеристике испитују остварује се помоћу референтног прстена, а по оствареном контакту започиње кретање утискивача. Како су померања утискивача на нанонивоу, утицај околине на мерења је велики. Конструкција овог уређаја има низ предности, као што су: велика тачност мерења дубине утискивања, занемарљива термална одступања, кратко време мерења, заштита зоне мерења од акустичних сметњи, заштита мерног утискивача од механичких оштећења.

Основне мерне карактеристике коришћеног уређаја су [123]:

- максимална сила утискивања: 500 mN;
- максимална вредност померања утискивача: 40 μm (опционо 200 μm);
- резолуција силе: 0,04 μN ;
- кретање радног стола: XY, 150 mm x 80 mm и
- резолуција сензора дубине: 0,04 nm.

Поред мерења тврдоће и модула еластичности на овом уређају могућа су испитивања течења материјала, заморна испитивања и мерења отпорности на лом. Мерења помоћу индентера могу се извршити на основу неколико дефинисаних типова испитивања која су приказана у табели 3.6. У зависности од потреба корисника и жељених резултата, може се бирати просторни распоред извођења експеримената као и начин оптерећења утискивача.

Табела 3.6 Типови и просторни распореди мерења наноиндентером

Тип мерења		Просторни распоред мерења	
Стандардно		Јединично	
Циклично мерење		Линијски распоред мерења	
Континуално вишециклично мерење		Матрични распоред	
Синусно мерење			

За испитивања у овом раду изабран је просторни распоред извођења експеримената тачније матрични распоред 3x3. За сва испитивања усвојена је иста вредност силе оптерећења. Урађено је 9 испитивања за сваки испитивани материјал.

3.3.5. Резултати испитивања макротврдоће

Стандардима (SRPS С.А4.001, SRPS С.А4.003, и други) се за мерење тврдоће препоручује најмање три мерења. Већи број мерења повећава тачност резултата мерења. Мерење макротврдоће алуминијумске легуре и алуминијумских нанокомпозита по Викерсу извршено је примењеном силом утискивања од 9,81 daN. Време утискивања утискивача у површину узорка материјала мора да обезбеди равномерни пораст силе од нуле до одабране вредности. При овом мерењу и оптерећењу од 10 kg усвојено је време задржавања од 10 до 15 s. Испитивање је реализовано на собној температури. У табели 3.7 дате су вредности тврдоће за припремљене узорке алуминијумских нанокомпозита и А356 легуре. За сваки узорак мерење је поновљено пет пута. Средње вредности измерених вредности тврдоће усвојене су за вредности макротврдоће.

Табела 3.7 Резултати тврдоће по Викерсу HV10

Материјал	Садржај ојачавача, mas. %	Величина ојачавача, nm	Тврдоћа, HV
А356 легура	/	/	98,033
А356/SiC	0,2	≈50	106,133
	0,3	≈50	97,433
	0,5	≈50	91,633
А356/Al ₂ O ₃	0,2	20-30	95,833
	0,3	20-30	89,067
	0,5	20-30	83,450
А356/Al ₂ O ₃	0,2	100	86,900
	0,3	100	87,600
	0,5	100	88,033

Промена вредности тврдоће код нанокомпозита са ојачавачима SiC и Al₂O₃ са величином честица од 20-30 nm прати тренд да се повећањем садржаја ојачавача смањује

тврдоћа нанокомпозита. Добијеним резултатима утврђено је да највећу тврдоћу има нанокомпозит $A356/0,2 \text{ mas.}\% \text{ SiC}$, док остали нанокомпозити имају нижу тврдоћу у односу на тврдоћу основне легуре. Један од могућих разлога за добијене резултате је да су се све честице нашле по површини нанокомпозита због њиховог малог садржаја или да је приликом мерења утискивач захватио област у којој има више еутектичког силицијума који се може видети на сликама од 3.4 до 3.6. Величина дијагонале отиска приликом испитивања макротврдоће је износила око 0,40 mm што указује да се приликом испитивања захвата већа запремина материјала која може бити са и без ојачавајућих честица. Супротан тренд од поменутог уочава се код нанокомпозита $A356/Al_2O_3$ са величином ојачавача од 100 nm. Према оствареним резултатима уочава се да се повећањем садржаја ојачавача благо повећава тврдоћа нанокомпозита, а евидентно је да је нижа у односу на вредност тврдоће основне легуре и осталих нанокомпозита. Утицај на остварене вредности макротврдоће нанокомпозита са ојачавачем од 100 nm може се преписати могућој порозности материјала.

Освртом на слична истраживања, може се запазити да су многи истраживачи постигли побољшање у механичким својствима нанокомпозита [124-127]. Лакшманан (*Lakshmanan*) и Амеф (*Amith*) су произвели нанокомпозите са основом алуминијума ($AA6061$) и ојачавача SiC у облику честица величина од 45 nm до 65 nm са садржајем од 0; 0,5; 1,0 и 1,5 зар.% SiC помоћу технике ливења уз интензивно мешање. Показали су да се повећањем садржаја ојачавача значајно повећава тврдоћа нанокомпозита у односу на основну легуру. Мерење тврдоће извршили су по Бринелу са оптерећењем од 10 kg, а извршили су по пет утискивања како би добили средњу вредност. Вредности тврдоће које су остварене износе 40 ВНН за основну легуру и 54, 63, 70 ВНН за нанокомпозите [124]. Упоредјујући вредности тврдоћа нанокомпозита са резултатима добијеним у овој дисертацији уочава се да су остварене веће вредности тврдоће свих материјала. Разлике у резултатима могу бити, евентуално из разлога што аутори [124] нису детаљно навели да ли је и каква термичка обрада спроведена на њиховим узорцима. Мадукар (*Madhukar*) и остали су у циљу остваривања хомогене расподеле наночестица са садржајем од 1 mas.% SiC у алуминијумској легури 7150 применили комбинацију поступка ливење са двоструким интензивним мешањем [125]. Успешност овакве производње нанокомпозита приказали су кроз резултате у побољшању затезне чврстоће за 26,05%, микротврдоће за 10,85% и смањења порозности од 74,1% у поређењу са основном легуром. Вредности тврдоће нанокомпозита које су добили Мадукар (*Madhukar*) и остали веће су у односу на резултате из ове дисертације.

При избору материјала за индустријску примену један од најважнијих критеријума су механичка својства материјала. Актуелна истраживања усмерена су на комбиновање две врсте керамичких честица у алуминијумској основи како би се испољио ефекат керамичких честица на својства хибридног нанокомпозитног материјала. Основни материјал са честицама SiC као примарним ојачавачем и Al_2O_3 као секундарним ојачавачем коришћени су за производњу нанокомпозита. Основа коју су користили у истраживању била је легура $AA6061$ која се примењује за израду крила и трупа у ваздухопловним конструкцијама, јахти, а и аутомобилској индустрији на пример у производњи шасије за Ауди А8. Анализом разних комбинација садржаја ојачавача установили су да комбинација од 7,5 mas.% SiC и 7,5 mas.% Al_2O_3 у алуминијумској основи доноси знатно побољшање у затезној чврстоћи и тврдоћи нанокомпозита у односу на основни материјал. Вредност тврдоће коју су добили је 87 ВНН [126] што је нижа вредност у односу на остварену тврдоћу нанокомпозита у овој дисертацији и то коришћењем мањег масеног садржаја ојачавача.

3.3.6. Резултати испитивања нанотврдоће

Одређивање механичких карактеристика материјала спроведено је на полираним површинама свих узорака нанокмпозита и основној легури А356. Сва испитивања су обављена у идентичним условима. Наноиндентација је спроведена на основу Берковичеве методе испитивања са утискивачем правилне тростране дијамантске пирамиде чији угао при врху износи $65,27^\circ$. За испитивање тврдоће и модула еластичности изабран је стандардни тип мерења у виду матрице 3x3, тачније на сваком испитиваном материјалу утискивање је изведено 9 пута. Међусобно растојање између отисака је $40 \mu\text{m}$, што је у складу са препорукама, да међусобно растојање између отисака буде најмање 2–2,5 пречника/дијагонале отиска, како би се спречио утицај деформационог ојачања у зонама око отиска [123].

У овом истраживању следећи су услови испитивања:

- сила утискивања: 50 mN;
- време трајања дејства пуног оптерећења: 15 s;
- брзина оптерећења: 100 mN/min и
- брзина растерећења: 100 mN/min.

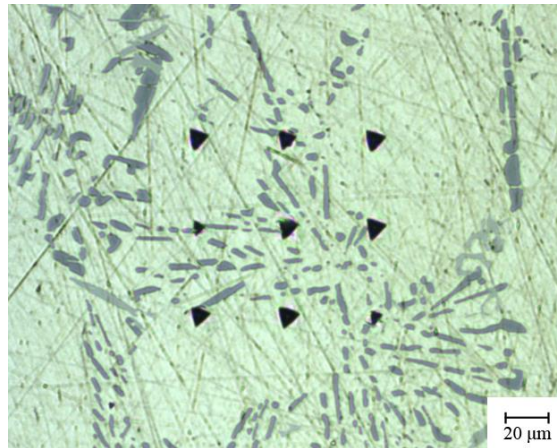
Усвојена вредност силе утискивања од 50 mN је оправдана јер се у пробним и претходним истраживањима показало да варијација силе не утиче значајно на резултате нанотврдоће [128-130]. У зависности од поступка добијања, садржаја и величине наночестица и других фактора у литератури се користи нешто већа вредност силе утискивања [131] или знатно мања [132]. Вредност Поасоновог коефицијента при овом испитивању је вредност основне легуре и он износи 0,33 [133].

На основу спроведеног мерења и анализе, у табели 3.8 дати су резултати утискивања, односно дате су вредности аритметичких средина измерених величина испитиваних материјала. Основни разлог некоришћења свих девет вредности утискивања је због измерених екстремно високих вредности тврдоће. Објашњење овог феномена приказано је на сликама са матрицама наноутискивања и коментарима (слике од 3.18 до 3.20). Према дефиницијама из поузданости довољно је извршити осредњавање резултата са три измерене вредности, али у овој дисертацији коришћено је пет и више резултата мерења. Избор вредности осредњавања и одбацивање појединих вредности вршено је анализирајући дисперзију резултата за сваки материјал.

Табела 3.8 Резултати наноутискивања (O&P)

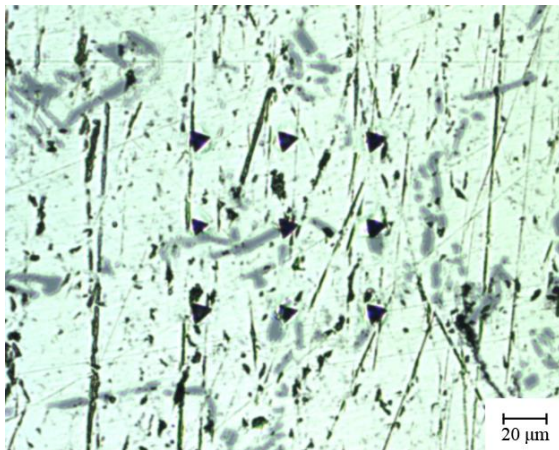
Материјал	H_{IT} , МПа	HVIT, Vickers	EIT, GPa	E^* , GPa	h_m , nm	h_c , nm
A356	1324,26	122,64	97,55	109,47	1305,95	1252,46
+0,2 mas.% SiC	1414,99	131,04	97,81	109,77	1266,53	1211,02
+0,3 mas.% SiC	1441,78	133,52	95,47	107,13	1261,61	1204,95
+0,5 mas.% SiC	1461,37	135,34	95,67	107,36	1270,10	1213,33
+0,2 mas.% Al ₂ O ₃	1444,68	133,79	95,84	104,64	1258,64	1198,51
+0,3 mas.% Al ₂ O ₃	1445,82	133,90	87,37	97,99	1278,65	1216,97
+0,5 mas.% Al ₂ O ₃	1486,68	137,68	97,85	109,81	1244,09	1185,71
+0,2 mas.% Al ₂ O ₃ (100 nm)	1280,14	118,56	90,95	102,06	1329,13	1272,51
+0,3 mas.% Al ₂ O ₃ (100 nm)	1380,81	127,88	97,91	109,88	1285,71	1231,49
+0,5 mas.% Al ₂ O ₃ (100 nm)	1635,23	151,44	97,56	109,48	1191,38	1131,26

Високе вредности тврдоће дешавале су се када врх индентера погоди у еутектички силицијум. На слици 3.18 дат је приказ површине узорка основне легуре са уочљивим сивим пољима по материјалу која представљају еутектички силицијум.

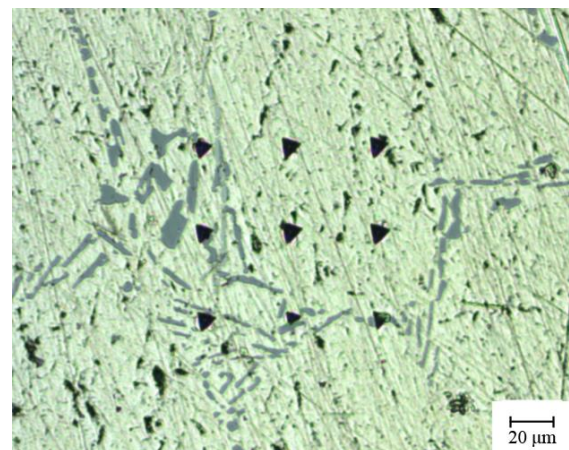


Слика 3.18 Трагови наноутискивања у А356 легуру

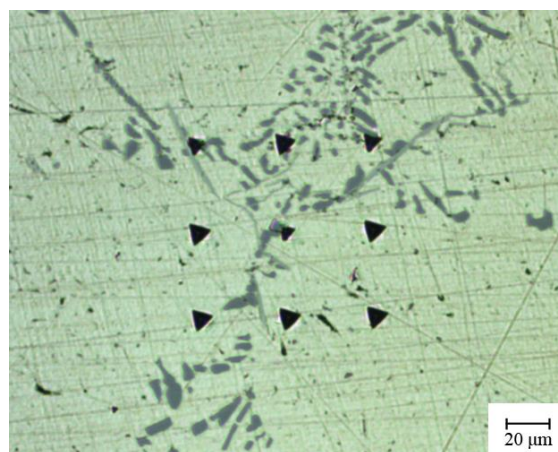
На сликама 3.19 и 3.20 су приказане матрице утискивања за све испитиване нанокомпозите.



а)

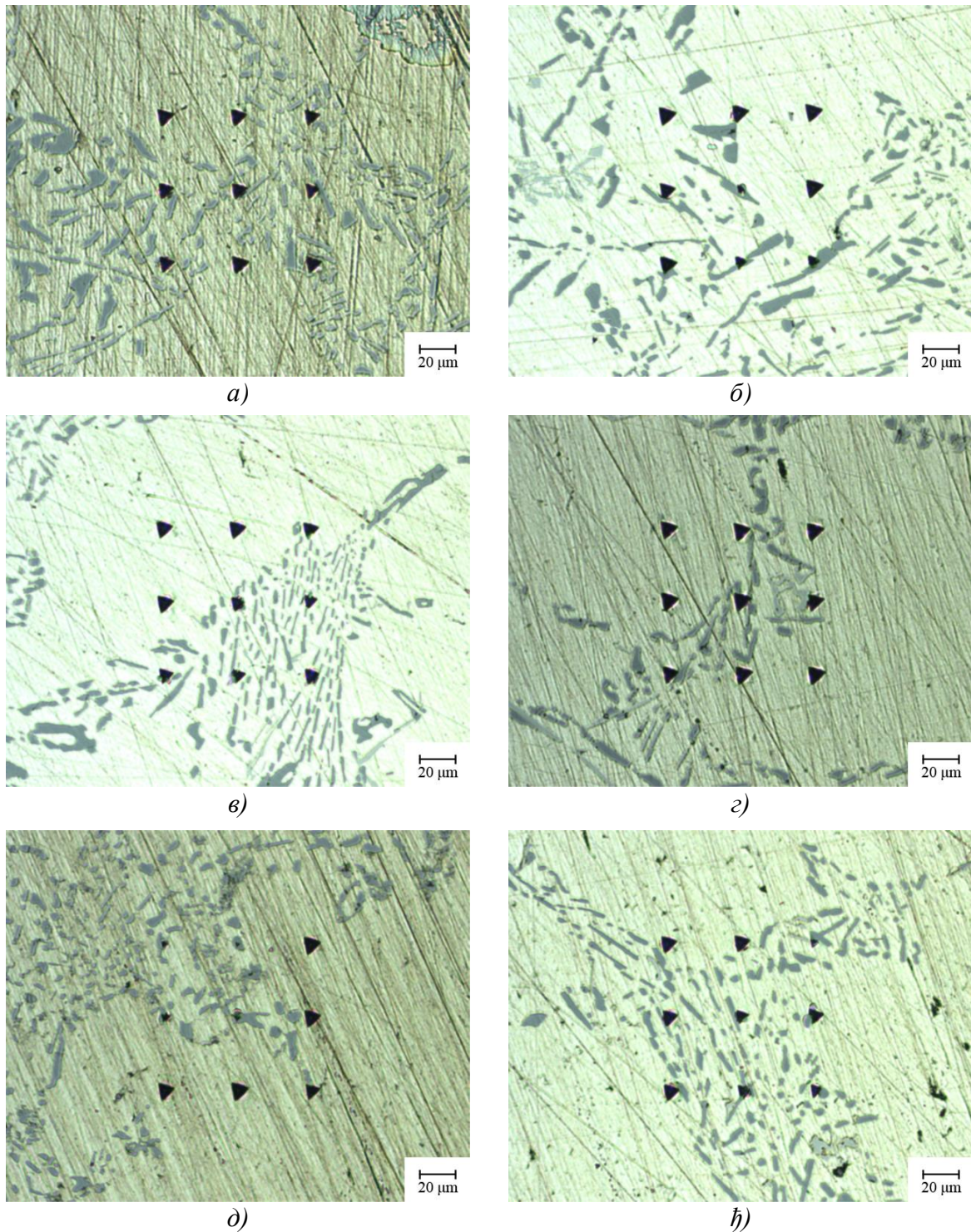


б)



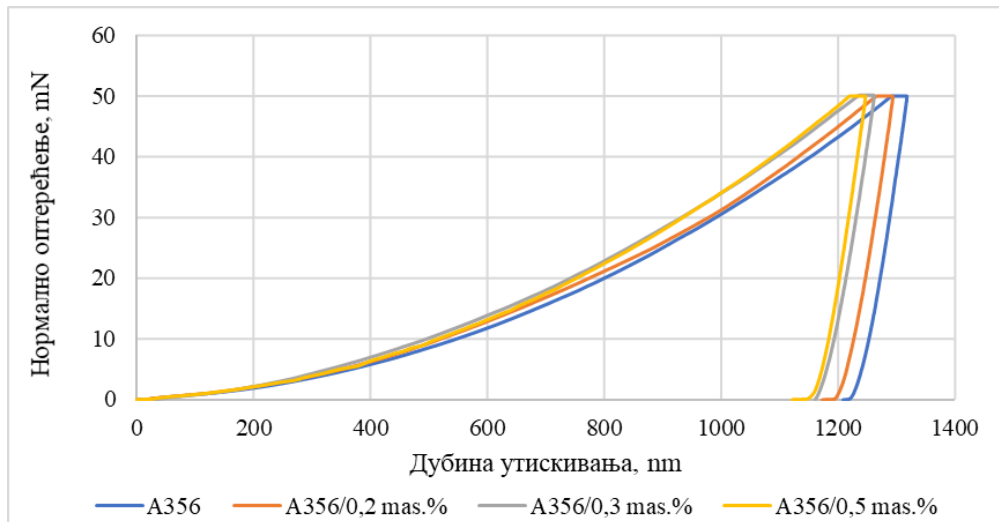
в)

Слика 3.19 Оптички микрографи трагова наноутискивања у нанокомпозите
а) А356/0,2 мас.% SiC, б) А356/0,3 мас.% SiC и в) А356/0,5 мас.% SiC

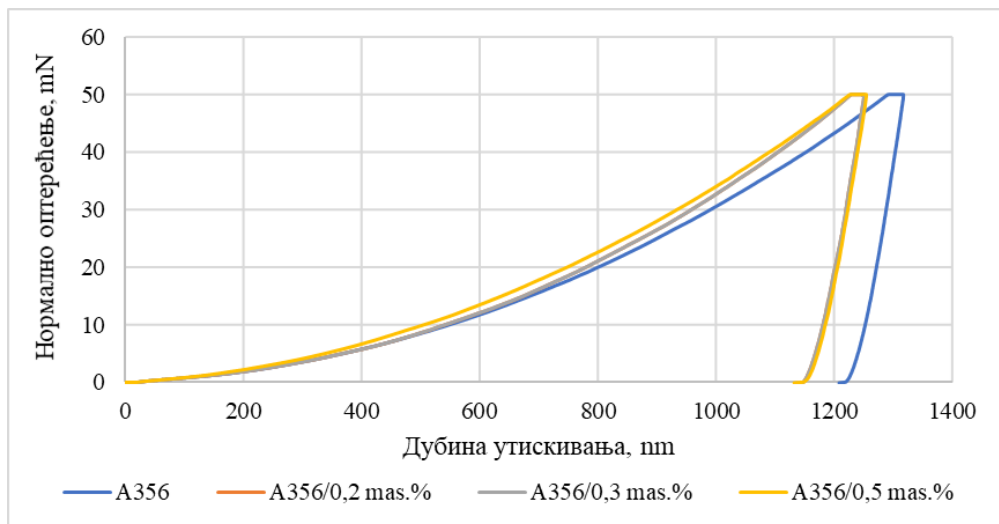


Слика 3.20 Оптички микрографи трагова наноутискивања у нанокомпозите са Al_2O_3 ојачавачем а) 0,2 мас. % (30 nm), б) 0,3 мас. % (30 nm), в) 0,5 мас. % (30 nm), г) 0,2 мас. % (100 nm), д) 0,3 мас. % (100 nm) и љ) 0,5 мас. % (100 nm)

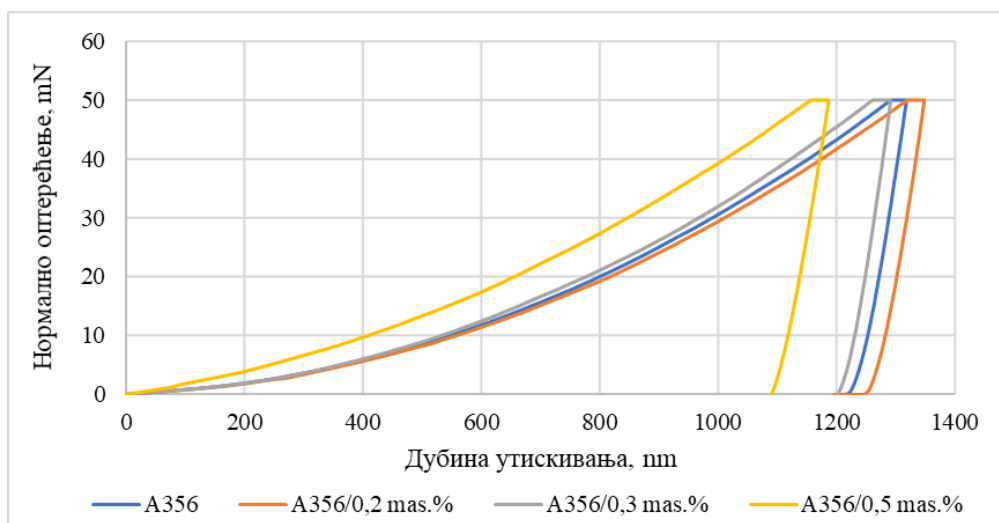
У табели 3.8 приказани су резултати спроведених испитивања, а приказани су и дијаграми кривих утискивања. Криве утискивања за све испитиване материјале су приказане на сликама од 3.21 до 3.23 и представљају зависност нормалног оптерећења од дубине утискивања. Како би се лакше извршило поређење свих нанокомпозита са основном легуром изабране су криве које приближно одговарају вредностима тврдоће средњих вредности.



Слика 3.21 Дијаграми наноутискивања нанокомпозита са SiC ојачавачем и основне легуре



Слика 3.22 Дијаграми наноутискивања нанокомпозита са Al₂O₃ ојачавачем (30 nm) и основне легуре



Слика 3.23 Дијаграми наноутискивања нанокомпозита са Al₂O₃ ојачавачем (100 nm) и основне легуре

У приказаним матрицама отисака насталих испитивањима уочава се разлика у величини и облику код међусобних отисака. Код појединих отисака тешко се уочава отисак због тврдоће коју поседује еутектички силицијум. Мора се напоменути да се код свих узорака током реализације овог експеримента водило рачуна да се одређени број утискивања изврши у области која захвата део са еутектичким силицијумом. Може се приметити да је распоред еутектичког силицијума у материјалу основе приближно исти, као и код осталих нанокompозита. На основу приказаних отисака лако се може уочити које су вредности одбачене приликом осредњавања резултата.

Анализом претходних дијаграма уочава се да се смањује дубина утискивања са повећањем тврдоће, што је и очекивано. Такође, може се закључити да се нанотврдоћа повећава са повећањем садржаја ојачавајућих честица, са изузетком код нанокompозита са 0,2 мас.% Al_2O_3 (100 nm). Нижа вредност тврдоће овог нанокompозита је због положаја матрице утискивања (слика 3.20g). С обзиром да су материјали ојачани честицама поједини истраживачи су разматрали и утицај локације утискивања на добијене резултате [134, 135]. У овом истраживању је изабран метрички распоред утискивања који је неопходан за наредна испитивања. Такође, немогуће је погодити локацију утискивања око ојачавача пошто су коришћени мали садржаји ојачавача. Анализом резултата утврђено је побољшање од око 10 % и 20 % у нанотврдоћи нанокompозита са ојачавачима SiC и Al_2O_3 (100 nm), респективно. Тренд у понашању резултата за вредност модула еластичности не може се тачно дефинисати. Модул еластичности нанокompозита са мањим садржајем ојачавача наночестица од 0,2 мас.% и 0,3 мас.% мало је нижи у односу на његову вредност основне легуре, док је за 0,5 мас.% ојачавача приближан вредности основне легуре. Мала је разлика у вредностима добијених за модул еластичности што је и оправдано с обзиром на коришћен мали масени садржај керамичких наночестица као ојачавача.

У оквиру ове дисертације, вредности нанотврдоће нанокompозита су доста ниже у поређењу са резултатима који су објавили Реди (*Reddy*) и остали, док су веће вредности макротврдоће [130]. Они су у свом раду, такође користили нижи проценат садржаја ојачавача од 0,3; 0,5; 1 и 1,5 зап.% SiC у алуминијумској легури.

Утицај еутектичког силицијума на механичка и триболошка својства разматрали су многи истраживачи. Познато је да морфологија и величина еутектичког силицијума директно одређују својства ливења. Тако да су веома актуелна истраживања ефекта додавања различитих врста и садржаја модификатора [115-117, 136-139], варијације температуре ливења [137] на морфологију силицијумске фазе, као и на механичка својства $Al-Si$ еутектичких легура [140]. Примећено је побољшање у затезној чврстоћи за 7% и издужењу модификоване легуре у односу на немодификовану $Al-Si$ еутектичку легуру за 74% [137], док је дуктилност побољшана за око 20% [139]. Побољшањем у микроструктури и механичким својствима еутектичких легура утиче на шири опсег њихове примене у индустрији [141, 142].

Систематско проучавање морфологије Si фазе коришћењем наночестица алуминијум нитрида (AlN) у легури $Al12Si$ на механичка својства извршили су Каити Ху (*Kaiqi Hu*) и остали [143]. На основу претходних истраживања, која су показала да наночестице утичу на процес раста Si фаза, они су у овом раду детаљно образложили, описали и доказали анализом материјала помоћу SEM и EDS анализе. Закључили су да додавањем 1 мас.% AlN наночестица у $Al12Si$ изазива изузетне модификације еутектичких Si фаза, а самим тим се значајно побољшава затезна чврстоћа и тврдоћа легуре $Al12Si$.

4. ПЛАН ТРИБОЛОШКИХ ИСПИТИВАЊА

Планирање експеримента даје боље резултате уз мање понављања експеримента, смањује трошкове у процесу добијања одређених информација, смањује ефекат случајних (неконтролисаних) фактора на резултате истраживања и одређује законитост појединих феномена. Као такав користи се у различитим сферама друштва. Сврха дизајна експеримента је да карактерише, предвиди, а затим побољша понашање било ког система или процеса. Методе за оптимизацију које се користе у научним студијама су: Факторски експериментални план (*Full Factorial Design*), Тагучи метода (*Taguchi method*), Сива релациона анализа (*Grey relation analysis, GRA*), Вештачке неуронске мреже (*Artificial Neural Network, ANN*), Генетски алгоритам (*Genetic algorithm, GA*), Техника оптимизације ројева честица (*Particle swarm optimization technique, PSO*) и многе друге.

Константна истраживања са циљем проналаска композитног материјала одређених механичких и триболошких особина доводе до потребе за применом оптимизационих метода којима би се убрзао развој и испитивање нанокompозита. Познато је да додавање керамичких чврстих честица меким алуминијумским легурама утиче на повећање тврдоће и отпорности на хабање нанокompозита. Међутим, неопходно је остварити хомогену и равномерну расподелу ојачавача у таквим композитима како би се постигла ефикасна носивост ојачавача. У супротном, агломерација или нехомогеност у распореду честица ојачавача може довести до смањене дуктилности, чврстоће и жилавости нанокompозита. Побољшање отпорности на хабање обично се приписује следећим факторима: саставу и микроструктури, величини, садржају и расподели наночестица, механичким особинама и особинама интерфејса између основе и ојачавача. Употреба метода за оптимизацију је у порасту, у научним истраживањима и индустрији, зато што су најисплативије за побољшање квалитета и продуктивности. Теоријске основе о оптимизационим методама које су коришћене у овој дисертацији биће описане у наставку.

4.1. Теоријске основе о методама

4.1.1. Дизајн експеримента

За сваку експерименталну анализу неопходно је планирање експеримента у свим подручјима истраживања. Планирање експеримента или дизајн експеримента (*Design of Experiments, DoE*) веома је моћна техника за постизање значајних побољшања квалитета производа и ефикасности процеса. Планирање експеримента представља систематски приступ који подразумева припрему, физичку реализацију експеримената (лабораторијску или у самој производњи), обраду експерименталних података и анализу добијених експерименталних резултата према усвојеном плану то јест матрици. Матрицу дефинише скуп експеримената састављених од различитих комбинација испитиваних променљивих којима се додељује две или више вредности које се зову нивои.

Постављање матрице је неопходно ради анализе резултата са циљем добијања математичког модела који највише одговара посматраном процесу. Математички модел омогућава предвиђање излазне променљиве у зависности од утицајних променљивих. Додатно се мери и контролише грешка експеримента. Коришћењем дизајна експеримента техничари, научници, истраживачи и инжењери могу постићи уштеду и до 50% времена потребног за извођење експеримента, уз боље разумевање технологије, побољшање дизајна, смањење времена развоја и смањење трошкова.

У оквиру методе планирања експеримента постоје два битна међусобно различита концепта и то су: класична и савремена планирања и извођења експеримента и анализе експерименталних резултата. Класични приступ извођења експеримента подразумева испитивање утицаја једне променљиве на понашање посматраног система, док се остале променљиве задржавају на одређеним константним нивоима. Извођење експеримента овог приступа подразумева велики број скувих и дуготрајних експеримената и готово је немогуће утврдити евентуално постојање интеракција између променљивих. Ако се експерименти не понављају, за z обухваћених фактора и X нивоа варирање сваког фактора, укупан број експеримената ће бити:

$$n = z(X - 1) + 1. \quad (4.1)$$

Класични експеримент онемогућава предвиђање излаза за услове који се могу у процесу променити, а нису били укључени у експеримент [144, 145]. Двадесетих година прошлог века Р. А. Фишер (*R.A Fisher*) развио је методу вишефакторне статистичке (регресионе и дисперзионе) анализе и тада је једнофакторни експеримент изгубио на значају. Фишер је хтео да сазна колико је потребно кише, сунца, ђубрива и воде за производњу најбољих усева. Први је препоручио примену дизајна експеримента при чему се сви фактори истовремено мењају и њихов ефекат се испитује истовремено [146]. Ова метода је позната као факторски експериментални план који се примењује за експерименте код којих је укључено више независних променљивих, то јест фактора. Циљ ове методе је процена главних утицаја и интеракција међу њима. Планирање експеримента подразумева да се добију поуздане и максималне информације из минимума изведених експеримената. У зависности од броја одабраних фактора, код вишефакторног експерименталног плана, могуће је исте испитивати на два или више нивоа. Према броју испитиваних фактора ти се експерименти називају двофакторни, трофакторни односно вишефакторни експерименти.

Савремено планирање експеримента испитивања ослања се на кибернетски приступ "црне кутије". Модел "црне кутије" обично се користи за процесе где су основни физички односи компликовани и/или нејасни. Примена таквог модела омогућава откривање законитости понашања, али не пружа сазнања о елементима и о структури појаве. На основу посматрања улазних и излазних величина могу се донети одређени закључци о функционисању система. Овај процес се карактерише скупом улазних и излазних променљивих. Улазна променљива у овом процесу је независна променљива, то јест фактор који се користи како би се изразила зависна променљива. Променљива коју треба објаснити или предвидети је зависна променљива односно резултат експеримента [145]. У улазне променљиве спадају управљачки (контролисани) улази, који се могу нумерички изразити и изабрати/променити, и неуправљачки (неконтролисани) улази (шум), који се не могу нумерички изразити, а чије је дејство непознато и/или се може занемарити. Промена излазних променљивих је последица утицаја улазних променљивих [147].

Поступак планирања експеримента обухвата препознавање и формулисање проблема, избор излазне променљиве, избор улазних променљивих (фактора), нивоа и опсега (интервала), избор експерименталног плана, извођење експеримента, као и

статистичку анализу експерименталних података, закључке и препоруке. Предност његове примене огледа се у организованом приступу при решавању неког проблема чиме се добијају корисне и поуздане информације о анализираном систему са проценом утицаја већег броја фактора. Циљеви планирања експеримента укључују следеће:

- одређивање најутицајнијих фактора на излазну величину (одговор);
- одређивање вредности утицајних фактора тако да је излаз готово увек у близини жељене номиналне вредности;
- одређивање вредности утицајних фактора тако да је варијабилитет излаза мали и
- одређивање вредности утицајних фактора тако да је утицај шума минимизован.

Најзначајнији сегмент у примени планирања експеримента огледа се у развијању математичког модела [146-148]. Развој и избор адекватног математичког модела олакшан је применом неких од компјутерских метода на експерименталне резултате чиме се његово креирање своди на минимални утрошак ресурса (време, трошкови, рачунање, ...). У зависности од броја посматраних фактора примењују се одговарајући математички модели. Најчешће коришћени математички модели у теорији и пракси су: линеарни, модел интеракција и квадратни модел. Избор одговарајућег модела зависи од циља експеримента. На основу досадашњих истраживања уочава се да се при оптимизацији процеса користе квадратни модели, док се у прелиминарним истраживањима користе модели интеракције.

За разлику од факторних експеримената, Тагучи метода има могућност извођења експеримената са знатно мањим бројем извођења поготово код експеримената који захтевају велики број истих. Према доступним подацима из литературе, у последње две деценије за ову врсту експерименталног истраживања, највећу примену у пракси имала је Тагучи метода. Последњих година у великом броју научних радова се примењује више оптимизационих метода на експерименталне резултате у циљу добијања оптимално тачног решења.

4.1.2. Тагучијева метода планирања експеримента

Методологија за побољшање квалитета производа развијена је 1950. године унапређењем статистичке методе *DoE* коју је спровео Геничи Тагучи (*Genichi Taguchi*). Тагучијева метода представља једноставан и ефикасан метод планирања експеримента. Заснована је на примени Тагучијевих експерименталних планова и најчешће се користи за експерименталну анализу и оптимизацију процеса или производа. Тагучи метода се користи како би се смањио број узорака приликом извођења експеримента. Применом Тагучи методе могуће је остварити следеће врсте циљева:

- општи циљеви, који се односе на оптимизацију производа и производних процеса, испитивање и проучавање више различитих фактора, односно њиховог деловања на излаз (резултат) експеримента, скраћивања потребног периода за извођење експеримента и фаза тестирања и
- посебни (специфични) циљеви, који се односе на проналажење фактора који имају више или мање утицаја, фактора који су толерантнији, то јест еластичнији на промене. Уз помоћ објективно добијених резултата могуће је дати информације о томе где је потребно распоредити ресурсе за побољшање квалитета.

Параметар квалитета представља мерљиву карактеристику производа дефинисану техничком документацијом тог производа, односно спецификацијом. Поступак реализације Тагучи методе састоји се од утврђивања параметара квалитета

производа пре израде прототипа, на основу јасно дефинисаних принципа, затим сужавања подручја њиховог расипања око циљне вредности, тако да се на тај начин смањује вероватноћа поремећаја у производњи и експлоатацији. Смањењем варијација карактеристика производа подстиче се побољшање технологије процеса, повећање квалитета и смањење трошкова, што данас у свету представља тренд. Најбоља могућност, према Тагучију, за отклањање варијација за време конструисања производа је у самом производном процесу. На основу тога је развијена стратегија квалитетног инжењерства које се може користити у оба контекста. Процес се састоји из следећих фаза: одређивање система, одређивање фактора и одређивање толеранција [140-150].

Главни доприноси Тагучијевих метода у области квалитетног инжењерства, у практичном смислу чине три концепта, и то су: ортогоналне матрице, робусност и функција губитка квалитета. Ортогоналне матрице представљају стандардне низове којима се прописује начин спровођења минималног броја експеримената са пружањем максималних информација о свим факторима који утичу на посматрани процес. Суштина ортогоналне матрице је да се изабере комбинација улазних фактора дизајна за сваки експеримент. Ортогонална матрица се користи за планирање експеримента где је димензија матрице дефинисана бројем фактора и бројем њихових нивоа. Тагучијевим дизајном ортогоналне матрице постиже се уравнотежен низ како би се осигурало да се сви нивои свих фактора сматрају једнаким. На тај начин омогућава се процена сваког фактора независно од других. Избором фактора који утичу на резултат (посматрани излаз) одређују се њихови нивои који треба да се разликују у експерименту. У сваком експерименталном извођењу треба тако изабрати нивое фактора да се елиминишу или минимизују интеракције између контролисаних фактора. У избор ортогоналних матрица, типично је да је број нивоа исти за сваки параметар мада у неким специфичним случајевима и не мора да буде тако. Одређивањем фактора и броја нивоа у експерименту могуће је одабрати ортогоналну матрицу према табели 4.1.

Табела 4.1 Стандардна табела за избор Тагучијевих ортогоналних матрица

Ортогонална матрица	Број редова	Максимални број фактора	Максимални број колона нивоа фактора			
			2	3	4	5
L_4	4	3	3	-	-	-
L_8	8	7	7	-	-	-
L_9	9	4	-	4	-	-
L_{12}	12	11	11	-	-	-
L_{16}	16	15	15	-	-	-
L'_{16}	16	5	-	-	5	-
L_{18}	18	8	1	7	-	-
L_{25}	25	6	-	-	-	6
L_{27}	27	13	-	13	-	-
L_{32}	32	31	31	-	-	-
L'_{32}	32	10	1	-	9	-
L_{36}	36	23	11	12	-	-
L'_{36}	36	16	3	13	-	-
L_{50}	50	12	1	-	-	11
L_{54}	54	26	1	25	-	-
L_{64}	64	63	63	-	-	-
L'_{64}	64	21	-	-	21	-
L_{81}	81	40	-	40	-	-

Ова табела представља стандардну табелу за избор Тагучијевих ортогоналних матрица. Ознака матрице показује величину табеле и особину колоне и састоје се од симбола:

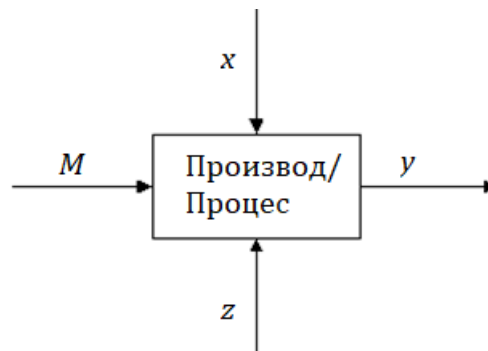
$$L_n(X^z),$$

где су: n – број експеримената, X – број нивоа и z – број фактора (број колона). У табели 4.1 је приказано 18 стандардних матрица по Тагучијевом избору. Неки од познатих матрица су $L_4(2^3)$, $L_8(2^7)$, $L_9(3^4)$, $L_{12}(2^{11})$, $L_{25}(5^6)$, $L_{27}(3^{13})$. Тагучи матрица ознаке, на пример, $L_9(3^4)$ има 9 редова, 4 колоне и 3 нивоа, што у стварности представља експеримент који има укупно 9 експерименталних извођења у коме се анализирају 4 фактора на 3 нивоа који утичу на резултат. Анализирајући исти број фактора и нивоа применом пуног факторног дизајна $3^4 = 81$, било би потребно спровести 81 експериментално извођење.

Робустан дизајн је концепција која се односи на производњу производа и услуга високог квалитета који немају грешака. Овај дизајн има високу толеранцију на факторе које није могуће контролисати. Тагучи је помоћу унутрашњег и спољашњег дизајна узео у обзир факторе буке (спољашње) и факторе дизајна (унутрашње). На овај начин настоји се да се произведу производи који неће имати грешака, али ће гарантовати функционисање и након планираног времена.

Тагучијева метода, у проблемима оптимизације, одвија се у четири корака [151]:

1. дефинисање свих релевантних фактора (слика 4.1) специфичних за проблем оптимизације и њихове вредности,
2. одабир прикладних поља за управљачке факторе и шумове, међу стандардним пољима или њихова модификација,
3. спровођење експеримената и анализа резултата и
4. спровођење верификацијских експеримената, којима треба потврдити побољшање које настаје оптималном комбинацијом фактора.



Слика 4.1 Концепција робусног дизајна

Фактор сигнала M (*Signal Factor*) је променљива чија вредност представља циљ процеса. Контролни фактори z (*Control Factors*) су променљиве на чије вредности конструктори процеса могу директно утицати. Главни циљ спровођења експеримената је поставити вредности ових променљивих на оптималне нивое. Фактори буке x (*Noise Factors*) су променљиве на чије се вредности не може директно утицати, због тога што их је тешко или немогуће контролисати. Одговор y (*Response*) је стварни одзив или излаз процеса. Овај излаз је приказан помоћу појма карактеристика квалитета QC (*Quality Characteristic*). Укратко, QC представља меру функционалности процеса за побољшање перформанси производа, то јест његовог квалитета [151].

Показатељ квалитета који је Тагучи предложио познат је под називом однос сигнал/шум S/N (*Signal/Noise*) који у методологији има веома важну улогу. Односом S/N

остварује се збирна статистичка оцена која обједињује информацију о средњим вредностима и варијансе у једну меру перформансе. Тагучи је без коришћења било каквог модела, емпиријски утврдио да однос сигнал/шум даје оптималну комбинацију нивоа фактора, где је варијанса минимална, а средња вредност близу циљне вредности. За разлику од класичног планирања експеримента где се користи средња вредност мерења, код Тагучи методе је обавезна трансформација експерименталних резултата у S/N односе [148-150]. Постоје три категорије S/N односа дате једначинама од 4.2 до 4.4:

- „мање је боље“ (*smaller is better*),

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right), \quad (4.2)$$

- „веће је боље“ (*larger is better*),

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right), \quad (4.3)$$

- „номинално најбоље“ (*nominal is best*),

$$S/N = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right), \quad (4.4)$$

где су:

y_i – i -та посматрана вредност излаза,

n – број експеримената,

\bar{y} – просечна вредност посматраних вредности (излаз) и

S – варијанса (мера одступања карактеристика од \bar{y}).

