



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА

мр Ненад А. Милорадовић

**ТРИБОЛОШКА КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ХИБРИДНИХ
КОМПОЗИТА НА БАЗИ ЛЕГУРЕ ZA27**

Докторска дисертација

Крагујевац, 2013.



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА



мр Ненад А. Милорадовић

**ТРИБОЛОШКА КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ХИБРИДНИХ
КОМПОЗИТА НА БАЗИ ЛЕГУРЕ ZA27**

Докторска дисертација

Ментор,
др Слободан Митровић, ванр. проф.

Крагујевац, 2013.

ИДЕНТИФИКАЦИОНА СТРАНИЦА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

I. Аутор

Име и презиме:	мр Ненад Милорадовић , дипл. инж. маш.
Датум и место рођења:	17. 05. 1968. године, Крагујевац
Садашње запослење:	Асистент на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

II. Докторска дисертација

Наслов:	„Триболошка карактеризација хибридниx композита на бази легуре ZA27“
Број страница:	189
Број слика:	560
Број библиографских података:	140
Установа и место где је рад израђен:	Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац
Научна област (УДК):	Машинство – Трибологија (620.176/178.3:669.5'71)
Ментор:	др Слободан Митровић, ванредни професор Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

III. Оцена и одбрана

Датум пријаве теме:	14. 04. 2011. год.
Број одлуке и датум прихватања докторске дисертације:	Одлука број: 01-1/2138-5 од 16. 06. 2011. године
Комисија за оцену подобности теме и кандидата:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Др Слободан Митровић, доцент Машинског факултета у Крагујевцу 2. Др Мирослав Бабић, редовни професор Машинског факултета у Крагујевцу 3. Др Илија Бобић, научни сарадник, ИНН „Винча“ 4. Др Александар Венцл, доцент Машинског факултета у Београду 5. Др Ненад Марјановић, редовни професор Машинског факултета у Крагујевцу
Комисија за оцену докторске дисертације:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Др Слободан Митровић, ванредни професор Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу 2. Др Мирослав Бабић, редовни професор Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу 3. Др Илија Бобић, научни сарадник, ИНН „Винча“ 4. Др Александар Венцл, ванредни професор Машинског факултета у Београду 5. Др Ненад Марјановић, редовни професор Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Комисија за одбрану докторске дисертације:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Др Слободан Митровић, ванредни професор Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу 2. Др Мирослав Бабић, редовни професор Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу 3. Др Илија Бобић, виши научни сарадник, ИНН „Винча“ 4. Др Александар Венцл, ванредни професор Машинског факултета у Београду 5. Др Ненад Марјановић, редовни професор Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Датум одбране дисертације:	

КОРИСТИМ ОВУ ПРИЛИКУ ДА СЕ ЗАХВАЛИМ ОСОБАМА КОЈЕ СУ МИ ПРУЖИЛЕ ПОДРШКУ ПРИЛИКОМ ИЗРАДЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

- МЕНТОРУ, ПРОФ. ДР СЛОБОДАНУ МИТРОВИЋУ, НА КОРИСНИМ САВЕТИМА У СВИМ ФАЗАМА ИЗРАДЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ, НЕСЕБИЧНОЈ ПОМОЋИ И РАЗУМЕВАЊУ,
- ДР МИРОСЛАВУ БАБИЋУ, РЕДОВНОМ ПРОФЕСОРУ ФАКУЛТЕТА ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА У КРАГУЈЕВЦУ, НА ИСКАЗАНОМ ПОВЕРЕЊУ И ПОДРШЦИ У СВИМ ЕТАПАМА РАДА,
- ДР ИЛИЈИ БОБИЋУ, ВИШЕМ НАУЧНОМ САРАДНИКУ, ИНН „ВИНЧА“, НА САВЕТИМА И АНГАЖОВАЊУ ПРИ ИЗРАДИ ХИБРИДНИХ КОМПОЗИТА,
- ДР АЛЕКСАНДРУ ВЕНЦЛУ, ВАНРЕДНОМ ПРОФЕСОРУ МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА У БЕОГРАДУ НА ЗНАЧАЈНИМ СУГЕСТИЈАМА, И ПОМОЋИ ТОКОМ ЛАБОРАТОРИЈСКЕ СЕМ АНАЛИЗЕ,
- КОЛЕГИНИЦАМА И КОЛЕГАМА СА КАТЕДРЕ ЗА МАШИНСКЕ КОНСТРУКЦИЈЕ И МЕХАНИЗАЦИЈУ И ИЗ ЛАБОРАТОРИЈЕ ЗА ТРИБОЛОГИЈУ, НА АКТИВНОЈ РАЗМЕНИ ЗНАЊА И ИСКУСТВА,
- СВОЈОЈ ЖИВОТНОЈ И „ПОСЛОВНОЈ“ САПУТНИЦИ, ДР ДАНИЈЕЛИ МИЛОРАДОВИЋ, БЕЗ ЧИЈЕ ПОДРШКЕ И ПОМОЋИ СВЕ БИ БИЛО МНОГО ТЕЖЕ,
- СВОЈОЈ ПОРОДИЦИ, НА БЕЗГРАНИЧНОМ СТРПЉЕЊУ, ПОВЕРЕЊУ И РАЗУМЕВАЊУ.

ТРИБОЛОШКА КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ХИБРИДНИХ КОМПОЗИТА НА БАЗИ ЛЕГУРЕ ZA27

РЕЗИМЕ

Предмет истраживања ове докторске дисертације је испитивање и унапређење триболошких карактеристика хибридних композита на бази легуре ZA27. Под композитним материјалом се подразумева мешавина два или више материјала или фаза истог материјала, који се не растварају једно у другом, и који има боље карактеристике у поређењу са сваким од основних материјала. Извршено је одређивање триболошких карактеристика развијених композита уз варирање геометрије контакта, брзине клизања, контактеног оптерећења и режима подмазивања.

С обзиром на све већи значај хибридних композита, рад је усмерен на истраживање развоја композита на металној основи уз додавање различитих ојачивача ради побољшања њихове отпорности на хабање. Као ојачивачи коришћене су честице силицијум карбида (SiC) и графита. Запремински удео SiC је износио 5% и 10%, док је учешће графита било 1%, 3% и 5%. Предвиђена лабораторијска испитивања су обављена у оквиру Центра за трибологију Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. Извршена је анализа добијених резултата мерења и формулисани су одговарајући закључци. Преко СЕМ и ЕДС анализа спроведена је квалитативна и квантитативна микроструктурна анализа композита. Такође су дате могуће смернице за даља истраживања у овој области.

Кључне речи: *хибридни композити, легура ZA27, трибологија*

TRIBOLOGICAL CHARACTERIZATION OF HYBRID COMPOSITES BASED ON ZA27 ALLOY

ABSTRACT

The subject of research in this doctoral dissertation is testing and improving the tribological properties of hybrid composites based on ZA27 alloy. Composite material is considered to be a mixture of two or more materials or phases of the same material that do not dissolve in each other and which has better properties compared to each of the basic materials. Determination of tribological properties of the developed composites is conducted with variation of the contact geometry, sliding speeds, contact loads and lubrication regimes.

Given the increasing importance of hybrid composites, the dissertation is intended to research the development of metal matrix composites by adding different reinforcements to improve their resistance to wear. Particles of silicon-carbide (SiC) and graphite were used as reinforcements. Volume fractions of SiC were 5% and 10%, while graphite volume fractions were 1%, 3% and 5%. Planned laboratory tests were conducted at the Laboratory for tribology of the Faculty of engineering, University of Kragujevac. Analysis of the obtained measurements was conducted and corresponding conclusions were formulated. Qualitative and quantitative analysis of the microstructure of the composites were carried out using SEM and EDS analysis. Possible directions for further research in this area were also given.

Key words: *hybrid composites, ZA27 alloy, tribology*

САДРЖАЈ

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА	1
2. КОМПОЗИТИ КАО ТРИБОЛОШКИ МАТЕРИЈАЛИ	3
2.1 ЕВОЛУЦИЈА ИНЖЕЊЕРСКИХ МАТЕРИЈАЛА	3
2.1.1 Од праисторије до ренесансе	4
2.1.2 Ренесанса	4
2.1.3 Пре – индустријска ера	5
2.1.4 Индустријска револуција.....	5
2.1.5 Ера науке	6
2.1.6 Свемирско доба	6
2.2 КОМПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ	7
2.3 КОМПОЗИТИ СА МЕТАЛНОМ МАТРИЦОМ	13
2.4 ПОСТУПЦИ ДОБИЈАЊА КОМПОЗИТА СА МЕТАЛНОМ МАТРИЦОМ	13
2.5 ПОДЕЛА КОМПОЗИТА СА МЕТАЛНОМ МАТРИЦОМ.....	19
2.5.1 Композити са алуминијумском матрицом	19
2.5.2 Композити са магнезијумовом матрицом	21
2.5.3 Композити са титанијумовом матрицом	22
2.5.4 Композити са бакарном матрицом.....	22
2.5.5 Композити са матрицом суперлегура	22
3. ПРЕГЛЕД РАЗВОЈА КОМПОЗИТА НА БАЗИ ZnAl ЛЕГУРА	23
3.1 ЛЕГУРЕ ЦИНКА СА ПОВЕЋАНИМ САДРЖАЈЕМ АЛУМИНИЈУМА	23
3.1.1 Примери примене ливених производа од ZA легура	25
3.2 КОМПОЗИТИ СА ОСНОВОМ ОД ЛЕГУРЕ ЦИНКА.....	31
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА ТРИБОЛОШКИХ КАРАКТЕРИСТИКА ХИБРИДНИХ КОМПОЗИТА	41
4.1 ДОБИЈАЊЕ ХИБРИДНИХ КОМПОЗИТА НА БАЗИ ЛЕГУРЕ ZA27	41
4.1.1 Опрема за добијање хибридних композита	42
4.1.2 Структура добијених узорака	44
4.2 ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ИСПИТИВАЊА	47
4.3 МЕТОДОЛОГИЈА ИСПИТИВАЊА	48
4.3.1 Мерне величине и начин њиховог мерења	48

4.3.2 Мерна опрема.....	52
4.3.3 Режији рада.....	56
4.3.4 План и услови триболошких испитивања	56
5. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА.....	60
5.1 РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА У УСЛОВИМА БЕЗ ПОДМАЗИВАЊА	60
5.1.1 Хабање (криве хабања, ширина трага хабања, интензитет хабања)	61
5.1.2 Коефицијент трења	73
5.2 РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА У УСЛОВИМА СА ПОДМАЗИВАЊЕМ.....	79
5.2.1 Хабање (криве хабања, ширина трага хабања, интензитет хабања)	79
5.2.2 Коефицијент трења	91
6. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА.....	96
6.1 АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У УСЛОВИМА БЕЗ ПОДМАЗИВАЊА	96
6.1.1 Хабање.....	96
6.1.2 Коефицијент трења	111
6.2 АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У УСЛОВИМА СА ПОДМАЗИВАЊЕМ	116
6.2.1 Хабање.....	116
6.2.2 Коефицијент трења	131
6.3 АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА НА ОСНОВУ СЕМ МИКРОСКОПИЈЕ И ЕДС СПЕКТРОСКОПИЈЕ.....	136
7. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА	141
ЛИТЕРАТУРА	145
ПРИЛОЗИ.....	153

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Композити са металном основом, као напредни материјали добрих механичких и триболошких својстава, све више се примењују последњих година. Посебно су значајна истраживања развоја композита на металној основи додавањем различитих ојачивача ради побољшања њихове отпорности на хабање. Варирањем врсте, величине и садржаја ојачивача знатно се утиче на њихове триболошке карактеристике.

Композити на бази легуре цинк-алуминијум (ZA) ојачани различитим ојачивачима (SiC, Al₂O₃, графит и др.) имају побољшана механичка и триболошка својства у односу на базни материјал. Зато се у задње време све више примењују као лаки материјали, отпорни на хабање. У оквиру докторске дисертације извршена је триболошка карактеризација хибридни композита са основом од легуре ZA27. Као ојачивачи, коришћени су силицијум-карбид и графит у одговарајућем запреминском уделу. Поменути хибридни композити добијени су коришћењем модификованог компокастинг поступка.

Истраживања предвиђена у оквиру дисертације најпре су обухватила анализу актуелног нивоа развоја и примене стандардних и хибридни композита за триболошке намене у земљи и свету. Реализација истраживања обухватила је и више комплексних истраживачких активности као што су:

- Испитивање триболошких, структурних и механичких карактеристика развијених композита.
- Дефинисање експерименталне процедуре, плана и услова триболошких испитивања.
- Трибометријска испитивања на микро и макро нивоу ради одређивања триболошких карактеристика развијених композита у лабораторијским условима, уз варирање геометрије контакта, брзине релативног кретања, контактног оптерећења и режима подмазивања.
- Карактеризација површина хабања и продуката хабања помоћу оптичког и скенирајућег електронског микроскопа.
- Анализа резултата триболошких испитивања и одређивање оптималних комбинација запреминских удела ојачивача.

Циљ ове докторске дисертације је да се применом савремених научних метода дефинише природа триболошког понашања хибридни композита на бази легуре ZA27. На основу експерименталних трибометријских и других истраживања дошло се до оригиналних резултата потребних за дефинисање оптималног запреминског удела ојачивача и потребне отпорности на хабање испитиваних материјала у функцији више варираних параметара и услова остваривања контакта. Реализација овог научног циља омогућила би унапређење низа глобалних циљева:

- смањење утрошка енергије, смањење масе конструкција, смањење трења и хабања, повећање могућности рециклирања,
- замену скупих увозних материјала,
- смањење трошкова одржавања (боља функционалност, дужи век трајања, мање отказа),
- смањење инвестиција кроз дужи век трајања тробомеханичких система.

Концепција предвиђених истраживања ће омогућити добијање резултата који ће бити корисни као повратне информације у итеративном поступку побољшања и отклањања недостатака развијаних композита.

Теоријска и експериментална истраживања у оквиру ове дисертације су систематизована и приказана у оквиру седам поглавља. Истраживања су имала као циљ систематизацију релевантних резултата у предметној области и допринос развоју одговарајућих теоријских и експерименталних метода проучавања триболошког понашања хибридних композита на бази легуре ZA27, кроз реализацију основних сегмената докторске дисертације.

У другом поглављу докторске дисертације истакнут је значај композита као триболошких материјала. Наведени су поступци добијања композита са металном матрицом и описана њихова подела.

Актуелно стање развоја композита на бази ZnAl легура, са нагласком на легуру ZA27, приказано је у трећем поглављу. Обухваћене су легуре цинка са повећаним садржајем алуминијума и композити са основом од легуре цинка. Други део овог поглавља посвећен је прегледу и систематизацији досадашњих резултата истраживања триболошког понашања композита на бази ZnAl легура. Различита теоријска и експериментална истраживања анализирана у овом поглављу помогла су при формулацији програма сопствених истраживања.

Експериментална истраживања представљена су у четвртном поглављу дисертације. Детаљно су представљени: начин и опрема за добијање хибридних композита на бази легуре ZA27, структура узорака, предмет и циљ испитивања, методологија испитивања и услови извођења експеримената.

Пето поглавље садржи резултате истраживања реализованих у условима са и без подмазивања. Најпре су спроведени тестови ради утврђивања природе процеса хабања при чему су добијене криве хабања. Затим је обављена серија континуалних тестова у којима су добијени сигнали коефицијената трења, одређене вредности ширине трага хабања и израчунати интензитети хабања и запремине похабаног материјала конкретних узорака. Приказани су резултати мерења, у нумеричком, табличном и графичком облику.

У шестом поглављу анализирани су и дискутовани резултати експерименталних триболошких истраживања. Извршена је статистичка обрада резултата и одређене регресионе функције. Преко скенирајуће електронске микроскопије и енергетско дисперзивне спектроскопије спроведена је квалитативна и квантитативна микроструктурна анализа композита.

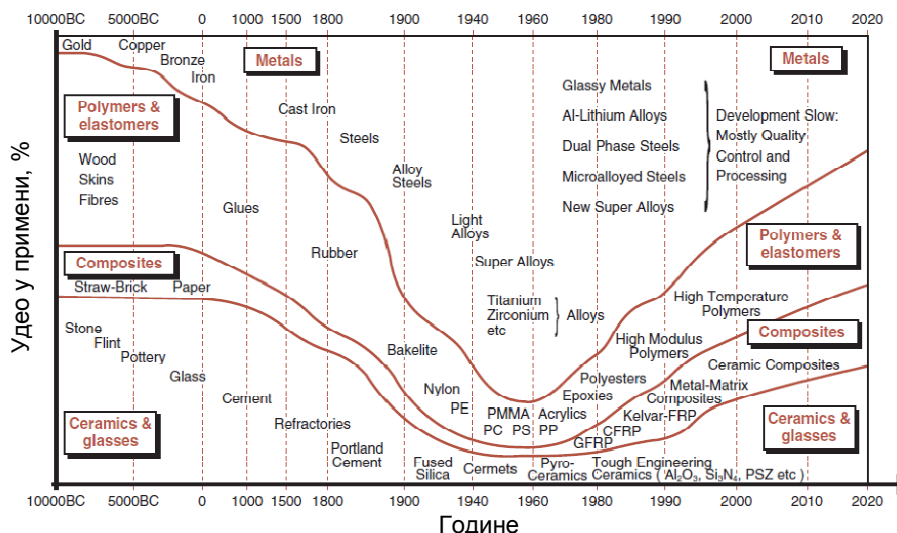
У закључним разматрањима, у седмом поглављу, представљен је преглед остварених резултата и истакнут допринос докторске дисертације током теоријских и експерименталних истраживања у овој области. На основу искустава стечених током израде тезе, као и уочених трендова у проучавању триболошких карактеристика хибридних композита на бази легуре ZA27, формулисани су могући правци даљих истраживања.

2. КОМПОЗИТИ КАО ТРИБОЛОШКИ МАТЕРИЈАЛИ

2.1 Еволуција инжењерских материјала

Кроз историју, раздобља у којима је човек живео добијала су називе према коришћеним материјалима, као што су, камен, бронза, гвожђе. Некада су емајлирани саркофаг Тутанкамона, бронзани мач и златна маска Агамемнона представљали најновију технологију њиховог доба. Данас су, на пример, ручни сат од титанијума, тениски рекет ојачан графитним влакнима или бицикл од композита на бази металне матрице предмети којих ћемо се радо сећати у будућности.

Број расположивих материјала се брзо повећавао кроз историју. Еволуција материјала и њен убрзани темпо илустровани су на слици 2.1. Праисторијски материјали (из каменог доба, пре 10000 година п.н.е.) били су керамика и стакло, природни полимери и композити. Оружје - увек врхунац технологије, прављено је од дрвета и кремена, зграде и мостови од камена и дрвета. Развој примитивне термо-хемије омогућио је екстракцију, прво бакра и бронзе, а онда и гвожђа (бронзано доба, од 4000. до 1000. године п.н.е. и гвоздено доба, од 1000. године п.н.е., до 1620. године нове ере), што је довело до развоја технологија. Технологија ливења гвожђа (из 1620-их година) установила је доминацију метала у инжењерству, док је развој челика (од 1850. године до данас), лаких легура (1940-их година) и специјалних легура учврстио њихову позицију.



PE – Полиетилен, PMMA – Полиметилметакрилат, PC – Поликарбонат, PS – Полистирол,
 PP – Полипропилен, GFRP – Пластике ојачане стакленим влакнима,
 CFRP – Пластике ојачане угљеничним влакнима

Слика 2.1 Еволуција инжењерских материјала [1,2]

До 1960-их година појам „инжењерски материјали“ подразумевао је само метале. Постојао је, наравно, развој других класа материјала. Побољшани цементи, ватростални

материјали, стакла, гуме, али њихов удео у укупном тржишту материјала био је мали. Од 1960. године, све се променило. Брзина развоја нових легура метала је сада мала, док је потражња за челиком и ливеним гвожђем у неким земљама и опала. Индустрије полимера и композита, са друге стране, убрзано расту, а пројекције раста производње нових керамичких материјала високих перформанси упућују на наставак експанзије и тих материјала. Због својих добрих механичких и триболошких својстава, последњих петнаестак година, као напредни трибоматеријали, све више се користе композитни материјали.

2.1.1 Од праисторије до ренесансе (5000. године п.н.е. – 1450. године)

Најстарија записана употреба материјала ради лакшег релативног кретања тела у контакту долази из Месопотамије и Египта [3]. То су била лежишта направљена од дрвета, костију или љуски од кокоса. Лончарски точкови су монтирани у вођицама, понекад подмазаним битуменом добијеним из нафте која је излазила на површину. Потреба за подмазаним лежиштима јавила се са појавом возила на точковима, која су почела да замењују саонице око 3500. године п.н.е. Мазива, ако су уопште коришћена, била су биљна уља или животињске масти, која су широко коришћена на египатским кочијама.

На Блиском Истоку, чињени су велики напори на смањењу трења приликом градње пирамида и храмова када се јавила потреба превоза масивних блокова или споменика до градилишта. Сигурно је да су испод њих постављани дрвени балвани, али остаје нејасно да ли су то биле траке или ваљци, што би значило прву употребу котрљајних лежајева. Неки од сачуваних рељефних записа приказују људе како сипају супстанцу испред балвана, мада је и овде нејасно да ли је то био муљ, вода, песак или изгњечен камен којег је било много у тим регионима. Ако је било тако, то би представљало прву употребу прашкастог мазива.

Кроз средњи век, већина машина је користила иста мазива као у антици: биљна уља и масти. Четрнаести и петнаести век нису много напредовали у односу на античку триболошку праксу и, на много начина, чак су и назадовали. Док су у античко доба неки лежајеви направљени од гвожђа или бакра већ коришћени, у 13. и 14. веку лежајеви су били типа дрво-на-дрво. Тако, у области трибологије, средњи век представља мрачни период, уосталом као и за већину других људских подухвата.

2.1.2 Ренесанса (1450 – 1600)

Са аспекта трибологије, ренесансом је доминирао само један човек: Леонардо да Винчи (1452 – 1519). Славни сликар, архитекта, научник и проналазач, зачео је, скицирао и побољшао многе основне инжењерске уређаје. Његови доприноси науци о трибологији и концепту машина са ниским трењем, могу се, делимично, сумирати на следећи начин:

- Трење не зависи од површине контакта, већ од јачине нормалне силе и материјала у контакту.
- За савршено „глатке и полиране“ површине, дао је формулу за израчунавање коефицијента трења у зависности од силе трења, и нормалног оптерећења.
- Изумео је легуру за лежајеве са смањеним трењем која се састојала од 30% бакра и 70% калаја. То је невероватно блиско белом металу, легури која није била пронађена све до 1839. године и која је касније постала широко коришћен материјал за израду лежајева.
- Постоји читав низ уређаја које је он смислио, а који су се ослањали на трење котрљања уместо трења клизања, јер је потпуно разумео предности такве промене.
- Врло је необично, али да Винчи је изгледа предвидео могућност прашкастог подмазивања. У једном од својих објашњења, да Винчи каже: „Све ствари, ма како танке биле, а које су убачене у средину између тела у контакту, смањују трење. И зато, мала зрнца као што је просо, чине кретање бољим и лакшим.“

2.1.3. Пре-индустријска ера (1600 – 1750)

Научник Гијом Амантос је спровео методичан експериментални програм за одређивање фрикционих карактеристика разних материјала и представио резултате 1699. године. Материјали које је он испитивао укључивали су: бакар, гвожђе, олово и дрво у разним комбинацијама. Површине су подмазиване свињском машћу. Потврдио је да је сила трења зависи само од нормалне силе, а не од контактне површине и резултате објаснио преко постојања површинске храпавости. Након тога, Белидор је 1737. године спровео експерименте са слојевима сферних лопти које имитирају површинску храпавост. Мерио је потребну силу њиховог раздвајања и закључио да је сила независна од броја неравнина, чиме је потврдио Амантосову хипотезу.

За време док у технологији подмазивања није постизан велики напредак, значајан догађај био је увођење појма вискозности - једне од најважнијих особина мазива. За то је одговоран Њутн. Њутнов став у вези вискозности био је следећи: „Отпор који се јавља услед недостатка подмазивања у деловима флуида је, ако су остале ствари једнаке, пропорционалан брзини којом се делови флуида раздвајају један од другог“. Њутнов термин „недостатак подмазивања“ одговара данашњем схватању унутрашњег трења, односно вискозности. Иако је Њутнов рад у вези вискозности остао у домену чисте науке, поставио је темеље дисциплине хидродинамичког подмазивања неких 200 година касније.

2.1.4 Индустријска револуција (1750 – 1850)

Током ове важне ере, дрво и месинг су остали основни материјали за лежајеве, док су лој и вода били уобичајена ручно наносена мазива. Калај и олово су испробани као материјали за лежајеве, али су били исувише меки и имали ниску тачку топљења да би били практично употребљиви. Тек од 1839. године, када је Исак Бабит предложио додавање мале количине антимона и бакра, могући материјали за лежајеве, познати као бели метали, постали су најуспешније легуре за лежајеве које се до данас користе.

У борби против превеликог трења, Варло је 1772. године, пронашао такав концепт, где за разлику од рукаваца, кугле и ваљци могу слободно да се окрећу и тако поставио основу за данашње лежајеве са котрљајним елементима. Међутим, овакво разумевање природе трења котрљања није било без недостатака. Наиме, целокупно трење приписано је отпору трења између појединих куглица и ваљака, под претпоставком да је котрљање без трења. У томе, можда, лежи апсурдна терминологија, која опстаје до данашњих дана, која назива такве лежајеве - антифрикционим.

Научник Кулон спровео је много опсежнију студију природе трења, укључујући улогу међуслојева. Као мазива, користио је лој и маст за осовине, испитујући и глатке и храпаве површине. Концентрисао се на неколико кључних аспеката: природу материјала (укључујући превлаке), величину површине, нормално оптерећење, интервал времена у коме су површине у контакту и утицаје температуре. За суво трење типа „дрво-о-дрво“ нашао је вредности коефицијента трења које су блиске вредностима добијеним од стране Боудена и Тabora. Комплетнију листу коефицијената трења за разне материјале је израдио Реније, тестовима спроведеним 1829. године.

Индустријска револуција је донела прогрес у области чврстих мазива. Реније је у својим експериментима користио графит, алотропску модификацију угљеника коју су звали „црно олово“ јер је остављало исте трагове као и црно олово коришћено као мастило у средњем веку. Друго чврсто мазиво био је стеатит или талк. Ове прашкасте супстанце су биле примењиване у малим количинама од стране машиниста као „лекови“ кад год је лежиште показивало знаке „стреса“. Зато су ти људи звани фабричким лекарима. То су све били храбри покушаји добијања задовољавајућег мазива на бази угљеника.

После настанка парног мотора и железнице средином 19. века, јавила се потреба за непрекидним системом подмазивања. Године 1835. Хенри Бут, патентирао је први уређај

тог типа. Тачно је да машине из доба индустријске револуције - споре и мало оптерећене - нису биле веома захтевне. Ипак, остаје чињеница да током два посматрана века, осим у случају лежајева од белог метала, није било револуције у области технологије мазива.

2.1.5 Ера науке (1850 – 1925)

Ова ера састоји се од декада између 19. и 20. века које су донеле технолошку револуцију у области трибологије, било да су то теоријска или експериментална открића. Тек тада, истраживања физичких и хемијских аспеката међуслојева су сустигла механичке аспекте технологије лежајева. Прави значај овог новог стања у трибологији јесте да је, од њене примитивне улоге смањења трења, откривена права функција мазива у физичком раздвајању површина у контакту. Током овог периода развијају се нове технологије обликовања и прераде материјала. Поступци превлачења делова машина и алата омогућавају битно повећање њиховог века трајања односно отпорности на хабање. Савремени приступи смањењу трења и успоравању процеса хабања заснивају се на коришћењу превлака различитих врста које се наносе на контактну површину критичног елемента трибосистема или се користе методе побољшања триболошких карактеристика контактних слојева основних материјала.

Још је крајем XVIII века, француски научник Кулон претпоставио да коефицијент трења није зависан од оптерећења у зони контакта и предложио двочлани израз за његово израчунавање. Током XX века, развијене су и постављене основне теорије трења. Оне не могу да објасне механизам трења у довољној мери, али доприносе бољем разумевању појава триболошке природе које се одигравају у зонама контакта код трибомеханичких система. Очигледно је да трење, односно коефицијент трења, зависи од много утицајних фактора и да његово одређивање не представља једноставан задатак.

2.1.6 Свемирско доба (1945 – 2000)

Посматрани експериментални материјали - композити са металном матрицом су добра алтернатива традиционалним материјалима, због својих побољшаних механичких и триболошких карактеристика. И поред тога, у индустрији имају релативно малу примену, јер трошкови њихове примене не дозвољавају ширу употребу. Главне примене су у пољу космонаутике и ваздухопловства, где трошкови материјала нису тако ограничени и где се врше континуирана специфична истраживања. Остаје чињеница да је све већи интерес примене композита са металном матрицом у аутомобилској индустрији, уз посебну пажњу посвећену моторима и кочним системима. Специјалне особине ових материјала, посебно њихова способност промене особина зависно од усвојеног технолошког процеса, повећале су поље примене на друга интересантна поља, почев од спорта (где су полимерни материјали и њихови композити готово у потпуности потиснули из примене дрво и металне материјале), до примене у електроници, где су од одлучујуће важности термичке особине и тачна вредност коефицијента термичког ширења.

У откривању и производњи нових материјала, по правилу, нема више случајности, него је то последица смишљеног организованог, континуираног рада. Данашња истраживања имају мултидисциплинарни карактер, захтевају велика новчана улагања, нове аналитичке методе и савремене инструменте и опрему за синтезу материјала, рачунарско моделирање ради пројектовања материјала жељеног састава, структуре и захтеваних карактеристика у нано и микросвету. Последица таквог деловања је појава великог броја разноврсних материјала. Према неким тврдњама, у последњих 70-так година, у практичну примену је ушло толико врста материјала колико у свим претходним вековима заједно. Процене говоре да располажемо са више од 70.000 различитих врста техничких материјала. Примена савремених материјала доводи до развоја многих производа са побољшаним карактеристикама у многим индустријским гранама. Примена композитних материјала у оквиру неких карактеристичних индустријских области, наведена је у наставку поглавља.

2.2 Композитни материјали

Реч композит је новијег датума, иако су композитни материјали постојали и коришћени хиљадама година. Дрво представља природни композит у коме лигнин повезује дуга влакна целулозе. У ову врсту материјала спада и цигла, као и бетон који је састављен од честица песка или шљунка сједињених помоћу цемента. У литератури постоји више дефиниција композитних материјала у зависности од нивоа посматрања који служи као основа за дефиницију.

Са инжењерске тачке гледишта, прихватљива дефиниција је да се под композитним материјалом подразумева мешавина два или више материјала или фаза истог материјала, који се не растварају једно у другом, при чему новодобијени материјал има боље карактеристике у поређењу са сваким од основних материјала. Садржај основних материјала треба да буде изнад 5 % укупне запремине, а њихове карактеристике морају да буду међусобно различите.

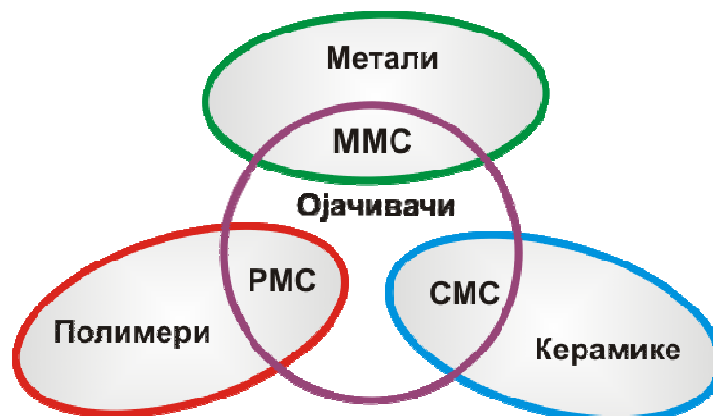
Иначе, нема универзално прихваћене дефиниције композитних материјала, али се у литератури композитни материјали најчешће дефинишу на следећи начин [1, 4].

Композитни материјали су састављени из два или више различитих чврстих материјала (засебно добијених), који су осмишљени тако да је у њима расподела фаза континуирана како би се побољшало једно или више својстава основном материјалу. Композитни материјали или композити су добијени међусобним спајањем два или више хемијски различитих материјала с јасном границом између њих. Хетерогени материјали састоје се од више материјала а са циљем добијања коначног материјала таквих својстава каква не поседује ни једна компонента посебно [5].

Композитни материјали су материјали који се састоје од смеше или комбинације два или више конституената који се разликују по облику и хемијском саставу и који су практично нерастворљиви један у другом [6].

Композитни материјал се може дефинисати као материјал који садржи два или више физички и хемијски различитих делова, распоређених на погодан начин, и који има различите особине у односу на особине саставних делова. Обично је садржај једног материјала знатно већи у односу на остале и тај материјал се назива основа. Основа (матрица) може бити, слика 2.2:

- керамичка,
- метална или
- полимерна



Композити са металном матрицом (MMC - *metal matrix composite*)
 Композити са полимерном матрицом (PMC - *polymer matrix composite*)
 Композити са керамичком матрицом (CMC - *ceramic matrix composite*)

Слика 2.2 Композитни материјали [5]

Композитни материјали са металном матрицом налазе, већ дуже време, примену у многим областима свакодневног живота. Често се и не зна да је у развоју неког производа примењен композитни материјал. У саобраћају, посебно аутомобилској индустрији, композити са металном матрицом се користе комерцијално код влакнима ојачаних клипова и алуминијумских кућишта, код ојачаних површина цилиндара, као и код кочних дискова ојачаних честицама.

Ови иновативни материјали отварају модерној науци о материјалима и уопште развоју производа неограничене могућности - карактеристике композита са металном матрицом могу се дизајнирати, по наруџбини, зависно од примене. Захваљујући овом потенцијалу, композити са металним матрицама испуњавају све жељене концепције конструктора. Ова група материјала постаје интересантна за употребу као конструктивни и функционални материјал, уколико карактеристике конвенционалних материјала или не испуњавају стандарде специфичних захтева или чине решење проблема. Предности композитних материјала су уочљиве само када постоји разумна веза трошкови - перформансе, при производњи дате компоненте. Употреба композитних материјала је обавезна уколико се специјално пројектоване карактеристике производа могу остварити само применом ових материјала.

Могућност комбиновања различитих система материјала (метал - керамика - неметал) даје неограничене варијације у њиховој примени. Особине ових нових материјала се у основи одређују особинама њихових појединачних компоненти. Слика 2.3 показује распоред композитних материјала по групама разних врста материјала.

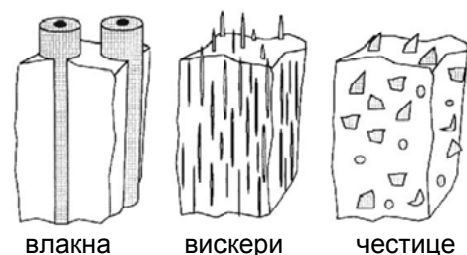


Слика 2.3 Класификација композитних материјала по групама [5]

Остали материјали или фазе у композиту се називају побољшивачи, а њихов задатак је да побољшају механичке, триболошке, хемијске, топлотне и електричне карактеристике материјала. Побољшивачи који, пре свега, побољшавају механичке карактеристике материјала се називају ојачивачи.

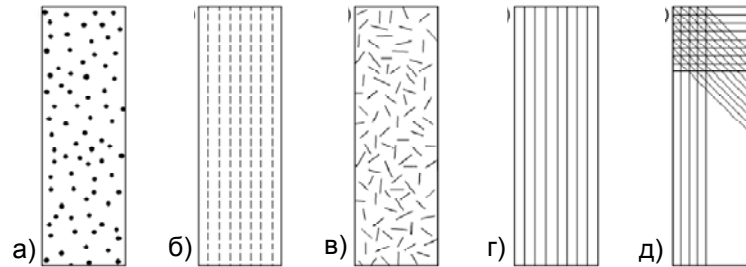
Могућа је и подела композита на основу облика и врсте ојачивача:

- композити с честицама,
- влакнима ојачани композити,
- структурни композити, слојевити композити (ламинати), сендвич конструкције.



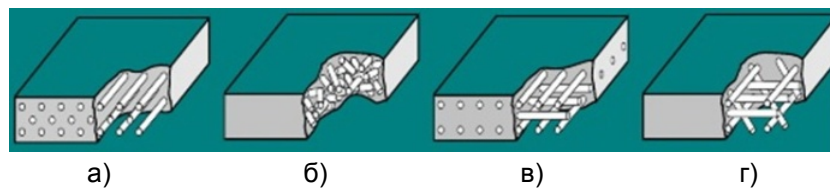
Слика 2.4 Композити ојачани влакнима и честицама [1, 4, 5]

Ојачивачи су обично у виду влакана или честица различите оријентације и облика (слике 2.4 и 2.5). Честице могу бити насумично, што је најчешћи случај (слика 2.5 а), и правилно распоређене, у облику сфере, коцке или неког другог правилног облика. Ојачивачи у виду влакана се дефинишу односом пречника и дужине влакна, па тако разликујемо дугачка (континуална) влакна (слике 2.5 г и 2.5 д) и кратка (дисконтинуална) влакна (слике 2.5 б и 2.5 в). Распоред може бити правилан (слика 2.8 б) и насумичан (слика 2.5 в), а често се правац простирања влакана мења од слоја до слоја (слика 2.5 д).



Слика 2.5 Облик и распоред ојачивача у композитним материјалима

Хибриди су врста композита код којих постоје две или више врста влакана или комбинација влакана и честица, измешане по слојевима или у истом слоју. Уколико се користе ојачивачи у виду влакана, треба водити рачуна о правцу деловања оптерећења у односу на правац простирања влакана (слика 2.6). Могућа оптерећења која делују дуж правца простирања влакана (дуж осе) су много већа у односу на она која делују нормално на тај правац.



Слика 2.6 Композитни материјал

а) континуална једносмерна влакна, б) случајно усмерена дисконтинуална влакна, в) ортогонално распоређена влакна, г) вишесмерно усмерена влакна

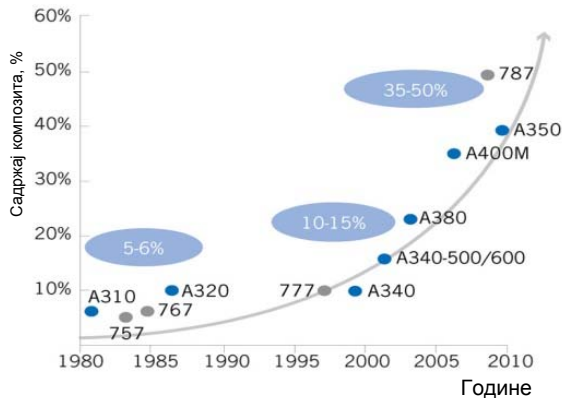
У односу на „традиционалне“ материјале композити имају бројне предности:

- побољшану отпорности на хабање,
- већу отпорност на корозију,
- мању густину и мању масу,
- добра механичка својства (специфична чврстоћа, крутост),
- могућност производње делова сложеног облика,
- једноставно и јефтино одржавање,
- дужи век трајања,
- врло добра својства на високим температурама,

Као лоше стране стране ММС композита могу се навести:

- компликована производња,
- врло висока цена - цена ће падати са повећањем примене,
- недовољно података о својствима материјала,
- постојање релативно мало смерница инжењерима при пројектовању и конструисању производа од ових материјала,
- мала могућност рециклаже.

Карактеристике композита зависе од врсте и особина матрице али и од особина, начина расподеле, величине, концентрације и врсте честица ојачивача, њихове оријентације унутар матрице. Квалитет и начин повезивања матрице и ојачивача је такође битан. Иако су повећане развојне активности довеле до системских решења која користе металне композитне материјале, употреба високо иновативних система, посебно у области лаких метала, није реализована.



Слика 2.7 Садржај композита у конструкцијама у авио индустрији током времена [5]

Основни проблем при производњи композита је хемијска (не)компатибилност металне матрице и влакна због хемијских реакција међу њима, што и сужава број комбинације влакана и матрица које је могуће комбиновати. Зато су се за ојачавање металних матрица најбоље показали SiC , Al_2O_3 . Коришћење угљеничних влакана је врло ограничено, обично на алуминијумске и магнезијумске матрице, ако је изложеност високим температурама минимална.

Данас су угљенична (карбонска) влакна распрострањена, посебно код механички најоптерећенијих авионских конструкција. Треба нагласити да је погрешно називати угљенична влакна графитним. Графит је један од облика угљеника, код којег су снажним ковалентним везама повезане хексагоналне базалне равни, док је тродимензионална структура постигнута њиховим међусобним повезивањем слабир Ван дер Валсовим силама. Управо ове силе омогућавају лако клизање базалних равни једне према другој, што је и разлог зашто графит има својство подмазивања, односно смањивања трења. За разлику од графита, угљенична влакна имају само дводимензионалну структуру.

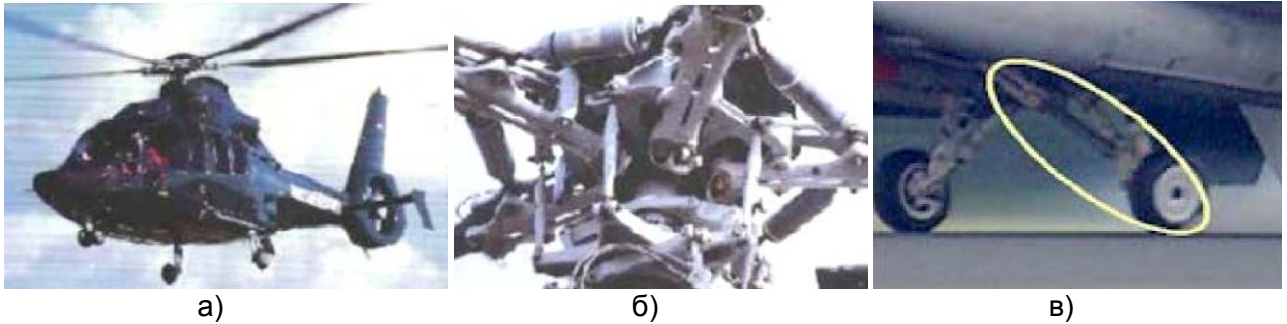
У новије време се све више говори о нанокompозитима као посебној врсти композитних материјала. Основни проблем њихове примене је врло скупа производња и немогућност производње у инжењерски потребним количинама. Иако су још врло далеко од практичне примене у стварним конструкцијама, ради се о материјалима будућности и због тога су данас предмет врло интензивних истраживања.

Повећано коришћење композитних материјала је, пре свега, условљено њиховим физичко механичким и триболошким својствима која су боља у поређењу са својствима основе. У оквиру групе композитних материјала са металном основом (ММС), композити на бази лакних метала алуминијума, магнезијума и цинка, захваљујући својој малој густини, налазе примену у многим индустријама. Од свих њих композити на бази алуминијума су најзаступљенији и велики број истраживања се баве могућношћу њихове примене за израду трибомеханичких компоненти.

Композитни материјали у ваздухопловству

На почетку развоја мотора ваздухоплова, пажња је била усмерена на повећање отпорности на деформације лопатица ротора кроз ојачање алуминијумских легура влакнима бора. У скорије време, све већи интерес је развој асиметричних компонената за моторе ваздухоплова, специјално од композита са матрицом од титанијума. Техничка керамика и композитни материјали примењују се све више за топлотно најоптерећеније делове погонских система. Интересантне примене се могу видети и код хеликоптера, посебно код мотора, где је композит заменио легуру $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$. Ипак, чињеница је да је инвестиција овог типа оправдана развојем врло ексклузивних производа.

Током 2003. године, фирма „SP Aerospace“ (Гелдорп, Холандија) остварила је први лет са главним компонентама уређаја за слетање од композита са металном матрицом. Ослонац доње кочнице код главног уређаја за слетање авиона F16, развијен је од композита са титанијумском матрицом, ојачаним влакнима силицијум карбида, слика 2.8 в).



Слика 2.8 а) и б) Веза између лопатица и мотора од композита са металном основом код EUROCOPTER-а в) Уређај за слетање авиона F16 "Orange"

Жеља за добијањем структура које одликују висока прецизност и димензиона стабилност код елемената који ће бити послати у свемир, довела је до развоја композита са металном матрицом. Прва успешна примена композита са металном матрицом ојачаног континуалним влакнима, била је код цевасте структуре направљене од алуминијума/бора, употребљене за ослону конструкцију централног дела спејс шатла Orbiter (око 1975. год.). Захваљујући примени нових композита, било је могуће остварити уштеду у тежини од око 145 kg или од 44 % у односу на исту алуминијумску структуру.

Пример примене композита са металном матрицом типа алуминијум/угљеник је код „водеће“ антене телескопа „Hubble Space“. Овај „водич“ (дугачак 3.6 метара) обезбеђује високу аксијалну крутост и мале термичке деформације при задржавању коректне позиције током рада у свемиру. Истовремено обезбеђује правилну функцију пријема таласа одличном електро-проводљивошћу и побољшава везу између антене и свемирског брода. Употребом композита са металном матрицом, тежина конструкције је смањена за 30 %, а остварена је већа отпорност на хемијску деградацију услед ефеката радијације из свемира.

Композитни материјали у аутомобилској индустрији

Због тежњи да возила имају што мању масу, што већу сигурност и, уз то, нижу продајну цену и мале трошкове производње, расте примена композита са металном матрицом у аутомобилској индустрији. Ово се не дешава само због конкуренције на тржишту, већ је јасно уочена предност примене нових композитних материјала што их је учинило интересантном алтернативом традиционалним материјалима. У ствари, постоји све важније присуство композита са металном матрицом код мотора (блок мотора и клипови), погонских вратила и диск кочница (слика 2.9). На пример, код кочних система, примена композита са металном матрицом посебно је истакнута код дискова који су произведени од алуминијумске матрице ојачане честицама SiC.



Слика 2.9 Клип (а), кочне плочице (б) и диск кочнице (в) направљени од хибридних композита

Из тог разлога, октобра 1991. године, Форд и Тојота су одлучили да усвоје дискове направљене од 80 % алуминијума и 20 % SiC. Избор 20 % SiC направљен је да би се комбиновала добра површинска отпорност (повећана присуством SiC) са термичком и механичком стабилношћу током рада. Матрица је такође изложена старењу да би се спречила деградација особина током употребе. После тога, и други произвођачи, као што су: Фолксваген, Тојота (RAV4EV, Plymouth Prowler, EV-1, Precept, Impact), Форд (Prodigy) и Лотус (Elise) су усвојили овакве типове материјала.

Композити са металном матрицом имају примену и код шинских возила. На слици 2.10 а) показана је компонента кочнице метроа у Копенхагену, направљена од композита, при чему је смањена тежина склопа за 38 % у односу на претходно коришћено ливено гвожђе. На сликама 2.10 б) и 2.10 в) приказане су аутомобилске диск кочнице направљене од композита са металном основим.



а)



б)



в)

Слика 2.10 Делови од композита са металном основом
а) код шинских возила б) и в) код аутомобила

Примена композита са металном матрицом код клипова је један од највећих успеха у пољу индустрије. Производња ових клипова почела је у Јапану у серијама од неколико комада да би се данас дошло до производње од милион комада годишње. Тојота је 1983. године увела примену 5 % кратких влакана Al_2O_3 код клипног прстена, смањивши тежину за 5-10 %. Овим системом је дебљина превлаке успешно смањена четири пута и остварено је повећање отпорности на деформације у односу на неојачани алуминијум.

Композитни материјали у електроници

Нова генерација напредних интегрисаних кола генерише значајно више топлоте током рада него раније. Термички замор се може појавити услед малог неслагања коефицијената термичког ширења код силицијумске основе и одвода топлоте (молибдена). Овај проблем може се решити коришћењем композита са металном матрицом са идентичним коефицијентима термичког ширења (на пример, алуминијум са бором или графитна влакна и алуминијум са честицама SiC).

Поред ниског коефицијента термичког ширења и високе термичке проводљивости, ови композити такође имају малу густину и висок модул еластичности. Материјали за херметичка паковања су развијени да заштите електронска кола од влаге и других утицаја околине. Ова паковања често имају заптиваче између стакла и метала. Зато су потребни материјали са „подешљивим“ коефицијентом термичког ширења. Композити на бази алуминијумске матрице испуњавају овај услов, пошто им коефицијент термичког ширења зависи од запреминског удела влакана и честица.

Композити са металним матрицама се такође користе код термичке заштите полупроводничких модула погона васионских бродова код комуникационих сателита, замењујући легуре бакра и волфрама са много већом густином и мањом термичком проводљивошћу, уз уштеду у тежини од више од 80 %. Ови модули се такође користе код више земаљских система, што објашњава годишњу производњу од близу милион комада. Уз поменуте, као и многе друге предности, примена композита са металном матрицом код електронских компонената ће наставити да расте код свемирских апликација.

2.3 Композити са металном матрицом

Композити са металном матрицом (MMC - Metal Matrix Composites) обезбеђују већу отпорност на хабање, више температурне границе од њихових основних легура. Такође, могу се обликовати тако да се оствари повећана чврстоћа, крутост, топлотна проводљивост и димензиона стабилност. Њихову основу најчешће чини легура, ређе чисти метал а ојачивач се састоји од угљеничних, металних или керамичких додатака. Током производње композита мешају се заједно матрица и ојачивач. Континуално влакно или влакнасти ојачивачи могу бити: угљеник (C), силицијум карбид (SiC), бор, алуминијум триоксид (Al₂O₃)... Дисконтинуални ојачивачи састоје се углавном од силицијум карбида у облику вискера или честица, алуминијум триоксида или титан диборида (TiB₂) и кратких или насецканих влакана Al₂O₃ или угљеника [1, 4, 7-9].

Присуство металне матрице даје металну природу композиту у смислу топлотне и електричне проводљивости, производних процеса и интеракције с околином. Механичка својства матрице, као модул еластичности и чврстоћа у попречном смеру композита са усмереним ојачивачима, довољно су висока код појединих MMC-а да је могуће једносмерно слагање у неким инжењерским конструкцијама.

Основна улога матрице (основног материјала):

- осигурава добро повезивање са ојачивачем,
- формира и осигурава спољашњи облик композитне конструкције,
- осигурава заштиту композита од спољашњих утицаја и оштећења,

Карактеристике ојачивача:

- осигуравају композиту велику тврдоћу и чврстоћу,
- висок модул еластичности – крутост,
- остале захтеване карактеристике (топлотна проводљивост, отпорност на хабање, ударна жилавост...).

2.4 Поступци добијања композита са металном матрицом

Поступци добијања композита са металном матрицом могу се поделити на примарне и секундарне. Примарним процесом композити се добијају синтерованем од основних материјала, матрице и ојачивача. Ојачивач се уграђује у матрицу у потребној количини и на одговарајућа места при чему се формирају одговарајуће везе између саставних елемената. Секундарни процес обухвата све остале поступке потребне за прераду примарног композита у коначни производ. У зависности од жељног коначног производа и примењеног начина производње, оба поступка се могу одвајати истовремено.

У општем случају, поступци за добијање композитних материјала са металном основом се разликују према стању металне основе и начину инфилтрације фазе ојачивача, као и према врсти и облику фазе ојачивача. Избор поступка за производњу композитног материјала зависи од механичких и хемијских карактеристика матрице и ојачивача. Такође, зависи од дужине и величине влакана, начина слагања и размештаја влакана, од величине, облика и расподеле честица. Потребно је и познавање термодинамичких процеса и могућих реакција матрица – ојачивач као и радне температуре ради избора оптималног поступка производње композита. Многи ојачивачи и материјали матрице нису компатибилни и не могу се прерадити у композите без прилагођавања њихових својстава. Постоје композити где је веза ојачивача и метала слаба и неопходно ју је појачати. Са друге стране, треба избегавати прекомерну активност на међуграници, која може ослабити својства материјала у контакту, посебно код композита произведених од реактивних саставних елемената. Решење проблема постиже се адекватном површинском обрадом, превлаком ојачивача или прилагођавањем састава легура матрице.

Поступци у чврстом стању (Solid State Processing)

Ови поступци се одвијају при нижим температурама где постоји могућност боље контроле термодинамичких процеса. Главни поступци за добијање композита у чврстом стању су дифузионо спајање материјала у облику танких слојева и синтеровање. Процеси наносења матрице, у којима се материјал матрице наноси на влакно, укључују електрохемијско превлачење, плазма спреј поступак и физичко таложење из гасовите фазе. После процеса наносења одвија се дифузионо спајање, на повишеној температури и високом притиску. Степен дифузије мора бити ограничен због могућег пораста нежељених крхких фаза на контактної међуповршини. Један од начина ограничавања времена дифузије је истискивање слоја влакана и матрице кроз алат. Такође се може применити и топло ваљање, при чему се деформација мора ограничити да би се смањило померање влакана ојачивача и избегла оштећења. Повишене температуре се користе ради олакшаног течења 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 самог спајања. Неопходно је претходно чишћење саставних материјала и одвијање поступка у вакууму [1, 4].

Високотемпературна синтеза (Self-Propagating Synthesis – SHS)

Високотемпературна синтеза топлим пресовањем је релативно јефтин и једноставан процес којим се могу производити композити са малом порозношћу и тродимензионалном структуром између интерметалних спојева и металних матрица. Истовремено дејство притиска и реакције синтезе омогућавају смањење порозности произведеног материјала и контролу геометрије пора као и равномерну расподелу честица у металној матрици [1, 4].

Металургија праха (Powder Metallurgy – PM)

Металургијом праха се остварује повезивање праха са честицама, плочицама или вискерима ојачивача. Два или више праха се мешају, понекад уз помоћ везива. Керамичке честице које треба да осигурају високу чврстоћу композита су реда величине 5 μm , док је величина праха легуре матрице (алуминијум или магнезијум) од 20 до 40 μm . Разлика у величини честица праха омогућава стварање непрекинуте мреже малих керамичких честица око већих зрна матрице. Тако настају микроструктурно нехомогена подручја. Стварањем мреже, настала порозност се мора попунити растопљеном легуром матрице током сједињавања (топло пресовање). Ако полазни прах лако оксидира, врло фини субмикронски оксиди могу се концентрисати на границама зрна значајно смањујући жилавост изворног материјала. Поступак обухвата: просејавање брзо очврслих честица, спајање честица са фазом или фазама за ојачавање са или без везива, очвршћавање смесе ојачивача и матрице на око 75 % густине, истискивање гаса и завршно сједињавање истискивањем, ковањем, ваљањем или неком другом топлим обрадом [1, 4].

Технологијама металургије праха, могуће је добити много различитих композитних материјала са металном основом врхунског квалитета. Међутим, висока цена производње ограничава примену ових технологија.

Поступци у течном стању (Liquid Processing)

Ради што бољег повезивање матрице и влакана пожељно је да растоп из матрице тече у међупросторе влакна да би се осигурало његово потпуно покривање. За такав поступак користе се дубоке купке које значајно олакшавају производњу, а које се употребљавају у индустрији за припрему полупроизвода. „Квашење“ влакана и избегавање превелике хемијске реакције између влакана и матрице захтева претходну обраду истих, и то превлачењем као нпр. са спојем титан диборида у случају алуминијумских MMC-а.

Ливење у калуп

Ово је најчешћи је од свих ливачких поступака за производњу велике количине делова уз најнижу цену. При томе се користе различити начини припреме растопа и технике ливења [1, 4].

Ливење мешањем (*Stir Casting*)

Ливење мешањем слично је класичном поступку код алуминијумских легура, али уз благо мешање растопа ради постизања равномерне расподеле нпр. SiC честица. У циљу избегавања прегрејавања и накнадног стварања карбида потребна је стална контрола температуре растопа [1, 4].

Ливење гњечењем (*Squeeze Casting*)

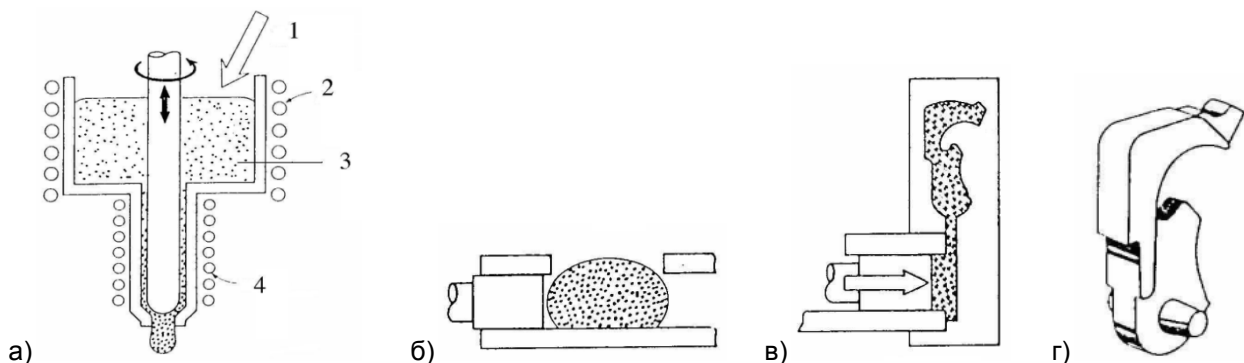
Ливење гњечењем подразумева утискивање порозне керамичке форме у предгрејани калуп, који ће се касније испунити течним металом. Помоћу притиска растопљени метал улази у керамичку форму при чему настаје чврст композит. Током овог поступка долази до истовременог очвршћавања основе уз остваривање чврсте граничне површине ојачивач - основа. Предност описаног поступка је у томе што се добија компактан композитни материјал минималне порозности [8]. Поступак смањује утрошак материјала и енергије, производећи делове на завршну меру и нуди способност селективног ојачавања елемената [1, 4].

Ливење у получврстом стању (*Rheocasting, Compcasting*)

Ливење у получврстом стању је поступак где се метална основа у фази процеса у којој се одвија инфилтрација ојачивача у металну основу налази у получврстом стању. Овај поступак добијања композитних материјала је сличан ливењу мешањем, са разликом што се честице мешају у метал који је у получврстом стању. Потребно је снажно мешање получврстог метала, а не благо као код ливења мешањем [1, 4]. Проблеми који су се јављали при коришћењу металне основе у течном стању довели су до пораста интереса за истраживањем начина добијања композитних материјала са металном основом у получврстом стању.

Реокастинг поступак

Код реокастинг поступка дендритни полуочврсли растоп неке легура трансформише се у недендритну двофазну (чврсто - течно) смешу. Овој смеси могуће је мењати привидни вискозитет. Наведена појава омогућава 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. 2.11 [1, 4, 10, 11].



Слика 2.11 Шематски приказ реокастинг поступка [1, 4, 10, 11]

а) Континуирани реокастер,

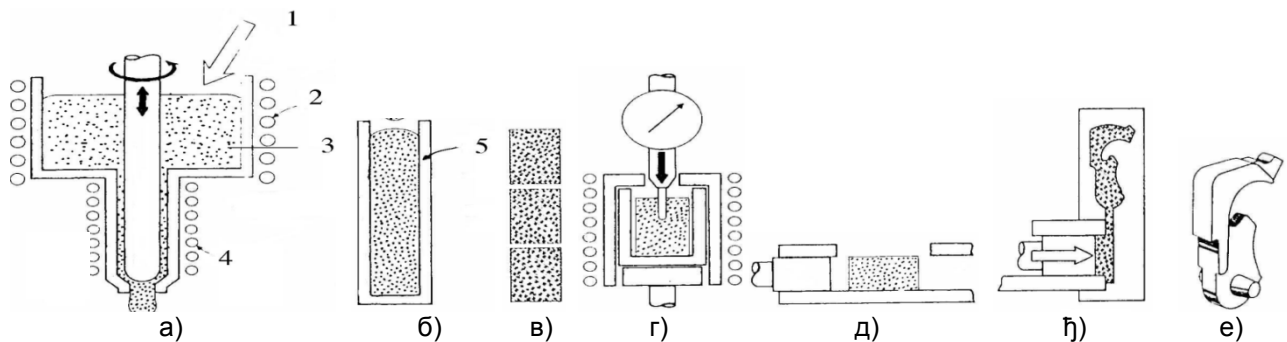
1 Улаз растопа, 2 Грејач горње коморе, 3 Растоп, 4 Грејач доње коморе

б) Комора уређаја за ливење под притиском,

в) Убризгавање полуочврстог растопа у алат, г) Одливак

Припремљен растоп се улива у уређај који се назива реокастер, у овом случају континуирани реокастер, слика 2.11 а). Уређај се састоји из две коморе. У првој, која има сопствено грејање, прихвата се растоп и одржава на некој температури изнад ликвидус температуре. У другој, (доњој) комори образује се полуочврсли растоп. Доња комора је снабдевена системом за хлађење тако да се регулацијом температуре може регулисати однос чврсто - течно. Мешач, облика ваљка, пролази кроз обе коморе. Избором одговарајуће брзине мешања могуће је добити жељени привидни вискозитет полуочврслог растопа, односно потребну течљивост. Двофазна смеша се затим излива у комору машине за ливење под притиском, слика 2.11 б). Даљи поступак сличан је класичном ливењу под притиском, тј. активира се клип и полуочврсли растоп се убризгава у алат, слика 2.11 в). Процес се завршава добијањем готовог одливка, слика 2.11 г).

Друга варијанта реокастинг поступка предвиђања за добијање полуопроизвода, названа тиксокастинг поступак, приказана је на слици 2.12. Полуочврсли растоп се реолошки обрађује у реокастеру, слика 2.12 а), после чега се излива у калуп, слика 2.12 б) и тако добијају инготи. С обзиром да је структура добијених ингота недендритна, овако добијени инготи често се називају тиксо - инготи. Инготи већих димензија могу се скратити на више мањих слика 2.12.в) и употребити на више начина. У варијанти приказаној на слици 2.12 део материјала исечен је из великог ингота и загреван у посебној пећи. По достизању планиране температуре шаржиран је у комору машине за ливење под притиском. Добијени тиксо - инготи могу се (скраћени или не) примењивати за процесе пластичне прераде, као што су ковање, ваљање и други.



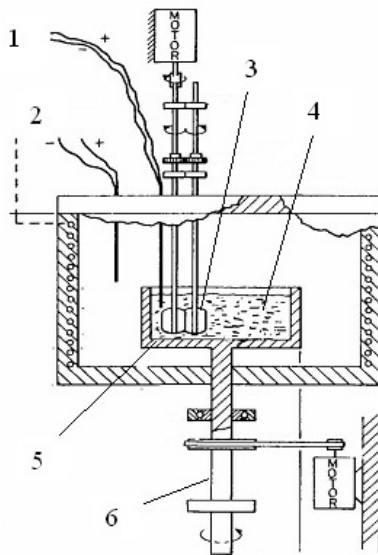
Слика 2.12 Шематски приказ тиксокастинг поступка [1, 4, 10, 11]

- а) Континуирани реокастер,
 1 Улаз растопа, 2 Грејач горње коморе, 3 Растоп, 4 Грејач доње коморе, 5. Калуп
 б) Тиксо-одливак (ингот), в) Тиксо ингот исечен на мање јединице,
 г) Додатни уређај за загревање дела тиксо-ингота,
 д) Комора уређаја за ливење под притиском,
 њ) Убризгавање полуочврслог растопа у алат, е) Одливак.

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 [8, 10 - 15]. Постоји могућност одржавања оптималног вискозитета полуочврслог растопа током мешања, уз истовремено додавање честица ојачивача и њиховог задржавања у маси основе.

Компокастинг поступак

Компокастинг поступак се користи за добијање композита са металном основом ојачаном честицама или кратким влакнима материјала као што су Al_2O_3 , SiC, графит и други. Поступак је карактеристичан по томе што се керамички ојачивачи додају током мешања металне основе која је у полуочврслост стању.



Слика 2.13 Скица апаратуре коришћене за добијање композита на бази легура алуминијума уз додатак честица ојачивача, компокастинг поступком [1, 4, 10]

- 1) Контрола температуре полуочврслог растопа,
- 2) Контрола температуре коморе,
- 3) Мешач,
- 4) Полуочврсли растоп,
- 5) Посуда,
- 6) Уређај за обртање посуде

Предност овог поступка је у томе што се за његово извођење честице ојачивача не морају претходно припремати, тј. могуће је добити композит 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.

Ради извођења компокастинг поступка конструисани су посебни уређаји. Један такав уређај приказан је на слици 2.13. Уређај се састоји из пећи за топљење, мешалице и лонца (у овом случају везаног на систем за обртање). Систем је снабдевен и потребним бројем термопарова ради строге контроле температуре.

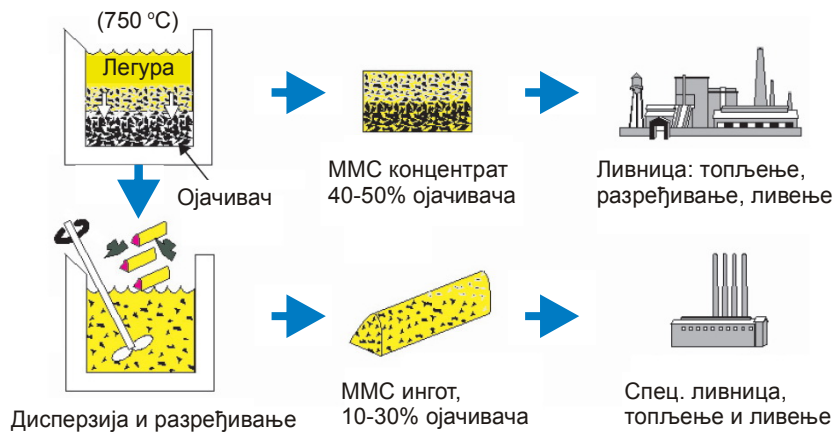
Компокастинг поступак успешно се примењује за добијање композита на бази легуре ZA27 уз додатак Al_2O_3 и SiC честица.

Коректно контролисан компокастинг поступак могао би да буде широко прихваћен као комерцијални начин за производњу композитних материјала, с обзиром да поседује значајне предности:

- нижа температура изливања полуочврслог растопа у алате, а самим тим и продужење времена њиховог трајања,
- уштеда у енергији и материјалу,
- велики избор могућих облика финалног производа,
- уз одговарајућа техничка и процесна побољшања могуће је у великој мери побољшати распоред честица ојачивача у металној основи, а тиме и механичке особине композитних материјала,
- претходна припрема честица ојачивача није неопходна, што поједностављује и појефтиније производњу.

Инфилтрација метала под ниским притиском (Pressureless Metal Infiltration)

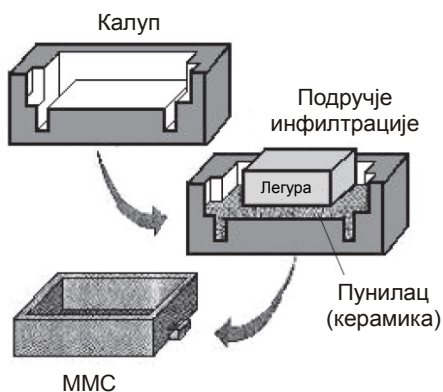
Инфилтрација метала под ниским притиском је поступак, власништво AM LANXIDE-а, познат под различитим заштићеним именима. Првим развијеним поступком композити се производе инфилтрацијом слоја честица Al_2O_3 растопљеним металом који је изложен оксидационој атмосфери. Материјал матрице насталог композита је састављен од смесе продуката оксидационе реакције и неоштећене алуминијске легуре (LANXIDETM). Овим поступком добијају се готови облици и својства композита која могу задовољити одговарајуће специфичне намене. 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, што је приказано на слици 2.14.



Слика 2.14 Шема производње MMC-а PRIMEX инфилтрацијом [1, 4, 15]

Долази до стварања јединствене површинске превлаке на честицама ојачивача чиме су омогућени потпуно „квашење“ честица и повољни услови за течење растопа ради даље ливачке употребе.

Економично се могу производити делови завршног или готово завршног облика, свих величина као и делови сложеног облика [1, 4].



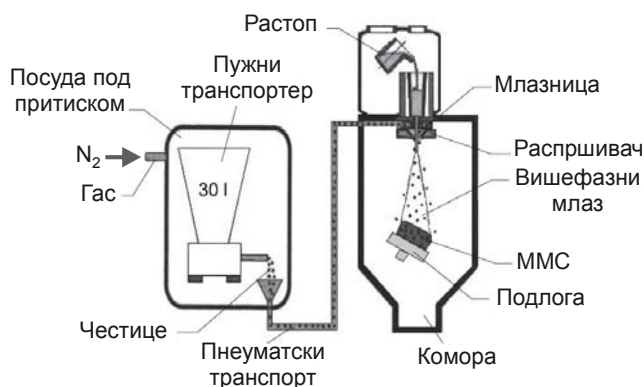
Слика 2.15 Шема производње електронског елемента инфилтрацијом [1, 4, 15]

Значајна примена овог поступка је у производњи делова за електронске компоненте од SiCp/Al композита, слика 2.15. Могу се испунити типични захтеви:

- мали коефицијент термичког ширења да би се смањила механичка напрезања усмерена на електронски уређај током склапања или рада,
- висока топлотна проводљивост ради смањења деформација,
- мала густина за постизање минималне тежине производа,
- смањење цене и повећање поузданости у односу на класичне методе израде електронских компоненти.

Спреј поступак (Spray Deposition)

Спреј поступак укључује атомизацију растопа (стварање засебних капљица), бризгање капљица растопљеног метала кроз дизне и скупљање и очвршћавање получврстих капљица на одговарајућој подлози. Шематски приказ овог поступка дат је на слици 2.16.



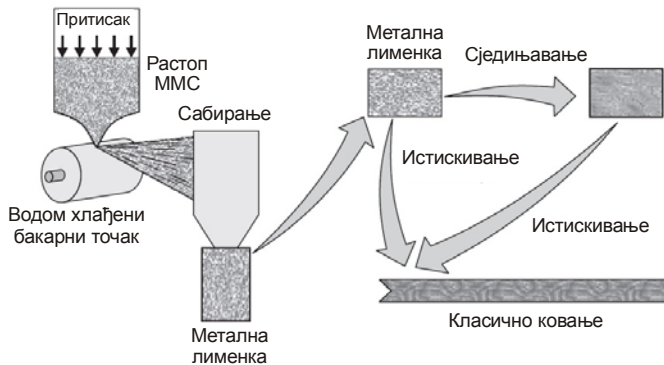
Слика 2.16 Шема спреј поступка [1, 4, 15]

Овим поступком метална легура се топи индуктивним загревањем и излива у загрејану посуду. Растоп тече кроз излаз на дну према гасном распршивачу. Гасни млаз велике брзине распршује метал у ситне капљице које се снажно убрзавају према подлози. На подлози капљице очврсну и стварају талог формирајући тако приближно коначне облике. Брзина очвршћавања није тако велика чиме се постижу две предности: директна производња претходних облика и директно укључивање ојачивача у припадајућу матрицу.

MMC инготи се лију увођењем честица за очвршћавање (угљеник, Al_2O_3 , SiC) у метални млаз. Потребна је пажљива контрола услова дозирања да би се осигурала равномерна расподела честица.

Брзо очвршћавање (*Rapid-Solidification Processing – RSP*)

На величину зрна композита добијених ингот технологијом може утицати растојање између честица, ако је пораст зрна онемогућен сударањем честица. Код метала осетљивих на пораст зрна као што је магнезијум, коначна величина зрна понекад је превелика, што погоршава механичка својства материјала. Због тога се при развоју низа инжењерских легура користио поступак брзог очвршћавања за постизање жељене микроструктуре (слика 2.17). Микроструктура ових легура карактерише се уједначенијим саставом, уситњеним микро саставним елементима, високим степеном презасићености и задржаним метастабилним фазама. Три су начина коришћења брзог очвршћавања у производњи композита: атомизација, добивање трака (*melt-spun ribbon*) и листића (*meltspun flake*).



Слика 2.17 Поступак брзог очвршћавања [1, 4, 15]

Последњи начин је најперспективнији јер довољно велика брзина очвршћавања омогућава добијање листића дебљине око 40 до 60 μm . Листићи добијени овим начином широки су и дугачки 6 до 8 mm и имају мали однос површина/запремина. Листићи се могу директно сјединити у композитни производ без даље промене величине. Траке, захтевају даљу обраду ради смањења њихове величине, што може довести до запрљаности и оксидације.

Физичко таложење из гасовите фазе (*Physical Vapour Deposition – PVD*)

Физичко таложење из гасовите фазе обухвата низ поступака укључујући испаравање електронским снопом. Таложење и електро - превлачење су поступци којима се производе композити узастопним nanoшењем слојева матрице на влакна ојачивача. PVD технике захтевају много мање загревања влакна од инфилтрације растопљеним металом. Температуре површине су обично испод 200°C.

2.5 Подела композита са металном матрицом

2.5.1 Композити са алуминијумском матрицом

Највећи део истраживања и развоја MMC-а усмерен је на алуминијум као метал матрице. Алуминијум је најатрактивнији посебно за употребу у авио индустрији, где је тежина структурних компонената битан чинилац. Значајна су топлотна својства алуминијумских композита, са проводљивошћу попут метала и са коефицијентом термичког ширења који се може снизити готово до нуле. Ови композити могу да задовоље многе захтеве у практичној примени, а да њихова производња буде прихватљива. Главни разлог додавања ојачивача алуминијуму и алуминијумским легурама је повећање чврстоће, крутости или отпорности на замор. Побољшање механичких, а посебно триболошких карактеристика наведених композита могуће је коришћењем одређених ојачивача, најчешће SiC, Al₂O₃ и графита. Силицијум карбид као ојачивач у алуминијумским композитима првенствено се бира због добре комбинације његових физичких својстава, расположивости и цене.

Бор/алуминијум је технолошки развијен композит с непрекинутим влакнима. Ова врста композита сједињује добру чврстоћу, крутост и ниску густину борних влакана са производном и инжењерском поузданошћу алуминијумских легура. Укупни пораст специфичне крутости борних влакана је готово шест пута већи у односу на било који стандардни инжењерски материјал, укључујући челик, алуминијум, молибден и магнезијум. Карактерише их висока електрична и топлотна проводљивост, жилавост и, незапаљивост. Примена ових композита укључује цевне везне делове структуре средњег трупа свемирског брода и хладне плоче у вишеслојним носачима електронских микрочипова.

Силицијум карбид/алуминијум (SiCf/Al) 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 ширења чија се вредност може контролисати променом удела силицијум карбида. У поређењу са основним металом, композит задржава чврстоћу, коју има на собној температури, на температурама до 260 °C.

Угљеник/алуминијум композити су почели да се развијају почетком шездесетих година прошлог века из комерцијалних разлога због чврстих и крутих угљеничних влакана. Међутим, угљеник и алуминијум су неподобни метали за производњу композита. Штетне реакције између угљеника и алуминијума, лоше „квашење“ угљеника растопљеним алуминијумом и оксидација угљеника, су значајне техничке препреке за производњу ових композита.

Алуминијум оксид/алуминијум композити могу се производити различитим поступцима, али су типични поступци у течном или у получврстом стању. Нека од керамичких оксидних влакана нису скупа и показују својства боља од својстава неојачаних алуминијумских легура. Овај композит има повећану отпорност на хабање и на деформације због топлотног замора, као и смањени коефицијент термичког ширења. Дугачко влакно Al₂O₃/Al производи се слагањем Al₂O₃ трака са усмереном оријентацијом стварајући тако форму која се ставља у калуп и натапа растопљеним алуминијумом уз помоћ вакуума. Веза ојачивач - матрица постиже се малим додатком литијума у растопљени метал.

Дисконтинуални силицијум карбид/алуминијум (SiCd/Al) композити укључују материјале са SiC честицама, вискерима, листићима, плочицама или кратким влакнима у алуминијумској матрици. Доступни су у великим количинама на тржишту по повољним ценама за разлику од већине осталих композита са металном матрицом. Више компанија развија технологију добијања SiCd/Al композита металургијом праха са честицама или вискерима као ојачивачима. Технологија ливења развијена је за ову врсту ММС-а и ливењем произведени инготи могу се припремити у потребном облику – истиснуте шипке, инготи или ваљани полупроизводи – за даљу обраду. Многе предности и релативно ниска цена уз малу тежину чини делове од ових композита конкурентним одређеним отковцима и одливцима од алуминијума и разним деловима који се данас израђују од челичних ливова, челика, магнезијума или титанијума.

Пораст чврстоће порастом удела SiC

Својства ливених ММС-а зависе од легуре матрице, удела SiC ојачивача, термичке обраде и поступка ливења. Као и код било које ливене алуминијумске легуре, микроструктура одливака од ММС-а зависи од брзине хлађења при очвршћавању. Својства ливених ММС, посебно специфична чврстоћа и крутост, су боља од својстава сивог лива и челика као и неочврснутог алуминијума. Присуство тврдих честица SiC такође доводи до значајног пораста отпорности на хабање. Ливени композити захтевају термичку обраду ради повећања механичких својстава. Ојачивачи од SiC утичу и на физичка својства одливака. Густина се мало повећава (нпр. око 3 % уз 20 мас.% SiC), а опадају електрична проводљивост и коефицијент термичког ширења. Топлотна проводљивост, међутим, расте.

Разлике у ливничкој пракси у ливењу SiCp/Al у односу на Al-легуру

Услови при ливењу ММС-а обично су слични као и при ливењу стандардних алуминијумских легура. Ипак постоји неколико битних разлика: Топљење под инертним гасом спроводи се према процени самог ливца. Уобичајена техника одстрањивања гаса, може изазвати стварање мехурића гаса на честицама SiC. Потребно је одржавати температуру растопа у уским границама да би се избегло прегрејавање и стварање алуминијум карбида. Растоп се мора лагано мешати да се постигне равномерна расподела SiC честица.

Топљење: ММС-и се топе врло слично поступцима за топљење неочврнутих алуминијумских легура. Сви потребни алати којима се улази у растоп морају такође да буду суви и предгрејани пре употребе. Контрола температуре растопа је стандардна, слична оној код неочврнутих легура. Међутим, мора се избећи прегрејавање које може довести до стварања алуминијум карбида што неповољно утиче на растоп, слаби ливени материјал и смањује отпорност одливака на корозију.

Мешање: Будући да су честице SiC потпуно наквашене течним алуминијумом, оне се неће стопити у чврсту масу, али ће се уместо тога скупљати на дну пећи. Употребом мешача врло брзо се постиже равномерна расподела честица у растопу. Мешање треба да буде полагано да би се избегло стварање вртлога на површини растопа. После мешања брзина таложења SiC честица је прилично спора делимично због топлотних струјања у растопу и природне појаве „ометаног слегања“.

Пречишћавање и одстрањивање гаса: Развијен је патентирани поступак за пречишћавање и одстрањивање гаса композитног растопа који користи уређај сличан мешалици са лопатицама, за мешање купке и убризгавање смесе гасова. Тај се уређај користи и за одржавање честица SiC у суспензији.

Претакање: При транспорту течног метала од пећи до места уливања није потребно мешање. Препоручено је темељито мешање купке, уклањање троске док је метал у пећи и потом транспорт растопа у лонац за уливање. Уколико пренос метала укључује претакање из нагибне пећи у лонац, важно је смањити турбуленције на минимум како не би дошло до заробљавања гаса. Међутим, нагибне пећи се генерално не препоручују за композитне растопе.

Уливни систем: Основна правила при уливању и доливању примењива су и на ливљиве ММС-е, укључујући употребу филтера који пропуштају честице SiC, а задржавају оксиде. Вискозни растоп се понаша као делимично очврнут па керамичке честице отежавају слободан проток гасова. Композитни материјали су знатно мање осетљиви на турбуленцију од алуминијума. Лоше изведени уливни системи могу проузроковати стварање и задржавање мехурића гаса у растопу који не могу истичати.

Завршна обрада: Стандардни резни алати израђени од брзорезног челика се троше врло брзо при обради ливених ММС-а због тврдих абразивних честица SiC. Алати од тврдих метала су оптимални за мале количине обрађеног материјала, док су за нормалне производне количине ценовно најповољнији дијамантски алати.

Композити ојачани вискерима (SiCw/Al) су много скупљи али имају следеће предности:

- монокристални вискери имају већу чврстоћу од осталих дисконтинуалних ојачивача као што су честице, поликристални листићи и насецкана влакна;
- уобичајени поступци прераде метала могу усмерити вискере у металној матрици;
- ваљањем, истискивањем, ковањем и пластичним обликовањем може се остварити усмереност чврстоће.

2.5.2 Композити са магнезијумовом матрицом

Ови композити су развијени да би се искористила иста својства као она значајна за алуминијум: висока крутост, мала тежина и низак коефицијент термичког ширења. Избор између алуминијума и магнезијума као матрице је обично заснован на жељеној тежини односно отпорности на корозију. Густина магнезијума износи приближно две трећине густине алуминијума, али је активнији у корозионој средини. Магнезијум има мању топлотну проводљивост која је често пресудна у његовом избору. Сада су у развоју три врсте магнезијумових композита: континуална влакна С/Мг за свемирске конструкције, кратка влакна Al₂O₃/Мг за делове аутомобилских мотора и дисконтинуална влакна SiC или B₄C/Мг за делове мотора и материјале у нисконапонској електроници. Производне методе за све три наведене врсте исте су као и оне код алуминијумских композита.

2.5.3 Композити са титанијумовом матрицом

Титанијум је изабран као метал матрице због своје добре специфичне чврстоће на средњим температурама и добре отпорности на корозију. У поређењу са алуминијумом титанијум задржава чврстоћу на вишим температурама. Повећана употреба титанијума, као замена за алуминијум у авио индустрији, наступила је са достизањем надзвучних брзина кретања ваздухоплова. Развој титанијумових композита отежавали су процесни проблеми проузроковани великом реактивношћу титанијума са многим материјалима за ојачање. Чврстоћа при повишеним температурама SiC/Ti композита знатно је већа од оне коју има неојачан титанијум. Од ових композита израђују се многе структурне компоненте авиона и вентилаторске и компресорске лопатице за модерне турбинске motore. Титанијумови композити са дисконтинуалним ојачивачима имају предност у умереној крутости и чврстоћи при повишеној температури у односу на неојачане титанијумове легуре. Они такође пружају могућност производње техником металургије праха и могу бити економичнији за производњу од титанијумових MMC-а са континуалним влакнима.

2.5.4 Композити са бакарном матрицом

Бакар има потенцијалне могућности као материјал матрице за композите од којих се захтева топлотна проводљивост и чврстоћа на високој температури. У примени су бакарни MMC-и са континуалним и дисконтинуалним ојачивачима.

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

C/Cu - композити са континуалним влакнима добили су на значају развојем угљеничних влакана. Бакар добро проводи топлоту, али има велику густину и лоша механичка својства при повишеним температурама. Развијена су угљенична влакна са аксијалном топлотном проводљивошћу, при собној температури, бољом од бабра. Додатак тих влакана бабру снижава густину, повећава крутост, повећава радну температуру и повољно утиче на коефицијента термичког ширења. Напредак у производњи C/Cu композита укључује галвански процес покривања сваког угљеничног влакна превлаком чистог бабра, чиме се постиже потребна еластичност.

2.5.5 Композити са матрицом суперлегура

Суперлегура се већином користе у турбинским моторима, међутим, композити са матрицом од суперлегура су међу првим материјалима који су примењени за побољшање конструкције турбина у циљу повећања радне температуре делова. Композити на бази суперлегура развијани су до данашњег нивоа током низа година почев од 60-тих година прошлог века.

Чврстоћа при високим температурама MMC суперлегура постигнута је само ојачавањем тешкотопљивим металима. Под тим се подразумевају влакна волфрама, молибдена, тантала и нобијума са саставом посебно прилагођеним тој намени. Најјача развијена влакна, волфрамове легуре, имају чврстоћу већу од 2070 МПа при 1095 °C или више него шест пута већу од чврстоће сада употребљаваних суперлегура у главном мотору свејс шатла (Space Shuttle). Већина ранијих истраживања на MMC суперлегурама усмерена је на проучавање компатибилности матрица – влакно, која су коначно довела до легура матрице које показују ограничену реакцију са влакнима. Нпр. волфрамова влакна су најмање реактивна у матрицама на основи железа и могу издржати краткотрајно излагање температурама и вишим од 1195 °C без примењене реакције.

На основу досадашњег искуства, композити са металном матрицом су материјали чији развој траје неколико деценије, а још преостаје да се истраживања имплементирају у производњу, као и да добијена својства проверена у примени, потпуније испуне очекивања.

3. ПРЕГЛЕД РАЗВОЈА КОМПОЗИТА НА БАЗИ ZnAl ЛЕГУРА

3.1 Легуре цинка са повећаним садржајем алуминијума

Развојем легура цинка са масеним садржајем алуминијума од 2.3 до 5% почела је комерцијална употреба цинка. Ове легуре одликује висока чврстоћа и добра обрадивост а због својих позитивних карактеристика користе се при изради појединих делова у ауто индустрији (карбуратори, пумпе за гориво, фитинзи), за израду делова мотора у електроиндустрији и др. Крајем седамдесетих година прошлог века појавиле су се легуре цинка са повећаним садржајем алуминијума, са комерцијалним називом ZA-легура. Уочене су њихове добре механичке, техничке и триболошке особине, што је био повод истраживачима и инжењерима да их даље развијају и практично примењују.

Фамилију цинк алуминијумских легура чине ZA8, ZA12 и ZA27 легуре. Нумерички део у ознакама одговара процентуалном садржају алуминијума у легури. Овакво означавање прихваћено је и од стране ASTM стандарда В 669-89, који поред осталог дефинише и хемијски састав легура, приказан у табели 3.1. Према европској норми EN 1774-98 у примени су ознаке ZL8, ZL12 и ZL27. Физичке карактеристике легура дате су у табели 3.2.

Табела 3.1 Хемијски састав
ZA легура

Основне компоненте	Састав (%)		
	Легура		
	ZA 8	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	0,02-0,03
Цинк	остатак	остатак	остатак
Нечистоће (максимални 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

Табела 3.2 Физичке карактеристике
ZA легура

Елементи	Састав (%)		
	Легура		
	ZA 8	ZA 12	ZA 27
Густина (g/cm ³) на 20°C	6,3	6,03	5,0
Скупљање при очвршћавању (%)	1,1	1,3	1,3
Температура очвршћавања (°C)	375-404	377-432	375-487
Специфична топлота (J/kgK) на 24-92°C	435	450	525
Термичко ширење (μm/mK) на 20-100°C	23,2	24,1	26
Термичка проводљивост (W/mK) на 24°C	115	116	125,5
Електрична проводљивост (%) IACS	27,7	28,3	29,7
Електроотпорност (μΩcm) на 20°C	6,2	6,1	5,6
Скупљање релевантно за моделара (mm/m)	10,4	13	13
Скупљање релевантно за израду калуца (mm/m)	0,007	0,0075	0,008

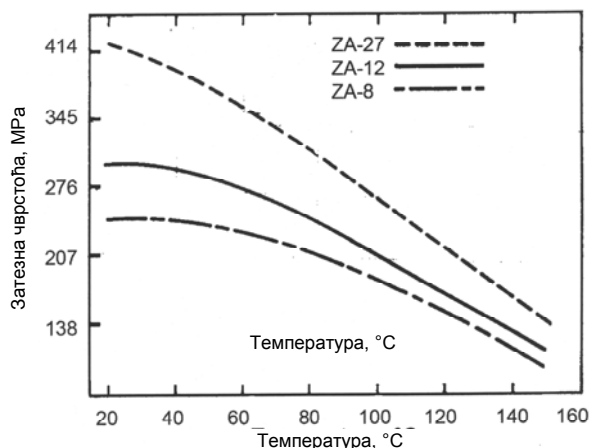
Посебан допринос развоју ZnAl легура имала је међународна организација за истраживање олова и цинка ILZRO (*International Lead Zinc Research Organization*) [16]. Наиме, у оквиру истраживања финансијски подржаним од стране ове организације, дошло је до унапређења постојећих, као и развоја нових легура на бази цинка и алуминијума.

Због повећаног садржаја алуминијума легуру ZA27 одликује нешто већа топлотна проводљивост, топлотно ширење и електрична проводљивост. Легура ZA27 има најмању густину у односу на остале легуре цинка. Генерално, ZnAl легуре имају:

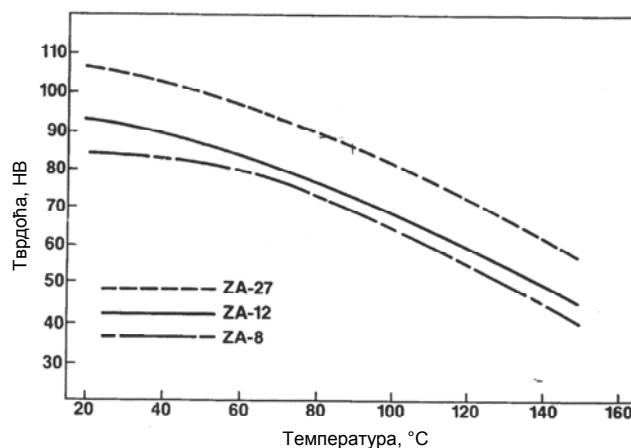
- Топлотно ширење веће него већина алуминијумских легура, легура на бази бакра и ливеног гвожђа,
- Топлотну и електричну проводљивост упоредиву са алуминијумским легурама и знатно већу у односу на легуре на бази бакра,
- Мању густину и тежину у односу на бронзе (легура ZA27 има густину за 45% мању у односу на SAE 660 бронзу).

Ове легуре имају већу затезну чврстоћу од већине легура алуминијума, месинга и бронзе, као и сивог лива, уз напомену да чврстоћа ZA легура у извесној мери зависи од начина ливења. На основу низа испитивања може се рећи да ZA легуре имају добру отпорност према статичком оптерећењу до температуре од 160°C. Механичке особине ZA легура не мењају се природним старењем. Вештачко старење утиче на промену димензија, али оне нису толико значајне, па се може закључити да ZA легуре поседују добру димензиону постојаност, што је важно за њихову практичну примену.

Релативно мале густине ZnAl легура их чине значајним материјалима за конструкције са смањеном тежином. Ове легуре задржавају релативно високе вредности затезне чврстоће на повишеним температурама, што је приказано на слици 3.1. Промена тврдоће са порастом температуре, дата је на слици 3.2. Повећана тврдоћа легура обезбеђује добра триболошка својства и примену ових легура у различитим трибомеханичким системима.



Слика 3.1 Утицај температуре на затезну чврстоћу ZnAl легура [1, 4, 17]



Слика 3.2 Промена тврдоће у функцији температуре ZnAl легура [1, 4, 17]

Доступни публиковани резултати истраживања који се односе на ове легуре показују да легуре на бази цинка које садрже алуминијум и бакар показују добре триболошке карактеристике. Објашњење је у њиховој мултифазној структури и формирању алуминијум и цинк оксида, где алуминијум доприноси доброј отпорности на хабање а цинк оксид смањењу трења.

ZA легуре поседују знатну отпорност према корозији. При излагању атмосферским утицајима, на површини одливака формира се слој оксида и карбоната који спречавају даљу корозију. Испитивања су показала да су ове легуре постојане и у агресивним срединама као што су морска вода и испарења разних соли што омогућава да се ове легуре примене за израду кућишта за заштиту делова који раде у таквим условима.

Једна од најважнијих технолошких особина легура цинка је њихова добра ливкост. Тиме је омогућена примена свих познатих ливачких технологија за производњу полупроизвода и одливака од ове групе легура. Захваљујући доброј отпорности према хабању, легуре цинка са повећаним садржајем алуминијума се примењују за израду клизних лежајева. Треба истаћи да је цена ових производа нижа у односу на класичне материјала коришћене у производњи клизних лежајева.

Пракса је показала да се операције машинске обраде изводе већом брзином у односу на железне и неке нежелезне легуре, при чему се добијају чисте и глатке површине производа. То наводи на закључак да је машинска обрадивост легура цинка са повећаним садржајем алуминијум веома добра.

Добра механичка и триболошка својства уз релативно мали утрошак енергије и нижу цену у односу на легуре бронзе, доприносе сталном развоју легура цинка са повећаним садржајем алуминијума. Истраживања су усмерена на следеће активности:

- промене процентуалног садржаја алуминијума,
- додавање легирајућих елемената,
- утицај термичке обраде,
- развој композита са ZA матрицом.

Главни недостатак свих легура цинка је у погоршању механичких особина на повишеним температурама. Оне су реално употребљиве у радним условима до 100°C. С обзиром на ове ниске температуре топљења у односу на било који легирајући елемент, легирањем се наведени недостатак не може уклонити. Истраживачи су дошли до закључка да се проблем може ублажити стварањем композита са основом од легуре цинка уз додаток ојачивача као што су SiC, Al₂O₃ и др. За добијање композитних материјала, легура ZA27 је оцењена као најперспективнија, јер подржава више метода и начина за добијање композита. Такође је погодна за термичку обраду и пластичну прераду, чиме се може накнадно утицати на механичке особине добијених производа.

3.1.1 Примери примене ливених производа од ZA легура

На слици 3.3., приказан је део производа од ZA легура, добијен углавном технологијом ливења под притиском. Производи приказани на сликама 3.3 до 3.18 имају различиту намену а углавном се користе као замена за неке скупље материјале [10, 18]. Заштитни поклопци за главчине код аутомобилских точкова ливени од ZA8 легуре дати су на слици 3.4. Добро се машински обрађују и на њих се лако наносе електролитичке превлаке у циљу побољшања њиховог спољашњег изгледа.

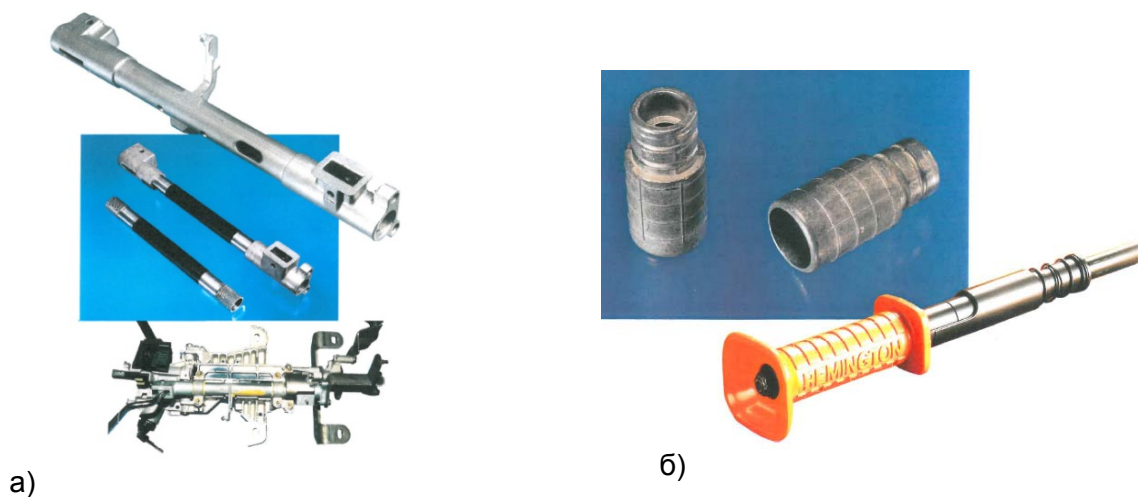


Слика 3.3 Одливци од ZA легура



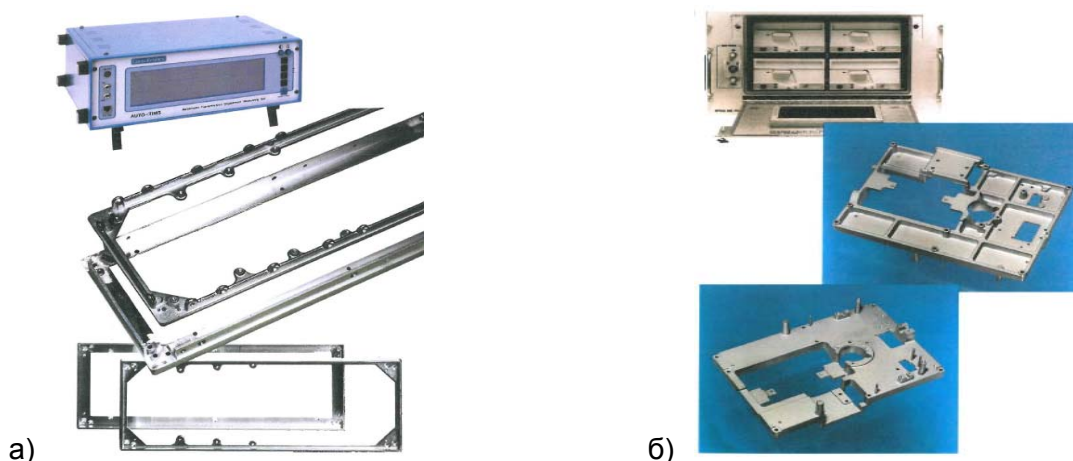
Слика 3.4 Заштитни поклопци за главчине аутомобилских точкова

Одливак од ZA8 легуре цилиндричног облика замењује склоп од машински обрађеног челика и ливеног магнезијума уз значајно смањење трошкова производње, слика 3.5 а). Делови ковачког чекића ливени од ZA8 легуре замењују исте делове од машински обрађеног челика, чиме се трошкови производње смањују на половину, слика 3.5 б).



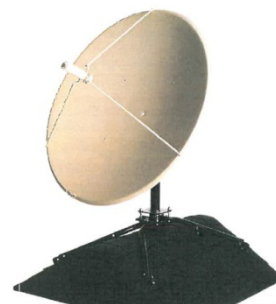
Слика 3.5 Делови добијени применом легуре ZA8

Украсни рамови ливени од легуре ZA12, слика 3.6 а), и постоља ливена од ZA12 легуре за различите уређаје, слика 3.6 б), замењују њима одговарајуће делове од алуминијума који захтевају низ додатних машинских операција (резање, заваривање и друге), уз осетно смањење трошкова производње.



Слика 3.6 Делови добијени применом легуре ZA12

На слици 3.7 су делови сателитске антене ливени од ZA12 легуре. Поседују добру димензиону стабилност у различитим временским условима, односно отпорни су према атмосферској корозији. Одливци од легуре ZA12 су високо котирани као материјали за израду ТВ антенских система.



Слика 3.7 Делови сателитске антене ливени од легуре ZA12

Рамови за кућишта разних канцеларијских машина ливени од ZA27 легуре приказани су на слици 3.8 а). Одливак (рам) замењује мноштво различитих делова који су раније улазили у састав рама. Због добре отпорност према корозији, додатна заштита рамова није потребна. Делови уређаја ливени од ZA27 легуре одликују се добром отпорношћу на хабање и јефтином израдом, слика 3.8 б).



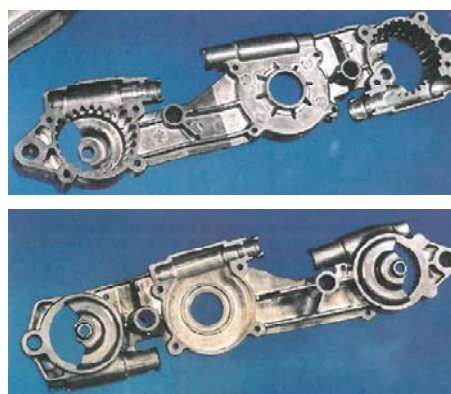
а)



б)

Слика 3.8 Делови добијени применом легуре ZA27

Јефтина и поуздана кућишта механизма за померање седишта у возилима, ливена од ZA27 легуре, приказана су сликом 3.9.



Слика 3.9 Механизам за померање седишта у возилима

На слици 3.10 је приказана машина за паковање фирме "Signode Corporation" која садржи три одливка од легуре ZA27: адаптер каиша (горе лево), улазни клизни оквир (горе десно) и чекрк (десно). Захваљујући изузетним карактеристикама легуре смањено је оптерећење и хабању делова током транспортно – претоварних процеса.

Инжењери фирме "John Deer" дизајнирали су ручицу саднице "MaxEmerge 2" од легуре ZA12 базирајући свој избор на њеној јачини, доброј завршној обради и карактеристикама хабања (слика 3.11).



Слика 3.10 Машина за паковање



Слика 3.11 Садница фирме "John Deere"

Поклопац пнеуматског чекића фирме "Danair Aerosmith" (слика 3.12 а) лије се од ZA12 легуре. Употреба ове легуре смањила је трошкове производње и повећала поузданост алата. Пнеуматски чекић (слика 3.12 б) може да оствари и до 1000 удараца у минути, при чему легура ZA12 обезбеђује јачину која може да поднесе радна оптерећења и да пригушује трзаје.



а)



б)

Слика 3.12 Поклопац пнеуматског чекића фирме "Danair Aerosmith"

Легура ZA27 користи се за израду кућишта тањирастих зупчаника (слика 3.13 а) као саставних делова механизма за дизање терета фирме "Superwinch" (слика 3.13 б)



а)



б)

Слика 3.13 Елементи електричног витла фирме "Superwinch"



Већ је истакнута улога ZA легура при изради делова у ауто – индустрији. На слици 3.14 је пример производње једног од најодговорнијих делова за правилно функционисање мотора са унутрашњим сагоревањем.

Слика 3.14 Клипњача и клип мотора израђени од легуре ZA12



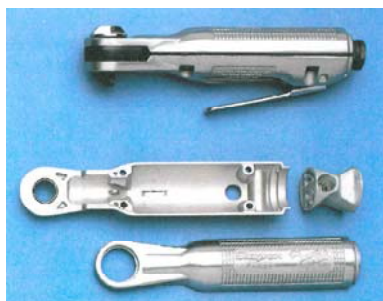
Слика 3.15 Лежајеви за радне машине



Слика 3.16 Померљиви точак управљача



Слика 3.17 Расхладни профили за употребу у рачунарској индустрији



Слика 3.18 Ваздушни одвртач фирме "Snap-On Tools"

Легуре на бази цинка и алуминијума налазе примену и у области механизације и транспортних система. Грејдер фирме "Champion Road Machinery" садржи три различита типа лежајева за мале брзине и велика оптерећења, направљена од легуре ZA12. Лежајеви обезбеђују побољшане радне перформансе и смањене трошкове одржавања (слика 3.15).

Померљиви точак управљача "Command 290" произвођача "Morse Controls" користи шест одливака од легуре ZA8: подложну плочу, ослонац стуба управљача и четири симетрична одливка који чине кардански зглоб (слика 3.16).

Расхладни профили са радијалним лопатицама од легуре ZA8 развијени за употребу у рачунарској индустрији приказани су на слици 3.17. Ефикасност хлађења је повећана одличном термопроводљивошћу легуре. Легура је повећала јачину расхладних профила тако да могу да издрже паковање, транспорт и руковање пре монтирања на матичну плочу рачунара.

Ваздушни одвртач фирме "Snap-On Tools" укључује три одливка од легуре цинка. Два одливка од легуре ZA27 чине кућиште овог алата, док одливак од легуре ZA8 функционише као ваздушни колектор (слика 3.18).

На основу приказаних слика, као и раније описаног, може се констатовати да одливци израђени од ZA легура имају добре перспективе на тржишту ливених производа.

