

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Дарко С. Пешић

**Анализа триболошких карактеристика
нано/микро композита са ZA-27 металном
ОСНОВОМ
мастер рад**

Крагујевац, 2020.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Трибомеханички системи

Број индекса: 383/2016

Дарко С. Пешић

**Анализа триболошких карактеристика
нано/микро композита са ZA-27 металном
ОСНОВОМ
мастер рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Драган Џунић, доцент - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог рада студент треба да:

- представи литературни осврт на текућу проблематику у вези са композитима са металном основом ојачаним керамичким микро и нано честицама;
- експерименталним методама утврди утицај промене удела ојачавача на триболошке карактеристике композита добијених компокастинг поступком;
- на основу теоријско-експерименталне анализе узорака, помоћу нанотрибометра и оптичког микроскопа, донесе закључке о триболошком понашању испитиваних материјала;

Препоручена литература:

- [1] М. Бабић, С. Митровић „Триболошке карактеристике композита на бази ZnAl легура“, монографија, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2007
- [2] S. Yu. Tarasov, A.V. Filippov, E.A., T.A. Kalashnikova, ‘Adhesion transfer in sliding a steel ball against an aluminum alloy’, Tribology International 115 (2017) 191–198,
- [3] Д. Џунић, „Анализа процеса трења и хабања нанокompозита са металном основом“, Докторска дисертација, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.

...

Крагујевац, 2020

Ментор:

др Драган Џунић, доцент

Предговор

Најпре бих желео да се захвалим ментору, доценту др Драгану Џунићу, човеку који је омогућио настанак овог рада, имао потпуно поверење у мене, обезбедио услове и помогао приликом извођења низа експеримената. Велико хвала и на помоћи при изради претходно сачињеног завршног рада из кога је проистекло веће интересовање за ову тему.

Велико хвала и проф. др Слободану Митровићу и проф. др Мирославу Бабићу на знању које сам стекао током њихових предавања.

Својим родитељима Далинди и Славку, као и сестри Јелени, који су ми били подршка током свих година студија, дугујем велику захвалност.

Посебно хвала мојој супрузи Душици, мојој највећој инспирацији, у протеклим, и у временима која долазе.

У Крагујевцу, 08.08.2020.

Дарко Пешић

Резиме

Предмет истраживања овог мастер рада јесу механичке и триболошке карактеристике композита са ZA-27 металном основом, коме су додате наночестице ојачавача Al_2O_3 (алуминијум-оксида) и микро честице SiC (силицијум-карбида). Цинк-алуминијумска легура се, на основу многих триболошких испитивања, показала као успешан материјал основе за добијање композита због својих механичких карактеристика. Утицај ојачавача, нано/микро керамичких честица, на карактеристике композита може довести до лакшег дефинисања истих. Инфилтрирање микрочестица SiC овом композиту представља покушај умањења структурних несавршености које се у одређеном броју случајева јављају приликом добијања нанокомпозита са ZA-27 металном основом. Основна ZA-27 легура ојачана је наночестицама ојачавача Al_2O_3 величине 20-30nm, масеног удела од 0,5% уз 3%, односно 5% масеног удела микрочестица SiC величине 40 μm . Овако добијени нанокомпозити подвргнути су испитивању помоћу нанотрибометра, док су добијени трагови хабања испитивани применом оптичког и SEM микроскопа, сходно дефинисању њихових механичких и триболошких карактеристика.

Релевантни параметри током триболошких испитивања, извршених применом CSM нанотрибометра, попут брзине клизања, нормалног оптерећења и броја циклуса, узети су као константни.

Кључне речи: композити, нанотрибометар, ZA-27 легура, ојачавач, нано/микро честице

Abstract

The subject of research in this work are tribological characteristics of nanocomposites based on a ZA-27 metal base with a percentage of Al_2O_3 nanoparticles and SiC microparticles. Zinc-aluminum alloy has been, following many tribological experiments, widely used as a based material for composites, because of its good mechanical properties. The influence of ceramical, nano/micro reinforcement particles, on composite properties, could give the major insight on those materials and its characteristics. Infiltration of SiC microparticles in this composite represents an attempt to get less structural imperfections, which have, in some cases, been noticed after the fabrication of ZA-27 composites. Nano particles of Al_2O_3 reinforcement size of a 20-30nm are added to a main metal ZA-27 base, where a mass fraction is 0,5% respectively and impregnated with SiC microparticles (mass fraction 3% and 5%) . Fabricated this way, composites have been exposed to the examination with nano tribometer, while wear scars were examined using optical and SEM microscope, all in order to define their mechanical and tribological properties.

Important parameters of this investigation, done on CSM nanotribometer, including sliding speed, normal load and number of cycles, were taken as constant.

Key words: composites, nano tribometer, ZA-27 alloy, reinforcement, nano/micro particles

САДРЖАЈ

УВОДНА РАЗМАТРАЊА	1
КОМПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ	3
2.1 Уопштено о композитима	3
2.2 Грађа и подела композитних материјала	4
2.3 Избор материјала и распоред честица ојачавача	9
2.3 Примена композитних материјала	11
КОМПОЗИТИ СА МЕТАЛНОМ ОСНОВОМ	13
3.1 Подела композита са металном основом	13
3.1.1 Композити са алуминијумском матрицом	14
3.1.2 Композити са магнезијумовом, титанијумовом, бакарном и матрицом суперлегура	15
3.2 Нанокompозити са металном основом	17
3.3 Нанокompозити са цинк-алуминијумском основом	19
ДОБИЈАЊЕ КОМПОЗИТА	21
4.1 Поступци добијања композита са металном основом	21
4.1.1 Поступци у чврстом стању (Solid State Processing)	21
4.1.2 Поступци у течном стању (Liquid Processing)	23
4.2 Добијање нанокompозита	25
ПРЕГЛЕД АКТУЕЛНОГ СТАЊА НАНОКОМПОЗИТА	30
5.1 Структурне, механичке и триболошке карактеристике нано/микро композита	30
МЕРНА И ИСПИТНА ОПРЕМА	44
6.1 Нанотрибометар	44
6.2 Оптички микроскоп	47
6.3 Скенирајући електронски микроскоп (Scanning electron microscope-SEM)	48
РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗА ИСПИТИВАЊА	52
7.1 Микро/нано структура површина	52
7.1.1 ZA-27 метална основа	52
7.1.2 Нанокompозит ZA-27 + 0,5 % нано Al_2O_3	53
7.1.3 Нано/микро композит ZA-27 + 0,5 % нано Al_2O_3 + 3% микро SiC	55
7.1.4 Нано/микро композит ZA-27 + 0,5 % нано Al_2O_3 + 5% микро SiC	57
7.2 Густина и порозност	59
7.3 Трење	61
7.3.1 ZA-27 метална основа	61
7.3.2 Нанокompозит ZA-27 + 0,5 % нано Al_2O_3	63

7.3.3 Нано/мирко композит ZA-27 + 0,5 % нано Al_2O_3 + 3% микро SiC	66
7.3.4 Нано/мирко композит ZA-27 + 0,5 % нано Al_2O_3 + 5% микро SiC.....	68
7.4 Хабање	69
7.4.1 ZA-27 метална основа.....	70
7.4.2 Нанокмползит ZA-27 + 0,5 % нано Al_2O_3	72
7.4.3 Нано/мирко композит ZA-27 + 0,5 % нано Al_2O_3 + 3% микро SiC	74
7.4.4 Нано/мирко композит ZA-27 + 0,5 % нано Al_2O_3 + 5% микро SiC	76
ЗАКЉУЧАК	82
ЛИТЕРАТУРА.....	85

УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Свакодневни живот човека кроз целокупну историју, одређен је постојањем, откривањем, производњом, прерадом и применом различитих материјала. Тек се у новијој историји, користећи квантитативна знања из математике, физике, механике, термодинамике, хемије и из осталих подручја, долази до одређених начина и принципа добијања савремених материјала. Интензиван развој нових материјала у свету резултира све већом количином информација о поступцима њиховог добијања, о њиховим својствима и о већ провереним примерима примене истих [1]. Тежња за добијањем материјала што бољих механичких и структурних карактеристика довела је до настанка материјала као што су композити. Правилном супституцијом материјала са адекватним композитним материјалом, могуће је смањити триболошке губитке, како директне тако и индиректне, и на тај начин остварити одређене уштеде. Испитивање композита, најпре полимерних, а потом и композита са металном основом довело је до употребе наночестица као ојачавача композита, како би се унапредиле механичке и триболошке карактеристике ових материјала. Развој трибологије као науке и технологије током година довео је до унапређења трибомеханичких система, односно свих механичких система чија је функција у непосредној вези са процесима триболошких интеракција површина у контакту које се релативно крећу једна по другој [1]. Карактеристике материјала испод 1nm, у неким наукама, као што су хемија и атомска физика, сматрају се предвидљивим и уочљивим. Нано наука и технологија се бави синтезом, карактеризацијом, испитивањем и употребом наноструктурних материјала [2]. Нано технологија се односи на поље инжењерства и технологије које се бави испитивањем материјала на атомском и молекуларном нивоу. Нано технологија изучава структуре код којих је бар једна димензија на нанометарској скали или мања од 100 nm [3], а мерљива је хиљадитим делом пречника људске длаке, скалом атома, или мањих молекула. Код ових материјала макар једна димензија припада нано скали, док нано структуре на неки начин чине везу између молекула и остатка материјала. Нано структуре испољавају нове особине и омогућавају нове и ефикасније функције које не могу бити изведене од стране макросистема и структура. Такође, доказано је да услед малих димензија структурних елемената материјала, њиховим физичким хемијским карактеристикама (димензиона стабилност, тврдоћа, проводљивост, реактивност, оптичка осетљивост, тачка топљења, итд.) се може управљати како би се побољшале њихове особине [4]. С друге стране, импрегнацијом наночестица у металну основу може доћи до стварања структурних несавршености у материјалу у виду гасних мехурова [5], те се с тога долази до идеје да се додавањем одређених микрочестица самом нанокомпозиту могу побољшати његове механичке и триболошке карактеристике и евентуално отклонити одређене структурне несавршености.

У средњовековном периоду, металне нано и микро честице су се употребљавале за бојење стакла катедрале. Данас, нано материјали имају значајну улогу у многим индустријама[6]:

- честице угљеника (величине 30nm) се додају аутомобилским гумама у циљу побољшања отпорности на хабање,
- нано честице фосфора се користе у изради „LCD“ и „LED“ екрана, за добијање боја
- нано влакна и честице за ојачања композита,
- нано честице Al_2O_3 се користе у поступцима fine и завршне обраде површина,
- нано честице оксида гвожђа додају се у циљу побољшања магнетичности материјала, што је нарочито присутно код компјутерских хард-дискова,
- нано оксиди цинка или титанијума се користе код наочара за сунце као блокатори штетног UV зрачења сунца.

У поглављу 2 предвиђено је упознавање са појмом композита, сличности и разлике са нанокомпозитима, као и препреке које треба заобићи зарад добијања жељених карактеристика композита. Биће такође представљена класификација композита, избор материјала као и распоред честица ојачавача. На крају поглавља дат је увид у примену композита у разним индустријама.

Поглавље 3 представља ближи осврт на композите са металном основом, најчешће коришћене материјале мезалне основе и самих нанокомпозита.

Поглављем 4 представљен је начин и поступци добијања композита, као и начин добијања нано/микро композита који су коришћени при самом испитивању.

У поглављу 5 приказане су структурне, механичке и триболошке карактеристике нанокомпозита, нано/микро композита, као и преглед актуелног стања на пољу истраживања ових материјала.

Поглављем 6 представљени су мерни инструменти и опрема, који су коришћени приликом испитивања композита.

У поглављу 7 приказани су резултати самог испитивања, као и анализа истих и осврт на тумачења резултата неких пређашњих радова, те и поређење карактеристика испитиваних нано/микро композита.

Поглављем 8 сумиран је комплетан рад, тј. дата су закључна разматрања о констатацијама изложеним у претходним поглављима.

На крају завршног рада налази се литература коришћена приликом састављања завршног рада, како теоријског дела, тако и практичног испитивања.

КОМПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ

Дуги низ година истраживања композита, како на микро тако и на нано нивоу, довео је до дефинисања начина настанка композитних материјала. Композитни материјали настају додавањем ојачавача основном материјалу у циљу побољшања одређених карактеристика. Односно, спајањем материјала чије се температуре топљења значајно разликују, тј. материјала који нису растворљиви један у другом, настају композити.

2.1 Уопштено о композитима

Реч *композит* потиче од латинске речи *Compositum* што значи састављено (eng. composite). Сам термин композит је релативно новијег датума, док композитни материјали постоје и користе се већ хиљадама година. Мало је познато да дрво представља природни композит у коме лигнин повезује друга влакна целулозе. Познато је такође, да се од давнина мачеви кују од легура гвожђа, челика и других материјала, док се цигле ојачавају сламом. Поред цигле, један од најпознатијих композита јесте бетон, састављен од честица песка, или шљунка, сједињен помоћу цемента. Први савремени композитни материјали су они са стакленим влакнима, произведени касних четрдесетих година прошлог века. Они су још увек најчешће коришћени и чине 65% свих композита који се данас производе [7].

У литератури, али и у свакодневној употреби, термин „композитан“ се односи на нешто што је састављено од различитих делова или елемената. У складу са тим следи закључак да је могуће формирати више дефиниција [8]. Који материјали се могу сматрати композитним, а који монолитним зависи од нивоа посматрања који служи као основа за дефиницију [1]:

- На молекуларном нивоу разматрања сви материјали који су састављени од два или више различита атома могу се сматрати композитима. У такве материјале убрајају се једињења, легуре, полимери и керамика.
- Што се тиче микроструктурног нивоа, нивоа кристала, фаза и једињења, за композитни материјал би се сматрао само онај материјал који је састављен од два или више различитих кристала, молекуларних структура или фаза. Према овој дефиницији, многи материјали, традиционално класификовани као монолитни или хомогени би се сматрали композитним материјалима. Те би тако челик, као вишефазна легура угљеника и железа био композитни материјал.
- Макроструктурни ниво, који се најчешће усваја, бави се великим структурним формама, тј. компонентама, нпр. матричним структурама, честицама, влакнима, те се композити на такав начин посматрају као систем материјала састављен од различитих макроструктура.

Не постоји универзално прихваћена дефиниција композитних материјала. Најчешће се композитни материјали у литератури дефинишу као [1]:

- Композитни материјал је систем материјала који се састоји од комбинације два или више „макро“ састојака који се разликују по форми и/или саставу материјала, а да су они притом апсолутно нерастворљиви један у другом [9].
- Композит је обликован производ начињен од композитног материјала, нпр. ливењем, ламинирањем или истискивањем. Композитни материјал је чврсти материјал који се састоји од комбинације двају или више једноставних материјала и у којем поједине компоненте задржавају свој засебан идентитет [10].
- Композитни материјали настају сједињавањем два или више различитих материјала. Полазни материјали имају међусобно различите особине и њихов спој даје потпуно нови материјал. Он има јединствена, сасвим нова и другачија својства у односу на саставне компоненте. Циљ је да се побољшају структурне, триболошке, термичке, хемијске или неке друге карактеристике појединачних материјала [11].

Употреба самог појма композит често претпоставља да су унапређена физичка својства, јер је главни технолошки интерес добијање материјала са супериорним физичким (обично механичким) својствима у односу на својства компонената. Предности композитних материјала у поређењу са основама огледају се у побољшању механичких особина, пре свега у повећању специфичног модула еластичности и већој чврстоћи, повећању отпорности према хабању, отпорности на корозију и високе температуре, хемијску инертност, издржљивост и постојаност [1].

Предности композитних материјала:

Неке од предности композитних материјала у односу на неке конвенцијалне материјале су:

- могућност израде врло сложених облика,
- смањење трошкова накнадне обраде делова,
- могућност спајања делова током самог поступка производње,
- димензиона стабилност при екстремним радним условима,
- отпорност на корозију

2.2 Грађа и подела композитних материјала

Композитни материјал има хетерогену структуру састављену од две или више фаза које долазе од његових компонената које се међусобно не мешају нити растварају. Једна фаза, названа ојачавачем, даје јачину и тврдоћу, а друга се назива матрицом или везивом и она окружује и држи заједно групе влакана или фрагменте ојачавача.

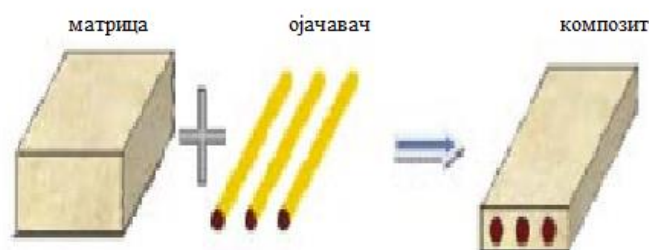
Улога матрице састоји се у томе да:

- повезује и држи заједно честице ојачавача (везива)
- штити од спољашњег утицаја
- има важну улогу приликом преноса оптерећења на ојачавач

- даје спољашњу форму композиту
- одређује његово понашање сходно деловању атмосфере, итд.

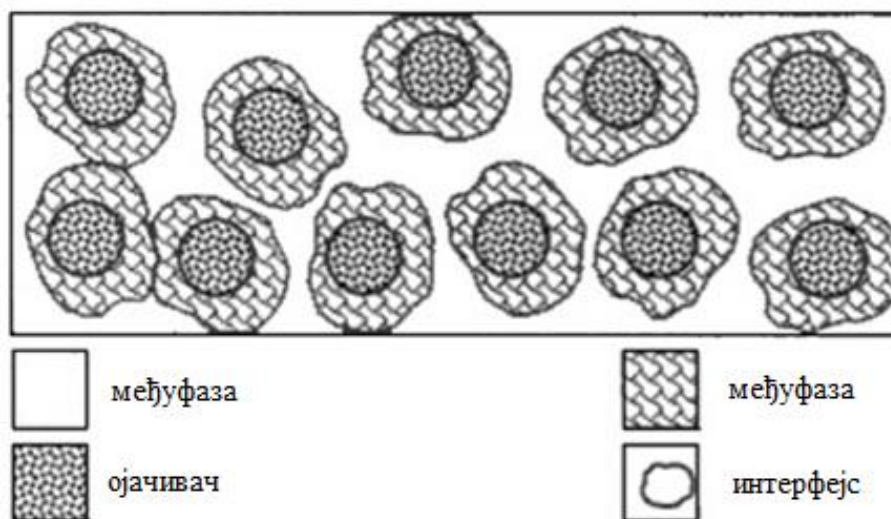
Улога ојачавача је да пре свега осигурају:

- високу чврстоћу,
- висок модул еластичности – крутост,
- отпорност на хабање



Слика 2.1 Саставне компоненте композита [12]

Због тога што су различити структурни елементи комбиновани у композиту, увек постоји гранични регион. То може бити интерфејс (површина која формира заједничку границу елемента), или у другим случајевима додирни регион је јасно додата фаза, названа међуфаза (интерфејс) [1].



Слика 2.2 Структура композитних материјала [1]

Распоред структурних елемената који сачињавају композитни материјал може бити двојак. Најчешћи облик појављивања структурних елемената је правилан и поновљив

модел, са релативно униформним укрштањима у материјалу и структури, али и са униформним распоредом у материјалу основе. Матрично-честични, и неке врсте матрично-влакнастих композита, у којима је структурни елемент равномерно распоређен по калупу, представља хомогени тип композитног материјала.

Друга могућност је варијабилни модел структурних елемената који се не понављају ни у унутрашњој форми ни у материјалу. Материјали овог типа називају се градијентни композити (енг. *graded, gradient composites*). У ову категорију спадају лиснати материјали који су састављени од неколико различитих слојева. Нитима обавијени (филамент) композити могу бити произведени са варијабилном расподелом влакана.

Код обе врсте, и код хомогених и код градијентних композита, структурни елементи могу бити смештени или у оријентисаном или произвољном распореду (слика 2.3).

Композити могу бити метално-метални, метално-керамички, метално-полимерни, керамичко-полимерни, керамичко-керамички, полимерно-полимерни, полимерно-метални.

У зависности од одређене везе између матрице и ојачавача, композити се могу поделити на:

- металне
- керамичке и
- полимерне.

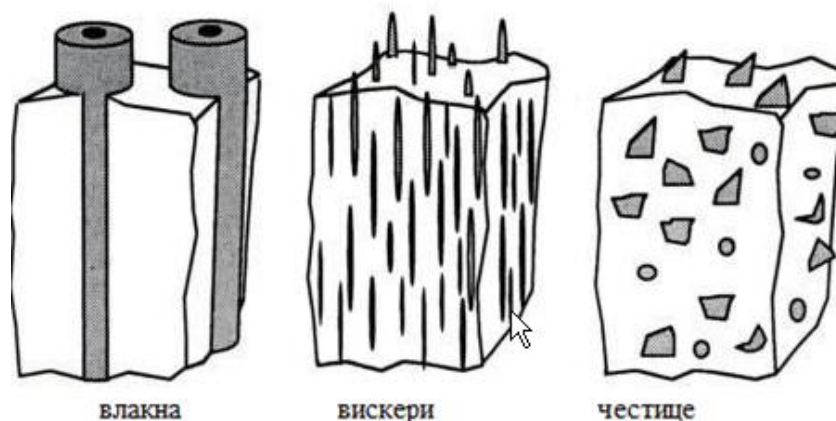
При томе се препоставља да су метали, керамика, односно полимери основа (матрица), којој се придодају најразличитији додаци у циљу модификовања својстава матрице, односно постизања циља који је наведен у дефиницијама, при чему је потребно да се добије материјал чија својства не поседује ни једна од компонената сама за себе, а притом задржава своје основне карактеристике и својства.

С друге стране, у зависности од врсте ојачавача, композити се могу поделити на :

- композите са честицама
- влакнима ојачане композите и
- слојевите композите, сендвич конструкције, односно структурне композите.



Слика 2.3 Распоред структурних елемената у композиту [1]



Слика 2.4 Композити ојачани влакнима и честицама [1]

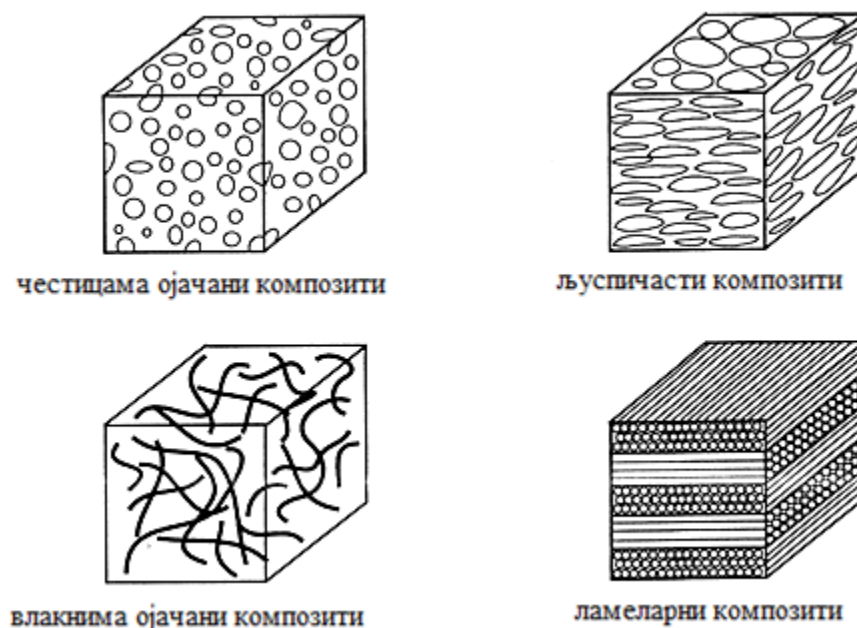
Најчешће се композитни материјали састоје од само две фазе: континуалне матрице која окружује другу фазу-додатке. Та се фаза назива распршена фаза (дисперзија). Својства композита огледају се пре свега у својствима конститутивних фаза, њихових релативних удела и геометрије распршене фазе. Геометрију распршене фазе (ојачавача) карактерише:

- удео,
- величина,
- облик,
- расподела и
- оријентација.

Према бројним ауторима, композитни материјали се у првом кораку класификују према структури матрице. Један од могућих приступа даљој класификацији композитних материјала приказан табеларно:

Табела 2.1 Класификација композита [13]

КОМПОЗИТИ						
честицама ојачани		влакнима ојачани			структурни	
велике честице	дисперзијски ојачани	континуални (усмерени)	дисконтинуални (кратка влакна)		Ламинати	Сендвич
			усмерени	случајно орјентисани		



Слика 2.5 Класификација композита према распршеној фази [1]

На основу поделе наведене у табели 2.1, постоје три главне групе композита: ојачани честицама, ојачани влакнима и структурни композити. Код честицама ојачаних композита распршена фаза је еквиаксијална (тј. димензије честица приближно су једнаке у свим смеровима). Код влакнима ојачаних композита, распршена фаза има геометрију влакана (тј. велики однос дужина-пречник). Док су структурни композити они који су сачињени од комбинације композита и хомогених материјала [1].

Код честичних, композита са дисперзијом повећана чврстоћа постиже се екстремно малим честицама дисперзивне фазе, које успоравају кретање дислокација. Код композита са великим честицама механичке карактеристике су побољшане деловањем самих честица.

Ефикасност ојачања најјача је код композита с влакнима. Код ових композита оптерећење се преноси и дистрибуира међу влакнима и то путем матрице која је у већини случајева осредње дуктилна. Знатно ојачавање ових композита могуће је једино ако је веза влакно-матрица јака. Према облику, сама влакна можемо поделити на вискере, влакна и жице. Вискери су врло танке нити керамичких монокристала, високе чистоће.

Распоред влакана значајно утиче на својства влакнастих композита. Механичка својства композита ојачаних континуалним усмереним влакнима су врло анизотропна. У смеру влакана чврстоћа је максимална док је у обрнутом смеру она минимална. Код композита ојачаних кратким влакнима влакна могу бити усмерена или случајно распоређена. Код ових композита, значајне вредности чврстоће и крутости могуће је постићи у уздужном смеру, с тим што су својства код композита ојачаних усмереним кратким влакнима изотропна.

Значајно је напоменути и једну од савременијих група композита, тзв. „угљеник-угљеник“ композите. Реч је о композитима који су добијени полагањем угљеничних влакана

у угљеничну матрицу. Значајни су такође и хибридни композити код којих се сусреће ојачање са барем два различита типа влакана.

Као што је раније поменуто, структурни композити се могу поделити у две основне групе: слојевите (тзв. ламинате) композите и сендвич конструкције. Својства ламината су привидно изотропна у два димензијама (површински гледано). То је омогућено слагањем више слојева високо анизотропног композита. Чврстоћа у сваком поједином смеру постиже се оријентисањем сваког слоја посебно. Сендвич конструкције се састоје од два чврста и крута слоја ламината између којих се по правилу налазе порозна језгра. На тај начин се постиже релативно висока чврстоћа и крутост уз релативно ниску густину [12].

Поред претходно наведених група композита, последњих година се све више помињу тзв. **хибридни композити** који су ојачани, не само једном врстом ојачавача, већ више. Композити ојачани на овај начин, било честицама, влакнима, вискерима и др. нано или микро нивоа, могу у великој мери надоместити недостатке претходно добијених композита. Висока тврдоћа и затезна чврстоћа су неке од битних карактеристика до којих овако добијени композити могу довести, као и слобода приликом избора и комбинације материјала за одређене конструкције у индустрији [15]. Нешто више о хибридним композитима наведено је у поглављу 5.

2.3 Избор материјала и распоред честица ојачавача

Најважнији фактор за успешно добијање композитних материјала јесте адекватан однос између материјала основе и ојачавача. С обзиром на саму тему рада, нагласак ће бити на композитима са металном основом. Најчешће коришћени метални материјали у виду основе за добијање композита су бакар, магнезијум, алуминијум, титанијум, легуре цинка и суперлегуре никла. Већина ојачавача су материјали малих димензија попут нано угљеничних влакана и керамичких честица.

Најчешће се лаки метали, као што су титанијум и магнезијум, бирају као метална основа, док се бакар и супер легуре на бази никла узимају у обзир за неке специфичне апликације. Ојачавачи, континуални или дисконтинуални, могу чинити 10 до 60 масеног удела композита. Континуално влакно или влакнасти ојачавачи могу бити: угљеник (C), силицијум-карбид (SiC), бор, алуминијум-триоксид (Al_2O_3) и др. Дисконтинуални ојачавачи се састоје углавном од SiC у облику вискера (w), честица (p) SiC, Al_2O_3 или титан-диборида (TiB_2) и кратких или насецканих влакана Al_2O_3 или угљеника [1].

Додатак нано честица доводи до значајног побољшања механичких карактеристика металне основе. Сама веза која се остварује између металне основе и керамичких честица има великог утицаја на модул еластичности јер првенствено утиче на способност преношења и дистрибуције оптерећења композита током деформисања. Унапређење квашљивости се може постићи [14]:

- повећањем површинске енергије чврсте фазе,
- смањењем површинских напона теченог метала,
- смањењем енергије везе између чврсте и течне фазе.

До стварања хемијских веза између магнезијумске легуре и SiC ојачавача може доћи уколико се растоп магнезијума изложи ултразвучним вибрацијама. Наиме, ултразвучне вибрације помажу разбијању гасних мехурова и силикатног слоја на површини SiC честица и чине њихову површину чистом, што унапређује квашљивост SiC и алумине. Према мишљењу Hashim-а [16] постоји неколико начина за унапређење квашљивости SiC честица у растопљеном алуминијуму:

- додавање легирајућих елемената материјалу основе,
- превлачење керамичких честица,
- претходном термичком припремом керамичких честица

С тога се може рећи да квашљивост керамичких честица ојачавача у растопима метала зависи од великог броја фактора и да не постоји сагласност у научном свету у погледу избора поступка унапређења квашљивости. С тим у вези, иако је знатно отежан посао инжењерима металургије, приликом добијања нанокомпозита са савршеним структурним и механичким карактеристикама, већина покушаја је била мање више успешна. Добијени материјали ће тако поседовати особине које треба испитати, како структурне и механичке, тако и триболошке. Међутим, постоји и велики број утицајних фактора који олакшавају или отежавају повољан распоред честица ојачавача у основном материјалу.

Најадекватнији критеријуми при избору керамичких честица у виду ојачавача су [14]:

- затезна чврстоћа, модул еластичности,
- густина, величина и облик,
- температура топљења,
- коефицијент термичког ширења,
- термичка стабилност,
- компатибилност са материјалом основе,
- цена и доступност на тржишту.

При избору одговарајућег керамичког ојачавача ове факторе треба посебно узети у обзир, али тек након одабира одговарајућег материјала за основу самог композита. Најчешће коришћене честице ојачавача су оксиди (Al_2O_3 , SiO_2), карбиди (SiC, B_4C), нитриди (Si_3Ni_4 , AlN) и борида (TiB_2).

Hashim је дошао до закључка да је, у циљу подешавања оптималних параметара процеса добијања композита са задатком равномерног распореда честица ојачавача у материјалу основе, потребно нагласити [17]:

- густина честица ојачавача, величина, облик и удео у композитном материјалу имају утицаја на распоред самог ојачавача
- карактеристике површина честица ојачавача могу олакшати или отежати квашљивост тих честица у металу основе,
- реолошке способности растопа металне легуре и густина ојачавача у растопу су последица реакција честица са растопом и са другим честицама,

- генерално, честице ојачавача заузимају простор између кристалних структура материјала основе, између дендрита или дендритних завршетака, па према томе што су мања растојања између кристалних структура и мање њихове величине, бољи је распоред честица ојачавача,
- гасни мехурови који настају током инфилтрације честица ојачавача или мешања резултоваће лошим распоредом честица, пошто се оне везују за гасне мехурове и као последица тога расте степен порозности.

Поред већ набројаних фактора, треба водити рачуна о брзини мешања и смеру ротације мешача, јер имају утицаја на карактеристике течења растопа основе. Такође, непожељна је појава вртлога на површини растопа, при већим брзинама мешања па се на основу тога може закључити да је веома битан и сам положај мешача. Врло је значајно да се током процеса мешања честице не задрже на дну посуде. Количина честица које ће се наћи на дну посуде су последица утицаја гравитације. На честице чија је величина испод 10 μ м гравитација готово да нема утицаја, док код честица већих од 100 μ м утицај је приметан и долази до значајног нагомилавања честица ојачавача на дну посуде, посебно при мањим брзинама мешања. Такође, услед мањих брзина течења растопа и центрифугалних сила које делују на честице приликом вртложног кретања растопа, долази до повећања удела ојачавача у непосредној близини зидова суда [18].

2.3 Примена композитних материјала

Композитни материјали, као што је раније поменуто, због својих побољшаних особина, пружају могућност широке примене. Последњих деценија направљено је мноштво нових композита са неким изузетно корисним особинама. Пажљивим избором материјала ојачавача и матрице, као и производним процесом којим се они спајају могу се добити композити својстава потребних за специјалне примене. Композитни материјали тако налазе примену у авио, аутомобилској и електронској индустрији, медицини, грађевинарству итд.

Композити метал-керамика, или метал-угљеник су погодни за примену у медицини јер су биокompatibilни, отпорни на корозију, хемијски инертни и добро подносе напрезање на истезање. Они се користе за израду вештачких импланта, попут срчаних зализака, кукова, импланта колена и др. Срчани залиски се праве од пиролитичког угљеника, а кукови од угљеник-полимер или угљеник-угљеник композита. Угљеник-полимер композитни материјали служе и за плоче за тзв. остеосинтезу, којима се делови кости причврћавају један за други. Механичке особине композита морају одговарати костима чиме се спречава деградација костију до које често долази када се користе металне плоче [1].

Значајно је напоменути и примену композитних материјала у грађевинарству и бродоградњи код којих се у великој мери користе тзв. сендвич конструкције, слојевити композити или само листови материјала (фолије, лимови), комбиновани са одговарајућим порозним материјалима (пенама) различитог порекла, те папира, алуминијума или неког другог материјала обликованог као пчелиње саће. При том су једни од најчешће

коришћених композитних материјала, у овим сферама, бетон (смеша цемента и шљунка) као шпер плоча, која се састоји од наизменичних слојева фурнира дрвета и спада у слојевите композите [12].

Композитни материјали налазе примену и у авиоиндустрији при изради спољашњих делова авиона где се користе арамид-алуминијум композити који поседују необичну комбинацију јачине, крутости, отпорности на корозију и мале тежине, а притом је побољшана и отпорност на крутост. За израду компоненти мотора се користе композити са металном матрицом док се угљеник-угљеник композити користе код делова који су изложени високим температурама, који могу да издрже и температуре преко 3000°C. Такође се и елисе хеликоптера израђују од композита [1].

Композити имају и широку примену и за израду делова аутомобила као што је ојачање аутомобилских гума, најчешће најлон, арамид или челичним влакнима, ради веће јачине и постојаности. Композити који се користе код израде делова кочница, мотора и мењача аутомобила, најчешће су алуминијумске основе са додатком 10-30% честица SiC или Al₂O₃ величине 10-20 µm. Овакве се честице користе и у оквиру брусних и резних плоча, импрегниране у полимерну или стаклену круту плочу. С друге стране, честице дијаманта се комбинују са металном матрицом приликом израде резних плочица [19].

Електрични контакти у прекидачима се праве од композитних материјала са честичним ојачањем попут волфрам-сребро композита који имају велику електричну проводљивост и отпорност на хабање. Такође се композити користе и за израду слојева за заштиту од интерференције електромагнетних таласа, с обзиром на то да се електромагнетно зрачење, посебно на високим фреквенцијама може мешати са електронским апаратима попут рачунара или уређаја у авионима итд.