Варијанса је мера погодности изабраног технолошког процеса, односно, одступање које је генерисано у самом развоју. Вредност варијансе могуће је смањити спровођењем контроле квалитета у фази планирања и развоја производа.

У зависности од циља излаза бира се одговарајућа карактеристика квалитета. Међутим, без обзира на изабрану категорију излаза, већи S/N однос одговара бољим карактеристикама квалитета тачније мањој варијанси излазне карактеристике (одзива) око жељене (циљне) вредности.

Испитивање важности утицаја главних фактора и њихових интеракција на излаз (зависна променљива) користи се статистичка метода анализа варијансе (*Analysis of Variance, ANOVA*) [152]. Помоћу *ANOVA* анализе добијају се вредности параметара којима се дефинишу статистички значајни чланови који представљају улазне променљиве чија промена утиче на промену излаза система (излазна променљива).

Тагучи препоручује графички приступ за анализу података. Помоћу графика излаза може се на једноставан начин, визуелно, идентификовати квантитативни и квалитативни утицај главних фактора у интервалу који је дефинисан експериментом. Анализа интеракција између два или више фактора са два или више нивоа је сложенија и захтева анализу графика интеракција и *ANOVA* анализу. Интеракција између нпр. два посматрана фактора са два нивоа постоји ако линије којима се представља интеракција нису паралелне. Процентуална значајност утицаја интеракција на излаз се одређује помоћу *ANOVA* анализе.

Примена Тагучи методе ограничава оптимизацију на одређене нивое вредности фактора. У неким случајевима могуће је добити боље резултате применом комбинације

фактора са вредностима између два нивоа варирања. Може постојати комбинација фактора са вредностима узетим између два нивоа варирања која даје боље резултате. Оптимално подешавање фактора преко Тагучија у већини случајева није (глобално) тачно оптимално решење већ је приближно оптимално решење.

Завршни корак у анализи експерименталних резултата је верификација побољшања карактеристика квалитета. Зато је важно извршити конфирмациони експеримент према одређеним оптималним нивоима фактора. Предвиђање S/N односа за оптималне нивое фактора може се одредити према следећој једначини [153]:

$$\hat{\eta}_{opt} = \eta + \sum_{i=1}^p (\hat{\eta}_{i,opt} - \eta), \quad (4.5)$$

где су:

η – укупан средњи S/N однос,

$\hat{\eta}_{i,opt}$ – средњи S/N однос за i -ти фактор оптималног нивоа и

p – број фактора који значајно утичу на карактеристике квалитета.

Укупан средњи S/N однос за експеримент може се одредити према једначини:

$$\eta = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} \eta_i, \quad (4.6)$$

где су:

n_t – укупан број експеримената и

η_i – S/N однос у i -том експерименту у ортогоналној матрици.

Уколико утицај интеракција фактора буде значајан, потребно је подешавање оптималних нивоа фактора. Фактори без значаја на излаз могу се подесити на било ком нивоу без утицаја на излаз, тачније они се могу занемарити у даљој анализи. Треба истаћи да Тагучи метода припада једнокритеријумским техникама оптимизације, али се у комбинацији са другим метода може успешно користити за вишекритеријумску оптимизацију.

4.1.3. Методологија резултујућих површина

Методологија резултујућих површина (*Response Surface Methodology, RSM*) је скуп статистичких и математичких метода које се користе за успостављање везе између излаза (одговора) са улазним променљивима које имају одређени утицај на излаз. То се постиже генерисањем математичког модела тачније једначине која описује процес. Постављањем математичког модела успоставља се одређена законитост помоћу које се могу доносити конкретни закључци о природи појаве и добра је основа за оптимизацију.

Циљ ове методе је оптимизација излаза који је под утицајем улазних променљивих посматраног процеса. Тачније, циљ представља одређивање оптималних услова процеса или утврђивање области независних променљивих у којима су радне спецификације система задовољене.

Процес оптимизације применом *RSM* подразумева следеће:

- избор независних променљивих које имају највећи утицај на процес, у складу са исходом;
- дефинисање опсега промена (минимум и максимум) за сваку променљиву;

- избор експерименталног дизајна матрице (плана) према коме се изводе експерименти;
- математичко-статистичка обрада добијених резултата;
- анализа перформансе модела и провера могућности за изменом померањем у смеру оптималне области и
- добијање оптималних вредности за сваку испитивану променљиву.

Предности примене ове методе у односу на класичне експерименталне методе огледа се у извођењу мањег броја експеримената из којих се може добити велики број информација, коришћењем емпиријског модела којим се повезује излаз са независним променљивим. Додатно, могуће је посматрати интерактивни ефекат независних променљивих на излаз. Процена интерактивних ефеката две различите независне променљиве на излаз код ове методе може се графички приказати у дводимензионалном или тродимензионалном простору (у облику контурних дијаграма). Ако се испитује три или више фактора, један мора бити постављен на изабрану константну вредност, док се промене вредности два друга фактора приказују на контурном дијаграму. На дијаграму се помоћу нијансе исте боје или различитих боја раздвајају контуре како би се идентификовала област интереса.

Као недостатак ове методе издваја се подешавање података у моделу другог реда, јер ако систем садржи закривљеност, не мора значити да је добро описан полиномом другог реда. Неки од истраживача примењујући ову методу врше конвертовање података у други облик. Тешко је знати који је облик трансформације најбољи и не може се поуздано тврдити да дају жељене резултате за све системе. Препорука је да се изабере мањи распон независних параметара ако је систем тешко објаснити моделом другог реда [154-157].

Битно је напоменути да се увек полази од чињенице да је функција излаза непозната. У току процеса моделовања излаз се прво апроксимира полиномом првог реда. У случају да се покаже да је модел првог реда неадекватан, анализира се модел са међусобним утицајима. Ако се и овај модел функције излаза покаже неадекватним, бира се полином другог реда. Математички модел сматра се добрим ако су вредности остатка мале. Треба истаћи да се полиноми трећег, а поготово четвртог, петог и виших редова изузетно ретко користе.

4.1.4. Вештачке неуронске мреже

Вештачке неуронске мреже (*Artificial Neural Network, ANN*) математичка су техника која опонаша понашање људског мозга. *ANN* за пренос информација користе међусобно повезане чворове који се називају неурони. Неуронске мреже нашле су своју примену у решавању комплексних научних и инжењерских проблема зато што скраћују време експеримента, а користе се и за предвиђање понашања излаза на основу посматраних фактора. Свака неуронска мрежа састоји се од три дела односно три слоја и то: улазног, скривеног и излазног слоја. Број неурона у улазном слоју једнак је броју улазних фактора, број неурона излазног слоја једнак је броју излазних фактора, док се скривени слој може састојати од више слојева, а број неурона у скривеном сваком слоју је флексибилан [157-160].

ANN се не програмирају, већ се врши њихово тренирање, што значи да може проћи доста времена пре него што *ANN* буду спремне за коришћење. Пре почетка тренирања корисник задаје улазне и излазне параметре, и затим се тренирање врши

надоградњом тежинских коефицијената (*weights*) да би се добио излаз што приближнији задатом [157-160]. Структура неуронске мреже може се представити као [157]:

$$N_{in} - [N_1 - N_2 - \dots - N_i]_h - N_{out}, \quad (4.7)$$

где су:

N_{in} – број неурона у улазном слоју,

N_{out} – број неурона у излазном слоју и

$N_1, N_2,$ и N_i – број неурона у сваком скривеном, док је са h у индексу означен број скривених слојева.

У овој докторској дисертацији примењена је математичка техника *ANN* за решавање посматраног проблема у циљу предвиђања и проналажења вредности утицајних фактора садржаја ојачавача, величине ојачавача, оптерећења и брзине клизања. Имајући у виду да је *RSM* техника успешно нашла примену у моделирању с *ANN*, у овој докторској дисертацији примењена је за одређивање оптималних услова, допуштајући избор оптималних вредности фактора за креирање *ANN* модела с побољшаним карактеристикама за предвиђање интензитета хабања.

4.1.5. Генетски алгоритам

Генетски алгоритам (*Genetic Algorithm, GA*) је оптимизациона метода која се користи за решавање бројних оптимизационих проблема [161-164], а посебно код комплексних инжењерских проблема. Метода је заснована на принципима природне селекције и спада у групу популарних мета хеуристичких метода. Принцип рада подразумева креирање популације која представља скуп потенцијалних решења. Итеративним поступком креирања нових генерација у којима опстају све боље јединке решење конвергира оптимуму. Иницијална популација креирана је од случајно одабраних вредности из дозвољеног домена претраге. Постоји велики број начина извођења генетског алгоритма [165-169], због популарности и заступљености методе.

Основне фазе *GA* су селекција (*Selection*), укрштање (*Crossover*) и мутација (*Mutation*). Применом ових поступака од иницијалних вредности јединки, добијају се нове јединке, док решење конвергира оптимуму. Оптимално решење представља вредност најбоље јединке у популацији. Укрштање је фаза алгоритма која представља процес комбиновања две јединке (као родитеља), где се добијају нове јединке које задржавају карактеристике од оба родитеља. Мутација је процес потпуне промене неке јединке, чиме се добија потпуно нова јединка. Процес мутације је веома важан, првенствено како би се избегла превремена конвергенција. Поступак селекције, укрштања и мутације понавља се кроз сваку генерацију, све док се не испуни критеријум заустављања. Метода се примењује и за решавање проблема вишекритеријумске оптимизације [170, 171].

4.1.6. Техника оптимизације ројева честица

Изузетно популарна метода, техника оптимизације ројева честица (*Particle swarm optimization, PSO*) спада у групу алгоритма интелигенције роја (*swarm intelligent*). Ова метода, због изузетних карактеристика има велику популарност, а поседује и велики број модификација које је могуће применити за решавање комплексних проблема [172-176]. Основна карактеристика ове методе је да врши претрагу по целом дозвољеном домену.

Алгоритам садржи само једну фазу. Принцип рада заснован је на такозваном убрзању честице, растојању позиције честице од најбоље вредности дате честице (*local best* – $x_{p,i}$) и позиције од глобално најбоље честице (*global best* – $x_{g,i}$). Позиција неке честице у датом тренутку представља потенцијално решење. Усваја се само најбоља позиција и она се преноси кроз итеративни оптимизациони процес. Свако ново решење зависи од ове две компоненте, брзине и позиције. Позиција је дефинисана са x_i , док је брзина представљена са v_i . Број позиција и убрзања је n , у зависности од укупног броја честица. Нова вредност добија се следећи једначину (4.8).

$$x_{new,i} = x_{old,i} + v_{new,i}, \quad (4.8)$$

где је:

$i = 1, 2, \dots, N$, укупна величина популације и

$$v_{new,i} = \omega \cdot v_{old,i} + c_p \cdot r_p (x_{p,i} - x_{x,i}) + c_g \cdot r_g (x_{g,i} - x_{x,i}). \quad (4.9)$$

Величине c_p и c_g представљају константе, а њихове препоручене вредности према литератури [172-176] су 1,5 за обе константе. Величине r_p и r_g случајне су вредности из интервала (0, 1). Тренутна позиција честице представљена је са $x_{x,i}$. Вредност интензитета честица ω (*inertia weight*) усвојена је као:

$$\omega = \omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{Iteration_{max}} \cdot Iteration, \quad (4.10)$$

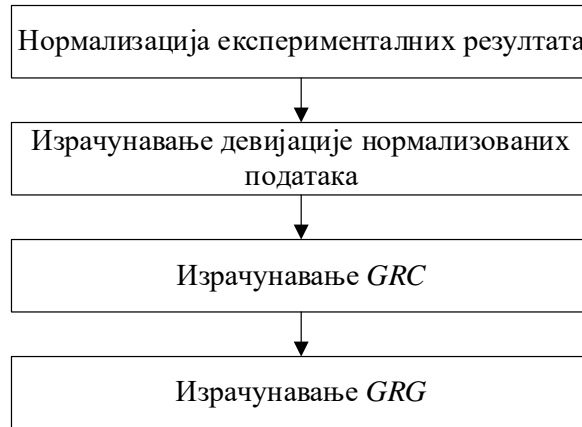
где су према препорукама литературе $\omega_{max} = 0,9$ и $\omega_{min} = 0,4$ [172-176].

Потреба индустријске производње за методом спровођења експеримената који оптимизују процесе и повећавају квалитет производа је стална. Дизајн експеримената је основни корак побољшања квалитета кроз оптимизоване процесе. То захтева правилно планирање и распоред експеримената, као и тачну анализу резултата, па су ове методе постале алат за решавање практичних проблема за инжењере и научнике.

4.1.7. Сива релациона анализа

Сложеност различитих процеса може се ефикасно решити применом вишекритеријумске оптимизације односно сиве релационе анализе (*Grey relation analysis, GRA*). Објављивањем два научна рада професора Дјулонг Денга (*Julong Deng*) 1982. године, настала је нова научна дисциплина названа теорија сивог система. Као део теорије сивог система 1989. године настала је *GRA* анализа [177, 178].

Тагучи метода не може се користити директно за оптимизацију проблема са више излаза па се зато комбинује са другим оптимизационим методама. У случају процеса оптимизације са више одговора, Тагучи метода се комбинује са сивом релационом анализом. Анализа *GRA* повезана са Тагучи методом представља нову методологију за вишекритеријумску оптимизацију која је позната као Тагучи-Греј (*Taguchi-Grey*) метода [179-186]. Предност ове технике је да више одговара могу бити претворени у једну сиву релациону оцену (*Grey relation grade, GRG*). Значајна предност *GRA* технике је да се може генерисати задовољавајући исход коришћењем релативно мале количине података. Алгоритам тока оптимизације *GRA* анализе је приказан на слици 4.2.



Слика 4.2 Ток спровођења GRA анализе

Први корак у *GRA* је нормализација података која се креће у границама од 0 до 1 [186-191]. Нормализација података врши се у зависности од очекиване природе излазних вредности при чему се разликују три нормализације. Прва нормализација је за „мање је боље”, где су очекиване најниже вредности циљне функције и која се врши помоћу једначине 4.11. Друга нормализација „веће је боље” примењује се када су очекиване вредности циљне функције највише (једначина 4.12). Када постоји жељена вредност (y^0) излаза, за нормализацију се користи једначина 4.13, која се назива „номинално је боље”.

$$x_i(k) = \frac{\max y_i(k) - y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)}, \quad (4.11)$$

$$x_i(k) = \frac{y_i(k) - \min y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)}, \quad (4.12)$$

$$x_i(k) = \frac{|y_i(k) - y^0|}{\max\{\max y_i(k) - y^0, y^0 - \min y_i(k)\}}, \quad (4.13)$$

где су:

k – број излаза,

i – број експеримената,

$\max y_i(k)$ – највећа експериментална вредност за k -ти излаз,

$\min y_i(k)$ – најнижа експериментална вредност за k -ти излаз и

y^0 – жељена вредност.

Наредни корак у *GRA* анализи је израчунавање сивог релационог коефицијента (*Grey Relational Coefficients*, *GRC*). За израчунавање *GRC* потребно је прво, помоћу нормализованих вредности, израчунати апсолутне вредности разлике Δ_{0i} према обрасцу:

$$\Delta_{0i} = \|x_0(k) - x_i(k)\|, \quad (4.14)$$

где је:

$x_0(k)$ – референтна нормализована вредност ($x_0(k) = 1$). После добијања апсолутне вредности разлике израчунава се сиви релациони коефицијент према обрасцу:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \varphi \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \varphi \Delta_{\max}}, \quad (4.15)$$

где су:

Δ_{\min} и Δ_{\max} – најмања и највећа апсолутна вредност разлике,

φ – коефицијент разлике који се налази у интервалу $0 \leq \varphi \leq 1$.

У случају када је тежина излаза једнака онда је $\varphi = 0,5$, што је веома често коришћено у научним радовима [186]. Последњи корак у *GRA* анализи је израчунавање *GRG* (γ_i) помоћу једначине:

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k), \quad (4.16)$$

где је:

n – укупан број излаза.

Једначина 4.16 користи се када се подразумева да је утицај посматраних одговора/излаза на *GRA* једнак. У реалним случајевима потребно је израчунати утицај сваког одговора на карактеристику процеса помоћу тежинских коефицијената. Тежински коефицијенти добијају се на основу *S/N* анализе помоћу једначине:

$$w_k = \frac{\sum_{j=1}^p \text{Delta}_{i,j}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^p \text{Delta}_{i,j}}. \quad (4.17)$$

Израчунавањем тежинских коефицијената могуће је добити реалније вредности *GRG* (γ_i) помоћу једначине:

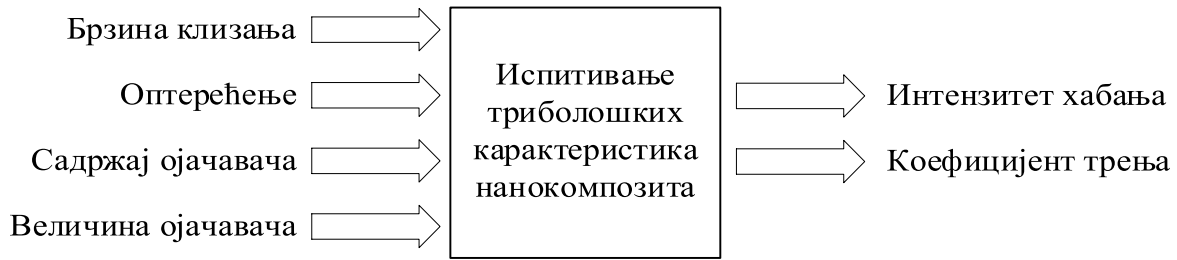
$$\gamma_i = \sum_{k=1}^n w_k \xi_i(k). \quad (4.18)$$

На овај начин се проблеми са више излаза конвертују у проблем са једним излазом. За даљу оптимизацију користи се *ANOVA* анализа.

4.2. Избор фактора, нивоа и плана експеримената

Најважнија фаза за добијање информација јесте фаза планирања експеримента. У овој фази утврђују се проблеми и циљеви експеримента, фактори који могу значајно утицати на карактеристике процеса који се прате и врши се одабир нивоа ових фактора. На основу знања, искуства и података из литературе могуће је извршити избор фактора. Неопходно је сагледати све утицајне факторе за које се претпоставља да имају највећи утицај на излаз. Такође, потребно је уочити и све зависности, односно функције које се из таквих испитивања могу добити, док се спољашњи услови морају одржавати на константном нивоу.

У овој докторској дисертацији планирање експеримента се односи на планирање и реализацију триболошких испитивања од самог почетка, тачније од препознавања и дефинисања утицајних фактора па све до статистичке обраде података и закључака. Циљ дисертације је налажење функционалне зависности између излаза, у овом случају интензитета хабања и коефицијента трења, и улазних фактора. У зависности од функције циља спроводи се поступак оптимизације улазних фактора по избору најадекватнијег модела. Избор фактора за триболошка испитивања врши се на основу претходних истраживања и података из литературе. Најутуцајнији фактори на интензитет хабања нанокомпозита су независно променљиве, и то су брзина клизања, оптерећење, садржај ојачавача и величина ојачавајућих честица у основној легури А356. На слици 4.3 је илустровано испитивање триболошких карактеристика нанокомпозита.



Слика 4.3 Пример избора утицајних фактора при испитивању и излаза који из таквих испитивања могу произаћи

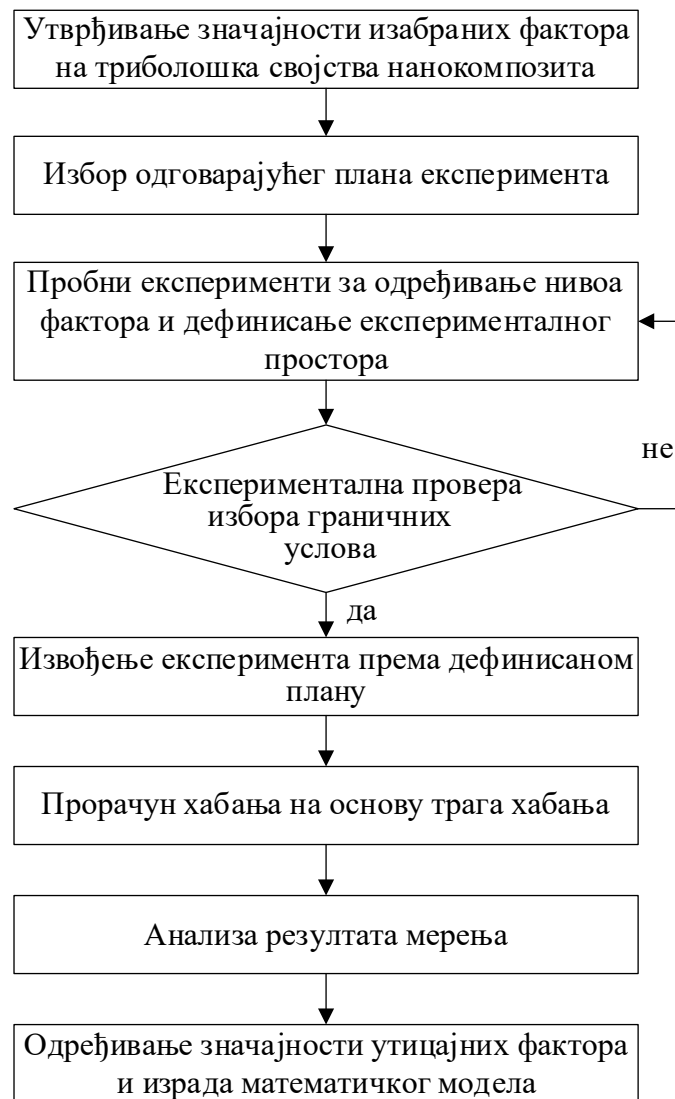
Фактори као што су температура околине и температура уља сматрају се спољашњим факторима и они се могу елиминисати, тачније држати на константном нивоу или се могу мењати по закону случајности. При извођењу експеримената ови фактори су се одржавали приближно константним. Фактор који је био константан за сва испитивања триболошких карактеристика јесте пут клизања, како би се уочило како остали фактори утичу на посматрани излаз. Спровођење експеримената уз ефекте спољашњих фактора оправдано је јер су од интереса резултати који се добијају у реалним условима, а не у идеализованим.

За улазне независне променљиве изабрани су тип ојачавача, величина ојачавајућих честица, садржај ојачавајућих честица, брзина клизања и оптерећење. Разматрани фактори и њихови нивои су приказани у табели 4.2. Пре формулације нивоа фактора претходила су пробна испитивања на основу којих су изабрани коришћени нивои. Константна вредност за пут клизања од 1000 m, усвојена је на основу претходних, пробних испитивања и прегледа литературе.

Табела 4.2 Улазни фактори и њихови нивои

Контролни фактори	Јединица	Ниво I	Ниво II	Ниво III	Ниво IV
Садржај ојачавача	mas. %	0	0,2	0,3	0,5
Тип ојачавача	-	SiC	Al ₂ O ₃	-	-
Величина честица	nm	20-30	≈50	100	-
Брзина клизања	m/s	0,25	1	-	-
Оптерећење	N	40	100	-	-

Изабрани су фактори, вредности фактора и број њихових нивоа, а затим је урађен избор одговарајуће матрице. По извршеном експерименту за анализу, обраду и приказ резултата коришћене су претходно описане методе. На слици 4.4 дат је алгоритам тока триболошког испитивања и анализе резултата. Коришћене методе за оптимизацију експерименталних података су реализоване уз помоћ софтвера *MINITAB19* и *MATLAB2016*.



Слика 4.4 Алгоритам експерименталног плана триболошких испитивања

У овом истраживању први корак је испитати утицај свих улазних фактора на триболошке карактеристике нанокompозита. Увидом у податке из литературе, до тренутка производње нанокompозита није било објављених научних радова са масеним садржајем ојачавача који су коришћени у овом истраживању. Примена Тагучи ортогоналних матрица омогућава избор нивоа фактора различитих нивоа. У овом случају постављене су две одговарајуће матрице како би на основу њих извршило триболошко испитивање, а потом извршила анализа резултата и уочила зависност између посматраних фактора и излаза. Циљ експерименталног истраживања је процена утицаја посматраних фактора: брзине клизања, оптерећења, садржаја ојачавача и величине ојачавајућих честица на интензитет хабања и коефицијент трења. Триболошко испитивање материјала реализовано је у лабораторијским условима.

У овом истраживању триболошке карактеристике нанокompозита карактеришу се помоћу улазних променљивих (фактора) и излазних односно излаз система (интензитет хабања, коефицијент трења). Циљ експеримента је утврдити њихову узрочно последиичну везу, то јест експериментални модел. Помоћу регресионе анализе добија се математички модел који представља алгебарски израз којим се аналитички изражава статистички однос међу променљивим.

4.3. Опрема за триболошка испитивања

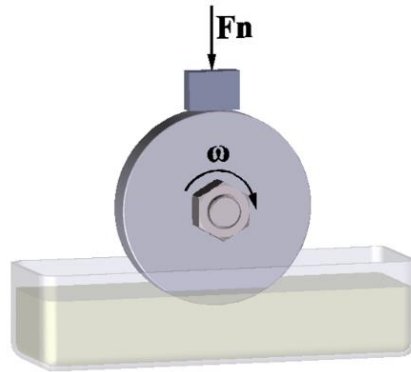
Експериментална испитивања триболошких карактеристика алуминијумских нанокомпозита моделског су типа и обављена су на унапређеном и компјутерски подржаном трибометру TPD 95 са контактном геометријом блок-на-диску („*block-on-disc*“). Ова испитивања су обављена у Лабораторији за трибологију на Машинском факултету у Београду. На слици 4.5 је приказан трибометар на коме су извршена триболошка испитивања по усвојеном плану испитивања.



Слика 4.5 Трибометар TPD 95

Трибомеханички систем остварује контакт по линији помоћу улазних параметара: нормалне силе, брзине контакта, пређеног пута и врсте мазива. Одређивање величине хабања и коефицијента трења могу се вршити у условима клизања са и без подмазивања. Излазне величине које се могу пратити, поред поменутих триболошких карактеристика, јесу температура мазива, контактна температура и пређени пут.

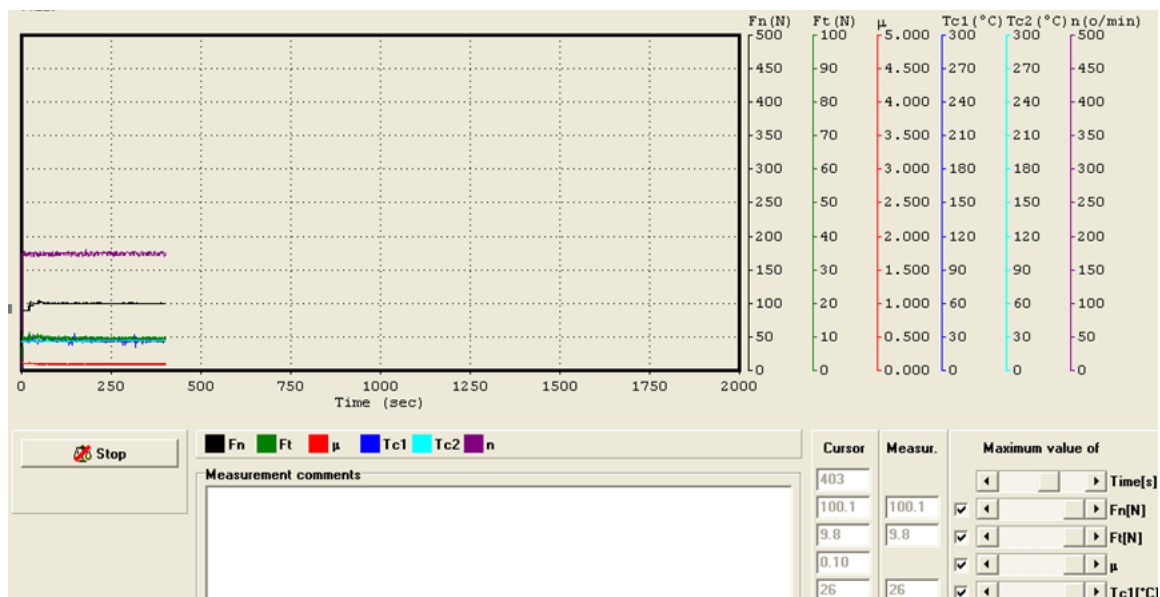
Основну конфигурацију трибометра чине: погонски систем, систем за задавање оптерећења, систем за подмазивање и мерни систем. Погонски систем се састоји од електромотора, каишног преносника и варијатора који омогућују избор брзине клизања у интервалу 0,1 до 5 m/s. На главном вратилу налази се ротациони диск. Систем за задавање оптерећења помоћу промене положаја тега и системом полука постиже оптерећења до 450 N. Систем за подмазивање чини посуда за мазиво у коју је ротациони диск делимично урођен (слика 4.6) и својим обртањем доводи мазиво у зону контакта. На основу претходног, конфигурација трибометра омогућава варирање услова испитивања.



Слика 4.6 Модел контактнoг пара

За аквизицију података, праћење процеса и запис сигнала на диск рачунара коришћена је одговарајућа корисничка апликација. На слици 4.7 је приказан изглед коришћене апликације „TPD-95“ која омогућава праћење вредности улазних параметара. Ова апликација омогућава:

- прикупљање података са трибометра континуално у току времена;
- приказ (нумерички и графички) вредности мерених величина у реалном времену;
- калибрацију физичких величина које се мере на трибометру и
- креирање датотека са подацима мерених величина који се чувају на диску рачунара и приказ резултата мерења.



Слика 4.7 Графички приказ тренутних вредности нормалне силе, коефицијента трења, температуре мазива и ваздуха

Коришћени софтвер, поред прикупљања података, омогућава и креирање нових података на бази измерених вредности мерних величина (нормална сила, сила трења, температура околине и температура мазива). Ова могућност је искоришћена за аутоматско генерисање коефицијента трења μ у реалном времену, коришћењем математичке операције дељења тренутних података силе трења и нормалног оптерећења.

После завршених триболошких испитивања извршено је мерење ширина трага хабања на контактнoј површини блока која представља основни параметар хабања. Мерење је вршено на три места, а затим је прорачуната средња аритметичка вредност која је коришћена за даљи прорачун. Мерење трагова извршено је на универзалном

мерном микроскопу, док је за детаљнију анализу коришћен *SEM* који је приказан на слици 4.8, а који се налази на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу у Центру за трибологију.

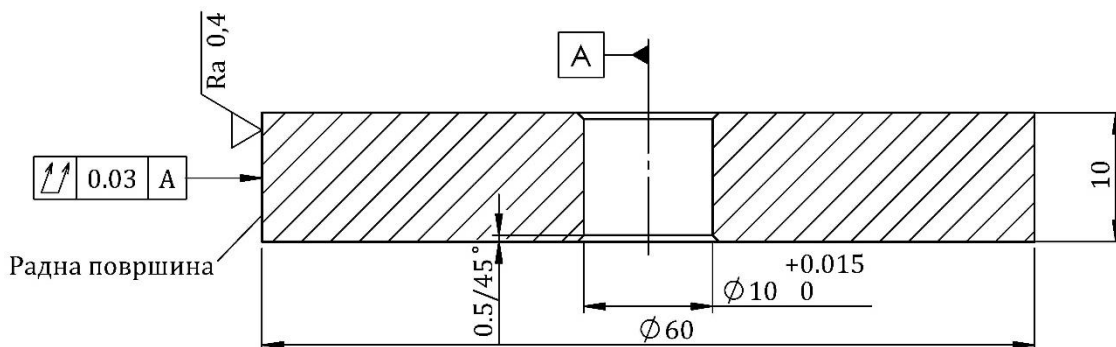


Слика 4.8 Скенирајући електронски микроскоп са *EDS*-ом

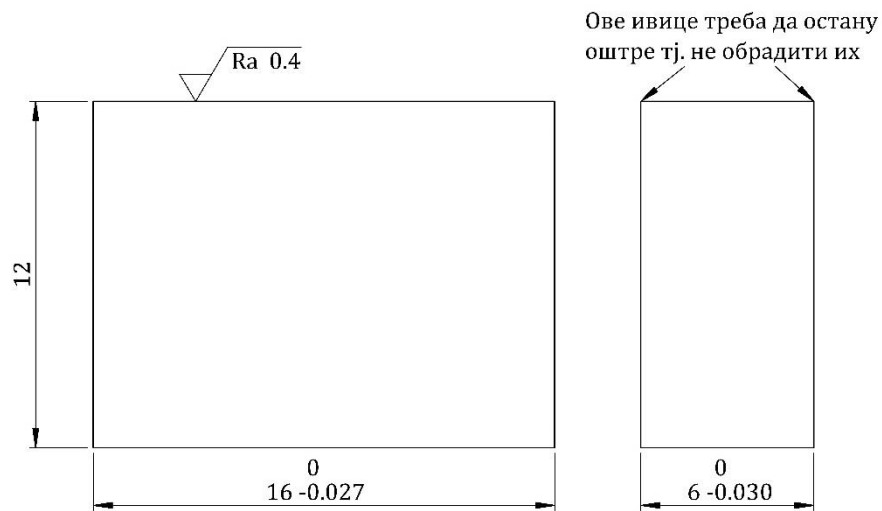
SEM омогућава пружања информације о топографији и морфологији, а такође се поуздано користи за одређивање хемијског састава површина посматраног материјала путем *EDS* анализе. Приказан уређај је коришћен за анализу трагова хабања алуминијумских нанокompозита. Пре приступању спровођења овог дела експеримента потребно је узорке припремити. Узорке треба очистити од честица прашине, влакана папира, отисака прстију и замашћених делова.

4.3.1. Контактни елементи

Контактни пар се састоји од диска пречника $D_d = 60 \text{ mm}$ и ширине $b_d = 10 \text{ mm}$ (слика 4.9) и стационарни блок ширине $b_b = 6 \text{ mm}$, дужине $l_b = 16 \text{ mm}$ и висине $h_b = 12 \text{ mm}$ (слика 4.10). Овај контактни пар одговара захтевима ASTM G 77 стандарда [113].



Слика 4.9 Шематски приказ диска са основним димензијама

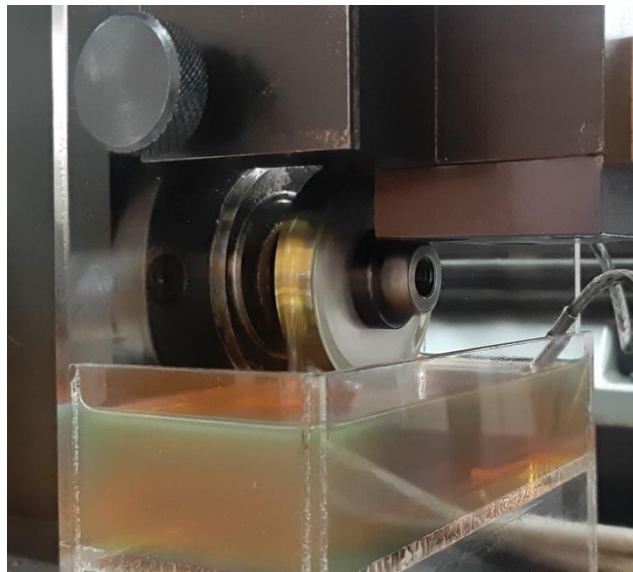


Слика 4.10 Димензије блока према ASTM G 77 стандарду

Флексибилност ових испитивања огледа се у могућности примене различитих материјала који се могу произвести и применити за блокове. Комбинације потенцијалних материјала за геометрију поменутог контактнoг пара су бескрајне.

5. ПРВА ФАЗА ТРИБОЛОШКИХ ИСПИТИВАЊА

Испитивања хабања нанокompозита обављена су на трибoметру TPD 95 у условима са подмазивањем и у складу са ASTM G77, а који се налази у Лабораторији за трибологију на Машинском факултету у Београду. Дужина линијског контакта остварена између обртног диска пречника 60 mm и испитиваних блокова је око 6 mm. Материјал дискова је челик 42CrMo4, тврдоће 50-55 HRC, а материјали блокова су испитивани алуминијумски нанокompозити. Површине блокова обрађене су брушењем према стандарду ASTM G77. Вредност Херцовог притиска између диска и блока налазила се у границама од 2,06 МПа до 5,48 МПа за испитиване нанокompозите, док је за основну легуру износила од 2,19 МПа до 5,38 МПа. Највеће вредности притиска јављале су се при линијском контакту блока по диску који се јавља у периоду уходавања. После периода уходавања траг хабања се повећава и контакт прелази у површински, а истовремено се смањује контактни притисак. На слици 5.1 приказан је контактни пар у току експерименталног испитивања на трибoметру TPD 95.



Слика 5.1 Фотографски приказ контактнoг пара приликом испитивања

На основу плана експеримента, анализиран је интензитет хабања алуминијумске легуре A356 и алуминијумских нанокompозита. Пут клизања је 1000 m у условима са подмазивањем, а при чему су варирани оптерећење, брзина клизања и величина ојачавајућих честица. За подмазивање коришћено је редукторско уље, вискозности 220 mm²/s (ISO VG 220). После триболошких испитивања посматране су похабане површине узорака применом SEM анализе и урађена EDS анализа са циљем да се одреди хемијски састав нанокompозита. Величина трага хабања мерена је после сваког испитивања. Мерење је вршено на три места, а затим је прорачуната средња аритметичка вредност ширине трагова хабања на основу којих је израчунат интензитет хабања коришћен за даљу анализу.

5.1. Резултати и анализа триболошких карактеристика нанокompозита A356/SiC

5.1.1. Тагучи анализа

За експериментални план изабрана су три фактора која су дата у табели 5.1, заједно са њиховим нивоима и ознакама. Фактор са четири нивоа је садржај ојачавача, док су остала два фактора другог нивоа и то су оптерећење и брзина клизања.

Табела 5.1 Улазни фактори и њихови нивои са кодираним вредностима

Фактор и ознака	Јединица	Ниво I	Ниво II	Ниво III	Ниво IV
Садржај ојачавача SiC (A)	mas. %	0 (1)	0,2 (2)	0,3 (3)	0,5 (4)
Брзина клизања (B)	m/s	0,25 (1)	1 (2)	-	-
Оптерећење (C)	N	40 (1)	100 (2)	-	-

Експериментални резултати за интензитет хабања (*wear rate*, *WR*) и коефицијент трења (*coefficient of friction*, *CoF*) добијају се спровођењем експерименталних испитивања применом Тагучи L_{16} ортогоналне матрице приказани у табели 5.2. Такође, у табели су дате величине трагова хабања насталих током испитивања. У циљу лакшег представљања коефицијената модела и лакшег тумачења резултата нивои фактора се кодирају (1, 2, 3, 4) и приказани су у табели 5.1.

Анализа резултата експеримената заснива се на процени утицаја фактора, као и анализи варијансе добијених резултата. Добијени експериментални резултати трансформишу се у однос сигнал–шум (*S/N*). Дакле, сигнал је средњи однос добијених резултата, док је бука/шум стандардно одступање. Тагучи користи *S/N* однос да мери карактеристике квалитета које одступају од жељене вредности, које су дате у поглављу 4.1.2. У овом истраживању *S/N* однос за постизање минималног хабања изражава се карактеристиком "мање је боље" и израчунава се помоћу једначине (4.1). Независно од примењене карактеристике квалитета, трансформисани резултати увек се тумаче тако да је боља већа вредност *S/N* односа.

Табела 5.2 Експериментални резултати са стварним вредностима фактора

Р.бр.	A, mas. %	B, m/s	C, N	Траг хабања, mm	WR, $10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$	CoF
1.	0,0	0,25	40	1,8240	1,0271	0,0401
2.	0,0	0,25	100	2,4300	2,4291	0,0466
3.	0,0	1,00	40	1,2631	0,3410	0,0401
4.	0,0	1,00	100	1,8599	1,0890	0,0218
5.	0,2	0,25	40	1,9491	1,2533	0,0393
6.	0,2	0,25	100	2,4736	2,5623	0,0464
7.	0,2	1,00	40	1,7700	0,9385	0,0146
8.	0,2	1,00	100	1,9930	1,3399	0,0374
9.	0,3	0,25	40	1,8771	1,1195	0,0674
10.	0,3	0,25	100	2,4210	2,4022	0,0340
11.	0,3	1,00	40	1,5263	0,6017	0,0444
12.	0,3	1,00	100	1,8947	1,1512	0,0178
13.	0,5	0,25	40	1,2368	0,3202	0,0707
14.	0,5	0,25	100	2,3157	2,1021	0,0824
15.	0,5	1,00	40	0,7368	0,0677	0,0300
16.	0,5	1,00	100	1,4622	0,5291	0,0234

У софтверском пакету *MINITAB19*, помоћу анализе варијансе *S/N* односа, извршена је статистичка анализа и одређена значајност фактора. Добијени експериментални подаци за интензитет хабања нанокомпозита претворени су у *S/N* однос и приказани у табели 5.3. У овој табели такође је дато и предвиђање помоћу Тагучи методе за исте улазне факторе у циљу валидације коришћеног модела. У случају да су одступања података предвиђених вредности мала у односу на експерименталне податке онда је предложени модел прихватљив.