Ливница PAP д.о.о, Батајница производи легуре PAP12 и PAP27 из система ZnAlCuMg, према америчким стандардима ASTM B 669-89 и ASTM B 791-88, које на домаћем тржишту пласира под називом „Српска бронза“, јер су све компоненте за добијање ове легуре – домаћег порекла [19].

У нашој земљи Српска бронза је нашла најширу примену као материјал за клизне лежајеве, клизне летве, пужне точкове и сл., када се захтевају високе триболошке карактеристике. Она се мање хаба од калајне бронзе и „белог материјала“ за преко 30%, док је хабање осовина мање за читавих 35%. Поред тога, Српска бронза има боље антифракционе особине, тј. мањи коефицијент трења, боље понашање у граничним условима подмазивања, бољу способност улежиштавања страних честица.

На слици 3.19 је наведен производни асортиман ливнице PAP који обухвата поменуте легуре, за различите области индустрије.



Бродарство

- Клизни лежајеви на погонском осовинском воду
- Клизни лежајеви на кормилу брода
- Навртке за дизаличне уређаје
- Клизни лежајеви за пумпне системе и багере



Железница

- Клизни лежајеви за локомотиве
- Навртке за дизаличне уређаје
- Клизни лежајеви за компресоре



Рударство

- Клизни лежајеви за тракасте транспортне системе и дробилице
- Клизни лежајеви за багере и дампере
- Клизни лежајеви за млинове, пумпе, бушилице



Пољопривреда

- Клизни лежајеви за тракторе и радне машине
- Клизни лежајеви за пољопривредне прикључне машине
- Клизни лежајеви за пумпе



Гумарство

- Клизни лежајеви и клизне летве за пресе
- Навртке за пресе
- Алати за гуму



Машине – алатке

- Клизни лежајеви
- Клизне летве
- Вучне навртке
- Пужни точкови



Грађевинарство

- Клизни лежајеви за транспортне сигурносне и грађевинске машине
- Пужни точкови за редукторе
- Матричне плоче

Слика 3.19 Производи ливнице РАР [19]

У садашњим условима огромна предност РАР легура је што у њима нема увозних компонената, као што је калај у бронзи и „белом металу”. РАР производи своје легуре по сопственој, оригиналној технологији, која гарантује врло висок и уједначен квалитет финалних производа.

3.2 Композити са основом од легуре цинка

Израда и карактеризација композита са основом од легура цинка почела је релативно касно у односу на композите са основом од легура алуминијума.

Крајем осамдесетих година прошлог века отпочела су прва истраживања на освајању композитних материјала са основом од легура цинка и то у Енглеској на Aston University, Round Oaks Laboratories. Нешто касније, активности на добијању наведених композита одиграле су се у оквиру Loughborough University of Technology у Енглеској, SAMIM-Centro Ricerche Veneto у Италији, Massachusetts Institute of Technology у САД-у.

Откривено је да на механичке особине композита, поред карактеристика металне основе, највећи утицај имају врста, распоред и удео инфилтрираних честица или влакана ојачивача, као и чврстоћа граничне површине основа - ојачивач. Уношење тврдих керамичких честица или влакана у металну основу доводи до побољшања механичких особина као што су тврдоћа, чврстоћа и модул еластичности. У великом броју случајева овакви композити показали су знатно боље механичке особине на повишеним температурама, у односу на неојачану металну основу.

Показало се да код композита на бази ZA27 додаток честица или влакана од SiC или Al₂O₃ не повећава чврстоћу на собној температури [1, 4, 10]. Међутим, за разлику од чисте легуре, чија чврстоћа и отпорност знатно опадају изнад температуре од 100 °C, легура ојачана са SiC влакнима или честицама задржава затезне особине на повишеним температурама и до 250 °C.

У табелама 3.3 и 3.4 [1, 4, 10] приказани су резултати механичких испитивања композита на бази легуре ZA27 ојачане SiC честицама, за различите концентрације ојачивача. Узорци су добијени компокастинг поступком.

Табела 3.3 Механичке особине ливених композита ZA27 легуре са разним концентрацијама ојачивача – честица SiC [1, 4, 12]

Материјал	Затезна чврстоћа, МПа	Модул еластичности, GPa	Издужење, %	Тврдоћа, НВ
ZA27 - основа	410	73	2	117
ZA27+SiC, 500+10 vol.%	396	92	0	121
ZA27+SiC, 500+20 vol.%	330	110	0	159
ZA27+SiC, 500+50 vol.%	310	220	0	225

Уочава се да са порастом удела честица ојачивача расту вредности тврдоће и модула еластичности. Приказане вредности издужења указују на то да узорци композита не показују пластично понашање. Може се констатовати и пад вредности затезне чврстоће, који је израженији при повећању удела SiC честица у основном материјалу.

Табела 3.4 Механичке особине ливених, па затим ваљаних композита ZA27 легуре са разним концентрацијама ојачивача – честица SiC [1, 4, 12]

Материјал	Затезна чврстоћа, МПа	Модул еластичности, GPa	Издужење, %
ZA27 - основа	410	73	2
ZA27 - ваљано	393	85	16
ZA27+SiC, 500+10 vol.%	396	92	0
ZA27+SiC, 500+20 vol.%	330	110	0

Позитиван утицај додавања тврдих керамичких честица металној основи долази највише до изражаја код отпорности на хабање. Композити са металном осномом имају знатно већу отпорност на хабање у односу на чисту металну основу, посебно на повишеним температурама. Ова особина је омогућила широку примену композита на бази легуре ZA27 код клизних лежајева и других машинских делова код којих су битне триболошке карактеристике. За те намене до сада су претежно коришћене скупље легуре бакра.

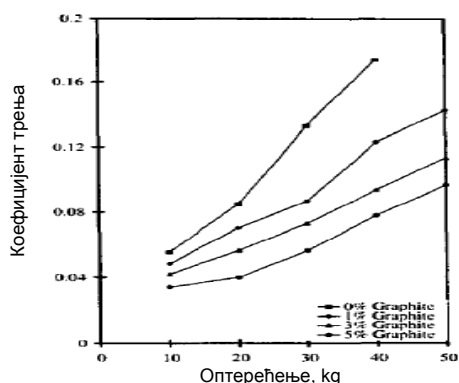
Хабање је комплексан процес на који утиче велики број параметара (микроструктура и тврдоћа основе, величина, облик и запремински удео честица, веза између честице и основе, карактер контактнoг материјала итд.). Зато је и механизам овог процеса још увек предмет опсежних истраживања.

На примеру легуре ZA27, којој су компокастинг поступком додате честице SiC величине 50 μm , показано је да композити са 10, односно 20 vol.% SiC имају знатно већу отпорност на хабање, што је утврђено на основу губитка масе испитиваног узорка и на основу брзине губитка масе. Сличан ефект потврдили су Tjong и Chen [20], користећи шири опсег величина додатих честица SiC и варирајући њихов запремински удео у ширим границама.

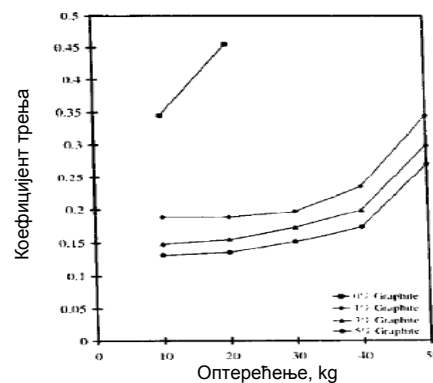
Допринос развоју композитних материјала са осномом од легура цинка дала је и група истраживача из Индије, Sharma, Girish, Seah и др (Department of Mechanical Engineering R.V.College of Engineering, Bangalore India). У истраживањима, као основа коришћена је легура ZA27, као ојачивачи додване су честице SiC, графита, цирконијума, са различитим масеним уделитема и величинама честица. Праћени су коефицијент трења и интензитет хабања уз варирање интензитета нормалног оптерећења, брзине клизања и услова контакта. Sharma, Girish, Seah и др су део истраживања који је био усмерен на утицај честица графита на триболошке и механичке карактеристике композита, изнели у радовима [14, 21 - 24].

Величине честица графита су се кретале од 80 - 120 μm , од 1 до 5% масеног удела а композити су добијени поступком у течном стању (liquid metallurgy technique) [23]. Испитивања су вршена у условима са и без подмазивања, варирано је нормално оптерећење од 10 - 50 N, уз мерење вредности коефицијента трења. Време трајања контакта износило је 120 минута. На основу добијених истраживања испитивања, формиране су графичке зависности приказане на сликама 3.20 до 3.21.

Зависност коефицијента трења од нормалног контактнoг оптерећења у условима граничног подмазивања приказана је на слици 3.20. Уочљиво је да је коефицијент трења добијених композита мањи од основног материјала, легуре ZA27, при свим вредностима нормалног оптерећења. Са порастом масеног удела графита коефицијент трења опада.



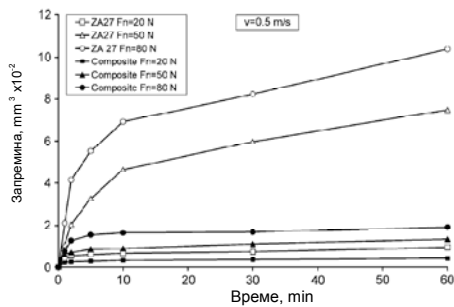
Слика 3.20 Коефицијент трења у зависности од нормалног оптерећења у условима граничног подмазивања [21]



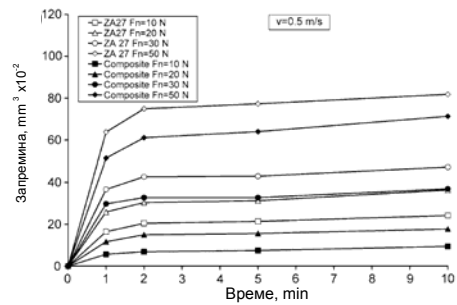
Слика 3.21 Коефицијент трења у зависности од нормалног оптерећења у условима без подмазивања [21]

Слика 3.21 даје зависност коефицијента трења од нормалног контактнoг оптерећења у условима без подмазивања. Коефицијент трења композита мањи је од основног материјала - легуре ZA27. Такође са порастом масеног удела графита коефицијент трења опада.

Триболошке карактеристике домаћих композита са основом од легуре ZA27 ојачане честицама графита утврђивали су Митровић, Бабић и др. и своје резултате представили у оквиру радова [26 - 30] На сликама 3.21 – 3.22 наведен је део истраживања из рада [26]. На слици 3.22 дата је запремина похабаног материјала током времена, при брзини испитивања од 5 m/s за различите нивое нормалног оптерећења (20, 50 и 80N), при испитивањима са подмазивањем. Криве хабања легуре ZA27 и композитних материјала у условима без подмазивања, приказане су на слици 3.23.

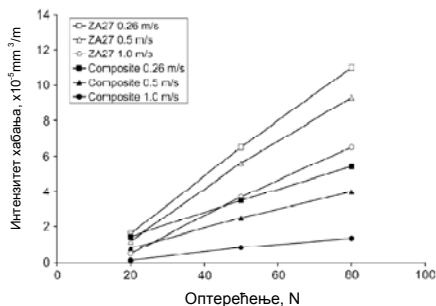


Слика 3.22 Криве хабања у условима са подмазивањем [26]

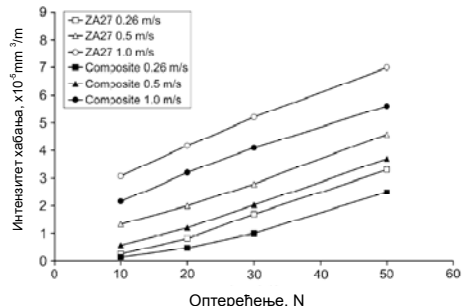


Слика 3.23 Криве хабања у условима без подмазивања [26]

Интензитет хабања композита и основног материјала у функцији нормалног оптерећења у условима са подмазивањем, дат је на слици 3.24, а при испитивањима без подмазивања на слици 3.25.

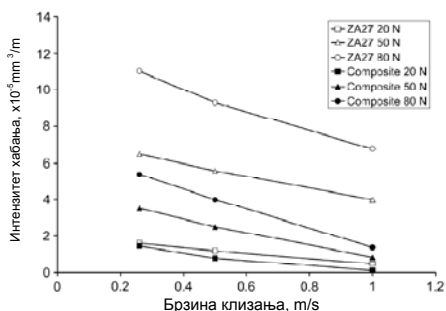


Слика 3.24 Интензитет хабања у зависности од нормалног оптерећења у условима са подмазивањем [26]

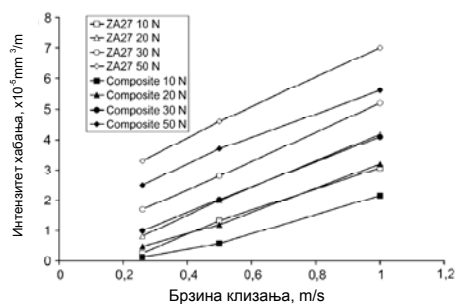


Слика 3.25 Интензитет хабања у зависности од нормалног оптерећења у условима без подмазивања [26]

Утицај брзине клизања на интензитет хабања у условима са и без подмазивања, дат је на сликама 3.26 и 3.27, респективно.

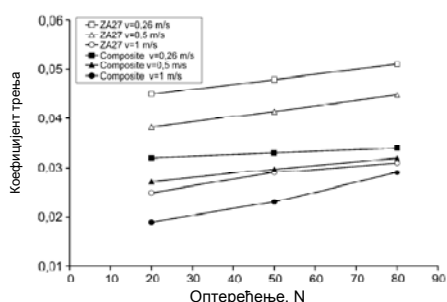


Слика 3.26 Интензитет хабања у зависности од брзине клизања у условима са подмазивањем [26]

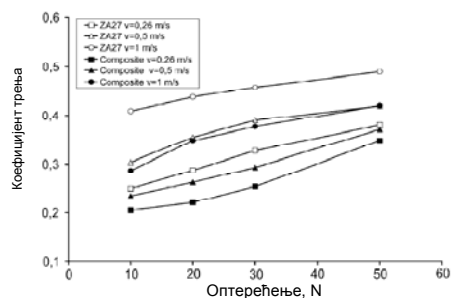


Слика 3.27 Интензитет хабања у зависности од брзине клизања у условима без подмазивања [26]

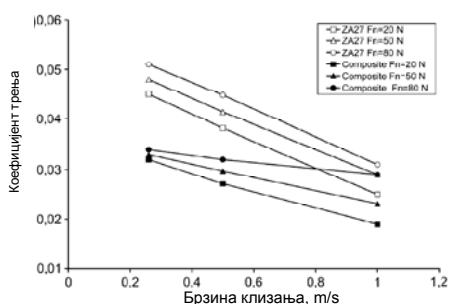
Промена коефицијента трења у функцији нормалног оптерећења, дата је на сликама 3.28 и 3.29 а утицај брзине клизања на вредности коефицијента трења на сликама 3.30 и 3.31.



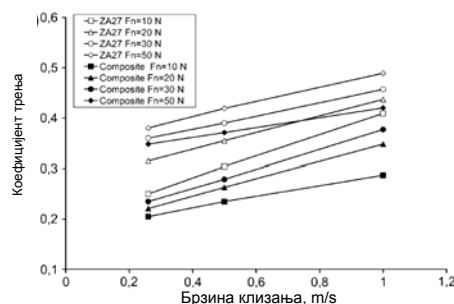
Слика 3.28 Коефицијент трења у зависности од нормалног оптерећења у условима са подмазивањем [26]



Слика 3.29 Коефицијент трења у зависности од нормалног оптерећења у условима без подмазивања [26]

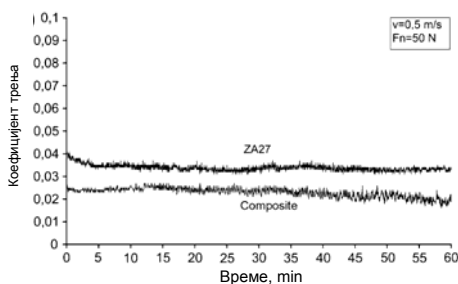


Слика 3.30 Коефицијент трења у зависности од брзине клизања у условима са подмазивањем [26]

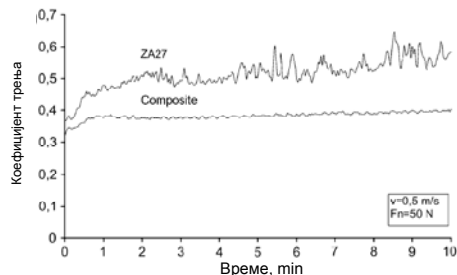


Слика 3.31 Коефицијент трења у зависности од брзине клизања у условима без подмазивања [26]

Графички приказ промене вредности коефицијента трења у функцији времена испитивања, за оба материјала, у условима са подмазивањем дат је на слици 3.32 а у условима без подмазивања на слици 3.33.



Слика 3.32 Коефицијент трења у зависности од времена у условима са подмазивањем [26]

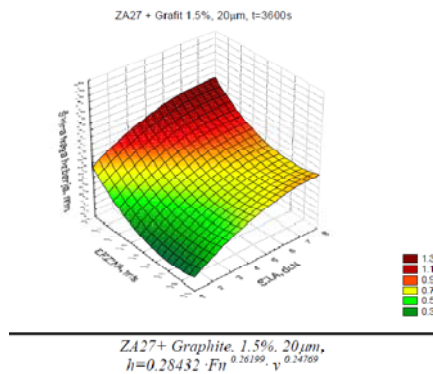


Слика 3.33 Коефицијент трења у зависности од времена у условима без подмазивања [26]

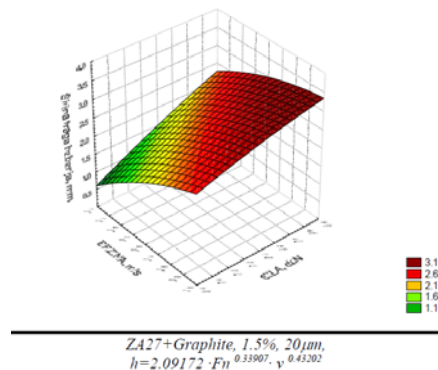
Испитивање ефекта макроскопских честица графита на пригушна својства композита на бази ZA27 вршено је у радовима [31 - 34]. Примећено је да пригушне карактеристике материјала повећавају са порастом температуре и учешћа графитних честица. Извршена је XRD анализа која је јасно приказала присуство Zn, Al и угљеника (у облику графита). Такође, присуство угљеника расте са повећањем процента графита у композиту.

На слици 3.34 је дат графички приказ промене ширине трага хабања композита у зависности од брзине клизања и нормалног оптерећења при испитивањима са подмазивањем. Графички приказ ширине трага хабања у условима без подмазивања приказан је на слици 3.35. У оквиру поменутог рада [27] зависности (ширина трага хабања -

брзина клизања - нормално оптерећење) су апроксимирани експоненцијалним регресионим функцијама.



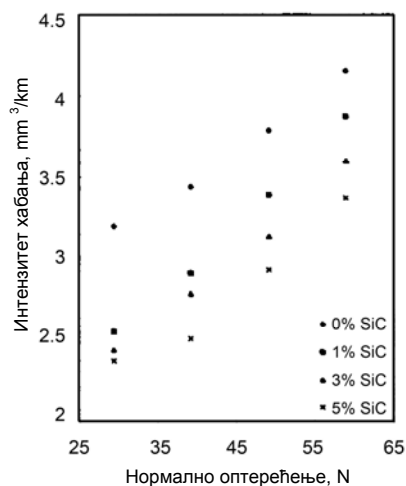
Слика 3.34 Ширина трага хабања као функција брзине клизања и нормалног оптерећења – са подмазивањем [27]



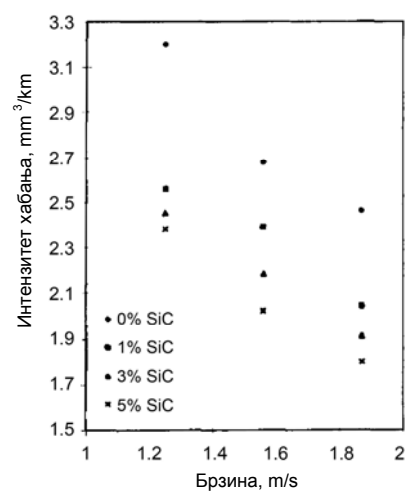
Слика 3.35 Ширина трага хабања као функција брзине клизања и нормалног оптерећења – без подмазивања [27]

Испитивања интензитета хабања композита са основом од ZA27 легура, ојачаним честицама SiC у различитим масеним % у условима без подмазивања, вршена су у раду [35]. Експеримент је извршен на трибометру типа pin-on-disc, коришћене су честице SiC од 1.5 до 5 мас. %, величине 20 - 30 µm. Варирано је нормално контактано оптерећење од 3, 4, 5 и 6 kg (29.4, 39.2, 49.1 и 58.9 N) при броју обртаја од 200, 250 и 300 min⁻¹ (брзина 1.25, 1.56, 1.87 m/s). Под идентичним условима као композит, испитивана је и легура ZA27.

Откривено је да композити имају нижи ниво хабања у односу на основни материјал. Повећањем оптерећења повећава се и ниво хабања, док са повећањем брзине клизања опада. Код композита, са порастом SiC интензитет хабање се смањује, док се тврдоћа узорака повећава. Највећу отпорност на хабање показао је композитни материјал са основом од ZA27 легуре, ојачан честицама SiC са 5 мас.%. Неки од резултата су приказани на сликама 3.36 до 3.37.

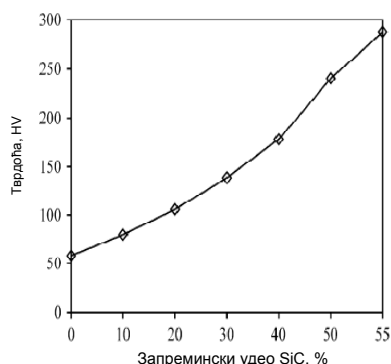


Слика 3.36 Интензитет хабања у зависности од нормалног оптерећења ($v=1.25\text{m/s}$, ZA27+SiC) [35]

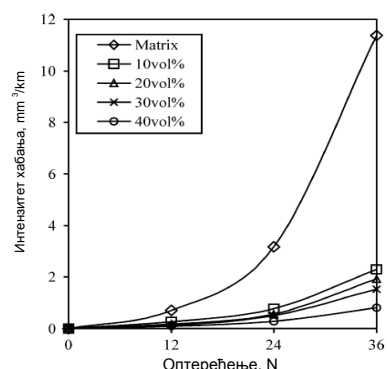


Слика 3.37 Интензитет хабања у зависности од брзине ($F_n=29.4\text{ N}$, ZA27+SiC) [35]

У радовима [36, 37] описана је израда и испитивање Zn-Al-SiC композита. Анализирана је затезна чврстоћа, тврдоћа, отпорност на хабање. Уочено је да мала количина SiC честица довољна да изазове прилично велику промену механичких својстава посматраног материјала али и да резултати зависе од одливка и локације са које су узорци узети. На слици 3.38 приказана је зависност тврдоће композита од удела честица SiC, док је интензитет хабања у зависности од нормалног оптерећења дат на слици 3.39.



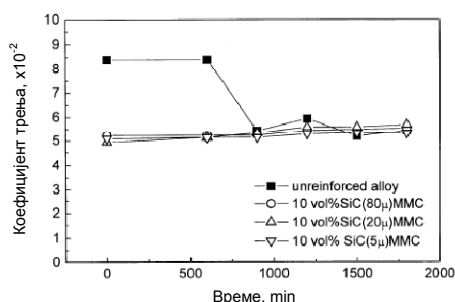
Слика 3.38 Зависност тврдоће композита од удела честица SiC [37]



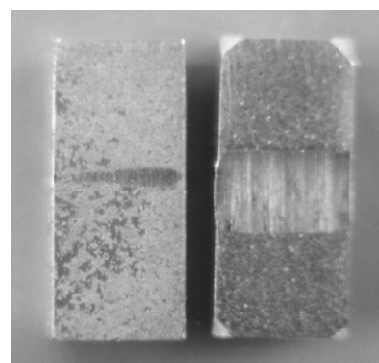
Слика 3.39 Интензитет хабања у зависности од нормалног оптерећења [37]

Добијени резултати су поткрепљени коментарима о микроструктури на основу скенирања електронским микроскопом. Микроструктурна анализа основне легуре и композита спроведена је помоћу оптичке и електронске микроскопије.

Запажања о хабању легура на бази цинк алуминијума ојачане са SiC честицама у условима са или без подмазивања описана су у радовима [38 - 46]. Вредности коефицијента трења добијени кроз истраживања [38] дата су на слици 3.40. На слици 3.41 дат је упоредни траг хабања композита који садржи честице силицијум карбида и основног материјала, легуре ZA27, добијени у оквиру истраживања [46].



Слика 3.40 Зависност коефицијента трења од брзине клизања [38]

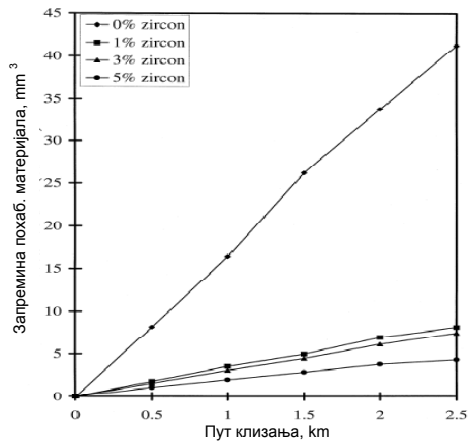


Слика 3.41 Узорци: композит и легура ZA27 [46]

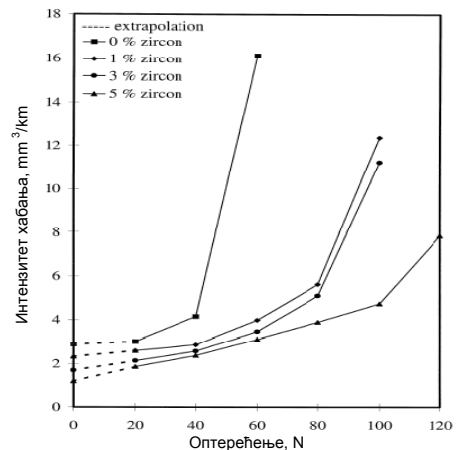
Корелацију између особина, структуре и триболошког понашања легура на бази цинк алуминијума и MMC композита истраживали су Ares, Gueijman, Schvezov [32, 87, 169]

Микроструктуру композита ојачаних силицијум карбидом, у зависности од начина и параметара производње проучавали су Zhu Y. H., Lee W. B са сарадницима (Политехнички универзитет из Хонг Конга) у радовима [48 - 50], као и Seah и Sharma у раду [42].

У радовима [50, 51] саопштени су резултати испитивања интензитета хабања композита са основом од легуре ZA27 где су као ојачивач коришћене честице цирконијума величине 30-50 μm, са садржајем од 1 ÷ 5 мас.%. Испитивања су вршена на трибометру типа pin-on-disc, без подмазивања, варирано је нормално оптерећење од 20 ÷ 120 N, при брзини клизања од 1.86 m/s, и путу клизања 0.5 ÷ 2.5 km. На слици 3.42 приказана је зависност интензитета хабања од пута клизања за композит, при нормалном оптерећењу од 60 N. Уочено је да са порастом мас.% честица цирконијума долази до смањења интензитета хабања композита. Слика 3.43 даје графичку зависност интензитета хабања композитних материјала од нормалног оптерећења при брзини клизања од 1.86 m/s. При свим испитивањима интензитет хабања композитних материјала је био нижи у односу на легуру SA27 која је коришћена као основа. Експериментални запажања објашњена су применом SEM микроскопије помоћу које је анализирана и микроструктура похабаних површина.

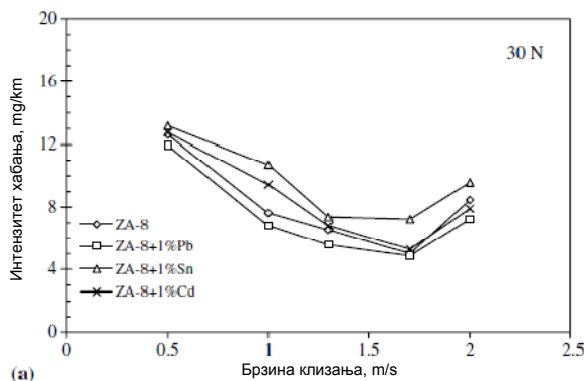


Слика 3.42 Интензитет хабања у зависности од пута клизања (ZA27+цирconiјум) [50]

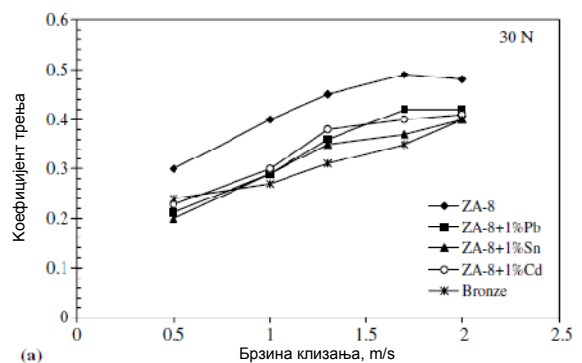


Слика 3.43 Интензитет хабања у зависности од нормалног оптерећења (ZA27+цирconiјум) [50]

Упоредивање својстава стандардне ZA8, модификоване ZA8 легуре са 1% Pb, 1% Sn и 1% Cd и конвенционалне CAE 660 бронзе описано је у раду [52]. Услови испитивања: оптерећење (30 ÷ 45N), брзина клизања (0.5 ÷ 2m/s), без подмазивања, pin-on-disc. Металографска студије је показала да додавање Pb, Sn и Cd изазива измену микроструктуре ZA8 легуре. Да би се испитале фазе у микроструктури модификованих легура, спроведена је ЕДС анализа. Уочено је да је настали алуминијум оксид тешко једињења и делује као фаза оптерећења лежишта, док је цинк оксид једињење које делује као мазиво. Интензитет хабања у зависности од брзине клизања дат је на слици 3.44. Коefицијент трења у функцији брзине клизања, приказан је на слици 3.45.

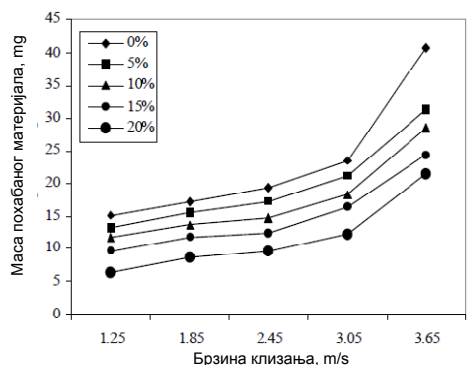


Слика 3.44 Интензитет хабања у зависности од брзине клизања [52]

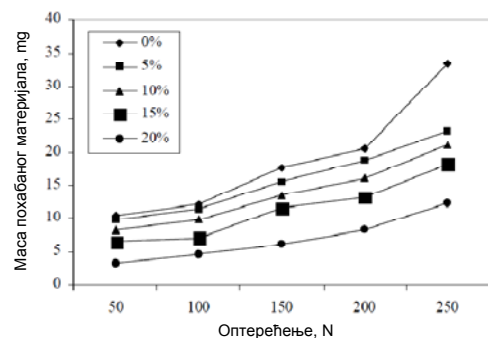


Слика 3.45 Коefицијент трења у зависности од брзине клизања [52]

Утицај брзине клизања на масу похабаног материјала је дат на слици 3.46 а одговарајући утицај нормалног оптерећења на слици 3.47.

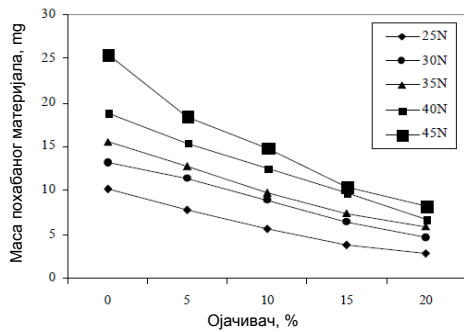


Слика 3.46 Утицај брзине клизања на масу похабаног материјала [53]

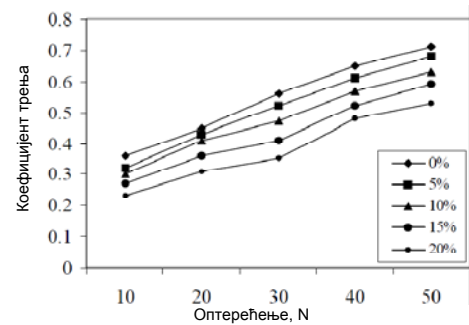


Слика 3.47 Утицај нормалног оптерећења на масу похабаног материјала [53]

Утицај учешћа честица ојачивача на масу похабаног материјала је приказан на слици 3.48. Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења, приказан је на слици 3.45.



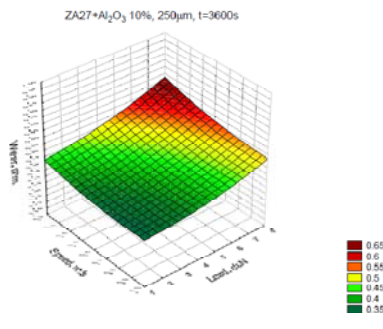
Слика 3.48 Утицај учешћа честица ојачивача на масу похабаног материјала при $v=2.5 \text{ m/s}$ [53]



Слика 3.49 Утицај нормалног оптерећења коефицијент трења [53]

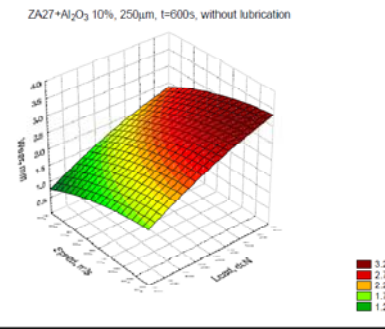
Понашање хибридних композита на бази легуре цинка и алуминијума ојачаних честицама Al_2O_3 наведено је у радовима [54, - 62].

Аутори Бабић, Митровић, Бобић са сарадницима, су проучавали триболошко понашање композита на бази легуре SA27, ојачаних честицама Al_2O_3 и своја искуства изнели у радовима [54 - 60]. Зависност ширина трага хабања од брзине клизања и нормалног оптерећења у облику просторних мапа приказана је на сликама: 3.50 (испитивање са са подмазивањем) и 3.51 (испитивање без подмазивања).



$$h = 0.46624 \cdot F_n^{0.05814} \cdot v^{0.18297}$$

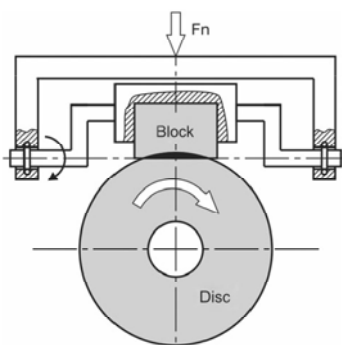
Слика 3.50 Ширина трага хабања као функција брзине клизања и нормалног оптерећења – са подмазивањем [54]



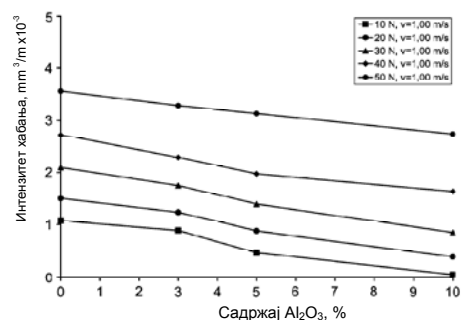
$$h = 1.51834 \cdot F_n^{0.5019} \cdot v^{0.2623}$$

Слика 3.51 Ширина трага хабања као функција брзине клизања и нормалног оптерећења – без подмазивања [54]

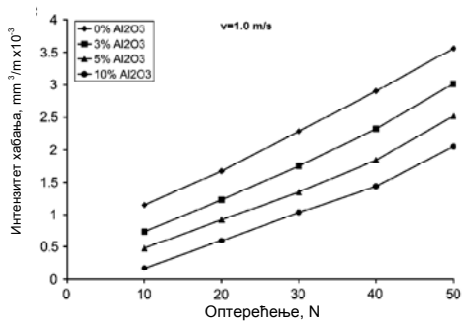
Испитивања су вршена на трибметру типа block on disc, а шема геометрије контактне пара је дата на слици 3.52. Интензитет хабања у зависности од % Al_2O_3 је дат на слици 3.52 а у зависности од нормалног оптерећења, односно брзине клизања на сликама 3.53 и 3.54, респективно.



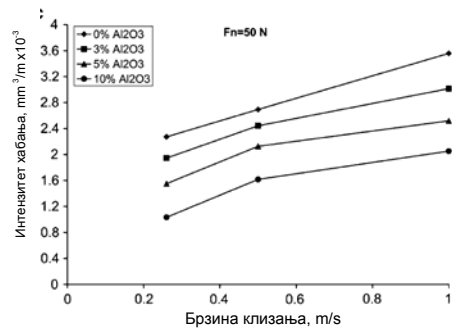
Слика 3.52 Шема геометрије контактне пара [56]



Слика 3.53 Интензитет хабања у зависности од % Al_2O_3 [56]

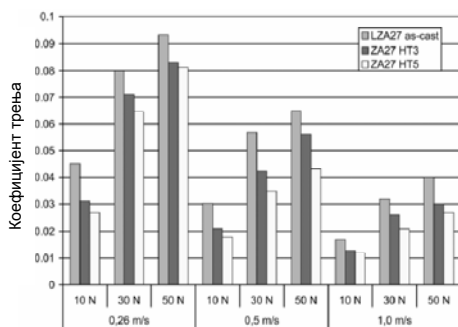


Слика 3.54 Зависност интензитета хабања од нормалног оптерећења [56]

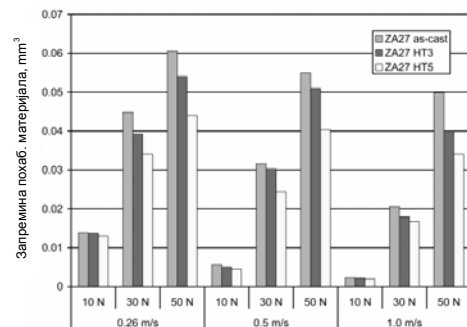


Слика 3.55 Зависност интензитета хабања од брзине клизања [56]

Побољшање триболошког потенцијала легура на бази ZnAl описано је у раду [61]. Коефицијент трења тестираних узорака дате је на слици 3.56 а запремина похабаног материјала тестираних узорака на слици 3.57.

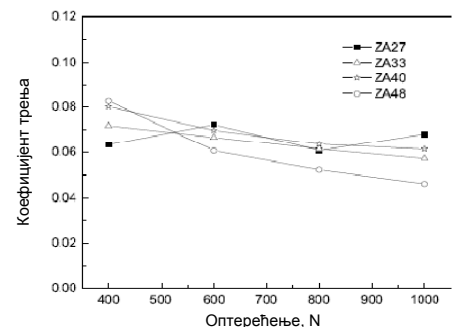
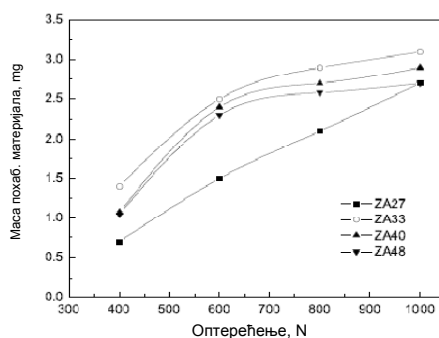


Слика 3.56 Коефицијент трења тестираних узорака [61]



Слика 3.57 Запремина похабаног материјала тестираних узорака [61]

Утицај садржаја алуминијума на триболошко понашање композита разматран је у раду [62]. Маса похабаног материјала и коефицијенти трења легура на бази ZnAl, у зависности од нормалног оптерећења дати су на слици 3.58.

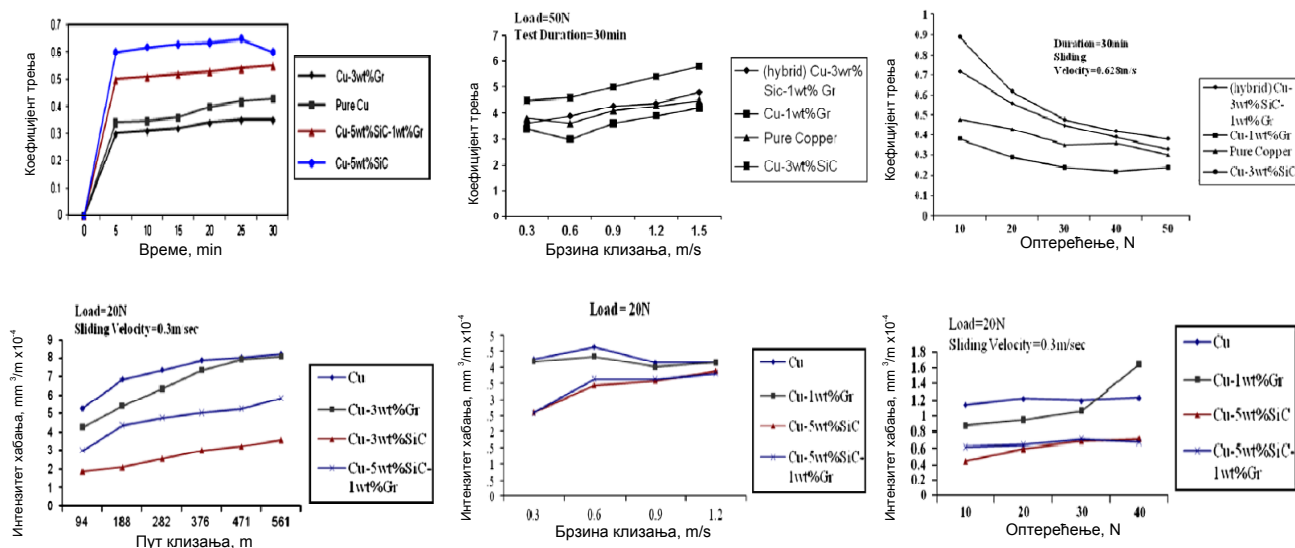


Слика 3.58 Утицај садржаја алуминијума на триболошко понашање композита [62]

Понашање хибридних композита цинк-алуминијум-SiC-графит, описано је у раду [63]. Испитивање је извршено на трибометру типа pin-on-disc, уз варирање оптерећења (10 ÷ 50N) и брзине клизања (0.3 ÷ 1.5m/s). Примећено је да се додавањем графита незнатно снижила тврдоћа хибридног композита у односу на Zn-Al-SiC композит али да је она и даље виша у односу на Zn-Al и Zn-Al-графит композите. Истакнута је улога графита као средства које може да побољша обрадивост материјала и повећа топлотну и електричну проводљивост. Хибридни композит поседује вредности тврдоће и коефицијента

трења које се налазе између одговарајућих вредности код Zn-Al-SiC и Zn-Al-графит композита, али зато имају одличну отпорност на хабање у поређењу са монолитним композитима.

Развој и перформансе ливених бакар-SiC-Gr хибридних композита показани су у раду [64]. Резултати истраживања су приказани на слици 3.59.



Слика 3.59 Резултати истраживања [64]

Истраживањем триболошког потенцијала хибридних композита на бази легура цинка и алуминијума, ојачаних SiC и графитним честицама балили су се Митровић и Бабић са сарадницима у радовима [65 - 69]

У нашој земљи, средином деведесетих година прошлог века, у Лабораторији за материјале института у Винчи, започела су експериментална истраживања композитних материјала. Као основа коришћена је легура ZnAl₂₅Cu₃, а као ојачивачи Al₂O₃ и SiC. Све активност биле су усмерене ка томе да се побољшају механичке особине легура цинка на повишеним температурама и њихова отпорност према хабању. Истраживања композитних материјала у оквиру радова [70 - 81] објавили су Бобић и сарадници.

Анализу микроструктуре похабаних материјала при различитим параметрима испитивања (брзина клизања и нормално оптерећење) истраживачи су дали у [82 - 94]. Испитивања легура на бази ZnAl у условима без подмазивања наведена су у [95 - 102]. Интензитет хабања у зависности од различитих ојачивача истраживан је у [111 - 127]. Примена методе коначних елемената при анализи понашања композита наведена је у [129], а утицај производног процеса на триболошка понашања композита у [130 - 140].

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА ТРИБОЛОШКИХ КАРАКТЕРИСТИКА ХИБРИДНИХ КОМПОЗИТА

У овом поглављу детаљно су представљени: начин добијања хибридних композита на бази легуре ZA27 предмет и циљ испитивања, методологија испитивања и услови извођења експеримента.

4.1 Добијање хибридних композита на бази легуре ZA27

Честични ZA27/SiC композити, као и хибридни (двојни) композити ZA27/SiC, уз додатак графита добијени су у Лабораторији за материјале у оквиру Института за нуклеарне науке „Винча“.

При томе су добијени следећи композити:

- композити са основом од легуре ZA27 уз додатак 5 и 10 vol.% SiC,
- композити са основом од легуре ZA27 уз додатак 5 и 10 vol.% SiC, уз додатак 1, 3 и 5 vol.% графита.

При изради наведених композита коришћени су следећи материјали:

1. ZA27 легура, добијена од домаћег произвођача ZA легура (ливница PAP[®] д.о.о., Батајница). Хемијски састав добијене легуре дат је у Табели 4.1.

Табела 4.1 Хемијски састав легуре ZA27

Елемент	Al	Cu	Mg	Fe	Sn	Cd	Pb	Zn
(мас.%)	26.3	2.54	0.018	0.062	0.002	0.005	0.004	остатак

На основу вредности масених удела хемијских елемената, може се закључити да хемијски састав легуре ZA27 примењене у експериментима у оквиру ове дисертације, одговара хемијском саставу легуре ZA27, наведеном у стандарду.

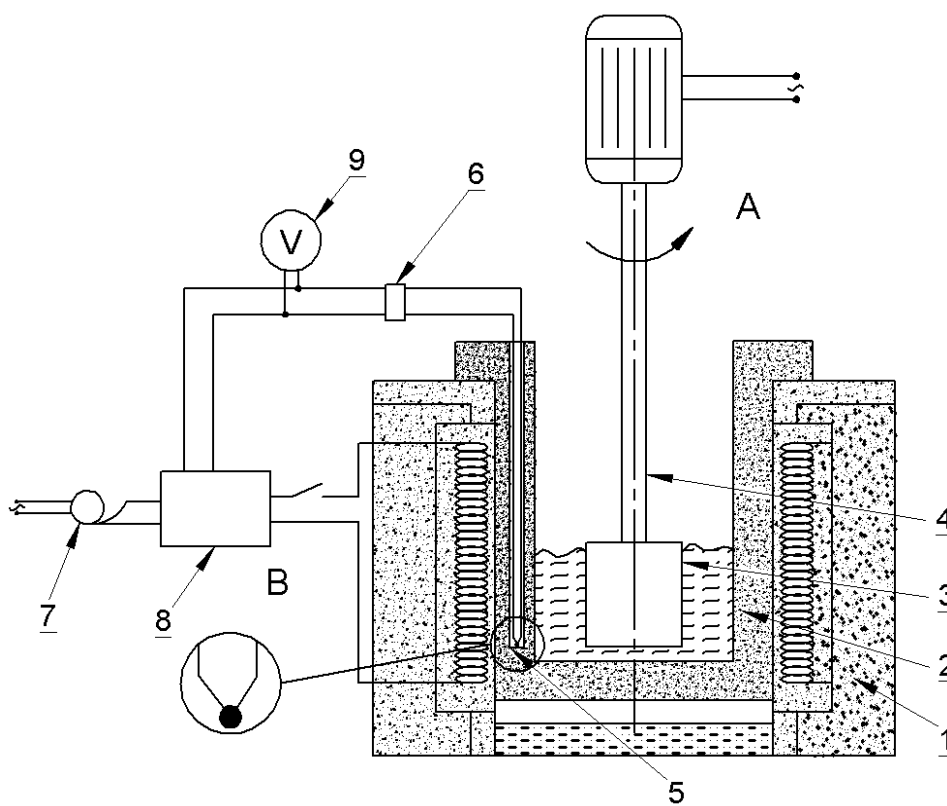
2. SiC просечне величине 26 μm , добијен је од произвођача абразивних производа (Гинић Тоцила[®] д.о.о., Барајево). Реч је о једној од фракција SiC која се користи за израду тоцила.
3. Графит, просечне величине 15 μm , добијен је од домаћег произвођача ZA легура (ливница PAP[®] д.о.о., Батајница).

4.1.1 Опрема за добијање хибридних композита

Сви композити испитивани током планираних експерименталних истраживања у оквиру ове дисертације, добијени су компокастинг поступком. У најопштијем, компокастинг поступак подразумева инфилтрацију честица секундарних фаза у металну основу која је у полуочврслор стању (на некој од температура између солидуса и ликвидуса). Детаљнији опис самог компокастинг поступка дат је у оквиру другог поглавља ове дисертације.

За добијање композитних материјала коришћена је опрема приказана на слици 4.1. Опрема се састоји из три дела:

- (А) процесни део,
- (Б) део за мерење, контролу и регулацију температуре,
- (Ц) део за мерење и контролу електричних параметара рада мешача.



Слика 4.1 Шематски приказ апаратуре за топљење легуре ZA27 и израду композита [1, 4, 10]

- А - процесни део, Б - део за контролу и регулацију температуре.
1 - електроотпорна пећ, 2 - лонац од алумине, 3 - активни део мешача, 4 - вратило,
5 - термопар, 6 - хладан спој термопара, 7 - аутотрансформатор,
8 - регулатор температуре, 9 - контролни мерач напона

Процесни део апаратуре (А) састоји се из лабораторијске електроотпорне пећи (снаге 2,5 kW) и мешача. Грејно тело је жица од кантала уграђена у одговарајуће елементе од шамота. У радни простор пећи цилиндричног облика смештен је лонац за топљење. Лонац је од алумине висине 150 mm, спољашњег пречника 90 mm и унутрашњег пречника 75 mm.

Примењени компокастинг поступак садржао је две фазе. У првој фази извршена је инфилтрација честица секундарних фаза у полуочврсли растоп основне легуре, уз

механичко мешање. Добијени одливци композита су затим подвргнути топлом пресовању (друга фаза), да би се смањила порозност и побољшала чврстоћа везе између матрице и ојачивача, односно да би се побољшала механичка својства композита.

Првом фазом компокастинг поступка обухваћене су следеће активности:

- Мерење, чишћење и одмашћивање шаржи основне ZA27 легуре.
- Припрема честица (секундарних фаза): мерење, сушење у сушници (на 200°C, један час) да би се уклонила влага и смањило термални шок за време инфилтрације. У случају хибридних композита у свим комбинацијама односа SiC-графит, честице SiC-графит мешане су у посебном суду, и тако инфилтриране (као смеша). Честице нису биле претходно хемијски третиране.
- Топљење и припрема растопа основне легуре (чишћење од шљаке и темперирање).
- Реолошка припрема растопа, тј. његово мешање (5 минута) при брзини обртаја мешача од 500 min⁻¹, на температури од 465°C, да би се трансформисала дендритна структура у недендритну и хомогенизовао растоп.
- Инфилтрација честица, према количини честица (табела 4.2).
- Мешање инфилтрираних честица са почетном температуром од 465°C. Лагано подизање температуре до 470°C (за композите са 5 vol.% SiC), односно до 475°C за композите са 10 vol.% SiC, за време од 2,5 минута уз брзину мешања од 500 min⁻¹ (ради хомогенизације система).
- Изливање композитне масе са 460°C у предгрејану челичну кокилу (450°C).

Током инфилтрација честица у полуочврсли растоп, температура је постепено повећавана како би се спречило згушњавање полуочврслог растопа услед додатих честица ојачивача. Инфилтрација је извршена континуирано, уз мешање, у циљу постизања што повољније расподеле честица у металној основи.

У описаном компокастинг поступку остварен је режим струјања честица ојачивача од зида посуде за топљење ка унутрашњости масе растопа. Избегнуто је стварање груписаних накупина SiC честица, што је раније било запажено при спором мешању (450 min⁻¹).

По завршетку предвиђеног времена мешања композитне масе дошло је до тренутног повећања вискозитета полуочврслог растопа композитне масе и заробљавања честица ојачивача у том растопу, при чему је расподела честица унутар основне легуре остала иста каква је била у тренутку непосредно пре прекида мешања. Хлађење полуочврслог растопа композитне масе вршено је са пећи (брзином од 5°C/min) до температуре од 460°C, када је извршено изливање у челичну кокилу, претходно предгрејану на 450°C. На тај начин, добијени су одливци композита у облику призме (20 mm x 30 mm x 120 mm).

Температура инфилтрације и време инфилтрације ојачавајућих честица, у току компокастинг поступка, зависе од запреминског удела честица у композиту. Ови подаци, као и подаци о укупном времену трајања компокастинг поступка, за сваки добијени композитни материјал, дати су у табели 4.2.

Табела 4.2 Вредности процесних параметара компокастинг поступка

Процесни параметри	Удели честица	
	5 vol.%	10 vol.%
T _r , °C	470	475
t _{inf} , min	5	7
t _{uk} , min	17.5	19.5

Процесни параметри су:

T_r , °C - радна температура мешања после инфилтрације,

$T_{inf, min}$ - време инфилтрације,

$T_{uk, min}$ - укупно време трајања компокастинг поступка.

У табели 4.2, наведени су удели честица ојачивача (SiC). Пошто је графит мешан пре инфилтрације са честицама силицијум карбида, уписано време инфилтрације везано је за овај ојачивач, тј. било је независно од удела графита.

Током извођења компокастинг поступка узимани су делови полуочврслих композитних маса и каљени у води („брзе пробе“), да би се испитала расподела честица ојачивача у основи, односно да би се одредило укупно време мешања композитне масе.

У другој фази компокастинг поступка извршено је топло пресовање добијених композитних материјала. Призматични одливци, који су добијени у првој фази поступка, машински су исечени на узорке димензија 20 mm x 30 mm x 5.5 mm, који су подвргнути топлом пресовању. Притисак пресовања за сваки композит одређен је у прелиминарним експериментима и зависи од удела инфилтрираних честица, као што је приказано у табели 4.3. Успешност пресовања оцењена је на основу испитивања порозности одливака (применом оптичке микроскопије). Сва пресовања извршена су у температурном интервалу β фазе (од 350°C до 370°C).

Табела 4.3 Притисак топлог пресовања одливака честичних композита

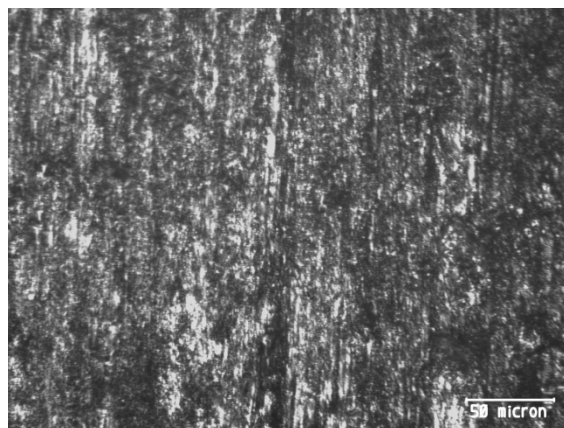
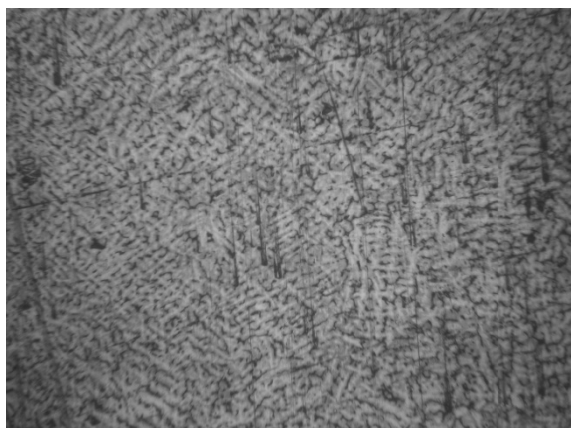
Удео SiC честица (vol.%)	5	10
P, МПа	250	300

После топлог пресовања композитних материјала, добијени су узорци димензија 17 ÷ 19 mm x 30 mm x 6 mm. Табела 4.3 направљена је према уделу честица SiC у композиту и односи се на све уделе графита код хибридних композита.

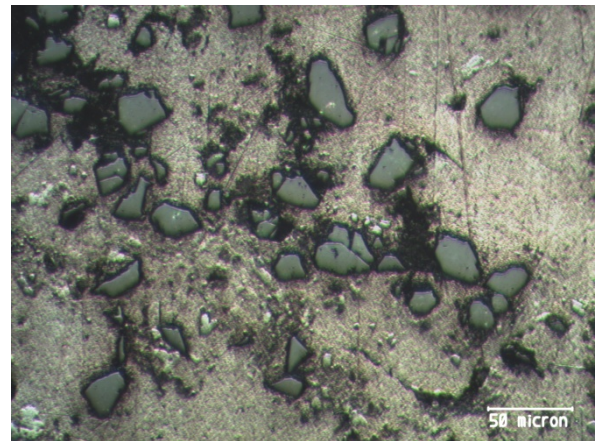
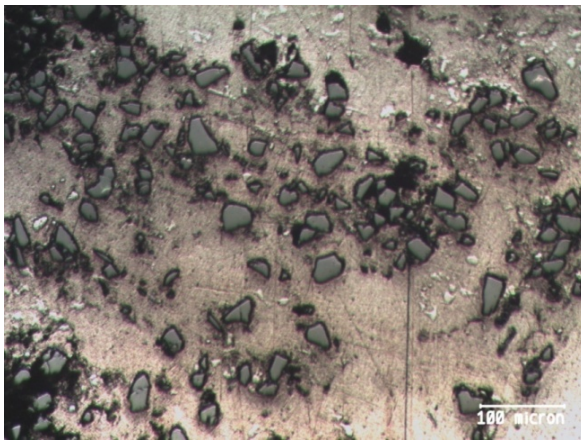
4.1.2 Структура добијених узорка

Микроструктуре легуре ZA27 и добијених композитних материјала посматране су на металуршком микроскопу (уз увећање 200 пута) и приказане на сликама 4.2 до 4.10.

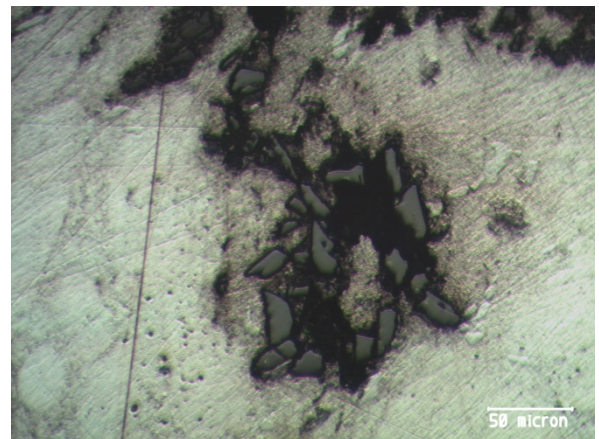
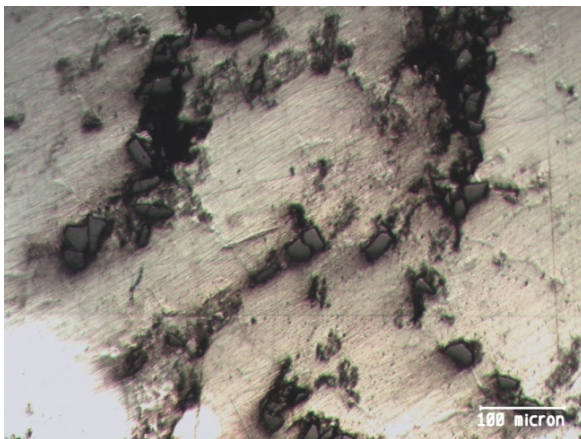
Структура узорка легуре ZA27 је типично дендритна. Уочава се уситњеност дендритних грана као последица знатног термалног хлађења током процеса ливења. Истовремено видљива је изразита равномерност структуре, што указује на повољан однос механичких особина.



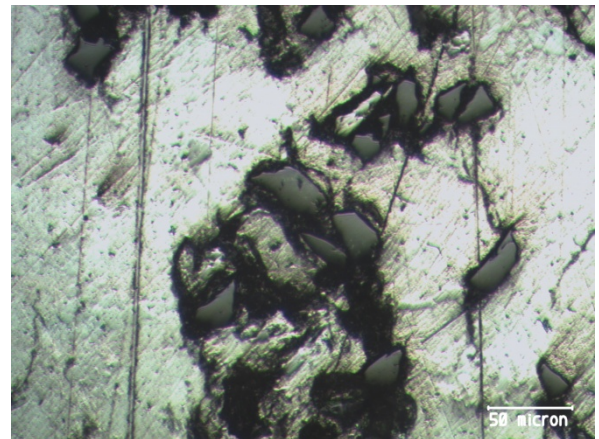
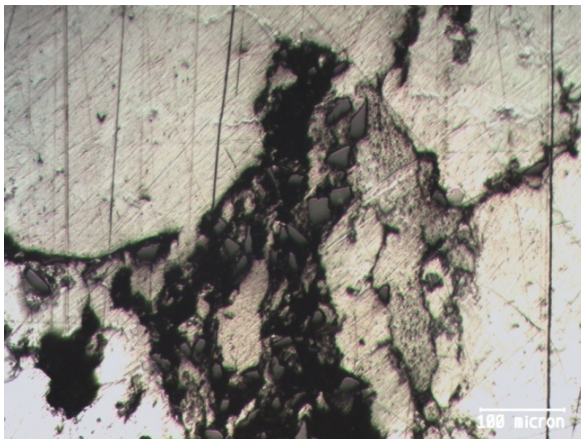
Слика 4.2 Микроструктура ZA27 легуре, (увећање x100 и x400)



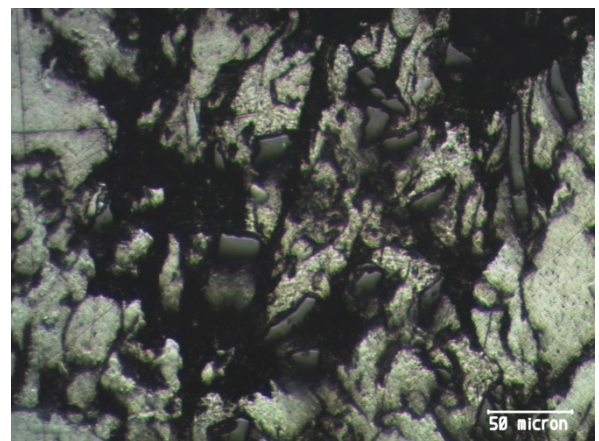
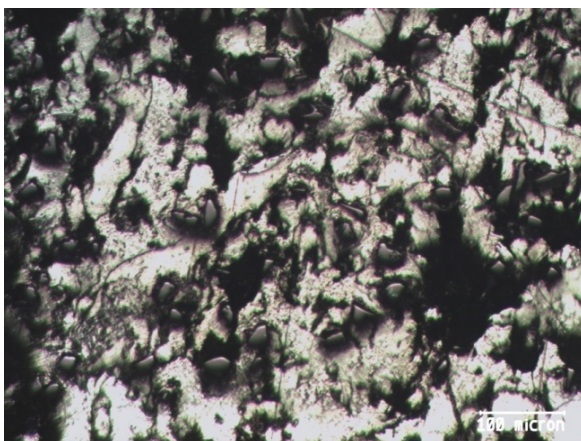
Слика 4.3 Микроструктура композита ZA27 + 5% SiC, (увећање x200 и x400)



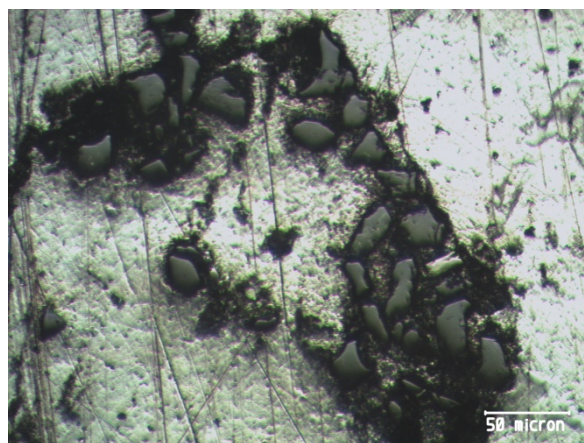
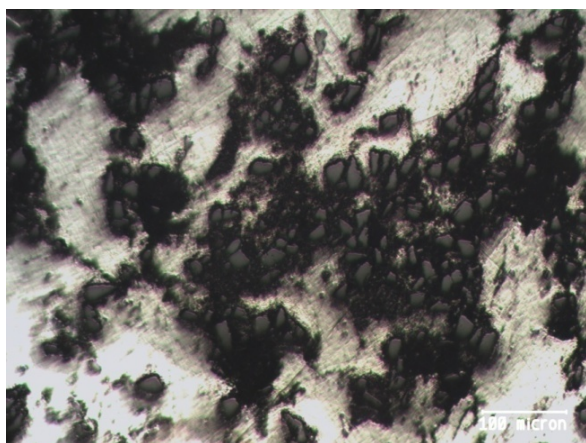
Слика 4.4 Микроструктура композита ZA27 + 5% SiC + 1% Gr, (увећање x200 и x400)



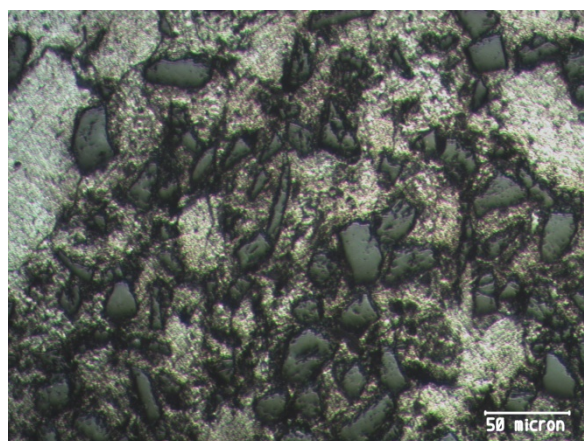
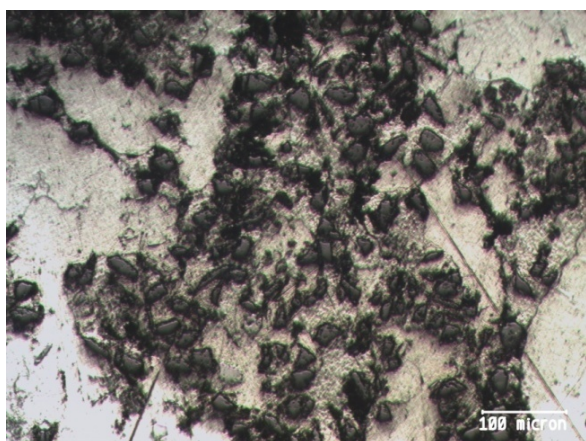
Слика 4.5 Микроструктура композита ZA27 + 5% SiC + 3% Gr, (увећање x200 и x400)



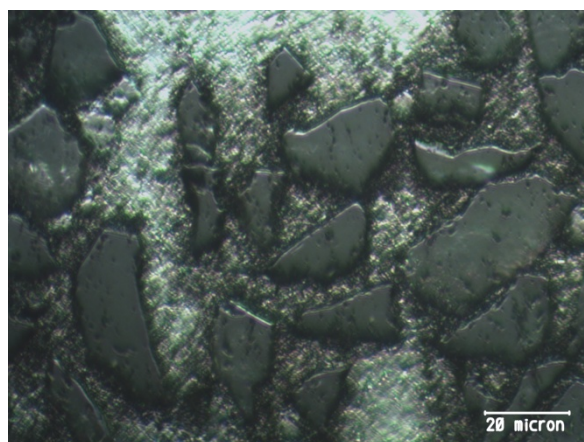
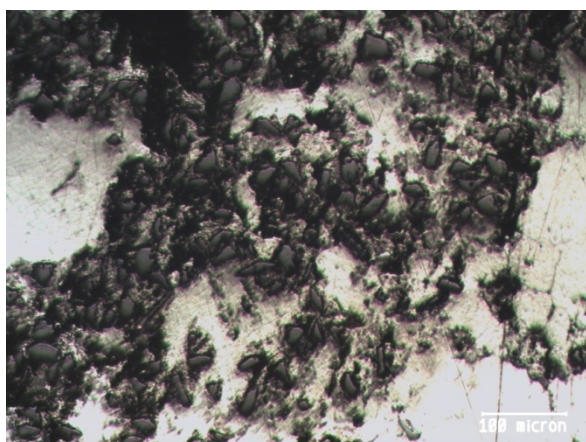
Слика 4.6 Микроструктура композита ZA27 + 5% SiC + 5% Gr, (увећање x200 и x400)



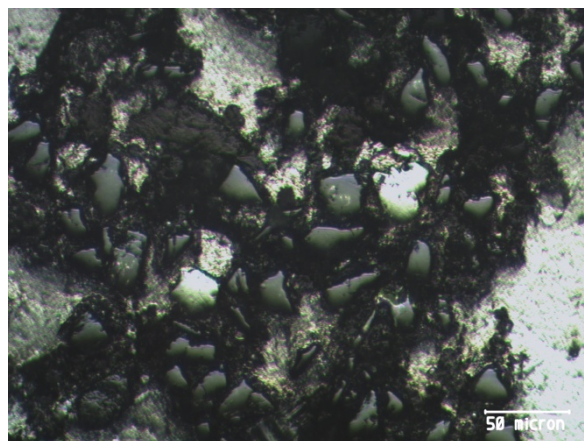
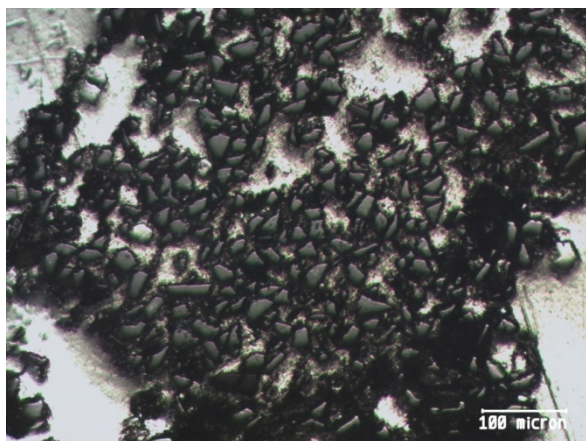
Слика 4.7 Микроструктура композита ZA27 + 10% SiC, (увећање x200 и x400)



Слика 4.8 Микроструктура композита ZA27 + 10% SiC + 1% Gr, (увећање x200 и x400)



Слика 4.9 Микроструктура композита ZA27 + 10% SiC + 3% Gr, (увећање x200 и x1000)



Слика 4.10 Микроструктура композита ZA27 + 10% SiC + 5% Gr, увећање x200

Код композитних материјала уочена је прилично добра расподела честица SiC и графита. На приказаним сликама се примећује да су честице и накупине честица SiC јасне и доста оштре геометрије за разлику од честица графита. Код хибридних композита који садрже честице графита уочавају се „острвца“ неправилног облика највероватније настала као последица уситњавања меканог графита услед сударања током компокастинг поступка.

У табели 4.4 приказане су тврдоће испитиваних композитних материјала и легуре ZA27. Приказане вредности тврдоћа су просечне вредности и добијене су као средње вредности извршених мерења (на три места). Уочено је да је расипање вредности тврдоћа веће код хибридних композита.

Табела 4.4 Параметри хrapавости легуре ZA27 и испитиваних композита

		Тврдоћа, HV	
		124	
Композити			
Основа	Ојачивач	Запремински удео, %	Тврдоћа, HV
ZA27	5% SiC	-	107
		1% Gr	132
		3% Gr	145
		5% Gr	153
	10% SiC	-	125
		1% Gr	127
		3% Gr	114
		5% Gr	132

У случају композита ојачаних само честицама SiC (без графита) изражена је добра репродуктивност вредности тврдоћа. Саме вредности су у очекиваном распону. Може се видети да у случају композита ојачаних силицијум карбидом, са повећањем запреминског удела ојачивача са 5 на 10 vol.%, расту тврдоће, што указује на добар распоред ојачивача (при истим осталим процесним условима).

4.2 Предмет и циљ испитивања

Експериментална истраживања обављена су у лабораторијским условима у Лабораторији за трибологију Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу [103].

Програм експерименталних истраживања приказан у оквиру ове дисертације обухватао је утврђивање триболошких карактеристика хибридних композита на бази ZnAl легуре и њихово поређење са карактеристикама легуре ZA27.

Циљ ове докторске дисертације је да се применом савремених научних метода дефинише природа триболошког понашања хибридних композита на бази легуре ZA27.

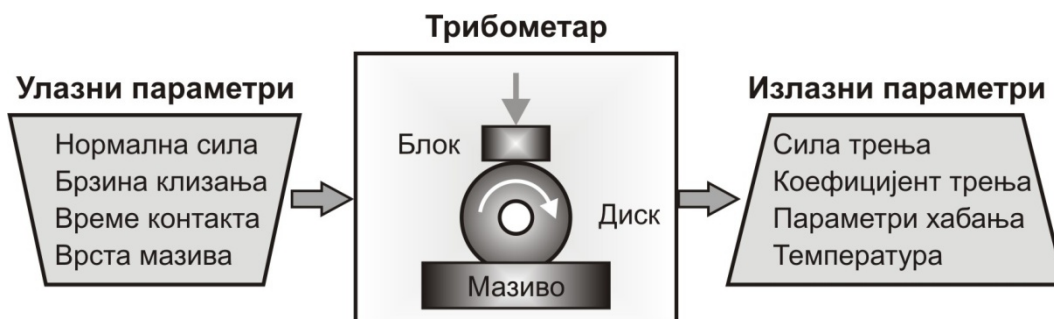
4.3 Методологија испитивања

Методологија испитивања триболошких карактеристика хибридних композита одговара захтевима ASTM G 77 стандарда. Примењена методологија је усклађена са непосредним циљевима испитивања, примењеном мерном инсталацијом и расположивом мерном опремом.

4.3.1 Мерне величине и начин њиховог мерења

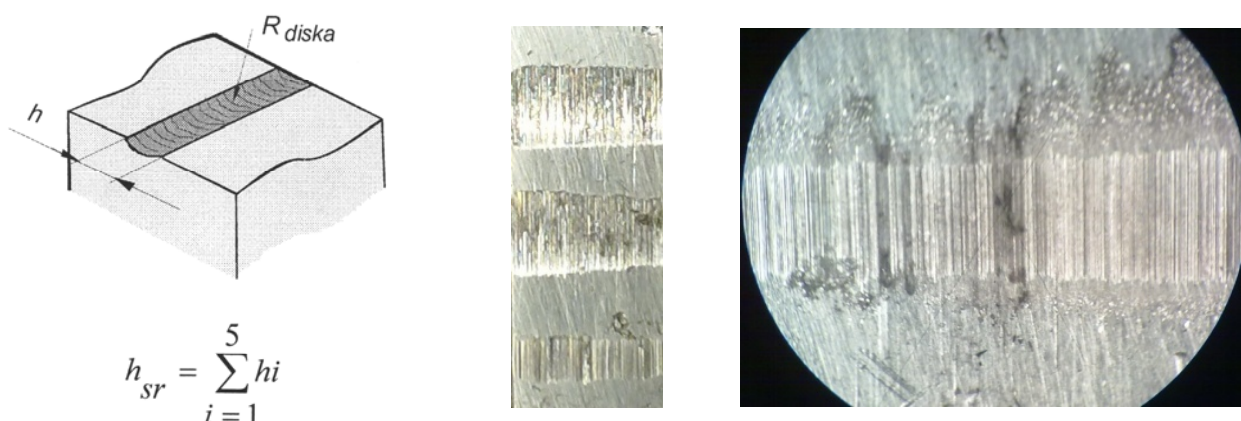
У складу са предметом испитивања, мерени су:

- ширина трага хабања на контактним површинама блока,
- сила трења,
- основни параметри хрпавости



Слика 4.11 Трибомеханички систем са улазним и излазним параметрима

Као основни параметар хабања усвојена је ширина трага хабања на контактної површини блока, према слици 4.12.



Слика 4.12 Ширина трага хабања на блоку

Мерење је вршено на пет места, па је израчунавана средња аритметичка вредност ширине трага хабања, која је узимана као меродавна за даља поређења трагова хабања. Мерење ширине трага хабања на контактним површинама блока остварено је на универзалном мерном микроскопу UIM-21, слика 4.13. Принцип мерења се састојао у томе да се на радну плочу микроскопа постави блок испитиваног материјала. Помоћу механизма за фокусирање у окулару је формирана јасна слика посматране површине хабања. Подешавања основне, допунске и кружне скале изводила су се одговарајућим механизмом за кретање скале уређаја. Ширина појаса хабања добијала се као разлика две

узастопно очитане вредности положаја кончанице, најпре оне која тангира ивицу трага (прва вредност) а затим, померањем одговарајућег клизача, оне уз границу појаса хабања (друга вредност). [104].

Мерење је такође вршено и на компјутерски подржаном Мејји Techno's MT8500 металуршком микроскопу, са могућношћу увећања $50 \div 1000$ пута уз CCD color TV камеру (слика 4.14).



Слика 4.13 Универзални мерни микроскоп UIM-21



Слика 4.14 Микроскоп Мејји Techno's MT8500 [105]

Микрогеометрија контактних површина испитиваних композитних материјала представљена је преко основних параметара храпавости:

- R_{max} - максимална висина неравнина на референтној дужини оцењивања,
- R_z - средња висина неравнина на дужини оцењивања,
- R_a - средње аритметичко одступање профила од средње линије профила на дужини оцењивања.

Табела 4.5 Параметри храпавости легуре ZA27 и испитиваних композита

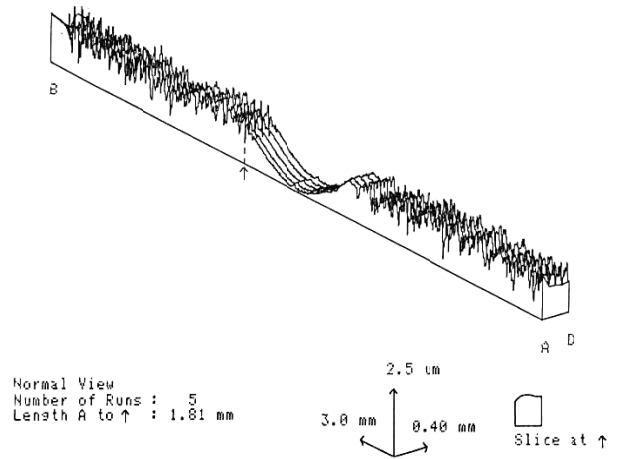
ZA27 легура			$R_a, \mu m$	$R_z, \mu m$	$R_{max}, \mu m$
			0.59	1.46	3.12
Основа	Ојачивач	Запремински удео, %	$R_a, \mu m$	$R_z, \mu m$	$R_{max}, \mu m$
ZA27	5% SiC	-	0.457	0.604	3.253
		1% Gr	0.271	0.364	2.561
		3% Gr	0.385	0.493	2.696
		5% Gr	0.373	0.642	5.933
	10% SiC	-	0.492	0.686	3.944
		1% Gr	0.381	0.491	2.512
		3% Gr	0.406	0.568	4.761
		5% Gr	0.498	0.735	4.685

Компјутеризовани мерни уређај Talysurf 6 (Taylor Hobson) [106] омогућава комплексно дефинисање стања контактних површина и приказан је на слици 4.15. Поред осталог на њему је могуће остварити:

- мерење основних и допунских параметара храпавости и валовитости,
- статистичку обраду резултата мерења параметара храпавости,
- приказивање резултата на екрану, њихово меморисање и штампање,
- просторно скенирање површине.



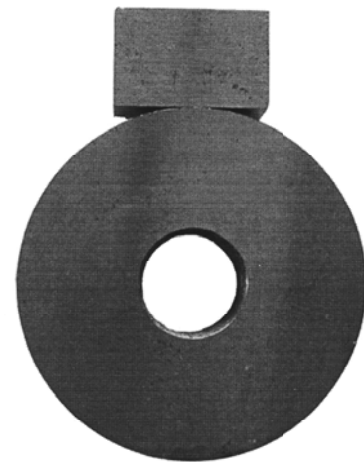
Слика 4.15 Мерни уређај Talysurf 6 [106]



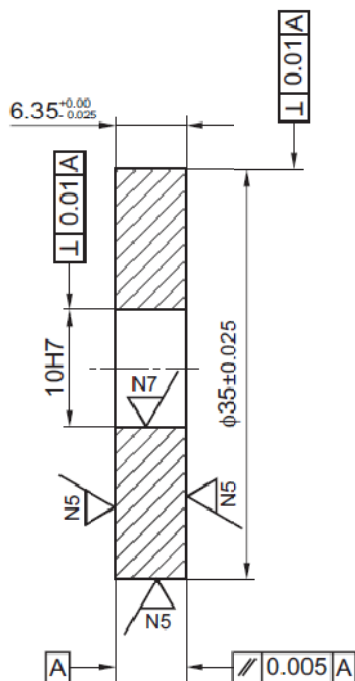
Слика 4.16 Профилотрисање похабаног дела површине блока [1]

Просторни изглед похабане површине блока, снимљен помоћу мерног уређаја Talysurf приказан је на слици 4.16.

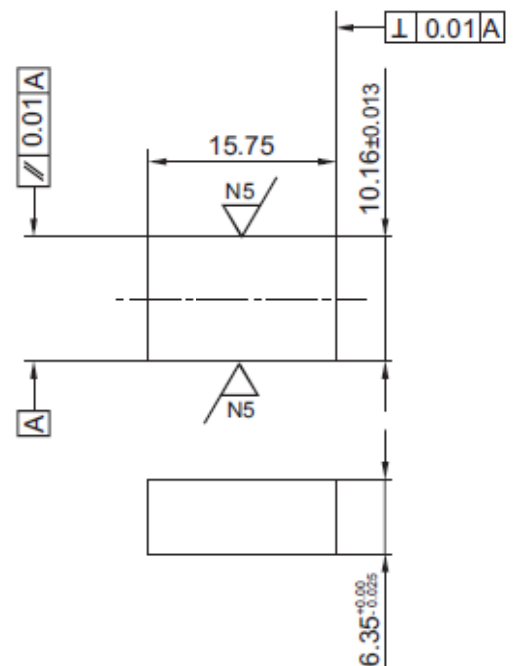
Изглед контактнoг пара дат је на слици 4.17, док су одговарајуће димензије блока и диска, у складу са стандардом ASTM G77, видљиве са слика 4.18 и 4.19. Испитивани контактни пар чине ротациони диска пречника $D_d = 35 \text{ mm}$, ширине $b_d = 6.35 \text{ mm}$ и стационарни блок ширине $b_b = 6.35 \text{ mm}$, дужине $l_b = 15.75 \text{ mm}$ и висине $h_b = 10.16 \text{ mm}$. Дискови су израђени од челика Č3840 (90MnCrV8), тврдоће $62 \div 64 \text{ HRC}$, са брушеним површинама, храпавости $R_a = 0.45 \mu\text{m}$. Блокови су израђени од испитиваних композитних материјала и од легуре ZA27.



Слика 4.17 Диск и блок



Слика 4.18 Димензије диска према ASTM G77 стандарду [1,4]



Слика 4.19 Димензије блока према ASTM G77 стандарду [1,4]

Микроструктура похабаних површина испитиваних хибридних композита истражена је применом скенирајућег електронског микроскопа, приказаног на слици 4.20.



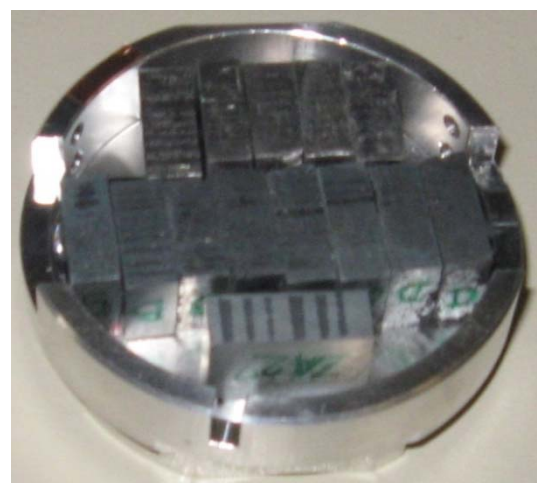
Слика 4.20 Скенирајући електронски микроскоп JEOL JSM-6610LV [107]

Скенирајући електронски микроскоп (СЕМ) постиже високу резолуцију слике са увећањима и до 100 000 пута. Поред детектора за секундарне електроне (SE) и повратно-расуте електроне (BSE) којим су опремљени углавном сви електронски микроскопи, овај микроскоп је опремљен и савременим енергетско-дисперзивним спектрометром (ЕДС). СЕМ пружа значајне предности у односу на конвенционалне мерне технике а карактерише га релативно лака припрема узорка и могућност непосредног посматрања структуре узорка у три димензије.

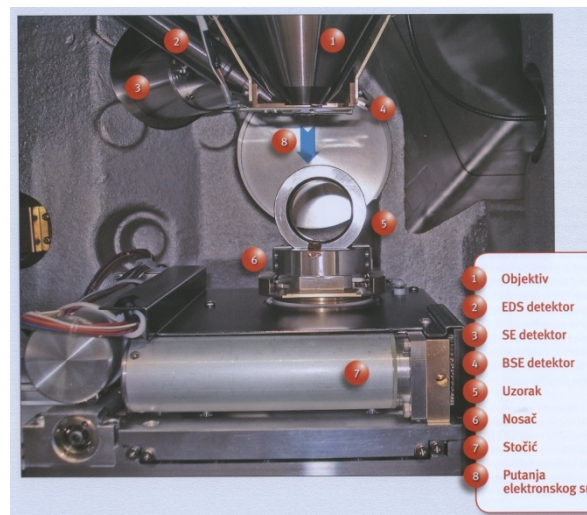
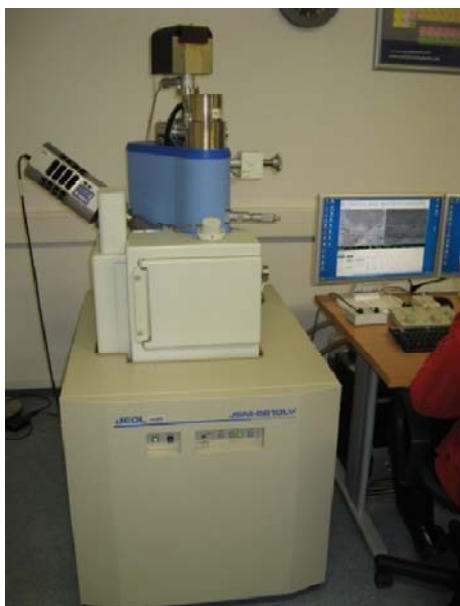
Прибор за припрему и монтирање узорака приказан је на слици 4.21. Испитивани узорци, композити и легура ZA27, постављени на одговарајући носач, непосредно пре убацивања у комору приказани су на слици 4.22. Пре саме СЕМ анализе узорци су детаљно очишћени, уроњени у етанол, па држани у ултразвучној кади ради добијања поузданих резултата.



Слика 4.21 Прибор за припрему и монтирање узорака [107]



Слика 4.22 Испитивани узорци



Слика 4.23 Унутрашњост коморе за узорке [107]

Сигнали са узорка се преко детектора, постављених у комори за узорке, преносе електронским путем до рачунара, односно монитора. Могуће је истовремено посматрати два снимка: BSE снимак на којем се виде различите фазе које се разликују по хемијском саставу и SE снимак који даје морфологију узорка. Такође, камером је омогућено праћење положаја узорка на носачу а померањем курсора могуће је вршити директан избор жељене позиције на узорку за даљу анализу.

Током ЕДС анализе могуће је бирати места за анализу директно на снимку, а анализе се могу радити у једној тачки, на одабраној површини или дуж одабране линије. На теко добијеном ЕДС спектру, апсциса представља енергију рентгенског зрачења изражену у килоелектронволтима (keV) а на основу положаја пикова утврђује се присуство хемијских елемената, тј. добија се квалитативна хемијска анализа. Ордината на спектру представља интензитет неког пика изражен у бројевима импулса (*counts*), који зависи од концентрације неког елемента, што представља основу за квантитативне хемијске анализе.

Испитивани узорци су снимани при различитим увећањима која су наведена на самим фотографијама.

4.3.2 Мерна опрема

Мерна опрема се састојала из пет основних група компонената: уређаја за триболошка испитивања (трибометра), давача, мерно-појачавачког моста, система за аквизицију података и рачунарске јединице.

Трибометар

Испитивања су била моделског типа и обављена су на компјутерски подржаном трибометру са контактном геометријом типа block-on-disc. При организовању моделских испитивања водило се рачуна да модел приближно одговара реалном систему у погледу елемената у контакту, окружења и утицајних параметара.

Основна конфигурација трибометра обухватала је:

- погонски систем (електомотор са ременицама, каишем и варијатором),
- систем за оптерећење (тегови),
- систем за вођење (лежајеви),
- систем за подмазивање (посуде за мазиво),
- систем за самоподешавање блока и диска (ротирајући носач блока),
- мерни систем.

Погонски систем остварује варирање бројева обртаја у распону $100 \div 1200 \text{ min}^{-1}$. Систем за оптерећење преко тегова и навојних парова омогућава постизање оптерећења контактних парова од $0 \div 500 \text{ N}$. Систем за вођење чине ваљкасти лежајеви код којих је преднапрезањем елиминисан зазор. Систем за подмазивање садржи различите посуде за мазиво а такође може да поседује систем за довод уља за подмазивање у зону контакта.



Слика 4.24 Трибометар

Систем за самоподешавање има задатак да у сваком тренутку, док траје контакт елемената, обезбеди потребан међусобни положај елемената у контакту



Слика 4.25 Носач блока

Конструкцијом посебног ротирајућег носача блока, слика 4.25, у оквиру система за самоподешавање блока и диска обезбеђено је преношење нормалног оптерећења у правцу осе диска чиме је остварен контакт целом дужином блока на диску.

На оваквом уређају било је могуће варирати релевантне параметре, у складу са предвиђеним планом експеримента. Тако, трибометар остварује варирање услова контакта са аспекта облика, димензија, материјала контактних елемената. Такође је могуће варирати нормално контактано оптерећење, брзине клизање, време трајања контакта. Према плану експеримента, било је могуће вршити испитивања у условима са и без подмазивања.

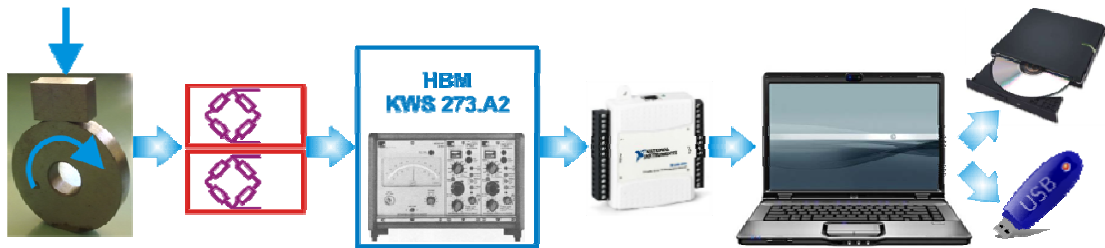
У општем случају, испитивања која се изводе помоћу трибометара имају низ предности:

- једноставна геометрија и мале димензије контактних елемената,
- могућност варирања и контроле релевантних параметара радних услова,
- поуздано мерења одговарајућих трибометријских карактеристика,
- релативно брзо добијања резултата,
- мали трошкови истраживања.

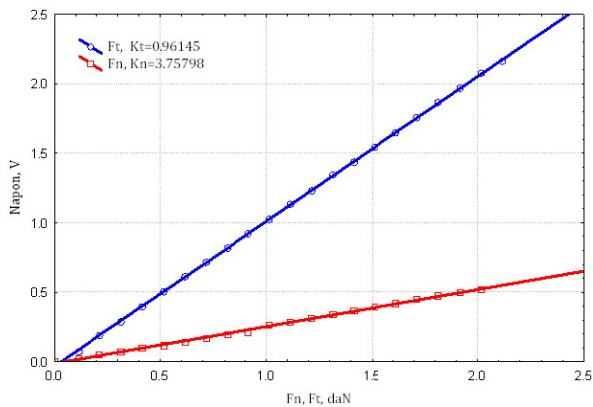
Мерни систем

У складу са планом експеримента, формиран је мерни систем, чија је шема дата на слици 4.26. Мерни систем омогућава мерење нормалне силе и силе трења. Састоји се од:

- динамометара (мерних трака повезаних у пун Wheaston-ов мост),
- мерно-појачавачког моста,
- А/Д конвертора,
- Рачунара.



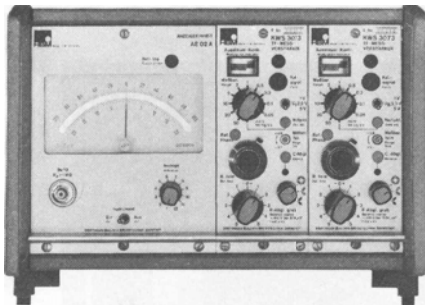
Слика 4.26 Шематски приказ примењене мерне опреме



Слика 4.27 Калибрационе зависности F_n и F_t сила код мерних трака

Пре мерења извршена је калибрација мерних трака. Састојала се у оптерећењу мерних трака тековима познате тежине, при чему је регистрован одзив давача. Улазне величине су мерене у њутнима, а одзив давача у волтима. На основу добијених зависности, формиране су калибрационе криве и дефинисане калибрационе константе. Ове константе су унете у мерни ланац, па је као резултат мерења у оквиру излазних параметара вредност мерних величина за силу изражавана у њиховим физичким јединицама (N). Ради провере тачности, калибрација мерних трака је вршена на притисак и истезање (у оба смера), при чему се калибрационе криве поклапају.

Мерно-појачавачки мост



Слика 4.28 Двоканални мерно-појачавачки мост HBM KWS 273.A2 [108]

Мерне траке су везане за двоканални мерно-појачавачки мост HBM KWS 273.A2, слика 4.28 [108]. Овај мерни мост напаја мерне траке наизменичном струјом носеће фреквенције 5 kHz, а на излазу дају сигнале једносмерне струје максималног опсега од ± 10 V. Напајају се, опционо, или наизменичном струјом напона 220 V, фреквенције 50 ÷ 60 Hz, или једносмерном струјом напона 11.5 ÷ 30 V преко посебног модула за напајање. Иако старији по конструкцији, мерно-појачавачки мост има исте функције као и новије варијанте мостова истог произвођача.

Осим што напајају пасивне даваче, мерно-појачавачки мост HBM KWS 273.A2 служе за мерење и појачање мерног сигнала давача, омогућавају подешавање „нуле” и калибрацију мерних ланаца.

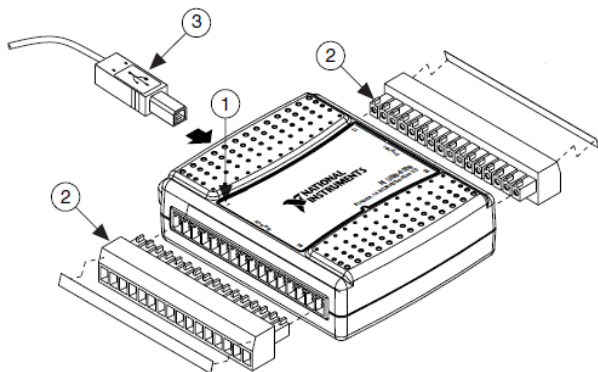
Систем за аквизицију података

Конверзија аналогних напонских сигнала са излаза мерно-појачавачких мостова у дигитални облик обављена је помоћу система за аквизицију података типа NI USB-6009 картице фирме National Instruments.



Слика 4.29 National Instruments NI USB-6009 картица [109]

Веза између дигиталне вредности резултата конверзије и величине улазног сигнала зависи од резолуције А/Д конвертора и опсега улазног напона. У експерименту је коришћен 12-битни А/Д конвертор. Аквизиција података подржана је од стране PC рачунара а контролу процеса аквизиције врши инсталирани софтверски пакет "Lab View" [110], фирме National Instruments.

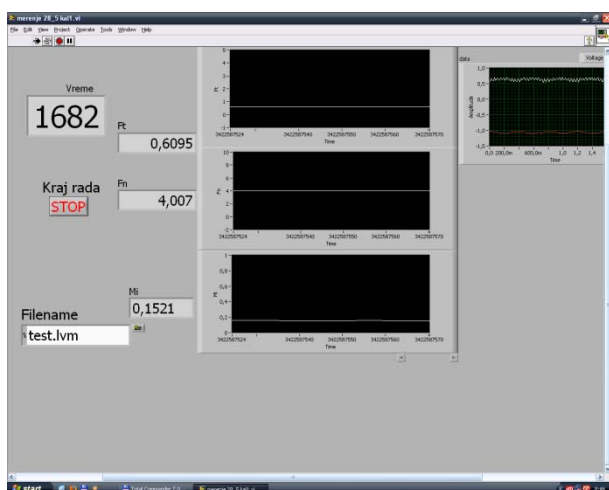


На слици 4.30 приказана је А/Д картица (1) са конекторима. Конектором (3), тј. USB каблом, остварује се конекција између рачунара и картице. Конекторима означеним бројем (2), остварује се аналогно/дигитална конекција са мерним тракама.

Основне карактеристике:

- 8 аналогних улаза (12-bit, 10 kS/s),
- 2 аналогна излаза (12-bit, 150 S/s),
- 12 дигиталних излазно/улазних канала.

Слика 4.30 NI USB-6009 картица [109]



Слика 4.31 Приказ могућих излазних параметара из "Lab View" апликације

За потребе експерименталног испитивања, дизајнирани су сопствени програми за аквизицију података помоћу програмског пакета "Lab View". Израђена апликација омогућава:

- континуирано прикупљање података са трибометра током времена,
- калибрацију физичких величина мерених на трибометру,
- нумерички и графички приказ вредности мерених величина у реалном времену,
- креирање датотека са улазно-излазним подацима мерених величина, чуваних на диску рачунара.

Софтвер аутоматски генерише вредност коефицијента трења у реалном времену, на основу познатих тренутних вредности силе трења и нормалног оптерећења. Датотеке садрже и средње вредности поменутих параметара формираних методом покретних средина. Аквизиција сигнала вршена је са 100 тачака у секунди (100 Hz).

4.3.3 Режи́ми рада

Планом истраживања триболошких карактеристика хибридних композита на бази легуре ZA27 предвиђено је да се испитивања обаве у више различитих режима. Режи́ми испитивања могу се грубо поделити на две групе:

- испитивање узорака материјала у условима без подмазивања,
- испитивање узорака материјала у условима са подмазивањем.

Подмазивање контактних елеменета реализовано је тако што је диск својим доњим делом уроњен до дубине од 3 mm у резервоар са уљем запремине 30 ml. При ротацији диска континуално се доводи уље у зону контакта и врши гранично подмазивање контактног пара. У свим тестовима са подмазивањем коришћено је исто хидраулично уље које по стандарду SRPS ISO 11158:2003 одговара типу HL и категорији HM, уље са побољшаним карактеристикама против хабања, градације вискозности VG 46, ISO 3448.



Слика 4.32 Подмазивање контактног пара

У оквиру планираних истраживања анализирани су следећи материјали:

- легура ZA27,
- композит ZA27 + 5%SiC,
- композит ZA27 + 10%SiC,
- хибридни композит ZA27 + 5%SiC + 1%Gr,
- хибридни композит ZA27 + 5%SiC + 3%Gr,
- хибридни композит ZA27 + 5%SiC + 5%Gr,
- хибридни композит ZA27 + 10%SiC + 1%Gr,
- хибридни композит ZA27 + 10%SiC + 3%Gr,
- хибридни композит ZA27 + 10%SiC + 5%Gr.

Испитивања су вршена уз варирање три нивоа нормалног контактног оптерећења и три нивоа брзине клизања:

- вредности нормалног оптерећења: 10 N, 20 N и 30 N;
- вредности брзина клизања: 0.25 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s.

4.3.4 План и услови триболошких испитивања

Након дефинисања контактне геометрије (типа block-on-disk) и начина подмазивања, дефинисани су услови испитивања. Детаљан план триболошких испитивања дат је у оквиру табела 4.6 до 4.8. Сваки експеримент је поновљен три пута ради добијања оптималних резултата мерења. Добијени резултати као и њихова анализа приказани су у оквиру посебног поглавља ове докторске дисертације.

Табела 4.6 План триболошких испитивања – са и без подмазивања

Услови испитивања	Пут клизања, m	Брзина клизања v, m/s	Нормално оптерећење F _n , N	Ширина трага хабања h, mm Коефицијент трења f	ZA27	ZA27										
						5% SiC				10% SiC						
						-	1%Gr	3%Gr	5%Gr	-	1%Gr	3%Gr	5%Gr			
Без подмазивања	600 m	v ₁ = 0.25 m/s	30	h	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
				f	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
			20	h	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
				f	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		10	h	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
			f	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		v ₂ = 0.5 m/s	30	h	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
				f	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
			20	h	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
				f	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		10	h	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
			f	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
	v ₃ = 1 m/s	30	h	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
			f	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		20	h	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
			f	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
	10	h	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
		f	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
	Са подмазивањем	1200 m	v ₁ = 0.25 m/s	30	h	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
					f	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
				20	h	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
					f	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			10	h	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
				f	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
v ₂ = 0.5 m/s			30	h	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
				f	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
			20	h	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
				f	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
10			h	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
			f	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
v ₃ = 1 m/s		30	h	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
			f	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		20	h	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
			f	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
10		h	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
		f	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			

Табела 4.7 План триболошких испитивања – криве хабања у условима без подмазивања

	v, m/s	F _n , N	s, m	ZA27	ZA27									
					5% SiC				10% SiC					
					-	1%Gr	3%Gr	5%Gr	-	1%Gr	3%Gr	5%Gr		
Ширина појаса хабања	0.25	10	30	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
			60	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			90	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			150	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			300	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			600	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		20	30	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			60	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			90	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			150	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			300	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			600	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		30	30	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			60	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			90	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			150	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			300	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			600	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	0.5	10	30	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
			60	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
			90	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
			150	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
			300	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
			600	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
20		30	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		60	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		90	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		150	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		300	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		600	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
30		30	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		60	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		90	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		150	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		300	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		600	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
1	10	30	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		60	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		90	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		150	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		300	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		600	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
	20	30	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		60	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		90	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		150	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		300	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		600	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
	30	30	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		60	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		90	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		150	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		300	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		600	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		

Табела 4.8 План триболошких испитивања – криве хабања у условима са подмазивањем

	v, m/s	F _n , N	s, m	ZA27	ZA27									
					5% SiC				10% SiC					
					-	1%Gr	3%Gr	5%Gr	-	1%Gr	3%Gr	5%Gr		
Ширина појаса хабања	0.25	10	60	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
			150	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
			300	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
			600	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
			1200	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		20	60	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			150	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			300	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			600	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			1200	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		30	60	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			150	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			300	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			600	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			1200	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	0.5	10	60	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
			150	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
			300	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
			600	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
			1200	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		20	60	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			150	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			300	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
			600	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
1200			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
30		60	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		150	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		300	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		600	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		1200	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
1	10	60	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		150	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		300	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		600	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
		1200	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
	20	60	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		150	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		300	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		600	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		1200	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
	30	60	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		150	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		300	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		600	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		1200	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	

5. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Истраживање триболошких карактеристика хибридних композита са основом од легуре ZA27 извршена су на основу претходно дефинисаног плана истраживања. Експериментална истраживања су спроведена у више фаза. Генерално, реализована су испитивања у условима са и без подмазивања. Најпре су спроведени тестови ради утврђивања природе процеса хабања при чему су добијене криве хабања. Затим је обављена серија континуалних тестова у којима су добијени сигнали коефицијената трења, одређене вредности ширине трага хабања и израчунати интензитети хабања и запремине похабаног материјала конкретних узорака. Сви добијени резултати су обрађени, систематизовани и приказани у облику табела и дијаграма.

