

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Основи трибологије

Број индекса: 131/2009

Никола М. Стевановић

**Коефицијент трења хибридних композита са
алуминијумском основом
завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. **др. Слободан Митровић - ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Овим завршним радом кандидат треба да одговори на питање шта су то композити и коефицијент трења, представи основне теорије трења. Посебан део пажње треба посветити анализи теоријских и експерименталних радова, који се тичу коефицијента трења. Студент треба да у оквиру практичног дела овог рада представи резултате експерименталних испитивања композита са основом А356 легуре, као и уређаје који се користе у циљу одређивања коефицијента трења.

Препоручена литература:

- [1] Branko Ivković, Aleksandar Rac: *Tribologija*, Jugoslovensko društvo za tribologiju, Kragujevac, 1995.
- [2] B. Bhushan: *Modern Tribology Handbook*, Volume One, CRC Press, Principles of Tribology, 2001.

ментор:

др. Слободан Митровић, ванр. проф.

Резиме рада:

Циљ овог завршног рада је дефинисање коефицијента трења, основних режима и механизма одговорних за његову појаву, као и испитивање утицај параметара на вредност коефицијента трења. Прегледом теоретских и експерименталних научних радова, из литературе, представљени су сви параметри који битно утичу на коефицијент трења. Такође, описани су и уређаји који се користе у циљу одређивања коефицијента трења.

Кључне речи:

Композити, трење и коефицијент трења.

Summary of work:

The goal of this paper is to define coefficient of friction and basic regimes and mechanisms that stand behind its occurrence, as well as to examine the influence of the parameters on the coefficient of friction value. Through the overview of the theoretical and experimental works, found in the literature, all the parameters that significantly influence friction coefficient are presented. Furthermore, the devices used for the purpose of determining coefficient of friction are presented and described.

Keywords:

Composites, friction and friction coefficient.

Садржај:

1. Увод	1
2. Композитни материјали	2
2.1.Дефиниције композита	2
2.2.Подела композитних материјала	4
2.3.Основа(матрица)	7
2.4.Примена композита	8
3. Коефицијент трења	15
3.1.Трење	15
3.2.Основне теорије трења	18
3.3.Преглед радова који се баве истраживањем коефицијента трења композитних материјала на бази А356	22
4. Уређаји за испитивање триболошких карактеристика	26
4.1.Мерни систем	28
4.2.Контактни елементи	32
5. Материјал	34
5.1.Композити на бази А356 легуре	34
5.2.Апаратура за добијање композита	34
6. План испитивања	37
7. Сигнали коефицијента трења.....	38
8. Резултати испитивања	40
9. Анализа резултата	48
10. Закључак	54
11. Литература / Reference	55

1. Увод

Познавање техничког материјала је један од основних задатака инжењера који се баве пројектовањем, али исто тако и производњом без обзира да ли је у питању машинство или нека друга грана индустрије. Услед све веће потребе коју намеће савремени развој технике и смањивања извора природних материјала, метални материјали који се користе за израду машинских елемената замењују се, где је то могуће, новим, вештачким створеним материјалима. Предност примене композитних материјала, у односу на конвенционалне материјале, огледа се у могућности варирања практично свих особина материјала од којих су састављени што се постиже путем избора саставних компонената, њихове количине, распореда и оријентације у оквиру материјала, а са циљем да се искористе њихова најбоља својства. Композити све више продиру и освајају нова тржишта тако да је количина и могућност примене композита у сталном порасту. Модерни композитни материјали заузимају данас значајну позицију на тржишту материјала за примену у инжењерству. Применом композитних материјала обезбеђује се уштеда у маси, а при томе су отпорност и издржљивост делова нешто већи у поређењу са класичним металним материјалима. Оно што се, у исто време поставља као велики изазов испред машинских инжењера је покушај смањења нешто веће цене композита. Примена атрактивних композитних компонената захтева развој нових техника производње у индустрији. Због релативно малог коефицијента трења машински елементи израђени од композитних материјала налазе све ширу примену у машинској индустрији. Данашње стање технике захтева потпуно познавање и материјала и сировина, не само ради избора материјала међу постојећим, него и ради стварања новог материјала. Испитивање материјала се не врши само ради утврђивања својства приликом производње, већ врло често и ради експертизе у сврху утврђивања начина употребе. Испитивање материјала има још једну веома значајну улогу. Оно треба да омогући да се дође до закључка који би служио као подлога за прописе о поузданости материјала или производа и конструкција

2.0. Композитни материјали



Слика 1. Композити [1]

Реч композит је релативно новијег датума, али композитни материјали постоје и користе се већ хиљадама година. Мало је познато да дрво представља природни композит у коме лигнит повезује дуга влакна целулозе. Од давнина се цигле ојачавају сламом, а мачеви кују од легура челика, гвожђа и других материјала. У композите спадају и цигла и бетон, састављен од честица песка или шљунка сједињених помоћу цемента. Први савремени композитни материјали су они са стакленим влакнима, произведени касних четрдесетих година прошлог века. Они су још увек најчешће коришћени и чине 65 % свих композита који се данас производе. [1]

2.1. Дефиниције композита

Који материјали се могу сматрати композитним, а који монолитним зависи од нивоа посматрања који служи као основа за дефиницију.

Молекуларни ниво

На овом нивоу разматрања, који сачињавају сами молекули и кристали честица. Сви материјали композита се могу издвојити јер не постоје у овом облику.

Микроструктурни ниво

На нивоу кристала, фаза и једињења за композитни материјал би се сматрао само онај материјал који је састављен од два или више различитих кристала, молекуларних структура или фаза. По овој дефиницији, међутим, многи материјали традиционално класификовани као монолитни или хомогени би се сматрали композитним материјалима.

Од свих металних материјала само једнофазне легуре као што су месинг или бронза би биле монолити по овој дефиницији. Тако би челик, вишефазна легура угљеника и жељеза био композитни материјал.

Макро – структурни ниво

Овај ниво разматрања, који ће овде бити усвојен се бави великим структурним формама односно компонентама, нпр. матричним структурама, честицама, влакнима, а о композитима говори као о систему материјала састављеног од различитих макроструктура. Тако се оваквим приступом долази до обухватније дефиниције композитних материјала. Ова дефиниција узима у обзир и облик самог материјала, али и састав састојака материјала. Композитни материјал је систем материјала који се састоји од мешавине или комбинације два или више састојака који се разликују по облику или саставу материјала, а да су они притом апсолутно нераствориви један у другом. Чак и оваквом разматрању је потребно разјашњење. Применом ове дефиниције, многим ће се инжењерима она чинити преширока јер обухвата материјале о којима обично не мислимо као композитима. То су пуњене пластике, бетон и импрегнирани материјали. И поред тога, сви ови материјали ипак припадају концепту композита и без обзира на опште прихваћен принцип, њих треба сматрати композитним материјалима. У литератури не постоји универзално прихваћена дефиниција композитних материјала.

Композитни материјали се најчешће дефинишу као материјали који настају сједињавањем два или више различитих материјала. Полазни материјали имају међусобно различите особине и њихов спој даје потпуно нови материјал. Циљ је да се побољшају структурне, триболошке, термичке, хемијске или неке друге карактеристике појединачних материјала.

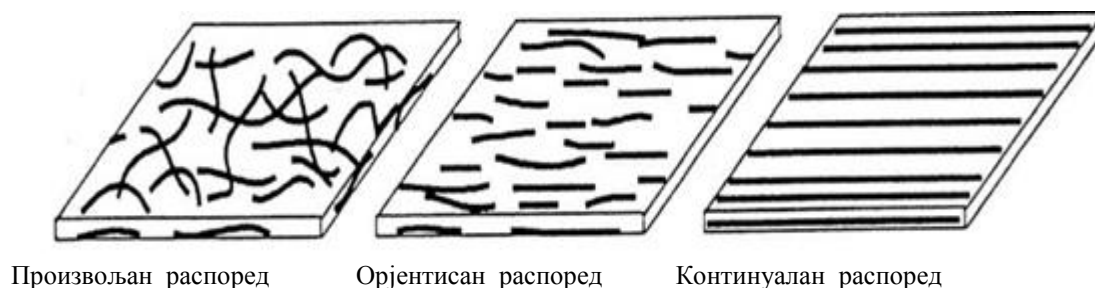
Употреба самог појма композит често представља да су унапређена физичка својства, јер је главни технолошки интерес добијање материјала са супериорним физичким (обично механичким) својствима у односу на својства компонената. Предности композитних материјала у поређењу са основама огледају се у побољшању механичких особина, пре свега у повећању отпорности према хабању, већој чврстоћи, отпорности на корозију и високим температурама, издржљивост и постојаност.

Композитни материјал има хетерогену структуру састављену од две или више фаза које долазе до његових компонената које се међусобно не мешају нити растварају. Једна фаза, названа ојачивачем, даје јачину и тврдоћу, а друга се назива матрицом или везивом и она окружује и држи заједно групе влакана или фрагменте ојачивача. Због тога што су различити структурни елементи у композиту измешани или комбиновани увек постоји гранични регион. То може бити интерфејс (површина која формира заједничку границу елемената), или у другим случајевима додирни регион је јасно додана фаза, названа међуфаза (*interphase*).

Структурни елементи који сачињавају композитни материјал могу се расподелити по композиту на два начина. Најчешћи облик појављивања структурних елемената је правилан и поновљив модел, са релативно униформним укрштањима у материјалу и структури, али и са униформном распоређеношћу по материјалу. Матрично-честични, и неке врсте матрично-влакнастих композита, у којима је структурни елемент равномерно распоређен по калупу, представља хомогени тип композитног материјала.

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

Код обе врсте и код хомогених и код градијентних композита структурни елементи могу бити смештени или у оријентисаном или произвољном распореду. (слика 2) [4]



Слика 2. *Распоред структурних елемената у композиту [1]*

2.2. Подела композитних материјала

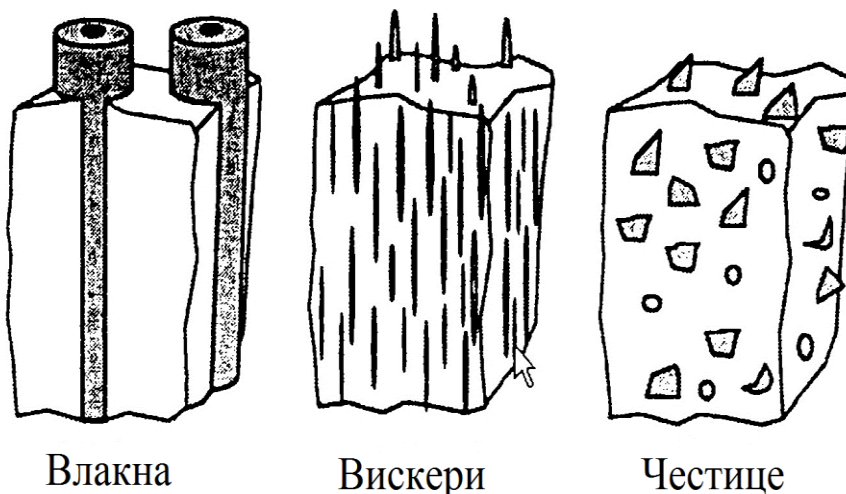
Композити могу бити: метално-метални, метално-керамички, метално-полимерни, керамичко-полимерни, керамичко-керамички, полимерно-полимерни и полимерно-метални. С обзиром на то, композити се могу поделити на:

- Металне,
- Керамичке и
- Полимерне.

При томе се претпоставља да су метали, керамика, односно полимери основна (матрица), којој се додају најразличитији додаци у циљу модификовања својства матрице, односно постизања циља који је наведен у дефиницији.

Могућа је и друга подела композита на основу облика додатака (ојачивача):

- Композити са честицама,
- Влакнима ојачани композити и
- Слојевити композити, сендвич конструкције и структурни композити.



Слика 3. Композити ојачани влакнима и честицама [1]

Композитни материјали се најчешће састоје од само две фазе: континуалне матрице која окружује другу фазу – додатке. Та се фаза назива распршена фаза (дисперзија) слика 4. Својства композита функција су својства конститутивних фаза, њихових релативних удела и геометрије распршене фазе [13]. Геометрију распршене фазе карактерише:

- Удео,
- Величина,
- Облик,
- Расподела и
- Оријентација

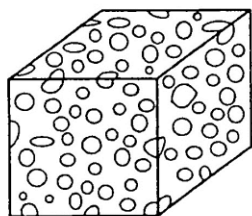


Слика 4. Шематски приказ различитих геометријских и просторних обележја композита [3]

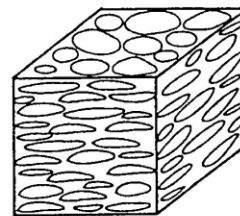
С обзиром на бројност постојећих композита, а још више на оне који ће се развити у будућности, непходно је извршити класификацију композита. Темељним приступом, који примењују бројни аутори, у првом кораку композитни материјали се класификују према структури матрице. Један од могућих приступа даљој класификацији композитних материјала приказан је у табели 1.

Табела 1. Класификација композита [3]

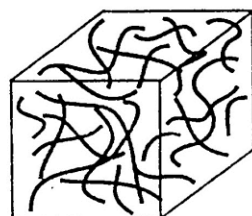
Композити						
Честицама ојачани		Влакнима ојачани		Структурни		
Велике честице	Дисперзијски ојачани	Континуални (умерени)	Дисконтинуални (кратка влакна)		Ламинати	Сендвич
			Усмерени	Случајно оријентисани		



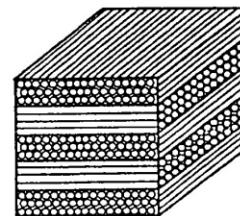
Честицама ојачани композити



Љуспичасти композити



Влакнима ојачани композити



Ламеларни композити

Слика 5. Класификација композита [2]

Према подацима из табеле постоје три главне групе композита:

- Ојачани честицама,
- Ојачани влакнима и
- Структурни композити.

Надаље, за сваку од тих група постоје две подгрупе. Код честицама ојачаних композита распршена фаза је еквиаксијална (тј. димензије честица приближно су једнаке у свим смеровима). Код влакнима ојачаних композита, распршена фаза има геометрију влакана (тј. велики однос дужина – пречник). Структурни композити су они који су сачињени од комбинације композита и хомогених материјала.

2.3. Основа (матрица)

Основа (матрица) код влакнасто ојачаних композитних материјала служи да:

- међусобно повезује влакна,
- делује као посредник који преноси и распоређује спољна оптерећења на влакна,
- заштити влакна од механичких оштећења и хемијских утицаја средине,
- спречи ширење кртог лома од влакна до влакна (служи као баријера
- ширењу прслине).

За влакнасто ојачане композитне материјале као материјал основе (матрице) користе се:

• Метални материјали:

- алуминијум,
- алуминијум-литијум,
- магнезијум,
- бакар и
- титан.

Композити са металном основом (MMC- *Metal Matrix Composites*) предмет су интересовања из разлога што су способни да обезбеде већу отпорност на хабање, више температуре границе од њихових основних метала и могу се обликовати тако да се добије повећана чврстоћа, крутост, топлотна проводљивост, отпорност на хабање и димензијска стабилност.

Поступци добијања композита са металном основом (матрицом):

- Поступци у чврстом стању (*Solid State Processing*)
 - Високотемпературна синтеза (*Self-Propagating Synthesis-SHS*),
 - Металургија праха (*Powder Metallurgy-PM*).
- Поступци у течном стању (*Liquid Processing*)
 - Ливење у калуп,
 - Ливење мешањем (*Stir Casting*),
 - Ливење гњечењем (*Squeeze Casting*),

➤ Ливење у получврстом стању (*Rheocasting Compocasting*).

- Реокастинг поступак,
- Компокастинг поступак,
- Инфилтрација метала под ниским притиском (*Pressureless Metal Infiltracion*),
- Спреј поступак (*Spray Deposition*),
- Брзо очвршћавање (*Rapid-Solidification Processing-RSP*),
- Физичко таложење из гасовите фазе (*Physical Vapour Deposition-PVD*). [14]

• **Полимерни материјали:**

- епоксидне смоле - (највише се користе, 80% од свих полимера),
- полиестер (јефтинији је од епоксидне смоле али има лошије особине),
- полиетарсулфани,
- полиамиди (за температуре од 300°C и више) и
- силикони.

Материјал	Густина g/cm ³	Модул еластичности, GPa	Затезна чврстоћа, MPa	Напон течења, MPa	Специфична крутост, mх10 ⁴	Специфична чврстоћа, mх10 ⁴
Меки челик	7.87	207	365	303	2.68	4.72
Побољшани челик	7.87	207	1722	1515	2.68	22.3
Нерђајући челик	7.87	196	1619	1515	2.54	21.0
Легура алуминијума	2.7	68.9	606	537	2.60	22.9
Легура титана	4.43	110	1171	1068	2.53	26.9
Легура никла	8.2	207	1309	1247	2.57	17.4
НС-угљена vlakна- епокси	1.55	137.8	1550	-	9.05	101.9
НМ-угљена vlakна- епокси	1.63	215	1240	-	13.44	77.5
Е-стакло vlakна- епокси	1.85	39.3	965	-	2.16	53.2
Кевлер 42 vlakна- епокси	1.38	75.8	1378	-	5.60	101.8
Борна vlakна- епокси	2.35	220	1109	-	9.54	48.1

Табела.2 Карактеристике неких конструкционих метала и композитних материјала [4]

2.4. Примена композита

Побољшане особине композитних материјала пријају могућност њихове широке примене. У последњим деценијама направљено је мноштво нових композитних материјала са неким изузетно корисним особинама. Пажљивим избором материјала ојачивача и матрице и производног процеса којим се они спајају могу се добити композити са

својствима потребним за специјалне примене. Користе се у авионској, аутомобилској и електронској индустрији, медицини, грађевинарству итд.