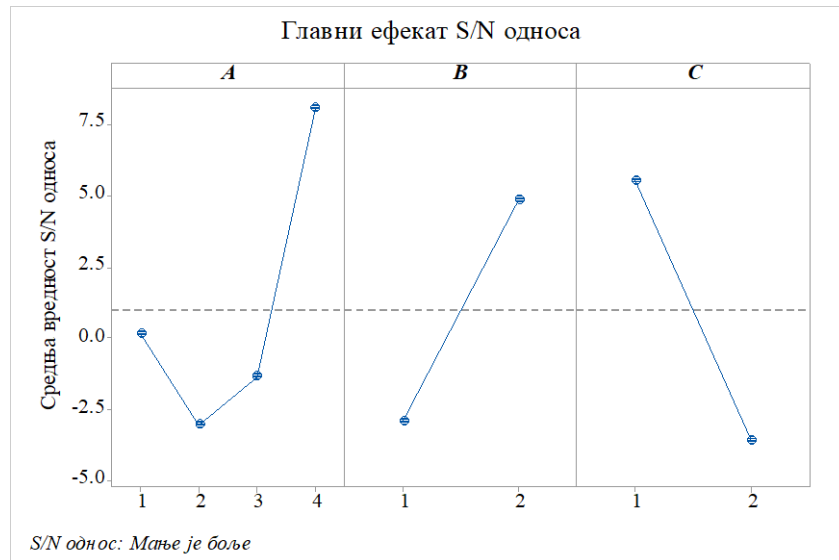
Табела 5.3 Резултати *S/N* односа експеримента

Р.бр.	A, mas. %	B, m/s	C, N	<i>S/N</i> однос за <i>WR</i>	<i>S/N</i> однос за <i>CoF</i>	Предвиђање <i>S/N</i> односа за <i>WR</i>	Предвиђање <i>S/N</i> односа за <i>CoF</i>
1.	0,0	0,25	40	-0,2323	27,9323	0,4193	26,6205
2.	0,0	0,25	100	-7,7091	26,6345	-8,3606	27,9464
3.	0,0	1,00	40	9,3444	27,9384	8,6929	29,2503
4.	0,0	1,00	100	-0,7402	33,2118	-0,0887	31,8999
5.	0,2	0,25	40	-1,9608	28,1175	-2,7410	30,1305
6.	0,2	0,25	100	-8,1726	26,6635	-7,3923	24,6504
7.	0,2	1,00	40	0,5510	36,7320	1,3313	34,7189
8.	0,2	1,00	100	-2,5414	28,5495	-3,3217	30,5626
9.	0,3	0,25	40	-0,9801	23,4250	-1,2297	23,2582
10.	0,3	0,25	100	-7,6121	29,3594	-7,3625	29,5262
11.	0,3	1,00	40	4,4121	27,0449	4,6617	27,2117
12.	0,3	1,00	100	-1,2231	34,9702	-1,4727	34,8034
13.	0,5	0,25	40	9,8927	23,0115	10,2710	22,4770
14.	0,5	0,25	100	-6,4532	21,6799	-6,8316	22,2143
15.	0,5	1,00	40	23,3908	30,4686	23,0124	31,0030
16.	0,5	1,00	100	5,5297	32,5986	5,9081	32,0642

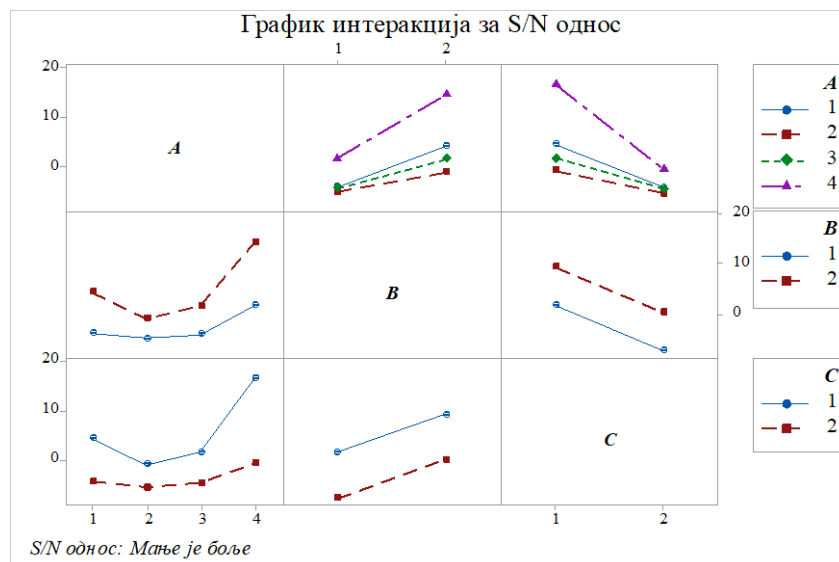
Анализа је урађена на експерименталним подацима с циљем процене утицаја садржаја ојачавача, брзине клизања и оптерећења на интензитет хабања и коефицијент трења нанокомпозита. Рангирање утицајних фактора у односу на интензитет хабања и коефицијент трења врши се процењивањем улазних величина на основу табеле 5.4. На основу делта вредности одређују се рангови разматраних фактора на посматране излазе. Фактор са највећом делта вредношћу је масени садржај *SiC* честица који највише утиче на интензитет хабања. Затим следи друго и треће ранжирани фактори по утицају на интензитет хабања, а то су оптерећење и брзина клизања, респективно. Посматрајући коефицијент трења уочава се да је брзина клизања прворанжирани фактор, док је масени саржај *SiC* честица другоранжирани фактор и фактор са најмање утицаја на коефицијент трења је оптерећење. Одређивање оптималне комбинације нивоа фактора понаособ на сваки излаз могуће је помоћу графика приказаних на сликама 5.2 и 5.3.

Табела 5.4 Резултати анализе за *S/N* однос „Мање је боље“

Ниво	<i>WR</i>			<i>CoF</i>		
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
1	0,1657	-2,9034	5,5522	28,93	25,85	28,08
2	-3,0309	4,8404	-3,6152	30,02	31,44	29,21
3	-1,3508			28,70		
4	8,0900			26,94		
Делта	11,1209	7,7438	9,1675	3,08	5,59	1,12
Ранг	1	3	2	2	1	3



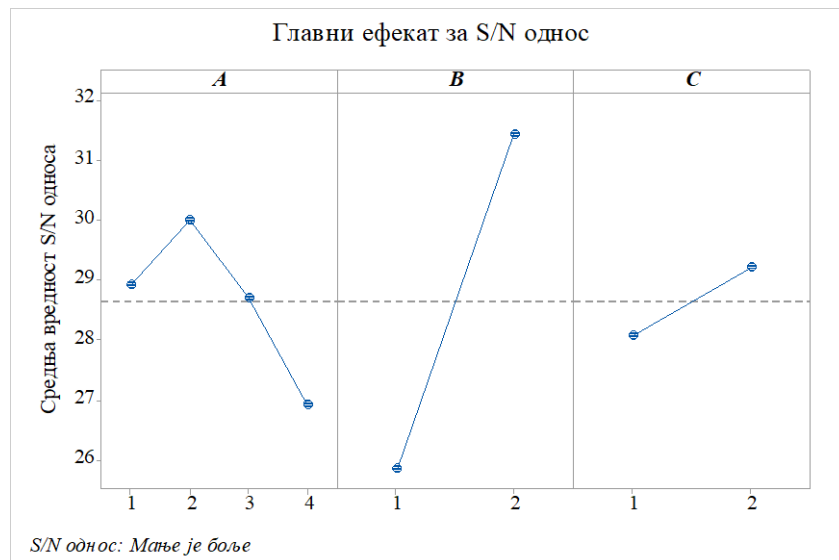
а)



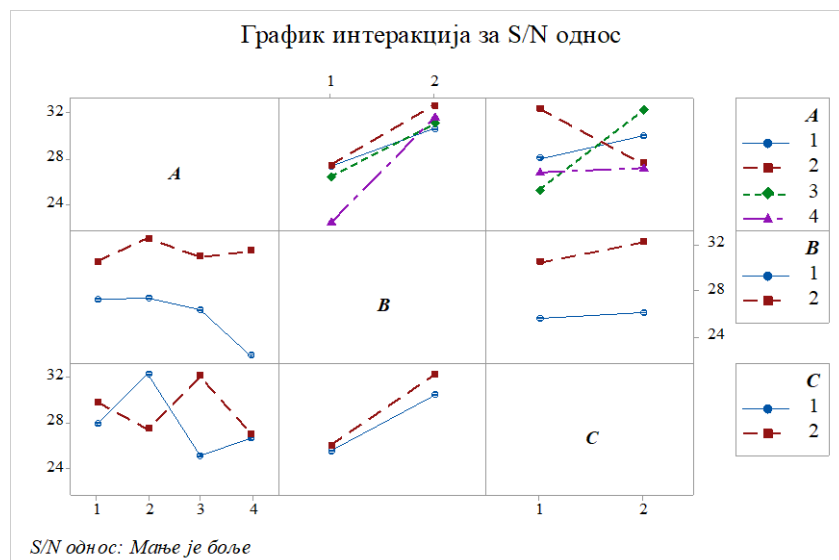
б)

Слика 5.2 Графици S/N односа за интензитет хабања а) главни ефекти и б) интеракције

На сликама 5.2а и 5.3а приказана су три графика која представљају средњи одзив и средњи S/N однос за садржај ојачавача, брзину клизања и оптерећења (A, B и C) и на основу којих је могуће одредити оптималну комбинацију нивоа фактора. Вредности приказане графиком, засноване су на S/N односу и приказане су у табели 5.4. Оптимална комбинација нивоа фактора за интензитет хабања (слика 5.2а) је A4B2C1. Дакле, минимално хабање алуминијумских наноконтропозита постиже се са садржајем ојачавача од 0,5 mas.% SiC, при брзини клизања од 1 m/s и оптерећењу од 40 N [110]. На сликама 5.2б и 5.3б приказани су графици који представљају интеракцију између фактора помоћу одређеног броја линија које зависе од броја и нивоа фактора. Помоћу графика интеракција S/N односа интензитета хабања (слика 5.2б) уочава се благо постојање интеракција између појединих фактора.



а)



б)

Слика 5.3 Графици S/N односа за коефицијент трења а) главни ефекти и б) интеракције

Оптимална комбинација фактора за коефицијент трења на основу графика главног ефекта (слика 5.3а) је $A2B2C2$, односно садржај ојачавача од 0,2 мас.% SiC , брзина клизања од 1 m/s и оптерећење од 100 N [110]. Посматрањем графика интеракција за коефицијент трења (слика 5.3б) уочава се да између појединих фактора постоји интеракција јер линије тих фактора нису паралелне. Анализом ANOVA може се добити прецизнији утицај интеракција и дејство фактора на сваки посматрани излаз понаособ.

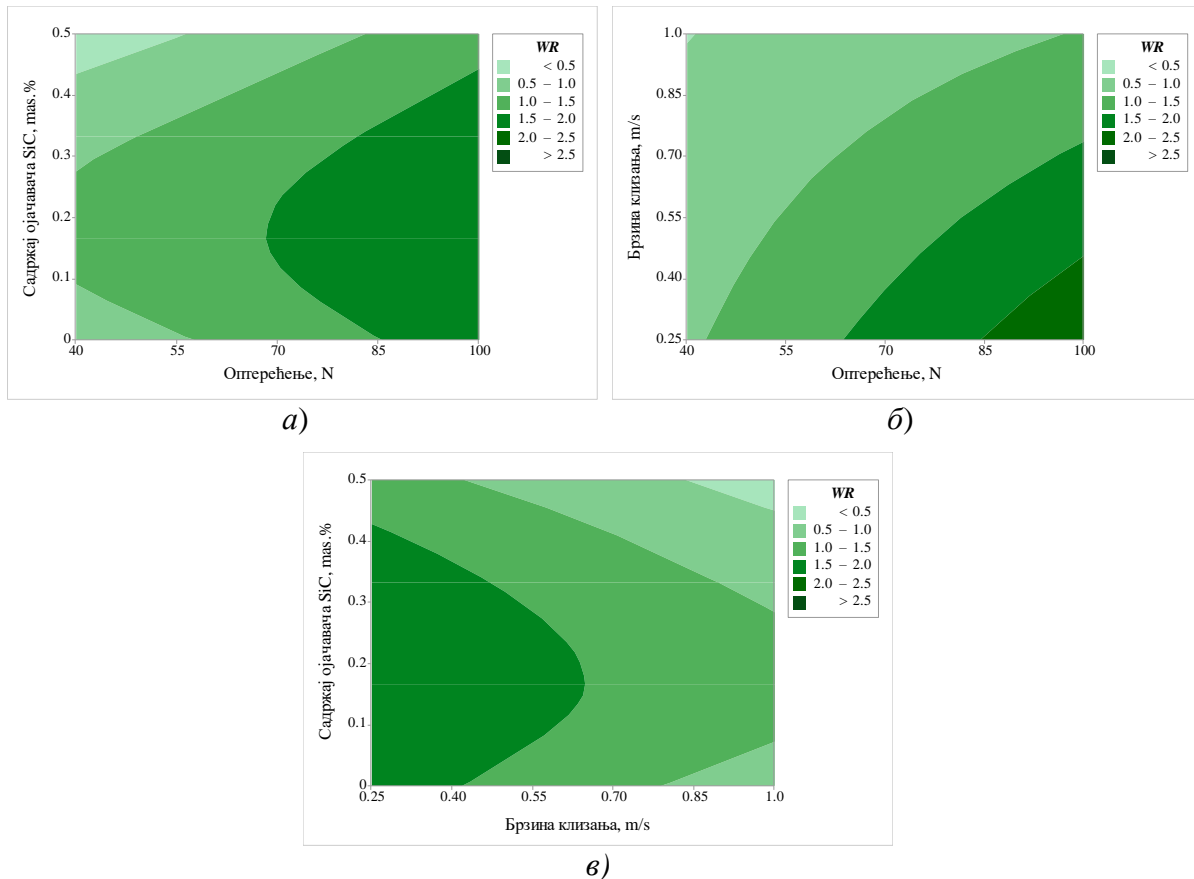
ANOVA анализа спроведена је на нивоу значајности од 5% (то јест 95% степен поузданости). Ниво значајности дефинише се преко P -вредности која указује утицај члана на излаз. Ако је израчуната P -вредност мања од 0,05 тај члан има утицај на посматране излазе [17, 18, 24, 110]. Неопходно је напоменути да је потребно опрезно посматрати чланове јер не треба увек све чланове који имају вредност мало већу од 0,05 занемарити, пошто то може бити резултат одступања у мерењу. Са друге стране чланове који имају вредност већу од 0,10 пожељно је изоставити из даље анализе јер то указује да они не утичу на излаз. Такође, утицај фактора може се анализирати и путем F

(Фишерове) вредности. Израчуната F -вредност упоређује се са вредношћу из таблице [146] за одабрани ниво значајности и према броју степени слободe. Када је ова вредност већа од вредности из таблице, то указује да фактор има утицаја на излаз, односно независна променљива утиче на зависну променљиву. Процентуални утицај сваког члана понаособ одређује се помоћу збира квадрата ($Seq SS$) и приказан је у последњој колони у табели 5.5. Ова табела садржи степен слободe (DF), прилагођен збир квадрата ($Adj SS$), прилагођену средњу вредност квадрата ($Adj MS$), статистичку вредност (F), вредност вероватноће (P), квадрат коефицијента корелације (R^2) и квадрат коефицијента корелације прилагођеног укупном броју експеримента ($R^2(adj)$)

Табела 5.5 Резултати ANOVA анализе интензитета хабања и коефицијента трења

WR							
Члан	<i>DF</i>	<i>Seq SS</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>Pr (%)</i>
A	3	290,94	290,939	96,980	58,71	0,004	28,90
B	1	239,87	239,869	239,869	145,22	0,001	23,82
C	1	336,17	336,171	336,171	203,52	0,001	33,39
A·B	3	42,17	42,167	14,056	8,51	0,056	4,19
A·C	3	92,72	92,722	30,907	18,71	0,019	9,21
B·C	1	0,00	0,000	0,000	0,00	0,999	0,00
Остатак	3	4,96	4,955	1,652			0,49
Укупно	15	1006,82					100,00
<i>R-Sq 99,51%; R-Sq (adj) 97,54%</i>							
CoF							
Члан	<i>DF</i>	<i>Seq SS</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>Pr (%)</i>
A	3	19,483	19,483	6,494	0,80	0,571	7,35
B	1	124,827	124,827	124,827	15,38	0,029	47,10
C	1	5,059	5,059	5,059	0,62	0,487	1,91
A·B	3	19,293	19,293	6,431	0,79	0,574	7,28
A·C	3	70,289	70,289	23,430	2,89	0,204	26,52
B·C	1	1,752	1,752	1,752	0,22	0,674	0,66
Остатак	3	24,347	24,347	8,116			9,19
Укупно	15	265,051					100,00
<i>R-Sq 90,81%; R-Sq(adj) 54,07%</i>							

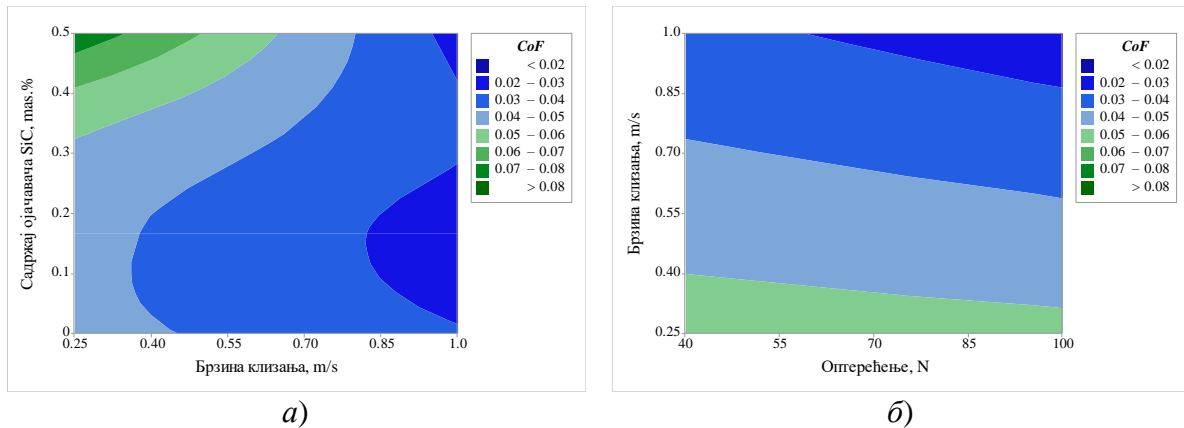
На основу претходне анализе и табеле 5.5, уочава се да посматрањем P -вредности сви чланови имају утицаја осим интеракција $B \cdot C$ на интензитет хабања. Према процентуалном уделу највећи утицај на интензитет хабања од 33,39% има оптерећење (A). Оптерећење представља важан контролни фактор који треба узети у обзир током процеса хабања. На другом месту је садржај ојачавача (A) са утицајем од 28,90%, затим следе брзина клизања (B) од 23,82% и интеракције садржаја ојачавача и брзине клизања (9,21%) и брзине клизања и оптерећења (4,19%). Најутицајнији фактор на коефицијент трења има брзина клизања са 47,1%, док утицај садржај ојачавача износи 7,35%, и на последњем месту је оптерећење са 1,91%. Утицајни чланови интеракција су садржај ојачавача и оптерећења са 26,52% и садржај ојачавача и брзина клизања са 7,28%. Велики утицај брзине клизања на коефицијент трења је због велике вискозности коришћеног уља (220 mm²/s) које формира уљни филм у контакту блока и диска па самим тим умањује се утицај материјала. На слици 5.4 приказани су равански дијаграми зависности утицајних фактора на интензитет хабања. Минимално хабање на основу дијаграма постиже се праћењем светлије боје. Подешавањем фактора на одређене вредности могуће је остварити циљану вредност интензитета хабања.



Слика 5.4 Дијаграмски приказ зависности интензитета хабања од а) садржаја ојачавача и оптерећења, б) брзине клизања и оптерећења и в) садржаја ојачавача и брзине клизања

Интензитет хабања се повећава са повећањем оптерећења, док се додавањем честица ојачавача силицијум карбида смањује хабање нанокompозита. Примећује се да мали процент ојачавача (0,2 mas.% и 0,3 mas.%) у алуминијумској легури не побољшава отпорност на хабање нанокompозита. Закључак је да додавање керамичких честица у А356 легуру мора да буде изнад 0,3 mas.% SiC. Алуминијумски нанокompозити ојачани са 0,5 mas.% SiC показују највећу отпорност на хабање, тако да ни при највећем оптерећењу не достиже ниво хабања који има нанокompозит ојачан са 0,3 mas.% SiC. Ови резултати у сагласности су са резултатима који су објавили Ека (Екка) и остали [72].

Анализом дијаграма на слици 5.4 уочава се да основа нанокompозита, А356 легура, показује бољу отпорност на хабање при већим вредностима оптерећења од 70 N до 85 N у односу на нанокompозит ојачан са $\approx 0,2$ mas.% SiC. Могући разлог за ово је да се малим садржајем ојачавача нарушава микроструктура нанокompозита у смислу појаве веће порозности унутар материјала. Побољшање отпорности на хабање нанокompозита у односу на основну легуру је за $\approx 80\%$ при мањим вредностима оптерећења, док при већим примењеним оптерећењима та разлика износи $\approx 50\%$. Разлог томе је мала количина ојачавајућих честица и разлика у густинама између ојачавајућих честица и основне легуре, због којих наночестице имају тежњу да уроне или плутају у растопу металне основе. Међутим, с обзиром на побољшање отпорности на хабање, може се закључити да су наночестице са 0,5 mas.% SiC равномерно распоређене у основу нанокompозита. На слици 5.5 приказани су издвојени дијаграми зависности појединих фактора и коефицијента трења.



Слика 5.5 Равански дијаграмски приказ зависности коефицијента трења од: а) садржај ојачавача SiC и брзине клизања и б) брзине клизања и оптерећења

Дијаграми зависности коефицијента трења и утицајних фактора указују да се при брзинама клизања већих од $\approx 0,5$ m/s достижу вредности за коефицијент трења ниже од 0,03. Утицај садржаја ојачавача на коефицијент трења примећује се тек са $\approx 0,5$ mas.% SiC. Коефицијент трења је мањи од 0,1 што указује да су у току испитивања симулирана два режима подмазивања, гранично и еластохидродинамичко. У овом истраживању коришћен је мали садржај ојачавача SiC наночестица у алуминијумској основи са циљем остваривање равномерне расподеле ојачавача у основи и побољшања отпорности на хабање нанокompозита. Утицај садржаја SiC наночестица захтева детаљну микроструктурну анализу, као и анализу похабаних површина о чему ће више речи бити у наредном поглављу. Познато је да применом Тагучи методе могуће је вршити једнокритеријумску оптимизацију посматрајући посебно интензитет хабања и коефицијент трења. Како би се сагледао утицај оба излаза одједном, врши се вишекритеријумска оптимизација применом сиве релационе анализе.

5.1.2. Сива релациона анализа

Према изабраној ортогоналној матрици, оптималне вредности су анализирани са три фактора различитих нивоа. GRG је примењена при оптимизацији више излаза за добијање оптималне комбинације фактора за редуковање интензитета хабања и коефицијента трења. Применом сиве релационе анализе прво је извршена нормализација експерименталних података помоћу једначине (4.10), а затим је израчунат GRC помоћу једначина (4.14) и (4.15). Коришћење једнаких тежинских коефицијената сваке циљне функције у овом случају није одговарајући приступ. Као што је објашњено у претходном поглављу, одређивање вредности тежинских коефицијената на више одговора (CoF и WR) је пресудно за постизање реалних резултата у GRA анализи. На основу анализе S/N односа добијени су тежински коефицијенти за CoF и WR који износе 0,2588 и 0,7412, респективно. На основу тежинских коефицијената и једначине (4.18), формирана је коначна једначина за GRG која гласи:

$$GRG = 0,2588 \cdot GRC_{CoF} + 0,7412 \cdot GRC_{WR}, \quad (5.1)$$

где су:

GRC_{CoF} – сиви релациони коефицијент коефицијента трења и

GRC_{WR} – сиви релациони коефицијент интензитета хабања.

Резултати сиве релационе анализе су дати у табели 5.6. У циљу лакшег тумачења резултата GRG рангиран је и приказан у последњој колони табеле 5.6.

Табела 5.6 Резултати сиве релационе анализе на основу експерименталних података

Р.бр.	Нормализовано <i>CoF</i>	Нормализовано, <i>WR</i>	<i>GRC</i> (<i>CoF</i>)	<i>GRC</i> (<i>WR</i>)	<i>GRG</i>	Ранг
1.	0,6234	0,6154	0,5704	0,5652	0,5666	9
2.	0,5281	0,0534	0,514433	0,345633	0,3893	14
3.	0,6238	0,8904	0,570627	0,820248	0,7556	2
4.	0,8927	0,5906	0,823316	0,549817	0,6206	8
5.	0,6358	0,5247	0,578588	0,512689	0,5297	10
6.	0,5303	0,0000	0,515645	0,333333	0,3805	15
7.	1,0000	0,6509	1	0,588865	0,6953	5
8.	0,6639	0,4900	0,598029	0,495059	0,5217	11
9.	0,2211	0,5784	0,390961	0,542526	0,5033	12
10.	0,7130	0,0642	0,635289	0,348235	0,4225	13
11.	0,5597	0,7859	0,53177	0,700205	0,6566	6
12.	0,9517	0,5657	0,911934	0,535133	0,6326	7
13.	0,1727	0,8988	0,376691	0,831656	0,7139	4
14.	0,0000	0,1845	0,333333	0,380073	0,3680	16
15.	0,7731	1,0000	0,687859	1	0,9192	1
16.	0,8691	0,8150	0,792577	0,729976	0,7462	3

Експеримент који има највећу релациону оцену *GRG* даје максималне триболошке карактеристике. На основу табеле 5.6 може се приметити да експеримент са редним бројем 15 испољава најповољније триболошке карактеристике. Установљено је да се за комбинацију фактора *A3B2C1* остварују минимални *CoF* од 0,0677 и *WR* од 0,30. Табела одговора генерише се за *GRG* како би се одредио редослед важности сваког фактора. Према подацима добијеним из табеле 5.6, редослед важности фактора према *S/N* односу је одређен и приказан у табели 5.7. Резултати за *GRG* оцењују се у оквиру *ANOVA* анализе и утицаји фактора представљени су у табели 5.8.

Табела 5.7 Табела *S/N* односа за *GRG*

Ниво	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
1	-4,927	-6,512	-3,665
2	-5,680	-3,286	-6,134
3	-5,269		
4	-3,721		
Делта	1,959	3,226	2,468
Ранг	3	1	2

Табела 5.8 Резултати *ANOVA* за *GRG*

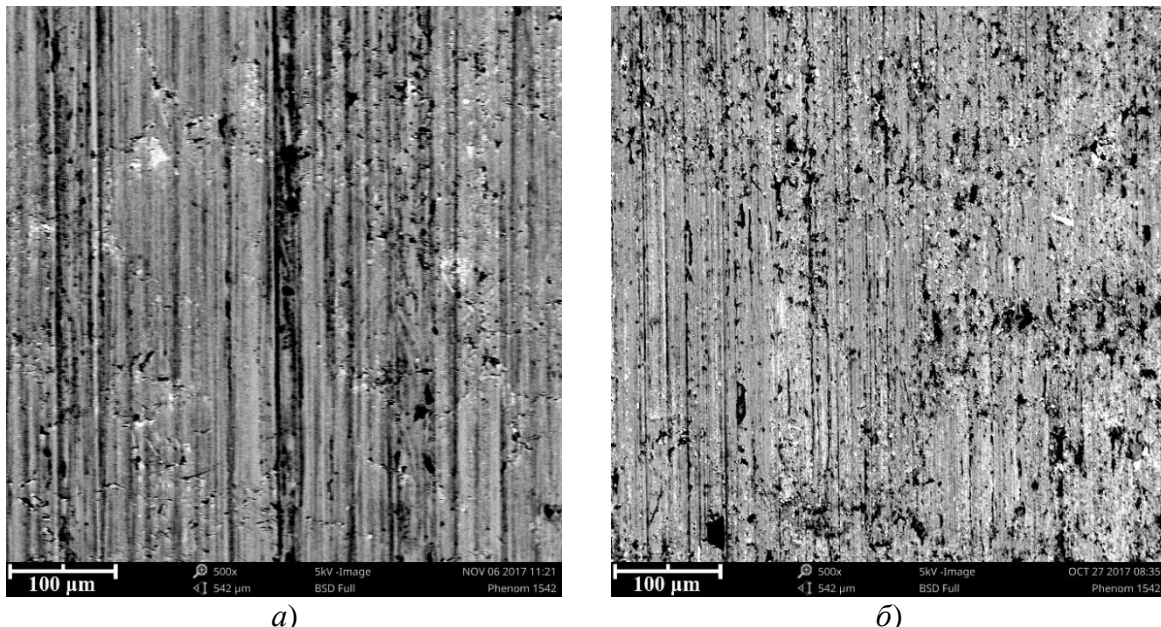
Члан	<i>DF</i>	<i>Seq SS</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>Pr</i> (%)
<i>A</i>	3	8,538	8,538	2,8460	4,85	0,114	10,04
<i>B</i>	1	41,623	41,623	41,6225	70,93	0,004	48,95
<i>C</i>	1	24,373	24,373	24,3733	41,53	0,008	28,66
<i>A·B</i>	3	1,446	1,446	0,4820	0,82	0,562	1,70
<i>A·C</i>	3	4,171	4,171	1,3905	2,37	0,249	4,91
<i>B·C</i>	1	3,124	3,124	3,1236	5,32	0,104	3,67
Остатак	3	1,760	1,760	0,5868			2,07
Укупно	15	85,035					100,00

На основу претходне анализе може се установити да су резултати *ANOVA* анализе у сагласности са резултатима приказаних у табели 5.7. Фактори *A*, *B* и *C* су објашњени у табели 5.1. Што се тиче утицаја на више карактеристика тачније *CoF* и *WR*, брзина клизања има највећи утицај и она је на првом месту (48,95 %), на другом месту је оптерећење (28,66%) и на трећем месту је масени садржај ојачавача (10,04%). При спровођењу сиве релационе анализе, ако би се укључила и тврдоћа као трећи одговор, добијају се резултати идентични добијеним резултатима анализе интензитета хабања и коефицијента трења. Сходно томе, при овој анализи утицај тврдоће је мали и зато није укључен у сиву релациону анализу.

5.1.3. Анализа механизма хабања *A356/SiC* нанокompозита на основу *SEM* и *EDS* анализе

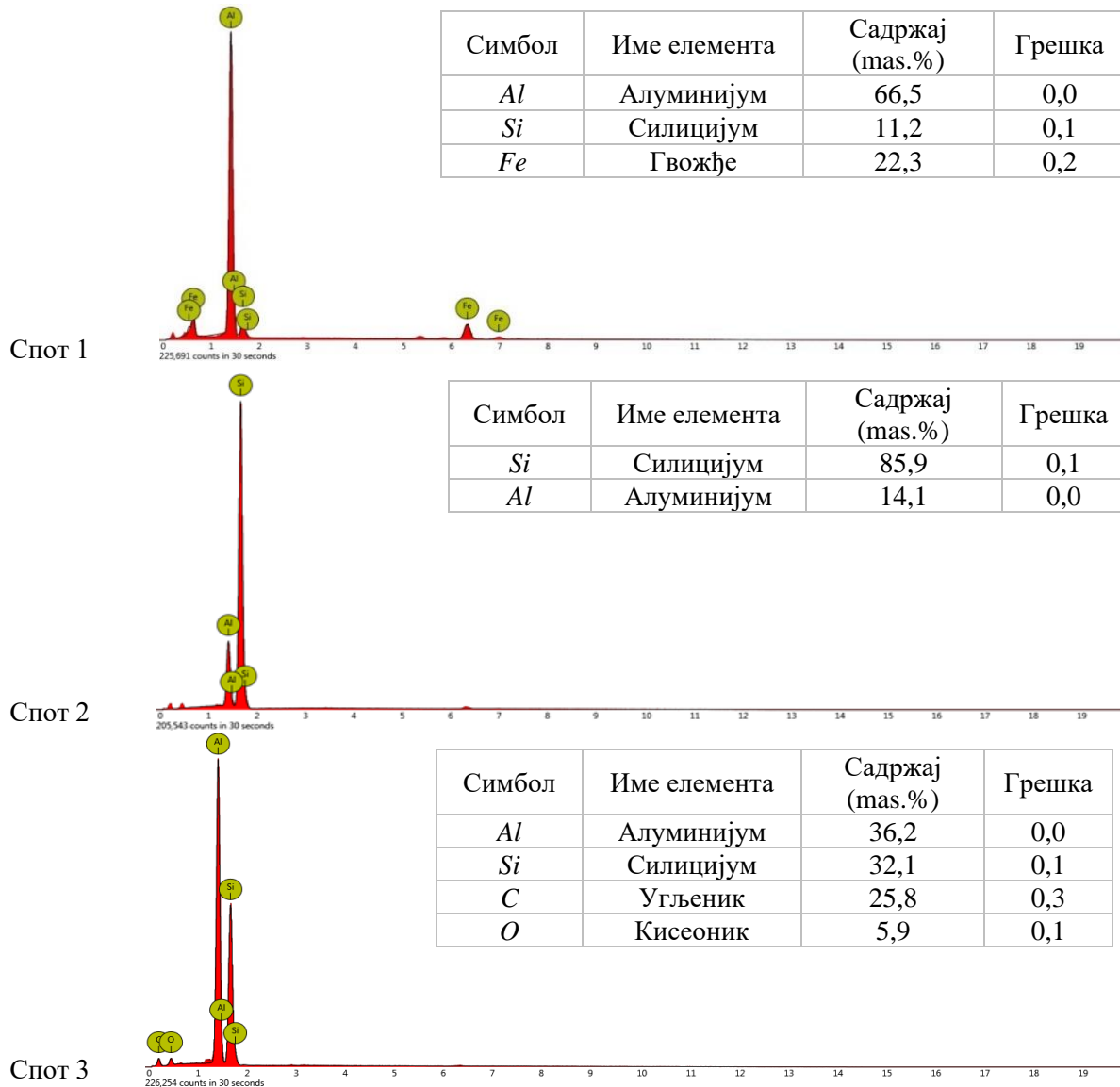
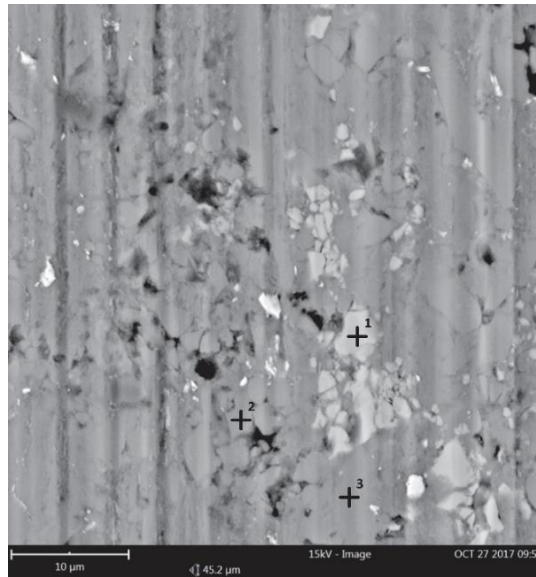
Анализирајући нанокompозит са 0,5 мас.% *SiC* и основну легуру, може се приметити да је побољшање отпорности на хабање нанокompозита при истој брзини клизања од 1 m/s значајно веће при нижем оптерећењу у односу на веће вредности оптерећења (око 50%). Пораст нормалног оптерећења повећава хабање, што је очекивано и у сагласности са литературним подацима [5, 22, 57, 58, 60, 70, 72, 77]. С друге стране, повећање брзине клизања индукује ниже вредности интензитета хабања и коефицијента трења. Повећањем вредности брзине клизања остварен је еластохидродинамички режим подмазивања.

Разлике између интензитета хабања нанокompозита са 0,5 мас.% *SiC* и основне легуре могу се објаснити анализом похабаних површина ова два материјала. На слици 5.6 приказане су похабане површине нанокompозита са 0,5 мас.% и основне легуре. Приказане површине настале су при триболошким условима испитивања: $F_n = 100\text{ N}$, $v = 0,25\text{ m/s}$, $s = 1000\text{ m}$ (слика 5.6а) и $F_n = 40\text{ N}$, $v = 0,25\text{ m/s}$, $s = 1000\text{ m}$ (слика 5.6б).



Слика 5.6 Похабана површина: а) основне легуре *A356* и б) нанокompозита са 0,5 мас.% *SiC*

На слици 5.7 је дат приказ површине трага хабања у којој је урађена *EDS* анализа нанокompозита *A356/0,5 мас.% SiC*.



Слика 5.7 Резултати EDS анализе у трагу хабања нанокмпозита са 0,5 mas.% SiC

Прорачунати су фактори хабања према [192] како би се упоредили добијени резултати са литературним подацима. Добијене вредности реда су $10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$. Ове вредности одговарају и подацима из литературе за метале у контакту при клизању (у условима граничног подмазивања интервал је од 10^{-9} до $10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, а у условима без подмазања и за адхезионо хабање, интервал је од 10^{-7} до $10^{-2} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) [192, 193].

Посматрањем трагова хабања скенирајућим електронским микроскопом уочене су уске бразде у траговима хабања нанокмпозита са 0,5 мас.% *SiC* које се могу преписати утицају равномерно распоређених наночестица као ојачавача. Похабане површине, приказане на слици 5.6, указују да је за оба материјала доминантни механизам хабања абразија, са адхезијом као секундарним механизмом хабања. Оба механизма хабања последица су примењених експерименталних услова и оствареног мешовитог подмазивања. На оба узорка могу се јасно приметити абразивни жлебови, који су израженији и дубљи на похабаној површини основне легуре.

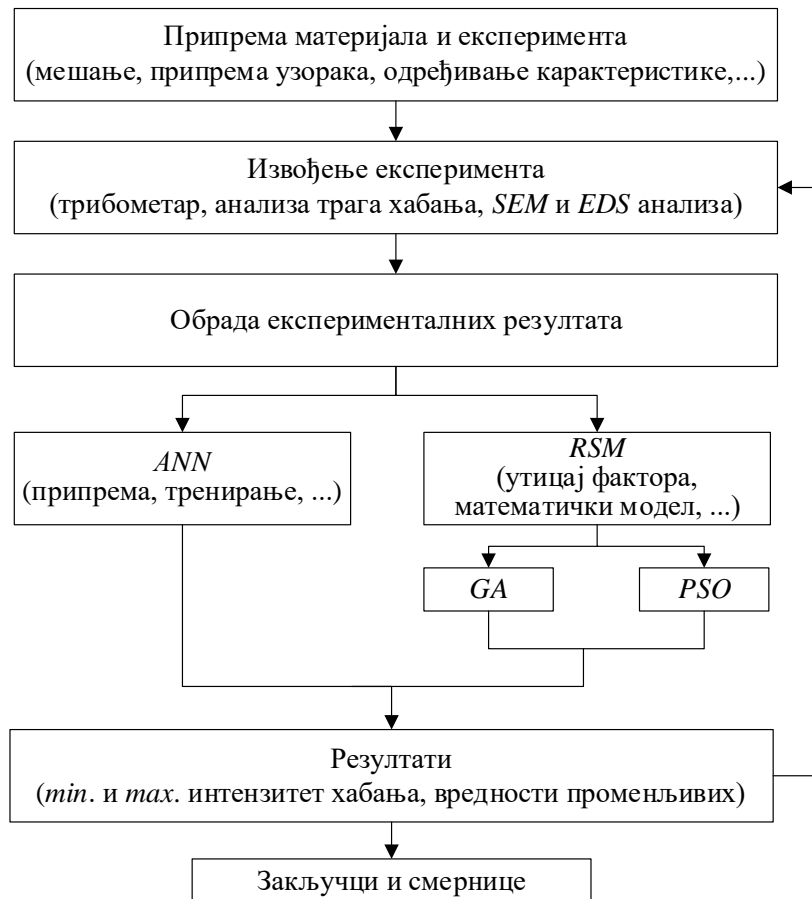
На већем увећању похабаних површина нанокмпозита са 0,5 мас.% *SiC* може се приметити присуство пренесеног материјала челичног диска. Овај пренос материјала примећен је код свих нанокмпозита, али је био најинтензивнији на нанокмпозиту са 0,5 мас.% *SiC* што је било и очекивано. Већим садржајем *SiC* повећава се количина тврђих елемената у композиту, а самим тим повећава се и хабање диска. То је у складу са идентификованим механизмима хабања, јер је пренос материјала карактеристичан за адхезивно хабање. С друге стране, абразивно хабање може изазвати веће неравнине (повећање храпавости) и продукти абразивног хабања могу да се утисну у меку основу нанокмпозита. Присуство пренесеног материјала потврђује се *EDS* анализом (спот 1 на слици 5.7). Поред пренесеног материјала, могу се приметити и ситне (мање од $10 \mu\text{m}$) *Si* честице (спот 2 на слици 5.7). Те *Si* честице чвршће су од *Al* основе и помажу у смањењу интензитета хабања овог нанокмпозита. Агломерација *SiC* наночестица није примећена [110] што доказују подручја на похабаној површини са повећаном количином угљеника (спот 3 на слици 5.7) која указују на присуство добро распоређених *SiC* наночестица.

Ако се посматрају алуминијумски нанокмпозити ојачани са *SiC* наночестицама, резултати анализе похабаних површина у сагласности су са многим истраживањима [33, 62, 73, 193]. Испитивањем отпорности на корозију и хабање нанокмпозита са основом Al6061 легуре и наночестицама ојачавача у садржају од 1, 2 и 3 vol. % *SiC*, просечне величине 25–50 nm, закључено је да је основни механизам хабања основне легуре адхезија, док се код нанокмпозита јавља абразија [33]. Проучавањем похабаних површина и продуката хабања алуминијумских нанокмпозита на основу *SEM* анализе уочено је да је абразија доминантни механизам хабања [62]. Установљено је да се код основне легуре јавља велика пластична деформација која је последица адхезивног хабања. Верификација претходне анализе потврђена је *SEM* и *EDS* анализом, као и посматрањем величине и облика продуката хабања основне легуре и нанокмпозита.

Анализом похабаних површина алуминијумских нанокмпозита и основне легуре утврђено је да се јавља комбинација механизма хабања, прецизније абразија у комбинацији са деламинацијом [64]. Истраживањем оптималне комбинације садржаја ојачавача *SiC* наночестица у основну легуру, аутори [65] су установили да се јављају различити механизми хабања у зависности од садржаја ојачавача. Прецизније, испитивањима похабаних површина нанокмпозита са садржајем ојачавача мањим од 1,5 мас.% *SiC* уочена је оксидација и деламинација, док је код нанокмпозита са садржајем ојачавача изнад 1,5 мас.% *SiC* присутна адхезија са деламинацијом [65]. Различити механизми хабања, наиме, абразија, адхезија, оксидација и деламинација јављају се у зависности од примењеног оптерећења у истраживању [73], испитивањем алуминијумског нанокмпозита са 1,2 мас.% *SiC*.

5.2. Резултати и анализа триболошких карактеристика нанокompозита $A356/Al_2O_3$

За проучавање односа интензитета хабања алуминијумских нанокompозита и улазних фактора који утичу на њега користи се дизајн експеримента. За идентификацију значајности фактора, одређивање екстремних вредности и предвиђање понашања материјала коришћене су оптимизационе методе приказане у алгоритму на слици 5.8. На слици је приказана комплетна процедура испитивања за ову серију материјала.



Слика 5.8 Блок дијаграм поступка за испитивање и анализу

Експерименти су изведени у складу са пројектованом матрицом ради стицања података о хабању на контролисан начин. Утицај независно променљивих на интензитет хабања нанокompозита $A356/Al_2O_3$ праћен је помоћу четири улазна фактора са одређеним нивоима који су приказани у табели 5.9.

Табела 5.9 Улазни фактори и њихови нивои

Назив фактора и ознака	Јединица	Ниво I	Ниво II	Ниво III
Садржај ојачавача Al_2O_3 (A)	mas. %	0,2	0,3	0,5
Брзина клизања (B)	m/s	0,25	1	/
Оптерећење (C)	N	40	100	/
Величина честица (D)	nm	30	100	/

План експеримента заснован је на ортогоналној матрици L_{24} са одговарајућим излазима интензитета хабања (табела 5.10). Урађена су потребна експериментална понављања и сваки пут је измерен траг хабања, а затим се прорачуном дошло до резултата за интензитет хабања сваког узорка. Просечна вредност свих мерења

интензитета хабања коришћена је за даљу обраду и анализу резултата. Експериментални резултати коефицијента трења такође су приказани у табели 5.10, али нису коришћени у даљој анализи. У табели 5.10 са *A*, *B*, *C* и *D* означене су вредности из табеле 5.9.

Табела 5.10 Експериментални резултати за наноконтрол са Al_2O_3 ојачавачем

Р.бр.	<i>A</i> , mas. %	<i>B</i> , m/s	<i>C</i> , N	<i>D</i> , nm	Траг хабања, mm	<i>WR</i> , $10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$	<i>CoF</i>
1.	0,2	0,25	40	30	1,8596	1,0884	0,0397
2.	0,2	0,25	40	100	1,4403	0,5057	0,0473
3.	0,2	0,25	100	30	2,7192	3,4042	0,0392
4.	0,2	0,25	100	100	1,8789	1,1227	0,0541
5.	0,2	1,00	40	30	1,4660	0,5332	0,0133
6.	0,2	1,00	40	100	1,2368	0,3202	0,0691
7.	0,2	1,00	100	30	1,7087	0,8443	0,0286
8.	0,2	1,00	100	100	1,6139	0,7114	0,0010
9.	0,3	0,25	40	30	1,7894	0,9697	0,0521
10.	0,3	0,25	40	100	1,3859	0,4505	0,0670
11.	0,3	0,25	100	30	2,4631	2,5298	0,0417
12.	0,3	0,25	100	100	1,6666	0,7835	0,0612
13.	0,3	1,00	40	30	1,1052	0,2284	0,0406
14.	0,3	1,00	40	100	0,5965	0,0359	0,0205
15.	0,3	1,00	100	30	1,5438	0,6227	0,0331
16.	0,3	1,00	100	100	0,8263	0,0955	0,0319
17.	0,5	0,25	40	30	1,7543	0,9138	0,0589
18.	0,5	0,25	40	100	1,2684	0,3453	0,0409
19.	0,5	0,25	100	30	2,3385	2,1649	0,1083
20.	0,5	0,25	100	100	1,5964	0,6886	0,0544
21.	0,5	1,00	40	30	0,8070	0,0889	0,0239
22.	0,5	1,00	40	100	0,2500	0,0026	0,0170
23.	0,5	1,00	100	30	1,4736	0,5415	0,0341
24.	0,5	1,00	100	100	0,4210	0,0126	0,0065

За проналажење математичког модела којим ће се описати веза између улазних фактора и интензитета хабања примењене су одговарајуће статистичке методе које су описане у поглављу 4. Вредности за интензитет хабања су прорачунате на основу измерених вредности трагова хабања на исти начин као и код наноконтрола са *SiC* ојачавачем.