Композити са арамид или карбонским влакнима се због велике крутости и мале тежине користе за израду спортске опреме, тј. реквизита, као што су скије, штапови за голф, весла, штапови за пецање итд, без обзира на своју високу цену [1].

3

КОМПОЗИТИ СА МЕТАЛНОМ ОСНОВОМ

Зависно од намене композита врши се одабир одговарајућег основног материјала и ојачавача на основу њихових структурних, механичких и триболошких карактеристика. Циљ је што више унапредити ове карактеристике материјала уз минималне трошкове. У савременом свету готово све се може купити, изразити новчано, те из тога проистиче закључак да је сва пажња научне јавности усмерена ка томе да се што више допринесе уштедама у било ком облику. Сходно томе, најчешће коришћени композити, поред полимерних, јесу они са металном основом.

Триболошке карактеристике композита на бази Zn/Al легура, детаљно су описане у истоименој монографији (*Бабић, Митровић*), док је у наставку дат кратак осврт на поделу композита и нанокompозита са металном основом.

3.1 Подела композита са металном основом

Композити са металном матрицом (MMCs – Metal Matrix Composites) представљају предмет истраживања научника још од 60-тих година 20. века због способности да обезбеде већу отпорност на хабање, више температурне границе од њихових основних метала и могу се обликовати тако да се добије повећана чврстоћа, крутост, топлотна проводљивост, отпорност на хабање и димензиона стабилност. Типични композити са металном основом садрже деформабилни метал као основу, тј. најчешће одређену легуру, а ређе чист метал, и круту керамику као ојачавач који се састоји од угљеничних, металних или керамичких додатака. С обзиром на металну основу композит задржава својства велике деформабилности, обрадивости и жилавости, док различити удео керамике, која улази у његов састав, омогућава велику чврстоћу и термичку стабилност. Током производње композита мешају се заједно матрица и ојачавач. Најзначајније карактеристике металних матрица видљиве су у различитим облицима, посебно у томе што метална матрица даје металну природу композиту у смислу топлотне и електричне проводљивости, производних процеса и интеракције са околином. Доминирајућа механичка својства матрице, као што су модул еластичности и чврстоћа у попречном смеру композита са усмереним ојачавачима, довољно су висока код неких MMC-а да је могуће једносмерно слагање у неким инжењерским конструкцијама [1,4,5]. Композити са металном основом могу бити ојачани честицама, кратким влакнима или пахуљама или слојевито, дугим влакнима [20].

Честицама ојачани MMC сматрају се веома значајним с обзиром на њихову изотропност, лакши начин израде и веома често мање трошкове добијања самог композита. Величина, количина, као и дистрибуција честица имају велики утицај на карактеристике ових композита. Истраживања су показала да с повећањем величине честица ојачавача затезна чврстоћа и деформабилност опадају [21].

3.1.1 Композити са алуминијумском матрицом

Највећи део истраживања усмерен је на алуминијум као метал матрице. Алуминијум представља најатрактивнији нежелезни метал матрице, посебно за употребу у авио-индустрији, где је тежина структурних компоненти битан чинилац. Веома су значајна топлотна својства алуминијумских композита, са проводљивошћу попут метала и са коефицијентом термичког ширења који се може снизити готово до нуле. Развијено је више врста ММС-а на основу алуминијума за примену у авио-индустрији. Главни разлог додавања ојачавача алуминијуму је ради повећања чврстоће, крутости или отпорности на замор, али обично се то постиже уз цену снижења других својстава [10].

Алуминијум може прихватити разне ојачаваче, као нпр. континуална, дуга влакна и разне честице, кратка влакна и вискера. Последња три су обично алуминијум-оксид, силицијум-карбид и силицијум-нитрид. Силицијум-карбид се као ојачавач у алуминијумским композитима бира због добре комбинације његових физичких својстава, расположивости и цене.

Бор/алуминијум је технолошки развијен композит са континуалним, дугим влакнима. Ова врста композита сједињује добру чврстоћу, крутост и ниску густину влакана са производном и инжењерском поузданошћу алуминијумских легура. Укупни пораст специфичне крутости борних влакана је готово шестсто пута већи у односу према било којем стандардном и инжењерском материјалу, укључујући челик, алуминијум, молибден и магнезијум, што представља предност у спречавању микросавијања влакана у матрици под притисним оптерећењем. Поред тога ове композите одликује и висока електрична и топлотна проводљивост, дуктилност, жилавост и незапаљивост. Стога се ови композити примењују приликом израде цевних везних делова структуре средњег трупа свемирског брода и хладне плоче у вишеслојним носачима електронских микрочипова.

Силицијум-карбид/алуминијум композити имају повећану чврстоћу и крутост, већу отпорност на хабање и бољу температурну стабилност у поређењу са неочврснутим алуминијумом, а без последица на тежину. Такође, поседују мањи коефицијент топлотног истезања чија се вредност може контролисати променом удела SiC. У поређењу са основним металом, композит задржава чврстоћу коју има на собној температури, на температурама до 260 °C.

Угљеник/алуминијум: развој ових композита почео је шездесетих година прошлог века из комерцијалних разлога, због чврстих и крутих угљеничних влакана. Угљенична влакна поседују низ својстава укључујући и модул еластичности до 966 GPa и негативни коефицијент термичког ширења од $-1,62 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Међутим, угљеник и алуминијум су неподобни материјали за производњу композита, пре свега због штетних реакција које се одвијају при добијању, због лошег „квашења“ угљеника растопљеним алуминијумом и оксидације угљеника. Теоријски C/Al ламинати, сложени под одређеним угловима, могу се добити, са циљем да се постигне коефицијент термичког ширења вредности готово нула, одговарајућим редоследом слагања и уделом влакана. У пракси се може постићи вредност коефицијента термичког ширења близу нуле, али је деформационо понашање сложено због

хистерезиса који се приписује пластичној деформацији у матрици током топлотног процеса [1, 22].

Алуминијум оксид/алуминијум композити имају повећану отпорност на хабање и на деформације због топлотног замора, као и смањени коефицијент термичког ширења. Такође се може рећи да нека од керамичких оксидних влакана нису скупа и омогућују боља својства од класичних алуминијумских легура. Дугачко влакно $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ производи се слагањем Al_2O_3 -трака са усмереном оријентацијом, стварајући тако форму која се ставља у калуп и натапа растопљеним алуминијумом уз помоћ вакуума. Веза ојачавач-матрица се постиже малим додатком литијума у растопљени метал [23].

Дисконтинуални силицијум карбид/алуминијум (SiC/Al) композити укључују материјале са SiC -честицама, вискерима, нодулама, листићима, плочицама или кратким влакнима у алуминијумској матрици. Одликује их висока димензиона стабилност или отпорност на деформисање под оптерећењем познатим као пузање. Што су ситније честице ојачавача, то је већа и отпорност на пузање. Такође, прилагођавањем удела ојачавача може се предвидети коефицијент термичког ширења повезаних компоненти. Чврстоћа и граница развлачења ових композита су до 60% веће од оних неочврснуте алуминијумске матрице. Истраживања механичких карактеристика SiC/Al са 20% вискера или 25% честичног ојачавача при повишеним температурама показују да композит може бити примењив у компонентама пројектованим за дуготрајно излагање температурама до 200°C и краткотрајно издржава температуру од 260°C [1].

Композити ојачани вискерима (SiCw/Al) су много скупљи од честичних јер пре свега монокристални вискери имају већу чврстоћу од осталих дисконтинуалних ојачавача као што су честице, поликристални листићи и насецкана влакна. Такође, сами поступци прераде метала могу усмерити вискере у металној матрици, а чврстоћа у уздужном смеру се повећава код истискиваних алуминијумских композита, јер се вискери настоје распоредити уздуж осе алата при пролазу материјала кроз алат.

Значајно је напоменути да су граница развлачења и чврстоћа влакана као и модул еластичности испитиваних узорака прецизног лива, већи у односу на неочврснуте алуминијумске узорке и расту с порастом удела SiC . Присуство тврдих честица SiC такође доводи до значајног пораста отпорности на хабање, како абразивно, тако и заморно [1].

У складу с претходним закључцима, као и претпоставком да се неким случајевима код нанокомпозита са алуминијумском основом могу јавити структурне несавршености, поставља се питање да ли микрочестице SiC могу довести до побољшања структурних карактеристика нанокомпозита као и отпорности на хабање.

3.1.2 Композити са магнезијумовом, титанијумовом, бакарном и матрицом суперлегура

Магнезијум композити развијени су да би се искористила готово иста својства као код алуминијумских матрица, разлика се огледа у тежини и отпорности на корозију. Густина магнезијума износи приближно две трећине густине алуминијума, али је активнији у корозионој средини. Магнезијум има мању топлотну проводљивост која је, суштински,

пресудна при његовом избору. Тренутно су у развоју три врсте магнезијумских композита: континуална влакна C/Mg за свемирске конструкције, кратка влакна Al_2O_3/Mg за делове аутомобилских мотора и дисконтинуална влакна SiC или B_4C/Mg за делове мотора и материјале у нисконапонској електротехници. Производња Mg композита са континуалним влакнима укључује наношење превлаке титан-бор за добијање композитних жица, наношење матрице на влакна PVD поступком или дифузионим спајањем влак/сендвич танких листова за добијање плоча.

Композити са титанијумовом матрицом се употребљавају, пре свега, због специфичне тврдоће титана на собној и на средњим температурама, и добре отпорности на корозију. У поређењу са алуминијумом, титан задржава чврстоћу на високим температурама. Чврстоћа при повишеним температурама SiC/Ti композита знатно је већа од оне класичног титанијума. Преласком са подзвучних на надзвучне брзине, дошло је до повећане употребе титанијума у авио-индустрији, као замене за алуминијум. Приликом производње ових композита јављали су се проблеми проузроковани великом реактивношћу титанијума са многим материјалима за ојачање. Међутим, титанијумови композити са дисконтинуалним ојачавачима имају предност у умереној крутости и чврстоћи при повишеној температури у односу на класичне титанијумове легуре, а такође пружају могућност производње техником металургије праха, те могу бити и економичнији за производњу од титанијумових композита са континуалним влакнима [1, 22].

Композити са бакарном матрицом се примењују са континуалним и дисконтинуалним влакнима, а сам бакар, као материјал основе, пружа потенцијалне могућности за композите од којих се захтева топлотна проводљивост и чврстоћа на високој температури, такорећи, својства која надмашују она код алуминијумских композита.

W/Cu-композити ојачани континуалним волфрамовим влакнима су први пут произведени 1950. године као истраживачки модел за проучавање понашања при деформисању, појави лома, жилавости и проводљивости у ММС-има. На основу своје високе чврстоће на температурама нижим од $950^{\circ}C$, W/Cu -композити сматрају се данас основним материјалима за облагање комора за сагоревање модерних ракетних мотора.

C/Cu-композити ојачани влакнима добили су на значају развојем угљеничних влакана. Бакар је добар проводник топлоте, али има велику густину и лоша механичка својства при повишеним температурама. Развијена су угљенична влакна са аксијалном топлотном проводљивошћу, при собној температури бољом од бакра. Додатак тих влакана бакру снижава густину, повећава крутост, повећава радну температуру и повољно утиче на коефицијент термичког ширења [1, 24].

Композити са матрицом од суперлегура су међу првима узети у обзир у циљу побољшања конструкције турбинских мотора и повећања радне температуре делова. Чврстоћа при високим температурама ММС суперлегура постигнута је само ојачавањем тешко топлјивим металима. Под тим се подразумевају влакна волфрама, молибдена, тантала, нобијума са саставом посебно прилагођеним тој намени. Најјача развијена влакна волфрамове легуре имају затезну чврстоћу већу од 2070 MPa при $1095^{\circ}C$ или више него шест пута већу од чврстоће до сада употребљиваних суперлегура у главном мотору $Sprase$

Shuttle-а (спејс-шатла). Већина ранијих радова на ММС суперлегурама усмерена је на проучавање компатибилности матрица-vlakно, односно код осталих ММС-а матрица-ојачавач [1].

Претходно наведене врсте композита са металном основом и истраживања изведена на пољу истих доводе до закључка да ће развој ових материјала вероватно достићи још виши стадијум с обзиром на то да комбиновање различитих својстава металне матрице и разних типова ојачавача могу довести до добијања идеалних карактеристика за тражене конструкције и делове у самој производњи, што даље доводи, како до великих уштеда, тако и до продуктивнијег рада.

3.2 Нанокompозити са металном основом

Основни циљ нано честица је да побољшају својства композита у односу на композите који су ојачани микро честицама. Нанокompозити са металном основом (MMNC – Metal Matrix Nano Composites) настају управо додавањем ових нано честица у виду ојачавача. Композити са нано честицама и нано угљеничним влакнима (CNT – Carbon Nanotube) најчешће су предмет истраживања последњих година, о чему сведочи и велики број објављених радова.

Ови композити поседују изузетне механичке и триболошке карактеристике и као такви имају велику примену у случајевима када је хабање елемената система важна карактеристика. Бројни истраживачи су се бавили испитивањем механизма хабања нанокompозита са металном основом.

Нанокompозити са металном основом допринели су побољшању тврдоће и отпорности на хабање [14], али сагледано у глобалу, остале карактеристике нису постигле очекиване вредности услед постојања извесних недостатака, као што су порозност и агломерација нано честица. Међутим, развој нових композита са добрим карактеристикама изазвао је велико интересовање научне јавности.

MMNC су показали бројне разлике на пољу карактеристика у поређењу са композитима ојачаним микро честицама. Неке од значајнијих разлика су [4]:

- Како се керамичке честице приближавају нано нивоу, тако се мењају њихове термичке карактеристике, као последица раста површинске енергије и различитог међуатомског растојања.
- Смањење димензија честица ојачавача на нано нивоу такође доводи до технолошких потешкоћа у испитивању истих материјала.
- Када се као ојачавач користе нано честице, услед агломерације нано честица, производња MMNC је знатно компликованија у односу на ММС.

Поред ових потешкоћа, MMNC показују потенцијал, те тако и даље привлаче пажњу истраживача. Мала запремина нано честица може помоћи одржању термичке и електропроводљивости, уз истовремено побољшање механичких карактеристика. Може се рећи да ће нано честице у основи утицати на процес очвршћавања и процесе термичке

обrade, који имају великог утицаја на микроструктуру и механичке карактеристике MMNC-а. Такође, присуство нано честица може зауставити процес омекшања (тј. уништавање дислокација) и додатно повезати границе зрна.

Дисперзијом нано честица Al_2O_3 у бакарној основи добија се нанокомпозит са одличном отпорношћу на високе температуре експлоатације, а да се истовремено задржавају добра термичка и електрична проводљивост [25].

Најчешће испитивани материјали основе за „MMNC“ у научним радовима су алуминијум, бакар, магнезијум, титанијум и гвожђе. Ојачавачи су у том случају углавном керамике, укључујући бориде, карбиде, нитриде, оксиде и њихове мешавине. Механичке, хемијске и физичке карактеристике како основе, тако и ојачавача, се морају узети у обзир приликом избора материјала за одговарајуће нанокомпозите, а управо су ове карактеристике материјала уско повезане са његовим триболошким карактеристикама. Управо због тога, у овом раду раду неће бити речи само о триболошким карактеристикама нанокомпозита, већ и о њиховим структурним, механичким и физичким карактеристикама. На пример, код „in-situ“ поступка добијања нанокомпозита, термичка стабилност керамичких честица је најважнија карактеристика на коју треба обратити пажњу приликом избора истих. Код „ex-situ“ поступка добијања најважнија је квашљивост између керамике и метала основе, и површинске везе које настају између ова два материјала. Квашљивост представља квалитет везе између честица ојачавача и материјала основе [26].

Из области нано композита највећи број радова се односи на поступке њиховог добијања. Ови поступци добијања могу се сврстати у две групе „in-situ“ и „ex-situ“ [20]. Код „in-situ“ поступка ојачавачи настају услед хемијске реакције између елемената или елемената и једињења током поступка добијања. Предности овог поступка су: добијање ојачавача који су термички стабилни; површине добијених честица ојачавача су чисте, што резултује веома јаким међумолекулским везама са материјалом основе; омогућена је дистрибуција честица у материјалу основе [26]. Код „ex-situ“ поступка, главна предност се односи на могућност добијања делова великих димензија. Услед слабе квашљивости између материјала основе и керамичких ојачавача и услед тенденције нано честица ка агрегацији, као резултат деловања њихових електростатичких и *Van der Waals*-ових сила током процеса мешања у течном фази, веома мали број ових нанокомпозита са металном основом оствари теоријски предвиђене механичке карактеристике.

Највећи проблеми које је потребно решити за успешну производњу нанокомпозита са металном основом, са освртом на преглед литаратуре испитивања великог броја научника, су следећи:

- дисперзија
- реактивност
- термичка стабилност
- квашљивост
- цена
- израда конструкционих елемената великих запремина.

Последњих пар година све више пажње се посвећује испитивању тзв. хибридних композита који се сматрају новом генерацијом композитних материјала, и потенцијално могу заменити композите са једноличним ојачањем, пре свега због унапређења физичких и механичких карактеристика. Управо тако, са све већим потраживањима индустрије, нано честице, у комбинацији са микро честицама ојачавача или евентуално неког другог типа ојачања, доводе до могућности коришћења ширег спектра специфичних карактеристика материјала. Иако до сада постоји врло мало радова на тему хибридних композита, са порастом интересовања расте и могућност ка ширем сазнању о карактеристикама и добијању ове врсте композитних материјала.

3.3 Нанокмполити са цинк-алуминијумском основом

Цинкове ливене легуре имају разноврсну примену у индустрији. Ниједна друга легура не пружа тако добру комбинацију јачине, чврстоће и крутости. Због својих способности ношења оптерећења веома често се користи за израду лежајева, а са друге стране је одликује изузетна економичност. Комерцијална употреба цинка проширена је развојем легура цинка са масеним садржајем алуминијума од 2,3 и 5 %.

Цинкове легуре имају добру способност ношења оптерећења и добре триболошке карактеристике, ниже температуре ливења и нижу цену коштања. Цинк-алуминијумска (ZA) легура садржи веома мали проценат бакра и због тога може бити економски и енергетски веома ефикасна замена за велики број обојених метала, поседујући већу јачину, бољу отпорност на хабање и нижу температуру ливења. ZA легура је веома важна легура за израду лежајева који раде у условима високих оптерећења и малих брзина. Услед добрих трибо-механичких карактеристика, мале густине, добре ливкости, добре обрадивости, велике јачине и тврдоће у ливеном стању, добре отпорности на корозију, малих иницијалних трошкова, енергетски ефикасног ливења, безбедна је по човекову околину, једнаких или чак и бољих карактеристика у погледу ношења оптерећења. Важан аспект који чини ове легуре привлачним је смањење трошкова 25 до 50% и 40 до 75% у поређењу са алуминијумом и калајном бронзом, респективно. Међутим, највеће ограничење ових легура је њихова инфериорност на повишеним температурама, изнад 100°C [4].

Значај у развоју ZnAl легура допринела је међународна организација за истраживање олова и цинка ILZRO (International Lead Zinc Research Organization). Наиме, у касним шездесетим годинама, у оквиру дела истраживања финансијски подржаних од стране ILZRO развијена је легура за гравитационо ливење са садржајем од 12 % алуминијума, а касније је преименована у ZA-12. Што је довело до наставка истраживања у том погледу од стране The New Jersey Zinc Company, где су дошли до стварања легуре цинка и алуминијума са 8 односно 27 %, тј. ZA-8 и ZA-27. Физичка својства ове три легуре су приказана у табели 3.1 док се према европској норми EN 1774-98 користе ознаке ZL8, ZL12 и ZL27. У поређењу са остале две, легуру ZA-27, због повећаног садржаја алуминијума одликује нешто већа топлотна проводљивост, топлотно ширење и електрична проводљивост. Такође се може нагласити да легура ZA-27 има за 44 % мању густину у односу на бронзу.

Табела 2.1 Хемијски састав ZA-27 легура [1]

основне компоненте	састав (%)		
	легура		
	ZA – 27	ZA – 12	ZA – 27
алуминијум	8,2 – 8,8	10,8 – 11,5	25,5 – 28,0
бакар	0,8 – 1,3	0,5 – 1,2	2,0 – 2,5
магнезијум	0,02 – 0,03	0,02 – 0,03	0,012 – 0,02
цинк	остатак	остатак	остатак
нечистоће (максималан садржај)			
гвожђе	0,065	0,065	0,072
олово	0,005	0,005	0,005
кадмијум	0,005	0,005	0,005
калај	0,002	0,002	0,002

ZA-27 легура која припада фамилији ZA легура испољава велику јачину и веома често се користи за израду лежајева и чаура, као замена за калајну бронзу због ниске цене коштања и једнаких или чак бољих карактеристика [1]. Поред тога, њена употреба за танкозидне одливке и компоненте за електричне, аутомобилске, индустријске и пољопривредне машине и уређаје, чини је популарном на пољу лежајева, компоненти отпорних на хабање, вентила, ременица итд.

Међу бројним техникама добијања композита са дисконтинуалним ојачавачима, ливење мешањем је опште прихваћено као најисплативија техника. Предност ове технике се огледа у једноставности, флексибилности и примењивости у масовној производњи и такође, ово је најекономичнија техника добијања композита од свих до данас представљених техника [28]. Код ове методе, након топљења материјала основе, изводи се и интензивно мешање у циљу стварања вртложног кретања на површини растопа и тада се додају ојачавачи на саму ивицу вртлога. Вртложно кретање се показало веома корисним у распоређивању честица у материјалу основе пошто разлика између унутрашњег и спољашњег притиска растопа увлачи честице унутар растопа. Када су у питању триболошке карактеристике ових композита, истраживачи [4] су закључили да инфилтрација честица ојачавача, значајно унапређује отпорност на хабање током клизања у условима без подмазивања. Генерално, присуство тврдих керамичких честица Al_2O_3 и SiC доприноси повећању отпорности на абразију два тела и абразију три тела, ерозиону корозију композита са ZA основом.

ДОБИЈАЊЕ КОМПОЗИТА

Током овог поглавља акценат је датен на добијање нанокомпозита, односно добијање нанокомпозита ZA-27, који су предмет испитивања овог завршног рада. Добијање нанокомпозита са ZA-27 металном основом уз додатак микрочестица SiC, који су директно испитивани помоћу нанотрибометра, нешто су ближе приказани.

Иако је жеља аутора овог завршног рада била да се потпуна пажња обрати на структурна, механичка и триболошка испитивања нанокомпозита ZA-27, који су предмет испитивања, то није било могуће с обзиром на то да није постојао адекватан број научних радова на ту тему, те су у глобалу представљена испитивања композита са металном основом. Испитивање легуре композита ZA-27 адекватно је представљено у докторској дисертацији „Анализа процеса трења и хабања нанокомпозита са металном основом“ (Џунић), као и у монографији „Триболошке карактеристике композита на бази Zn-Al легура“ (Бабић, Митровић), Ови радови су такође послужили као основа за лакше дефинисање нанокомпозита ZA-27.

4.1 Поступци добијања композита са металном основом

Поступци добијања композита са металном матрицом се могу поделити на примарне и секундарне. Синтеровањем од основних материјала, матрице и ојачавача, добијају се композити у виду примарних поступака. При томе се врши импрегнација ојачавача у матрицу у одговарајућој количини и на одговарајућа места и формирање адекватних веза између конституената. С друге стране, секундарни поступци обухватају све остале поступке потребне за прераду примарног композита у коначан део. У одређеним варијантама оба поступка се одвијају истовремено, у зависности од жељеног коначног производа и коришћеног поступка производње [10].

Један од најосновнијих проблема приликом добијања композита јесте компатибилност матрице и ојачавача приликом њихових приањања. Код мање компатибилних материјала мора се извршити корекција, односно прилагођавање њихових својстава. Код неких композита, веза ојачавача и метала основе је слаба, те се мора појачати. Код композита произведених од реактивних конституената треба избегавати прекомерну активност на међуграници која може ослабити својства материјала. Тај проблем се обично решава површинском обрадом или превлаком ојачавача или прилагођавањем својстава легура металне основе.

4.1.1 Поступци у чврстом стању (Solid State Processing)

Ови поступци се одвијају на нижим температурама јер постоји могућност боље контроле термодинамике процеса. Две главне групе ових поступака су дифузионо спајање материјала у облику танких слојева и синтеровање. Процеси наношења матрице у којима се

материјал матрице наноси на влакно, укључују електрохемијско превлачење, плазма спреј поступак и физичко таложење из гасовите фазе. После процеса наношења, често је потребан следећи корак сједињавања као што је дифузионо спајање.

Дифузионо спајање се одвија на повишеној температури и високом притиску. Уколико степен дифузије није ограничен може доћи до пораста нежељених крхких фаза на међуповршини. Један од начина ограничавања времена дифузије је истискивање слоја влакана и матрице кроз алат. Такође се може применити и топло ваљање, али у том случају деформација се мора ограничити да би се смањило померање влакана ојачавача и избегла оштећења. Повишене температуре се користе да би се олакшало течење матрице, али се мора избећи прекомерно загревање које може довести до хемијске реакције влакана. Недостатак ових поступака је што захтевају врло чисте површине пре покушаја спајања. Обично је неопходно претходно чишћење саставних материјала и одвијање поступка у вакууму.

Високо-температурна синтеза (Self-Propagating Synthesis-SPS) топлим пресовањем (Hot Pressing, HP) је процес којим се производе композити мале порозности и тродимензиалном структуром између интерметалних спојева и металних матрица, конкуренте цене и једноставности. На овај начин могу се добити нпр. метални композити $\text{Al}_3\text{Ti}/\text{Al}$. Као полазна сировина се користе прах алуминијума и титан-оксида (TiO_2). Присуство алуминијума у течной фази је најбољи начин за попуњавање пора. У тој реакцији, вишак алуминијума служи за контролу порозности композита и олакшавање процеса синтезе. Део метала се потроши у реакцији за стварања интерметалног споја, а остатак који је течан попуњава поре у матрици за време синтеровања и повећава густину композита. Употреба притиска и реакције синтезе омогућава смањење порозности и контролу геометрије пора као и равномерну расподелу честица ојачавача.

Металургија праха (Powder Metallurgy - PM) је процес повезивања праха са честицама, плочицама или вискерима ојачавача. Два или више компонента се мешају, а понекад и уз помоћ везива. Керамичке честице које треба да осигурају високу чврстоћу композита су реда величине $5\mu\text{m}$, док је величина праха легуре матрице (обично алуминијум или магнезијум) од 20 до $40\mu\text{m}$. Разлика у величини честица праха омогућава стварање непрекидне мреже малих керамичких честица око већих зрна матрице. Тако настају микроструктурно нехомогена подручја. Стварањем мреже, настала порозност мора се попунити растопљеном легуром матрице током сједињавања (топло пресовање). Композити произведени на овај начин су врло високе цене, као и повећане чврстоће и крутости. Кораци самог поступка обухватају:

- просејавање брзо очврслих честица,
- спајање честица фазом или фазама за ојачавање са или без везива,
- очвршћавање смесе ојачавача и матрице на око 75% густине,
- истискивање гаса и завршно сједињавање истискивањем, ковањем ваљањем или неком другом топлим обрадом.

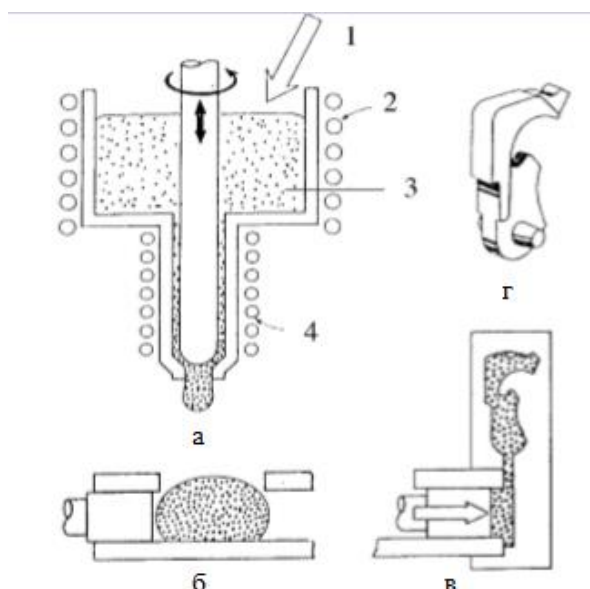
4.1.2 Поступци у течном стању (Liquid Processing)

Како би се извршило адекватно повезивање матрице и влакана, неопходно је да растоп из матрице тече у међупросторе влакана, како би се обезбедило потпуно покривање влакана. За такав поступак, користе се тзв. дубоке купке, а „квашење“ влакана и избегавање превелике хемијске реакције између влакана и матрице захтева претходну обраду истих, најчешће превлачењем, којим се штите влакна од евентуалне хемијске реакције при повишеним температурама. Влакна са превлаком се затим провлаче кроз купку растопљеног алуминијума, а чије продирање између влакана обезбеђује раздвајање истих, као и везну међуповршину између влакана и матрице.

Ливење у калуп је најчешћи од свих поступака за производњу велике количине делова уз најнижу цену, при чему се користе различите технике ливења и припреме растопа попут:

- Ливење мешањем (Stir Casting)
- Ливење гњечењем (Squeeze Casting)
- Ливење у получврстом стању (Rheocasting, Compocasting)

Реокастинг поступак представља методу добијања композита код које се дендритни, полуочврсли растоп неке легуре трансформише у више или мање недендритну двофазну смешу. Овој смеси је могуће мењати привидни вискозитет. Наведена појава отвара могућност изливања смеше у одређену форму под притиском, ради добијања готових одливака, или гравитационо, за добијање недендритних ингота, које је могуће прерађивати поступцима пластичне прераде као што су екструзија, ковање и ваљање. Шематски приказ реокастинг поступка дат је на слици 4.1 [1].

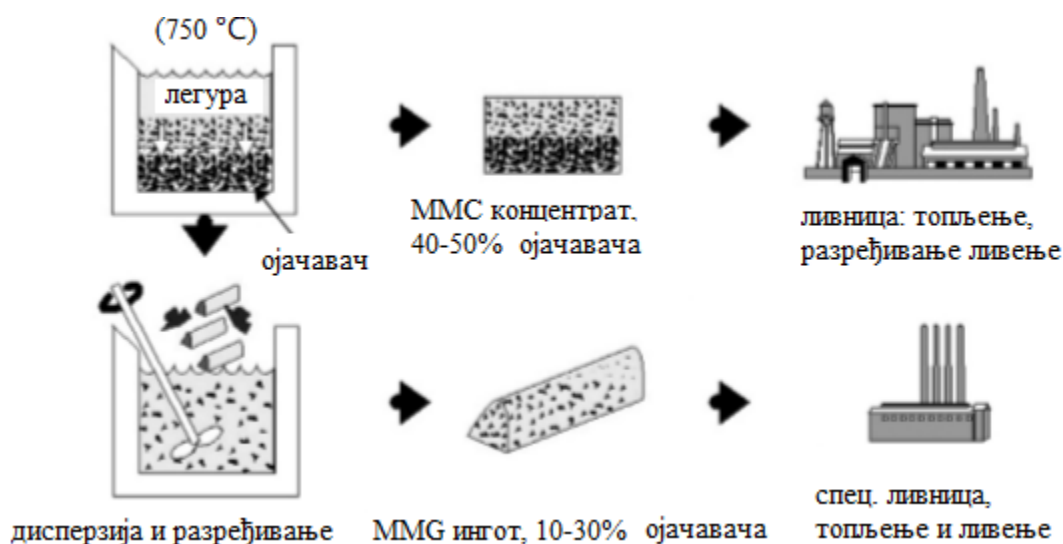


Слика 4.1 Шематски приказ реокастинг поступка [1]

а. Континуирани реокастер, б. Комора уређаја за ливење под притиском, в. Убризгавање полуочврстог растопа у алат, г. Одливак, 1. Улаз растопа, 2. Грејач горње коморе, 3. Растоп, 4. Грејач доње коморе

Реокастинг поступак је веома погодан за добијање композита са металном основом уз додатак честица или кратких влакана материјала као што су Al_2O_3 , SiC и други. Погодност се заснива на могућности одржавања оптималног вискозитета полуочврслог растопа током мешања, уз истовремено додавање честица ојачавача и њиховог задржавања у маси основе. Друга варијанта поступака ливења у полуочврстом стању, компокастинг поступак, поменут је у наредним поглављима.

Инфилтрација метала под ниским притиском (Pressureless Metal Infiltration) је поступак, власништво АМ LANXIDE-а, познат под различитим заштићеним именима. Првим развијеним поступком, композити се производе инфилтрацијом слоја честица Al_2O_3 растопљеним металом који је изложен оксидационој атмосфери. Материјал матрице насталог композита је састављен од смесе продуката оксидационе реакције и неоштећене алуминијумске легуре (LANXIDETM). Новијим поступком PRIMEX CONCENCRATETM производи се материјал који се касније може претапати и користити у ливницама за производњу делова од алуминијумског MMC-а. Поступак обухвата инфилтрацију алуминијума у масу керамичких честица за ојачање, слика 4.2 [1].



Слика 4.2 Шема производње MMC-а PRIMEX инфилтрацијом [1]

Инфилтрација је праћена „*in situ*“ стварањем јединствене површинске превлаке на честицама ојачавача. Превлака омогућава потпуно „квашење“ честица и повољне услове за течење растопа код кога вискозност остаје стабилна недељама при нормалној температури ливења, уколико нема недостатка „квашења“. Типичан удео ојачавача у концентрату је 40-50 %, а остатак је алуминијумска легура матрице. Ливнице које користе овакав концентрат могу га саме разредити јефтинијим алуминијумом, а разређен композит, припремљен за ливење, обично садржи 10-30 % керамичких честица, у зависности од захтеваних својстава и примењеног поступка ливења. Тако добијен растоп је хомоген и стабилан.

Алуминијумски метални композити ојачани крупнијим честицама SiC показују изузетну отпорност на ерозију суспензијама, а они са честицама Al_2O_3 су потенцијални

материјал за примену у производима где се тражи већа чврстоћа и жилавост. Композити $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ су крући, чвршћи од неочврснуте легуре и задржавају добру ломну жилавост и поред мање дуктилности.

Физичко таложeње из гасовите фазе (Physical Vapour Deposition-PVD) обухвата низ поступака укључујући испаравање електронским снопом. Магнетрон таложeње и електро-превлачење су поступци којима се производе композити са узастопним наношењем слојева матрице на влакна ојачавача. PVD технике захтевају пуно мање загревања влакана од инфилтрације растопљеним металом. Температуре површине су обично испод $200\text{ }^\circ\text{C}$. Та се техника увелико користи за производњу C/Al композита [1].

Ове технологије, заједно са технологијама за производњу делова од композита са керамичком матрицом су заштићене низом патената. У свету постоји више од 2700 патената из тог подручја.

4.2 Добијање нанокомпозита

Структурне, механичке и триболошке карактеристике композита са нанометарским ојачавачима знатно су боље него карактеристике композита са микрометарским ојачавачима. Међутим, унапређење карактеристика ових композита у многome зависи од хомогеног распореда честица ојачавача [29]. Постоји велики број фактора који утичу на распоред честица ојачавача у металној основи материјала. Ови фактори се односе на:

- реолошко понашање основне легуре
- стапање честица ојачавача са металном основом и њихов распоред у материјалу
- интеракцију материјала основе и ојачавача
- мењање распореда честица ојачавача пре, током и после и мешања као и током фазе очвршћавања.