- **Медицина:**

Композити метал – керамика, или метал – угљеник, су погодни за примену у медицини јер су биокомпатибилни, отпорни на корозију, хемијски инертни и добро подносе напрезање на истезање. Они се користе за израду вештачких имплантата, попут срчаних зализака, кукова, имплантата колена (слика 6). Срчани залиски се праве од пиролитичког угљеника, а кукови од угљеник – полимер или угљеник – угљеник композита. Угљеник – полимер композитни материјали служе и за плоче за тзв. остеосинтезу, којима се делови кости причвршћују један за другу. Механичке особине композита морају одговарати костима чиме се спречава деградација костију до које често долази када се користе металне плочице.



Слика 6. Систем вештачког колена [4]

- **Авиоиндустрија:**

Композитни материјали су нашли примену и у авиоиндустрији за израду спољашњих делова авиона, компоненти мотора као и делова који су изложени високим температурама. Спољашњи делови авиона се праве од арамид - алуминијум композита који поседује необичну комбинацију јачине, крутости, отпорности на корозију и мале тежине. Уз то је побољшана и отпорност на замор. За израду компоненти авионских мотора користе се композити са металном матрицом. Они су отпорни на високе температуре које се развијају при раду мотора, али су, на жалост, много тежи од оних са полимерном основом. За делове изложене високим температурама, употребљавају се угљеник - угљеник композити. Они могу да издрже температуре до 3000 °C и заправо су јачи на високим него на ниским температурама. Елисе хеликоптера се такође израђују од композита.



Слика 7. Ваздушни транспорт [4]



Слика 8. Млазни мотор [4]

- Аутоиндустрија

Композити имају широку примену и за израду делова аутомобила. Један од примера примене су аутомобилске кочнице, као замена за сиви лив (слика 9). За олакшавање укључивања графита у матрицу додаје се никлом превучен графитни прах у растопљену алуминијумску легуру. Током скраћивања никал реагује са алуминијумом и ствара хомогену расподелу интерметалних спојева Ni - алуминида. Такав композит има добру техничку проводљивост и високу отпорност хабања.



Слика 9. Аутомобилске кочице [4]

Најзначајније карактеристике видљиве су у различитим облицима, посебно у томе што метална матрица даје металну природу композиту у смислу топлотне и електричне проводљивости, производних процеса и интеракције са околином. Доминирајућа механичка својства матрице, као што је модул еластичности и чврстоћа у попречном смеру композита са усмереним ојачивачима, довољно су висока код неких ММС - а да је могуће једносмерно слагање у неким инжењерским конструкцијама.

Селективно ојачану главу клипа уводи *Toyota Motor* у 1983 години. Развијени ливењем под притиском доводе до побољшања као што су већа отпорност на хабање и нижа топлотна проводљивост. Осим тога ММС обезбеђује нижи КТШ од ојачаног алуминијума, тако да се добијају већи притисак и боље преформансе. Облоге клипова добијене притиском су употребљаване у *Honda Prelude* још од 1990 године (слика 10). Веома је битно да ММС облоге обезбеђују већу отпорност на хабање а осим тога и доводи до повећања кубикаже мотора тако да се више коњских снага добије из исте тежине и запремине мотора.



Слика 10. Ливени блок мотора од алуминијума [4]

ММС карданска вратила имају знатно мању масу од челичних, конкретно у Chevrolet S-10 моделу тежи 9кг мање. ММС карданска вратила налазе примену и у моделима GMC Sonoma 1996 године као и Chevrolet Corvette 1997 године и 1990 године Ford Motor почиње уградњу ММС карданских вратила у полицијским пресретачима верзија Crown Victoria.

Да би блок мотора задовољио функционалне захтеве, мора да поседује високу чврстоћу, еластичност, отпорност на хабање и корозију. Велика снага је посебно битна у дизел моторима, због компресије 17.0:1 или веће. Материјали такође треба да имају ниску густину, термичко ширење, и топлотну проводљивост (да се спречи неуспех под високим температурама). Добра завршна обрада помућу машина и легура метала су такође важни фактори у избору одговарајућег материјала. Поред претходно наведених карактеристика, легура морају поседовати добро пригушење вибрација.

Да би испуниле функционалне захтеве цилиндра и својства метала, индустрије су користиле ливено гвожђе и легура алуминијума за производњу блокова. Ливеног гвожђа легуре се користи због комбинације добрих механичких особина, ниских цена и доступности. Поједине легуре алуминијума комбинују карактеристике легура гвожђа због мале тежине. Легуре магнезијума, које су биле претходно неподесне за употребу као материјал блока мотора, имају предност да су најлакши од свих поменутих метала, али и дају потребну снагу коју захтева блока.

Клипњача направљена од Al - легуре ојачане са Al_2O_3 честицама. Она има пуно боља механичка својства и отпорност на замор од челичне клипњаче, а уз све то има и 42% мању масу (слика 11).



Слика 11. Клипњача [4]

- **Електротехника:**

Електрични контакти у прекидачима се праве од композитних материјала. Материјал који се користи за електричне контакте морају истовремено имати велику електричну проводљивост и отпорност на хабање. Композити са честичним ојачавањем попут волфрам - сребро композита задовољавају ове услове. Такође се користе и за израду слојева за заштиту од интерференције електромагнетних таласа. Користе се и за израду сателитске антене, куполе, врхова ТВ торњева и ветрењача.



Слика 12. Ветрењача [4]

- **Грађевинарство:**

Један од најпознатијих и најчешће коришћених композита је бетон са честицама песка или шљунка повезаних цементом. Користи се и ојачан бетон тј. бетон ојачан челичном шипкама које побољшавају јачину и спречавају рушење конструкције уколико дође до пуцања самог бетона.



Слика 13. Израда плоче [4]

- **Спортска опрема:**

Композити са арамид или карбонским влакнима се због велике крутости и мале тежине користе за израду спортске опреме тј. реквизита, као што су скије, штапови за голф, штапови за пецање, тениски рекети итд. Овакви реквизити омогућавају постизање најбољих спортских резултата, па се користе доста без обзира на високу цену [2].



Слика 14. Спортска опрема (тениски рекет) [4]

Добре	Лоше
Висока чврстоћа	Висока цена
Висок модул еластичности	Спора производња
Мала густина	Запаљиви
Висока специфична чврстоћа	Токсични
Ударна отпорност	Непостојани у агресивним срединама
Заморна отпорност	Слабо познавање у стручним круговима
Корозиона отпорност	Недовољно стручне радне снаге
Пригушење	Осетљивост на температуре
Анизотропија	Осетљивост на влагу
Невидљиви за радар (већина)	Непогодност оправке
Погодни за прототајпинг	
Лако покретљиви	

Табела 3. Добре и лоше особине композитних материјала [4]

3.0. Коефицијент трења

3.1. Трење

Трење представља отпор релативном кретању површина у додиру и захтева утршак одређене количине енергије за његово савладавање. Изражава се силом трења (F_T), која се јавља као отпор појави кретања.

Трење се може поделити у два основна облика:

- Унутрашње трење
- Спољашње трење

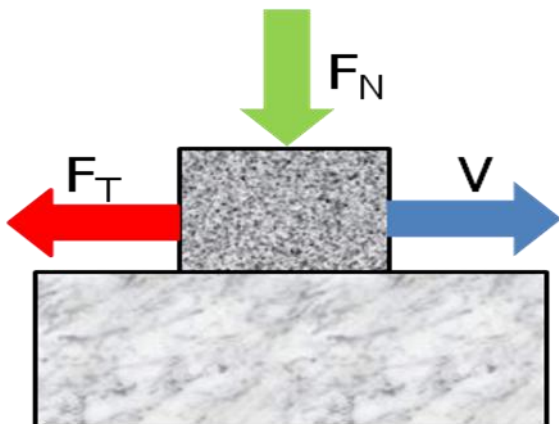
Унутрашњим трењем назива се међусобно деловање молекула флуида, при чему долази до супротстављања релативном кретању слојева. Унутрашње трење флуида се назива вискозност.

Спољашњим трењем назива се међуделовање тела које се јавља на местима њиховог непосредног додира, а супротставља се њиховом релативном кретању. У зависности од врсте кретања могу се разликовати:

- Трење клизања
- Трење котрљања
- Комбиновано трење

Трење клизања

Трење клизања остварује се у зонама контакта два тела која се релативно крећу неком брзином V уз присуство спољашњег оптерећења F_N [7].



$$F_T = \mu F_N$$

где је:

F_T – сила трења

μ - коефицијент трења

F_N – нормална сила

Слика 15. Трење клизања [7]

На трење утичу:

- Хемијски састав материјала
- Стање обрађене површине оба тела
- Састав околине
- Оптерећење
- Брзина кретања
- Начин кретања (праволинијско, кривудаво, напред-назад)
- Врсте контакта (површински, концентрисани)
- Температуре
- Претходно клизање по тој површини

Трење клизања је присутно у највећем броју трибомеханичких система и представља основни узрок губитка енергије и прогресивног развоја процеса хабања контактних елемената.

Његова величина зависи од комплекса радних услова (типа кретања, оптерећења, брзине клизања, температуре у контакту, трајања процеса), параметара њихове структуре (елементи, њихове карактеристике – укључујући стање контактних слојева и интеракције елемената) и пре свега од услова подмазивања.

Трење котрљања

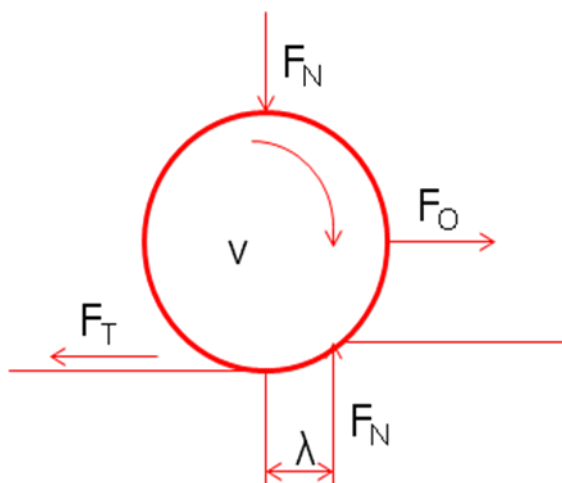
Трење котрљања јавља се у трибомеханичким системима у којима се један елемент система котрља по другом.

Према теоријским разматрањима разликују се два случаја :

- слободно или чисто котрљање
- котрљање са клизањем

Слободно котрљање

Слободно котрљање остварује се само при котрљању апсолутно тврдых тела у трибомеханичким системима, док котрљање са клизањем настаје као последица присуства тангенцијалних сила (вучних или кочионих) у трибомеханичким системима.



$$M = F_N \lambda = F_O R = F_T R - \text{момент}$$

$$F_T = \lambda F_N / R$$

$$F_T = \mu F_N$$

$$\mu = \lambda / R - \text{Коефицијент трења}$$

$$\lambda = \mu R - \text{коефицијент отпора при котрљању, има димензију дужине}$$

Слика 16. *Трење котрљања* [7]

Вектор реакција на спољашње оптерећење F_N јавља се у зони контакта у истом правцу, али помереном за величину λ у односу на осу обртања, са истим интензитетом и супротним смером.

Коефицијент трења (μ) зависи од врсте материјала предмета. Ако су тврдоће куглице и подлоге довољно велике, а њихове површине идеалне, може се претпоставити да ће код неког оптерећења додирно место бити тачка. Повећавањем оптерећења, долази се у подручје еластичних деформација, а додирно место постаје површина. Услед савлађивања котрљања и деформација, долази до пораста силе трења и коефицијента трења. Изнад неког граничног оптерећења наступа преоптерећење са трајно пластичним деформацијама. Вредности коефицијента трења котрљања су знатно мање него у случају клизања.

Комбиновано трење

Комбиновано трење је динамичко трење између два тела у додиру када постоји истовремено трење котрљања и трење при клизању на месту додира. Овај тип трења се најчешће среће у зупчастим паровима [7].

3.2. Основне теорије трења

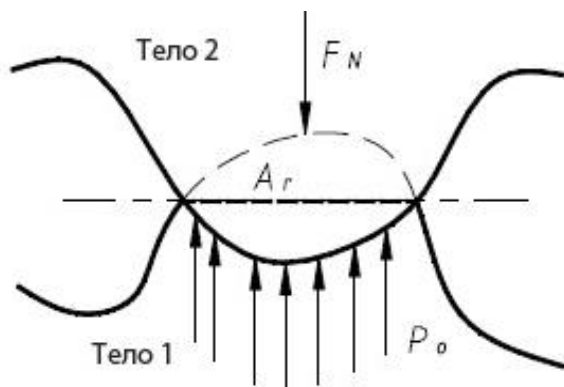
Основне теорије трења могу бити:

- Адхезивна теорија трења
- Модификована адхезивна теорија трења
- Молекуларна теорија трења
- Молекуларно-механичка теорија трења
- Енергетска теорија трења

Адхезивна теорија трења

При контакту два чврста тела додир се остварује по врховима неравнина, па је величина реалне површине контакта врло мала, а реални притисци врло велики, чак и при релативно малим спољашњим оптерећењима.

Процес пластичне деформације материјала у зонама додира трајаће све до тренутка појаве реалне површине контакта A_r која помножена са притиском на граници течења мекшег материјала у контакту p_o , обезбеђује уравнотежење спољашњих и унутрашњих сила, Слика 15.



Слика 17. Јединични контакт остварен између неравнина два чврста тела [7]

Према адхезивној теорији трења, за прорачун силе и коефицијента трења, полази се од следеће претпоставке:

$$F_t = A_s + \tau + p_c$$

A_s - површина смицања и одговара реалној површини контакта;

τ - чврстоћа на смицање материјала тела мање тврдоће у контакту;

p_c - сила потребна за остварење кретања врха неравнине тврђег тела кроз контактни слој мање тврдоће.

На основу даље анализе, може се извести израз за силу и коефицијент трења према адхезивној теорији трења :

$$F_T = A_s + \tau = F_N \cdot \frac{\tau}{\rho_0}$$

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} = \frac{\tau}{\rho_0}$$

Модификована адхезивна теорија трења

Једна од полазних претпоставки при овој теорији трења је да раст реалне површине елементарног контакта не зависи само од величине нормалног оптерећења већ и од тангенцијалних сила које се појављују у зони контакта при кретању једног тела по другом.

При томе, нормално напрезање и напрезање у равни смицања (тангенцијално), настају искључиво под дејством нормалне и тангенцијалне силе, а смањују се са порастом фрикционе везе, тј. реалне површине контакта.

Веза између ове две врсте напрезања је дата следећим изразом:

$$\rho^2 + \alpha + \tau^2 = \kappa^2$$

Даљом анализом је утврђено да на основне величине трења утиче и тзв. спољашњи гранични слој, на чију структуру утиче:

- природа материјала елемената трибомеханичких система;
- средина у којој се контактни елементи налазе.

Спољашњи гранични слој садржи апсорбоване гасове, воду, уље, хемијске слојеве услед хемијских реакција. Критична вредност напона на смицање спољашњег граничног слоја преко кога се врши контакт, увек је мања од критичне вредности напона на смицање материјала елемената у контакту.

На основу изложеног, може се израчунати коефицијент трења и сила трења:

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} = \frac{\tau_s}{\rho} = \frac{C}{\sqrt{C^2 - \frac{1}{2}}} \Rightarrow F_T = \mu \cdot F_N$$

Основни закључци који се могу извести из адхезивне теорије трења су:

1. Реална површина контакта одређена је величином пластичне деформације материјала у зонама елементарног додира;
2. Контакт између елемената трибомеханичког система остварује се преко спољашњег граничног слоја, на контактним површинама, чије су вредности напона на смицање мање од критичне вредности напона на смицање основног материјала;
3. Величина силе и коефицијента трења зависе од критичне вредности напона на смицање спољашњег граничног слоја и притиска на граници течења основног материјала.

Молекуларна теорија трења

Једна од полазних претпоставки при овој теорији трења је да се у зонама контакта између два тела јављају привлачне и одбојне молекуларне силе. На основу ове претпоставке изведена је једначина равнотеже спољашњих и унутрашњих сила облика:

$$F_N + \sum p_p = \sum p_n$$

F_N - сила која потиче од спољашњег оптерећења;

$\sum p_p$ - збир привлачних сила у зони додира;

$\sum p_n$ - збир одбојних сила у зони додира.

Спољашњу нормалну силу може да уравнотежи n парова молекула, ако сваки пар молекула може да уравнотежи спољашње оптерећење величине p :

$$F_N = p \cdot n$$

Број молекуларних веза које се стварају и раскидају при кретању једног тела по другом на путу x се рачуна на следећи начин:

$$K = \frac{n \cdot x}{l}$$

Ако енергија једног пара молекула износи W , тада ће укупан рад који се троши за раскидање формираних молекуларних веза на путу x при кретању једног елемента по другом да износи $K \cdot W$, тада је:

$$F_T = F_N \cdot \mu = \mu \cdot p \cdot n$$

Даљом анализом се утврђује израз за силу и коефицијент трења:

$$\mu = \frac{C_1 \cdot W \cdot n}{l \cdot F_N} \Rightarrow F_T = \mu \cdot F_N$$

Основни закључци који следе из ове теорије трења су да сила и коефицијент трења зависе од:

1. Енергије молекуларних веза;
2. Правца кретања једног елемента по другом у односу на осу кристалне решетке;
3. Броја остварених молекуларних веза у зони контакта;
4. Растојања центара молекула;
5. Спољашњег оптерећења.

Молекуларно - механичка теорија трења

Сила трења која се јавља у зонама контакта TMS-а се састоји од две компоненте, што се може закључити на основу израза:

$$F_T = F_{Tm} + F_{Td}$$

F_{Tm} - молекуларна компонента силе трења, последица је појаве међумолекуларних сила тј. фрикционих веза у зонама контаката.