5.2.1. Моделирање и оптимизација помоћу резултујућих површина (*RSM*)

RSM је метода која се користи за анализу резултата добијених током експерименталног испитивања и пружа могућност квантитативног мерења могућих интеракција између анализираних фактора, који се тешко могу добити помоћу других метода. Састоји се од групе математичких и статистичких приступа у којима анализирани одговор зависи од неколико значајних променљивих. Циљ ове методе је оптимизација и развијање одговарајућег математичког модела за посматрани одговор [72, 157]. Математички модел за интензитет хабања (*WR*) представљен је једначином:

$$WR = f(A, B, C, D) + \delta \quad (5.2)$$

где су: *A*, *B*, *C* и *D* садржај ојачавача, брзина клизања, оптерећење и величина честица, респективно, а δ је грешка која има нормалну расподелу у вези са посматраним

испитивањем. Коришћењем експерименталних података у софтверу *MINITAB19*, одређена је једначина другог реда која описује интензитет хабања:

$$WR = 1,873 - 7,61 \cdot A - 1,204 \cdot B + 0,04052 \cdot C - 0,01101 \cdot D + 9,73 \cdot A^2 + 0,30 \cdot A \cdot B - 0,0197 \cdot A \cdot C + 0,0064 \cdot A \cdot D - 0,01778 \cdot B \cdot C + 0,01744 \cdot B \cdot D - 0,00018 \cdot C \cdot D \quad (5.3)$$

Коефицијенти регресије и резултати регресионе анализе приказани су табелама 5.11 и 5.12, респективно. Када је вредност R^2 близу јединице, то указује на добру корелацију између експерименталних и предвиђених вредности. Анализом је утврђено да вредност R^2 износи 0,95 па се може закључити да је предложени модел резултујућих површина адекватан за изражавање интензитета хабања.

Табела 5.11 Коефицијенти регресије

Услови	Коефицијент	SE Коефицијент	T-вредност	P-вредност
Константа	0,6120	0,1020	5,99	0,000
A	-0,2357	0,0623	-3,78	0,003
B	-0,4535	0,0513	-8,84	0,000
C	0,3251	0,0513	6,34	0,000
D	-0,3652	0,0513	-7,12	0,000
A·A	0,219	0,124	1,77	0,102
A·B	0,0169	0,0612	0,28	0,787
A·C	-0,0884	0,0612	-1,45	0,174
A·D	0,0338	0,0612	0,55	0,590
B·C	-0,2001	0,0509	-3,93	0,002
B·D	0,2289	0,0509	4,50	0,001
C·D	-0,1888	0,0509	-3,71	0,003
$R^2 = 95,31\%$, $R^2(adj) = 91,00\%$, $R^2(pred) = 80,36\%$				

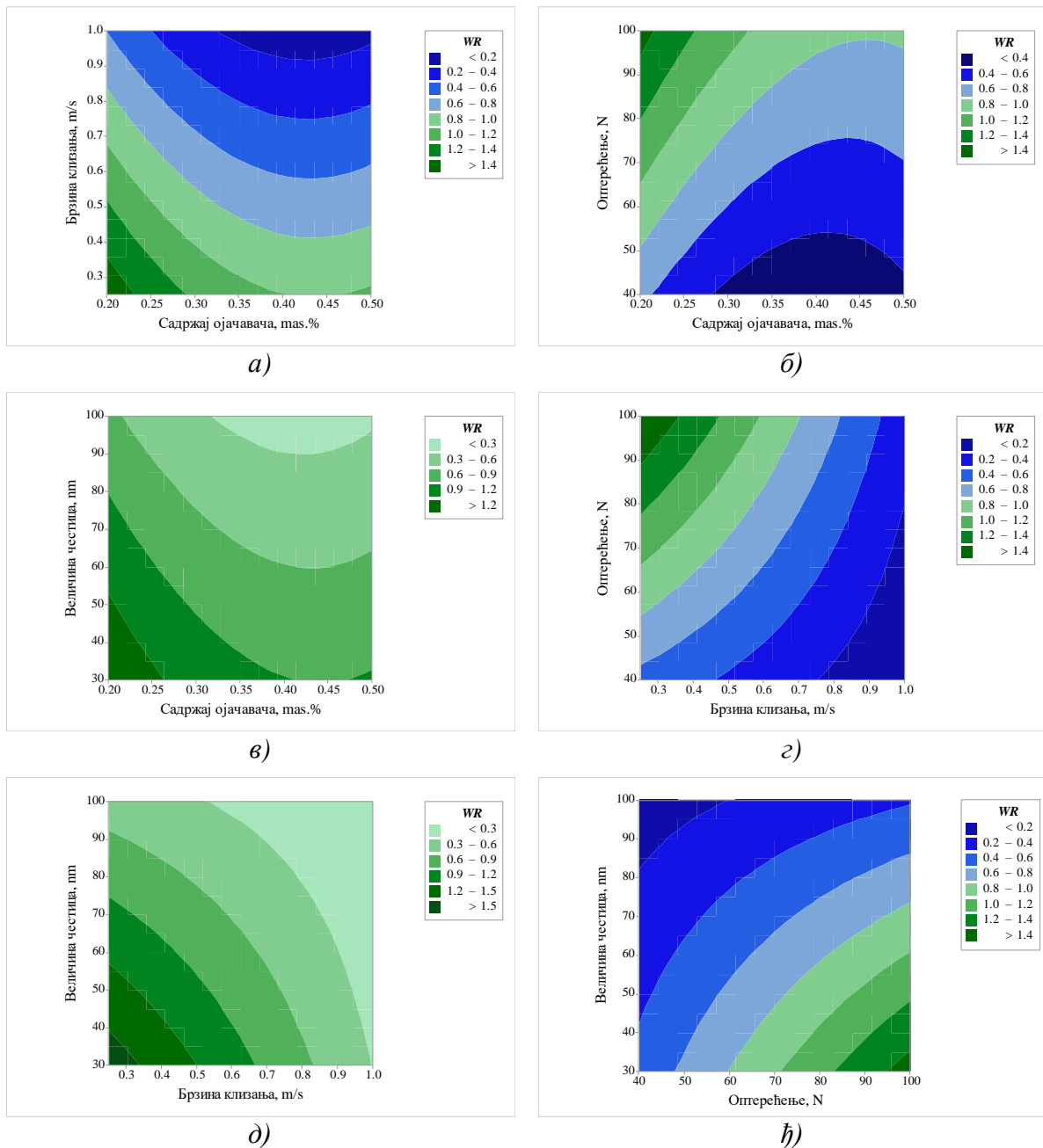
Валидност развијеног модела и статистичке значајности регресионих коефицијената утврђене су коришћењем *ANOVA* анализе. *ANOVA* анализа на нивоу поузданости од 95% користи се за утврђивање ефекта сваког фактора на интензитет хабања и резултати су дати у табели 5.12.

Табела 5.12 Анализа варијансе за интензитет хабања

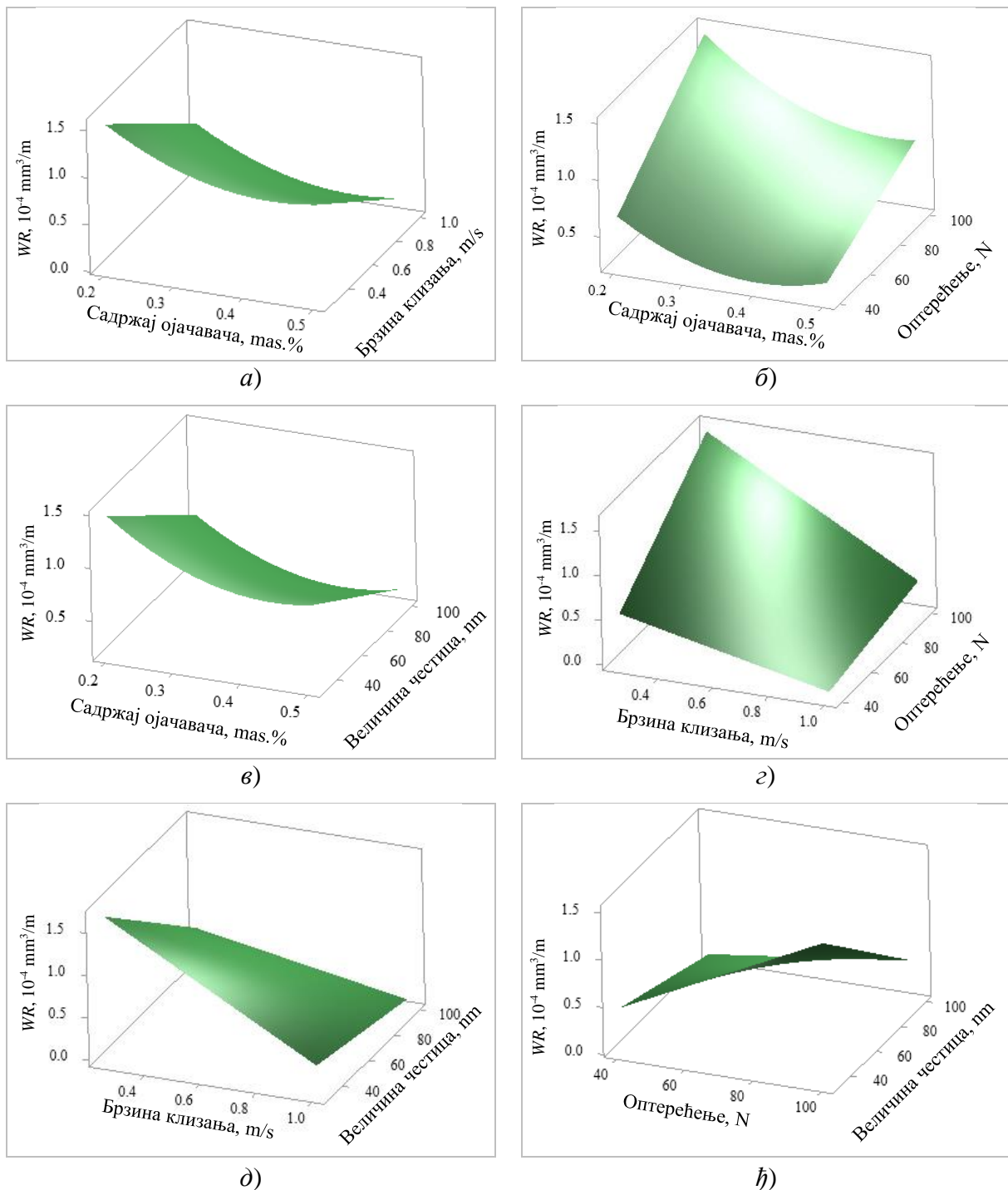
Извори	DF	Adj SS	Adj MS	F	P
Модел	11	15,1253	1,37503	22,15	0,000
Линеарни	4	11,3764	2,84409	45,82	0,000
A	1	0,8892	0,88917	14,33	0,003
B	1	4,8496	4,84962	78,13	0,000
C	1	2,4925	2,49250	40,16	0,000
D	1	3,1451	3,14509	50,67	0,000
Квадратни	1	0,1948	0,19477	3,14	0,102
A·A	1	0,1948	0,19477	3,14	0,102
Интеракција	6	3,2269	0,53782	8,66	0,001
A·B	1	0,0048	0,00476	0,08	0,787
A·C	1	0,1298	0,12977	2,09	0,174
A·D	1	0,0190	0,01900	0,31	0,590
B·C	1	0,9605	0,96051	15,47	0,002
B·D	1	1,2575	1,25754	20,26	0,001
C·D	1	0,8554	0,85535	13,78	0,003
Грешка	12	0,7448	0,06207		
Укупно	23	15,8701			

Статистички значај за излаз одређује се помоћу *P*-вредности, а затим помоћу *F*-статистичке вредности *ANOVA*. Извори (чланови) са *F*-вредношћу већом од вредности

из Фишерове табеле [146] за поузданост од 95% и P -вредношћу мањом од нивоа значајности (у овом случају 0,05) сматра се да имају значајан ефекат на интензитет хабања (одговор) [155-157, 194]. Уочава се да сви посматрани фактори имају утицај на интензитет хабања јер је њихова P -вредност мања од 0,05. На нивоу поузданости од 95% уочава се да постоји и утицај интеракција фактора $B \cdot C$, $B \cdot D$ и $C \cdot D$ који се не смеју занемарити при проучавању триболошких карактеристика наноконтрола. На сликама 5.9 и 5.10 приказани су дијаграми зависности одабраних фактора и интензитета хабања.



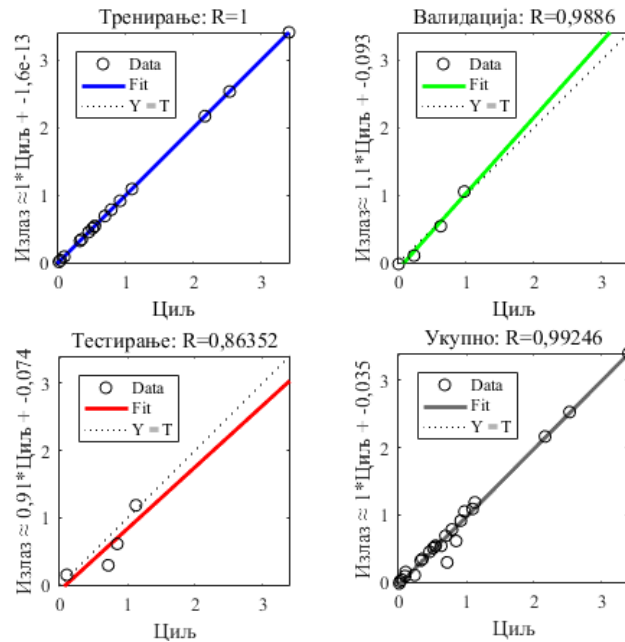
Слика 5.9 Дводимензионални дијаграм зависности интензитета хабања и а) садржаја ојачавача и брзина клизања, б) садржај ојачавача и оптерећење, в) садржај ојачавача и величина честица, г) брзина клизања и оптерећење, д) брзина клизања и величина честица и љ) оптерећење и величина честица



Слика 5.10 Тродимензионални дијаграмски приказ зависности интензитета хабања од фактора: а) садржаја ојачавача и брзине клизања, б) садржаја ојачавача и оптерећења, в) садржаја ојачавача и величине честица, г) брзине клизања и оптерећења, д) брзине клизања и величине честица и ж) оптерећења и величине честица

На дијаграмима (слика 5.9 и 5.10) дат је приказ зависности два фактора на интензитет хабања при чему су вредности друга два фактора задржане на вредностима средњег нивоа тачније $A=0,35 \text{ mas.}\%$, $B=0,625 \text{ m/s}$, $C=70 \text{ N}$ и $D=0,65 \text{ nm}$. Ефекат дводимензионалног дијаграма приказан је у две основне боје зеленој и плавој. Наиме, тамно зеленом бојом приказана је област где се остварује највеће хабање, светло зеленом и светло плавом приказана је просечна вредност, док је област за минималну вредност

закључити да се усвојена мрежа са великом поузданошћу може користити за предвиђање интензитета хабања.



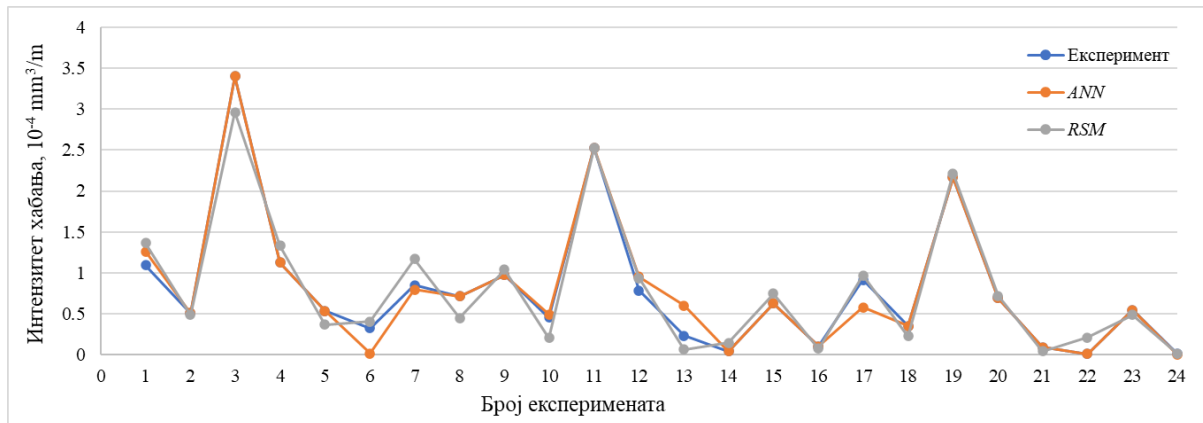
Слика 5.12 Коefицијент регресије добијен помоћу ANN

У табели 5.13 приказане су вредности интензитета хабања добијених експериментом, предвиђањем помоћу ANN и предвиђањем помоћу RSM модела.

Табела 5.13 Експерименталне и предвиђене вредности интензитета хабања

Р.бр.	A, mas. %	B, m/s	C, N	D, nm	WR, $10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$	Предвиђање, WR - ANN, $10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$	Предвиђање, WR - RSM, $10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$
1.	0,2	0,25	40	30	1,0884	1,0884	1,3625
2.	0,2	0,25	40	100	0,5057	0,5056	0,4826
3.	0,2	0,25	100	30	3,4042	3,4042	2,9666
4.	0,2	0,25	100	100	1,1227	1,1845	1,3307
5.	0,2	1,00	40	30	0,5332	0,5332	0,3635
6.	0,2	1,00	40	100	0,3202	0,3202	0,3992
7.	0,2	1,00	100	30	0,8443	0,6112	1,1675
8.	0,2	1,00	100	100	0,7114	0,2927	0,4472
9.	0,3	0,25	40	30	0,9697	1,0511	1,0359
10.	0,3	0,25	40	100	0,4505	0,4505	0,2008
11.	0,3	0,25	100	30	2,5298	2,5298	2,5218
12.	0,3	0,25	100	100	0,7835	0,7834	0,9307
13.	0,3	1,00	40	30	0,2284	0,1039	0,0594
14.	0,3	1,00	40	100	0,0359	0,0359	0,1399
15.	0,3	1,00	100	30	0,6227	0,5391	0,7452
16.	0,3	1,00	100	100	0,0955	0,1504	0,0697
17.	0,5	0,25	40	30	0,9138	0,9138	0,9665
18.	0,5	0,25	40	100	0,3453	0,3453	0,2210
19.	0,5	0,25	100	30	2,1649	2,1648	2,2160
20.	0,5	0,25	100	100	0,6886	0,6886	0,7145
21.	0,5	1,00	40	30	0,0889	0,0889	0,0350
22.	0,5	1,00	40	100	0,0026	-0,0201	0,2051
23.	0,5	1,00	100	30	0,5415	0,5415	0,4844
24.	0,5	1,00	100	100	0,0126	0,0126	-0,1015

Приказане вредности предвиђања су дијаграмски приказане на слици 5.13, ради лакшег праћења одступања између коришћених метода и експерименталних вредности. На основу развијеног математичког модела помоћу *RSM* и *ANN* анализе могуће је предвидети понашање интензитета хабања нанокмозита у оквирима граница експеримента.



Слика 5.13 Дијаграмски упоредни приказ резултата

На основу приказаног дијаграма очигледно је да постоје одступања између вредности добијене експериментом и методама *ANN* и *RSM* у појединим условима експерименталног извођења. Најчешће се у пракси за валидацију модела примени још једна оптимизациона метода или се изврше додатна експериментална испитивања. Примењене технике генетског алгорита и ројева честица за експерименталне податке изабране су због карактеристика и велике могућности примене.

5.2.3. Резултати добијени помоћу генетског алгорита (*GA*) и оптимизације ројева честица (*PSO*)

Циљ оптимизације је да се на основу развијеног *RSM* модела предвиде услови минималног интензитета хабања и одреде вредности променљивих за које ће овај услов бити испуњен. Формулација оптимизационог проблема извршена је на основу математичког модела представљеног у једначини 5.3, што представља функцију циља (*objective function*).

У овој функцији важну улогу имају четири међусобно зависне променљиве, од којих зависи интензитет хабања. Функција циља је минимизована следећи (*subject to*) ограничења (*boundaries*) променљивих (из табеле 5.9):

$$\begin{aligned} 0,2 &\leq A \leq 0,5, \\ 0,25 &\leq B \leq 1, \\ 40 &\leq C \leq 100, \\ 30 &\leq D \leq 100. \end{aligned}$$

У првом случају за оптимизацију коришћен је *GA*. Подешавања алгорита оријентисана су на проналажење оптималне вредности. Величина популације подешена је на 50, док је максимални број генерација 200. Поузданост укрштања (*crossover probability*) је 0,85, док је поузданост мутације (*mutation probability*) 0,01. Извршено је по 30 узастопних понављања симулација да би се потврдило постизање оптималне вредности сваким понављањем. У другом случају за оптимизацију коришћен је *PSO* алгоритам. Услови оптимизације постављени су да се за 30 узастопних понављања

постиже оптимална вредност. За рад *PSO* алгоритма дефинисан је број итерација као 200 и број честица као 50.

Вредност интензитета честица усвојена је као:

$$\omega = \omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{Iteration_{max}} \cdot Iteration, \quad (5.4)$$

где су:

$\omega_{max} = 0,9$ – максимална вредност интензитета честица,

$\omega_{min} = 0,4$ – минимална вредност интензитета честица,

Iteration – тренутна актуелна итерација и

Iteration_{max} – укупан број итерација.

Извршена је оптимизација и добијене вредности дате су у табели 5.14. У овом случају оптимизација је извршена за *RSM* модел, као функције циља. Поред вредности добијених оптимизацијом извршено је предвиђање *ANN* методом и у табели 5.14 су ове вредности упоређене са оптималним.

Табела 5.14 Резултати предвиђања минималне вредности интензитета хабања применом *PSO*, *GA* и *ANN* методе

Метода	A, mas. %	B, m/s	C, N	D, nm	Минимална вредност за <i>WR</i> , $10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$
<i>GA-RSM</i>	0,444	1	100	100	-0,132
<i>PSO-RSM</i>	0,444	1	100	100	-0,132
<i>ANN</i>	0,444	1	100	100	0,0335

Сва предвиђања указују да ће за исте вредности променљивих бити најмањи интензитет хабања, али се вредности интензитета хабања разликују у зависности од тога да ли се врши оптимизација на основу *RSM* или предвиђање применом *ANN*. Приликом поређења вредности са експерименталним подацима, највеће вредности интензитета хабања приказане су у табели 5.15. Поређење је извршено за *GA*, *PSO*, *ANN* и експерименталне податке. Представљена су и одступања добијених вредности оптимизацијом и *ANN* од експерименталних података.

Табела 5.15 Поређење резултата са експерименталним вредностима и одређивање грешке *RSM* модела

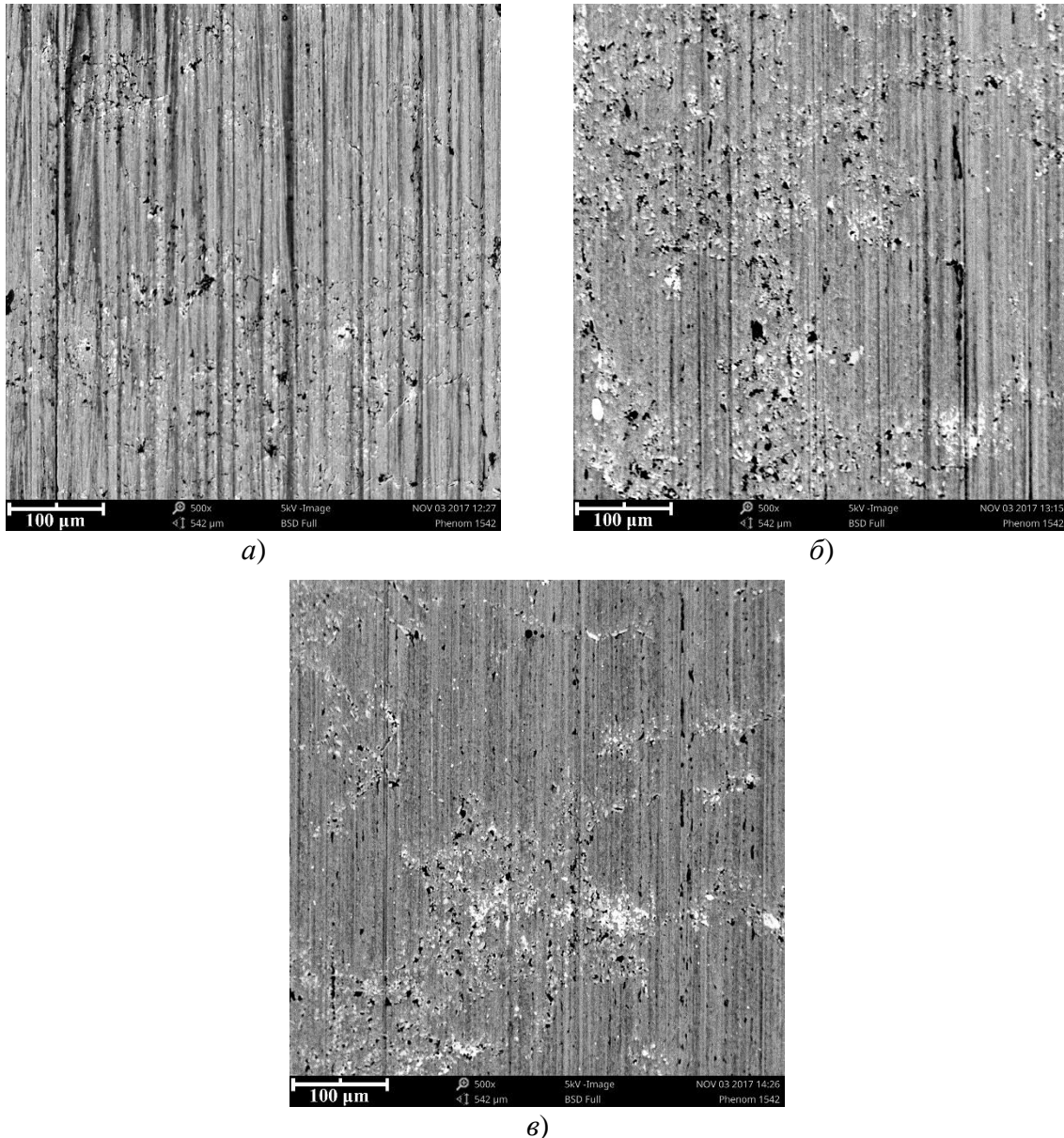
Метода	A, mas. %	B, m/s	C, N	D, nm	<i>WR</i> , $10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$	Грешка, %
Експеримент	0,2	0,25	100	30	3,40	0
<i>GA-RSM</i>	0,2	0,25	100	30	2,97	12,65
<i>PSO-RSM</i>	0,2	0,25	100	30	2,97	12,65
<i>ANN</i>	0,2	0,25	100	30	3,40	0

Применом оптимизационих метода одређене су вредности фактора, режим рада при коме се остварују минималне и максималне вредности интензитета хабања. На овај начин могуће је сагледати понашање материјала и изабрати правац даљих истраживања.

Битно је напоменути да се применом развијеног математичког модела помоћу *RSM* може добити апроксимативни опис посматраног процеса. Граничне вредности указују на карактеристике и понашање материјала и дефинишу правац даљих истраживања нанокомпозита. Применом развијеног математичког модела за поједине случајеве добијане су негативне вредности интензитета хабања. Ова појава физички није могућа, али се ове вредности могу објаснити апроксимацијом реалног модела у датим условима испитивања. Негативне вредности су блиске нули, па се могу сматрати као релевантним минималним вредностима интензитета хабања.

5.2.4. Анализа механизма хабања $A356/Al_2O_3$ нанокompозита на основу *SEM* и *EDS* анализе

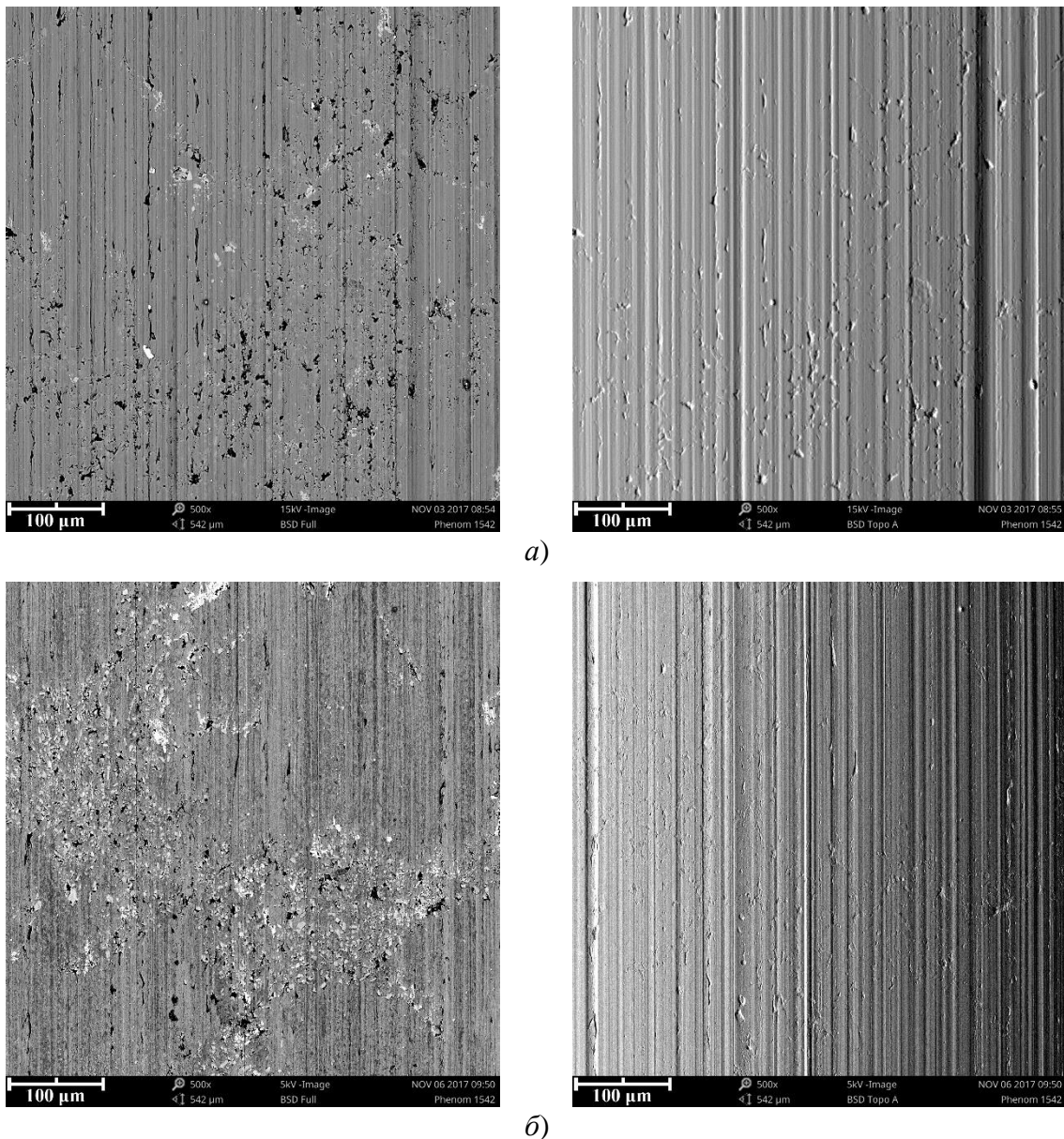
Трагови хабања на испитиваним материјалима су последица директног контакта са контактним елементима трибометра. Након триболошких испитивања увек се ради анализа добијених трагова хабања како би се дефинисао доминантни механизам хабања. За анализу карактеристика хабања и испитивање механизма хабања и морфологије обрађених површина коришћене су *SEM* и *EDS* анализе. Изглед похабаних површина нанокompозита $A356/Al_2O_3$ са просечном величином честица од 100 nm приказане су на слици 5.14.



Слика 5.14 Похабана површина: а) нанокompозита са 0,2 мас.% Al_2O_3 , б) нанокompозита са 0,3 мас.% Al_2O_3 , и в) нанокompозита са 0,5 мас.% Al_2O_3 са величином честица од 100 nm

На слици 5.14 и 5.15 са увећањем од x500 јасно се уочавају правци клизања који су настали при условима триболошког испитивања: $F_n = 40$ N, $v = 0.25$ m/s и $s = 1000$ m. На слици 5.14 а) и б) правац клизања је одозго наниже, док је на слици 5.14 в) одоздо

навише. Код нанокompозита са 0,2 и 0,3 мас.% Al_2O_3 примећују се дубоки дугачки жлебови у смеру клизања у односу на уске жлебове који се јављају код нанокompозита са 0,5 мас.% Al_2O_3 . Мањи број микрошупљина има нанокompозит са садржајем 0,5 мас.% што доводи до закључка да је то оптималан садржај за побољшање отпорности на хабање и остваривање добре микроструктуре нанокompозита. Бела поља, која се појављују у траговима свих нанокompозита, указују на трансфер материјала са челичног диска на блокове нанокompозита. На слици 5.15 дат је приказ нанокompозита са садржајем ојачавача од 0,5 мас.% Al_2O_3 са различитим величинама ојачавајућих честица у два различита мода приказа. Правац клизања код испитиваних узорака је одоздо навише. Помоћу другог мода приказа, слика 5.15 десно, поузданије се може одредити дубина и ширина жлебова насталих током клизања, а уочава се и блага порозност у материјалу.



Слика 5.15 Похабана површина нанокompозита A356/0,5 мас.% Al_2O_3 са просечном величином честица а) од 30 nm и б) од 100 nm

На основу анализе уочава се да мали садржај ојачавајућих честица Al_2O_3 (0,2 и 0,3 мас.%) са просечном величином честица од 30 nm и 100 nm имају веома мали утицај на побољшање отпорности на хабање нанокompозита. Анализом похабаних површина испитиваних материјала помоћу SEM-а веома је тешко уочити разлику између похабаних

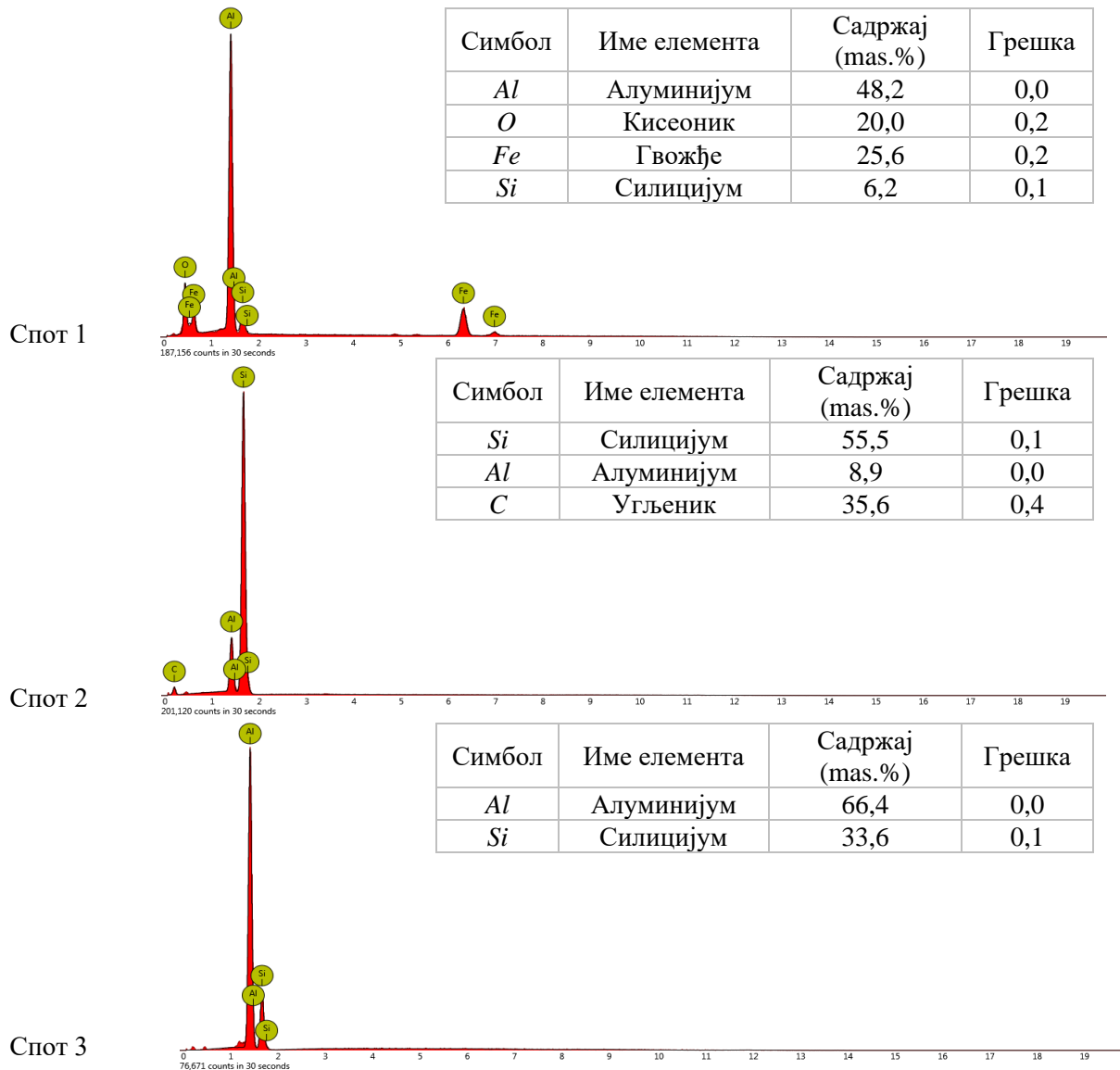
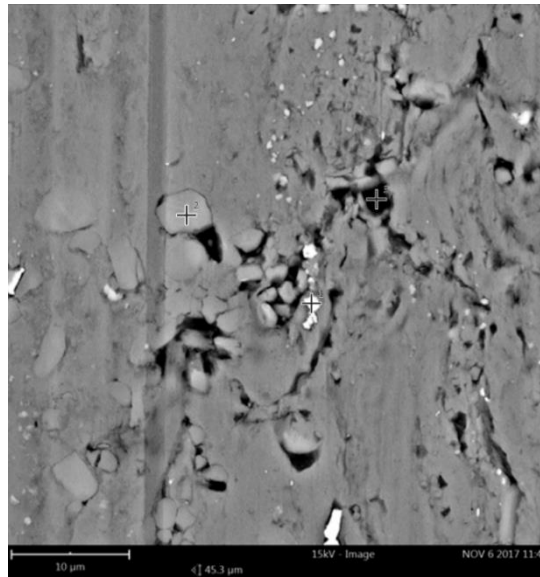
површина разматраних нанокompозита. На слици 5.15 приказана је похабана површина нанокompозита са различитим величинама ојачавајућих честица од 100 nm и 30 nm како би се уочила разлика између похабаних површина при истим условима испитивања. Може се приметити да постоји мањи број шупљина код нанокompозита са величином честица од 100 nm (слика 5.15б) које се преписују порозности материјала. Нанокompозити са величином честица од 30 nm (слика 5.15а) имају доста израженије жлебове настале током процеса клизања у односу на нанокompозите са величином честица од 100 nm (слика 5.15б).

Може се закључити да је за све испитиване материјале доминантан механизам хабања абразија са адхезијом као секундарним механизмом хабања. Нанокompозити са 0,5 мас.% Al_2O_3 са просечном величином честица од 100 nm издвајају се показујући највећу отпорност на хабање што је потврђено претходном анализом резултата и доказано анализом посматраних површина трагова хабања.

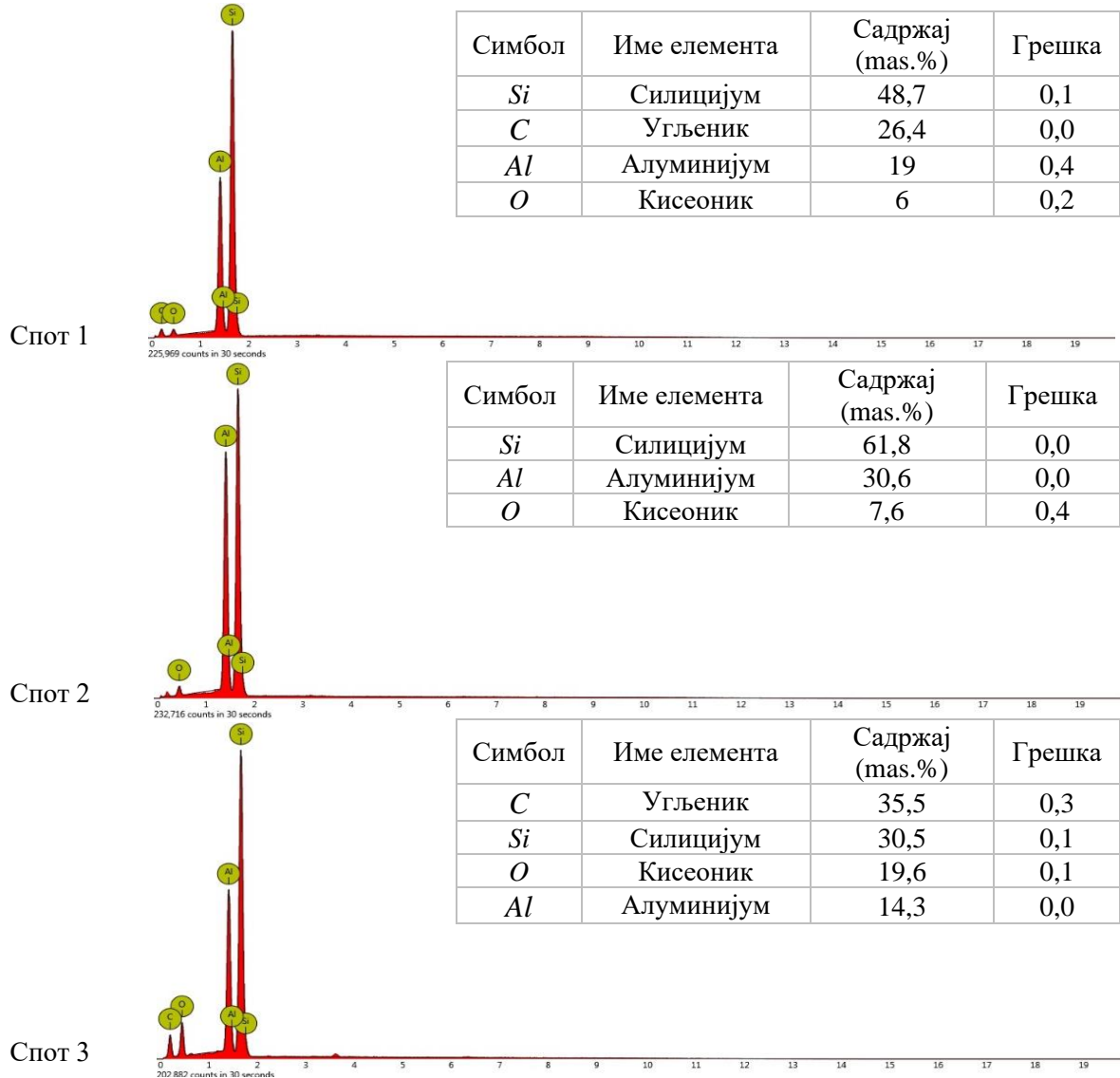
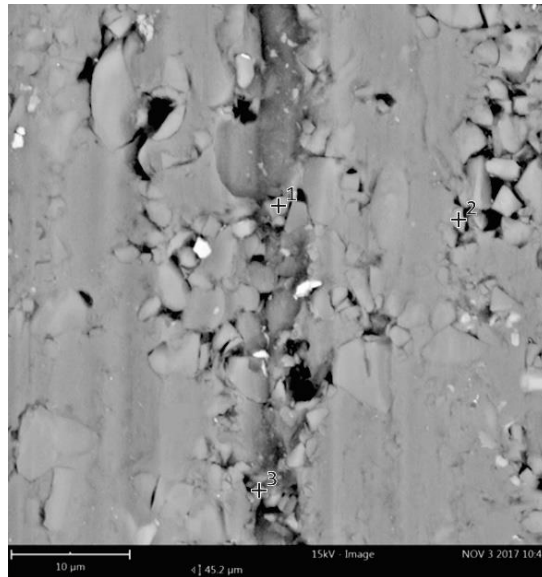
Анализирајући нанокompозите са различитим величинама ојачавача Al_2O_3 у основној легури А356, може се приметити да је побољшање отпорности на хабање нанокompозита са просечном величином честица од 100 nm веће у односу на нанокompозите са просечном величином честица од 30 nm независно од масеног садржаја ојачавача (0,2; 0,3 или 0,5 мас.%). Закључак је да се са повећањем оптерећења повећава интензитет хабања код свих испитиваних материјала. Утицај повећања брзине клизања на смањење интензитета хабања последица је мешовитог режима подмазивања, док је утицај оптерећења очекиван и у складу са истраживањима из литературе. Закључак о резултатима добијеним за мешовит режим подмазивања донет је на основу вредности за коефицијенте трења који није анализиран при оптимизацији.

