

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Основи трибологије

Број индекса: 196 / 2009

Срђан М. Церовић

**Отпорност на хабање композита са
металном основом ојачаних честицама SiC**

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Слободан Митровић ванр.професор - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

Проучи литературу и да одговори на питања шта су то композити, који је њихов значај, као и да да кратак преглед актуелног стања испитивања металних композита ојачаних честицама SiC. Такође студент је дужан да у оквиру практичног дела овог рада представи резултате експерименталних испитивања композита са основом ZA-27. Циљ експерименталног испитивања је да се одреди утицај контактних параметара (нормалног оптерећења и брзине клизања) и различитих процената масеног удела ојачивача SiC на отпорност на хабање.

Препоручена литература:

- [1] IVKOVIĆ B. , A. RAC: Tribologija, Jugoslovensko društvo za tribologiju, 1995.
- [2] BABIĆ M., S. MITROVIĆ: Tribološke karakteristike kompozita na bazi ZnAl legura, Fakultet inženjerskih nauka u Kragujevcu, 2007
- [3] BABIĆ M. , R. NINKOVIĆ: Tribološki potencijal ZnAl legura, Fakultet inženjerskih nauka u Kragujevcu, 2007

ментор:

Др.Слободан Митровић, ванр.проф

Резиме рада

Циљ овог завршног рада било је експериментално испитивање отпорности на хабање композитних материјала са основом ZA-27 и додатком честица SiC-а са променом контактних услова и променом масеног удела SiC-а. Сва испитивања вршена су при константним вредностима контактних параметара и у условима без подмазивања. Такође, у оквиру овог завршног рада представљени су композити и актуелно стање испитивања композита, опрема за испитивање триболошких карактеристика и резултати испитивања у виду дијаграма и слика. На основу теоријских основа, прегледа литературе и експерименталних резултата представљени су закључци који се односе на отпорност на хабање композитних материјала ојачаних честицама SiC.

Кључне речи:

композити, хабање, ZA-27, SiC

Summary of work:

The goal of this paper was to experimentally investigate wear resistance of the ZA-27 matrix composites reinforced with SiC particles, with the change in the contact conditions and in the volume fraction of SiC particles. All the measurements were performed with the constant values of contact parameters and in the dry conditions. Furthermore, composite materials, as well as the current state of the investigation of composite materials, equipment used for the investigation of the tribological characteristics, and the results of the investigation in the form of figures and diagrams, were presented in this paper. On the basis of the theoretical background, overview of the theoretical works and experimental results, the conclusions related to the wear resistance of the composite materials reinforces with SiC particles have been given.

Keywords:

composites, wear, ZA-27, SiC

САДРЖАЈ

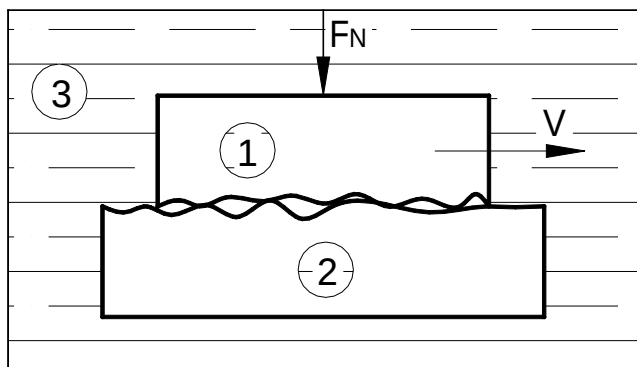
1. Увод	1
1.1 Трибомеханички системи	1
2. Композитни материјали	3
2.1 Основа (матрица)	9
3. Актуелно стање развоја композита са додатком честица SiC	14
3.1 Легуре цинка са повећаним садржајем алуминијума	14
3.1.1 Композити са основом од легуре цинка	15
3.2 Абразивно хабање Al-SiC композита	15
3.3 Корозиона отпорност композита са магнезијумском основом ојачаних честицама SiC	19
3.4. Отпорност на хабање Al-Si-Cu композита ојачаних честицама SiC	21
3.4.1 Материјали и експериментална процедура	21
3.4.2 Резултати и дискусија	23
3.5 Триболошке карактеристике синтероване легуре Al-SiC	26
4. Уређаји за испитивање триболошких карактеристика	31
4.1 Мерни систем	33
4.2 Контактни елементи	40
4.3 Микрогеометрија контактних површина	41
5. Резултати испитивања триболошких карактеристика композита са основом ZA-27 ојачаних честицама SiC	44
5.1 Материјал	44
5.1.1 Домаћи композити на бази ZnAl легура	44
5.2 Апаратура за добијање композита	46
5.3 План испитивања	48
5.4 Резултати испитивања	49
6. Закључак	55
7. Литература / Reference	57

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. Да би се избор материјала могао обавити најцелисходније, потребно је детаљно познавати функције које материјал треба да обавља у израђеном предмету, како би се знало која својства треба да има. 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

1.1 Трибомеханички системи

Сви механички системи чија је функција непосредно везана за процесе триболошких интеракција површина у контакту које се непосредно крећу једна по другој представљају тзв: **трибомеханичке системе**. Трибомеханички систем чине најмање два елемента чије се површине налазе у међусобном контакту у процесу релативног кретања.



Слика 1. пример трибомеханичког система [1]

Унапређење трибомеханичких система доводи до смањења енергије утрошене на трења, смањене трошкова одржавања и продужетка века трајања система, смањења трошкова кроз смањење застоја, смањење инвестиција кроз дужи век трајања трибомеханичких система. Унапређење је засновано на смањењу интензитета триболошких интеракција и повећању отпорности контактних елемената на хабање. То се може постићи унапређењем целокупне структуре система. Проблем с којим се данас суочава развој технике проистиче из веома израженог раскорака између степена развоја трибологије као науке и технологије и степена њене практичне примене. Трибологија је први пут употребљена као реч и штампана у Великој Британији у извештају Комитета Британског Министарства за образовање и науку 9. марта 1966. године. Последњих година, трибологија се схвата све више као “интердисциплинарна наука и технологија о проблемима преноса и расипања маса и енергије у механичким системима, са посебним нагласком на процесе **трења**, **хабања** и **подмазивања**”.