Површинске карактеристике ојачавача су од суштинског значаја, као и разлика у густини фаза композитних материјала, тј. основе и ојачавача. До равномерног распореда нанометарских честица керамике у растопљеном материјалу је веома тешко доћи, услед велике вискозности, слабе квашљивости растопљених метала и великог односа површине и запремине нано честица ојачавача. Приликом додавања честица ојачавача у растопљени метал основе, доћи ће до стварања разлике у густини између честица ојачавача и растопљеног материјала основе, тако да распоред честица није равномеран јер честице притом теже агрегацији у стварању кластера [30]. Врло је значајно додати да се утицај гравитационог ефекта може занемарити, с обзиром на то да су нано честице керамичких ојачавача у потпуности окружене растопом основног материјала.

Развој композитних материјала пропраћен је откривањем и усавршавањем великог броја метода и поступака за добијање истих, односно остваривањем услова постизања равномерног распореда ојачавача у материјалу основе. С обзиром на то да постоји велика разлика између микро и нано ојачавача, многе ове методе изискивале су значајна

прилагођавања, ради постизања равномерног распореда и добијања жељених карактеристика нанокомпозита. Бројне од тих метода су [4]:

- механичко млевење, као поступак за добијање финих прахова,
- ливење, које се огледа у загревању материјала основе изнад температуре топљења при чему се додају одређени ојачавачи применом различитих поступака млевења,
- металургија праха, као једна од веома коришћених техника за добијање нанокомпозита у виду праха
- инфилтрација притиском, техника која се своди на припрему порозне структуре ојачавача чије се поре касније испуњавају течним металом
- хемијски метод
- процес умешавања трењем
- везивање ваљањем

Постоје бројна истраживања и тумачења ових метода. Међутим, метода и сам принцип добијања нанокомпозита ZA-27 од веће је важности, пре свега јер су испитани материјали добијени управо тим поступком. С тим у вези неће бити осврта на целисходност претходно наведених метода и поступака.

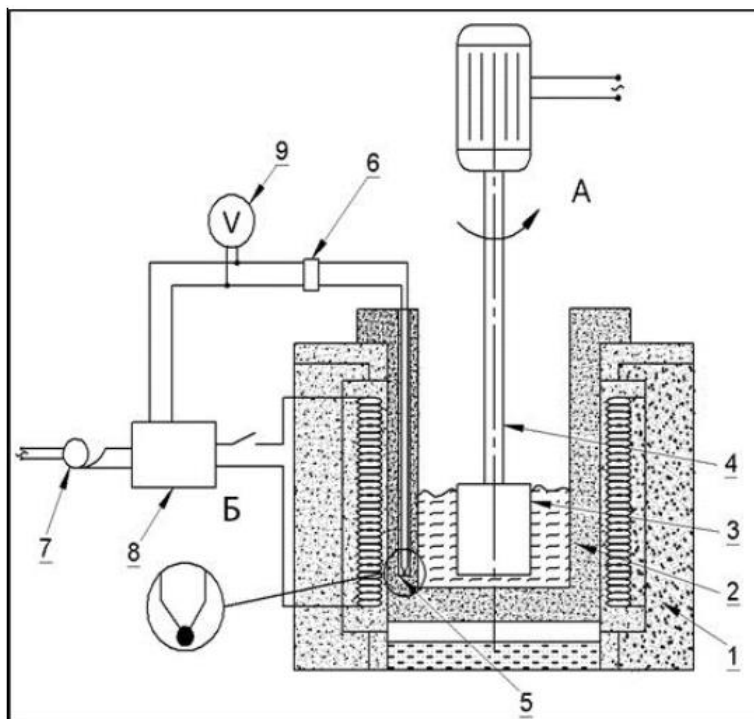
4.3 Поступак добијања нано/микро композита са ZA-27 основом

Испитивани нанокомпозити ZA-27 легура добијени су компокастинг поступком. Компокастинг поступак подразумева инфилтрацију честица секунадрних фаза у металну основу која је у полуврстом стању (на некој од температура између солидуса и ликвидуса). Поступак је карактеристичан по томе што се керамичке честице ојачавача додају током мешања металне основе у полуврстом стању. Предност овог поступка у односу на друге поступке добијања композита се огледа у томе што за његово извођење честице ојачавача се не морају претходно припремати, тј. могуће је добити композите са честицама које нису квашљиве у растопима метала. Даља прерада материјала добијених компокастинг поступком могућа је применом технологија као што су: ливење под притиском, пресовање, ваљање и ковање.

Компокастинг поступак се успешно примењује за добијање композита на бази легура ZA-27 и уз додатак керамичких честица ојачавача Al_2O_3 , као и честица графита. Да добијање и испитивање композитних материјала има велику традицију у Србији потврђује неколико докторских дисертација на ту тему. Најопштије речено, заједничко за ZA-27 легуре је да је реч о легурама цинка, односно алуминијума за ливење, које дендритно очвршћавају. Облик и величина дендрита зависе од брзине очвршћавања, док сама брзина очвршћавања растопа након изливања зависи од начина ливења (нпр. при ливењу у калупе испуњене ливачким песком, због термичких карактеристика материјала, мања је брзина очвршћавања у односу на брзину која се постиже ливењем у кокилама). Са друге стране, облик и величина дендрита примарних фаза утичу на механичке особине добијених одливака.

Компокастинг поступак добијања не захтева скупе припремне фазе ојачавача и честице ојачавача се релативно лако инфилтрирају у растоп основне легуре, самим тим су и трошкови добијања композитних материјала нижи [4].

За добијање нанокомпозита коришћена је опрема на слици 4.3. Приказана опрема се састоји из три дела: А) процесни део, Б) део за мерење температуре, контролу и регулацију температуре, В) део за мерење и контролу електричних параметара рада мешача.



Слика 4.3 Шема апаратуре за топљење ZA-27 легуре за израду композита

А- процесни део, Б-део за контролу и регулацију температуре.

1-електроотпорна пећ, 2-лонац од алумине, 3-активни део мешача, 4-вратило, 5-термо-пар, 6-хладан спој термо-пара, 7-аутотрансформатор, 8-регулатор температуре, 9-контролни мерач напона [1].

Након поступка мешања и хлађења растопа, у циљу смањења порозности и повећања компактности одливка примењује се поступак топлог пресовања.

Хемијски састав (основни елементи) легуре на бази које су израђени испитивани нано/микро композити, приказан је у табели 4.1, који одговара стандарду „BS EN 12844:1999“. Нечистоће (Fe, Sn, Cd и Pb) су у границама прописаним истим стандардом. Легура је произведена у ливници РАР-Батајница д.о.о., која је партиципant на пројекту у оквиру кога су ова испитивања извршена.

Табела 4.1 – Хемијски састав полазне легуре ZA-27

Назив легуре	Хемијски састав (масени %)			
	Al	Cu	Mg	Zn
ZA-27	25-27	2 до 2.5	0,015-0,02	Остатак

Нано/микро композити са основом од ZA-27 легуре уз додат.ак 0,5% масеног удела Al_2O_3 честица величине 20-30 nm и микрочестица SiC масеног удела 3% и 5%, величине 40 μm , добијени су компокастинг поступком у две фазе. Прву фазу чинила је припрема полуочврслог растопа, инфилтрација честица ојачавача, мешање полуочврслог растопа композита са циљем добијања повољног распореда честица и изливање у предгрејану челичну кокилу. Припрема растопа за инфилтрацију вршена је на следећи начин: ZA-27 легура стопљена је у електроотпорној пећи и предгрејана на 570°C (око 80°C изнад температуре топљења) ради чишћења шљаке. Након тога је растоп хлађен у пећи (брзина хлађења 5°C/min) до температуре од 475°C (температура испод ликвидус температуре) кад је у њега уроњен активни део мешача облика плоче. Мешање је започето брзином радног дела мешача од 50 o/min. По достизању температуре од 465°C (задата радна температура компокастинг поступка) повећана је брзина мешача на 500 o/min. При овим параметрима полуочврсли растоп ZA-27 легуре је мешан 5 минута ради хомогенизације и олакшања инфилтрације честица ојачавача. Затим је извршена инфилтрација нано/микро честица, која је трајала од 3 до 5 минута у зависности од удела истих, независно од врсте честица.

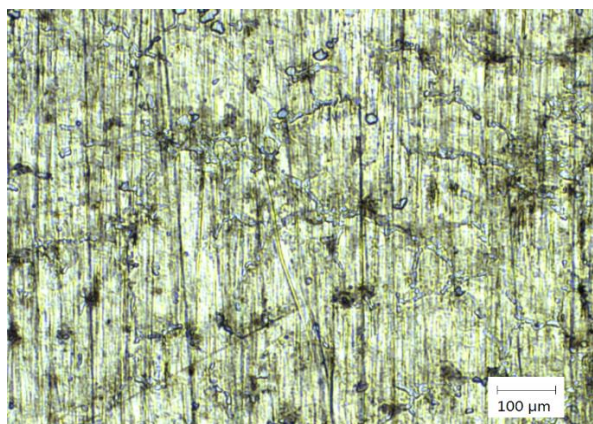
По завршеној инфилтрацији, извршено је кратко хомогенизационо мешање за сваку фракцију у трајању од око 3 минута и при брзини обртања мешача од 500 o/min. После тога је, независно од масеног удела и врсте наночестица примењено интензивније мешање у трајању од 15 минута при брзини од 1000 o/min, на горе наведеним температурама које су зависиле од масеног удела ојачавача. Изливање је извршено у челичну кокилу предгрејану на 350°C. Добијени су одливци нанокомпозита димензија 30 x 20 x 8 mm, који су након сечења подвргнути топлом пресовању. Топло пресовање је извршено применом посебно израђеног алата од специјалног ватроотпорног челика у температурној области β фазе на температури од 350°C. Пресовање је извршено притиском од 250 МПа. Добијени су узорци димензија 30 x 20 x 8 mm. С обзиром на то да се испитивање вршило при цикличном кретању како би се олакшао процес испитвања, узорци су преполовљени.

Детаљан опис рада приказане апаратуре и самог компокастинг поступка, као и претходно описаних поступака добијања композита (Spray Deposition, Rapid-Solidification processing-RSP, итд.), дат је у монографији „Триболошке карактеристике композита на бази ZnAl легуре“, чији су аутори *Бабић* и *Митровић* [1].

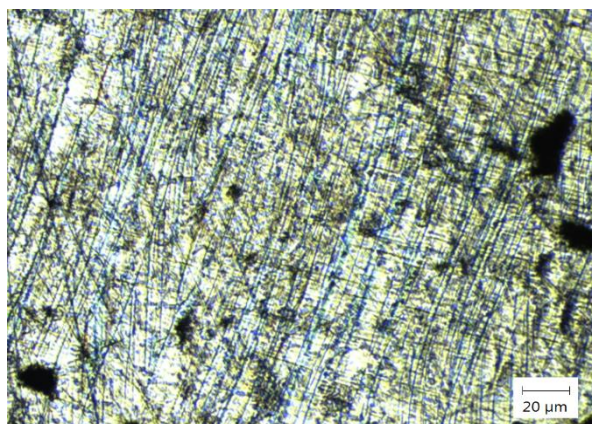
Зарад добијања узорака спремних за испитивање, даље је спроведена завршна обрада брушењем помоћу SiC водоотпорног брусног папира. Брушење је извршено кроз неколико фаза:

1. брушење помоћу брусног папира са финоћом зрна 320P
2. брушење помоћу брусног папира са финоћом зрна 640P
3. брушење помоћу брусног папира са финоћом зрна 1200P
4. брушење помоћу брусног папира са финоћом зрна 2000P
5. брушење помоћу брусног папира са финоћом зрна 3000P

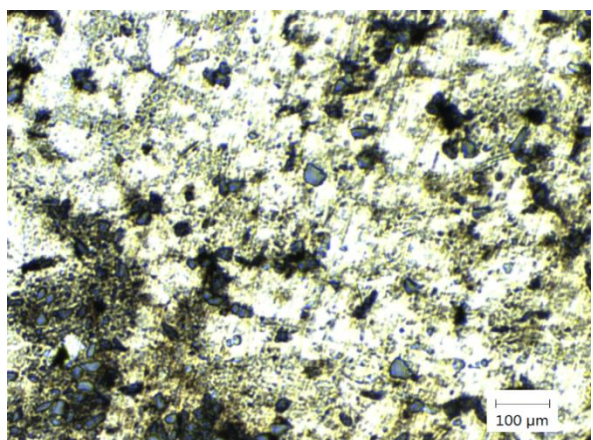
Након брушења извршено је полирање узорака помоћу брусног папира, честица величине 0,4 μm .



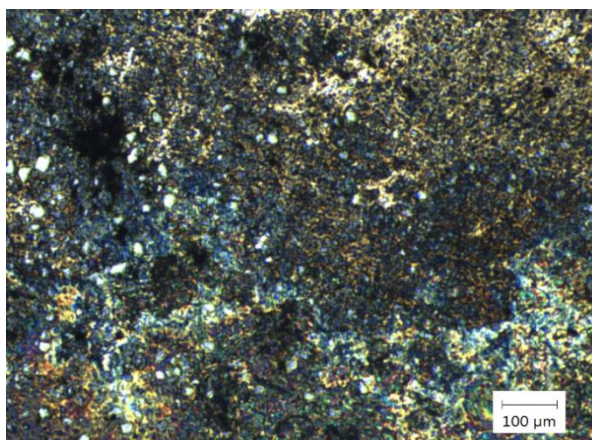
Слика 4.4 Изглед површине ZA-27
металне основе



Слика 4.5 Изглед површине
нанокомполита ZA-27+0,5% Al₂O₃



Слика 4.6 Изглед површине нанокомполита
ZA-27+0,5% Al₂O₃+3% SiC



Слика 4.7 Изглед површине нанокомполита
ZA-27+0,5% Al₂O₃+5% SiC

ПРЕГЛЕД АКТУЕЛНОГ СТАЊА НАНОКОМПОЗИТА

Током овог поглавља представљено је актуелно стање на пољу испитивања композитних материјала, а више пажње је дато нанокомпозитима и њиховим ојачавачима и наноструктурним материјалима. Литературни преглед испитивања триболошких карактеристика композита, у виду испитивања које су спровели бројни научници ближе одређује механичке и структурне карактеристике материјала које се најчешће доводе у везу са триболошким испитивањима, тј. резултатима триболошких испитивања, што је и приказано у овом поглављу.

5.1 Структурне, механичке и триболошке карактеристике нано/микро композита

Композитни материјали су као предмет истраживања привукли значајну пажњу истраживача, а све са циљем да се испуне основни задаци трибологије као науке и технологије. Задаци се огледају у спречавању губитка енергије у триболошким системима, у уштеди исте, као и уштеди материјала до чијег губитка долази услед процеса хабања у процесима релативног кретања између елемената трибомеханичких система. С обзиром на све то било је потребно развити одговарајуће методе добијања нанокомпозита, тј. одговарајући распоред ојачавача у материјалу основе.

Као што је претходно речено, велики удео у испитивањима композита заузимају композити са полимерном матрицом. Поред њихове примене у спорту, полимери у великој мери налазе примену и у зубној протетици. Из тог разлога се све више пажње посвећује коришћењу различитих типова ојачавача полимерних матрица, као и компатибилности са истим. Било да је у питању један или више типова ојачавача, експерименти се такође односе и на одабир адекватне матрице која одговара траженим захтевима и условима експлоатације. Поред тога што су знатно лакши од металних материјала, предности полимера у односу на металне материјале, као што су самоподмазивање, отпорност на корозију и једноставнији процес добијања, доводе до тога да се све чешће користе као замена за металне материјале, пре свега у условима интензивног трења и хабања.

Boon-Peng, Hazizan u Ramdziah вршили су испитивање полиетилена ултра-високе молекуларне тежине (ultra-high molecular weight polyethylene - UHMWPE) ојачаног микро влакнима цинк-оксида, као и нано честицама цинк-оксида (ZnO). UHMWPE представља материјал који се све чешће модификује и користи као основа код композита, пре свега због високе отпорности на хабање и ниског коефицијента трења, користи се у гранама зубне протетике, ауто-индустрији и др.

Испитивани UHMWPE композит, коме је додат одређени проценат ојачавача ZnO испитиван је *pin-on-disc* методом уз коришћење диска од челика са превлаком од SiC, у виду абразивног контра-тела. Испитивани узорци, са додатком микро честица величине нешто

мање од $1\mu\text{m}$, и нано честица величине незнатно мање од 100nm , подвргнути су различитим оптерећењима 10-30N у условима клизања без подмазивања, а резултати су довели до појаве одређене количине абразивног хабања у зависности од нормалне силе и коефицијента трења.

Табела 5.1 Композиција UHMWPE/ ZnO композита [36]

Назив композита	Врста матрице	Проценат удела ојачавача	Величина честица
P0	UHMWPE	0 wt% (pure UHMWPE)	–
M5	UHMWPE	5 wt% ZnO	$< 1\mu\text{m}$
M10	UHMWPE	10 wt% ZnO	$< 1\mu\text{m}$
M15	UHMWPE	15 wt% ZnO	$< 1\mu\text{m}$
M20	UHMWPE	20 wt% ZnO	$< 1\mu\text{m}$
N5	UHMWPE	5 wt% ZnO	$< 100\text{nm}$
N10	UHMWPE	10 wt% ZnO	$< 100\text{nm}$
N15	UHMWPE	15 wt% ZnO	$< 100\text{nm}$
N20	UHMWPE	20 wt% ZnO	$< 100\text{nm}$

Добијени резултати показали су да се додавањем микро/нано честица ојачавача у било којој количини могу побољшати триболошке карактеристике UHMWPE композита. Такође се може приметити значајно смањење појаве ширих трагова хабања, налепа и бразди код композита који су ојачани у односу на чист UHMWPE. Код композита са микро честицама најбоље су се показали они са 5-10 % ZnO, док су код нанокмползита најбоље карактеристике што се тиче хабања и коефицијента трења уочене код оних са 10 % ојачавача. Такође је утврђено да долази до већег губитка материјала приликом повећања силе и брзине, што је и могуће јер долази до повећања температуре у зони контакта. Међутим, приликом поређења композита са микро и нано ојачањима, може се утврдити да са смањењем величине честица долази и до смањења коефицијента трења. Може се такође уочити и појава паралелних бразди у правцу клизања, насталих због механизма абразивног хабања, што је утврђено коришћењем SEM анализа трагова хабања [36]. Поред тога, површине које настају након контакта код нанокмползита ојачаних ZnO честицама имају значајно мање неравнине, те су само површине финије и омогућавају незнатније даље хабање површина у контакту.

У протеклој деценији значајнија пажња истраживача осврнута је додавању угљеничних нано влакана материјалима или легурама у циљу побољшања механичких и триболошких карактеристика, из разлога што имају изузетне механичке карактеристике. Zhou [37] је истраживао угљенична нано влакна и њихов утицај на триболошке карактеристике алуминијумске основе. Показао је да су угљенична нано влакна равномерно распоређена у материјалу основе и да се са повећањем удела ојачавача смањује коефицијент трења, а потом и хабање материјала и то у вредности до 20%. Такође, да долази и до унапређења триболошких карактеристика, у погледу драстичног смањења хабања и драстичног смањења коефицијента трења потврдили су и други истраживачи, и то не само због присуства нано ојачавача, већ и због смањења величине кристалног зрна материјала основе [38]. Исти аутори су доказали да оптималан масени удео угљеничних нано влакана

у погледу најмањег хабања износи 4.5%. Такође, са повећањем нормалног оптерећења расте коефицијент трења, а опада са порастом брзине клизања.

Веома значајну примену у индустрији налазе и керамичке микро/нано честице које се наносе на металну основу у виду превлака, стварајући на тај начин тврди слој на површини који доводи до побољшања постојаности материјала, као и његове отпорности на хабање. Све чешће се као превлаке материјала користе и композити на бази алуминијума и никла са додатком керамичких честица. Никл и његове легуре се у индустрији, већ дуже време користе у виду заштитних превлака због своје отпорности на хабање и корозију. Међутим, чист никл је материјал веома мале тврдоће и чврстине те се не може као такав користити у условима интензивног хабања и абразије. С тим у вези, додају му се керамичке честице у виду ојачавача. Те се тако овакви композити, пре свега базирани на Ni-B, Ni-Co, Ni-W and Ni-Mo основи, а ојачани одређеним керамичким честицама, користе као узорци за испитивања.

Mahtab, Alireza, Elyad [39] вршили су испитивања Ni-B композита са додацима микро честица величине 3 μm SiC, као и нано честица величине 100 nm SiC, помоћу тестова микро тврдоће, SEM и EDS технологије (Scanning Electron Microscopy, Energy Dispersive Spectroscopy), у циљу одређивања механичких и триболошких карактеристика истих, као и њиховог поређења. Композитне превлаке добијене су електро депозицијом у модификованој Ватовој купки (Watts bath). У оба случаја, код композита са микро честицама, као и композита са нано честицама дошло је до повећања дебљине превлаке са повећањем густине честица. Такође, уочена је финија зрнаста структура код нанокompозита. Нанокompозити су се показали као материјали веће тврдоће и отпорности на корозију и хабање у односу на микро композите, пре свега због хомогеније структуре такве превлаке, као и присуство агломерата и веће густине нано честица.

Механичке и триболошке карактеристике композитних превлака испитиване су од стране неколицине истраживача са Ланжоу института за физичку хемију (*Lanzhou Institute of Chemical Physics*). Испитиване су превлаке у виду мешавине композита са микро, односно нано честицама Al_2O_3 ојачавача. Нано честице алуминијум-оксида додате су композитној превлаци са микрочестицама Al_2O_3 помоћу ултрасоничне дисперзије, не би ли се тако добила превлака у виду мешавине, тј. хибридног композита, и на тај начин избегле грешке које се могу јавити код микрокомпозита и побољшале његове карактеристике. Превлаке су добијене помоћу атмосферске плазма-спреј технике наношења (atmospheric plasma spraying) масеног удела од 0, 3, 5, и 10 % нано честица Al_2O_3 респективно. Испитивање је вршено помоћу *ball-on-disc* трибометра, са контра телом у виду куглице од нерђајућег челика. Дошли су до закључка да се са повећањем удела нано честица Al_2O_3 код композита са претходно додатим микро честицама повећава и хомогеност структуре хибридног композита. Такође, комбинацијом микро и нано честица може се смањити хабање контра тела као и отпорност на хабање саме подлоге [40].

Код композита са микрометарским честицама ојачавача примећени су дубљи кратери и на основу тога се може рећи да је присутна деламинација, као маханизам хабања, а да је у мањем обиму присутна и абразија. Ови композити имају и мање вредности

релативне густине и тврдоће, што указује на хетерогеност њихове структуре. Ако се ово узме у обзир, долази до деформационог ојачања током хабања, и то као резултат нагомилавања дислокација око хетерогености у подповршинском слоју [4]. Нагомилавање дислокација може узроковати настанак и развијање пукотина испод контактне површине, што касније може довести и до уклањања материјала са контактних површина у виду пахуља. Потврда да је реч о деламинацији је и недостатак гвожђа на EDS спектру. Како деламинација доминира тако је трансфер гвожђа са челичног диска на површину композита минималан [40].

Hosseini [41] је испитивао утицај величине ојачавача на триболошке карактеристике. Материјал основе, Al6061, подвргнут је поступку млевења и то 30 сати, након чега му се додају честице ојачавача и млевење бива настављено још 15 сати, након чега се добија композитни прах. Честице ојачавача Al_2O_3 су различитих величина, 30 nm, 1 μm и 60 μm . Након млевења до величине кристалног зрна, алуминијумске матрице су: 41, 53, 59 nm, ове вредности одговарају добијеним композитима са различитим величинама честица ојачавача. Резултати су показали да се релативна густина смањује са смањењем величине честица ојачавача, а то истовремено прати и повећање вредности тврдоће. Услед повећања тврдоће, на основу Арчардове једначине се може закључити да ће доћи до повећања отпорности на хабање. Унапређење отпорности на хабање није само последица повећања тврдоће већ и присуства малих честица Al_2O_3 ојачавача и смањења величине кристалног зрна материјала основе. SEM анализа трагова ојачавача је показала да је доминантни механизам хабања абразивно хабање. Разлог таквог тумачења су уске паралелне бразде и плитки кратери. У прилог томе иде и EDS анализа трагова хабања (Енергеско-дисперзивна спектроскопија, енг. Energy-dispersive X-ray spectroscopy), која је потврдила трансфер материјала са челичног диска на контактну површину нанокмозита.

При испитивању нанокмозита са алуминијумском основном Al6061 са додатком честица Al_2O_3 ојачавача, *Ezatpour* [42] представио је структурне и механичке карактеристике. Испитивани су нанокмозити са 0.5, 1 и 1.5% масеног удела честица Al_2O_3 , величине 40nm, добијени поступком ливења мешањем. Структурна испитивања су показала пад густине са додатком честица ојачавача. Даљим повећањем удела ојачавача у композиту, поред пада густине, расте и порозност. Порозност настаје као последица лоше квашљивости и настанка пора у међусобном реаговању матрице и Al_2O_3 ојачавача. Према мишљењу аутора велики утицај на настанак пора у материјалу композита има и време мешања, тј. са повећањем времена мешања расте и проценат порозности. SEM анализе су показале да се сирове нано честице Al_2O_3 групишу у велике агломерате и да их је веома тешко механичким мешањем растопа „растурити“. Аутор је, из тога разлога, поступком млевења куглицама, претходно припремио композитни прах. На тај начин, разбијени су агломерати, а услед честих судара тврдих честица Al_2O_3 честицама алуминијума, дошло је до њиховог стапања са меком површином алуминијума што је довело до боље квашљивости и распореда у материјалу основе. Честице алуминијума се растварају и постепено ослобађају нано честице ојачавача у растоп, када се добијени композитни прах дода у раствор алуминијумске легуре. Тврдоћа композита добијених истискивањем расте са повећањем удела ојачавача, док тврдоћа ливених композита опада када је удео ојачавача

већи од 1%. Разлог томе је равномернији распоред честица ојачавача, јаче везе између ојачавача и материјала основе и већа густина композита добијених истискивањем.

Kok i Ozdin [43] су испитивали композите са 10, 20, 30% масеног удела ојачавача у алуминијумској 2024 основи. Резултатима су дошли до закључка да је отпорност на хабање композита знатно боља у односу на отпорност на хабање материјала основе, што говори да отпорност на хабање расте уколико се повећа проценат масеног удела и величине честица ојачавача.

Утицај масеног удела честица SiC ојачавача на ерозивну отпорност композита са основом ZA-27, представио је у свом раду *Mishra* [44]. Пре него што је композит ZA-27 подвргнут испитивању корозионе отпорности, испитане су његове механичке карактеристике, тј. механичке карактеристике материјала основе са масеним уделима ојачавача од 3, 6 и 9%. Утврђено је да додавање честица ојачавача доводи до побољшања већине испитиваних механичких карактеристика, тј. да се са повећањем удела ојачавача повећава и микро тврдоћа, затезна чврстоћа и ударна жилавост, али долази до пада еластичности. Добијени резултати јесу последица повећања масеног удела ојачавача, при чему се повећава релативна густина. С обзиром на то да увек постоји разлика између теоријских и измерених вредности густина композита, долази до присуства шупљина и пора, и њихово присуство утиче на механичке карактеристике композита у зависности од степена.

Утицај ојачавача у виду керамичких нано честица Al_2O_3 испитиван је у завршном раду аутора. Приликом експеримента вршеног помоћу скреч теста (Scratch test) дошло се до закључака да се поред позитивног утицаја нано честица ојачавача, запреминског удела од 1, 3 и 5 % респективно, у самом композиту могу појавити и одређене структурне несавршености у виду гасних мехурова или агломерата, који се могу јавити услед нехомогености структуре материјала, односно неадекватног распореда честица ојачавача у материјалу основе. Гасни мехурови који се јављају између честица материјала основе и честица ојачавача доводе до значајнијег продирања утискивача у сам материјал, а последица су заробљеног ваздуха између честица ојачавача и основног материјала насталих током процеса ливења. Такође, може се претпоставити да се при испитивању овог материјала јавља механизам абразивног хабања, због деловања материјала веће тврдоће (утискивач) на материјал мање тврдоће (испитивани материјал).

Услед испитивања нанокомпозита ZA-27 са 1% запреминског удела ојачавача Al_2O_3 , приметно је да једнопроцентни запремински удео не доводи до претераног побољшања карактеристика материјала ZA-27. Може се такође из дијаграма закључити да се веће вредности коефицијента трења јављају код нанокомпозита ZA-27 са 3% запреминског удела ојачавача. Такође, приметно је да нанокомпозит петопроцентним запреминским уделом ојачавача има најбоље структурне карактеристике. Приметно је, такође, да са повећањем запреминског удела нано честица ојачавача Al_2O_3 опада коефицијент трења. Нанокомпозит са тропроцентним уделом ојачавача, с друге стране, оповргава ту теорију, али је то највероватније последица већих структурних несавршености и присуства агломерата који доводе до израженијег абразивног хабања у подповршинском слоју током контакта, што у

неким деловима пута клизања доводи и до одвајања продуката хабања. Последње испитивани материјал, односно наноккомпозит ZA-27 са 5% запреминског удела ојачавача Al_2O_3 показао се као материјал са најбољим карактеристикама од испитиваних.

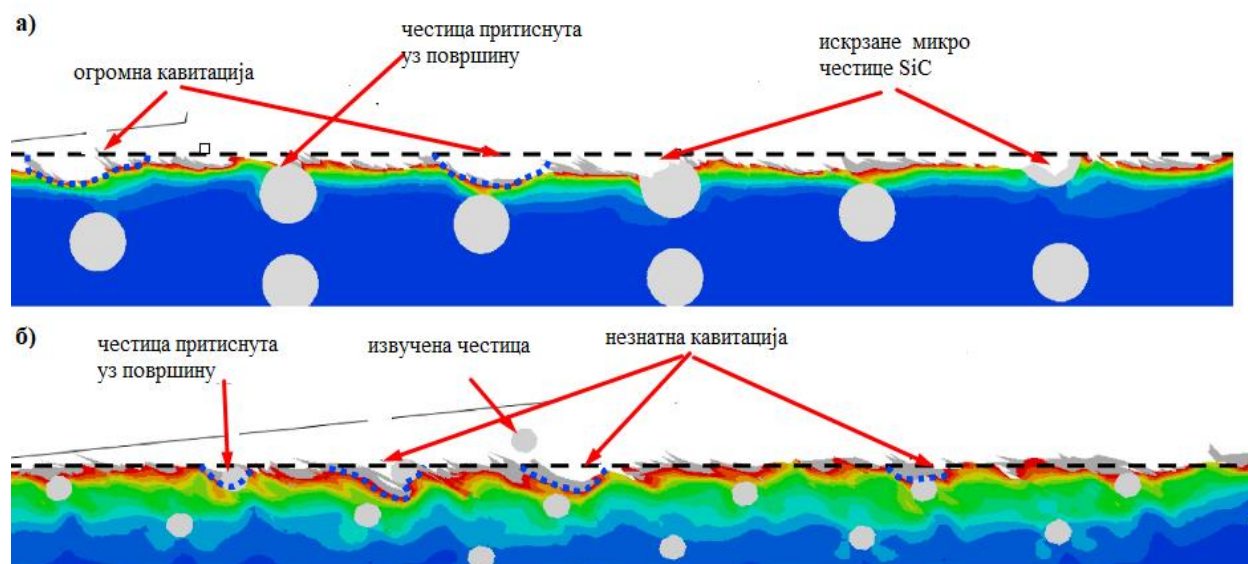
При испитивању отпорности на хабање, у условима клизања без подмазивања, магнезијумске легуре AZ31B и наноккомпозита који је ојачан са 1.5% честица Al_2O_3 и 1% Ca, *Srinivasan* [45] је, заједно са својим колегама, закључио да степен хабања опада са порастом брзине, а да расте са пређеним путем клизања. Узроком оваквог понашања композита може се сматрати изражена оксидација магнезијумске легуре услед повишених температура у зони контакта. На тај начин настаје оксидни слој који штити контактне површине од директног контакта два метала. С друге стране, с повећањем брзине клизања, у случају композита, долази до уситњавања Al_2O_3 честица, што за резултат даје „three body“ абразију. Са накнадним повећањем брзине, избраздана површина композита ће реаговати са кисеоником и формирати оксидни слој Fe_3O_4 . Честице Fe, Fe_3O_4 , Al_2O_3 и настали оксидни слој формирају нови слој који утиче на смањење степена хабања и назива се механички мешани слој (Mechanical Mixed Layer – MML).

Трагови хабања су покривени паралелним браздама у правцу клизања, што је уобичајено када је доминантан механизам хабања, абразивно хабање. Оне се јављају када тврди врхови неравнина челичног диска или тврдых честица у зони контакта браздају или режу материјал, уклањајући мале фрагменте или танке траке материјала. Појава дубљих бразди односи се на дубље продирање тврдых неравнина у материјал, потом долази до благог истискивања са обе стране и настале бразде указују на абразивно резање при малим брзинама. Стога, аутор је дошао до закључка да при већим брзинама клизања повећана пластична деформација материјала основе прелази из резања у браздање, а потом и у формирање клинова. Код браздања материјал се истискује са обе стране без отклањања материјала, док код формирања клинова, танки клинасти фрагменти настају само током почетне фазе овог процеса [46]. То доводи до настанка плитких огреботина и смањења степена хабања са повећањем брзине клизања. Основни закључак је да наноккомпозит испољава већу отпорност на хабање у односу на основну легуру.

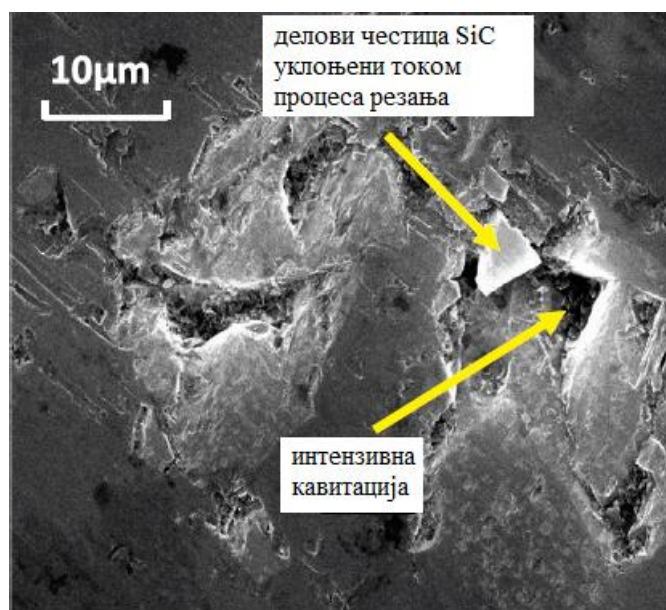
Резултати испитивања хабања наноккомпозита Al/ Al_2O_3 , добијеног механичким легирањем и топлим пресовањем, које је вршио *Tavoosi* [47], показали су да је дошло до побољшања у погледу тврдоће и отпорности на хабање са повећањем удела Al_2O_3 у наноккомпозиту. Такође, примећено је, да је адхезија доминантни механизам хабања код наноккомпозита са малим, а деламинација код наноккомпозита са великим уделом Al_2O_3 честица. Када је у питању трење, равномеран распоред честица ојачавача води ка смањењу вредности коефицијента трења, што је случај код наноккомпозита. С друге стране, повећање тврдоће површинских слојева утиче на смањење реалне површине контакта, а самим тим и коефицијента трења.

Поређењем стања и микро/нано структуре површина приликом резања, а коришћењем методе коначних елемената (Finite Element Method-FEM), дошли су до закључка да је смањење величине честица (нано честица) од кључног значаја за побољшање стања површине и отпорности на хабање материјала у контакту. Испитивани су композити

на бази алуминијума ојачани микро, односно нано честицама силицијум-карбида. Значајно је напоменути да се приликом резања код композита ојачаног нано честицама SiC јављају континуални продукти хабања, док код композита са микро честицама продукти хабања теже дисконтинуалности. Сами продукти хабања су као и кавитација приликом резања већи код микро композита, што се може уочити и на слици 5.1 на којој је приказана илустрована морфологија површине приликом микрорезања испитиваних композита, док се на слици 5.2 могу уочити оштећења настала на самим микро честицама SiC [48].