5.1 Резултати истраживања у условима без подмазивања

5.1.1 Хабање (криве хабања, ширина трага хабања, интензитет хабања)

Ради сагледавања развоја процеса хабања, за све испитиване материјале добијене су одговарајуће криве хабања. Испитивања су вршена у условима без подмазивања, у промењивим условима контакта са аспекта контактеног оптерећења, брзине и пута клизања. Тестови су вршени уз варирање три нивоа нормалног контактеног оптерећења и три нивоа брзине клизања:

- нормално оптерећење: 10 N, 20 N и 30 N;
- брзина клизања: 0.25 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s.

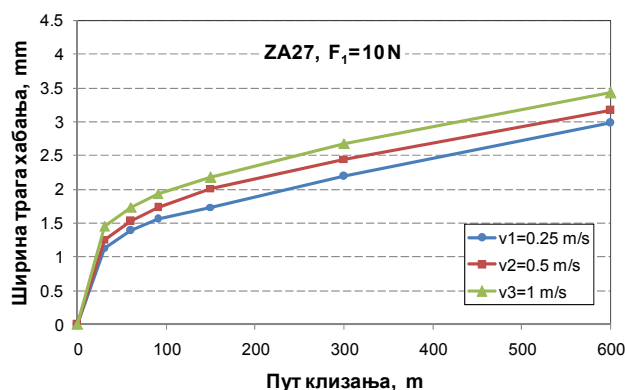
Дужина пута клизања за све материјале износила је 600 m. Као основни параметар хабања за формирање кривих хабања коришћена је ширина трага хабања на контактеној површини испитиваног блока. Изглед одговарајућег контакта блок-диск, приказан је на слици 4.17, а опис поступка и методологија испитивања дати је у оквиру претходног поглавља.

Праћење развоја процеса хабања захтевало је дисконтинуално одвијање појединачних тестова ради мерења хабања. Повремено се, после 30, 60, 90, 150, 300 и 600 метара прекидао процес трења блока по диску и мерила се ширина трага хабања на блоку. Мерење ширине трага хабања испитиваних материјала вршено је на универзалном микроскопу према утврђеној процедури.

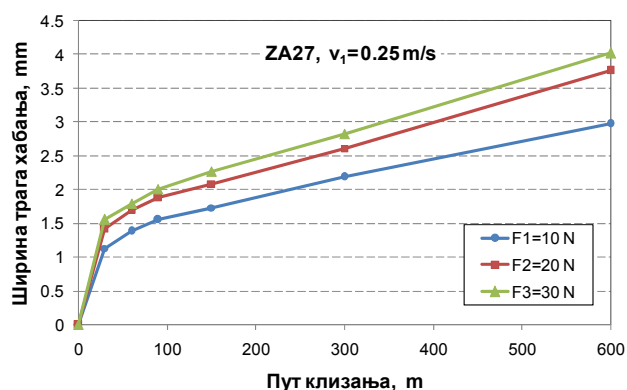
Измерене вредности ширине трага хабања у условима без подмазивања, за све испитиване материјале, дате су у прилогу ове докторске дисертације (табеле П.1 до П.9). Овде су ради сагледавања стања хабања, истакнуте само вредности које се односе на базни материјал, легуру ZA27 и изабрани композит, ZA27+5%SiC+1%Gr и приказане су у табелама 5.1 и 5.2. На основу измерених ширина трагова хабања формиране су криве хабања као функције промене ширине трага хабања у зависности од пута клизања. За поменуте материјале ове експерименталне криве су приказане на сликама 5.1 до 5.6 (за легуру ZA27) и 5.7 до 5.12 (за ZA27+5%SiC+1%Gr).

Табела 5.1 Ширина трага хабања – ZA27, без подмазивања

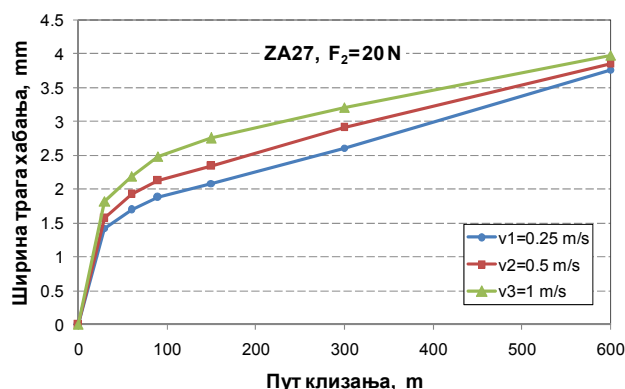
ZA 27		Ширина трага хабања, mm					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	1.132	1.384	1.552	1.734	2.185	2.974
	20	1.421	1.696	1.877	2.086	2.613	3.768
	30	1.552	1.795	2.012	2.268	2.829	4.025
0,5	10	1.254	1.531	1.729	2.014	2.444	3.166
	20	1.571	1.921	2.125	2.346	2.915	3.859
	30	1.653	1.998	2.212	2.465	3.067	4.223
1	10	1.452	1.729	1.933	2.171	2.677	3.424
	20	1.825	2.192	2.489	2.756	3.212	3.985
	30	1.871	2.328	2.549	2.814	3.502	4.451



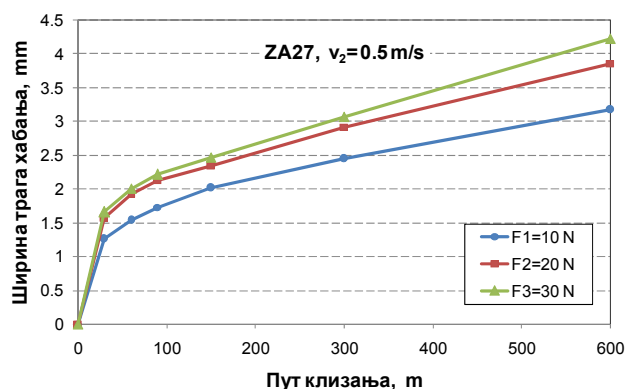
Слика 5.1 Криве хабања – ZA27, $F_1 = 10\text{ N}$



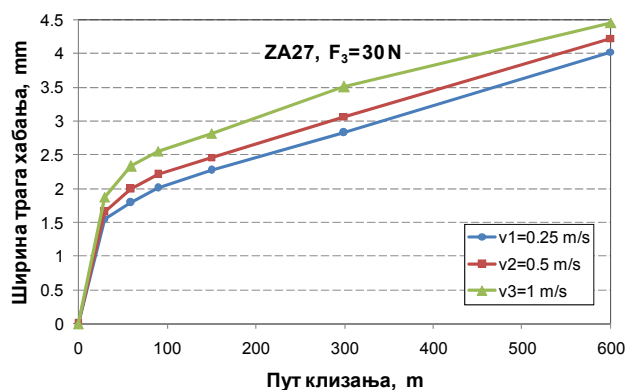
Слика 5.2 Криве хабања – ZA27, $v_1 = 0.25\text{ m/s}$



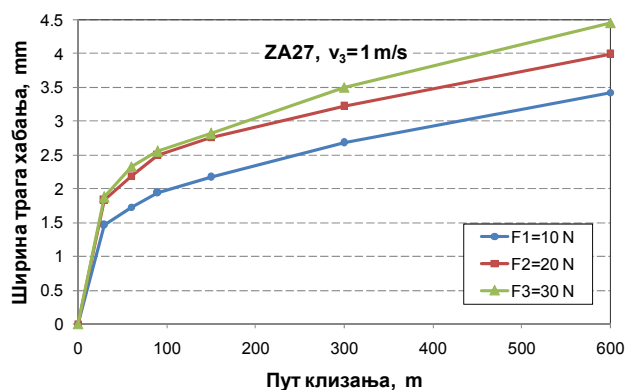
Слика 5.3 Криве хабања – ZA27, $F_2 = 20\text{ N}$



Слика 5.4 Криве хабања – ZA27, $v_2 = 0.5\text{ m/s}$



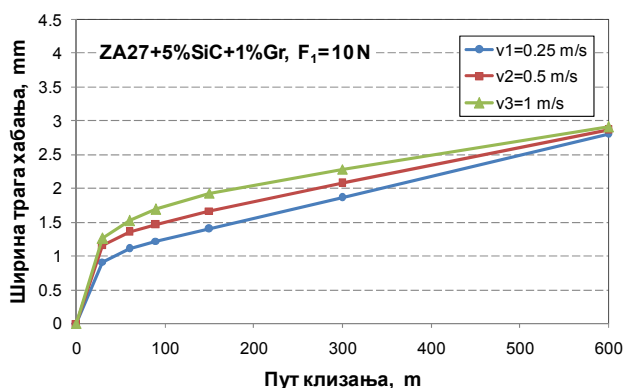
Слика 5.5 Криве хабања – ZA27, $F_3 = 30\text{ N}$



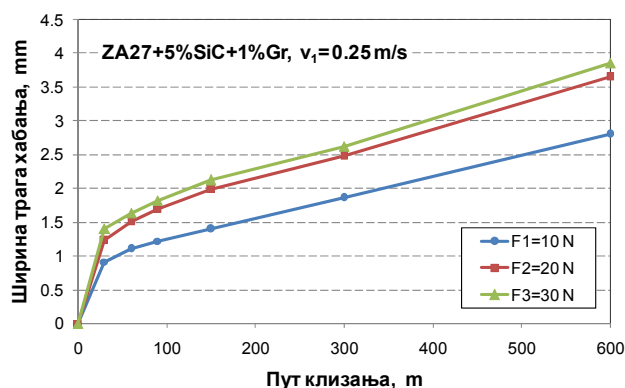
Слика 5.6 Криве хабања – ZA27, $v_3 = 1\text{ m/s}$

Табела 5.2 Ширина трага хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, без подмазивања

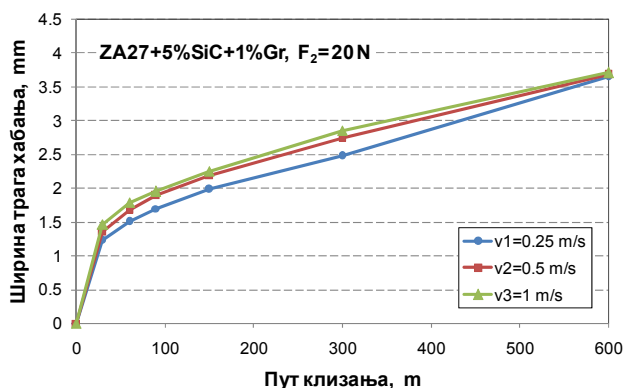
ZA 27+5%SiC+1%Gr		Ширина трага хабања, mm					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.911	1.104	1.215	1.398	1.856	2.803
	20	1.226	1.502	1.695	1.979	2.478	3.643
	30	1.395	1.633	1.817	2.116	2.617	3.855
0,5	10	1.156	1.345	1.459	1.663	2.072	2.864
	20	1.355	1.681	1.891	2.189	2.735	3.679
	30	1.432	1.736	1.965	2.331	2.909	3.878
1	10	1.252	1.515	1.687	1.929	2.275	2.905
	20	1.465	1.785	1.949	2.251	2.854	3.708
	30	1.551	1.903	2.111	2.441	3.015	3.902



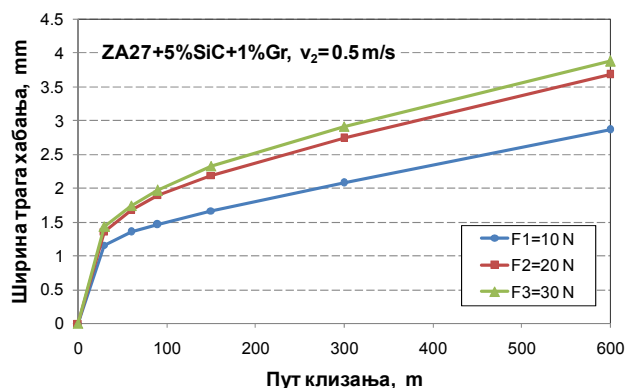
Слика 5.7 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $F_1 = 10\text{ N}$



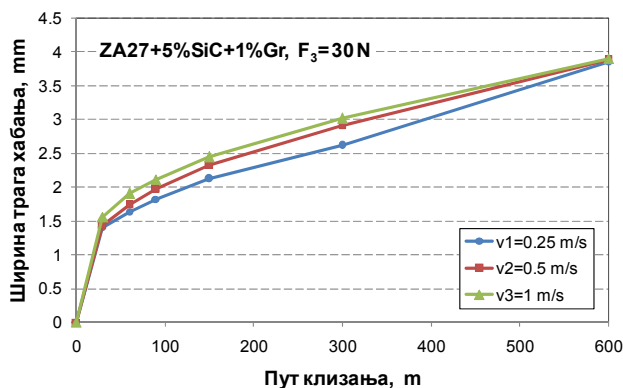
Слика 5.8 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $v_1 = 0.25\text{ m/s}$



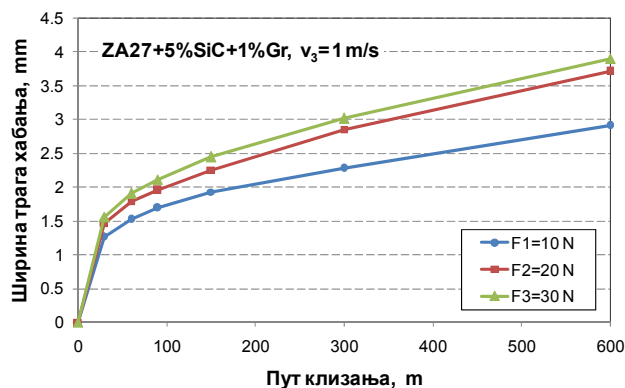
Слика 5.9 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $F_2 = 20\text{ N}$



Слика 5.10 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $v_2 = 0.5\text{ m/s}$



Слика 5.11 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $F_3 = 30\text{ N}$



Слика 5.12 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $v_3 = 1\text{ m/s}$

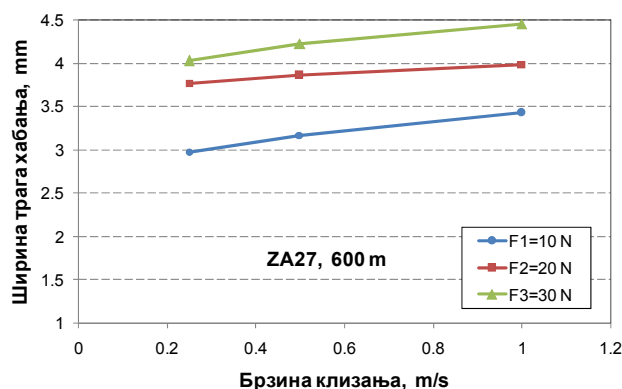
У општем случају, без обзира на врсту механизма хабања присутног у зонама контакта елемената трибо-механичког система процес хабања чврстих елемената система развија се временом на исти начин, при чему се уочавају три фазе развоја процеса хабања [110]. У првој фази, фази иницијалног хабања, брзина процеса хабања (интензитет хабања) интензивно расте са временом, односно пређеним путем клизања. Друга фаза развоја процеса хабања (фаза устаљеног хабања) почиње у тренутку када брзина хабања почиње полако да расте. Раст брзине хабања (интензитета хабања) траје све до почетка треће фазе хабања која се назива и фазом катастрофалног (разорног) хабања. У трећој фази процес хабања се развија великом брзином, тако да за кратко време рада трибо-механичког система његови елементи достижу критични ниво похабаности.

Вредности ширина трагова хабања које су дате у табелама представљају средње вредности добијене после извршена три испитивања при истим радним режимима. Зависности ширине трага хабања од брзине клизања и нормалног оптерећења, за основни материјал, легуру ZA27, приказане су на сликама 5.13. и 5.14, респективно. Може се уочити да са порастом брзине, односно нормалног оптерећења, расте и хабање испитиваног основног материјала.

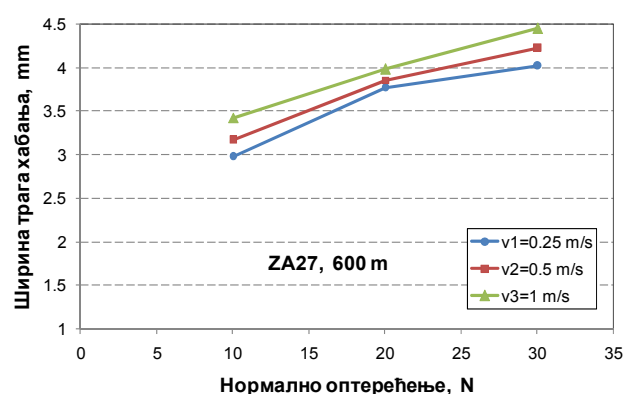
Криве хабања су начин представљања хабања материјала у функцији пређеног пута или времена рада трибо-механичког система који се најчешће користи. Облик и изглед кривих хабања зависи од оствареног контакта блока и диска, интензитета спољашњег оптерећења и брзине клизања али и од триболошких карактеристика испитиваних материјала.

Добијене криве хабања имају облик који је сагласан са теоријским моделима процеса хабања. Из добијених дијаграма може се закључити да свим испитиваним материјалима у свим условима контакта одговара истоветна природа развоја процеса хабања. Уочава се зона иницијалног, интензивног хабања која одговара периоду уходавања контактних површина и зона устаљеног, умереног хабања када се одвија равномерно хабање материјала.

Са приказаних кривих хабања карактеристично је се иницијално хабање одиграва током првих 30 до 50 m пута клизања. Током наведеног интервала долази до наглог пораста ширине трага хабања. Након тога пораст ширине трага хабања је мали и готово линеаран.

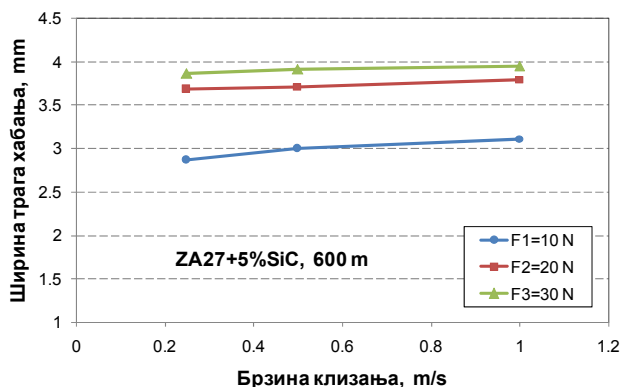


Слика 5.13 Ширина трага хабања у функцији брзине клизања – ZA27

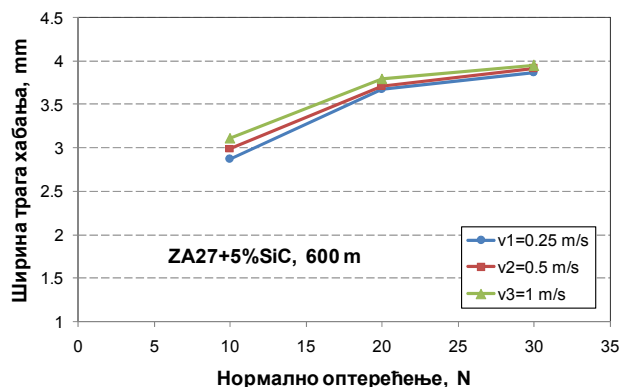


Слика 5.14 Ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27

Код композитних материјала, криве хабања су добијене на истоветан начин као и за основни материјал. Испитивања су вршена уз варирање три брзине клизања, и три нивоа оптерећења. Код композита ојачаног са 5%SiC, ширина трага хабања у функцији брзине клизања дата је слици 5.15, док је ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења показана на слици 5.16.

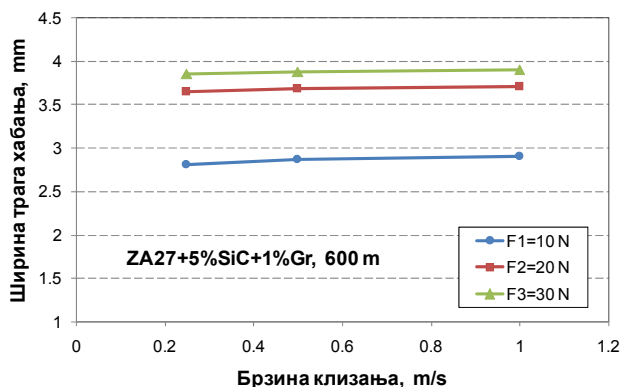


Слика 5.15 Ширина трага хабања у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC

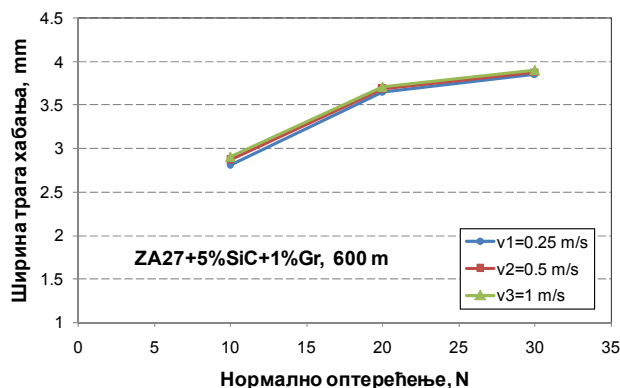


Слика 5.16 Ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC

На сликама које следе наведене су зависности ширине трага хабања од брзине клизања и нормалног оптерећења за хибридне композите. У случају хибридног композита ојачаног са 5%SiC и 1%Gr, утицај брзине клизања на ширину трага хабања истакнут је на слици 5.17 а утицај нормалног оптерећења на слици 5.18.

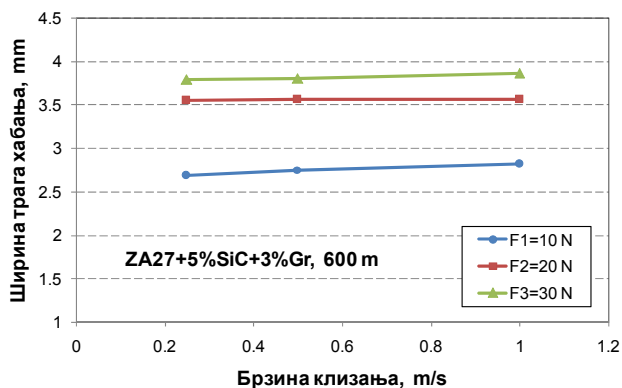


Слика 5.17 Ширина трага хабања у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC+1%Gr

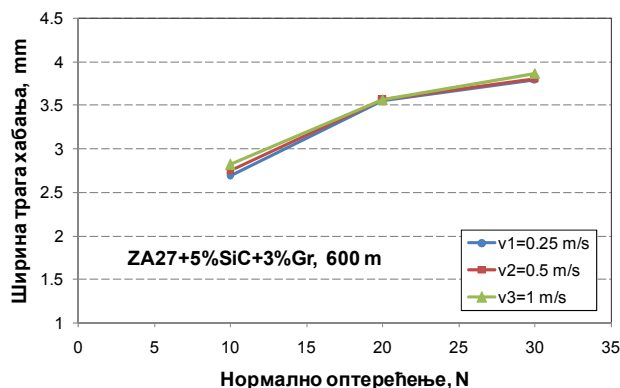


Слика 5.18 Ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC+1%Gr

Слика 5.19 показује зависност ширине трага хабања од брзине клизања код хибридног композита који садржи 5%SiC и 3% графита. Ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења дата је сликом 5.20.

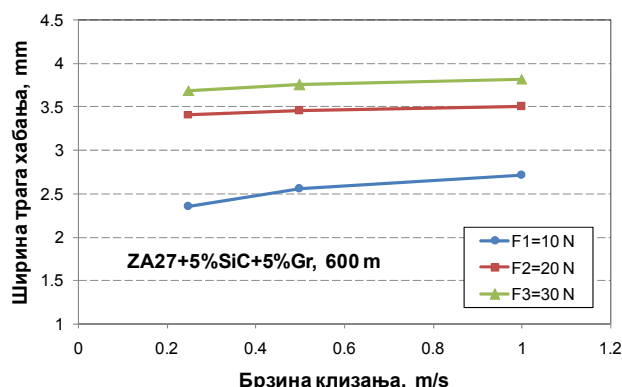


Слика 5.19 Ширина трага хабања у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC+3%Gr

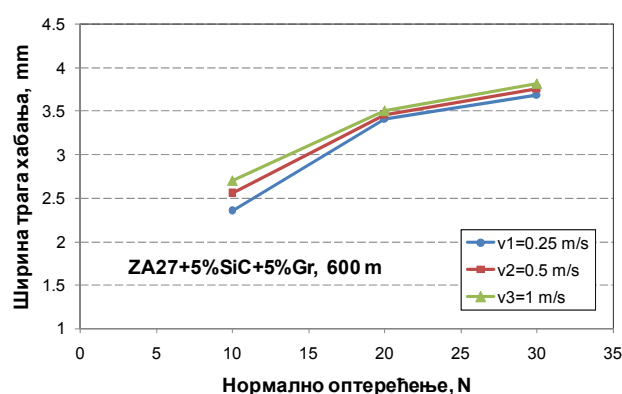


Слика 5.20 Ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC+3%Gr

Код композита са највишим садржајем графита (5%SiC и 5% графита), зависности ширине трага хабања од брзине клизања и нормалног оптерећења, дате су на сликама 5.21. и 5.22, респективно.

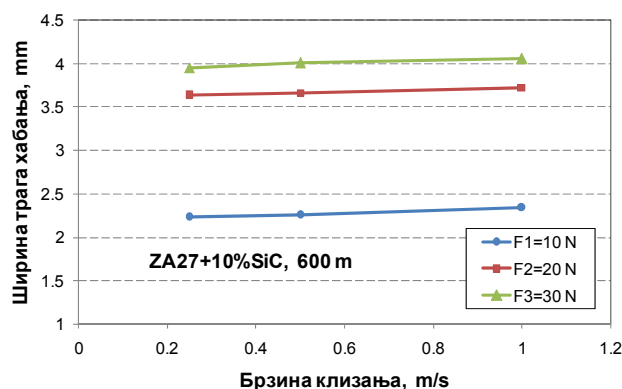


Слика 5.21 Ширина трага хабања у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC+5%Gr

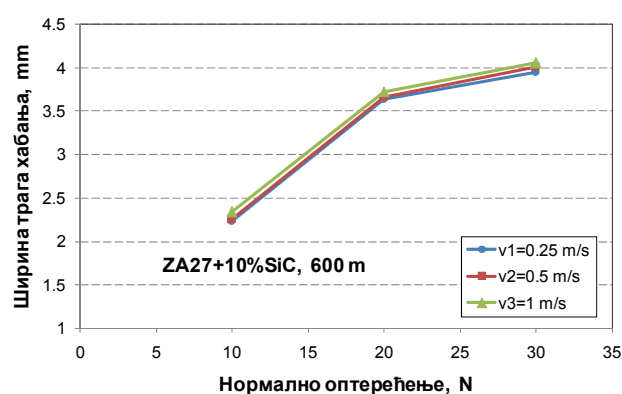


Слика 5.22 Ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC+5%Gr

За композит који садржи 10%SiC, утицај брзине клизања на ширину трага хабања дат је на слици 5.23, а утицај нормалног оптерећења на слици слици 5.24.

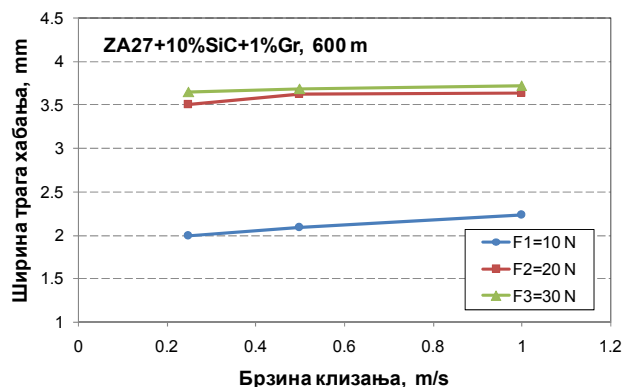


Слика 5.23 Ширина трага хабања у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC

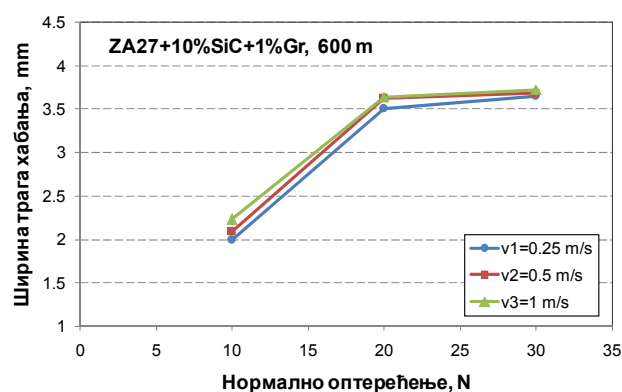


Слика 5.24 Ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC

На слици 5.25 је графички приказ зависности ширине трага хабања од брзине клизања а на слици 5.26 приказ зависности ширине трага хабања од нормалног оптерећења, све за хибридни композит који садржи 10%SiC и 1% графита.

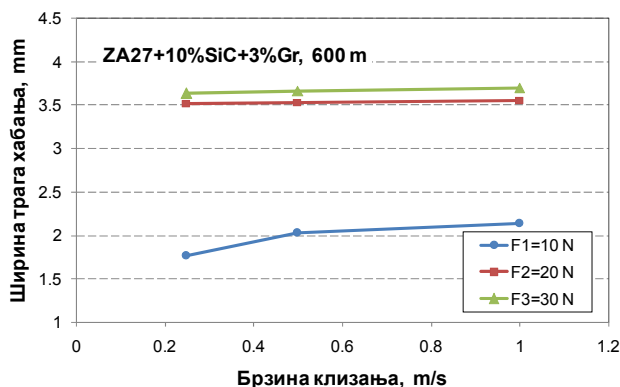


Слика 5.25 Ширина трага хабања у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC+1%Gr

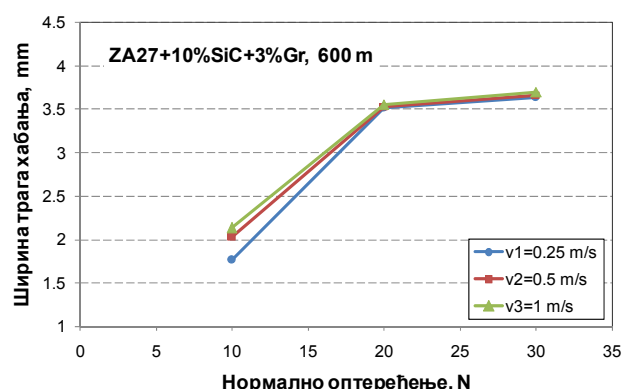


Слика 5.26 Ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC+1%Gr

Код хибридног композита који садржи 10%SiC и 3%Gr, утицај брзине клизања на ширину трага хабања приказан је на слици 5.27 а утицај нормалног оптерећења на ширину трага хабања на слици 5.28.

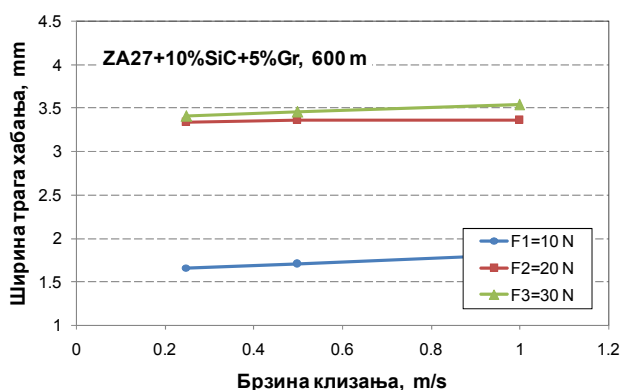


Слика 5.27 Ширина трага хабања у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC+3%Gr

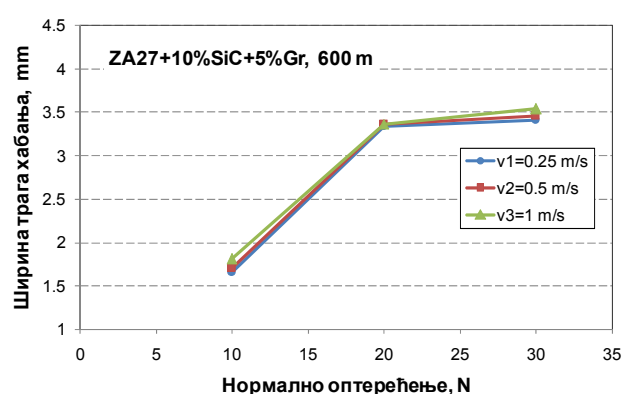


Слика 5.28 Ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC+3%Gr

Зависност ширине трага хабања од брзине клизања код хибридног композита са највишим садржајем силицијум карбида и графита, дата је на слици 5.29. Ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења приказана је сликом 5.30.



Слика 5.29 Ширина трага хабања у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC+5%Gr



Слика 5.30 Ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC+5%Gr

Са претходних дијаграма који показују зависност ширине трага хабања од брзине клизања може се уочити да ширина трага хабања расте са порастом брзине клизања. Уочене законитости важе за све испитиване материјале. С обзиром на благи нагиб кривих, повећање брзине клизања доводи до малог пораста ширине трага хабања, за све вредности варираног оптерећења. При повећању нормалног оптерећења са 10 N на 20 N приметан је већи скок у вредностима ширине трага хабања, него што је то случај када се оптерећење увећава са 20 N на 30 N.

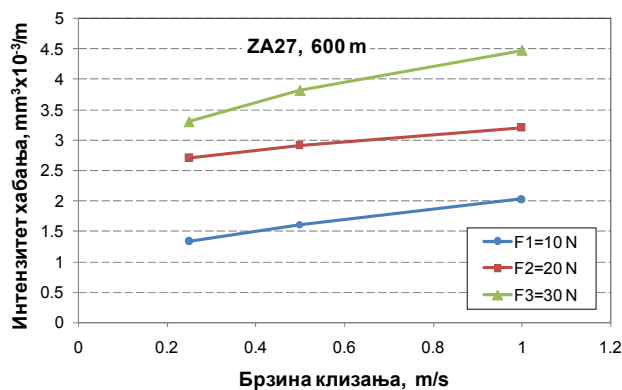
Са показаних дијаграма који дају ширину трага хабања у функцији нормалног оптерећења закључује се да са порастом нормалног оптерећења расте и хабање испитиваних материјала, како основног, тако и свих композита. Са порастом угла нагиба кривих, расте и хабање. Угао нагиба кривих је овде више изражен што говори о значајнијем утицају нормалног оптерећења на вредности ширине трага хабања. Тренд раста вредности ширине трага хабања је готово идентичан за све вариране вредности брзине клизања. Уочено је да је хабање интензивније при порасту оптерећења са 10 N на 20 N, док је тренд хабања далеко блажи при даљем увећању нормалног оптерећења.

Како је већ наведено, као основни параметар хабања коришћена је ширина трага хабања на контактної површини блока. Са порастом степена похабаности, долази до ширења трага хабања, који с обзиром на облик хабања није линеарно пропорционалан промени запремине похабаног материјала. Изведени параметри хабања, запремина похабаног материјала и интензитет хабања, добијени су рачунским путем на основу површине кружног одсечка и ширине диска, тј блока, како је и наведено у четвртом поглављу. Израчунате су вредности запремина похабаног материјала за испитиване узорке, у условима без подмазивања. На основу запремина похабаног материјала, израчунати су интензитети хабања у функцији пута клизања у условима без подмазивања за све испитиване материјале и дати у прилогу у оквиру табела (табеле П.10 до П.18) и дијаграма (слике П.55 до П.108).

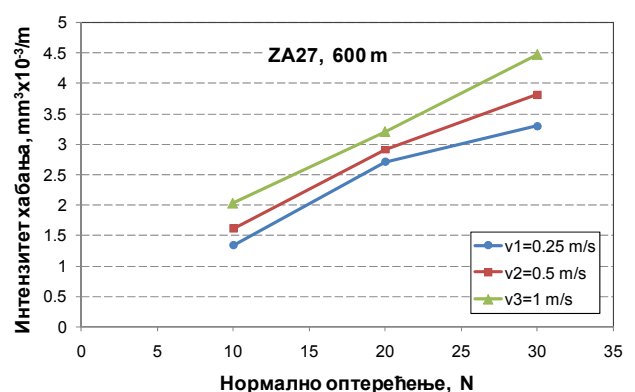
Вредности интензитета хабања за основни материјал ZA27 дати су у табели 5.3 у зависности од брзине клизања, нормалног оптерећења и пута клизања. На основу вредности интензитета хабања, за пут клизања од 600 m, приказана је зависност интензитета хабања у функцији брзине клизања (слика 5.31) и зависност интензитета хабања у функцији нормалног оптерећења (слика 5.32).

Табела 5.3 Интензитет хабања – ZA27, без подмазивања

ZA 27		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-3} / \text{m}$					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	1.463	1.337	1.257	1.052	1.053	1.329
	20	2.894	2.461	2.224	1.832	1.801	2.706
	30	3.771	2.917	2.739	2.355	2.287	3.299
0,5	10	1.988	1.811	1.738	1.648	1.474	1.603
	20	3.911	3.576	3.228	2.606	2.502	2.907
	30	4.556	4.024	3.641	3.024	2.915	3.812
1	10	3.087	2.607	2.429	2.065	1.937	2.029
	20	6.132	5.314	5.189	4.228	3.349	3.202
	30	6.607	6.367	5.573	4.501	4.342	4.466



Слика 5.31 Интензитет хабања у функцији брзине клизања – ZA27

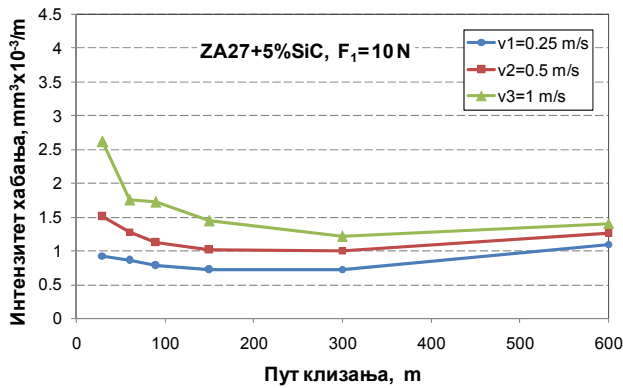


Слика 5.32 Интензитет хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27

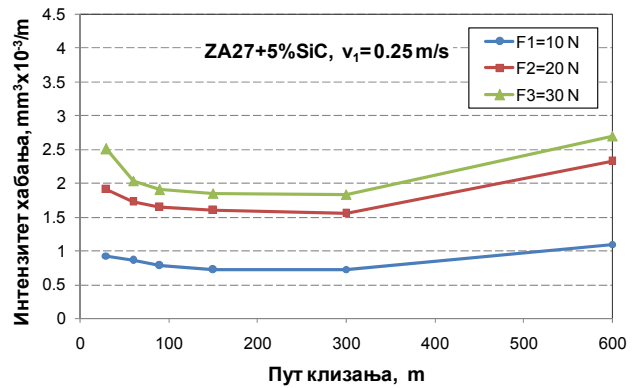
У оквиру овог поглавља као илустративна, дата је табела 5.4 са вредностима интензитета хабања за композит ZA27+5%SiC. За овај композит, на основу података из табеле, приказани су дијаграми интензитета хабања за различите брзине и оптерећења у функцији пута клизања (слике 5.33 до 5.38). Такође су дате графичке зависности интензитета хабања од брзине клизања (за сва три оптерећења) – слика 5.39 и зависност интензитета хабања од нормалног оптерећења (за све три брзине клизања) – слика 5.40.

Табела 5.4 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, без подмазивања

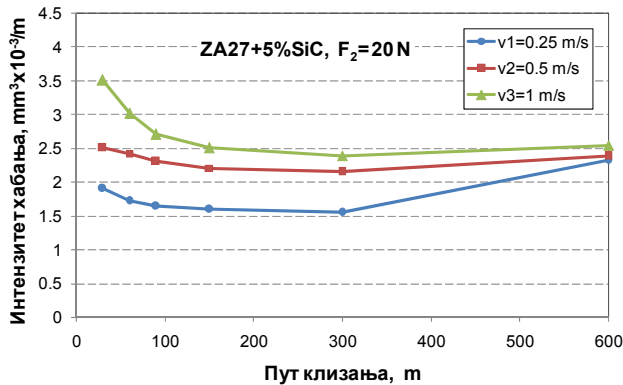
ZA 27+5%SiC		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-3} / \text{m}$					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.923	0.852	0.774	0.712	0.725	1.096
	20	1.907	1.723	1.646	1.599	1.546	2.323
	30	2.501	2.031	1.902	1.851	1.829	2.699
0,5	10	1.507	1.277	1.121	1.012	1.002	1.253
	20	2.506	2.421	2.301	2.207	2.156	2.383
	30	3.006	2.714	2.535	2.504	2.396	2.801
1	10	2.611	1.747	1.715	1.441	1.205	1.401
	20	3.507	3.014	2.705	2.504	2.391	2.547
	30	4.017	3.819	3.404	3.103	2.696	2.868



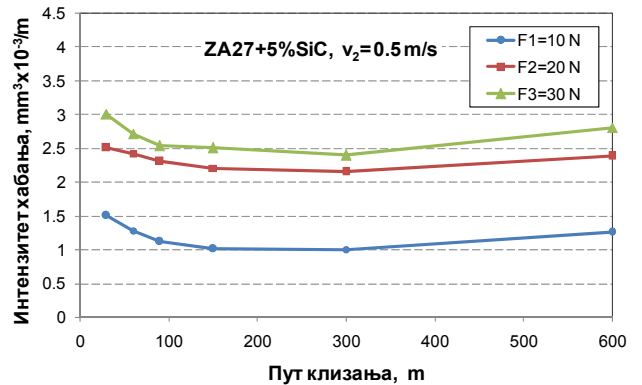
Слика 5.33 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $F_1 = 10 \text{ N}$



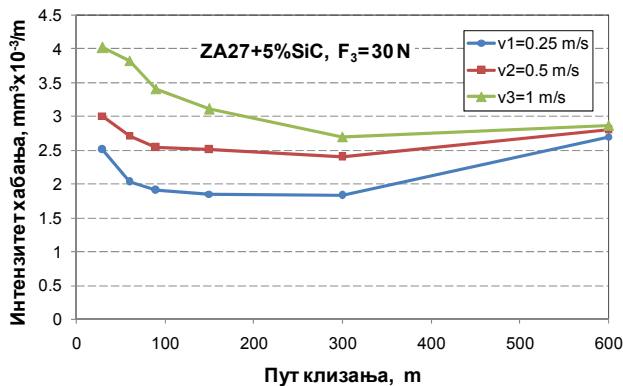
Слика 5.34 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$



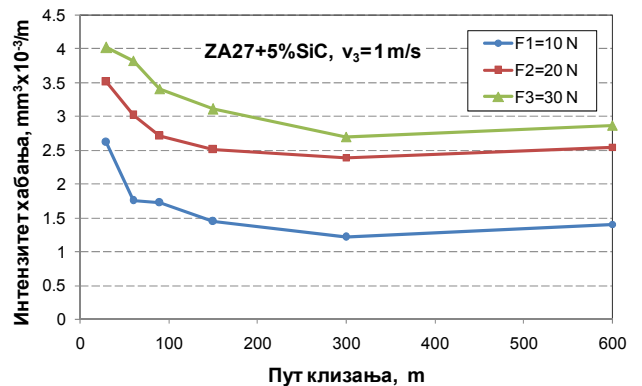
Слика 5.35 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $F_2 = 20 \text{ N}$



Слика 5.36 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $V_2 = 0.5 \text{ m/s}$

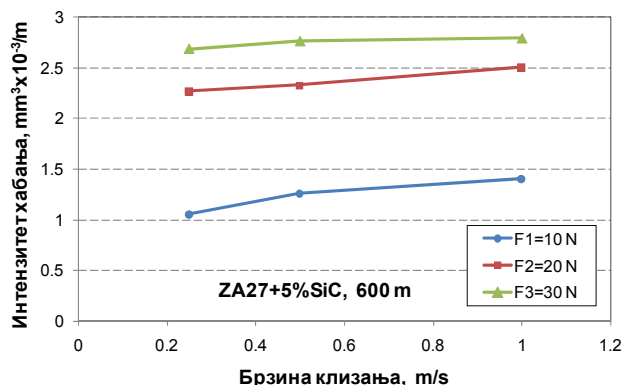


Слика 5.37 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $F_3 = 30 \text{ N}$

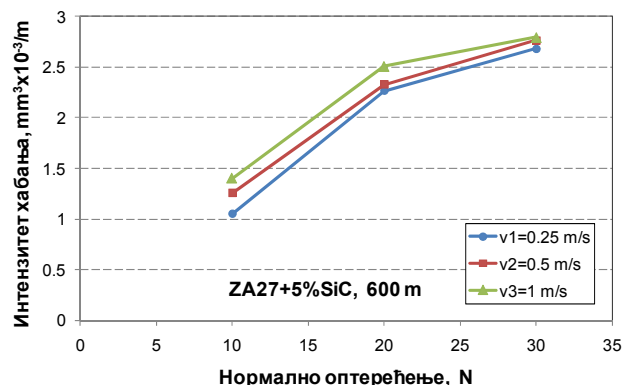


Слика 5.38 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $V_3 = 1 \text{ m/s}$

Зависности интензитета хабања од брзине клизања и нормалног оптерећења, за композит ZA27+5%SiC, приказане су на сликама 5.39. и 5.40, респективно. Уочава се да са порастом брзине, односно нормалног оптерећења, расте и интензитет хабања испитиваног материјала.



Слика 5.39 Интензитет хабања у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC

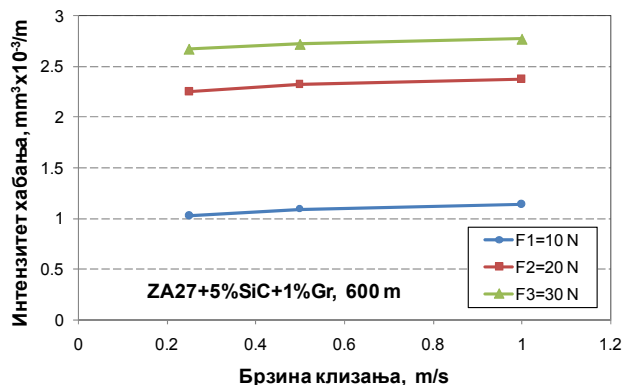


Слика 5.40 Интензитет хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC

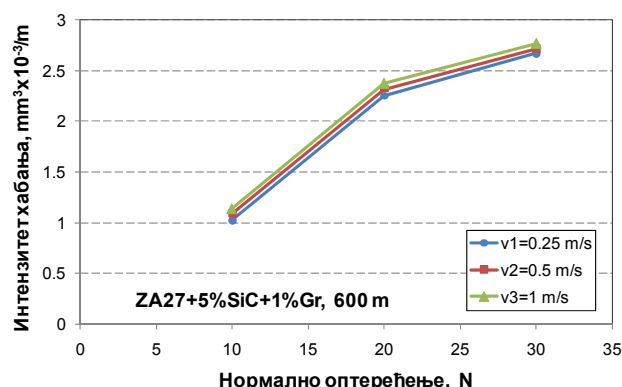
За све остале материјале, предвиђене планом испитивања, формиране су и дијаграмима представљене (у прилогу) одговарајуће криве интензитета хабања. Вредности интензитета хабања за композите који садрже 5% силицијум карбида уз додаток 1%, 3% и 5% графита, наведене су у табелама 5.5, 5.6 и 5.7, респективно. Одговарајуће графичке зависности интензитета хабања у функцији брзине клизања односно нормалног оптерећења дате су у табелама 5.41 до 5.46.

Табела 5.5 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, без подмазивања

ZA 27+5%SiC+1%Gr		Интензитет хабања, mm ³ x10 ⁻³ /m					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.702	0.625	0.555	0.508	0.594	1.024
	20	1.712	1.574	1.508	1.441	1.414	2.252
	30	2.522	2.023	1.858	1.761	1.667	2.671
0,5	10	1.435	1.131	0.962	0.855	0.827	1.093
	20	2.311	2.207	2.095	1.951	1.903	2.321
	30	2.728	2.431	2.351	2.355	2.291	2.718
1	10	1.823	1.615	1.487	1.334	1.095	1.141
	20	2.921	2.643	2.294	2.121	2.163	2.375
	30	3.467	3.202	2.915	2.705	2.551	2.769



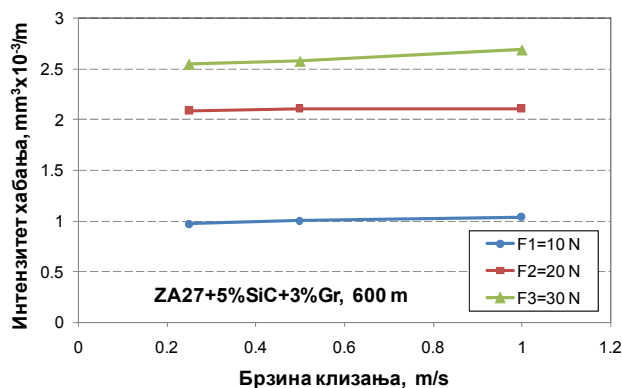
Слика 5.41 Интензитет хабања у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC+1%Gr



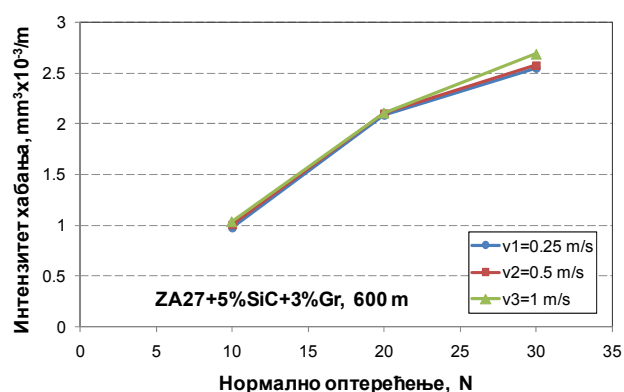
Слика 5.42 Интензитет хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC+1%Gr

Табела 5.6 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, без подмазивања

ZA 27+5%SiC+3%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-3}/\text{m}$					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.319	0.261	0.245	0.252	0.396	0.897
	20	1.416	1.299	1.252	1.204	1.255	2.085
	30	2.311	1.892	1.744	1.616	1.608	2.547
0,5	10	1.033	0.807	0.699	0.651	0.691	0.968
	20	1.894	1.683	1.686	1.749	1.733	2.103
	30	2.632	2.411	2.294	2.261	2.218	2.575
1	10	1.551	1.237	0.976	0.794	0.803	1.037
	20	2.211	1.991	1.946	1.981	1.835	2.108
	30	3.104	2.811	2.705	2.407	2.351	2.688



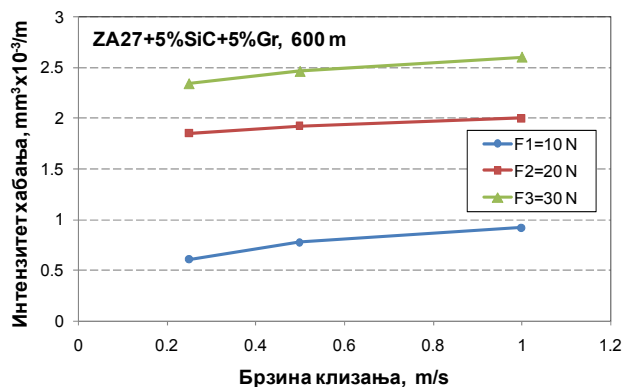
Слика 5.43 Интензитет хабања у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC+3%Gr



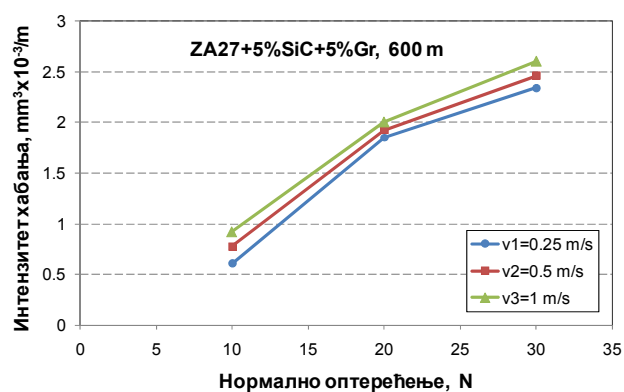
Слика 5.44 Интензитет хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC+3%Gr

Табела 5.7 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, без подмазивања

ZA 27+5%SiC+5%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-3}/\text{m}$					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.177	0.152	0.157	0.193	0.231	0.604
	20	0.503	0.547	0.672	0.764	1.136	1.848
	30	0.644	0.583	0.742	0.918	1.439	2.339
0,5	10	0.296	0.257	0.261	0.262	0.321	0.774
	20	0.705	0.723	0.852	0.924	1.289	1.922
	30	0.974	0.927	1.014	1.188	1.679	2.459
1	10	0.418	0.412	0.419	0.414	0.492	0.921
	20	1.246	1.013	1.098	1.126	1.474	2.001
	30	1.629	1.458	1.471	1.548	1.933	2.599



Слика 5.45 Интензитет хабања у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC+5%Gr



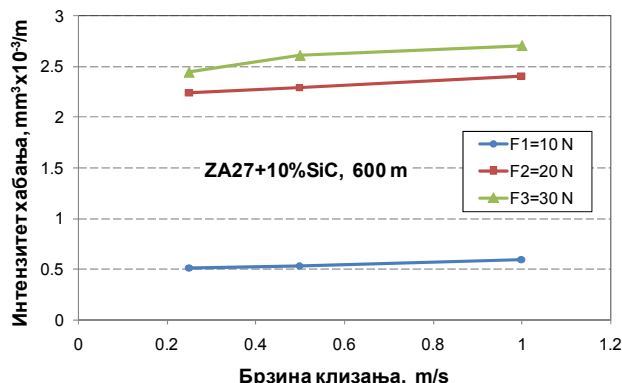
Слика 5.46 Интензитет хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC+5%Gr

На основу добијених вредности интензитета хабања наведених композита видљив је готово исти тренд. Интензитет хабања композитних материјала расте са порастом нормалног оптерећења и порастом брзине клизања.

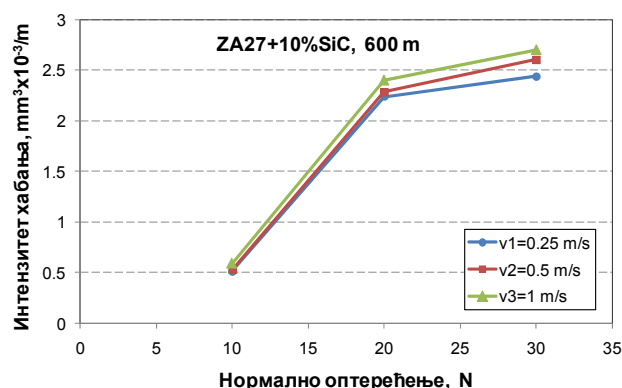
Вредности интензитета хабања композита који садржи 10% силицијум карбида, дате су на слици 5.8, док су вредности интензитета хабања хибридних композита са 10% SiC уз додатак 1%, 3% и 5% графита, наведене у табелама 5.9, 5.10 и 5.11, респективно. Одговарајући графички прикази интензитета хабања у зависности од брзине клизања односно нормалног оптерећења дати су у табелама 5.47 до 5.54.

Табела 5.8 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC, без подмазивања

ZA 27+10%SiC		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-3}/\text{m}$					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.413	0.341	0.321	0.323	0.373	0.512
	20	1.201	1.105	1.012	1.001	1.148	2.237
	30	1.836	1.638	1.584	1.501	1.601	2.441
0,5	10	0.568	0.417	0.411	0.411	0.418	0.531
	20	1.811	1.612	1.508	1.398	1.522	2.288
	30	2.538	2.299	2.203	2.112	2.003	2.606
1	10	0.735	0.551	0.539	0.514	0.477	0.592
	20	3.001	2.521	2.231	2.076	2.204	2.402
	30	3.623	2.871	2.524	2.432	2.408	2.703



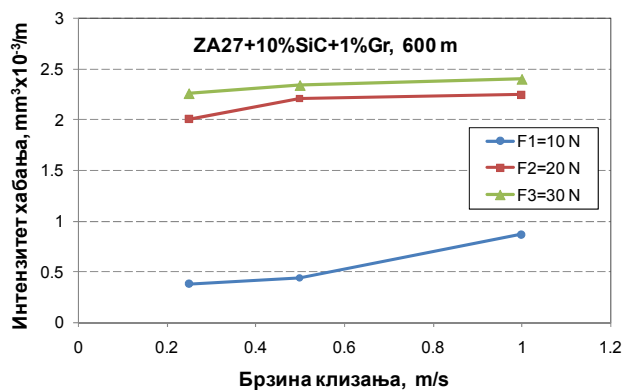
Слика 5.47 Интензитет хабања у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC



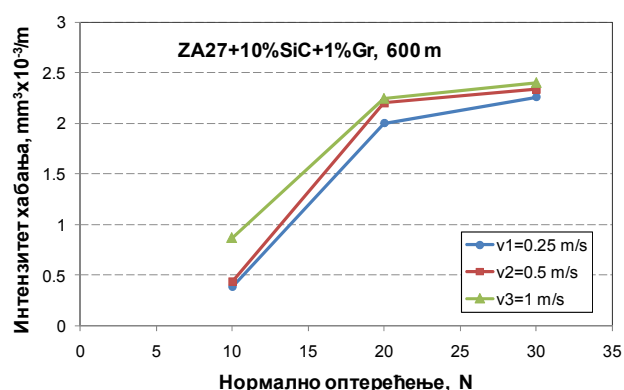
Слика 5.48 Интензитет хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC

Табела 5.9 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, без подмазивања

ZA 27+10%SiC+1%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-3}/\text{m}$					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.369	0.294	0.271	0.233	0.268	0.365
	20	1.113	0.905	0.852	0.851	1.068	2.002
	30	1.585	1.482	1.412	1.353	1.444	2.258
0,5	10	0.521	0.381	0.318	0.272	0.311	0.422
	20	1.597	1.455	1.312	1.237	1.386	2.206
	30	2.181	1.885	1.744	1.599	1.696	2.339
1	10	0.671	0.462	0.393	0.341	0.349	0.512
	20	2.261	1.815	1.579	1.591	1.663	2.245
	30	3.251	2.701	2.394	2.189	2.201	2.401



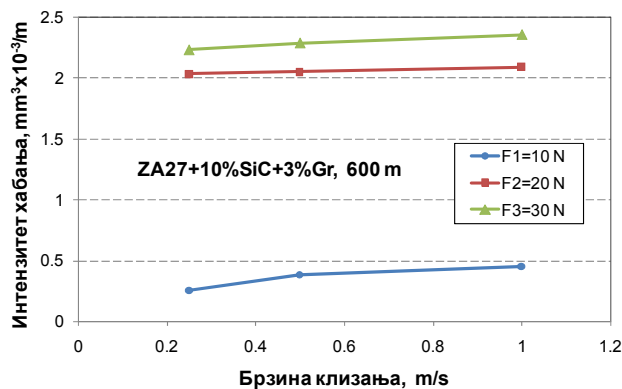
Слика 5.49 Интензитет хабања у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC+1%Gr



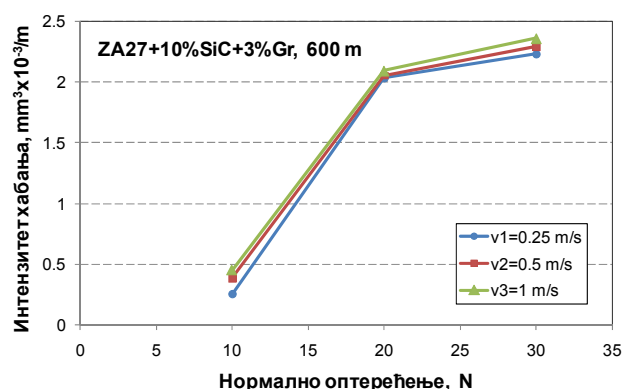
Слика 5.50 Интензитет хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC+1%Gr

Табела 5.10 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, без подмазивања

ZA 27+10%SiC+3%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-3} / \text{m}$					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.321	0.246	0.201	0.172	0.158	0.252
	20	0.702	0.639	0.642	0.667	0.757	2.033
	30	1.253	1.237	1.096	1.089	1.089	1.294
0,5	10	0.503	0.351	0.264	0.239	0.254	0.384
	20	1.298	1.161	1.125	0.998	1.211	2.051
	30	1.872	1.771	1.541	1.395	1.555	2.288
1	10	0.616	0.477	0.377	0.321	0.323	0.451
	20	2.291	1.794	1.541	1.458	1.544	2.091
	30	2.939	2.551	2.301	2.071	2.056	2.358



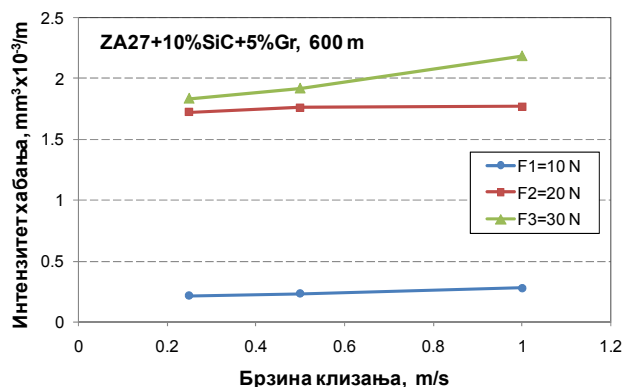
Слика 5.51 Интензитет хабања у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC+3%Gr



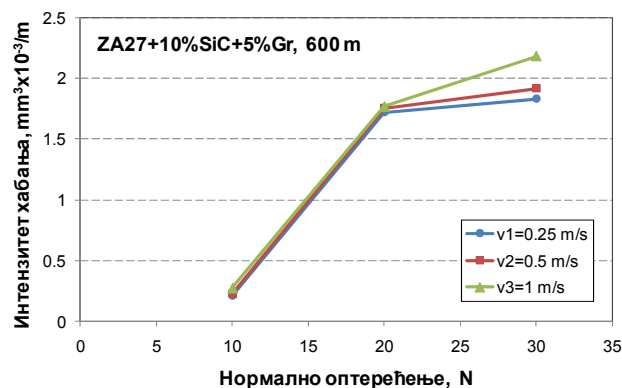
Слика 5.52 Интензитет хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC+3%Gr

Табела 5.11 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, без подмазивања

ZA 27+10%SiC+5%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-3} / \text{m}$					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.156	0.137	0.131	0.117	0.111	0.211
	20	0.726	0.611	0.553	0.522	0.653	1.721
	30	1.154	0.988	0.954	0.931	1.154	1.833
0,5	10	0.297	0.254	0.207	0.179	0.161	0.229
	20	1.109	0.916	0.872	0.895	1.131	1.758
	30	1.691	1.512	1.346	1.253	1.353	1.917
1	10	0.578	0.406	0.333	0.285	0.245	0.275
	20	1.775	1.218	1.077	0.991	1.292	1.768
	30	2.615	2.418	2.196	1.895	1.801	2.295



Слика 5.53 Интензитет хабања у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC+5%Gr



Слика 5.54 Интензитет хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC+5%Gr

Величина критичне похабаности елемената трибо-механичког система, било које врсте, одређена је величином изабраног параметра хабања која се јавља на крају друге фазе хабања. У индустријској пракси, развој процеса хабања дозвољава се само до краја поменуте фазе, односно до тренутка када почиње фаза катастрофалног хабања. У складу са наведеним, и на основу искустава из публикованих радова, усвојена је вредност дужине пута клизања од 600 m.

На добијеним кривама хабања и кривама интензитета хабања могу се уочити периоди уходавања, односно интензивног хабања, као и фазе са умереним хабањем и константним растом запремине похабаног материјала. После 450 до 500 m пута клизања, интензитет хабања почиње поново да расте, што говори да се материјал приближава фази интензивног (разорног) хабања. Исте зависности јављају се за све три брзине клизања и сва три нивоа оптерећења.

5.1.2 Коefицијент трења

За све материјала, током трајања контакта између блока и диска, сниман је сигнал коefицијента трења. Експерименти су вршени уз варирање три нивоа нормалног контактеног оптерећења и три нивоа брзине клизања, као што је раније наведено. Добијен је континуални сигнал на дужини пута клизања од 600 m. Сва испитивања су понављана по три пута а коначни резултати су добијени као њихове средње аритметичке вредности.

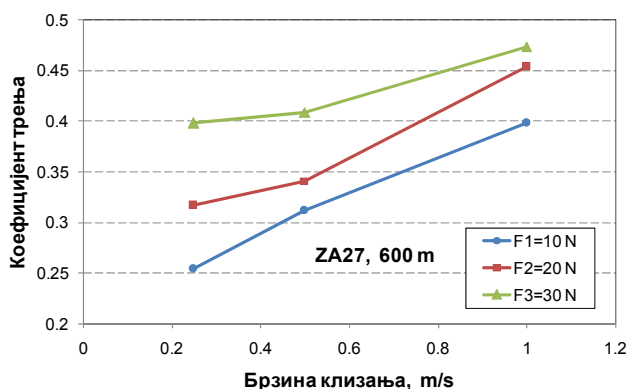
Одговарајући резултати овако спроведених испитивања приказани су у табелама 5.12 до 5.20. На основу ових вредности, формиране су дијаграмске зависности коefицијента трења од брзине клизања и нормалног контактеног оптерећења у условима без подмазивања, слике 5.55 до 5.72.

Вредности коefицијента трења за основни материјал, легуру ZA27, наведене су у табели 5.12. Коefицијент трења се налази у границама од $0.254 \div 0.473$.

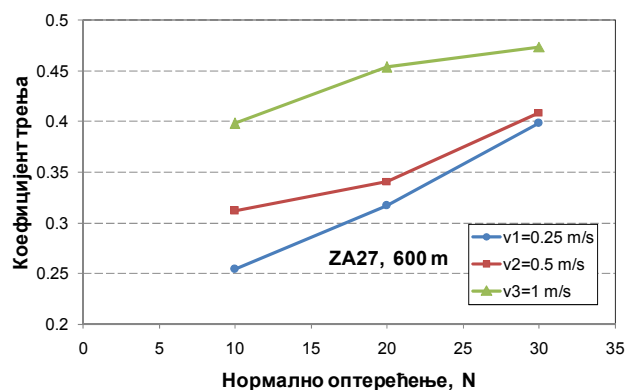
Табела 5.12 ZA27, на путу клизања од 600 m, без подмазивања

v, m/s	F, N	Коефицијент трења
0,25	10	0.2537
	20	0.3168
	30	0.3978
0,5	10	0.3115
	20	0.3408
	30	0.4087
1	10	0.3977
	20	0.4532
	30	0.4731

Графички приказ зависности коефицијента трења у функцији брзине клизања дат је слици 5.55. Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења приказан је на слици 5.56.



Слика 5.55 Коефицијент трења у функцији брзине клизања – ZA27



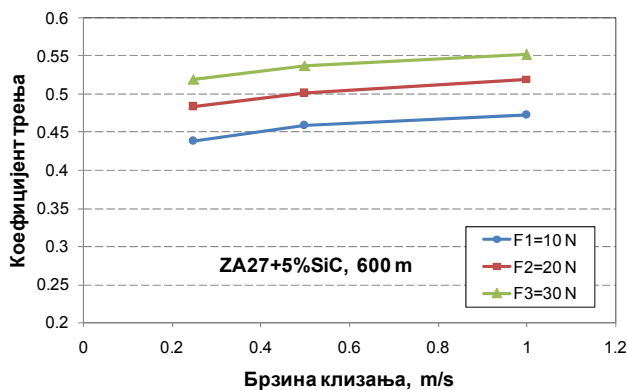
Слика 5.56 Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења – ZA27

Табела 5.13 ZA27+ 5%SiC, на путу клизања од 600 m, без подмазивања

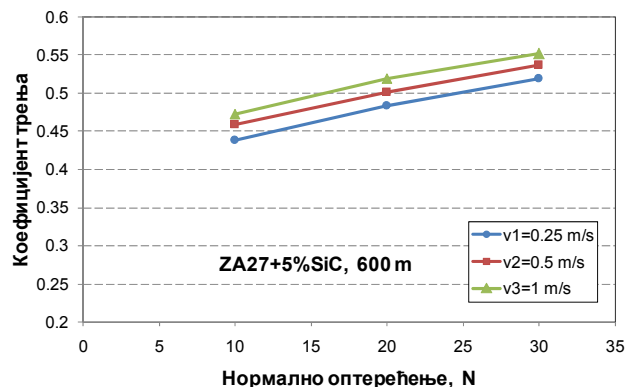
v, m/s	F, N	Коефицијент трења
0,25	10	0.4377
	20	0.4832
	30	0.5192
0,5	10	0.4584
	20	0.5012
	30	0.5369
1	10	0.4724
	20	0.5196
	30	0.5514

Вредности коефицијента трења за композит са 5%SiC, наведене су у табели 5.13.

Коефицијент трења у функцији брзине клизања дат је на слици 5.57. Зависност коефицијента трења од нормалног оптерећења приказана је сликом 5.58. Као и код основног материјала, вредност коефицијента трења опада и са повећањем оптерећења и са повећањем брзине клизања.



Слика 5.57 Коефицијент трења у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC



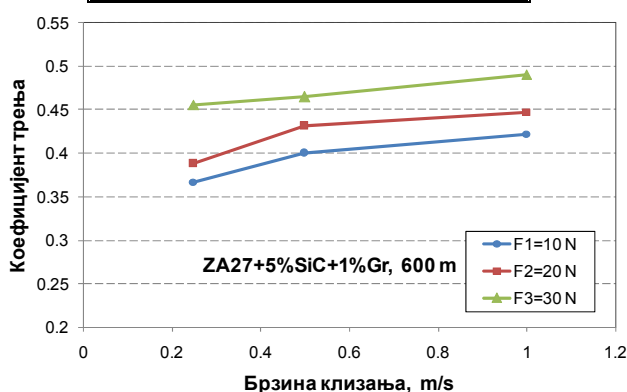
Слика 5.58 Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC

Табела 5.14 ZA27+5%SiC+1%Gr, на путу клизања од 600 m, без подмазивања

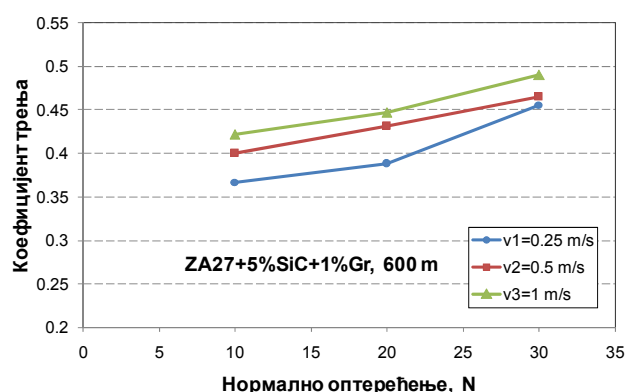
v, m/s	F, N	Коефицијент трења
0,25	10	0.3667
	20	0.3878
	30	0.4554
0,5	10	0.4001
	20	0.4306
	30	0.4644
1	10	0.4221
	20	0.4471
	30	0.4901

У табели 5.14 дате су вредности коефицијента трења за хибридни композит који садржи 5%SiC и 1% графита.

Зависност коефицијента трења од брзине клизања приказана је слици 5.59. Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења приказан је на слици 5.60.



Слика 5.59 Коефицијент трења у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC+1%Gr



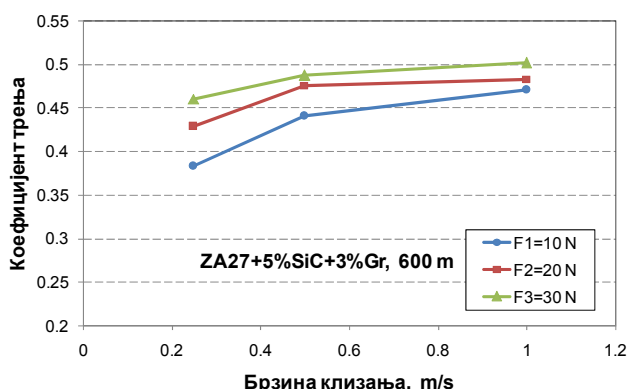
Слика 5.60 Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC+1%Gr

Табела 5.15 ZA27+5%SiC+3%Gr, на путу клизања од 600 m, без подмазивања

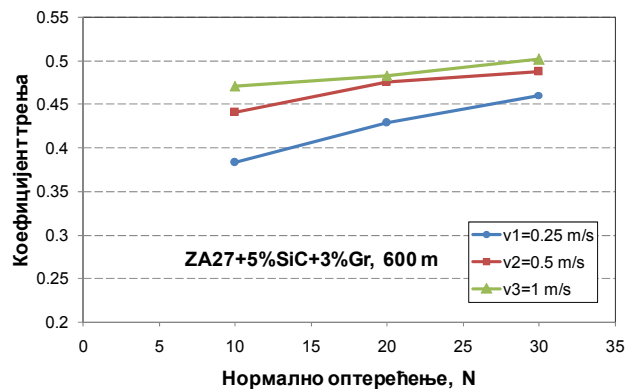
v, m/s	F, N	Коефицијент трења
0,25	10	0.3827
	20	0.4283
	30	0.4605
0,5	10	0.4409
	20	0.4759
	30	0.4873
1	10	0.4706
	20	0.4831
	30	0.5017

Вредности коефицијента трења за хибридни композит који има 5%SiC и 3% графита наведене су у табели 5.15.

Дијаграм зависности коефицијента трења од брзине клизања дат је слици 5.61. Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења приказан је на слици 5.62.



Слика 5.61 Коефицијент трења у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC+3%Gr



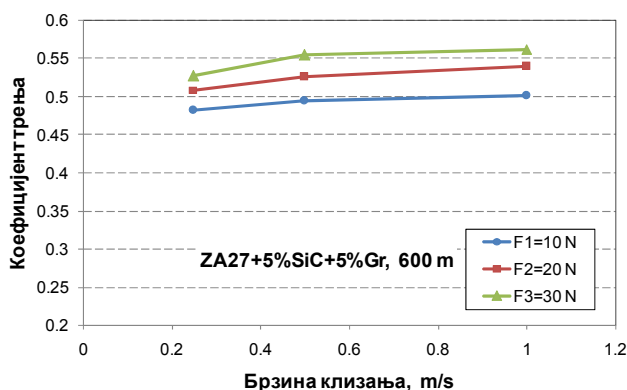
Слика 5.62 Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC+3%Gr

Табела 5.16 ZA27+5%SiC+5%Gr, на путу клизања од 600 m, без подмазивања

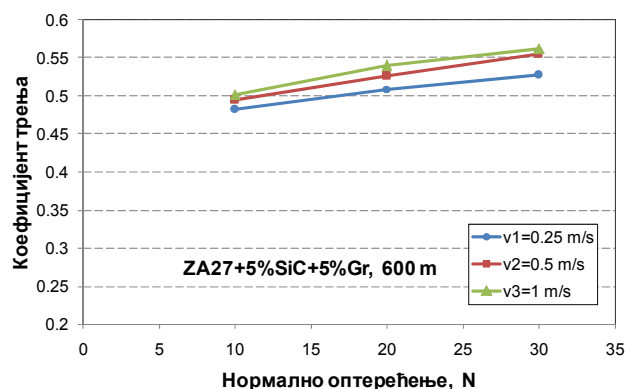
v, m/s	F, N	Коефицијент трења
0,25	10	0.4815
	20	0.5086
	30	0.5266
0,5	10	0.4938
	20	0.5256
	30	0.5542
1	10	0.5011
	20	0.5392
	30	0.5618

Вредности коефицијента трења за хибридни композит који садржи 5%SiC и 5% графита наведене су у табели 5.16.

Коефицијент трења у функцији брзине клизања дат је на слици 5.63. Зависност коефицијента трења од нормалног оптерећења приказана је на слици 5.64.



Слика 5.63 Коефицијент трења у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC+5%Gr



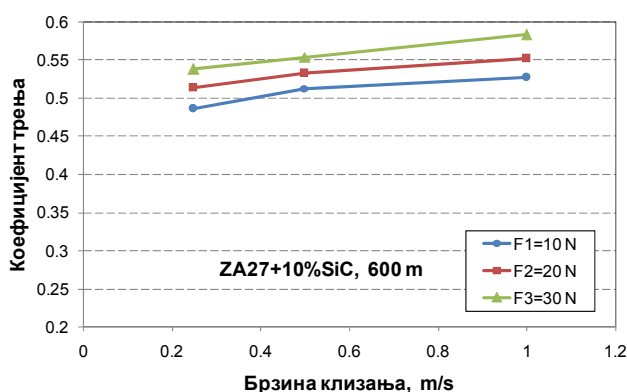
Слика 5.64 Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC+5%Gr

Табела 5.17 ZA27+10%SiC, на путу клизања од 600 m, без подмазивања

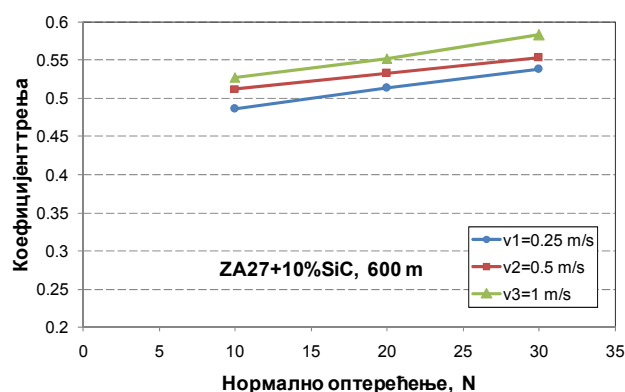
v, m/s	F, N	Коефицијент трења
0,25	10	0.4861
	20	0.5134
	30	0.5378
0,5	10	0.5128
	20	0.5324
	30	0.5535
1	10	0.5271
	20	0.5519
	30	0.5831

У табели 5.17 дате су вредности коефицијента трења за композит који садржи 10% силицијум карбида.

Дијаграм зависност коефицијента трења од брзине клизања дат је слици 5.65. Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења приказан је на слици 5.66.



Слика 5.65 Коефицијент трења у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC



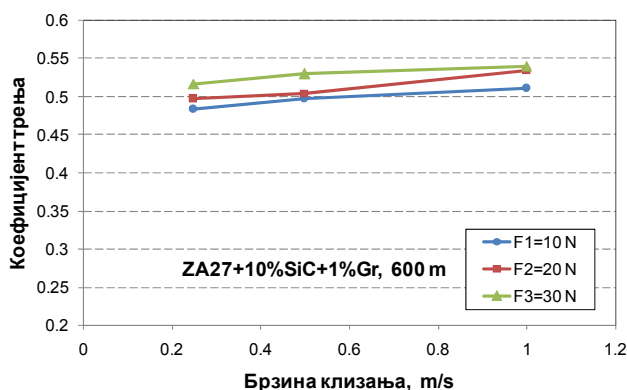
Слика 5.66 Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC

Табела 5.18 ZA27+10%SiC+1%Gr, на путу клизања од 600 m, без подмазивања

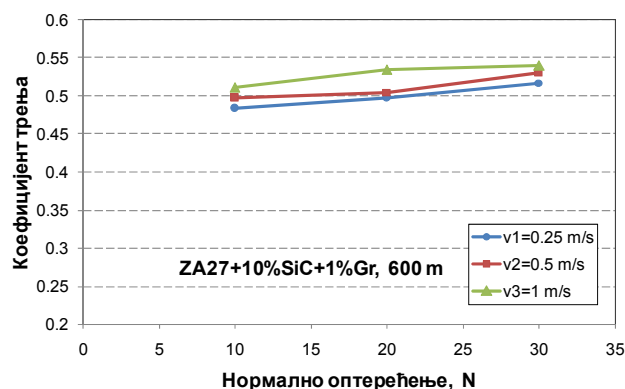
v, m/s	F, N	Коефицијент трења
0,25	10	0.4831
	20	0.4969
	30	0.5169
0,5	10	0.4971
	20	0.5046
	30	0.5297
1	10	0.5109
	20	0.5346
	30	0.5402

У табели 5.18 дате су вредности коефицијента трења за хибридни композит који садржи 10%SiC и 1% графита.

Графички приказ зависности коефицијента трења од брзине клизања дат је слици 5.67. Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења приказан је на слици 5.68.



Слика 5.67 Коефицијент трења у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC+1%Gr



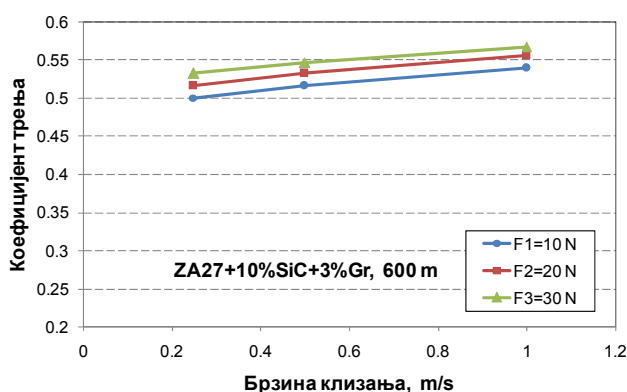
Слика 5.68 Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC+1%Gr

Табела 5.19 ZA27+10%SiC+3%Gr, на путу клизања од 600 m, без подмазивања

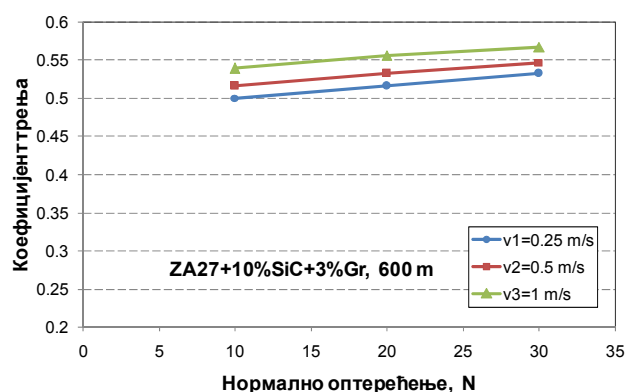
v, m/s	F, N	Коефицијент трења
0,25	10	0.5002
	20	0.5159
	30	0.5321
0,5	10	0.5157
	20	0.5321
	30	0.5469
1	10	0.5392
	20	0.5561
	30	0.5677

Вредности коефицијента трења за хибридни композит који садржи 10%SiC и 3% графита наведене су у табели 5.19.

Коефицијент трења у функцији брзине клизања дат је на слици 5.69. Зависност коефицијента трења од нормалног оптерећења приказана је сликом 5.70.



Слика 5.69 Коефицијент трења у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC+3%Gr



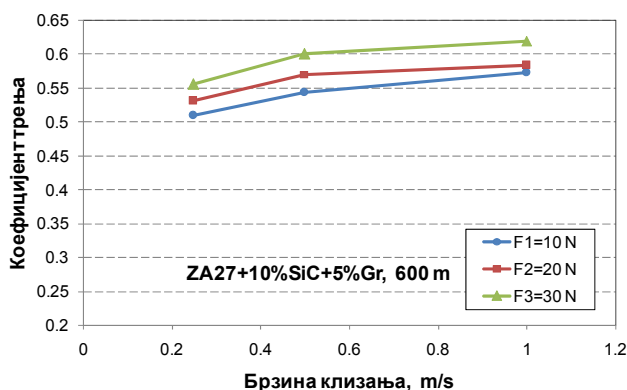
Слика 5.70 Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC+3%Gr

Табела 5.20 ZA27+10%SiC+5%Gr, на путу клизања од 600 m, без подмазивања

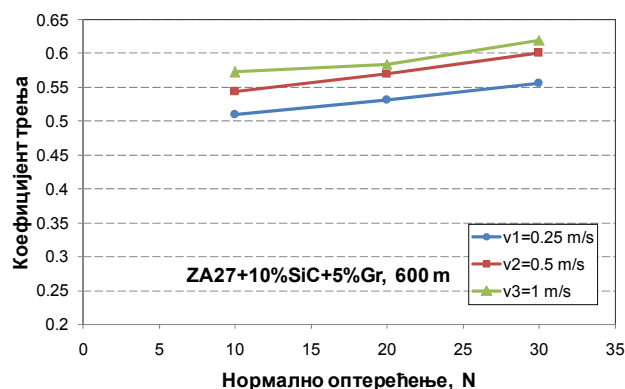
v, m/s	F, N	Коефицијент трења
0,25	10	0.5092
	20	0.5311
	30	0.5553
0,5	10	0.5431
	20	0.5702
	30	0.5998
1	10	0.5723
	20	0.5837
	30	0.6191

Вредности коефицијента трења за хибридни композит који садржи 10%SiC и 5% графита наведене су у табели 5.20.

Коефицијент трења у функцији брзине клизања дат је на слици 5.71. Зависност коефицијента трења од нормалног оптерећења приказана је сликом 5.72.



Слика 5.71 Коефицијент трења у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC+5%Gr



Слика 5.72 Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC+5%Gr

Из дијаграма датих на сликама 5.55 до 5.72 уочено је да са порастом нормалног контактеног оптерећења у условима без подмазивања коефицијент трења расте за све испитиване материјале. Такође, у условима без подмазивања, пораст брзине клизања условљава и пораст коефицијента трења код свих испитиваних контактних парова. При промени режима испитивања, тј нормалног контактеног оптерећења, односно брзине клизања сви испитивани материјали реагују на исти начин.

Повећањем брзине клизања уочен је интензивнији пораст коефицијента трења код основног материјала него код композитних материјала. Истоветно понашање уочено је и при порасту нормалног контактеног оптерећења.

У погледу утицаја силицијум карбида на коефицијент трења, видљиво је да се његовим додавањем повећавају вредности коефицијент трења. Тако, композит са 10%SiC има виши коефицијент трења у односу на композит са садржајем 5%SiC. Најмањи коефицијент трења добијен је код основног материјала, легуре ZA27.

Додавањем графита мењају се фрикционе карактеристике испитиваних хибридни композита. У погледу понашања хибридни композита, додавањем графита, коефицијент трења расте, тако да највише вредности коефицијент трења има хибридни композит са 10%SiC и 5% графита.

5.2 Резултати истраживања у условима са подмазивањем

5.2.1 Хабање (криве хабања, ширина трага хабања, интензитет хабања)

У циљу праћења развоја процеса хабања, за све испитиване материјале добијене су експерименталне криве хабања. Испитивања су вршена у условима са подмазивањем, у варираним условима контакта са аспекта контактнoг оптерећења, брзине и пута клизања. Тестови су вршени уз варирање три нивоа нормалног контактнoг оптерећења и три нивоа брзине клизања:

- нормално оптерећење: 40 N, 80 N и 120 N;
- брзина клизања: 0.25 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s.

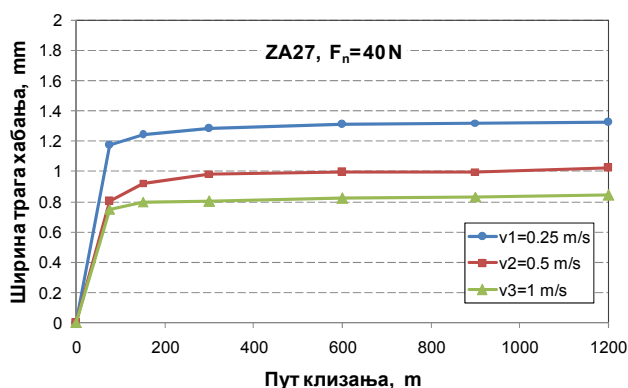
Дужина пута клизања за све материјале износила је 1200m. Као основни параметар хабања за формирање кривих хабања коришћена је ширина трага хабања на контактнoј површини испитиваног блока. Код композитних материјала се, после 60, 150, 300, 600 и 1200 метара прекидао процес трења блока по диску и мерила се ширина трага хабања на блоку. Код узорка од легуре ZA27 ови интервали су били 75, 150, 300, 600, 900 и 1200m.

Измерене вредности ширине трагова хабања у условима са подмазивањем, за све посматране материјала, дате су у прилогу (табеле П.19 до П.27). Вредности ширина трагова хабања које су дате у табелама представљају средње вредности добијене после извршена три испитивања при истим радним режимима. На основу поменутих резултата мерења формиране су одговарајуће зависности промене ширине трага хабања у функцији пута клизања – криве хабања. Ове експерименталне криве којима се региструје развој процеса хабања на сваком испитиваном узорку од композирног материјала и узорку од ZA27 легуре, приказане су у прилогу на сликама П.109 до П.162.

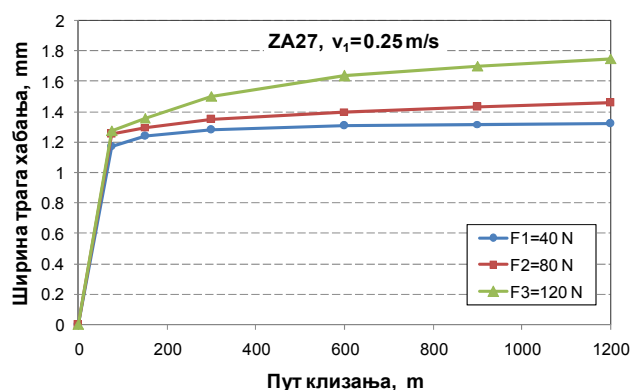
Овде су ради сагледавања стања хабања, наведене само вредности које се односе на базни материјал, легуру ZA27 и изабрани композит, ZA27+5%SiC+1%Gr и приказане су у табелама 5.21 и 5.22. На основу измерених ширина трагова хабања формиране су криве хабања као функције промене ширине трага хабања у зависности од пута клизања. За поменуте материјале ове експерименталне криве су приказане на сликама 5.73 до 5.78 (за легуру ZA27) и 5.79 до 5.84 (за ZA27+5%SiC+1%Gr).

Табела 5.21 Ширина трага хабања – ZA27, са подмазивањем

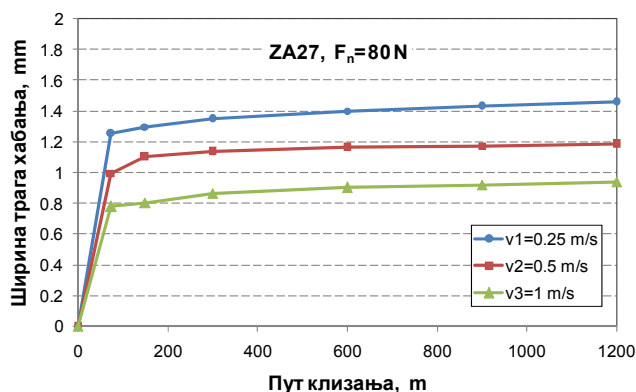
ZA 27		Ширина трага хабања, mm					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		75	150	300	600	900	1200
0,25	40	1.171	1.241	1.281	1.309	1.319	1.324
	80	1.253	1.298	1.351	1.402	1.431	1.461
	120	1.275	1.359	1.502	1.636	1.701	1.751
0,5	40	0.803	0.921	0.984	0.996	0.998	1.021
	80	0.997	1.103	1.136	1.164	1.175	1.184
	120	1.011	1.199	1.252	1.302	1.331	1.381
1	40	0.749	0.798	0.801	0.821	0.832	0.843
	80	0.779	0.802	0.865	0.902	0.921	0.942
	120	0.805	0.903	1.021	1.046	1.089	1.112



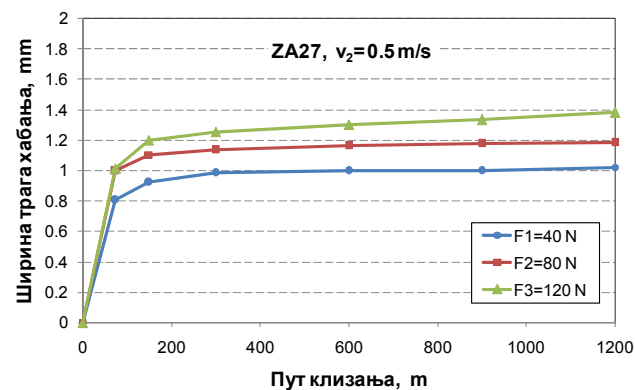
Слика 5.73 Криве хабања – ZA27, $F_1 = 40 \text{ N}$



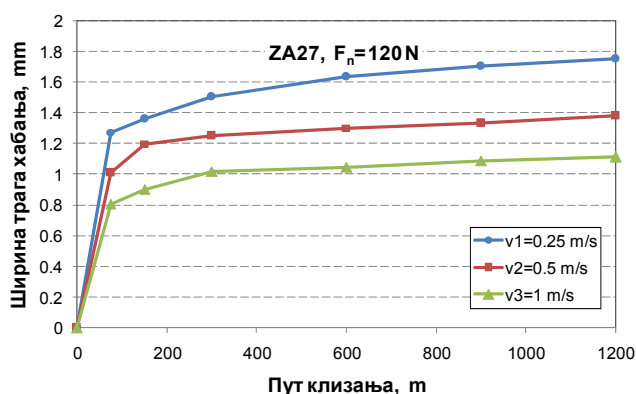
Слика 5.74 Криве хабања – ZA27, $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$



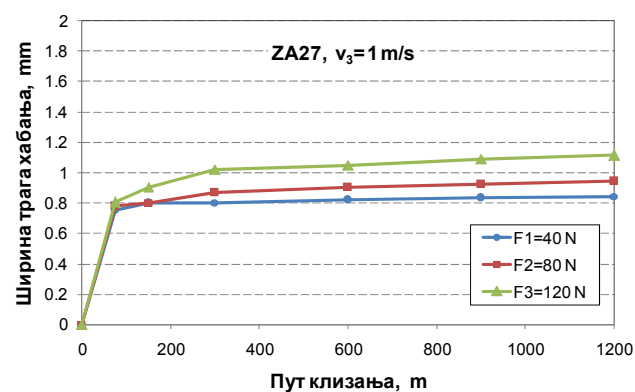
Слика 5.75 Криве хабања – ZA27, $F_2 = 80 \text{ N}$



Слика 5.76 Криве хабања – ZA27, $v_2 = 0.5 \text{ m/s}$



Слика 5.77 Криве хабања – ZA27, $F_3 = 120 \text{ N}$

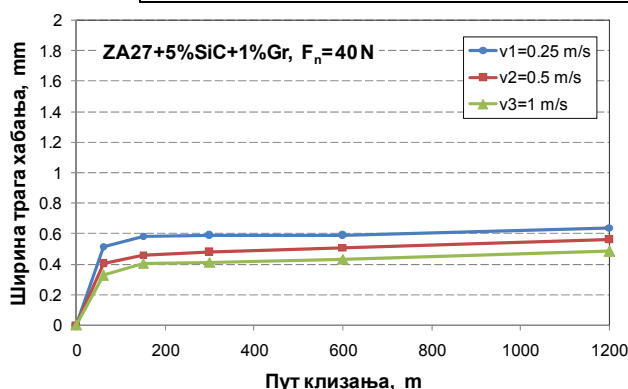


Слика 5.78 Криве хабања – ZA27, $v_3 = 1 \text{ m/s}$

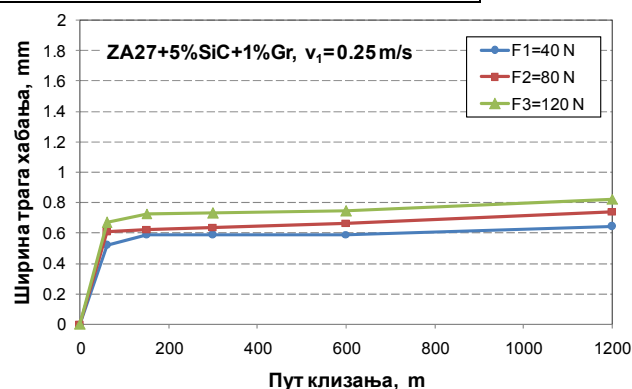
Добијене криве хабања имају облик који је сагласан са теоријским моделима процеса хабања. Из добијених дијаграма може се закључити да свим испитиваним материјалима у свим условима контакта одговара истоветна природа развоја процеса хабања. Јасно се може уочити зона иницијалног, интензивног хабања која одговара периоду уходавања контактних површина и зона устаљеног, умереног хабања када се одвија равномерно хабање. Оваква природа процеса хабања може се објаснити и самом геометријом контакта [1,4]. Наиме, при самом почетку трења остварује се линијски контакт блока по диску, при чему се јављају велика специфична механичка и топлотна оптерећења. Она изазивају интензивно хабање блока, с обзиром да је његова тврдоћа знатно мања од тврдоће диска. Даљим развојем процеса хабања овај контакт се претвара у површински, додир између блока и диска постаје комфоран, што ствара услове за увлачење уља између контактних површина. Као резултат свега, долази до значајног смањења интензитета хабања.

Табела 5.22 Ширина трага хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, са подмазивањем

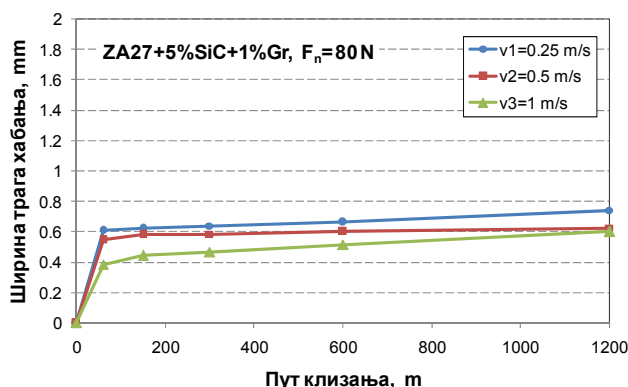
ZA 27+5%SiC+1%Gr		Ширина трага хабања, mm				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	0.515	0.584	0.585	0.588	0.639
	80	0.609	0.623	0.638	0.664	0.741
	120	0.666	0.724	0.729	0.743	0.822
0,5	40	0.401	0.461	0.476	0.508	0.561
	80	0.545	0.579	0.585	0.601	0.626
	120	0.592	0.634	0.661	0.698	0.746
1	40	0.326	0.402	0.411	0.432	0.483
	80	0.382	0.443	0.466	0.513	0.601
	120	0.541	0.612	0.635	0.671	0.714



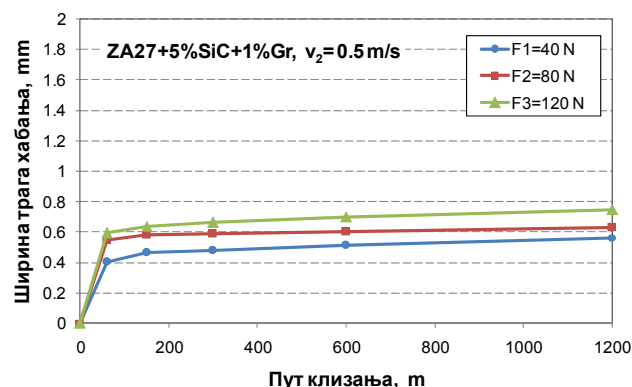
Слика 5.79 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, F₁ = 40 N



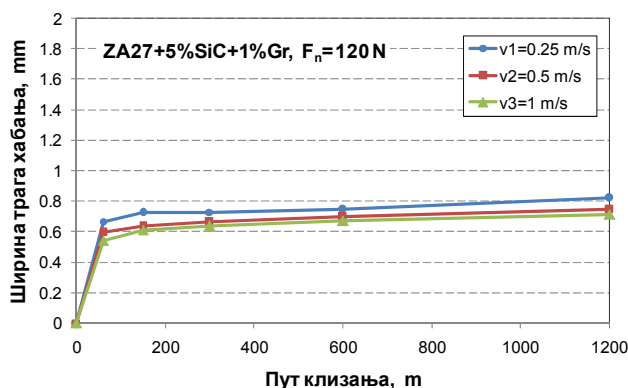
Слика 5.80 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, v₁ = 0.25 m/s



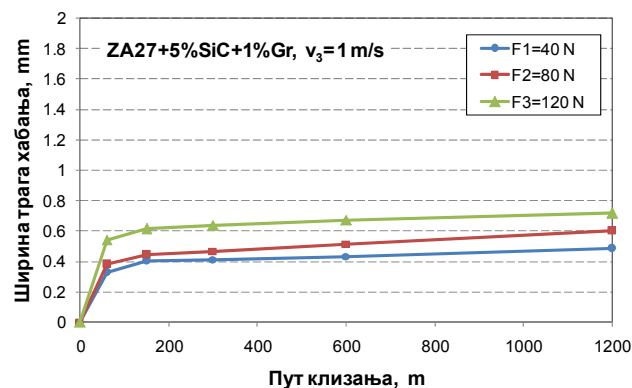
Слика 5.81 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, F₂ = 80 N



Слика 5.82 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, v₂ = 0.5 m/s

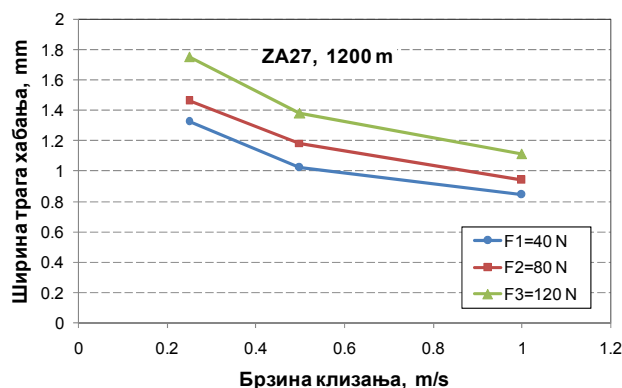


Слика 5.83 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, F₃ = 120 N

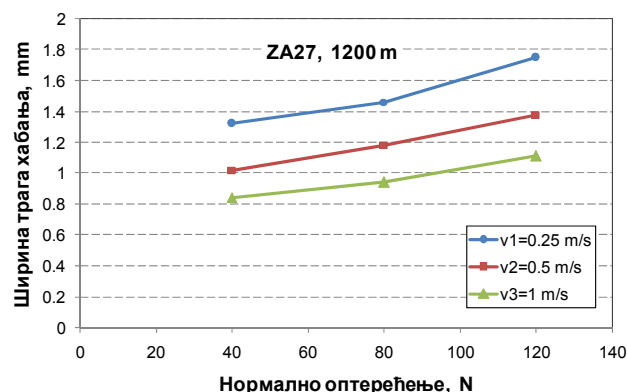


Слика 5.84 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, v₃ = 1 m/s

Зависности ширине трага хабања од брзине клизања и нормалног оптерећења, за основни материјал, легуру ZA27, приказане су на сликама 5.85 и 5.86, респективно. Може се уочити да са порастом брзине, опада вредност ширине трага хабања, док са порастом нормалног оптерећења, расте и хабање испитиваног основног материјала.