Подручја у којима **трибологија** даје највећи допринос, су:

- **Област материјала** (нови материјали, керамика, полимери, метали...),
- **Обраде материјала** (средства за хлађење и подмазивање, алатни материјали, лакообрадљиви материјали...),
- **Конструисање машинских елемената и система** (зупчаници, лежаји, клизни елементи...),
- **Област подмазивања** (уља, масти, адитиви)
- **Одржавање машина.**

То су истовремено области у којима треба у будућности вршити триболошка истраживања. Велики губици у индустрији и транспорту услед трења, а посебно хабања материјала су основни покретачи развоја трибологије у свету. [1]

2. Композитни материјали



Слика 2. Композити [2]

Основни разлог за рад на развоју композита јесте могућност да се поједине особине композитних материјала искористе за испуњавање одређених захтева. Композитни материјали се у литератури могу дефинисати као: систем материјала који се састоји од мешавине или комбинације два или више “макро” састојака који се разликују по форми и/или саставу материјала, а да су они притом апсолутно нерастворљиви један у другом. Научни истраживачи у индустрији користе прецизнију дефиницију: композитни материјали настају сједињавањем два или више различитих материјала, полазни материјали имају међусобно различите особине и њихов спој даје потпуно нови материјал. Он има јединствена, сасвим нова и другачија својства у односу на саставне компоненте. [3]

Термини који се често употребљавају јесу: **основа (матрица) и ојачивачи**

Композитни материјали састоје се од два или више различитих материјала, који су чврсто међусобно повезани. Овакви материјали попримају својства материјала другачија од њихових појединих компоненти. Они омогућавају флексибилност у дизајну, лаку израду делова сложене геометрије, лаки су, отпорни на удар, отпорни на замор услед коришћења и имају добру хемијску отпорност. Због ових особина четири главна сектора у којима се следећих година очекује раст употребе полимерних композита су грађевинска, аутомобилска, авио-индустрија и индустрија коришћења енергије ветра. Полимерни композити све више постају материјал за замену традиционалних материјала у аутомобилској индустрији. И поред тога потражња за композитним материјалима у 2008 и 2009 години је опала. Овај пад приписује се економској кризи а са њеним слабљењем и нарочито са опоравком ауто и авио индустрије очекује се поновни раст потражње за овим материјалима. Како глобална економија наставља да излази из кризе очекује се све бржи развој и примена ових материјала јер се њиховом употребом добијају производи који су лакши, јачи, квалитетнији и чистији.

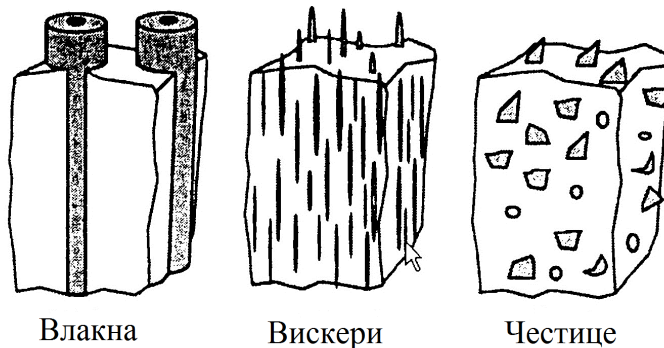
Композити се састоје из:

• основе (матрице)

- 1) метал,
- 2) керамика,
- 3) полимер

• материјала за ојачавање (ојачавача)

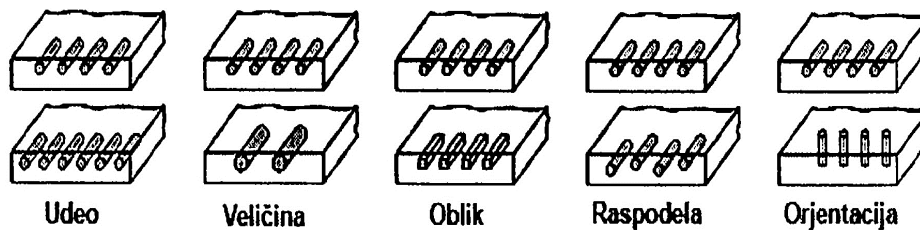
- 1) честице,
- 2) влакна,
- 3) вискери



Слика 3. Композити ојачани влакнима и честицама [4]

Најчешће се композитни материјали састоје од само две фазе: континуалне основе која окружује другу фазу-додатке. Та фаза се назива распршена фаза (дисперзија). Својства композита функција су својства конститутивних фаза, њихових релативних удела и геометрије распршене фазе [5]. Геометрију распршене фазе карактерише:

- удео,
- величина,
- облик,
- расподела и
- оријентација (слика 4.)

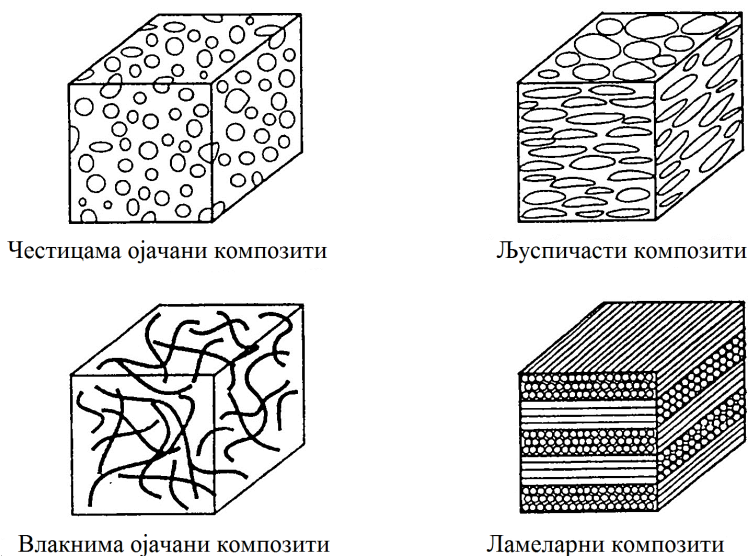


Слика 4. Шематски приказ различитих геометријских и просторних обележја композита [6]

С обзиром на бројност постојећих композита, а још више на оне који ће се развити у будућности, неопходно је извршити класификацију композита

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

Табела 1. Класификација композита [6]



Слика 5. Класификација композита [2]

Композитни материјали могу да буду:

- **изотропни** (иста својства у свим правцима),
- **анизотропни** (различита својства у различитим правцима)

Честицама ојачани композитни материјали

Грађевински материјал – Бетон (песак – цемент),

Кермети: WC, TiC (честице) – Co, Ni, челици (матрица),

Брусни материјал (тоцила за брушење и сечење): SiC, BN и

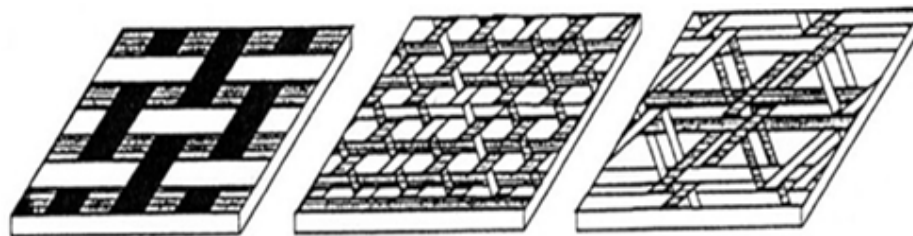
дијамант (честице) – полимерни материјали (матрица),

Електроконтакти: W (честице) – Ag (матрица), итд.