Слика 5.1 Илустрована морфологија површине током резања (а) микро композит, (б) нано композит [48]



Слика 5.2 Површина композита са микро честицама скенирана помоћу SEM-а [48]

С обзиром на то да су нано/микро композити, испитивани у овом научно-истраживачком раду, нека врста хибридних композита, значајно је нагласити да су многи аутори закључили да се додавањем две врсте ојачавача постиже напредак у погледу многих карактеристика материјала.

Sukriti, Swati i Sugandha су у свом прегледном раду о хибридних микро/нано композитима дали увид у претходно испитиване хибридне композите, њихове механичке и триболошке карактеристике, тип ојачавача, као и примену истих у ауто- и авио-индустрији, што се може детаљније видети у табели 5.2.

Табела 5.2 Карактеристике одређених хибридних композита са металном матрицом [49]

Метална основа	Тип ојачања	Техника добијања	Карактеристике	Референца
Mg-Ti композит	микро честице Ti и нано честице карбида бора	млевење помоћу куглица (ball milling), топљење, ливење	Најбоља комбинација чврстоће и еластичности при затезању, боља финоћа зрна	[50]
Атомски 99,5 % чист Al	микро честице SiC и нано честице бакар-оксида	синтеровање	Микро тврдоћа, густина и индиректна затезна чврстоћа расту са порастом удела нано честица бакра	[51]
AA6061-T6	SiC и графит	ливење мешањем помоћу трења	Већа отпорност на хабање, низак коефицијент трења као и % издужења опадају са порастом брзине приликом испитивања	[52]
Al керамички прах	Прах MgO са нано честицама ZnO у виду праха	синтеровање при различитим температурама	Побољшана микро тврдоћа, чврстоћа при лому, као и брже згушњавање и пининг ефекат	[53]
Al 6061	микро SiC, графит и нано честице ZrO ₂	ливење мешањем	Увећан масени удео комбинованих микро/нано честица смањује проценат корозије, док 9% комбинованог ојачања даје најбоље резултате	[54]
LM25	силицијум-карбид и TiO ₂	ливење мешањем	Умањен проценат хабања на собној температури; μ опада са порастом удела TiO ₂ , долази до повећања тврдоће, док еластичност опада	[55]

Al 6065	силицијум-карбид и графит	Вортекс метода	Са порастом удела SiC смањује се густина, а очвршћава легура Al, долази и до значајног увећања отпорности на корозију	[56]
Al 7075	SiC и титанијум-карбид	двотактно ливење мешањем	Пораст % удела комбинованог ојачања доводи до повећања чврстоће композита, узорци са 15 % удела ојачавача су чвршћи у односу на остале приликом затезања	[57]

Из претходно наведене табеле се може закључити да комбиновање ојачања микро, односно нано честица може довести до смањења корозије код композита, повећања отпорности на хабања, као и побољшања неких других механичких карактеристика. Самим тим је шира област примене ових материјала, те су они погоднији за употребу, како у аутомобилској, тако и другим индустријама.

Што се тиче микроструктуре тзв. хибридних композита, не може се са сигурношћу одредити правилност у распореду, како микро, тако и наночестица, импрегнираних у материјал основе. Неколицина истраживача на *Taiyuan* универзитету у Кини испитивали су предности микро/нано-бимодалних B_4C честица на микроструктуру композита са алуминијумском 6061 матрицом. Испитивани композити са процентом ојачавача од 3%, 5% и 7%, добијени су плазма синтерованјем (Spark Plasma Sintering-SPS), након чега следи екструзија на топло и ваљање (Hot Extrusion and Rolling-HER), праћено повећањем густине са 99,21% на 99,65%, добијањем хомогеније структуре и затезне чврстоће материјала након HER-а. Коришћење нано честица као ојачавача доводи до добијања финијег зрна у микроструктури композита, што смањује могућност за стварање пукотина. Такође, затезна чврстоћа $B_4C/6061Al$ композита се повећава са повећањем удела ојачавача [58].

Gurcan i Baker [31] су у својој студији закључили да хибридни композит који је ојачан влакнима Al_2O_3 и честицама SiC има бољу отпорност на хабање него што је то случај код композита који су ојачани само влакнима или само честицама. Оваквом комбинацијом бавио се *Wang* [32] и показао да се већи степен хабања на собној температури испољава када су влакна паралелна контактаној површини, док са додавањем SiC честица долази до пада степена хабања. На повишеној температури ($100^\circ C$), с друге стране, са додатком честица SiC доћи ће до повећања степена хабања у односу на композит ојачан само влакнима Al_2O_3 . При температурама око $150^\circ C$ генерално је мањи степен хабања свих испитиваних композита, док са примесама честичног ојачавача долази до пораста степена хабања. То је нешто више изражено код композита са влакнима која су паралелно постављена у односу на површину контакта. До тога пре свега долази јер влакна, која имају овакав распоред, могу врло лако бити ишчупана из материјала основе. Код композита са паралелно постављеним влакнима *Wang* [32], као основни механизам хабања наводи

абразивно хабање, док је код композита са нормално постављеним влакнима присутније адхезивно хабање.

Такође, у својој студији, *Park* [33] долази до закључка да хибридни композити имају напредније триболошке карактеристике од композита који су ојачани само једном врстом ојачавача. До тог закључка је дошао испитујући композите ојачане кратким влакнима SiC и влакнима Al₂O₃. Слично *Park*-овом експерименту, истраживање су спровели *Sharifi* и *Karimzadeh* [34] и добили релативно сличне резултате, с разликом што су се у овом случају као ојачавачи користили Al₂O₃, AlB₁₂.

Анализу хабања хибридног композита са Al6061 основом, ојачаном честицама Al₂O₃ и SiC представио је *Umanath* [35], и то математички модел ове анализе. Аутор је заједно са колегама испитивао утицај четири, према њиховом мишљењу, основна фактора који утичу на вредности хабања композита, а то су:

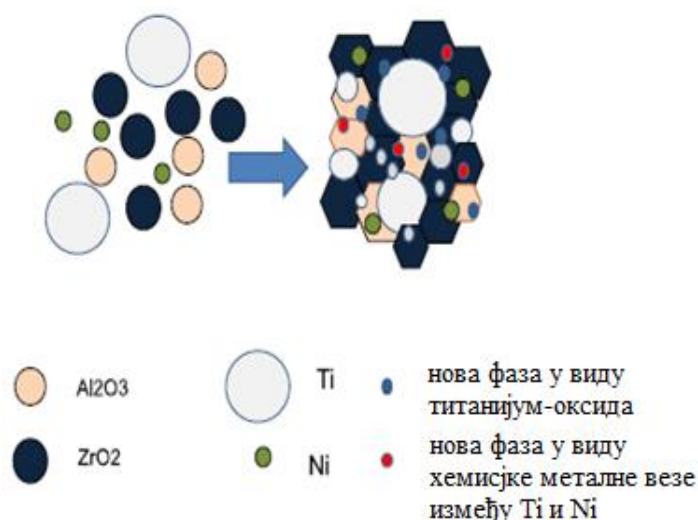
- вредност нормалног оптерећења,
- брзина ротације,
- процентуални удео ојачавача,
- тврдоћа материјала контра-тела.

Вредности ових величина на тесту су износиле:

- процентуални удео ојачавача око 5 и 15%,
- нормално оптерећење 40 и 60N,
- брзина ротације 200 и 400 o/min,
- тврдоћа материјала контра-тела 25 и 35 HRC.

Суштина истраживања се свела на то да композити са великим процентом удела ојачавача, малим нормалним оптерећењем, малом брзином клизања и великом тврдоћом материјала контра-тела испољавају најмању вредност хабања.

Истраживања хибридних композитних материјала у последње време најчешће обухватају композите са металном основом, као и неке полимерне материјале. Међутим, постоје разматрања да се керамичке честице поред употребе у сврху ојачавача могу искористити и као матрица композита у виду честица праха у комбинацији са честицама одређених металних материјала. Комплексна микро/нано структура се може остварити коришћењем почетне форме две или више керамичких, односно металних конституената, различите величине честица праха. На тај начин, могуће је евентуално добијање материјала побољшане чврстоће у односу на саме керамичке материјале, али металне наночестице могу довести и до тзв. ефекта отврдњавања.



Слика 5.3 Геометријски модел квартарне структуре са честицама Ti и Ni, и керамичким честицама ZrO_2 и Al_2O_3 [59]

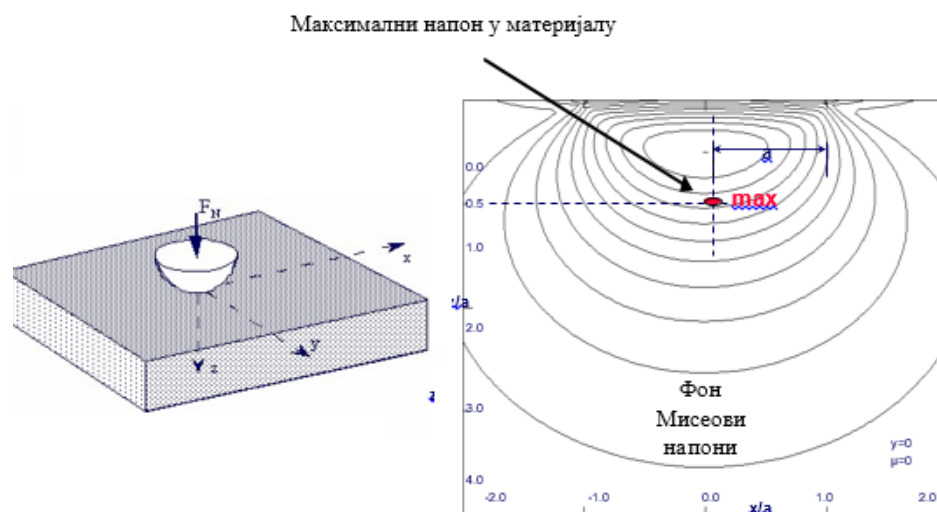
Под претпоставком комбиновања више материјала, па и керамичких честица у виду праха, као метала основе, *Копорка* [59] је дао геометријски приказ са више врста керамичких честица праха ZrO_2 и Al_2O_3 сличне величине зрна као метала основе, уз додатке честица праха титанијума и никла. Наночестице керамичког праха могу негативно утицати на структуру композита „блокирајући“ адекватно формирање честица титанијума у самој структури. Комплексна структура керамичких хибридних композитних материјала је приказана на слици 5.3 где се може видети потенцијални положај различитих честица ојачавача. Исти аутор је са својим тимом истраживача испитивао и појаву нове „спинел“ (spinel) фазе између керамичких честица Al_2O_3 и Ni као и Al_2O_3 и Fe, у виду NiAl_2O_4 и FeAl_2O_4 и то између зрна керамичких честица. Ове фазе, у одређеној мери доводе до повећања тврдоће материјала као и опторности на хабање у виду пукотина које се могу јавити током процеса експлоатације.

Код хибридних композита могу се комбиновати и две врсте керамичких честица уз честице једног или више метала, уз евентуалну појаву нових међуфаза. Међутим због недостатка истраживачких радова на ову тему, сви закључци о побољшању карактеристика су релевантни.

Већ је раније установљено, да у трибомеханичким системима долази до појаве трења која може довести до појаве различитих врста деформација. Најчешћи видови хабања и деформација који се јављају између контактних површина два предмета јесу адхезионо и абразивно хабање, односно пластична деформација материјала.

Приликом испитивања *pin-on-disk* методом уз праћење стања материјала како на собној тако и на повишеним температурама *Tarasov* [60] је дошао до закључка да приликом клизања материјала долази до адхезивног трансфера честица Al-Mg легуре на челичну куглицу (контра тело је у овом случају у виду куглице), која представља контра тело при самом испитивању. Геометрија контакта је била готово иста као и при испитивању аутора

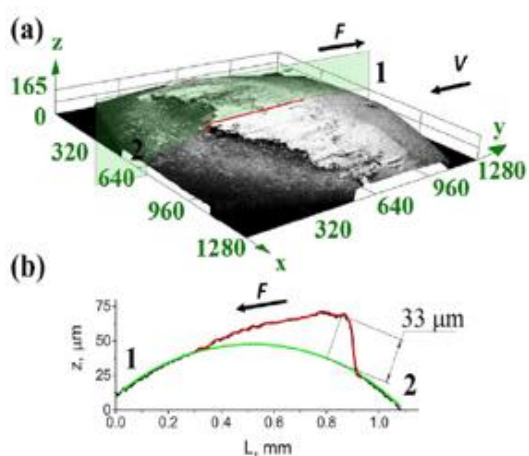
овог мастер рада. С обзиром на то да је контра тело које преноси оптерећење на испитивани материјал облика сфере, сви напони и деформације који се јављају при контакту челичне куглице и узорка су углавном подређени условима Херцовог контакта (слика 5.4).



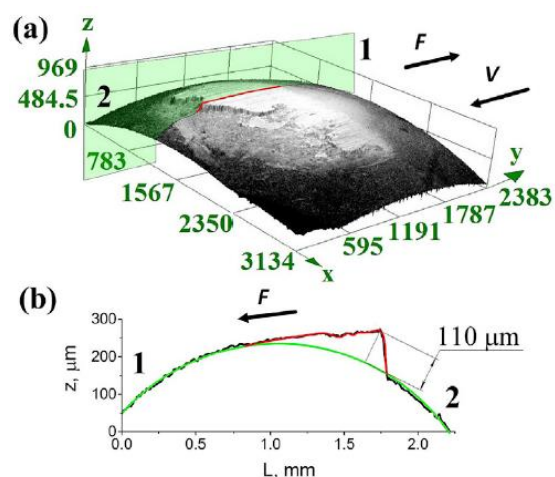
Слика 5.4 Напони у условима Херцовог контакта [5]

Значајно је напоменути да се количина трансферованог материјала у виду „налепина (налепа)“ повећава са порастом температуре испитивања са 25 до 200 °С. На насталом трагу хабања који је у облику кружнице, с обзиром на то да се испитивање вршило при ротационом кретању носача узорка, могле су се уочити грешке тј. пластичне деформације слоја алуминијума. Комбинацијом високе температуре и пластичне деформације долази до тзв. заваривања трењем честица алуминијума на челичну куглицу. Продукти хабања који се тако „лепе“ на челичну куглицу након адхезионог трансфера материјала доводе до проширења зоне контакта између челичне куглице и испитиваног материјала, што доводи и до проширења трага хабања на самом узорку. Такође се на самом трагу хабања могу уочити и испупчења настала након повратног адхезивног трансфера продукта хабања алуминијума. До оваквог исхода долази и због првобитног деформисања честица материјала у подповршинском слоју, чија се величина може измерити на нанометарској скали, што даље доводи, како наводи Tarasov [60] до нестабилности у самом контакту и до већ поменутог трансфера материјала.

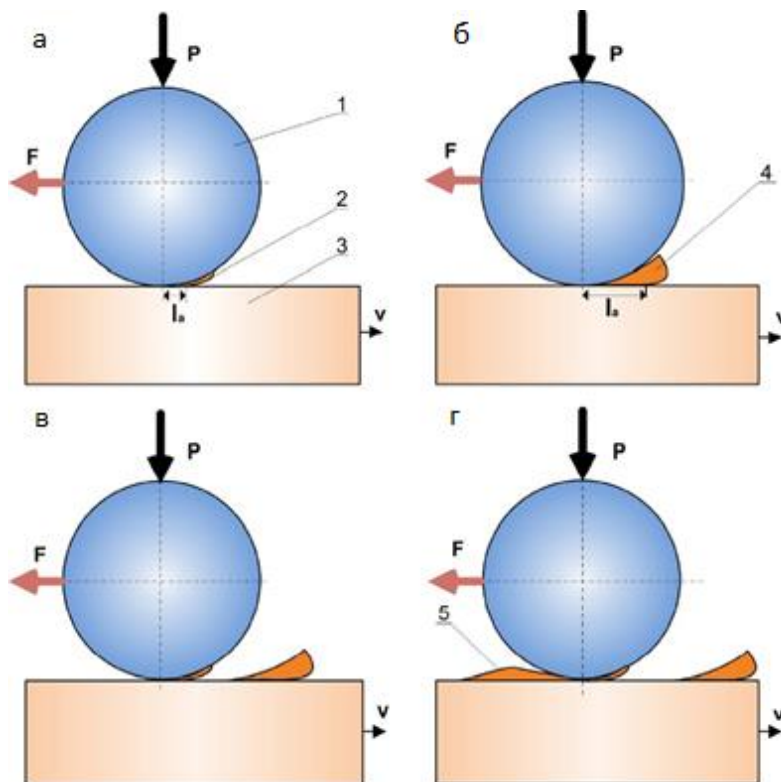
Испитивање је вршено при температурама од 25 , 100 и 200 °С, док је за дефинисање резултата коришћен скенирајући микроскоп са ласерским снопом (Laser scanning microscope), помоћу кога је и уочен трансфер материјала. Испитивањима се такође дошло до закључка да параметри попут ширине трага хабања и дебљине слоја трансферованог материјала расту с повећањем температуре. При испитивању на 25 °С адхезивни трансфер материјала је незнатан. Дебљине слоја трансферованог материјала при испитивању на 100°С (Слика 5.5) износила је 21–33 μm, док до најинтензивнијег адхезивног трансфера долази при испитивању на температури од 200 °С (Слика 5.6), где се јавља и повратни трансфер материјала са челичне куглице на испитивани узорак од поменуте алуминијумске легуре. Дебљина слоја износила је 100–110 μm [60].



Слика 5.5 Слој трансферованог материјала на челичној куглици при клизању на 100 °C, F представља силу трења [60]



Слика 5.6 Слој трансферованог материјала на челичној куглици при клизању на 200 °C, F представља силу трења [60]



Слика 5.7 Шематски приказ адхезивног трансфера материјала. 1-челична куглица, 2-раст адхезивног слоја, 3-покретни узорак, 4-одвајање дела адхезивног слоја са куглице и лепљење на покретни узорак (повратни трансфер), 5-деформација адхезивног слоја насталог након повратног трансфера, P -нормална сила, F -сила трења, v -брзина клизања, l_a - дужина адхезивног слоја у контакту [60].

Дакле, при порасту температуре у зони контакта долази до адхезије, потом одвајања делова алуминијумске легуре и трансфера на челичну куглице где услед кохезивних сила долази до лепљења материјала (Слика 5.7 а и б). Даљим кретањем, праћеним трењем клизања, долази до повратног трансфера материјала на испитивани узорак, услед чега се стварају испупчења на истом (Слика 5.7 в). С обзиром на то да се зона контакта шири, долази и до проширења трага хабања, а самим тим и до већих оштећења испитиваних површина (Слика 5.7 в). Оваква појава у највећој мери може имати негативне последице по одређене трибомеханичке системе, једино се позитивно може искористити у случају заваривања трењем уколико би се дебљина слоја трансферованог материјала могла контролисати [60].

Претходни аутори и суштине њихових радова о карактеристикама композита, потпомогли су значајно анализу резултата овог научно-истраживачког рада и довели до одређених закључака који се тичу, како механичких и триболошких карактеристика испитиваних микро/нано композита, тако и утицаја ојачавача на исте.

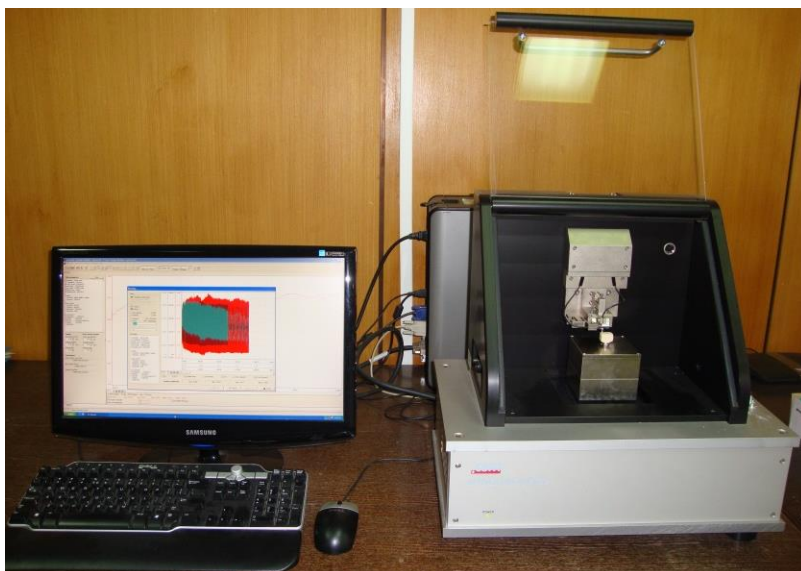
6

МЕРНА И ИСПИТНА ОПРЕМА

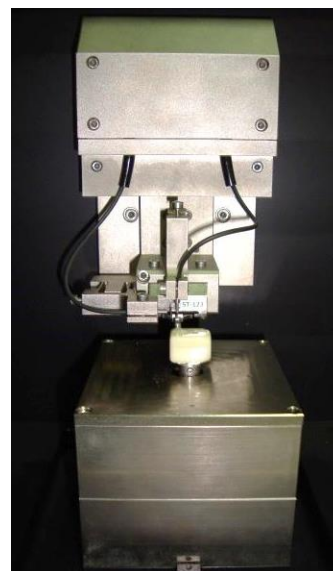
Услови у којима се одређена испитивања спроводе, пре свега, тип и геометрија инструмента, потом оптерећење, брзина и време које је потребно како би се испитивање извршило на адекватан начин, од круцијалне су важности за било који научно-истраживачки рад. С тога, у овом поглављу биће дат кратак увид у опрему и мерне инструменте коришћене при самом испитивању, а без којих не би било могуће доћи до одређених закључака у вези са триболошким понашањем микро/нано композита.

6.1 Нанотрибометар

Испитивања триболошких карактеристика микро/нано композита, као и утицај ојачавача су моделског типа и обављена су на компјутерски подржаном нанотрибометру, CSM произвођача, који се налази у Центру за трибологију Факултета инжењерских наука у Крагујевцу (Слика 6.1а).



а)



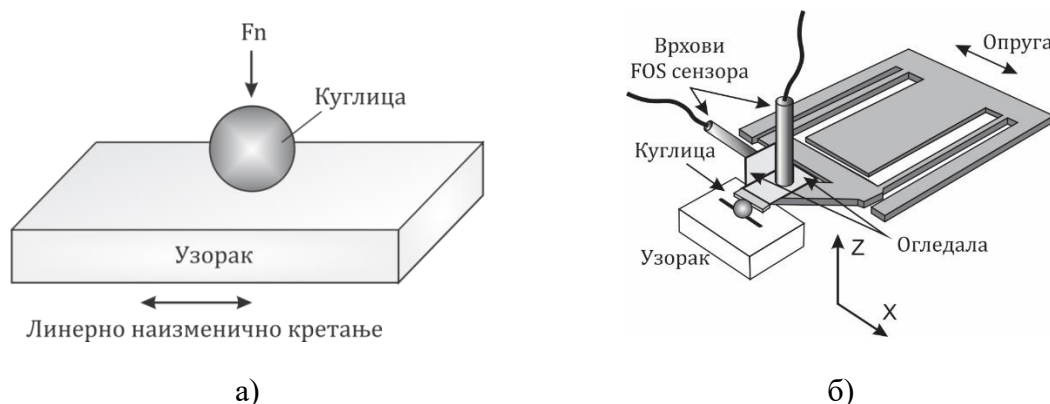
б)

Слика 6.1 а) CSM нанотрибометар; б) Линеарни наизменични модул [61]

Примена нанотрибометра у овој и многим другим областима је све већа што потврђује велики број радова који се заснивају на резултатима добијеним баш на овом уређају. Контактна геометрија овог уређаја може бити „куглица на равној површини“ (*ball-on-plate*, Слика 6.2а) и „пин на равној површини“ (*pin-on-plate*). Сам трибометар, својом

конструкцијом нуди могућност рада са једним од два могућа модула кретања: линеарни наизменични модул (линеарно наизменично кретање по дужини у распону од 10 – 1000 μm), приказан на слици 6.2б) и ротациони модул (са распоном радијуса од 30 μm – 10 mm). Линеарни наизменични модул користи се за симулацију већег броја реалних врста кретања.

Вредности нормалног оптерећења које овај трибометар подржава крећу се у границама од 50 μN до 1 N са резолуцијом од 1 μN . Такође, веома велика осетљивост у раду овог трибометра се огледа и приликом аквизиције силе трења, као основне карактеристике овог уређаја, при чему је опсег силе трења од 10 μN до 1 N са прецизношћу од 1 μN . Контакт између куглице и равне површине узорка се остварује тачно дефинисаном силом. Нанотрибометар има могућност прецизног мерења дубине продирања куглице у реалном времену, у материјал који се испитује. Дубина продирања може бити до 100 μm , са прецизношћу од 20 nm. Уређај такође користи одговарајући софтвер за аквизицију, обраду и приказ података.

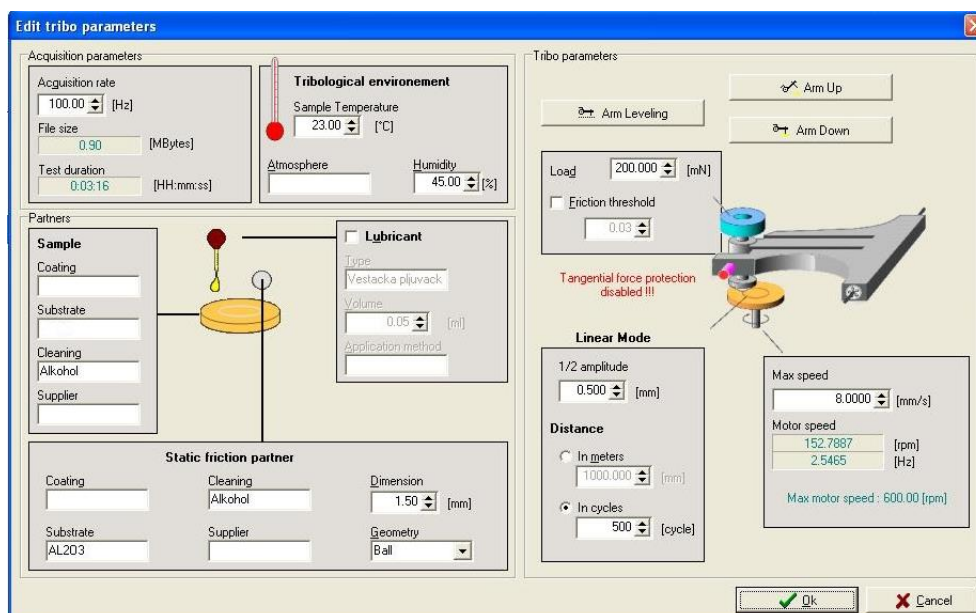


Слика 6.2 а) Контактна геометрија (*ball-on-plate*); б) Конзола [61].

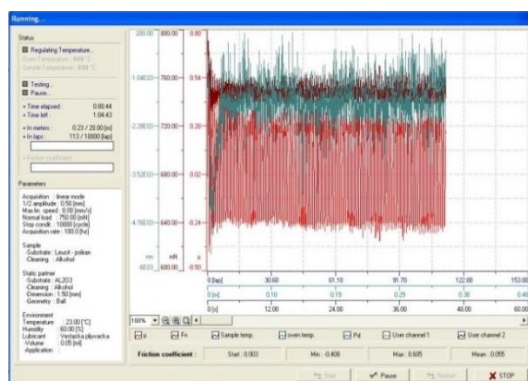
Мерни елемент нанотрибометра је конзола са тачно пројектованом тангенцијалном силом (F_t) и нормалном крутости (F_n). Конзола је монтирана директно на мерној глави уређаја и може се скидати, а повезана је са два оптичка FOS сензора (*fiberoptic sensors*) за мерење нормалног и бочног одступања (Слика 6.2б). Пре сваког теста, неопходно је калибрисати сваки FOS сензор. Два осетљива оптичка огледала, постављена близу главе конзоле (на X и Z осу), мере осцилације конзоле током клизања куглице по површинском слоју узорка, који се креће линеарно наизменично. Примљени сигнали се конвертују у електричне сигнале помоћу оптичко-електронских претварача. Коефицијент трења се одређује мерењем померања еластичног дела конзоле у оба правца, у хоризонталној и вертикалној равни, помоћу два FOS сензора.

Два тела (куглица и површина узорка) се доводе до контакта путем софтверског управљања, потпуно аутоматски. Величине нормалне силе, брзине клизања и дужина

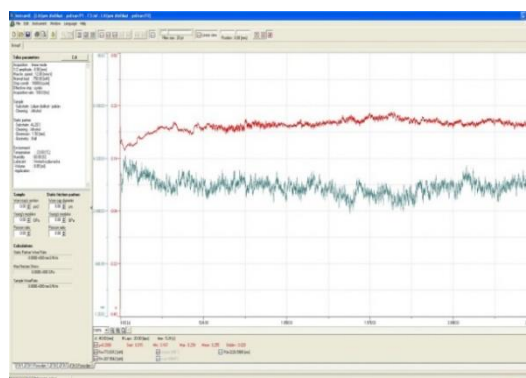
путање клизања задају се такође софтверским путем. Софтвер садржи комплетан сет опција за подешавање улазних параметара (Слика 6.3). Аутоматски прикупља следеће податке током триболошког теста: број циклуса, дужину пређеног пута [m], вредност нормалне силе и силе трења [mN], коефицијент трења и дубину продирања. Током трајања теста, софтвер даје приказ нормалне силе, коефицијента трења и дубине продирања у реалном времену, као функције пређеног пута, броја циклуса и времена (Слика 6.4). Софтвер има и могућност филтрирања сигнала и аутоматског израчунавања вредности коефицијента трења. На крају теста, софтвер нанотрибометра може аутоматски генерисати извештај резултата у форми .pdf фајла, при чему се представљају криве коефицијента трења, силе трења и дубине продирања [60].



Слика 6.3 Приказ подешавања улазних параметара у софтверу нанотрибометра [61].



а)



б)

Слика 6.4 а) Изглед приказивања вредности у реалном времену; б) изглед филтрираног сигнала након завршеног теста [61].

Испитивања се могу вршити у условима са подмазивањем и без подмазивања, при чему се подмазивање врши наношењем мазива микропипетом на саму контактну површину која се испитује. Контролисани испитни параметри као што су брзина, фреквенција и контактни притисак, време трајања и услови испитивања (температура, влажност и мазиво) помажу да се веома прецизно симулирају реални експлоатациони услови при којима настаје хабање контактних елемената [61].

6.2 Оптички микроскоп

За анализу површина припремљених узорака, као и за анализу добијених трагова хабања коришћени су оптички микроскопи (Слика 6.5). Микроскопи произвођача „MEIJ Techno” су компјутерски подржани микроскопи и сваки од њих је опремљен сопственим илуминатором и камером високе резолуције. На основу величине узорака микроскопи су подељени на алатни и металуршки, при чему алатни микроскоп има могућност подешавања висине оптичког дела микроскопа, а самим тим и могућност анализе узорака већих димензија. Металуршки микроскоп, за разлику од алатног има могућност осветљења узорака са доње стране. Микроскопи су опремљени објективима различитих увећања 5х, 10х, 20х, 50х и 100х. Такође, оба микроскопа поседују филтере, који се могу приметити за бољи приказ испитиваних површина.

Пратећи софтвер нуди велики број могућности за обраду и анализу направљених снимака. Претходном калибрацијом микроскопа одговарајућем објективу пружа се могућност мерења разних металуршких феномена. Мерења могу бити у погледу линијских и површинских димензија, при чему је могуће извршити мерења површина неправилних облика [4].



Слика 6.5 „MEIJ Techno“ оптички микроскопи: алатни (лево) и металуршки (десно) [4].

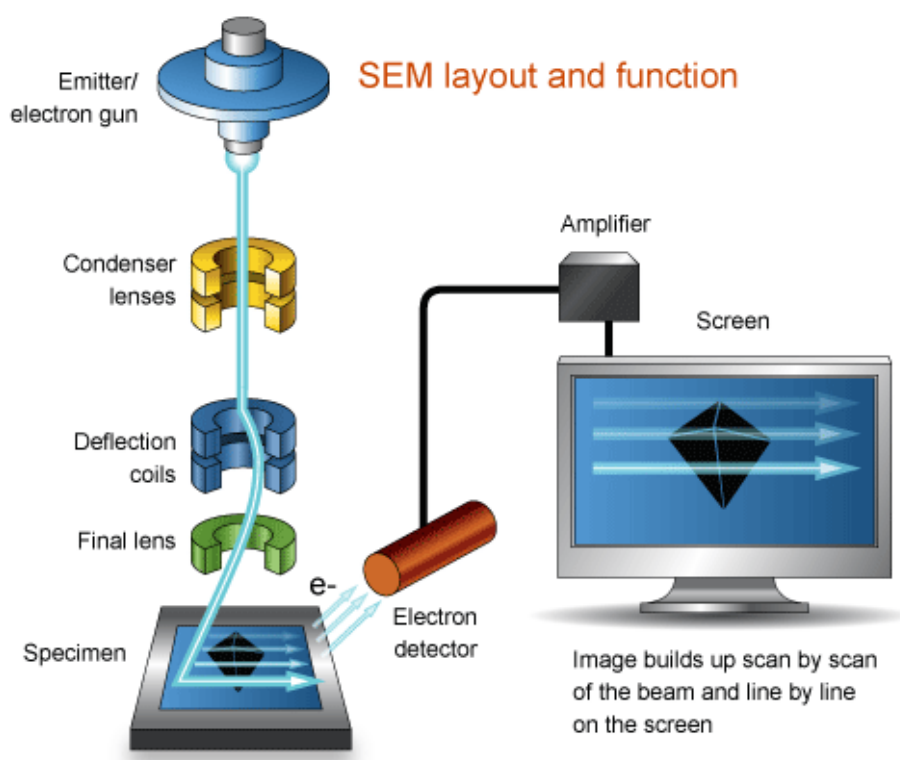
6.3 Скенирајући електронски микроскоп (Scanning electron microscope-SEM)

Скенирајући електронски микроскоп је веома популарна и примењивана техника за карактеризацију наноматеријала и наноструктура. SEM се може веома успешно применити за карактеризацију узорка резолуције од неколико нанометара, са могућим увећањем од 10 до 300 000. Упоредо са информацијама о топографији површине, SEM може пружити информације о хемијском саставу, кристалној оријентацији и распореду унутрашњих напона. SEM поседује електронски топ који емитује електроне фокусиране у сноп радијуса до 5 nm. Електрони се убрзавају до енергија у опсегу од неколико стотина eV до 50 keV, и распршују по површини узорка помоћу дефлекционих калемова. Како електрони падну на површину и продру у њу, јављају се бројне интеракције које резултирају емитовањем електрона и фотона са узорка, док се SEM приказ добија прикупљањем емитованих електрона помоћу катодне цеви (CRT – Cathode Ray Tube).

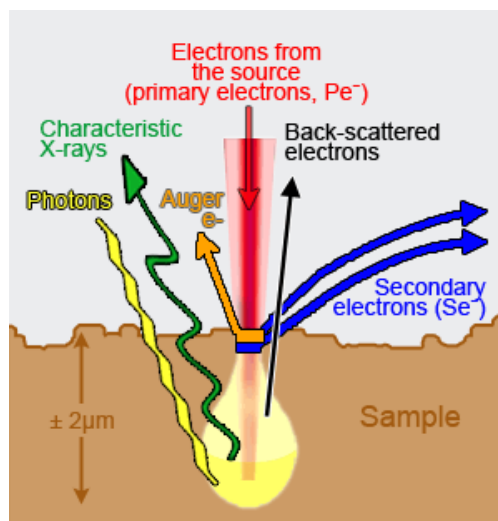


Слика 6.6 – Паук превучен превлаком злата, припремљен за SEM анализу [4].