Присуство пренесеног материјала са челичног диска на испитиване нанокompозите примећено је *SEM* анализом и потврђено *EDS* анализом (слика 5.16). На слици 5.16 дат је приказ похабане површине нанокompозита са 0,5 мас.% Al_2O_3 са резултатима одговарајуће *EDS* анализе. Потврђени трансфер материјала (слика 5.16 спот 1 и 2) у складу је са идентификованим механизмима хабања, а пренос материјала карактеристичан је за адхезивно хабање. Агломерација наночестица SiC није примећена ни при већем увећању при посматрању свих трагова хабања. На похабаној површини постојале су повећане количине угљеника (слика 5.16, спот 2), што упућује на присуство добро распоређених наночестица Al_2O_3 . На слици 5.17 приказана је анализа нанокompозита са 0,5 мас.% Al_2O_3 са просечном величином честица од 30 nm.

На основу спроведене *EDS* анализе, такође је потврђен трансфер материјала (слика 5.17, спот 1, 2 и 3) што потврђује идентификован механизам хабања *SEM* анализом. Упоредивањем нанокompозита са различитим просечним величинама честица, од 30 и 100 nm, не може се уочити разлика према *EDS* анализи. Мање-више масени садржај елемената је у границама код свих испитиваних материјала. На већим увећањем уочавају се веће фазе микронских величина које се могу можда преписати агломератима као што је приказано и доказано *EDS* анализом у истраживању [15]. Приликом *EDS* анализе поменутог истраживања, у једном споту испитивања, измерена је велика вредност *Si*, док у другом испитивању није детектовано *Si*. Могући разлози за овај феномен јесу да је дошло до испадања агломерата честица SiC из материјала или да унутар запремине нанокompозита постоје гасни мехурови.



Слика 5.16 EDS анализа наноконтропта $A356/0,5 \text{ mas.}\% \text{ Al}_2\text{O}_3$ са просечном величином честица од 100 nm



Слика 5.17 EDS анализа наноконтропта $A356/0,5 \text{ mas.}\% \text{ Al}_2\text{O}_3$ са просечном величином честица 30 nm

У овом испитивању, на сликама 5.16 и 5.17 спот 2, детектовано је веће присуство Si , али није било испитивања без детекције Si . Овај феномен се уочава и код нанокompозита са честицама SiC на слици 5.7 спот 2, с тим што се тамо уочавају мање димензије Si у односу на нанокompозите са Al_2O_3 честица. Може се закључити да коришћењем мањег садржаја ојачавача у нанокompозиту обезбеђује се равномерна расподела честица у нанокompозиту и мала је вероватноћа за појаву агломерата наночестица већ се претпоставља да су у питању гасни мехурови који су израженији код нанокompозита са Al_2O_3 (20-30 nm).

5.3. Изводи прве фазе истраживања

Циљ истраживања у првом делу докторског рада је експериментална идентификација фактора који утичу на хабање нанокompозита. Како нанокompозити садрже веома мали проценат ојачавача, било је неопходно испитати исте уз оптимизацију трошкова и времена и доћи до свих потребних информација за даљи ток истраживања. Идентификација се заснива на мерењу улазних и излазних величина, анализи и процени утицаја фактора на хабање. Циљ је такође утврдити постоји ли математичка зависност између посматраних фактора и интензитета хабања. У овом истраживању анализирани су најутицајнији фактори на триболошке карактеристике материјала.

Тагучи метода је примењена за планирање експеримента на основу кога се на брз, контролисан и разумљив начин долази до оптималних решења која су неопходна за даља истраживања. На овај начин постижу се велике уштеде у људским, временским и финансијским ресурсима. У првом делу истраживања коришћен је мали проценат ојачавача SiC (50 nm) и Al_2O_3 (20-30 nm и 100 nm) наночестица у алуминијумској основи са циљем побољшања отпорности на хабање нанокompозита и остваривање равномерне расподеле ојачавача у основи нанокompозита.

На основу прикупљених података, извршене анализе резултата и добијене оптималне комбинације фактора приступа се триболошком испитивању нове серије материјала. Нови материјали су нанокompозити који у свом саставу имају већи масени садржај керамичких честица у односу на прву серију испитиваних материјала.

Према анализи остварених резултата прве фазе истраживања, изабрани су материјали за другу фазу истраживања. Закључак је да честице Al_2O_3 са величином честица од 30 nm нису постигле побољшање триболошких карактеристика у односу на основни материјал. Нанокompозити са величином честица од 100 nm нису разматрани у даљем току истраживања. Изабрани су алуминијумски нанокompозити са SiC наночестицама као ојачавачем због побољшања чврстоће, тврдоће, отпорности на корозију и хабање. Њихова потенцијална примене је код машинских елемената као што су: вратило, зупчаници, брегаста осовина, цилиндар мотора и клип.

У другој фази истраживања главни циљ је оптимизација карактеристика нанокompозита. Тако да се у циљу уштеде материјала, енергије, времена и новца изабрани експериментални план за триболошка испитивања и анализу резултата идентичан ће бити као код прве серије материјала.

6. ДРУГА ФАЗА ТРИБОЛОШКИХ ИСПИТИВАЊА

6.1. Производња нанокompозита

Поступак добијања нове серије материјала сличан је поступку производње претходно испитиваних материјала. За ову фазу истраживања, у циљу добијања материјала што бољих карактеристика у поређењу са основном легуром, произведени су нанокompозити са већим садржајем ојачавача у односу на прву фазу истраживања. Добијени су нанокompозити са основном алуминијумске легуре А356 и садржајем ојачавача од 0,7; 1,0; 1,5 и 2,0 мас.% SiC са величином честица од 45 nm.

6.2. Параметри хrapавости

Провера површинске хrapавости неопходна је пре сваког експерименталног извођења. Хrapавост блокова била је у границама (за Ra до 0,4 μm) за квалитет N5, а по један пример мерења параметара хrapавости приказан је за сваки материјал у табели 6.1. Референтна дужина при овом мерењу износила је од 1,25 mm (5 x 0,25). Измерена хrapавост дискова је износила $\approx 0,4 \mu\text{m}$.

Табела 6.1 Параметри хrapавости основне легуре и нанокompозита

Материјал	$Ra, \mu\text{m}$	$Rz, \mu\text{m}$	$Rmax, \mu\text{m}$	$Rq, \mu\text{m}$	$Rv, \mu\text{m}$	$Rp, \mu\text{m}$
A356	0,343	2,246	2,246	0,443	1,563	0,683
A356/0,7 мас.% SiC	0,341	2,213	2,212	0,438	1,492	0,720
A356/1,0 мас.% SiC	0,362	1,956	1,955	0,448	1,324	0,631
A356/1,5 мас.% SiC	0,378	2,059	2,058	0,480	1,230	0,828
A356/2 мас.% SiC	0,410	2,442	2,442	0,550	1,717	0,725

Поступак припреме површина био је идентичан при сваком испитивању и вршена је провера квалитета обрађене површине пре сваког испитивања, а вршена је и провера димензија узорака.

6.3. Резултати испитивања микротврдоће

Испитивање микротврдоће материјала извршено је у Лабораторији за трибологију на Машинском факултету у Београду на уређају „ТН710“ који је приказан на слици 6.1.



Слика 6.1 Уређај за мерење микротврдоће

Уређај са слике 6.1 може се користити за мерење тврдоће превлака и материјала и одређивање промене тврдоће услед трења и хабања површинских слојева. Основне мерне карактеристике коришћеног уређаја су:

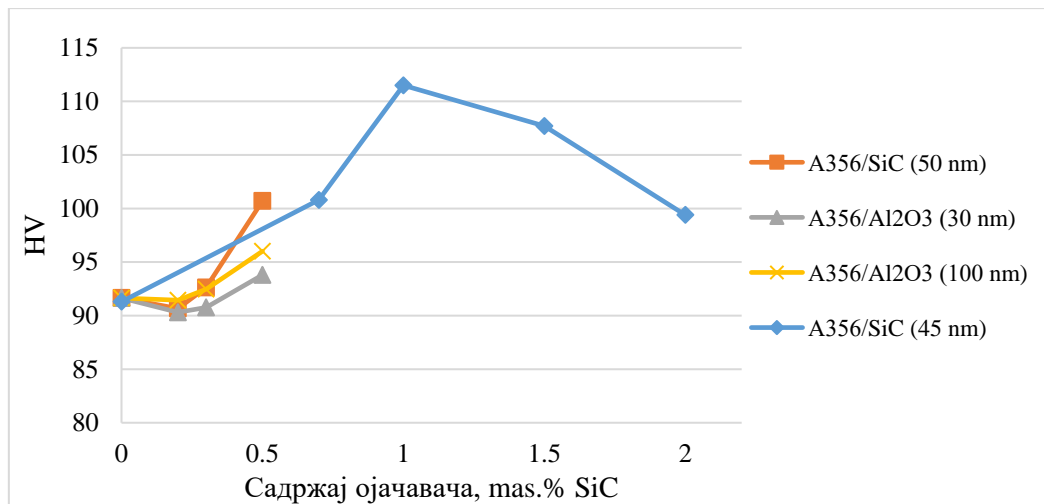
- опсег сила: 0,1 N – 10 N и
- опсег мерења: 1 HV – 3000 HV.

Мерење тврдоће нанокompозита извршено је по Викерсу уз понављање три пута са примењеном силом утискивања од 5 N према стандарду ASTM [195]. Време утискивања утискивача у површину усвојено је као време задржавања од 15 s. У табели 6.2 дате су средње вредности измерених тврдоћа на собној температури.

Табела 6.2 Резултати мерења тврдоће по Викерсу

Материјал	HV0,5
A356	91,3
A356/0,7 mas.% SiC	100,8
A356/1 mas.% SiC	111,5
A356/1,5 mas.% SiC	107,7
A356/2 mas.% SiC	99,4

Према просечним вредностима тврдоће уочава се пораст тврдоће са додатком ојачавача од 0,7 и 1 mas.% SiC у односу на основну легуру. Даљим додавањем ојачавача од 1,5 и 2 mas.% SiC у A356 легуру вредност тврдоће благо опада, али је већа од тврдоће 91,3 HV, колико износи тврдоћа основне легуре. Тврдоћа сваког нанокompозита превазилази тврдоћу основе нанокompозита (A356 легуре). Испитивана је и микротврдоћа прве серије материјала како би се извршило поређење са резултатима других истраживања. На слици 6.2 приказан је дијаграм измерених вредности тврдоће прве и друге серије испитиваних материјала.



Слика 6.2 Дијаграм вредности микротврдоће свих испитиваних материјала

Упоредним прегледом може се уочити да је већа вредност тврдоће остварена коришћењем материјала са већим процентом масеног садржаја ојачавача. Уочено је побољшање тврдоће са додатком од 0,5 mas.% SiC зато што са мањим садржајем ојачавача тврдоћа нанокompозита је нижа или приближна вредности тврдоће основне легуре.

Може се приметити да се микротврдоћа повећава са повећањем масеног садржаја наночестица (до 1 mas.% SiC) што се може приписати примењеном модификованом процесу производње који доводи до хомогене расподеле SiC честица. Керамичке наночестице спречавају кретање дислокације јер се при кретању индентера повећава скупљање честица у близини индентера, а то доводи до повећања тврдоће нанокompозита. Повећање тврдоће последица је чврстог приањања између керамичких наночестица и коришћене основне легуре. Пошто је у питању јака веза између основе и наночестица мањих садржаја у основној легури, може се рећи да се јавља механизам ојачања кроз ефекат преношења оптерећења. Код овог механизма ојачања подразумева се да се оптерећење са материјала основе преноси на керамичке честице што је посебно изражено када не постоји агломерација наночестица у материјалу.

Додавањем честица изнад 1 mas.% SiC микротврдоћа нанокompозита благо се смањује. Претпоставља се да је разлог томе повећана порозност у нанокompозитима. Порозност нанокompозита повећава се са већим садржајем керамичких наночестица због агломерације додатих честица. Слична запажања у вези са тврдоћом нанокompозита се могу наћи и у другим истраживањима [133, 135]. Један од закључака које су извели Езапур (*Ezatpour*) и остали [135] је да се смањењем величина честица или повећањем запреминског удела наночестица у нанокompозиту утиче на уситњавање зрна основне легуре. Применом поступка ливења за производњу нанокompозита (0,5; 1 и 1,5 mas.% Al₂O₃) приметили су повећање тврдоће са повећањем садржаја ојачавача до 1 mas.% Al₂O₃. Повећањем преко те вредности тврдоћа се смањује. Посматрањем површина и помоћу SEM анализе установили су да су честице равномерно распоређене са малом агломерацијом у основи нанокompозита.

Сва истраживања везана за развој нанокompозита наводе да је равномерни распоред ојачавача у основној легури веома важан параметар. Ово директно утиче на побољшање механичких и триболошких карактеристика нанокompозита у односу на основну легуру. Тврдоћа нанокompозита зависи од врсте наноојачавача, расподеле наночестица у основи, као и од нивоа порозности материјала.

Испитивањима нанокompозита установљено је да су SiC честице равномерно распоређене у алуминијумској основи без дефекта као што су порозност и шупљине [196-198]. Добра распоређеност наночестица и додавање ојачавача до 2 мас.% SiC наночестица [196] резултирало је повећањем Викерсове микротврдоће и отпорности на хабање. Већи проценат SiC смањује Викерсову микротврдоћу и отпорност на хабање. Побољшање тврдоће нанокompозита у односу на основну легуру су доказали и многи други истраживачи својим истраживањима [110, 122, 130, 132, 197, 199-203].

Поред тврдоће веома битна карактеристика материјала је и затезна чврстоћа која такође зависи од врсте основне легуре и ојачавача. Још једно истраживање показало је да садржај ојачавача од 1,5 мас.% SiC + 0,5 мас.% B_4C има мању затезну чврстоћу (200 МПа) од нанокompозита састава 1 мас.% SiC + 0,5 мас.% B_4C (265 МПа) [204].

Последњих пар година истраживачи улажу огромне напоре да пронађу праву комбинацију у примени поступка за добијање нанокompозита [200]. Једно од решења јесте примена модификатора у поступку производње нанокompозита. Помоћу њих се утиче на побољшање карактеристика нанокompозита. Применом модификатора утиче се на елиминацију порозности код нанокompозита ојачаних наночестицама SiC . Побољшање механичких својстава нанокompозита у односу на основну легуру $A356$ може се добити применом титанијума и никла, при чему су бољи резултати применом никла. Показали су да је уз побољшање микроструктуре остварена и погодна комбинација чврстоће и дуктилности [127].

Производњом нанокompозита са основом $AA7150$ и ојачавачем од 1% SiC честица величине 40–60 nm постигли су значајна побољшања: повећање затезне чврстоће за 19,6%, микротврдоће за 2,9% и смањење порозности за 46,96% у поређењу са својствима основног материјала [110]. Помоћу SEM анализе потврдили су равномерну расподелу ојачавача у основи нанокompозита [200].

Анализу механичких карактеристика нанокompозита са основом $A357$ и садржајем ојачавача од 0,5; 1,0 и 1,5 мас.% SiC просечне величине честица 50 nm извршили су Бадизи (*Badizi*) и остали [205]. Произвели су нанокompозите поступком ливења уз мешање помоћу електромагнетног мешача. За разлику од овог истраживања они су закључили да најбоље механичке карактеристике поседује нанокompозит са 1,5 мас.% SiC . Још једно истраживање је доказало да нанокompозит са додатком од 1,5 мас.% SiC (у односу на коришћене 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 мас.% SiC) поседује најбоље карактеристике. Нанокompозит $AA7150/1,5$ мас.% SiC показује смањење порозности за 83,47%, побољшање микротврдоће за 23,9% и затезне чврстоће за 60,1% у поређењу са основном легуром. Уочено је да су микропукотине сведене на минимум са 1,5 мас.% SiC у поређењу са основном легуром и нанокompозитом $AA7150/2$ мас.% SiC [198]. Остварени резултати у овој докторској дисертацији у сагласности су са наведеним истраживањима. Установљено је да се са садржајем ојачавача у основи од 2 мас.% SiC смањује микротврдоћа нанокompозита. Већи садржај ојачавача доводи до повећања порозности због великог односа површине и запремине наночестица. У другим истраживањима констатовали су да када се једном пређе одређена граница у растопљеној смеши метала долази до формирања кластера и празнина што као резултат има већу порозност нанокompозита [206]. Када су у питању нанокompозити ојачани честицама тешко је установити и посебно издвојити механизам ојачања који се дешава јер је углавном у питању спрега више њих истовремено. Према теорији механизма ојачања познато је да су сви механизми међусобно повезани и зато је немогуће издвојити само један.

6.4. Триболошко испитивање нанокompозита A356/SiC

6.4.1. Анализа резултата добијених помоћу Тагучи L₈ матрице

За спровођење експеримента изабрани су фактори, као и у првој фази истраживања (табела 6.3). Вредност пута клизања је 1000 m како би било могуће извршити поређења резултата са резултатима прве фазе истраживања.

Табела 6.3 Улазни фактори и њихови нивои са кодираним вредностима

Контролни фактори	Јединица	Ниво I	Ниво II	Ниво III	Ниво IV
Садржај ојачавача SiC, A	mas. %	0 (1)	0,7 (2)	1,0 (3)	1,5 (4)
Оптерећење, B	N	40 (1)	100 (2)	-	-
Брзина клизања, C	m/s	0,25 (1)	1 (2)	-	-

Усвојена је Тагучи матрица L₈ и експеримент је спроведен у условима подмазивања уљем ISO VG 220. Контактни елементи су дискови од челика 42CrMo4, а блокови су испитивани нанокompозити. Триболошка испитивања су спроведена на трибометру TPD 95 у Лабораторији за трибологију на Машинском факултету у Београду, а резултати испитивања приказани су у табели 6.4.

Табела 6.4 Ортогонална матрица L₈ са експерименталним резултатима

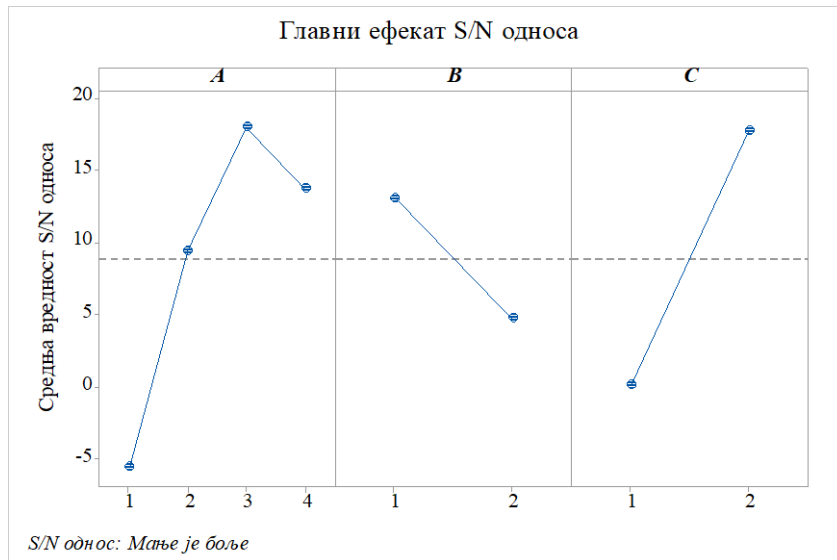
Р.бр.	A, mas. %	B, N	C, m/s	Траг хабања, mm	WR, 10 ⁻⁵ mm ³ /m	CoF	S/N однос WR
1.	0	40	0,25	1,099	2,2206	0,0228	-6,9292
2.	0	100	1	0,986	1,6036	0,0247	-4,1018
3.	0,7	40	0,25	0,7900	0,8248	0,0376	1,6735
4.	0,7	100	1	0,4360	0,1386	0,0155	17,1623
5.	1	40	1	0,2930	0,0421	0,0281	27,5195
6.	1	100	0,25	0,6099	0,3796	0,0592	8,4133
7.	1,5	40	1	0,2667	0,0317	0,0279	29,9703
8.	1,5	100	0,25	0,9280	1,3369	0,0281	-2,5219

Тагучи метода користи ANOVA анализу за тумачење утицаја сваког улазног фактора и за одређивање процента утицаја сваког улаза понаособ на излаз. Циљ експерименталног плана је проналажење најутичајнијих фактора и комбинације фактора који утичу на хабање, и поређење ових резултата са првом серијом материјала. Експериментални резултати трансформисани су у S/N однос (табела 6.4) помоћу карактеристике квалитета „мање је боље“ која је одређена једначином 4.1. У табели 6.5 дати су резултати анализе за S/N однос интензитета хабања. Фактори A, B и C у табели су променљиве приказане у табели 6.3.

Табела 6.5 Резултати анализе за S/N однос „мање је боље“

Ниво	A	B	C
1	-5,5155	13,0585	0,1589
2	9,4179	4,7380	17,6376
3	17,9664		
4	13,7242		
Делта	23,4819	8,3206	17,4787
Ранг	1	3	2

Може се уочити да највећи утицај има садржај ојачавача, затим брзина клизања и оптерећење. Како би се одредила оптимална комбинација фактора најбоље је посматрати график са слике 6.3. Са A, B и C су означене величине из табеле 6.3.



Слика 6.3 Главни ефекти S/N односа за интензитет хабања

Оптимална комбинација фактора за постизање минималног интензитет хабања је A3B1C2 односно 1 mas.% SiC, 40 N и 1 m/s. Према резултатима и анализама у првом делу истраживања овде се врши оптимизација према једном излазу, а то је интензитет хабања. Анализа резултата спроведена је на нивоу поузданости од 95% и приказана је у табели 6.6.

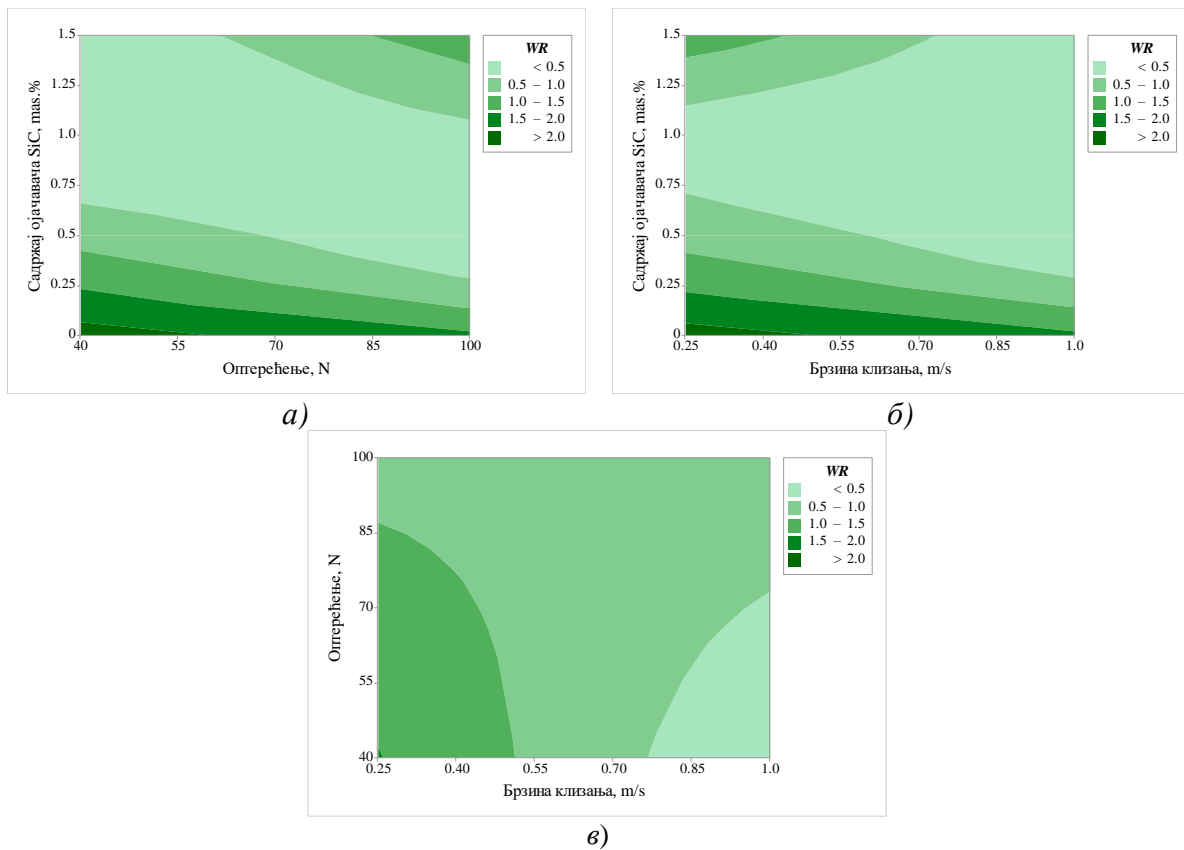
Табела 6.6 Резултати ANOVA анализе интензитета хабања

Члан	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Pr (%)
A	3	627,09	627,09	209,03	4,93	0,173	42,91
B	1	138,46	138,46	138,46	3,26	0,213	9,47
C	1	611,01	611,01	611,01	14,40	0,063	41,81
Остатак	2	84,87	84,87	42,44			5,81
Укупно	7	1461,44					100,00

R-Sq 94,19% R-Sq(adj) 79,67%

Резултати које је дала ANOVA анализа показују да је приближно једнак утицај садржаја ојачавача 42,91% и брзине клизања 41,81 %. Утицај оптерећења најмањи је и износи 9,47%. У поређењу са првом серијом материјала, може се приметити да највећи утицај на интензитет хабања има садржаја ојачавача у основној легури A356.

На слици 6.3 помоћу графика главних ефеката јасно се уочава како после садржаја ојачавача од 1 mas.% SiC (ниво 3) опада средња вредност S/N односа. Ово је потврђено и оптималном комбинацијом фактора. Резултат је у сагласности са оствареном микротврдоћом. Највећу тврдоћу поседује наноккомпозит са 1 mas.% SiC. Зависност интензитета хабања од посматраних фактора приказана је на слици 6.4.



Слика 6.4 Дијаграмски приказ зависности интензитета хабања од а) садржаја ојачавача $\text{mas.}\% \text{ SiC}$ и оптерећења, б) садржаја ојачавача $\text{mas.}\% \text{ SiC}$ и брзине клизања и в) оптерећења и брзине клизања

Анализом дијаграма са слике 6.4 може се уочити да је утицај садржаја ојачавача од $1 \text{ mas.}\% \text{ SiC}$ при већем оптерећењу израженији јер се ту сужава област обојена светло зеленом бојом која означава минимални интензитет хабања. При мањем оптерећењу од 40 до 60 N, хабање је минимално када је садржај ојачавача у границама 0,85 до $1,5 \text{ mas.}\% \text{ SiC}$. При максималном оптерећењу минимално хабање је са садржајем ојачавача од 0,5 до $1,1 \text{ mas.}\% \text{ SiC}$ (слика 6.4а). У поређењу остварених резултата и резултата остварених првом серијом материјала може се закључити да се овом серијом материјала постиже мање хабање. Ако се посматра зависност садржаја ојачавача и брзине клизања закључак је да са садржајем од $1 \text{ mas.}\% \text{ SiC}$ постиже се минимално хабање независно од вредности брзине клизања. Хабање је минимално при брзини клизања од 0,7 до 1 m/s са садржајем ојачавача од 0,7 до $1,5 \text{ mas.}\% \text{ SiC}$ (слика 6.4б). Зависност оптерећења и брзине клизања приказан је на слици 6.4в. Највеће хабање је при брзини клизања до приближно $0,5 \text{ m/s}$ са оптерећењем до 65 N, а затим се сужава област (тамно зелена боја). Најмање хабање (светло зелена боја) је при брзини клизања већој од $\approx 0,75 \text{ m/s}$, а при нижим вредностима оптерећења (од 40 до 70 N).

Анализом остварених резултата долази се до закључка да је потребно извршити додатна испитивања са измењеним триболошким условима. Уочено је побољшање отпорности на хабање нанокompозита, а анализом резултата уочен је велики утицај брзине клизања на интензитет хабања нанокompозита. Вредности за коефицијент трења биле су у границама од 0,0155 до 0,0592 што одговара еластохидродинамичком подмазивању. На основу резултата и анализе може се закључити да је неопходно изабрати друге услове испитивања. Из поменутог разлога за нову серију материјала извршило се испитивање са минималним бројем експерименталног извођења

коришћењем матрице L_8 . Ово је урађено како би се резултати упоредили са претходном серијом материјала и како би се дефинисали нови услови испитивања. У овом испитивању је било битно постићи средње вредности хабања како би се извршила SEM анализа нанокompозита која је неопходна за детаљнију анализу и практичну примену ових материјала.

По завршетку анализе резултата добијених испитивањима помоћу матрице L_8 урађена су пробна испитивања. Пробна испитивања са одређеним бројем понављања извршена су са редукторским уљем ISO VG 100. Услови испитивања одређени су помоћу дијаграма (слика 6.4) са брзином клизања 0,5 и 1 m/s и оптерећењем од 100 N. При овом испитивању остварено је веће хабање и већа вредност коефицијента трења (\approx два пута већа) у односу на вредности са претходно коришћеним уљем. Ово је у сагласности са теоријом трења и подмазивања. Изабрано је моторно уље због примене легуре A356 у аутомобилској индустрији. За даљи ток истраживања усваја се коришћење уља познатог домаћег произвођача NISOTEC SAE 5W-30.

6.4.2. Анализа резултата добијених помоћу Тагучи L_{27} матрице

Коришћењем већег броја експерименталних извођења омогућава се развијање математичког модела који представља циљ сваке оптимизације. Тако се са усвојеним уљем, изабраним новим нивоима фактора и усвојеном матрицом приступило експерименталном извођењу. Спољни фактори као што су температура уља и ваздуха одржавани су на приближно истим вредностима ($\pm 4^\circ$) при свим условима испитивања. Дужина пута клизања је 1000 m. Анализом резултата на основу прикупљених експерименталних података коришћене су нове вредности нивоа фактора за оптимизацију триболошких карактеристика, а које су приказане у табели 6.7.

Табела 6.7 Улазни фактори и њихови нивои са кодираним вредностима

Контролни фактори	Јединица	Ниво I	Ниво II	Ниво III
Садржај ојачавача SiC, A	mas. %	0 (1)	1,5 (2)	2 (3)
Оптерећење, B	N	100 (1)	150 (2)	200 (3)
Брзина клизања, C	m/s	0,5 (1)	0,75 (2)	1 (3)

Задржана су три фактора која су на три нивоа, ортогонална Тагучи L_{27} матрица коришћена је за анализу и оптимизацију нанокompозита. Подразумевана је основна легура и одабран је садржај ојачавача од 1,5 и 2 mas. % SiC на основу анализе претходних резултата и резултата из литературе [198, 205]. У табели 6.8 приказане су експерименталне вредности за траг хабања, интензитет хабања и коефицијент трења. Вредности интензитета хабања прорачунате су на основу величине трага хабања [113], док су вредности за коефицијент трења узете као средња аритметичка вредност три испитивања. Последње две колоне у табели 6.8 приказују S/N односе за посматране излазе остварене при спроведеној ANOVA анализи. A, B и C су означене величине из табеле 6.7.

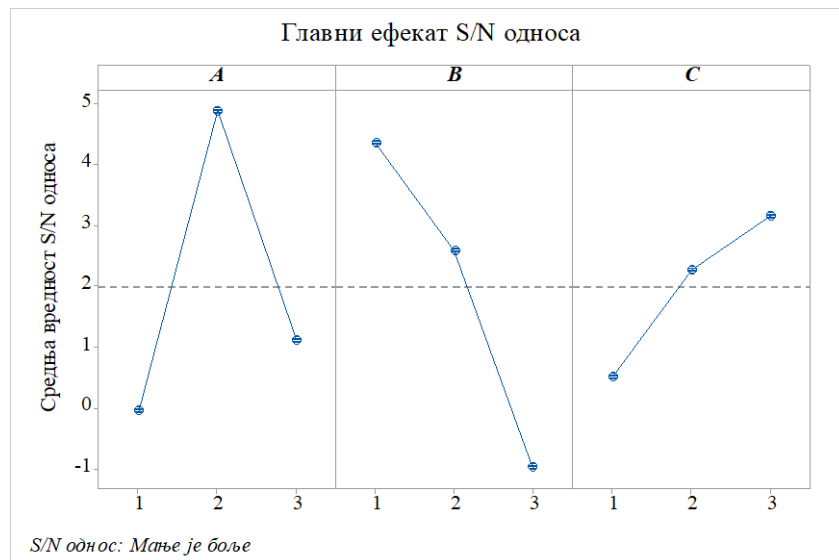
Табела 6.8 Ортогонална матрица L_{27} са експерименталним резултатима

Р.бр.	A, mas.%	B, N	C, m/s	Траг хабања, mm	WR, 10^{-4} mm ³ /m	CoF	S/N за WR	S/N за CoF
1.	0	100	0,5	1,8733	1,0692	0,077	-0,5812	22,2702
2.	0	100	0,75	1,5660	0,6224	0,059	4,1186	24,5830
3.	0	100	1	1,5733	0,6388	0,068	3,8927	23,3498
4.	0	150	0,5	1,9333	1,1774	0,089	-1,4185	21,0122
5.	0	150	0,75	1,6470	0,7397	0,077	2,6189	22,2702
6.	0	150	1	1,5800	0,6504	0,084	3,7364	21,5144
7.	0	200	0,5	2,2611	1,9169	0,097	-5,6520	20,2646
8.	0	200	0,75	2,1000	1,5444	0,098	-3,7752	20,1755
9.	0	200	1	2,0800	1,4679	0,075	-3,3339	22,4988
10.	1,5	100	0,5	1,4475	0,4944	0,091	6,1184	20,8192
11.	1,5	100	0,75	1,4500	0,5024	0,069	5,9790	23,2230
12.	1,5	100	1	1,3888	0,4396	0,082	7,1389	21,7237
13.	1,5	150	0,5	1,5450	0,5487	0,120	5,2133	18,4164
14.	1,5	150	0,75	1,5200	0,5839	0,089	4,6732	21,0122
15.	1,5	150	1	1,4500	0,5000	0,075	6,0206	22,4988
16.	1,5	200	0,5	1,7466	0,8786	0,121	1,1242	18,3443
17.	1,5	200	0,75	1,6000	0,6728	0,113	3,4423	18,9384
18.	1,5	200	1	1,5578	0,6216	0,091	4,1298	20,8192
19.	2	100	0,5	1,5678	0,6334	0,089	3,9664	21,0122
20.	2	100	0,75	1,5700	0,6375	0,080	3,9104	21,9382
21.	2	100	1	1,5361	0,5918	0,070	4,5565	23,0980
22.	2	150	0,5	2,0250	1,2171	0,086	-1,7065	21,3100
23.	2	150	0,75	1,9600	0,8468	0,087	1,4444	21,2096
24.	2	150	1	1,6466	0,7354	0,086	2,6695	21,3100
25.	2	200	0,5	2,0098	1,3135	0,098	-2,3686	20,1755
26.	2	200	0,75	1,9600	1,2581	0,078	-1,9943	22,1581
27.	2	200	1	1,8567	1,0447	0,099	-0,3798	20,0873

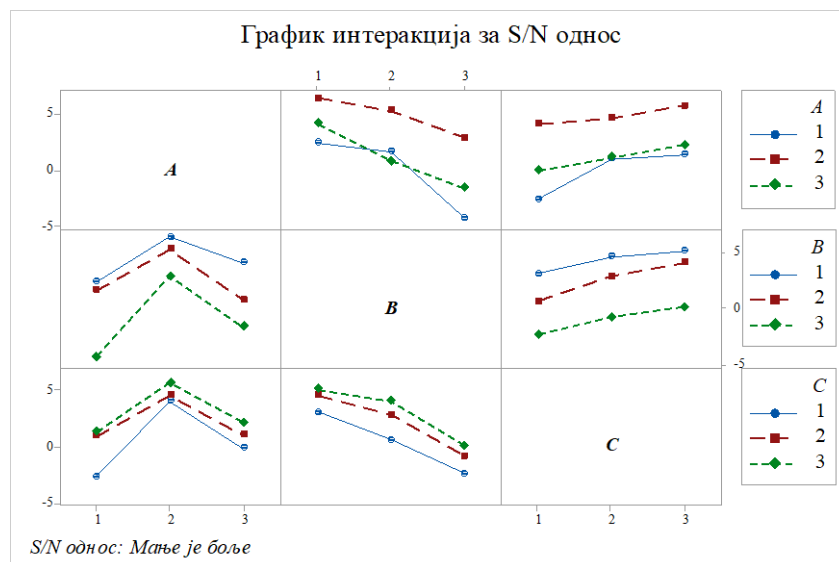
Процена утицаја фактора на интензитет хабања извршена је помоћу ANOVA анализе. Рангирање фактора је према делта вредности и приказано је у табели 6.9. Фактор који је прво рангиран за интензитет хабања јесте оптерећење, а затим следе садржај ојачавача и брзина клизања. Анализом S/N односа за коефицијент трења распоред фактора је следећи: оптерећење, брзина клизања и садржај ојачавача. На слици 6.5 су приказани графици главних ефеката и интеракција фактора за интензитет хабања. A, B и C су променљиве из табеле 6.7.

Табела 6.9 Резултати анализе за S/N однос „Мање је боље“

Ниво	WR			CoF		
	A	B	C	A	B	C
1	-0,04380	4,34442	0,52173	21,99	22,45	20,40
2	4,87107	2,58348	2,26859	20,64	21,17	21,72
3	1,12200	-0,97862	3,15895	21,37	20,38	21,88
Делта	4,91487	5,32304	2,63722	1,35	2,06	1,48
Ранг	2	1	3	3	1	2



а)



б)

Слика 6.5 Графици S/N односа за интензитет хабања а) главни ефекти и б) интеракције

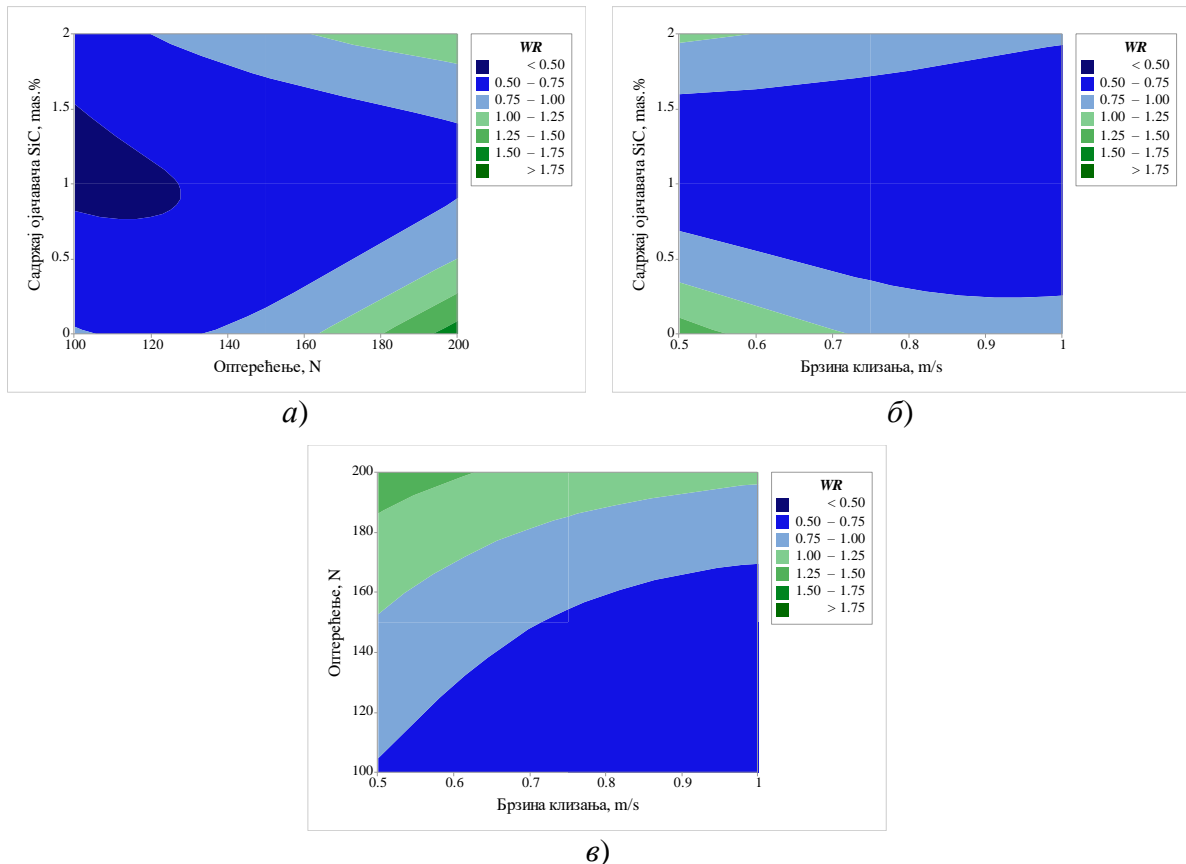
Вредности приказане графиком на слици 6.5а, засноване су на S/N односу и уз помоћ њих могуће је одредити оптималну комбинацију нивоа фактора за интензитет хабања која гласи $A2B1C3$. Минимално хабање остварује се са садржајем ојачавача од 1,5 мас.% SiC при оптерећењу од 100 N и брзини клизања од 1 m/s. График интеракција фактора приказан је на слици 6.4б и показује да постоји утицај интеракција између фактора који се ближе одређује ANOVA анализом (табела 6.10). Задржан је ниво значајности од 5% (95% степен поузданости) за анализу експерименталних резултата. Утицај сваког члана на излаз одређује се преко P-вредности и помоћу процентуалног утицаја сваког члана понаособ.