На слици 6. су приказани начини оријентације влакнима ојачаних композитних материјала



Слика 6. Распоред структурних елемената у композиту [7]



Слика 7. Типови ткања [7]

Запремински удео влакана:

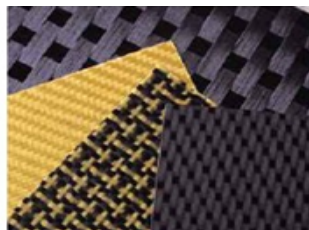
80% мах. запреминско учешће влакана и 20% матрица.

Оријентација влакана:

- произвољна,
- делимично уређена
- потпуно уређена.



”Roving” (благо увијене нити)



”Fabric” (тканине)



”Ужад” (уплетене нити)

Слика 8. Завршни производи [7]

Врсте ојачавајућих влакана

Користе се:

Стаклена влакна:

- Е – стакло (електрично - боросиликатно стакло),
- С – стакло (високе јачине - магнезијум-алуминијум оксид-силикат стакло).

Угљена влакна израђују се из катрана добијеног рафинацијом нафте или сувом естилацијом угља:

- HS – високе чврстоће (93-95%С – угљена влакна),
- HM – високог модула (99%С – графитна влакна).

Арамидна влакна (Kevlar) су ароматични полиамидни полимер ојачан бензоловим прстеном:

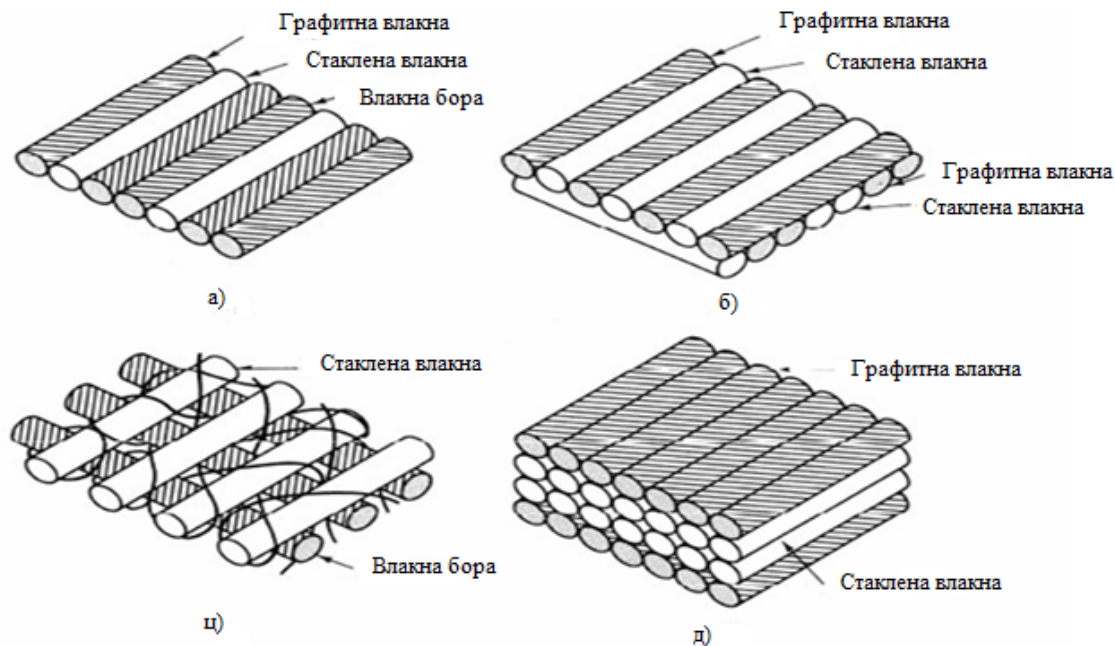
- Kevlar 29 – балистичка заштита, ужад, каблови,
- Kevlar 49 - за ваздушно-космичку примену, бродове, аутомобиле.

Борна влакна састоје се од бора који се наноси специјалним поступком на влакна волфрама.

Остала влакна произведена од:

- најлона, полиетилена, силицијум карбида, силицијум нитрида, алуминијум оксида, волфрама, бор карбида, бор нитрида, челика високе чврстоће итд.

Композит ојачан са две или више врста влакана назива се хибридан.



Слика 9. Композит ојачан са два или више влакана [7]

Материјал	Густина (g/cm ³)	Затезна чврстоћа (N/mm ²)	Модул еластичности (N/mm ² x 10 ³)	Специфична чврстоћа (m x 10 ⁴)	Специфична крутост (m x 10 ⁶)	Температура топљења °C
Е-стакло	2.55	3447	72.3	13.7	2.89	<1725
С-стакло	2.50	4481	86.8	18.2	3.54	<1725
SiO ₂	2.19	5860	72.3	27.2	3.53	1728
Al ₂ O ₃	3.95	2068	379.2	5.3	9.78	2015
Ugljenik, Hs	1.90	3000	241.3	16.0	12.9	3700
Ugljenik, Hm	1.90	2000	344.7	10.7	18.4	2730
BN	1.90	1380	89.6	7.3	4.8	2730
Bor	2.36	3448	379.2	14.8	16.3	2030
B ₄ C	2.36	2275	482.6	9.8	20.8	2450
SiC	4.09	2068	482.6	5.1	12.0	2700
TiB ₂	4.48	103	510.2	0.23	11.6	2980
W	19.3	4000	406.8	2.1	2.1	3410
Полиетилен	0.97	2585	117.2	27.1	12.3	147
Најлон	1.14	828	2.75	7.4	0.24	249
Кевлар	1.44	4480	124.1	19.8	8.7	500

Табела 2. Физичко-механичка својства ојачавајућих влакана [7]

2.1 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). [8]

• 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, m ³ /10 ⁴	Специфична чврстоћа, m ³ /10 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.3 Карактеристике неких конструкционих метала и композитних материјала [7]

Влакнасто ојачани композитни материјали и њихова примена

У зависности од компонената влакно-основе композитни материјали

сврстани су у три система:

- влакно-полимерна основа,
- влакно-метална основа,
- влакно-керамичка основа.