Конвенционални SEM уређаји захтевају да узорци буду електропроводни, барем на површини, и уземљени како би се спречила акумулација електростатичког набоја. Електронепроводни узорци акумулирају набој као последица деловања електронског снопа, што се посебно региструје при анализи секундарних електрона што доводи до грешака и других неправилности везаних за приказ слике. Метални материјали захтевају веома малу припрему која се односи на чишћење и постављање узорка на одговарајући носач. Непроводни материјали се најчешће превлаче ултра танким превлакама електропроводних материјала. Узорци за SEM треба да поднесу услове високог вакуума и сноп електрона велике енергије.



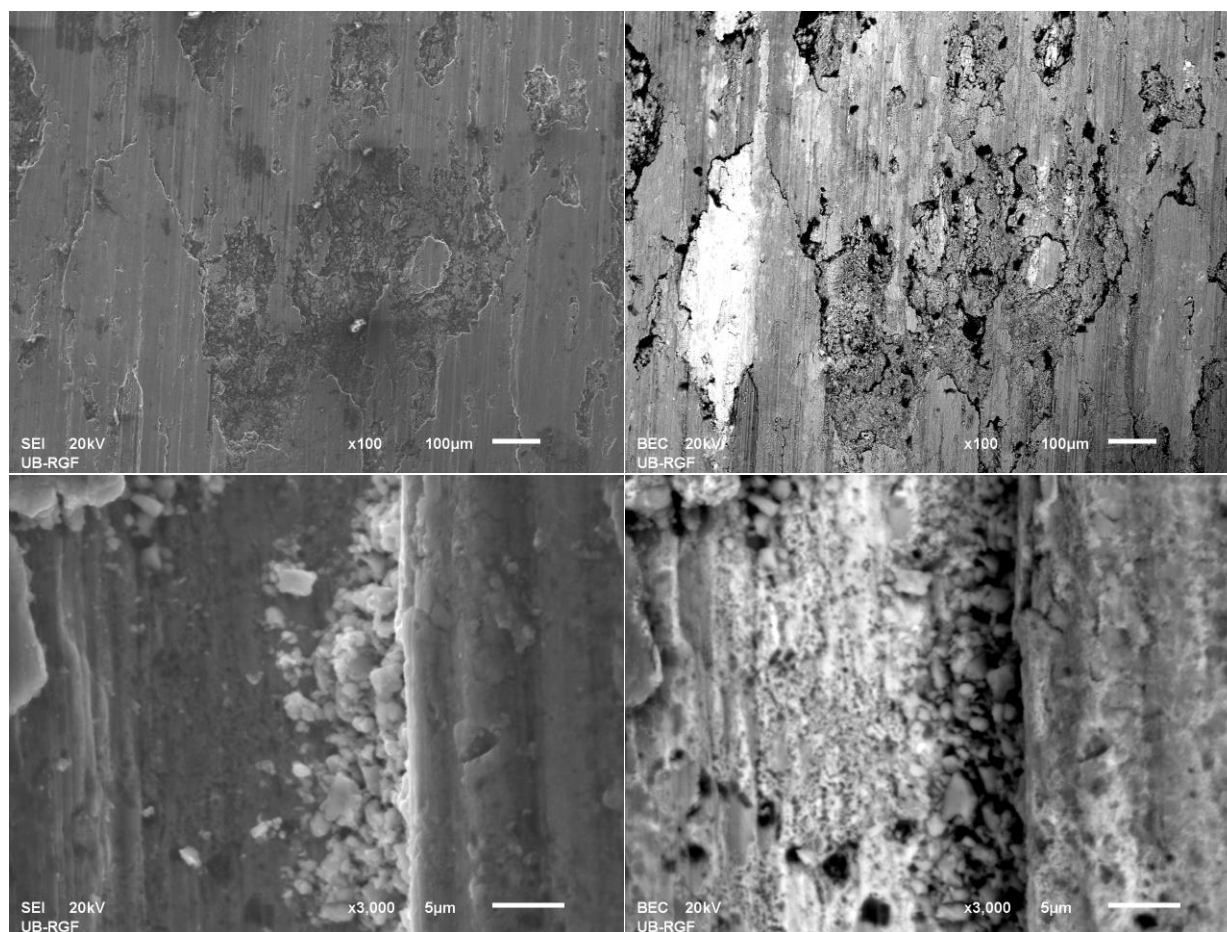
Слика 6.7 – Шема и принцип рада SEMa [4].



Слика 6.8 – Графички приказ интеракције примарног снопа електрона са површином материјала [4].

Када примарни електрони велике енергије дођу у контакт са атомима површине узорка, може доћи до нееластичних судара са електронима атома или еластичних судара са језгром атома. При нееластичним сударима са електронима, примарни електрони предају део енергије другим електронима. Када је енергетски трансфер довољно велики, електрон се истискује са површине. Уколико истиснути електрон има енергију мању од 50 eV, онда се назива секундарним електроном (Secondary Electron - SE) (електроном емитованим из

орбитале погођеног атома). Како је енергија секундарних електрона мала, приказ добијен од секундарних електрона је веома осетљив на топографске осцилације површине узорка. Рефлектовани електрони (Backscattered Electron - BSE) су електрони који су учествовали у еластичном судару са језгром атома и готово да имају исту енергију као и примарни електрони. Степен рефлексије електрона, односно број еластичних судара електрона и језгра атома узорка, се повећава са повећањем атомског броја испитиваног материјала. Иако прикази настали на основу прикупљања рефлектованих електрона не могу користити за хемијску анализу површинског слоја, контрастне зоне на снимку су последица разлике у атомским бројевима атома на површини узорка. BSE анализа омогућава контраст који се заснива на разлици атомских бројева упоредо са контрастом који је последица топографских феномена.



Слика 6.9 Пример два начина добијања приказа површине узорка применом SEM-а [4].

Додатни извор информација о испитиваном материјалу је и регистровање и анализа рендгенских X-зрака. Када примарни електрон изазове истискивање електрона атома испитиваног материјала, ти атоми се враћају у првобитно стање емитовањем или карактеристичних X-зрака или Аугерових електрона, оба могу послужити за хемијску карактеризацију испитиване површине. Енергија емитована путем карактеристичних X-зрака или Аугерових електрона одговара погођеном атому и самим тим њихова анализа

омогућава хемијску карактеризацију испитиваних материјала. Фокусирањем снопа електрона на веома малу тачку могуће је добити локализоване информације које се односе на промене хемијског састава површине. Међутим, треба имати на уму да информације добијене на основу анализе X-зрака се на површински слој дебљине око 1 μm и да су добијене информације осредњене за целу ту дубину.

РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗА ИСПИТИВАЊА

У овом поглављу дати су резултати испитивања нанокомпозита са металном ZA-27 основом, и масеног удела ојачавача у виду 0,5% наночестица Al_2O_3 величине 20-30nm, и 3%, односно 5% микрочестица SiC величине 40 μm , као и анализа истих. Резултати су приказани помоћу дијаграма зависности дубине продирања и коефицијента трења од броја пролаза, чијом су анализом представљене одређене механичке и триболошке карактеристике испитиваних нанокомпозита.

Табела 7.1 Параметри испитивања

број пролаза, n	брзина, $v=\text{const}$, [mm/s]	сила, $F=\text{const}$, [mN]	полупречник, r, [mm]	време, t, [min]
1000	20	800	3	15,24
			2.5	13,36
			2	10,13

Пре самог испитивања извршено је уклањање евентуалних површинских нечистоћа помоћу алкохола пре постављања на носач узорака. Контактна геометрија при испитивању била је *ball-on-plate*, док је као контра тело коришћена челична куглица Inox 440 C, пречника $d=1,5\text{mm}$ и тврдоће 60-62 HRC. Као што се може видети, према табели 7.1 испитивање је вршено применом модула ротационог кретања. Брзина клизања је приликом испитивања била константна и износи од 20 mm/s при константном нормалном оптерећењу од 800 mN. За сваки од материјала, односно ZA-27, ZA-27 + 0,5% Al_2O_3 , ZA-27 + 0,5% Al_2O_3 + 3% SiC и ZA-27 + 0,5% Al_2O_3 + 5% SiC коришћена су по 3 узорка, а на којима се након испитивања могу уочити по три трага хабања у виду концентричних кружница полупречника 3, 2,5 и 2 mm.

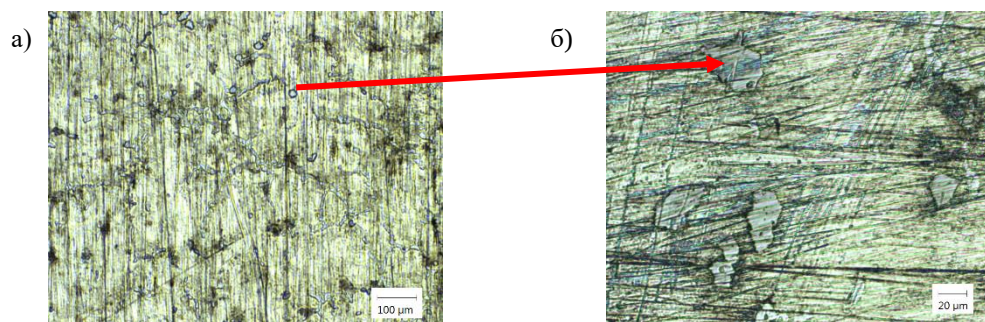
7.1 Микро/нано структура површина

Након испитивања извршеног помоћу нанотрибометра, трагови хабања испитиваних узорака подвргнути су испитивању помоћу оптичког микроскопа и SEM-а (Scanning electron microscope), а пре испитивања је применом исте опреме одређен изглед и структура површине испитиваних узорака.

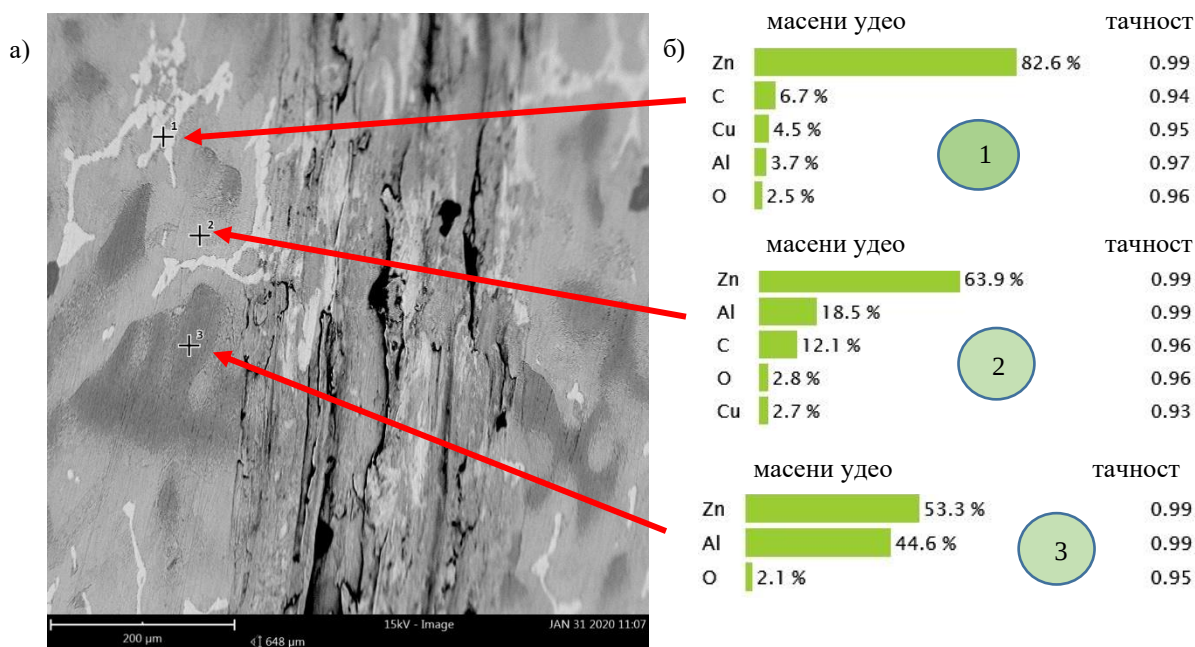
7.1.1 ZA-27 метална основа

На слици 7.1 може се видети како изгледа површина ZA-27 металне основе, где се могу уочити структуре у виду различитих материјала. Одређени тип дендритних честица која представљају готово чист цинк, означен је стрелицом. Фаза која преовлађује је материјал у виду легуре ZA-27 што се боље може видети на слици 7.2 где су приказани снимци површина помоћу SEM микроскопа и EDS (Energy-dispersive X-ray spectroscopy)

анализа која омогућава увид у хемијску анализу приказаних фаза. Анализу структуре ZA-27 металне основе представио је и Бабић, где се такође може уочити присуство више различитих фаза [62].



Слика 7.1 Изглед површине ZA-27 металне основе (увећања 5× и 20×)



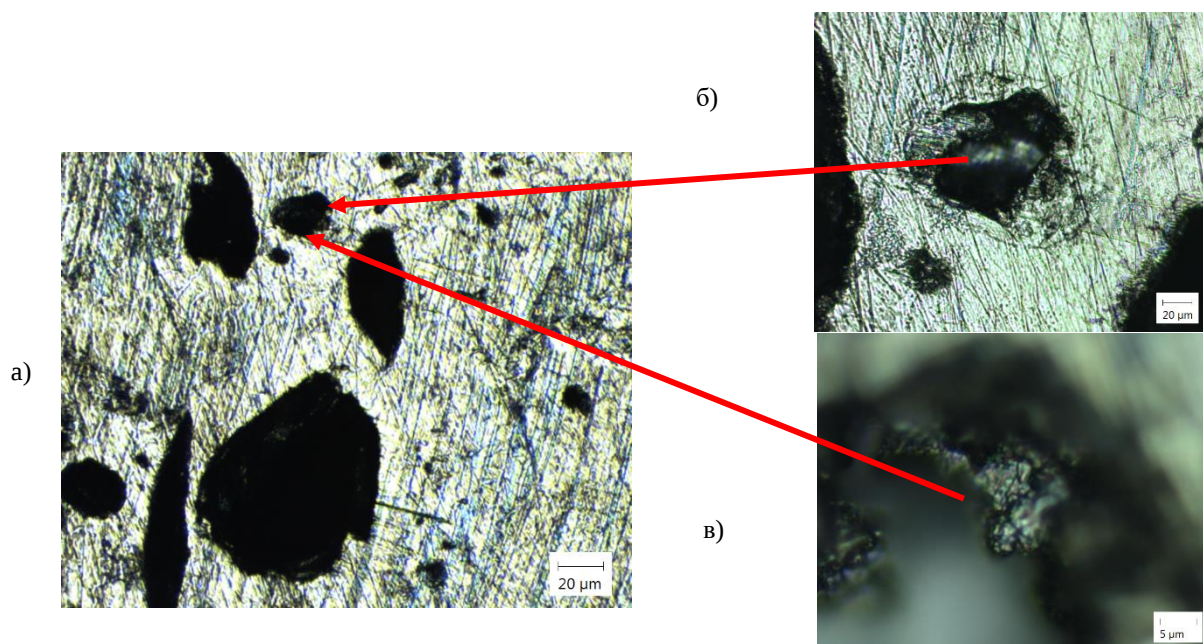
Слика 7.2 Микроструктура ZA-27 металне основе: а) SEM снимак б)EDS анализа

Управо се на слици 7.2 могу уочити најсветлије, беле фазе које представљају у највећој мери цинк, што је приказано тачком 1. Тачке 2 и 3 означавају фазе које представљају легуру ZA-27 са одређеним процентуалним уделом алуминијума и цинка, с тим што се може уочити и присуство одређених оксида насталих након самог процеса испитивања. На слици је такође видљив и траг хабања настао током процеса испитивања.

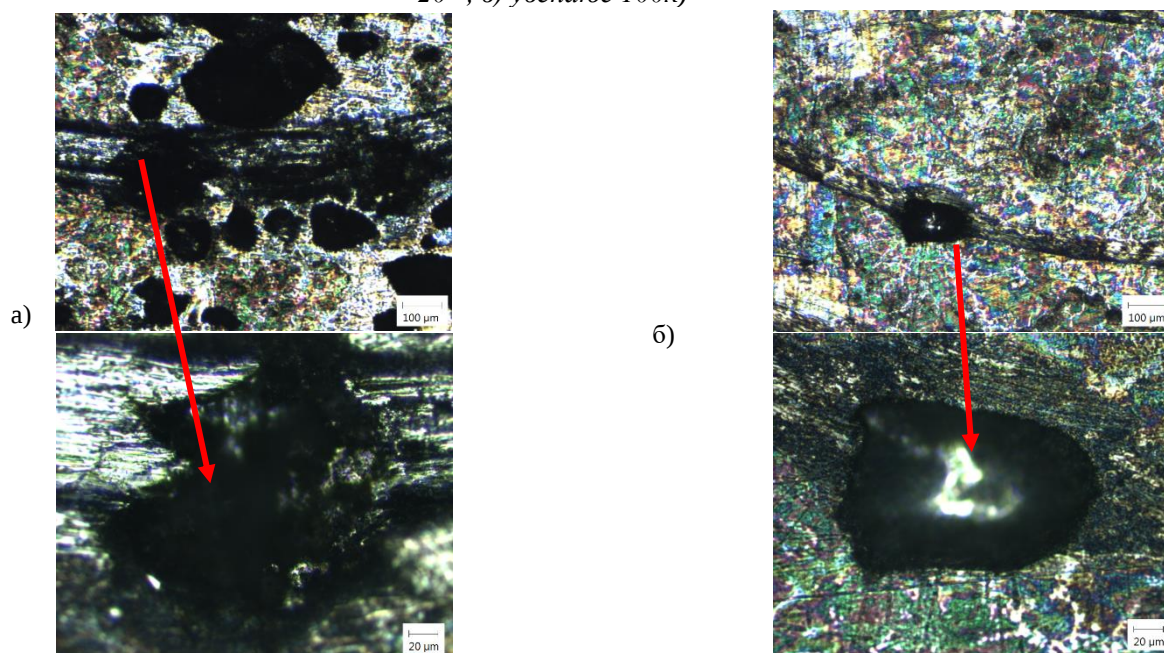
7.1.2 Наноккомпозит ZA-27 + 0,5 % нано Al_2O_3

Као што је претходно напоменуто, испитивани наноккомпозит садржи 0,5 % масеног удела нано честица Al_2O_3 , а изглед површине, као и неке карактеристичне фазе у структури, се могу уочити на слици 7.3. Може се рећи да тамнија поља представљају одређене структурне несавршености у виду гасних мехурова или нечистоћа насталих при самом

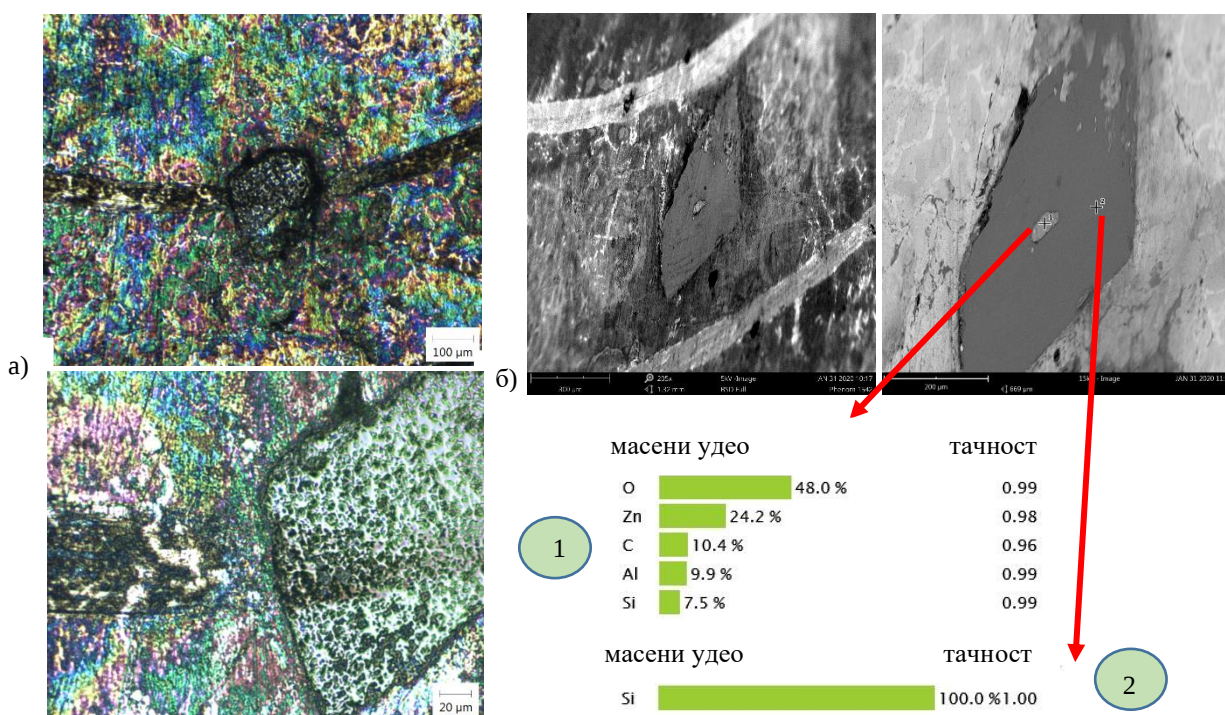
процесу добијања ових нанокомпозита. У овакву врсту грешака у материјалу дат је увид у поглављу 5, где је поменуто претходно испитивање ових материјала од стране аутора овог рада. На слици 7.4, поменута тамна поља се могу уочити чак и на самом трагу хабања. Не може се са сигурношћу тврдити, али тамне мрље на самом трагу могу представљати поре у материјалу. С друге стране, на слици 7.4 б), на ужем трагу, где је тамна мрља увећана 20х и то до дубине од 155 μm , постоји могућност да је на овом месту у материјалу постојала одређена група честица, која је током једне од фаза брушења уклоњена.



Слика 7.3 Изглед површине нанокомпозита ZA-27 + 0,5 % Al_2O_3 : а) увећање 5 $\times$, б) увећање 20 $\times$, в) увећање 100 $\times$)



Слика 7.4 Структурне несавршености на трагу хабања : а) шири траг, б) ужи траг

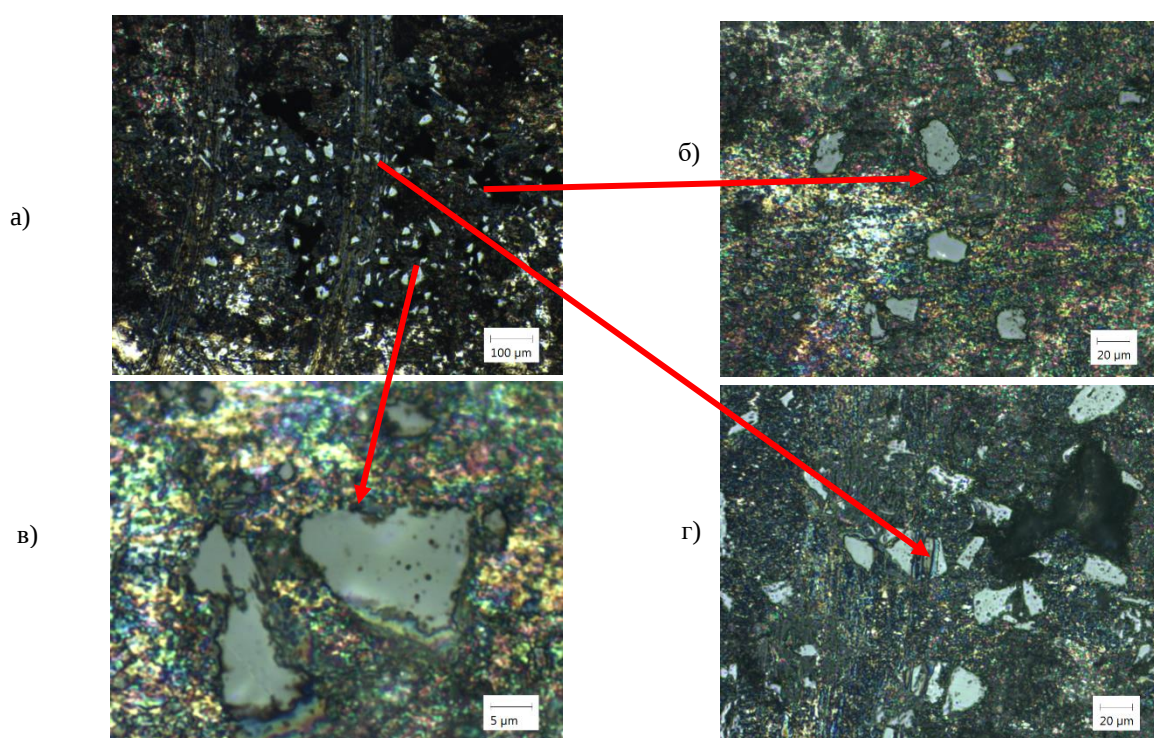


Слика 7.5: Честице силицијум-карбида на, и у близини трага хабања:
 а) Оптички микроскоп б) SEM снимак и EDS анализа нанокompозита са 0,5% Al_2O_3

С друге стране, на слици 7.5, на самом трагу хабања, али и у близини истог, могу се уочити и крупне микро честице силицијум-карбида. Иако ове честице не би требало да се нађу како у структури тако и на површини овог испитиваног материјала, оваква појава се може приписати самом процесу добијања овог нанокompозита, а с обзиром на начин мешања, постоји могућност да је честица SiC, претходно „прилепљена“ на унутрашњој површини мешача, одвојена и „умешана“ у састав нанокompозита. Испитивањем помоћу SEM микроскопа и EDS анализе утврђено је да се ради о чистом силицијуму, с претпоставком евентуалног удела угљеника, што се може видети на слици 7.5 б). Такође се може уочити тачка 2, која представља присуство одређених оксида насталих након процеса испитивања, као и присуство нечистоћа.

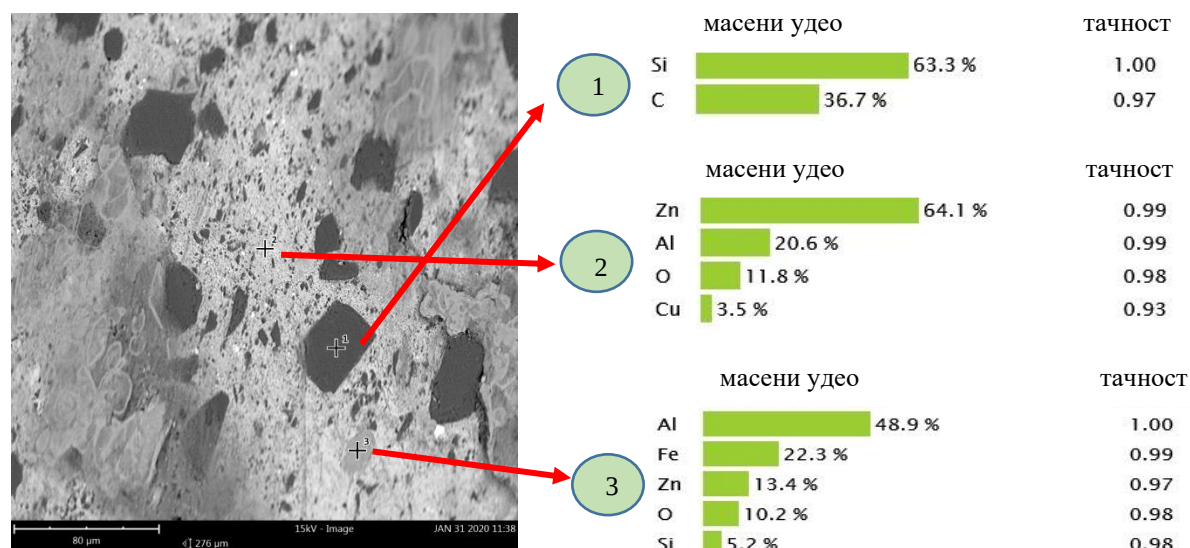
7.1.3 Нано/микро композит ZA-27 + 0,5 % нано Al_2O_3 + 3% микро SiC

Нано/микро композит се тако може назвати јер је базна легура истовремено ојачана нано честицама Al_2O_3 и микро честицама SiC. Приликом испитивања помоћу оптичког микроскопа, на површини овог материјала су уочене управо честице SiC, што се може видети и на слици 7.6. Честице су неправилно распоређене у материјалу, а могу се наћи и виду група одређеног облика и величина, што се може видети и на слици, где се налазе и на самом трагу хабања. Слика 7.6 г) приказане су честице SiC на самом трагу хабања, те се може установити да је челична куглица прешла управо преко неколико оваквих честица и оставила траг на истим.



Слика 7.6 Изглед површине нано/микро композита ZA-27 + 0,5 % Al_2O_3 + 3% SiC:
а) увећање 5×, б) увећање 20×, в) увећање 100×, г) честица SiC на трагу хабања, увећање 20×

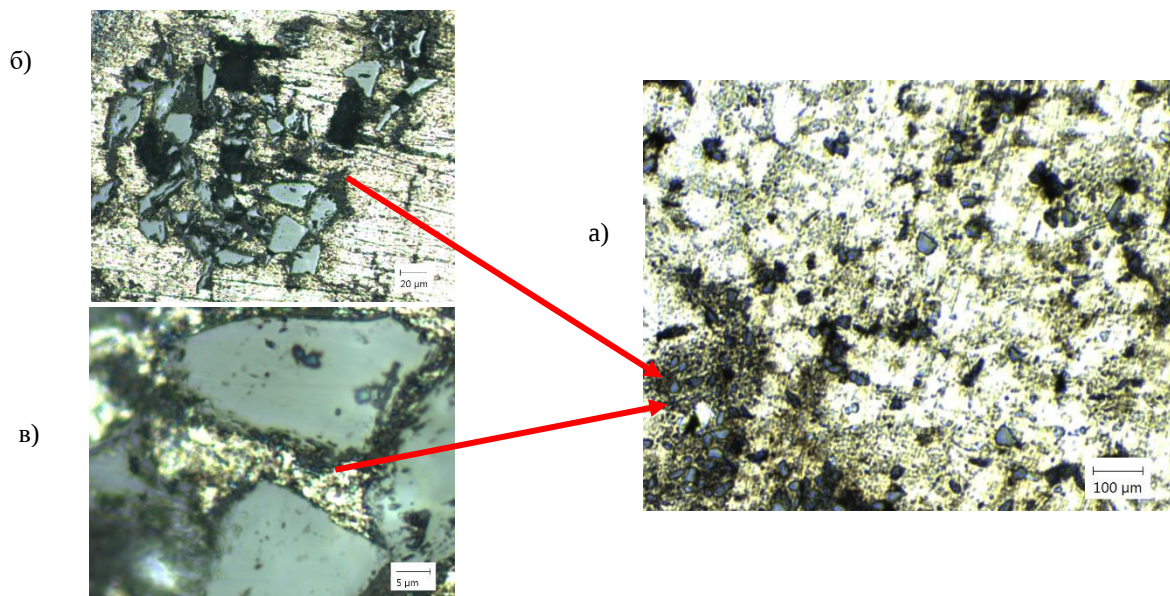
Помоћу снимка са SEM-а и EDS анализе, утврђено је присуство честица силицијум-карбида на површини испитиваног нано/микро композита, на слици 7.7 под тачком 1. Тачке 2 и 3 представљају одређене фазе легуре ZA-27, са одређеним присуством оксида. Фаза приказана тачком 2 има већи проценат цинка, док код фазе приказане тачком 3 доминира алуминијум.



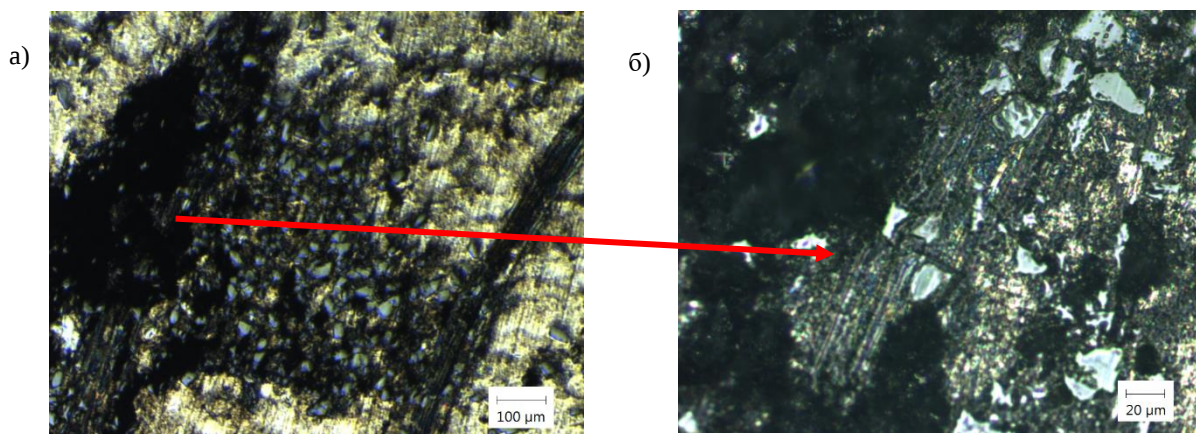
Слика 7.7 SEM снимак и EDS анализа површине нанокомпозита ZA-27 + 0,5 % Al_2O_3

7.1.4 Нано/микро композит ZA-27 + 0,5 % нано Al_2O_3 + 5% микро SiC

За разлику од претходно приказаног нано/микро композита, у овом случају је масени удео честица SiC 5%. Сликаом 7.8 то се може и потврдити с обзиром на то да се на слици може уочити већа количина, како неправилно распоређених честица SiC, тако и честица груписаних у „кластере“.



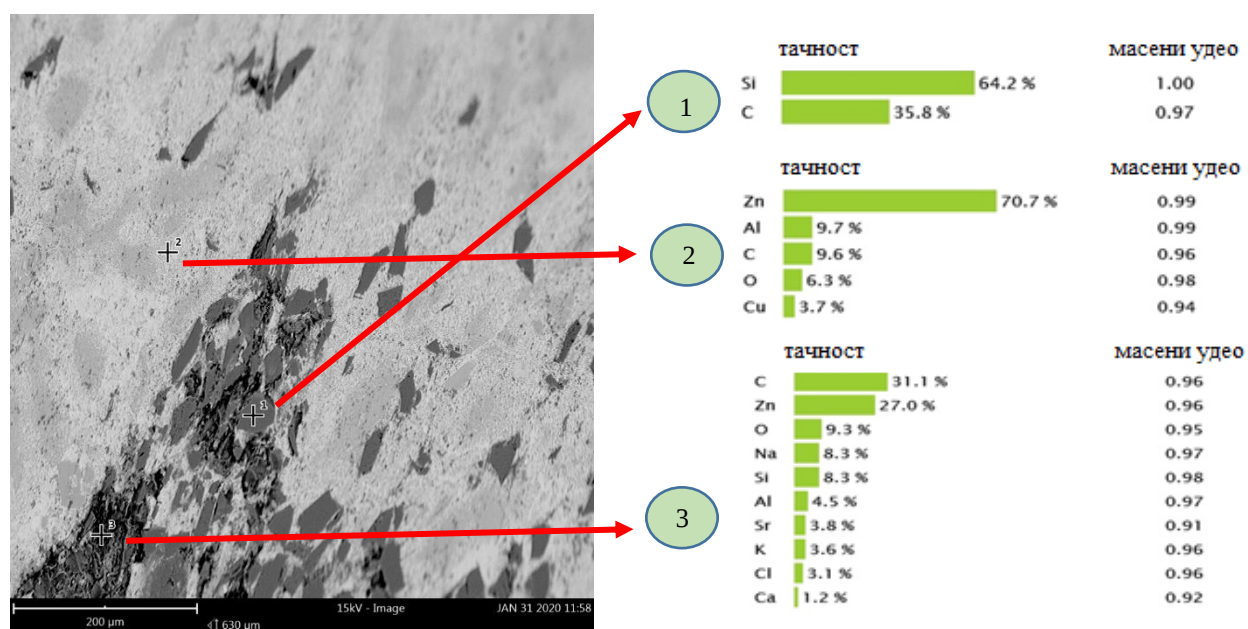
Слика 7.8 Изглед површине нано/микро композита ZA-27 + 0,5 % Al_2O_3 + 3% SiC :
а) увећање 5×, б) честице груписане у „кластер“ увећање 20×, в) увећање 100х)



Слика 7.9 Групације честица у виду „кластера“ у околини и на трагу хабања:
а) увећање 5×, б) увећање 20×

Већи удео честица код нано/микро композита са петопроцентим уделом може се потврдити и сликом 7.9 где се могу уочити горепоменути кластери још већег обима. Такође, групације честица су видљиве, како у околини, тако и на трагу хабања.