Табела 6.10 Резултати ANOVA анализе интензитета хабања

Члан	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Pr (%)
A	2	118,712	118,712	59,3559	53,67	0,000	37,14
B	2	132,373	132,373	66,1864	59,85	0,000	41,41
C	2	32,398	32,398	16,1988	14,65	0,002	10,14
A·B	4	17,400	17,400	4,3500	3,93	0,047	5,44
A·C	4	8,265	8,265	2,0663	1,87	0,209	2,59
B·C	4	1,644	1,644	0,4110	0,37	0,823	0,51
Остатак	8	8,847	8,847	1,1059			2,77
Укупно	26	319,638					100,00

R-Sq 98,37%; *R-Sq (adj)* 94,72%

Посматрањем *P*-вредности сви чланови имају утицај на интензитет хабања, осим интеракција *A·C* и *B·C*, а на нивоу поузданости од 95%. Утицај свих чланова интеракција задржан је при анализи јер би се уклањањем тих чланова смањила поузданост у предвиђању интензитета хабања без обзира на познате препоруке. При овој анализи долази се до закључка да највећи утицај има оптерећење од 41,41%, затим садржај ојачавача са 37,14% и утицај брзине клизања од 10,14%. Интеракција фактора садржај ојачавача и оптерећења је са највећим утицајем међу интеракцијама и то са 5,44%, док је утицај интеракција садржај ојачавача и брзина клизања 2,59%, а интеракција оптерећење и брзина клизања износи 0,51%. На слици 6.6 су приказани равански дијаграми добијени на основу спроведене анализе.



Слика 6.6 Дијаграмски приказ зависности интензитета хабања од а) садржаја ојачавача мас.% SiC и оптерећења, б) садржаја ојачавача мас.% SiC и брзине клизања и в) оптерећења и брзине клизања

Најповољнији радни услови нанокompозита одређеног састава могу се уочити на основу претходних дијаграма. Посматрајући дијаграм са слике 6.6a, уочава се да садржај ојачавача у границама од 0,8 до 1,5 мас.% SiC показује најмање хабање, а при оптерећењу од 100 до ≈125 N (тамно плава боја). Минимално хабање при највећем оптерећењу од 200 N постиже се са садржајем ојачавача од ≈1 до 1,4 мас.% SiC (плава боја). Поменућа област захвата већи део приказаног дијаграма и може се закључити да повећан садржај ојачавача у основи A356 долази до изражаја при екстремнијим условима рада. Анализом зависности садржаја ојачавача и брзине клизања примећује се да је плава боја веома заступљена, а она указује на нижи ниво хабања што је и потврђено малим процентом утицаја брзине клизања на хабање. Највеће хабање дешава се при најмањим брзинама клизања и највећем оптерећењу, а што је у сагласности са теоријом хабања и подмазивања.

Спроведена је ANOVA анализа и за коефицијент трења. Утицај сваког фактора на коефицијент трења утврђен је и гласи: садржај ојачавача 14,54%, оптерећење 34,53% и брзина клизања 20,97%. Рангирање поменутих фактора (табела 6.9) одговара процентуалном дејству истих на коефицијент трења. Утицај свих интеракција је око 5%.

Математички модел којим се најбоље може описати зависност интензитета хабања и улазних фактора може се приказати једначином:

$$WR = 2,584 - 1,741 \cdot A - 0,024 \cdot B - 0,420 \cdot C + 0,4234 \cdot A \cdot A + 0,1305 \cdot B \cdot B + 0,0624 \cdot C \cdot C - 0,0704 \cdot A \cdot B + 0,0512 \cdot A \cdot C - 0,0373 \cdot B \cdot C. \quad (6.1)$$

Пре самог усвајања овог модела извршена је проба модела само са интеракцијама фактора, али је његова поузданост била мала. Због тога је усвојен квадратни модел са интеракцијама са поузданошћу од 85,16%.

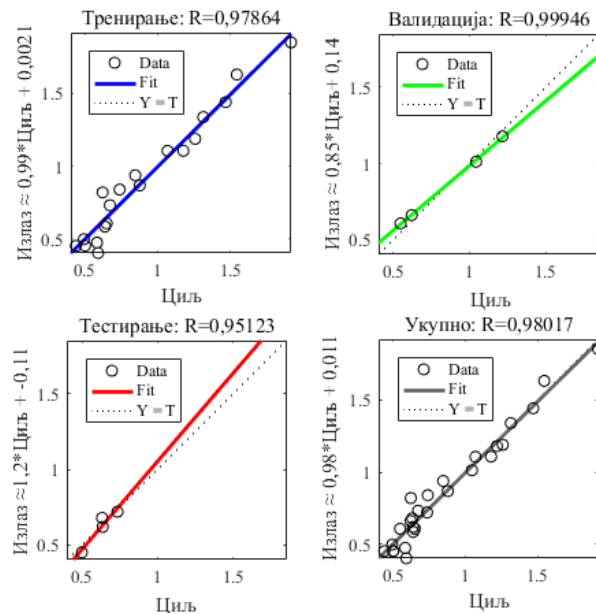
Завршни корак у Тагучи методи је потврда експериментом, која је неопходна у верификацији побољшања карактеристика, а на основу добијених оптималних вредности фактора. Резултати потврде експеримента (табела 6.11) у поређењу су са резултатима предвиђања помоћу Тагучи методе и експерименталних резултата.

Табела 6.11 Резултати потврде експеримента за интензитет хабања

		Оптимална комбинација			
		Експеримент	Предвиђање	Верификација	ANN
WR, 10 ⁻⁴ mm ³ /m	A2B1C3	0,4396	0,4477	0,49196	0,4539
	S/N однос (dB)	7,1389	6,9798	6,1614	/

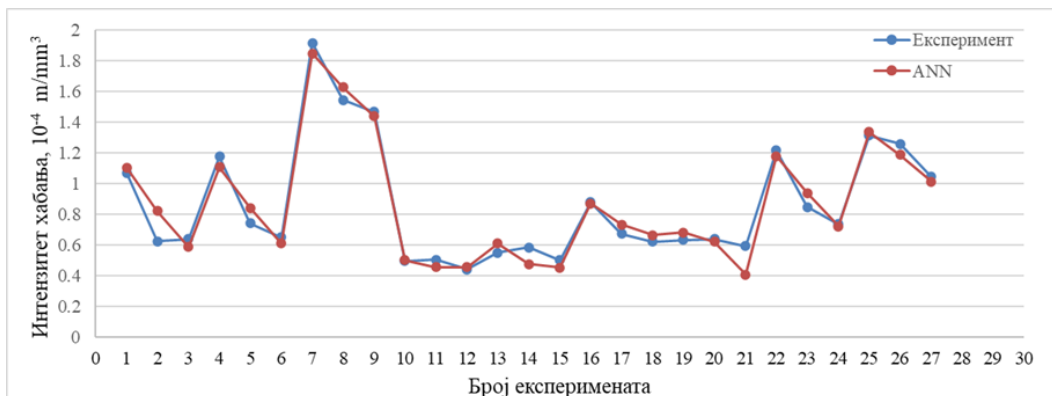
За оптималну комбинацију фактора постоји експерименталан податак, тако да није вршено поновно испитивање, већ се вредност из ортогоналне матрице користи за поређење. На основу резултата приказаних у табели 6.11 евидентно је одступање резултата применом Тагучи методе око 1,5%, а у верификацији резултата помоћу Тагучи методе је око 11% у поређењу са резултатима који су добијени експериментом.

Примењена је ANN анализа на експерименталне резултате интензитета хабања из табеле 6.2, са истим параметрима подешавања ANN анализе као у поглављу 5.2.2. Коришћена ANN мрежа је са ознаком 3-5-1, што значи да мрежа има 3 неурона у улазном слоју (садржај ојачавача, оптерећење и брзина клизања), 5 у скривеном слоју и 1 неурон у излазном слоју (интензитет хабања). На слици 6.7 приказан је дијаграм коефицијената регресије на основу трениране мреже из софтвера MATLAB.



Слика 6.7 Коefицијент регресије добијен помоћу ANN

Резултати остварени тренирањем мреже приказани су кроз коefицијенте регресије за тренирање, валидацију, тестирање и укупан коefицијент регресије. Укупан коefицијент регресије је $R=0,98017$, што указује на велико поклапање између експерименталних података и излаза добијеног тренирањем мреже. На слици 6.8 приказан је дијаграм у циљу поређења експерименталних вредности и вредности добијене предвиђањем помоћу ANN.



Слика 6.8 Упоредни приказ резултата остварених експериментом и ANN предвиђањем

Излаз добијен тренирањем мреже за оптималну комбинацију фактора може се видети и у табели 6.11. На основу табеле 6.11 и слике 6.8 може се закључити да се коришћена мрежа са великом поузданошћу може користити за предвиђање интензитета хабања. Грешка између експерименталне вредности и ANN анализе је 3,25%. Иста аналогија, као што је описано у поглављу 4.1.7, може се применити на експерименталне резултате (табела 6.2) коришћењем *GRA* анализе. Утицај тежинских коefицијената за CoF и WR су 0,28 и 0,72, респективно. Према вредностима тежинских коefицијената и једначине 4.18, формирана је једначина за *GRG* која гласи:

$$GRG = 0,28 \cdot GRC_{CoF} + 0,72 \cdot GRC_{WR} \quad (6.2)$$

Највећу релациону оцену *GRG* има експеримент под редним бројем 12 из табеле 6.8. Најбоље триболошке карактеристике којима се остварује минимално хабање и коefицијент трења је за комбинацију фактора $A2B1C3$, а то је уједно и оптимална комбинација добијена једнокритеријумском оптимизацијом.

6.5. Анализа механизма хабања нанокompозита

Анализа похабаних површина материјала урађена је Лабораторији катедре за неорганску хемију и технологију на Металуршком факултету у Београду. Немогућност коришћења исте опреме као у првој фази испитивања материјала је због отказа уређаја. Прво коришћени *SEM* је имао уграђену могућност и провере хемијског састава у тачки док је у овом случају било могуће само извршити површинску *EDS* анализу у трагу хабања. Уређај за *SEM* анализу приказан је на слици 6.9, а на слици 6.10 уређај *JSM-5800* за *EDS* анализу.

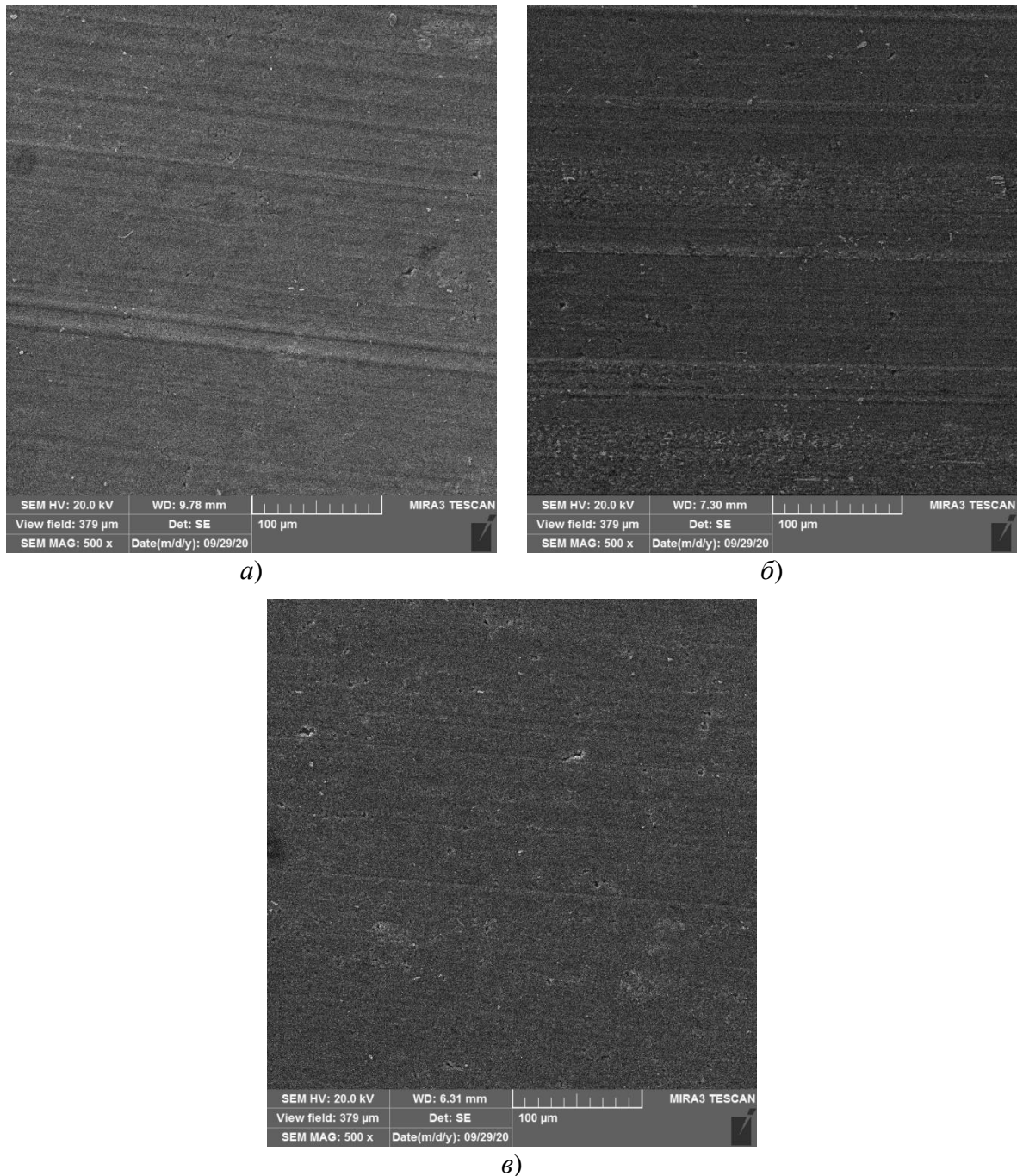


Слика 6.9 Уређај за *SEM* анализу



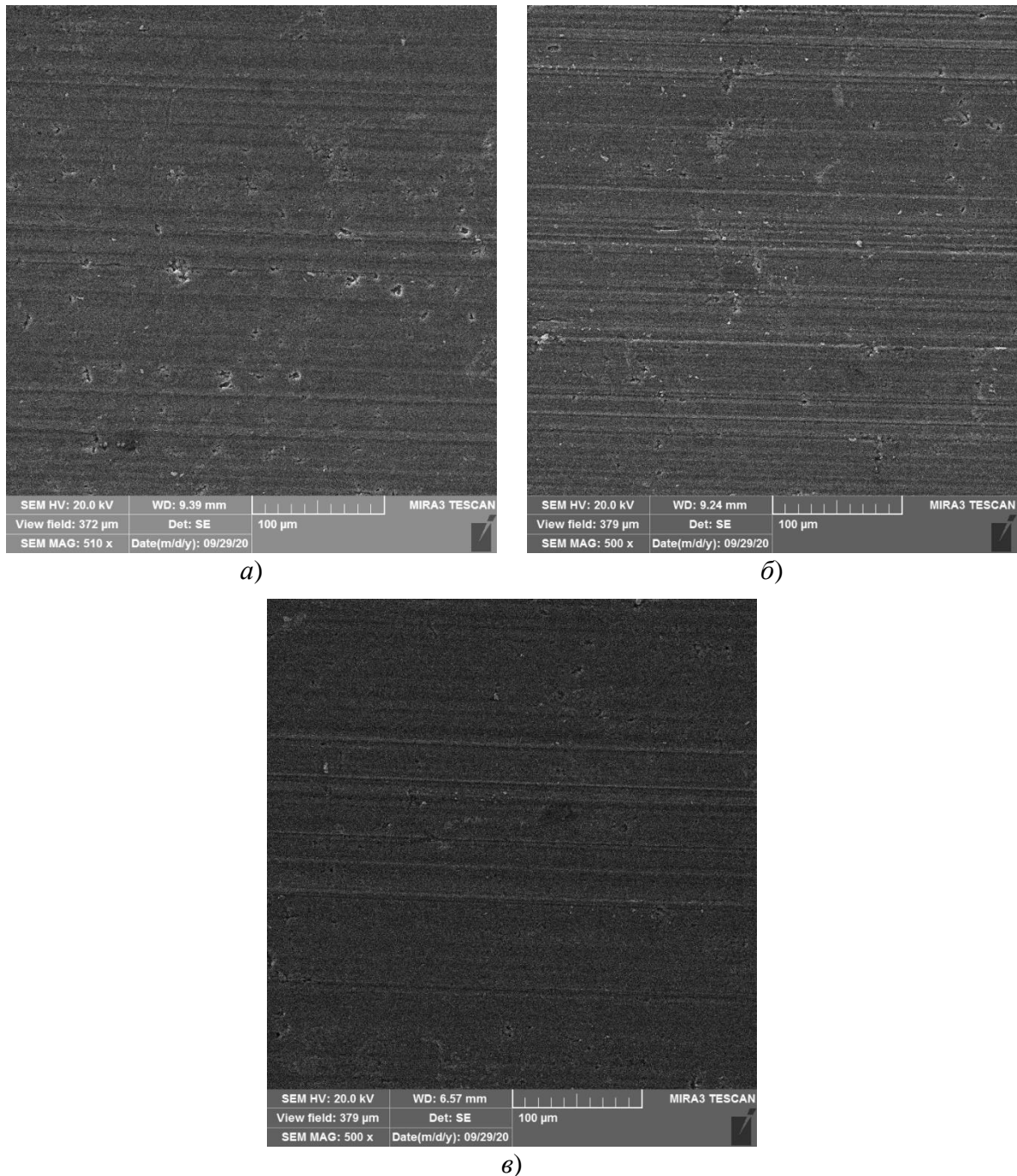
Слика 6.10 Уређај „*JSM-5800*“

Посматрајући површине нанокompозита у трагу хабања, тешко је уочити разлику у траговима хабања испитиваних материјала. На сликама 6.11 и 6.12 приказане су површине похабаних нанокompозита и основне легуре при истим условима испитивања са истим увећањем. Услови триболошких испитивања посматраних трагова хабања су: $F = 200 \text{ N}$, $v = 0.5 \text{ m/s}$, $s = 1000 \text{ m}$ (слика 6.11) и $F = 100 \text{ N}$, $v = 1 \text{ m/s}$, $s = 1000 \text{ m}$ (слика 6.12).



Слика 6.11 Похабана површина: а) основне легуре А356, б) нанокмпозита са 1,5 мас.% SiC и в) нанокмпозита са 2 мас.% SiC

Похабане површине, основне легуре и нанокмпозита, настале применом већег оптерећења је тешко разликовати. На похабаним површинама, слика 6.11, уочавају се трагови хабања у виду бразди које прате правац кретања. Правац клизања на свим приказаним похабаним површина је с леве на десну страну, што се може закључити на основу честица оксида гвожђа. Честице оксида гвожђа беле су боје, али нису лако уочљиве на похабаним површинама. Присуство оксида гвожђа показује да се догодило хабање површинског слоја челичног диска.



Слика 6.12 Похабана површина: а) основна легура A356, б) нанокмпозита са 1,5 мас.% SiC и в) нанокмпозита са 2 мас.% SiC

Евидентно је да се код основне легуре уочавају нешто шири жлебови настали током процеса клизања у поређењу са свим осталим похабаним површинама нанокмпозита приказаних на сликама 6.11 и 6.12. Интензивније уске бразде уочавају се код нанокмпозита са 1,5 мас.% SiC који је показао највећу отпорност на хабање при екстремнијим условима триболошких испитивања. Ово се преписује оптималној количини масеног садржаја наночестица у A356 легури.

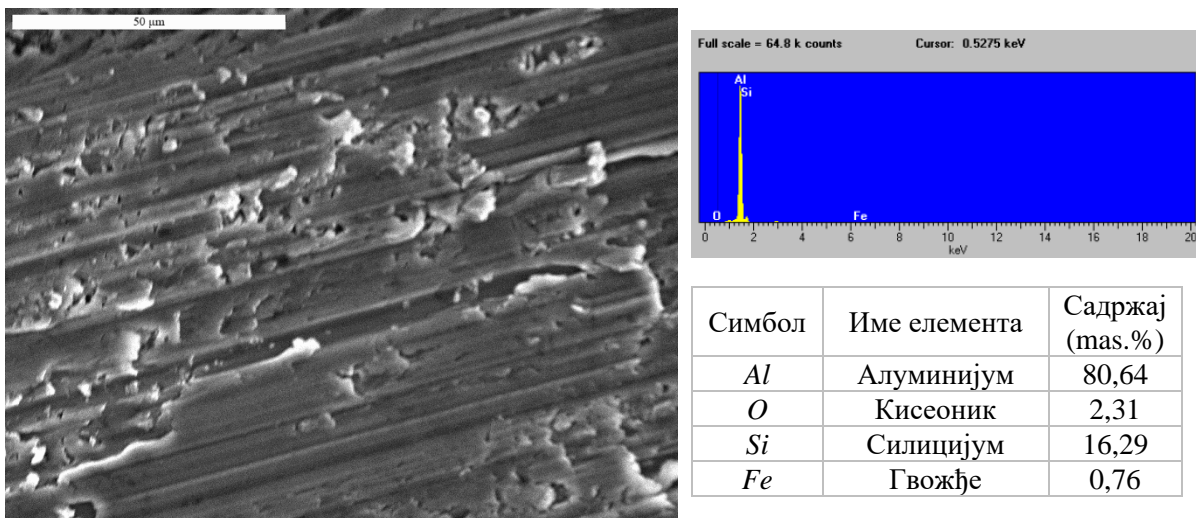
Блага разлика у количини површинске порозности уочава се код свих нанокмпозита. На слици 6.12, посматрањем похабане површине основне легуре, може се уочити већи број микрошупљина него код нанокмпозита. Бројни аутори су у својим радовима ово преписали побољшаној густини нанокмпозита.

При условима испитивања од 100 N и 1 m/s уочене су микрошупљине већих димензија него при триболошким условима од 200 N и 0,5 m/s. Претпоставка је да је у питању порозност материјала и да се већом силом деловања на површину нанокompозита дешава пластична деформација у материјалу и на тај начин долази до шупљина мањих димензија.

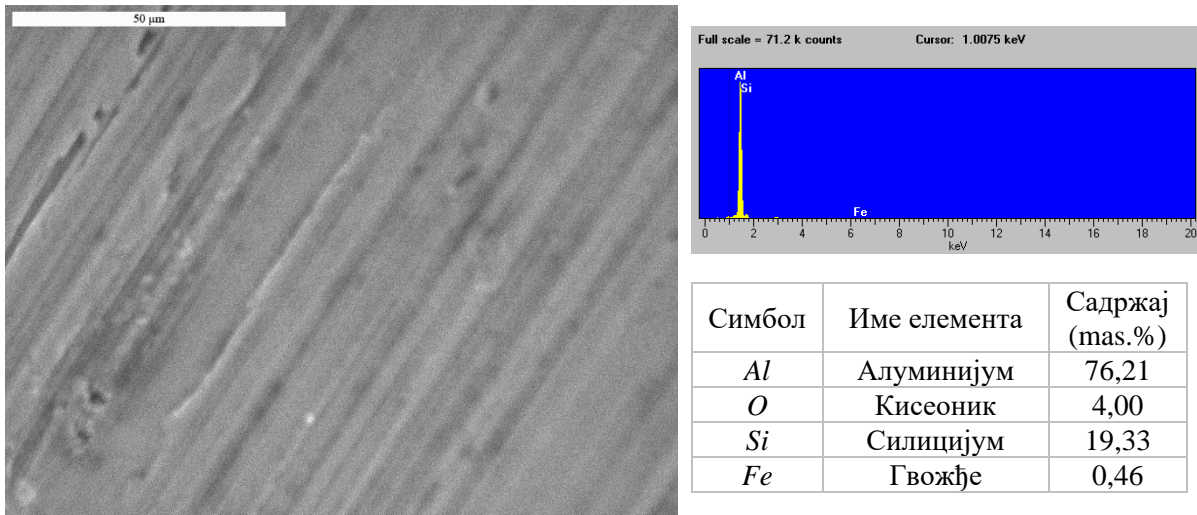
На основу спроведене анализе тешко је уочити већу разлику између похабаних површина испитиваних материјала. Доминантни механизам хабања, према SEM анализи трагова хабања је абразија. Карактеристичне за абразију јесу уске паралелне бразде у правцу клизања, које су се и јављале на посматраним површинама нанокompозита. Правац клизања на свим претходним сликама SEM анализе је с лева на десно.

Добијене вредности хабања биле су реда 10^{-8} до 10^{-6} mm³/Nm. Ове вредности одговарају подацима из литературе за метале у контакту при клизању, а при условима граничног подмазивања интервал од 10^{-9} до 10^{-6} mm³/Nm [186]. Може се закључити да је абразивно хабање доминантан механизам хабања свих испитиваних нанокompозита. Овај вид хабања приказали су и аутори који су користили A356 основу са ојачавачем Ti3AlC2 за добијање нанокompозита. Они су закључили да су се приликом абразивног хабања по површини узорака појавиле честице за које се претпоставља да су производи хабања. Тиме су закључили да су те честице доказ уклањања оксидације материјала током испитивања отпорности на хабање нанокompозита [203].

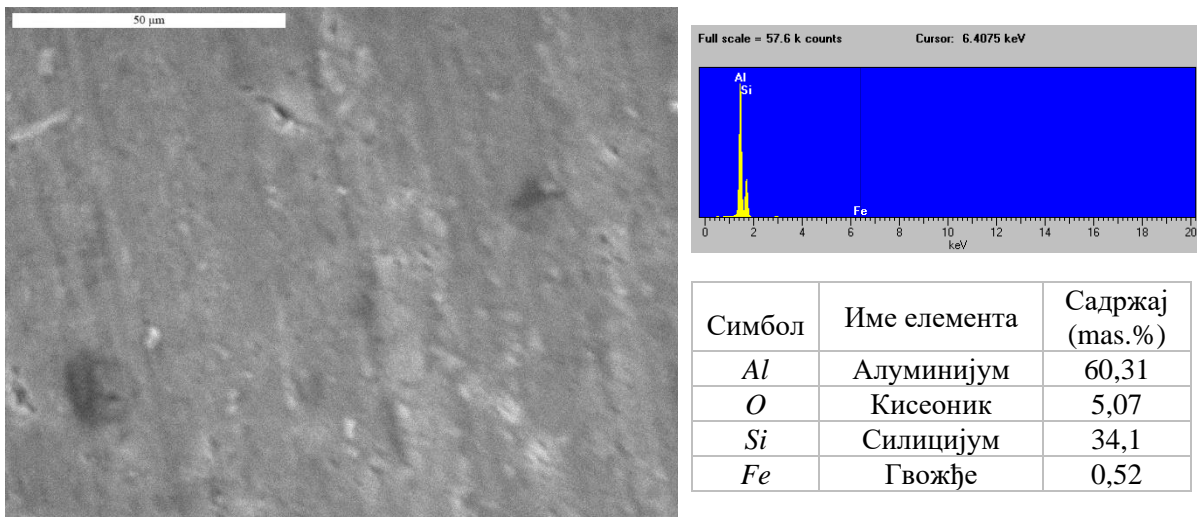
На сликама 6.13, 6.14 и 6.15 приказане су површине испитиваних материјала са истим увећањем на којима је извршена анализа. Триболошки услови посматраних трагова хабања су: $F = 200$ N, $v = 0,5$ m/s и $s = 1000$ m.



Слика 6.13 EDS анализа A356 легуре



Слика 6.14 EDS анализа A356/1,5 mas.% SiC наноконтрозита



Слика 6.15 EDS анализа A356/2 mas.% SiC наноконтрозита

Спроведена површинска EDS анализа трагова хабања свих испитиваних материјала показала је постојање гвожђа у хемијском саставу наноконтрозита. На сликама је дат приказ површина на којима је извршена анализа, спектар и табеларни приказ хемијског састава материјала. Може се закључити да постоји трансфер материјала са челичног диска на контактне површине свих испитиваних материјала. Поменута појава је типична за абразивно хабање, које је примећено при SEM анализи, а сада потврђено EDS анализом.

На граници детекције појавили су се и други хемијски елементи, који су у садржају основне легуре A356, али је њихов проценат био веома низак и њихов садржај није приказан. Елементи који су пронађени површинском анализом јесу цинк, бакар и никл са садржајем испод 0,5 mas.%.

Побољшана отпорност на хабање нове серије материјала је због присуства већег садржаја керамичких наночестица у основи A356, као и због повећања тврдоће наноконтрозита у односу на основну легуру.

6.6. Анализа резултата друге фазе истраживања

У првој експерименталној серији нанокомпозита испитана је зависност садржаја ојачавача на карактеристике новонасталог нанокомпозита. Подаци добијени у првој фази истраживања добијени су из прва два независна експеримента (нанокомпозити ојачани SiC и нанокомпозита са Al_2O_3 честицама различитих величина) која су показала да постоји могућност побољшања својстава, али са садржајем ојачавача приближно већим од 0,5 мас. %.

Наиме, велики број студија у последњем периоду доказује побољшање у карактеристикама нанокомпозита ојачаних керамичких честица у поређењу са основном легуром. Недавно је показано, да процес добијања нанокомпозита може бити веома успешан, иако је са почетком развоја нанокомпозита представљао велики проблем. У зависности од поступка добијања многи истраживачи су комбиновали одређене поступке или су користили одређене модификаторе у току производње како би новонастали материјал поседовао одређена побољшања у својствима. Најважније је изабрати одређене вредности параметара у самом поступку производње, тачније подесити их на оптималне вредности које би се могле добити применом оптимизације, као и садржај ојачавача у основи композита. Добро је познато да се применом једнокритеријумске и вишекритеријумске оптимизације може се добити оптимално решење.

Претходно речено уочено је у истраживању Мохета (*Mohit*) и осталих [207], они су применили методу *RSM* како би извршили оптимизацију механичких карактеристика уз помоћ следећих параметара: односа тежине куглица према праху, брзине глодања, времена млевења и садржаја ојачавача SiC у $Al6061$ легури. На основу резултата *ANOVA* анализе утврдили су да сва четири параметра имају значајну улогу на затезну чврстоћу нанокомпозита. Кристи (*Christy*) и остали [208] извршили су оптимизацију помоћу сиве релационе анализе параметара процеса мешања и ливења тачније притиска, времена истискивања, температуре предгревања калуца и брзине мешања. Извршили су анализу композита путем микроструктуре, тврдоће, затезне чврстоће и отпорности на хабање. Узорак који су добили оптимизацијом показао је најмању порозност и значајно већу притисну чврстоћу, али нешто нижу тврдоћу и крајњу затезну чврстоћу у поређењу са осталим узорцима. Предност коришћене технике је у томе што се променљиве вишеструког одговора могу претворити у једну сиву релациону оцену (*GRG*) у ситуацији када неке одговоре треба максимизирати или минимизирати. Штавише, још једна значајна предност *GRA* технике јесте та што она користећи релативно малу количину података може дати задовољавајуће резултате.

Анализа резултата друге серије материјала извршена је и путем сиве релационе анализе и закључено је да на триболошко понашање нанокомпозита у условима подмазивања утиче 72% хабање и 28% коефицијент трења. Генерално сматра се да су честице равномерно распоређене у основи алуминијумске легуре, што је довело до повећања у тврдоћи материјала и отпорности на хабање у односу на основну легуру $A356$. Може се закључити да се нанокомпозити садржаја ојачавача између 1 или 1,5 мас. % SiC могу успешно применити уместо коришћења основне алуминијумске легуре.

Захтев за добрим механичким и триболошким својствима односи се и на практичну примену ових материјала у инжењерству и у другим областима индустрије. Основни захтеви који се постављају пред материјалима зависе од услова рада елемената за које се примењују. За разлику од мноштва набројаних индустрија и елемената у којима се користе алуминијумске легуре, у овом раду за анализу применом *MKE* методе изабрани су машински елементи са којима се срећемо у свакодневном животу.

7. ПРИМЕНА ИСПИТИВАНИХ МАТЕРИЈАЛА КОД ЗУПЧАСТИХ ПАРОВА

Историјски гледано развој сваке науке је различит, али је циљ увек један, а то је развој новог и бољег производа, процеса и методе. Конструисање новог производа увек је интердисциплинарног или мултидисциплинарног карактера. Како би производ одговорио на постављену листу захтева, неопходно је повезати знања већег броја научних дисциплина која се намећу у процесу развоја новог производа.

Примена алуминијума веома је распрострањена јер је материјал мале густине. Легура *A356* припада легурама *Al-Si-Mg* и има широку примену у ваздухопловној и аутомобилској индустрији. Јединствена и жељена својства ове легуре као што су одлична ливкост, добра отпорност на корозију и заварљивост, висок однос чврстоће и масе чине потражњу за овом легуром већом [209]. Својства материјала као што је отпорност на хабање често одређују животни век компонената за многе примене. Лоша отпорност на хабање алуминијумских легура главно је ограничење за многе примене. Њихова најчешћа употреба је код: делова летелица, кућишта пумпи, радних кола, брзоходних дуваљки, држача где се захтева велика чврстоћа (нпр. носачи мотора), и тако даље [210]. Легуре на бази алуминијума *A356* одличне су за употребу, где је комплексност делова велика, а захтева се велика притисна издржљивост.

У експлоатацији се јавља трење и хабање елемената као резултат триболошких процеса које је неопходно разумети при стварању новог производа. Тако да је неопходно укључити и триболошке процесе у процес настајања елемената, склопова и конструкција како би се добио квалитетнији производ. Додавањем керамичких ојачавача у алуминијумску легуру добијају се нови материјали побољшаних својстава у поређењу са основном легуром. Побољшања новонасталих материјала доказана су резултатима овог истраживања у смислу побољшања отпорности на хабање, повећања тврдоће нанокмпозита, добра микроструктура и обрадљивост површина.

Развој и истраживање зупчастих парова дуго су били усредсређени на задовољавање потреба за већом носивошћу и мањом тежином. Међутим, брзина и ниски трошкови производње такође су веома важни параметри у индустријској производњи зупчаника. Како би се обезбедио квалитет зупчастих парова поред свега поменутог, неопходно је вршити оптимизацију у различитим сегментима истраживања зупчастих парова. Оптимизација се врши посматрањем са неколико различитих приступа као што су, на пример, нови материјали, процес производње као и модификација профила зуба зупчаника. Познато је да се значајно може смањити концентрација напона и побољшати чврстоћа зуба зупчаника применом оптимизације на профил зуба зупчаника [211-213]. Смањењем напона утиче се на смањење замора зупца зупчаника чиме се повећава радни век зупчаника, док се величина и тежина зупчаника могу смањити при задржавању исте носивости.

Лом зупца је један од главних начина отказа код зупчаника који настаје услед ударних оптерећења. Заморна оптерећења покрећу прслину у пределу корена зуба и шире се путем најмањег отпора који доводи до потпуног лома зубаца. Предвиђањем

ширења прслине помоћу анализе коначних елемената и експерименталним испитивањима бавили су се многи научници [213-216]. Спроведена су и истраживања о утицају вибрације на настајање прслине у корену зупца, на ефекат почетног заосталог напона у зупчанику који утиче на замор, а самим тим и на век трајања зупчаника.

Метода коначних елемената (*Finite Element Analysis, FEM*) најчешће се користи за израчунавање напона, деформација и померања и може се користити за проучавање напрезања код зупчаника. Резултати који се остварују анализом могу се користити за оптимизацију геометрије зуба и смањења напона у корену зуба. Напони и деформације које се јављају у контакту зубаца спрегнутих зупчаника веома су битни параметри при конструкцији и прорачуну зупчастог пара. Отказ зупчаника настаје услед лома у корену зупца или хабања бокова зупчаника. При проучавању алтернативних материјала за производњу зупчаника веома је важно узети у обзир величину напона и деформација које се јављају у контакту.

Примена материјала попут челика и керамике за производњу зупчаника анализирањем напона у контакту вршили су Меита (*Mehta*) и остали [214]. Изабрана керамика је силицијум-нитрид која се одликује карактеристикама попут повећане тврдоће, већег односа чврстоће и отпорности на хабање. Применом одговарајућих софтвера извршили су поређење резултата остварених применом поменутих материјала за производњу зупчаника. Установили су да се силицијум-нитридом постижу бољи резултати у односу на челик. Приказали су да се код зупчаника од силицијум-нитрида јављају мање деформације што доприноси већем радном веку зупчаника.

Павар (*Pawar*) и остали [215] установили су да се композитни материјал са основом алуминијума и ојачавачем силицијум-карбидом може користити као материјал за елементе за пренос снаге као што су зупчаници. Извршили су моделирање и *FEM* анализу помоћу одговарајућих софтвера и установили да је највећа вредност напона на врху зубаца. Најбоље карактеристике показује композит са 10 мас.% *SiC* са којим су остварена побољшања у тврдоћи и жилавости материјала у односу на основну легуру алуминијума. Анализу расподеле напона и деформација применом различитих материјала за зупчанике су вршили и Махакл (*Mahakul*) са осталима [216]. Применом софтвера *SolidWorks* извели су анализу за цилиндричне зупчанике са одвојеним материјалима попут челика, легуре цинка *ZnAC41A* и композита *Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr*. Упоредивањем резултата анализе установили су да се код зупчаника од композитног материјала јавила повољнија расподела напона, мања деформација и мање је масе у односу на зупчанике од челика и легуре цинка. Тако да су закључили да је боље користити композит као материјал за израду зупчаника у односу на друга два анализирана материјала.

Прегледом литературе, у овом делу рада, уочава се да је веома мали број научних радова који се баве конкретно применом нових материјала, тачније алуминијумских нанокompозита за израду триболошких елемената.

7.1. Избор елемената за примену испитиваних материјала

За потребе овог истраживања, изабрани су зупчасти парови због могућности примене испитног стола *GUNT AT 200* који се налази у Лабораторији за испитивање механичких преносника снаге на матичном факултету. Испитивањима је могуће вршити варијацију контактних материјала елемената, уља за подмазивање редуктора, улазне

снаге и улазног броја обртаја са циљем одређивања њиховог степена искоришћења. Постоји могућност праћења промене температуре у раду, мерење буке и вибрације и хабање контактних елемената редуктора. За анализу су изабрани зупчасти парови који се састоје од цилиндричних зупчаника са правим зупцима.

На основу познатих карактеристика материјала могу се издвојити предности зупчастих парова од анализираних материјала:

- могу да се израђују ливењем за мање прецизне зупчанике;
- могу се остварити површине високог квалитета због добре обрадљивости резањем;
- могу се користити у условима без подмазивања (у зависности од садржаја ојачавача);
- мање су масе у односу на зупчанике од челика;
- побољшана отпорност на хабање;
- смањена бука и вибрација у току рада;
- отпорни су на корозију и тако даље.

При стварању нових елемената циљ је ублажити трење и хабање које се јавља у контакту машинских елемената, а то је могуће побољшањем механичких и физичких својстава, претходних и завршних обрада, подмазивањем, контролисаним условима рада (брзине и оптерећење) и другим утицајним факторима. На основу извршених испитивања механичких и триболошких карактеристика установило се побољшање код карактеристика нанокompозита у поређењу са основном легуром.

У наредним поглављима, с обзиром на мали број истраживања о примени А356 легуре, биће размотрена могућност примене алуминијумске легуре и алуминијумских нанокompозита код зупчастих парова. Примена А356 легуре код компоненти возила највише је заступљена, али оне нису изабране за анализу јер превазилазе тренутне могућности за даља истраживања на нашој институцији. Елементи за анализирање применом *FEM* методе изабрани су због постојања могућности да се у будућем раду експериментално испитују и упореде са резултатима ове анализе.

7.2. Аналитички прорачун цилиндричних зупчастих парова

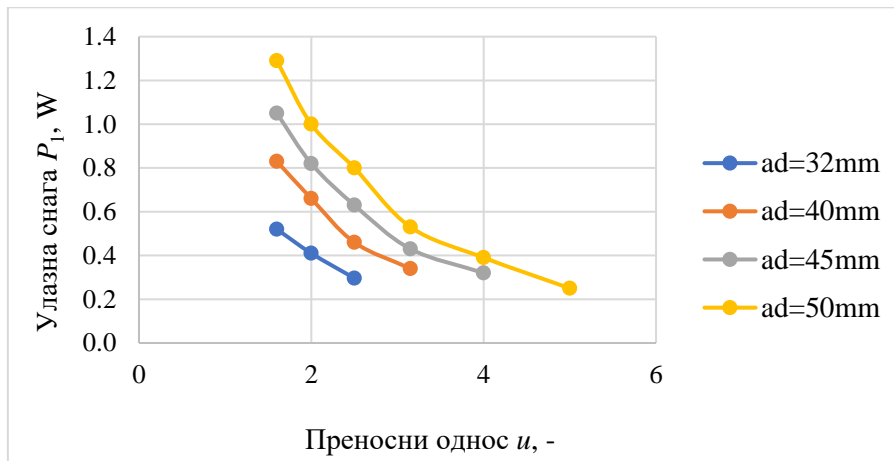
Како би се спровела анализа зупчастих парова потребно је извршити прорачун степена сигурности против лома корена зупца, степена сигурности на разарање бока зупца, прорачун на појаву тешког адхезионог хабања и флеш температуру. Зупчасти пар састоји се од два зупчаника чинећи тиме најједноставнији зупчасти преносник. Зупчасти преносници помоћу везе обликом преносе кретање и обртни момент са једног вратила на друго вратило. При томе се врши одређена трансформација броја обртаја и обртног момента чије су вредности за изабране зупчaste парове дате у наредном поглављу. Аналитички прорачун зупчастих парова изведен је у софтверском пакету *Autodesk Inventor* у окружењу *Design Accelerator*, према стандарду DIN3990-1998. Механичке карактеристике материјала основне легуре А356 и челика за побољшање С1531 (С45Е) могу се наћи у литератури [210, 217-219], док механичке карактеристике нанокompозита преузете су из истраживања које су спровели Алам (*Alam*) и остали [220]. Приближне вредности у резултатима механичких карактеристика алуминијумских нанокompозита

закључио је и Кун (*Kun*) са осталима [221]. Мора се напоменути да су коришћене механичке карактеристике других истраживања због немогућности производње епрувета за испитивање на затезање. За извођење прорачуна усвојен је константан број обртаја на погонском зупчанику од $n_1 = 1400 \text{ min}^{-1}$ и константна ширина зупчаника од 30 mm. Претпостављена вредност за степен искоришћења је 0,98 за све комбинације цилиндричних зупчастих парова. Прорачун је вршен тако да се на основу улазних геометријских параметара одредила вредност максималне снаге коју ови зупчаници могу да пренесу при 1400 min^{-1} . Извршена је варијација осних растојања и преносних односа датих у табели 7.1.

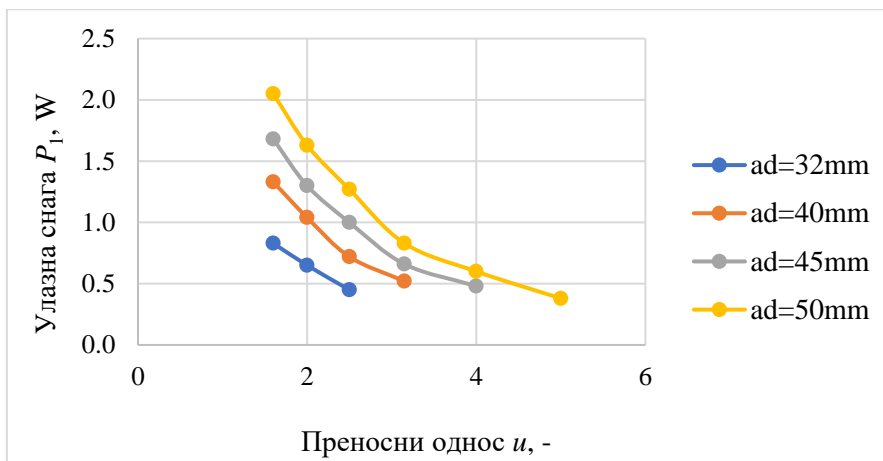
Табела 7.1 Геометријске карактеристике цилиндричних зупчаника са правим зупцима

u	1,6	2	2,5	3,15	4	5
$a_d = 32 \text{ mm}$	x	x	x	-	-	-
$a_d = 40 \text{ mm}$	x	x	x	x	-	-
$a_d = 45 \text{ mm}$	x	x	x	x	x	-
$a_d = 50 \text{ mm}$	x	x	x	x	x	x

Резултати прорачуна цилиндричних зупчаника за алуминијум и челик за максималну улазну снагу дијаграмски су приказани (слика 7.1) у зависности од величине преносног односа за различита осна растојања.