Влакно-полимерна основа

Особине:

- добра комбинација чврстоће, крутости и мале масе,
- добра отпорност на замор и пузање,
- губе чврстоћу при релативно ниским температурама (изнад 70°C).

Примена неких влакнасто ојачаних полимера

Влакно основа	Примена
Кевлар-епокси	Ваздухопловство, аерокосмонаутика, бродска корита
Кевлар-полиестер	Спортска опрема (тениски рекети, штапови за голф, штапови за пецање), непробојни прслуци.
Графит-полимер	Аерокосмонаутика, компоненте аутомобила, спортска опрема.
Стакло-полимер	Ваздухопловство, аерокосмонаутика, аутомобилска индустрија, бродоградња, спортска опрема.

Влакно-метална основа

Особине:

- добра отпорност на повишеним температурама,
- већа пластичност и жилавост у односу на полимерну матрицу већа густина,
- тешкоће у технологији израде делова.

Влакно-основа	Примена
Графит-алуминијум	За израду компоненти сателита, ракета, хеликоптера
Графит-магнезијум	Структуре космичких летелица, сателита
Графит-олово	Плоча акумулатора
Графит-бакар	За електричне контакте
Бор-алуминијум	За израду компресорских лопатица, носећих структура

Влакно-керамичка основа

Особине:

- имају велику чврстоћу и крутост,
- отпорни су на високим температурама (преко 1500°C),
- веома су крти.

Користе се за израду:

- компоненти млазних мотора,
- компоненти мотора СУС,
- делова опреме подморница,
- посуда под притиском,
- компоненти разних уређаја.

У већини случајева полимерних композита (РМС) су у конкуренцији против постојећих металних делова. У случају аутомобилске индустрије то значи челика и алуминијума. Предности су цене челика, снага, а и рута за рециклажу који је саставни део процеса производње, 50% произведеног челика проналази свој пут назад у челичану као стари метал. Недостаци су веома високе цене сировина и машина као и границе дуктилност. За алуминијум је сличан случај, релативно високи трошковима материјала.

Израда сличних компоненте из полимерних композита карактерише јефтина постројења, али скупи материјали, који омогућавају креирање комплексних облика као појединачни делови.

Иако су обично полимерни композити прихваћени за мале количине делова, они могу сами да превазиђу своје недостатке ако се користе за производњу великих размера за више софистициране производе.

Употреба композитних материјала на нашим тренутним возилима повећава се значајно (тржишни трендови сугеришу до 10% раста годишње на аутомобилском тржишту), а коришћење таквих компоненти ће дати користи купца који ће бити тешко игнорисати. Употреба композита је главни услов да се сачува тежина и такође смање инвестициони трошкови повезани са композитним материјалима. Будуће економски притисци ће тежити да се повећа употреба материјала ниске густине и композитних материјала

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	
Лако састављиви делови	

Табела 4. ДОБРЕ и ЛОШЕ особине композитних материјала [7]

3. Актуелно стање развоја композита са додатком честица SiC

Почетком седамдесетих година повећана је примена разних алуминијумских легура које су потиснуле и неке легуре цинка, посебно из аутомобилске индустрије. Као одговор на то, повећана су финансијска улагања индустрије цинка у развоју нових легура цинка са повећаним садржајем алуминијума са комерцијалним називом Za-легура [9]. Због добрих механичких и технолошких особина порастао је интерес истраживача и инжењера широм света за ове легуре, у смислу њиховог даље развоја и ширења поља практичне примене[10]. Значај у развоју ZnAl легура допринела је међународна организација за истраживање олова и цинка ILZRO (internacional Lead Zinc Research Organization) [11]. У касним шездесетим годинама у оквиру дела истраживања финансијски подржаних од стране ILZRO, развијена је легура за гравитационо ливење са садржајем 12% алуминијума. Ова легура је тада названа ILZRO 12, а касније је преименована у ZA-12. Касније као резултат рада других истраживача St.Joe Minerals Corporation i Noranda Research Centre развијене су две нове ZA гравитационо ливене легуре означене са ZA-8 и ZA-27 [12].

3.1 Легуре цинка са повећаним садржајем алуминијума

Комерцијална употреба цинка проширена је развојем легура цинка са масеним садржајем алуминијума од 2.3 до 5%. Ове легуре се одликују високом чврстоћом и добром обрадљивошћу, а користе се за израду мањих делова у аутомобилској индустрији (карбуратори, пумпе за горива, фитинзи), за делове разних мотора у електроиндустрији и др. [13]

Основне компоненте	Састав (5%)		
	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	0.012-0.02
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 5. Хемијски састав ZA легура [14]

3.1.1 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. Такође, резултата истраживања има знатно мање пре свега због велике примене легура алуминијума и композитних материјала са основом од ових легура у аутомобилској индустрији.

Почетак рада на освајању композитних материјала са основом од легура цинка датира од краја осамдесетих година прошлог века у Round Oaks Laboratories i Aston Univeristy у Енглеској. Као основа коришћена је легура цинка $ZnAl30Cu2$, а ојачавачи кратка влакна SiC .

Нешто касније, сличан рад на добијању композита почео је на Loughborough University of Tehnology у Енглеској. Поред легура са 27 до 30 mas.% Zn, основне легуре су проширене на легуре цинка са 8% и 12% мас.% алуминијума и уведени нови ојачавачи; честице SiC , влакна и честице SiC . [10, 15]

Знатан напредак у побољшању особина композита са основом од $ZnAl27Cu2$ i $ZnAl12Cu1$ легура (за легуре Zn-12 и Zn-27) уз додатак честица SiC и влакана SiC постигла је група истраживача са MIT-а (Америка).

Композити са основом ZA-27 били су честа тема научних радова професора са Факултета инжењерских наука у Крагујевцу [16-22].

Предмет ових испитивања били су и композити са додатком Al_2O_3 [17-20], и додатком графита [21-22]. Том приликом испитиван је утицај различитих термички припремљених легура ZA-27 на отпорност на хабање.

Композити са истом основом само са додатком SiC , су такође били предмет испитивања Центра за трибологију на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу и један део биће представљен у петом поглављу овог завршног рада.

У даљем тексту бих хтео да наведем пар кратких прегледа научних радова, који се односе на композите ојачане честицама SiC -а. Споменућу основне ствари које се односе на услове испитивања (уређај, материјали, оптерећења, брзине, са или без подмазивања, повишене температура и тако даље).

3.2 Абразивно хабање Al-SiC композита [23]

Понашање композита са алуминијумском основом ојачаних честицама силицијум карбида током абразивног хабања између два тела било је предмет студије аутора овог рада. Композити са металним основом произведени су путем металургије праха укључујући и завршни корак екструзије, и у себи имају Al 1100 матрицу и α - $SiCr$ ојачиваче, што заправо значи да је основа ојачана честицама SiC величина 10, 27 и 43 μm , са процентуалним уделом од 5, 10 и 20 %.