Тамна зона на слици 7.9 потенцијално наводи да је у тој зони постојала група честица, а да је евентуално одвојена током процеса испитивања, с обзиром на то да је на самом трагу хабања. Тамне зоне, које нису у околини трага хабања, настају као последица уклањања групе честица током процеса брушења. Значајно је напоменути да одређене тамне зоне, како је већ поменуто, могу представљати и структурне несавршености у самом материјалу. Места груписаних честица прати порозност структуре и знатно слабије везе са материјалом основе, па је самим тим на тим местима могуће и присуство нечистоћа и оксида, што се може видети и на слици 7.10. Помоћу SEM снимка и EDS анализе утврђено је да се на месту где доминира група честица SiC могу наћи и одређене нечистоће у виду Na, K, Cl, Ca, као и оксида што се може закључити због присуства кисеоника (тачка 3, слика 7.10). Тачка 1 представља зону у којој доминирају силицијум и угљеник, тачније честицу SiC, док подручје означено тачком 3 представља легуру ZA-27 са приказаним процентуалним уделом алуминијума и цинка.



Слика 7.10 Групације честица у виду „кластера“: а) SEM снимак б) EDS анализа

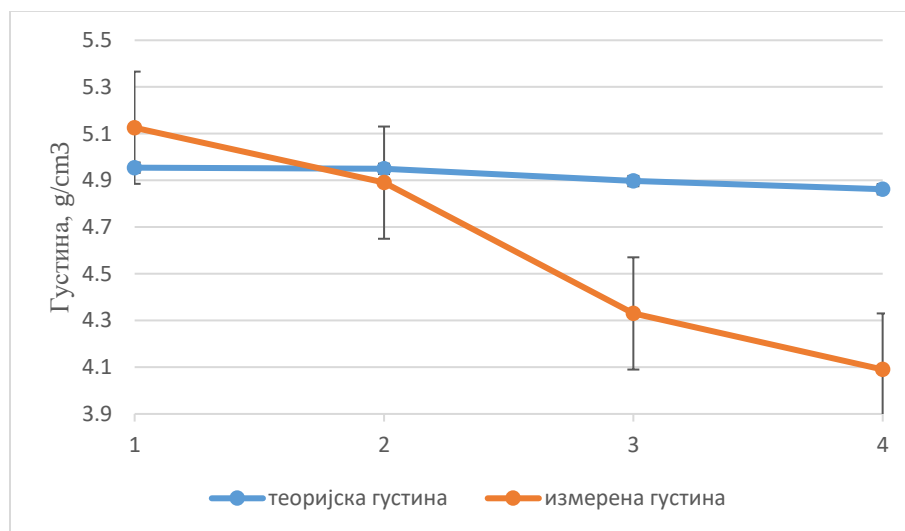
Проф. др Мирослов Бабић [62] у свом раду, који се тиче микро/нано структурног нивоа нанокомпозита ојачаних нано честицама SiC, детаљније наводи појаву групације честица у виду кластера у микро/нано структури композита. Кластер се може таквим окарактерисати уколико је у зони у којој су груписане честице масени удео честица већи од метала основе, у овом случају ZA-27 металне основе.

7.2 Густина и порозност

Структурне карактеристике испитиваних композита су, поред микроструктуре, представљене и резултатима мерења густине и порозности.

Евидентна је разлика између теоријске и стварне густине што пре свега имплицира на постојање структурних несавршености насталих током процеса добијања ових композита. Може се такође претпоставити да густина значајно опада додавањем нано честица Al_2O_3 , док посебно долази до пада густине са порастом удела микро честица SiC . Пад вредности густине испитиваних материјала може се окарактерисати као последица мање густине честица у односу на густину честица металне основе и појаве горепомнутих структурних несавршености, што је случај код измерене (стварне) густине честица (слика 7.11).

Измерена густина металне основе износи $4,95 \text{ g/cm}^3$, густина нано честица износи $3,95 \text{ g/cm}^3$, а микро честица SiC $3,21 \text{ g/cm}^3$. Тачка 1 представља густину ZA-27 металне основе и при којој стварна густина износи приближно $4,954 \text{ g/cm}^3$, док тачка 2 представља густину нанокомпозита ZA-27 са 0,5% масеног удела честица Al_2O_3 , где је теоретска густина приближно $4,945 \text{ g/cm}^3$. Тачке 3 и 4 представљају густину нано/микро композита ZA-27 са 0,5% масеног удела честица Al_2O_3 и тропроцентним, односно петопроцентним масеним уделом честица SiC , код којих је пад теоретске густине евидентан. Такође, на слици 7.11 представљен је и тренд пада стварне, експериментално измерене густине узорака применом Архимедовог закона.

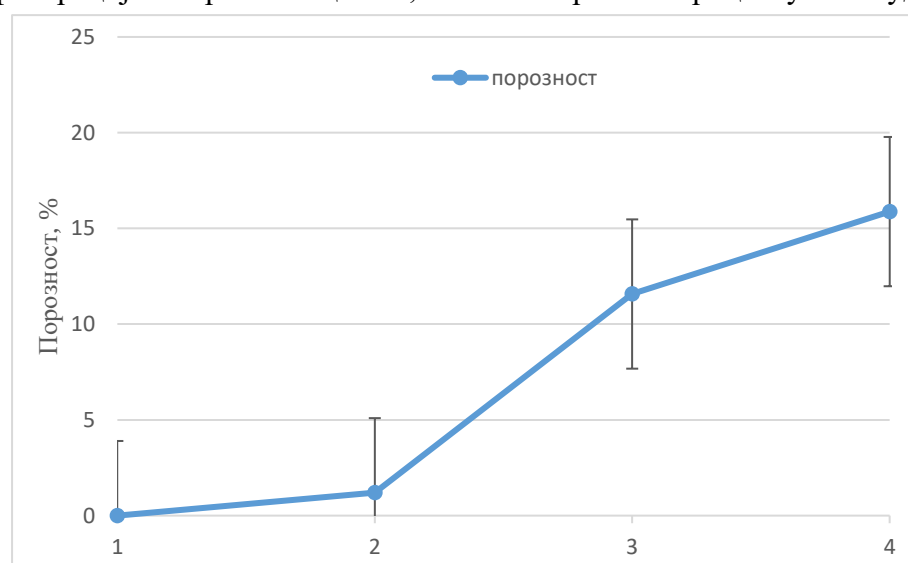


Слика 7.11 Густина испитиваних материјала: тачка 1 - ZA-27 металну основу, тачка 2 - ZA-27 + 0,5% Al_2O_3 , тачка 3 - ZA-27 + 0,5% Al_2O_3 + 3% SiC , тачка 4 - ZA-27 + 0,5% Al_2O_3 + 5% SiC

Пад измерене густине не прати у потпуности пад теоретски израчунате густине узорака, а карактеристичне тачке 1 – 4 представљају измерену густину претходно поменутих узорака. Као што се и на самом дијаграму може уочити, највећи пад стварне

густине евидентан је код нано/микро композита ојачаног 3% SiC, при чему се може доћи до закључка да удео микро честица доводи до већег пада густине, пре свега због мање густине микро честица. Тренд пада густине је настављен са порастом удела ових честица. Значајно је напоменути и да је стварна, експериментално измерена густина узорака нижа у односу на теоријски израчунату густину, што даље имплицира на постојање порозности материјала као последицу процеса добијања ових композита. *Ezatpour* [42] је такође дошао до закључка да до пада густине и пораста порозности у материјалу долази због додавања честица ојачавача. Лоша квашливост и настанак пора у међусобном реаговању матрице и честица ојачавача доводе до стварања порозности.

Проценат порозности испитиваних материјала израчунат је поређењем теоретски израчунате густине узорака и стварне, експериментално измерене густине (слика 7.12). На слици се може приметити значајан пораст порозности са уделом нано честица, а посебно након инфилтрације микро честица SiC, као и са порастом процентуалног удела истих.



Слика 7.12 Дијаграм порозности испитиваних материјала: тачка 1 - ZA-27 металну основу, тачка 2 - ZA-27 + 0,5% Al₂O₃, тачка 3 - ZA-27 + 0,5% Al₂O₃ + 3% SiC, тачка 4 - ZA-27 + 0,5% Al₂O₃ + 5% SiC

До сличних закључака, који се тичу пада густине и повећања порозности нанокомпозита, дошао је и професор *Бабић* [62], с тим што је у том раду испитиван нанокомпозит са једним типом нано честица SiC, те се може рећи да је тренд пада теоријске густине готово линеаран. Један од разлога пада густине са уделом честица ојачавача представља управо постојање горепоменутих групација честица SiC у виду „кластера“. Овако груписане честице доводе до пада густине материјала, али и до стварања порозне структуре.

7.3 Трење

Током експерименталног испитивања на нанотрибометру праћена је промена коефицијента трења у зависности од броја циклуса (1000 циклуса). С обзиром на то да се испитивање вршило применом модула за ротационо кретање, време трајања једног експеримента варира између 10 и 15 минута у зависности од полупречника, односно 2, 2,5 и 3 mm. Како би се обавио већи број испитивања, а у циљу добијања поузданих средњих вредности, било је неопходно варирати вредности полупречника. Стога је одлучено да се број циклуса (пролаза) задржи константним. У зависности од испитиваног материјала коефицијент трења, током процеса испитивања, варира приближно између 0,06 и 0,32.

7.3.1 ZA-27 метална основа

Испитивањем материјала металне основе утврђено је да коефицијент трења достиже максималну вредност од 0,32 у односу на остале испитиване материјале, што се може уочити и на слици 7.13. где су приказане средње вредности коефицијента трења. То се најпре може окарактерисати појавом адхезивног трансфера материјала који доводи до истородног контакта два материјала који је најчешће предуслов за веће вредности коефицијента трења [Дунић, 4], [Tavoosi, 47].



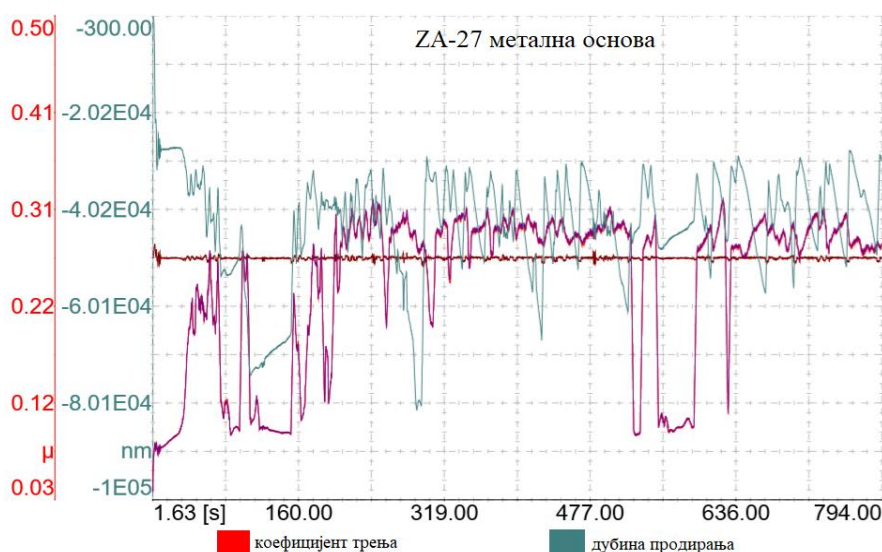
Слика 7.13 Дијаграм средње вредности коефицијента трења у зависности од броја пролаза за ZA-27 металну основу, $r=3\text{mm}$, $r=2,5\text{mm}$ и $r=2\text{mm}$

Како се и на слици може уочити, коефицијент трења варира приближно између 0,1 и 0,32, а један од разлога јесте већ поменути адхезивни трансфер материјала који доводи до стварања налепа на површини контра тела. Како наводи Tarasov [60], разлог стварања налепа у виду нагомилане количине материјала јесте повећање температуре у зони контакта, како је и детаљније објашњено у поглављу 5.

Значајно мања отпорност на хабање ZA-27 металне основе, као и повећање брзине клизања и оптерећења приликом експеримента, значајно утичу на стварање услова за адхезивни трансфер материјала. Бабић [61] такође наводи да до значајне адхезије долази на самом почетку испитивања, односно одмах након деловања нормалног оптерећења на испитивани материјал. Приликом деловања нормалног оптерећења од 100, 150 и 200 mN и брзине клизања од 4, 6 и 8 m/s долази до значајног пораста коефицијента трења и стварања налепа. Испитивањем при нормалном оптерећењу од 50 mN и 2m/s није утврђена појава налепа.

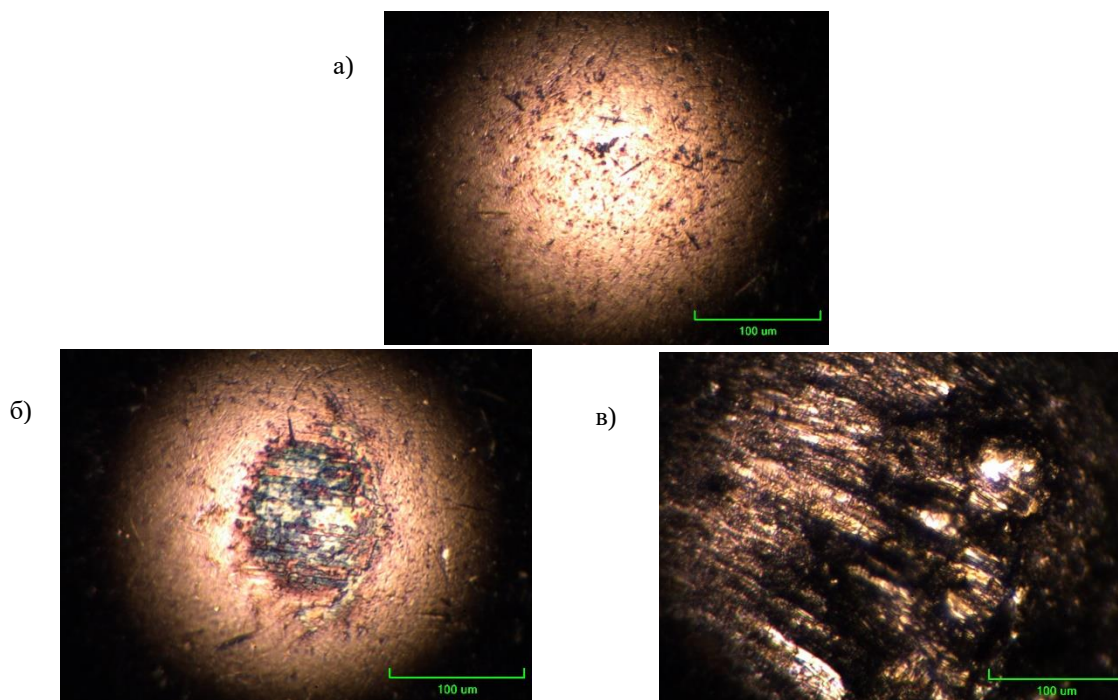
С обзиром на то да су у овом експерименту параметри током испитивања константни, а како праћење температура у зони контакта није омогућено, не може се са сигурношћу утврдити разлог настанка налепа на површини челичне куглице који утиче на пораст коефицијента трења у овом случају. Променом контактних параметара у неким наредним студијама могле би се одредити граничне вредности.

Поред високог коефицијента трења, на слици 7.13 примећују се и велике осцилације криве која исти и представља. На слици 7.14 приказан је дијаграм коефицијента трења и дубине продирања за ZA-27 металну основу који приказује софтвер нанотрибометра, пре свега због упоређивања осцилација поменутих параметара. С обзиром на то да нанотрибометар бележи вредности дубине продирања по z оси, овакве осцилације се могу приписати управо трансферу материјала. Налеп на челичној куглици не може настати одједном, већ је сам процес настанка континуалан. Слој трансферованог материјала расте до неке критичне величине, која није у стању да се одупре тангенцијалној смицајној сили услед клизања по испитиваном материјалу. По преласку те границе долази до одвајања дела трансферованог слоја, што у том тренутку узрокује пад коефицијента трења, али и дубине продирања што се може уочити на слици 7.14, где се тзв. пикови који означавају њихов контакт поклапају по вертикали. У том тренутку настаје абразија три тела, односно одвојени делови материјала делују као абразив.



Слика 7.14 Дијаграм коефицијента трења и дубине продирања у зависности од времена за један од трагова - ZA-27 метална основа.

На слици 7.15 дат је изглед непохабане куглице, тј. пре испитивања (7.15 а), након испитивања, без налепа (7.15 в) и након испитивања, са налепом (7.15 в).

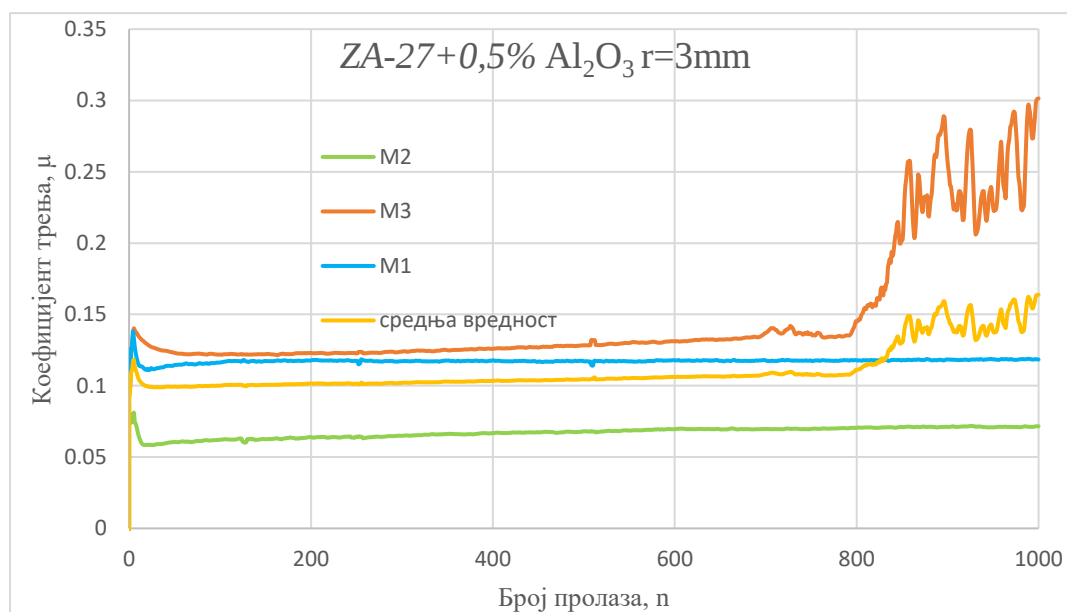


Слика 7.15 Контра тело нанотрибометра у виду челичне куглице, увећање 5×:
а) непохабана куглица, б) похабана куглица без налепа в) куглица са налепом

7.3.2 Наноккомпозит ZA-27 + 0,5 % нано Al_2O_3

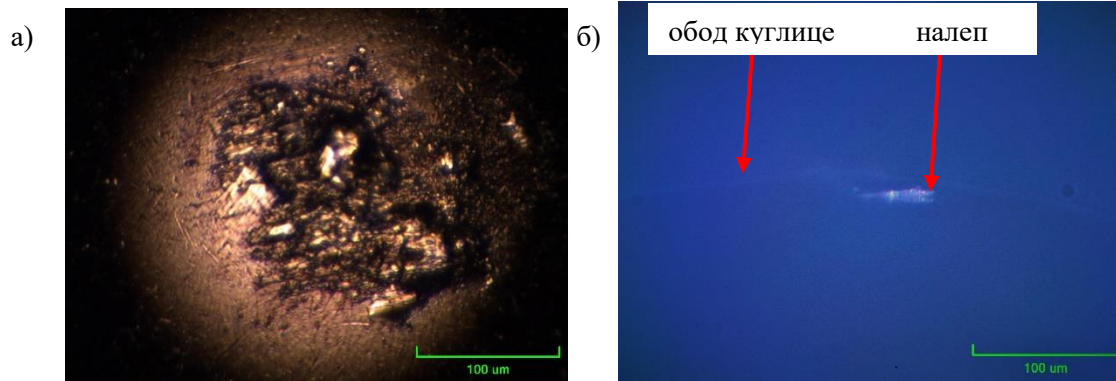
Додавањем честица алуминијум-триоксида металној основи постиже се побољшање структурних, механичких и триболошких карактеристика саме основе, што се може закључити и на основу претходно наведених резултата у неколицини радова на тему наноккомпозита. Такође, до сличних закључака аутор овог рада дошао је у завршном раду приликом испитивања наноккомпозита помоћу „скреч“ теста. Добијени резултати приликом испитивања наноккомпозита, а који се тичу пре свега коефицијента трења приказани су на слици 7.16. На основу вредности за сва три мерења (M1, M2, M3) за овај испитивани материјал, према пречнику путање контра тела, могу се утврдити одређене карактеристике материјала.

Као што се и на дијаграму може уочити, при првом и другом мерењу су вредности коефицијента трења релативно константне и у благом порасту, док при трећем мерењу долази до наглог пораста коефицијента трења. Оваква појава се може приписати већ поменутом адхезивном трансферу материјала који се у овом случају јавља након 800 циклуса. С обзиром на то да се налеп јавља значајно касније него код ZA-27 металне основе, када су вредности коефицијента трења ниже, може се закључити да су фрикционе способности наноккомпозита значајно боље у односу на ZA-27 металну основу.



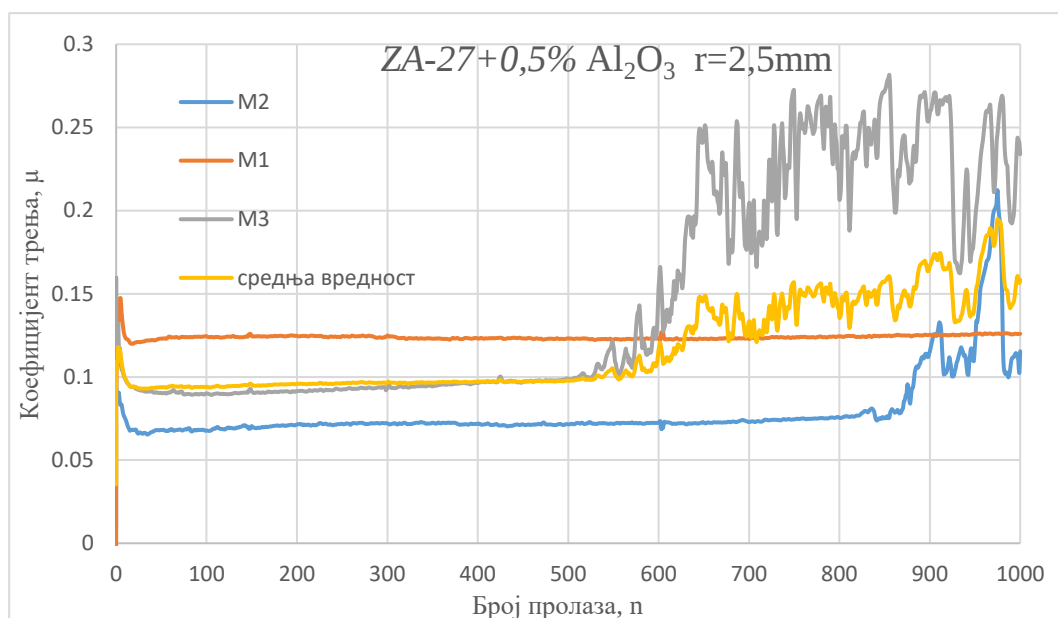
Слика 7.16 Дијаграм средње вредности коефицијента трења у зависности од броја пролаза за нанокомпозит ZA-27 са 0,5 % нано честица Al_2O_3 , $r=3\text{mm}$

У односу на слику 7.15 где налеп прекрива читаву површину куглице, на слици 7.17 се може уочити значајно мањи слој трансферованог материјала, што имплицира да додавање нано честица може довести до ређе појаве трансфера материјала на површини контра тела, куглице.

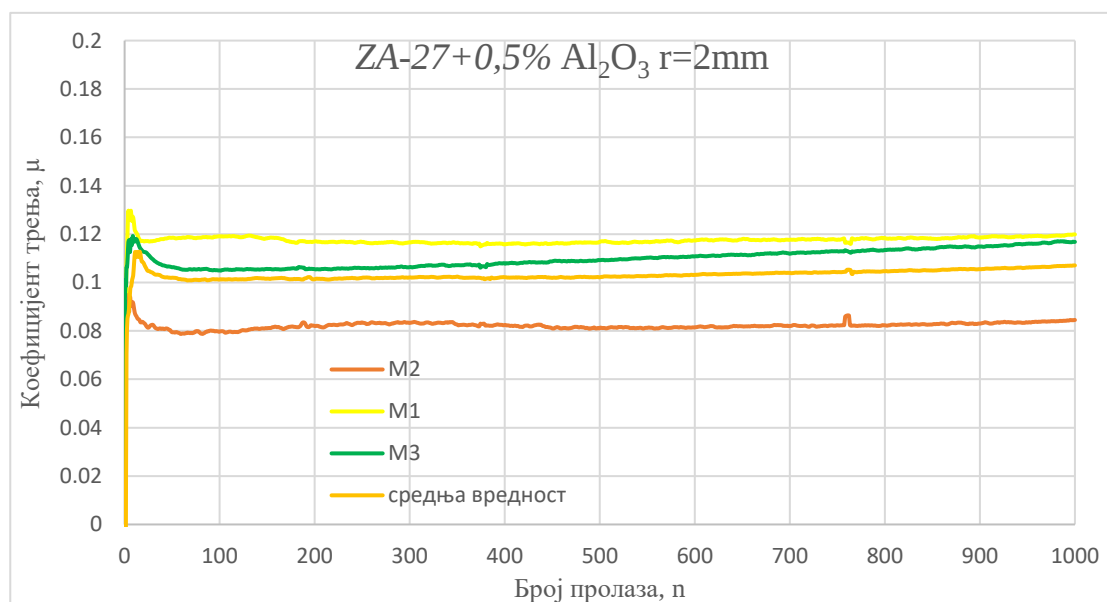


Слика 7.17 Контра тело нанотрибометра у виду челичне куглице, увећање $5\times$:
а) куглица са налепом – фронтално б) са стране

На сликама 7.18 и 7.19 се могу видети дијаграми коефицијента трења у односу на број пролаза за вредности полупречника 2,5 и 2 mm. При првом мерењу, код полупречника 2,5mm, нема значајнијег варирања коефицијента трења, док код другог и трећег мерења долази до наглог пораста коефицијента трења, односно до адхезивног трансфера материјала. При другом мерењу до ове појаве долази тек на крају испитивања, док при трећем мерењу долази до трансфера материјала након 550 пролаза од почетка испитивања, иако се готово најниже вредности коефицијента трења јављају управо при овом мерењу.



Слика 7.18 Дијаграм средње вредности коефицијента трења у зависности од броја пролаза за нанокомпозит ZA-27 са 0,5 % нано честица Al_2O_3 , $r=2,5\text{mm}$



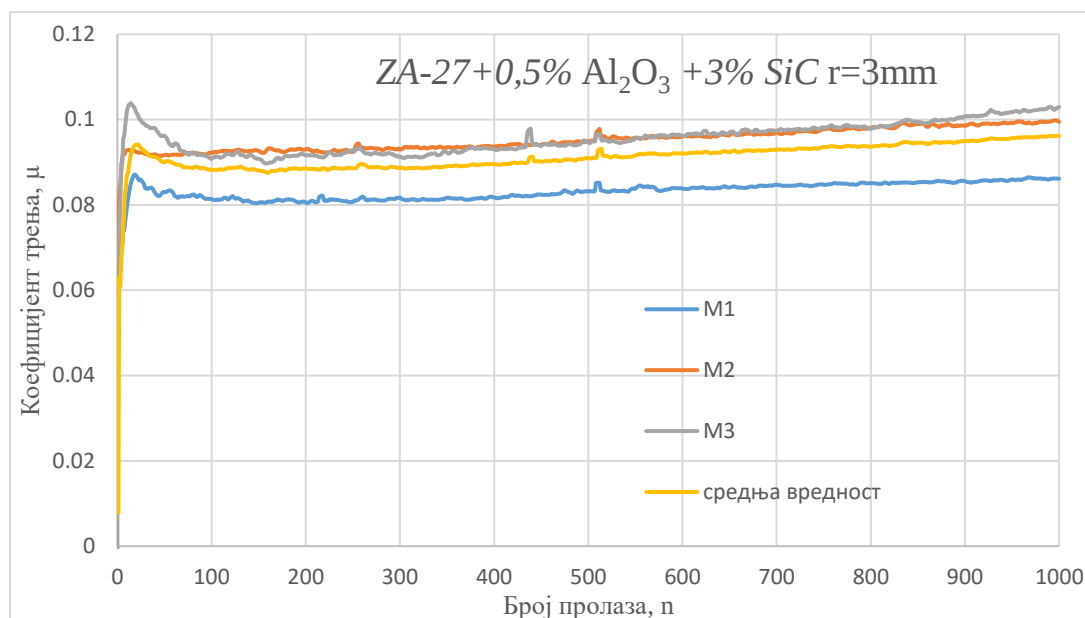
Слика 7.19 Дијаграм средње вредности коефицијента трења у зависности од броја пролаза за нанокомпозит ZA-27 са 0,5 % нано честица Al_2O_3 , $r=2\text{mm}$

Као што се на слици 7.19 може приметити, нема одређених осцилација коефицијента трења, а вредности су значајно ниже него на дијаграму за ZA-27 металну основу, између 0,085 и 0,12.

С обзиром на то да се трансфер материјала не јавља при сваком од мерења, а како је већ поменуто да се не може са сигурношћу утврдити контактна температура, распоред честица у великој мери може утицати на појаву налепа. Места на којима се појављује више нано честица могу довести до побољшања триболошких карактеристика материјала.

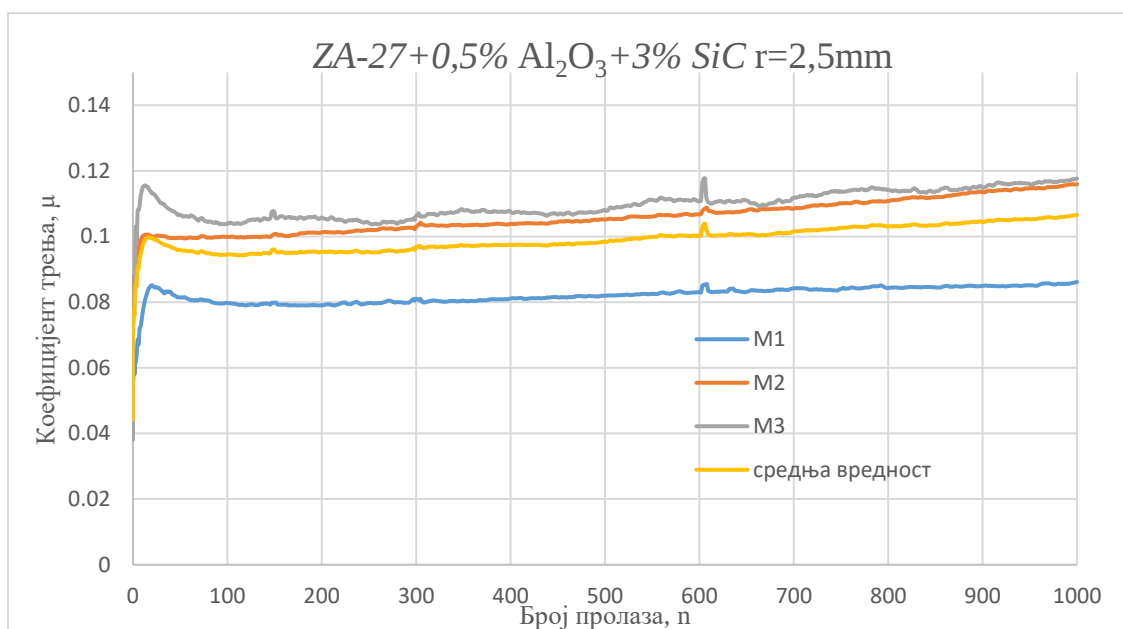
7.3.3 Нано/микро композит ZA-27 + 0,5 % нано Al_2O_3 + 3% микро SiC

Као што је већ поменуто, нанокompозити имају боље фрикционе карактеристике у односу на њихову металну основу. Међутим, појава одређених структурних несавршености у самом нанокompозиту утиче на нестабилност ових карактеристика. Под претпоставком да ће се унапредити карактеристике извршено је испитивање ових нанокompозита са додатком микро честица SiC.

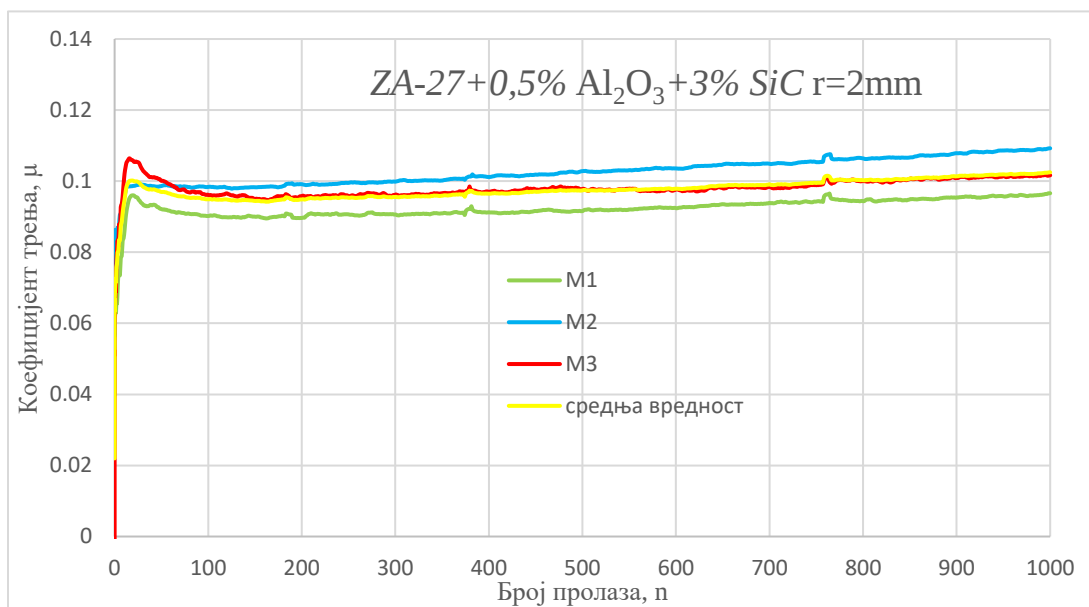


Слика 7.20 Дијаграм средње вредности коефицијента трења у зависности од броја пролаза за нанокompозит ZA-27 са 0,5 % нано честица Al_2O_3 и 3% микро честица SiC, $r=3mm$

На сликама 7.20, 7.21 и 7.22 приказани су дијаграми зависности коефицијента трења од броја пролаза за нано/микро композит ZA-27 са 0,5% нано честица Al_2O_3 и 3% микро честица SiC према полупречнику путање контра тела. На сва три дијаграма се може уочити да нема већих осцилација коефицијента трења, што даље имплицира да додавање микро честица SiC позитивно утиче на фрикционе карактеристике. Овакав закључак могу само потврдити вредности коефицијента трења које су ниже у односу на нанокompозит и крећу се у опсегу 0,8 до 0,115. У просеку, највише вредности коефицијента трења за нано/микро композит са 3% SiC уочене су код трага полупречника 2,5mm, а најниже вредности за полупречник од 3mm.