F_{Td} - отпор деформисању контактеног слоја материјала мање тврдоће, последица је кретања елемената TMS-а.

Молекуларно - механичком теоријом трења уведен је и појам трећег тела у којем се развијају триболошки процеси за време остварења контакта елемената TMS-а. Структуру трећег тела чине следећи слојеви:

- Унутрашњи гранични слој (UGS);
- Спољашњи гранични слој (SGS).

Сила трења и коефицијент трења зависе искључиво од карактеристика спољашњег и унутрашњег граничног слоја. Укупна сила трења која се јавља у зони контакта елемената TMS-а зависи од укупног броја додира остварених на контактним површинама и дефинисана је изразом:

$$F_T = \int_0^{n_r} F_{Ti} d_{nr}$$

Деформације контактеног слоја могу бити:

1. еластичне;
2. еластично-пластичне;
3. пластичне.

Енергетска теорија трења

Енергетска теорија трења се заснива на следећим претпоставкама:

- Трење је одређено радом који се троши на савладавање силе трења на путу x , он је једнак количини енергије која се у процесу трења претвори у топлоту;
- На процес трења је могуће применити први закон термодинамике;
- Постоји директна веза између количине рада који се утроши на савладавање трења и количине продуката хабања који при томе настају;
- У процесу трења могућа је појава промене физичко-хемијских карактеристика контактних слојева елемената у додиру.

При томе је укупан рад који се троши на савладавање силе трења на пређеном путу:

$$W_R = F_T \cdot x$$

$$W_R = W_{term} + W_{hem} + W_{el} + W_{jon} + W_{meh}$$

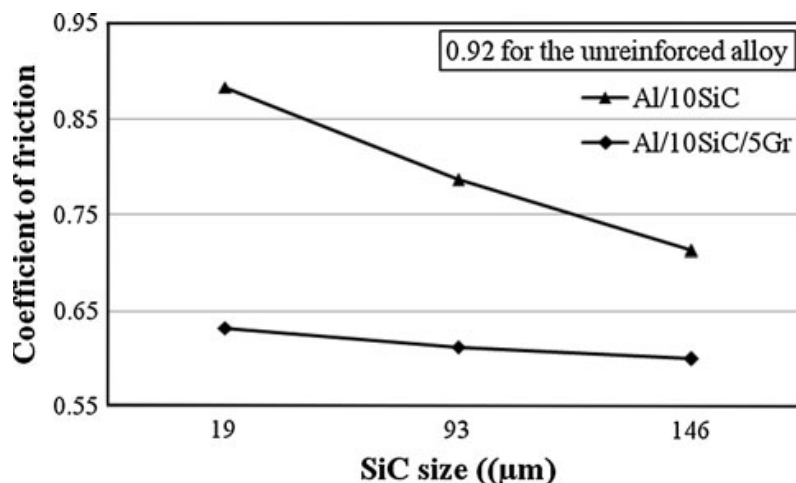
3.3. Преглед радова који се баве истраживањем коефицијента трења композитних материјала на бази А356

Проблемом трења бавили су се многи научници у свету. Величина и вредност коефицијента трења зависи од врсте материјала, контактне геометрије и услова испитивања. Коефицијентом трења композита са *Al MMC* највише су се бавили следећи научници: *S. Mahdavi, F. Akhlaghi, Aleksandar Vencl, Ilija Bobic, Saioa Arostegui, Biljana Bobic, Aleksandar Marinković, Miroslav Babić, N. Natarajan, S. Vijayarangan, I. Rajendran, R.C. Shivamurthy и M.K. Surappa.*

Вредности коефицијената се крећу у границама од $0.3 \div 0.8$, зависи од врсте контакта, величине оптерећења, брзине клизања, услова подмазивања, дужине пута клизања и врсте материјала.

Аутори: *S. Mahdavi* и *F. Akhlaghi* проучавали су триболошко понашање Al6061 легуре са додатком SiC и графита.

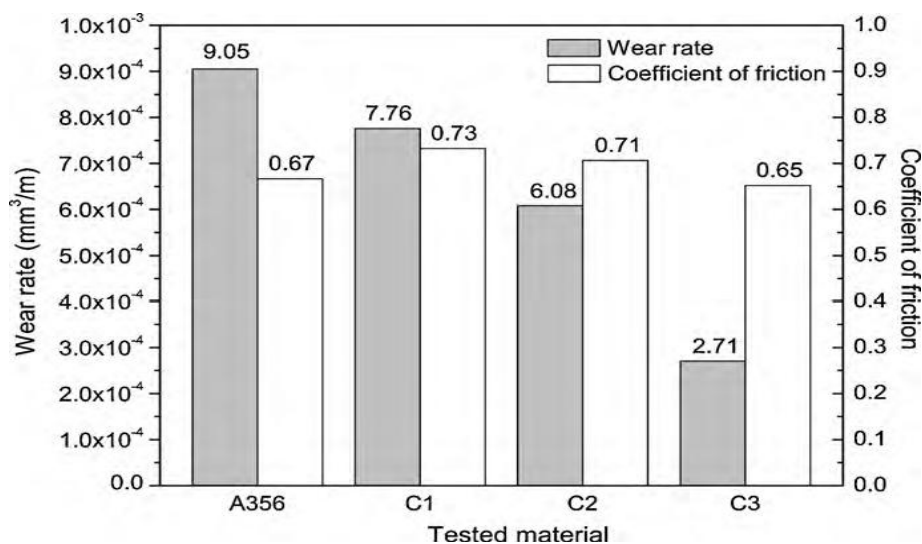
Вредности коефицијента трења крећу се у границама од $(0.58 \div 0.87)$ за дате материјале.



Слика 17а. Коефицијент трења Al + 10 % SiC и Al + 10 % SiC + 5 % Графит [17]

Аутори: *Aleksandar Vencel*, *Ilija Bobic*, *Saioa Arostegui*, *Biljana Bobic*, *Aleksandar Marinković* и *Miroslav Babić* проучавали су триболошко понашање хибридних композита са SiC, Al₂O₃ и графитом.

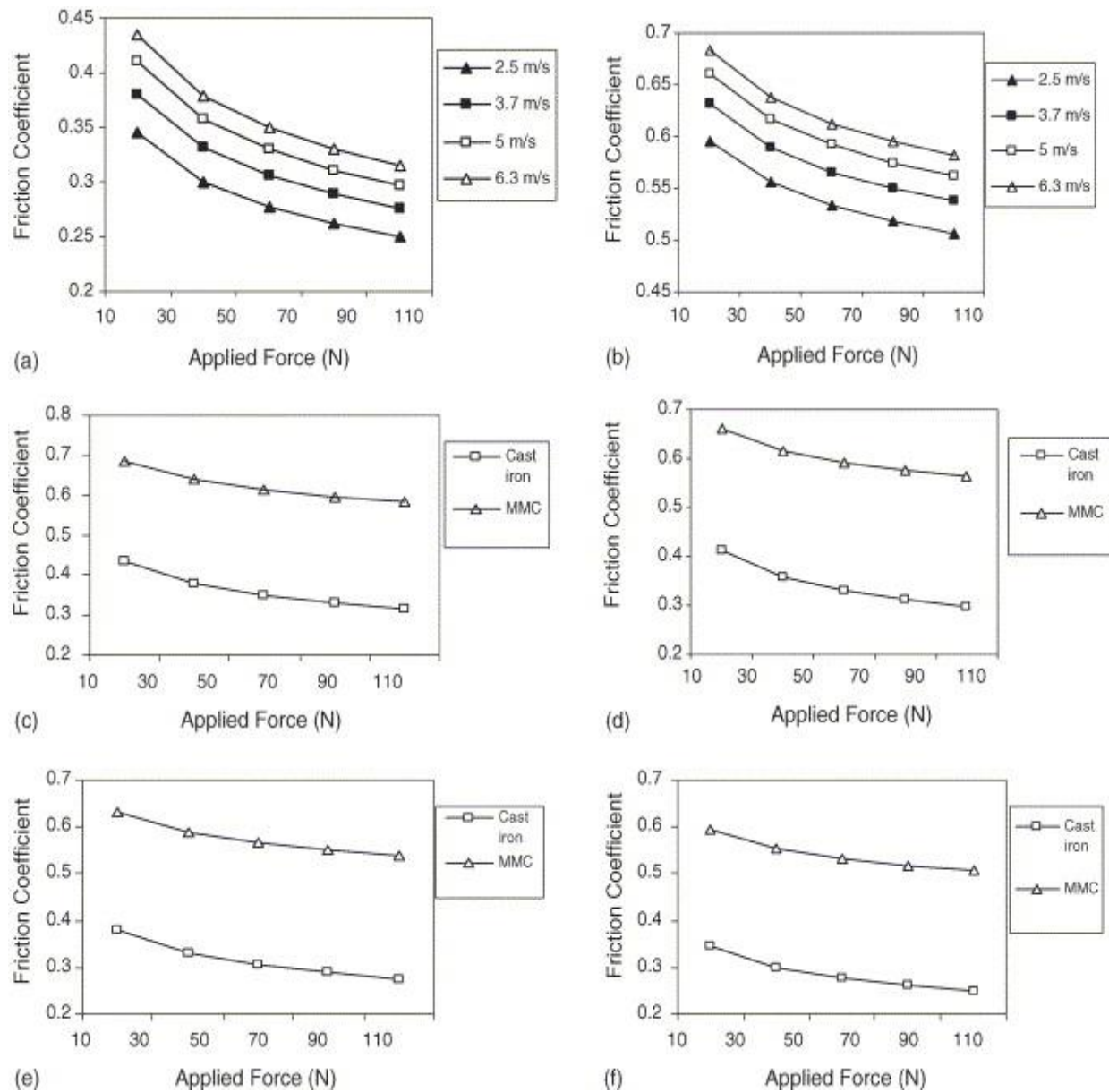
Вредности коефицијента трења крећу се у границама од $(0.65 \div 0.73)$ за дате материјале.



Слика 17б. Коефицијент трења A356, C1 (A356 + 10% Al₂O₃), C2 (A356 + 10 % SiC), C3 (A356 + 10 % SiC + 1 % Графит) [17]

Аутори: *N. Natarajan, S. Vijayarangan, I. Rajendran и M.K. Surappa* проучавали су триболошко понашање хибридног композита A356 + 25 % SiC.

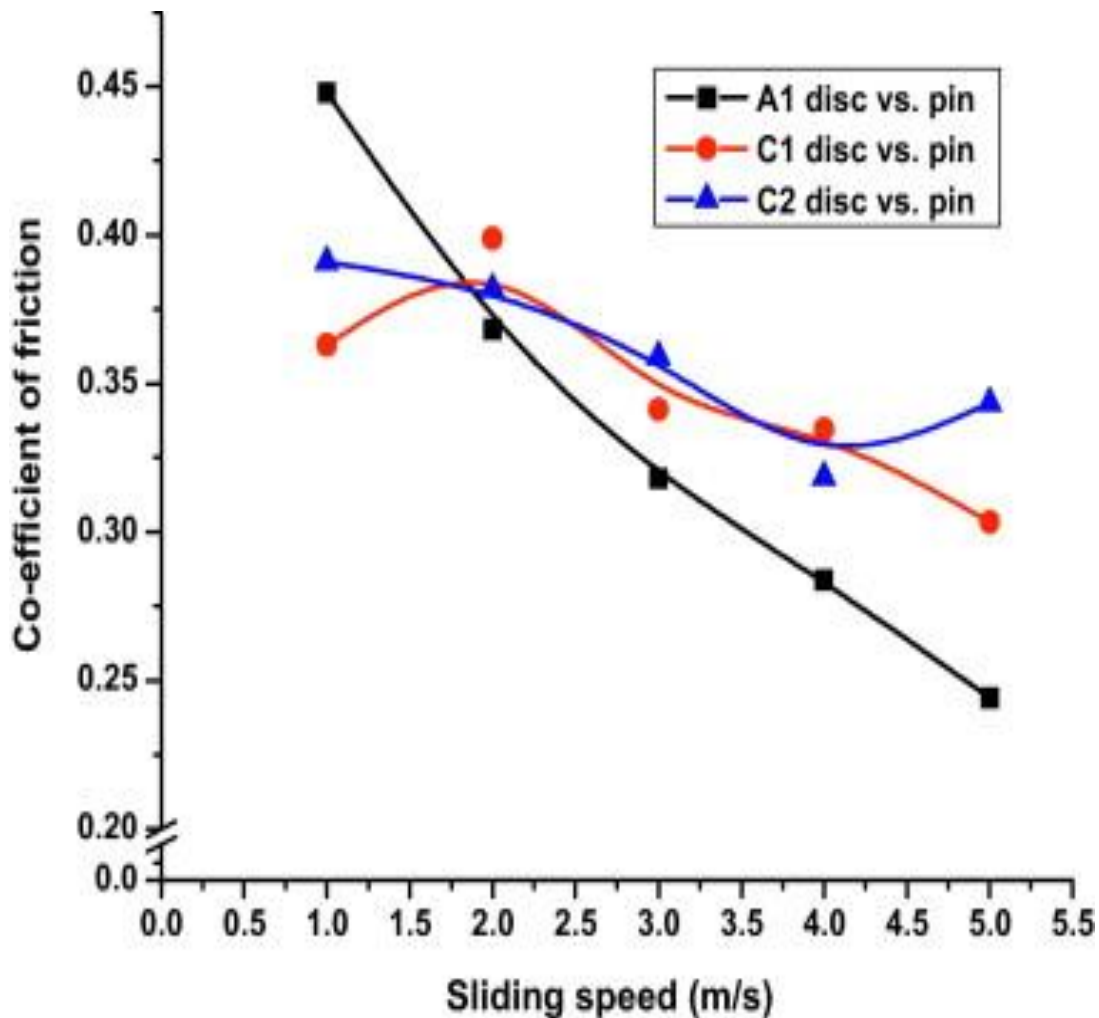
Вредности коефицијента трења крећу се у границама од (0.25 ÷ 0.68) за дати материјал.



Слика 17в. Коефицијент трења A356 + 25 % SiC [18]

Аутори: R.C. Shivamurthy и M.K. Surappa проучавали су триболошке карактеристике А356 легуре са додатком SiC.

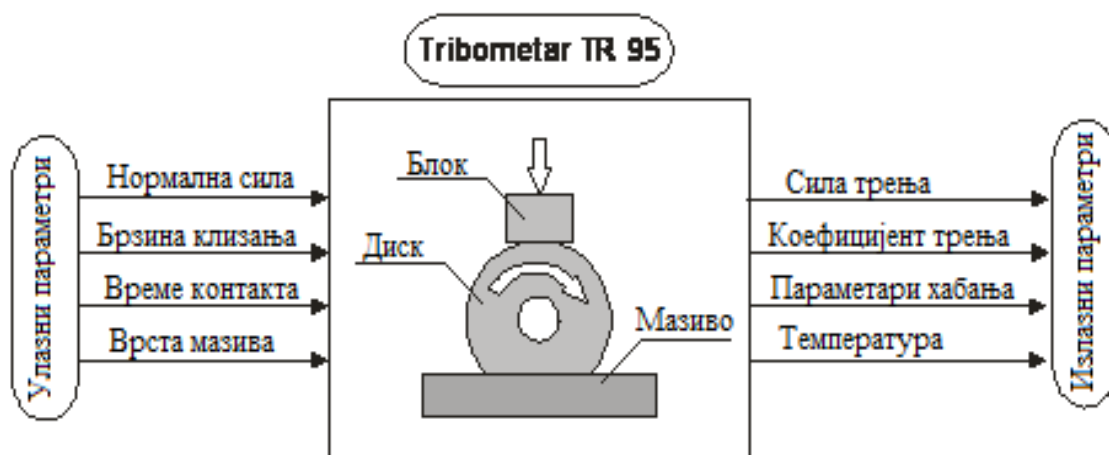
Вредности коефицијента трења крећу се у границама од $(0.23 \div 0.45)$ за дате материјале.



Слика 17г. Коефицијент трења А356 + 25 % SiC [19]

4.0. Уређаји за испитивање триболошких карактеристика

Испитивање триболошких карактеристика обављена су на унапређеном и комјутерски подржаном трибометру TR-95 са "block-on-disk" контактном геометријом у Центру за трибологију Факултета инжењерских наука у Крагујевцу (слика 18.)



Слика 18. Трибомеханички систем са улазним и излазним параметрима [14]

Трибометар TR-95 омогућава варирање услова контакта са аспекта облика, димензија и материјала контактних елемената, нормалног контактног оптерећења и брзине клизања. Испитивања се могу вршити у условима са подмазивањем и без подмазивања.

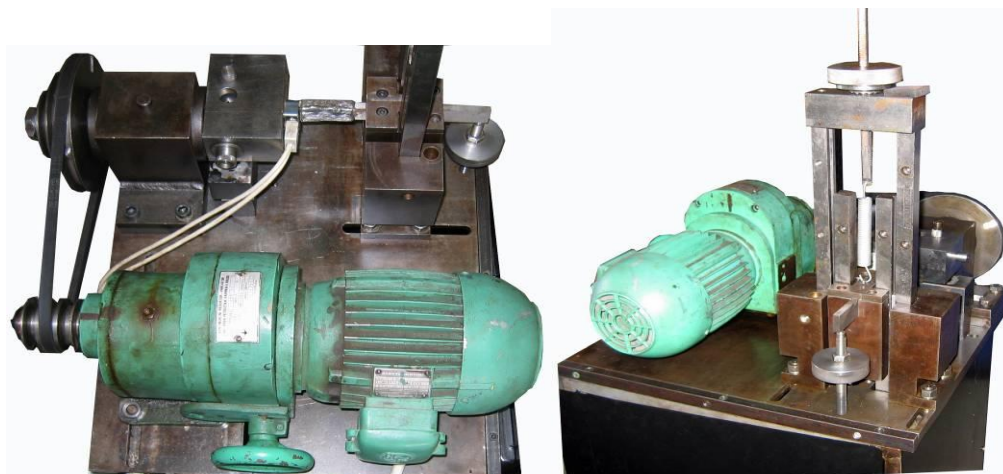
Основну конфигурацију трибометра чине: погонски систем, систем за оптерећење, систем за вођење, систем за подмазивање, систем за самоподешавање блока и мерни систем.