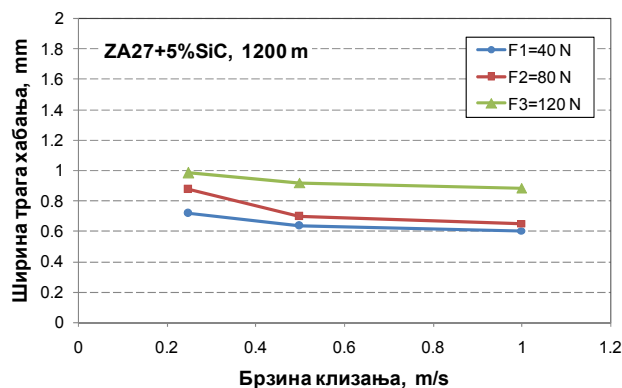


Слика 5.85 Ширина трага хабања у функцији брзине клизања – ZA27

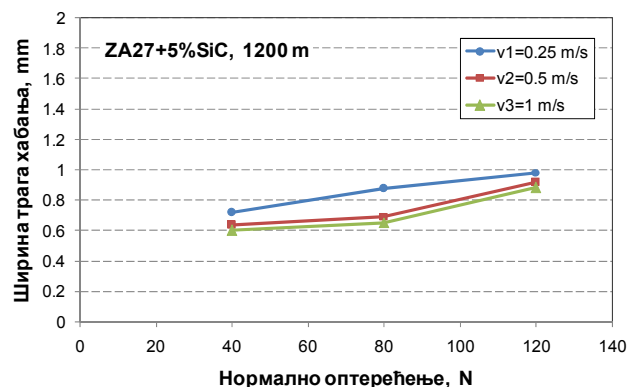


Слика 5.86 Ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27

Као и код основног материјала, код композитних материјала криве хабања су формиране у зависности од пута клизања, за различите вредности оптерећења и брзине клизања. Код композита који садржи 5%SiC, ширина трага хабања у функцији брзине клизања приказана је на слици 5.87, док је ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења дата на слици 5.88.

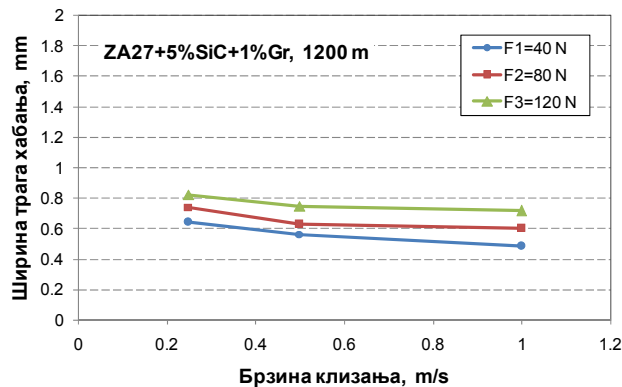


Слика 5.87 Ширина трага хабања у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC

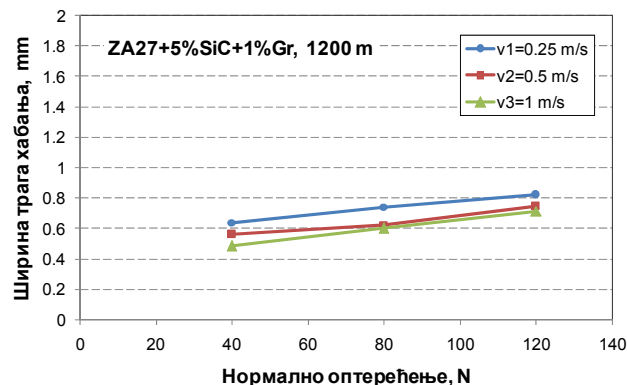


Слика 5.88 Ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC

Вредности ширине трагова хабања за композит који садржи 5%SiC и 1% графита дате су у табели 5.22 а криве хабања су приказане на сликама 5.83 до 5.88. Слика 5.89 даје зависност ширине трага хабања од брзине клизања, док је ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења представљена сликом 5.90.

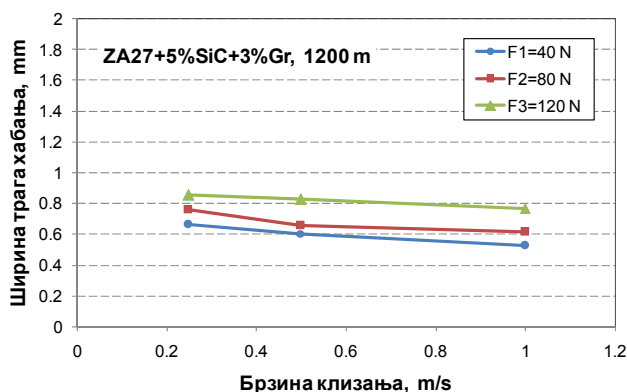


Слика 5.89 Ширина трага хабања у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC+1%Gr

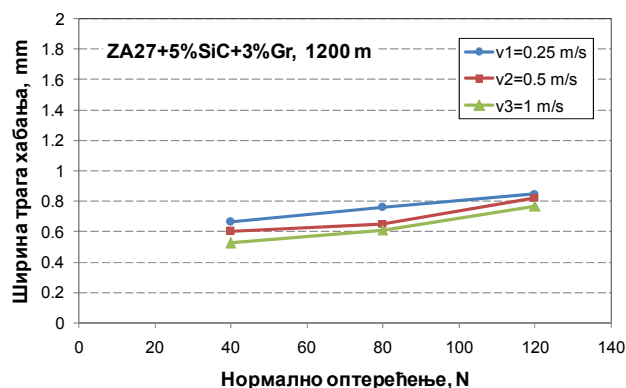


Слика 5.90 Ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC+1%Gr

За хибридни композит који садржи 5%SiC и 3%Gr, утицај брзине клизања на ширину трага хабања истакнут је на слици 5.91 а утицај нормалног оптерећења на слици 5.92.

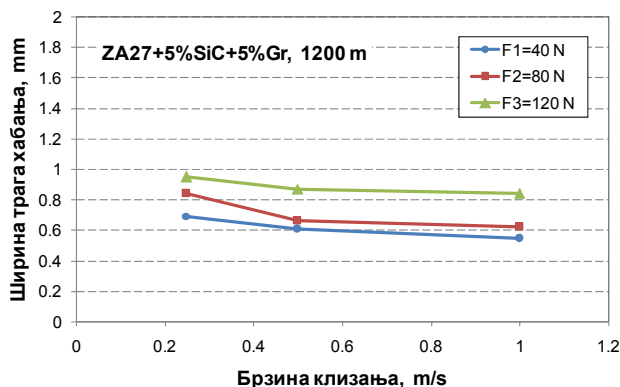


Слика 5.91 Ширина трага хабања у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC+3%Gr

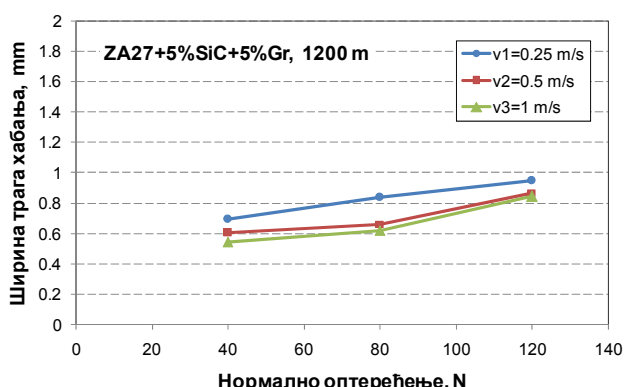


Слика 5.92 Ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC+3%Gr

Код композита са садржајем 5%SiC и 5% графита зависности ширине трага хабања од брзине клизања и нормалног оптерећења, дате су на сликама 5.93. и 5.94, респективно.

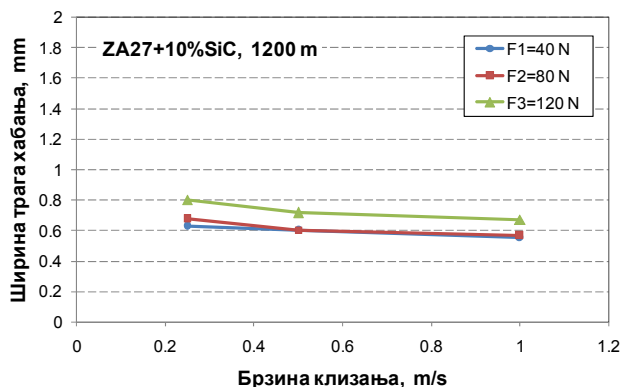


Слика 5.93 Ширина трага хабања у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC+5%Gr

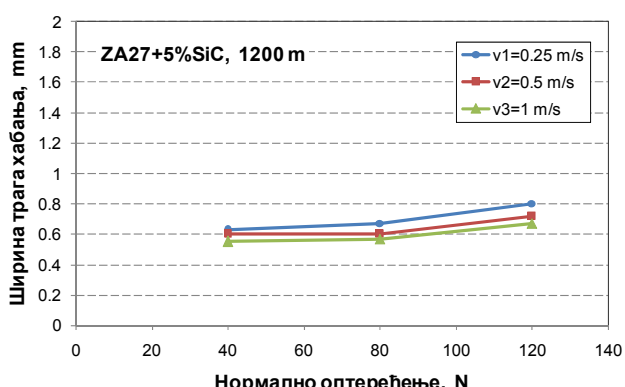


Слика 5.94 Ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC+5%Gr

За композит који садржи 10%SiC, утицај брзине клизања на ширину трага хабања дат је на слици 5.95, а утицај нормалног оптерећења на слици слици 5.96.

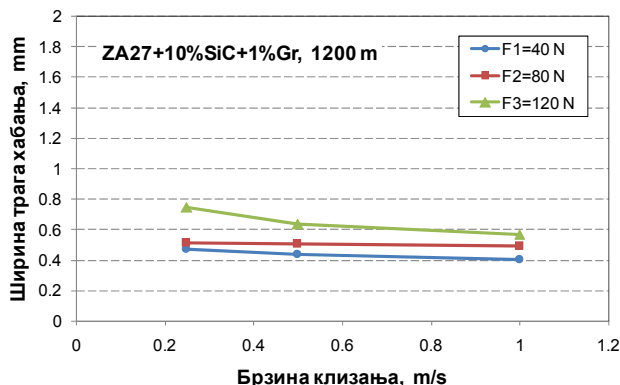


Слика 5.95 Ширина трага хабања у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC

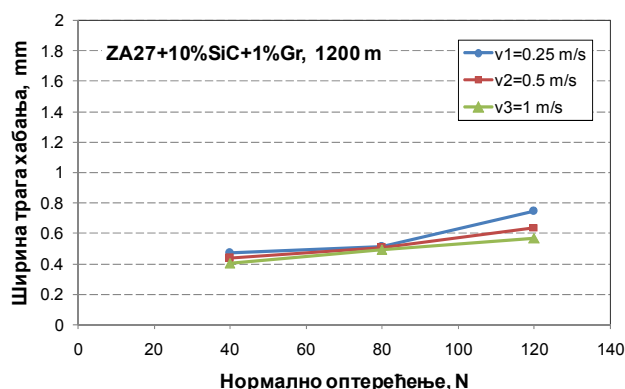


Слика 5.96 Ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC

На слици 5.97 је дијаграм зависности ширине трага хабања од брзине клизања а на слици 5.98 приказ зависности ширине трага хабања од нормалног оптерећења за хибридни композит који садржи 10%SiC и 1% графита.

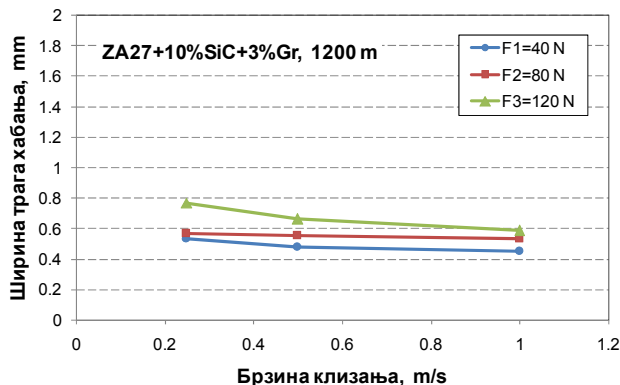


Слика 5.97 Ширина трага хабања у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC+1%Gr

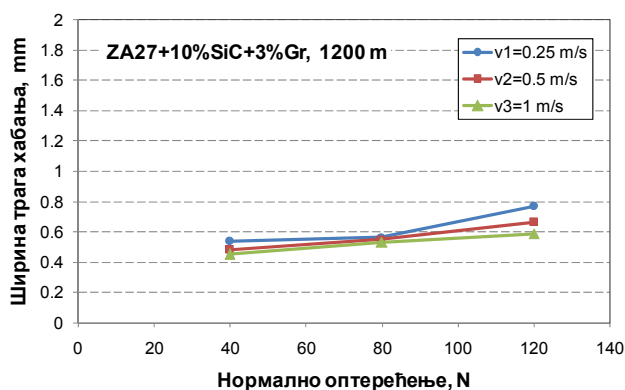


Слика 5.98 Ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC+1%Gr

Код хибридног композита који садржи 10%SiC и 3%Gr, утицај брзине клизања на ширину трага хабања приказан је на слици 5.99 а утицај нормалног оптерећења на ширину трага хабања на слици 5.100.

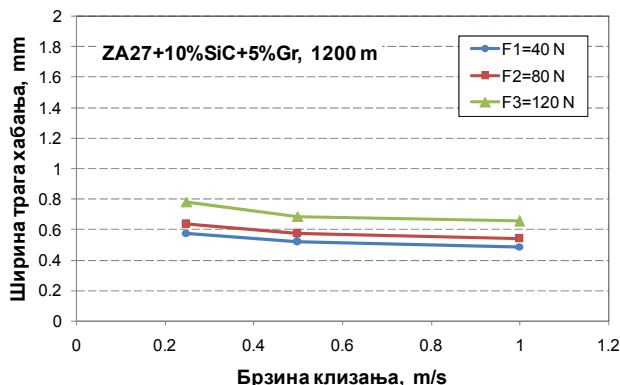


Слика 5.99 Ширина трага хабања у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC+3%Gr

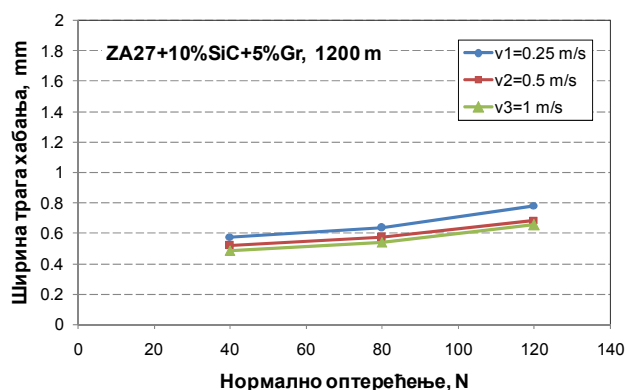


Слика 5.100 Ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC+3%Gr

Зависност ширине трага хабања од брзине клизања код хибридног композита са највишим садржајем силицијум карбида и графита, дата је на слици 5.101. Ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења приказана је на слици 5.102.



Слика 5.101 Ширина трага хабања у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC+5%Gr



Слика 5.102 Ширина трага хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC+5%Gr

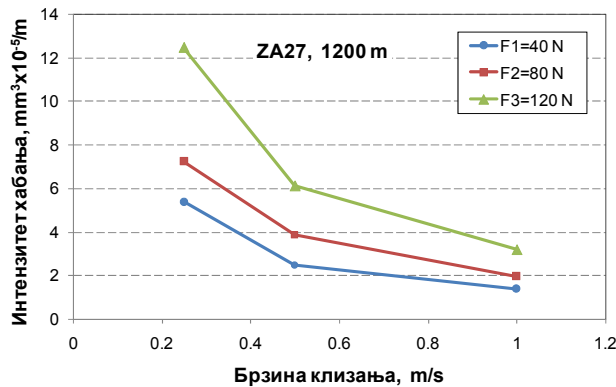
На основу добијених дијаграма уочава се да код свих испитиваних материјала ширина трага хабања опада са повећањем брзине клизања, али да расте са повећањем нормалног оптерећења. Ширине трагова хабања испитиваних композитних материјала су мање у односу на ширине трагова хабања основног материјала за исте услове испитивања.

Вредности запремина похабаног материјала за испитиване узорке, у условима са подмазивањем, су израчунате на основу измерених ширина трагова хабања. На основу запремина похабаног материјала, израчунати су интензитети хабања у функцији пута клизања у условима са подмазивањем за све испитиване материјале и дати у прилогу у оквиру табела (табеле 8.28 до 8.36) и дијаграма (слике П.163 до 8.216).

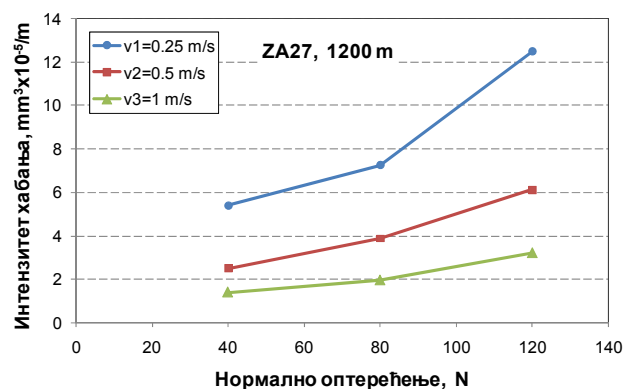
Вредности интензитета хабања за основни материјал ZA27 дати су у табели 5.23 у зависности од брзине клизања, нормалног оптерећења и пута клизања. На основу вредности интензитета хабања, за пут клизања од 1200 m, приказана је зависност интензитета хабања у функцији брзине клизања (слика 5.103) и зависност интензитета хабања у функцији нормалног оптерећења (слика 5.104).

Табела 5.23 Интензитет хабања – ZA27, са подмазивањем

ZA 27		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-5} / \text{m}$					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		75	150	300	600	900	1200
0,25	40	59.661	35.508	19.527	10.418	7.106	5.391
	80	73.096	40.631	22.907	12.801	9.075	7.243
	120	77.015	46.634	31.482	20.343	15.245	12.472
0,5	40	19.235	14.512	8.849	4.616	3.077	2.471
	80	34.647	24.929	13.617	7.325	5.023	3.854
	120	38.392	32.023	18.231	10.252	7.302	6.117
1	40	15.609	9.439	4.773	2.569	1.783	1.386
	80	17.561	9.582	3.408	3.408	2.419	1.941
	120	19.379	13.677	9.857	5.315	3.999	3.193



Слика 5.103 Интензитет хабања у функцији брзине клизања – ZA27

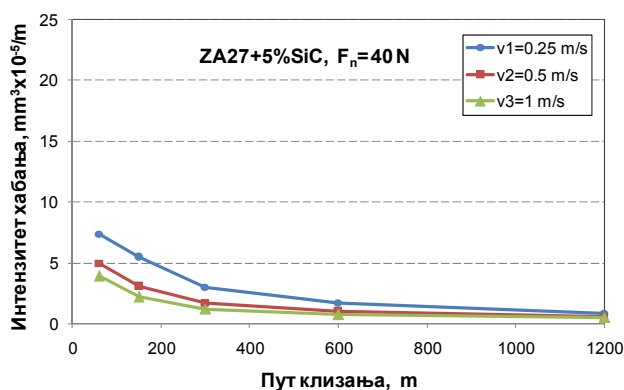


Слика 5.104 Интензитет хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27

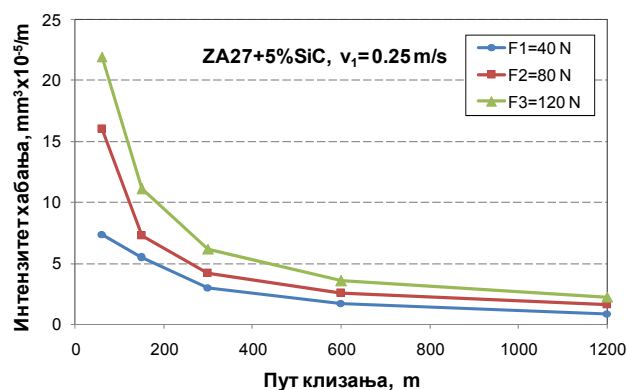
У оквиру овог поглавља, у табели 5.24, као илустративне дате су вредности интензитета хабања за композит ZA27+5%SiC. На основу података из табеле, приказани су дијаграми интензитета хабања за различите брзине и оптерећења у функцији пута клизања (слике 5.105 до 5.110). Такође су дате графичке зависности интензитета хабања од брзине клизања (за сва три оптерећења) – слика 5.111 и зависност интензитета хабања од нормалног оптерећења (за све три брзине клизања) – слика 5.112.

Табела 5.24 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, са подмазивањем

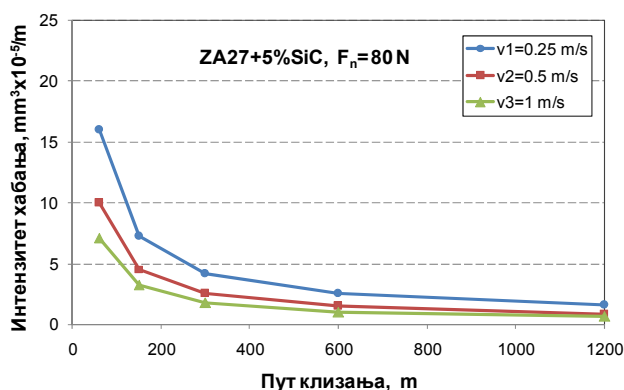
ZA 27+5%SiC		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-5} / \text{m}$				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	7.352	5.437	2.984	1.697	0.855
	80	15.995	7.255	4.174	2.541	1.555
	120	21.951	11.088	6.136	3.522	2.198
0,5	40	4.976	3.006	1.692	0.993	0.594
	80	9.979	4.534	2.526	1.492	0.779
	120	16.972	7.993	4.561	2.684	1.802
1	40	3.874	2.171	1.181	0.699	0.506
	80	7.111	3.244	1.765	1.007	0.641
	120	12.988	6.481	3.687	2.298	1.593



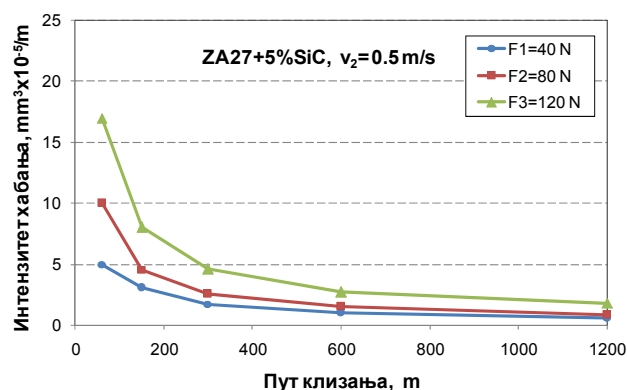
Слика 5.105 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $F_1 = 40 \text{ N}$



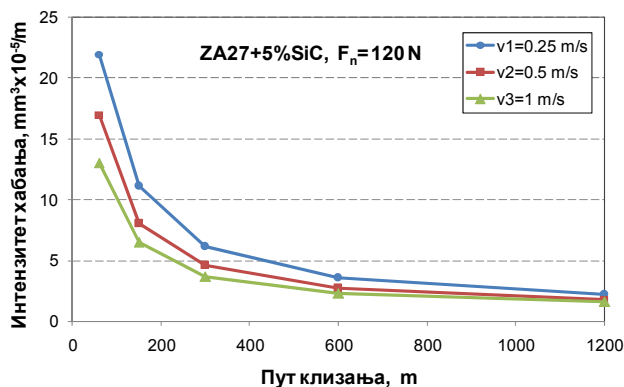
Слика 5.106 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$



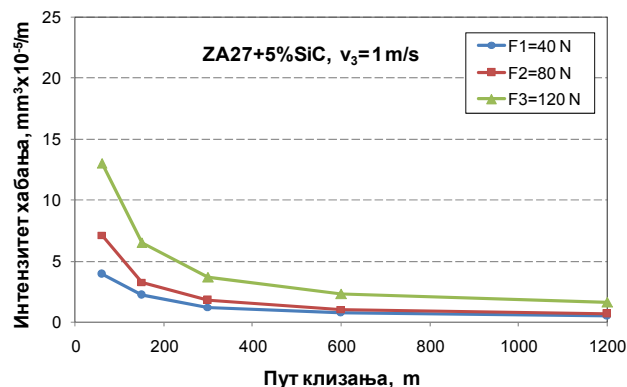
Слика 5.107 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $F_2 = 80 \text{ N}$



Слика 5.108 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $v_2 = 0.5 \text{ m/s}$

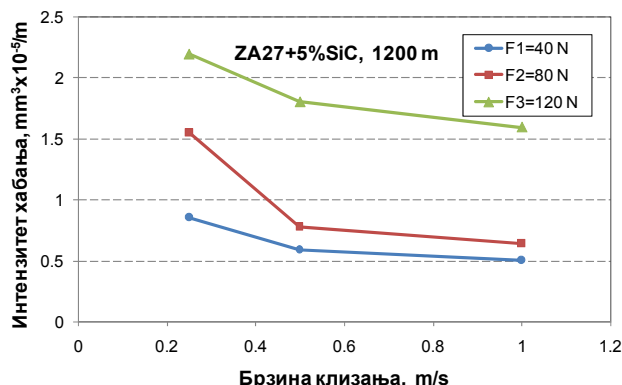


Слика 5.109 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $F_3 = 120 \text{ N}$

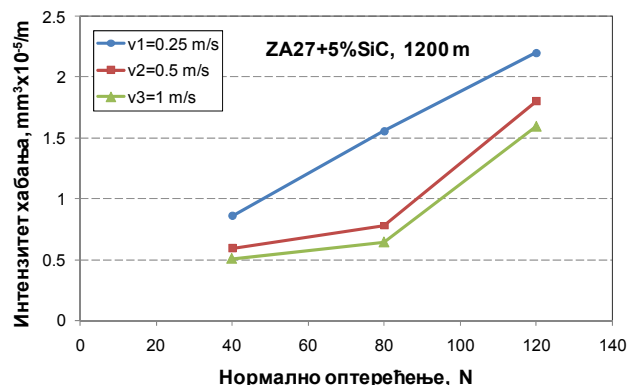


Слика 5.110 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $v_3 = 1 \text{ m/s}$

Зависности интензитета хабања од брзине клизања и нормалног оптерећења, за композит ZA27+5%SiC, приказане су на сликама 5.111. и 5.112, респективно. Уочава се да са порастом нормалног оптерећења расте и интензитет хабања испитиваног материјала, док при повећању брзине клизања интензитет хабања опада.



Слика 5.111 Интензитет хабања у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC

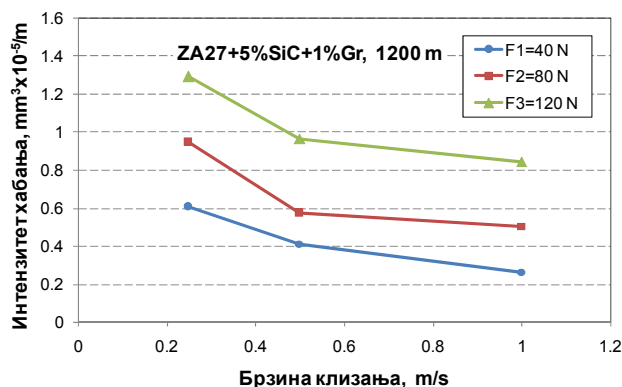


Слика 5.112 Интензитет хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC

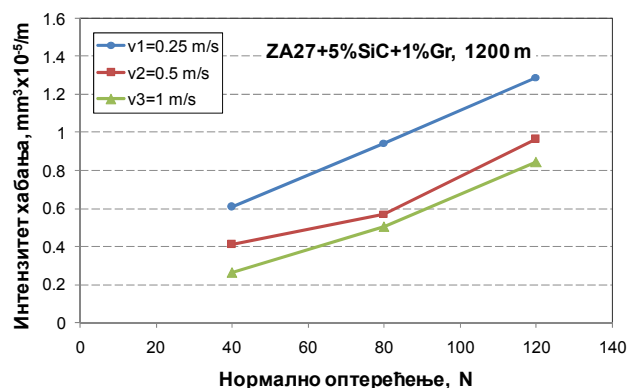
За све остале материјале, предвиђене планом испитивања, формиране су и дијаграмима представљене (у прилогу) одговарајуће криве интензитета хабања. Вредности интензитета хабања за композите који садрже 5% силицијум карбида уз додаток 1%, 3% и 5% графита, наведене су у табелама 5.25, 5.26 и 5.27, респективно. Одговарајуће графичке зависности интензитета хабања у функцији брзине клизања односно нормалног оптерећења дате су у табелама 5.113 до 5.118.

Табела 5.25 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, са подмазивањем

ZA 27+5%SiC+1%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-5} / \text{m}$				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	6.342	3.699	1.859	0.943	0.606
	80	10.487	4.491	2.411	1.359	0.945
	120	13.707	7.049	3.597	1.905	1.291
0,5	40	2.993	1.819	1.001	0.608	0.411
	80	7.516	3.605	1.859	1.007	0.571
	120	9.633	4.733	2.682	1.579	0.964
1	40	1.609	1.207	0.644	0.374	0.262
	80	2.588	1.615	0.939	0.627	0.504
	120	7.352	4.257	2.377	1.403	0.845



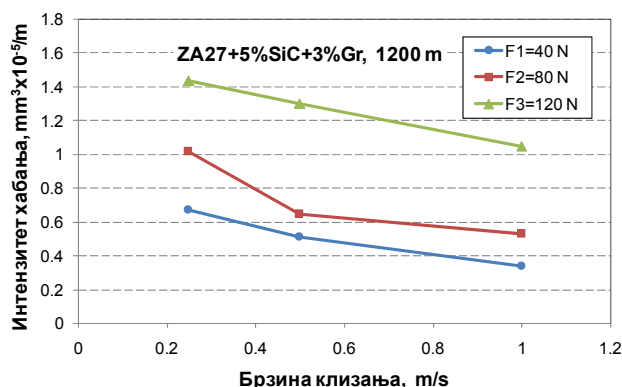
Слика 5.113 Интензитет хабања у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC+1%Gr



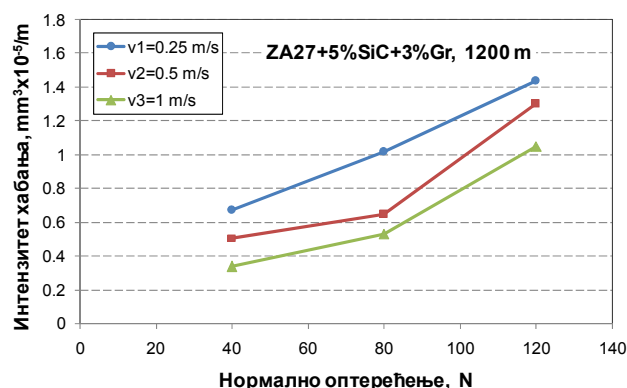
Слика 5.114 Интензитет хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC+1%Gr

Табела 5.26 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, са подмазивањем

ZA 27+5%SiC+3%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-5} / \text{m}$				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	6.795	4.236	2.181	1.151	0.671
	80	11.391	4.961	2.621	1.492	1.015
	120	16.064	8.121	4.339	2.477	1.436
0,5	40	3.769	1.941	1.141	0.695	0.507
	80	9.441	4.032	2.097	1.112	0.646
	120	14.599	6.704	3.539	2.006	1.299
1	40	2.712	1.615	0.892	0.491	0.336
	80	5.632	2.567	1.446	0.855	0.529
	120	10.081	5.413	2.881	1.669	1.048



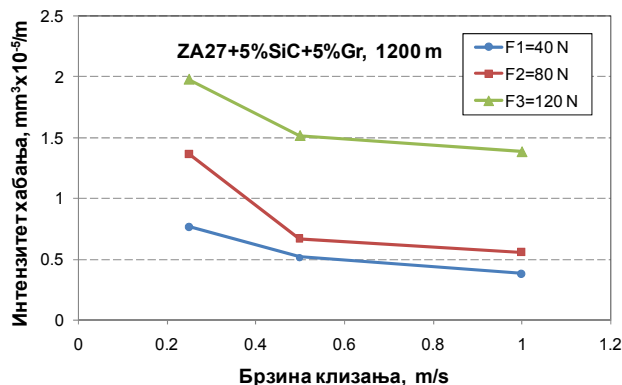
Слика 5.115 Интензитет хабања у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC+3%Gr



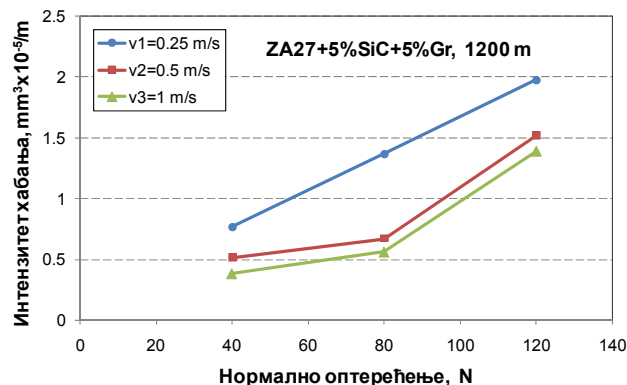
Слика 5.116 Интензитет хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC+3%Gr

Табела 5.27 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, са подмазивањем

ZA 27+5%SiC+5%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-5} / \text{m}$				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	6.991	4.733	2.457	1.311	0.766
	80	14.217	6.316	3.509	1.967	1.366
	120	20.064	10.279	5.583	3.197	1.978
0,5	40	4.374	2.349	1.321	0.777	0.512
	80	8.198	3.795	2.056	1.112	0.671
	120	15.995	6.962	4.012	2.395	1.518
1	40	3.039	1.844	1.014	0.587	0.378
	80	6.087	2.749	1.528	0.864	0.556
	120	11.666	5.536	3.117	1.814	1.386



Слика 5.117 Интензитет хабања у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC+5%Gr



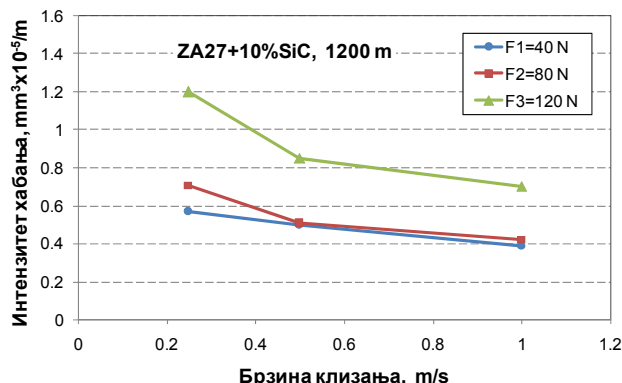
Слика 5.118 Интензитет хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC+5%Gr

Из добијених вредности интензитета хабања наведених композита уочава се исти тренд. Наиме, интензитет хабања композитних материјала расте са порастом нормалног оптерећења а опада са порастом брзине клизања.

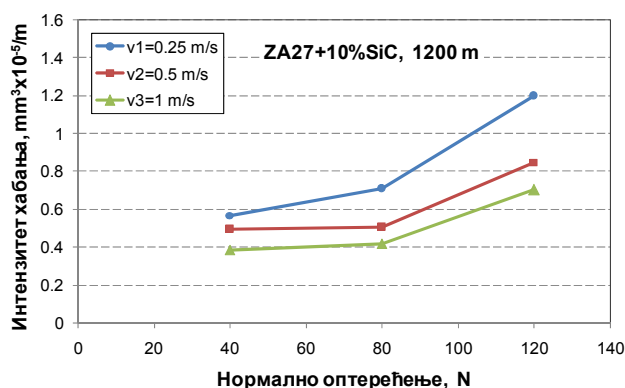
Вредности интензитета хабања композита који садржи 10% силицијум карбида, дате су на слици 5.28, док су вредности интензитета хабања хибридних композита са 10% SiC уз додатак 1%, 3% и 5% графита, наведене у табелама 5.29, 5.30 и 5.31, респективно. Одговарајући дијаграми интензитета хабања у зависности од брзине клизања односно нормалног оптерећења дати су у табелама 5.119 до 5.126.

Табела 5.28 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC, са подмазивањем

ZA 27+10%SiC		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-5} / \text{m}$				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	3.717	2.812	1.528	0.846	0.569
	80	5.909	3.073	1.701	0.934	0.708
	120	9.012	5.315	2.945	1.754	1.198
0,5	40	2.527	1.749	1.065	0.591	0.423
	80	4.759	2.627	1.398	0.777	0.506
	120	5.873	3.795	2.056	1.222	0.848
1	40	1.699	1.011	0.630	0.424	0.306
	80	2.994	1.812	1.039	0.587	0.421
	120	3.666	2.307	1.374	0.901	0.701



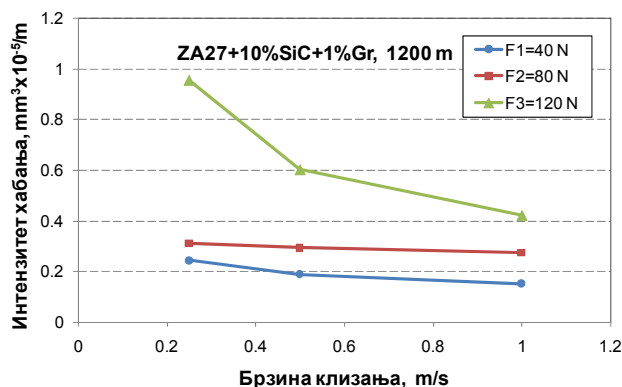
Слика 5.119 Интензитет хабања у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC



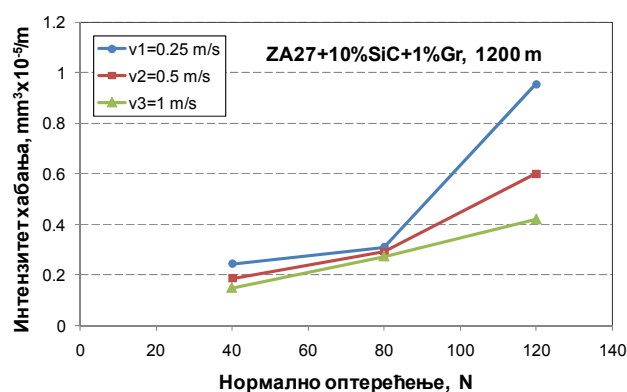
Слика 5.120 Интензитет хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC

Табела 5.29 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, са подмазивањем

ZA 27+10%SiC+1%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-5} / \text{m}$				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	2.222	1.456	0.774	0.429	0.243
	80	3.465	1.529	0.818	0.491	0.311
	120	7.641	3.795	2.056	1.111	0.799
0,5	40	1.216	0.956	0.525	0.301	0.188
	80	3.016	1.366	0.733	0.398	0.294
	120	3.448	2.145	1.239	0.727	0.602
1	40	1.031	0.796	0.451	0.254	0.151
	80	2.094	1.136	0.630	0.346	0.275
	120	2.508	1.704	0.951	0.553	0.421



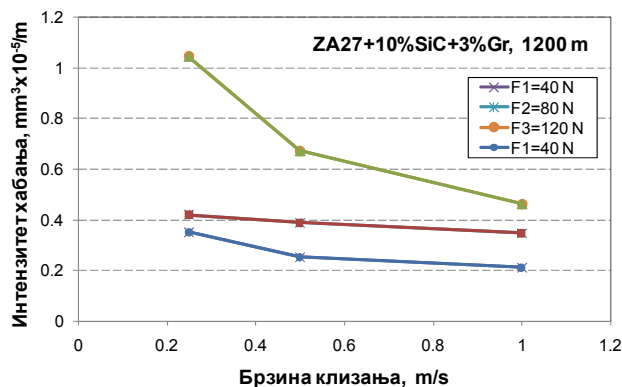
Слика 5.121 Интензитет хабања у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC+1%Gr



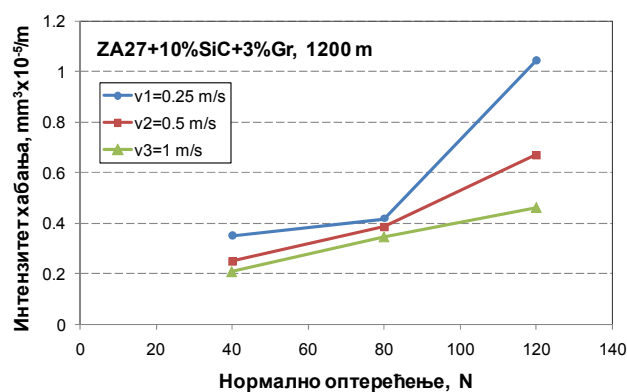
Слика 5.122 Интензитет хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC+1%Gr

Табела 5.30 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, са подмазивањем

ZA 27+10%SiC+3%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-5} / \text{m}$				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	2.712	1.658	1.039	0.556	0.351
	80	3.107	1.773	1.014	0.619	0.419
	120	8.024	4.072	2.245	1.305	1.044
0,5	40	1.507	1.206	0.644	0.353	0.251
	80	2.733	1.487	0.857	0.517	0.388
	120	4.402	2.596	1.454	0.901	0.671
1	40	1.191	0.859	0.505	0.322	0.211
	80	1.777	1.203	0.712	0.424	0.347
	120	3.016	1.891	1.085	0.695	0.462



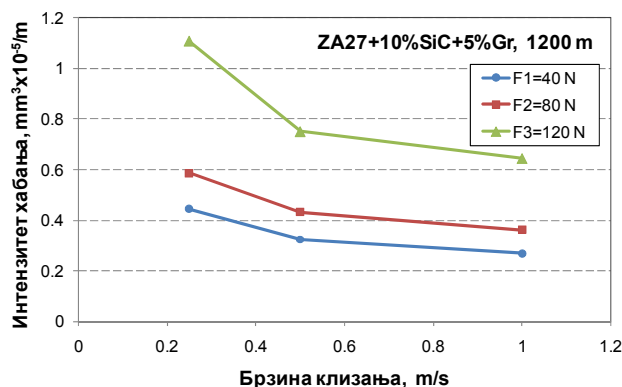
Слика 5.123 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr



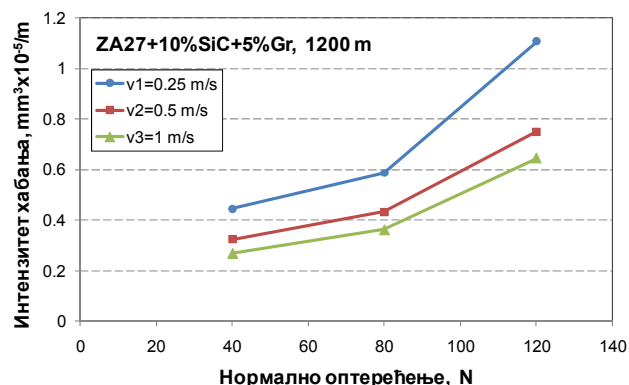
Слика 5.124 Интензитет хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC+3%Gr

Табела 5.31 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, са подмазивањем

ZA 27+10%SiC+5%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-5} / \text{m}$				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	2.905	1.773	1.079	0.657	0.444
	80	4.091	2.198	1.261	0.741	0.586
	120	8.735	4.892	2.731	1.552	1.106
0,5	40	2.025	1.426	0.823	0.447	0.323
	80	3.464	1.761	1.007	0.627	0.432
	120	4.608	3.006	1.878	1.111	0.749
1	40	1.535	0.918	0.616	0.366	0.268
	80	2.314	1.327	0.812	0.504	0.361
	120	2.691	2.067	1.313	0.821	0.643



Слика 5.125 Интензитет хабања у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC+5%Gr



Слика 5.126 Интензитет хабања у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC+5%Gr

Композити који садрже 10%SiC показују исти тип зависности интензитета хабања од нормалног оптерећења и брзине клизања

5.2.2 Коэффициент трења

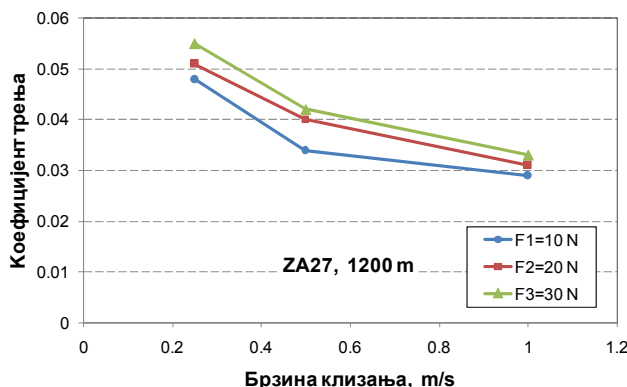
У условима са подмазивањем, током трајања контакта између блока и диска, сниман је сигнал коефицијента трења. Експерименти су вршени у уз варирање три нивоа нормалног контактеног оптерећења и три нивоа брзине клизања. Добијен је континуални сигнал на дужини пута клизања од 1200m. Сва испитивања су понављана по три пута а коначни резултати су добијени као њихове средње аритметичке вредности. Одговарајуће средње вредности коефицијента трења су приказани у табелама 5.32 до 5.40.

Табела 5.32 ZA27, на путу клизања од 1200 m, са подмазивањем

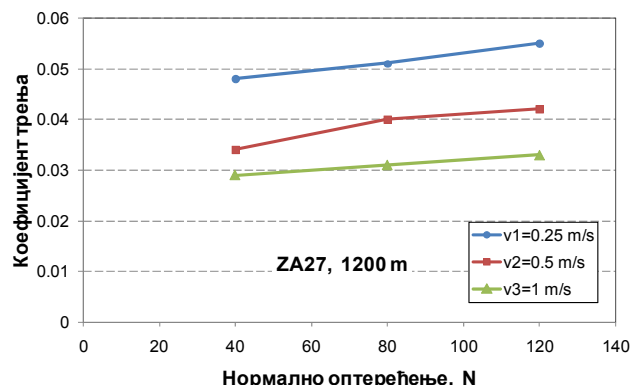
v, m/s	F, N	Коефицијент трења
0,25	40	0.048
	80	0.051
	120	0.055
0,5	40	0.034
	80	0.04
	120	0.042
1	40	0.029
	80	0.031
	120	0.033

На основу ових вредности, формиране су дијаграмске зависности коефицијента трења од брзине клизања и нормалног контактеног оптерећења у условима са подмазивањем.

Вредности коефицијента трења за основни материјал, легуру ZA27, наведене су у табели 5.32. Коэффициент трења у функцији брзине клизања дат је на слици 5.127. Зависност коефицијента трења од нормалног оптерећења приказана је сликом 5.128.



Слика 5.127 Коэффициент трења у функцији брзине клизања – ZA27



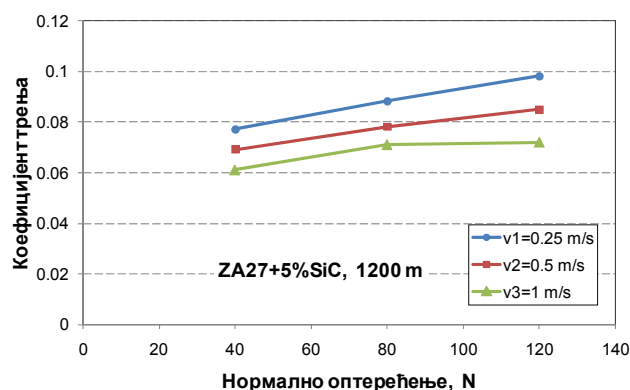
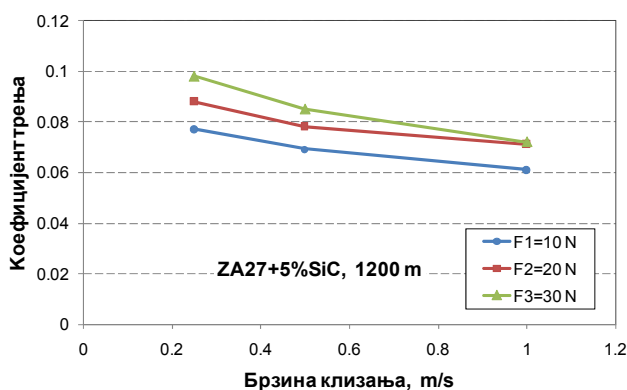
Слика 5.128 Коэффициент трења у функцији нормалног оптерећења – ZA27

Табела 5.33 ZA27+ 5%SiC, на путу клизања од 1200 m, са подмазивањем

v, m/s	F, N	Коефицијент трења
0,25	40	0.077
	80	0.088
	120	0.098
0,5	40	0.069
	80	0.078
	120	0.085
1	40	0.061
	80	0.071
	120	0.072

У табели 5.33 дате су вредности коефицијента трења за композит који садржи 5%SiC.

Графички приказ зависности коефицијента трења у функцији брзине клизања дат је слици 5.129. Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења приказан је на слици 5.130.



Слика 5.129 Коефицијент трења у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC

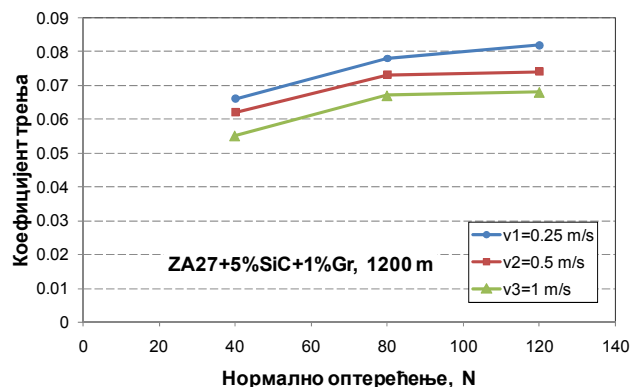
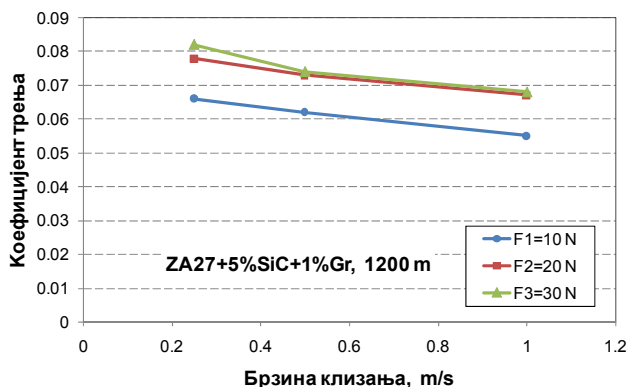
Слика 5.130 Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC

Табела 5.34 ZA27+5%SiC+1%Gr, на путу клизања од 1200 m, са подмазивањем

v, m/s	F, N	Коефицијент трења
0,25	40	0.066
	80	0.078
	120	0.082
0,5	40	0.062
	80	0.073
	120	0.074
1	40	0.055
	80	0.067
	120	0.068

Вредности коефицијента трења за хибридни композит који има 5%SiC и 1% графита наведене су у табели 5.34.

Дијаграм зависности коефицијента трења од брзине клизања дат је слици 5.131. Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења приказан је на слици 5.132.

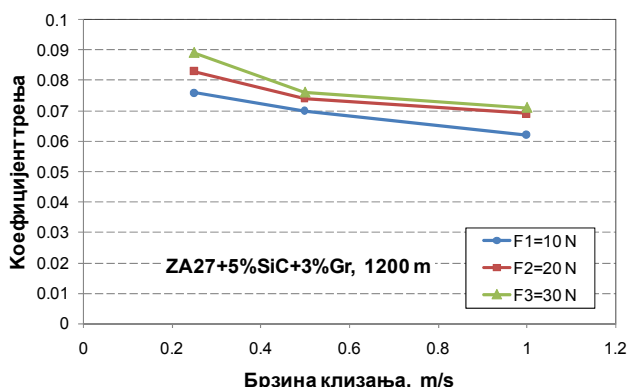


Слика 5.131 Коефицијент трења у функцији брзине клизања – A27+5%SiC+1%Gr

Слика 5.132 Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC+1%Gr

Табела 5.35 ZA27+5%SiC+3%Gr, на путу клизања од 1200 m, са подмазивањем

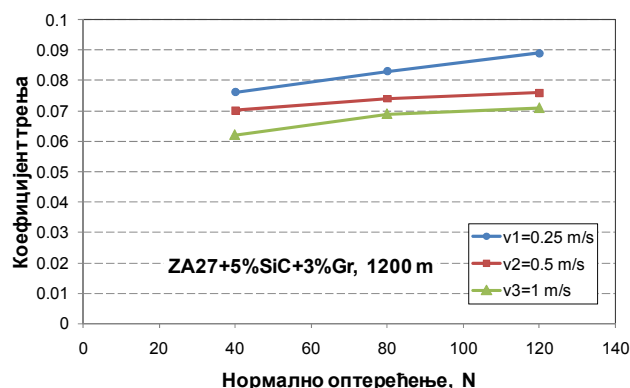
v, m/s	F, N	Коефицијент трења
0,25	40	0.076
	80	0.083
	120	0.089
0,5	40	0.07
	80	0.074
	120	0.076
1	40	0.062
	80	0.069
	120	0.071



Слика 5.133 Коефицијент трења у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC+3%Gr

Вредности коефицијента трења за хибридни композит који садржи 5%SiC и 3% графита наведене су у табели 5.35.

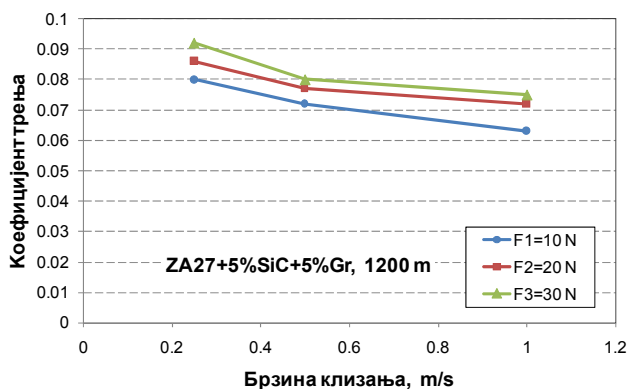
Дијаграм зависности коефицијента трења од брзине клизања дат је слици 5.133. Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења приказан је на слици 5.134.



Слика 5.134 Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC+3%Gr

Табела 5.36 ZA27+5%SiC+5%Gr, на путу клизања од 1200 m, са подмазивањем

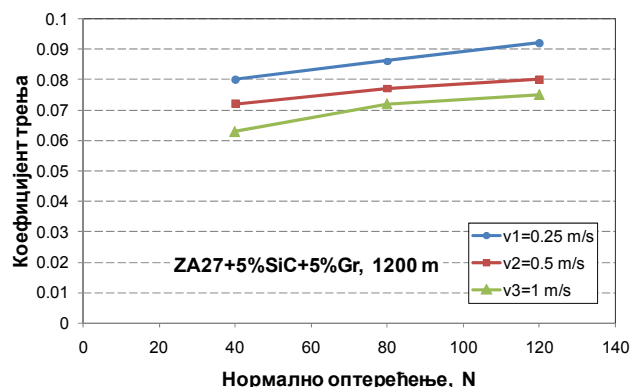
v, m/s	F, N	Коефицијент трења
0,25	40	0.08
	80	0.086
	120	0.092
0,5	40	0.072
	80	0.077
	120	0.08
1	40	0.063
	80	0.072
	120	0.075



Слика 5.135 Коефицијент трења у функцији брзине клизања – ZA27+5%SiC+5%Gr

У табели 5.36 дате су вредности коефицијента трења за хибридни композит који садржи 5%SiC и 5% графита.

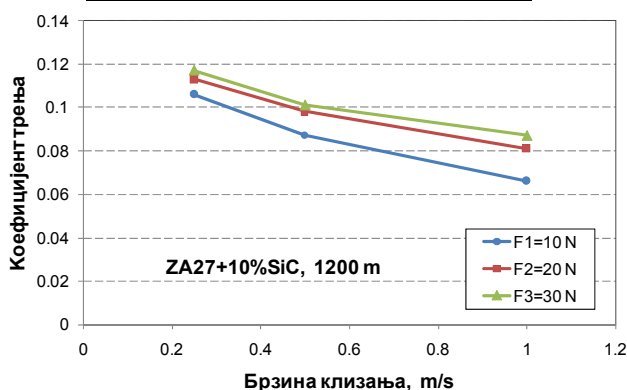
Графички приказ зависности коефицијента трења у функцији брзине клизања дат је слици 5.135. Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења приказан је на слици 5.136.



Слика 5.136 Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења – ZA27+5%SiC+5%Gr

Табела 5.37 ZA27+10%SiC, на путу клизања од 1200 m, са подмазивањем

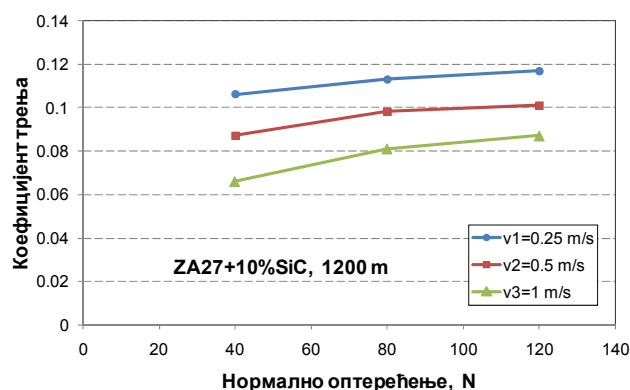
v, m/s	F, N	Коефицијент трења
0,25	40	0.106
	80	0.113
	120	0.117
0,5	40	0.087
	80	0.098
	120	0.101
1	40	0.066
	80	0.081
	120	0.087



Слика 5.137 Коефицијент трења у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC

Вредности коефицијента трења за композит који има 10%SiC наведене су у табели 5.37.

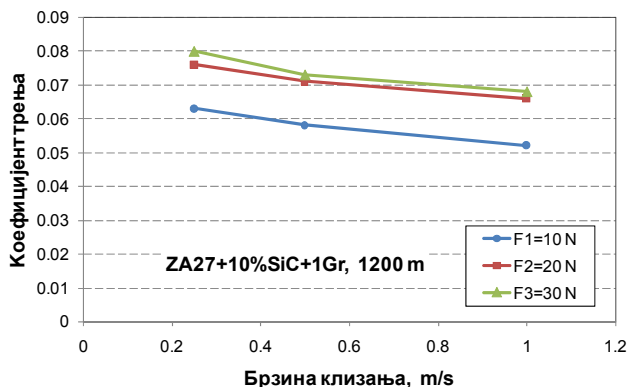
Дијаграм зависности коефицијента трења од брзине клизања дат је слици 5.137. Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења приказан је на слици 5.138.



Слика 5.138 Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC

Табела 5.38 ZA27+10%SiC+1%Gr, на путу клизања од 1200 m, са подмазивањем

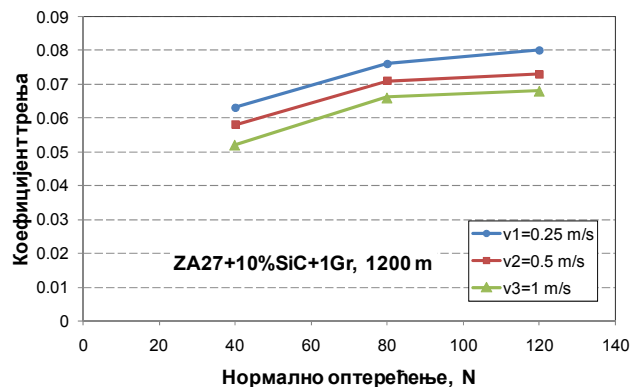
v, m/s	F, N	Коефицијент трења
0,25	40	0.063
	80	0.076
	120	0.08
0,5	40	0.058
	80	0.071
	120	0.073
1	40	0.052
	80	0.066
	120	0.068



Слика 5.139 Коефицијент трења у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC+1%Gr

У табели 5.38 дате су вредности коефицијента трења за хибридни композит који садржи 5%SiC и 1% графита.

Графички приказ зависности коефицијента трења у функцији брзине клизања дат је слици 5.139. Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења приказан је на слици 5.140.



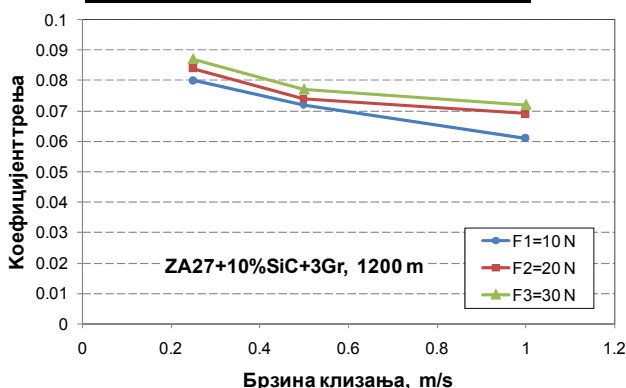
Слика 5.140 Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC+1%Gr

Табела 5.39 ZA27+10%SiC+3%Gr, на путу клизања од 1200 m, са подмазивањем

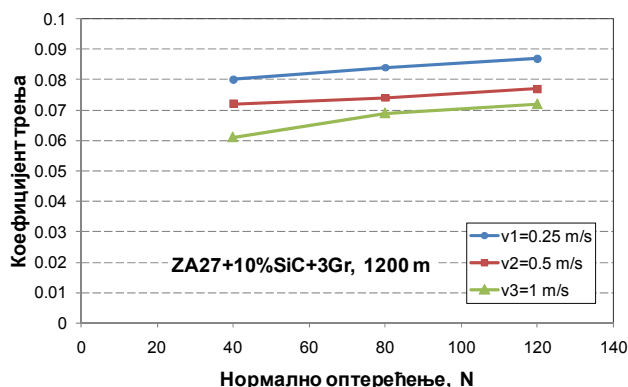
v, m/s	F, N	Коефицијент трења
0,25	40	0.08
	80	0.084
	120	0.087
0,5	40	0.072
	80	0.074
	120	0.077
1	40	0.061
	80	0.069
	120	0.072

Вредности коефицијента трења за хибридни композит који садржи 10%SiC и 3% графита наведене су у табели 5.39.

Коефицијент трења у функцији брзине клизања дат је на слици 5.141. Зависност коефицијента трења од нормалног оптерећења приказана је на слици 5.142.



Слика 5.141 Коефицијент трења у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC+3%Gr



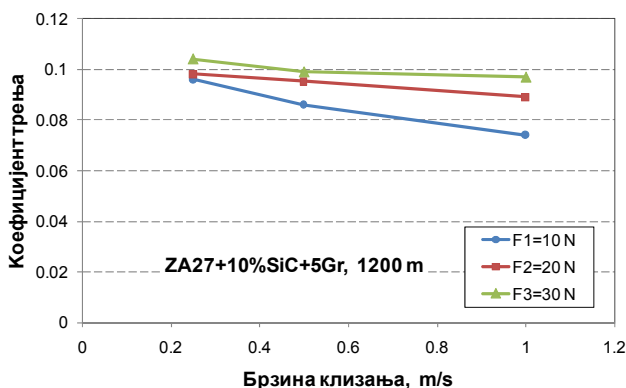
Слика 5.142 Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC+3%Gr

Табела 5.40 ZA27+10%SiC+5%Gr, на путу клизања од 1200 m, са подмазивањем

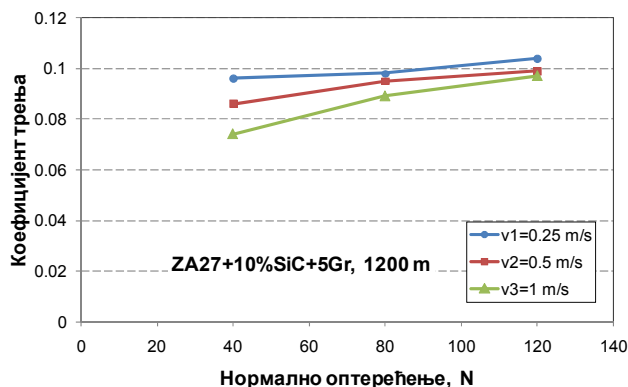
v, m/s	F, N	Коефицијент трења
0,25	40	0.096
	80	0.098
	120	0.104
0,5	40	0.086
	80	0.095
	120	0.099
1	40	0.074
	80	0.089
	120	0.097

У табели 5.40 дате су вредности коефицијента трења за хибридни композит који садржи 5%SiC и 1% графита.

Графички приказ зависности коефицијента трења у функцији брзине клизања дат је слици 5.143. Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења приказан је на слици 5.144.



Слика 5.143 Коефицијент трења у функцији брзине клизања – ZA27+10%SiC+5%Gr



Слика 5.144 Коефицијент трења у функцији нормалног оптерећења – ZA27+10%SiC+5%Gr

6. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА

Триболошким испитивањима хибридних композита на бази ZA27 легуре добијени су резултати, наведени у претходном поглављу. У оквиру овог поглавља је извршена анализа добијених резултата на основу које се могу дефинисати одговарајући закључци.

Ради сагледавања процеса хабања, интензитета хабања и фрикционих карактеристика испитиваних композитних материјала формиран су одговарајући, табеларни, графички и хистограмски прикази. У њима су дате добијене триболошке карактеристике композита али и саме ZA27 легуре у циљу поређења резултата истраживања.

Статистичком обрадом резултата испитивања дефинисане су корелационе и графичке зависности ширине трага хабања, интензитета хабања и коефицијента трења у зависности од брзине клизања и нормалног контактнoг оптерећења. Дат је и упоредни приказ испитиваних триболошких карактеристика, коефицијената трења, ширине трагова хабања, запремине похабаног материјала, интензитета хабања за све испитиване материјале.

Трибометријска испитивања обухватала су следеће материјале:

- композите на бази ZA27 легуре ојачане честицама SiC и графита
 - ZA27+5% SiC,
 - ZA27+5% SiC+1% Gr,
 - ZA27+5% SiC+3% Gr,
 - ZA27+5% SiC+5% Gr,
 - ZA27+10% SiC,
 - ZA27+10% SiC+1% Gr,
 - ZA27+10% SiC+3% Gr,
 - ZA27+10% SiC+5% Gr.
- основни материјал, легуру ZA27.

Сви материјали испитивани су за све нивое нормалног оптерећења и брзине клизања у режимима са и без подмазивања и на истој мерној опреми.

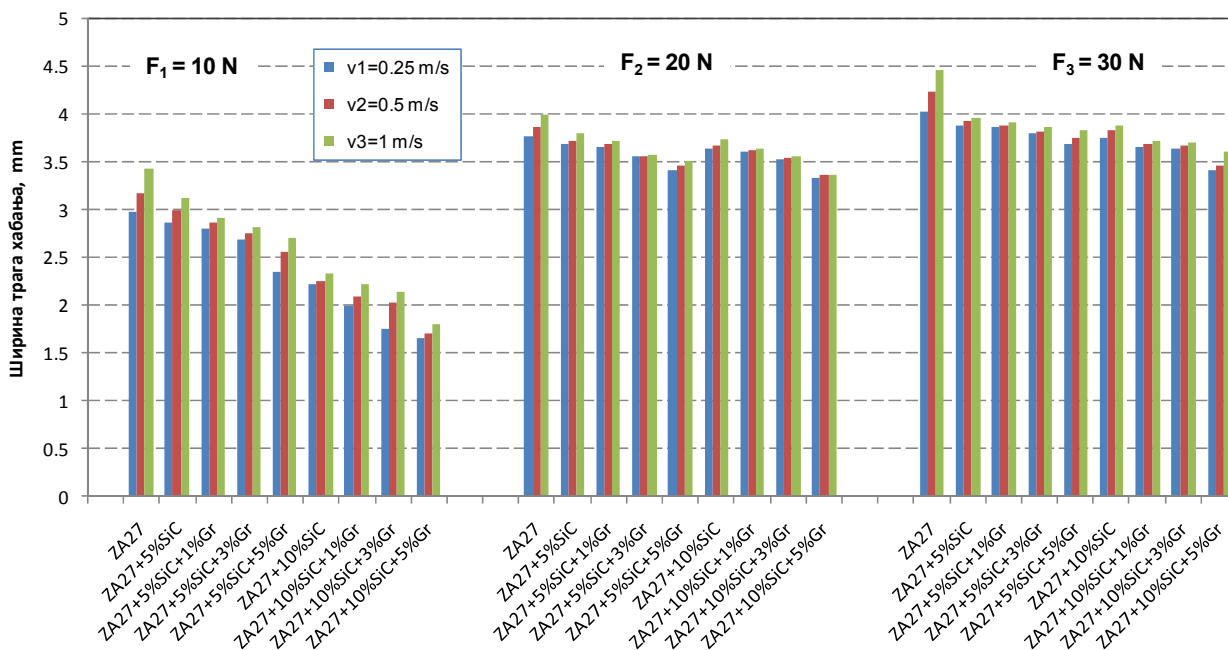
6.1 Анализа резултата истраживања у условима без подмазивања

6.1.1 Хабање

За све испитиване материјале добијене су одговарајуће криве хабања при следећим условима испитивања:

- нормално оптерећење: 10 N, 20 N и 30 N;
- брзина клизања: 0.25 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s;
- дужина пута клизања 600 m.

Отпорност на хабање легуре ZA27 и композитних материјала изражена преко ширине трага хабања, у условима без подмазивања, дата је у виду хистограмског приказа на слици 6.1.

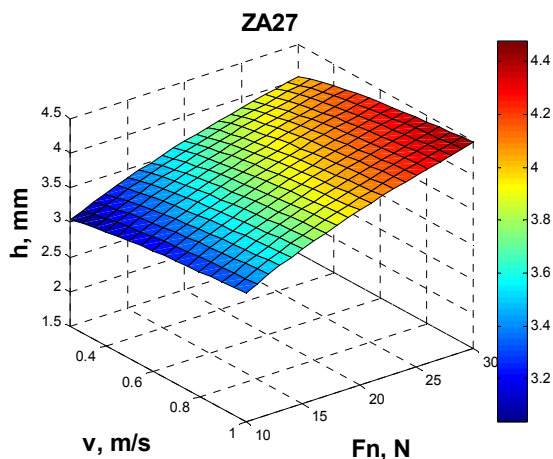


Слика 6.1 Ширина трага хабања, легуре ZA27 и испитиваних композита, без подмазивања

Са хистограмског приказа може се јасно уочити утицај нормалног контактнoг оптерећења и брзине клизања на процес хабања. Са порастом нормалног оптерећења долази до пораста хабања. Такође са порастом брзине клизања расту ширине трагова хабања Овај утицај је истоветан за све испитиване материјале. Очигледно је да се највеће вредности ширина трагова хабања добијају при највећим брзинама и највећим контактним оптерећењима.

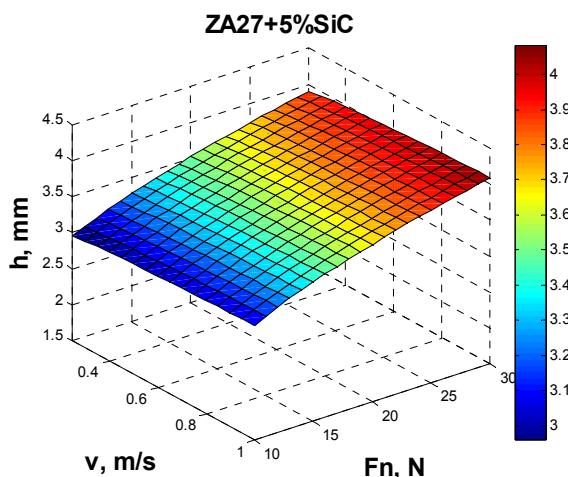
Разлике у нивоима хабања при истим условима контакта нису тако изражене као у испитивањима са подмазивањем, што је посебно уочљиво при вишим вредностима нормалног оптерећења. У свим условима испитивања, у условима трења без подмазивања, композитни материјали показују мање хабање у односу на основни материјал, легуру ZA27. Јасно се може извршити њихово рангирање. Највећу отпорност на хабање показао је хибридни композит ојачан честицама силицијум карбида у количини од 10 vol.% и 5% графита. Ово је посебно изражено при нижим оптерећењима, где се ширина трага хабања смањује и за скоро 100% у односу на основни материјал.

Зависности промене ширине трагова хабања од брзине клизања и нормалног оптерећења у облику просторних мапа, при испитивањима без подмазивања, дате су на сликама 6.2 ÷ 6.10. Наведене зависности апроксимиране су експоненцијалним регресионим функцијама а коефицијенти регресионих функција добијени су коришћењем Маталаб софтвера (MathLab). Такође су наведени и индекси криволинијске корелације као показатељи слагања предложене емпиријске расподеле са експерименталним подацима.



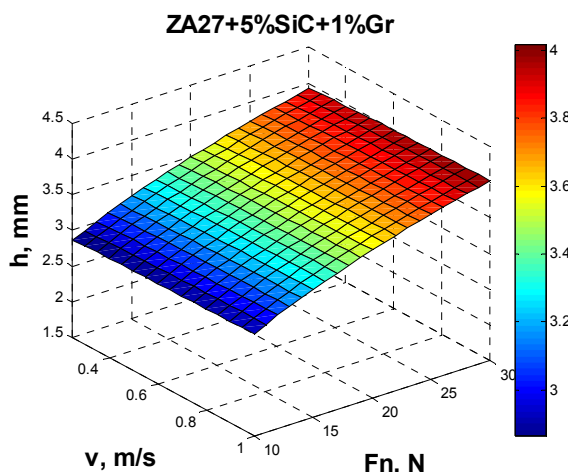
ZA27			
$h = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
1.8395	0.2613	0.0715	R=0.9922
$h = 1.8395 \cdot F_n^{0.2613} \cdot v^{0.0715}$			

Слика 6.2 Ширина трага хабања, ZA27, без подмазивања



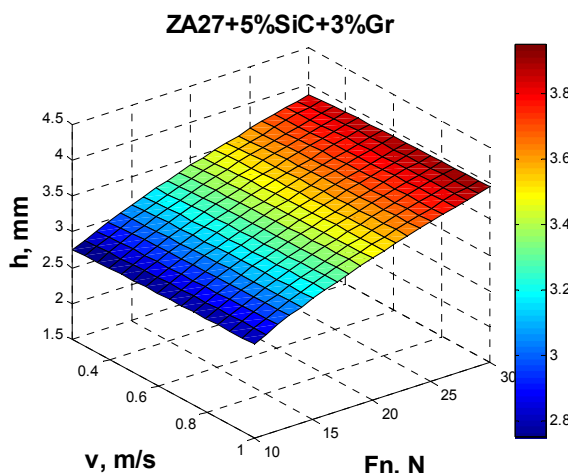
ZA27+5%SiC			
$h = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
1.7305	0.2525	0.0381	R=0.9717
$h = 1.7305 \cdot F_n^{0.2525} \cdot v^{0.0381}$			

Слика 6.3 Ширина трага хабања, ZA27+5% SiC, без подмазивања



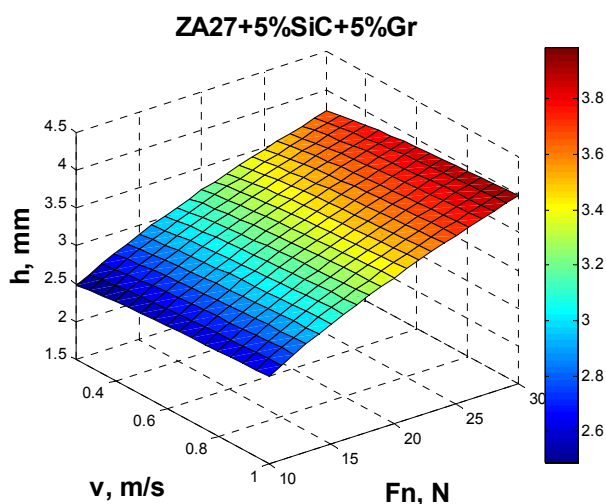
ZA27+5%SiC+1%Gr			
$h = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
1.5117	0.2874	0.0158	R=0.9737
$h = 1.5117 \cdot F_n^{0.2874} \cdot v^{0.0158}$			

Слика 6.4 Ширина трага хабања, ZA27+5%SiC+1%Gr, без подмазивања



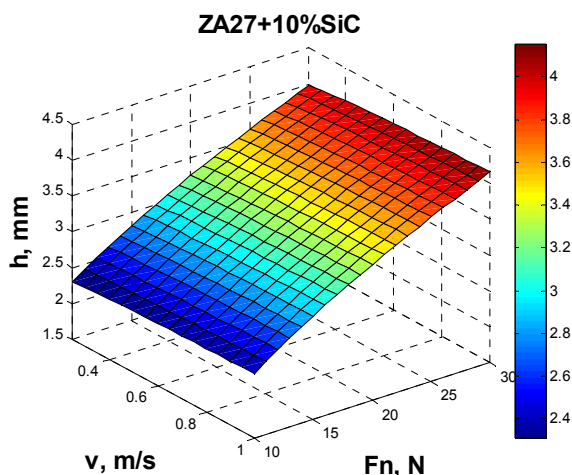
ZA27+5%SiC+3%Gr			
$h = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
1.3851	0.3079	0.0168	0.9824
$h = 1.3851 \cdot F_n^{0.3079} \cdot v^{0.0168}$			

Слика 6.5 Ширина трага хабања, ZA27+5%SiC+3%Gr, без подмазивања



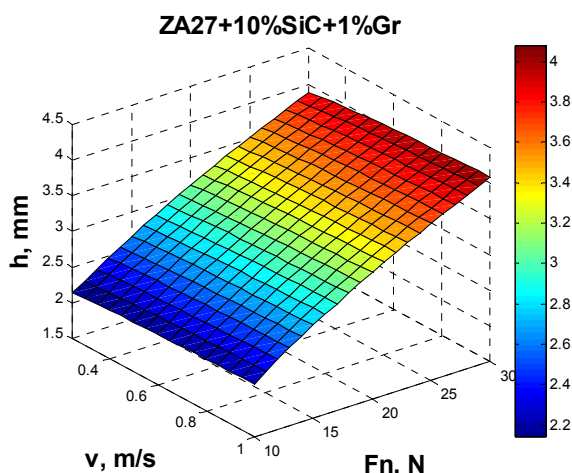
ZA27+5%SiC+5%Gr			
$h = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
1.1394	0.368	0.0485	R=0.9756
$h = 1.1394 \cdot F_n^{0.368} \cdot v^{0.0485}$			

Слика 6.6 Ширина трага хабања, ZA27+5%SiC+5%Gr, без подмазивања



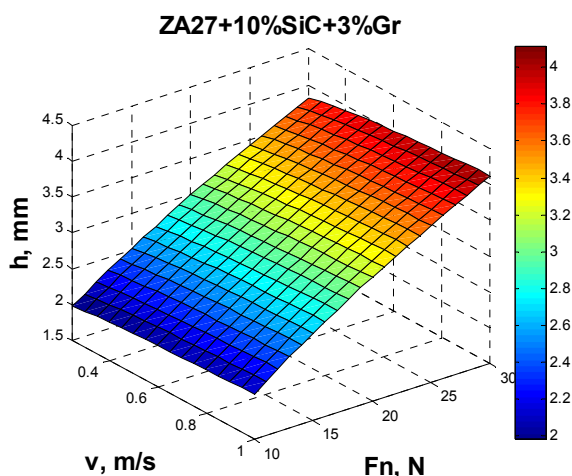
ZA27+10%SiC			
$h = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.7671	0.4964	0.0286	R=0.9304
$h = 0.7671 \cdot F_n^{0.4964} \cdot v^{0.0286}$			

Слика 6.7 Ширина трага хабања, ZA27+10%SiC, без подмазивања



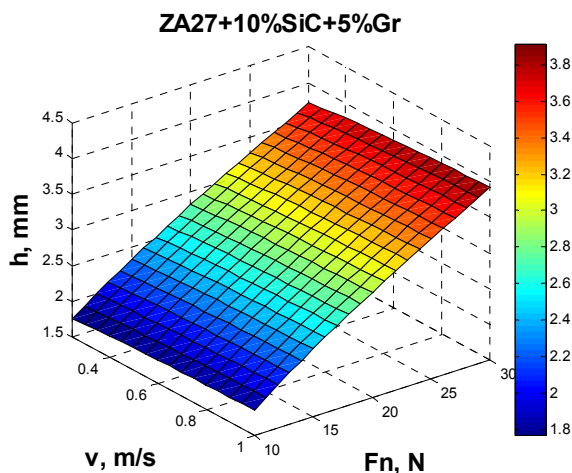
ZA27+10%SiC+1%Gr			
$h = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.6444	0.5427	0.0345	R=0.9123
$h = 0.6444 \cdot F_n^{0.5427} \cdot v^{0.0345}$			

Слика 6.8 Ширина трага хабања, ZA27+10%SiC+1%Gr, без подмазивања



ZA27+10%SiC+3%Gr			
$h = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.539	0.5978	0.0531	R=0.9177
$h = 0.539 \cdot F_n^{0.5978} \cdot v^{0.0531}$			

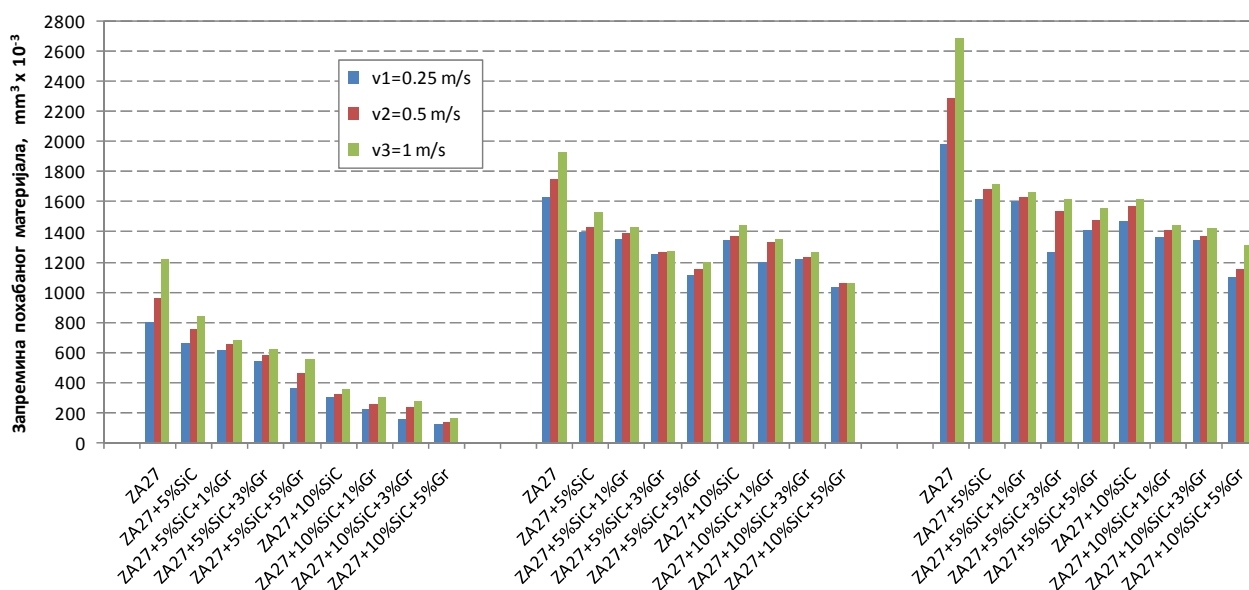
Слика 6.9 Ширина трага хабања, ZA27+10%SiC+3%Gr, без подмазивања



ZA27+10%SiC+5%Gr			
$h = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.3924	0.6764	0.0371	R=0.919
$h = 0.3924 \cdot F_n^{0.6764} \cdot v^{0.0371}$			

Слика 6.10 Ширина трага хабања, ZA27+10%SiC+5%Gr, без подмазивања

Запремина похабаног материјала испитиваних композита и базне легуре ZA27 у условима без подмазивања, приказана је на на слици 6.11.

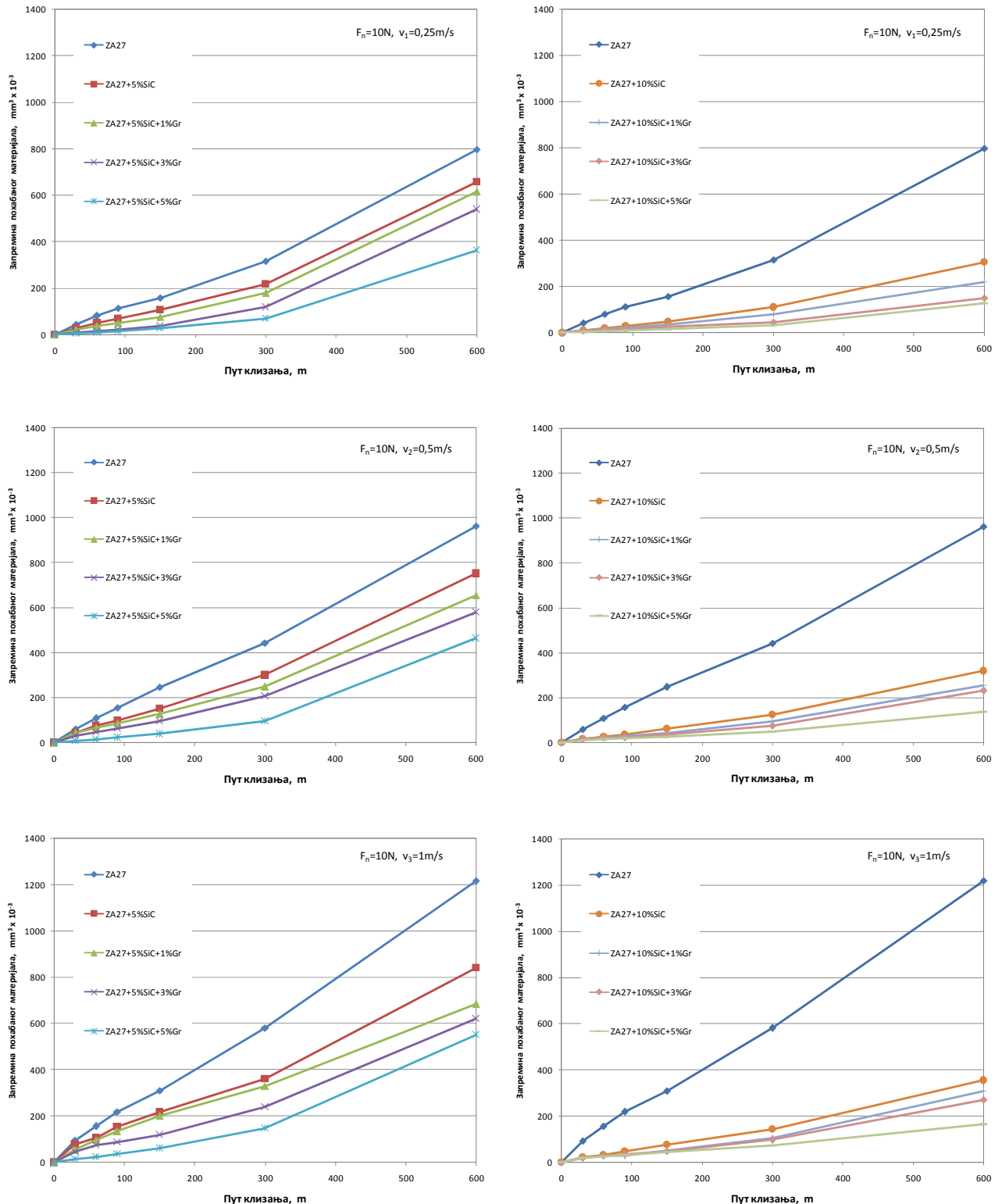


Слика 6.11 Запремина похабаног материјала, легуре ZA27 и испитиваних композита, без подмазивања

Са хистограма са слике 6.11 уочава се да у свим режимима испитивања и током целог пута клизања највеће вредности запремина похабаног материјала има легура ZA27.

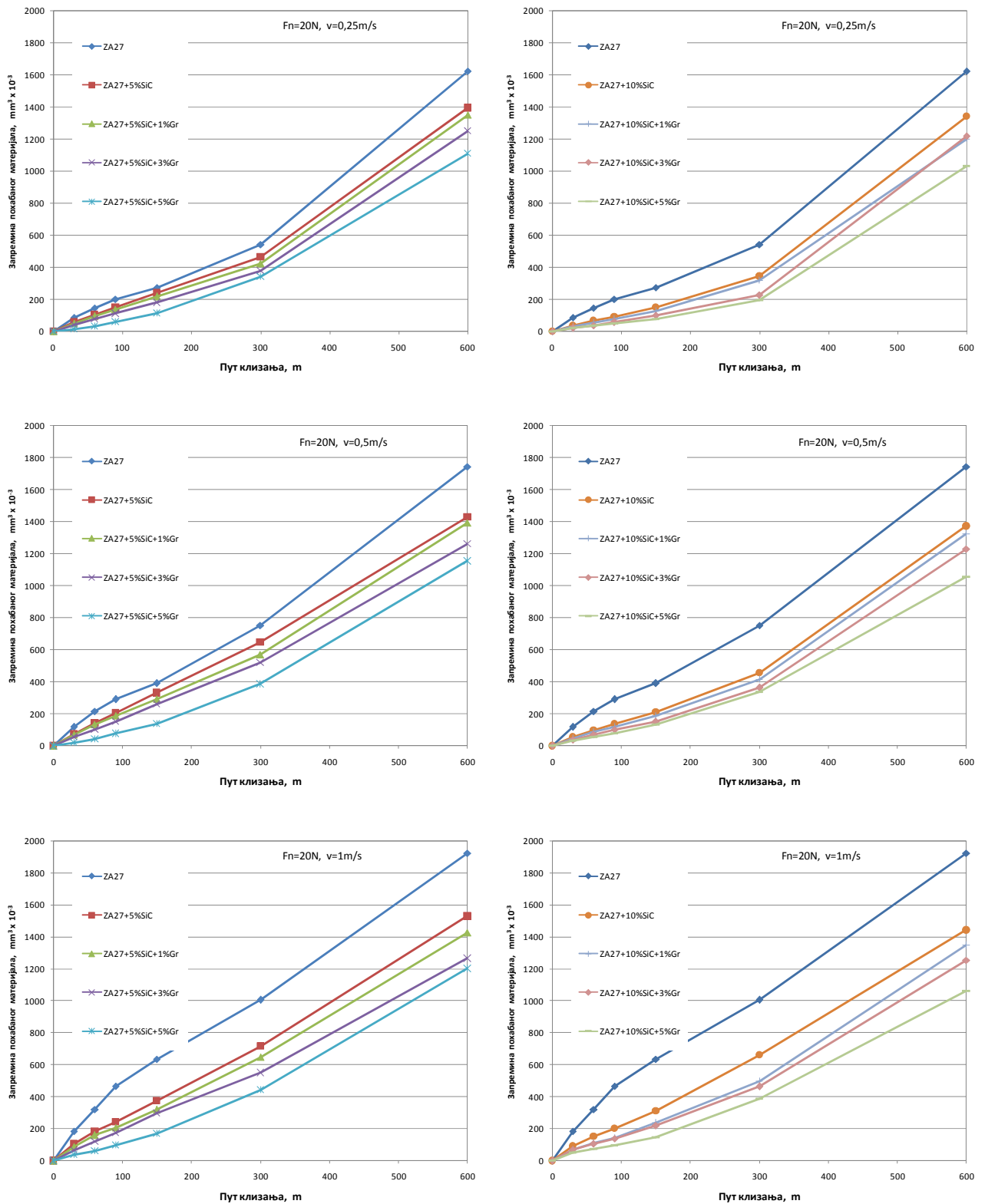
Зависности запремина похабаног материјала од пута клизања за све режиме испитивања, за три брзине клизања и три нивоа оптерећења, за све испитиване материјале, збирно су дате на сликама 6.12 до 6.14. Запремина похабаног материјала приказана је у функцији пута клизања при оптерећењу од 10 N, уз варирање брзина клизања (0.25 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s) Ради прегледности груписани су и посебно графички приказани композити који садрже 5% SiC, док су поред њих дијаграми са композитима ојачаних са 10% SiC. У оба случаја, приказана је и вредност запремине похабаног материјала основног материјала, тј. легуре ZA27.

На слици 6.12 дате су запремине похабаног материјала легуре ZA27 и испитиваних композита у функцији пута клизања при оптерећењу од 10 N, уз варирање брзина клизања (0.25 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s).



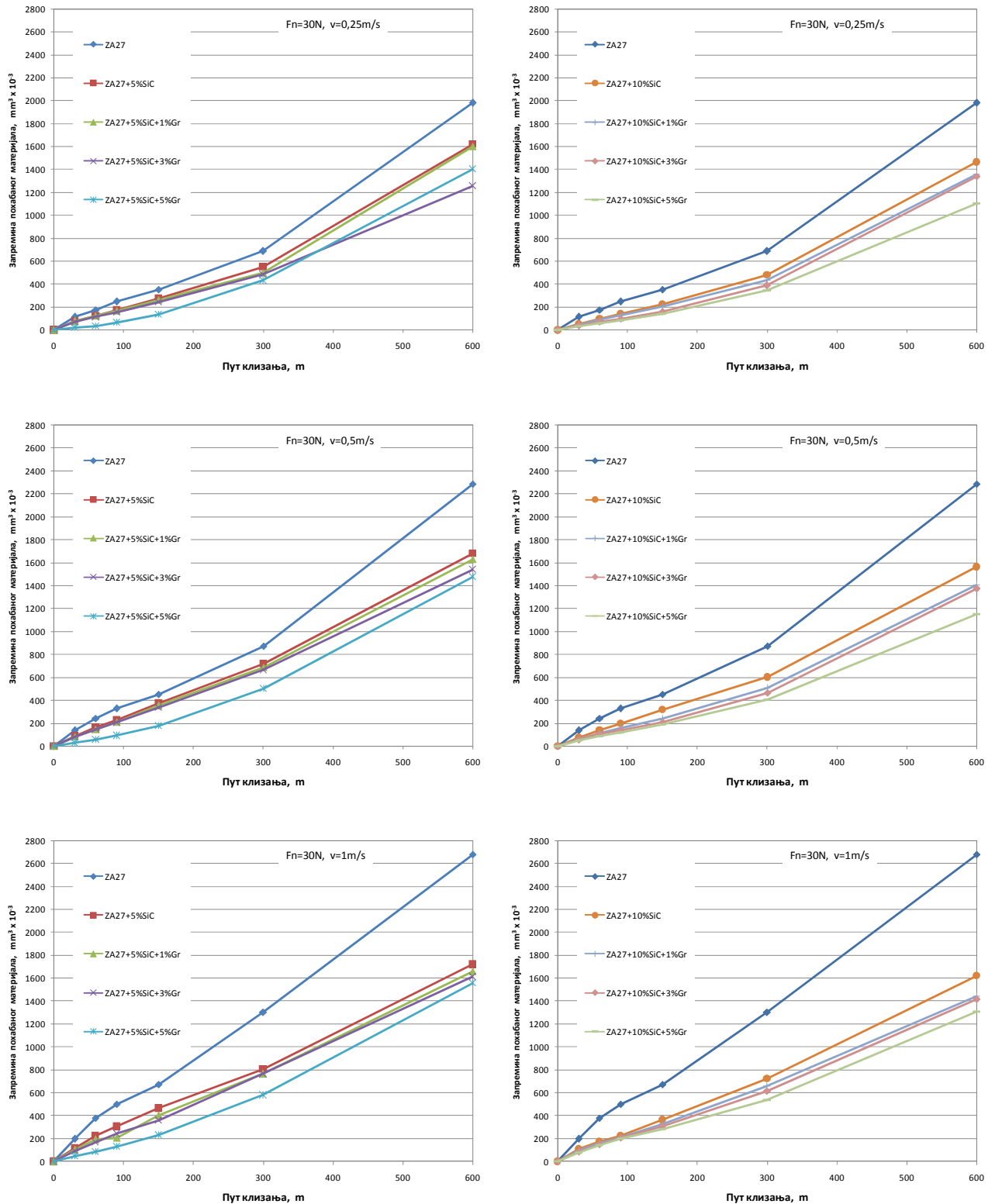
Слика 6.12 Запремина похабаног материјала, легуре ZA27 и испитиваних композита, без подмазивања, $F_1 = 10 \text{ N}$

На слици 6.13 приказане су запремине похабаног материјала легуре ZA27 и испитиваних композита у зависности од пута клизања при оптерећењу од 20 N, за различите брзине клизања (0.25 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s).



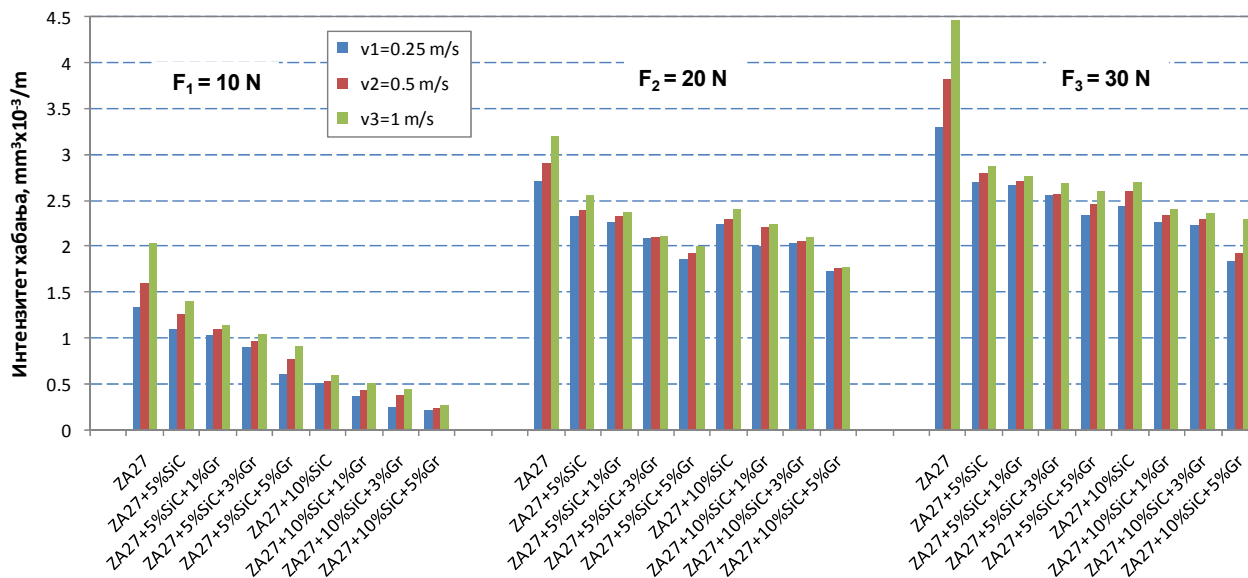
Слика 6.13 Запремина похабаног материјала, легуре ZA27 и испитиваних композита, без подмазивања, $F_2 = 20\text{ N}$

На слици 6.14 дате су запремине похабаног материјала легуре ZA27 и испитиваних композита у функцији пута клизања при оптерећењу од 30 N, уз варирање брзина клизања (0.25 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s).



Слика 6.14 Запремина похабаног материјала, легуре ZA27 и испитиваних композита, без подмазивања, $F_3 = 30\text{ N}$

Добијене вредности интензитета хабања легуре ZA27 и композитних материјала у условима без подмазивања, приказане су на слици 6.15. Дужина пута клизања износила је 600 m



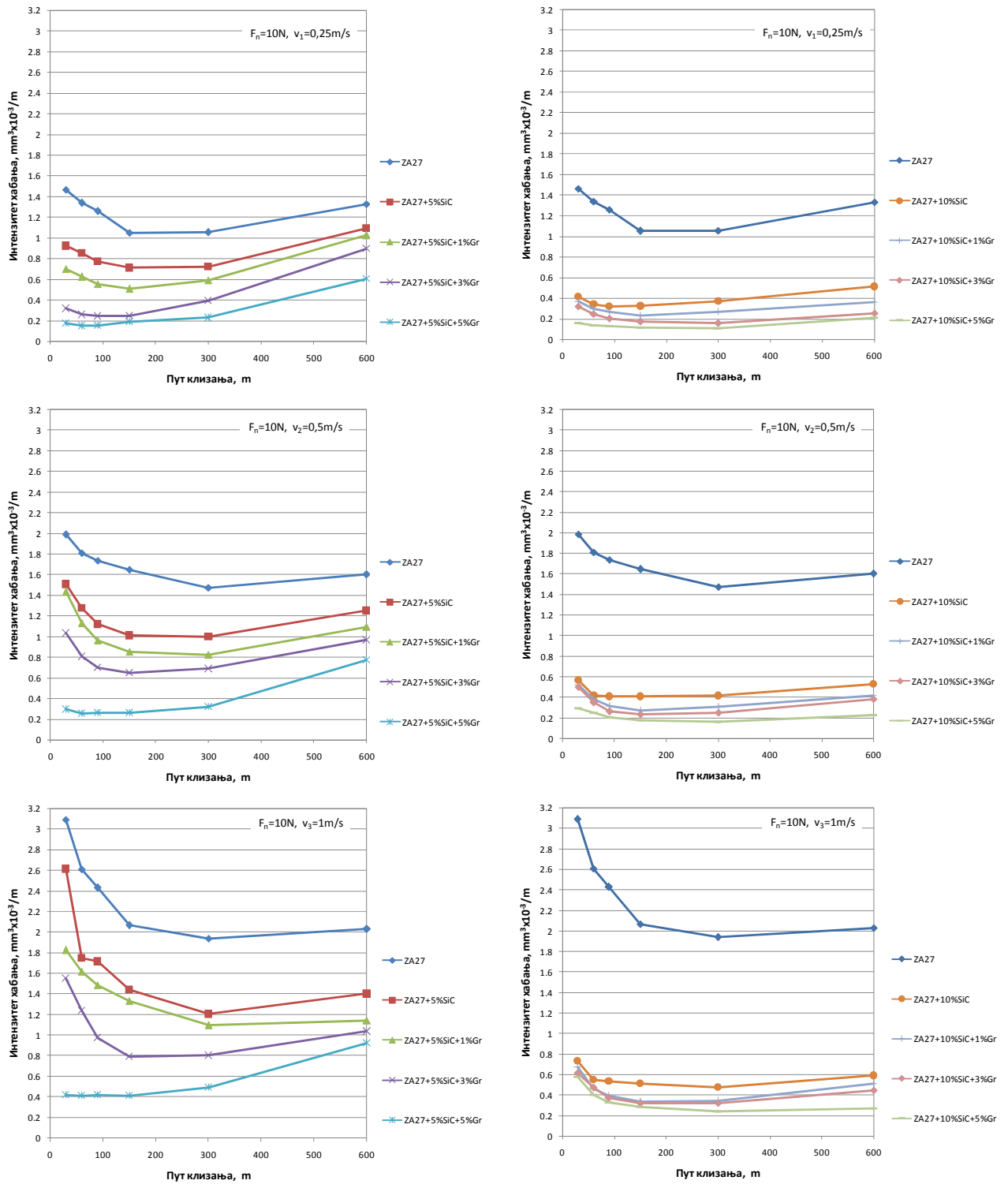
Слика 6.15 Интензитет хабања, легуре ZA27 и испитиваних композита, без подмазивања

Са хистограма са слике 6.15 се уочава да у свим режимима испитивања и током целог пута клизања највеће вредности интензитета хабања има основни материјал.