Процентуални удео и величина SiC честица пре израде композита који су били предмет проучавања, а измерени су помоћу анализатора честица (Малверн 2006) и равнотеже маса. Композити са процентуалним уделом α - SiC SiC_p од 5, 10 и 20 % и величином честица од 10, 27 и 43 μm добијени су технологијом металургије праха (Табела 6).

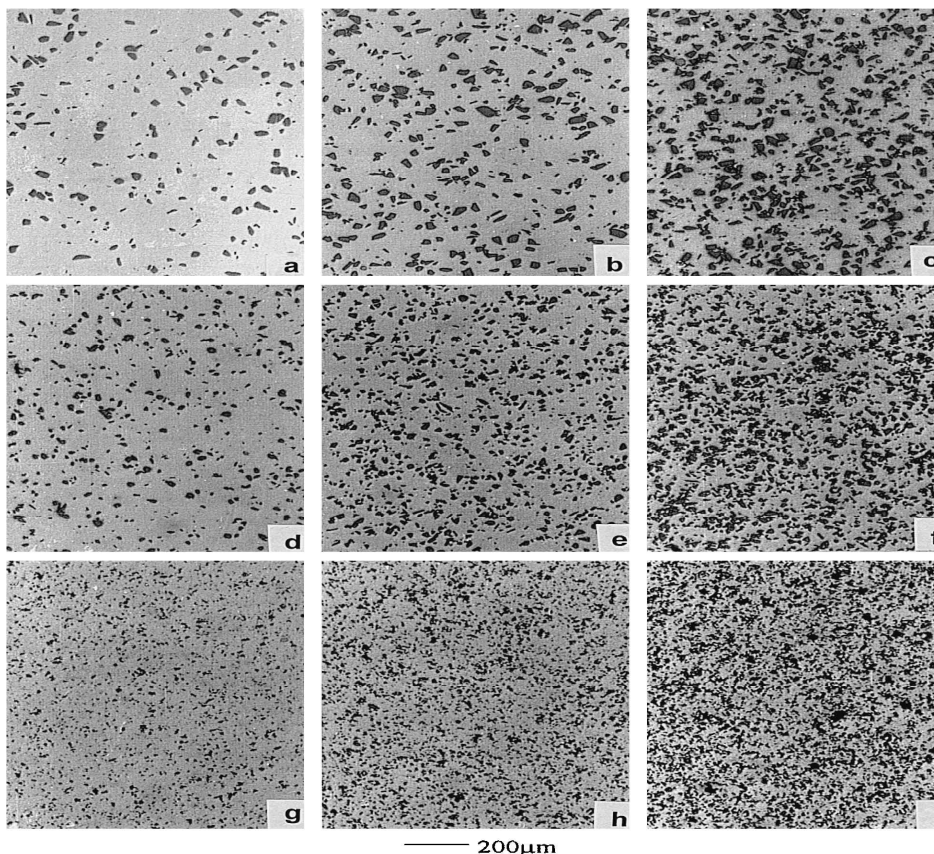
Материјал	Обим трења SiC честица (vol.%)	Просечн величина SiC честица (μm)
Al		
Al-5-10	5	10
Al-10-10	10	10
Al 20-10	20	10
Al-5-27	5	27
Al-10-27	10	27
Al-20-27	20	27
Al-5-43	5	43
Al-10-43	10	43
Al-20-43	20	43

Табела 6. Карактеристике тестираних материјала [23]

У табели 7. приказане су вредности тврдоће композита и неојачане основе. Тврдоћа композита повећава се са повећањем процентуалног удела SiC_p честица.

Материјал	Тврдоћа (HV 10)
Al	29.6 ± 0.2
Al-5-10	36.2 ± 0.8
Al-10-10	39.4 ± 0.5
Al 20-10	43.5 ± 0.4
Al-5-27	33.3 ± 0.4
Al-10-27	36.8 ± 0.4
Al-20-27	45.0 ± 0.3
Al-5-43	34.0 ± 0.3
Al-10-43	37.2 ± 0.3
Al-20-43	44.8 ± 0.9

Табела 7. Обим тврдоће тестираних материјала [23]



Слика 10. Оптичка микрографија Al-SiC композита а) Al-5-43, (б). Al-10-43, (ц). Al-20-43, (д). Al-5-27, (е). Al-10-27, (ф) Al-20-27, (г). Al-5-10, (х) Al-10-10, (и). Al-20-10 [23]

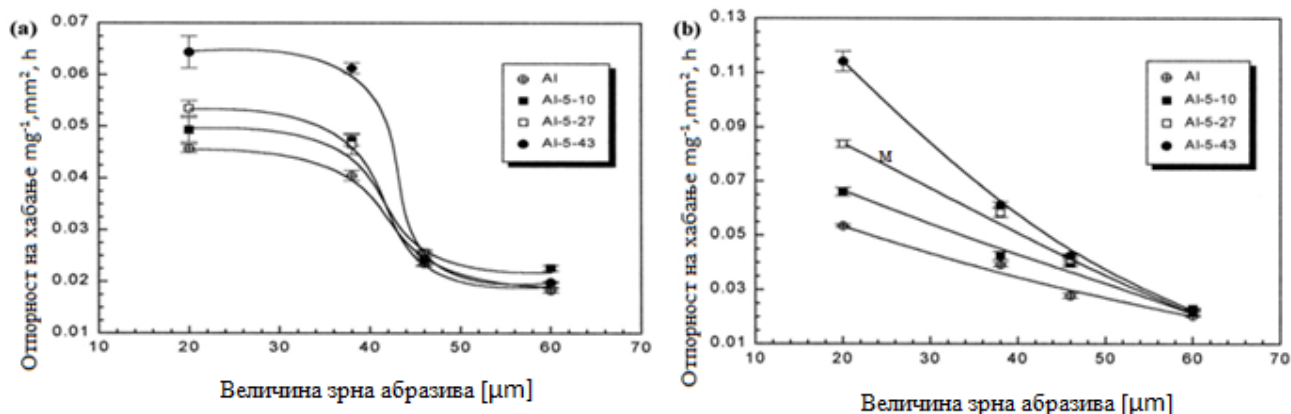
Коришћењем "pin on disk" контактне геометрије извршени су тестови хабања композита, на бази алуминијума ојачаних честицама силицијум карбида. Карактеризације микроструктуре, направљене су помоћу оптичке микроскопије, а коришћењем скенирајуће електронске микроскопије (SEM), одређени су доминантни механизми хабања.