Погонски систем чини електромотор са ременицама, каишем и варијатором који омогућују варирање бројева обртаја од 100 до 1200 о/мин. На главном вратилу налази се ротациони диск. Систем за оптерећење помоћу тегова или навојним паром омогућује оптерећење контактних парова од 0 до 50 daN. Систем за вођење је реализован помоћу линеарних ваљкастих лежајева, код кога је преднапрезањем елиминисан зазор. Систем за подмазивање чине различите посуде за мазиво или систем за довод уља за подмазивање у зону контакта.

Систем за самоподешавање блока и диска има задатак да у сваком тренутку обезбеди преношење нормалног оптерећења у правцу осе диска и контакт целом дужином блока на диску. Овај систем је реализован конструкцијом специјалног ротирајућег носача блока (Слика 21.).[8]



Слика 19. Трибометар TP-95 [14]



Слика 20. Детаљи трибометра TP-95 [14]



Слика 21. Носач блока [14]

4.1. Мерни систем

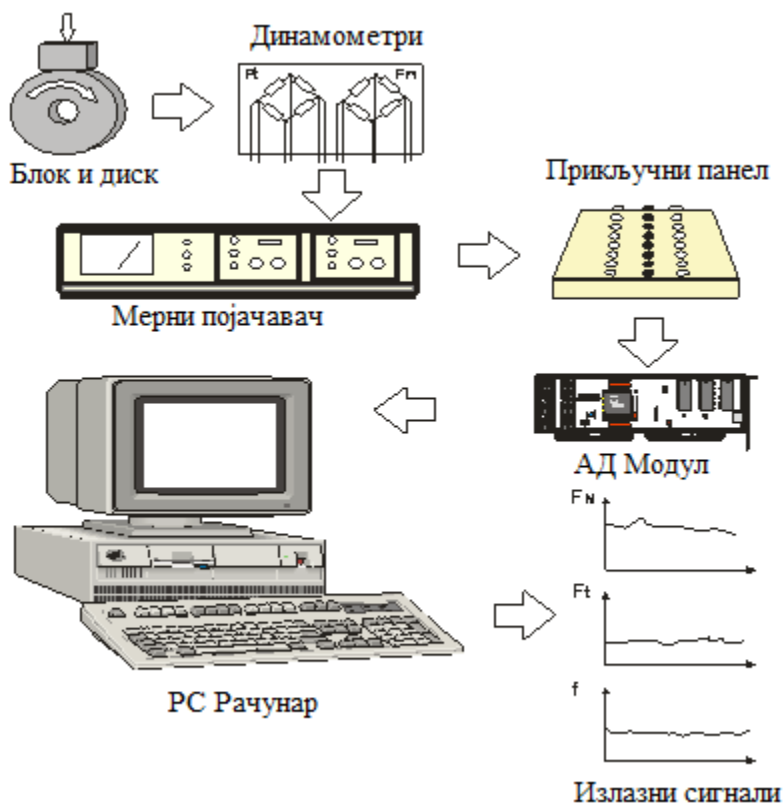
За експериментално испитивање формиран је и одговарајући мерни систем, чија је шема дата на слици 22.

Мерни систем се састоји од:

- динамометара (са мерним тракама повезане у пун *Wheaston-ov* мост),
- мерног појачавача,
- прикључног панела,
- АД претварача и
- РС рачунара.

Изглед мерног система дат је на слици 23. Овај мерни систем омогућава мерење нормалне силе и силе трења. Елиминисање утицаја тежине покретних елемената врши се посебним системом опруга. Мерни сигнали са давача сила се појачавају и уводе у рачунар помоћу двоканалног мерног моста - појачавача и А/Д конвертора.

Пре мерења било је потребно извршити калибрацију динамометара. Динамометри су оптерећивани теговима познате тежине, а одзив давача је регистрован у волтима за познате улазне величине (силе и daN). На основу овако добијених зависности формиране су калибрационе криве и одређене калибрационе константе, слика 24. Калибрационе константе су уведене у мерни ланац, тако да је као резултат мерења на излазу добијана вредност мерних величина F_n и F_t у њиховим физичким јединицама (daN). [14]

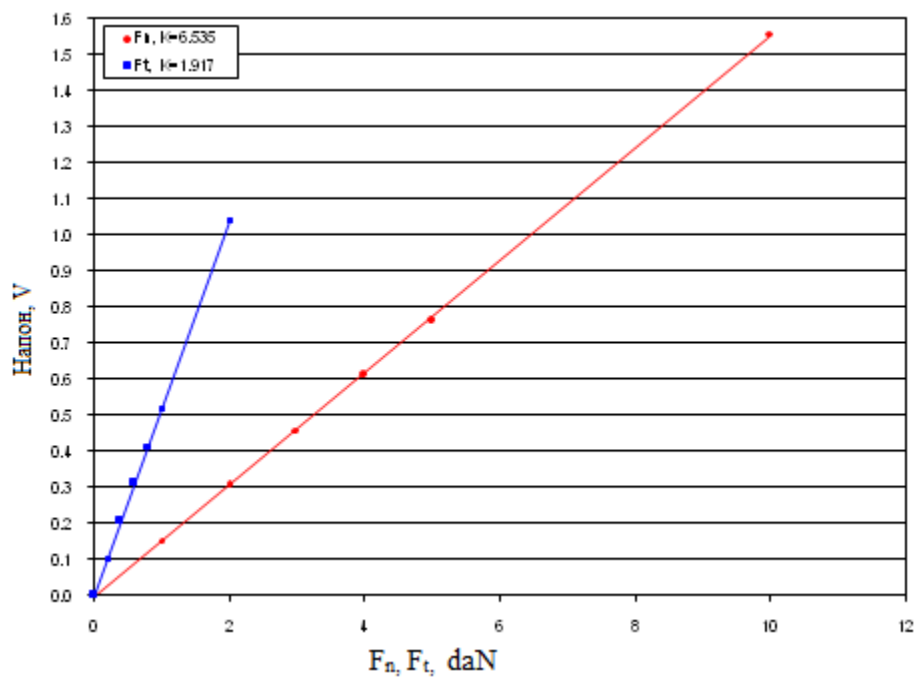


Слика 22. Шема мерног система [14]

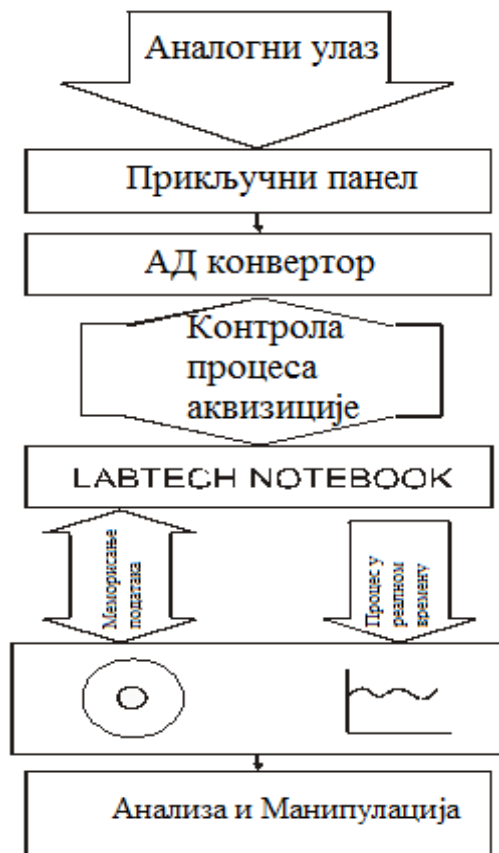


Слика 23. Изглед мерног система [14]

Калибрација динамометара је вршена у оба смера (на притисак и истезање) улазног оптерећења и при томе калибрационе криве се поклапају.

Слика 24. Калибрационе зависности F_n и F_t динамометара [14]

Функционисање мерног система одвија се кроз процес АД конверзије и аквизиције сигнала нормалне силе F_N и силе трења F_M , како би се добио рачунски сигнал коефицијента трења. Одвијање АД конверзије, аквизиција података и њихове анализе, приказане су блок дијаграмом на слици 25.



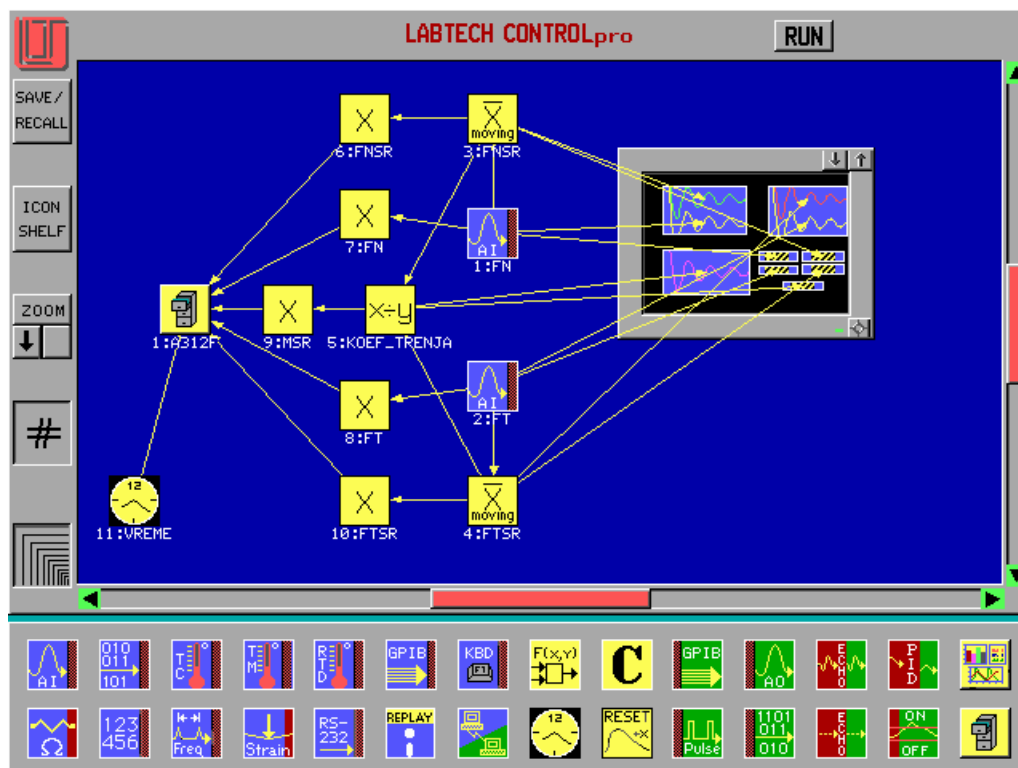
Слика 25. Блок дијаграм процеса аквизиције података [14]

Аналогни сигнали сила F_N и F_M доводе се са динамометара (мерних давача), преко појачавача на прикључни панел који служи као интерфејс између уређаја и РС рачунара. Са прикључног панела сигнали се доводе на АД конвертор (претварач) који је израђен у виду модула (картице) и смештен је у слот РС рачунара.

За аквизицију података коришћен је софтвер *Labtech Notebook* верзија 7.0. За праћење процеса и запис сигнала на диск рачунара, израђена је одговарајућа корисничка апликација, слика 26.

Ова апликација омогућава:

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

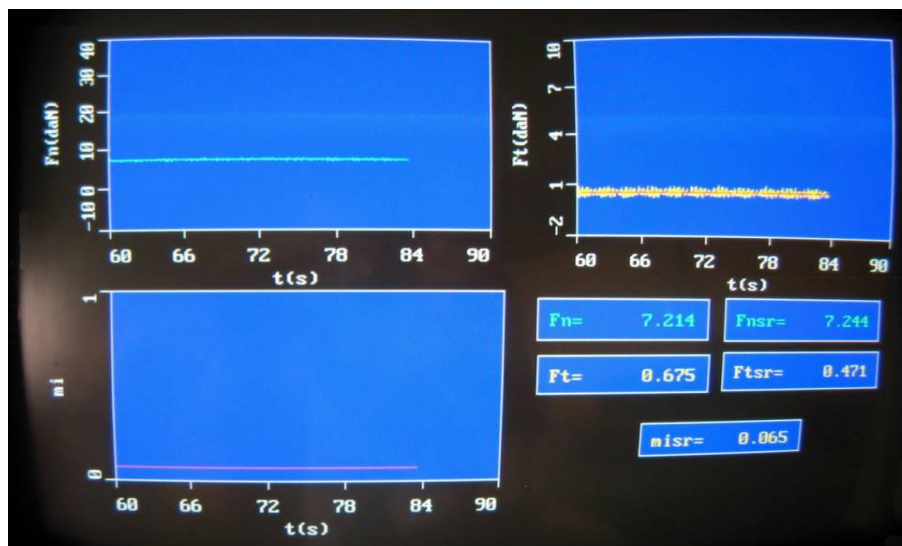


Слика 26. Корисничка апликација израђена у Labtech Notebook-у [14]

Помоћу софтвера са А/Д конвертора прикупљају се подаци о вредностима мерених величина (нормална сила и сила трења). Софтвер омогућава да се врши креирање нових података на бази мерених вредности. Ова могућност је искоришћена за аутоматско генерисање коефицијента трења μ у реалном времену, коришћењем математичке операције дељења тренутних података силе трења и нормалног оптерећења. Поред тога, формиране су и средње вредности нормалне силе и силе трења $F_n(sr)$ и $F_m(sr)$ методом покретних средина.

Ова метода се састоји у томе што се уместо сваке реално измерене величине временске серије узима аритметичка средина низа података у коме је она средња. Током мерења коришћена је аритметичка средина 5 тачака, што значи да се првом аритметичком средином замењује трећа тачка, затим аритметичком средином од друге до шесте тачке, смењује се четврта тачка итд. Овакава метода покретних средина има за циљ уједначавање линија тренда, али и поштовање основних варијација временских серија. Подаци се заједно са подацима о мереним силама приказују на екрану монитора и снимају на диск рачунара. Креирана датотека на диску рачунара је у облику ASCII датотеке..

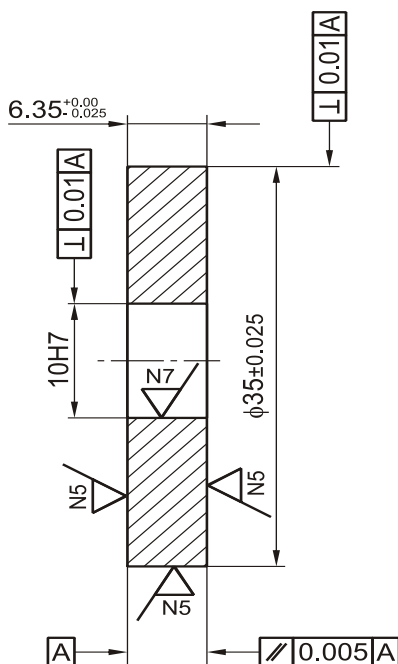
Квалитет софтвера се огледа у прегледном радном окружењу (мониторингу процеса испитивања), које пружа не само графички приказ сигнала мерене величине већ њену тренутну нумеричку вредност и осредњену вредност у одређеном временском интервалу, слика 27. [14]



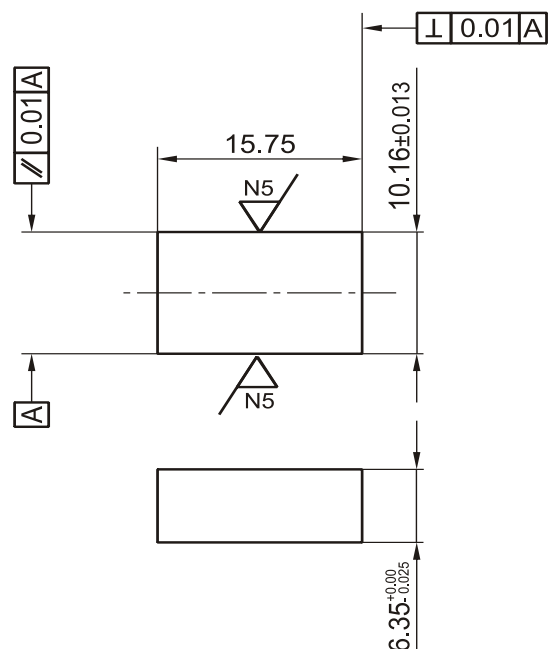
Слика 27. Сигнали тренутних и осредњих вредности F_n , F_t [14]

4.2. Контактни елементи

Испитивани контактни пар одговара захтевима ASTM G 77 стандарда. Сачињава га ротациони диск пречника $D_d=35$ mm и ширине $b_d=6.35$ mm и стационарни блок ширине $b_b=6.35$ mm, дужине $l_b=15.75$ mm и висине $h_b=10.16$ mm (слике 28. и 29).



Слика 28. Димензије диска према ASTM G 77 стандарду [14]



Слика 29. Димензије блока према ASTM G 77 стандарду [14]

Дискови су израђивани од челика $\check{S}$ 3840 тврдоће 62 - 64 HRC са брушеним површинама, хrapавости $Ra=0.45 \mu m$, а блокови од алуминијумских композитних материјала на бази A356. Фотографски приказ блока и диска као и контактна геометрија, дат је на слици 30.



Слика 30. Диск и блок [14]

5.0. Материјал

5.1. Композити на бази А356 легуре

Као основа за добијање композита коришћена је подеутектичка Al-Si легура EN AlSi7Mg0,3 (А356 легура) хемијског састава датог у табели 4.