Зависности интензитета хабања од пута клизања за све режиме испитивања, за три брзине клизања и три нивоа оптерећења, за све испитиване материјале, збирно су дате на сликама 6.16 до 6.18. На слици 6.16 приказан је интензитет хабања материјала у функцији пута клизања при оптерећењу од 10 N, уз варирање брзина клизања (0.25 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s) Ради прегледности груписани су и посебно графички приказани композити који садрже 5% SiC, док су поред њих дијаграми са композитима ојачаних са 10% SiC. У оба случаја, приказана је и вредност интензитета хабања основног материјала, тј. легуре ZA27.

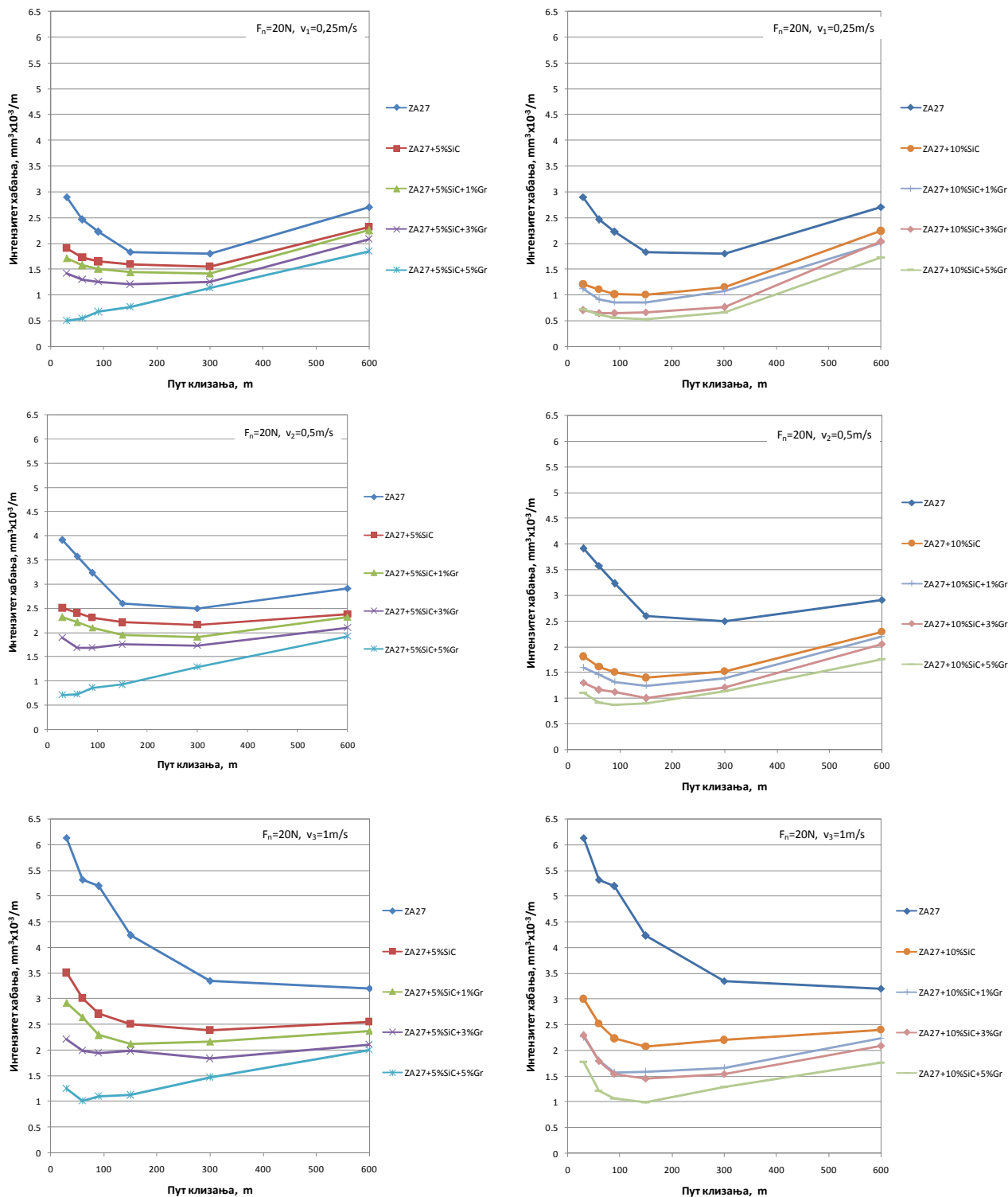
Анализом добијених кривих хабања, као и добијених зависности које се односе на вредности запремина похабаног материјала у функцији пута клизања и добијених вредности интензитета хабања може се закључити да се јасно уочавају периоди уходавања, односно периоди интензивног хабања материјала. Овај период карактерише нагли скок хабања и појава великих вредности интензитета хабања. После пређених око 50 - 100 m, испитивани материјали улазе у фазу устаљеног хабања. Ова фаза се одликује умереним хабањем и константним растом запремине похабаног материјала. У даљем току испитивања, интензитет хабања бележи благи пораст. Исти тренд, односно иста зависност јавља се за сва три оптерећења и све три брзине клизања.

У условима без подмазивања, за величину нормалног оптерећења од $F_1 = 10 \text{ N}$, добијају се дијаграмске зависности приказане на слици 6.16.



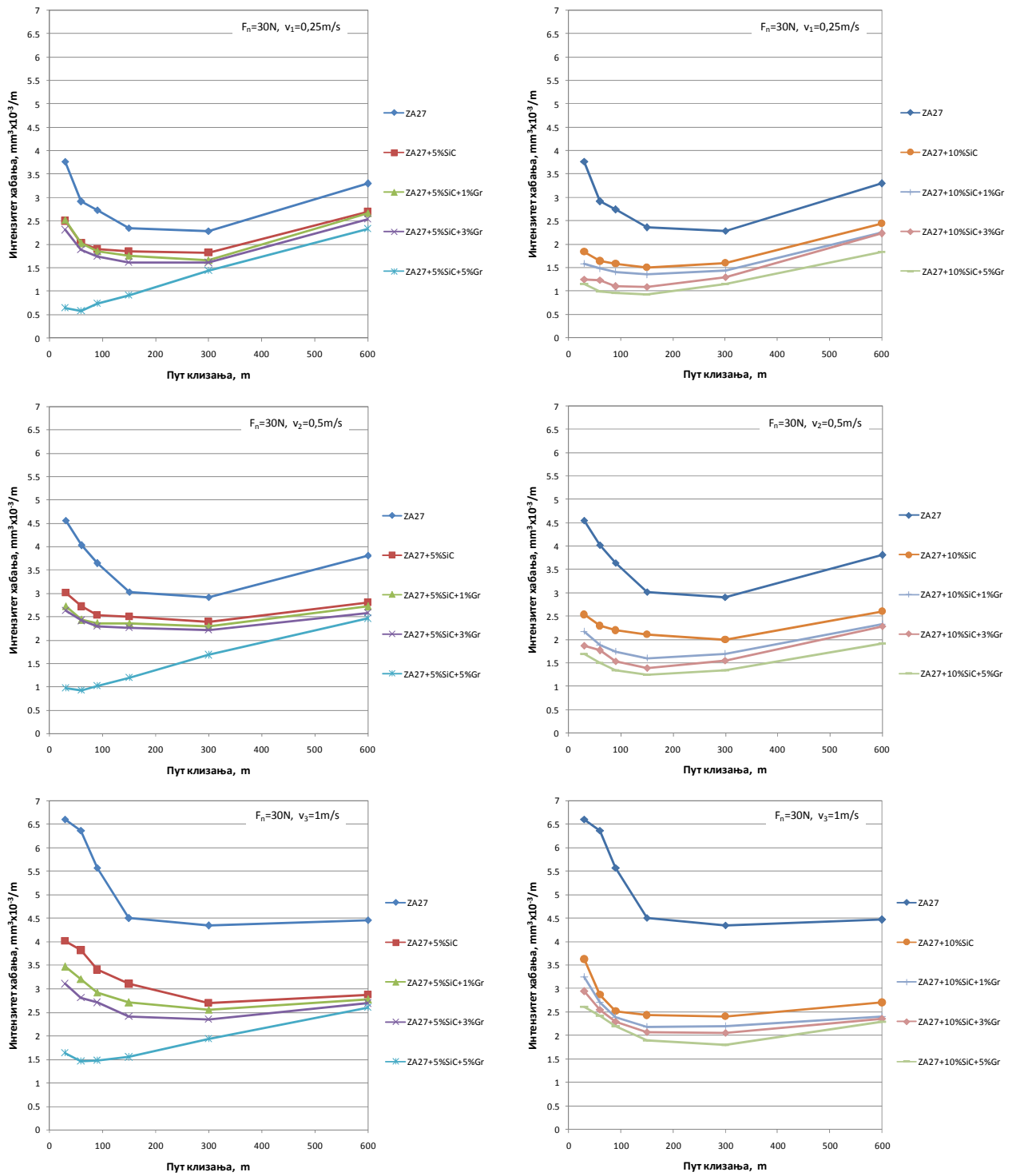
Слика 6.16 Интензитет хабања, легуре ZA27 и испитиваних композита, без подмазивања, $F_1 = 10 \text{ N}$

Интензитети хабања легуре ZA27 и испитиваних композита у функцији пута клизања при оптерећењу од 20 N, уз варирање брзина клизања (0.25 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s) дати су на слици 6.17, а при оптерећењу од 30 N на слици 6.18.

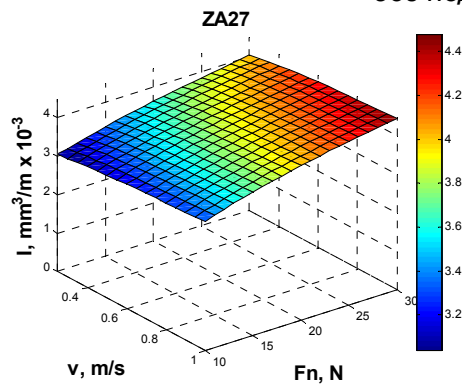


Слика 6.17 Интензитет хабања, легуре ZA27 и испитиваних композита, без подмазивања, $F_2 = 20\text{ N}$

Аналитичке и графичке зависности промене интензитета хабања од брзине клизања и нормалног оптерећења при испитивањима без подмазивања, дате су на сликама 6.15÷6.23. Наведене су регресионе функције, коефицијенти регресионих функција и добијени индекси криволинијске корелације.

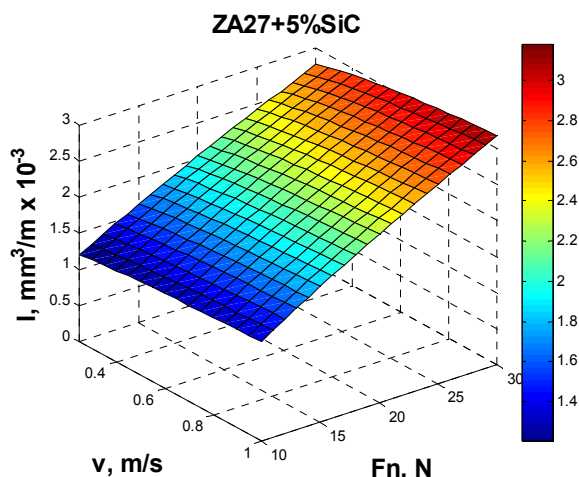


Слика 6.18 Интензитет хабања, легуре ZA27 и испитиваних композита, без подмазивања, $F_3 = 30 N$



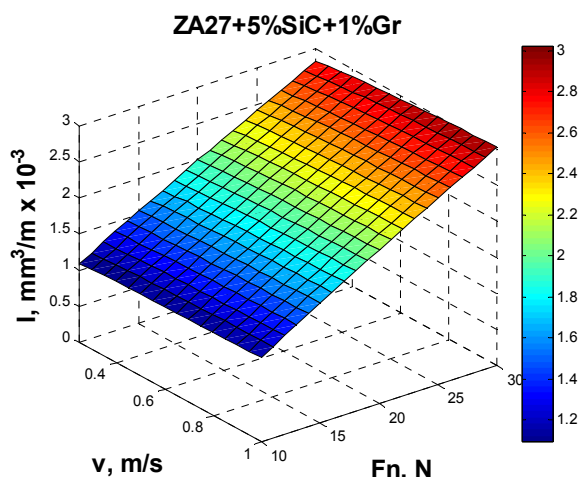
ZA27			
$I = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
1.8395	0.2613	0.0715	R=0.9922
$I = 1.8395 \cdot F_n^{0.2613} \cdot v^{0.0715}$			

Слика 6.19 Интензитет хабања, ZA27, без подмазивања



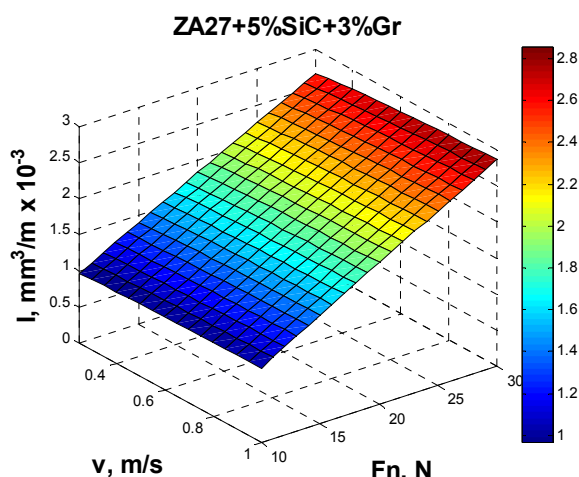
ZA27+5%SiC			
$I = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.2403	0.7589	0.0958	R=0.9645
$I = 0.2403 \cdot F_n^{0.7589} \cdot v^{0.0958}$			

Слика 6.20 Интензитет хабања, ZA27+5%SiC, без подмазивања



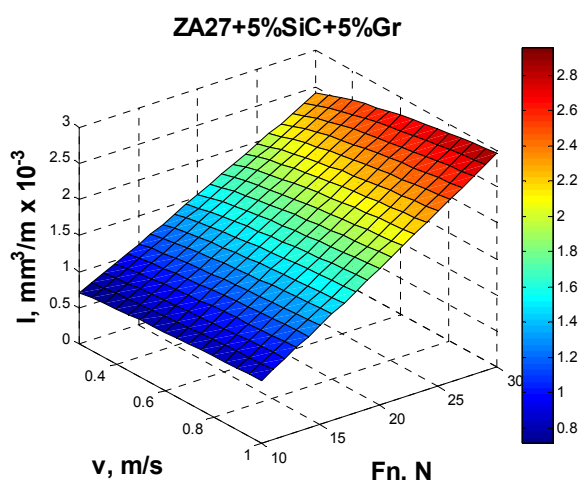
ZA27+5%SiC+1%Gr			
$I = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.1601	0.8640	0.0475	R=0.9651
$I = 0.1601 \cdot F_n^{0.8640} \cdot v^{0.0475}$			

Слика 6.21 Интензитет хабања, ZA27+5%SiC+1%Gr, без подмазивања



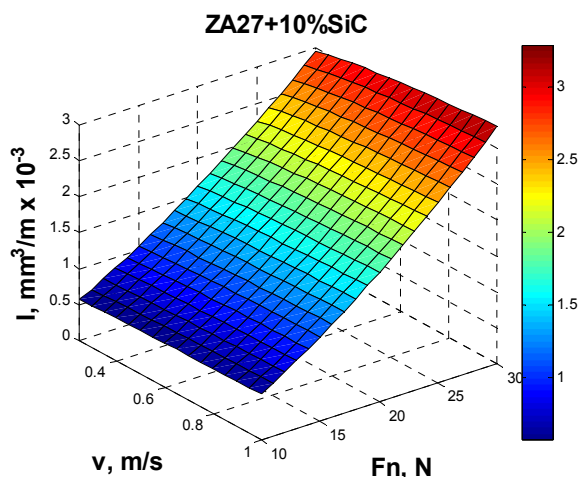
ZA27+5%SiC+3%Gr			
$I = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.1235	0.9239	0.0487	R=0.9771
$I = 0.1235 \cdot F_n^{0.9239} \cdot v^{0.0487}$			

Слика 6.22 Интензитет хабања, ZA27+5%SiC+3%Gr, без подмазивања



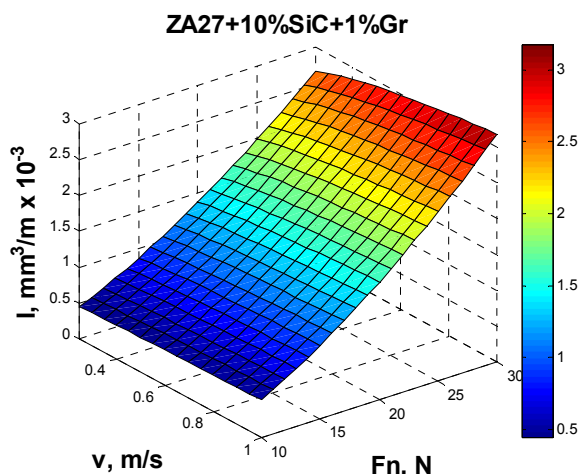
ZA27+5%SiC+5%Gr			
$I = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0685	1.1074	0.1459	R=0.9664
$I = 0.0685 \cdot F_n^{1.1074} \cdot v^{0.1459}$			

Слика 6.23 Интензитет хабања, ZA27+5%SiC+5%Gr, без подмазивања



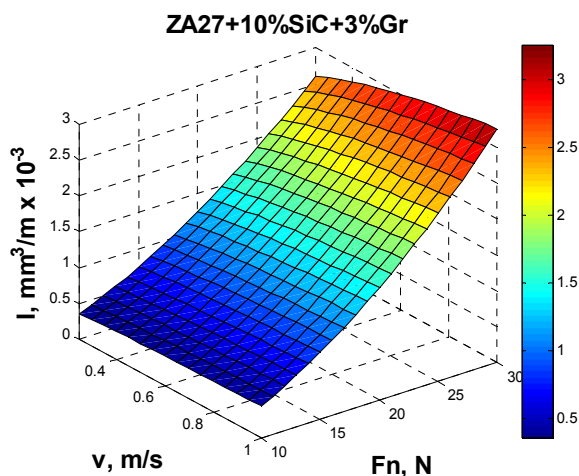
ZA27+10%SiC			
$I = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0208	1.4892	0.0765	R=0.9014
$I = 0.0208 \cdot F_n^{1.4892} \cdot v^{0.0765}$			

Слика 6.24 Интензитет хабања, ZA27+10%SiC, без подмазивања



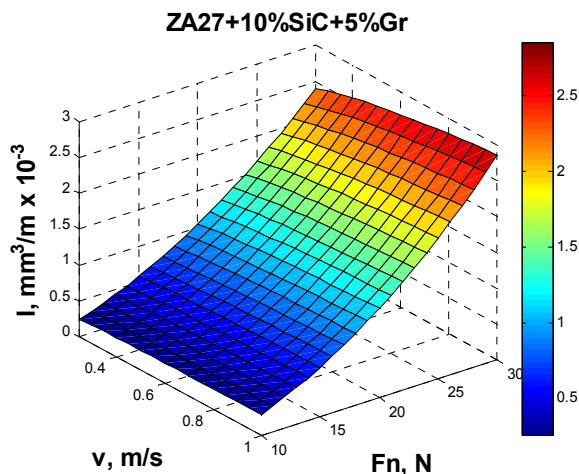
ZA27+10%SiC+1%Gr			
$I = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0126	1.6257	0.1237	R=0.9215
$I = 0.0126 \cdot F_n^{1.6257} \cdot v^{0.1237}$			

Слика 6.25 Интензитет хабања, ZA27+10%SiC+1%Gr, без подмазивања



ZA27+10%SiC+3%Gr			
$I = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0072	1.7958	0.16	R=0.9176
$I = 0.0072 \cdot F_n^{1.7958} \cdot v^{0.16}$			

Слика 6.26 Интензитет хабања, ZA27+10%SiC+3%Gr, без подмазивања

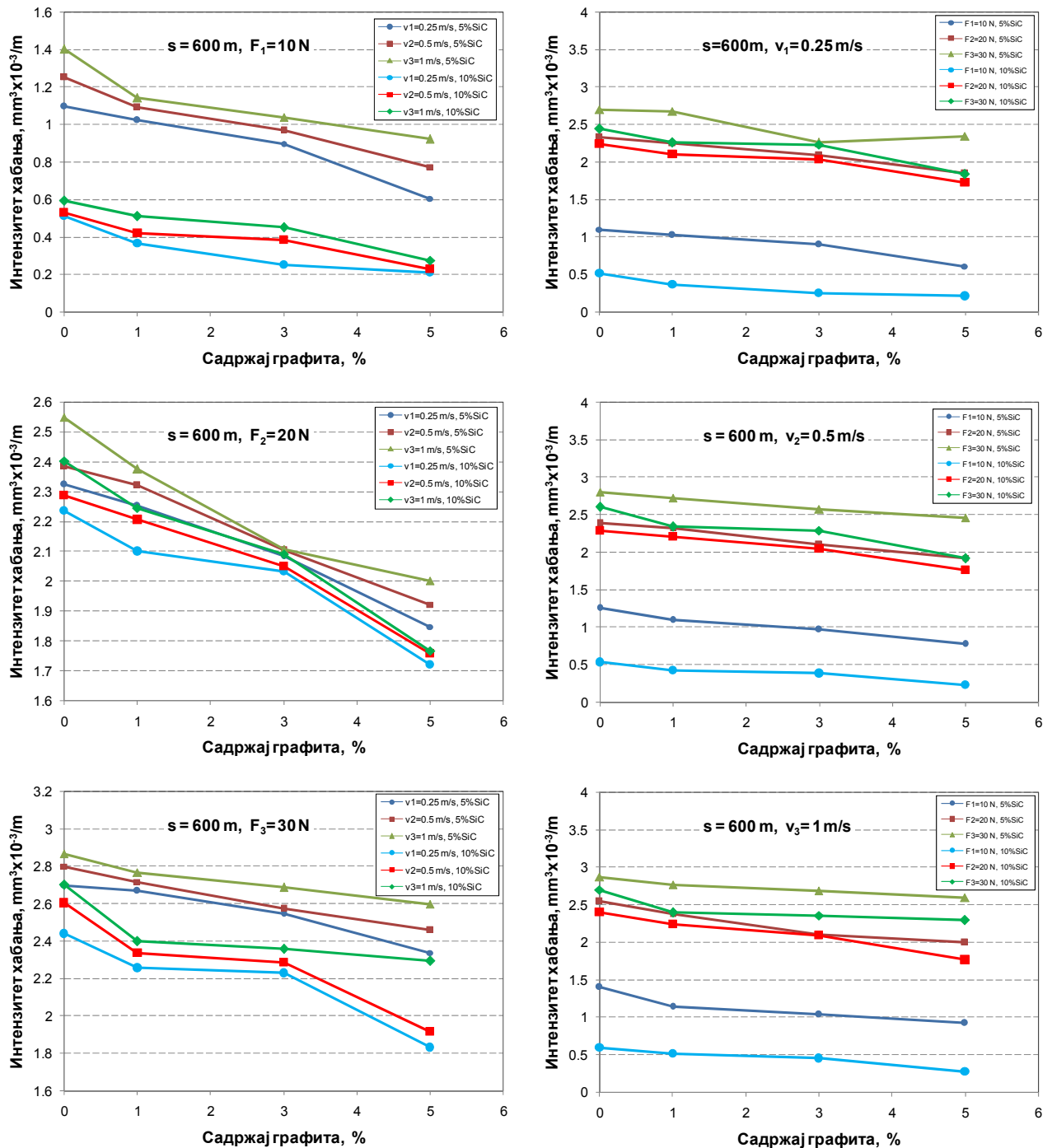


ZA27+10%SiC+5%Gr			
$I = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0027	2.0456	0.1242	R=0.9213
$I = 0.0027 \cdot F_n^{2.0456} \cdot v^{0.1242}$			

Слика 6.27 Интензитет хабања, ZA27+10%SiC+5%Gr, без подмазивања

При свим условима испитивања повећање удела SiC у композитном материјалу, доводи до повећане отпорности на хабање. Ово тврђење је у складу са доступним публикованим радовима других истраживача. Легура ZA27 се интензивније хаба и има већу ширину трага хабања него композит са 5% SiC. Повећавањем учешћа силицијум карбида на 10% доводи до даљег смањења ширине трага хабања, што је посебно изражено при нижим нивоима оптерећења, где се ширина трага хабања смањује за око 50% у односу на легуру ZA27.

Да би се сагледао утицај графита на хабање композитних материјала, на слици 6.28 дата је зависност интензитета хабања од садржаја графита у композитима.



Слика 6.28 Интензитет хабања испитиваних композита у зависности од садржаја графита

Анализирани су композити који садрже силицијум карбид и графит. Код хибридних композита ојачаних са 5%, односно 10% SiC, додавање графита (од 1 ÷ 5%) доводи до смањења ширине трага хабања, у односу на легуру ZA27. Такође, хибридни композити ојачани SiC, који садрже и графит, мање се хабају од композита који су ојачани само честицама SiC. Овај тренд је тако рећи линеаран код нижих контактних оптерећења, нпр. за вредност нормалног оптерећења 10 N. Међутим, код већих вредности оптерећења ова линеарност није присутна, већ повећано учешће графита, доводи до веће отпорности на хабање. На пример, хибридни композит ZA27+5%SiC+5%Gr има мању ширину трага хабања, односно интензитет хабања у односу на композит ZA27+10%SiC.

Гледајући само композите ојачане са 5% SiC, најмању отпорност на хабање, у свим тестовима има материјал ZA27+5%SiC. Из те групе композита, најбоље се показао композит ZA27+5%SiC+5%Gr. Из групе композита ојачаних са 10% SiC, најмању отпорност на хабање показао је композит ZA27+10% SiC. Композит ZA27+10% SiC+5% Gr се показао као најотпорнији.

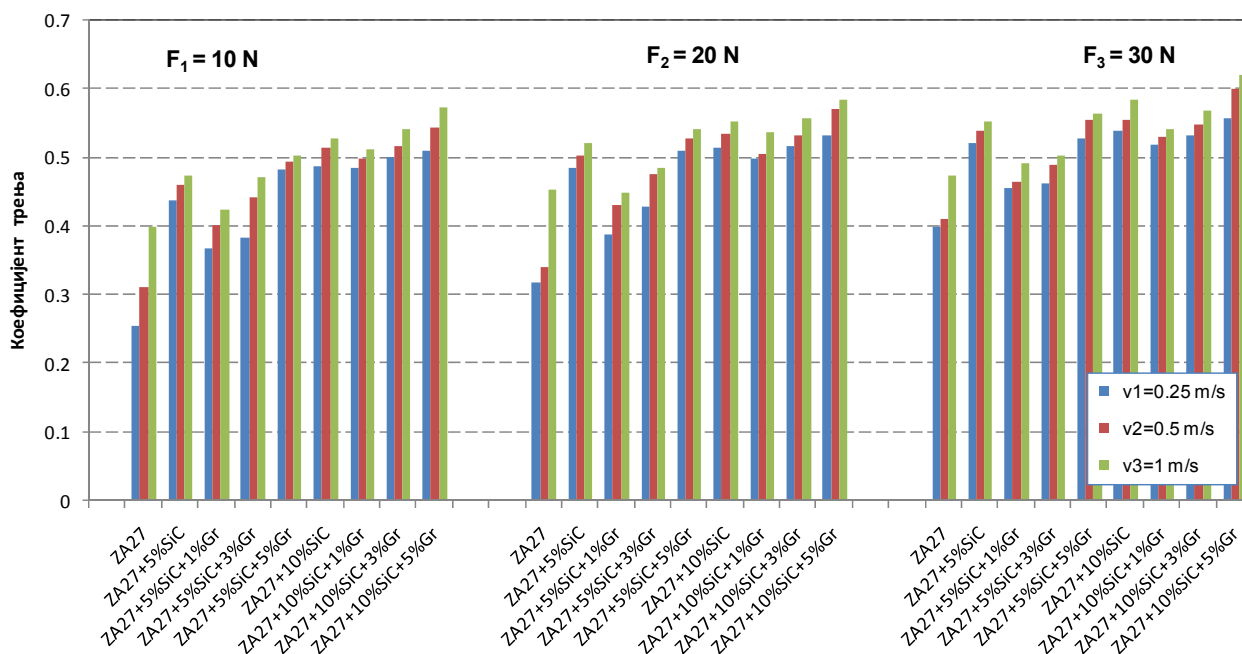
6.1.2 Коefицијент трења

Према описаној процедури, током експерименталних испитивања континуално је праћен коefицијент трења за све испитиване материјале у следећим условима:

- нормално оптерећење: 10 N, 20 N и 30 N;
- брзина клизања: 0.25 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s;
- дужина пута клизања 600 m.

Током испитивања, за сваки нови материјал коришћен је нови диск. При томе су контактне површине детаљно чишћене алкохолем како би се уклониле нечистоће које би могле да утичу на поузданост мерења.

На величину коefицијента трења утичу многи фактори: основни материјал, врста, величина и процентуални састав ојачивача, брзина клизања, нормално оптерећење, дужина пута клизања, контактна геометрија, поступак добијања композита, врста подмазивања итд. Ради лакше анализе утицаја брзине клизања и нормалног оптерећења на фрикционе карактеристике испитиваних композита, формиран је упоредни хистограмски приказ, дат на слици 6.29, На овај начин јасно се уочава ранг фрикционих својстава испитиваних материјала.

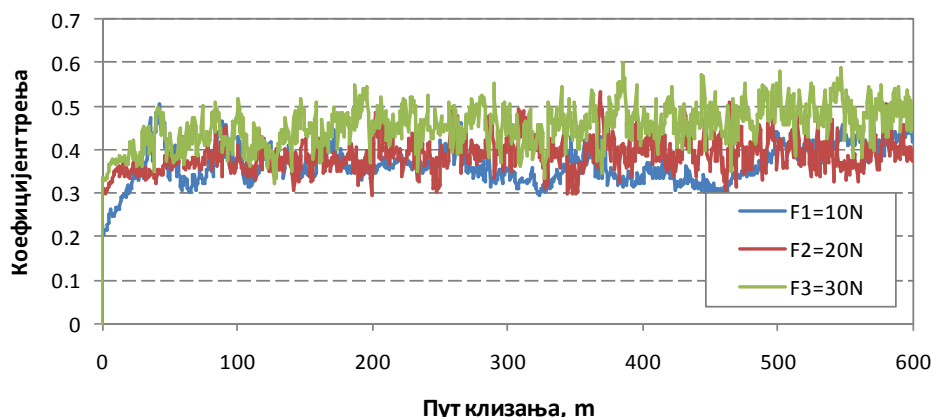


Слика 6.29 Коefицијент трења легуре ZA27 и испитиваних композита, без подмазивања

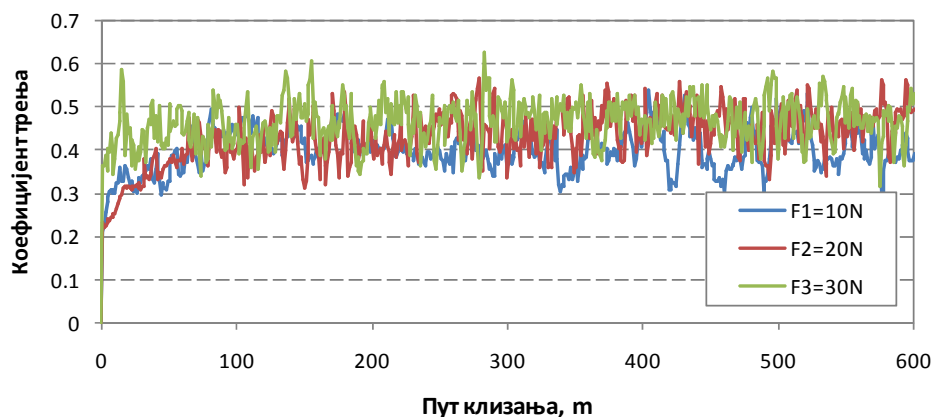
Анализом дијаграма, уочава се јасан утицај нормалног контактнoг оптерећења и брзине клизања на фрикционе карактеристике композита. Са порастом нормалног оптерећења коефицијент трења расте за све испитиване материјале. При повећању брзине клизања повећавају се и вредности коефицијената трења, тако да се највеће вредности коефицијената трења одговарају највећој брзини клизања.

На сликама 6.30 до 6.32 дате су зависности коефицијента трења од пута клизања, које су добијене за хибридни композит ZA27+5%SiC+1%Gr, за све три вредности брзине клизања. Дијаграми промене коефицијента трења у зависности од пута клизања за остале испитиване материјале у условима без подмазивања имају сличан облик.

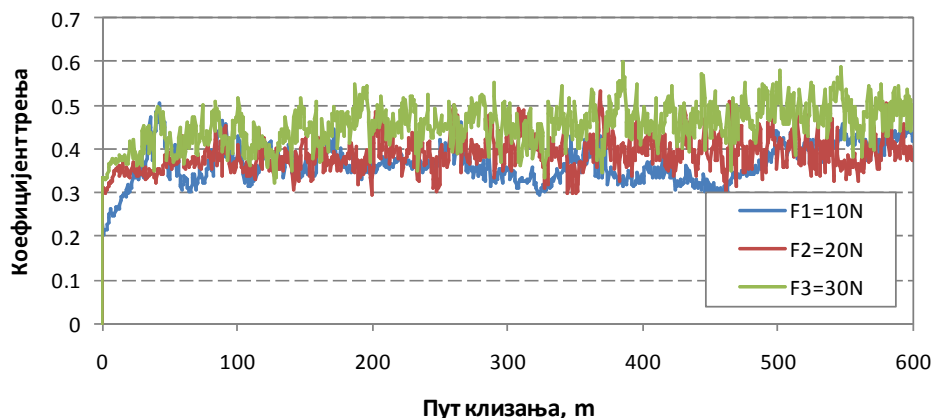
На сликама 6.30 до 6.32 уочава се да су највеће вредности коефицијента трења при највећим нивоима нормалног оптерећења.



Слика 6.30 Коефицијент трења – ZA27+5%SiC+1%Gr, при брзини клизања $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$

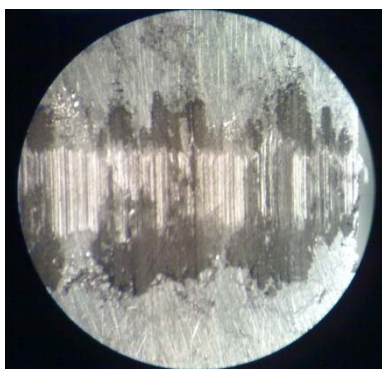


Слика 6.31 Коефицијент трења – ZA27+5%SiC+1%Gr, при брзини клизања $v_2 = 0.5 \text{ m/s}$



Слика 6.32 Коефицијент трења – ZA27+5%SiC+1%Gr, при брзини клизања $v_3 = 1 \text{ m/s}$

Уочава се да се после периода уходавања коефицијент трења има благи пораст али уз јасно изражену динамика просеса. Анализом дијаграма на слици 6.29 може се уочити да сви испитивани материјали имају исти тренд понашања при промени брзине клизања и нормалног оптерећења. Додавањем силицијум-карбида у основни материјал долази до побољшања триболошких карактеристика али истовремено долази до повећања коефицијента трења. Најнижи коефицијента трења уочава се код основног материјала, легуре ZA27. Композит са 5% SiC при повећању оптерећења има знатно виши коефицијента трења, а даљим додатком силицијум-карбида, код композита са 10% SiC, тај пораст је још израженији. Еквивалентан тренд је и при порасту брзине клизања. Међутим, уочљиво је да је скок коефицијента трења изражајнији при промени брзине клизања, посебно при већим брзинама клизања. Тај пораст вредности коефицијента трења може се објаснити појавом абразивног хабања као доминантног механизма хабања које доводи до повећање коефицијента трења.



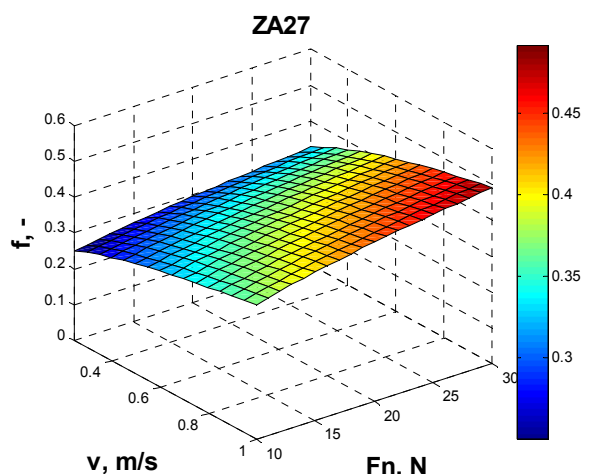
Слика 6.32 Траг хабања и продукти хабања - композит

Додатком графита (1%) материјалима који садрже 5% SiC, односно 10% SiC, долази до пада вредности коефицијента трења. Анализирајући само хибридне композите, уочава се да композит ZA27+5%SiC+1%Gr има најниже вредности коефицијента трења. Међутим даље повећање учешћа графита код хибридних композита (3% и 5%) доводи до пораста коефицијента трења, било да је реч и промени брзине клизања или нормалног оптерећења. Уочава се да материјали са највишим садржајем силицијум-карбида и графита имају највеће вредности коефицијента трења.

Са порастом садржаја графита у композиту, смањује се количина продуката хабања која остаје у зони контакта. Уочава се присуство честица силицијум-карбида што доводи до повећања коефицијента трења хибридних композита (слика 6.32).

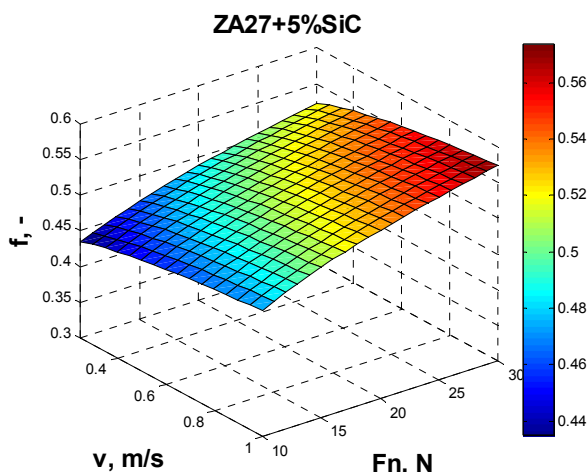
И код ових истраживања формиране су одговарајуће аналитичке зависности промене коефицијента трења од услова контаката. Узимајући обзир брзине клизања и нормална оптерећења при испитивањима без подмазивања, одређене су константе и експоненти корелационих функција и дефинисан коефицијент корелације за све испитиване материјале.

Утицај брзине клизања и нормалног контактног оптерећења на коефицијент трења легуре ZA27 и композитних материјала, у условима без подмазивања, приказан је на сликама 6.33 - 6.41. Очигледан је пораст коефицијента трења са порастом брзине клизања и порастом нормалног оптерећења.



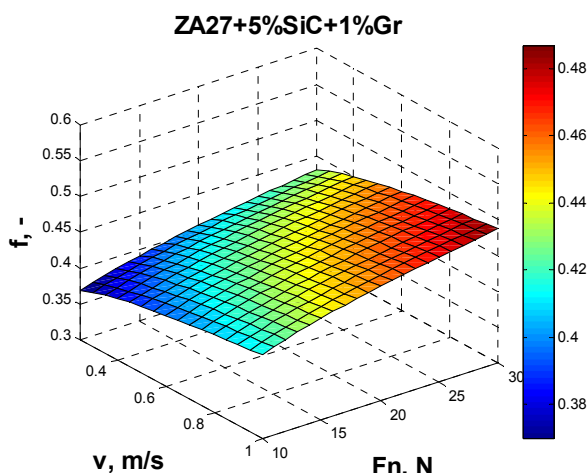
ZA27			
$f = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.212	0.247	0.2899	R=0.9414
$f = 0.212 \cdot F_n^{0.247} \cdot v^{0.2899}$			

Слика 6.33 Коефицијент трења, ZA27, без подмазивања



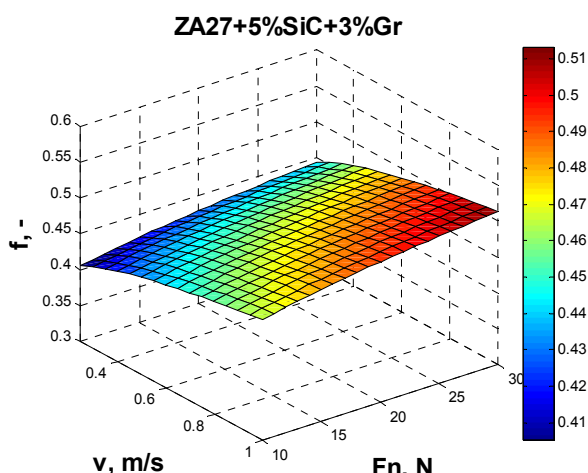
ZA27+5%SiC			
$f = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.3232	0.1686	0.0661	R=0.9595
$f = 0.3232 \cdot F_n^{0.1686} \cdot v^{0.0661}$			

Слика 6.34 Коефицијент трења, ZA27+5%SiC, без подмазивања



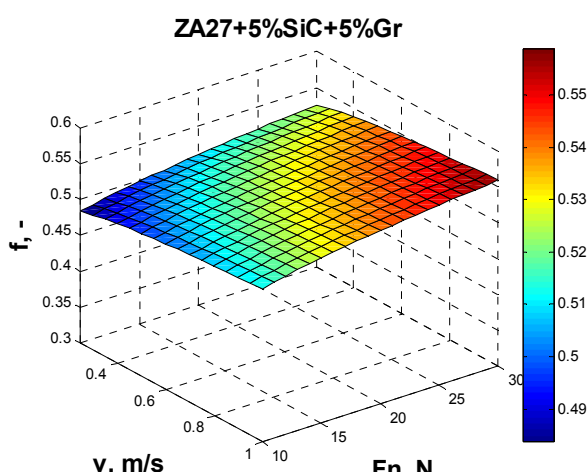
ZA27+5%SiC+1%Gr			
$f = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.3017	0.1407	0.0868	R=0.9551
$f = 0.3017 \cdot F_n^{0.1407} \cdot v^{0.0868}$			

Слика 6.35 Коефицијент трења, ZA27+5%SiC+1%Gr, без подмазивања



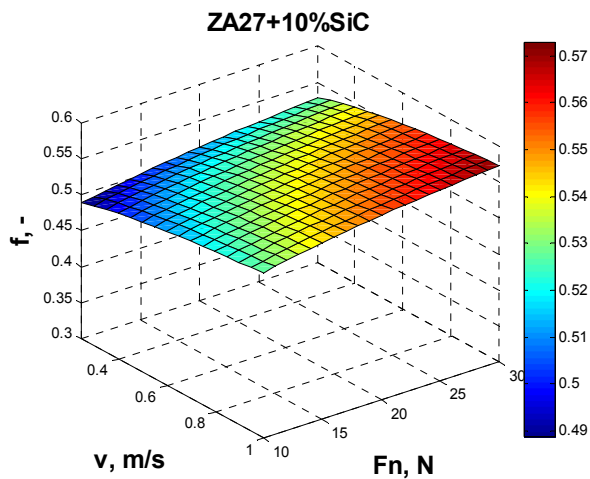
ZA27+5%SiC+3%Gr			
$f = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.3855	0.0842	0.1037	R=0.9339
$f = 0.3855 \cdot F_n^{0.0842} \cdot v^{0.1037}$			

Слика 6.36 Коефицијент трења, ZA27+5%SiC+3%Gr, без подмазивања



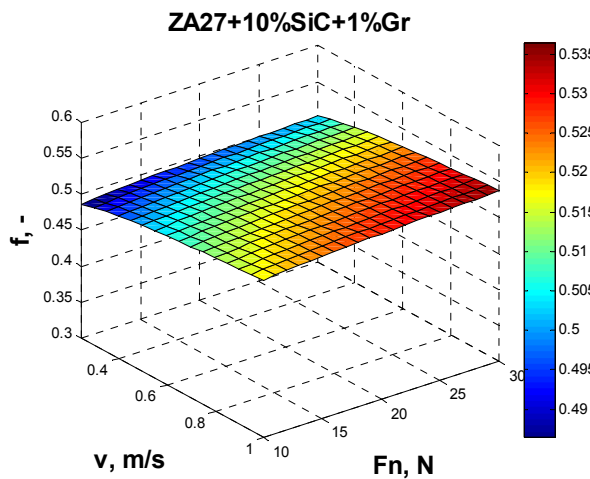
ZA27+5%SiC+5%Gr			
$f = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.4305	0.0767	0.043	R=0.9826
$f = 0.4305 \cdot F_n^{0.0767} \cdot v^{0.043}$			

Слика 6.37 Коефицијент трења, ZA27+5%SiC+5%Gr, без подмазивања



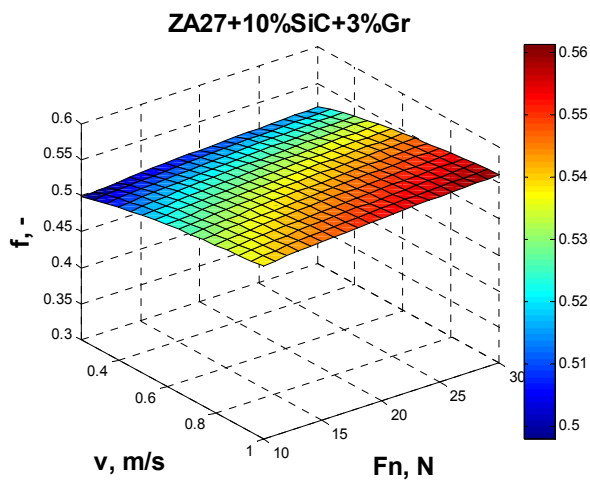
ZA27+10%SiC			
$f = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.4478	0.0724	0.0573	0.9893
$f = 0.4478 \cdot F_n^{0.0724} \cdot v^{0.0573}$			

Слика 6.38 Коефицијент трења, ZA27+10%SiC, без подмазивања



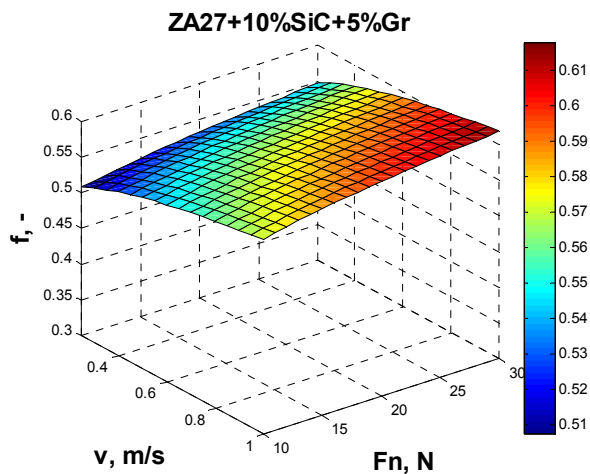
ZA27+10%SiC+1%Gr			
$f = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.4825	0.0312	0.0459	R=0.9844
$f = 0.4825 \cdot F_n^{0.0312} \cdot v^{0.0459}$			

Слика 6.39 Коефицијент трења, ZA27+10%SiC+1%Gr, без подмазивања



ZA27+10%SiC+3%Gr			
$f = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.4974	0.0356	0.0581	R=0.9907
$f = 0.4974 \cdot F_n^{0.0356} \cdot v^{0.0581}$			

Слика 6.40 Коефицијент трења, ZA27+10%SiC+3%Gr, без подмазивања



ZA27+10%SiC+5%Gr			
$f = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.4874	0.0697	0.0866	R=0.9712
$f = 0.4874 \cdot F_n^{0.0697} \cdot v^{0.0866}$			

Слика 6.41 Коефицијент трења, ZA27+10%SiC+5%Gr, без подмазивања

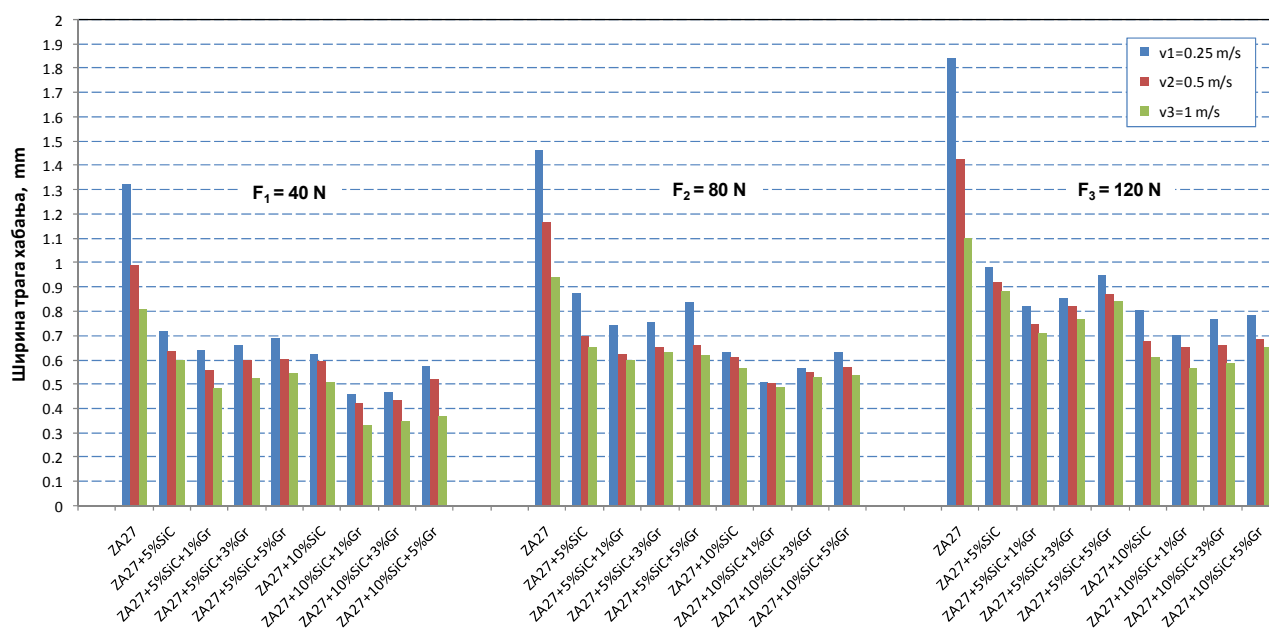
6.2 Анализа резултата истраживања у условима са подмазивањем

6.2.1 Хабање

Испитивања триболошких карактеристика легуре ZA27 и композитних материјала вршена су у следећим условима:

- нормално оптерећење: 40 N, 80 N и 120 N;
- брзина клизања: 0.25 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s;
- дужина пута клизања 1200 m.

Резултати испитивања отпорност на хабање композитних материјала, у условима са подмазивањем, дати су у виду хистограмског приказа на слици 6.42.



Слика 6.42 Ширина трага хабања, легуре ZA27 и испитиваних композита, са подмазивањем

Промена ширине трага хабања током времена има исти карактер за све испитиване материјале. Уочава се разлика у нивоу хабања код конкретних материјала. Процес хабања карактерише постизање одређеног нивоа, стабилизација и благи пораст ширине трага хабања током времена. Хабање испитиваних композитних материјала увек је далеко ниже у односу на ниво хабања легуре ZA27 која је коришћена као основни материјал.

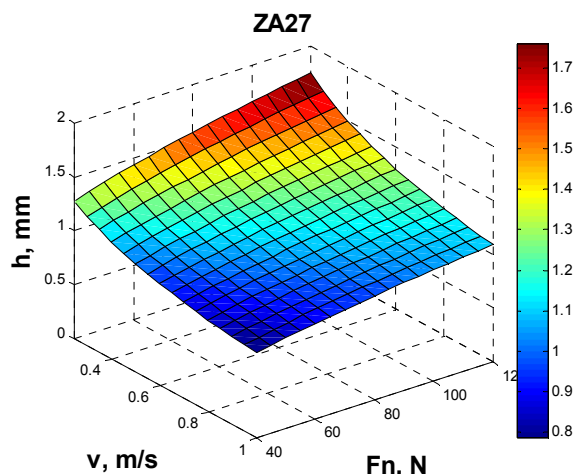
Са хистиграмског приказа ширине трагова хабања легуре ZA27 и испитиваних композита може се јасно уочити утицај нормалног контактнoг оптерећења и брзине клизања на величину хабања. Овај утицај је истоветан за све испитиване материјале. Са порастом нормалног оптерећења долази до пораста ширине трага хабања. Са порастом брзине клизања уочава се да се хабање смањује. Утицај нормалног контактнoг оптерећења на степен хабања има приближно исти карактер и при мањим и при већим брзинама клизања. Највеће ширине трагова хабања одговарају најмањим брзинама клизања и највећим контактним оптерећењима. При највећој брзини клизања и најмањем оптерећењу забележене су најмање ширине трагова хабања код свих испитиваних материјала.

У свим условима испитивања, у условима са подмазивањем, композитни материјали показују мање хабање у односу на основни материјал, легуру ZA27. Јасно се може извршити њихово рангирање. Највеће хабање се јавља код основног материјала. Анализом дијаграма коже се видети да су вредности ширине трагова хабања код композита знатно мање. Додавањем силицијум карбида у основни материјал, настају композити ZA27+5%SiC и ZA27+10%SiC. Очигледно је да при свим условима испитивања SiC повећава отпорност на хабање новодобијених композита. Композит са већим садржајем силицијум карбида има већу отпорност на хабање.

Испитивање хибридних композита са 1% и 3% и 5% графита, показује да они имају још боље триболошке карактеристике, односно имају још мање ширине трагова хабања. Најмање хабање се јавља код хибридних композита са 1% графита и то у свим режимима и током целе дужине пута клизања. Уочава се да се све време испитивања, до 1200 m, сви материјали налазе у фази умереног хабања и да додавањем уља триболошке карактеристике хибридних композита долазе до изражаја. Највећу отпорност на хабање показао је хибридни композит ојачан честицама силицијум карбида у количини од 10 vol.% и 1% графита. Даље повећање учешћа графита (3% и 5%), код хибридних композита доводи до благог пораста ширине трагова хабања.

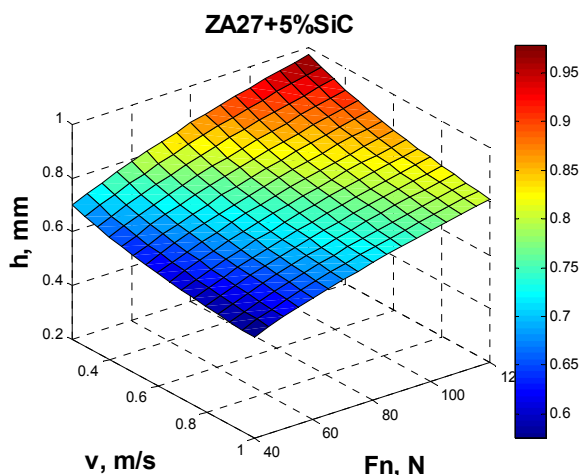
Анализом наведених резултата испитивања добијене су корелационе зависности ширине трагова хабања од услова испитивања, за све материјале.

На сликама 6.43 ÷ 6.51 приказане су зависности ширине трагова хабања од брзине клизања и нормалног контактнoг оптерећења за испитиване материјале, при испитивањима са подмазивањем. Ширине трагова хабања су апроксимиране експоненцијалним регресионим функцијама које највише одговарају реалним расподелама. С обзиром на високе вредности коефицијената корелације очигледно је високо слагање предложених емпиријских расподела са експерименталним подацима.



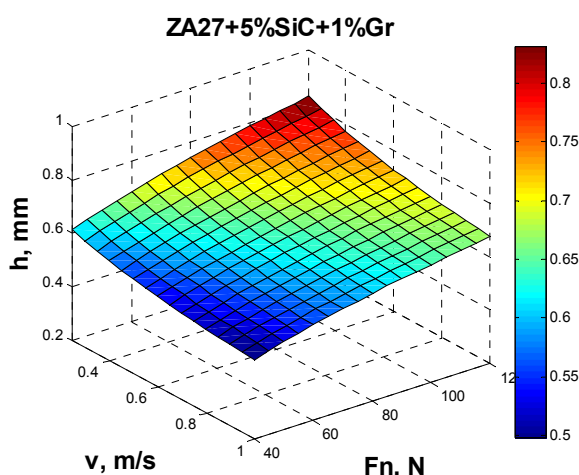
ZA27			
$h = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.2667	0.2936	-0.3475	R=0.9839
$h = 0.2667 \cdot F_n^{0.2936} \cdot v^{-0.3475}$			

Слика 6.43 Ширина трага хабања, ZA27, са подмазивањем



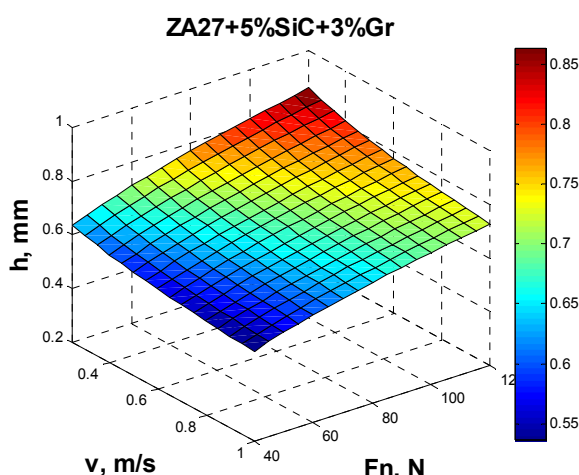
ZA27+5%SiC			
$h = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0185	0.3077	-0.139	R=0.9374
$h = 0.0185 \cdot F_n^{0.3077} \cdot v^{-0.139}$			

Слика 6.44 Ширина трага хабања, ZA27+5%SiC, са подмазивањем



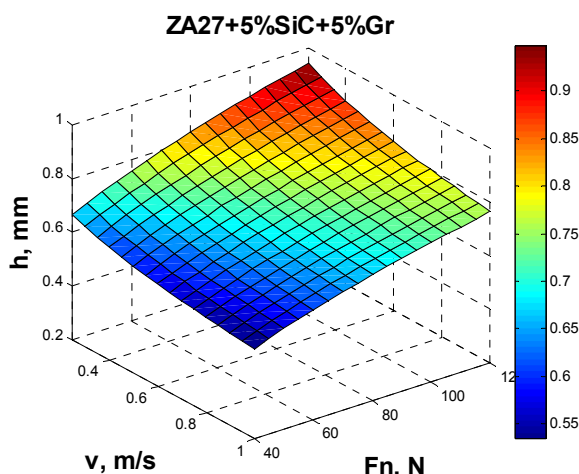
ZA27+5%SiC+1%Gr			
$h = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.1798	0.2758	-0.1515	R=0.9747
$h = 0.1798 \cdot F_n^{0.2758} \cdot v^{-0.1515}$			

Слика 6.45 Ширина трага хабања, ZA27+5%SiC+1%Gr, са подмазивањем



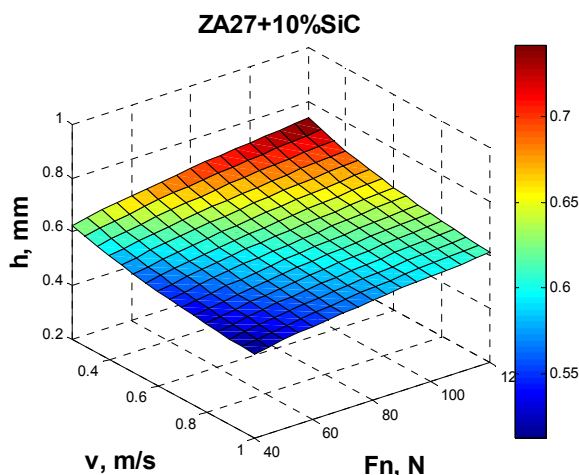
ZA27+5%SiC+3%Gr			
$h = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.1926	0.2772	-0.1251	R=0.9607
$h = 0.1926 \cdot F_n^{0.2772} \cdot v^{-0.1251}$			

Слика 6.46 Ширина трага хабања, ZA27+5%SiC+3%Gr, са подмазивањем



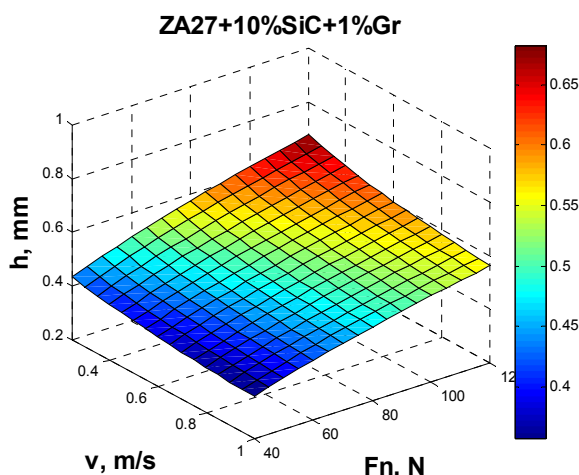
ZA27+5%SiC+5%Gr			
$h = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.1629	0.3224	-0.1572	R=0.9448
$h = 0.1629 \cdot F_n^{0.3224} \cdot v^{-0.1572}$			

Слика 6.47 Ширина трага хабања, ZA27+5%SiC+5%Gr, са подмазивањем



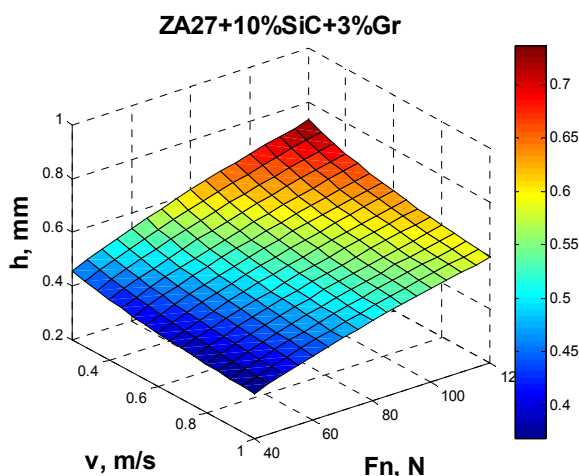
ZA27+10%SiC			
$h = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.2878	0.1566	-0.1421	R=0.9092
$h = 0.2878 \cdot F_n^{0.1566} \cdot v^{-0.1421}$			

Слика 6.48 Ширина трага хабања, ZA27+10%SiC, са подмазивањем



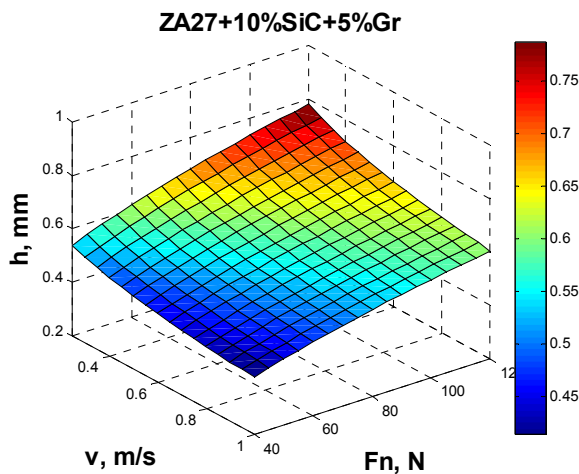
ZA27+10%SiC+1%Gr			
$h = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0786	0.411	-0.14	0.9565
$h = 0.0786 \cdot F_n^{0.411} \cdot v^{-0.14}$			

Слика 6.49 Ширина трага хабања, ZA27+10%SiC+1%Gr, са подмазивањем



ZA27+10%SiC+3%Gr			
$h = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0748	0.4329	-0.155	R=0.9748
$h = 0.0748 \cdot F_n^{0.4329} \cdot v^{-0.155}$			

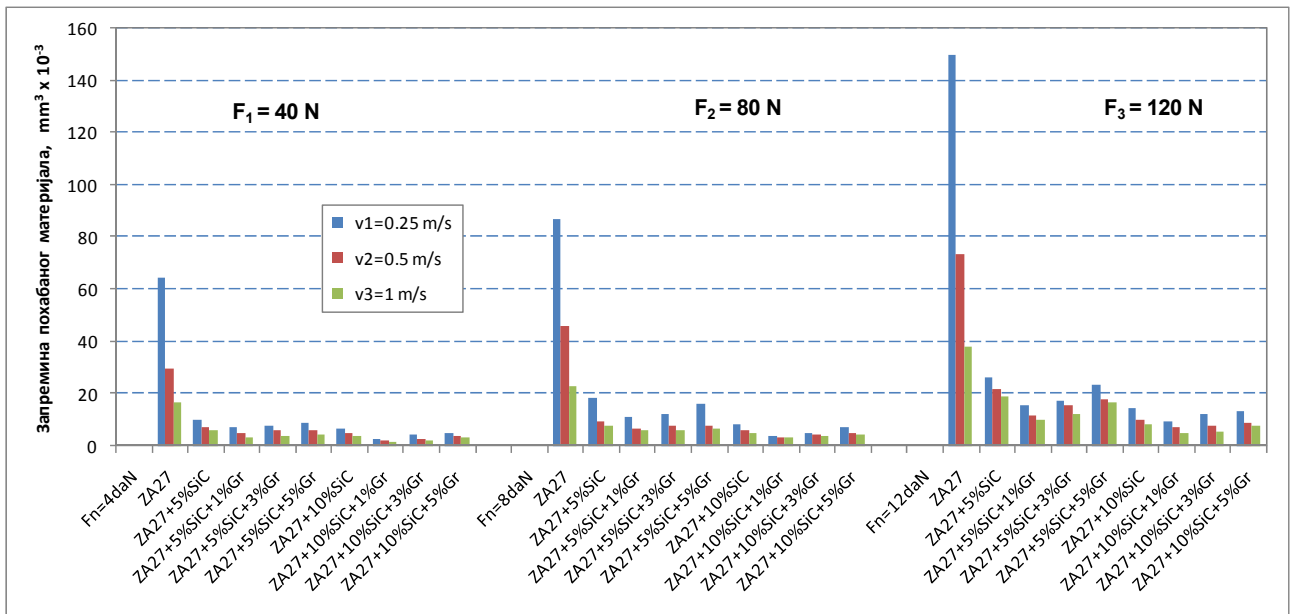
Слика 6.50 Ширина трага хабања, ZA27+10%SiC+3%Gr, са подмазивањем



ZA27+10%SiC+5%Gr			
$h = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.117	0.3429	-0.1899	R=0.9469
$h = 0.117 \cdot F_n^{0.3429} \cdot v^{-0.1899}$			

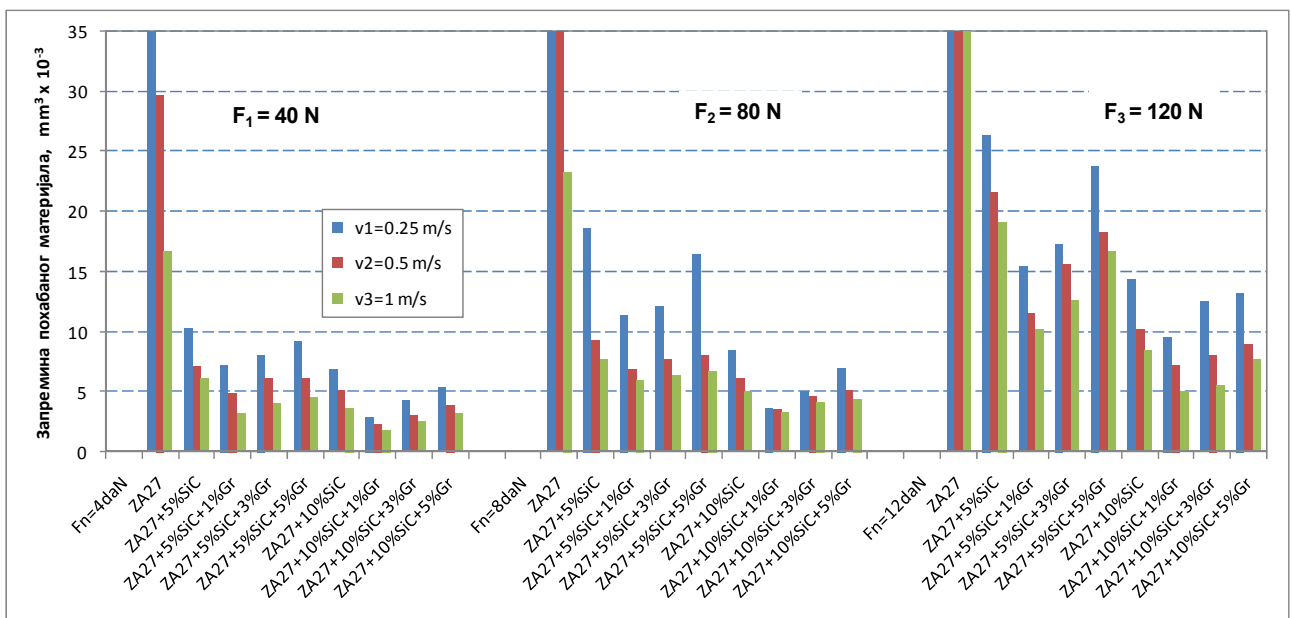
Слика 6.51 Ширина трага хабања, ZA27+10%SiC+5%Gr, са подмазивањем

Запремина похабаног материјала испитиваних композита у условима са подмазивањем, приказана је на на слици 6.52.



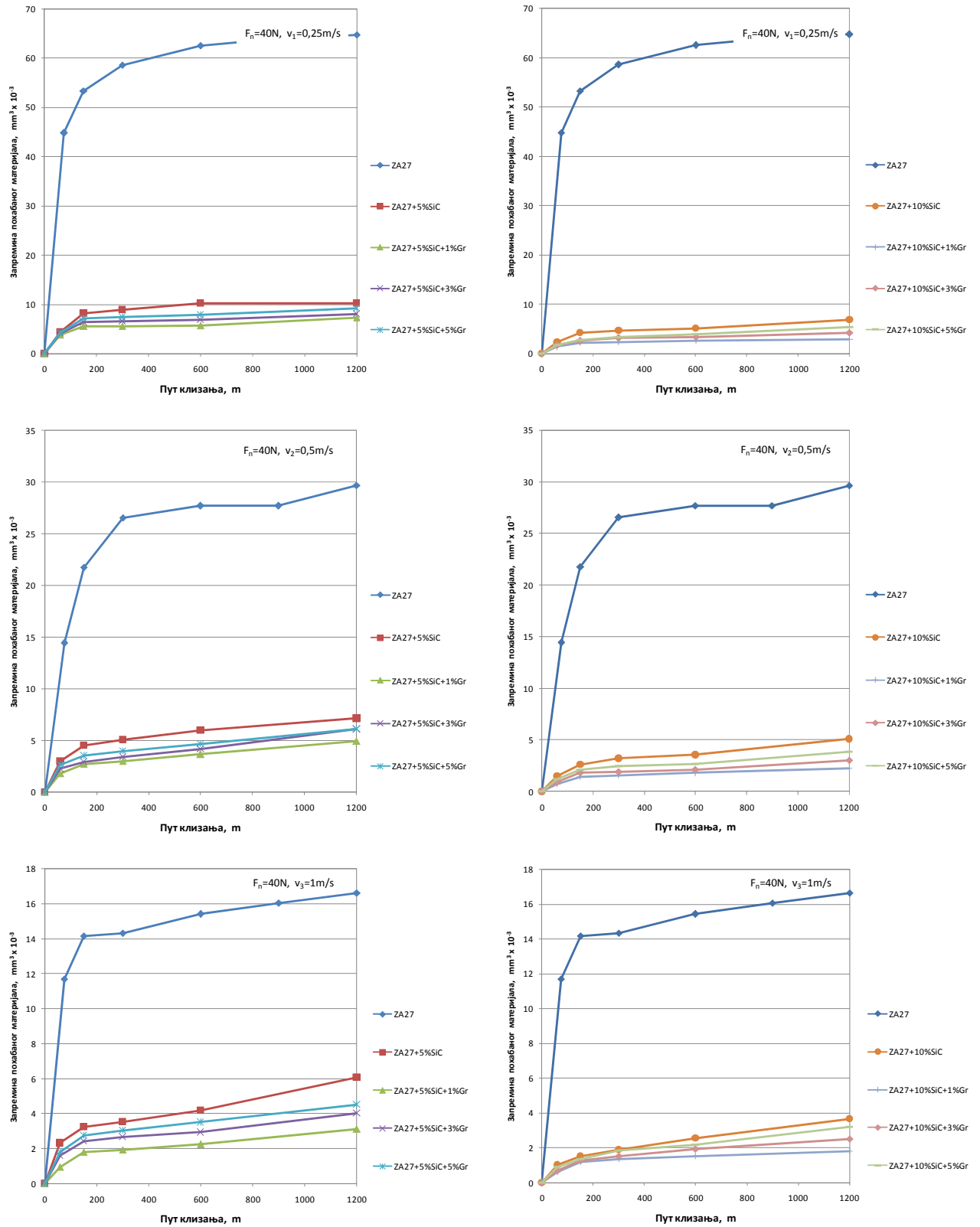
Слика 6.52 Запремина похабаног материјала, легуре ZA27 и испитиваних композита, са подмазивањем

С обзиром да је запремина похабаног материјала легуре ZA27 значајно већа од запремина похабаног материјала код испитиваних композита, да би се боље сагледале вредности запремина похабаног материјала хибридних композита, на слици 6.68 дат је увећан приказ претходног хистограма.



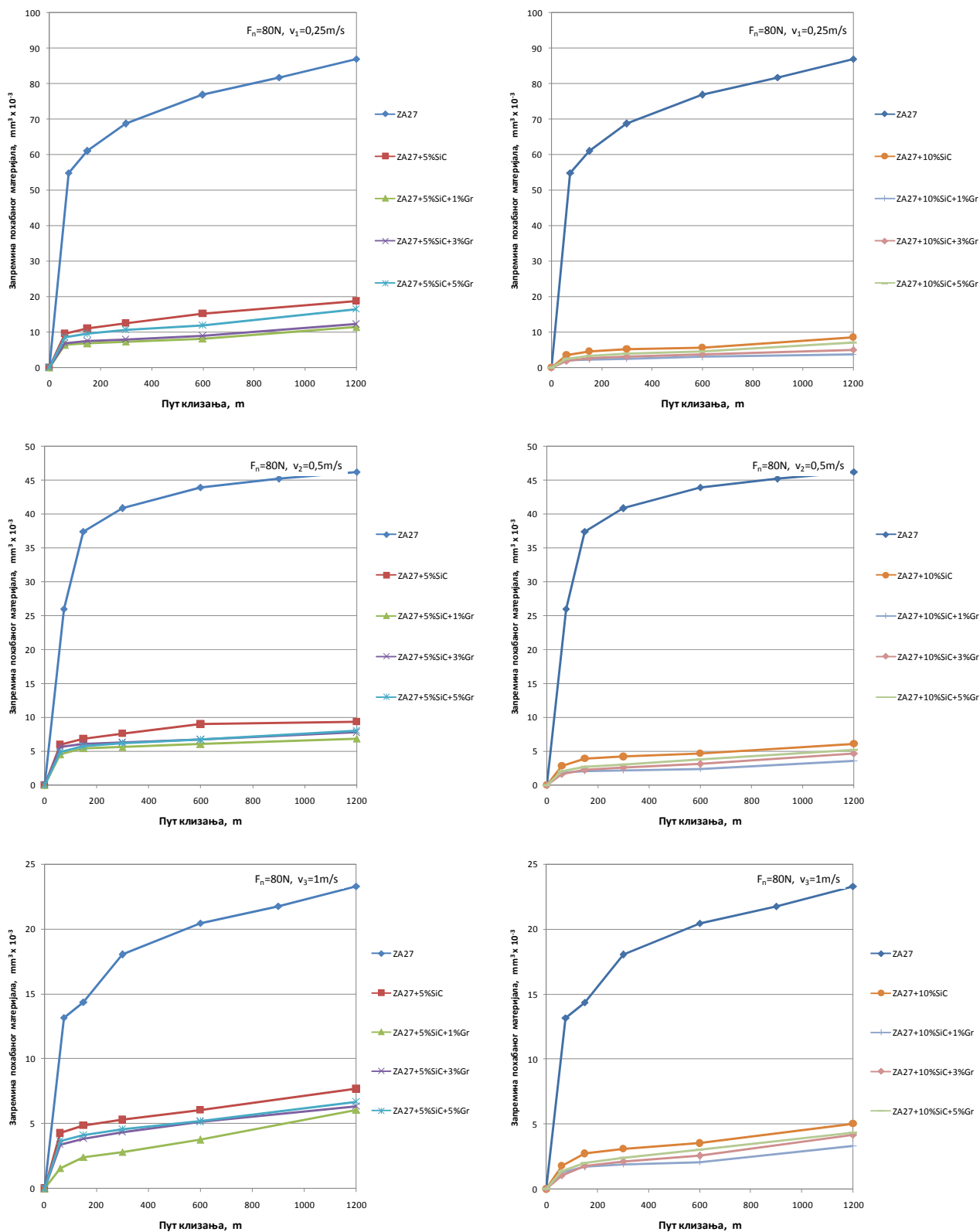
Слика 6.53 Запремина похабаног материјала испитиваних композита, са подмазивањем

На слици 6.54 приказане су запремине похабаног материјала легуре ZA27 и испитиваних композита у функцији пута клизања при оптерећењу од 10 N, уз варирање брзина клизања (0.25 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s).



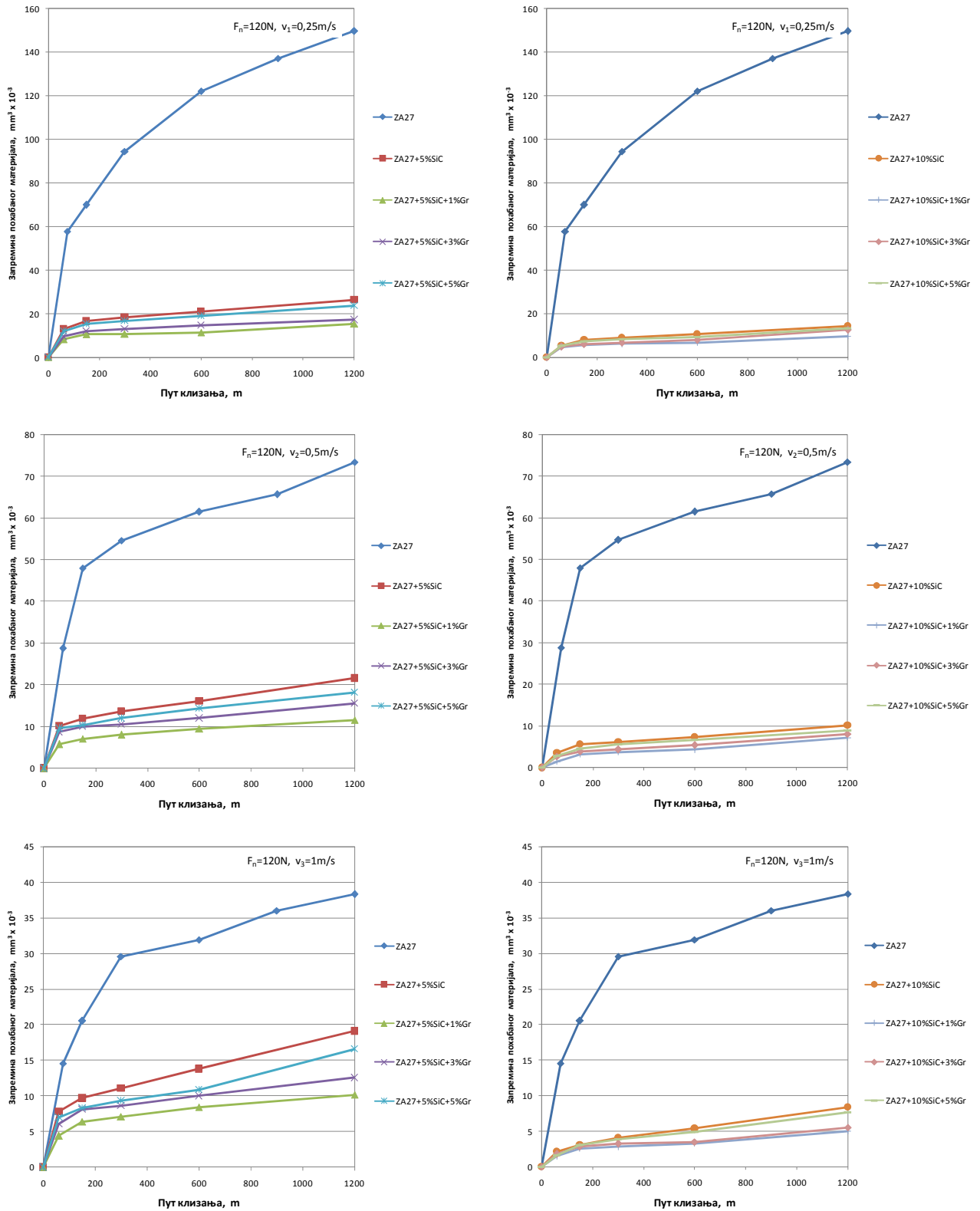
Слика 6.54 Запремина похабаног материјала, легуре ZA27 и испитиваних композита, са подмазивањем, $F_1 = 40 \text{ N}$

На слици 6.55 дате су запремине похабаног материјала легуре ZA27 и испитиваних композита у зависности од пута клизања при оптерећењу од 20 N, уз варирање брзина клизања (0.25 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s).



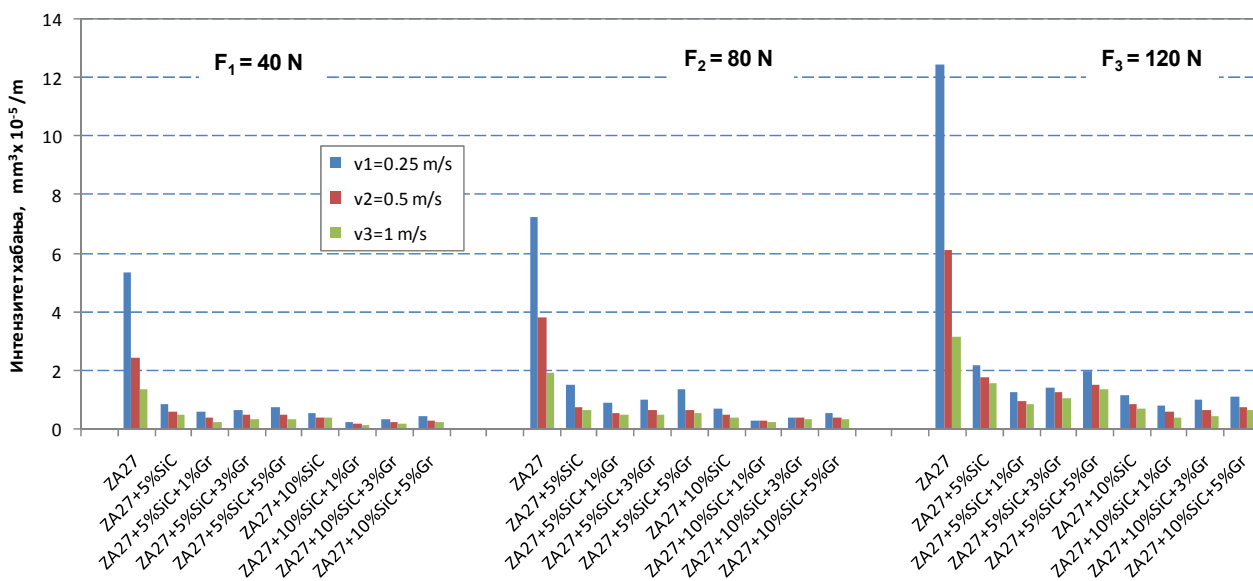
Слика 6.55 Запремина похабаног материјала, легуре ZA27 и испитиваних композита, са подмазивањем, $F_2 = 80\text{ N}$

На слици 6.56 приказане су запремине похабаног материјала легуре ZA27 и испитиваних композита у функцији пута клизања при оптерећењу од 10 N, за различите брзине клизања (0.25 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s).



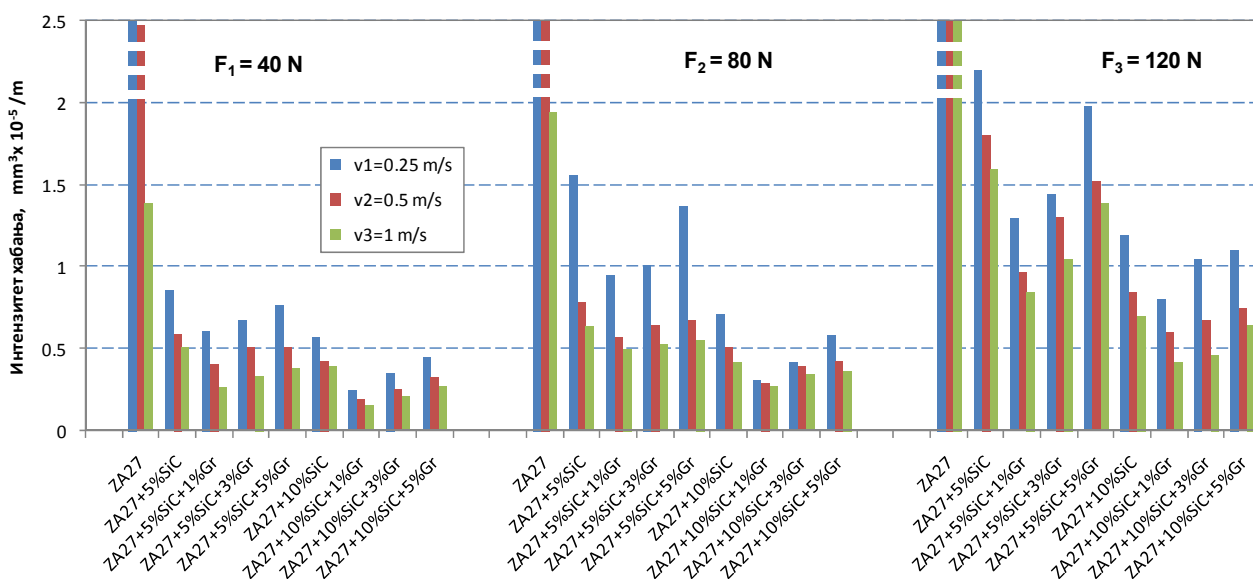
Слика 6.56 Запремина похабаног материјала, легуре ZA27 и испитиваних композита, са подмазивањем, $F_3 = 120\text{ N}$

Добијене вредности интензитета хабања легуре ZA27 и композитних материјала у условима са подмазивањем, приказане су на слици 6.57. Дужина пута клизања износила је 1200 m.



Слика 6.57 Интензитет хабања, легуре ZA27 и испитиваних композита, са подмазивањем

С обзиром да су вредности интензитета хабања ZA27 легуре далеко веће од одговарајућих за композитне материјала, да би се сагледало стање интензитета хабања хибридних композита, на слици 6.58 дат је увећан приказ претходног хистограма.

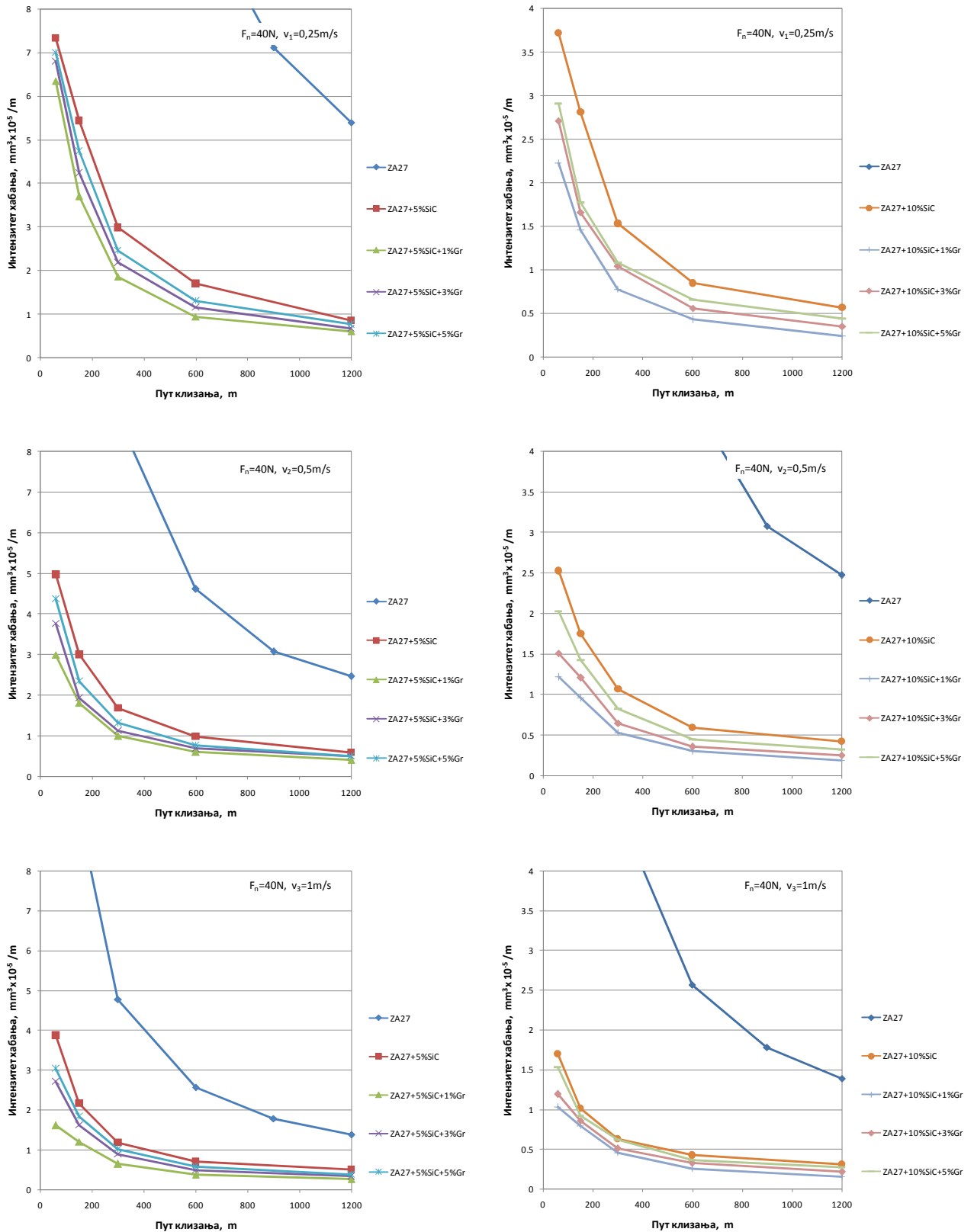


Слика 6.58 Интензитет хабања испитиваних композита, са подмазивањем

Са порастом нормалног оптерећења долази до раста интензитета хабања код свих испитиваних материјала. Овај пораст је посебно изражен код основног материјала и важи за све брзине клизања. Са порастом брзине клизања долази до смањења интензитета хабања код свих испитиваних материјала. Уочава се да су вредности интензитета хабања које се јављају при мањим брзинама клизања знатно веће. Овај тренд је присутан код свих испитиваних материјала и очекиван с обзиром да је време трајања контакта при најмањој брзини клизања (0.25 m/s) најдуже.

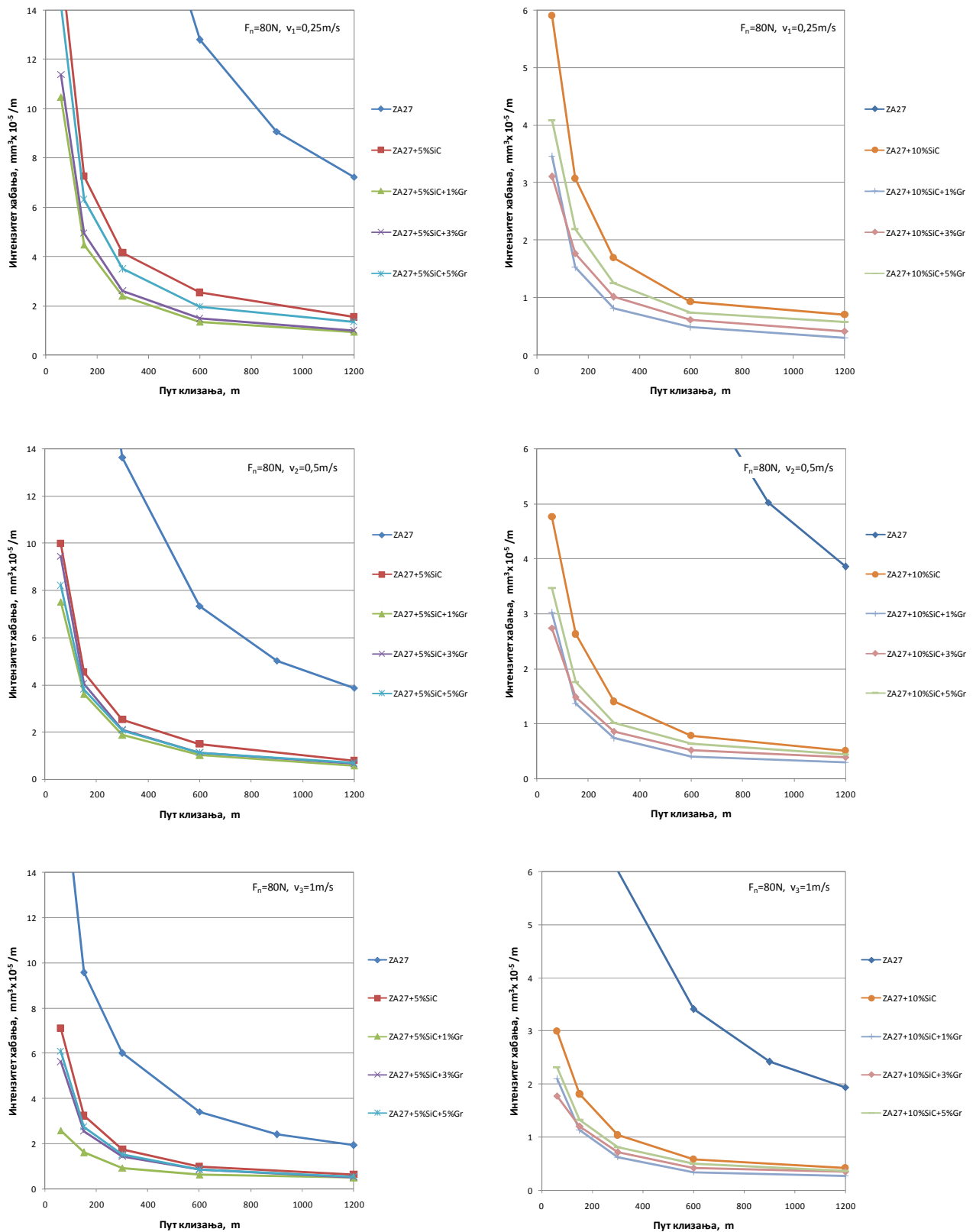
Од свих испитиваних материјала најмањи интензитет хабања има хибридни композит са 1% графита.

Зависности интензитета хабања од пута клизања, за све испитиване материјале, збирно су дате на сликама 6.59 до 6.61. Интензитета хабања је представљен за све режиме испитивања, тј. за три брзине клизања и три нивоа оптерећења.



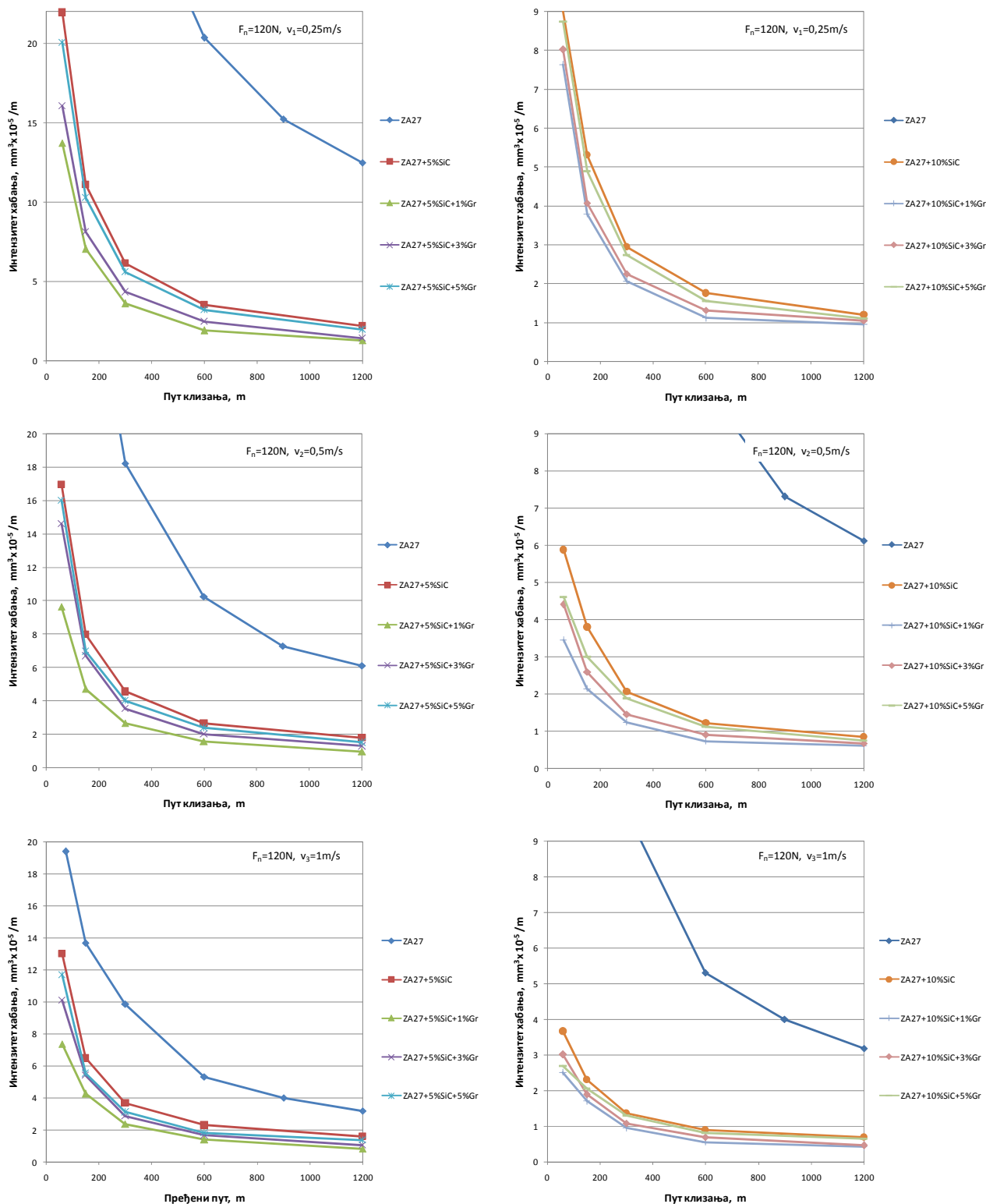
Слика 6.59 Интензитет хабања, легуре ZA27 и испитиваних композита, са подмазивањем, F₁ = 40 N

На слици 6.60 дат је интензитет хабања испитиваних материјала у функцији пута клизања при оптерећењу од 20 N, уз варирање брзина клизања (0.25 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s).



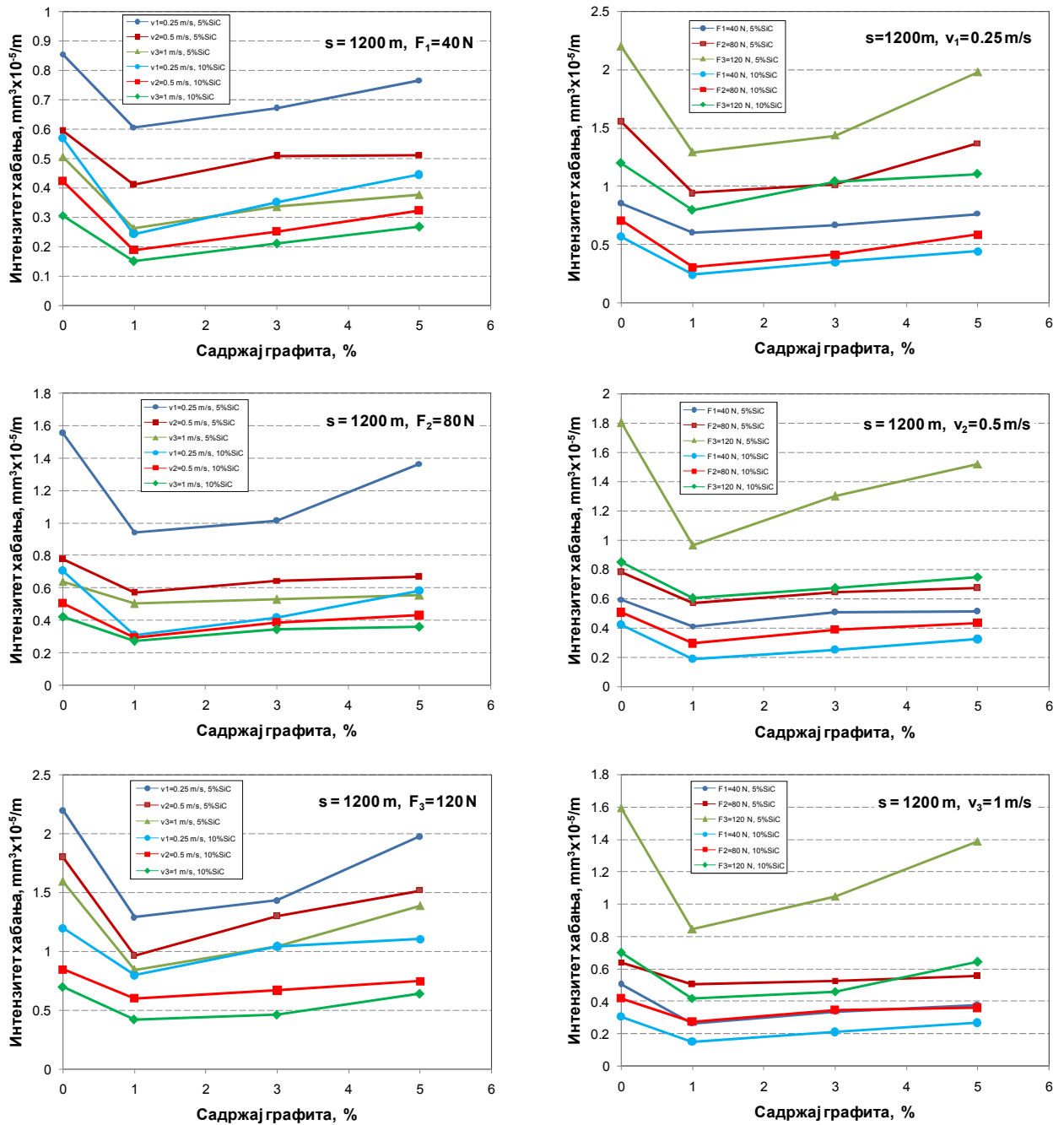
Слика 6.60 Интензитет хабања, легуре ZA27 и испитиваних композита, са подмазивањем, $F_2 = 80 \text{ N}$

На слици 6.61 приказан је интензитет хабања испитиваних материјала у функцији пута клизања при оптерећењу од 30 N, за различите брзине клизања (0.25 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s).