а)



б)

Слика 7.1 Дијаграми у зависности од преносног односа u и улазне снаге зупчастог пара од: а) алуминијума и б) челика

Резултати прорачуна максималне снаге за зупчанике од нанокompозита (A356/2 mas.% SiC) нису приказани јер одговарају резултатима добијених за алуминијум са одступањима од приближно +1%. На основу аналитичког прорачуна уочава се да повећањем преносног односа смањује се вредност максималне снаге коју зупчасти пар може да пренесе при дефинисаним осним растојањем. Вредност улазне снаге повећава се са повећањем осног растојања. Исти тренд се уочава у понашању улазног обртног момента и обимне силе што је очекивано јер су у функцији од улазне снаге. Генерално може се установити да је по тренду понашања резултата остварених применом алуминијумске легуре исти као и од уобичајених материјала. Може се закључити да зупчасти парови од челика могу највише снаге да пренесу, посебно при највећем осном растојању од 50 mm. Зупчасти парови од алуминијумске легуре могу да преносу снагу за око 36% мању у односу на зупчасти пар од челика.

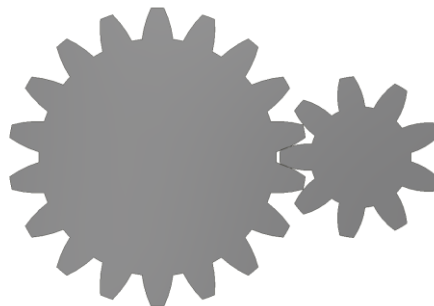
7.3. Израда CAD модела цилиндричних зупчастих парова

На основу прорачунатих геометријских величина и провере степена сигурности зупчастих парова против лома корена зупца и разарање бока зупца може се приступити изради модела. Креирање модела свих зупчастих парова неопходно је како би се спровела анализа методом коначних елемената у циљу гаранције поузданог и ефикасног рада преносника.

7.3.1. Геометријске карактеристике зупчастих парова

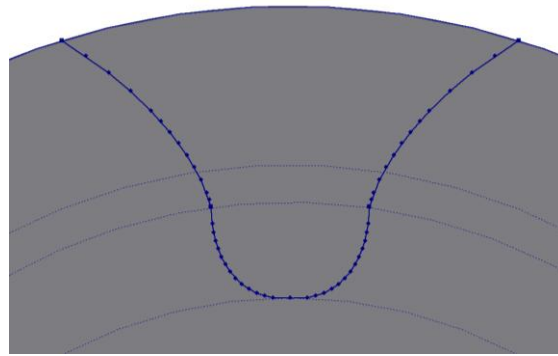
Геометријске карактеристике ових зупчастих парова прилагођене су типу кућишта редуктора који могу да се уграде на поменути испитни сто. У табели 7.1 су дате геометријске величине цилиндричних зупчаника са правим зупцима.

Генерисање зупчастих парова изведено је у софтверском пакету *Autodesk Inventor 2020*. За генерисање зупчастих парова коришћено је окружење *Design Accelerator*. С обзиром да софтвер даје основну геометрију зупца цилиндричних зупчаника са правим зупцима као апроксимирану (слика 7.2), неопходно је коришћење напредније технике генерисања профила зупца.



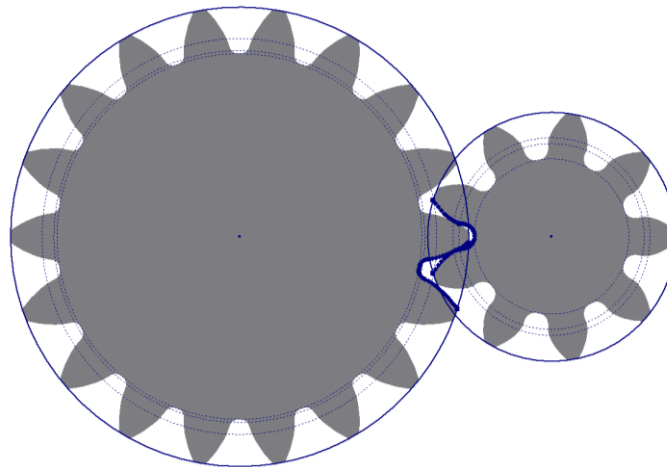
Слика 7.2 Апроксимирани облик профила зупца

Апроксимирана геометрија профила зупца зупчаника изведена је делом кружнице којом је немогуће урадити *FEM* анализу, па је било неопходно да се генерише тачна геометрија зупца. Тачна геометрија зупца постиже се тако што се мануелно изведе профил зупца, па се затим ручно генерише модел зупчаника. Експортовани профил зупца цилиндричних зупчаника са правим зупцима приказан је на слици 7.3.



Слика 7.3 Експортирани профил међузубља

Изглед генерисаног пара цилиндричних зупчаника са правим зупцима, са извезеним профилем међузубља приказан је на слици 7.4.



Слика 7.4 Генерисани пар цилиндричних зупчаника са правим зупцима коришћењем експортираног међузубља

Према усвојеним геометријским карактеристикама, генерисаним зупчастим паровима са дефинисаним отворима за вратило може се приступити анализи напона применом нумеричке методе.

7.4. Нумеричка анализа спрегнутих зупчаника

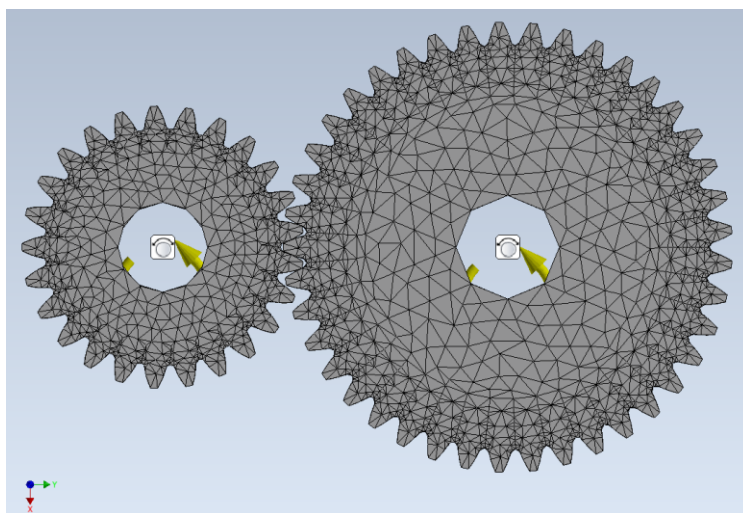
Метода коначних елемената је најпопуларнија нумеричка метода за анализу веома различитих инжењерских проблема која омогућава једноставно креирање и измену прорачунских модела. Иако се применом ове методе на разматраним моделима добијају апроксимативна решења, савремена рачунарска техника омогућава високу поузданост и тачност добијених резултата који у највећем броју случајева конвергирају аналитичким или експерименталним резултатима са којима се пореде. Процес дискретизације, тј. моделирања разматране структуре подразумева генерисање мреже одговарајућих коначних елемената у зависности од третираног проблема међусобно повезаних у чворним тачкама или чворовима. Типови, величина и укупан број генерисаних коначних елемената бирају се тако да нумерички модел што је могуће прецизније апроксимира реалну структуру и омогућава добијање адекватног резултата тј. одговора. Свакако да избор најбољег дискретног модела првенствено зависи и од познавања суштине разматраног проблема и инжењерске праксе. Примена савремених програмских пакета заснованих на методи коначних елемената омогућава детаљну напонску анализу,

односно проверу носивости свих елемената разматране структуре који се често аналитичким или експерименталним путем не могу поуздано утврдити. Поље померања свих карактеристичних тачака појединих елемената конструкције, али и конструкције у целини, такође су предности примене ове методе [222-224]. Данас смо сведоци јако широког поља примене методе коначних елемената где оно излази из граница инжењерске праксе. Све се више ова метода примењује и у другом научним областима, као што је на пример медицина, па се може закључити да она има интердисциплинарни карактер када је примена у питању.

У оквиру овог истраживања извршена је статичка анализа спрегнутог зупчастог пара са циљем да се још у раној фази пројектовања добију информације о оптималном избору материјала за зупчaste парове. Анализа је спроведена на нумеричком моделу који је израђен у окружењу *Stress Analysis* софтвера *Autodesk Inventor*. Делови у спрези су моделирани 3Д коначним елементом тетраедра и аутоматски генерисани садрже:

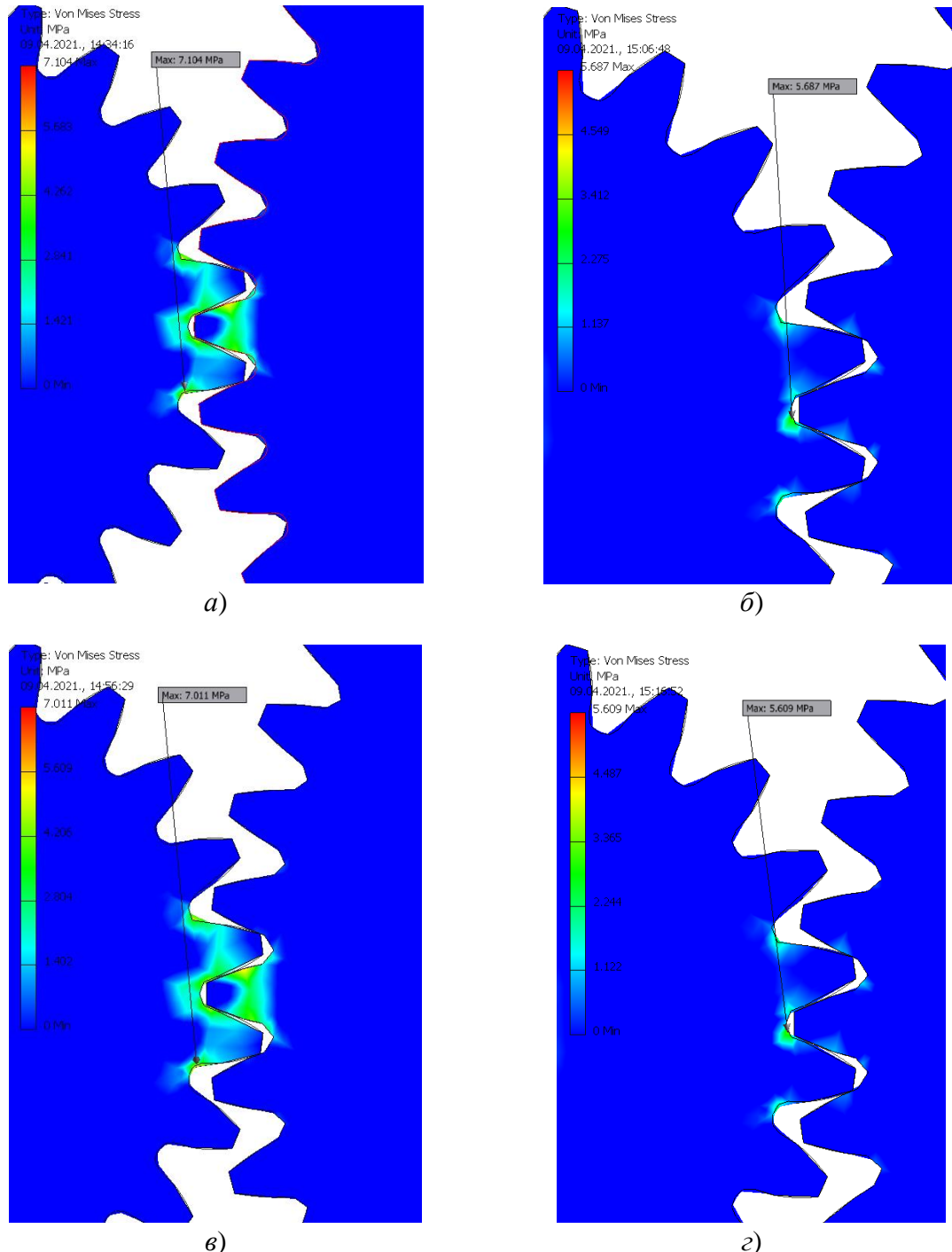
- за $u = 2$ и $a_d = 45$ mm, 292383 елемента и 419611 чворова;
- за $u = 2$ и $a_d = 50$ mm, 217499 елемената и 314326 чворова;
- за $u = 2,5$ и $a_d = 45$ mm, 253259 елемената и 366486 чворова и
- за $u = 2,5$ и $a_d = 50$ mm, 193293 елемента и 282428 чворова.

На слици 7.5 приказана је мрежа коначних елемената разматраног модела са граничним условима и оптерећењима. Одговарајући гранични услови задати су фиксирањем отвора за вратило у радијалном и аксијалном правцу, а на местима контакта зуба зупчаника одговарајући контакти *Sliding/No separation*. Оптерећења у виду момената задата су на основу аналитичког прорачуна зупчастих парова. Према аналитичком прорачуну за изабране зупчaste парове вредност момента на погонском зупчанику износи 3,069 Nm, док вредности момената на гоњеним зупчаницима за преносне односе 2 и 2,5 износе 6,016 Nm и 7,305 Nm, респективно. Нумеричка анализа је вршена редом на моделима са варијацијама у погледу геометрије, то јест осног растојања, преносног односа и примењених материјала. Модели зупчастих парова анализирани су прво за примењен материјал челик за побољшање (C45E), а затим за алуминијумску легуру A356 и нанокмполит A356/2 mas.% SiC са карактеристикама преузетим из литературе [217, 218, 220].



Слика 7.5 Мрежа коначних елемената зупчастог пара

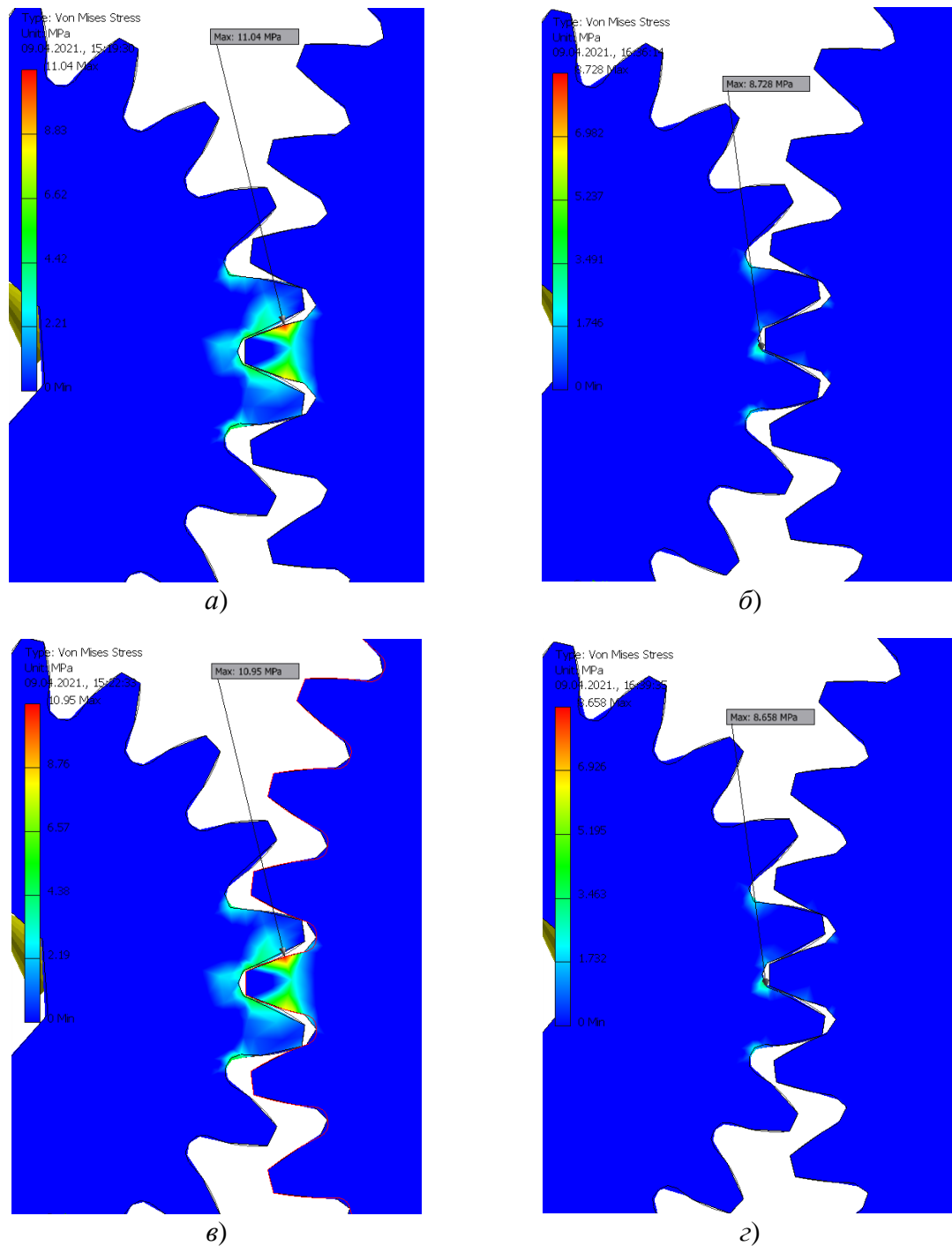
На слици 7.6 приказано је поље еквивалентног напона за разматрани пример зупчастог пара са преносним односом 2, улазном снагом од 0,45 kW и осним растојањем 45 mm и 50 mm, за сва три наведена примењена материјала. Поље напона за примењени материјал од алуминијумске легуре и нанокompозита идентичан је, ако се има у виду иста вредност примењених механичких карактеристика материјала.



Слика 7.6 Поље еквивалентног напона код зупчастог пара са преносним односом 2 од челика а) $a_d = 45$ mm, б) $a_d = 50$ mm, и алуминијумске легуре, односно нанокompозита в) $a_d = 45$ mm и з) $a_d = 50$ mm

Максимална вредност еквивалентног напона јавља се у свим случајевима у подножју зупца спрегнутих зупчаника од челика у износу од 7,104 MPa за осно растојање

од 45 mm, односно 5,867 MPa за осно растојање од 50 mm. Када су у питању вредности напона за зупчанике од алуминијумске легуре и нанокompозита, оне износе 7,011 MPa, односно 5,609 MPa респективно, што наводи на закључак да се променом осног растојања напон код зупчаника израђених како до челика, тако и од нанокompозита смањује за $\approx 20\%$. За сва три примењена материјала иста анализа се спроводи за пример зупчастог пара са непромењеном улазном снагом од 0,45 kW и осним растојањима од 45 mm и 50 mm, али сада са преносним односом 2,5, где је поље еквивалентног напона приказано на слици 7.7.



Слика 7.7 Поље еквивалентног напона код зупчастог пара са преносним односом 2,5 од челика а) $ad = 45$ mm, б) $ad = 50$ mm, и алуминијумске легуре, односно нанокompозита в) $ad = 45$ mm и г) $ad = 50$ mm

Анализом добијених резултата са слике 7.7 закључује се да повећањем преносног односа, за исте остале улазне параметре, максималне вредности еквивалентног напона расту и код зупчаника од челика у износима 11,04 МПа, односно 8,728 МПа, али и када су зупчаници израђени од алуминијумске легуре, то јест нанокompозита са вредностима максималних напона од 10,95 МПа, односно 8,658 МПа. Променом осног растојања максимални еквивалентни напон, и у овом случају, задржава тенденцију смањења за $\approx 20\%$ код свих врста материјала. Са порастом преносног односа максимални напон се повећава код свих материјала за $\approx 35\%$, с тим што за исте улазне параметре напон код легура остаје нижи него у поређењу са челиком. Ако се посматра генерално, поље напона код све три врсте материјала, уочава се повољнија расподела напона на боковима зупца него у корену зупца зупчаника у контакту.

Спроведена нумеричка анализа зупчастих парова важна је како би се са задовољавајућом тачношћу могло извршити конструкционо планирање и одабир материјала на основу добијених информација о оптерећењима и напонима. Утицај оптерећења у челичном зупчастом пару спровео је Бодзас (*Bodzás*) [224]. Констатовано је да повећањем оптерећења свакако се повећава напон, и да је напон по апсолутној вредности већи код погонског зупчаника у односу на гоњени зупчаник. Друга група истраживача је у својим истраживањима констатовала да је расподела напона код композитних материјала умерена у поређењу са челиком [215, 216]. На основу закључака истраживања које су спровели Павар (*Pawar*) и остали [215], установљено је да композити са побољшаним карактеристикама, у поређењу са основном алуминијумском легуром, такође могу користити за зупчанике. Према томе очекује се да би се применом нанокompозитних материјала у зупчастом пару постигао већи пренос снаге у односу на алуминијумске зупчасте парове. Такође, и расподела напона биће умеренија код композитних зупчаника у поређењу са челичним и алуминијумским, а ниво утицаја буке и вибрације ће се свакако смањити.

Веома битан податак при прорачуну и конструкцији преносника, а самим тим и њихових елемената, тачније зупчастих парова је маса. Повећањем преносног односа зупчастог пара за одговарајуће осно растојање повећава се и маса зупчастог пара. Велика разлика у вредностима масе уочава се код испитиваних парова. Маса зупчастих парова израђених од А356 легуре доста је нижа (приближно три пута) у односу на парове израђене од челика, што је и очекивано с обзиром да је густина за А356 легуру $2,67 \text{ g/cm}^3$, док за челик износи $7,85 \text{ g/cm}^3$. У случају највеће масе зупчастог пара од челика и истог пара од алуминијумске легуре уочава се смањење масе од 66%. Применом алуминијума поред смањења масе читавог преносника утиче се и на смањење нивоа буке и вибрације у редукторима мањих снага. Примена методе коначних елемената доприноси скраћивању времена за све потребне анализе, као и на смањење трошкова посебно када су у питању скупа експериментална испитивања. Међутим, верификација резултата нумеричке анализе свакако је неопходна и одговарајућа експериментална испитивања се очекују у будућем раду.

8. ЗАКЉУЧАК

Савремена истраживања усмерена су на испитивање и добијање нових материјала повољних механичких и триболошких карактеристика. О актуелности теме сведочи велики број радова у последњих пет година који су отворили мноштво нових питања на која треба дати одговоре. Циљ овог истраживања био је да пружи одговоре на нека од актуелних питања. Мотиви за истраживање у оквиру ове дисертације били су да се развије нови нанокompозит са алуминијумском основом, да се испитају његове карактеристике, утврди потенцијални правац развоја и његова примена.

Дисертација је урађена у две фазе. У оквиру прве фазе дат је детаљан опис поступка производње нанокompозита, урађене су одговарајуће обраде контактних површина и дати су резултати површинске храпавости елемената. Извршена су испитивања нанотврдоће и макротврдоће основне легуре и нанокompозита. Испитивања триболошких карактеристика урађена су према плану извођења експеримента. Применом метода оптимизације, анализом резултата и на основу искуства прве фазе истраживања развијени су нови нанокompозити који представљају другу фазу истраживања у дисертацији. Из анализе резултата прве фазе истраживања може се закључити следеће:

- Нанокompозити са основом *A356* ојачани различитим врстама и садржајем керамичких наночестица, тачније са 0,2; 0,3; 0,5 мас.% *SiC*, 0,2; 0,3; 0,5 мас.% *Al₂O₃* са просечном величином честица од 20 до 30 nm и 0,2; 0,3; 0,5 мас.% *Al₂O₃* са просечном величином честица од 100 nm, успешно су произведени модификованим компокастинг процесом.
- Мерењем нанотврдоће нанокompозита са ојачавачем *SiC* и *Al₂O₃* (20-30 nm) добијени су резултати којима се утврђује побољшање у нанотврдоћи за око 10%, док је код нанокompозита са ојачавачем *Al₂O₃* (100 nm) побољшање око 20%, у односу на *A356* легуру. Вредност модула еластичности основне легуре и свих нанокompозита се налазила у интервалу од 87 до 97,8 GPa која је већа у односу на комерцијалну легуру *A356* (73 GPa).
- Према резултатима нанотврдоће утврђено је да се повећањем масеног садржаја ојачавача благо повећава нанотврдоћа нанокompозита.
- Испитивањем макротврдоће нанокompозита установљен је негативан утицај наночестица у основној легури. Резултатима испитивања нанокompозита утврђене су ниже вредности макротврдоће у односу на *A356* легуру ($\approx 98\text{HV}$). Основни разлог ове појаве је да се приликом испитивања захвата већа запремина материјала која садржи већи проценат порозности у материјалу. Издваја се тврдоћа нанокompозита са садржајем од 0,2 мас.% *SiC* ($\approx 106\text{HV}$) која је била већа при сваком утискивању у односу на остале материјале.
- Испитивање триболошког понашања *A356/SiC* нанокompозита извршено је применом *L₁₆* матрице за реализацију експеримента. Разматрани фактори садржај ојачавача *SiC*, брзина клизања и нормално оптерећење оптимизовани су да минимизирају хабање и коефицијент трења легуре *A356* и његових нанокompозита. *ANOVA* анализом

одређени су оптимални услови који се остварују применом највећег садржаја SiC ојачавача, највећом брзином клизања и најмањим примењеним оптерећењем. Најутицајнији фактор који утиче на брзину хабања јесте оптерећење са 33,39%, праћено садржајем ојачавача SiC од 28,90% и брзином клизања са 23,82%. Међу интеракцијама фактора, само интеракцију садржај ојачавача и нормално оптерећење вреди поменути са утицајем од 9,21%. На коефицијент трења утицај фактора је следећи: брзина клизања са 47,1%, садржај ојачавача SiC са 7,35% и оптерећење са 1,91%. Утицајни чланови интеракција су садржај ојачавача и оптерећења са 26,52% и садржај ојачавача и брзина клизања са 7,28%. Применом GRA анализе извршена је оптимизација посматрањем интензитета хабања и коефицијента трења истовремено. $ANOVA$ анализом резултата GRA се установило да брзина клизања има највећи утицај са 48,95 %, затим оптерећење са 28,66% и на крају садржај ојачавача са 10,04%. Применом GRG , на основу тежинских коефицијената, одређено је да на триболошке карактеристике утицај интензитета хабања је 74,12%, док је 25,88% за коефицијент трења што указује да хабање има далеко већи утицај.

- Утврђено је да применом мањих количина ојачавача SiC честица (0,2 и 0,3 мас.%) не побољшавају се триболошке карактеристике нанокompозита.
- Реализација триболошких испитивања $A356/Al_2O_3$ (20-30 nm) и $A356/Al_2O_3$ (100 nm) извршена је применом L_{24} матрице. У софтверском пакету $MINITAB19$, помоћу $ANOVA$ анализе извршена је процена утицајних фактора. Потврђено је да на интензитет хабања утичу брзина клизања, оптерећење, величина честица, док садржај ојачавача утиче у нешто мањој мери. На основу резултата експерименталних испитивања развијен је ANN модел. Извршено је предвиђање вредности интензитета хабања и резултати су упоређени са експерименталним. Утврђено је да постоје извесна одступања, али да тренирана мрежа одговара понашању разматране појаве. Такође, развијен је математички модел (RSM модел) који дефинише отпорност нанокompозита на хабање у зависности од утицајних фактора. Резултати, који се добијају RSM моделом, верификовани су поређењем са експерименталним вредностима. Примењене су оптимизационе методе GA и PSO за одређивање екстремних вредности интензитета хабања. Оптимизован је RSM модел и добијене су променљиве за које интензитет хабања има најмању и највећу вредност. Урађена су и предвиђања применом ANN методе за одређивање екстремних вредности.
- Анализом остварених резултата закључује се да нанокompозити са величином честица од 100 nm показује бољу отпорност на хабање у односу на нанокompозите ојачане честицама од 30 nm. Овим приступом утврђено је у којим условима ће нанокompозит испољити најбоље и најлошије триболошке карактеристике и како ће се понашати у условима експлоатације.
- Анализом површина трагова хабања основне легуре и испитиваних нанокompозита установљено је да је доминантни механизам хабања абразија. Присуство гвожђа у траговима хабања испитиваних материјала указало је на секундарни механизам хабања, адхезију. Евидентирани су израженији жлебови код основне легуре у односу на посматране нанокompозите. Ови феномени уочени су испитивањем нанокompозита помоћу EDS и SEM анализе. Анализом резултата издвајају се нанокompозити са 0,5 мас.% Al_2O_3 (просечна величина честица 100 nm) и 0,5 мас.% SiC за које постоји могућност будуће практичне примене.

На основу резултата прве фазе истраживања приступило се другој фази истраживања. У односу на прву фазу истраживања произведени су нанокompозити са садржајем ојачавача изнад 0,5 мас.% SiC. У другој фази истраживања извршена је провера површинске хrapавости контактних елемената, испитана тврдоћа нанокompозита и креиран дизајн експеримента за триболошка испитивања.

- Провером површинске хrapавости утврђено је да су параметри хrapавости истог реда величина код свих испитиваних површина.
- Мерењем микротврдоће нанокompозита са ојачавачем SiC (45 nm) добијени су резултати којима се утврђује побољшање у микротврдоћи око 20% у односу на A356 легуру. Према резултатима микротврдоће утврђено је да се повећањем садржаја ојачавача до 1 мас.% SiC повећава микротврдоћа нанокompозита, а затим благо опада.
- Триболошка испитивања су реализована помоћу Тагучи L_{27} матрице. Анализом резултата одређена је комбинација фактора за остваривање минималног хабања која гласи да садржај ојачавача износи 1,5 мас.% SiC, оптерећење од 100 N при брзини клизања од 1 m/s. ANOVA анализом одређен је утицај сваког фактора понаособ на интензитет хабања и то утицај оптерећења је 41,41%, затим следи садржај ојачавача са 37,14% и брзина клизања са 10,14%. Анализом резултата за коефицијент трења утицај фактора је следећи: оптерећење има највећи утицај са 34,53%, затим брзина клизања са 20,97% и садржај ојачавача са 14,54%. GRA анализом, помоћу GRG утврђен је утицај тежинских коефицијената за триболошке карактеристике са утицајем интензитета хабања и коефицијента трења од 72% и 28%, респективно. Најбоље триболошке карактеристике којима се остварује минимално хабање и коефицијент трења одговарају комбинацији фактора добијених једнокритеријумском оптимизацијом интензитета хабања. Верификација резултата за интензитет хабања је урађена помоћу ANN анализе којом се закључило да је поклапање 98% између експерименталних резултата и резултата остварених тренирањем мреже.
- EDS и SEM анализом похабаних површина, материјала друге фазе истраживања, веома је тешко уочити разлику између похабаних површина материјала. Као основни механизам хабања код испитиваних материјала јесте абразија.

Урађена је и анализа могуће практичне примене алуминијумских нанокompозита. Стварање новог производа са применом нових материјала захтева познавање великог броја научних дисциплина и указује на неопходност стварања тима истраживача и стручњака из ужих области инжењерства и праксе како би се начинио корак даље, који није уочен у досадашњим објављеним научним радовима. Аналитички прорачун је урађен према дефинисаним ограничењима како би се извршила провера прорачуна изабраних зупчастих парова на степен сигурности против лома корена зупца и степен сигурности на разарање бока зупца.

- Применом нумеричке методе анализирани су напони у контакту зупчастих парова. Напони су истог реда величине код нанокompозита и основне легуре, али применом нанокompозита за израду зупчастог пара може се постићи већи пренос снаге у односу на зупчасти пар израђен од A356 легуре. Максимална вредност еквивалентног напона јавља се у подножју зупца спрегнутих зупчаника и повољнија расподела напона је уочена на боковима зупца у контакту код свих испитиваних материјала.
- Алуминијумски нанокompозитни зупчасти парови, иако преносе мању снагу у односу на челичне зупчанике, могу се користити код зупчастих парова за пренос кретања где се захтева отпорност на корозију, као и за пренос мањих снага.

- Предности које се могу издвојити код зупчастих парова произведених од алуминијумских нанокompозита јесу отпорност на корозију, отпорност на хабање, добар однос тврдоће и масе зупчаника. Смањењем масе зупчастог пара утиче се на смањење нивоа буке и вибрације у редукторима мањих снага, као и на масу комплетног преносника.

Главни допринос рада јесте побољшање триболошких карактеристика применом алуминијумских нанокompозита у односу на основну легуру. Највећи проблем код зупчастих парова је хабање, које се јавља у контакту спрегнутих зупчаника, услед којег настају хаварије. Смањењем хабања смањује се појава иницијалних прелина који су главни изазивачи појаве кртог лома који је најчешће узрок отказа. Такође, применом нанокompозита на зупчасте парове, као и на друге машинске елементе, утицало би се на дужи радни век елемената.

Остварени резултати у овој дисертацији представљају основу за правце даљих истраживања и указују на могућност примене алуминијумских нанокompозита. Ефикасност трошкова један је од важних фактора који тренутно спречава примену нанокompозита за израду триболошких елемената. Нанокompозити су скупљи за производњу од А356 па се за мање одговорне делове у конструкцијама може користити основна легура, док за делове који су одговорнији може се користити нанокompозит.

За остваривање технолошких унапређења у индустријској производњи нанокompозита захтева се оптимизација комплетног производног процеса. Потребно је планирање експеримената од процеса производње до испитивања материјала и коришћење методе оптимизације ради смањења потрошње енергије и природних ресурса. Неопходно је првенствено извршити вишекритеријумску оптимизацију у процесу производње и развоја нових нанокompозита. Уочен је велики број фактора који утичу у самом процесу производње, првенствено код алуминијумских легура, где је неопходно испратити морфологије микроструктуре силицијумске фазе која има велики утицај на механичка својства нанокompозита.

За будући развој нанокompозита препоручује се оптимизација у додавању још једне врсте керамичког ојачавача са циљем постизања хибридног нанокompозита бољих карактеристика у односу на остварене карактеристике испитиваних нанокompозита. Примена вишекритеријумске оптимизације на резултате како би се као такав материјал са оптималним карактеристикама применио у пракси.

Према резултатима других научника, а и резултатима овог рада, пажња мора бити у будућности усмерена на реализацију и развоју лаких, еколошки прихватљивих, јефтиних нанокompозитних материјала са високом чврстоћом. Међутим, биће још много успешних и нешто мање успешних истраживања нанокompозитних материјала како би се као такви материјали могли са великом сигурношћу користити у будућности. Закључује се да проналазак исплативе методе за производњу и састав нанокompозита јесте од суштинског значаја за њихову практичну примену.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Rohatgi, P. K., & Schultz, B. (2007). Lightweight metal matrix nanocomposites—stretching the boundaries of metals. *Material Matters*, 2(4), 16-21.
- [2] Zweben, C. (2015). *Composite Materials Mechanical Engineers' Handbook*, John Wiley & Sons, Inc.
- [3] Ebrahimi, F. (Ed.). (2012). *Nanocomposites: new trends and developments*. BoD—Books on Demand. ISBN 978-953-51-0762-0.
- [4] Vencl A.A., *Istraživanje mogućnosti poboljšanja triboloških karakteristika Al-Si legura u uslovima klizanja*, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd (Srbija), 2008
- [5] Stojanović, B. Ž. (2013). *Tribološko ponašanje hibridnih kompozita sa A356 matricom*, (Doktorska disertacija, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka).
- [6] Hashim, A. A. (Ed.). (2011). *Advances in nanocomposite technology*. BoD—Books on Demand. ISBN 978-953-307-347-7
- [7] Capek, I. (2006). *Nanocomposite Structures and Dispersions: Science and Nanotechnology—Fundamental Principles and Colloidal Particles Studies in Interface Science* vol 23 ed D Mobius and R Miller. ISBN-13: 978-0-444-52716-5, ISBN-10: 0-444-52716-8. (Amsterdam: Elsevier)
- [8] Davim, J. P., & Charitidis, C. A. (2013). *Nanocomposites: materials, manufacturing and engineering*. Springer Heidelberg New York Dordrecht London. ISSN 2192-8983
- [9] Zeren, A. (2015). Effect of the graphite content on the tribological properties of hybrid Al/SiC/Gr composites processed by powder metallurgy. *Industrial Lubrication and Tribology*, 67(3), 262.
- [10] Viswanatha, B. M., Kumar, M. P., Basavarajappa, S., & Kiran, T. S. (2016). Study of the microstructure, hardness and tribological behavior of hypoeutectic Al-7Si hybrid composites. *Industrial Lubrication and Tribology*, 68(2), 233
- [11] Alipour, M., & Eslami-Farsani, R. (2017). Synthesis and characterization of graphene nanoplatelets reinforced AA7068 matrix nanocomposites produced by liquid metallurgy route. *Materials Science and Engineering: A*, 706, 71-82.
- [12] Vencl, A., Vaxevanidis, N.M., Kandevara, M. (2020). A bibliometric analysis of scientific research on tribology of composites in Southeastern Europe, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 724, Paper 012012.
- [13] Djordjević, Z., Jovanović, S., Veličković, S., Jović, D., & Milićević, J. (2017). Influence of Application of New Material in Automotive Industry on Improving Quality of Life. *Center For Quality*, 331-332.
- [14] Babić, M. & Mitrović S. (2007). *Tribološke karakteristike kompozita na bazi legura*, Monografija, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Kragujevac.
- [15] Džunić, D. S. (2015). *Analiza procesa trenja i habanja nanokompozita sa metalnom osnovom*, (Doktorska disertacija, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka).
- [16] Djordjević, Z. (2018). *Kompozitne konstrukcije*, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac.
- [17] Stojanović, B., Babić, M., Veličković, S., & Blagojević, J. (2016). Tribological Behavior of Aluminum Hybrid Composites Studied by Application of Factorial Techniques. *Tribology Transactions*, 59(3), 522-529.

- [18] Veličković, S., Stojanović, B., Babic, M., & Bobić, I. (2017). Optimization of tribological properties of aluminum hybrid composites using Taguchi design. *Journal of Composite Materials*, 51(17), 2505-2515.
- [19] Radhika, N., Subramanian, R., Prasat, S. V., & Anandavel, B. (2012). Dry sliding wear behaviour of aluminium/alumina/graphite hybrid metal matrix composites. *Industrial Lubrication and Tribology*, 64(6), 359-366.
- [20] Ravindran, P., Manisekar, K., Narayanasamy, P., Selvakumar, N., & Narayanasamy, R. (2012). Application of factorial techniques to study the wear of Al hybrid composites with graphite addition. *Materials & Design*, 39, 42-54.
- [21] Veličković, S., Miladinović, S., Stojanović, B., Nikolić, R. R., Hadzima, B., & Arsić, D. (2018). Influence of load and reinforcement content on selected tribological properties of Al/SiC/Gr hybrid composites. *Production Engineering Archives*, 18.
- [22] Sharifi, E. M., Karimzadeh, F., & Enayati, M. H. (2011). Fabrication and evaluation of mechanical and tribological properties of boron carbide reinforced aluminum matrix nanocomposites. *Materials & Design*, 32(6), 3263-3271.
- [23] Tabandeh-Khorshid, M., Omrani, E., Menezes, P. L., & Rohatgi, P. K. (2016). Tribological performance of self-lubricating aluminum matrix nanocomposites: role of graphene nanoplatelets. *Engineering science and technology, an international journal*, 19(1), 463-469.
- [24] Miloradović, N., Stojanović, B., Mitrović, S., & Veličković, S. (2019). Application of Taguchi method in the optimization of zinc based composite. *16th International Conference on Tribology SERBIATRIB'19*, Kragujevac.
- [25] Casati, R., & Vedani, M. (2014). Metal matrix composites reinforced by nano-particles - a review. *Metals*, 4(1), 65-83.
- [26] Sapuan, S.M. (2017). *Composite Materials, Concurrent Engineering Approach*. ISBN 978-0-12-802507-9.
- [27] Bhushan, B. (2005). *Nanotribology and Nanomechanics*. Springer. ISBN: 9783540282488 (online), ISBN 9783540242673.
- [28] Bhushan, B. (2007). *Handbook of Nanotechnology*. Springer. ISBN: 978-3-540-29855-7 (Print), ISBN: 978-3-540-29857-1 (Online).
- [29] Vencel, A., Bobić, B., Vučetić, F., Svoboda, P., Popović, V., & Bobić, I. (2018). Effect of Al₂O₃ nanoparticles and strontium addition on structural, mechanical and tribological properties of Zn₂₅Al₃Si alloy. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(11), 1-13.
- [30] Park, C. Y., Jang, B. W., Kim, J. H., Kim, C. G., & Jun, S. M. (2012). Bird strike event monitoring in a composite UAV wing using high speed optical fiber sensing system. *Composites Science and Technology*, 72(4), 498-505.
- [31] Ruzek, R., Kudrna, P., Kadlec, M., Karachalios, V., & Tserpes, K. I. (2014). Strain and damage monitoring in CFRP fuselage panels using fiber Bragg grating sensors. Part II: Mechanical testing and validation. *Composite Structures*, 107, 737-744.
- [32] Mobarhan Bonab, M. A., & Simchi, A. (2016). Effect of silicon carbide nanoparticles on hot deformation of ultrafine-grained aluminium nanocomposites prepared by hot powder extrusion process. *Powder Metallurgy*, 59(4), 262-270.
- [33] Mosleh-Shirazi, S., Akhlaghi, F., & Li, D. Y. (2016). Effect of SiC content on dry sliding wear, corrosion and corrosive wear of Al/SiC nanocomposites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(7), 1801-1808.