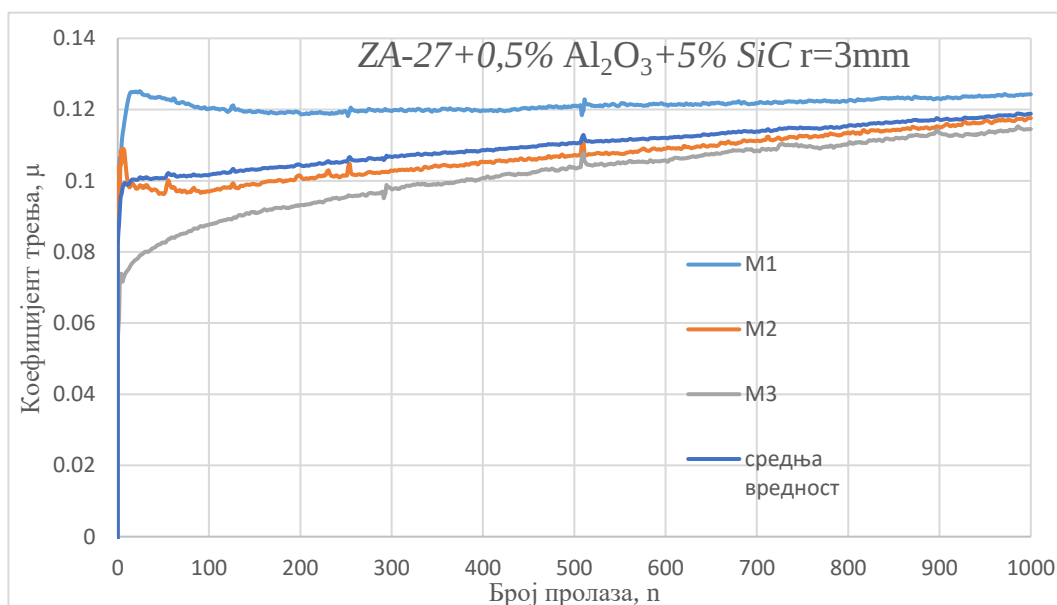
Слика 7.21 Дијаграм средње вредности коефицијента трења у зависности од броја пролаза за нанокмпозит ZA-27 са 0,5 % нано честица Al₂O₃ и 3% микро честица SiC, r=2,5mm



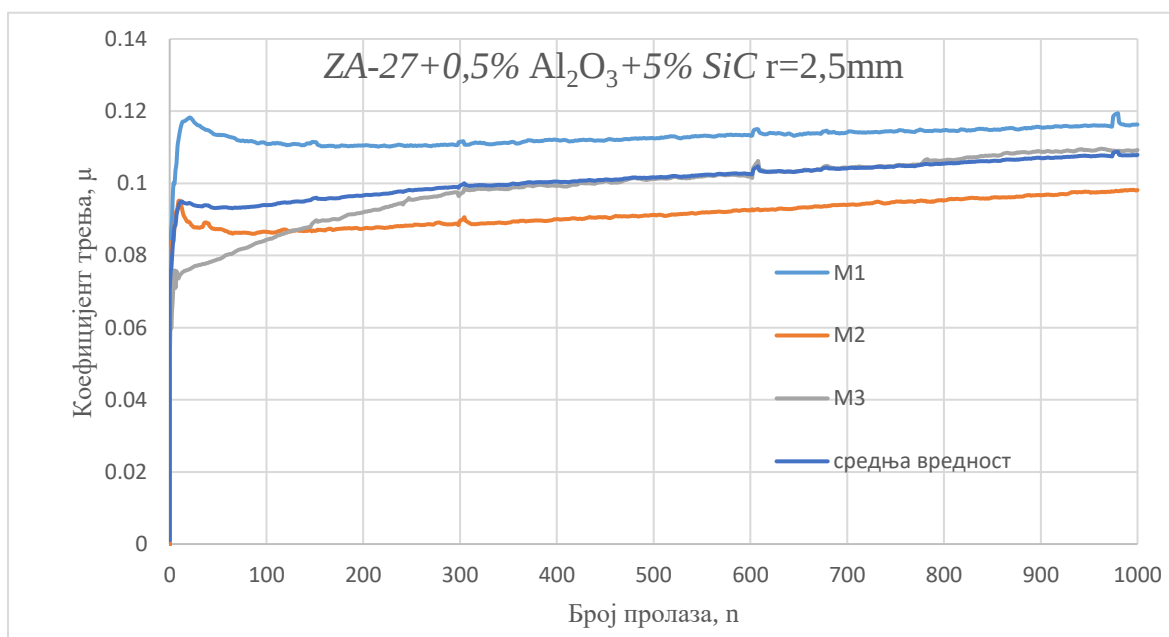
Слика 7.22 Дијаграм средње вредности коефицијента трења у зависности од броја пролаза за нанокмпозит ZA-27 са 0,5 % нано честица Al₂O₃ и 3% микро честица SiC, r=2 mm

7.3.4 Нано/микро композит ZA-27 + 0,5 % нано Al_2O_3 + 5% микро SiC

Повећањем процентуалног масеног удела ових честица (5%) нису уочене значајније промене које се тичу пре свега трења, односно, пораста или смањења коефицијента трења, а није уочен ни трансфер материјала на површину контра тела. С тога се не може са сигурношћу констатовати да са повећањем масеног удела микро честица долази до побољшања карактеристика микро/нано композита.

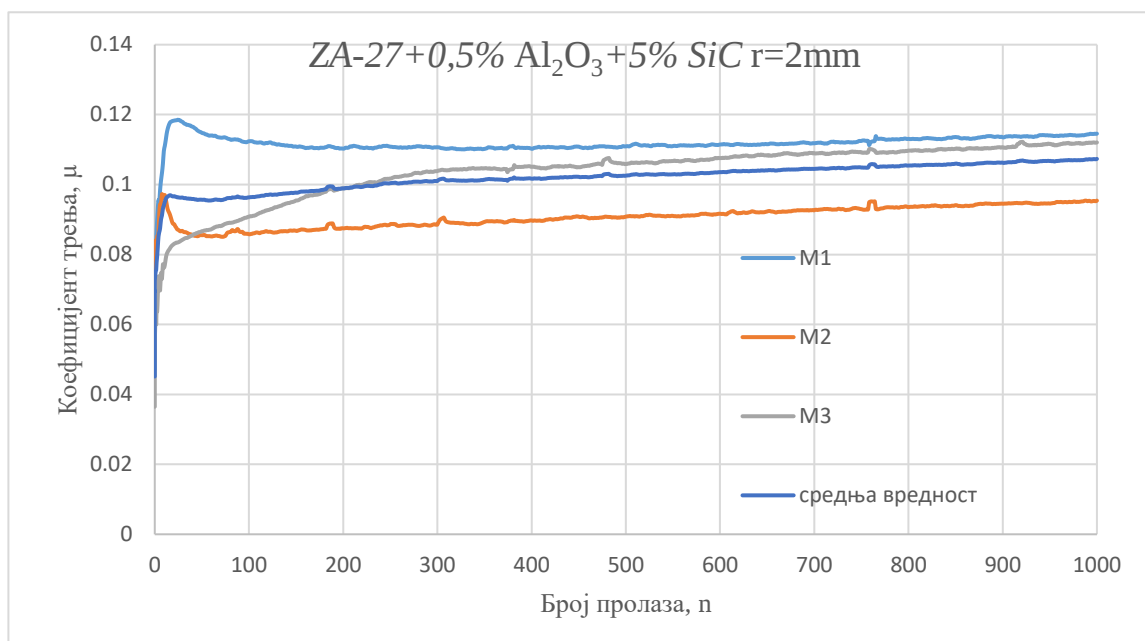


Слика 7.23 Дијаграм средње вредности коефицијента трења у зависности од броја пролаза за нанокомпозит ZA-27 са 0,5 % нано честица Al_2O_3 и 5% микро честица SiC, $r=3\text{ mm}$



Слика 7.24 Дијаграм средње вредности коефицијента трења у зависности од броја пролаза за нанокомпозит ZA-27 са 0,5 % нано честица Al_2O_3 и 5% микро честица SiC, $r=2,5\text{ mm}$

На сликама 7.23, 7.24, 7.25 се могу видети дијаграми зависности коефицијента трења од броја пролаза за полупречнике 3, 2,5 и 2 mm, током три мерења. У сваком од три мерења примењен је већ поменути константни пораст коефицијента трења током самог мерења. Дакле, иако нема веће промене у вредностима коефицијента трења, може се приметити незнатни пораст коефицијента трења у односу на нано/микро композит са 3% SiC



Слика 7.25 Дијаграм средње вредности коефицијента трења у зависности од броја пролаза за нанокомпозит ZA-27 са 0,5 % честица Al_2O_3 и 5% микро честица SiC, $r=2mm$

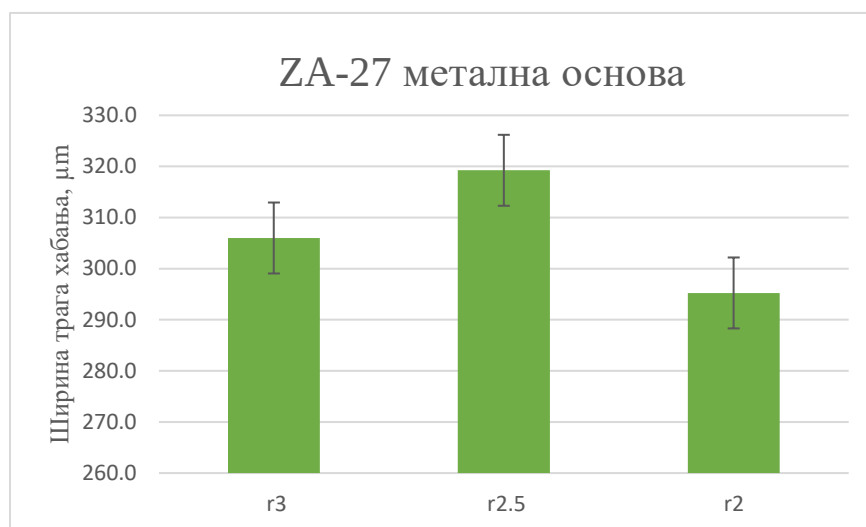
7.4 Хабање

Хабање се дефинише као прогресиван процес губитка материјала са контактних површина елемената трибо-механичког система при релативном кретању. Настали трагови хабања на површинама елемената у контакту, последица су одређених механизма хабања који зависе од врсте контакта, али и механичких и триболошких карактеристика елемената у контакту.

С обзиром на то да је испитивање вршено помоћу нанотрибометра код кога је контра тело у виду куглице, ротационим кретањем контра тела приликом испитивања, на површини композита настају трагови хабања у виду кружница. Такође, материјал куглице се бира тако да његова тврдоћа буде већа од тврдоће испитиваних материјала. У зависности од врсте испитиваних композита, ширина новонасталих трагова хабања варира између 50 и 350 μm .

7.4.1 ZA-27 метална основа

На слици 7.26 може се видети просечна ширина трага хабања за цинк-алуминијумску основу.

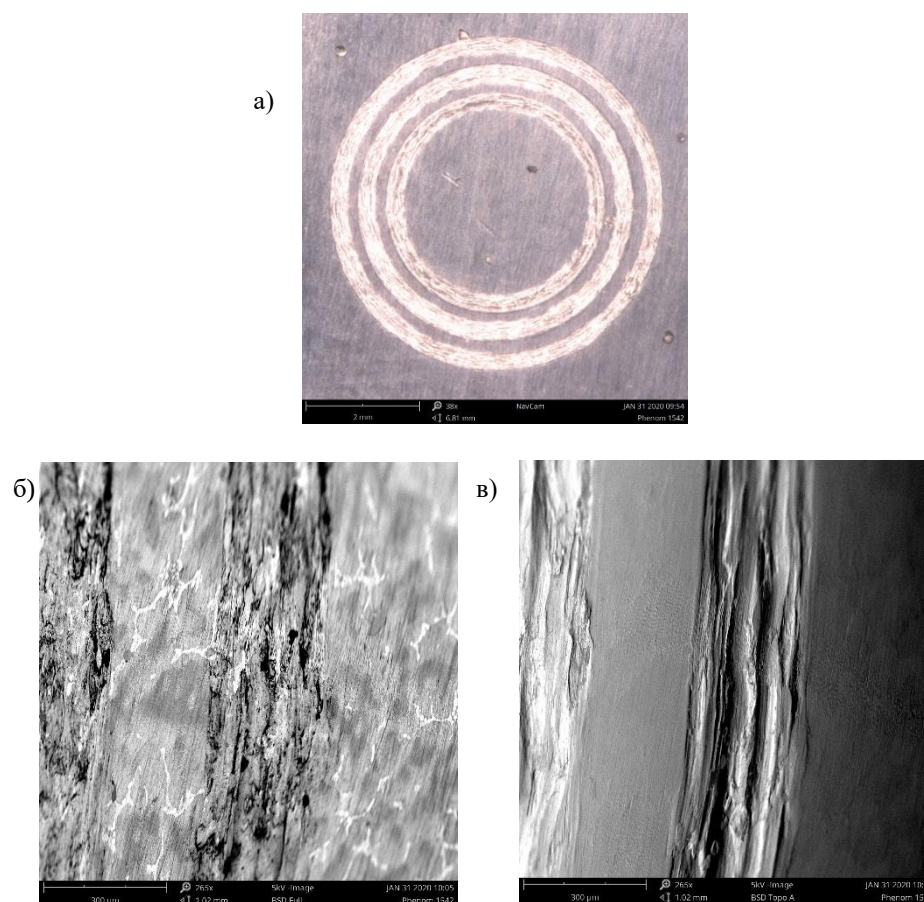


Слика 7.26 Просечна ширина трага хабања за ZA-27 металну основу у зависности од полупречника

Ширина трага хабања код металне основе је око $300\mu\text{m}$, при чему је дошло до адхезивног трансфера материјала, који утиче на повећање хабања и настанак налепа на површини куглице [Tarasov].

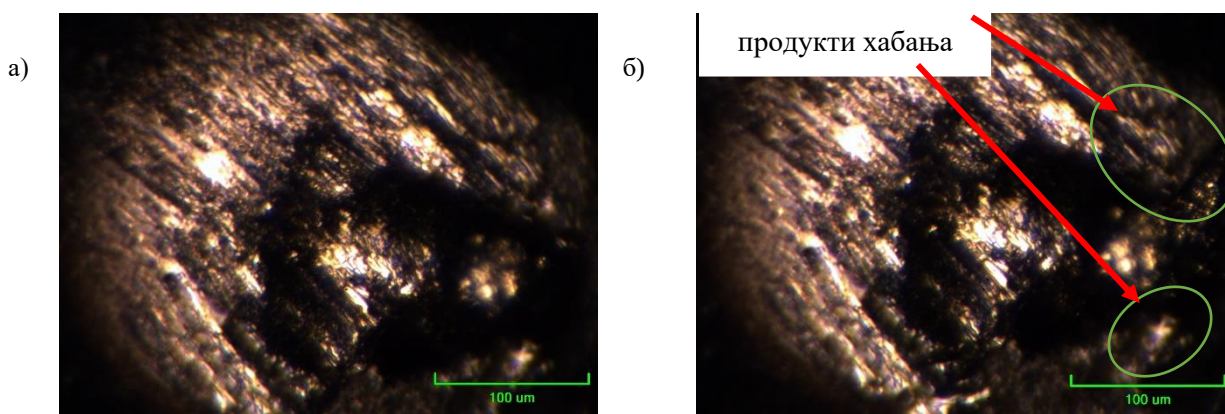
На слици 7.27 се могу видети трагови хабања настали током испитивања једног од узорака ZA-27 металне основе анализом и применом SEM-а.

Сва три трага хабања се јасно могу видети на слици 7.27 а), док топографски приказ SEM микроскопа даје детаљан увид како изгледа траг хабања настао услед адхезивног трансфера материјала. Налеп на куглици, настао нагомилавањем слојева трансферованог материјала, доводи до ширих трагова хабања, и дубљих и ширих бразди унутар самог трага. Такође, појава паралелних бразди у правцу клизања указује на појаву абразивног хабања као доминантног механизма, што су у свом раду закључили и Boon-Peng, Hazizan и Ramdziah [36].



Слика 7.27 SEM приказ трагова хабања на површини узорка ZA-27 металне основе:
а) оптичка микроскопија, сва три трага хабања, б) оптичка микроскопија, в) топографски приказ

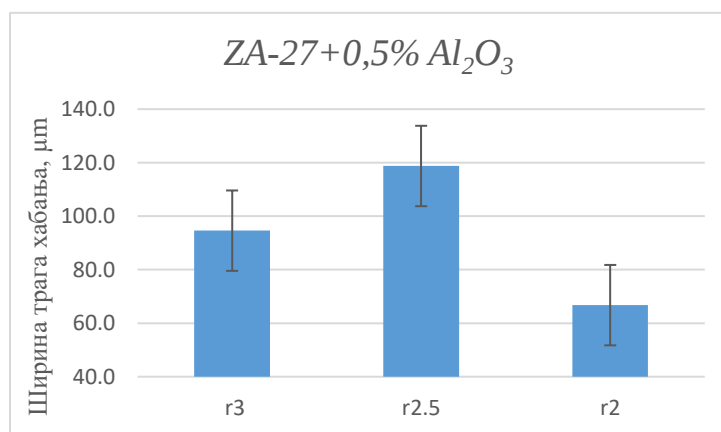
На слици 7.28 се може видети површина куглице након испитивања са и без присуства продуката хабања, насталих током процеса испитивања. Продукти хабања у овом случају нису лако уочљиви с обзиром на то да је код ZA-27 металне основе адхезивни трансфер доминантан механизам хабања.



Слика 7.28 Контра тело у виду челичне куглице:
а) без продуката хабања, б) са продуктима хабања

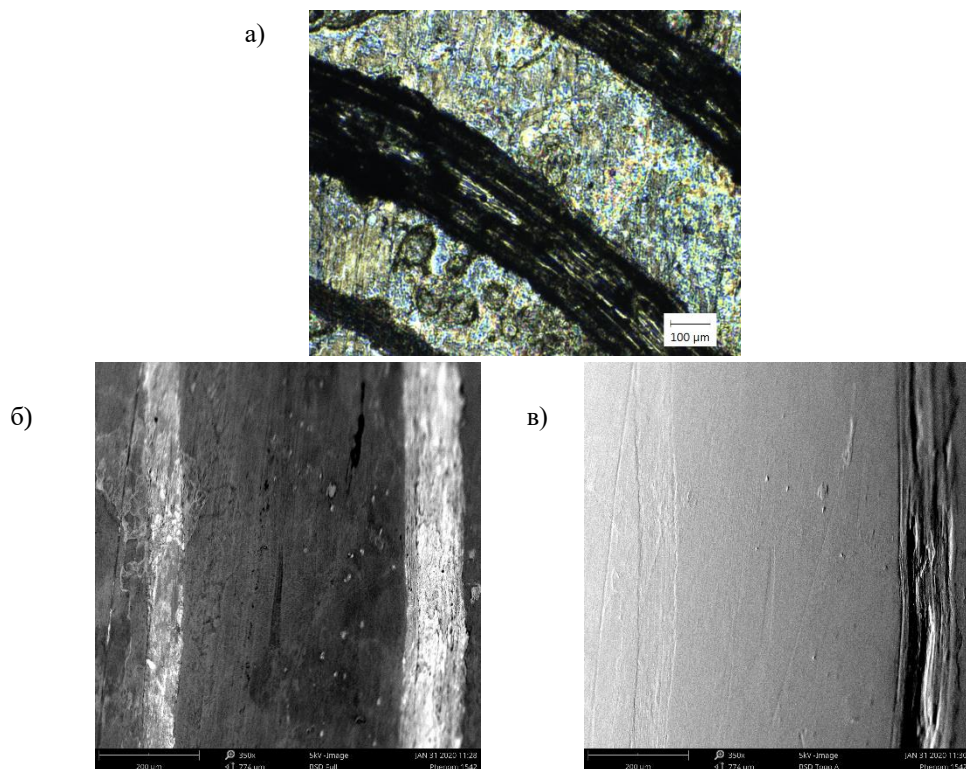
7.4.2 Наноккомпозит ZA-27 + 0,5 % нано Al_2O_3

Додавањем нано честица Al_2O_3 цинк-алуминијумској основи долази до повећања отпорности на хабање, како је већ напоменуто. Сликаом 7.29 приказана је просечна ширина трага хабања код испитиваног наноккомпозита, у зависности од полупречника. Вредности ширине трага хабања за овај материјал се крећу између 60 и 120 μm , док су веће вредности, у великој мери последица налепа насталог услед трансфера материјала.



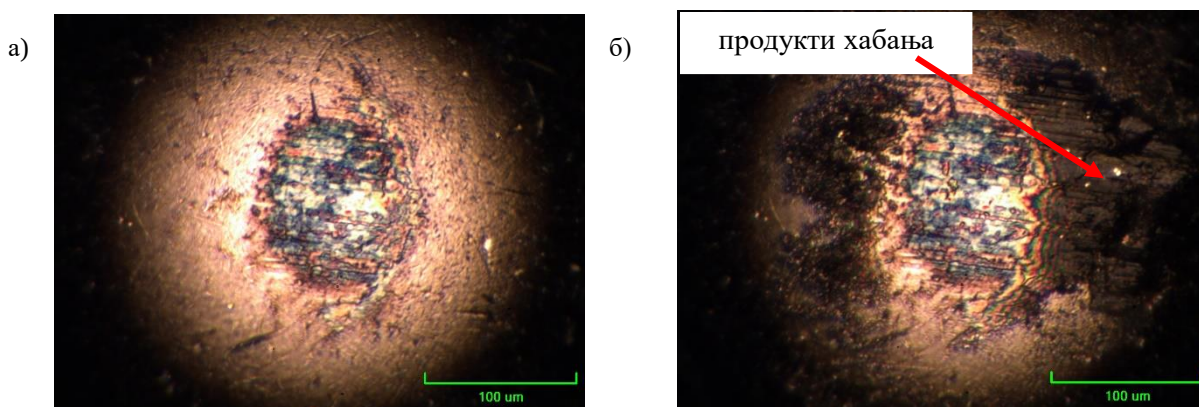
Слика 7.29 Просечна ширина трага хабања за наноккомпозит ZA-27+0,5% Al_2O_3
у зависности од полупречника

На слици 7.30 се могу видети трагови хабања, а разлика између трага налепа и трага без налепа је јасно уочљива. Помоћу SEM топографског приказа, под в), дат је јаснији увид у изобразаност трага насталог посредством контакта налепа на челичној куглици и испитиваног материјала. На слици 7.30 в) траг који се јасно види настао је посредством адхезивног трансфера који је у овом случају доминантан механизам хабања уз интензивну пластичну деформацију. Траг на левој страни SEM топографског приказа настао је посредством абразије у највећој мери, као и умерене пластичне деформације.



Слика 7.30 Приказ трагова хабања на површини нанокомпозита:

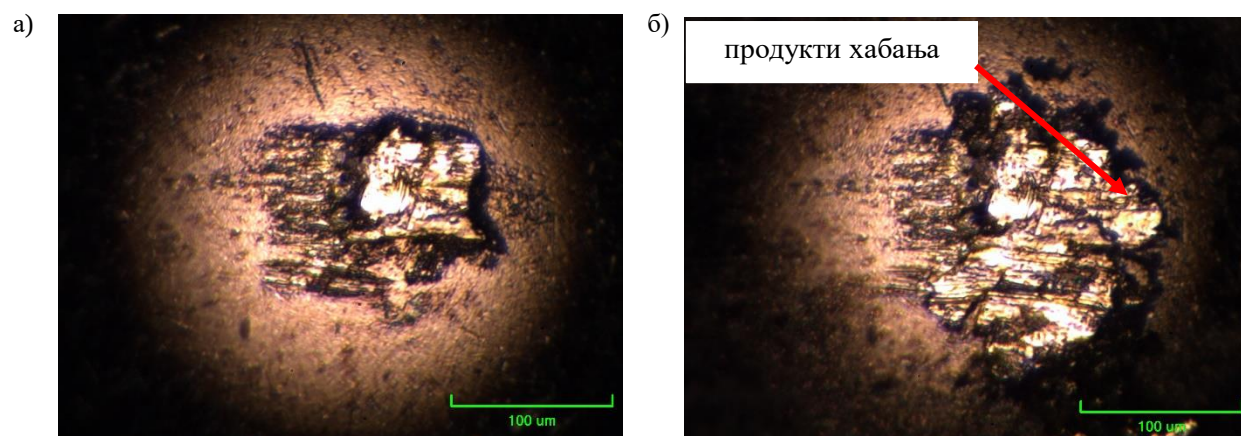
а) сва три трага, оптичка микроскопија, б) SEM приказ, в) топографски приказ,



Слика 7.31 Контра тело у виду челичне куглице:

а) без продуката хабања; б) са продуктима хабања

Сликама 7.31 и 7.32 представљена је површина куглице након испитивања са и без присуства продуката хабања, насталих током процеса испитивања. Трагови хабања су у оба случаја лако уочљиви на сликама под б). Управо продукти хабања могу у виду абразива деловати на површине испитиваних материјала, интензивирајући тако процес абразивног хабања као и умерене пластичне деформације.



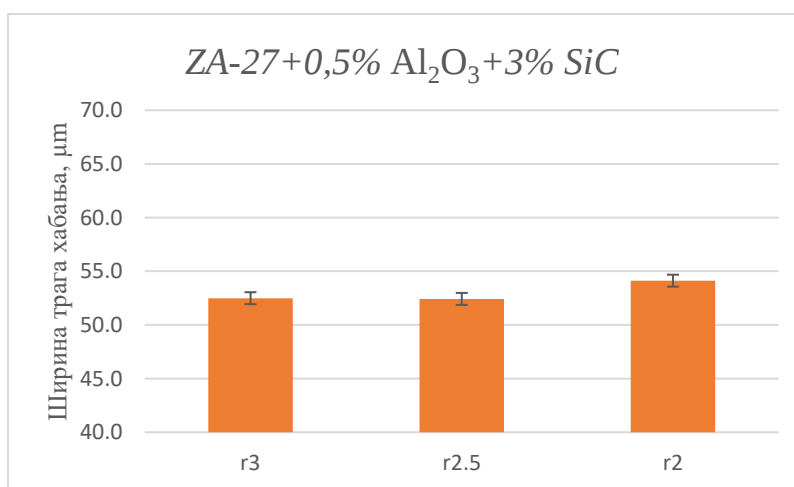
Слика 7.32 Контра тело у виду челичне куглице:
а) без продукта хабања; б) са продуктима хабања

7.4.3 Нано/микро композит ZA-27 + 0,5 % нано Al_2O_3 + 3% микро SiC

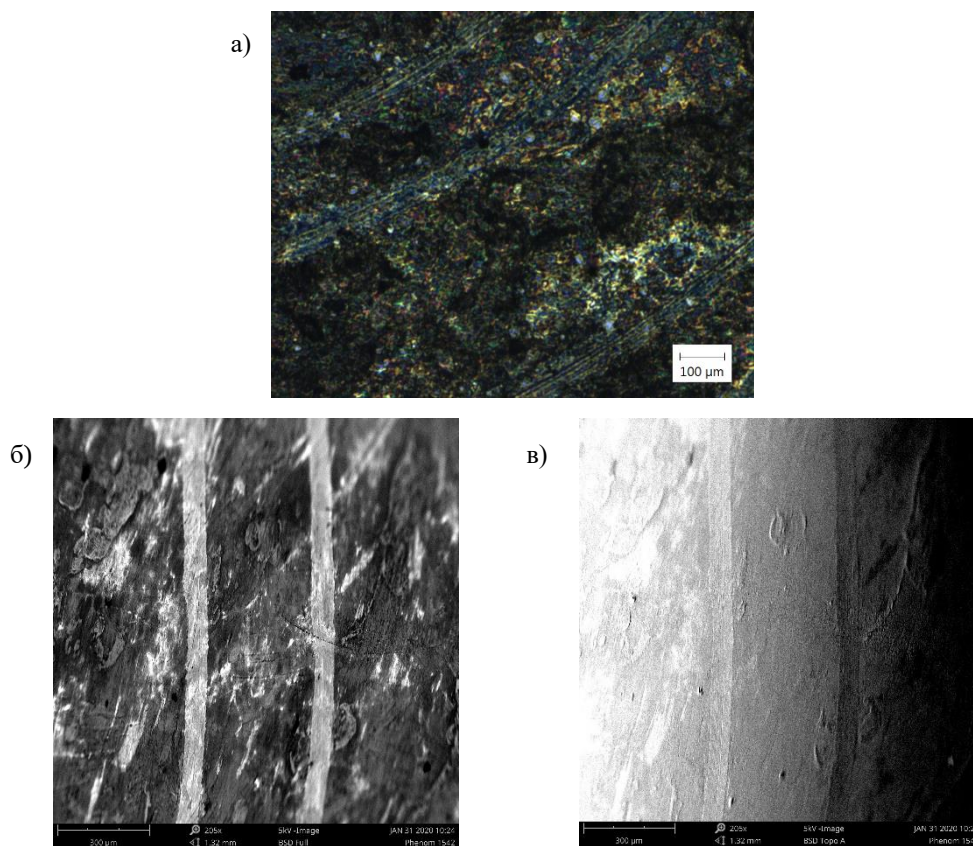
Претходно наведеним дијаграмима коефицијента трења установљено је да нано/микро композити имају значајно боље фрикционе карактеристике у односу на нанокомпозите. На слици 7.33 приказана је просечна ширина трага хабања за нано/микро композит са 3% масеног удела SiC, чија је вредност у опсегу од 50 до 60 μm . Такође, нема појаве налепа, која негативно утиче на карактеристике испитиваних материјала.

Сликом 7.34 приказани су трагови хабања настали током испитивања, помоћу оптичког микроскопа и SEM-а. Као што се може приметити, нема значајне разлике у ширини трагова хабања као ни у изгледу трагова.

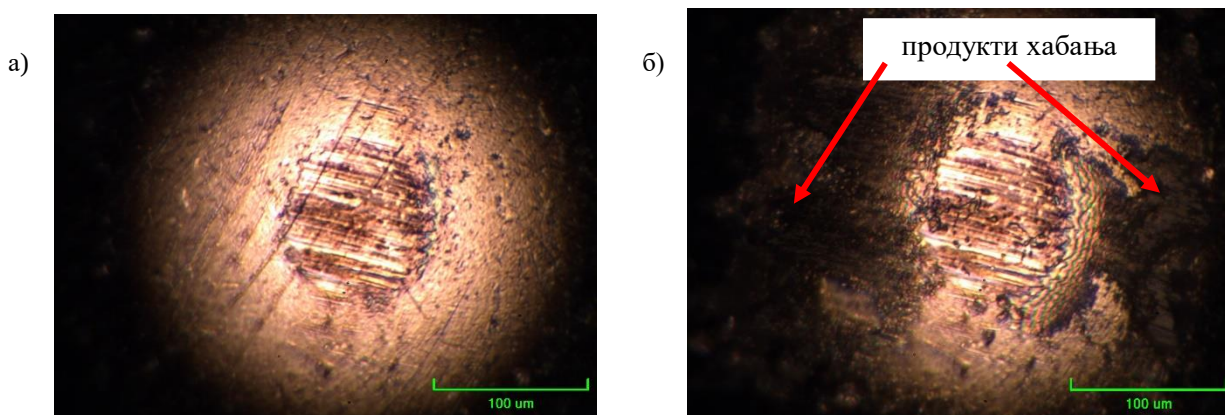
На слици 7.35 се могу видети трагови хабања настали на челичној куглици са или без продукта хабања.



Слика 7.33 Просечна ширина трага хабања за нано/микро композит ZA-27+0,5% Al_2O_3 + 3% SiC у зависности од полупречника



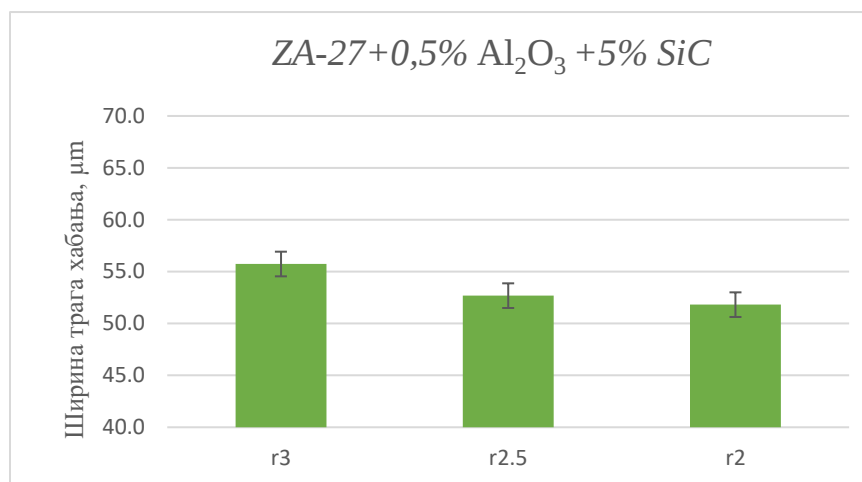
Слика 7.34 Приказ трагова хабања на површини нано/микро композита:
а) сва три трага, оптичка микроскопија, б) SEM приказ, в) топографски приказ,



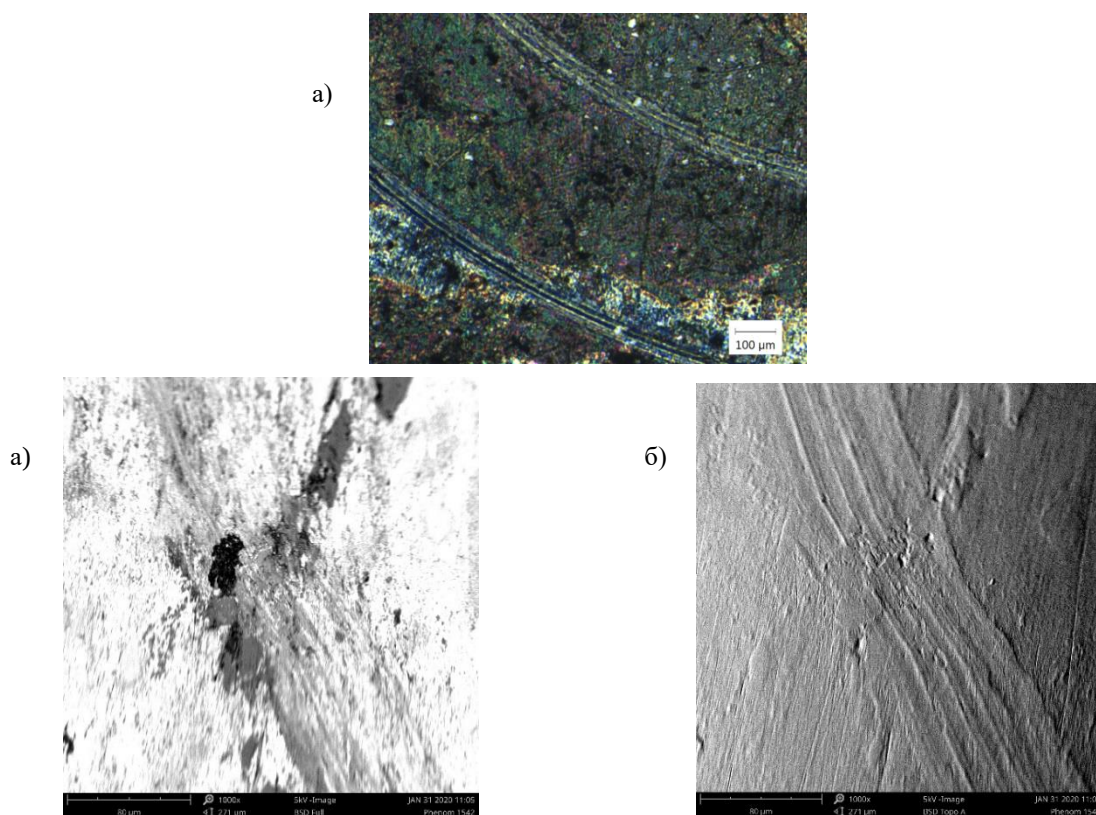
Слика 7.35 Контра тело у виду челичне куглице:
а) без продукта хабања; б) са продуктима хабања

7.4.4 Нано/микро композит ZA-27 + 0,5 % нано Al_2O_3 + 5% микро SiC

У овом случају код нано/микро композита са 5% масеног удела SiC просечна вредност ширина трага хабања је на неким местима на трагу незнатно већа него код нано/микро композита са 3% масеног удела SiC, што се може видети и на слици 7.36.