Table 4. Хемијски састав (мас. %) А356 легуре

Елемент	Si	Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Ni	Ti	Al
Проценат	7,20	0,02	0,29	0,01	0,18	0,01	0,02	0,11	остатак

А356 легура је легура алуминијума са силицијумом уз додатак мале количине магнезијума, предвиђена за ливење. Широко је примењена у аутомобилској и авионској индустрији. Одликује се одличном ливкошћу и отпорношћу на корозију. Термичком обрадом, посебно Т6 режимом термичке обраде значајно се побољшавају њене механичке карактеристике.

С обзиром на постављени задатак и изабрани технолошки поступак добијања композита у Лабораторији за материјале Института за нуклеарне науке “Винча” развијени су хибридни композити са алуминијумском матрицом од А356 легуре и ојачивачима SiC и графитом.

Композити су добијени компокастинг поступком (инфилтрацијом честица ојачивача у полуочврсли растоп А356 легуре) применом лабораторијске опреме, која се састојала од процесног дела и дела за мерење и регулацију температуре. Керамички лонац је био израђен од алумине из више слојева. [12]

5.2. Апаратура за добијање композита

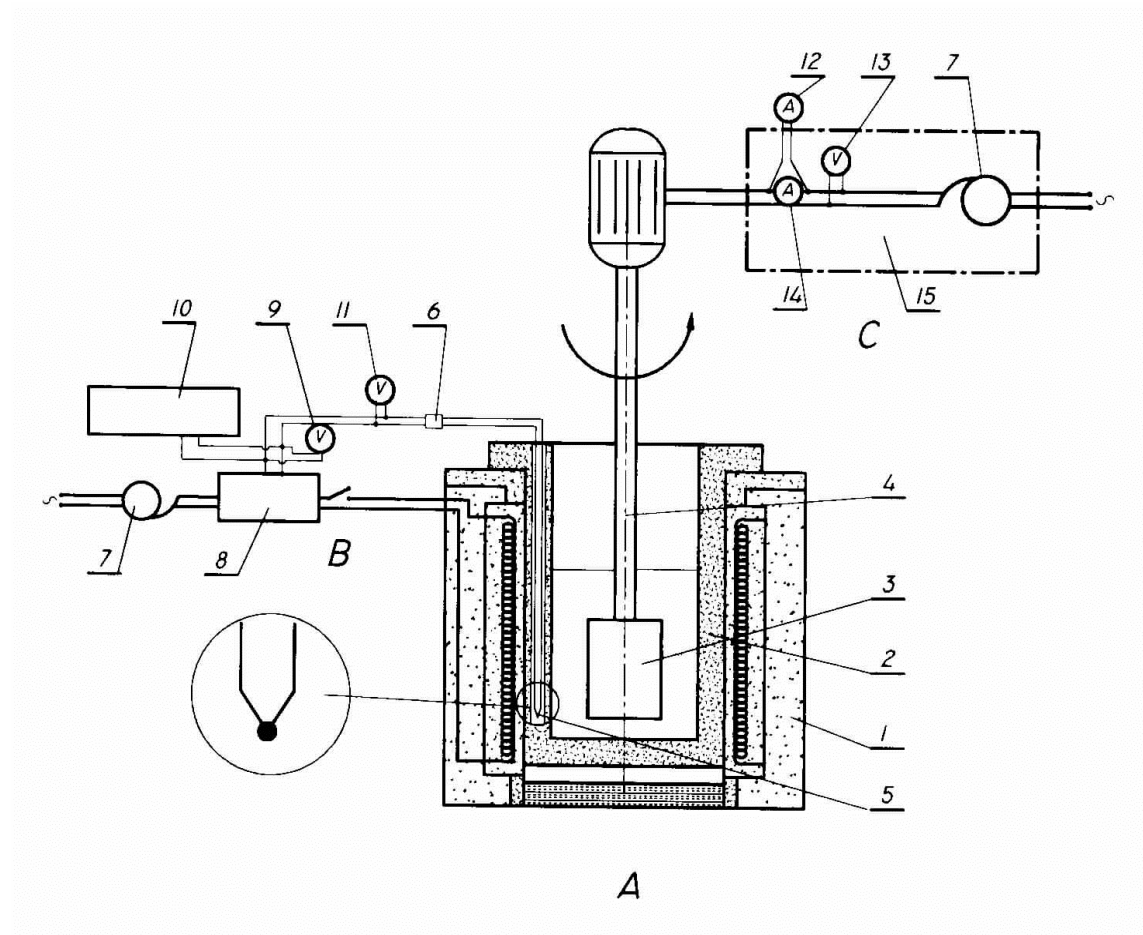
За потребе добијања композитних материјала коришћена је апаратура која је шематски приказана на слици 50. Апаратура се састоји из три дела: процесног дела (А), дела за мерење, контролу и регулацију температуре (В) и дела за мерење и контролу електричних параметара рада мешача (С) [10].

Процесни део састоји се из лабораторијске електроотпорне пећи и мешача. Лабораторијска пећ (1), снаге 2.5 kW шематски је приказа на слици 51. Грејно тело је жица од кантала уграђена у одговарајуће елементе од шамота. Ови елементи додатно су изоловани, чиме је обезбеђен режим хлађења растопа са брзином од 5°C/мин по искључењу пећи из мреже. Радни део пећи је цилиндричан отвор у који је могуће ставити лонац од материјала по избору.

При добијању композитних материјала коришћена је посуда од алумине, посебно израђена за потребе компокастинг поступка, отпорна на термо шокове и механичке ударе. У зид

посуде уграђена је уска цев од алумине у коју је смештен термопар хромел-алумел (5, слика 31). Основне димензије посуде су: спољни пречник 85 mm, унутрашњи 75 mm.

Процесном делу апаратуре припада и лабораторијски мешач (5, слика 31) снаге 250 W при максималном броју обртаја од 600 о/мин, и напону од 220V, са уграђеним потенциометром за ручно подешавање брзине обртања. Као активни део мешача коришћена је плоча од челичног лима на којој је плазма-поступком нанесен танак слој алуминијум оксида. Пречник круга коју описује плоча при обртању (дужина доње ивице плоче) је 40 mm.



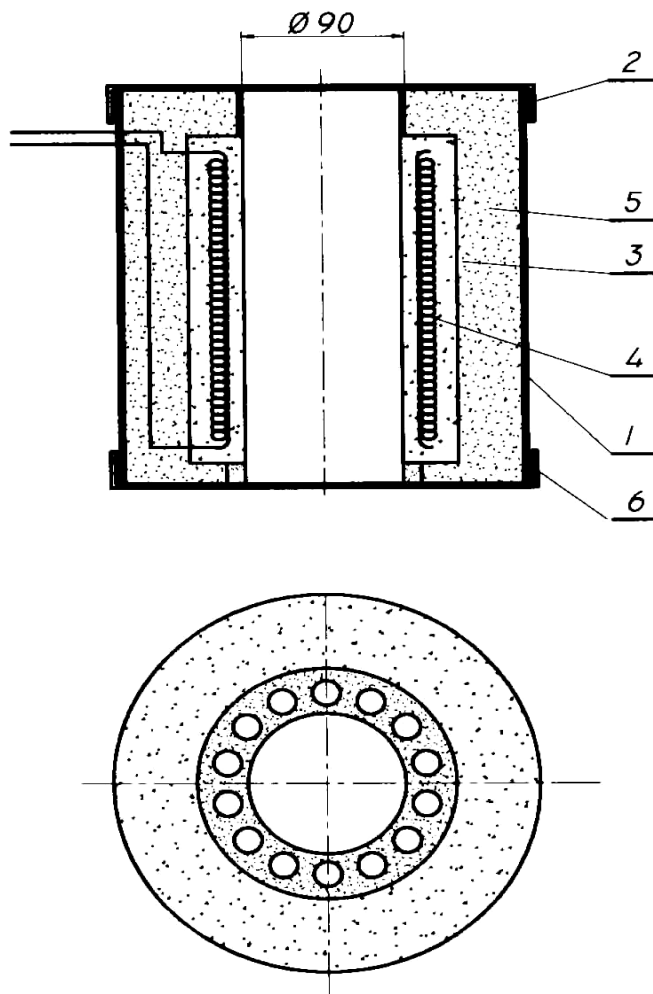
А. Процесни део, В. Део за контролу и регулацију температуре,

С. Део за мерење и контролу електричних параметара.

1. Електроотпорна пећ, 2. Посуда од графита, 3. Активни део мешача, 4. Вратило, 5. Термопар, 6. Мешач, 7. Аутотрансформатор, 8. Регулатор температуре, 9. Прецизни волтметар,
10. Писач, 11. Контролни мерач напона, 12. Прецизни амперметар, 13. Волтметар, 14. Амперметар, 15. Метални ормар, 16. Хладан спој термопара,

Слика 31. Шематски приказ апаратуре за добијање композита [6]

Део апаратуре за мерење, контролу и регулацију температуре (слика 32) састављен је од следећих елемената: термопара хромел-алумел (5), регулатора температуре мерног опсега од 25 до 1200°C (8), универзалног мерног инструмента (9) који је спрегнут са термопаром и регулатором. Радни опсег му је од 0 до 2000 mV. Повремено је коришћен и писач (10) као и контролни дигитални мерач ниских напона (11).



1. Омотач пећи израђен од челичног лима, 2. Поклопци (горњи и доњи) израђени од челичног лима, 3. Грејачи, 4. Изолациони слој од азбеста, 5. Простор попуњен молохитним песком

Слика 32. Шематски приказ лабораторијске електроотпорне пећи [6]

6. План испитивања

Контактни услови:

1. Узорак – Узорак – композит са основом A356
 - A356+10 % SiC
 - A356+10 % SiC+1 % Gr
 - A356+10 % SiC+3 % Gr
 - A356+10 % SiC+5 % Gr
2. Контра тело – челични диск Č6980
3. Тип кретања – клизање
4. Нормално оптерећење – 10N, 20N и 30N, константно,
5. Брзине клизања – 0.25 m/s, 0.5 m/s, и 1 m/s константна

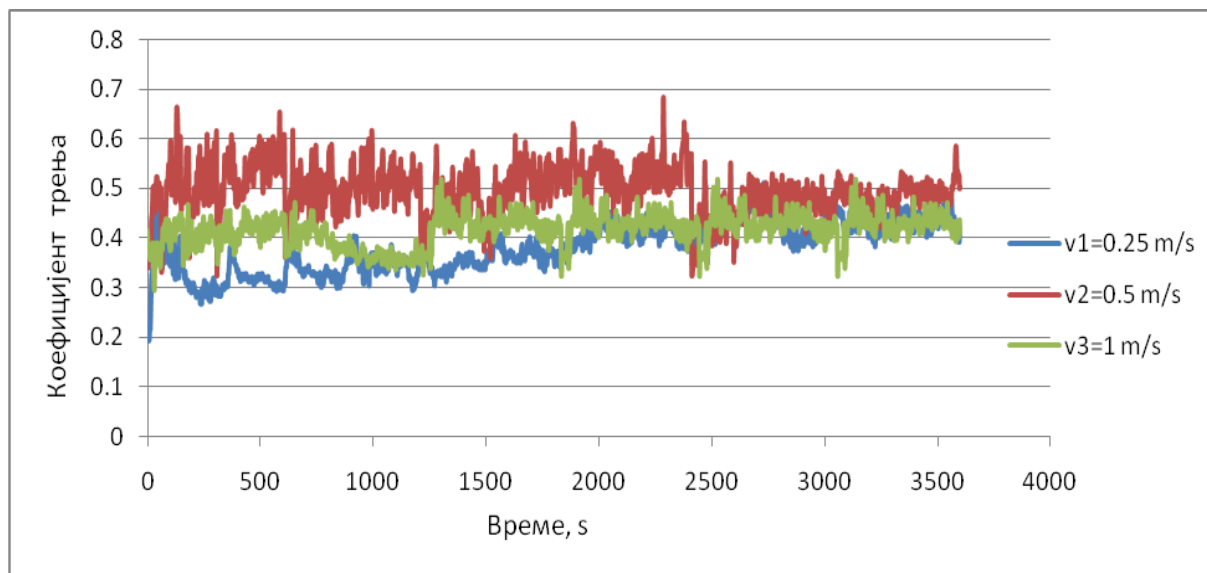
Мерени су само основни технолошки параметри: сила,односно коефицијент трења.

Испитивања су вршена без подмазивања уз варирање три брзине клизања (0.25 m/s, 0.50 m/s и 1.0 m/s) и три нивоа нормалног контактеног оптерећења (10 N, 20 N и 30 N).

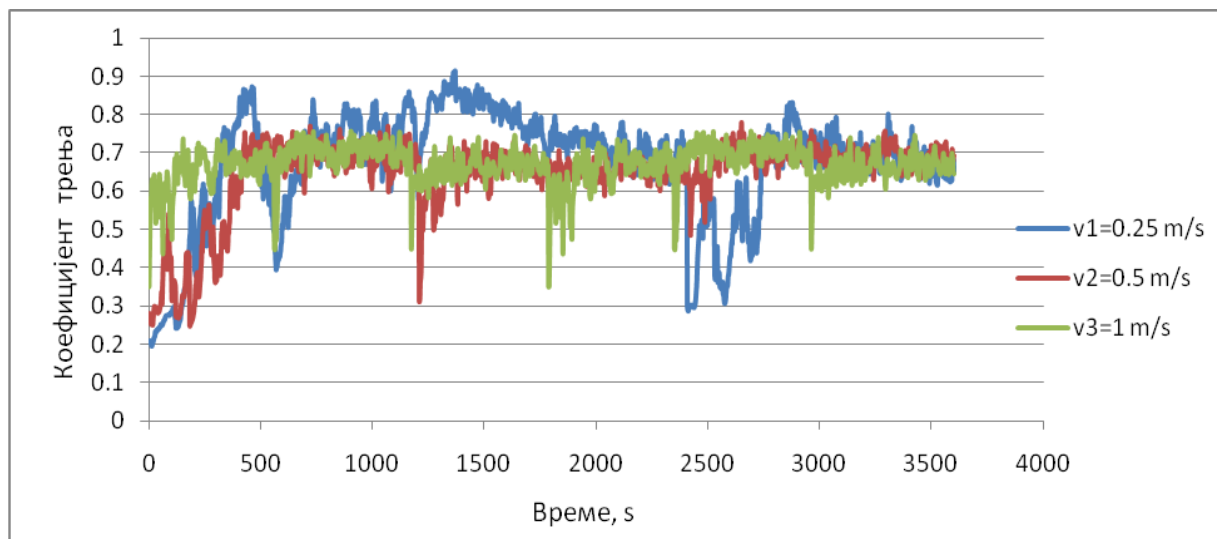
Сваки експеримент је поновљен по три пута како би се учила поновљивост резултата која је била задовољавајућа. Коефицијент трења је узет као средња вредност од сва три мерења.

7. Сигнали коефицијента трења

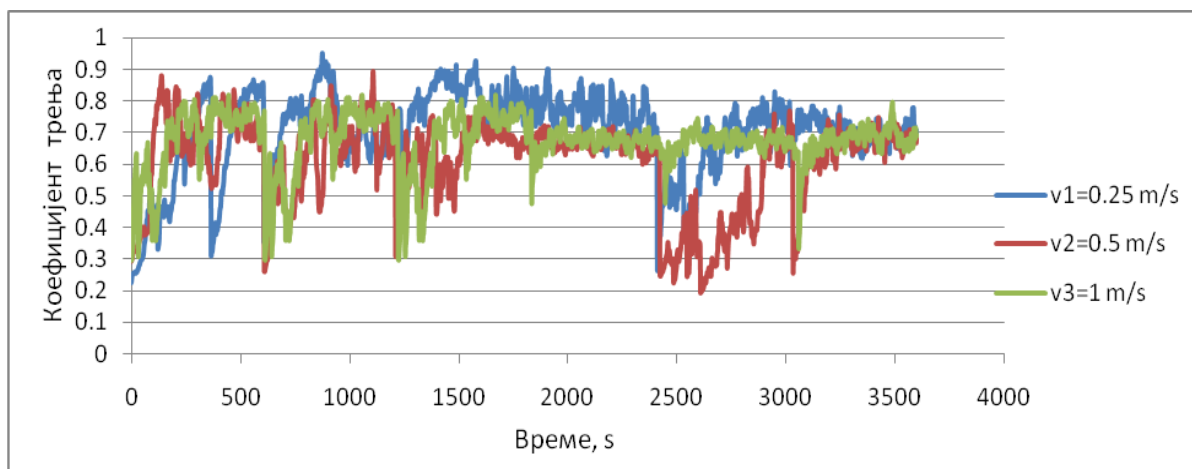
На основу експерименталних испитивања према описаној процедури формирани су и претстављени сигнали коефицијента трења.