- [34] Veličković, S., Garić, S., Stojanović, B., & Vencl, A. (2016). Tribological properties of aluminium matrix nanocomposites. *Applied Engineering Letters*, 1(3), 72-79.
- [35] Marini, C. D., & Fatchurrohman, N. (2015). A review on the fabrication techniques of aluminium matrix nanocomposites. *Jurnal Teknologi*, 74(10), 103–109.
- [36] Javadi, A., Cao, C., & Li, X. (2017). Manufacturing of Al-TiB₂ Nanocomposites by Flux-Assisted Liquid State Processing. *Procedia Manufacturing*, 10, 531–535
- [37] Afkham, Y., Khosroshahi, R. A., Kheirifard, R., Mousavian, R. T., & Brabazon, D. (2017). Microstructure and morphological study of ball-milled metal matrix nanocomposites. *Physics of Metals and Metallography*, 118(8), 749–758.
- [38] Carreño-Gallardo, C., Estrada-Guel, I., López-Meléndez, C., & Martínez-Sánchez, R. (2014). Dispersion of silicon carbide nanoparticles in a AA2024 aluminum alloy by a high-energy ball mill. *Journal of Alloys and Compounds*, 586, S68–S72.
- [39] Rostami, R. B., & Tajally, M. (2014). Improvements in microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu alloy-Al₂O₃ nanocomposite modified by ZrO₂. *Journal of Materials Research*, 29(21), 2505-2513.
- [40] Sharifi, E. M., Karimzadeh, F., & Enayati, M. H. (2010). Mechanochemically synthesized Al₂O₃-TiC nanocomposite. *Journal of alloys and compounds*, 491(1-2), 411-415.
- [41] Ahamed, H., & Senthilkumar, V. (2012). Experimental investigation on newly developed ultrafine-grained aluminium based nano-composites with improved mechanical properties. *Materials & Design*, 37, 182-192.
- [42] Atrian, A., Majzoobi, G. H., Enayati, M. H., & Bakhtiari, H. (2014). Mechanical and microstructural characterization of Al7075/SiC nanocomposites fabricated by dynamic compaction. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 21(3), 295-303.
- [43] Mousavian, R. T., Khosroshahi, R. A., Yazdani, S., & Brabazon, D. (2017). Manufacturing of cast A356 matrix composite reinforced with nano-to micrometer-sized SiC particles. *Rare Metals*, 36(1), 46-54.
- [44] El-Daly, A. A., Abdelhameed, M., Hashish, M., & Daoush, W. M. (2013). Fabrication of silicon carbide reinforced aluminum matrix nanocomposites and characterization of its mechanical properties using non-destructive technique. *Materials Science and Engineering: A*, 559, 384-393.
- [45] Vencl, A., & Rac, A. (2004). New wear resistant Al based materials and their application in automotive industry. *Mobility & Vehicles Mechanics (MVM)*, 30, Special Edition, 115-139.
- [46] Muley, A. V., Aravindan, S., & Singh, I. P. (2015). Mechanical and tribological studies on nano particles reinforced hybrid aluminum based composite. *Manufacturing Review*, 2, 26.
- [47] Donthamsetty, S., & Babu, P. S. (2017). Experiments on the wear characteristics of A356 MMNCs fabricated using ultrasonic cavitation. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 14, 4589-4602.
- [48] Surendran, R., Manibharathi, N., & Kumaravel, A. (2017). Wear properties enhancement of aluminium alloy with addition of nano alumina. *FME Transactions*, 45(1), 83-88.
- [49] Wu, S. S., Yuan, D., Lü, S. L., Hu, K., & An, P. (2018). Nano-SiC P particles distribution and mechanical properties of Al-matrix composites prepared by stir casting and ultrasonic treatment. *China Foundry*, 15(3), 203-209.
- [50] Singh, M., Rana, R. S., Purohit, R., & Sahu, K. (2015). Development and analysis of Al-matrix nano composites fabricated by ultrasonic assisted squeeze casting process. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 3697–3703.

- [51] Kandemir, S., Atkinson, H. V., Weston, D. P., & Hainsworth, S. V. (2014). Thixoforming of A356/SiC and A356/TiB₂ nanocomposites fabricated by a combination of green compact nanoparticle incorporation and ultrasonic treatment of the melted compact. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45(12), 5782-5798.
- [52] Anvari, S. R., Karimzadeh, F., & Enayati, M. H. (2013). Wear characteristics of Al–Cr–O surface nano-composite layer fabricated on Al6061 plate by friction stir processing. *Wear*, 304(1-2), 144-151.
- [53] Abbasi, M., Givi, M., & Ramazani, A. (2019). Friction stir vibration processing: a new method to improve the microstructure and mechanical properties of Al5052/SiC surface nanocomposite layer. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(5-8), 1463-1473.
- [54] Mazaheri, Y., Karimzadeh, F. A., & Enayati, M. H. (2014). Tribological behavior of A356/Al₂O₃ surface nanocomposite prepared by friction stir processing. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45(4), 2250-2259.
- [55] Ahmadifard, S., Kazemi, S., & Momeni, A. (2018). A356/TiO₂ Nanocomposite Fabricated by Friction Stir Processing: Microstructure, Mechanical Properties and Tribologic Behavior. *JOM*.
- [56] Ravindran, P., Manisekar, K., Kumar, S. V., & Rathika, P. (2013). Investigation of microstructure and mechanical properties of aluminum hybrid nano-composites with the additions of solid lubricant. *Materials & Design*, 51, 448-456.
- [57] Nemati, N., Khosroshahi, R., Emamy, M., & Zolriasatein, A. (2011). Investigation of microstructure, hardness and wear properties of Al–4.5 wt.% Cu–TiC nanocomposites produced by mechanical milling. *Materials & Design*, 32(7), 3718-3729.
- [58] Abbass, M. K., & Fouad, M. J. (2014). Study of wear behavior of aluminum alloy matrix nanocomposites fabricated by powder technology. *Engineering and Technology Journal*, 32 (7 Part (A) Engineering), 1720-1732.
- [59] Alizadeh, A., Abdollahi, A., & Biukani, H. (2015). Creep behavior and wear resistance of Al 5083 based hybrid composites reinforced with carbon nanotubes (CNTs) and boron carbide (B₄C). *Journal of Alloys and Compounds*, 650, 783-793.
- [60] Jeyasimman, D., Narayanasamy, R., Ponalagusamy, R., Anandakrishnan, V., & Kamaraj, M. (2014). The effects of various reinforcements on dry sliding wear behaviour of AA6061 nanocomposites. *Materials & Design*, 64, 783-793.
- [61] Yazdani, B., Xu, F., Ahmad, I., Hou, X., Xia, Y., & Zhu, Y. (2015). Tribological performance of Graphene/Carbon nanotube hybrid reinforced Al₂O₃ composites. *Scientific reports*, 5, 11579.
- [62] Moazami-Goudarzi, M., & Akhlaghi, F. (2016). Wear behavior of Al5252 alloy reinforced with micrometric and nanometric SiC particles. *Tribology International*, 102, 28-37.
- [63] Manikandan, P., Sieh, R., Elayaperumal, A., Le, H. R., & Basu, S. (2016). Micro/nanostructure and tribological characteristics of pressureless sintered carbon nanotubes reinforced aluminium matrix composites. *Journal of nanomaterials*, 2016.
- [64] Akbarpour, M. R., & Alipour, S. (2018). Microstructure and tribological properties of nanostructured aluminum reinforced with SiC nanoparticles fabricated by powder metallurgy route. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 71(3), 745-752.
- [65] Bahmani, E., Abouei, V., Shajari, Y., Razavi, S. H., & Bayat, O. (2018). Investigation on microstructure, wear behavior and microhardness of Al– Si/SiC nanocomposite. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 54(4), 350-358.

- [66] Ahmadi, M., & Siadati, M. H. (2018). Synthesis, mechanical properties and wear behavior of hybrid Al/(TiO₂ + CuO) nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*, 769, 713–724.
- [67] Hariharasakthisudhan, P., Jose, S., & Manisekar, K. (2019). Dry sliding wear behaviour of single and dual ceramic reinforcements premixed with Al powder in AA6061 matrix. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 275-283.
- [68] Purohit, R., Qureshi, M. M. U., & Dandoutiya, B. K. (2018). Study of tribological properties of Al-Al₂O₃ nanocomposites developed through ultrasonic assisted stir casting process. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 20492-20499.
- [69] Das, S., Chandrasekaran, M., Samanta, S., Kayaroganam, P., & Davim, P. (2019). Fabrication and tribological study of AA6061 hybrid metal matrix composites reinforced with SiC/B₄C nanoparticles. *Industrial Lubrication and Tribology*.
- [70] Karbalaee Akbari, M., Rajabi, S., Shirvanimoghaddam, K., & Baharvandi, H. R. (2015). Wear and friction behavior of nanosized TiB₂ and TiO₂ particle-reinforced casting A356 aluminum nanocomposites: A comparative study focusing on particle capture in matrix. *Journal of Composite Materials*, 49(29), 3665-3681.
- [71] Moghadam, A. D., Omrani, E., Menezes, P. L., & Rohatgi, P. K. (2016). Effect of in-situ processing parameters on the mechanical and tribological properties of self-lubricating hybrid aluminum nanocomposites. *Tribology Letters*, 62(2), 25.
- [72] Ekka, K. K., & Chauhan, S. R. (2015). Dry sliding wear characteristics of SiC and Al₂O₃ nanoparticulate aluminium matrix composite using Taguchi technique. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(2), 571-581.
- [73] Manivannan, I., Ranganathan, S., Gopalakannan, S., Suresh, S., Nagakarthishan, K., & Jubendradass, R. (2017). Tribological and surface behavior of silicon carbide reinforced aluminum matrix nanocomposite. *Surfaces and Interfaces*, 8, 127-136.
- [74] Kannan, C., Ramanujam, R., Venkatesan, K., Dheeraj, N. V., Sundaresh, M. R., & Vimal, A. (2018). An investigation on the tribological characteristics of Al 7075 based single and hybrid nanocomposites. *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 12837-12847.
- [75] Kumar, N. S., Prabhu, T. R., Mishra, R. K., Eswaraprasad, N., Shankar, G. S., & Basavarajappa, S. (2018). Analysis of dry sliding wear behavior of the nano composites using statistical methods with an emphasis on temperature effects. *Measurement*, 128, 362-376.
- [76] Sozhamannan, G. G., Yusuf, M. M., Aravind, G., Kumaresan, G., Velmurugan, K., & Venkatachalapathy, V. S. K. (2018). Effect of applied load on the wear performance Of 6061 Al/Nano Ticp/Gr hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 6489-6496.
- [77] Kalashnikov, I. E., Bolotova, L. K., Kobeleva, L. I., Bykov, P. A., & Kolmakov, A. G. (2015). Wear products that form during tribological tests of aluminum-matrix composite materials. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2015(4), 285-289.
- [78] Babu, J. S. S., Kang, C. G., & Kim, H. H. (2011). Dry sliding wear behavior of aluminum based hybrid composites with graphite nanofiber–alumina fiber. *Materials & Design*, 32(7), 3920-3925.
- [79] Maurya, R., Kumar, B., Ariharan, S., Ramkumar, J., & Balani, K. (2016). Effect of carbonaceous reinforcements on the mechanical and tribological properties of friction stir processed Al6061 alloy. *Materials & Design*, 98, 155-166.
- [80] Eskandari, H., Taheri, R., & Khodabakhshi, F. (2016). Friction-stir processing of an AA8026-TiB₂-Al₂O₃ hybrid nanocomposite: Microstructural developments and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 660, 84-96.

- [81] Asl, A. M., & Khandani, S. T. (2013). Role of hybrid ratio in microstructural, mechanical and sliding wear properties of the Al5083/Graphitep/Al₂O₃p a surface hybrid nanocomposite fabricated via friction stir processing method. *Materials Science and Engineering: A*, 559, 549-557.
- [82] Heidarpour, A., Ahmadifard, S., & Kazemi, S. (2018). On the Al5083–Al₂O₃–TiO₂ Hybrid Surface Nanocomposite Produced by Friction Stir Processing. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 54(3), 409-415.
- [83] Singh, T., Tiwari, S. K., & Shukla, D. K. (2019). Friction-stir welding of AA6061-T6: The effects of Al₂O₃ nano-particles addition. *Results in Materials*, 1, 100005.
- [84] Venci, A. (2012). *Tribology of the Al-Si Alloy Based MMCs and Their Application in Automotive Industry*, in: L. Magagnin (Ed.), *Engineered Metal Matrix Composites: Forming Methods, Material Properties and Industrial Applications*, Nova Science Publishers, New York, 127–166.
- [85] Prasad, S. V., & Asthana, R. (2004). Aluminum metal-matrix composites for automotive applications: tribological considerations. *Tribology letters*, 17(3), 445-453.
- [86] Lim, S. C. (1998). Recent developments in wear-mechanism maps. *Tribology International*, 31(1-3), 87-97.
- [87] Wang, D. Z., Peng, H. X., Liu, J., & Yao, C. K. (1995). Wear behaviour and microstructural changes of SiCw-Al composite under unlubricated sliding friction. *Wear*, 184(2), 187-192.
- [88] Wilson, S., & Alpas, A. T. (1997). Wear mechanism maps for metal matrix composites. *Wear*, 212(1), 41-49.
- [89] Lekatou, A., Karantzalis, A. E., Evangelou, A., Gousia, V., Kaptay, G., Gácsi, Z., Baumli, P., & Simon, A. (2015). Aluminium reinforced by WC and TiC nanoparticles (ex-situ) and aluminide particles (in-situ): Microstructure, wear and corrosion behaviour. *Materials & Design* (1980-2015), 65, 1121-1135.
- [90] Suresh, S., Moorthi, N. S. V., Vettivel, S. C., & Selvakumar, N. (2014). Mechanical behavior and wear prediction of stir cast Al–TiB₂ composites using response surface methodology. *Materials & Design*, 59, 383-396.
- [91] Peng, D. X., & Kang, Y. (2014). Preparation of SiO₂ nanoparticles and investigation of its tribological behavior as additive in liquid paraffin. *Industrial Lubrication and Tribology*, 66(6), 662-670.
- [92] Stojanovic, B., & Glisovic, J. (2016). *Automotive Engine Materials*, in: S. Hashmi (Ed.), *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier, Oxford, 1–9.
- [93] Stojanović, B. & Ivanović, L. (2015). Application of aluminium hybrid composites in automotive industry. *Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette*, 22(1), 247–251.
- [94] *Nanowerk*; Available from: <https://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=23934.php> , приступљено маја 2018.
- [95] Veličković, S., Stojanović, B., Ivanović, L., Miladinović, S., & Milojević, S. (2019). Application of nanocomposites in the automotive industry, *Mobility & Vehicle Mechanics*, 45(3), 51-64.
- [96] Tiruvenkadam, N., Thyla, P. R., Senthilkumar, M., Bharathiraja, M., & Murugesan, A. (2015). Synthesis of new aluminum nano hybrid composite liner for energy saving in diesel engines. *Energy Conversion and Management*, 98, 440-448.
- [97] Carvalho, O., Buciumeanu, M., Madeira, S., Soares, D., Silva, F. S., & Miranda, G. (2015). Optimization of AlSi–CNTs functionally graded material composites for engine piston rings. *Materials & Design*, 80, 163-173.

- [98] Ramachandra, M., Abhishek, A., Siddeshwar, P., & Bharathi, V. (2015). Hardness and wear resistance of ZrO₂ nano particle reinforced Al nanocomposites produced by powder metallurgy. *Procedia Materials Science*, 10, 212-219.
- [99] Sundaram M.U., & Mahamani, A. (Ed.) (2015) *Development of Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Matrix Composite Brake Drum for Automotive Applications*, Research and Innovation in Carbon Nanotube-Based Composites.
- [100] Rana, R. S., Purohit, R., Soni, V. K., & Das, S. (2015). Development and wear analysis of Al-nano SiC composite automotive cam. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 3586-3592.
- [101] Dhanabal, S., Vetrivel, S., & Vimal, R. M. (2015). An overview of hybrid metal matrix composites – characterization, directed applications, and future scope. *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science*, 1(9), 344-350.
- [102] Dearnley, P. A., Kern, E., & Dahm, K. L. (2005). Wear response of crystalline nanocomposite and glassy Al₂O₃-SiC coatings subjected to simulated piston ring/cylinder wall tests. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 219(2), 121-137.
- [103] Gopalakannan, S., & Senthilvelan, T. (2015). Synthesis and Characterisation of Al 7075 reinforced with SiC and B₄C nano particles fabricated by ultrasonic cavitation method. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 74, 281-285.
- [104] Presting, H., & König, U. (2003). Future nanotechnology developments for automotive applications. *Materials Science and Engineering: C*, 23(6-8), 737-741.
- [105] Reddy, A. C. (2015). Reduction of Vibrations and Noise using AA7020/Al₂O₃ Nanocomposite Gear Box in Lathe. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(9), 671-677.
- [106] Asmatulu, R., Nguyen, P., & Asmatulu, E. (2013). Nanotechnology safety in the automotive industry. *Nanotechnology safety*. Elsevier, 57-72.
- [107] Atrian, A., & Nourbakhsh, S. H. (2018). Mechanical Behavior of Al-SiC np Nanocomposite Fabricated by Hot Extrusion Technique. *International Journal of Advanced Design & Manufacturing Technology*, 11(1).
- [108] Manasijević, S. (2012). *Aluminijumske klipne legure*, LOLA-institut, Beograd.
- [109] Bobić, I., Vencl, A., Babić, M., Mitrović, S., & Bobić, B. (2011). *Tehnološki postupak dobijanja dvojnog hibridnog kompozita sa osnovom od A356 legure aluminijuma uz dodatak 10 mas. % čestica SiC i 1 mas. % čestica grafita (bitno poboljšan postojeći proizvod ili tehnologija)*, Mašinski fakultet Univerziteta u Kragujevcu.
- [110] Veličković, S., Stojanović, B., Babić, M., Vencl, A., Bobić, I., Bognár, G. V., & Vučetić, F. (2019). Parametric optimization of the aluminium nanocomposites wear rate. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(1), 1-10.
- [111] Tanasijević, S. (1989). *Tribologija mašinskih elemenata*, Naučna knjiga, Beograd. ISBN
- [112] Gligorić, R. (2015). *Inženjerske komunikacije*, Univerzitet u Novom Sadu Poljoprivredni fakultet, Novi Sad. ISBN 978-86-7420-327-8.
- [113] ASTM G77-98. (1998). Standard test method for ranking resistance of materials to sliding wear using block-on-ring wear test. *West Conshohocken (PA): ASTM International*.
- [114] Vencl, A., Vučetić, F., Bobić, B., Pitel, J., & Bobić, I. (2019). Tribological characterisation in dry sliding conditions of compocasted hybrid A356/SiC p/Gr p composites with graphite macroparticles. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(9), 2135-2146.

- [115] Bobić, I., Ružić, J., Bobić, B., Babić, M., Vencl, A., & Mitrović, S. (2014). Microstructural characterization and artificial aging of compo-casted hybrid A356/SiCp/Grp composites with graphite macroparticles. *Materials Science and Engineering: A*, 612, 7-15.
- [116] Vencl A., Bobić I., Stanković M., Hvizdoš P., Bobić B., Stojanović B., Franek F., Influence of secondary phases in A356 MMCs on their mechanical properties at macro- and nanoscale, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42, 3, 2020, Paper 115
- [117] Vencl A., Bobić B., Vučetić F., Svoboda P., Popović V., Bobić I., Effect of Al₂O₃ nanoparticles and strontium addition on structural, mechanical and tribological properties of Zn₂₅Al₃Si alloy, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40, 11, 2018, Paper 513
- [118] Jovanović, M., Lazić, V., & Arsić, D. (2017). *Nauka o materijalima 1*, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac. ISBN 978-86-6335-042-7.
- [119] ASTM E92. (1997). Standard test methods for Vickers hardness of metallic materials. *West Conshohocken (PA): ASTM International*.
- [120] Do Kyung Kim, *Nanoindentation-Basic Principle*, Department of Materials Science and Engineering KAIST, http://szft.elte.hu/oktat/hkaroly/mikronano/Nano_indentation.pdf .
- [121] Oliver, W. C., & Pharr, G. M. (1992). An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of materials research*, 7(6), 1564-1583.
- [122] Pantić, M. M. (2017). *Tribološka karakterizacija naprednih stomatoloških materijala* (Doktorska disertacija, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka).
- [123] User manual, *Nanoindentation Tester*,
<https://www.anton-paar.com/?eID=documentsDownload&document=57427&L=0>
- [124] Lakshmanan, P., & Amith, S. C. (2020). Investigation of tribological properties of Al-Mg-Si/SiCp nanocomposites prepared by ultrasonic assisted casting method. *Materials Today: Proceedings*.
- [125] Madhukar, P., Selvaraj, N., Gujjala, R., & Rao, C. S. P. (2019). Production of high performance AA7150-1% SiC nanocomposite by novel fabrication process of ultrasonication assisted stir casting. *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 104665.
- [126] Dwivedi, S. P., Srivastava, A. K., Maurya, N. K., Sahu, R., Tyagi, A., & Maurya, R. (2020). Microstructure and mechanical behaviour of Al/SiC/Al₂O₃ hybrid metal matrix composite. *Materials Today: Proceedings*, 25, 789-792.
- [127] Mousavian, R. T., Behnamfard, S., Khosroshahi, R. A., Zavašnik, J., Ghosh, P., Krishnamurthy, S., Heidarzadeh, A., & Brabazon, D. (2020). Strength-ductility trade-off via SiC nanoparticle dispersion in A356 aluminium matrix. *Materials Science and Engineering: A*, 771, 138639.
- [128] Džunić, D., Mitrović, S., Babić, M., Bobić, I., Pantić, M., Adamović, D., & Nedeljković, B. (2015). Nanoindentation of Za-27 Alloy Based Nanocomposites Reinforced with Al₂O₃ Particles. *Tribology in industry*, 37(4).
- [129] Bathula, S., Saravanan, M., & Dhar, A. (2012). Nanoindentation and wear characteristics of Al 5083/SiCp nanocomposites synthesized by high energy ball milling and spark plasma sintering. *Journal of Materials Science & Technology*, 28(11), 969-975.
- [130] Reddy, M. P., Shakoor, R. A., Parande, G., Manakari, V., Ubaid, F., Mohamed, A. M. A., & Gupta, M. (2017). Enhanced performance of nano-sized SiC reinforced Al metal matrix

- nanocomposites synthesized through microwave sintering and hot extrusion techniques. *Progress in Natural Science: Materials International*, 27(5), 606-614.
- [131] Xie, Y., Huang, Y., Wang, F., Meng, X., Li, J., Dong, Z., & Cao, J. (2020). Deformation-driven metallurgy of SiC nanoparticle reinforced aluminum matrix nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*, 823, 153741.
- [132] Sharma, A., Sharma, V. M., & Jinu, P. A. U. L. (2019). A comparative study on microstructural evolution and surface properties of graphene/CNT reinforced Al6061– SiC hybrid surface composite fabricated via friction stir processing. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(10), 2005-2026.
- [133] Velickovic, S., Stojanović, B., Djordjević, Z., Miladinović, S., & Blagojević, J. (2019). Effect of reinforcement on mechanical characteristics of A356 alloy nanocomposites. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 659(1), 012039.
- [134] Akbari, M. K., Mirzaee, O., & Baharvandi, H. R. (2013). Fabrication and study on mechanical properties and fracture behavior of nanometric Al₂O₃ particle-reinforced A356 composites focusing on the parameters of vortex method. *Materials & Design*, 46, 199-205.
- [135] Akbari, M. K., Baharvandi, H. R., & Mirzaee, O. (2013). Nano-sized aluminum oxide reinforced commercial casting A356 alloy matrix: Evaluation of hardness, wear resistance and compressive strength focusing on particle distribution in aluminum matrix. *Composites Part B: Engineering*, 52, 262-268.
- [136] Peng, H. P., Li, Z. W., Zhu, J. Q., Su, X. P., Ya, L. I. U., Wu, C. J., & Wang, J. H. (2020). Microstructure and mechanical properties of Al–Si alloy modified with Al–3P. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 30(3), 595-602.
- [137] Wang, S., Fu, M., Li, X., Wang, J., & Su, X. (2018). Microstructure and mechanical properties of Al–Si eutectic alloy modified with Al–3P master alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 255, 105-109.
- [138] Furuta, S., Kobayashi, M., Uesugi, K., Takeuchi, A., Aoba, T., & Miura, H. (2017). Investigation of three-dimensional morphology changes of the eutectic Si particles affected by trace P and Sr in Al-7% Si cast alloys by means of synchrotron nano-tomography. *Materials Characterization*, 130, 237-242.
- [139] Moussa, M. E., El-Hadad, S., & Khalifa, W. (2019). Influence of chemical modification by Y₂O₃ on eutectic Si characteristics and tensile properties of A356 alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(7), 1365-1374.
- [140] Jiang, B., Ji, Z., Hu, M., Xu, H., & Xu, S. (2019). A novel modifier on eutectic Si and mechanical properties of Al-Si alloy. *Materials Letters*, 239, 13-16.
- [141] Summer, F., Pusterhofer, M., Grün, F., & Gódor, I. (2020). Tribological investigations with near eutectic AlSi alloys found in engine vane pumps–Characterization of the material tribo-functionalities. *Tribology International*, 146, 106236.
- [142] Huter, P., Oberfrank, S., Grün, F., & Stauder, B. (2016). Thermo-mechanical fatigue influence of copper and silicon on hypo-eutectic Al–Si–Cu and Al–Si–Mg cast alloys used in cylinder heads. *International Journal of Fatigue*, 88, 142-155.
- [143] Hu, K., Ma, X., Gao, T., Xu, Q., Qian, Z., Wu, Y., & Liu, X. (2018). Morphological transformation mechanism of eutectic Si phases in Al–Si alloys by nano-AlNp. *Journal of Alloys and Compounds*, 765, 113-120.
- [144] Antony, J. (2014). *Design of experiments for engineers and scientists*. Elsevier. ISBN 978-0-08-099417-8.

- [145] Oruč, M., Sunulahpašić, R., & Hadžalić, M. (2016). *Ispitivanje materijala visokozahtjevnih komponenti*. Univerzitet u Zenici, Fakultet za metalurgiju i materijale Zenica.
- [146] Pantelić, I. (1976). *Uvod u teoriju inženjerskog eksperimenta*. Radnički univerzitet Radivoj Ćirpanov, Novi Sad.
- [147] Montgomery, D.C. (2015). *Design and Analysis of Experiments*, (8th Edition) Arizona State University, John Wiley and Sons.
- [148] Damyanov, G., & Germanova-Krasteva, D. (2012). *Textile Processes: Quality Control and Design of Experiments*, Momentum Press, New York.
- [149] Su, C. T. (2013). *Quality engineering: off-line methods and applications*. CRC press. ISBN 9781466569485.
- [150] Davis, R., & John, P. (2018). *Application of Taguchi-Based Design of Experiments for Industrial Chemical Processes*. Statistical Approaches with Emphasis on Design of Experiments Applied to Chemical Processes, 137.
- [151] Hinkelmann, K., & Kempthorne, O. (2005). *Advanced Experimental Design in: Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, New Jersey.
- [152] Rutherford, A. (2001). *Introducing Anova and Ancova: A GLM Approach*. SAGE Publications Ltd.
- [153] Stojanovic, B., Blagojevic, J., Babic, M., Velickovic, S., & Miladinovic, S. (2017). Optimization of hybrid aluminum composites wear using Taguchi method and artificial neural network. *Industrial lubrication and tribology*, 69(6), 1005-1015.
- [154] Box, G. E., & Draper, N. R. (2007). *Response surfaces, mixtures, and ridge analyses*. John Wiley & Sons
- [155] Karthikeyan, G., & Jinu, G. R. (2016). Dry sliding wear behavior optimization of stir cast LM6/ZrO₂ composites by response surface methodology analysis. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 40(3), 351-369.
- [156] Huang, M. L., Hung, Y. H., & Yang, Z. S. (2016). Validation of a method using Taguchi, response surface, neural network, and genetic algorithm. *Measurement*, 94, 284-294.
- [157] Yusri, I. M., Majeed, A. A., Mamat, R., Ghazali, M. F., Awad, O. I., & Azmi, W. H. (2018). A review on the application of response surface method and artificial neural network in engine performance and exhaust emissions characteristics in alternative fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 665-686.
- [158] Gyurova, L. A., Miniño-Justel, P., & Schlarb, A. K. (2010). Modeling the sliding wear and friction properties of polyphenylene sulfide composites using artificial neural networks. *Wear*, 268(5-6), 708-714
- [159] Fathy, A., & Megahed, A. A. (2012). Prediction of abrasive wear rate of in situ Cu–Al₂O₃ nanocomposite using artificial neural networks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(9-12), 953-963.
- [160] Sardar, S., Dey, S., & Das, D. (2020). Modelling of tribological responses of composites using integrated ANN-GA technique. *Journal of Composite Materials*.
- [161] Tsoulos, I. G. (2009). Solving constrained optimization problems using a novel genetic algorithm. *Applied Mathematics and Computation*, 208(1), 273-283.
- [162] Kuo, H. C., & Lin, C. H. (2013). A directed genetic algorithm for global optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 219(14), 7348-7364.
- [163] Lin, C. H. (2013). A rough penalty genetic algorithm for constrained optimization. *Information Sciences*, 241, 119-137.

- [164] Elsayed, S. M., Sarker, R. A., & Essam, D. L. (2014). A new genetic algorithm for solving optimization problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 27, 57-69.
- [165] Thakur, M. (2014). A new genetic algorithm for global optimization of multimodal continuous functions. *Journal of Computational Science*, 5(2), 298-311.
- [166] Kaya, M. (2011). The effects of two new crossover operators on genetic algorithm performance. *Applied soft computing*, 11(1), 881-890.
- [167] Das, K. N., & Mishra, R. (2013). Chemo-inspired genetic algorithm for function optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 220, 394-404.
- [168] K. Deep, M. Thakur, A new crossover operator for real coded genetic algorithms, *Applied Mathematics and Computation*, 188 (2007) 895-911.
- [169] Chuang, Y. C., Chen, C. T., & Hwang, C. (2015). A real-coded genetic algorithm with a direction-based crossover operator. *Information Sciences*, 305, 320-348.
- [170] Li, X., & Du, G. (2013). BSTBGA: A hybrid genetic algorithm for constrained multi-objective optimization problems. *Computers & Operations Research*, 40(1), 282-302.
- [171] Long, Q. (2014). A constraint handling technique for constrained multi-objective genetic algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 15, 66-79.
- [172] Gang, M., Wei, Z., & Xiaolin, C. (2012). A novel particle swarm optimization algorithm based on particle migration. *Applied Mathematics and Computation*, 218(11), 6620-6626.
- [173] Shin, Y. B., & Kita, E. (2014). Search performance improvement of particle swarm optimization by second best particle information. *Applied Mathematics and Computation*, 246, 346-354.
- [174] Sun, S., & Li, J. (2014). A two-swarm cooperative particle swarms optimization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 15, 1-18.
- [175] Mahmoodabadi, M. J., Mottaghi, Z. S., & Bagheri, A. (2014). HEPPO: High exploration particle swarm optimization. *Information Sciences*, 273, 101-111.
- [176] Yadav, A., & Deep, K. (2014). An efficient co-swarm particle swarm optimization for non-linear constrained optimization. *Journal of Computational Science*, 5(2), 258-268.
- [177] G. He, N.-j. Huang, A modified particle swarm optimization algorithm with applications, *Applied Mathematics and Computation*, 219 (2012) 1053-1060.
- [178] Haklı, H., & Uğuz, H. (2014). A novel particle swarm optimization algorithm with Levy flight. *Applied Soft Computing*, 23, 333-345.
- [179] He, G., & Huang, N. J. (2014). A new particle swarm optimization algorithm with an application. *Applied Mathematics and Computation*, 232, 521-528.
- [180] Wang, L., Yang, B., & Chen, Y. (2014). Improving particle swarm optimization using multi-layer searching strategy. *Information Sciences*, 274, 70-94.
- [181] Gosciniak, I. (2015). A new approach to particle swarm optimization algorithm. *Expert Systems with Applications*, 42(2), 844-854.
- [182] Liu, S., Yang, Y., & Forrest, J. (2017). Grey data analysis. Springer Singapore, Singapore, doi, 10(1007), 978-981.
- [183] Julong, D. (1989). Introduction to grey system theory. *The Journal of grey system*, 1(1), 1-24.
- [184] Samson, R. M., Geethapriyan, T., Raj, A. A., Ashok, A., & Rajesh, A. (2019). Parametric optimization of abrasive water jet machining of beryllium copper using Taguchi grey relational analysis. *Advances in Manufacturing Processes*, 501-520.

- [185] Dinesh, S., Antony, A. G., Rajaguru, K., & Vijayan, V. (2016). Investigation and prediction of material removal rate and surface roughness in CNC turning of EN24 alloy steel. *Asian Journal of Research in Social Sciences and Humanities*, 6(8), 849-863.
- [186] Dinesh, S., Antony, A. G., Rajaguru, K., & Vijayan, V. (2017). Experimental investigation and optimization of material removal rate and surface roughness in centerless grinding of magnesium alloy using grey relational analysis. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 21(1), 17-28.
- [187] Joel, C., & Jeyapooan, T. (2020). Optimization of machinability parameters in abrasive water jet machining of AA7075 using Grey-Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*.
- [188] Anand, G., Alagumurthi, N., Elansezhian, R., Palanikumar, K., & Venkateshwaran, N. (2018). Investigation of drilling parameters on hybrid polymer composites using grey relational analysis, regression, fuzzy logic, and ANN models. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(4), 214.
- [189] Girish, B. M., Siddesh, H. S., & Satish, B. M. (2019). Taguchi grey relational analysis for parametric optimization of severe plastic deformation process. *SN Applied Sciences*, 1(8), 937.
- [190] Jena, S. P., Mahapatra, S., & Acharya, S. K. (2020). Optimization of performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with Karanja biodiesel using Grey-Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*.
- [191] Hussain, M. Z., Khan, S., & Sarmah, P. (2020). Optimization of powder metallurgy processing parameters of Al₂O₃/Cu composite through Taguchi method with Grey relational analysis. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 32(4), 274-286.
- [192] Vencel, A. (2015). Tribological behavior of ferrous-based APS coatings under dry sliding conditions. *Journal of Thermal Spray Technology*, 24(4), 671-682.
- [193] Abedinzadeh, R., Safavi, S. M., & Karimzadeh, F. (2015). A comparative study on wear properties of nanostructured Al and Al/Al₂O₃ nanocomposite prepared by microwave-assisted hot press sintering and conventional hot pressing. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(9), 3685-3690.
- [194] Panda, A., Das, S. R., & Dhupal, D. (2017). Surface roughness analysis for economical feasibility study of coated ceramic tool in hard turning operation. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 1(4), 237-249.
- [195] Standard, A.S.T.M. (2000). Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. *ASTM International West Conshohocken*.
- [196] Akbarpour, M. R., Najafi, M., Alipour, S., & Kim, H. S. (2019). Hardness, wear and friction characteristics of nanostructured Cu-SiC nanocomposites fabricated by powder metallurgy route. *Materials Today Communications*, 18, 25-31.
- [197] Sun, W., Duan, C., & Yin, W. (2020). Development of a dynamic constitutive model with particle damage and thermal softening for Al/SiCp composites. *Composite Structures*, 236, 111856.
- [198] Behnamfard, S., Mousavian, R. T., Khosroshahi, R. A., & Brabazon, D. (2019). A comparison between hot-rolling process and twin-screw rheo-extrusion process for fabrication of aluminum matrix nanocomposite. *Materials Science and Engineering: A*, 760, 152-157.
- [199] Hsieh, C. T., Ho, Y. C., Wang, H., Sugiyama, S., & Yanagimoto, J. (2020). Mechanical and tribological characterization of nanostructured graphene sheets/A6061 composites fabricated by induction sintering and hot extrusion. *Materials Science and Engineering: A*.

- [200] Zhu, J., Jiang, W., Li, G., Guan, F., Yu, Y., & Fan, Z. (2020). Microstructure and mechanical properties of SiCnp/Al6082 aluminum matrix composites prepared by squeeze casting combined with stir casting. *Journal of Materials Processing Technology*.
- [201] Kumar, M. A., Honnaiaha, C., & Prasad, S. A. (2018). Influence of extrusion process on mechanical and tribological properties of aluminium A356- Al₂O₃ Stir Cast MMC. *Materials Today: Proceedings*, 5(13), 26918-26924.
- [202] Jalilvand, M. M., Mazaheri, Y., Heidarpour, A., & Roknian, M. (2019). Development of A356/Al₂O₃+SiO₂ surface hybrid nanocomposite by friction stir processing. *Surface and Coatings Technology*, 360, 121-132.
- [203] Manochehrian, A., Heidarpour, A., Mazaheri, Y., & Ghasemi, S. (2019). On the surface reinforcing of A356 aluminum alloy by nanolayered Ti₃AlC₂ MAX phase via friction stir processing. *Surface and Coatings Technology*, 377, 124884.
- [204] Poovazhagan, L., Kalaichelvan, K., Rajadurai, A., & Senthilvelan, V. (2013). Characterization of hybrid silicon carbide and boron carbide nanoparticles-reinforced aluminum alloy composites. *Procedia Engineering*, 64, 681-689.
- [205] Badizi, R. M., Parizad, A., Askari-Paykani, M., & Shahverdi, H. R. (2020). Optimization of mechanical properties using D-optimal factorial design of experiment: Electromagnetic stir casting process of A357– SiC nanocomposite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 30(5), 1183-1194.
- [206] Madhukar, P., Selvaraj, N., Rao, C. S. P., & Kumar, G. V. (2020). Enhanced performance of AA7150-SiC nanocomposites synthesized by novel fabrication process. *Ceramics International*, 46, 17103-17111.
- [207] Mohit, H., & Selvan, V. A. M. (2020). Optimization of the tensile strength of sintered Al6061/SiC nanocomposites using response surface methodology. *Materials Today: Proceedings*.
- [208] Christy, J. V., Arunachalam, R., Mourad, A. H. I., Krishnan, P. K., Piya, S., & Al-Maharbi, M. (2020). Processing, Properties, and Microstructure of Recycled Aluminum Alloy Composites Produced Through an Optimized Stir and Squeeze Casting Processes. *Journal of Manufacturing Processes*, 59, 287-301.
- [209] Kočić, M., Vencl, A., Bobić, I., Ristić, M., Antić, M., & Milutinović, Z. (2014). Joining of composite materials based on Al-Si alloys by using the GMAW process. *Welding and Material Testing*, 23(3), 9-12.
- [210] Kaufman, J. G. (2000). *Introduction to aluminum alloys and tempers*. ASM international.
- [211] Yılmaz, T. G., & Karpat, F. (2019). Finite element stress and modal analysis of bimetal spur gears. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 24(3), 339-346.
- [212] CATERA, P. G., MUNDO, D., GAGLIARDI, F., & TREVISIO, A. (2020). A comparative analysis of adhesive bonding and interference fitting as joining technologies for hybrid metal-composite gear manufacturing. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1-16.
- [213] Thirumurugan, R., & Gnanasekar, N. (2020). Influence of finite element model, load-sharing and load distribution on crack propagation path in spur gear drive. *Engineering Failure Analysis*, 110, 104383.
- [214] Mehta, G., Somani, M., Babu, T. N., & Watts, T. (2018). Contact stress analysis on composite spur gear using finite element method. *Materials today: proceedings*, 5(5), 13585-13592.

- [215] Pawar, P. B., & Utpat, A. A. (2014). Development of aluminium based silicon carbide particulate metal matrix composite for spur gear. *Procedia Materials Science*, 6, 1150-1156.
- [216] Mahakul, R., Thatoi, D. N., Choudhury, S., & Patnaik, P. (2020). Design and numerical analysis of spur gear using SolidWorks simulation technique. *Materials Today: Proceedings*.
- [217] *Aluminum A356.0-T6, Sand Cast*, http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=d524d6bf305c4ce99414cabd1c7ed070, приступљено новембра 2020.
- [218] Nikolić, V. (2004). *Mašinski elementi: teorija, proračun, primeri*. Mašinski fakultet, Kragujevac.
- [219] Tebaldini, M., Petrogalli, C., Donzella, G., & La Vecchia, G. M. (2017). Estimation of fatigue limit of a A356-T6 automotive wheel in presence of defects. *Procedia Structural Integrity*, 7, 521-529.
- [220] Alam, M. T., Ansari, A. H., Arif, S., & Alam, M. N. (2017). Mechanical properties and morphology of aluminium metal matrix nanocomposites-stir cast products. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 3(4), 600-615.
- [221] Kun, H. U., Du, Y. U. A. N., LÜ, S. L., & Wu, S. S. (2018). Effects of nano-SiCp content on microstructure and mechanical properties of SiCp/A356 composites assisted with ultrasonic treatment. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 28(11), 2173-2180.
- [222] Vujanac, R., Vulovic, S., Disic, A., & Miloradovic, N. (2018). Numerical analysis of beam-to-column connection of pallet racks. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 393, No. 1, p. 012009). IOP Publishing.
- [223] Blagojevic, M., Marjanovic, N., Djordjevic, Z., Stojanovic, B., Marjanovic, V., Vujanac, R., & Disic, A. (2014). Numerical and experimental analysis of the cycloid disc stress state. *Technical Gazette*, 21(2), 377-382.
- [224] Bodzás, S. (2020). Computer-aided design and loaded tooth contact analyses of bevel gear pair having straight teeth by different loaded torques. *Mechanics & Industry*, 21(1), 109.

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Сандра Гајевић (девојачко Величковић) рођена је 26. јула 1989. године у Крагујевцу. Основну и средњу школу завршила је у Великој Плани. Машински факултет у Крагујевцу уписује 2008. године. Основне академске студије завршила је са просечном оценом 9,07 на смеру за Машинске конструкције и механизацију одбраном завршног рада под насловом „Испитивање машинских конструкција без разарања“, са оценом 10.

Мастер академске студије уписује на истом факултету (сада Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу) на смеру за Машинске конструкције и механизацију и завршава са просечном оценом 10. Мастер рад под насловом „Испитивање утицаја фактора спољашње средине на механичка својства материјала од пластичних маса“ одбранила је 18. 06. 2013. године, са оценом 10. У току студија више пута је била награђивани студент, док је на мастер студијама проглашена за студента генерације.

На докторске академске студије Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу уписује се школске 2013/14. године. Положила је све испите на докторским студијама са просечном оценом 10 и одобрена јој је израда докторске дисертације под насловом „Развој и оптимизација алуминијумских нанокмпозита за израду триболошких елемената“ под менторством др Блаже Стојановића, ванр. проф.

Први пут изабрана је у звање истраживач сарадник 21. 08. 2014. године на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. Поновни избор у звање истраживач сарадник, у трајању од три године, био је 31. 08. 2017. године на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

За асистента на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу изабрана је 2019. године. У том периоду ангажована је на извођењу аудиторних и лабораторијских вежби из следећих предмета: Отпорност материјала, Машински елементи, Механички преносници, Основи конструисања, Механички преносници 2, Трибологија машинских система, Tribology in machine system и Истраживачки рад у машинству.

У педагошком раду на основу анкета студената позитивно је оцењена, док је за 2019. годину изабрана за најбољег асистента.

У току студија била је стипендиста Министарства просвете, науке и технолошког развоја. Као стипендиста докторант била је ангажована на пројекту ТР 35041, под називом „Истраживање безбедности возила као дела кибернетског система: возач - возило - окружење“, од 2014. до 2016. године на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу. Од 2016. године ангажована је на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије ТР-35021 под називом „Развој триболошких микро/нано двокомпонентних и хибридних самоподмазујућих кмпозита“. Учесник је на билатералном пројекту научне и технолошке сарадње Србија-Мађарска, под називом „Примена триболошких рачунских метода и експерименталних испитивања у развоју савремених нанокмпозитних материјала“, од 2017. године.

Похађала је летњу школу, септембра 2017. године, под називом „Интелигентни материјали будућности“ на Силесиан Технолошком Универзитету, Машински факултет, Гливице у Пољској.

Учествовала је у организацији V међународног конгреса “Моторна возила и мотори - МВМ 2014”, на матичном факултету. Била је члан организационог одбора 9.

Међународне конференције „Истраживање и развој машинских елемената и конструкција ИРМЕС 2019“ у Крагујевцу.

Члан је комисије за промоцију Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, од 2015. Члан је Асоцијације за дизајн, елементе и конструкције АДЕКО.

Као аутор и коаутор објавила је око 50 научно-стручних радова у земљи и иностранству.

ИЗЈАВА АУТОРА О ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ја, Сандра Н. Гајевић, изјављујем да докторска дисертација под насловом:

РАЗВОЈ И ОПТИМИЗАЦИЈА АЛУМИНИЈУМСКИХ
НАНОКОМПЗИТА ЗА ИЗРАДУ ТРИБОЛОШКИХ ЕЛЕМЕНАТА

која је одбрањена на Факултету инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу 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/ла повреду* ауторског нити другог права интелектуалне својине других лица,
- да умножени примерак докторске дисертације у штампаној и електронској форми у чијем се прилогу налази ова Изјава садржи докторску дисертацију истоветну одбрањеној докторској дисертацији.

У Крагујевцу, 19.4.2021. године,

Сандра Н. Гајевић
потпис аутора

ИЗЈАВА АУТОРА О ИСКОРИШЋАВАЊУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ја, _____,

дозвољавам

не дозвољавам

Универзитетској библиотеци у Крагујевцу да начини два трајна умножена примерка у електронској форми докторске дисертације под насловом:

која је одбрањена на _____

Универзитета у Крагујевцу, 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 _____, 19.4.2021. 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/>