Резултати су показали да ојачање SiC делићима повећава отпорност материјала на абразивно хабање независно од врсте абразивних честица које се користе. Повећање отпорности на абразивно хабање је генерално било веће код алуминијума него код силицијум карбида. Отпорност на абразивно хабање повећавало се са повећањем величине и процентуалног удела SiC честица.

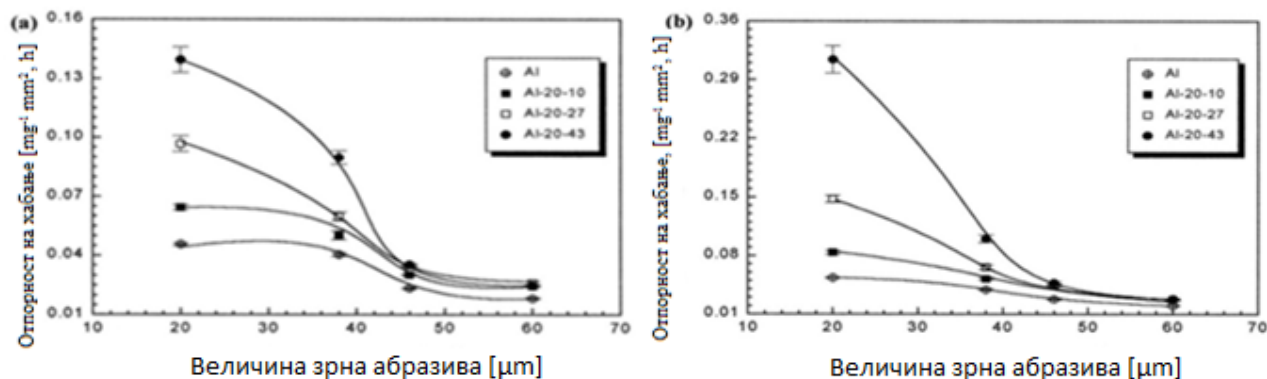
Тестови абразивног хабања између два тела вршени су помоћу механизма "pin on disk". Пин пречника 6 mm провучен је кроз вертикални држач узорка наспрам хоризонталног ротирајућег диска (25 обрта у минути) прекривеног абразивним папиром. Истовремено, узорак је ротиран око сопствене вертикалне осе брзином од 25 обртаја у минути. Узорак је померан преко абразивног папира у облику спирале, тако да је непрекидно долазио у додир са још некоришћеним деловима папира. Коришћено оптерећење било је 5.5 N које је стварало номинални контактни притисак од 0.195 МПа. Коришћени су алуминијумски и силицијум карбидни брусни папири од 20 (финоће 600), 38 (финоће 400), 46 (финоће 320) и 60 (финоће 240) μm .

Губитак масе одређиван је са прецизношћу од ± 1 mg. За сваки узорак вршена су најмање четири теста, и коришћена је просечна вредност.

Резултати су показали да ојачање SiC честицама повећава отпорност материјала на абразивно хабање независно од врсте абразивних честица које се користе. Повећање отпорности на абразивно хабање генерално било веће код алуминијума него код силицијум карбида. Отпорност на абразивно хабање повећавала се са повећањем величине и процентуалног удела SiC честица.

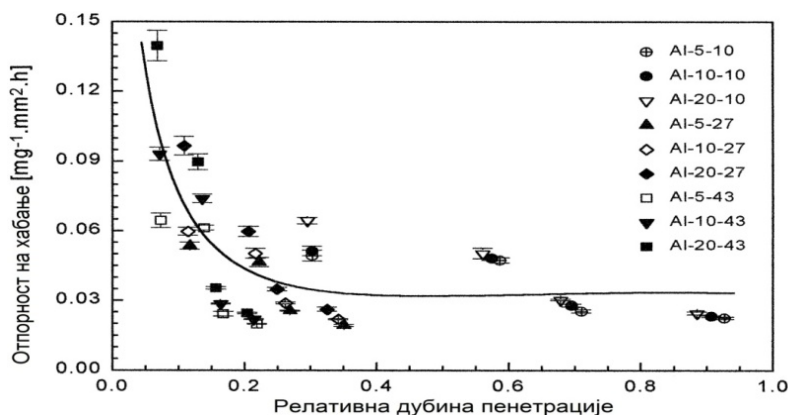


Слика 11. Отпорност на хабање у функцији величине зрна абразива, запреминског удела SiC=5 % (a) SiC, (б) Al_2O_3 [23]



Слика 12. Отпорност на хабање у функцији величине зрна абразива, запреминског удела SiC=20%. (a) SiC, (б) SiC [23]

Резултати су такође показали да се отпорност на абразивно хабање смањује када дубина продирања честица абразива расте изнад одређене критичне вредности; испод ове вредности отпорност на абразивно хабање није показала зависност од дубине продирања честица.

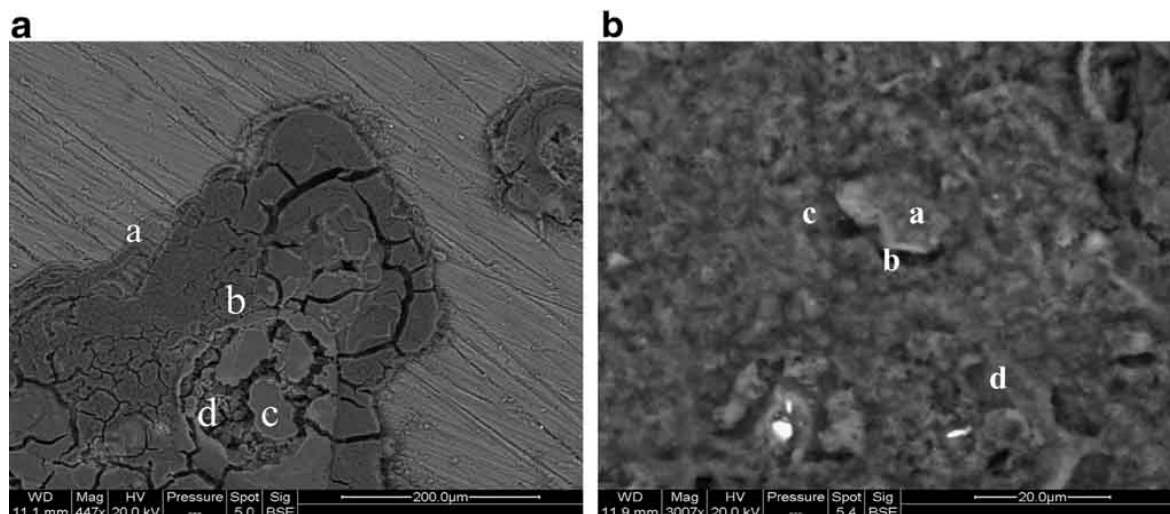


Слика 13. Отпорност на хабање у функцији релативног абразивног дубинског продирања честица, SiC абразива [23]

Из истраживања абразивног хабања између два тела различитих композита са алуминијумским основама можемо рећи да је ојачавање алуминијумске основе честицама SiC побољшало је отпорност на хабање свих тестираних композита у контакту са свим коришћеним абразивима.