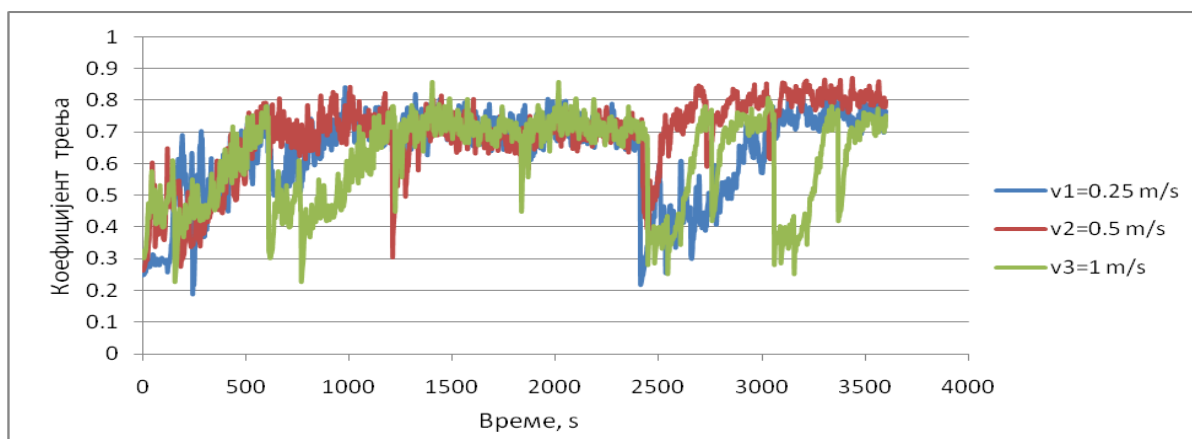
Слика 33. Сигнал коефицијента трења, A356



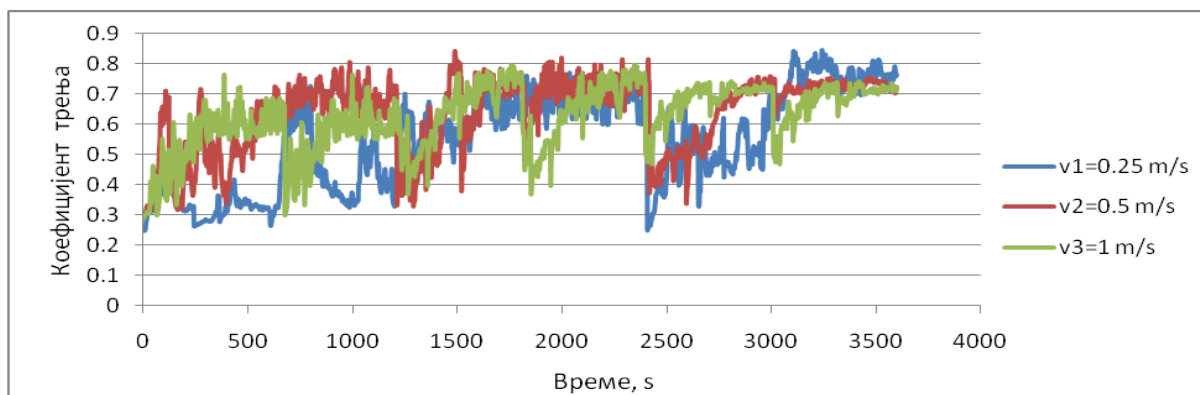
Слика 34. Сигнал коефицијента трења A356 + 10 % SiC



Слика 35. Сигнал коефицијента трења $A356 + 10\% \text{ SiC} + 1\% \text{ Графит}$



Слика 36. Сигнал коефицијента трења $A356 + 10\% \text{ SiC} + 3\% \text{ Графит}$



Слика 37. Сигнал коефицијента трења $A356 + 10\% \text{ SiC} + 5\% \text{ Графит}$

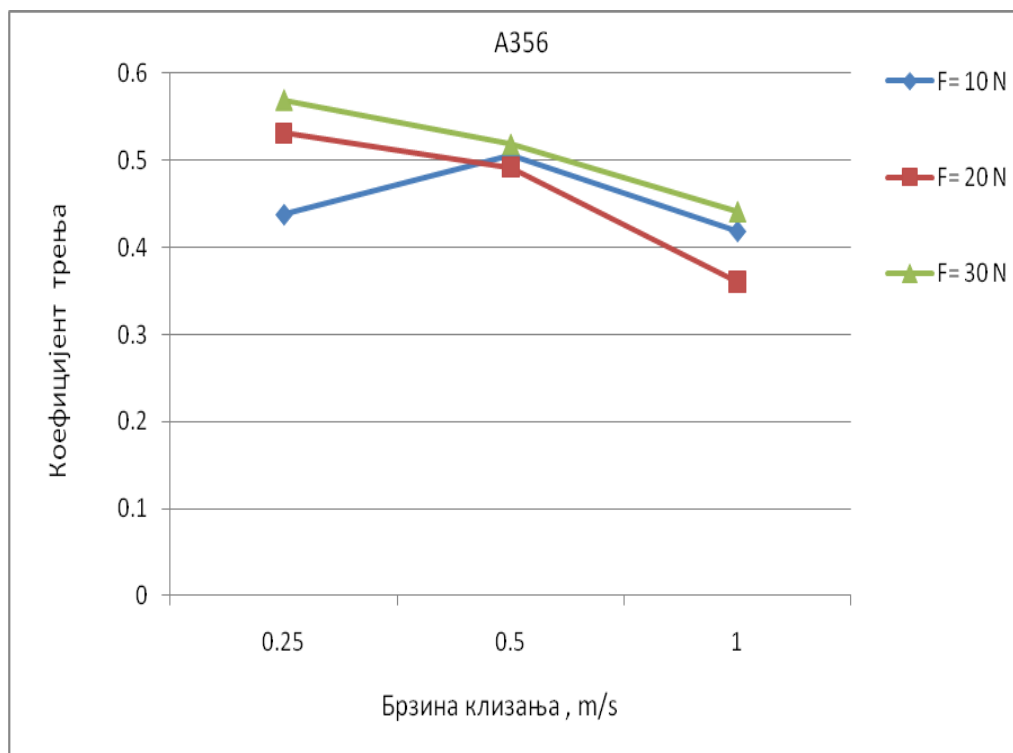
8. Резултати испитивања

У овом поглављу су представљени добијени резултати испитивања, у виду табела и дијаграма.

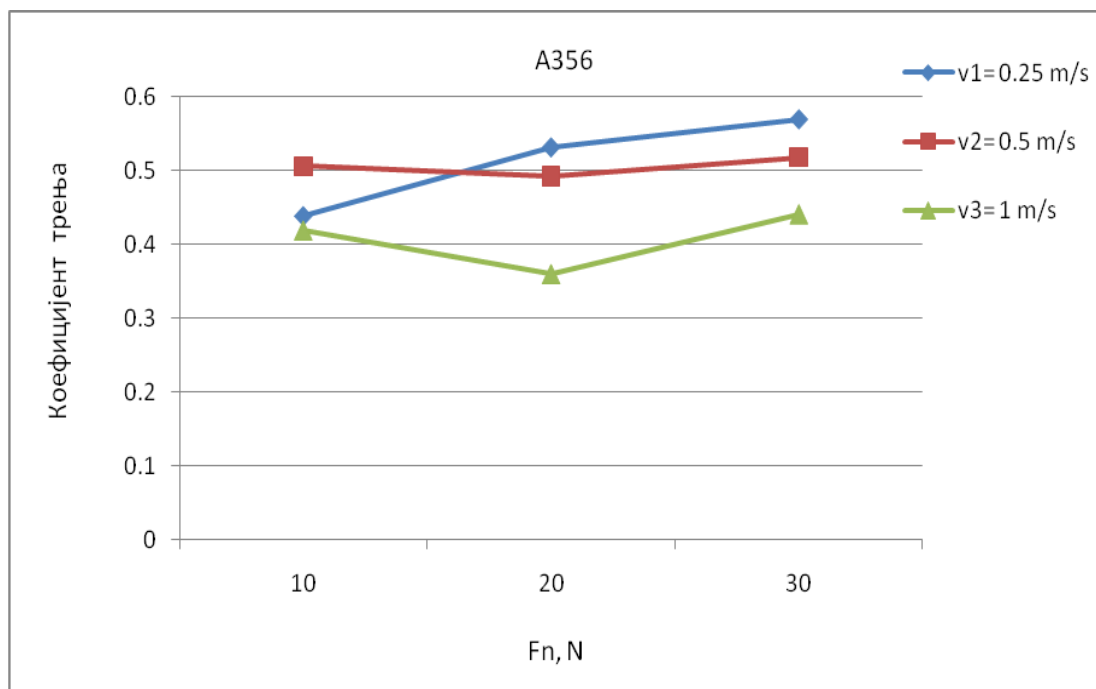
Табела 5. Коефицијент трења основног материјала A356

V (m/s)	F _n (N)	Коефицијент трења μ
0.25	10	0.438
	20	0.531
	30	0.569
0.5	10	0.506
	20	0.492
	30	0.518
1.0	10	0.419
	20	0.36
	30	0.441

На основу табеле формиране су дијаграмске зависности коефицијента трења од брзине клизања и нормалног оптерећења (слике 38 и 39).



Слика 38. Коефицијент трења - A356

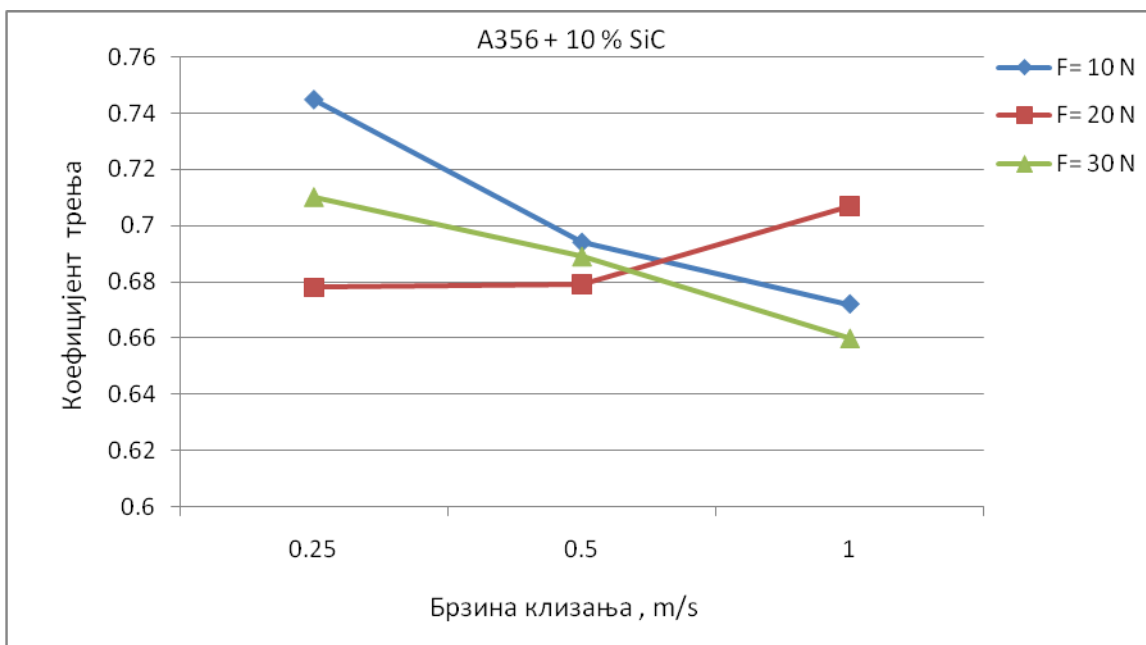


Слика 39. Коефицијент трења - A356

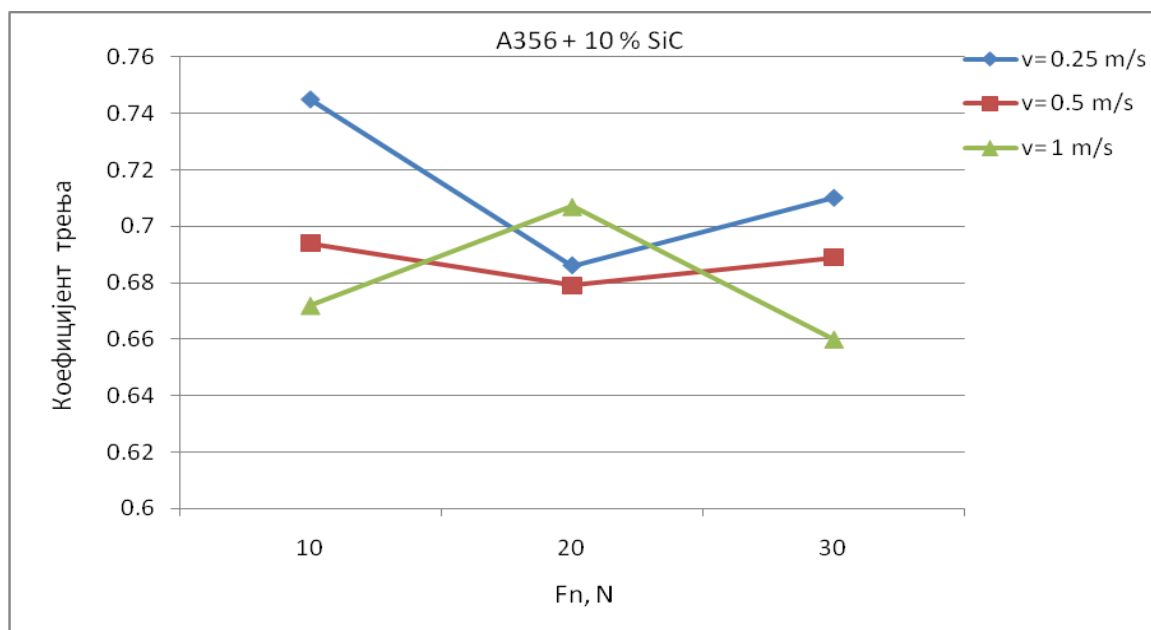
Табела 6. Коефицијент трења композитног материјала A356 + 10 % SiC

V (m/s)	Fn (N)	Коефицијент трења μ
0.25	10	0.745
	20	0.678
	30	0.71
0.5	10	0.694
	20	0.679
	30	0.689
1.0	10	0.672
	20	0.707
	30	0.66

На основу табеле формиране су дијаграмске зависности коефицијента трења од брзине клизања и нормалног оптерећења (слике 40 и 41).



Слика 40. Коефицијент трења - A356 + 10 % SiC

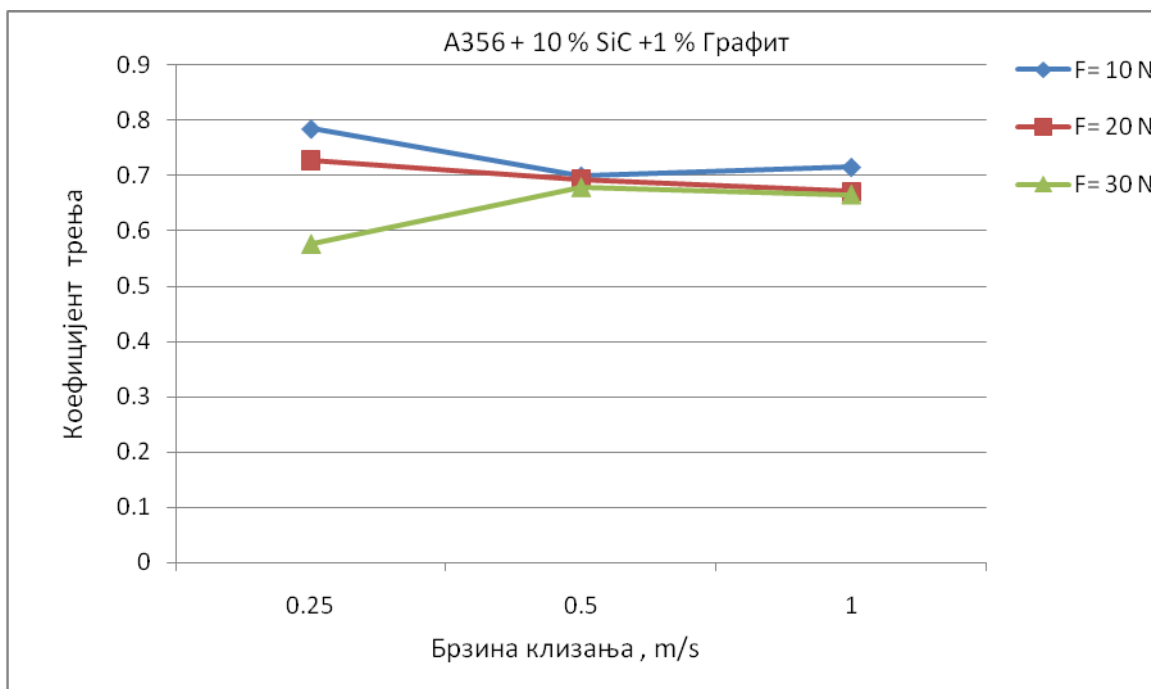


Слика 41. Коефицијент трења - A356 + 10 % SiC

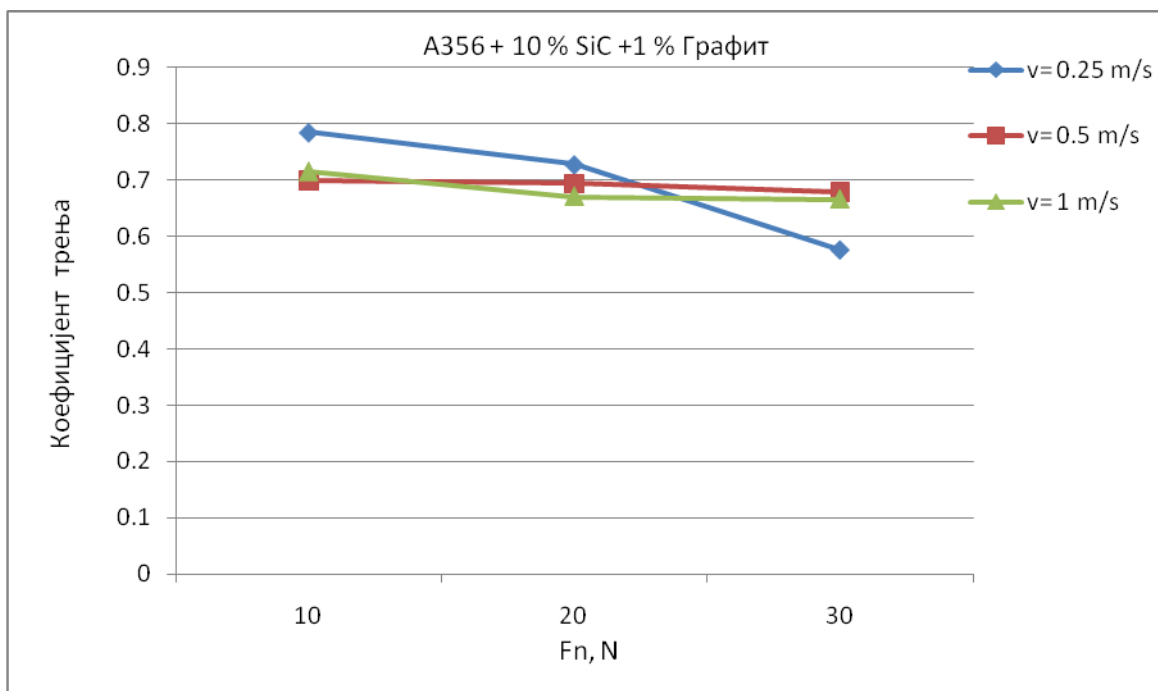
Табела 7. Коефицијент трења композитног материјала A356 + 10 % SiC + 1 % Графит

V (m/s)	Fn (N)	Коефицијент трења μ
0.25	10	0.758
	20	0.728
	30	0.577
0.5	10	0.699
	20	0.694
	30	0.679
1.0	10	0.715
	20	0.671
	30	0.666

На основу табеле формиране су дијаграмске зависности коефицијента трења од брзине клизања и нормалног оптерећења (слике 42 и 43).