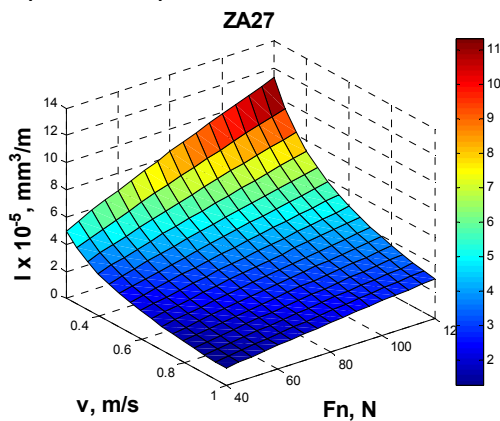
Слика 6.61 Интензитет хабања, легуре ZA27 и испитиваних композита, са подмазивањем, $F_3 = 120\text{ N}$

На слици 6.62 дате су зависности интензитета хабања од садржаја графита у композитним материјалима. На дијаграмима су приказани интензитети хабања композита ZA27+5%SiC и ZA27+10%SiC, као и интензитети хабања хибридних композита са 1, 3 и 5 % графита. Очигледно је да се најмањи интензитет хабања јавља код хибридних композита са 1% графита и то за све три брзине клизања и сва три нивоа оптерећења



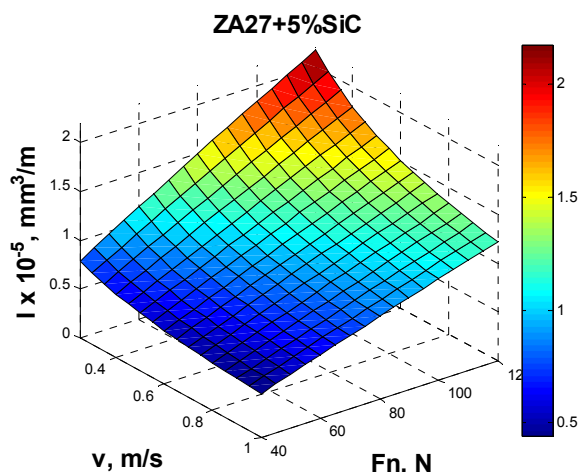
Слика 6.62 Интензитет хабања испитиваних композита у зависности од садржаја графита

Зависности промене интензитета хабања од брзине клизања и нормалног оптерећења при испитивањима без подмазивања, дате су на сликама 6.58 до 6.66.



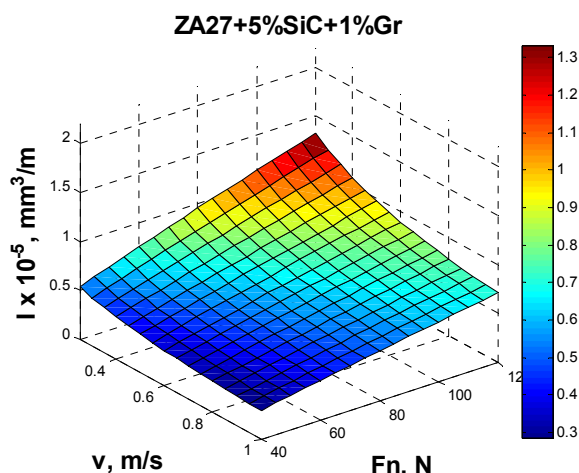
ZA27			
$I = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0799	0.7543	-0.9708	R=0.9126
$I = 0.0799 \cdot F_n^{0.7543} \cdot v^{-0.9708}$			

Слика 6.63 Интензитет хабања, ZA27, са подмазивањем



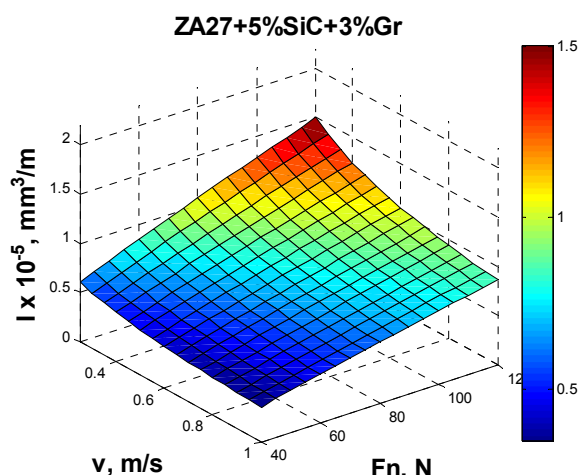
ZA27+5%SiC			
$I = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0147	0.9239	-0.4166	R=0.9293
$I = 0.0147 \cdot F_n^{0.9239} \cdot v^{-0.4166}$			

Слика 6.64 Интензитет хабања, ZA27+5%SiC, са подмазивањем



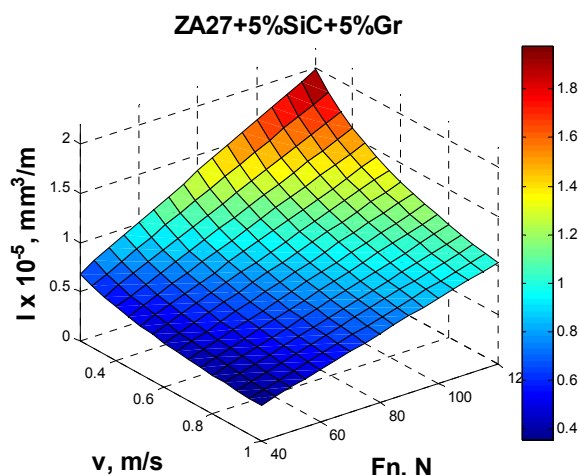
ZA27+5%SiC+1%Gr			
$I = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0136	0.8265	-0.4547	R=0.9252
$I = 0.0136 \cdot F_n^{0.8265} \cdot v^{-0.4547}$			

Слика 6.65 Интензитет хабања, ZA27+5%SiC+1%Gr, са подмазивањем



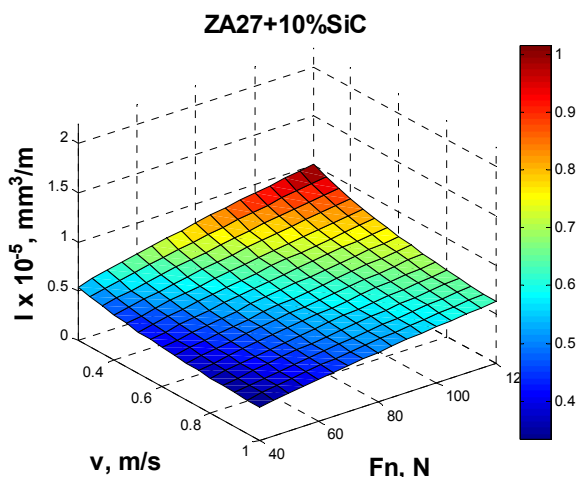
ZA27+5%SiC+3%Gr			
$I = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0165	0.8262	-0.3987	R=0.9315
$I = 0.0165 \cdot F_n^{0.8262} \cdot v^{-0.3987}$			

Слика 6.66 Интензитет хабања, ZA27+5%SiC+3%Gr, са подмазивањем



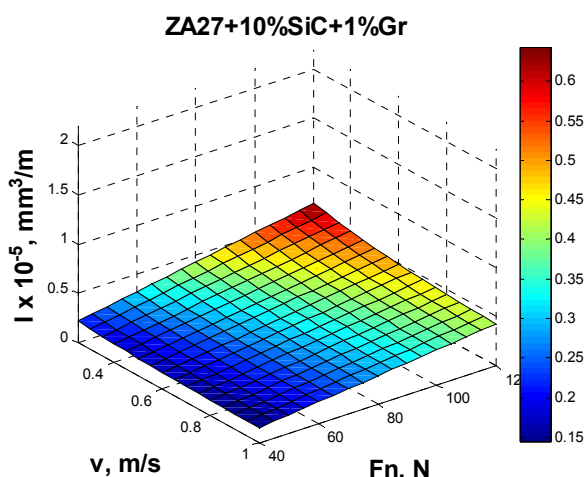
ZA27+5%SiC+5%Gr			
$I = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0101	0.9668	-0.4715	R=0.9243
$I = 0.0101 \cdot F_n^{0.9668} \cdot v^{-0.4715}$			

Слика 6.67 Интензитет хабања, ZA27+5%SiC+5%Gr, са подмазивањем



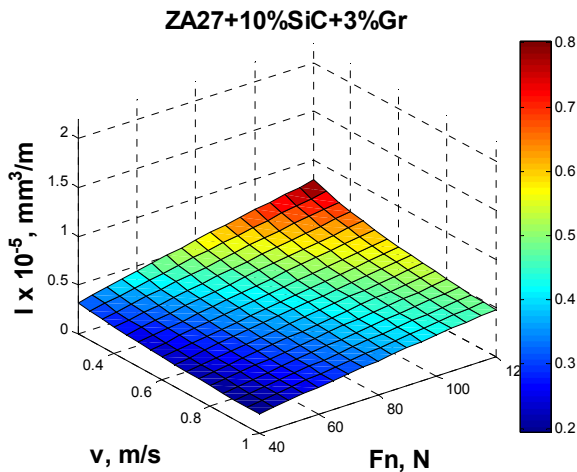
ZA27+10%SiC			
$I = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0402	0.5748	-0.3459	R=0.9333
$I = 0.0402 \cdot F_n^{0.5748} \cdot v^{-0.3459}$			

Слика 6.68 Интензитет хабања, ZA27+10%SiC, са подмазивањем



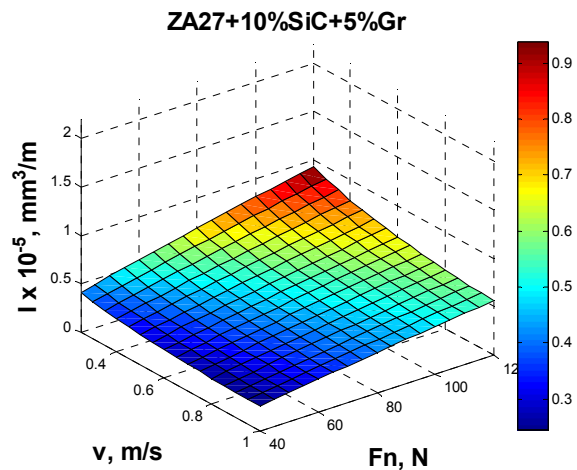
ZA27+10%SiC+1%Gr			
$I = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0039	0.9819	-0.298	R=0.9260
$I = 0.039 \cdot F_n^{0.9819} \cdot v^{-0.298}$			

Слика 6.69 Интензитет хабања, ZA27+10%SiC+1%Gr, са подмазивањем



ZA27+10%SiC+3%Gr			
$I = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0091	0.831	-0.3637	R=0.9336
$I = 0.0091 \cdot F_n^{0.831} \cdot v^{-0.3637}$			

Слика 6.70 Интензитет хабања, ZA27+10%SiC+3%Gr, са подмазивањем



ZA27+10%SiC+5%Gr			
$I = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0151	0.7566	-0.3683	R=0.9343
$I = 0.0151 \cdot F_n^{0.7566} \cdot v^{-0.3683}$			

Слика 6.71 Интензитет хабања, ZA27+10%SiC+5%Gr, са подмазивањем

На основу усвојених регресионих функција, добијених коефицијената регресионих функција и добијених индекса криволинијске корелације закључује се да промена интензитета хабања, односно промена ширине трага хабања има исти карактер за све испитиване материјале, а да су уочене разлика само у величини хабања.

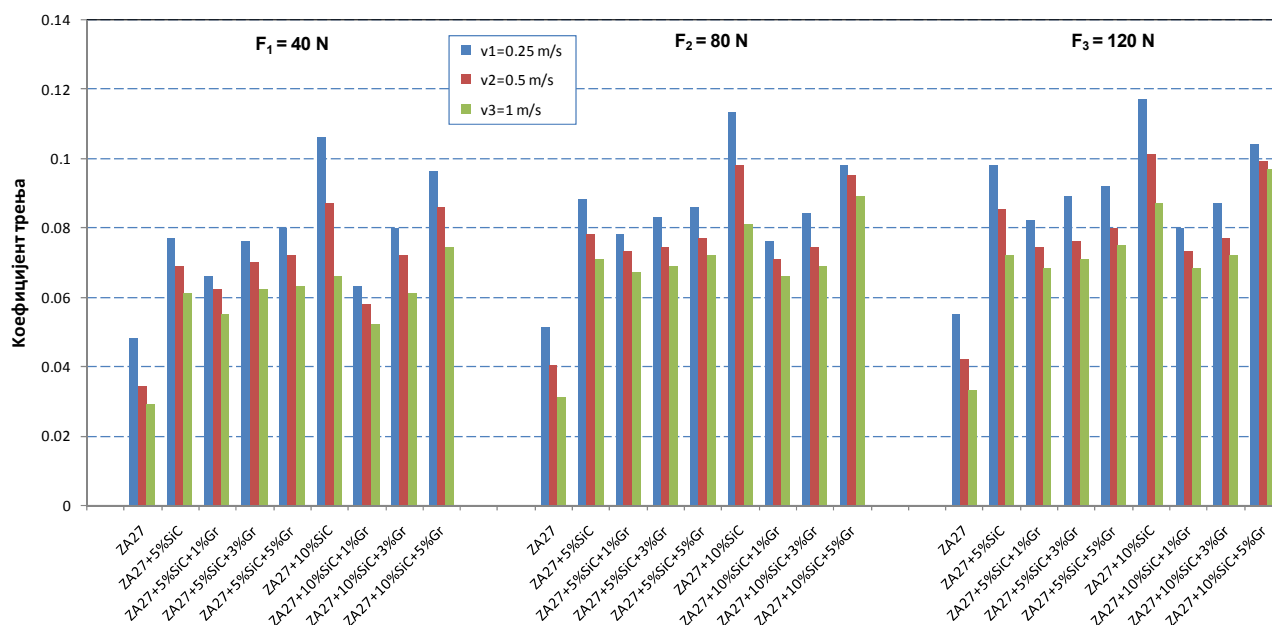
6.2.2 Коефицијент трења

Током експерименталних испитивања континуално је праћен коефицијент трења за све испитиване материјале у следећим условима:

- нормално оптерећење: 40 N, 80 N и 120 N;
- брзина клизања: 0.25 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s;
- дужина пута клизања 1200 m.

Током испитивања, за сваки нови материјал коришћен је нови диск.

Ради лакше анализе утицаја брзине клизања и нормалног оптерећења на фрикционе карактеристике испитиваних композита, формиран је упоредни хистограмски приказ, дат на слици 6.72.



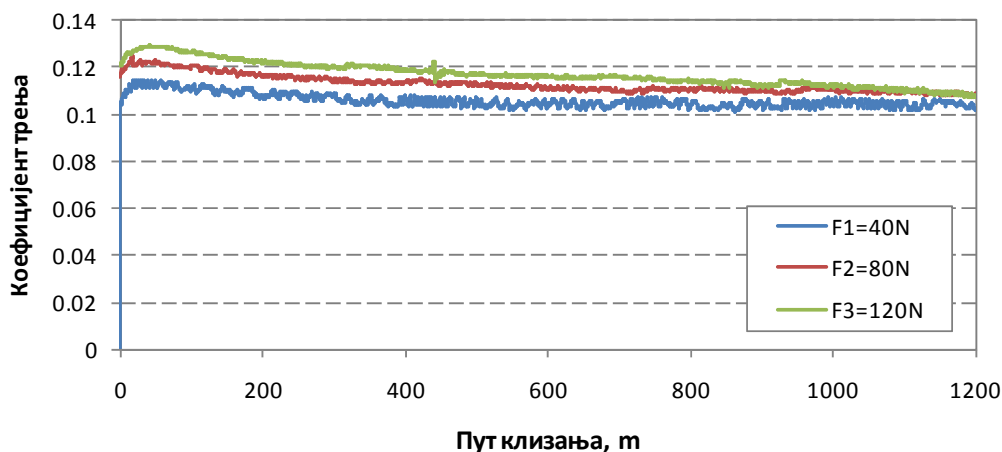
Слика 6.72 Коефицијент трења легуре ZA27 и испитиваних композита, са подмазивањем

Анализом дијаграма, уочава се јасан утицај нормалног контактнoг оптерећења и брзине клизања на фрикционе карактеристике композита. Уочава се да су вредности коефицијената трења доста ниже у односу на оне добијене при испитивањима без подмазивања. Са порастом нормалног оптерећења коефицијент трења расте за све испитиване материјале. При повећању брзине клизања опадају вредности коефицијената трења, тако да највеће вредности коефицијената трења одговарају најмањој брзини клизања.

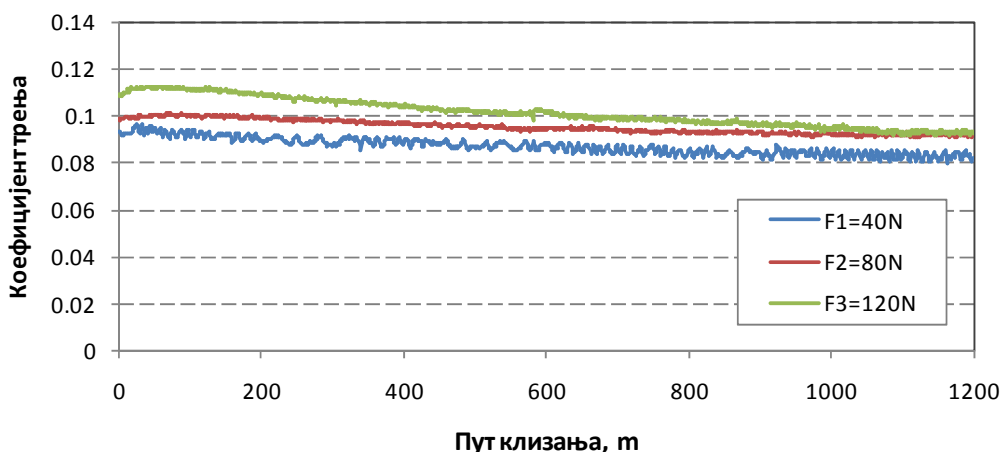
Додавањем силицијум-карбида у основни материјал добијају се композити ZA27+5%SiC и ZA27+10%SiC чији су коефицијенти трења већи од коефицијента трења основног материјала. Међутим, додавањем графита вредности коефицијента трења се смањују, како код хибридниh композита са 5%SiC, тако и код хибридниh композита са 10%SiC. Најбоље фрикционе карактеристике има хибридни композит са 1% графита, ZA27+5%SiC+1%Gr. Даље повећање учешћа графита код хибридниh композита изазива повећање вредности коефицијента трења.

Као илустративни, на сликама 6.73 до 6.75, приказани су сигнали промене коефицијента трења у функцији пута клизања, које су добијене за композит ZA27+10%SiC. При томе су узети у обзир све брзине клизања и сва нормална оптерећења. Дијаграми промене коефицијента трења у зависности од пута клизања за остале испитиване материјале у условима без подмазивања имају сличан облик.

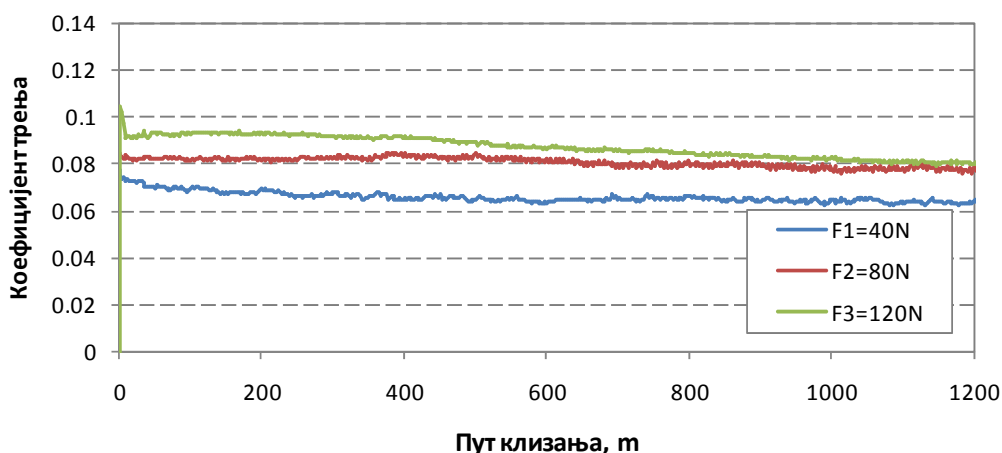
На сликама 6.73 до 6.75 уочава се пад вредности коефицијента трења на самом почетку процеса трења да би се касније коефицијента трења стабилизовао, уз благи пад вредности без изразитих одступања.



Слика 6.73 Коефицијент трења – ZA27+10%SiC, при брзини клизања $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$



Слика 6.74 Коефицијент трења – ZA27+10%SiC, при брзини клизања $v_2 = 0.5 \text{ m/s}$



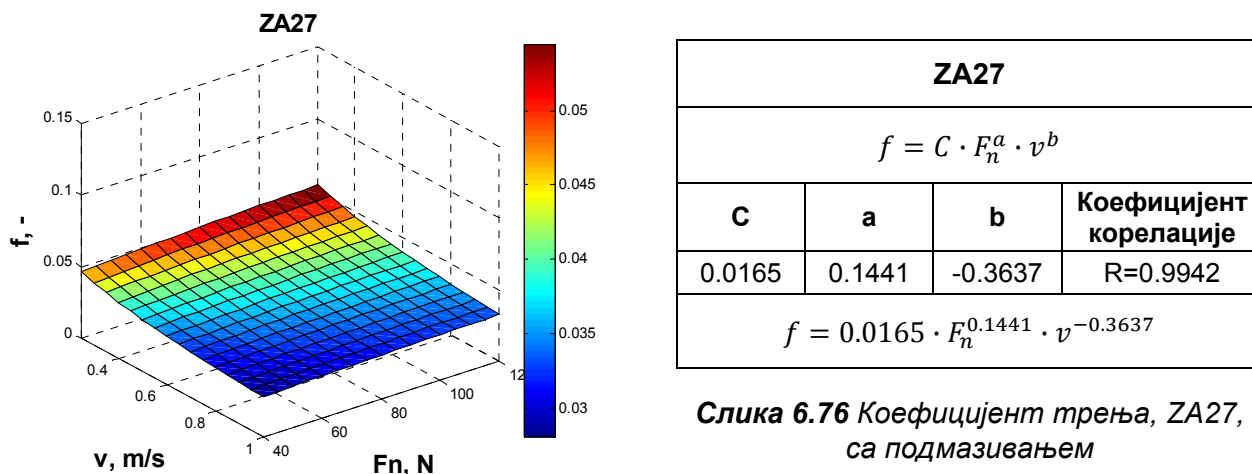
Слика 6.75 Коефицијент трења – ZA27+10%SiC, при брзини клизања $v_3 = 1 \text{ m/s}$

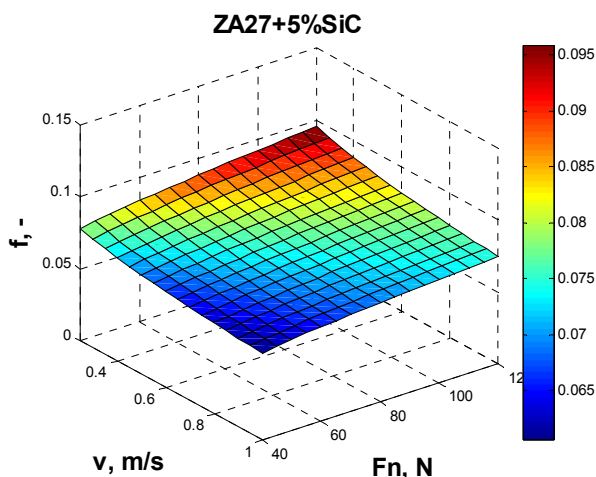
Оваква природа коефицијента трења последица је промене контактне геометрије која је на самом почетку процеса трења линијска, да би са развојем процеса хабања прешла у површински контакт. Тиме је омогућено присуство веће количине мазива у зони контакта и створени су услови за прелазак од граничног на мешовито подмазивање. До сталног пада вредности коефицијента трења долази због формирања одговарајућег мешовитог слоја (*mechanically mixed layer* - MML), односно због преласка честица гвожђа са контратела на композитни блок, што је потврђено СЕМ микроскопијом и ЕДС анализом.

На графицима се уочава да су највеће вредности коефицијента трења при највећим нивоима нормалног оптерећења.

Као и код испитивања у условима без подмазивања и овде су формиране одговарајуће аналитичке зависности промене коефицијената трења од услова контаката. Узимајући обзир брзине клизања и нормална оптерећења при испитивањима са подмазивањем, одређене су константе и експоненти корелационих функција и дефинисан коефицијент корелације за све испитиване материјале.

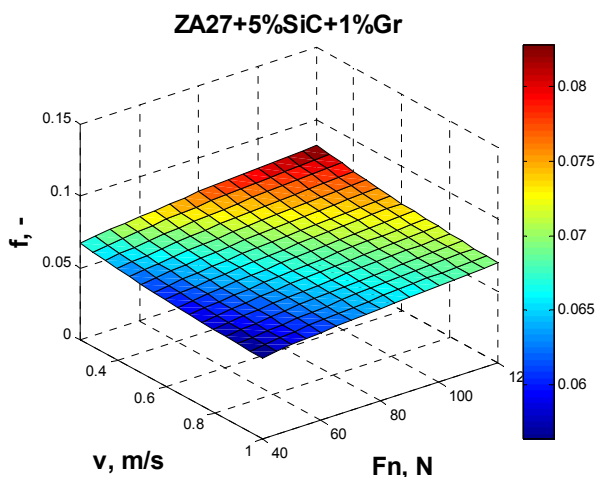
Графичке зависности коефицијента трења од брзине клизања и нормалног оптерећења за легуре ZA27 и композитне материјале, у условима без подмазивања, приказане су на сликама 6.76 до 6.84.





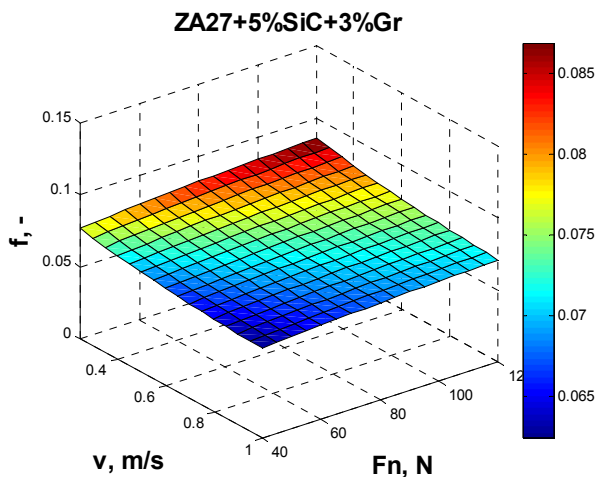
ZA27+5%SiC			
$f = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0303	0.1878	-0.1818	R=0.9917
$f = 0.0303 \cdot F_n^{0.1878} \cdot v^{-0.1818}$			

Слика 6.77 Коефицијент трења, ZA27+5%SiC, са подмазивањем



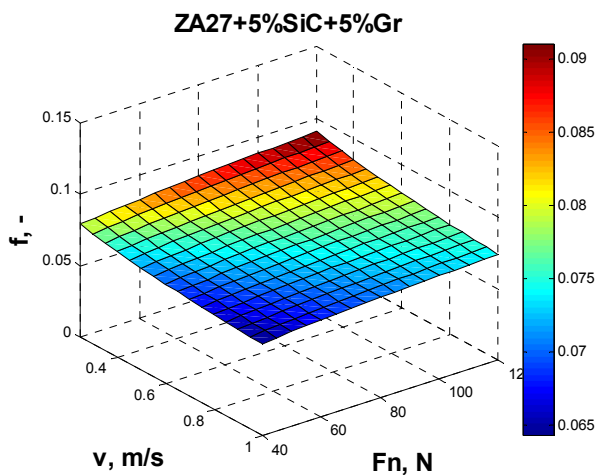
ZA27+5%SiC+1%Gr			
$f = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0278	0.1914	-0.1254	R=0.9756
$f = 0.0278 \cdot F_n^{0.1914} \cdot v^{-0.1254}$			

Слика 6.78 Коефицијент трења, ZA27+5%SiC+1%Gr, са подмазивањем



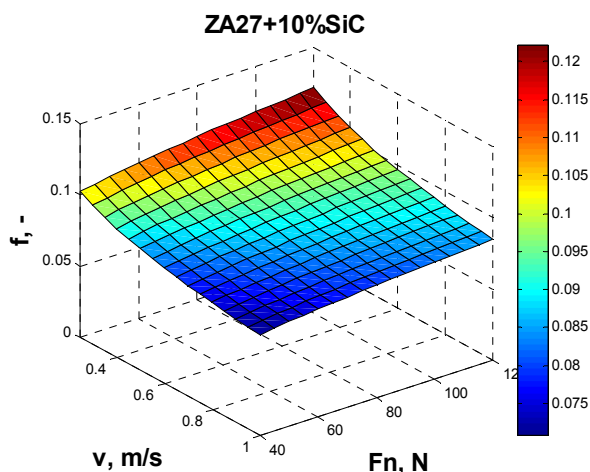
ZA27+5%SiC+3%Gr			
$f = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0409	0.1147	-0.1477	R=0.9857
$f = 0.0409 \cdot F_n^{0.1147} \cdot v^{-0.1477}$			

Слика 6.79 Коефицијент трења, ZA27+5%SiC+3%Gr, са подмазивањем



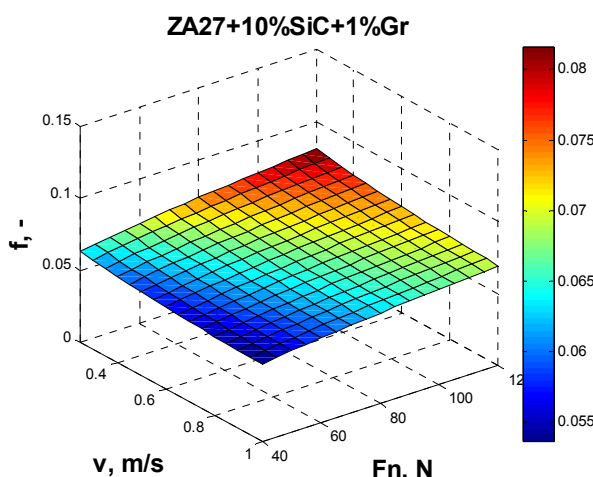
ZA27+5%SiC+5%Gr			
$f = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0402	0.1277	-0.1493	R=0.9884
$f = 0.0402 \cdot F_n^{0.1277} \cdot v^{-0.1493}$			

Слика 6.80 Коефицијент трења, ZA27+5%SiC+5%Gr, са подмазивањем



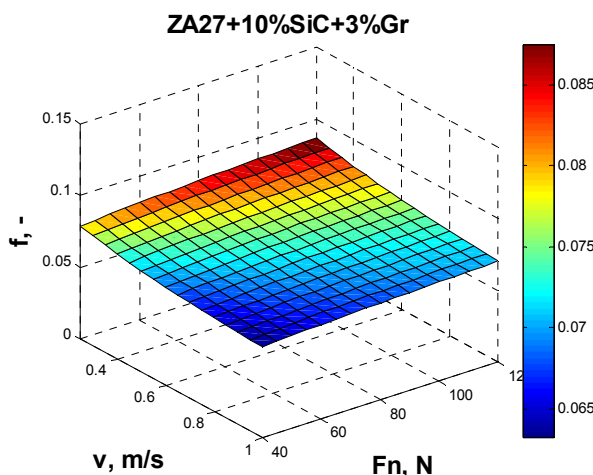
ZA27+10%SiC			
$f = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.039	0.1620	-0.2652	R=0.9806
$f = 0.039 \cdot F_n^{0.162} \cdot v^{-0.2625}$			

Слика 6.81 Коефицијент трења, ZA27+10%SiC, са подмазивањем



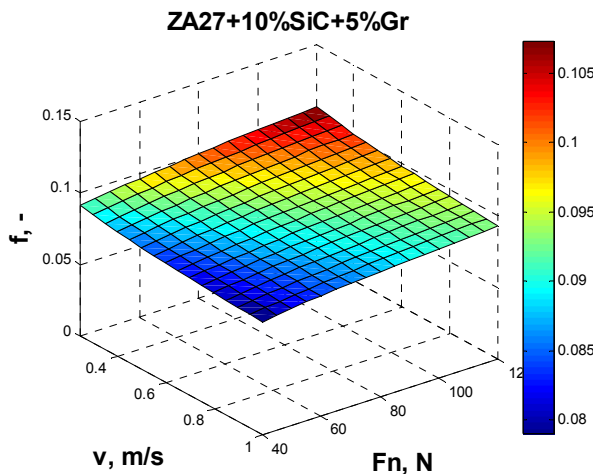
ZA27+10%SiC+1%Gr			
$f = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0228	0.2321	-0.1191	R=0.9758
$f = 0.0228 \cdot F_n^{0.2321} \cdot v^{-0.1191}$			

Слика 6.82 Коефицијент трења, ZA27+10%SiC+1%Gr, са подмазивањем



ZA27+10%SiC+3%Gr			
$f = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0444	0.0961	-0.158	R=0.9822
$f = 0.0444 \cdot F_n^{0.0961} \cdot v^{-0.158}$			

Слика 6.83 Коефицијент трења, ZA27+10%SiC+3%Gr, са подмазивањем



ZA27+10%SiC+5%Gr			
$f = C \cdot F_n^a \cdot v^b$			
C	a	b	Коефицијент корелације
0.0456	0.1488	-0.1025	R=0.9285
$f = 0.0456 \cdot F_n^{0.1488} \cdot v^{-0.1025}$			

Слика 6.84 Коефицијент трења, ZA27+10%SiC+5%Gr, са подмазивањем

6.3 Анализа резултата на основу СЕМ микроскопије и ЕДС спектроскопије

Микроструктура похабаних површина код испитиваних хибридних композита са металном основом је знатно комплекснија него код базних легура. Анализа, разумевање и карактеризација ових микроструктура није једноставна. Скенирајућа електронска микроскопија (СЕМ) и енергетско дисперзивна спектроскопија X-зрачења (ЕДС) могу да допринесу бољем разумевању механизма хабања.

Испитивања узорка свих материјала обављена су у Лабораторији за скенирајућу електронску микроскопију у оквиру Департмана за минералогiju, кристалографију, петрологију и геохемију Хемијског факултета Универзитета у Београду [107]. Иначе, сама лабораторија део је Рударско - геолошког факултета Универзитета у Београду

Пре саме СЕМ анализе узорци су детаљно очишћени и припремљени за рад, како је већ наведено у поглављу 4. Узорци су уроњени у етанол, па пар минута држани у ултразвучној кади. Чишћење узорка је било неопходно не само ради добијања поузданих резултата мерења већ и ради спречавања контаминације микроскопа честицама са узорка, с обзиром да микроскоп ради у високом вакууму који може да „усиса“ неvezане честице материјала.

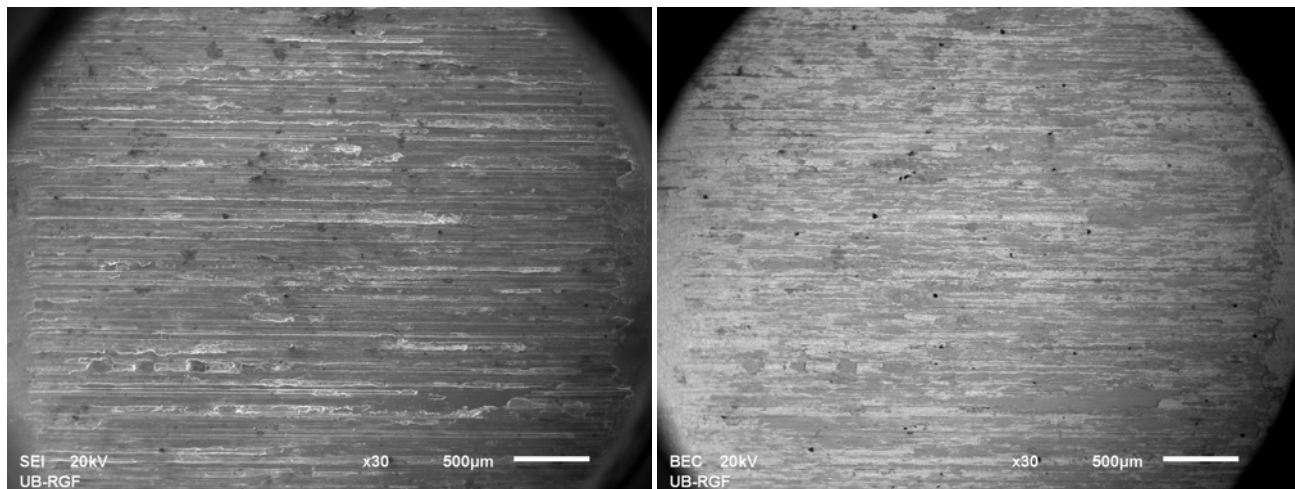
Скенирајући електронски микроскоп има могућност анализе врло ситних и финих детаља у структури материјала. На тај начин се може установити идентитет присутних фаза, њихова оријентација, нехомогеност и дефекти структуре материјала. Код СЕМ микроскопије основне информације су морфолошке, а такође се могу добити информације о елементарном хемијском саставу испитиваног материјала применом ЕДС анализе засноване на карактеристичним екситацијама таласних дужина елемената који се налазе унутар датог узорка. СЕМ пружа значајне предности у односу на конвенционалне технике и карактерише га релативно лака припрема узорка и могућност непосредног посматрања структуре узорка у три димензије.

СЕМ техника не намеће рестрикцију величине узорка, осим оне која је одређена величином коморе. Електронски топ са врха СЕМ-а фокусира се на узорак и скенира на раму иза узорка. У узорку настају „секундарни електрони“ (настали избацавањем електрона из атома снопом) који се детектују. Постоји зависност између осветљености детаља на слици и броја секундарних електрона у тачкама узорка. Снимање слике врши се у дигиталној форми на персоналним рачунарима. Слике генерисане секундарним електронима представљају приказ морфолошких карактеристике узорка. Испитивани узорци су снимани при различитим увећањима која су наведена на самим фотографијама.

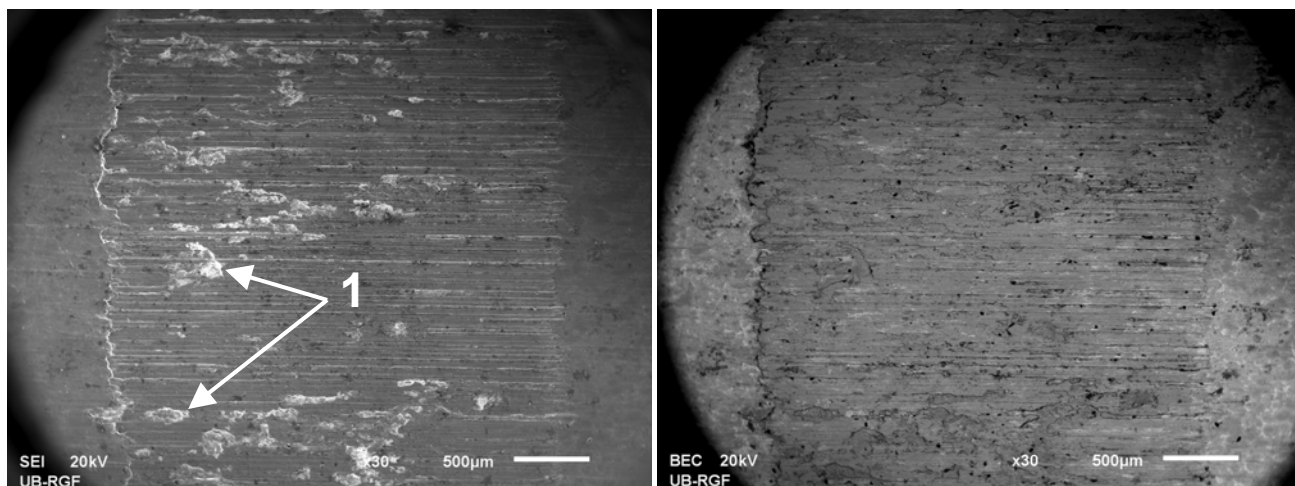
Енергетско дисперзивна спектроскопска метода (ЕДС) служи за испитивање квалитативног и квантитативног елементарног састава површине чврстих узорка. Ова техника осим елементарног састава може дати податке и о томе где се дати елементи налазе на површини. Метода се заснива на емитовању карактеристичних X-зрака под утицајем снопа електрона електронског микроскопа, који се региструју специјалним детектором. У детектору се налази кристал који апсорбује енергију X-зрака генеришући електроне који стварају електрични импулс. Добијени сигнал је пропорционалан енергији карактеристичних x-зрака одређеног елемента. ЕДС систем је повезан са СЕМ микроскопом, тако да се анализе врше истовремено.

У оквиру ове дисертације, приликом СЕМ анализе добијено је више фотографија, од којих су приказане неке карактеристичне.

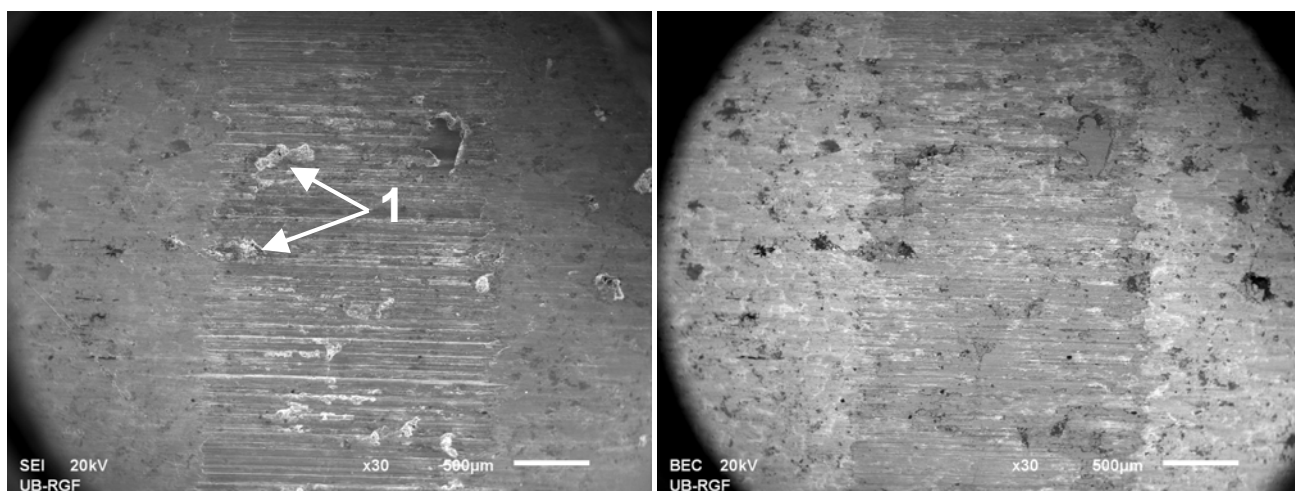
На сликама 6.85 до 6.87, дат је изглед трагова хабања легуре ZA27 и композита, ојачаних честицама SiC, после извршених триболошких испитивања у условима без подмазивања, при брзини клизања $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$ и оптерећењу $F_1 = 10 \text{ N}$.



Слика 6.85 Изглед похабане површине ZA27 легуре, фотографисан СЕМ-ом у условима без подмазивања, при $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$ и $F_1 = 10 \text{ N}$

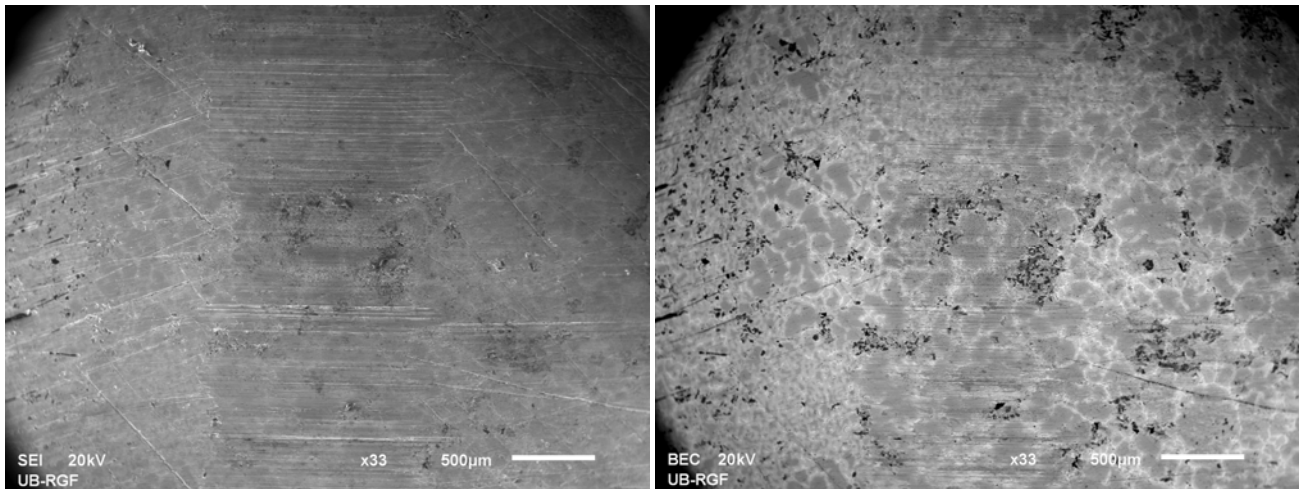


Слика 6.86 Изглед похабане површине композита ZA27+5%SiC, фотографисан СЕМ-ом у условима без подмазивања, при $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$ и $F_1 = 10 \text{ N}$



Слика 6.87 Изглед похабане површине композита ZA27+10%SiC, фотографисан СЕМ-ом у условима без подмазивања, при $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$ и $F_1 = 10 \text{ N}$

Изглед похабане површине хибридног композита ZA27+5%SiC+5%Gr после извршених триболошких испитивања у условима без подмазивања, при брзини клизања $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$ и оптерећењу $F_1 = 10 \text{ N}$, дат је на слици 6.88.



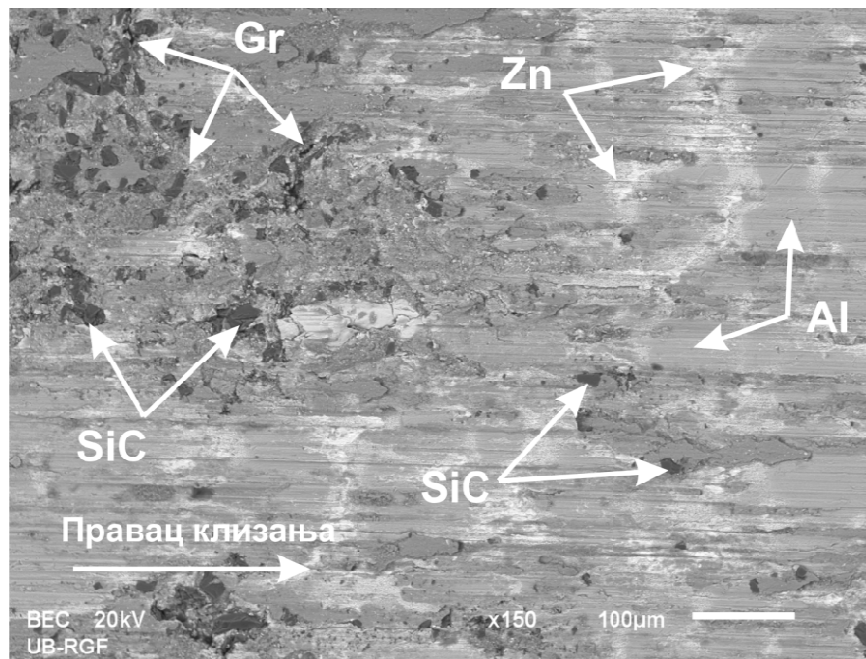
Слика 6.88 Изглед похабане површине композита ZA27+10%SiC+5%Gr, фотографисан СЕМ-ом у условима без подмазивања

На основу изгледа похабаних површина узорка приказаних на сликама 6.85- 6.88 уочава се да је основни механизам хабања композита при најмањој брзини клизања (0.25 m/s), атхезионо хабање. Ово хабање се јавља услед наизменичног образовања и разарања фрикционих веза, насталих као резултат атомских и међумолекуларних узајамних деловања граничних слојева контактних тела. Током атхезионог хабања долази до одвајања материјала са контактне површине композитног материјала (блока), део материјала се у облику продукта хабања избацује из зоне контакта, док се други део таложи (лепи) на трагу хабања. Као последица таквог процеса, на површини блока видљиве су јамице неправилног облика и неравномерне дубине (означене бројем 1 на сликама 6.86 и 6.87). Уочено је да се оне јављају углавном у другој половини контакта (узимајући у обзир смер ротације диска) и при мањим брзинама клизања, без обзира на интензитет нормалног оптерећења.

Уочено је да је при највећим брзинама клизања (посебно при највећем оптерећењу) доминантно абразивно хабање. На површини контакта уочљиви су трагови хабања у виду бразди и рисева које прате правац кретања.

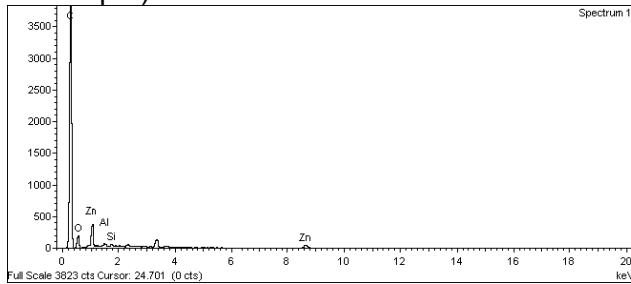
Изглед похабане површине композита ZA27+10%SiC+1%Gr, фотографисан СЕМ-ом у условима без подмазивања приказан је на слици 6.89. На трагу хабања, уочене су честице графита и SiC (на снимку су тамније боје) и честице алуминијума и цинка (на снимку су светлије боје). Извршена ЕДС анализа потврдила је присуство наведених честица на изабраним местима на похабаној површини хибридног композита. Слика 6.90 показује релативни удео посматраних хемијских елемената, при чему је на првом спектру потврђено присуство честица графита а на другом силицијум карбида. Трећи спектар показује присуство алуминијума а четврти подручје са цинком.

Наведене анализе потврђују присуство саставних елемената Zn, Al, SiC, Gr (C), Уочено је и повећано присуство Fe што се може тумачити као последица трансвера материјала са контратела (диска) на композитни блок.

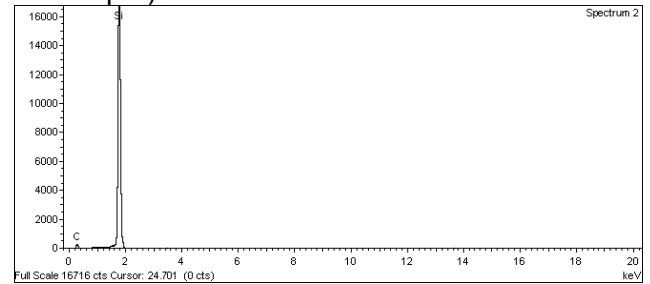


Слика 6.89 Изглед похабане површине композита ZA27+10%SiC+1%Gr, фотографисан СЕМ-ом у условима без подмазивања, при $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$ и $F_1 = 10 \text{ N}$

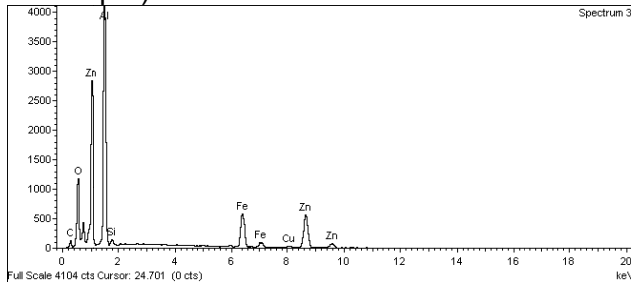
Спектар 1)



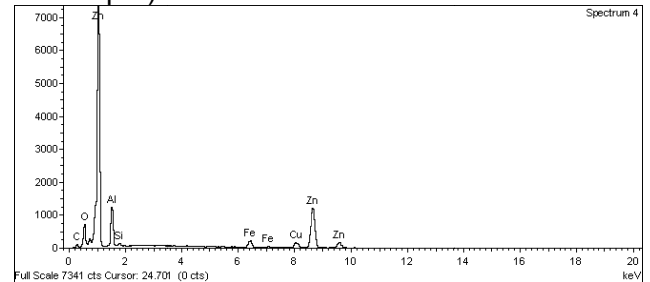
Спектар 2)



Спектар 3)

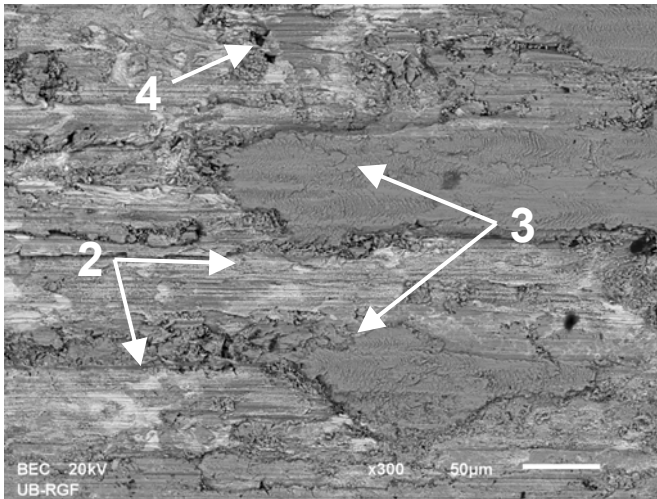


Спектар 4)



Слика 6.90 Релативни удео појединих хемијских елемената у изабраним местима на похабаној површини композита ZA27+10%SiC+1%Gr, у условима без подмазивања

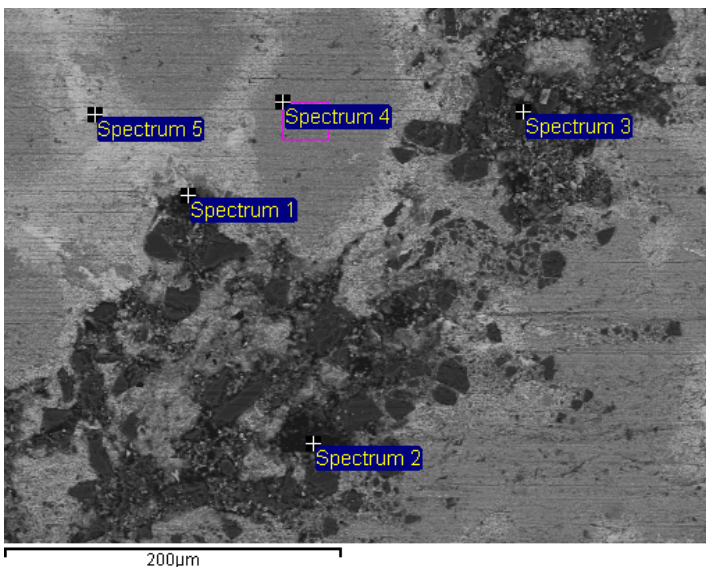
На слици 6.91 приказан је изглед похабане површине композита ZA27+5%SiC у условима без подмазивања. Хабање је настало при вредностима нормалног оптерећења од $F_1 = 10 \text{ N}$, уз брзину клизања од $v_1 = 1 \text{ m/s}$. Повећање брзине клизања са 0.25 на 1 m/s довело је до већих површинских оштећења. Оштећење површине јавило се у облику слојева који су релативно равномерно распоређени дуж похабане површине (означених бројем 2), али и у облику дубоких жлебова (означених бројем 3). Може се закључити да постоји контактна површина која је неадекватно заштићена MML слојем што је изазвало повећање површинских оштећења. Могући узрок слабљења MML слоја је појава пукотина (на слици 6.91, означених бројем 4) што у процесу хабања доводи до разарања разарања MML слоја.



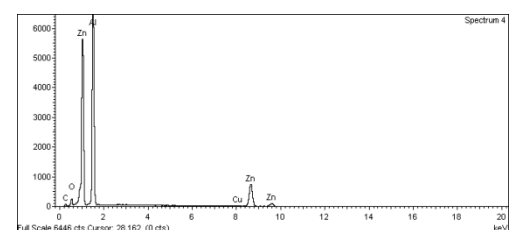
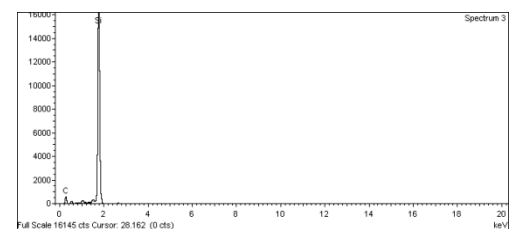
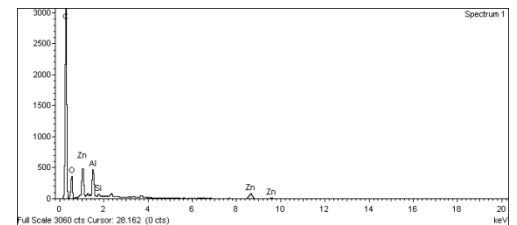
Слика 6.91 Изглед похабане површине композита ZA27+5%SiC, фотографисан СЕМ-ом у условима без подмазивања, при $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$ и $F_1 = 10 \text{ N}$

Феномен формирања MML слоја је посебно изражен у контакту легура ојачаних честицама SiC и челика. Честице SiC су знатно тврђе од одговарајућих површина челичног диска, и гребу површину материјала диска која је са њима у контакту. Већа количина продуката хабања (честице гвожђа) се смешта у облику MML слоја на површину композита. Појава се интензивира са повећањем садржаја чврстих честица у композиту. У условима већих брзина клизања долази до повећаног разарања MML слоја, долази до смањења удела контактне површине која је била заштићена MML слојем и повећања оштећења површине композита.

На слици 6.92 приказан је део похабане површине хибридног композита ZA27+10%SiC+5%Gr, фотографисан СЕМ-ом у условима са подмазивањем. Траг хабања је добијен при брзини клизања од 0.25 m/s и нормалном оптерећењу од 40 N.



Слика 6.92 Изглед похабане површине композита ZA27+10%SiC+5%Gr, фотографисан СЕМ-ом и релативни удео појединих хемијских елемената у изабраним местима у условима са подмазивањем, при $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$ и $F_1 = 10 \text{ N}$



Извршена је ЕДС анализа и као илустративни наведени су спектри у којима је потврђено присуство честица графита (спектар 1), честица SiC (спектар 3) и основног материјала Zn-Al. (спектар 4).

7. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

Унапређење трибомеханичких система, са аспекта смањења трења и хабања представља суштински важан задатак. Основни начин решавања тог задатка блиско је повезан са развојем и унапређењем триболошких материјала. У новије време, посебно је евидентан развој нових композитних материјала, као напредних триболошких материјала, чије су триболошке карактеристике побољшане у односу на карактеристике базних материјала од којих су добијени.

Легуре цинка са повећаним садржајем алуминијума (ZnAl легуре) се због својих добрих механичких и триболошких својстава, већ дужи низ година користе у свету као напредни триболошки материјали. Главни недостатак ових легура је погоршање њихових механичких особина на повишеним температурама. Како је овај недостатак тешко отклонити легирањем, сматра се да је добијање композитних материјала са основом од ZnAl легуре најбољи начин превазилажење овог проблема. Легура ZA27 је, у том смислу, врло перспективна за добијање хибридних композита, јер је погодна као основа за примену више метода и поступака за њихово добијање. Правилним избором ојачивача и одговарајућег производног процеса могу се добити композити који имају нова, боља својства у односу на саставне компоненте. У поређењу са базним материјалом, легуром ZA27, добијени композити имају низ предности: повећану отпорност према хабању, већу чврстоћу, отпорност на корозију, издржљивост и постојаност.

Композитни материјали са металном матрицом на бази легуре ZA27 у свету се интензивно истражују, све више уводе у производну праксу и комерцијализују. Иако су прва истраживања овог типа почела релативно давно, у многим сегментима она су још увек у раним фазама развоја због релативно скупог и сложеног производног процеса, недоступних технологија и недовољног искуства истраживача. Због тога, инжењери и технолози који се сусрећу и раде са композитним материјалима данас, веома тешко могу да нађу поуздане, научно засноване информације о триболошким карактеристикама ових материјала. Посебно је евидентно да су информације о истраживањима хибридних композита на бази легуре ZA27 ретко публиковане.

У оквиру ове дисертације, извршена су триболошка испитивања више композита и хибридних композита са основом од легуре ZA27, добијених компокастинг поступком, који је одабран зато што је економичан и обезбеђује равномерну расподелу ојачивача и повољну структуру композита. Спроведена истраживања подразумевала су примену метода трибомониторинга и трибодијагностике, уз неопходну компјутерску подршку у фази аквизиције, обраде и анализе експерименталних података. Анализом резултата испитивања, учињен је покушај да се утврде и објасне утицаји на побољшање механичких и триболошких својстава легуре ZA27, успоставе одговарајуће зависности и употпуне триболошка знања везана за испитиване материјале.

Имајући у виду наведене чињенице, као и пресек савремених истраживања у области хибридних композита, у овој докторској дисертацији, посебна пажња је усмерена на анализу микрогеометрије контактних површина испитиваног трибомеханичког система. Резултати експерименталних истраживања показују да је, променом запреминског удела честица ојачивача силицијум-карбида (SiC) и графита (Gr), могуће утицати на триболошке

карактеристике испитиваних композита са основом од легуре ZA27. С обзиром на релативно мали број публикованих истраживачких радова из области хибридних ZA27/SiC/Gr композита, добијене информације могу бити значајне за правилну триболошку карактеризацију ових материјала.

У оквиру дисертације, испитиване су триболошке карактеристике следећих материјала:

- базне легуре ZA27,
- композита са основом од ZA27 легуре, уз додаток 5 и 10 vol.% SiC и
- хибридних композита са основом од ZA27 легуре, уз додаток 5 и 10 vol.% SiC, и 1, 3 и 5 vol.% графита.

Просечне величине честица силицијум карбида биле су 26 μm , а честица графита 15 μm . Испитивања триболошких карактеристика наведених материјала у лабораторијским условима показала су како нормално оптерећење, брзина клизања, пут клизања и подмазивање утичу на њихово триболошко понашање.

Испитивања су реализована на трибометру са "block on disc" контактном геометријом. Планом триболошких испитивања дефинисане су вредности нормалних оптерећења, брзине клизања и дужине путева клизања. Реализована су испитивања у условима са и без подмазивања. За сваки материјал, мерене су ширине трагова хабања за различите путеве клизања. На основу добијених вредности ширина трагова хабања, одређене су запремине похабаног материјала и интензитети хабања, код свих узорака. Такође, мерени су и коефицијент трења и сила трења.

Зависности промене ширине трагова хабања, запремине похабаног материјала и интензитета хабања од брзине клизања и нормалног оптерећења приказане су у облику просторних мапа. Наведене зависности апроксимирани су експоненцијалним регресионим функцијама, а добијени су и коефицијенти регресионих функција и наведени коефицијенти криволинијске корелације, као показатељи слагања предложене емпиријске расподеле са експерименталним подацима.

Анализом добијених триболошких карактеристика композитних материјала на бази легуре ZA27 ојачане честицама SiC и графита, као и саме легуре ZA27 у условима без подмазивања могу се донети следећи закључци:

- Развој процеса хабања има исти карактер за све испитиване материјале.
- Криве хабања, интензитети хабања и криве трења добијене експерименталним испитивањима, одговарају теоријским моделима и подлежу основним законима трења и хабања.
- Време иницијалног хабања, када се бележи нагли пораст ширине трага хабања, је подједнако за све испитиване материјале и одговара вредности пута клизања од приближно 50 m. После тога, пораст ширине трага хабања је мали, и код свих материјала настаје период нормалног хабања.
- Ширина трага хабања код свих композитних материјала је мања него код легуре ZA27, за све вариране вредности брзина клизања и нормалног оптерећења.
- Вредности ширина трагова хабања и величине интензитета хабања код свих испитиваних композита расту са повећањем брзине клизања и нормалног оптерећења.
- Најмање вредности ширина трагова хабања уочене су код композита ZA27+10%SiC+5%Gr.
- Додавањем SiC основном материјалу, смањује се ширина трага хабања и интензитет хабања.
- Повећањем удела графита, смањују се ширина трага хабања и интензитет хабања код свих композитних материјала. Хибридни композити са 1, 3 и 5% графита се мање хабају него композити ојачани честицама SiC.
- Најнижи коефицијента трења уочава се код основног материјала, легуре ZA27.

- Код свих испитиваних материјала, коефицијент трења расте са порастом брзине клизања и нормалног оптерећења.
- Најбоље фрикционе карактеристике показао је композит ZA27+10%SiC+5%Gr.
- Додавањем SiC основном материјалу, долази до повећања коефицијента трења.
- Додавањем графита долази до повећања вредности коефицијента трења.
- Побољшане механичке карактеристике композитних узорака у односу на базну легуру су последица повољног распореда и величина честица силицијум карбида у структури композита.

Анализом триболошких карактеристика композитних материјала на бази легуре ZA27 ојачане честицама SiC и графита, као и саме легуре ZA27, у условима са подмазивањем могу се донети следећи закључци:

- Развој процеса хабања има исти карактер за све испитиване материјале.
- Криве хабања које су добијене експерименталним испитивањима одговарају теоријским моделима и подлежу основним законима трења и хабања.
- Време иницијалног хабања, када се бележи нагли пораст ширине трага хабања, је подједнако за све испитиване материјале и одговара вредности пута клизања од приближно 100 m. Након тога, пораст ширине трага хабања је мали и готово линеаран и код свих материјала настаје период нормалног хабања.
- Ширина трага хабања код свих композитних материјала је мања него код легуре ZA27, за све вариране вредности брзина клизања и нормалних оптерећења.
- Вредности ширина трагова хабања и величине интензитета хабања код свих испитиваних композита опадају са повећањем брзине клизања, а расту са повећањем нивоа нормалног оптерећења.
- Најмање вредности ширине трага хабања уочене су код композита ZA27+10%SiC+1%Gr.
- При свим условима испитивања силицијум-карбид повећава отпорност на хабање.
- Код свих испитиваних материјала, коефицијент трења опада са порастом брзине клизања, а расте са порастом нормалног оптерећења.
- Додавањем силицијум-карбида у основни материјал добијају се композити чији су коефицијенти трења већи од коефицијента трења основног материјала.
- Најбоље фрикционе карактеристике има хибридни композит са 1% графита, ZA27+5%SiC+1%Gr. Даље повећање учешћа графита код хибридних композита изазива повећање вредности коефицијента трења.

Микроструктуре похабаних површина испитиваних композита и легуре ZA27, анализиране су путем СЕМ микроскопије и ЕДС спектроскопије.

На основу СЕМ микроскопије, утврђено је да је да је ахезионо хабање главни механизам хабања код анализираних узорака, при малим брзинама клизања. Овај облик хабања се одликује стварањем и разарањем фрикционих веза, које се манифестују стварањем јамица и трансфера материјала по контактаној површини. При већим брзинама клизања и при већим нормалним оптерећењима, као главни механизам хабања јавља се абразивно хабање.

Фотографије добијене СЕМ-ом показују да се на трагу хабања, уочавају честице графита и SiC, као и честице алуминијума и цинка. Извршена ЕДС анализа потврдила је присуство наведених честица на изабраним местима на похабаној површини хибридног композита. Такође, уочено је и присуство гвожђа, што се може тумачити као последица трансфера материјала са диска на композитни блок.

Реализацијом предвиђених теоријских и експерименталних истраживања у оквиру ове докторске дисертације, остварени су следећи резултати, који представљају њен научни и стручни допринос:

- Сачињен је преглед савремених теоријских знања из области композитних материјала, са посебним освртом на теорију композита са металном матрицом.
- Извршена је систематизација научних истраживања у области композита на бази ZnAl легура.
- Варирањем вредности нормалних оптерећења, брзине клизања и дужине путева клизања, у условима испитивања са и без подмазивања, спроведена су обимна експериментална триболошка испитивања базне легуре ZA27, композита са основом од ZA27 легуре, уз додатак 5 и 10 vol.% SiC и хибридних композита са основом од ZA27 легуре, уз додатак 5 и 10 vol.% SiC, и 1, 3 и 5 vol.% графита.
- Формирана је значајна база података коју сачињавају резултати спроведених триболошких истраживања.
- Анализом резултата испитивања, извршена је триболошка карактеризација испитиваних композита на бази легуре ZA27.

Очекује се да добијени резултати имају примену у даљем развоју домаћих хибридних композита са основом ZA27, посебно у областима које су до сада недовољно истражене, са циљем да се створе услови за њихову ширу примену. Такође, постоји могућност примене добијених резултата, као повратних информација, у поступку усавршавања и оптимизације карактеристика фамилије развијених производа начињених од посматраних композита.

Иако је постигнут реалан напредак у побољшању триболошких карактеристика нових хибридних композита, истраживаче очекују нови изазови и задаци које би требало решавати у будућности. У том смислу, правци даљег истраживања у овој области могу бити:

- даље истраживање утицаја промене запреминског или масеног удела ојачивача силицијум-карбида и графита на триболошке карактеристике композита,
- истраживање утицаја величине честица ојачивача силицијум-карбида и графита на триболошко понашање хибридних композита са основом ZA27,
- спровођење триболошких испитивања посматраних композита на трибометрима типа "pin on disc" и
- израда конкретног дела од материјала који би био неки од посматраних композита и његово испитивање у реалним експлоатационим условима.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бабић М, Митровић С., Триболошке карактеристике композита на бази ZnAl легура - Монографија, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2007.
- [2] Ashby M. F. Materials Selection in Mechanical Design, Pergamon Press, Oxford, 1992
- [3] Hooshang Heshmat, Tribology of Interface Layers, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010
- [4] Митровић С.: Триболошке карактеристике композита на бази ZnAl легура, Докторска дисертација, Машински факултет у Крагујевцу, 2007.
- [5] Kreith, F., Goswami D. Y., The mechanical engineering Handbook, CRC Handbook, 2005
- [6] Schwartz M., Composite Materials Handbook, Metals and Metals Processing, Sikorsky Aircraft Division of United Technologies, 1995
- [7] Karl U. Kainer, Metal Matrix Composites. Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2006
- [8] Ashby M F., Materials Selection in Mechanical Design, Pergamon Press, Oxford, 2001
- [9] McCoy D.A., Lloyd D.J., "Fabrication of graphite fibre reinforced aluminium", Canadian Aeronautics and Space J. v. 33, 3, pp. 11-17, 1987
- [10] Бобић И., Развој поступака прераде у полуочврслном стању (rheo i compo-casting процеса) и утицаја начина управљања процесима на квалитет производа на бази легуре ZnAl₂₅Cu₃, Докторска дисертација, Технолошко – металуршки факултет у Београду, 2003.
- [11] Flemings M.C., Riek R.G., Young K.P., Material Science and Engineering, 25, 103, 1976
- [12] Cornie I. A., Guerriero R., Meregalli L., Tangerini I., Cast Reinforced Metal Composites, ASM International USA, 155, 1988
- [13] Cornie I. A., Guerriero R., Meregalli L., Tangerini I., Microstructures and Properties of Zinc-Alloy Matrix Composite Materials, Cast Reinforced Metal Composites, 155-165, 1988
- [14] Flemings M., Metall. Transactions A, vol. 22A, 957, 1991
- [15] Kovačićek F. Žmak I., Metalni kompoziti, MATRIB 2004, Vela Luka, 349-356, 2004.
- [16] International Lead Zinc Research Organization, [Online] 2011. [Cited: November 2012], <http://www.ilzro.org/>
- [17] Goodwin F., Ponikvar A., Engineering properties of zinc alloys, Third edition, ILZRO, 1989
- [18] Engineering solutions with zinc, <http://www.interzinc.org/>
- [19] Ливница PAP® д.о.о., Батајница, <http://rar.rs/site/>
- [20] Tjong, S.C., Chen, F.: Wear behavior of as-cast ZnAl₂₇/SiC particulate metal-matrix composites under lubricated sliding condition. Metall. Mater. Trans. A Vol. 28 No. 9, pp. 1951–1955, 1997

- [21] Sharma S.C., Girish B.M., Kramath R. Satish B.M., Graphite particles reinforced ZA-27 alloy composite materials for journal bearing applications, *Wear* 219, pp. 162-168, 1998
- [22] Seah K. H. W., Sharma S. C, Girish B. M., Effect of artificial ageing on the hardness of cast ZA27/graphite particulate composites, *Materials & Design* Vol. 16 No. 6 1996
- [23] Seah K. H. W., Sharma S.C., Girish B.M., Mechanical properties of as-cast and heat-treated ZA-27/graphite particulate composites, *Composites Part A* 28A pp. 251-256, 1997
- [24] Seah K. H. W., Sharma S.C., Girish B.M., Mechanical properties of cast ZA-27/graphite particulate composites, *Materials & Design* Vol. 16 No. 5, 271-275, 1996
- [25] Sharma S. C., Girish B. M., Kamath R., Satish B. M., Seah K. H. W., Hardness of aged ZA-27/short glass fibre reinforced composites, *Materials & Design*, Vol. 18, No. 3, pp. 155-159, 1997
- [26] Babic M., Mitrovic S., Džunic D., Jeremic B., Bobic B., Tribological Behavior of Composites Based on Za-27 Alloy Reinforced With Graphite Particles, *Tribology Letters*, Vol. 37, No. 2, pp. 401-410, 2010
- [27] Babić M., Mitrović S., Bobić I., Tribological Properties of Composites with Substrate Made of the ZA-27 Alloy Reinforced by the Graphite Particles, *Tribology in industry*, Vol. 29, No. 3&4, 2007
- [28] Babic M, Mitrovic S, Jeremic B., The Influence of Heat Treatment on the Sliding Wear Behavior of a ZA-27 Alloy, *Tribology International*, Vol.43, No.1-2, pp. 16-21, 2010
- [29] Babić M., Mitrović S., Ninković R., Tribological Potencial of Zinc-Aluminium Alloys Improvement, *Tribology in industry*, Vol. 31, No. 1&2, pp. 15-28, 2009
- [30] Babic, M., Vencel, A., Mitrovic, S., Bobic, I., Influence of T4 Heat Treatment on Tribological Behavior of Za27 Alloy Under Lubricated Sliding Condition, *Tribology Letter* 36, pp.125–134, 2009
- [31] Girish B.M., Prakash K.R., Satish, B.M. Jain, P.K. Prabhakar P., An investigation into the effects of graphite particles on the damping behavior of ZA-27 alloy composite material, *Materials and Design* Vol. 32, pp. 1050–1056, 2011
- [32] WEI JianNing, SONG ShiHua, HU KongGang, XIE WeiJun, MA MingLiang, LI GenMei, HAN FuSheng, Influence of macroscopic graphite particulates on the damping properties of Zn-Al eutectoid alloy, *Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy*, vol. 52, no. 1, pp. 70-75, 2009
- [33] Sastry,S., Krishna M., Uchil J., A study on damping behaviour of aluminite particulate reinforced ZA-27 alloy metal matrix composites, *Journal of Alloys and Compounds* 314 pp. 268-274, 2001
- [34] Seah, K.H.W., Sharma, S.C., Girish, B.M., Lima, S.C., Wear characteristics of of as-cast ZA27/graphite particulate composites, *Materials & Design*. Vol.17, No.2, pp. 63-67, 1996
- [35] Sharma S.C., Girish B.M., Kramath R. Satish B.M., Effect of SiC particle reinforcement on the unlubricated sliding wear behaviour of ZA-27 alloy composites, *Wear*, 213, pp.33-40, 1997
- [36] Pruthviraj R. D., Wear characteristics of Chilled Zinc-Aluminium Alloy reinforced with Silicon Carbide Particulate composites, *Research Journal of Chemical Sciences*, Vol. 1 (2) May 2011
- [37] Sahin Y., Acilar M., Production and properties of SiCp-reinforced aluminium alloy composites, *Elsevier, Composites: Part A* 34 pp. 709–718, 2003
- [38] Prasad B.K., Investigation into sliding wear performance of zinc-based alloy reinforced with SiC particles in dry and lubricated conditions, *Wear* 262 pp. 262–273, 2007
- [39] Prasad B.K., Jha A.K., Modi O.P., Das S., Yegneswaran A.h., Abrasive Wear Characteristics of Zn-37.2Al-2.5Cu-0.2Mg Alloy Dispersed with Silicon Carbide Particles, *Material Transaction, JIM*, Vol. 36, No. 8, pp. 1048-1057, 1995

- [40] Prasad, B.K. Modi O.P., Khaira H.K., High-stress abrasive wear behaviour of a zinc-based alloy and its composite compared with a cast iron under varying track radius and load conditions, *Materials Science and Engineering A* 381, pp. 343–354, 2004
- [41] Ares A.E., Gueijman S.F., Schvezov C.E., Correlations between properties, structures and ZA50/SiC composites (MMC), 17 th - Brazilian Congress of Engineering and Materials Science, Brazil, pp. 3020-3031, 2006
- [42] Seah K. H. W., Sharma S.C., Rao P. R., Girish B.M., Mechanical properties of as-cast and heat-treated ZA-27/silicon carbide particulate composites, *Materials & Design* Vol. 16 No. 5, pp. 277-281, 1995
- [43] Mei Z., Zhu Y.H., Lee W.B., Yue T.M., Pang G.K.H., Microstructure investigation of a SiC whisker reinforced eutectoid zinc alloy matrix composite, *Composites: Part A* 37 pp. 1345-1350, 2006
- [44] Bobic I., Ninkovic R., Babic M., Structural and Mechanical Characteristics of Composites With Base Matrix of RAR27 Alloy Reinforced With Al_2O_3 and Sic Particles, BALKANTRIB'05, 5th International Conference on Tribology, Kragujevac, Serbia and Montenegro, pp. 281-284, 2005
- [45] Martínez H. V., Valencia M. F., Chejne F., Cruz J., Compocasting of the ZA-27 alloy, reinforced with SiC particles, *Revista Facultad de Ingeniería* No 37. pp. 50-58. 2006
- [46] Forlerer E., Auras R., Montero R., Calderón S. Schvezov C.E., DESGASTE POR FRICCIÓN EN LA ALEACION DE Zn-Al: ZA27 Y EN UN COMPUESTO DE ZA27 REFORZADO CON Si Y CSi, *Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga*, Agosto de 2000, 451-458, SAM Conference 2000 - IV Latin American Symposium Fracture and Fatigue, , 451-458, 2000
- [47] Wang Q., Wei Y., Chen W., Zhu Y., Ma C., Ding W., In situ surface composites of $(Mg_2Si+Si)/ZA27$ fabricated by centrifugal casting, *Materials Letters* 57, pp. 3851– 3858, 2003
- [48] Zhu Y.H., Hinojosa J., Yue T.M Lee , W.B., Structural evolution in a continuously cast eutectoid Zn–Al-based alloy, *Materials Characterization* 48, pp. 315-322, 2002
- [49] Zhu Y.H., Lee W.B., Mei Z., To S., Sze Y.K., Structural evolution in films of alloy $Zn_{70}Al_{27}Cu_3$ (ZA27), *Applied Surface Science* 242, pp. 236–244, 2005
- [50] Geng H., Ma J., Yang S., Effect of Charge Inheritance on High Za-Al Based Alloy, *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol 11, 1995
- [51] Wang J.C., Zhang Z.M., Lu Y.L., Song G.S., Yang G.C., Influence of zirconium on microstructure and damping capacity of ZA27 alloys, *Acta Metallurgica Sinca*, Vol. 11 No. 3 pp. 230-234, 1998
- [52] Turk A., Kurnaz C., Sevik H., Comparison of the wear properties of modified ZA-8 alloys and conventional bearing bronze, *Materials and Design* 28, pp. 1889–1897, 2007
- [53] Prasanna Kumar, M., Sadashivappa, K., Prabhukumar, G. P., Basavarajappa S., Dry Sliding Wear Behaviour of Garnet Particles Reinforced Zinc-Aluminium Alloy Metal Matrix Composites, ISSN 1392–1320 *Materials Science (Medžiagotyra)*. Vol. 12, No. 3., 2006
- [54] Mitrović S., Babić M., Bobic I., ZA-27 Alloy Composites Reinforced with Al_2O_3 Particles, *Tribology in industry*, Vol. 29, No. 3&4, 2007
- [55] Bobić B., Babić M., Mitrović S., Jovanović M., Bobić I., Comparison of rheological behavior between semisolid mixtures of ZA27 alloy and za27- Al_2O_3 composites, *Association of Metallurgical Engineers of Serbia, AMES*, pp. 1-12, 2009
- [56] Babic M., Mitrovic S., Zivic F., Bobic I., Wear Behavior of Composites Based on ZA-27 Alloy Reinforced by Al_2O_3 Particles Under Dry Sliding Condition, *Tribol Lett* 38: pp. 337–346, 2010

- [57] Mitrović S., Babić M., Živić F., Bobić I., Džunić D., Nanotribology Investigations of Composites Based on Za-27 Alloy Reinforced by Al_2O_3 Particles, Tribology in industry, Vol. 30, No. 1&2, 2008
- [58] Bobić I., Babić M., Mitrović S., Bobić B., Jovanovic M.T., Rheological Behavior of ZA27 Alloy Semi-Solid Slurries and Al_2O_3 Particulate / ZA27 Composite Slurries, Tribology in industry, Volume 30, No. 1&2, 2008
- [59] Babić M., Mitrović S., Bobić I., Živić F., Wear behavior of composites based on ZA-27 alloy reinforced by Al_2O_3 particles under dry sliding condition, Tribology Letters, Vol.38, No.3, pp. 337-346, 2010
- [60] Mitrović, S., Babić, M., Živić, F., Bobić, I., Džunić, D., Pantić, M., Influence Of Al_2O_3 Particle Content On The Sliding Wear Behaviour Of Za-27 Alloy Composite, Journal of the Balkan Tribological Association, Vol.18, No.4, pp. 548–558, 2012
- [61] Babić M., Mitrović S., Ninković R., Tribological Potencial of Zinc-Aluminium Alloys Improvement, Tribology in industry, Vol. 31, No. 1&2, 15-28, 2009
- [62] Yan S., Xie J., Liu Z., Wang W., Wang A., Li J., Influence of Different Al Contents on Microstructure, Tensile and Wear Properties of Zn-based Alloy, J. Mater. Sci. Technol., 26(7), pp. 648-652, 2010
- [63] Prakash C.H.1 and Pruthviraj R.D., Microstructural Studies of Cast Zinc - Aluminum-SiC-Graphite Hybrid Composites, Research Journal of Chemical Sciences, Vol. 1(6), pp. 88-90, 2011
- [64] Ramesh, C.S. Ahmed, R. N, Mujeebu, M.A., Abdullah, M.Z., Development and performance analysis of novel cast copper-SiC-Gr hybrid composites, Materials and Design 30, pp. 1957-1965, 2009
- [65] Mitrović S., Babić M., Stojanović B., Miloradović N., Pantić M., Džunić D., Tribological Potential of Hybrid Composites Based on Zinc and Aluminium Alloys Reinforced with SiC and Graphite Particles, Tribology in industry, Vol.34, No.4, pp. 177-185, 2012
- [66] Babić M., Stojanović B., Mitrović S., Bobić I., Miloradović N., Pantić M., The Influence of Lubricant on Friction Coefficient of Hybrid Al-SiC-Gr Composites, Tribological Journal Bultrib, No.3, pp.126-132, 2013
- [67] Miloradović N., Stojanović B., Tribological behavior of ZA-27/10SiC/1Gr Hybrid Composite, Journal of the Balkan Tribological Association, Vol.19, No.1, pp. 97-105, 2013
- [68] Mitrović S., Miloradović N., Babić M., Bobić I., Stojanović B., Džunić D., Wear Behaviour of Hybrid Za27/SiC/Graphite Composites Under Dry Sliding Conditions, Tribological Journal Bultrib, No.3, pp.120-125, 2013
- [69] Mitrović S., Babić M., Stojanović B., Miloradović N., Tribological Potential of Hybrid Composites Based on Zinc and Aluminium Alloys Reinforced with SiC and Graphite Particles, 12th International Conference on Tribology SERBIATRIB '11, Kragujevac, Serbia, pp. 138-145, 2011
- [70] Bobić B., Bajić N., Jovanović M., Bobić I., Microstructure and mechanical properties of Zn₂₅Al₃Cu based composites with large Al_2O_3 particles at room and elevated temperatures, MJoM Vol 15 (4) pp. 245-255, 2009
- [71] Bobić I., Jovanović M.T Ilić N., Microstructure and strength of ZA-27-based composites reinforced with Al_2O_3 particles, Materials Letters 57, pp. 1683-1688, 2003
- [72] Bobić B., Mitrović S., Babić M., Bobić I., Corrosion of Aluminium and Zinc-Aluminium Alloys Based Metal-Matrix Composites, Tribology in industry, Vol. 31, No. 3&4, 2009
- [73] Bobić B., Mitrović S., Babić M., Bobić I., Corrosion of Metal-Matrix Composites with Aluminium Alloy Substrate, Tribology in industry, Vol. 32, No. 1, 2010
- [74] Jovanović M., Bobić I., Djurić B., Grahovac N., Ilić N., Microstructural and sliding wear behavior of a heat-treated zinc-based alloy, Tribology Letters, Vol. 25 No. 3, pp. 173-184, 2007

- [75] Bobić B., Babić M., Mitrović S., Ilić N., Bobić I., Jovanovic M., Microstructure and mechanical properties of Zn₂₅Al₃Cu based composites with large Al₂O₃ particles at room and elevated temperatures, IJMR_ijmr-110425 – 14.10.10/stm media köthen, 2010
- [76] Jovanović M., Ilić N., Bobić I., Cvijović-Alagić I., Rajković V., Mišković Z., Metallic materials-application of TEM, EPMA and SEM in science and engineering practice, MJoM, Металургија - Journal of Metallurgy, Vol 15 (4) pp. 257-266, 2009
- [77] Bobic B., Bajat J., Acimovic-Pavlovic Z., Rakin M., Bobic I., The effect of T4 heat treatment on the microstructure and corrosion behavior of Zn₂₇Al_{1.5}Cu_{0.02}Mg alloy, Corrosion Science 53 pp. 409–417, 2011
- [78] Babić M., Ninković R., Mitrović S., Bobić I., Influence of Heat treatment on Tribological Behavior of Zn-Al Alloys, 10th International Conference on Tribology, SERBIATRIB'07, Kragujevac, Srbija, 2007
- [79] Babić M., Ninković R., Mitrović S., Bobić I., Tribological properties of composites with substrate made of the ZA-27 alloy reinforced by the graphite particles, 10th International Conference on Tribology, SERBIATRIB'07, Kragujevac, Srbija, 2007
- [80] Babic, M., Mitrovic, S., Bobic, I., Ninkovic, R., Influence of Heat Treatment on Tribological Properties of ZA-27 Alloy, The 4th World Tribology Congress 2009, Kyoto, Japan, pp. J-213, 2009
- [81] Mitrovic, S. Babic, M. Zivic, F. Bobic, I. Dzunic, D., Influence Of Al₂O₃ Particle Content On The Sliding Wear Behaviour Of Za-27 Alloy Composite, 7th Batkantrib 11, Thessaloniki, Greece, pp. 59-67, 2011
- [82] Abou El-khair M.T., Lotfy A., Daoud A., El-Sheikh A.M., Microstructure, thermal behavior and mechanical properties of squeeze cast SiC, ZrO₂ or C reinforced ZA27 composites, Materials Science and Engineering A 528 pp. 2353–2362, 2011
- [83] Balalan Z, Kaplan M., Investigation of the Microstructure and Wear Properties of a Cast ZA Alloy, International Journal of Science & Technology Vol. 2, No 1, pp. 75-81, 2007
- [84] Prasad B.K., Patwardhan A.K., Yegneswaran A.H., Microstructure and Property Characterization of a Modified Zinc-Base Alloy and Comparison with Bearing Alloys, Journal of Materials Engineering and Performance, JMEPEG 7, pp. 130-135, 1998
- [85] Choudhury P., Das K., Das S., Evolution of as-cast and heat-treated microstructure of a commercial bearing alloy, Materials Science and Engineering A 398, pp. 332–343, 2005
- [86] Krupinska B., Dobrzanski L.A., Rdzawski Z.M., Labisz K., Cooling rate influence on microstructure of the Zn-Al cast alloy, Materials Science and Engineering, Vol. 43, Issue 1, pp. 13-20, 2010
- [87] Santos G., Neto C., Osorio W., Garcia A., Design of mechanical properties of a Zn₂₇Al alloy based on microstructure dendritic array spacing, Materials and Design 28, pp. 2425–2430, 2007
- [88] Wang J., Yan S., Xie J., Liu Z., Li J., Wang W., Effect of Cooling Rate on the Microstructure of ZA48 Alloy, Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 2010
- [89] Al-Qawabah S M A., Al-Qawabeha U. F., Mahasneh A A., Effect of copper addition on the mechanical behavior, microstructure, and microhardness of zn-21% al cast alloy, The Canadian Journal of Pure and Applied Sciences, Vol. 4, No. 3, 2010
- [90] Abou El-khaira M.T., Daouda A., Ismail A., Effect of different Al contents on the microstructure, tensile and wear properties of Zn-based alloy, Materials Letters 58, pp. 1754-1760, 2004
- [91] Choudhury P., Das S., Effect of microstructure on the corrosion behavior of a zinc-aluminium alloy, Journal of Materials Science 40, pp. 805– 807, 2005

- [92] Yan S., Xie J., Liu Z., Wang W., Wang A., Li J., Influence of Different Al Contents on Microstructure, Tensile and Wear Properties of Zn-based Alloy, *J. Mater. Sci. Technol.* 26(7), pp. 648-652, 2010
- [93] Prasad B.K., Tensile properties of some zinc-based alloys comprising 27.5% Al: effects of alloy microstructure, composition and test conditions, *Materials Science and Engineering A245* () 257–266, 1998
- [94] Turk A., Durman M., Kayali E., The effect of manganese on the microstructure and mechanical properties of zinc–aluminium based ZA-8 alloy, *J Mater Sci* 42, pp.8298–8305, 2007
- [95] Yu S., He Z., Chen K., Dry sliding friction and wear behaviour of short fibre reinforced zinc-based alloy composites, *Wear* 198, pp. 108-114, 1996
- [96] Ranganath G., Sharma S.C., Krishna M., Dry sliding wear of garnet reinforced zinc/aluminium metal matrix composites, *Wear* 251, pp. 1408–1413, 2001
- [97] Sharma, S. C., Satish, B. M., Girish, B. M., Kamath R., Asanuma H., Dry sliding wear of short glass fibre reinforced zinc–aluminium composites, *Tribology International* Vol. 31, No. 4, pp. 183–188, 1998
- [98] B.K. Prasad, Influence of Some Test Parameters on Dry Sliding Wear Characteristics of a Zinc-11.5% Aluminum Alloy, *Journal of Materials Engineering and Performance*, JMEPEG 11, pp.461-468, 2002
- [99] Rajeev V. R., Dwived D. K., Jain S. C., Dry reciprocating wear of Al–Si–SiC_p composites: A statistical analysis, *Tribology International* 43, pp. 1532–1541, 2010
- [100] Basavarajappa S., Chandramohan G., Dry Sliding Wear Behaviour of Hybrid Metal Matrix Composites, *Materials Science (Medžiagotyra)*. Vol. 11, No. 3. 2005
- [101] Prasad B.K., Patwardhan A.K., Yegneswaran A.H., Dry sliding wear characteristics of some zinc-aluminium alloys: a comparative study with a conventional bearing bronze at a slow speed, *Wear* 199, pp. 142-151, 1996
- [102] Tanasijevic S., Stojanovic B., Miloradovic N.: Eco-tribological correct design: New demands of contemporary design, *Journal of the Balkan Tribological Association*, Vol.16, No.4, pp. 608-616, 2010
- [103] Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Лабораторија за трибологију [Online] 1997. [Cited: November 2012] http://fink.rs/index.php?option=com_content&view=category&id=15&Itemid=274
- [104] Лазић М., Основи метрологије, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1987.
- [105] Metallurgical Microscopes MT8500 Series, [Online] 2004. [Cited: November 2012] <http://www.meijitechno.com/mt8500.htm>
- [106] Taylor Hobson company, [Online] 2011. [Cited: November 2012] <http://www.taylor-hobson.com/>
- [107] SEMLAB, Лабораторија за скенирајућу електронску микроскопију, Универзит у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд, 2011
- [108] Hottinger Baldwin Messtechnik, "5-kHz-TF-Meßverstärker: KWS 273.D4, KWS 273.A2 - Bedienungsanleitung", Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
- [109] National Instruments, NI USB-6008/6009 User guide and specifications, [Online] 2004. [Cited: November 2012] <http://www.ni.com/pdf/manuals/371303m.pdf>
- [110] Ивковић Б., Рац А., Трибологија, Југословенско друштво за трибологију, Машински факултет, Крагујевац, 1995
- [111] Sharma S.C., Girish B.M., Somashekar D.R., Satish B.M., Kramath R., Sliding wear behaviour of zircon particles reinforced ZA-27 alloy composite materials *Wear*, 224, pp.89-94, 1999

- [112] Prasad B.K., Abrasive wear characteristics of a zinc-based alloy and zinc-alloy/SiC composite, *Wear* 252, pp 250–263, 2002
- [113] Savaskan, T., Alemdag, Y., Effects of pressure and sliding speed on the friction and wear properties of Al–40Zn–3Cu–2Si alloy: A comparative study with SAE 65 bronze, *Materials Science and Engineering A* 496, pp. 517–523, 2008
- [114] Cuvalci H., Celik H. S., Investigation of the abrasive wear behaviour of ZA-27 alloy and CuSn10 bronze, *Journal of Materials Science*, Vol. 46, No. 14, pp. 4850-4857, 2011
- [115] Pandey J. P., Prasad B. K., Sliding Wear Response of a Zinc-Based Alloy Compared to a Copper-Based Alloy, *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol 29A, pp. 1245-1255, 1998
- [116] Li Y, Ngai T. L., Xia W., Zhang W., Effects of Mn content on the tribological behaviors of Zn-27% Al-2% Cu alloy, *Wear* 198, pp.129-135, 1996
- [117] Tijun C., Chengren Y., Mingfeng F., Ying M., Yuandong L., Yuan H., Friction and wear properties of casting in-situ silicon particle reinforced ZA27 composites, *Research & Development*, pp. 1-8, 2009
- [118] Babic M., Ninkovic R., Rac A., Sliding wear behavior of Zn-Al alloys in conditions of boundary lubrication, *The Annals of University "Dunarea De Jos " of Galați Fascicle VIII, Tribology*, 60-64, 2005
- [119] Savaskan T., Purcek G., Murphy S., Sliding wear of cast zinc-based alloy bearings under static and dynamic loading conditions, *Wear* 252, pp. 693–703, 2002
- [120] Prasad B.K., Slurry Wear Characteristics of a Zinc-Based Alloy, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 12(6), pp. 708-714, 2003
- [121] Prasad B.K., Modi ., O.P., Slurry wear characteristics of zinc-based alloys: Effects of sand content of slurry, silicon addition to alloy system and traversal distance, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 19, pp. 277-286, 2009
- [122] Yan S., Xie J., Liu Z., Li J., Wang W., Wang A., The effect of composition segregation on the friction and wear properties of ZA48 alloy in dry sliding condition, *J Mater Sci* 44, pp.4169–4173, 2009
- [123] Prasad B.K., Modi O.P., Yegneswaran A.H., Wear behaviour of zinc-based alloys as influenced by alloy composition, nature of the slurry and traversal distance, *Wear* 264 pp. 990-1001, 2008
- [124] Rosenberger M., Ares A., Gatti I., Schvezov C., Wear resistance of dilute Zn-Al alloys, *Wear* 268, pp. 1533–1536, 2010
- [125] Babić M., Mitrović S., Živić F., Effects of Al₂O₃ Particle Reinforcement on the Lubricated Sliding Wear Behavior of ZA-27 Alloy Composites, *Journal of Materials Science*, Vol.46, No.21, pp. 6964-6974, 2011
- [126] Stojanović B., Babić M., Mitrović S., Vencl A., Miloradović N., Pantić M., Tribological characteristics of aluminum hybrid composites reinforced with silicon carbide and graphite, *Journal of the Balkan Tribological Association*, Vol.19, No.1 pp. 83-96, 2013
- [127] Бабић М, Нинковић Р., Триболошки потенцијал ZnAl легура - Монографија, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2007
- [128] Liu G., Li R., Finite element analysis of mechanics behavior in the interface of particle filled zinc-aluminium composite, *Journal of Mechanical Strength*, 2004.
- [129] Sharma S.C., Sastry S., Krishna M., Effect of aging parameters on the micro structure and properties of ZA-27/ aluminite metal matrix composites, *Journal of Alloys and Compounds* 346, pp. 292–301, 2002
- [130] Anwar M., Murphy S., Comparative load-relaxation behavior of high-aluminium zinc-based alloys, *Journal of Materials Science* 36, pp. 411–417, 2001

- [131] Ares A.E., Gassa L.M., Gueijman S.F., Schvezov C.E., Correlation between thermal parameters, structures, dendritic spacing and corrosion behavior of Zn–Al alloys with columnar to equiaxed transition, *Journal of Crystal Growth* 310, pp. 1355–1361, 2008
- [132] Martinez-Flores E., Negrete J., Torres Villasenor G., Structure and properties of Zn–Al–Cu alloy reinforced with alumina particles, *Materials and Design* 24, pp. 281–286, 2003
- [133] Savaskan T., Turhal M.S., Relationships between cooling rate, copper content and mechanical properties of monotectoid based Zn–Al–Cu alloys, *Materials Characterization* 51, pp. 259-270, 2003
- [134] Abood A.N., Habeb T.S., Production of ZA-27 Alloy by New Rheocasting Process., *Journal of Zankoy Sulaimani*, , 11(1) Part A, pp. 89-99, 2008
- [135] Sharma S.C., Girish B.M., Satish B.M., Kamath R., Mechanical Properties of As-Cast and Heat-Treated ZA-27 Alloy/Short Glass Fiber Composites, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 7(1), pp. 93-99, February 1998
- [136] Кастелец-Мацура С., Бобић И., Аћимовић-Павловић З., Раић К., Корелација параметатра компокастинг процеса, структуре и својстава композита са основом од легуре ZnAl25Cu3, *MJoM , Металургија - Journal of Metallurgy*, Vol. 13 No.3, pp 213-219, 2007
- [137] Cay F., Kurnaz S., Hot tensile and fatigue behaviour of zinc–aluminum alloys produced by gravity and squeeze casting, *Materials and Design* 26, pp. 479–485, 2005
- [138] Sharma S.C., Girish B.M., Somashekar D.R., Kamath R., Satish B.M., Mechanical properties and fractography of zircon-particle-reinforced ZA-27 alloy composite materials, *Composites Science and Technology* 59, pp. 1805-1812, 1999
- [139] Li Z., Zhou H., Luo X., Wang T., Shen K., Aging microstructural characteristics of ZA-27 alloy and SiCdZA-27 composite, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 16, pp. 98-104, 2006
- [140] Seenappa, Sharma K.V., Effect of Alloying Additions on Tribological Properties of ZA Alloys, *International Journal of Advanced Engineering & Application*, pp.1-4, 2011

ПРИЛОЗИ

- Резултати истраживања у условима без подмазивања

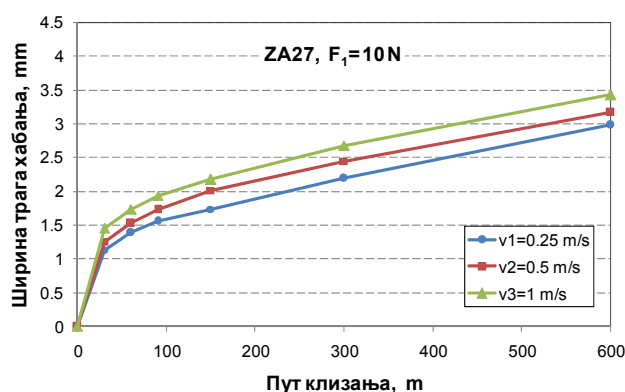
- Криве хабања (П.1 – П.9)
- Интензитет хабања (П.10 – П.18)

- Резултати истраживања у условима са подмазивањем

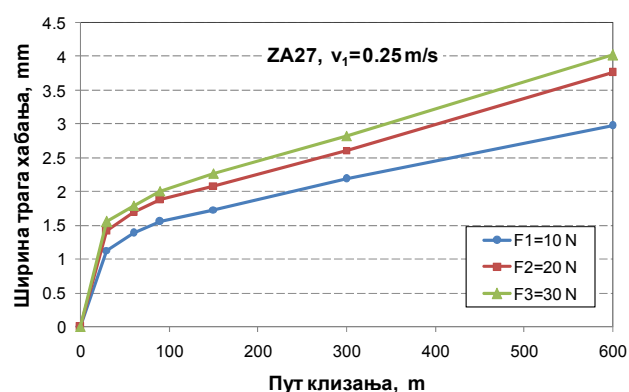
- Криве хабања (П.19 – П.27)
- Интензитет хабања (П.28 – П.36)