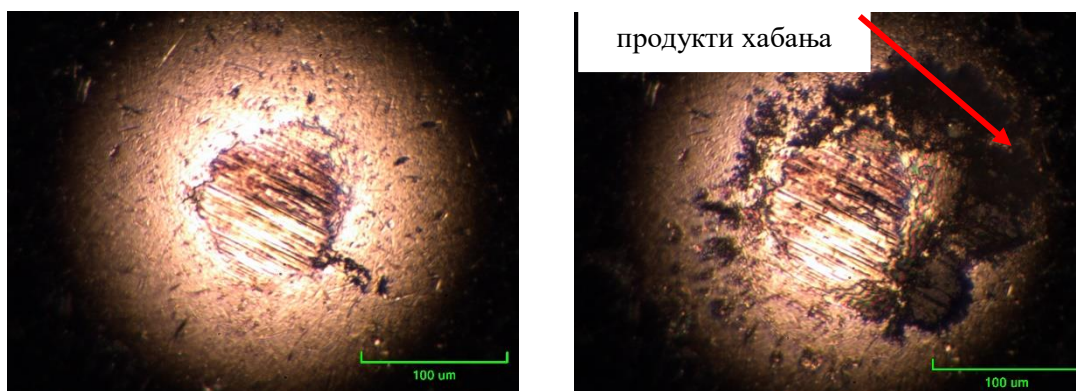
Слика 7.36 Просечна ширина трага хабања за нано/микро композит ZA-27+0,5% Al_2O_3 + 5% SiC у зависности од полупречника



Слика 7.37 Приказ трагова хабања на површини нано/микро композита:
а) оптичка микроскопија, б) SEM приказ, в) топографски приказ,

На слици 7.37 а) приказани су трагови хабања, помоћу оптичког микроскопа, настали током испитивања на нанотрибометру ширине трага приближно $50\mu\text{m}$, што сугерише да није дошло до трансфера материјала. У случају појаве налепа долази до проширења трага и до неколико пута. На слици под б) се може уочити приказ трага хабања помоћу SEM-а у околини кога се налазе честице силицијум-карбида (светлије сива фаза). Најтамнија фаза на трагу хабања представља место на коме је постојала честица SiC, али је одстрањена, или током процеса брушења, или још вероватније током испитивања, с обзиром на то да је куглица прешла директно преко поменуте честице. На слици под в) се може уочити топографија површине испитиваног материјала, а јасне неравнине које настају као последица хабања материјала, је лако уочити. Паралелне бразде у правцу клизања сугеришу на абразивно хабање и умерену пластичну деформацију контактеног слоја.

Сликом 7.38 представљен је траг хабања настао на куглици са или без продуката хабања при једном од испитивања нано/микро композита са петопроцентним запреминским уделом SiC. Продукти хабања остали на куглици су у овом случају у виду праха јер је мањи интензитет хабања, као и пластичне деформације у односу на нанокомпозите.

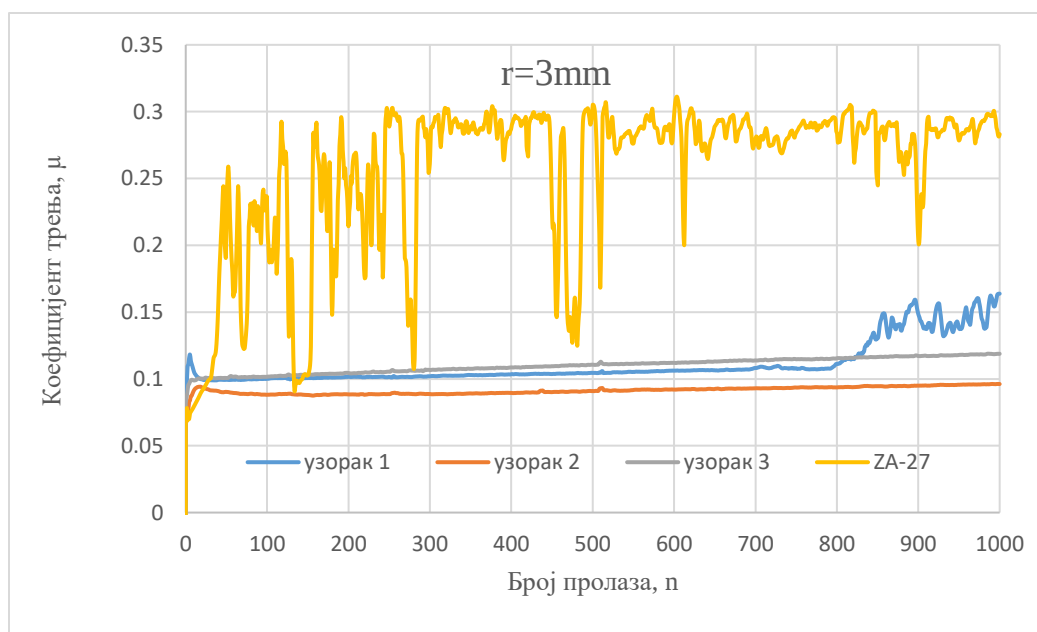


Слика 7.38 Контра тело у виду челичне куглице:
а) без продуката хабања; б) са продуктима хабања

3.5 Компаративни приказ испитиваних композита

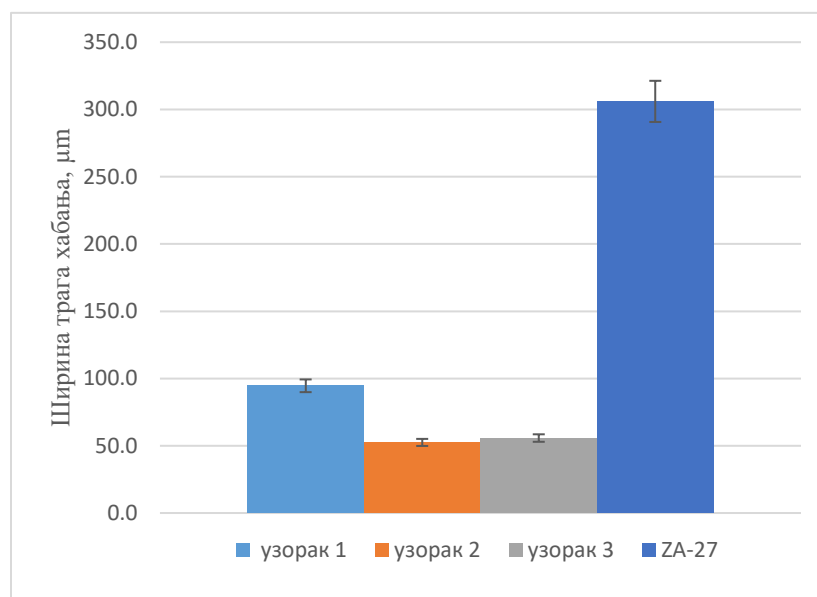
Сходно адекватнијој прегледности резултата у наредном поглављу дат је компаративни приказ измерених и осредњених вредности на којима се могу видети дијаграми зависности средњих вредности коефицијента трења у зависности од броја пролаза као и дијаграми средњих вредности ширине трага хабања. Појединачно, на свакој од слика поређење је извршено према полупречнику трага хабања ($r=3\text{mm}$, $r=2,5\text{mm}$, $r=2\text{mm}$), док узорак 1 представља нанокомпозит са 0,5% запреминског удела Al_2O_3 , узорак 2 представља нано/микро композит са запреминским уделом од 0,5% Al_2O_3 и 3% SiC , док је узорак 3 нано/микро композит са запреминским уделом од 0,5% Al_2O_3 и 5% SiC .

На слици 7.39 су приказане средње вредности коефицијента трења у зависности од броја пролаза за полупречник $r=3\text{mm}$, док су на слици 7.40 приказане средње вредности ширине трага хабања за исти полупречник



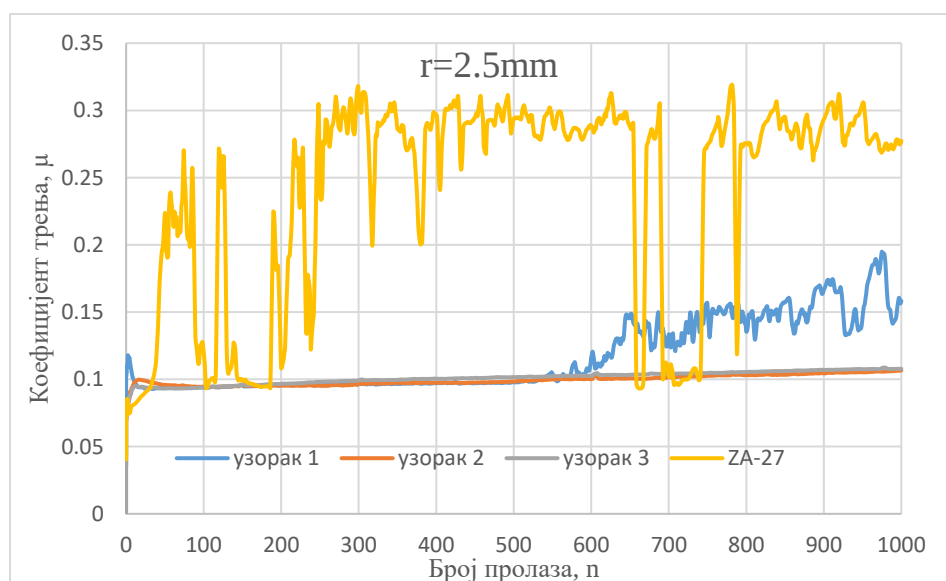
Слика 7.39 Средње вредности коефицијента трења у зависности од броја пролаза за испитиване материјале, за $r=3\text{mm}$.

На сваком од дијаграма, односно хистограма, вредности коефицијента трења и ширине трага хабања су значајно веће за материјал металне основе ZA-27 у односу на остале испитиване композите. Самим тим, може се рећи да су механичке и триболошке карактеристике композита побољшане у односу на саму металну основу додавањем честица ојачавача, без обзира на уочене структурне недостатке који резултују падом вредности густине, односно повећањем порозности материјала.

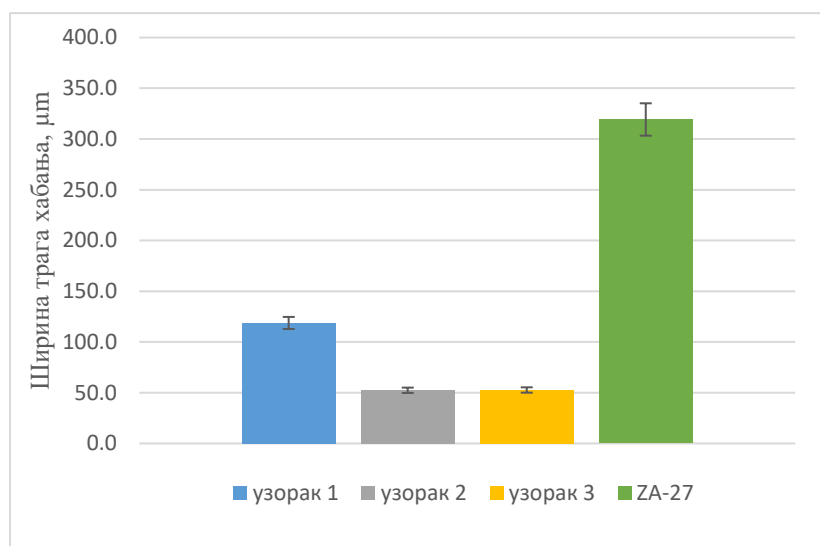


Слика 7.40 Средње вредности ширине трага хабања за испитиване материјале, за $r=3\text{mm}$.

На сликама 7.41 и 7.42 приказане су средње вредности коефицијента трења у зависности од броја пролаза, односно средње вредности ширине трага хабања, за полупречник $r=2,5\text{mm}$.



Слика 7.41 Средње вредности коефицијента трења у зависности од броја пролаза за испитиване материјале, за $r=2,5\text{mm}$.

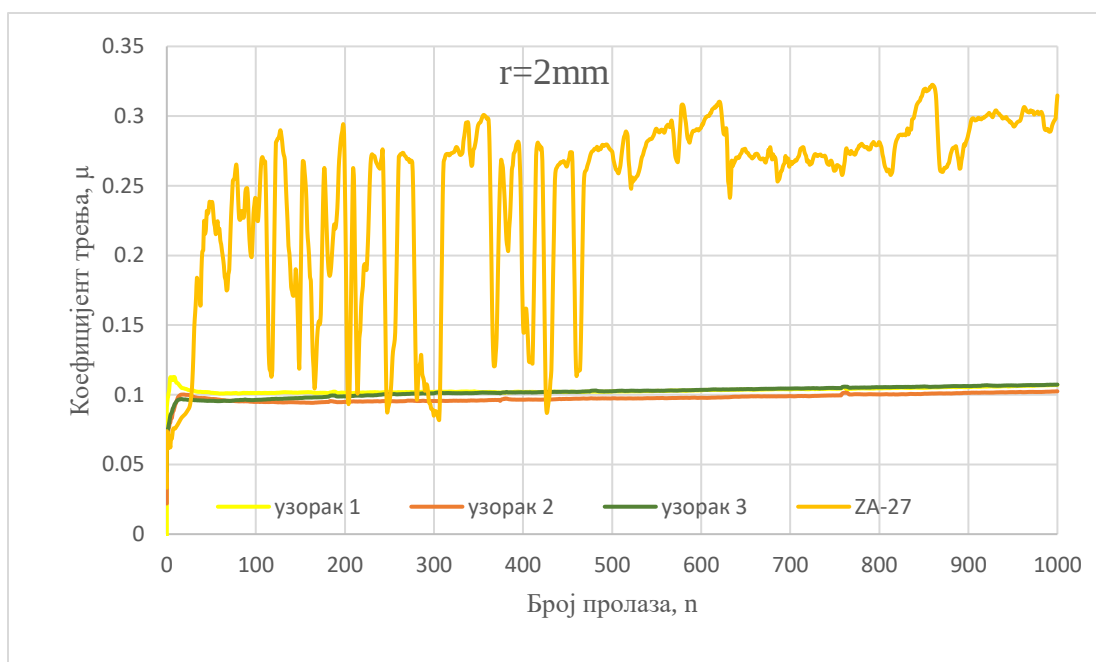


Слика 7.42 Средње вредности ширине трага хабања за испитиване материјале, за $r=2,5\text{mm}$.

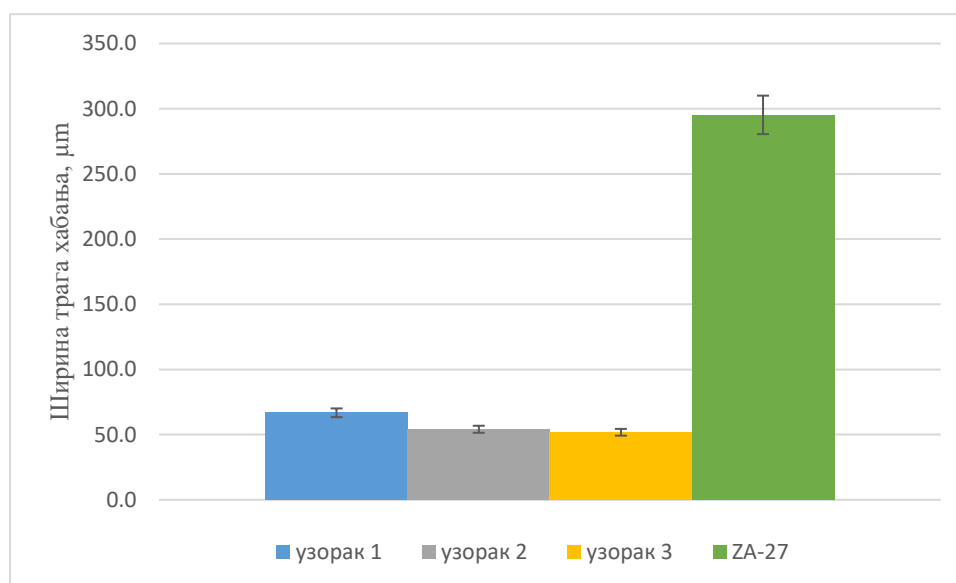
Додавање микро честица нанокомпозиту, такође утиче на побољшање карактеристика материјала, што се и на дијаграмима може видети, с обзиром на то да су вредности коефицијента трења и ширине трага хабања код нано/микро композита ниже у односу на нанокомпозит. На слици 7.41 готово да се криве коефицијента трења оба нано/микро композита поклапају, док до поклапања кривих коефицијента трења свих композита долази у случају полупречника $r=2\text{mm}$, на слици 7.43.

Такође, приликом испитивања нанокомпозита дошло је до појаве адхезивног трансфера материјала. Поред тога, присутна је и интензивна пластична деформација која је посебно изражена у траговима који су настали у условима клизања са налепом, док је абразивно хабање најприсутнији механизам хабања у условима клизања без налепа као и умерена пластична деформација.

Сликом 7.43 дат је приказ средњих вредности коефицијента трења у зависности од броја пролаза за полупречник $r=2\text{mm}$, док су на слици 7.44 приказане средње вредности ширине трага хабања за исти полупречник.



Слика 7.43 Средње вредности коефицијента трења у зависности од броја пролаза за испитиване материјале, за $r=2\text{mm}$.



Слика 7.44 Средње вредности ширине трага хабања за испитиване материјале, за $r=2\text{mm}$.

ЗАКЉУЧАК

Појава микро/нано структура довела је до значајног интересовања трибологије у том погледу, како са научног тако и технолошког аспекта. Нано и микро триболошке студије откривају понашање површина које може бити потпуно различито у односу на оно које се испољава на макро нивоу.

У последњој деценији направљен је велики напор у развијању композита различитих основних материјала ојачаним различитим типовима ојачавача. Композити са металном основом су група материјала са керамичким честицама ојачавача које се додају у одређеној количини у жилави метал или металну легуру заузимајући тако одређени распоред и на неки начин повећавајући јачину и модул еластичности материјала основе. Из поменутих разлога предмет испитивања су нано/микро композити на бази ZA-27 легуре, која је позната по својој жилавости, ојачани нано керамичким честицама Al_2O_3 и микро честицама SiC. Циљ овако добијених материјала јесте и смањење коефицијента трења, повећање отпорности на хабање, као и предупредивање појаве неких структурних несавршености, који настају коришћењем једног типа ојачања.

Испитивања су обављена помоћу нанотрибометра док је за утврђивање трага хабања, одређивање промене у микроструктури коришћен оптички микроскоп, а поред тога и SEM. Сви добијени резултати анализирани су у зависности од удела ојачавача, док су триболошке вредности анализиране додатно са аспекта промене коефицијента трења ширине трага хабања у зависности од броја циклуса.

Анализом добијених аналитичко-експерименталних вредности испитивања ZA-27 легуре, нанокомпозита и нано/микро композита може се закључити следеће:

- Додавањем ојачавача, како нано честица, тако и микро, долази до видне промене микроструктуре испитиваних узорака. Групације честица или „кластери“ су посебно уочљиви на површинама нано/микро композита.
- На површинама испитиваних композита могу се уочити тамна поља које могу бити последица структурних несавршености у самом материјалу, или последица уклањања групе честица са површине током процеса брушења. Уколико су, с друге стране, уочена на самом трагу хабања, постоји могућност да су честице уклоњене током самог експеримента.
- Мања густина нано честица Al_2O_3 и микро честица SiC доводи до пада, како теоријске, тако и измерене густине нанокомпозита и нано/микро композита.
- Значајно је напоменути и да је експериментално измерена густина узорака нижа у односу на теоријски израчунату густину, што даље имплицира на постојање порозности материјала, као последицу процеса добијања ових композита, односно лоше квашливости и настанка пора у међусобном

реаговању матрице и честица ојачавача. Порозност додатно расте са порастом удела микро честица SiC.

- Уочен је, такође, и пораст порозности са уделом честица ојачавача, а посебно при додавању микро честица SiC нанокомпозиту.
- Вредности коефицијента трења варирају између 0,06 и 0,32.
- Највише вредности коефицијента трења уочене су приликом испитивања материјала основе ZA-27. До тога долази због појаве адхезивног трансфера материјала који је последица контакта истородних материјала (материјала сличних структурних и хемијских карактеристика). Односно, након настанка налепа, контакт челичне куглице са испитиваним материјалом остварује се преко трансферованог слоја који је по саставу сличан основној легури ZA-27.
- Приликом испитивања нанокомпозита са 0,5% Al_2O_3 уочен је пад коефицијента што се може приписати додавању ојачавача основном материјалу. С друге стране, приликом неколико мерења, уочена је и појава адхезивног трансфера материјала.
- Са становишта фрикционих карактеристика најбоље резултате показују нано/микро композити, односно, најниже вредности коефицијента трења.
- Повећање удела микро честица SiC не доводи до пада коефицијента трења, чак се ниже вредности могу уочити код нано/микро композита са 3% микро честица SiC. Стога се, као фактор промене коефицијента трења, у обзир може узети распоред честица ојачавача у материјалу основе.
- Вредности ширине трага хабања, зависно од испитиваног материјала, варирају између 50 и 350 μm . Ширина трага хабања је у великој мери одређена појавом адхезивног трансфера који доводи до значајно ширих трагова хабања.
- Најмања отпорност на хабање приметна је код материјала основе ZA-27, код кога је измерен и најшири траг хабања.
- Што се тиче механизма хабања, поред поменутог адхезивног трансфера материјала, јавља се и абразивно хабање. Најприсутнији механизам хабања код ZA-27 металне основе је адхезивни трансфер материјала уз интензивну пластичну деформацију. С друге стране, код нанокомпозита и нано/микро композита, најприсутнији механизам хабања је абразивно хабање уз умерену пластичну деформацију.
- Значајно ужи траг хабања уочен је код нанокомпозита, уз мање интензиван адхезивни трансфер материјала током неких мерења, те се може рећи да и у овом случају додавање ојачавача утиче на повећање отпорности на хабања.
- Комбиновање нано и микро честица као ојачавача доводи до повећања отпорности на хабање у односу на нанокомпозите. Присуство честица ојачавача онемогућава трансфер материјала. Вредности ширине трага хабања су најниже управо код нано/микро композита, између 50 и 60 μm . Повећање удела микро честица не прави битну разлику у ширини трага хабања.
- Додавање честица ојачавача, а посебно комбинација нано и микро честица доводе до побољшања триболошких карактеристика материјала

Даљим проширењем обима испитивања у смислу мерења деловањем нормалне силе различитих вредности, као и различитих вредности брзине клизања, могуће је доћи до адекватнијих закључака по питању утицаја ојачавача на механичке, структурне и триболошке карактеристике нано/микро композита. Такође, употреба ширег спектра уређаја, као испитивање узорка са различитим процентуалним уделом ојачавача, доприносе добијању адекватнијих закључака по питању карактеристика композита.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] М. Бабић, С. Митровић „Триболошке карактеристике композита на бази ZnAl легура“, монографија, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2007
- [2] I. Gogotsi, 'Nanomaterials handbook. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2006.
- [3] D. K. Koli, G. Agnihotri, R. Purohit, 'A Review on Properties, Behaviour and Processing Methods for Al-Nano Al₂O₃ Composites', Procedia Materials Science, vol. 6 pp. 567-589, 2014.
- [4] Д. Џунић, „Анализа процеса трења и хабања нанокompозита са металном основом“, Докторска дисертација, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
- [5] Д. Пешић, „Анализа триболошких карактеристика нанокompозита са ZA-27 металном основом помоћу скреч теста“, завршни рад, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2016.
- [6] F.H. Froes, 'Advanced metals for aerospace and automotive use', Materials Science and Engineering, A, vol. 184, pp. 119-133, 1994.
- [7] Шљукић Биљана, „Композитни материјали“, Економист магазин, бр. 123, 2006.
- [8] Блануша Петар, „Анализе термо – механичких особина композитних материјала и могућност примене у термотехници“
- [9] Schwartz Mel. 'Composite materials Handbook, Metals and Metals Processing', Sikorsky Aircraft-Division of United Technologies, 1995.
- [10] Žmak I, Kovačiček F, „Proizvodni postupci za izradu metalnih kompozita“, Zbornik radova savjetovanja MATRIB 2004, Vela Luka, 2004.
- [11] Kreith Frank, Goswami D. Yogi, The Mechanical Engineering Handbook, CRC Handbook, 2005.
- [12] Macan, J.: nastavni materijali iz kolegija „Kompozitni materijali“, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2011
- [13] Indof J, "Konstruiranje I sastav polimernih kompozita, Polimeri [22 (2) 62-66 (2006.)], Janez Indof, Đurica Španiček, „Materijali i tehnologijski razvoj“, Akademija tehničkih znanosti Hrvatske
- [14] I. Ibrahim, F. Mohamed, E. Lavernia, 'Particulate reinforced metal matrix composites', Journal of Materials Science , 1991.
- [15] J. Lan, Y. Yang, 'Microstructure and microhardness of Sic nanoparticles reinforced magnesium composites fabricated by ultrasonic method', Materials Science and Engineering, pp. 284-290, 2004.
- [16] J. Hashim, L. Looney, 'Journal of Materials Processing Technology, 2002.
- [17] J. Hashim, L. Looney, M. Hashmi, 'Particle distribution in cast metal matrix composites' Journal of Materials Processing Technology, 2002.
- [18] K. Aldas, M. Mat, 'Experimental and theoretical analysis of particle distribution in particulate metal matrix composites', Journal of Materials Processing Technology, 2005.
- [19] Danijel Vuković, „Kompoziti sa metalno matricom“, завршни рад, Proizvodno strojarstvo, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac 2017
- [20] F. He, 'Ceramic nanoparticles in metal matrix composites', Ceramic nanocomposites, Woodhead Publishing Limited, pp. 185-207, 2013.

- [21] P. M. Ajayan, L.S. Schadler, P. Braun, 'Nanocomposite science and technology', 2003.
- [22] Lima M., Santos D., 'Metal matrix composites from self-propagating synthesis and hot pressing', *European Microscopy and Analysis* 8, p. 29-31., 2001
- [23] Kennedy D.O., 'SiC particles Beef up Investment-Cast Aluminum', *Advanced Materials&Processes* 6/91, p. 42-46., 1991.
- [24] McCoy D.A., Lloyd D.J., 'Fabrication of graphite fibre reinforced aluminium, *Canadien Aeronautics and Space J.* v. 33, 3, p. 11-17, 1987.
- [25] M. S. Motta, E.A. Brocchi, 'Complementary Microscopy Tehniques Applied to the Characterization of Cu-Al₂O₃ Nanocomposites', *Formatex Research Centre*, 2004.
- [26] F. Shehata, A. Fathy, S. Mustafa, 'Preparation and Properties of Al₂O₃ nanoparticle reinforced copper matrix composites by in-situ processing', pp. 3006-3012, 2009.
- [27] P. Mishra, V. Dikshit, 'Erosive Wear Behaviour of Redmud Filled Metal Matrix Composites', 2007.
- [28] Y. Li, T. Ngai, W. Zhang, 'Effect of Mn content on the tribological behaviors of Zn-27%, Al-2%, Cu alloy', *Wear*, vol. 198, pp. 129-135, 1996.
- [29] L. Davis, C. Andres, J. Allison, 'Microstructure and strengthening of metal matrix composites', *Materials Science and Engineering*, 1998.
- [30] M. Kok, K. Ozdin, 'Wear resistance of aluminium alloy and its composites reinforced by Al₂O₃ particles', *Journal of Materials Processing Technology*, 2007.
- [31] A. Gurcan, T. Baker, 'Wear Behaviour of AA6061 aluminium alloy and its composites', *Wear*, 1995.
- [32] Y. Wang, J. Song, 'Dry sliding wear behavior of Al₂O₃ fiber and SiC particle reinforced aluminium bas MMCs fabricated by squeeze castig method', *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, pp. 1441-1448, 2011.
- [33] H. Park, 'Wear behavior of hybrid metal matrix composite materials', *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1992.
- [34] E. Sharifi, F. Karimzadeh, 'Wear behavior of aluminium matrix hybrid nanocomposites fabricated by powder metallurgy', *Wear*, 2011.
- [35] K. Umanath, K. Palanikumar, S. Selvamani, 'Analysis of dry sliding wear behavior of Al6061/SiC/Al₂O₃ hybrid metal matrix composites', *Composites Part B: Engineering*, 2013.
- [36] Boon-Peng Chang, Hazizan Md.Akil, Ramdziah Bt.Md.Nasir, 'Comparativ study of micro-and nano-ZnO reinforced UHMWPE composites under dry sliding wear', *Engineering Campus Universiti Sains Malaysia*, 2012.
- [37] S. Zhou, X. Zhang, Z. Ding, 'Fabrication and tribological propertis of carbon nanotubes reinforced Al composites prepared by pressureless infiltration technique' *Composites par A:Applied Science and Manufacturing*, 2007.
- [38] H. Choi, S. Lee, Dae, 'Wear characteristic of aluminum-based composites containing multi-walled carbon nanotubes', *Wear*, 2010.
- [39] Mahtab Salari Mehr, Alireza Akbari, Elyad Damerchi, 'Electrodeposited Ni-B/SiC micro-and nano-composite coatings', *A comparative study*, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, 2018.
- [40] Yulong An, Shuangjian Li, Guoliang Hou, Xiaoqin Zhao, Huidi Zhou, Jianmin Chen 'Mechanical and tribological properties of nano/micro composite alumina coatings fabricated by atmospheric plasma spraying', *Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou*, 2017.

- [41] N. Hosseini, F. Karimzadeh, M. Abbasi, 'Tribological properties of Al6061-Al2O3 nanocomposite prepared by milling and hot pressing', Materials&Design, 2010.
- [42] H. Ezatpour, S. Sajjadi, Y. Huang, 'Investigation of microstructure and mechanical properties of Al6061-nanocomposite fabricated by stir casting' Materials&Design, 2014.
- [43] M. Kok, K. Ozdin, 'Wear resistance of aluminium alloy and its composites reinforced by Al2O3 particles', Journal of Materials Processing Technology, 2007.
- [44] S. Mishra, S. Biswas, A. Satapathy, 'A study on processing, characterization and erosion wear behavior of silicon carbide particle filled Zr-22 metal matrix composites', Materials&Design, 2014.
- [45] M. Srinivasan, C. Loganathan, M. Kamaraj, 'Sliding wear behavior of AZ31B magnesium alloy and nanocomposite', Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012.
- [46] K. Hokkirigawa, K. Kato, 'An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear', Tribology International, 1988.
- [47] M. Tavoosi, F. Karimzadeh, M. Enayati, 'Wear behaviour of Al-Al2O3 nanocomposites prepared by mechanical alloying and hot pressing'. Materials Science and Tehnology, 2010.
- [48] Xiangyu Teng, Wanqun Chen, Dehong Huo, Islam Shyh, Chao Lin, 'Comparison of cutting mechanism when machining micro and nano-particles reinforced SiC/Al metal matrix composites', Composite structures magazine, 2018.
- [49] Sukriti Yadav, Swati Gangwar, Sugandha Singh, 'Micro/Nano Reinforced Filled Metal Alloy Composites: A Review Over Current Development in Aerospace and Automobile Applications, Department of Mechanical Engineering, Madan Mohan Malaviya University of Technology, Gorakhpur, India, 2016.
- [50] S.Sankaranarayana, S.Jayalakshmi, M.Gupta, Journal of magnesium and alloys, 2(2014)13-19.
- [51] T. Rajamohan, K.Palanikumar, S. Arumugam, Composites, 59(2014)43-49.
- [52] D. Aruri, K.Adepu, Kumaraswamy, K.Bazavada, J mater res technol., 2(2013)362-369.
- [53] T. Alam, K.H.A.A. Mahmud, M.F. Hasan, S.A.Shahir, H.H. Masjuki, M.A. Kalam, A. Imran, H.M. Mobarak, Procedia engineering, 68(2013)723 – 729.
- [54] P.R. Thyra, N.Tiruvankadam, M.S. Kumar, International journal of chem tech research, 8(2015)312-316.
- [55] G. Elango, B.K. Raghunath, Procedia engineering, 64(2013)671-680.
- [56] N.Suitha, K.G. Manjuntha, International journal of innovate research and development, 5(2016)19-22.
- [57] M.Sambathkumar, P.Navaneethakrishnan, K.Ponappa, K.S.K.Sasikumar, P.Arunkumar, International journal of advance engineering technology, 7(2016)180-183.
- [58] Ruifeng Liu, Wenxian Wang, Hongsheng Chen, Minbo Tan, 'Microstructure evolution and mechanical properties of micro-/nano-bimodal size B4C particles reinforced aluminum matrix composites prepared by SPS followed by HER', College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, China, 2018.
- [59] Katarzyna Konopka, 'Complex micro-nano structure of ceramic-metal composites', Warsaw University of Technology, Faculty of Materials Science and Engineering, Warsaw, Poland, 2019.
- [60] S. Yu. Tarasov, A.V. Filippov, E.A., T.A. Kalashnikova, 'Adhesion transfer in sliding a steel ball against an aluminum alloy', Tribology International 115 (2017) 191–198, Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS, Akademicheskii, 2/4, Tomsk, Russia, 2017.

- [61] М. Пантић, „Триболошка карактеризација напредних стоматолошких материјала“, Докторска дисертација, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
- [62] Miroslav Babic, Blaza Stojanovic, Dragan Dzunic and Marko Pantic, ‘Micro/nanoscale structural, mechanical and tribological characterization of ZA-27/SiC nanocomposites, Journal of composite materials, 0(0), 1-17, Faculty of mechanical engineering, Tribology center, University of Kragujevac, Serbia, 2019.