3.3. Корозиона отпорност композита са магнезијумском основном ојачаних честицама SiC [24]

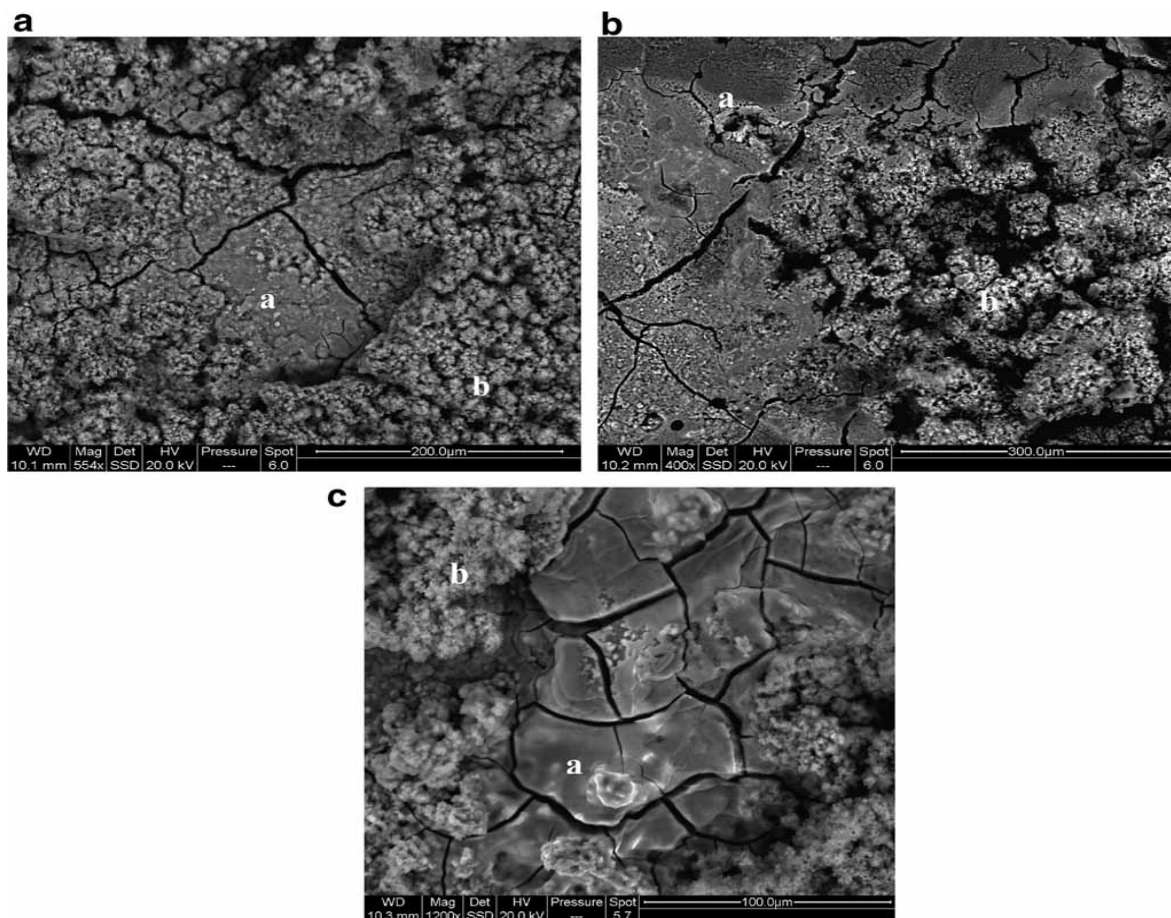
Предмет истраживања било је корозионо понашање два композита са металном основном на бази магнезијума Mg-6SiC i Mg-16SiC ојачаних честицама SiC. Ови композити су изложени дејству 1M NaCl раствора, а потом је њихово корозионо понашање упоређено са корозионим понашањем чистог Mg.



Слика 14. Типична СЕМ микрографија (a) Mg и (b) Mg-6 SiC површина добијених након излагања дејству 1M NaCl раствора у трајању 5 минута [24]

Иако је период изложености био релативно кратак, примећено је постојање локалних оштећења на површини. EDAX анализа показала је да оштећења на матрици нису озбиљна, т.ј. тачка означена са „a“ на слици 14. била је прекривена MgO.

Благо оштећена тачка „б“ показала је присуство хлора. Озбиљно оштећена површина „ц“ показала је формирање хлора/ оксихлорида/ оксида, док је у тачки „д“ примећено формирање хидроксида. Примарни продукти корозије су MgO и $Mg(OH)_2$ док хлор може бити остатак раствора који се задржао на површинском филму након испирања, или евентуално показатељ постојања малих количина хлора/ оксихлорида на површини.



Слика 15. Типична СЕМ микрографија (а) Mg, (б) Mg-6 SiC и (ц) Mg-16 SiC површина добијених након излагања дејству 1M NaCl раствора у трајању 1h [24]

Уопштено гледано, код продуката корозије примећена су два типа морфологије, и они су означени са „а“ и „б“ на слици 15 а-ц. Слој продукта корозије у области „а“ испољио је тип пуцања карактеристичан за торте од блата услед неравномерног сушења. Област „а“ садржала је оксиде Mg, као и хлоридне јоне. У области „б“ примећене су мање концентрације хлоридних јона него у области „а“. Ова запажања указала су на то да инкорпорација SiC у Mg није имала утицај на основни корозиони механизам. Концентрација хлоридних јона се вероватно повећавала на површини узорака временом, услед адхезије раствора са продуктима корозије

Сви узорци били су прекривени релативно дебелим, сивим слојем продукта корозије, чија је боја током сушења постајала светлија.

Показало се да присуство SiC честица умањује отпорност магнезијума на корозију.

Отпорност на корозију смањивала се са повећањем процентуалног удела SiC.