Табела П.1 Ширина трага хабања – ZA27, без подмазивања

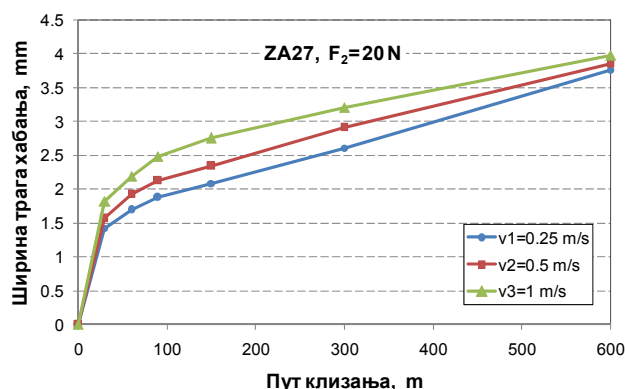
ZA 27		Ширина трага хабања, mm					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	1.132	1.384	1.552	1.734	2.185	2.974
	20	1.421	1.696	1.877	2.086	2.613	3.768
	30	1.552	1.795	2.012	2.268	2.829	4.025
0,5	10	1.254	1.531	1.729	2.014	2.444	3.166
	20	1.571	1.921	2.125	2.346	2.915	3.859
	30	1.653	1.998	2.212	2.465	3.067	4.223
1	10	1.452	1.729	1.933	2.171	2.677	3.424
	20	1.825	2.192	2.489	2.756	3.212	3.985
	30	1.871	2.328	2.549	2.814	3.502	4.451



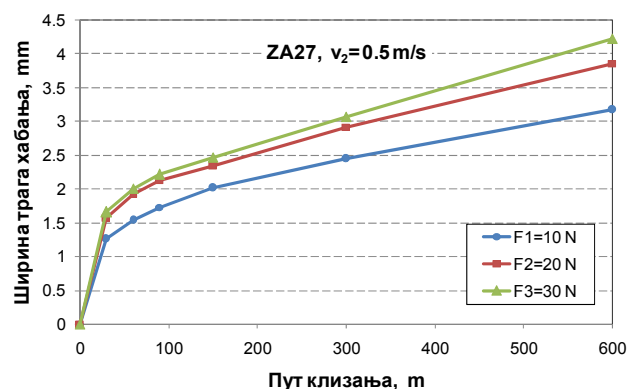
Слика П.1 Криве хабања – ZA27, $F_1 = 10\text{ N}$



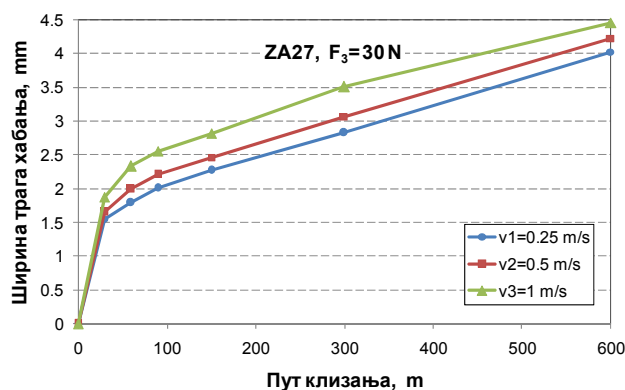
Слика П.2 Криве хабања – ZA27, $v_1 = 0.25\text{ m/s}$



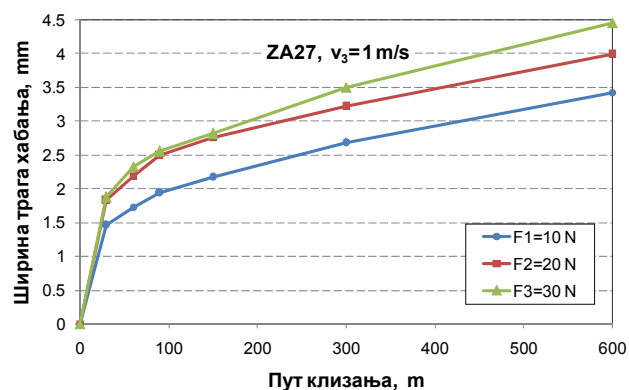
Слика П.3 Криве хабања – ZA27, $F_2 = 20\text{ N}$



Слика П.4 Криве хабања – ZA27, $v_2 = 0.5\text{ m/s}$



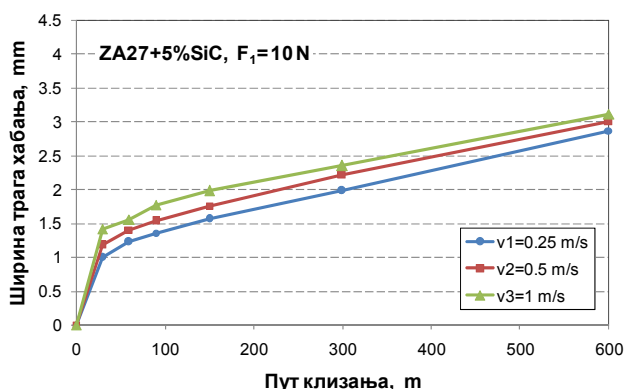
Слика П.4 Криве хабања – ZA27, $F_3 = 30\text{ N}$



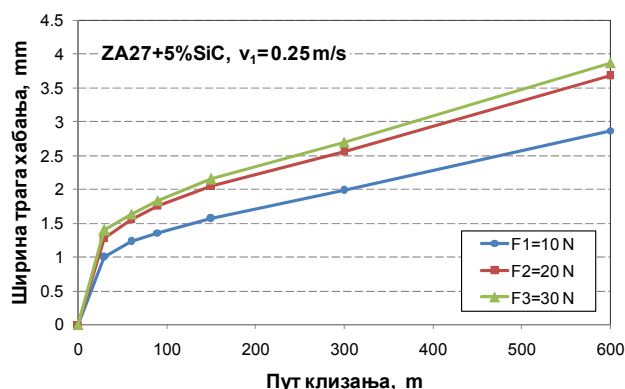
Слика П.6 Криве хабања – ZA27, $v_3 = 1\text{ m/s}$

Табела П.2 Ширина трага хабања – ZA27+5%SiC, без подмазивања

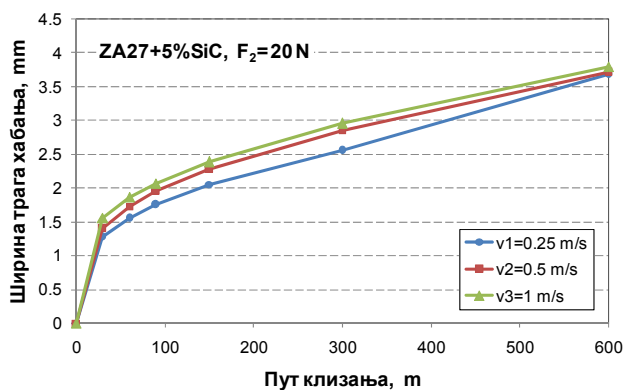
ZA 27+5%SiC		Ширина трага хабања, mm					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.998	1.224	1.357	1.565	1.983	2.867
	20	1.271	1.548	1.745	2.049	2.552	3.681
	30	1.391	1.635	1.831	2.151	2.699	3.869
0,5	10	1.175	1.401	1.535	1.759	2.209	2.997
	20	1.392	1.729	1.951	2.281	2.851	3.712
	30	1.479	1.801	2.015	2.379	2.953	3.917
1	10	1.411	1.555	1.769	1.979	2.349	3.111
	20	1.557	1.865	2.059	2.379	2.951	3.795
	30	1.629	2.018	2.223	2.555	3.071	3.948



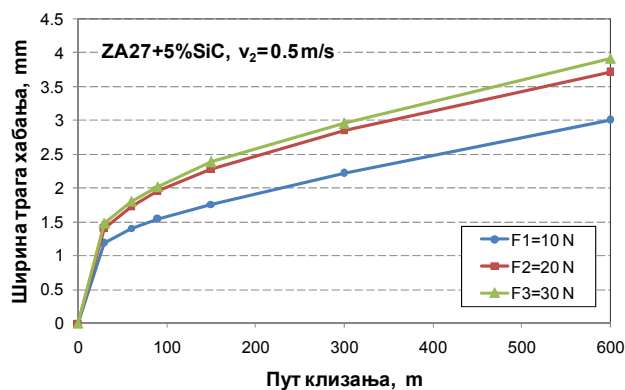
Слика П.7 Криве хабања – ZA27+5%SiC, $F_1 = 10\text{ N}$



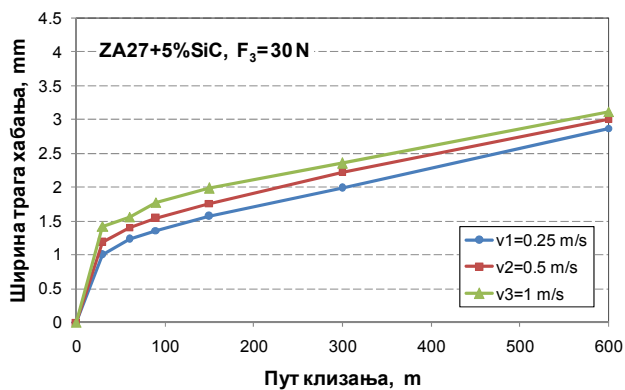
Слика П.8 Криве хабања – ZA27+5%SiC, $v_1 = 0.25\text{ m/s}$



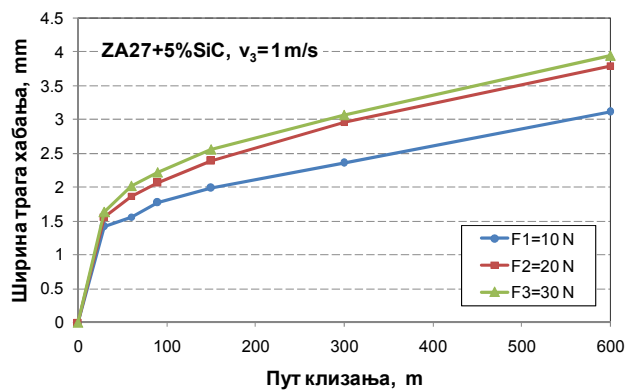
Слика П.9 Криве хабања – ZA27+5%SiC, $F_2 = 20\text{ N}$



Слика П.10 Криве хабања – ZA27+5%SiC, $V_2 = 0.5\text{ m/s}$



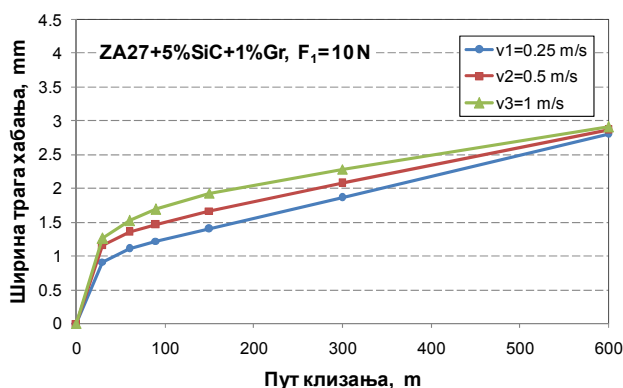
Слика П.11 Криве хабања – ZA27+5%SiC, $F_3 = 30\text{ N}$



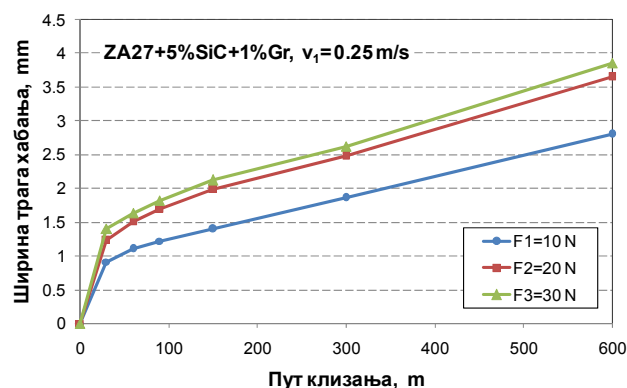
Слика П.12 Криве хабања – ZA27+5%SiC, $V_3 = 1\text{ m/s}$

Табела П.3 Ширина трага хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, без подмазивања

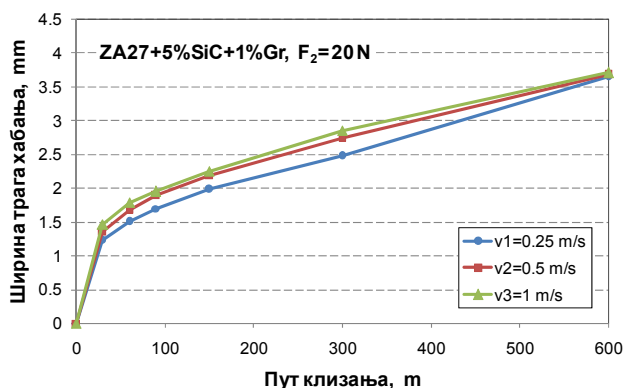
ZA 27+5%SiC+1%Gr		Ширина трага хабања, mm					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.911	1.104	1.215	1.398	1.856	2.803
	20	1.226	1.502	1.695	1.979	2.478	3.643
	30	1.395	1.633	1.817	2.116	2.617	3.855
0,5	10	1.156	1.345	1.459	1.663	2.072	2.864
	20	1.355	1.681	1.891	2.189	2.735	3.679
	30	1.432	1.736	1.965	2.331	2.909	3.878
1	10	1.252	1.515	1.687	1.929	2.275	2.905
	20	1.465	1.785	1.949	2.251	2.854	3.708
	30	1.551	1.903	2.111	2.441	3.015	3.902



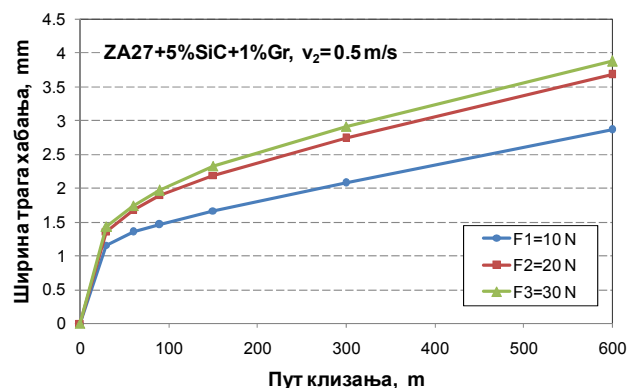
Слика П.13 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, F₁ = 10 N



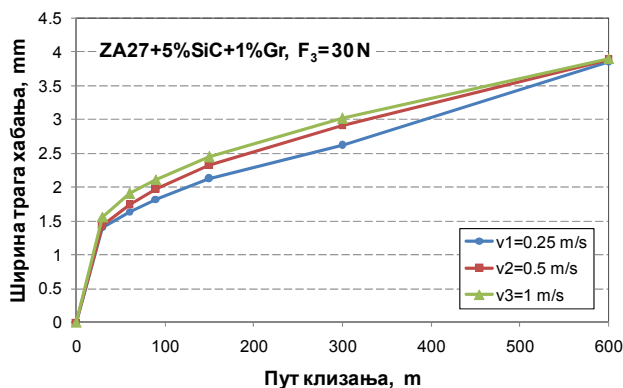
Слика П.14 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, v₁ = 0.25 m/s



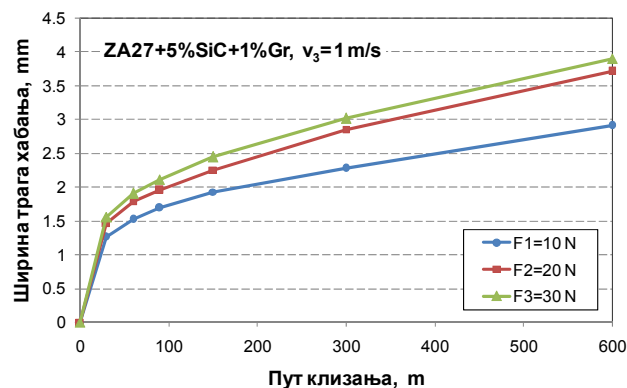
Слика П.15 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, F₂ = 20 N



Слика П.16 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, v₂ = 0.5 m/s



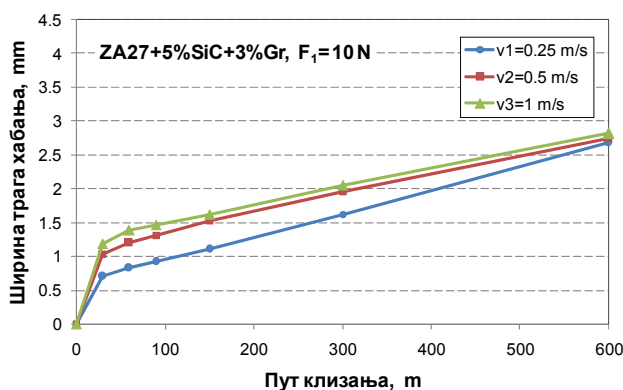
Слика П.17 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, F₃ = 30 N



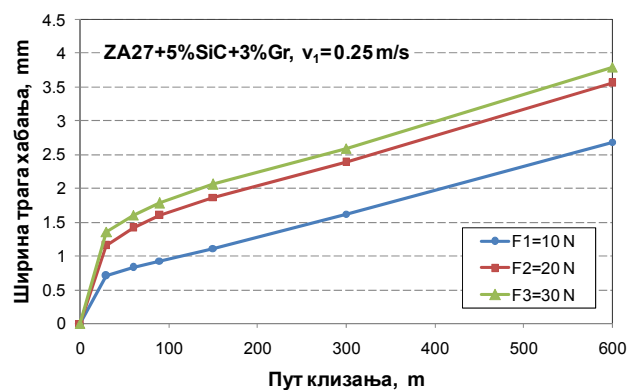
Слика П.18 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, v₃ = 1 m/s

Табела П.4 Ширина трага хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, без подмазивања

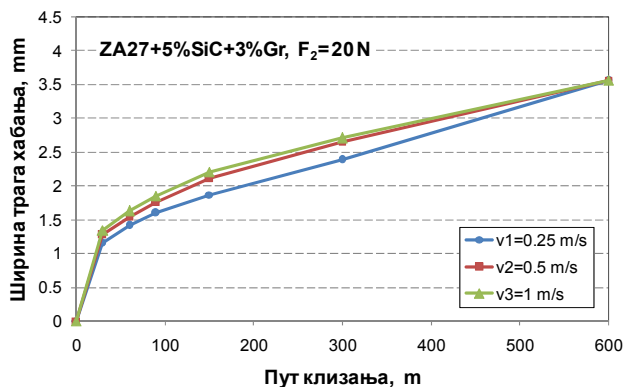
ZA 27+5%SiC+3%Gr		Ширина трага хабања, mm					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.701	0.824	0.925	1.107	1.621	2.682
	20	1.151	1.409	1.593	1.864	2.381	3.551
	30	1.355	1.597	1.779	2.056	2.586	3.795
0,5	10	1.036	1.202	1.312	1.519	1.951	2.751
	20	1.268	1.536	1.759	2.111	2.651	3.561
	30	1.415	1.731	1.949	2.299	2.878	3.807
1	10	1.186	1.386	1.466	1.623	2.052	2.814
	20	1.335	1.624	1.845	2.201	2.702	3.564
	30	1.495	1.822	2.059	2.348	2.934	3.864



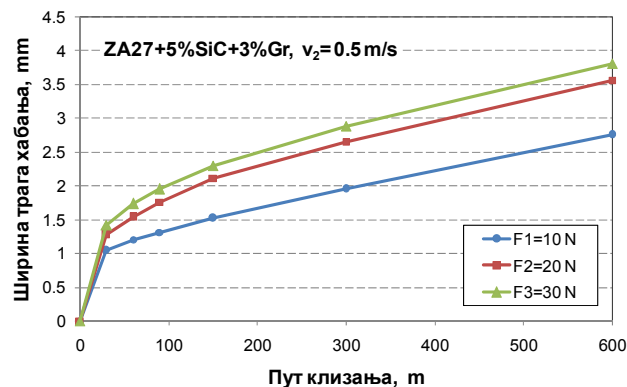
Слика П.19 Криве хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, F₁ = 10 N



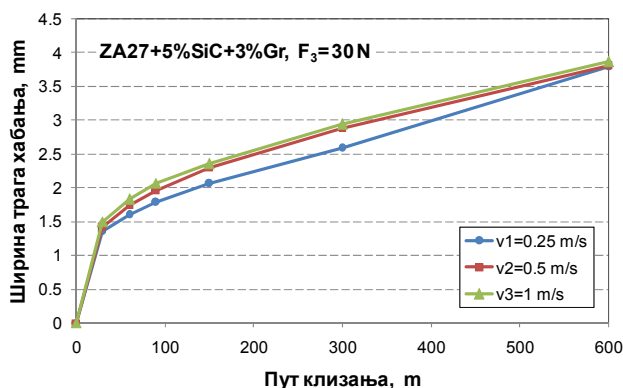
Слика П.20 Криве хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, v₁ = 0.25 m/s



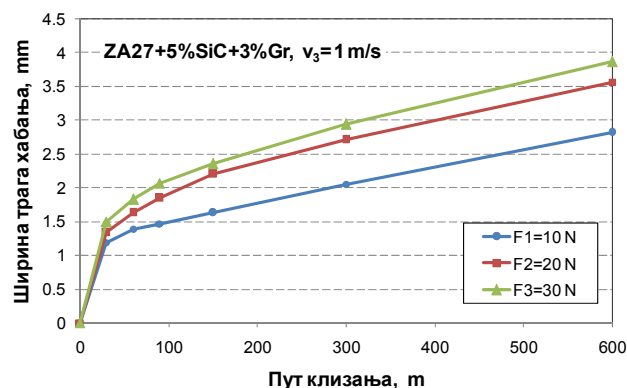
Слика П.21 Криве хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, F₂ = 20 N



Слика П.22 Криве хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, v₂ = 0.5 m/s



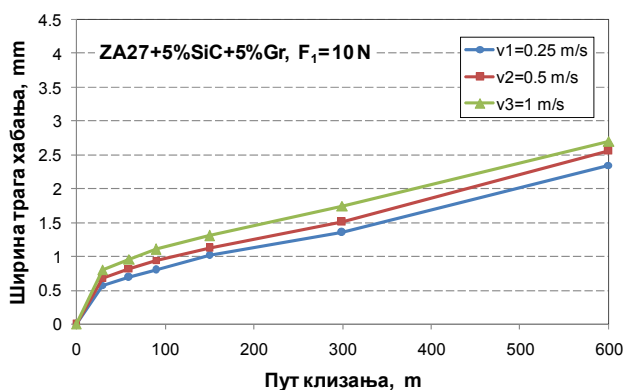
Слика П.23 Криве хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, F₃ = 30 N



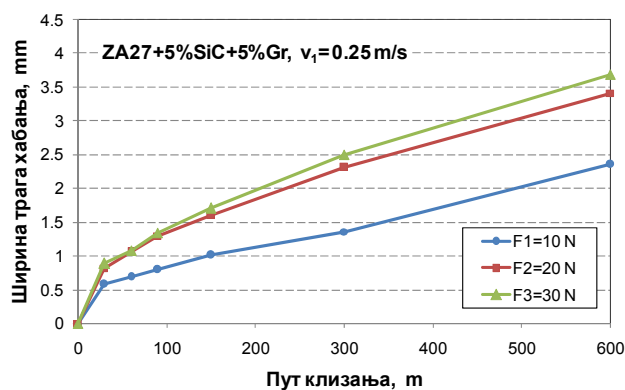
Слика П.24 Криве хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, v₃ = 1 m/s

Табела П.5 Ширина трага хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, без подмазивања

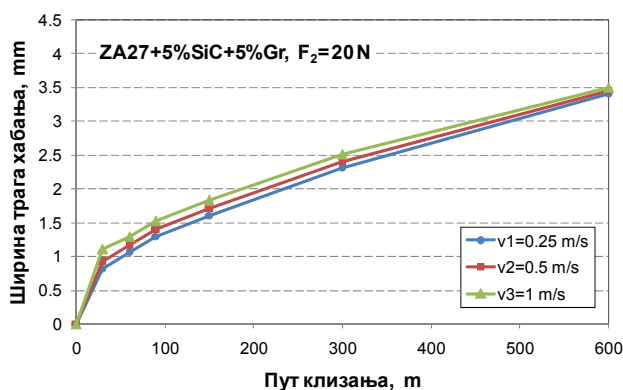
ZA 27+5%SiC+5%Gr		Ширина трага хабања, mm					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.576	0.689	0.798	1.013	1.354	2.351
	20	0.815	1.056	1.295	1.602	2.303	3.411
	30	0.885	1.079	1.338	1.703	2.492	3.689
0,5	10	0.683	0.821	0.945	1.119	1.511	2.553
	20	0.912	1.159	1.401	1.707	2.402	3.456
	30	1.016	1.259	1.485	1.856	2.623	3.751
1	10	0.803	0.961	1.106	1.306	1.743	2.705
	20	1.103	1.297	1.525	1.823	2.512	3.502
	30	1.206	1.464	1.681	2.027	2.749	3.821



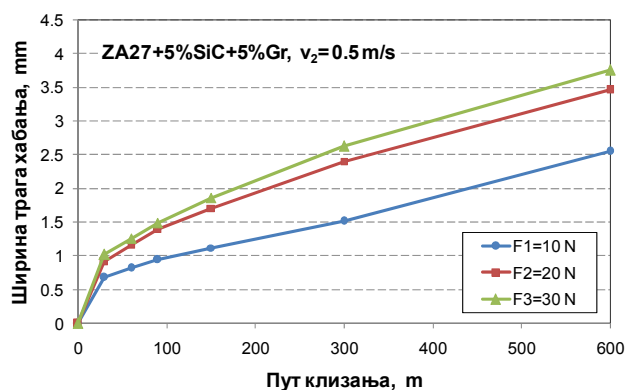
Слика П.25 Криве хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $F_1 = 10\text{ N}$



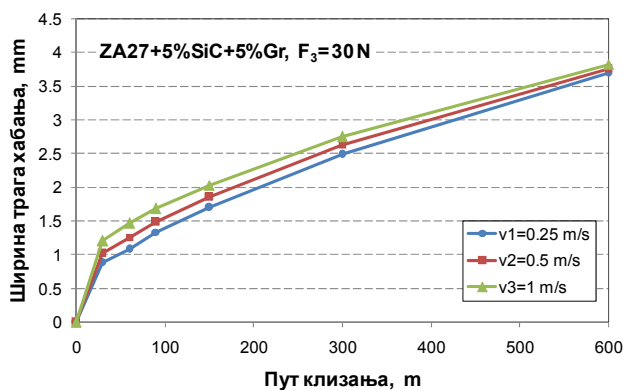
Слика П.26 Криве хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $v_1 = 0.25\text{ m/s}$



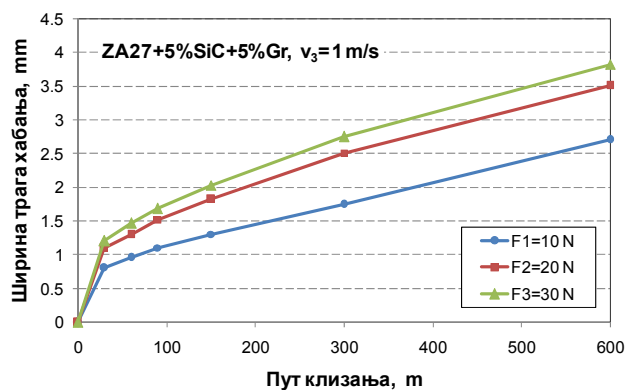
Слика П.27 Криве хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $F_2 = 20\text{ N}$



Слика П.28 Криве хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $v_2 = 0.5\text{ m/s}$



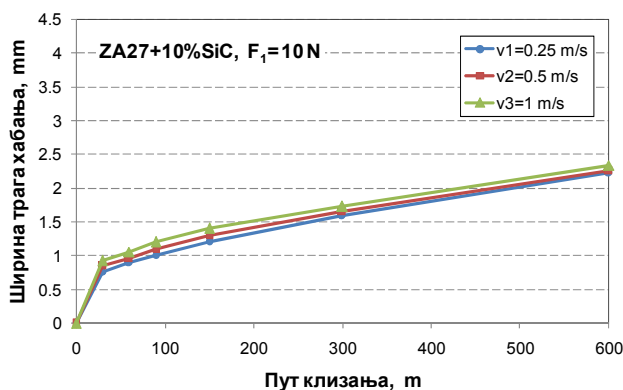
Слика П.29 Криве хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $F_3 = 30\text{ N}$



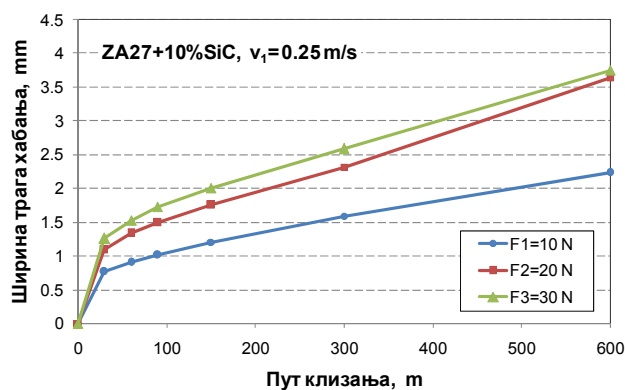
Слика П.30 Криве хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $v_3 = 1\text{ m/s}$

Табела П.6 Ширина трага хабања – ZA27+10%SiC, без подмазивања

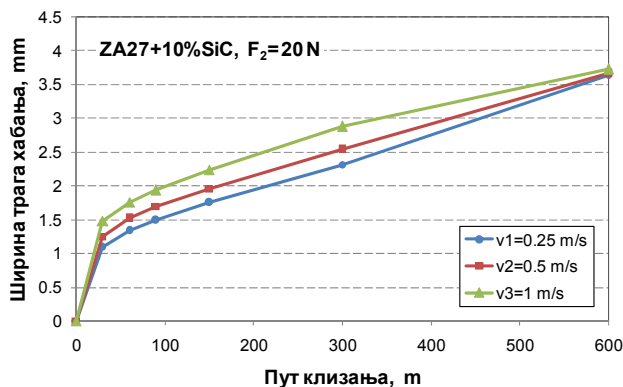
ZA 27+10%SiC		Ширина трага хабања, mm					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.763	0.902	1.012	1.202	1.589	2.225
	20	1.089	1.335	1.484	1.753	2.311	3.635
	30	1.255	1.522	1.723	2.006	2.582	3.742
0,5	10	0.849	0.965	1.098	1.303	1.651	2.252
	20	1.249	1.514	1.695	1.959	2.539	3.662
	30	1.398	1.704	1.923	2.248	2.782	3.824
1	10	0.925	1.058	1.203	1.404	1.725	2.335
	20	1.478	1.757	1.931	2.235	2.872	3.722
	30	1.574	1.835	2.012	2.356	2.958	3.871



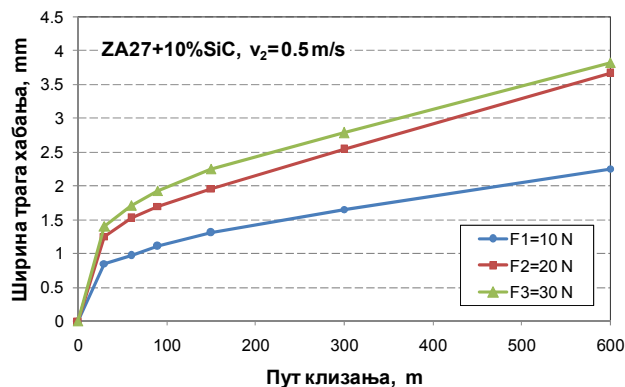
Слика П.31 Криве хабања – ZA27+10%SiC, $F_1 = 10\text{ N}$



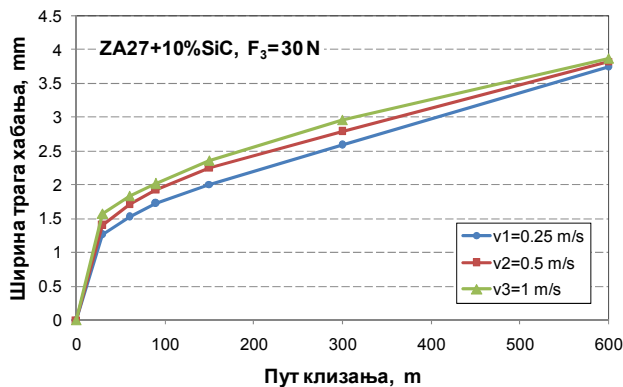
Слика П.32 Криве хабања – ZA27+10%SiC, $v_1 = 0.25\text{ m/s}$



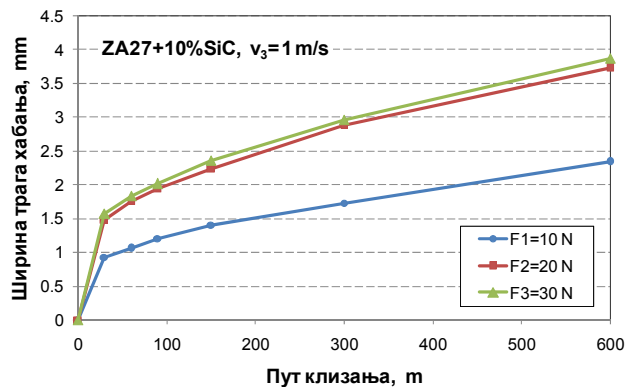
Слика П.33 Криве хабања – ZA27+10%SiC, $F_2 = 20\text{ N}$



Слика П.34 Криве хабања – ZA27+10%SiC, $v_2 = 0.5\text{ m/s}$



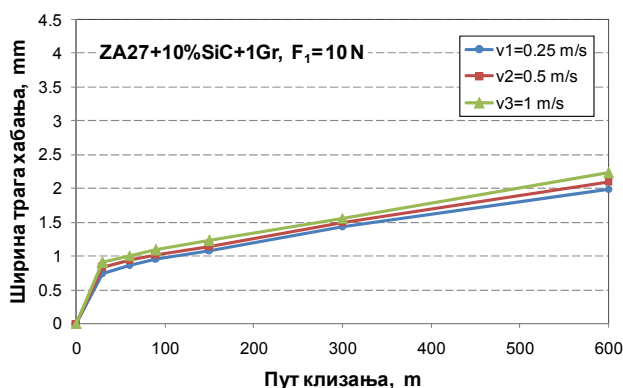
Слика П.35 Криве хабања – ZA27+10%SiC, $F_3 = 30\text{ N}$



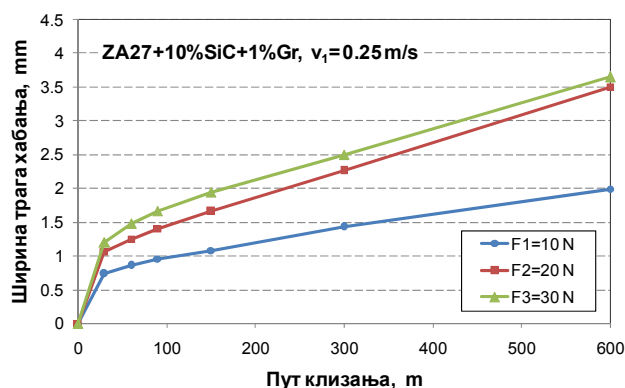
Слика П.36 Криве хабања – ZA27+10%SiC, $v_3 = 1\text{ m/s}$

Табела П.7 Ширина трага хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, без подмазивања

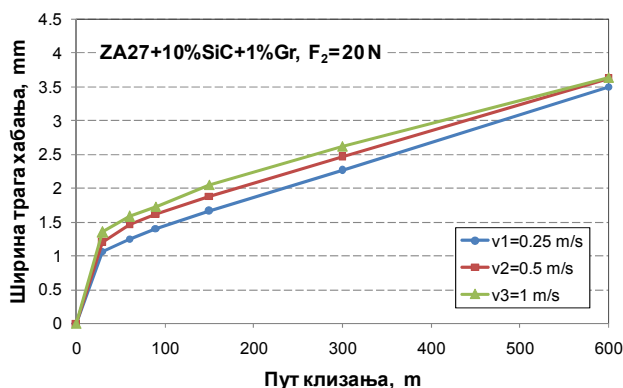
ZA 27+10%SiC+1%Gr		Ширина трага хабања, mm					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.735	0.859	0.957	1.078	1.423	1.987
	20	1.062	1.249	1.401	1.661	2.256	3.603
	30	1.195	1.472	1.658	1.938	2.495	3.646
0,5	10	0.825	0.936	1.009	1.135	1.496	2.086
	20	1.198	1.463	1.618	1.881	2.461	3.618
	30	1.329	1.595	1.779	2.049	2.632	3.689
1	10	0.897	0.998	1.083	1.223	1.555	2.225
	20	1.345	1.575	1.721	2.045	2.615	3.639
	30	1.518	1.798	1.977	2.275	2.871	3.721



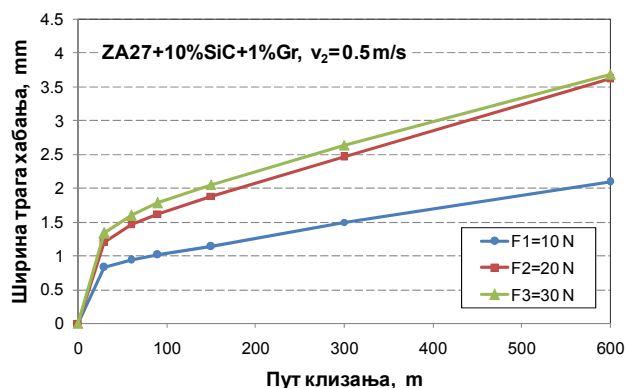
Слика П.37 Криве хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, F₁ = 10 N



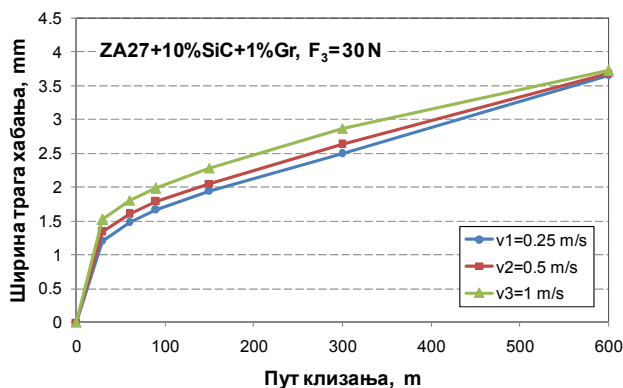
Слика П.38 Криве хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, v₁ = 0.25 m/s



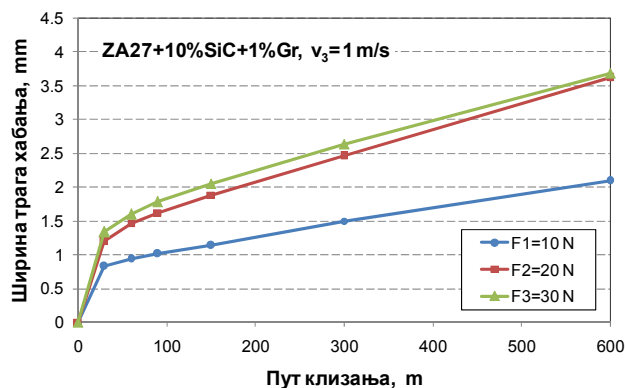
Слика П.39 Криве хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, F₂ = 20 N



Слика П.40 Криве хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, v₂ = 0.5 m/s



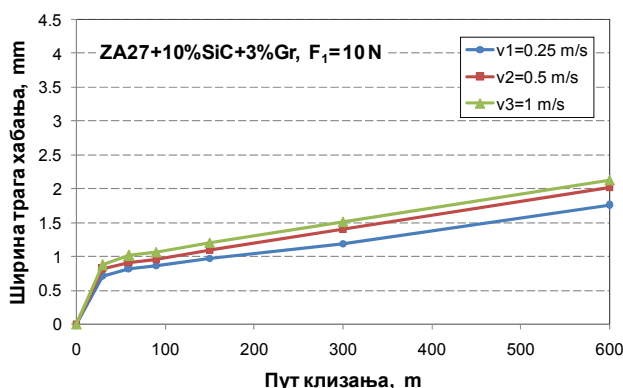
Слика П.41 Криве хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, F₃ = 30 N



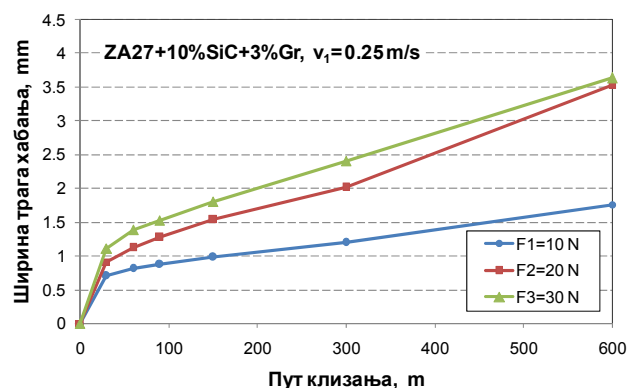
Слика П.42 Криве хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, v₃ = 1 m/s

Табела П.8 Ширина трага хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, без подмазивања

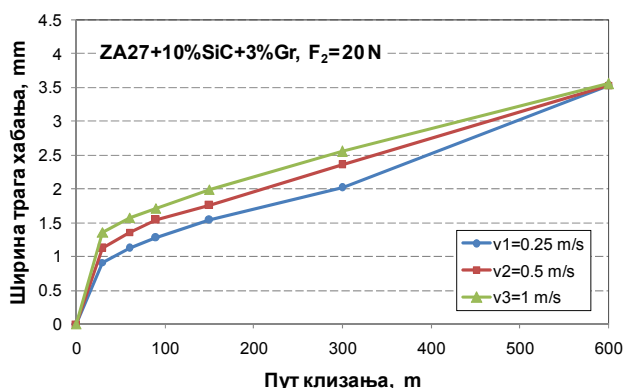
ZA 27+10%SiC+3%Gr		Ширина трага хабања, mm					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.701	0.809	0.865	0.975	1.193	1.758
	20	0.911	1.112	1.275	1.531	2.012	3.521
	30	1.105	1.386	1.524	1.803	2.405	3.631
0,5	10	0.815	0.911	0.948	1.088	1.398	2.021
	20	1.118	1.357	1.537	1.751	2.353	3.531
	30	1.263	1.562	1.707	1.958	2.557	3.662
1	10	0.872	1.009	1.068	1.199	1.515	2.132
	20	1.351	1.569	1.707	1.987	2.551	3.554
	30	1.468	1.757	1.951	2.233	2.806	3.699



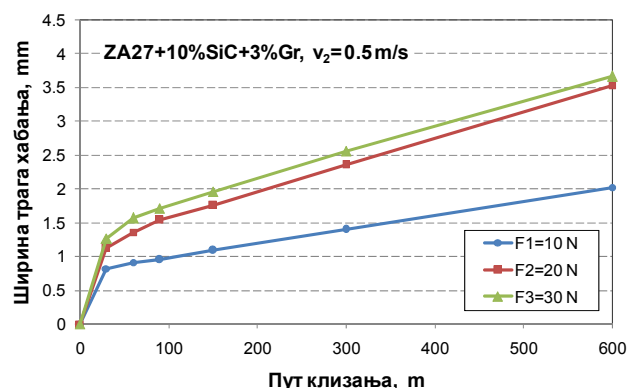
Слика П.43 Криве хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $F_1 = 10\text{ N}$



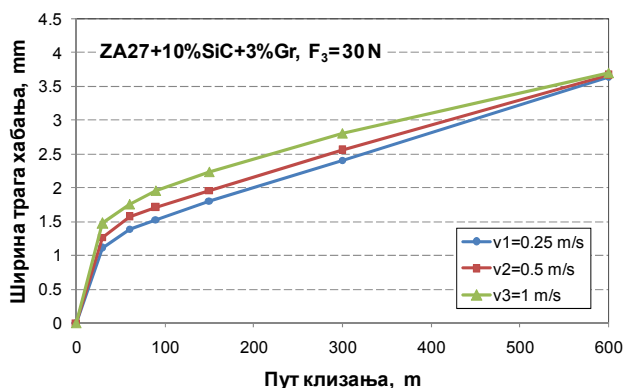
Слика П.44 Криве хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $v_1 = 0.25\text{ m/s}$



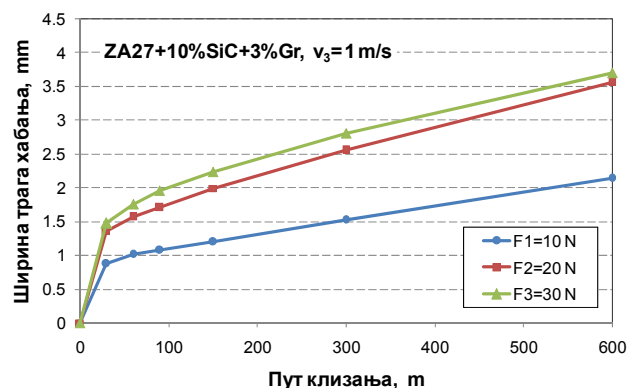
Слика П.45 Криве хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $F_2 = 20\text{ N}$



Слика П.46 Криве хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $v_2 = 0.5\text{ m/s}$



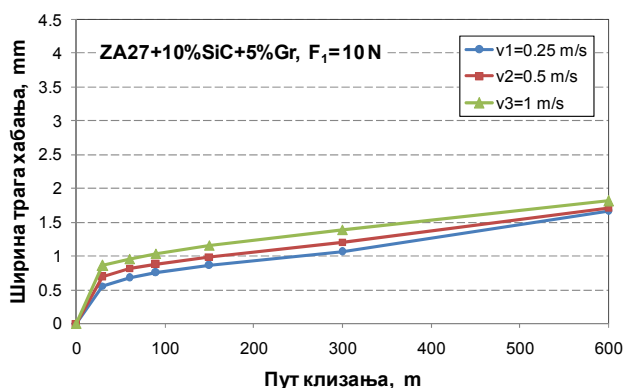
Слика П.47 Криве хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $F_3 = 30\text{ N}$



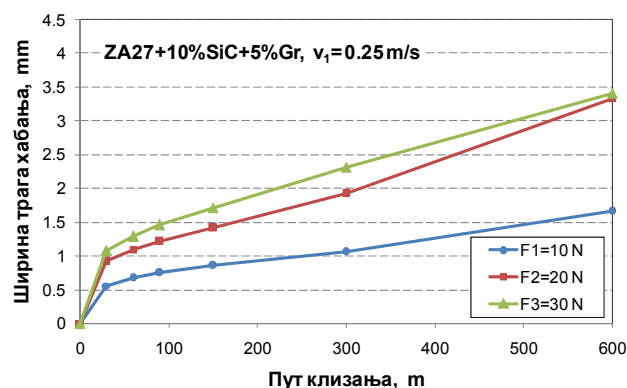
Слика П.48 Криве хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $v_3 = 1\text{ m/s}$

Табела П.9 Ширина трага хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, без подмазивања

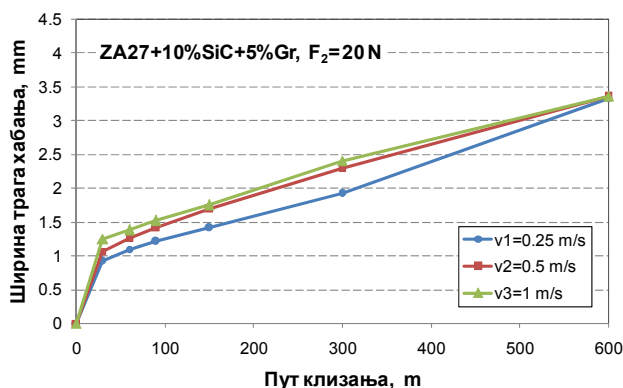
ZA 27+10%SiC+5%Gr		Ширина трага хабања, mm					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.552	0.665	0.751	0.856	1.058	1.657
	20	0.921	1.096	1.213	1.411	1.915	3.331
	30	1.075	1.286	1.455	1.711	2.315	3.402
0,5	10	0.684	0.818	0.875	0.987	1.202	1.703
	20	1.061	1.254	1.412	1.689	2.299	3.355
	30	1.221	1.482	1.631	1.888	2.441	3.453
1	10	0.854	0.956	1.025	1.153	1.381	1.808
	20	1.241	1.379	1.515	1.747	2.404	3.361
	30	1.412	1.733	1.921	2.168	2.685	3.606



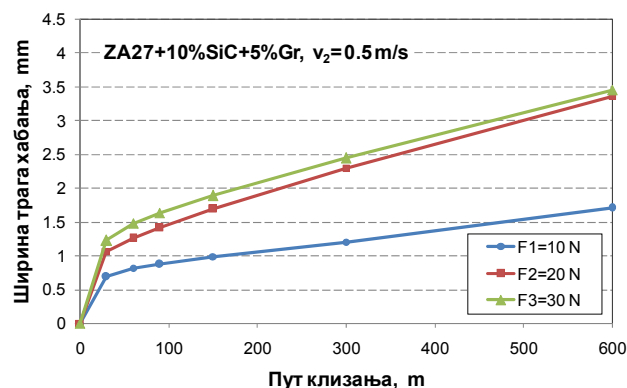
Слика П.49 Криве хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, F₁ = 10 N



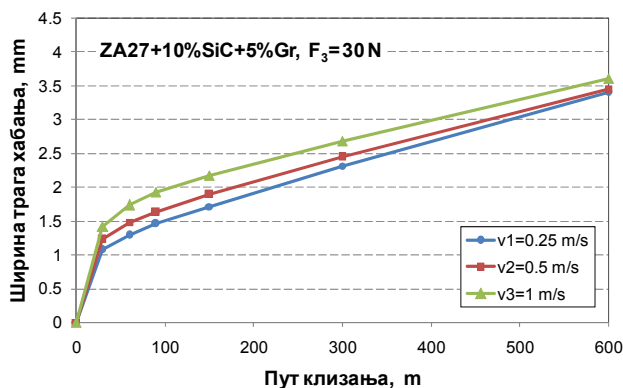
Слика П.50 Криве хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, v₁ = 0.25 m/s



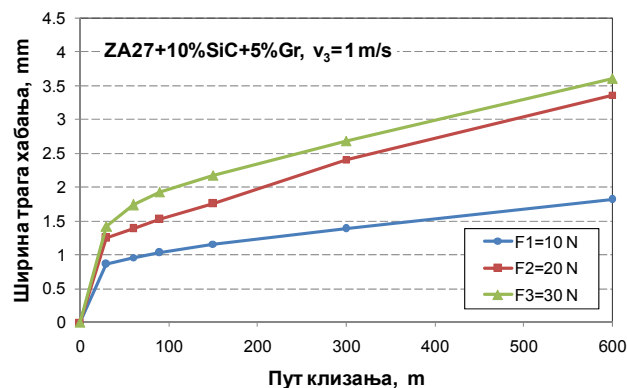
Слика П.51 Криве хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, F₂ = 20 N



Слика П.52 Криве хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, v₂ = 0.5 m/s



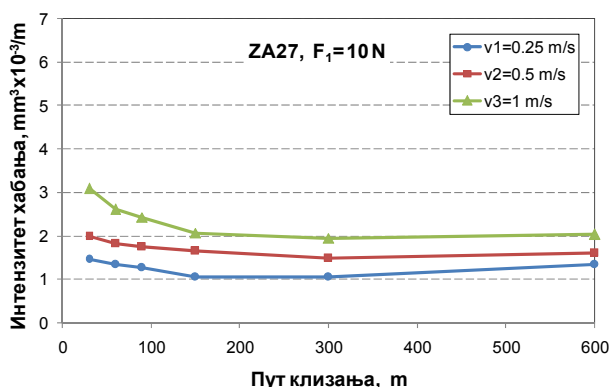
Слика П.53 Криве хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, F₃ = 30 N



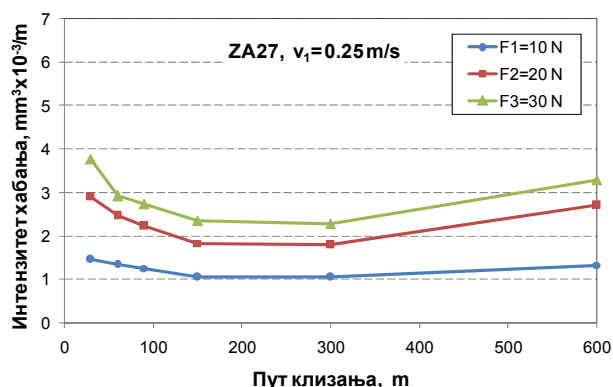
Слика П.54 Криве хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, v₃ = 1 m/s

Табела П.10 Интензитет хабања – ZA27, без подмазивања

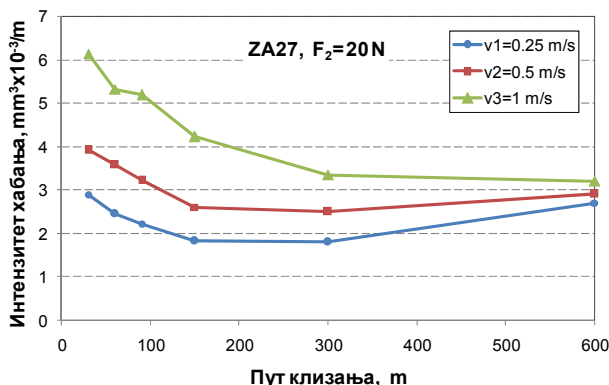
ZA 27		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-3}/\text{m}$					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	1.463	1.337	1.257	1.052	1.053	1.329
	20	2.894	2.461	2.224	1.832	1.801	2.706
	30	3.771	2.917	2.739	2.355	2.287	3.299
0,5	10	1.988	1.811	1.738	1.648	1.474	1.603
	20	3.911	3.576	3.228	2.606	2.502	2.907
	30	4.556	4.024	3.641	3.024	2.915	3.812
1	10	3.087	2.607	2.429	2.065	1.937	2.029
	20	6.132	8.314	8.189	4.228	3.349	3.202
	30	6.607	6.367	8.573	4.501	4.342	4.466



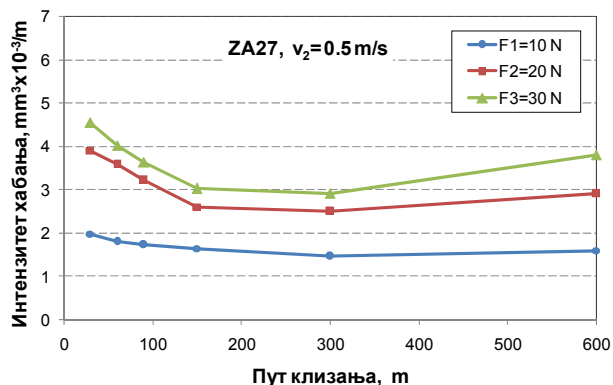
Слика П.55 Интензитет хабања – ZA27, $F_1 = 10 \text{ N}$



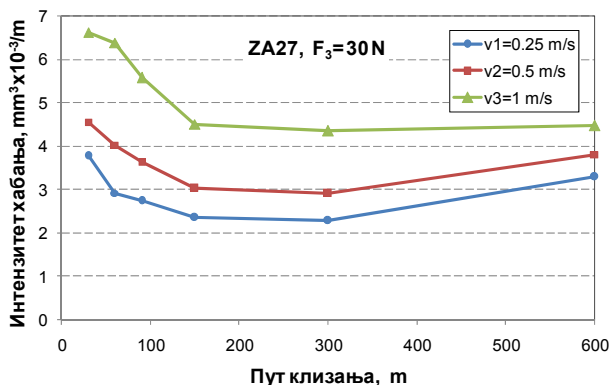
Слика П.56 Интензитет хабања – ZA27, $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$



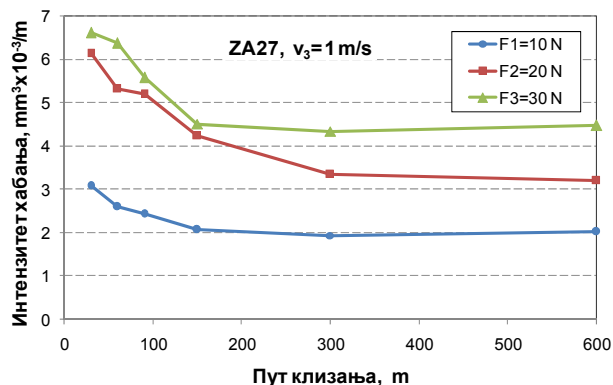
Слика П.57 Интензитет хабања – ZA27, $F_2 = 20 \text{ N}$



Слика П.58 Интензитет хабања – ZA27, $v_2 = 0.5 \text{ m/s}$



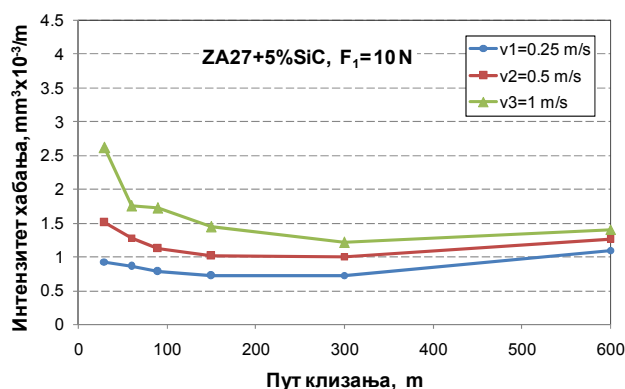
Слика П.59 Интензитет хабања – ZA27, $F_3 = 30 \text{ N}$



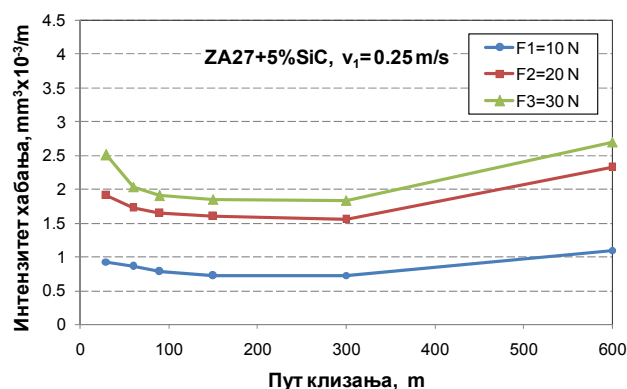
Слика П.60 Интензитет хабања – ZA27, $v_3 = 1 \text{ m/s}$

Табела П.11 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, без подмазивања

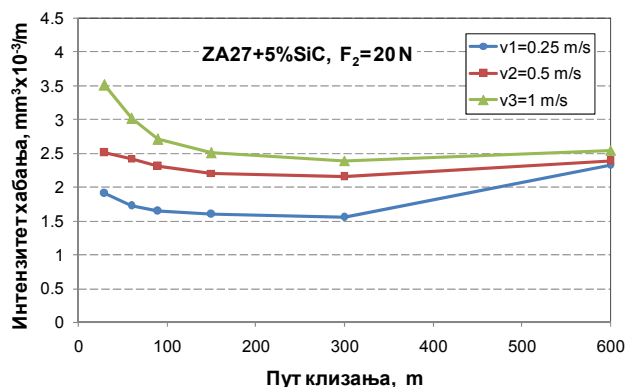
ZA 27+5%SiC		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-3} / \text{m}$					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.923	0.852	0.774	0.712	0.725	1.096
	20	1.907	1.723	1.646	1.599	1.546	2.323
	30	2.501	2.031	1.902	1.851	1.829	2.699
0,5	10	1.507	1.277	1.121	1.012	1.002	1.253
	20	2.506	2.421	2.301	2.207	2.156	2.383
	30	3.006	2.714	2.535	2.504	2.396	2.801
1	10	2.611	1.747	1.715	1.441	1.205	1.401
	20	3.507	3.014	2.705	2.504	2.391	2.547
	30	4.017	3.819	3.404	3.103	2.696	2.868



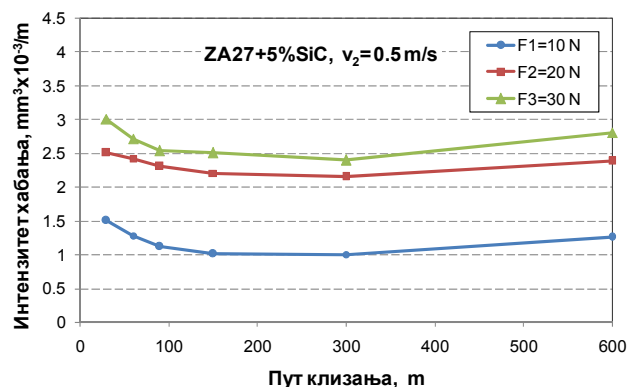
Слика П.61 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $F_1 = 10 \text{ N}$



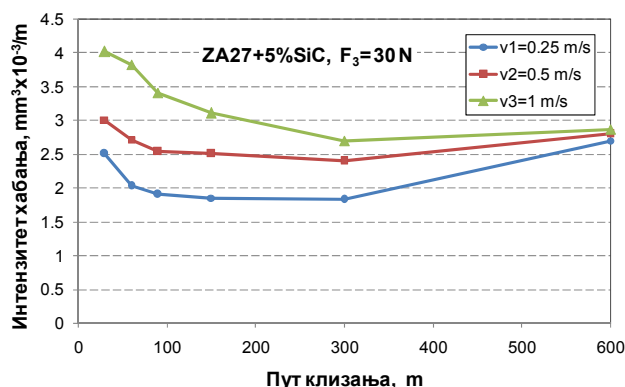
Слика П.62 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$



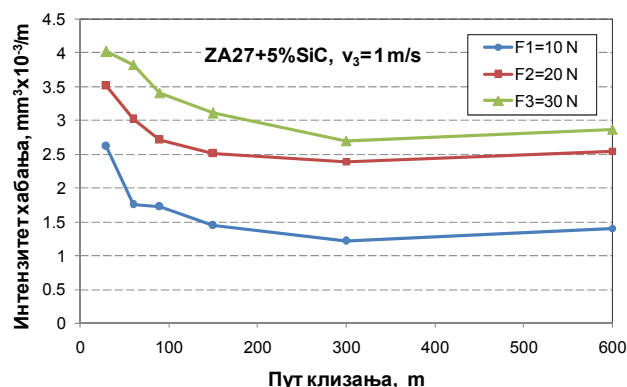
Слика П.63 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $F_2 = 20 \text{ N}$



Слика П.64 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $v_2 = 0.5 \text{ m/s}$



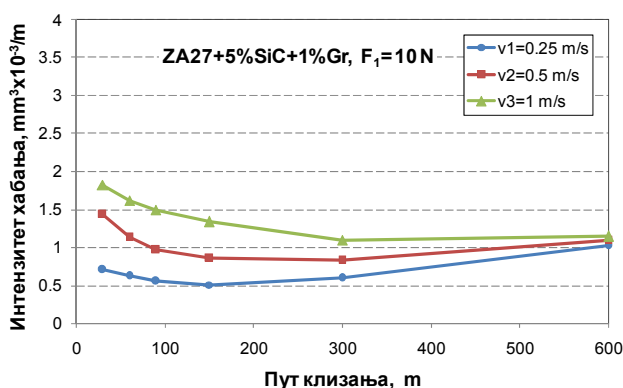
Слика П.65 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $F_3 = 30 \text{ N}$



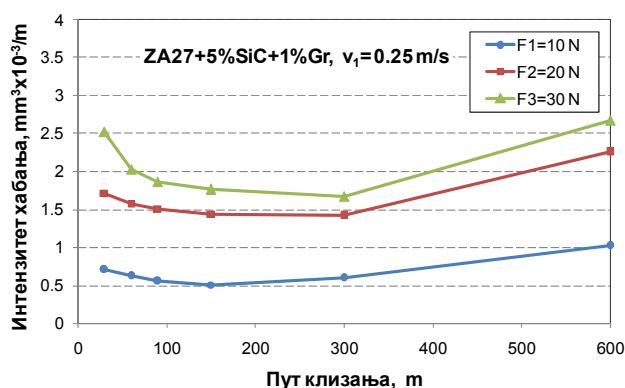
Слика П.66 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $v_3 = 1 \text{ m/s}$

Табела П.12 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, без подмазивања

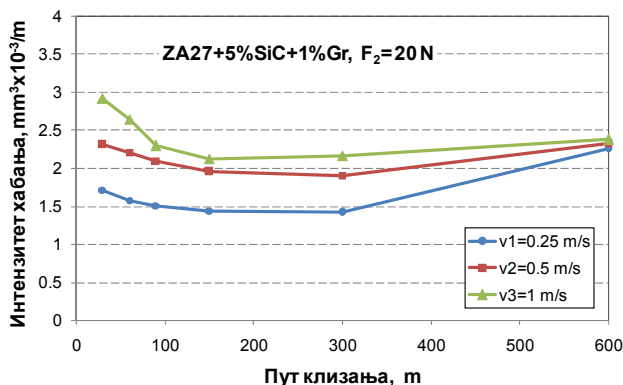
ZA 27+5%SiC+1%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-3}/\text{m}$					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.702	0.625	0.555	0.508	0.594	1.024
	20	1.712	1.574	1.508	1.441	1.414	2.252
	30	2.522	2.023	1.858	1.761	1.667	2.671
0,5	10	1.435	1.131	0.962	0.855	0.827	1.093
	20	2.311	2.207	2.095	1.951	1.903	2.321
	30	2.728	2.431	2.351	2.355	2.291	2.718
1	10	1.823	1.615	1.487	1.334	1.095	1.141
	20	2.921	2.643	2.294	2.121	2.163	2.375
	30	3.467	3.202	2.915	2.705	2.551	2.769



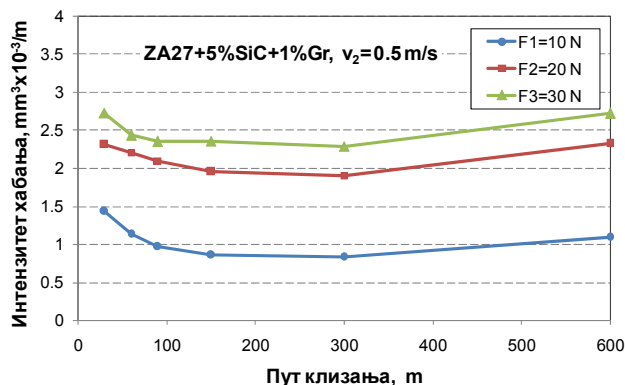
Слика П.67 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $F_1 = 10 \text{ N}$



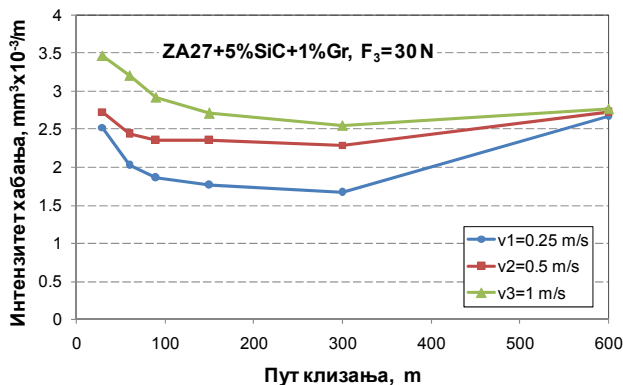
Слика П.68 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$



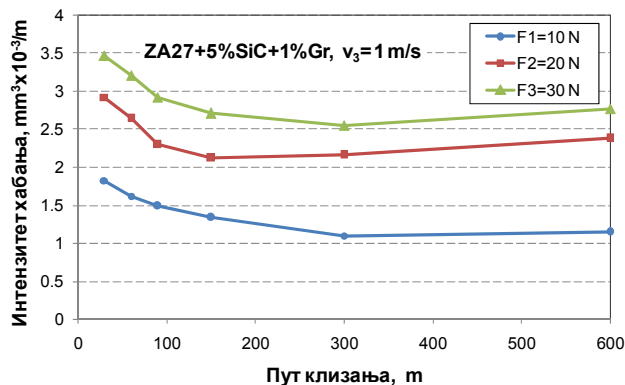
Слика П.69 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $F_2 = 20 \text{ N}$



Слика П.70 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $v_2 = 0.5 \text{ m/s}$



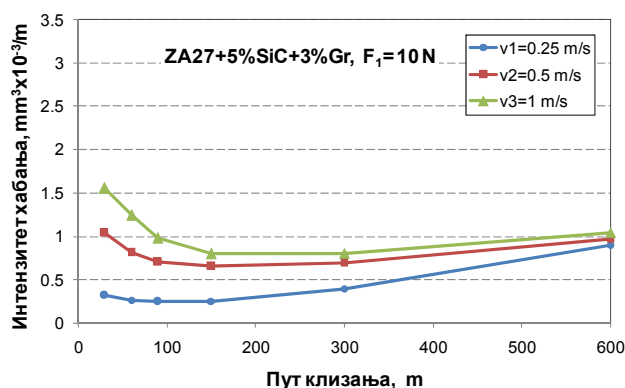
Слика П.71 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $F_3 = 30 \text{ N}$



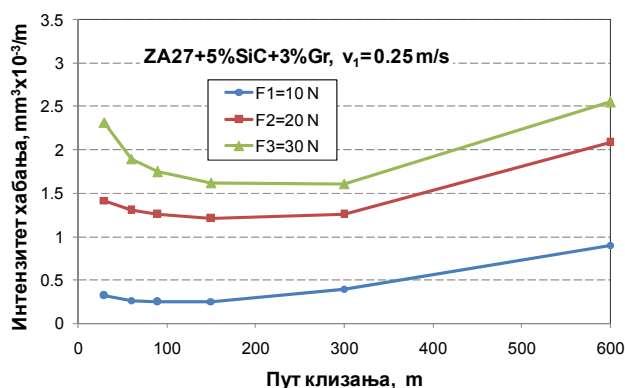
Слика П.72 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $v_3 = 1 \text{ m/s}$

Табела П.13 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, без подмазивања

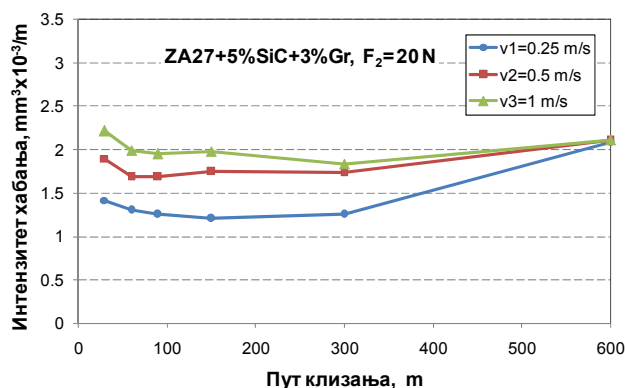
ZA 27+5%SiC+3%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-3}/\text{m}$					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.319	0.261	0.245	0.252	0.396	0.897
	20	1.416	1.299	1.252	1.204	1.255	2.085
	30	2.311	1.892	1.744	1.616	1.608	2.547
0,5	10	1.033	0.807	0.699	0.651	0.691	0.968
	20	1.894	1.683	1.686	1.749	1.733	2.103
	30	2.632	2.411	2.294	2.261	2.218	2.575
1	10	1.551	1.237	0.976	0.794	0.803	1.037
	20	2.211	1.991	1.946	1.981	1.835	2.108
	30	3.104	2.811	2.705	2.407	2.351	2.688



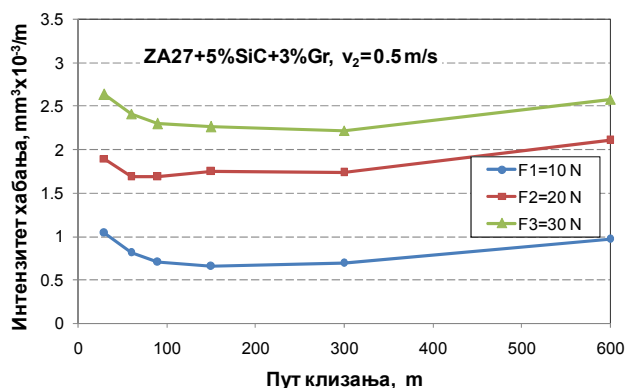
Слика П.73 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, $F_1 = 10\text{ N}$



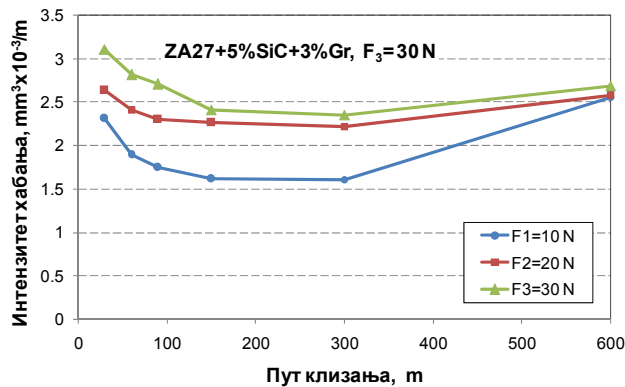
Слика П.74 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, $v_1 = 0.25\text{ m/s}$



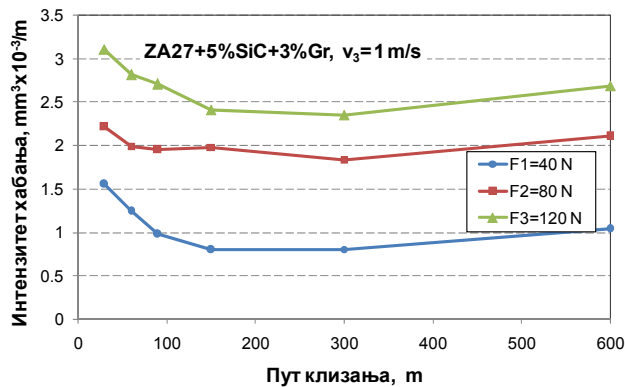
Слика П.75 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, $F_2 = 20\text{ N}$



Слика П.76 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, $v_2 = 0.5\text{ m/s}$



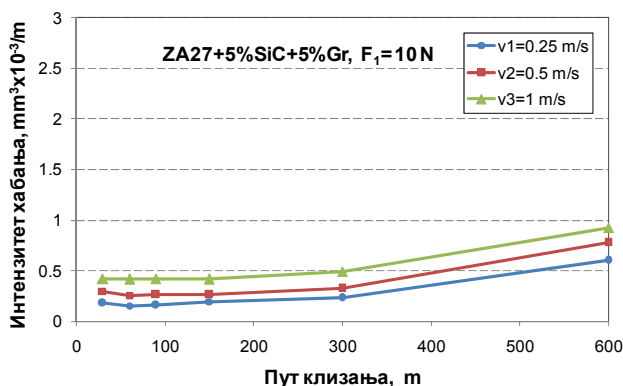
Слика П.77 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, $F_3 = 30\text{ N}$



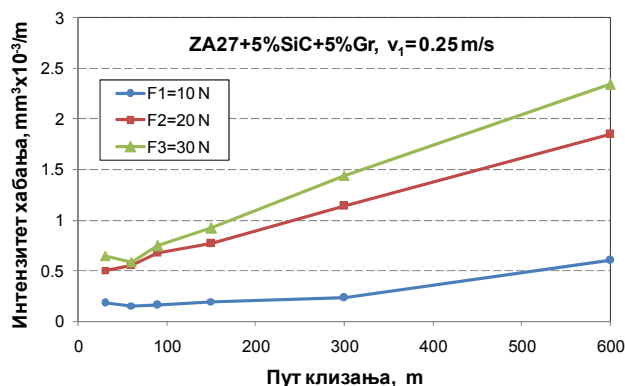
Слика П.78 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, $v_3 = 1\text{ m/s}$

Табела П.14 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, без подмазивања

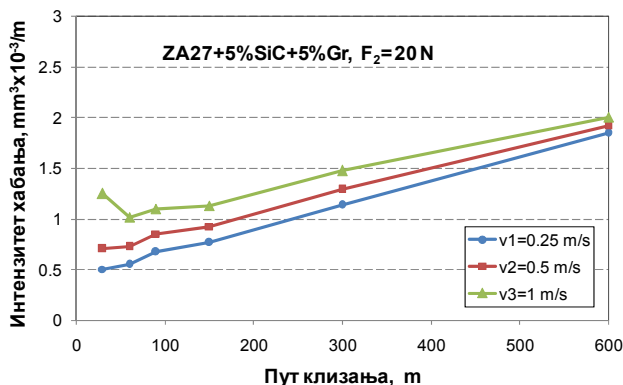
ZA 27+5%SiC+5%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-3}/\text{m}$					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.177	0.152	0.157	0.193	0.231	0.604
	20	0.503	0.547	0.672	0.764	1.136	1.848
	30	0.644	0.583	0.742	0.918	1.439	2.339
0,5	10	0.296	0.257	0.261	0.262	0.321	0.774
	20	0.705	0.723	0.852	0.924	1.289	1.922
	30	0.974	0.927	1.014	1.188	1.679	2.459
1	10	0.418	0.412	0.419	0.414	0.492	0.921
	20	1.246	1.013	1.098	1.126	1.474	2.001
	30	1.629	1.458	1.471	1.548	1.933	2.599



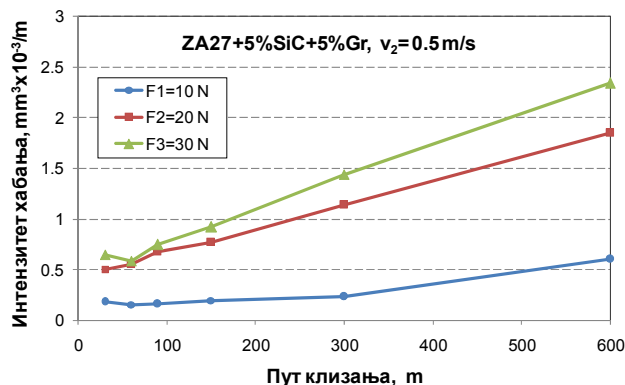
Слика П.79 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $F_1 = 10\text{ N}$



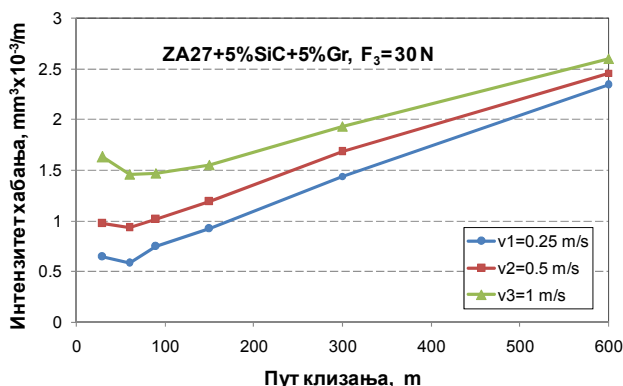
Слика П.80 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $v_1 = 0.25\text{ m/s}$



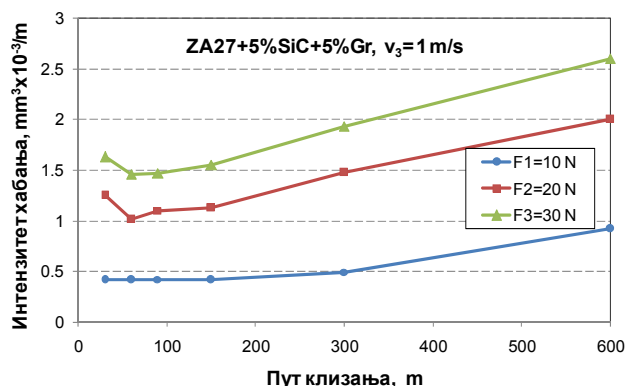
Слика П.81 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $F_2 = 20\text{ N}$



Слика П.82 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $v_2 = 0.5\text{ m/s}$



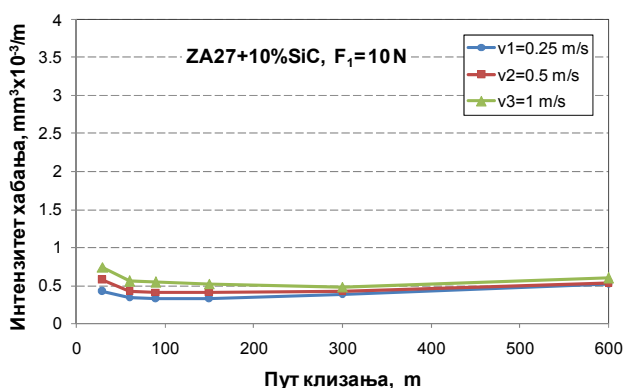
Слика П.83 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $F_3 = 30\text{ N}$



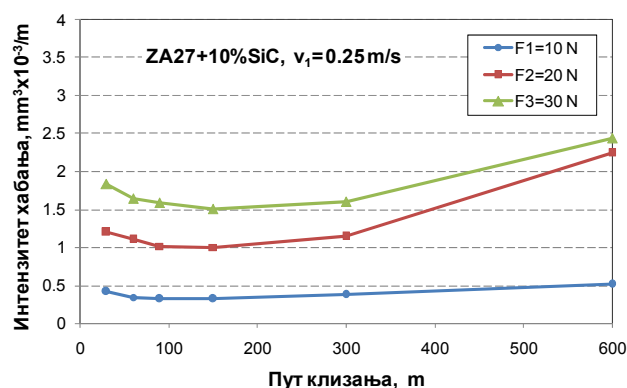
Слика П.84 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $v_3 = 1\text{ m/s}$

Табела П.15 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC, без подмазивања

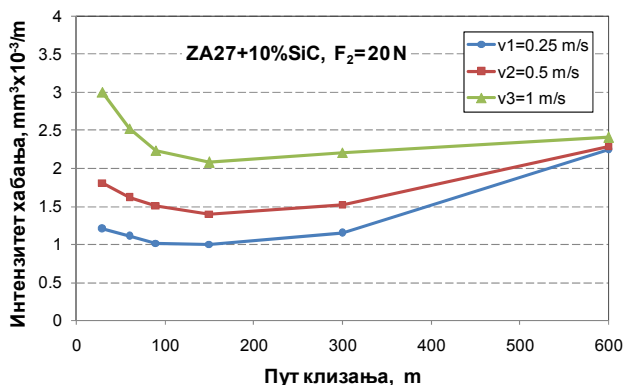
ZA 27+10%SiC		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-3}/\text{m}$					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.413	0.341	0.321	0.323	0.373	0.512
	20	1.201	1.105	1.012	1.001	1.148	2.237
	30	1.836	1.638	1.584	1.501	1.601	2.441
0,5	10	0.568	0.417	0.411	0.411	0.418	0.531
	20	1.811	1.612	1.508	1.398	1.522	2.288
	30	2.538	2.299	2.203	2.112	2.003	2.606
1	10	0.735	0.551	0.539	0.514	0.477	0.592
	20	3.001	2.521	2.231	2.076	2.204	2.402
	30	3.623	2.871	2.524	2.432	2.408	2.703



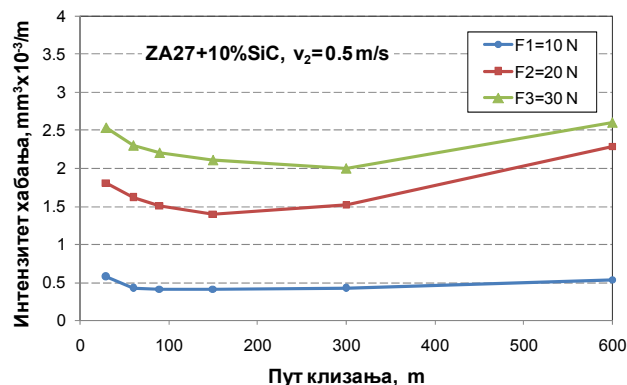
Слика П.85 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC, $F_1 = 10\text{ N}$



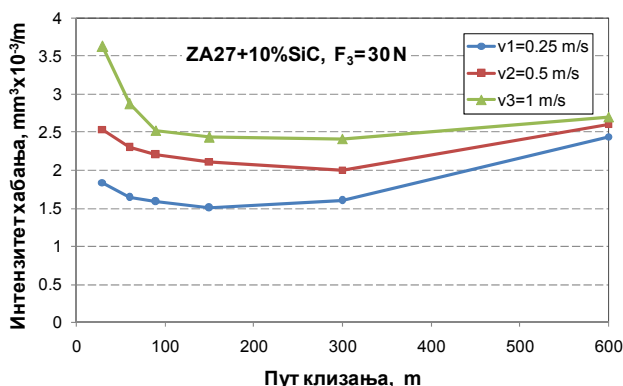
Слика П.86 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC, $v_1 = 0.25\text{ m/s}$



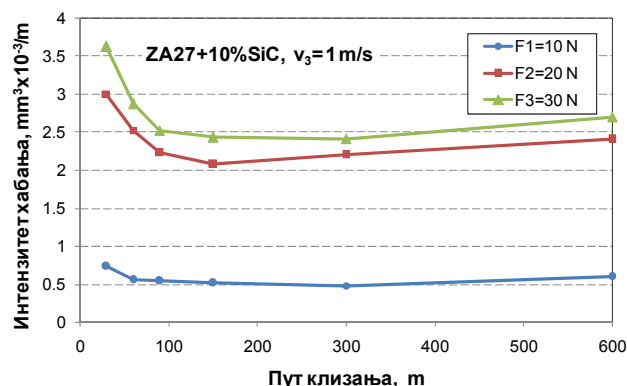
Слика П.87 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC, $F_2 = 20\text{ N}$



Слика П.88 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC, $v_2 = 0.5\text{ m/s}$



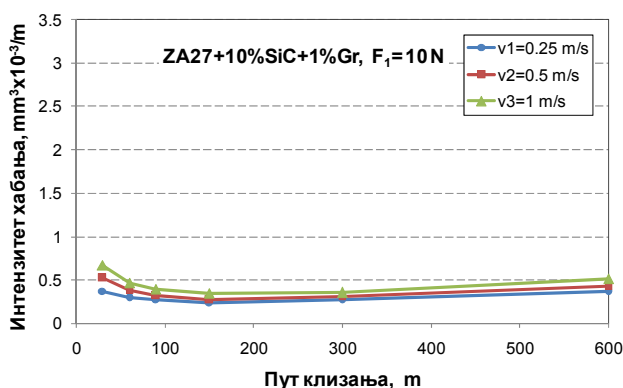
Слика П.89 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC, $F_3 = 30\text{ N}$



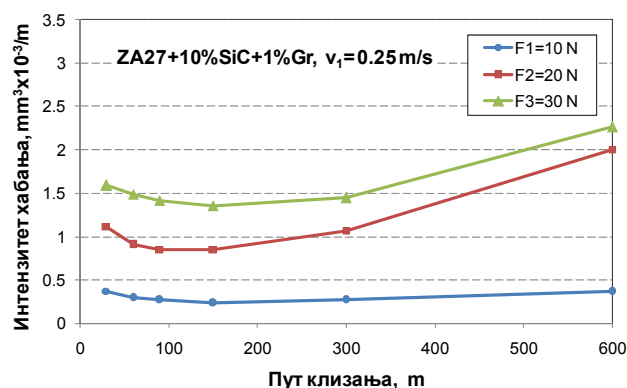
Слика П.90 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC, $v_3 = 1\text{ m/s}$

Табела П.16 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, без подмазивања

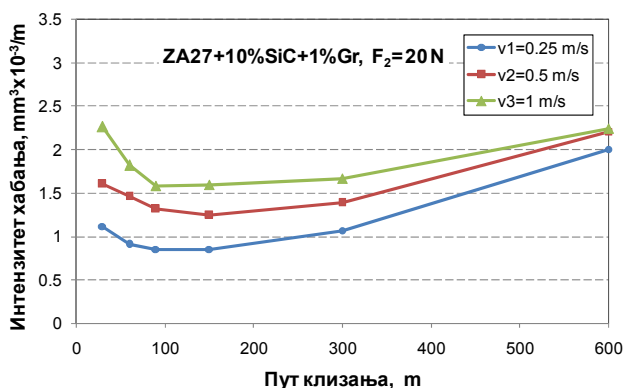
ZA 27+10%SiC+1%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-3} / \text{m}$					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.369	0.294	0.271	0.233	0.268	0.365
	20	1.113	0.905	0.852	0.851	1.068	2.002
	30	1.585	1.482	1.412	1.353	1.444	2.258
0,5	10	0.521	0.381	0.318	0.272	0.311	0.422
	20	1.597	1.455	1.312	1.237	1.386	2.206
	30	2.181	1.885	1.744	1.599	1.696	2.339
1	10	0.671	0.462	0.393	0.341	0.349	0.512
	20	2.261	1.815	1.579	1.591	1.663	2.245
	30	3.251	2.701	2.394	2.189	2.201	2.401



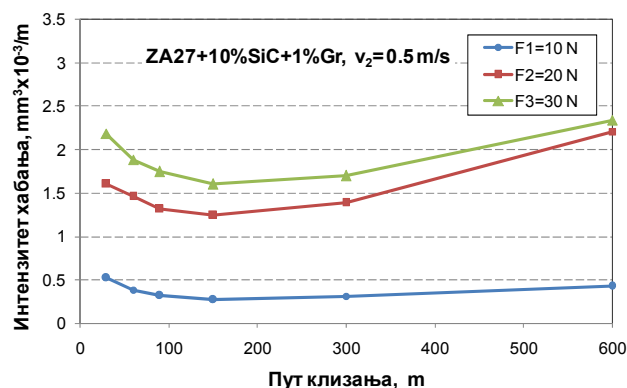
Слика П.91 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, $F_1 = 10 \text{ N}$



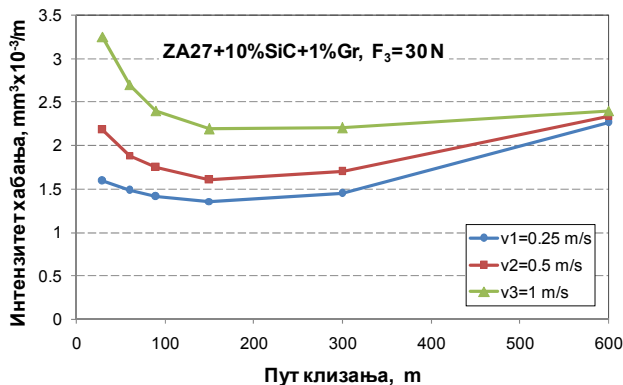
Слика П.92 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$



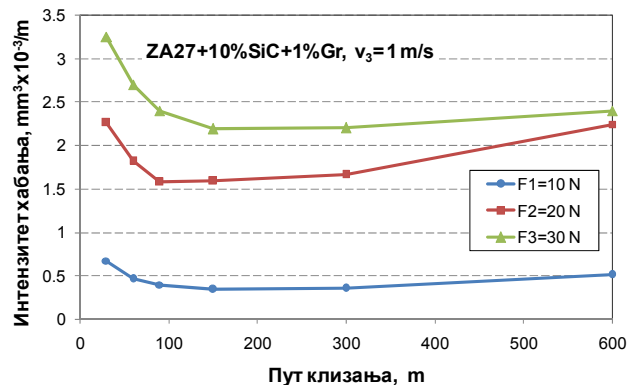
Слика П.93 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, $F_2 = 20 \text{ N}$



Слика П.94 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, $v_2 = 0.5 \text{ m/s}$



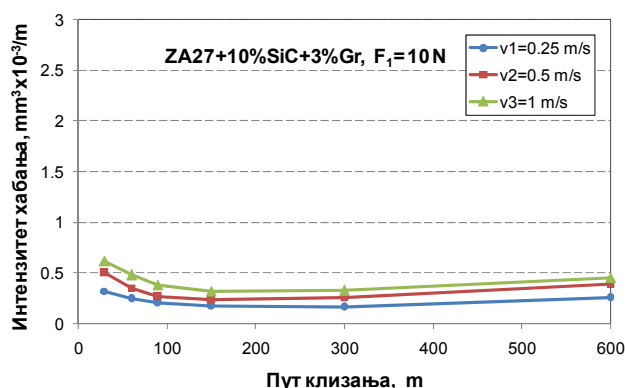
Слика П.95 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, $F_3 = 30 \text{ N}$



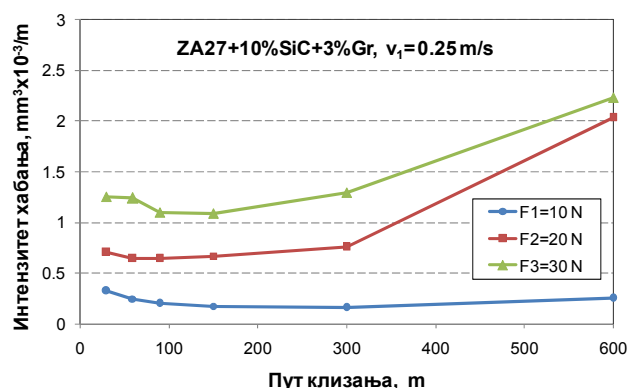
Слика П.96 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, $v_3 = 1 \text{ m/s}$

Табела П.17 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, без подмазивања

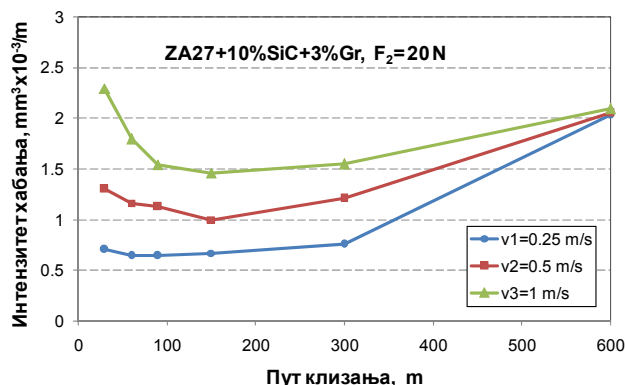
ZA 27+10%SiC+3%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-3} / \text{m}$					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.321	0.246	0.201	0.172	0.158	0.252
	20	0.702	0.639	0.642	0.667	0.757	2.033
	30	1.253	1.237	1.096	1.089	1.294	2.231
0,5	10	0.503	0.351	0.264	0.239	0.254	0.384
	20	1.298	1.161	1.125	0.998	1.211	2.051
	30	1.872	1.771	1.541	1.395	1.555	2.288
1	10	0.616	0.477	0.377	0.321	0.323	0.451
	20	2.291	1.794	1.541	1.458	1.544	2.091
	30	2.939	2.551	2.301	2.071	2.056	2.358



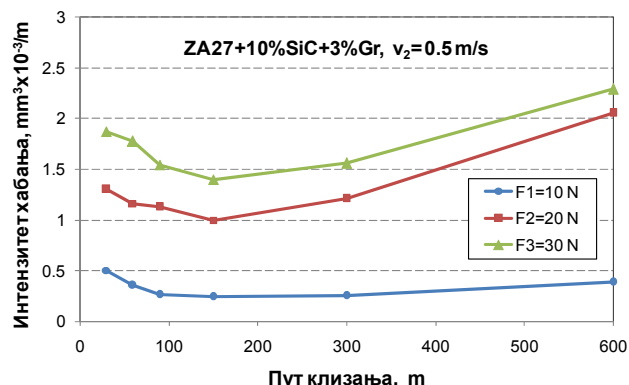
Слика П.97 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $F_1 = 10 \text{ N}$



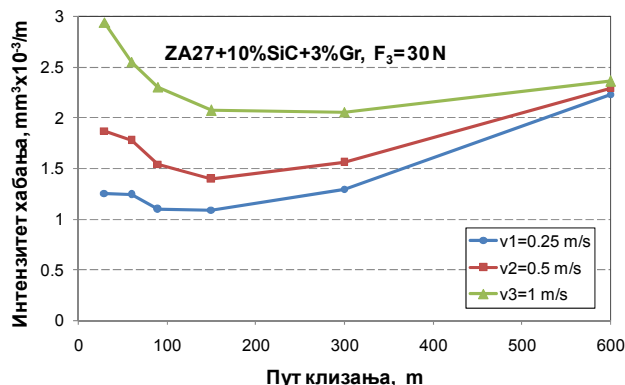
Слика П.98 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$



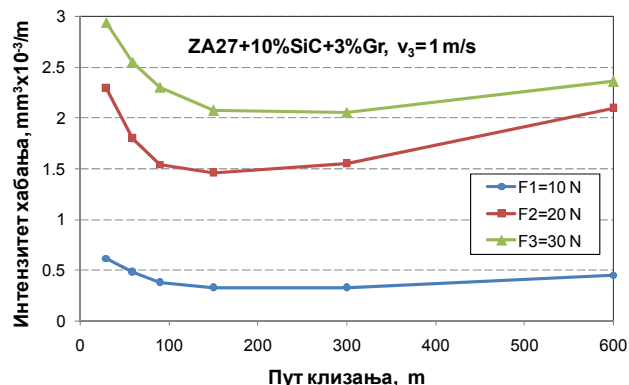
Слика П.99 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $F_2 = 20 \text{ N}$



Слика П.100 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $v_2 = 0.5 \text{ m/s}$



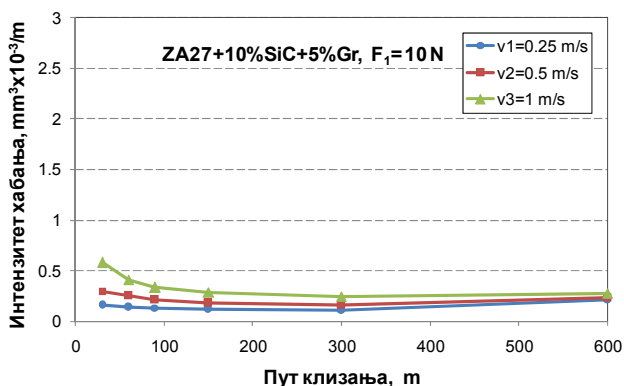
Слика П.101 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $F_3 = 30 \text{ N}$



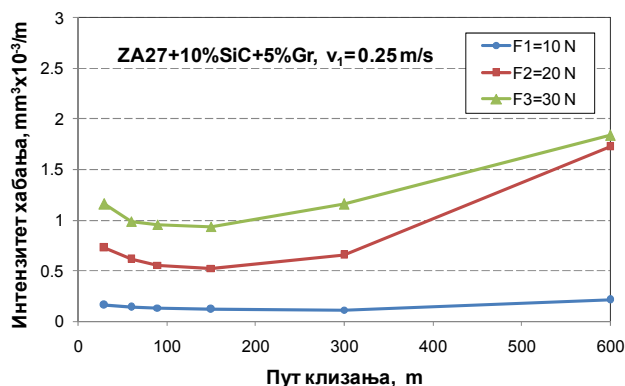
Слика П.102 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $v_3 = 1 \text{ m/s}$

Табела П.18 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, без подмазивања

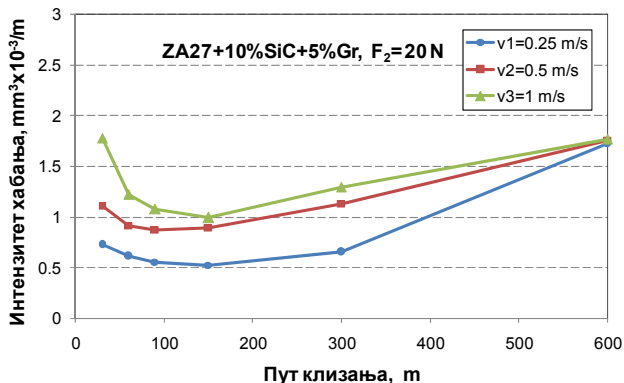
ZA 27+10%SiC+5%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-3} / \text{m}$					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		30	60	90	150	300	600
0,25	10	0.156	0.137	0.131	0.117	0.111	0.211
	20	0.726	0.611	0.553	0.522	0.653	1.721
	30	1.154	0.988	0.954	0.931	1.154	1.833
0,5	10	0.297	0.254	0.207	0.179	0.161	0.229
	20	1.109	0.916	0.872	0.895	1.131	1.758
	30	1.691	1.512	1.346	1.253	1.353	1.917
1	10	0.578	0.406	0.333	0.285	0.245	0.275
	20	1.775	1.218	1.077	0.991	1.292	1.768
	30	2.615	2.418	2.196	1.895	1.801	2.295



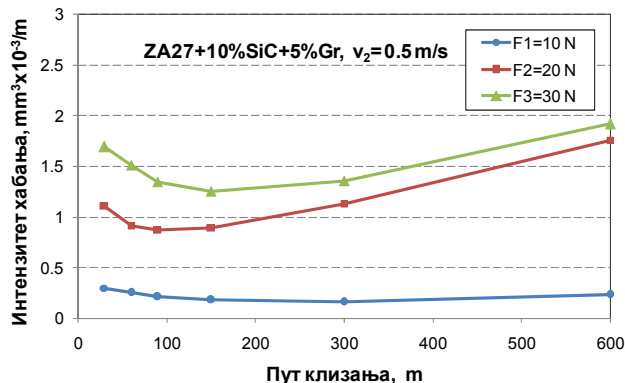
Слика П.103 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, $F_1 = 10 \text{ N}$



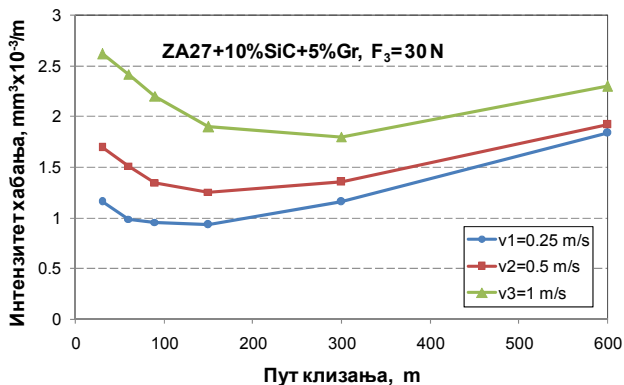
Слика П.104 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$



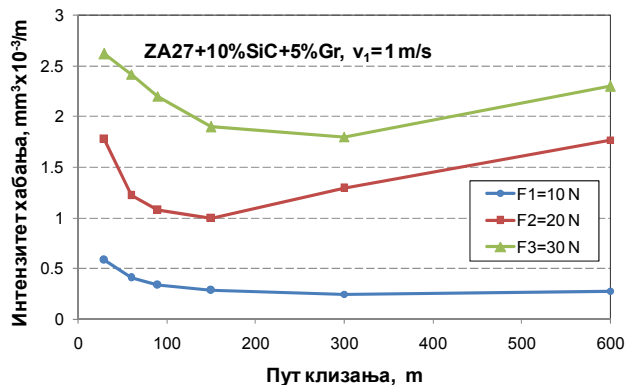
Слика П.105 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, $F_2 = 20 \text{ N}$



Слика П.106 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, $v_2 = 0.5 \text{ m/s}$



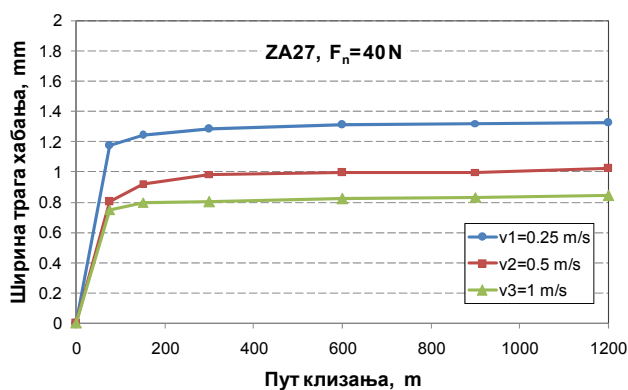
Слика П.107 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, $F_3 = 30 \text{ N}$