Слика 42. Коефицијент трења - A356 + 10 % SiC + 1 % Графит

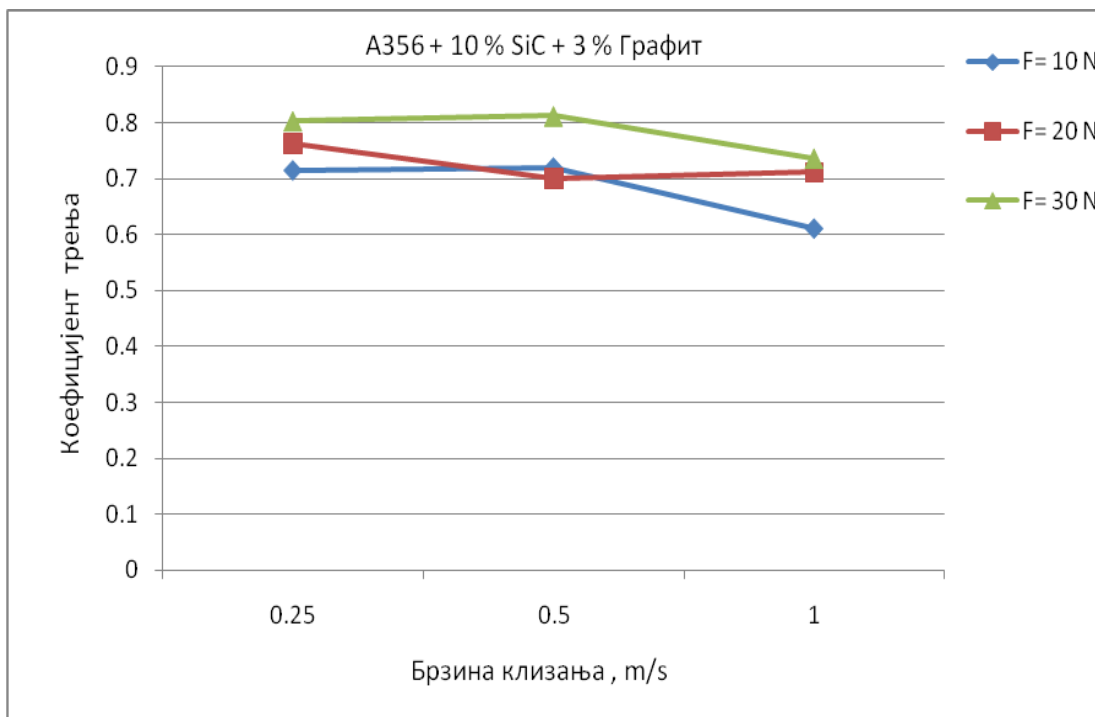


Слика 43. Коефицијент трења - A356 + 10 % SiC + 1 % Графит

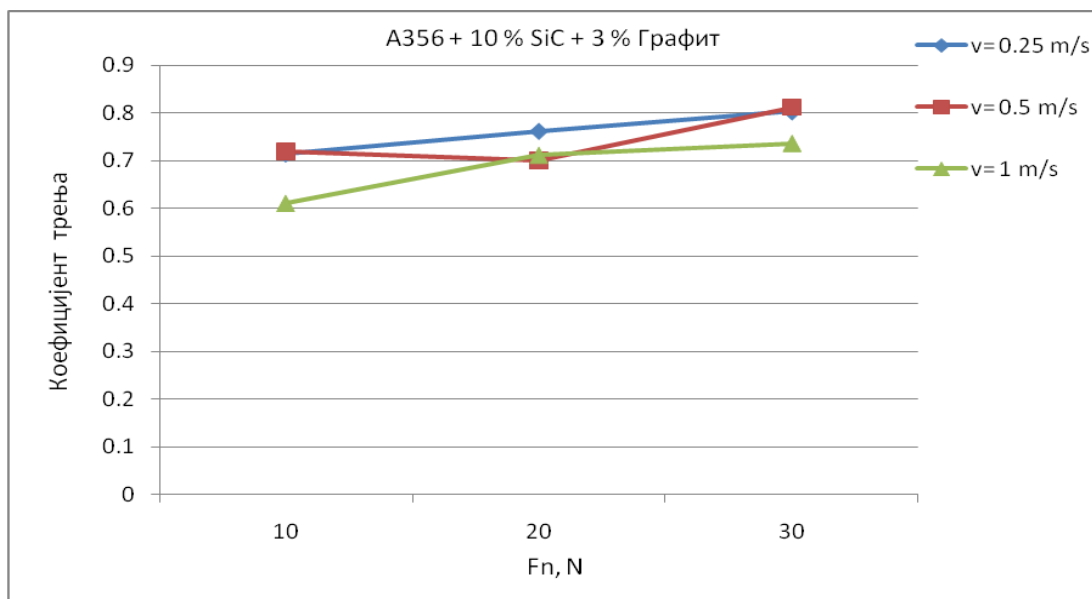
Табела 8. Коефицијент трења композитног материјала A356 + 10 % SiC + 3 % Графит

V (m/s)	Fn (N)	Коефицијент трења μ
0.25	10	0.654
	20	0.761
	30	0.843
0.5	10	0.686
	20	0.729
	30	0.722
1.0	10	0.605
	20	0.72
	30	0.709

На основу табеле формиране су дијаграмске зависности коефицијента трења од брзине клизања и нормалног оптерећења (слике 44 и 45).



Слика 44. Коефицијент трења - A356 + 10 % SiC + 3 % Графит

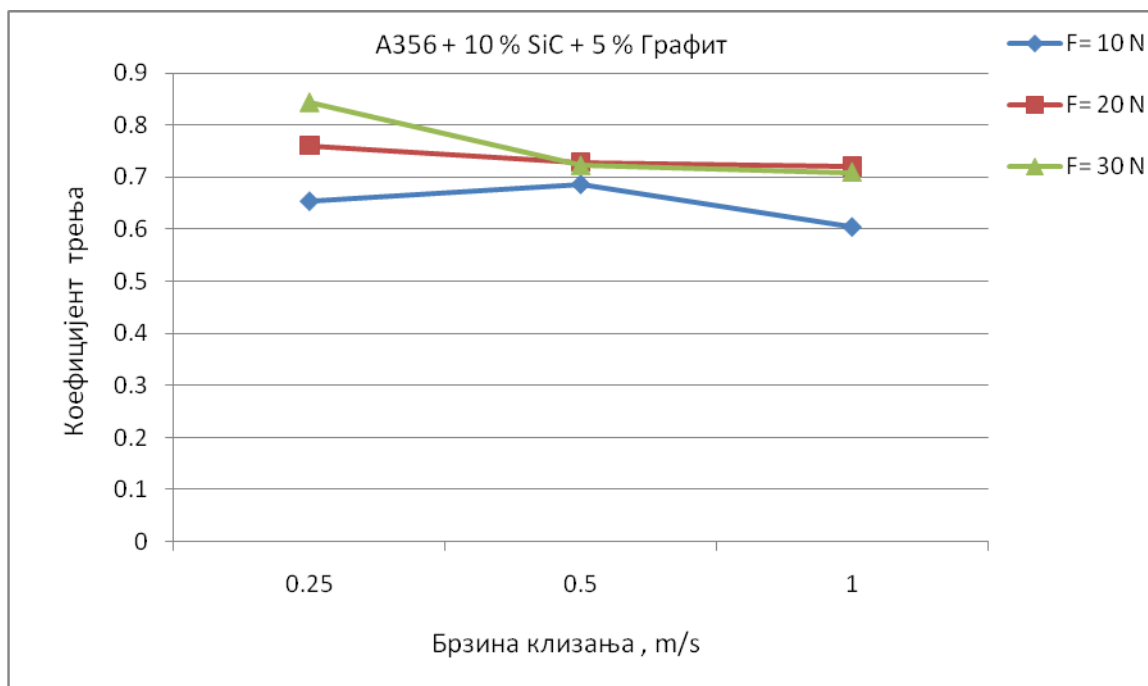


Слика 45. Коефицијент трења - A356 + 10 % SiC + 3 % Графит

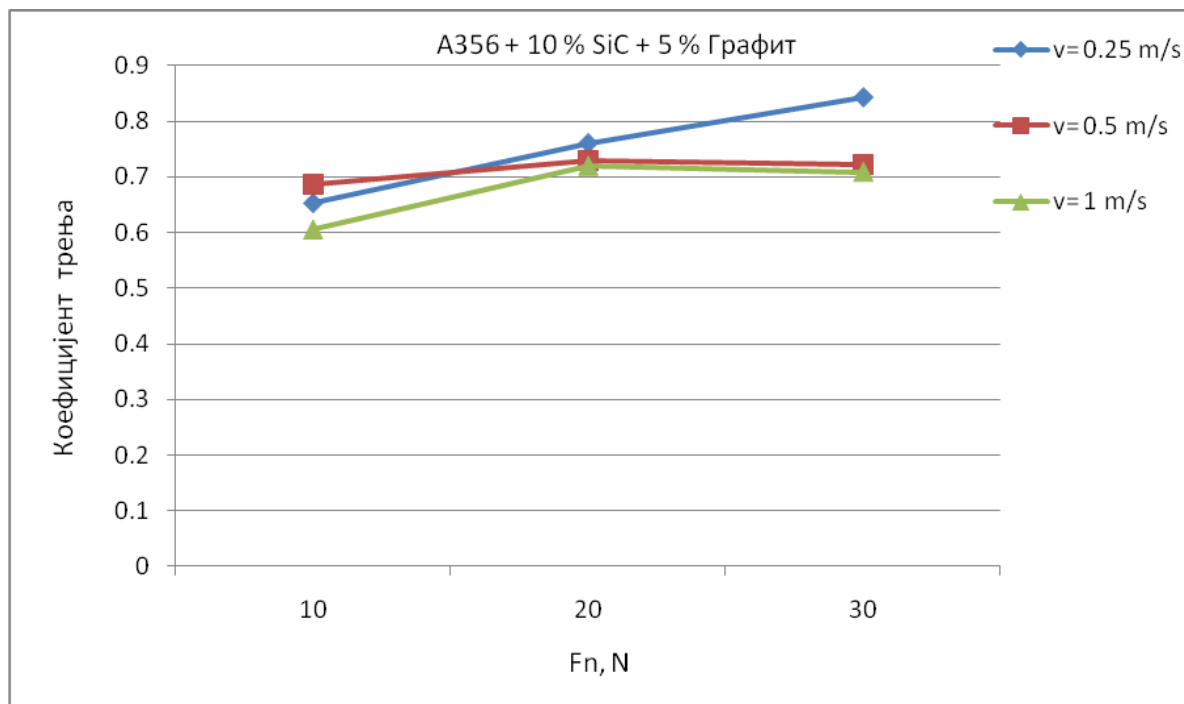
Табела 9. Коефицијент трења композитног материјала A356 + 10 % SiC + 5 % Графит

V (m/s)	Fn (N)	Коефицијент трења μ
0.25	10	0.714
	20	0.762
	30	0.803
0.5	10	0.719
	20	0.7
	30	0.812
1.0	10	0.61
	20	0.711
	30	0.736

На основу табеле формиране су дијаграмске зависности коефицијента трења од брзине клизања и нормалног оптерећења (слике 46 и 47).



Слика 46. Коефицијент трења - A356 + 10 % SiC + 5 % Графит



Слика 47. Коефицијент трења - A356 + 10 % SiC + 5 % Графит

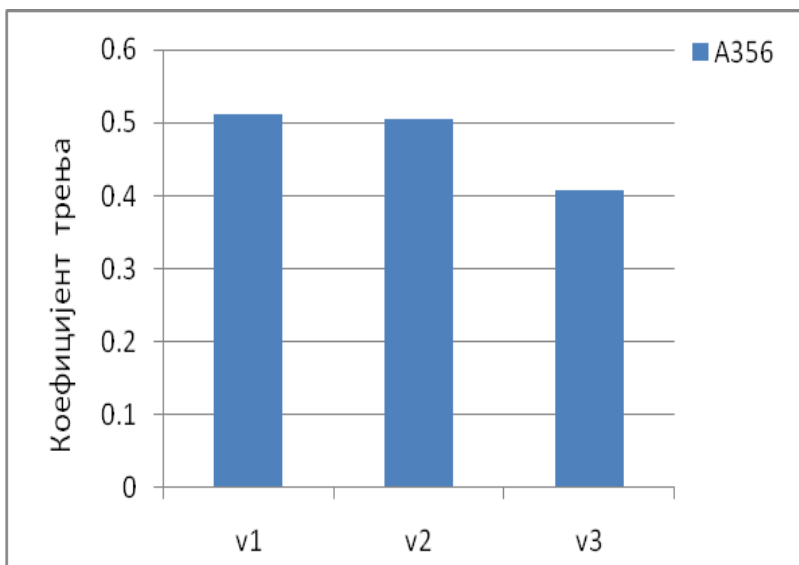
8. Анализа резултата

Током експерименталних испитивања према описаној процедури континуално је праћен коефицијент трења, који је меморисан у виду временских серија. На основу добијених временских промена коефицијента трења током трајања контакта формиране су средње серије, у којима свака дискретна вредност представља аритметичку средину дискретних вредности свих понављања за дати тренутак дискретизације. Вредности коефицијента трења добијене на овај начин биле су меродавне за даљу анализу. Испитивање је вршено у времену трајања трења блока по диску од 60 минута. При сваком испитивању контактне површине су детаљно чишћене бензином како би се уклониле нечистоће које би могле да утичу на поузданост мерења.

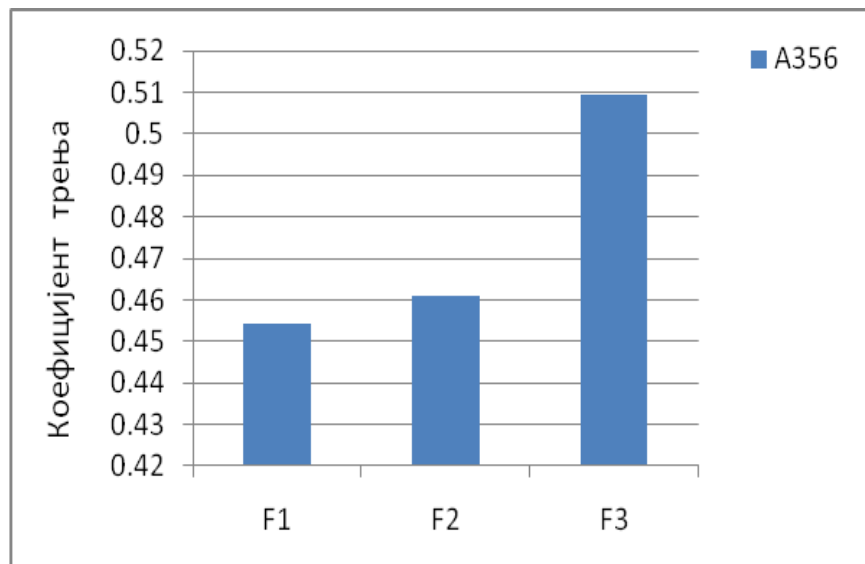
Са дијаграмских приказа (слике 38, 40, 42, 44 и 46) утврђено је да са порастом брзине клизања за константне вредности нормалног оптерећења (10, 20 и 30 N) коефицијент трења опада за све испитиване узорке. Овај тренд пада вредности коефицијента трења је готово идентичан при свим контактним условима.

Са дијаграмских приказа (слике 39, 41 и 47) утврђено је да са порастом нормалног оптерећења за константне вредности брзине клизања (0.25 m/s, 0.5 m/s и 1 m/s) коефицијент трења расте, а са дијаграмских приказа (слике 43 и 45) са порастом нормалног оптерећења за константне вредности брзине клизања (0.25 m/s, 0.5 m/s и 1 m/s) коефицијент трења опада.