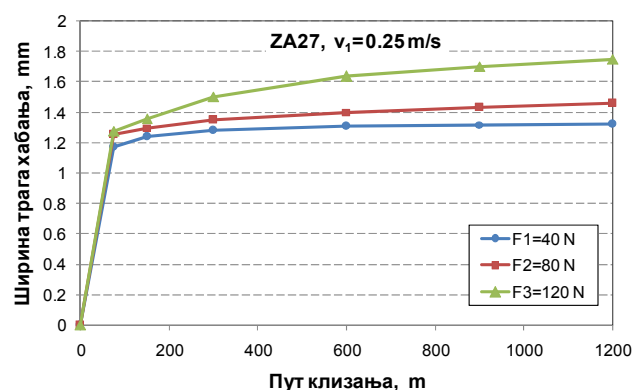
Слика П.108 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, $v_3 = 1 \text{ m/s}$

Табела П.19 Ширина трага хабања – ZA27, са подмазивањем

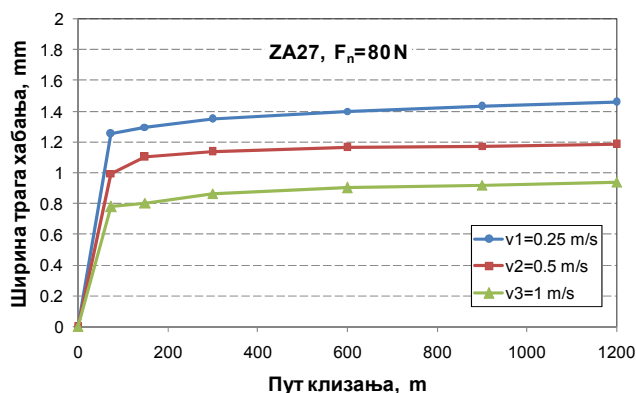
ZA 27		Ширина трага хабања, mm					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		75	150	300	600	900	1200
0,25	40	1.171	1.241	1.281	1.309	1.319	1.324
	80	1.253	1.298	1.351	1.402	1.431	1.461
	120	1.275	1.359	1.502	1.636	1.701	1.751
0,5	40	0.803	0.921	0.984	0.996	0.998	1.021
	80	0.997	1.103	1.136	1.164	1.175	1.184
	120	1.011	1.199	1.252	1.302	1.331	1.381
1	40	0.749	0.798	0.801	0.821	0.832	0.843
	80	0.779	0.802	0.865	0.902	0.921	0.942
	120	0.805	0.903	1.021	1.046	1.089	1.112



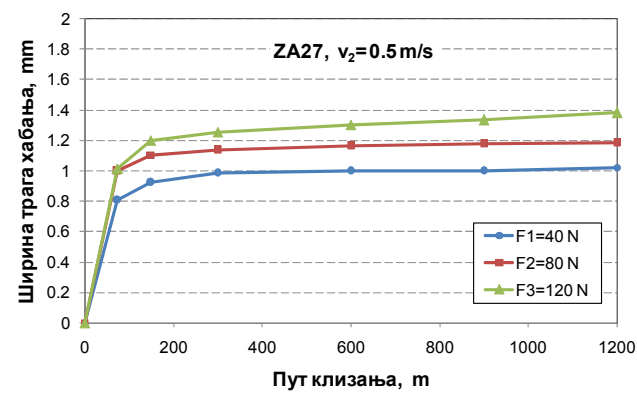
Слика П.109 Криве хабања – ZA27, $F_1 = 40\text{ N}$



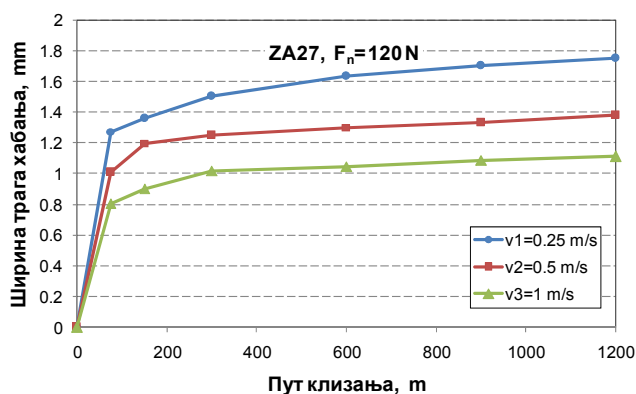
Слика П.110 Криве хабања – ZA27, $v_1 = 0.25\text{ m/s}$



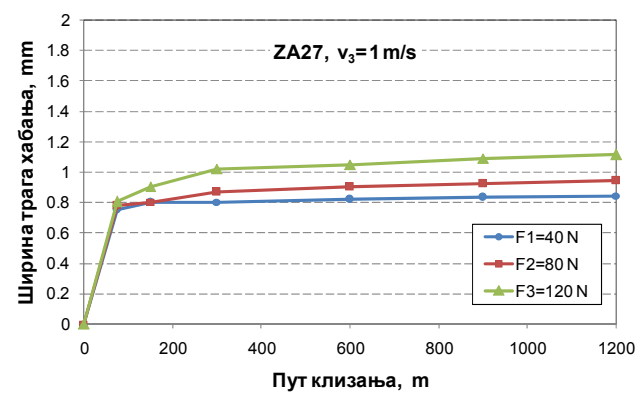
Слика П.111 Криве хабања – ZA27, $F_2 = 80\text{ N}$



Слика П.112 Криве хабања – ZA27, $v_2 = 0.5\text{ m/s}$



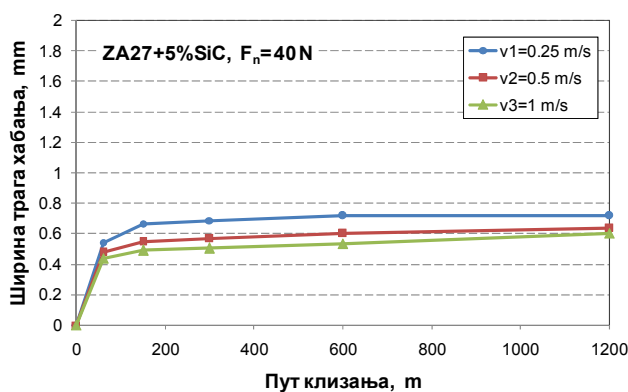
Слика П.113 Криве хабања – ZA27, $F_3 = 120\text{ N}$



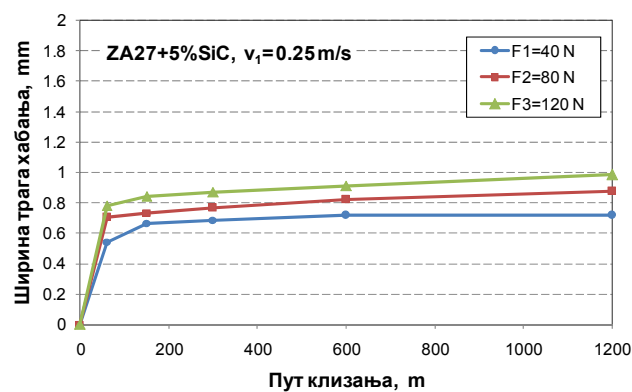
Слика П.114 Криве хабања – ZA27, $v_3 = 1\text{ m/s}$

Табела П.20 Ширина трага хабања – ZA27+5%SiC, са подмазивањем

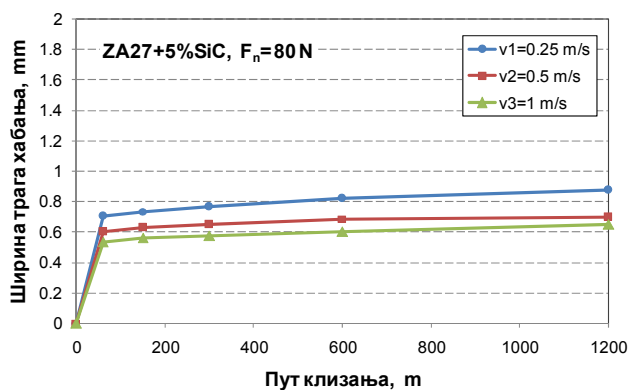
ZA 27+5%SiC		Ширина трага хабања, mm				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	0.541	0.664	0.685	0.715	0.717
	80	0.701	0.732	0.766	0.818	0.875
	120	0.779	0.842	0.871	0.912	0.982
0,5	40	0.475	0.545	0.567	0.598	0.635
	80	0.599	0.625	0.648	0.685	0.695
	120	0.715	0.755	0.789	0.833	0.919
1	40	0.437	0.489	0.503	0.532	0.602
	80	0.535	0.559	0.575	0.601	0.651
	120	0.654	0.704	0.735	0.791	0.882



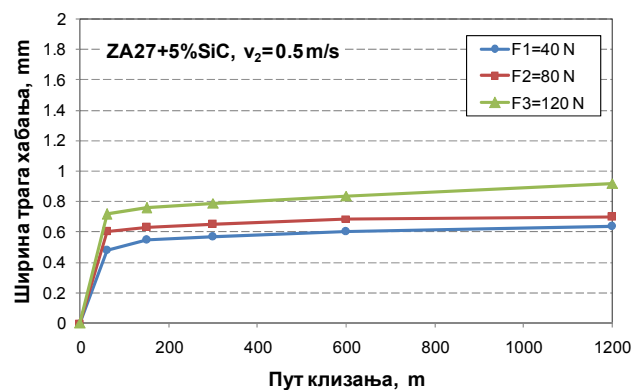
Слика П.115 Криве хабања – ZA27+5%SiC, $F_n = 40\text{ N}$



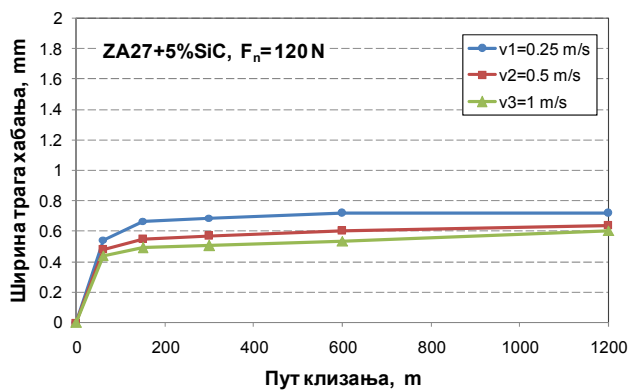
Слика П.116 Криве хабања – ZA27+5%SiC, $v_1 = 0.25\text{ m/s}$



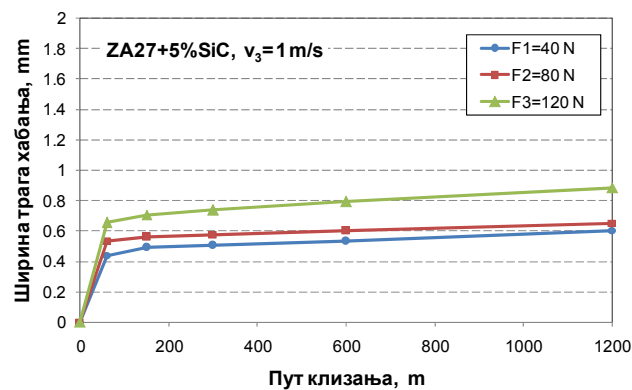
Слика П.117 Криве хабања – ZA27+5%SiC, $F_2 = 80\text{ N}$



Слика П.118 Криве хабања – ZA27+5%SiC, $V_2 = 0.5\text{ m/s}$



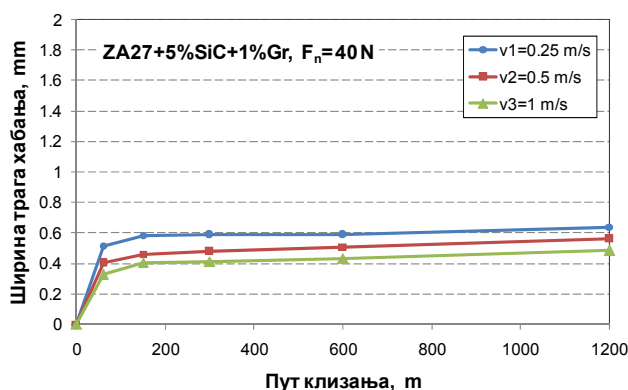
Слика П.119 Криве хабања – ZA27+5%SiC, $F_3 = 120\text{ N}$



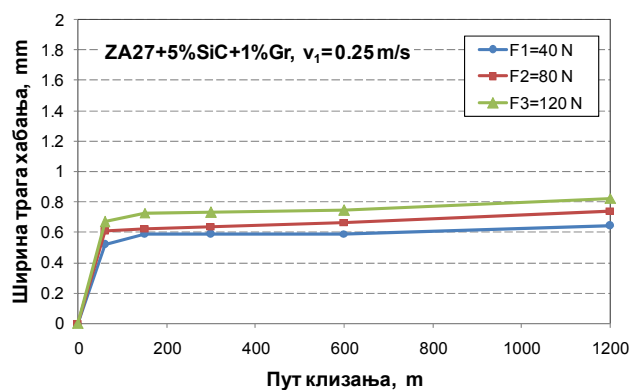
Слика П.120 Криве хабања – ZA27+5%SiC, $V_3 = 1\text{ m/s}$

Табела П.21 Ширина трага хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, са подмазивањем

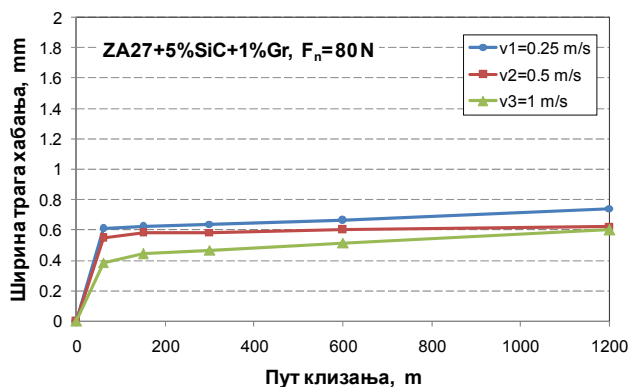
ZA 27+5%SiC+1%Gr		Ширина трага хабања, mm				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	0.515	0.584	0.585	0.588	0.639
	80	0.609	0.623	0.638	0.664	0.741
	120	0.666	0.724	0.729	0.743	0.822
0,5	40	0.401	0.461	0.476	0.508	0.561
	80	0.545	0.579	0.585	0.601	0.626
	120	0.592	0.634	0.661	0.698	0.746
1	40	0.326	0.402	0.411	0.432	0.483
	80	0.382	0.443	0.466	0.513	0.601
	120	0.541	0.612	0.635	0.671	0.714



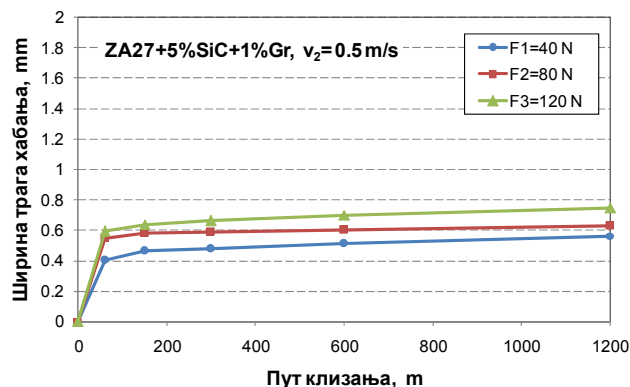
Слика П.121 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $F_1 = 40$ N



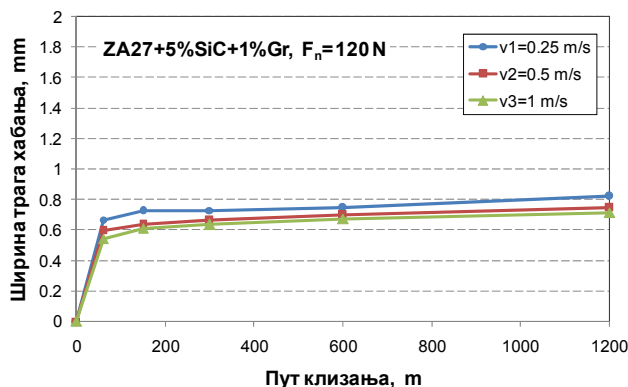
Слика П.122 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $v_1 = 0.25$ m/s



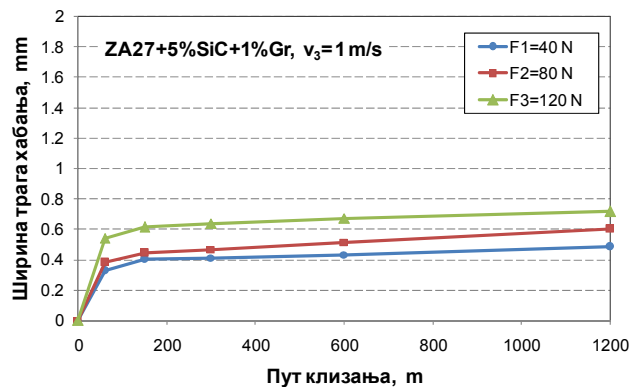
Слика П.123 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $F_2 = 80$ N



Слика П.124 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $v_2 = 0.5$ m/s



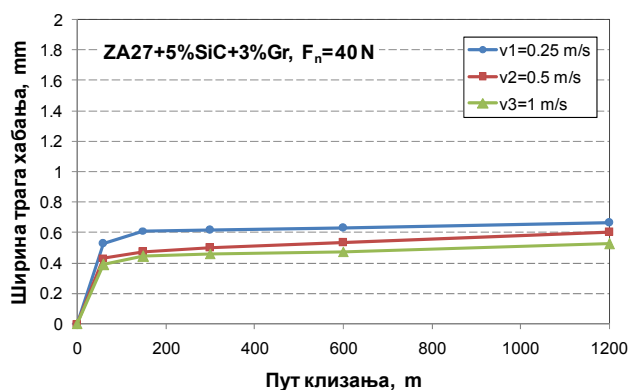
Слика П.125 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $F_3 = 120$ N



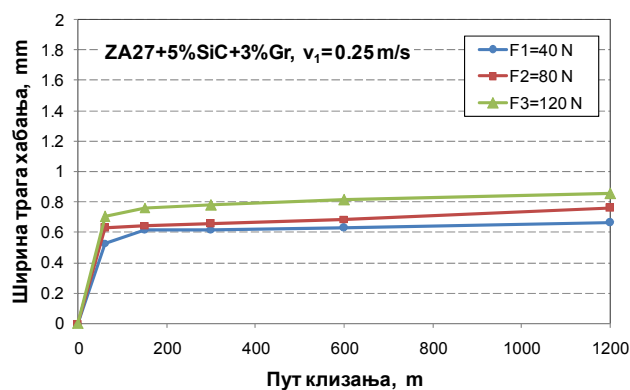
Слика П.126 Криве хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $v_3 = 1$ m/s

Табела П.22 Ширина трага хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, са подмазивањем

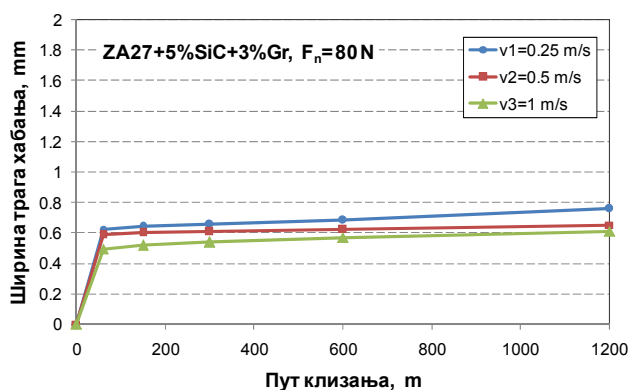
ZA 27+5%SiC+3%Gr		Ширина трага хабања, mm				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	0.527	0.611	0.617	0.628	0.661
	80	0.626	0.644	0.656	0.685	0.759
	120	0.702	0.759	0.776	0.811	0.852
0,5	40	0.433	0.471	0.497	0.531	0.602
	80	0.588	0.601	0.609	0.621	0.653
	120	0.68	0.712	0.725	0.756	0.824
1	40	0.388	0.443	0.458	0.473	0.525
	80	0.495	0.517	0.538	0.569	0.611
	120	0.601	0.663	0.677	0.711	0.767



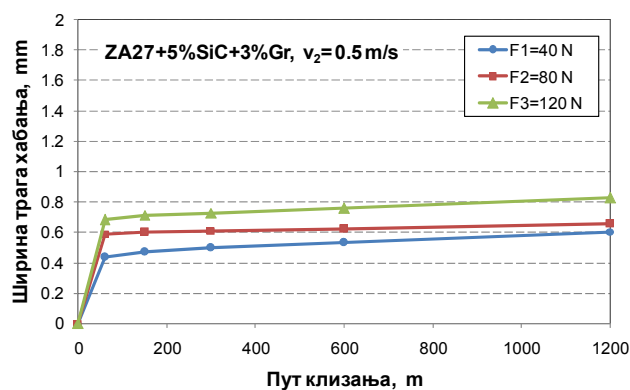
Слика П.127 Криве хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, $F_1 = 40\text{ N}$



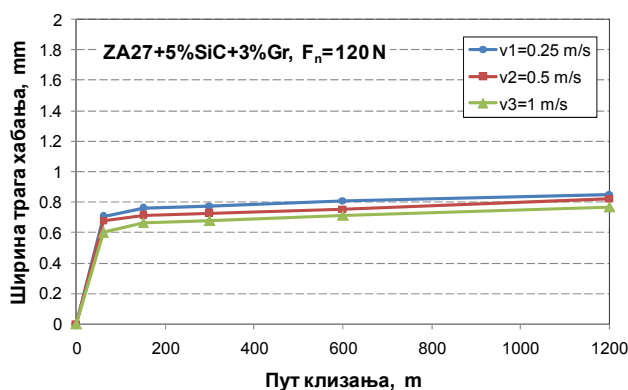
Слика П.128 Криве хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, $v_1 = 0.25\text{ m/s}$



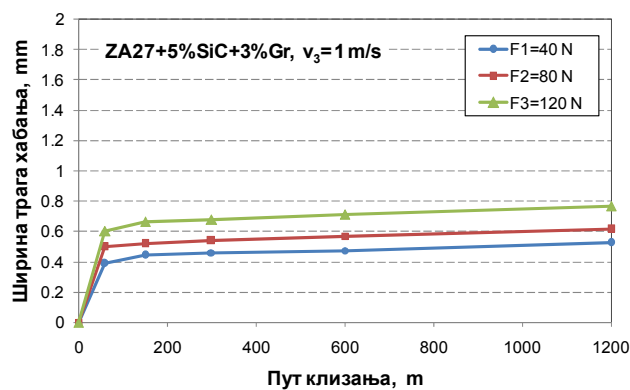
Слика П.129 Криве хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, $F_2 = 80\text{ N}$



Слика П.130 Криве хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, $v_2 = 0.5\text{ m/s}$



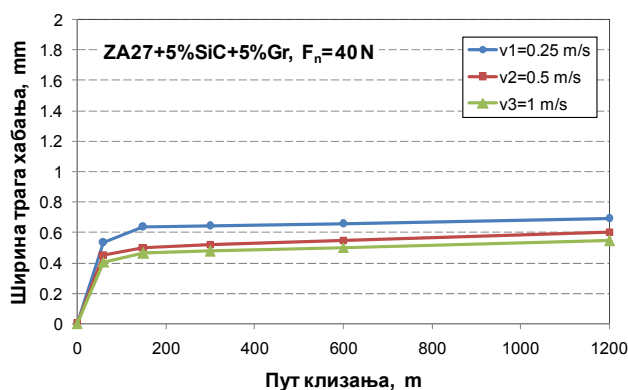
Слика П.131 Криве хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, $F_3 = 120\text{ N}$



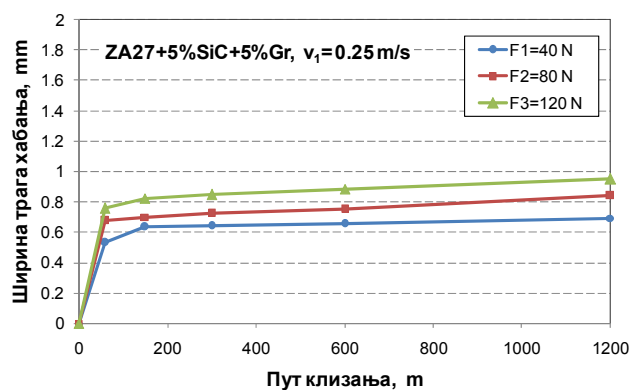
Слика П.132 Криве хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, $v_3 = 1\text{ m/s}$

Табела П.23 Ширина трага хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, са подмазивањем

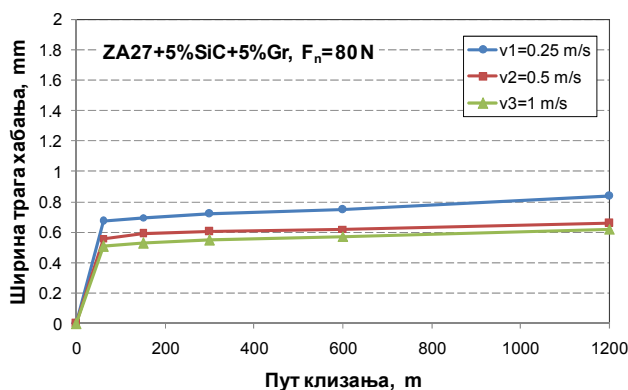
ZA 27+5%SiC+5%Gr		Ширина трага хабања, mm				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	0.532	0.634	0.642	0.656	0.691
	80	0.674	0.698	0.723	0.751	0.838
	120	0.756	0.821	0.844	0.883	0.948
0,5	40	0.455	0.502	0.522	0.551	0.604
	80	0.561	0.589	0.605	0.621	0.661
	120	0.701	0.721	0.756	0.802	0.868
1	40	0.403	0.463	0.478	0.502	0.546
	80	0.508	0.529	0.548	0.571	0.621
	120	0.631	0.668	0.695	0.731	0.842



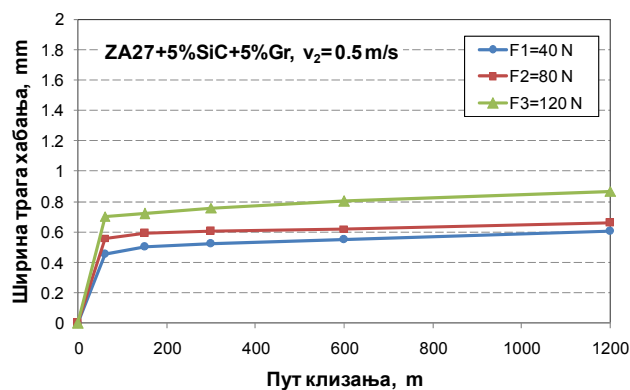
Слика П.133 Криве хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $F_1 = 40\text{ N}$



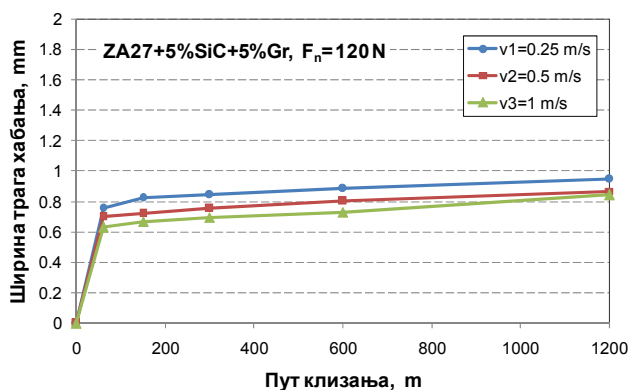
Слика П.134 Криве хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $v_1 = 0.25\text{ m/s}$



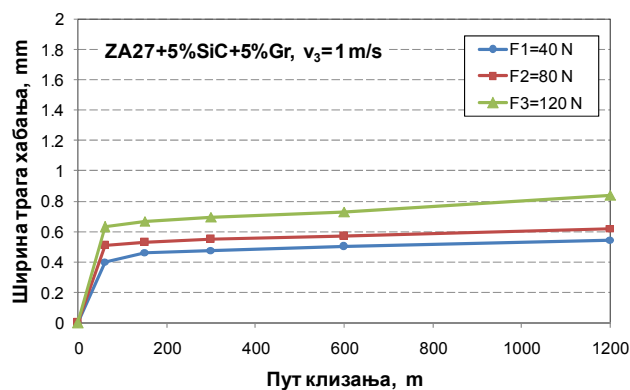
Слика П.135 Криве хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $F_2 = 80\text{ N}$



Слика П.136 Криве хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $v_2 = 0.5\text{ m/s}$



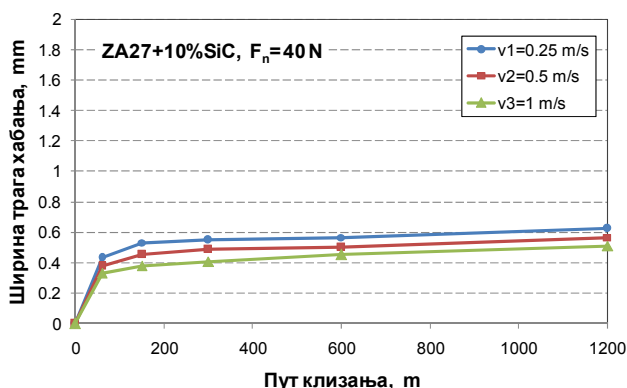
Слика П.137 Криве хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $F_3 = 120\text{ N}$



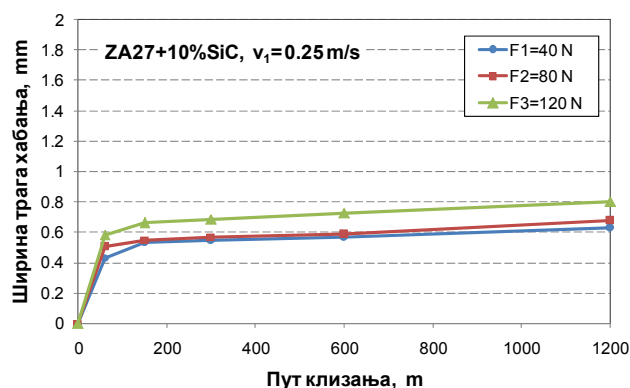
Слика П.138 Криве хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $v_3 = 1\text{ m/s}$

Табела П.24 Ширина трага хабања – ZA27+10%SiC, са подмазивањем

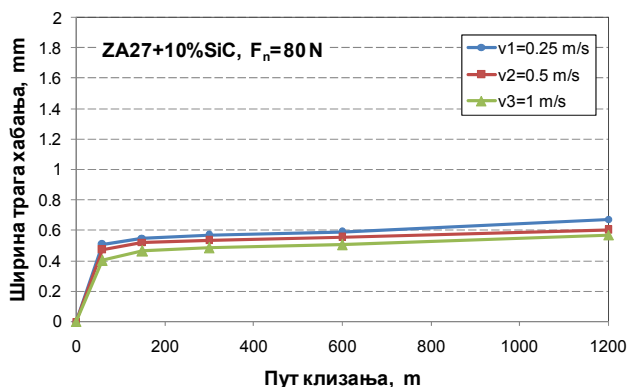
ZA 27+10%SiC		Ширина трага хабања, mm				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	0.431	0.533	0.548	0.567	0.626
	80	0.503	0.549	0.568	0.586	0.673
	120	0.579	0.659	0.682	0.723	0.802
0,5	40	0.379	0.455	0.486	0.503	0.567
	80	0.468	0.521	0.532	0.551	0.602
	120	0.502	0.589	0.605	0.641	0.715
1	40	0.332	0.379	0.408	0.451	0.509
	80	0.401	0.461	0.482	0.502	0.566
	120	0.429	0.499	0.529	0.579	0.671



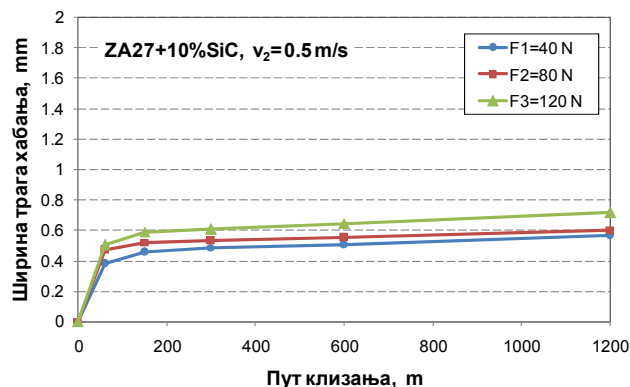
Слика П.139 Криве хабања – ZA27+10%SiC, F₁ = 40 N



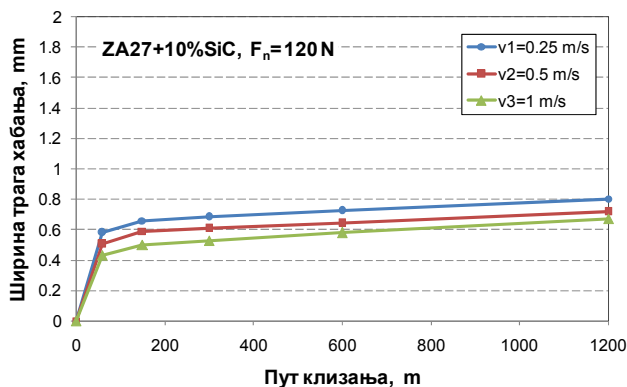
Слика П.140 Криве хабања – ZA27+10%SiC, v₁ = 0.25 m/s



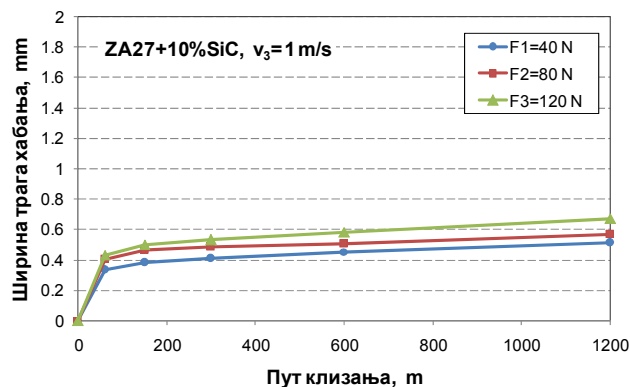
Слика П.141 Криве хабања – ZA27+10%SiC, F₂ = 80 N



Слика П.142 Криве хабања – ZA27+10%SiC, v₂ = 0.5 m/s



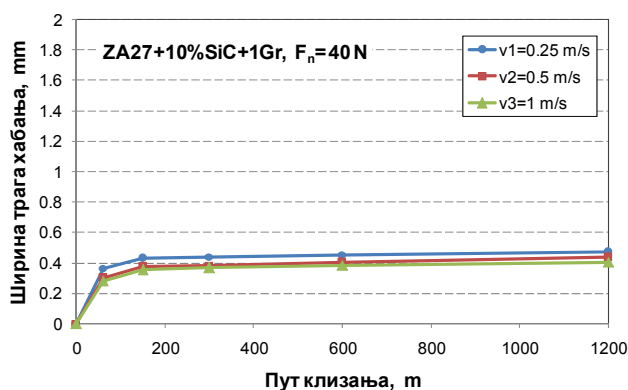
Слика П.143 Криве хабања – ZA27+10%SiC, F₃ = 120 N



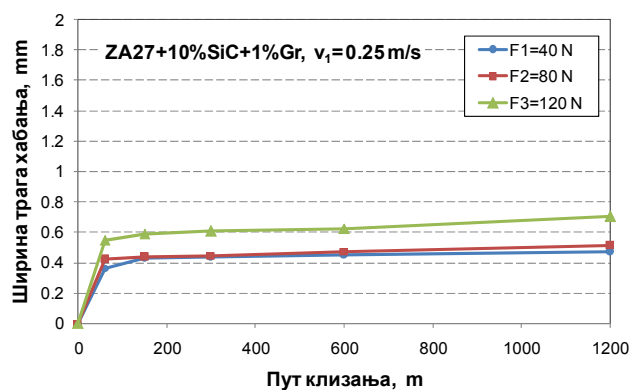
Слика П.144 Криве хабања – ZA27+10%SiC, v₃ = 1 m/s

Табела П.25 Ширина трага хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, са подмазивањем

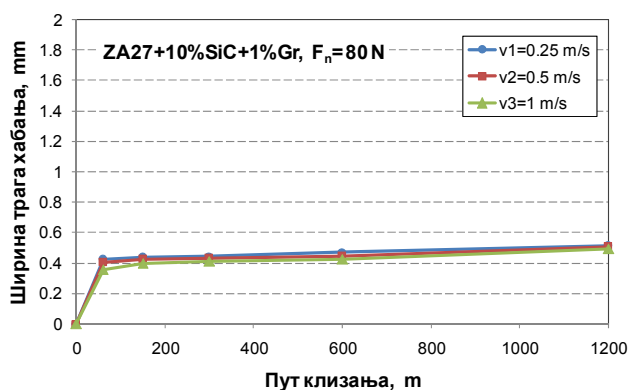
ZA 27+10%SiC+1%Gr		Ширина трага хабања, mm				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	0.363	0.428	0.437	0.452	0.471
	80	0.421	0.435	0.445	0.473	0.511
	120	0.548	0.589	0.605	0.621	0.701
0,5	40	0.297	0.372	0.384	0.402	0.433
	80	0.402	0.419	0.429	0.441	0.502
	120	0.375	0.487	0.511	0.539	0.638
1	40	0.281	0.351	0.365	0.381	0.402
	80	0.356	0.394	0.408	0.421	0.491
	120	0.378	0.451	0.468	0.492	0.566



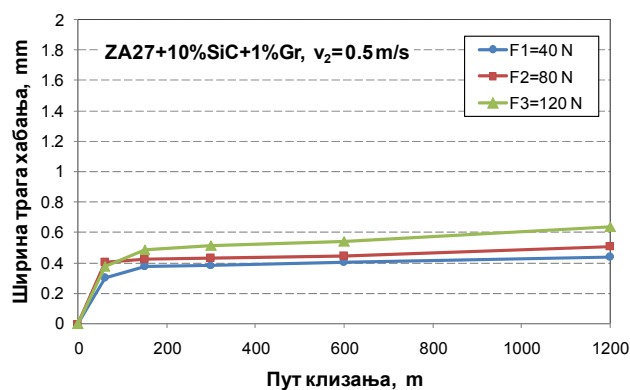
Слика П.145 Криве хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, $F_1 = 40\text{ N}$



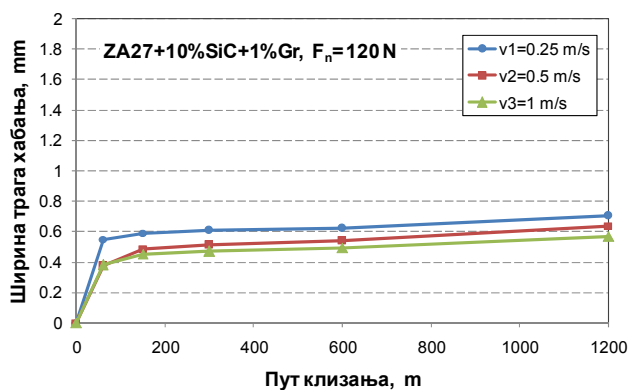
Слика П.146 Криве хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, $v_1 = 0.25\text{ m/s}$



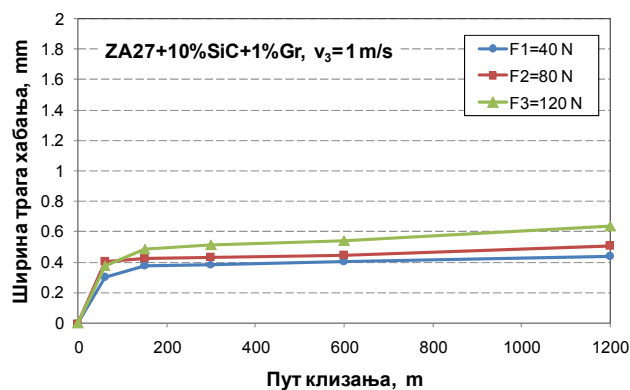
Слика П.147 Криве хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, $F_2 = 80\text{ N}$



Слика П.148 Криве хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, $v_2 = 0.5\text{ m/s}$



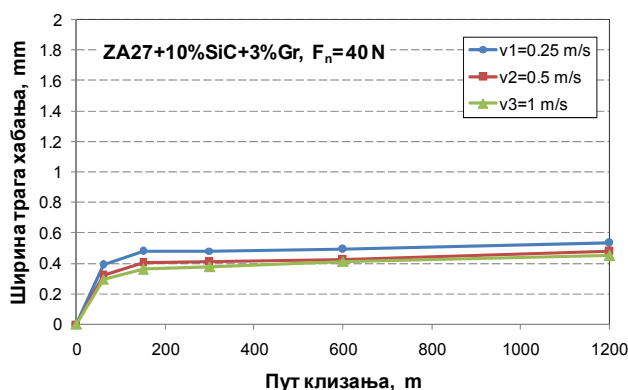
Слика П.149 Криве хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, $F_3 = 120\text{ N}$



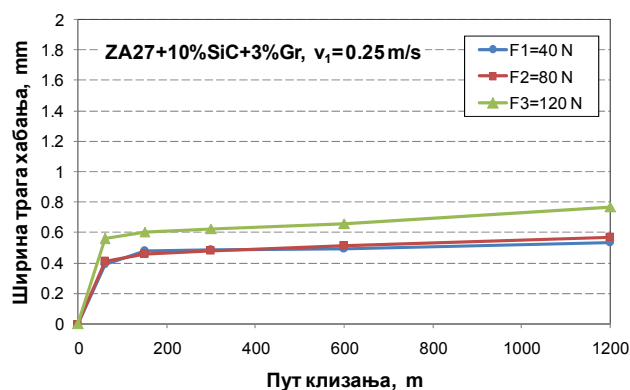
Слика П.150 Криве хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, $v_3 = 1\text{ m/s}$

Табела П.26 Ширина трага хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, са подмазивањем

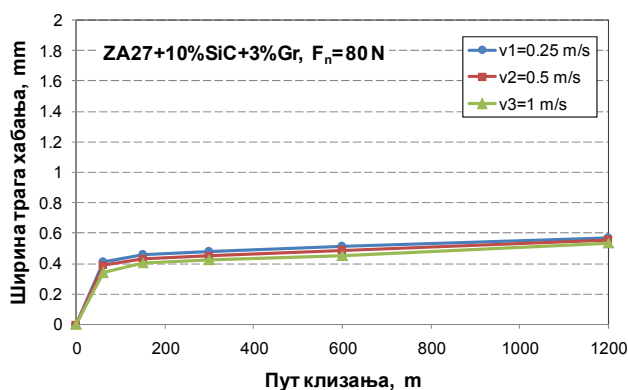
ZA 27+10%SiC+3%Gr		Ширина трага хабања, mm				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	0.388	0.477	0.482	0.493	0.533
	80	0.406	0.457	0.478	0.511	0.565
	120	0.557	0.603	0.623	0.655	0.766
0,5	40	0.319	0.402	0.411	0.424	0.477
	80	0.389	0.431	0.452	0.481	0.551
	120	0.456	0.519	0.539	0.579	0.661
1	40	0.295	0.359	0.379	0.411	0.449
	80	0.337	0.402	0.425	0.451	0.531
	120	0.402	0.467	0.489	0.531	0.584



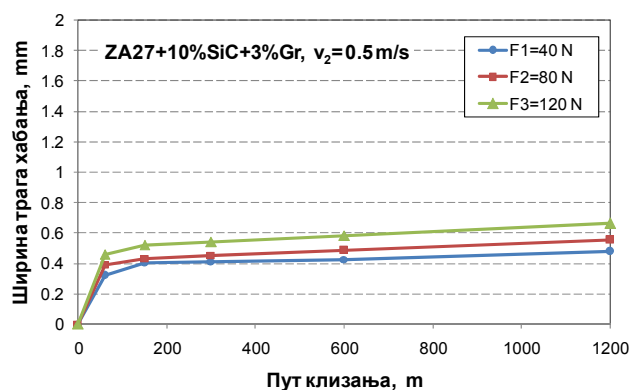
Слика П.151 Криве хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $F_1 = 40\text{ N}$



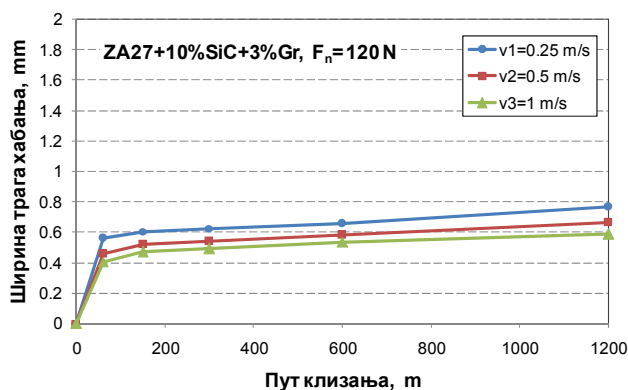
Слика П.152 Криве хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $v_1 = 0.25\text{ m/s}$



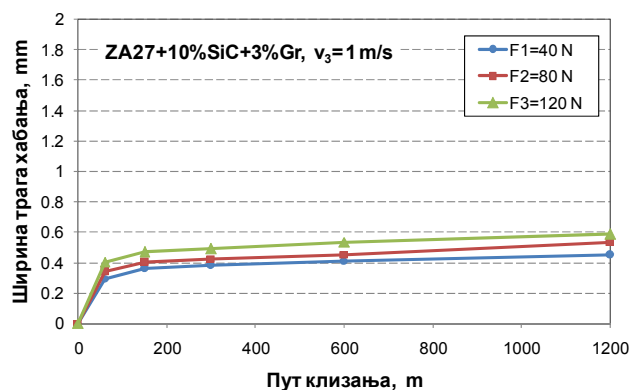
Слика П.153 Криве хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $F_2 = 80\text{ N}$



Слика П.154 Криве хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $v_2 = 0.5\text{ m/s}$



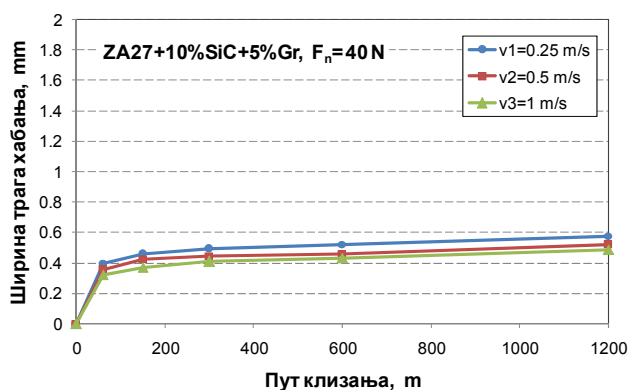
Слика П.155 Криве хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $F_3 = 120\text{ N}$



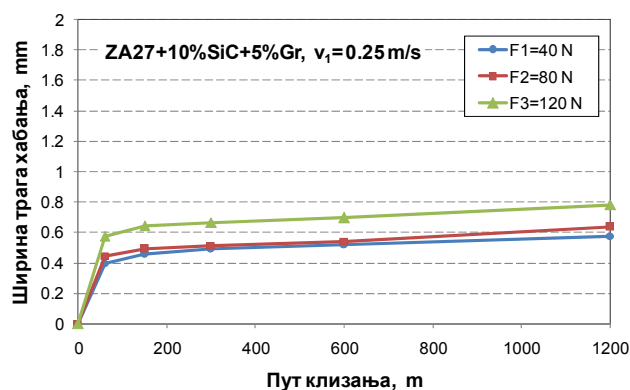
Слика П.156 Криве хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $v_3 = 1\text{ m/s}$

Табела П.27 Ширина трага хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, са подмазивањем

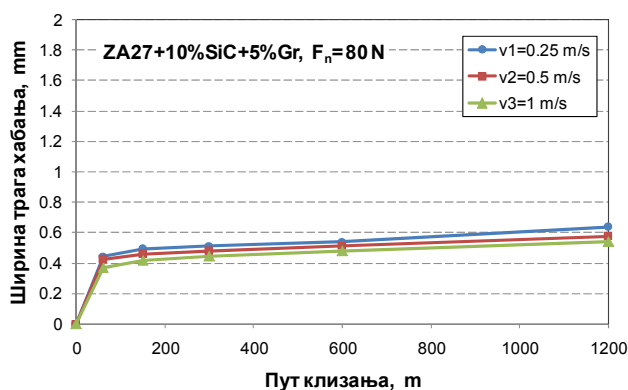
ZA 27+10%SiC+5%Gr		Ширина трага хабања, mm				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	0.397	0.457	0.488	0.521	0.576
	80	0.445	0.491	0.514	0.542	0.632
	120	0.573	0.641	0.665	0.694	0.781
0,5	40	0.352	0.425	0.446	0.458	0.518
	80	0.421	0.456	0.477	0.513	0.571
	120	0.463	0.545	0.587	0.621	0.686
1	40	0.321	0.367	0.405	0.429	0.487
	80	0.368	0.415	0.444	0.477	0.538
	120	0.387	0.481	0.521	0.561	0.652



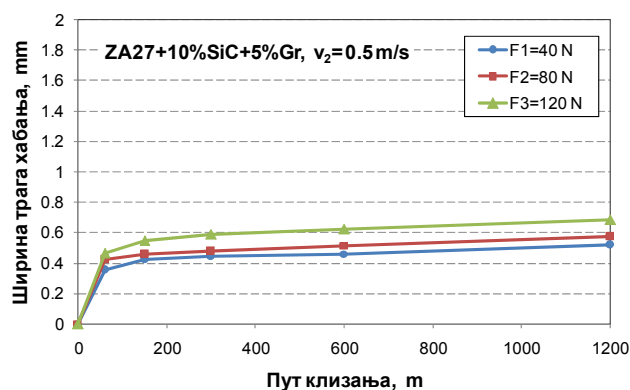
Слика П.157 Криве хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, $F_1 = 40$ N



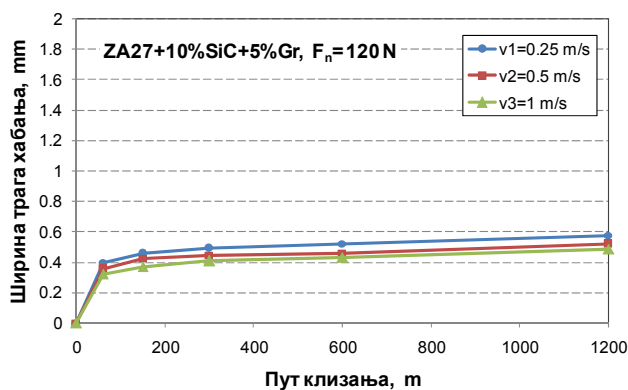
Слика П.158 Криве хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, $v_1 = 0.25$ m/s



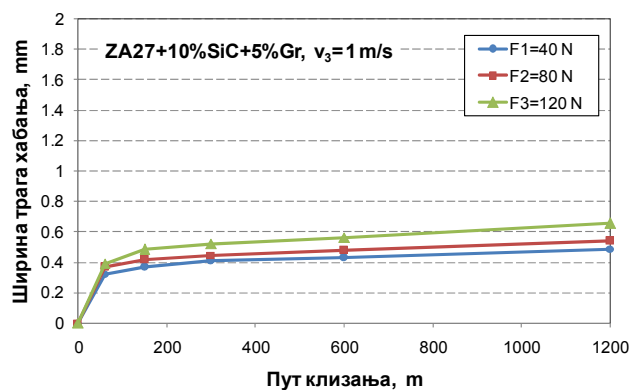
Слика П.159 Криве хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, $F_2 = 80$ N



Слика П.160 Криве хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, $v_2 = 0.5$ m/s



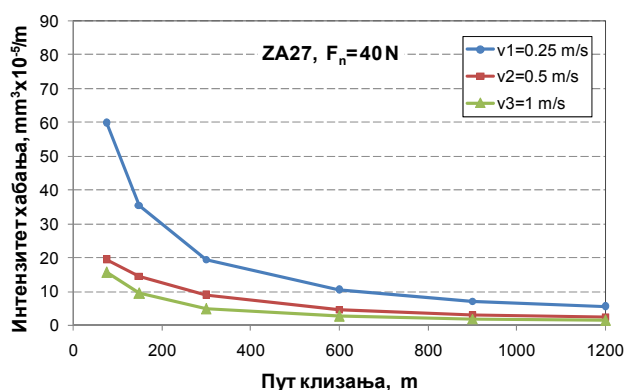
Слика П.161 Криве хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, $F_3 = 120$ N



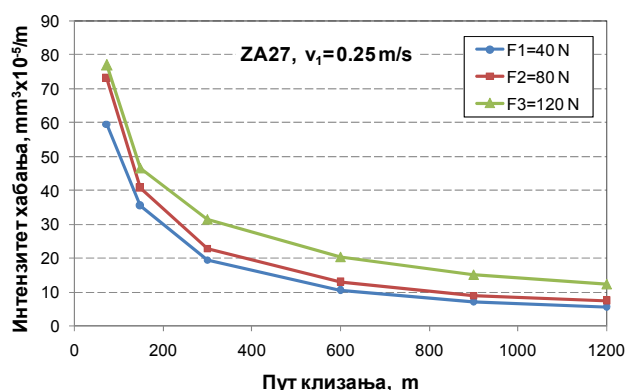
Слика П.162 Криве хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, $v_3 = 1$ m/s

Табела П.28 Интензитет хабања – ZA27, са подмазивањем

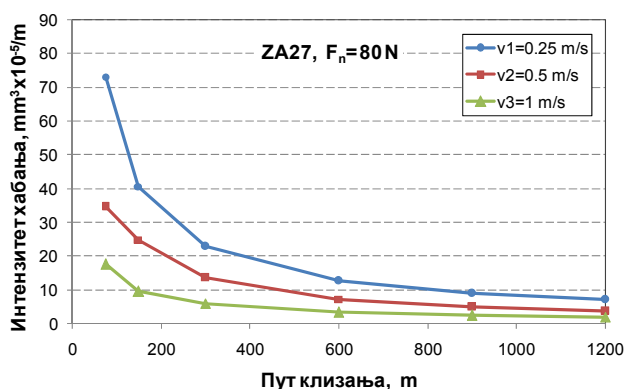
ZA 27		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-5} / \text{m}$					
v, m/s	F, N	Пут клизања, m					
		75	150	300	600	900	1200
0,25	40	59.661	38.508	19.527	10.418	7.106	8.391
	80	73.096	40.631	22.907	12.801	9.075	7.243
	120	77.015	46.634	31.482	20.343	18.245	12.472
0,5	40	19.235	14.512	8.849	4.616	3.077	2.471
	80	34.647	24.929	13.617	7.325	8.023	3.854
	120	38.392	32.023	18.231	10.252	7.302	6.117
1	40	18.609	9.439	4.773	2.569	1.783	1.386
	80	17.561	9.582	3.408	3.408	2.419	1.941
	120	19.379	13.677	9.857	8.315	3.999	3.193



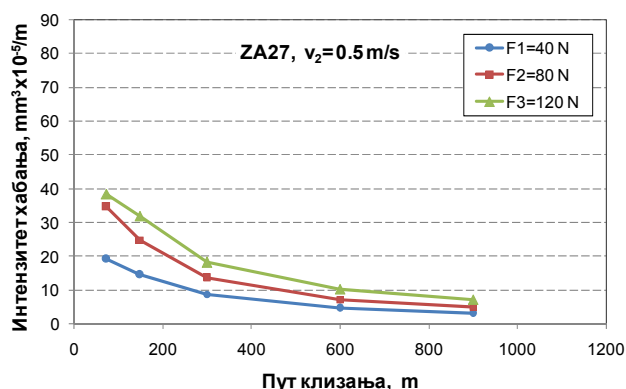
Слика П.163 Интензитет хабања – ZA27, $F_1 = 40 \text{ N}$



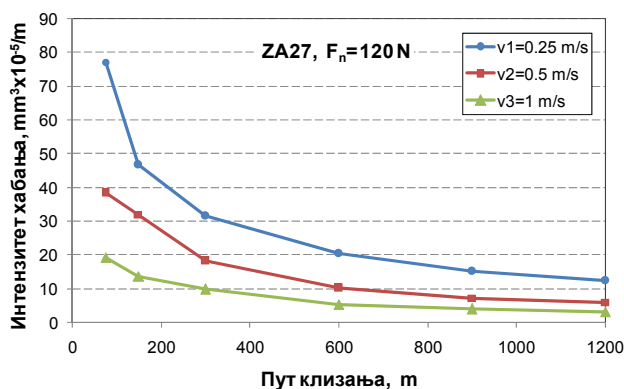
Слика П.164 Интензитет хабања – ZA27, $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$



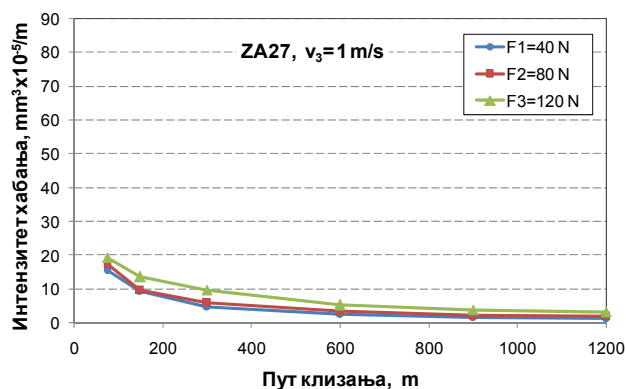
Слика П.165 Интензитет хабања – ZA27, $F_2 = 80 \text{ N}$



Слика П.166 Интензитет хабања – ZA27, $v_2 = 0.5 \text{ m/s}$



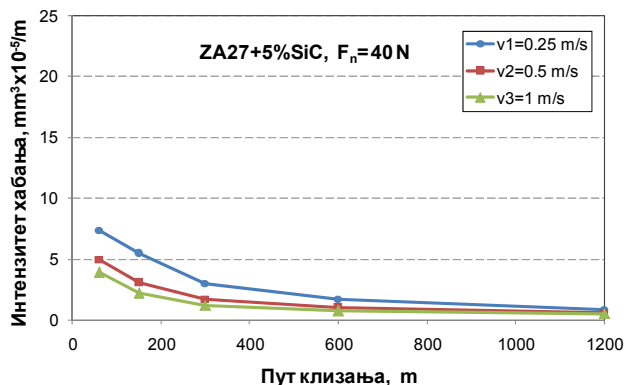
Слика П.167 Интензитет хабања – ZA27, $F_3 = 120 \text{ N}$



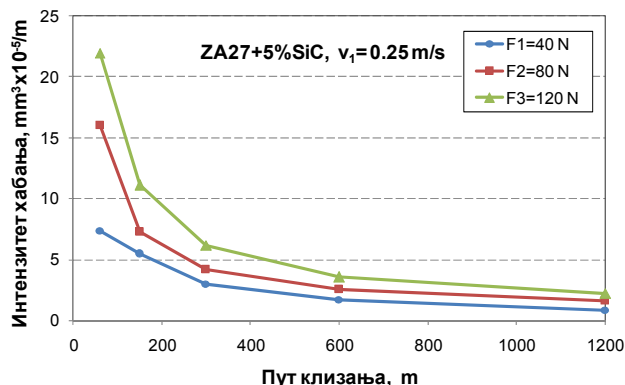
Слика П.168 Интензитет хабања – ZA27, $v_3 = 1 \text{ m/s}$

Табела П.29 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, са подмазивањем

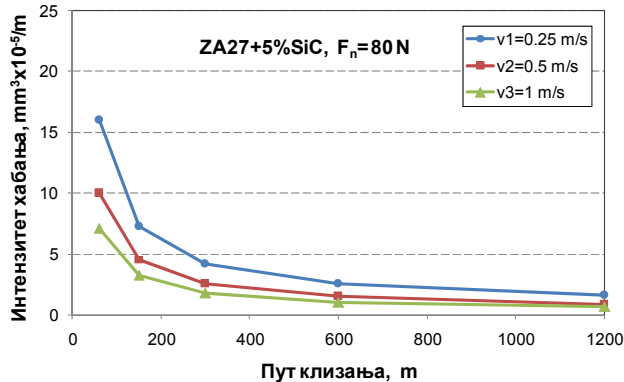
ZA 27+5%SiC		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-5} / \text{m}$				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	7.352	8.437	2.984	1.697	0.855
	80	18.995	7.255	4.174	2.541	1.555
	120	21.951	11.088	6.136	3.522	2.198
0,5	40	4.976	3.006	1.692	0.993	0.594
	80	9.979	4.534	2.526	1.492	0.779
	120	16.972	7.993	4.561	2.684	1.802
1	40	3.874	2.171	1.181	0.699	0.506
	80	7.111	3.244	1.765	1.007	0.641
	120	12.988	6.481	3.687	2.298	1.593



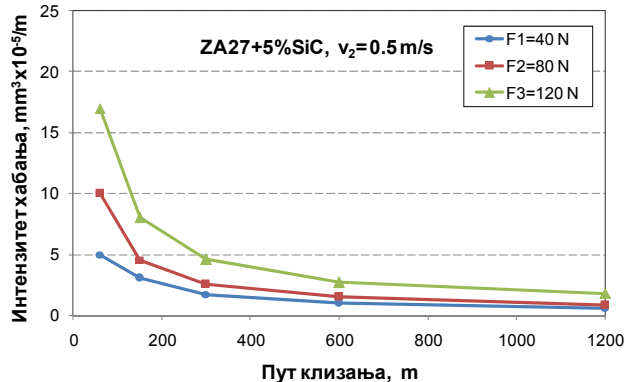
Слика П.169 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $F_1 = 40 \text{ N}$



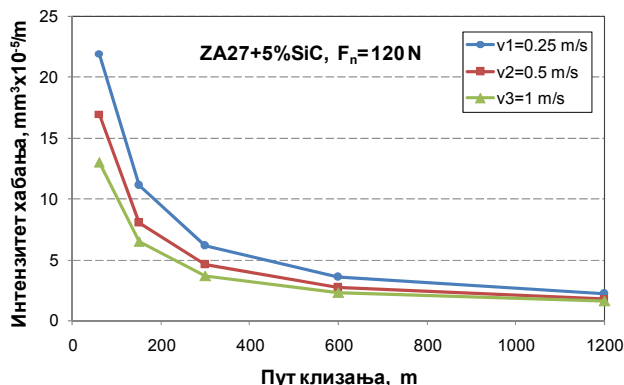
Слика П.170 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$



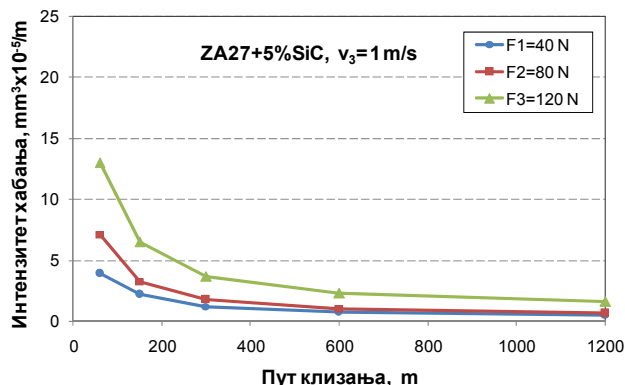
Слика П.171 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $F_2 = 80 \text{ N}$



Слика П.172 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $V_2 = 0.5 \text{ m/s}$



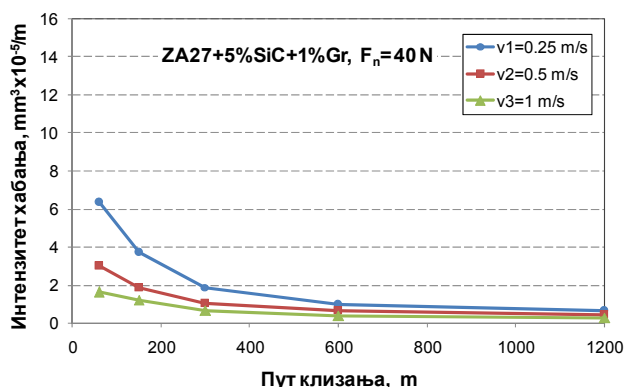
Слика П.173 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $F_3 = 120 \text{ N}$



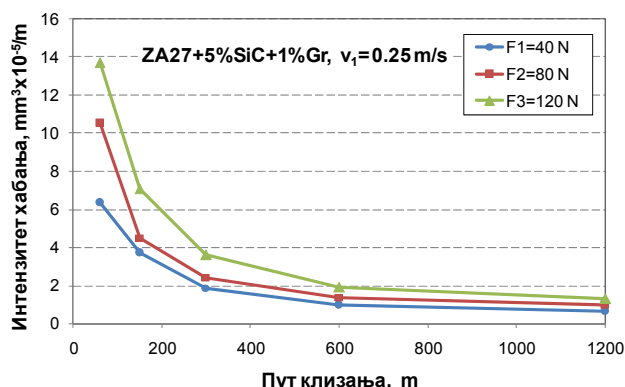
Слика П.174 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC, $V_3 = 1 \text{ m/s}$

Табела П.30 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, са подмазивањем

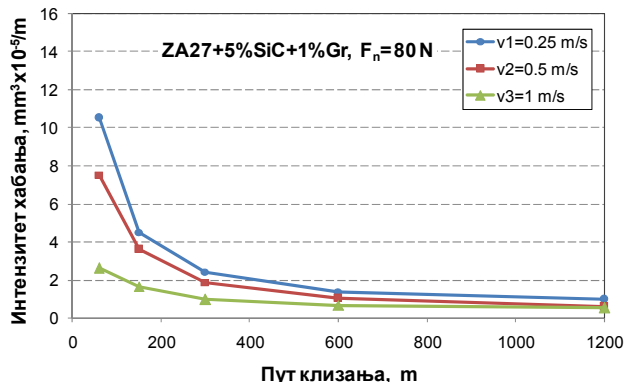
ZA 27+5%SiC+1%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-5} / \text{m}$				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	6.342	3.699	1.859	0.943	0.606
	80	10.487	4.491	2.411	1.359	0.945
	120	13.707	7.049	3.597	1.905	1.291
0,5	40	2.993	1.819	1.001	0.608	0.411
	80	7.516	3.605	1.859	1.007	0.571
	120	9.633	4.733	2.682	1.579	0.964
1	40	1.609	1.207	0.644	0.374	0.262
	80	2.588	1.615	0.939	0.627	0.504
	120	7.352	4.257	2.377	1.403	0.845



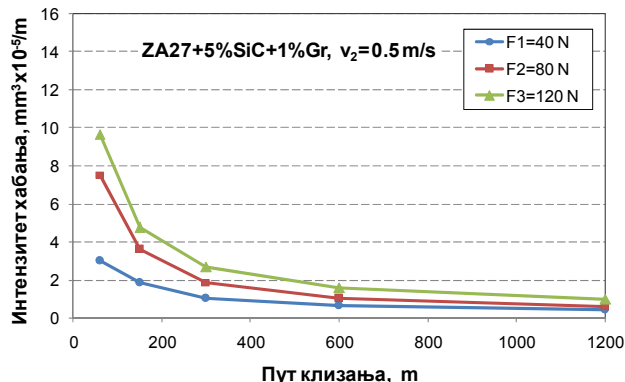
Слика П.175 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $F_1 = 40 \text{ N}$



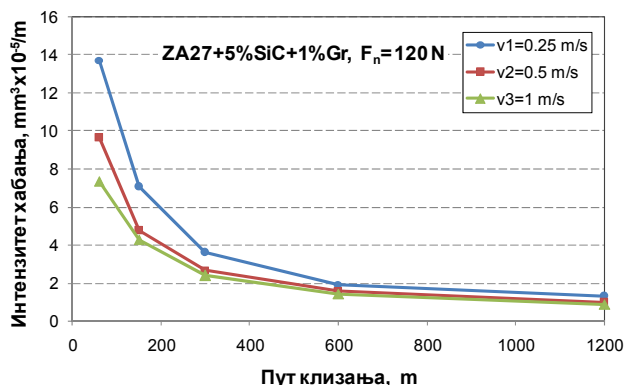
Слика П.176 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$



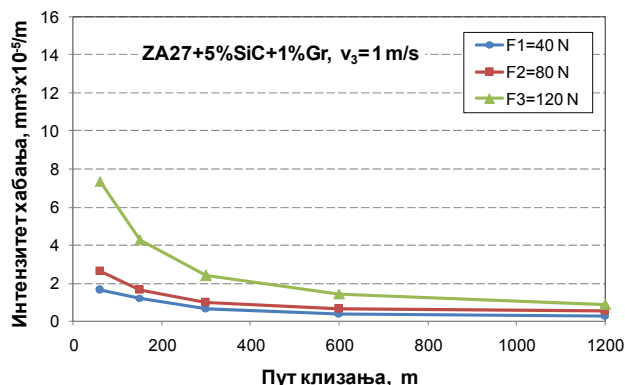
Слика П.177 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $F_2 = 80 \text{ N}$



Слика П.178 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $v_2 = 0.5 \text{ m/s}$



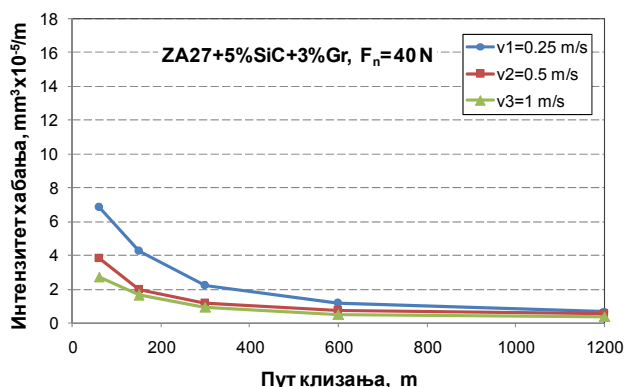
Слика П.179 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $F_3 = 120 \text{ N}$



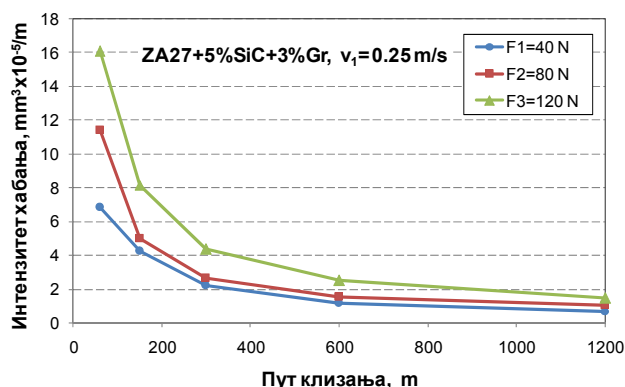
Слика П.180 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+1%Gr, $v_3 = 1 \text{ m/s}$

Табела П.31 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, са подмазивањем

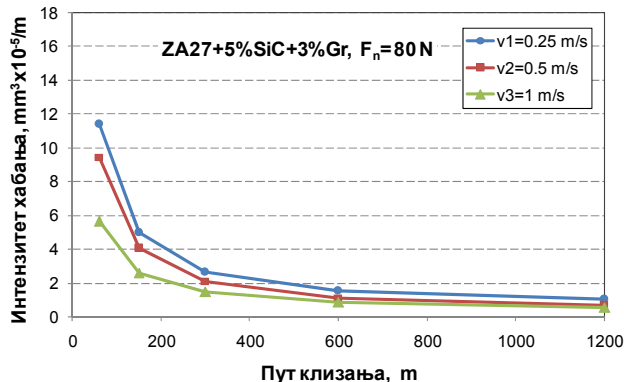
ZA 27+5%SiC+3%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-5} / \text{m}$				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	6.795	4.236	2.181	1.151	0.671
	80	11.391	4.961	2.621	1.492	1.015
	120	16.064	8.121	4.339	2.477	1.436
0,5	40	3.769	1.941	1.141	0.695	0.507
	80	9.441	4.032	2.097	1.112	0.646
	120	14.599	6.704	3.539	2.006	1.299
1	40	2.712	1.615	0.892	0.491	0.336
	80	8.632	2.567	1.446	0.855	0.529
	120	10.081	8.413	2.881	1.669	1.048



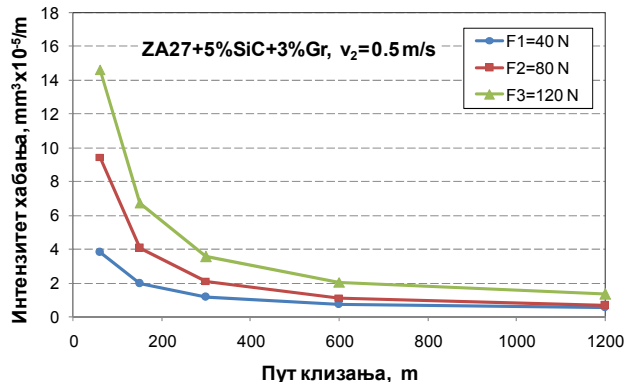
Слика П.181 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, $F_1 = 40 \text{ N}$



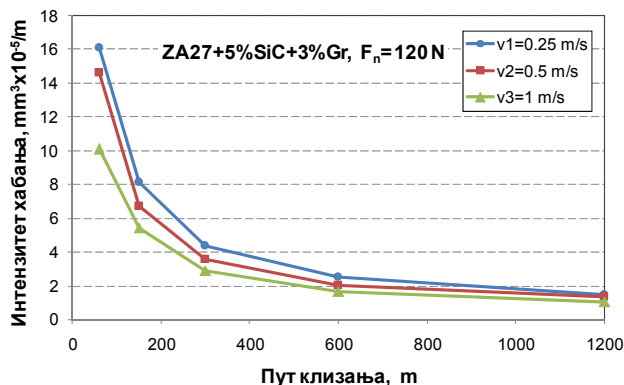
Слика П.182 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$



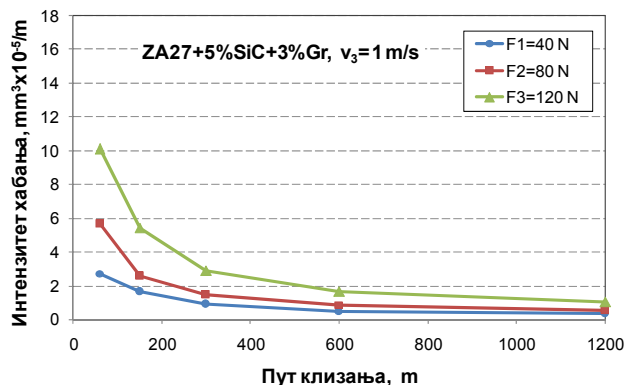
Слика П.183 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, $F_2 = 80 \text{ N}$



Слика П.184 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, $v_2 = 0.5 \text{ m/s}$



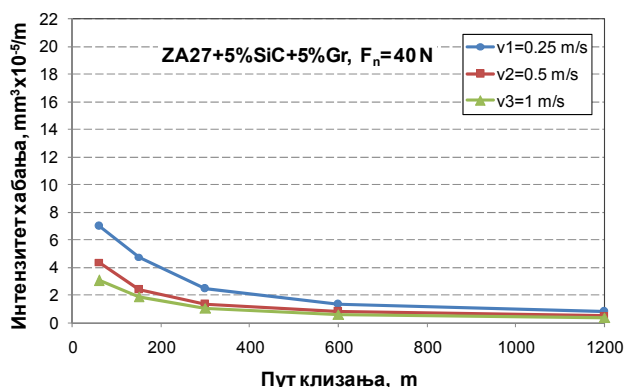
Слика П.185 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, $F_3 = 120 \text{ N}$



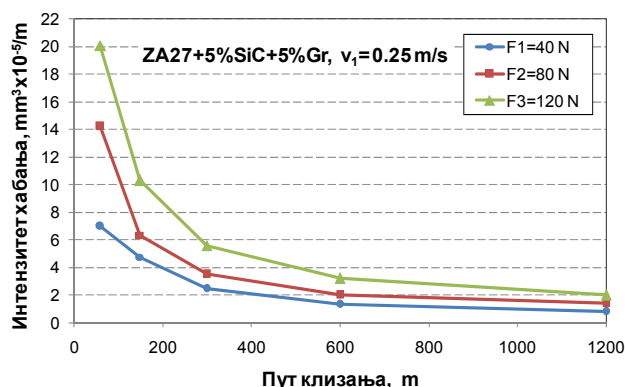
Слика П.186 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+3%Gr, $v_3 = 1 \text{ m/s}$

Табела П.32 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, са подмазивањем

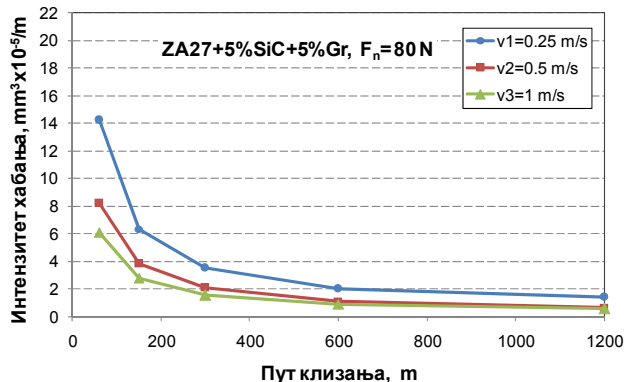
ZA 27+5%SiC+5%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-5} / \text{m}$				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	6.991	4.733	2.457	1.311	0.766
	80	14.217	6.316	3.509	1.967	1.366
	120	20.064	10.279	8.583	3.197	1.978
0,5	40	4.374	2.349	1.321	0.777	0.512
	80	8.198	3.795	2.056	1.112	0.671
	120	18.995	6.962	4.012	2.395	1.518
1	40	3.039	1.844	1.014	0.587	0.378
	80	6.087	2.749	1.528	0.864	0.556
	120	11.666	8.536	3.117	1.814	1.386



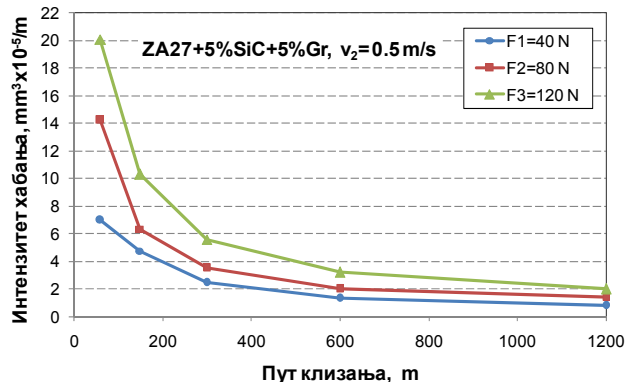
Слика П.187 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $F_1 = 40 \text{ N}$



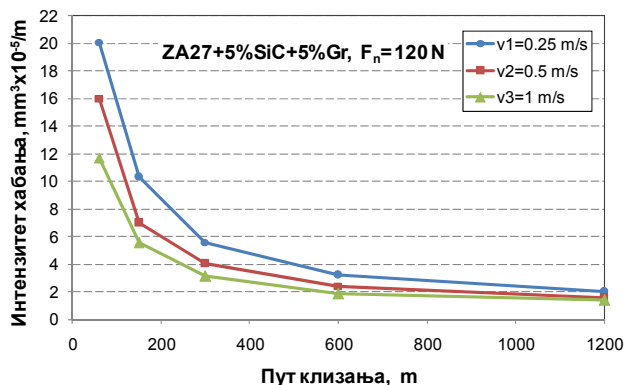
Слика П.188 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$



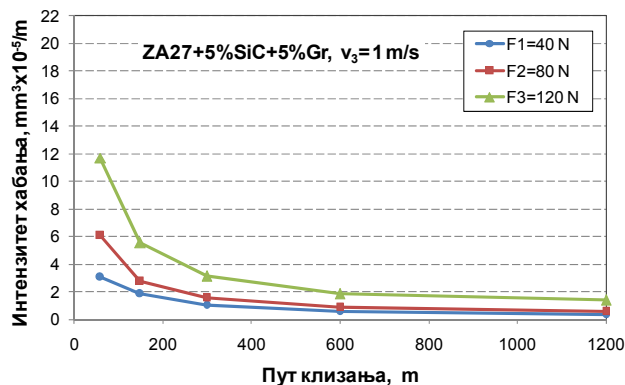
Слика П.189 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $F_2 = 80 \text{ N}$



Слика П.190 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $v_2 = 0.5 \text{ m/s}$



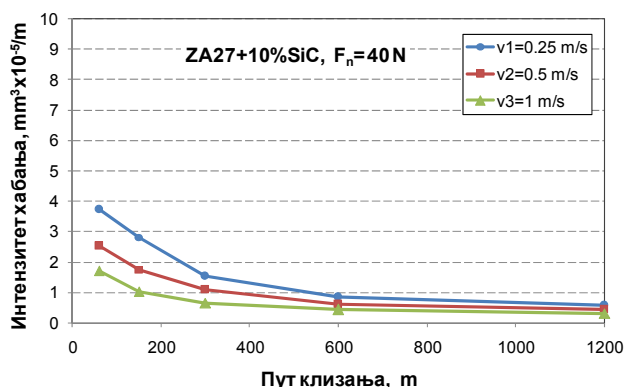
Слика П.191 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $F_3 = 120 \text{ N}$



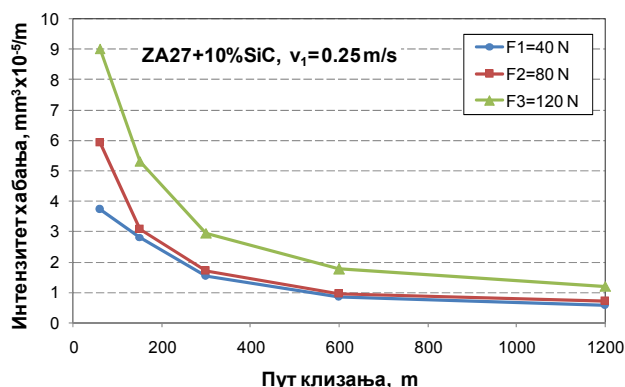
Слика П.192 Интензитет хабања – ZA27+5%SiC+5%Gr, $v_3 = 1 \text{ m/s}$

Табела П.33 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC, са подмазивањем

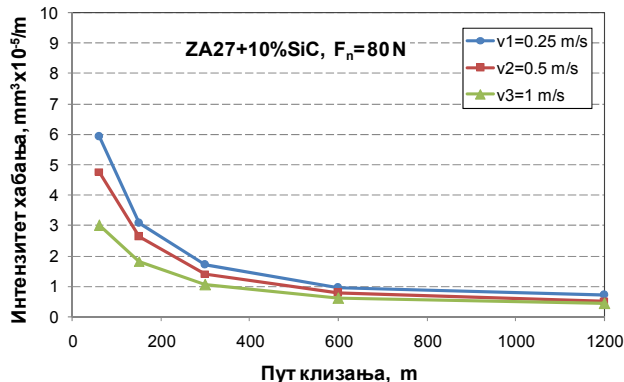
ZA 27+10%SiC		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-5} / \text{m}$				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	3.717	2.812	1.528	0.846	0.569
	80	8.909	3.073	1.701	0.934	0.708
	120	9.012	8.315	2.945	1.754	1.198
0,5	40	2.527	1.749	1.065	0.591	0.423
	80	4.759	2.627	1.398	0.777	0.506
	120	8.873	3.795	2.056	1.222	0.848
1	40	1.699	1.011	0.630	0.424	0.306
	80	2.994	1.812	1.039	0.587	0.421
	120	3.666	2.307	1.374	0.901	0.701



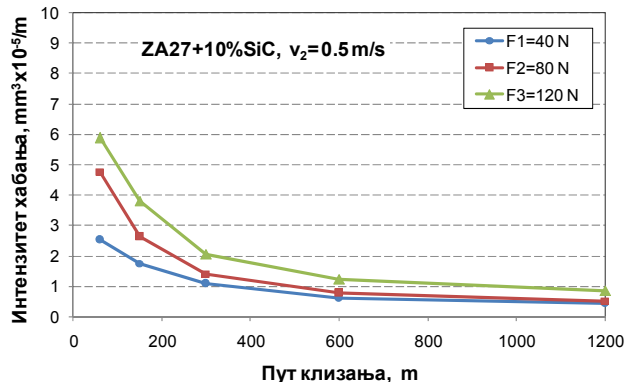
Слика П.193 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC, $F_1 = 40 \text{ N}$



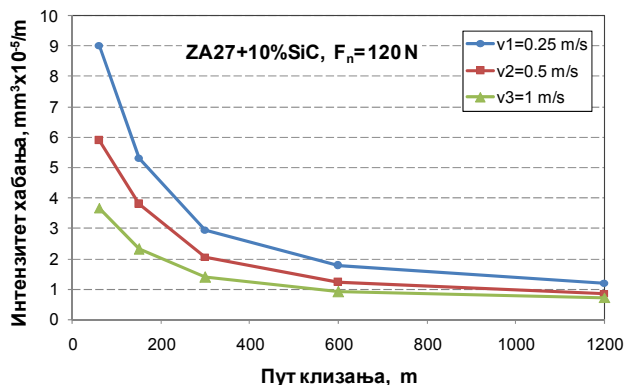
Слика П.194 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC, $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$



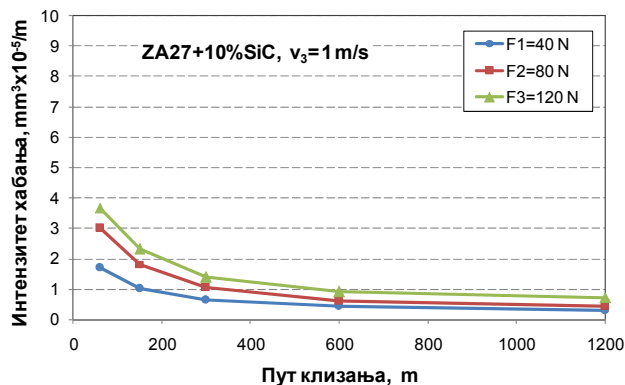
Слика П.195 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC, $F_2 = 80 \text{ N}$



Слика П.196 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC, $v_2 = 0.5 \text{ m/s}$



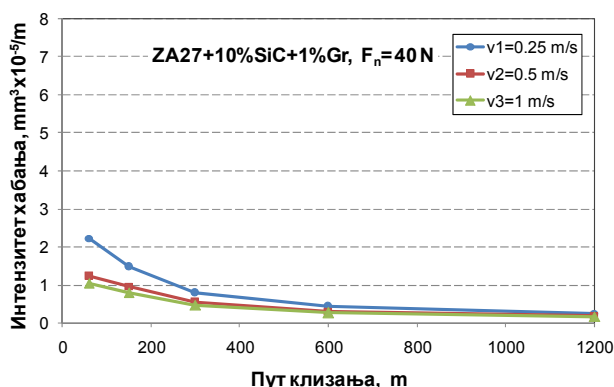
Слика П.197 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC, $F_3 = 120 \text{ N}$



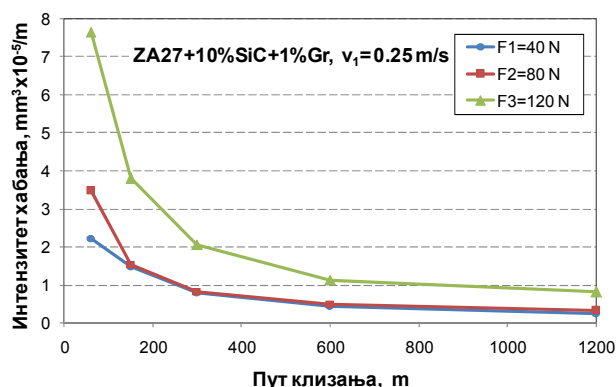
Слика П.198 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC, $v_3 = 1 \text{ m/s}$

Табела П.34 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, са подмазивањем

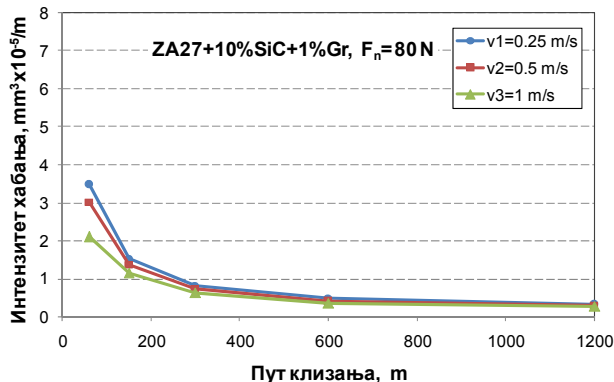
ZA 27+10%SiC+1%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-5} / \text{m}$				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	2.222	1.456	0.774	0.429	0.243
	80	3.465	1.529	0.818	0.491	0.311
	120	7.641	3.795	2.056	1.111	0.799
0,5	40	1.216	0.956	0.525	0.301	0.188
	80	3.016	1.366	0.733	0.398	0.294
	120	3.448	2.145	1.239	0.727	0.602
1	40	1.031	0.796	0.451	0.254	0.151
	80	2.094	1.136	0.630	0.346	0.275
	120	2.508	1.704	0.951	0.553	0.421



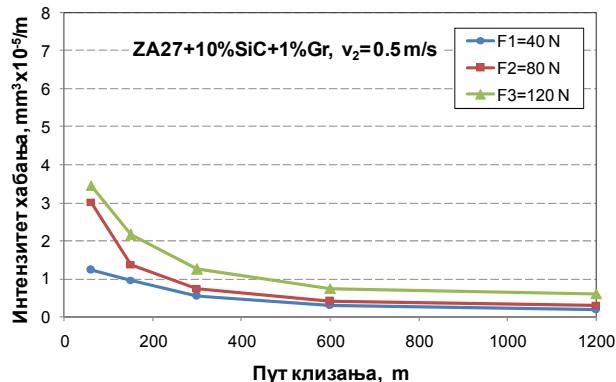
Слика П.199 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, $F_1 = 40 \text{ N}$



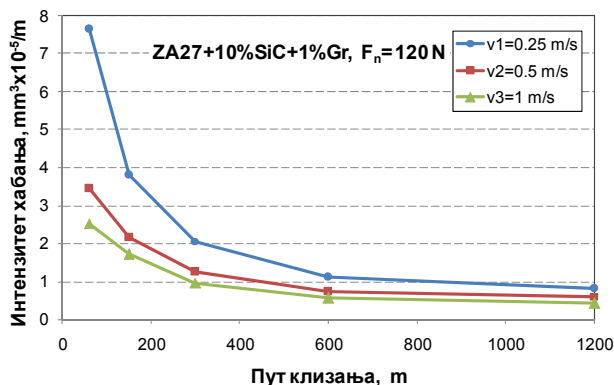
Слика П.200 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$



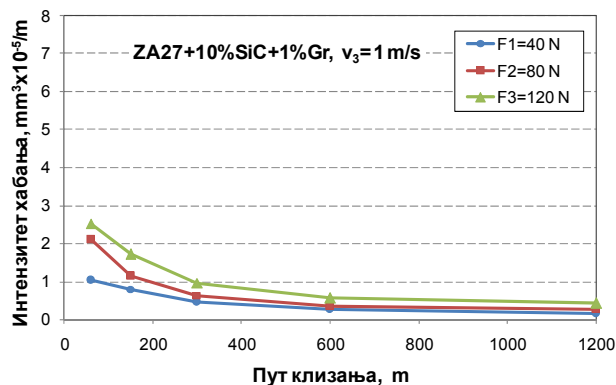
Слика П.201 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, $F_2 = 80 \text{ N}$



Слика П.202 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, $v_2 = 0.5 \text{ m/s}$



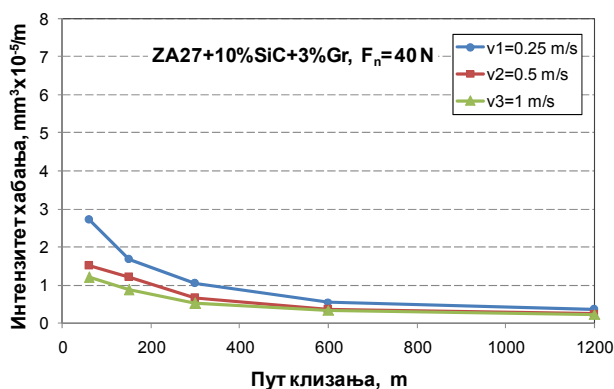
Слика П.203 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, $F_3 = 120 \text{ N}$



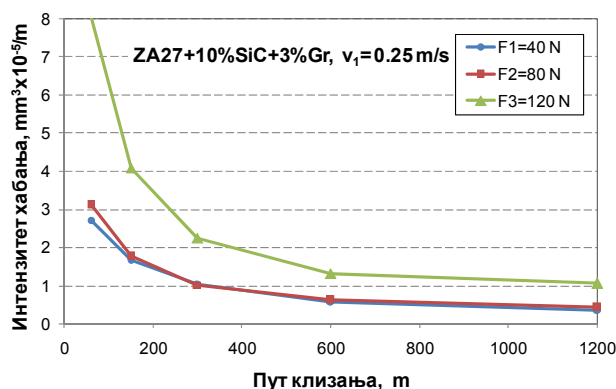
Слика П.204 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+1%Gr, $v_3 = 1 \text{ m/s}$

Табела П.35 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, са подмазивањем

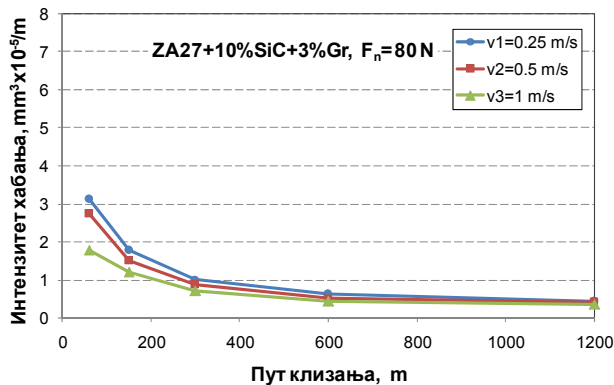
ZA 27+10%SiC+3%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-5} / \text{m}$				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	2.712	1.658	1.039	0.556	0.351
	80	3.107	1.773	1.014	0.619	0.419
	120	8.024	4.072	2.245	1.305	1.044
0,5	40	1.507	1.206	0.644	0.353	0.251
	80	2.733	1.487	0.857	0.517	0.388
	120	4.402	2.596	1.454	0.901	0.671
1	40	1.191	0.859	0.505	0.322	0.211
	80	1.777	1.203	0.712	0.424	0.347
	120	3.016	1.891	1.085	0.695	0.462



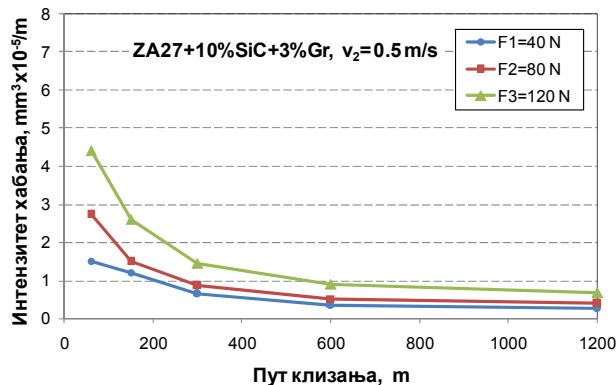
Слика П.205 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $F_1 = 40 \text{ N}$



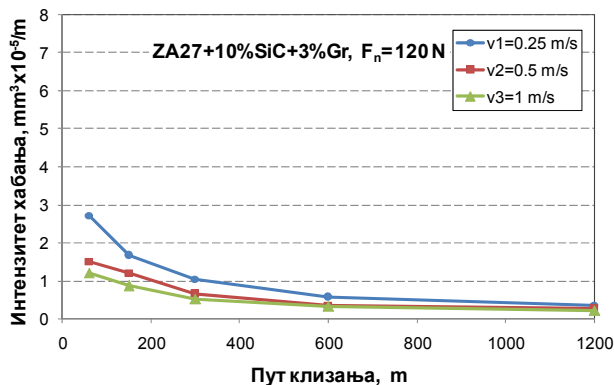
Слика П.206 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$



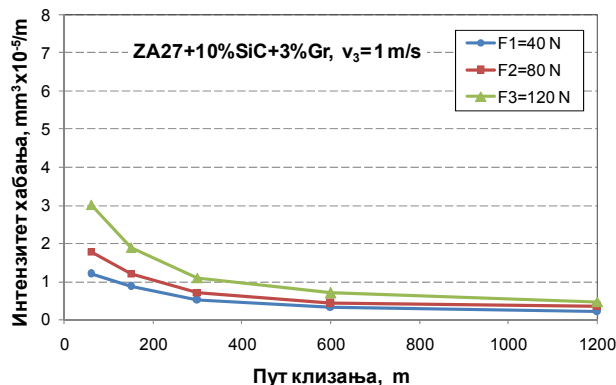
Слика П.207 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $F_2 = 80 \text{ N}$



Слика П.208 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $v_2 = 0.5 \text{ m/s}$



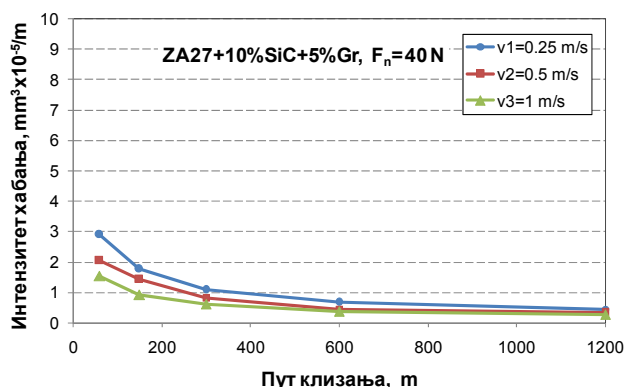
Слика П.209 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $F_3 = 120 \text{ N}$



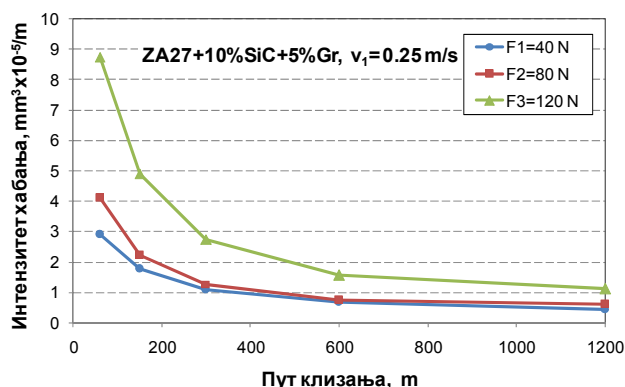
Слика П.210 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+3%Gr, $v_3 = 1 \text{ m/s}$

Табела П.36 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, са подмазивањем

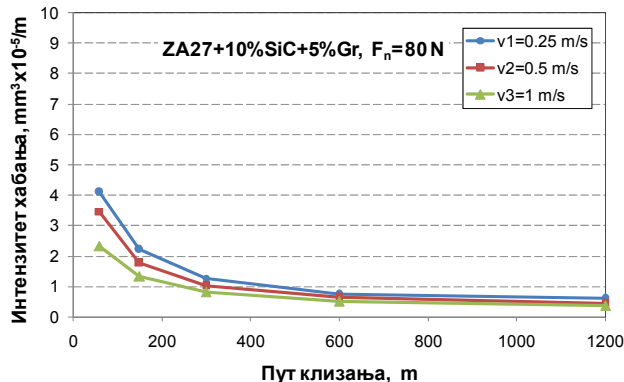
ZA 27+10%SiC+5%Gr		Интензитет хабања, $\text{mm}^3 \times 10^{-5} / \text{m}$				
v, m/s	F, N	Пређени пут, m				
		60	150	300	600	1200
0,25	40	2.905	1.773	1.079	0.657	0.444
	80	4.091	2.198	1.261	0.741	0.586
	120	8.735	4.892	2.731	1.552	1.106
0,5	40	2.025	1.426	0.823	0.447	0.323
	80	3.464	1.761	1.007	0.627	0.432
	120	4.608	3.006	1.878	1.111	0.749
1	40	1.535	0.918	0.616	0.366	0.268
	80	2.314	1.327	0.812	0.504	0.361
	120	2.691	2.067	1.313	0.821	0.643



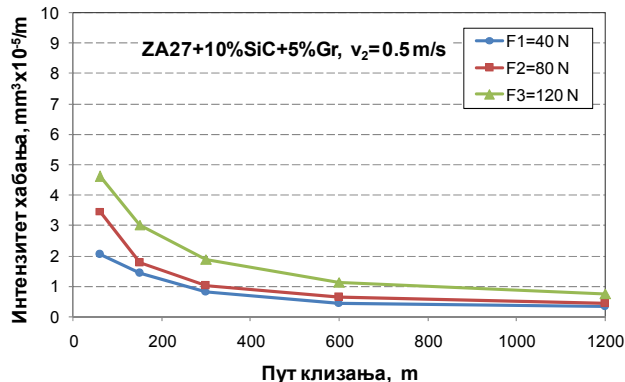
Слика П.211 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, $F_1 = 40 \text{ N}$



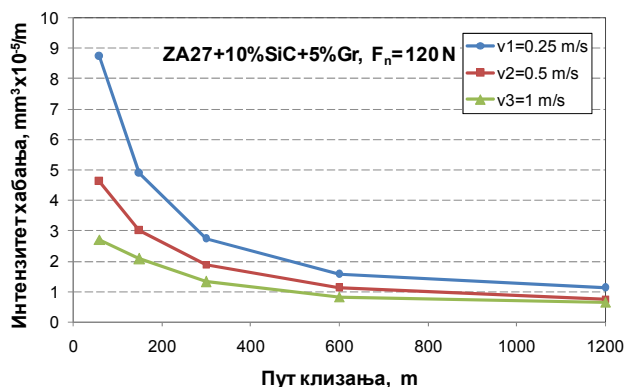
Слика П.212 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, $v_1 = 0.25 \text{ m/s}$



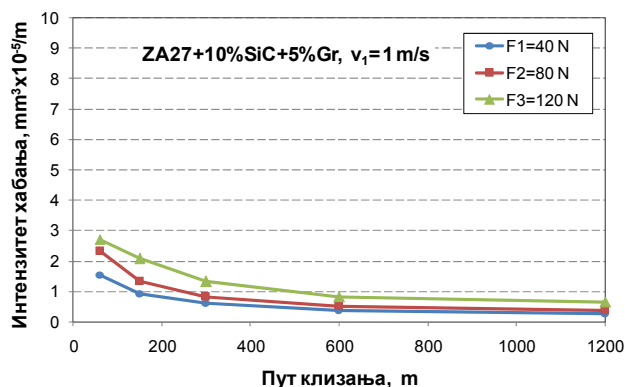
Слика П.213 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, $F_2 = 80 \text{ N}$



Слика П.214 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, $v_2 = 0.5 \text{ m/s}$



Слика П.215 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, $F_3 = 120 \text{ N}$



Слика П.216 Интензитет хабања – ZA27+10%SiC+5%Gr, $v_3 = 1 \text{ m/s}$