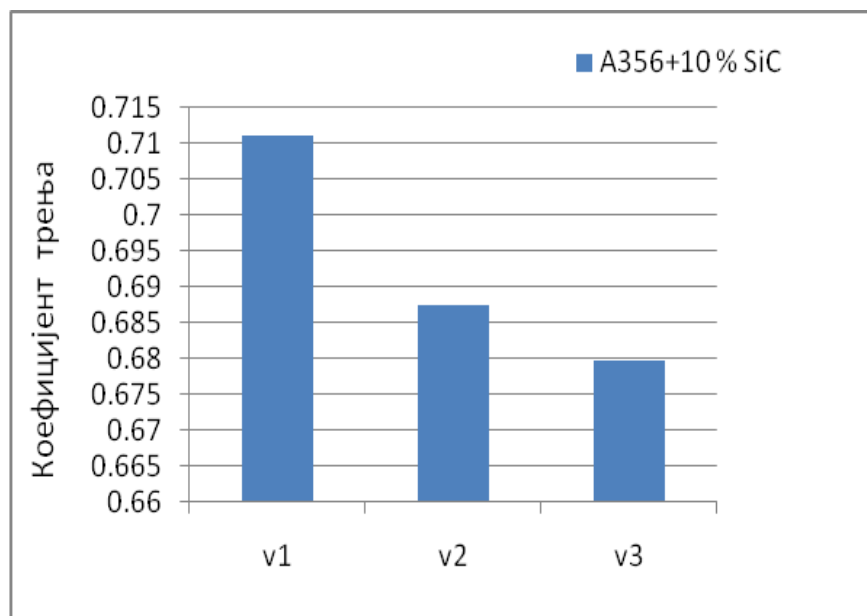
На основу спроведених триболошких испитивања формирани су одговарајући хистограмски прикази, где је приказан ниво коефицијента трења испитиваних материјала у условима без примене мазива. (слике 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56 и 57)



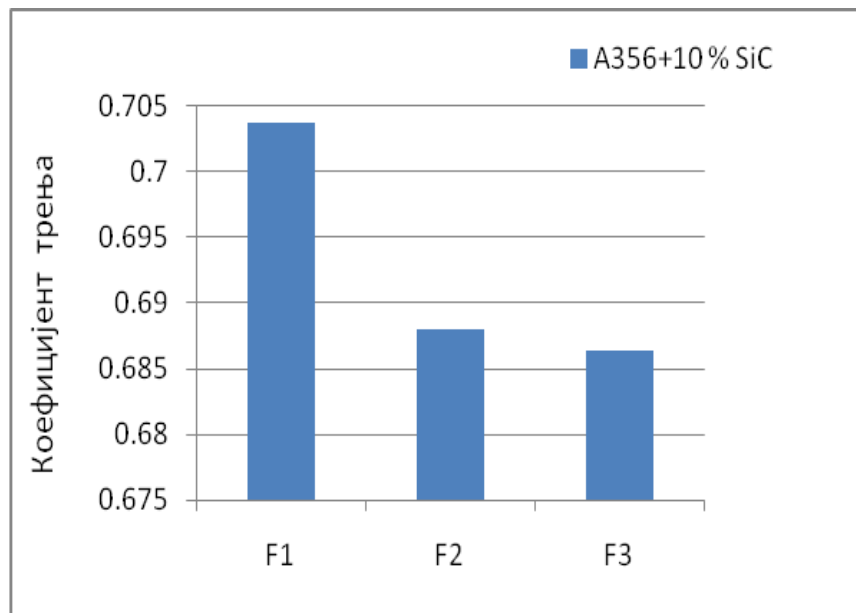
Слика 48. Хистограмски приказ зависности коефицијента трења од брзине клизања



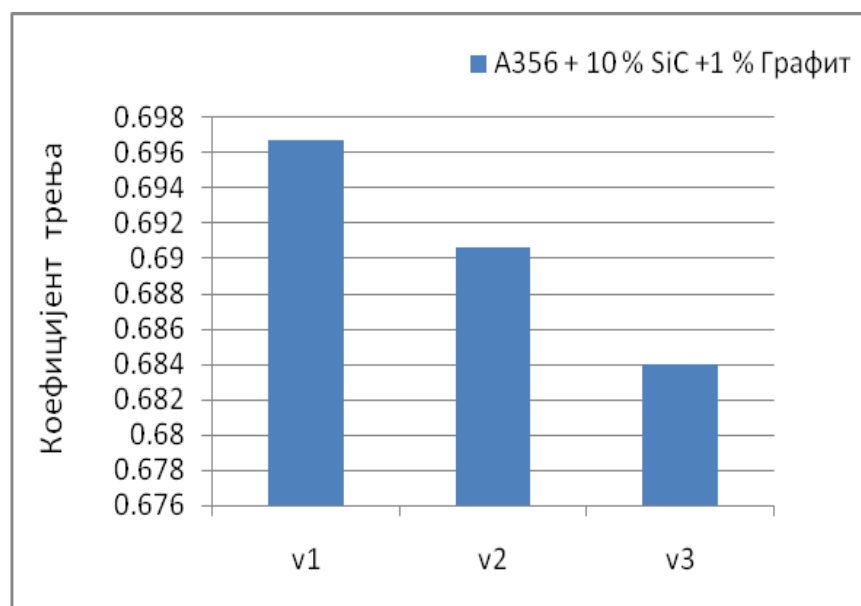
Слика 49. Хистограмски приказ зависности коефицијента трења од нормалног оптерећења



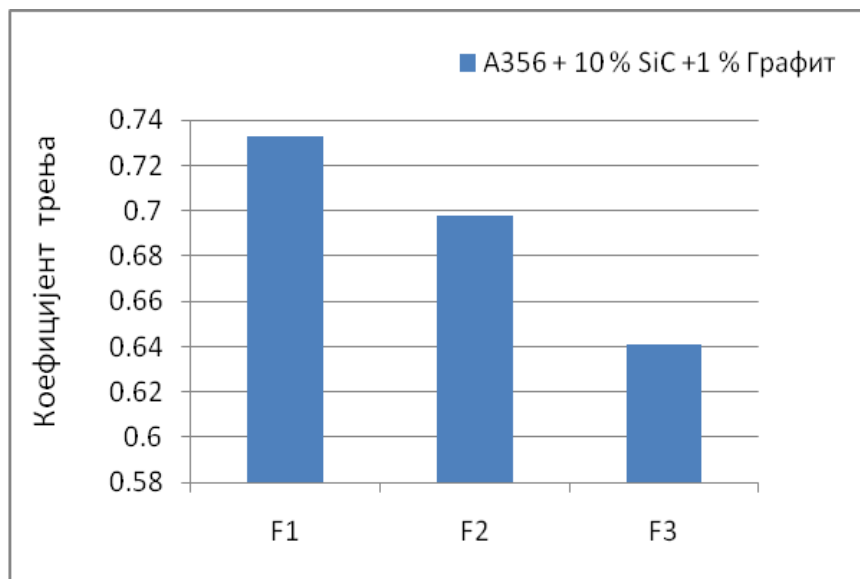
Слика 50. Хистограмски приказ зависности коефицијента трења од брзине клизања



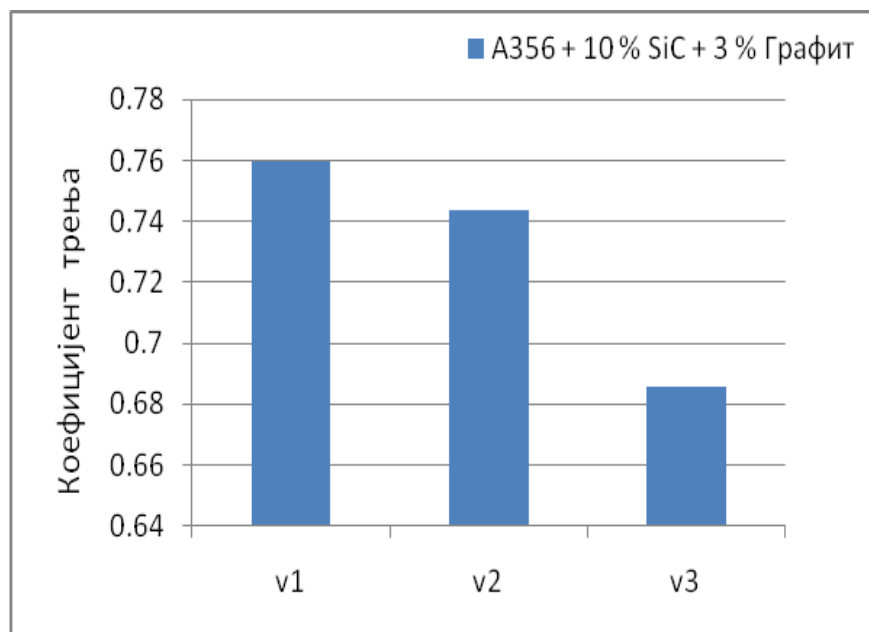
Слика 51. Хистограмски приказ зависности коефицијента трења од нормалног оптерећења



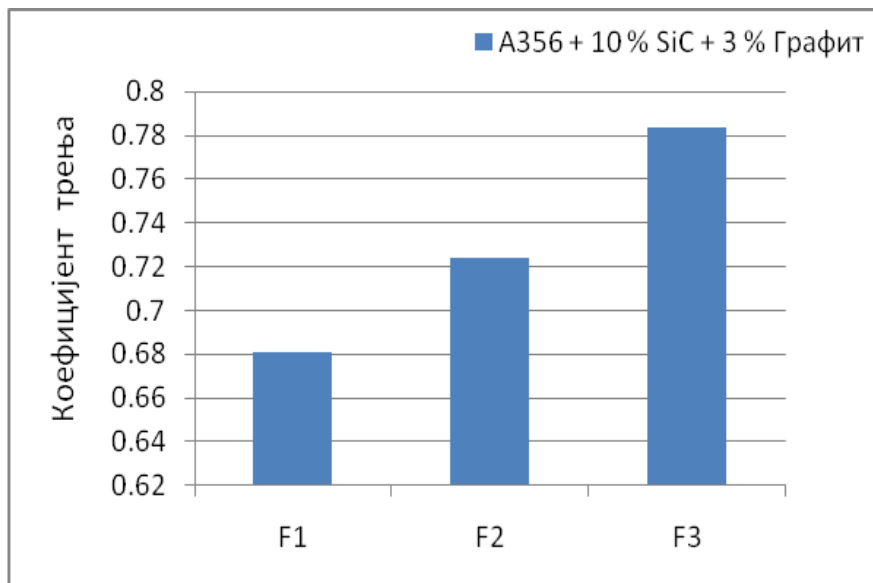
Слика 52. Хистограмски приказ зависности коефицијента трења од брзине клизања



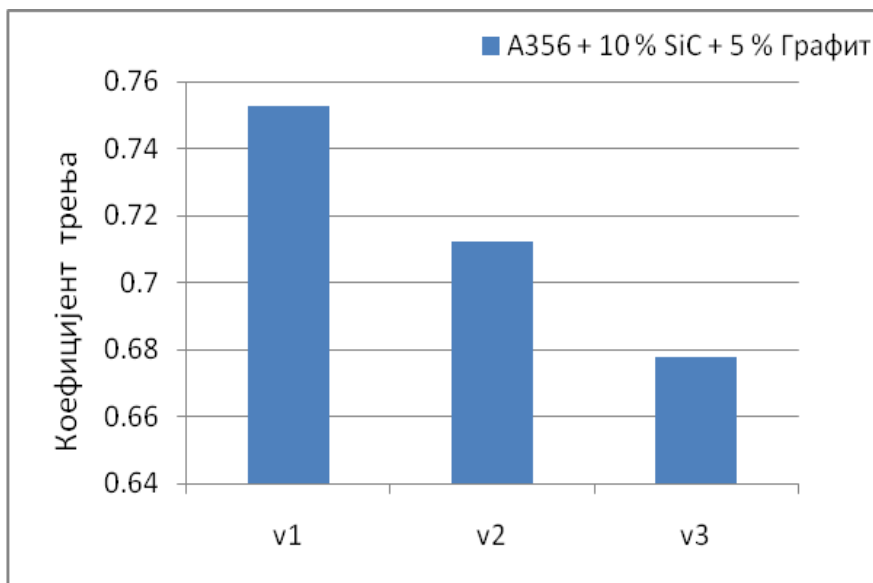
Слика 53. Хистограмски приказ зависности коефицијента трења од нормалног оптерећења



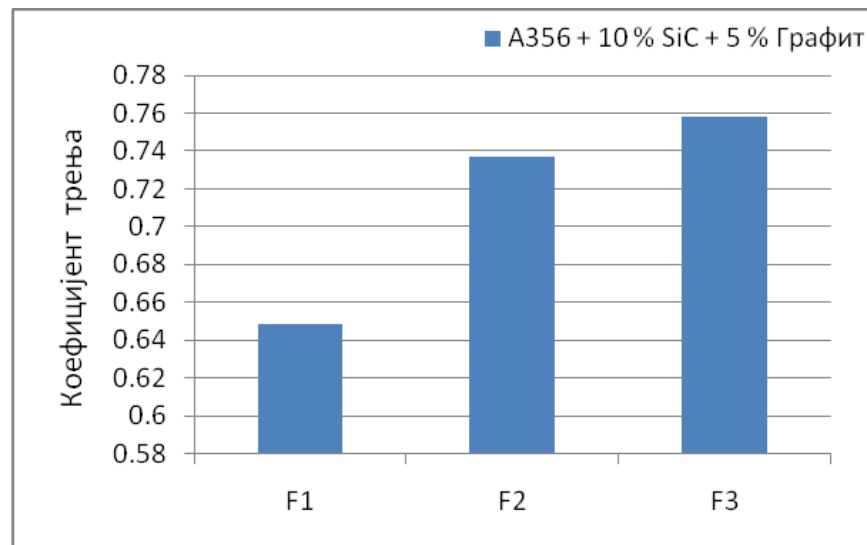
Слика 54. Хистограмски приказ зависности коефицијента трења од брзине клизања



Слика 55. Хистограмски приказ зависности коефицијента трења од нормалног оптерећења



Слика 56. Хистограмски приказ зависности коефицијента трења од брзине клизања



Слика 57. Хистограмски приказ зависности коефицијента трења од нормалног оптерећења

10. Закључак

Алуминијумске легура поседују добре физичко-механичке карактеристике и то их чини веома интересантним за примену у аутомобилској индустрији, где могу успешно да се користе као замена за челик и сиви лив. Триболошке карактеристике најчешће коришћених алуминијумских легура нису задовољавајуће уколико се примењују тамо где се захтева висока отпорност на хабање, тако да одређена побољшања ових легура морају да се изврше. Примена нових технологија добијања алуминијумских легура је једно од могућих решења. У раду је приказано испитивање триболошких карактеристика (трење) легуре А356 са додатком 10 % SiC и 1, 3, 5 % Gr. Приложеним се описује технологија добијања нових материјала - композита (класичног и хибридног) који показују знатно боље карактеристике у односу на основну легуру.

Анализа резултата триболошких испитивања композита са основом А356 показује да се вредности коефицијента трења налазе у границама од 0.4-0.8. Овако високе вредности коефицијента трења показују да ови материјали могу да се користе за израду кочионих дискова у аутомобилској индустрији.

12. Литература / Reference

- [1] Babić M., Mitrović S.: Osnovi tribologije-tribomehanički sistemi, predavanje, Fakultet inženjerskih nauka u Kragujevcu, 2011.
- [2] Davim Paulo J. Machining of Metal Matrix Composites.
- [3] Konstruiranje i sastav polimernih kompozita, Polimeri 22 (2) 62-66 (2001), Janez Indof, Đurđica Španiček, Materijali i tehnološki razvoj, Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, Zagreb, 2002.
- [4] Adamović D.:Kompozitni materijali (AS)- predavanje, Fakultet inženjerskih nauka u Kragujevcu, 2009.
- [5] Kassim S. Al-Rubaie , Humberto N. Yoshimura , José Daniel Biasoli de Mello: Two-body abrasive wear of Al-SiC composites, Wear 233–235 (1999), pages 444–454, 1999, Brazil.
- [6] Babić M.: Doprinos istraživanju triboloških svojstava kontaktnih slojeva kroz razvoj tribometrije, Doktorska disertacija, Kragujevac, 1989.
- [7] Предавања из *Основи трибологије*, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, 2011.
- [8] Б. Тадић, Б. Јеремић, Ђ. Вукелић, С. Митровић, *Упутство за употребу Трибометра Т1*.
- [9] UEMP trenje, http://www.fer.hr/download/repository/UEMP_trenje2009.pdf,
- [10] Boboć I.: Razvoj postupaka prerade u polučvrstom stanju (rheo i compo-casting procesa) i uticaj načina upravljanja na kvalitet proizvoda na bazi legure ZnAl25Cu3, Doktorska disertacija, Tehnološko - metalurški fakultet u Beogradu, 2003.
- [11] http://www.mas.bg.ac.rs/referati/arhiva_pdf/AVencl-referat-0408.pdf
- [12] И. Бобић, А. Венцл, М. Бабић, С. Митровић, Б. Бобић: Технолошки поступак добијања композита са основом од AlSi7Mg0.3 (A356) легуре уз додатак ситних честица Al₂O₃ (битно побољшан постојећи производ или технологија), Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, ТР-06/2010,2010.
- [13] Indof J., Ђ. Španiček: Materijali i tehnološki razvoj, Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, Zagreb, 2002.
- [14] Babić M., Mitrović S.: Tribološke karakteristike kompozita na bazi ZnAl legura, Fakultet inženjerskih nauka u Kragujevcu, 2007.
- [15] Dohda K. , Wang Z. , Taniguchi Y.: Tribo-Characteristics of Al-SiC Sintered Alloy, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan.
- [16] Clyne T., Withers P. J.: An Introduction to Metal Matrix Composites, Cambridge University Press, 1995.
- [17] H Jang, K Ko, S.J Kim, R.H Basch, J.W Fash, The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials, Wear, Volume 256, Issues 3–4, February 2004, Pages 406-414

[18] N. Natarajan, S. Vijayarangan, I. Rajendran, Wear behaviour of A356/25SiCp aluminium matrix composites sliding against automobile friction material, *Wear*, Volume 261, Issues 7–8, 20 October 2006, Pages 812-822

[19] R.C. Shivamurthy, M.K. Surappa, Tribological characteristics of A356 Al alloy–SiCP composite discs, *Wear*, Volume 271, Issues 9–10, 29 July 2011, Pages 1946-1950