3.4. Отпорност на хабање Al-Si-Cu композита ојачаних честицама SiC [25]

Предмет истраживања биле су карактеристике хабања при клизању монолитних Al-Si-Cu легура, као и композита ојачаних честицама SiC са запреминским уделом од 5, 13, 38 и 50% и пречника 5.5, 11.5 и 57 μm . Резултати су показали да је отпорност на хабање много већа код композита него код монолитних легура, и да расте са повећањем пречника и процентуалног удела честица SiC. Металографска испитивања показала су да је подслој похабаних композита сачињен и од делова SiC-а честица и од деформисане легуре основе. Дубина зоне фрактуре честица у подслоју варира је од 20-35 μm при путу клизања од 1.8 km, док је дубина зоне пластичне деформације подслоја похабаних монолитних легура била више од 100 μm . СЕМ похабаног слоја, микроструктуре подслоја и продукта хабања показала је да се дубина зоне фрактуре честица смањује са повећањем пречника честица SiC. Са повећањем тврдоће и смањењем притиска примењеног при хабању морфологија продукта хабања променила се од плочица до малих грумена.

3.4.1 Материјали и експериментална процедура

Монолитна легура коју смо у нашем истраживању користили јесте комерцијална каљива Al-Si-Cu-Mg легура (JIS-AC4B). Састав монолитне легуре приказан је у табели 8. SiC честица ојачивача просечног пречника 5.5, 11.5, 57 μm обезбедила је компанија Fujimi Inc. Co.

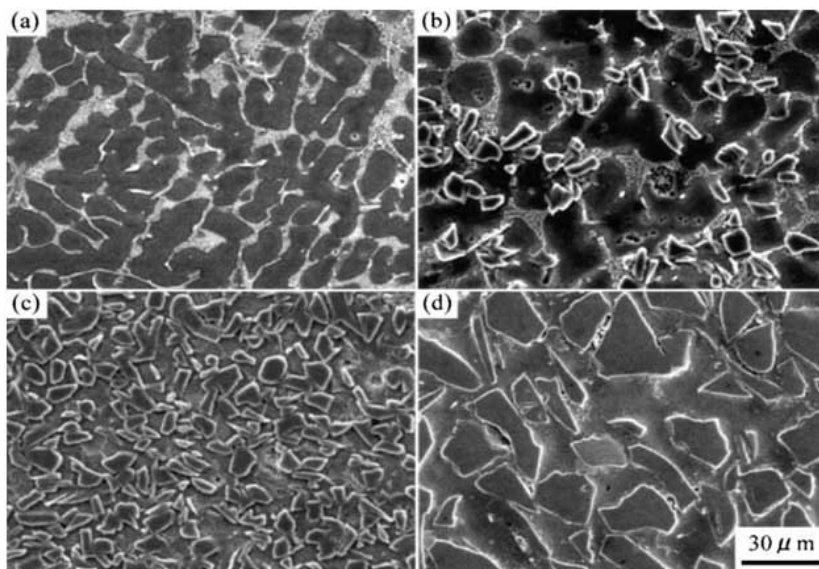
Si	Cu	Mg	Fe	Zn	Mn	Ni	Al
6-51	2-17	0-26	0-63	0-48	0-24	0-04	Bal.

Табела 8. Хемијски састав монолитне легуре, масени %" [25]

Композити су произведени комбинацијом ливења утискивањем и вртложне методе. Најпре је монолитна легура загрејана до температуре од 1023 K, честица SiC загрејани су до 1023K, а метални калуп до 673K. Затим је растопљени метал сипан преко честица SiC у металном калупу, и утискиван под притиском од 50MPa како би се произвели композити са процентуалним уделом од 50% честица SiC пречника 5.5 и 11.5 μm , и композита са процентуалним уделом 38% честица SiC пречника 57 μm . Након тога, ови су композити поново растопљени, заједно са монолитном легуром, а затим су у трајању од 60 минута мешани у пећи са Ar гасом помоћу лопатица чији је број обртаја у минути био 200.

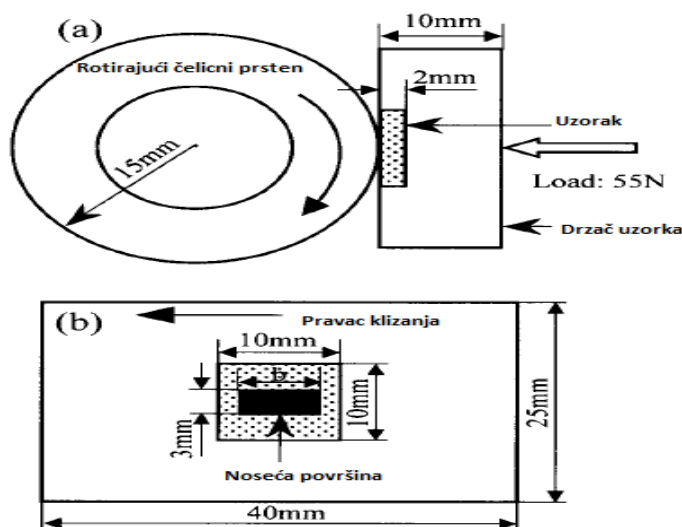
Растопљена легура са процентуалним уделом SiC честица од 13 и 5% је затим сипана у метални калуп где је очврснута под притиском од 50MPa. Најзад, композити и монолитна легура потопљени су у раствор соли загрејан на 773K на 10h, а затим су хлађени у леденој води.

Тврдоћа композита смањивала се са повећањем просечног пречника SiC честица, док се показало да је отпорност на хабање директно пропорционална просечном пречнику. Сходно томе можемо рећи да није само тврдоћа та која утиче на отпорност на хабање композита, и величина и пропорционални удео SiC честица имају значајан утицај. Дакле, циљ нашег истраживања јесте да покажемо утицај тврдоће композита, просечног пречника честица (5.5, 11.5, 57 μm) и њиховог процентуалног удела (5, 13, 38, 50 %) на отпорност на хабање. Параметри хабања композита утврђивани су и путем СЕМ анализе микроструктуре површине и подслоја. На слици 16. приказане су микроструктуре монолитне легуре, композита ојачаних SiC честицама пречника 11.5 μm са процентуалним уделом од 13 и 50 %, и композита ојачаног SiC честицама пречника 57 μm са процентуалним уделом од 38%. Резултати ЕРМА анализе показали су да микроструктуру композита карактерише фина зрнаста структура дендрита и распоређеност честица SiC углавном у еутектичком слоју као и везивање силицијума из еутектичког слоја за SiC честица, што се и види на слици 16. б, ц, д. Ширење α дендрита ограничили су SiC честице, па су финије обликовани него код монолитних легура.



Слика 16. Микроструктура молиитне легуре б) 11.5 μm , 13 вол.-% SiC композита, ц) 11.5 μm , 50 вол.-% SiC композита и д) 57 μm , 38 вол.-% SiC композита [25]

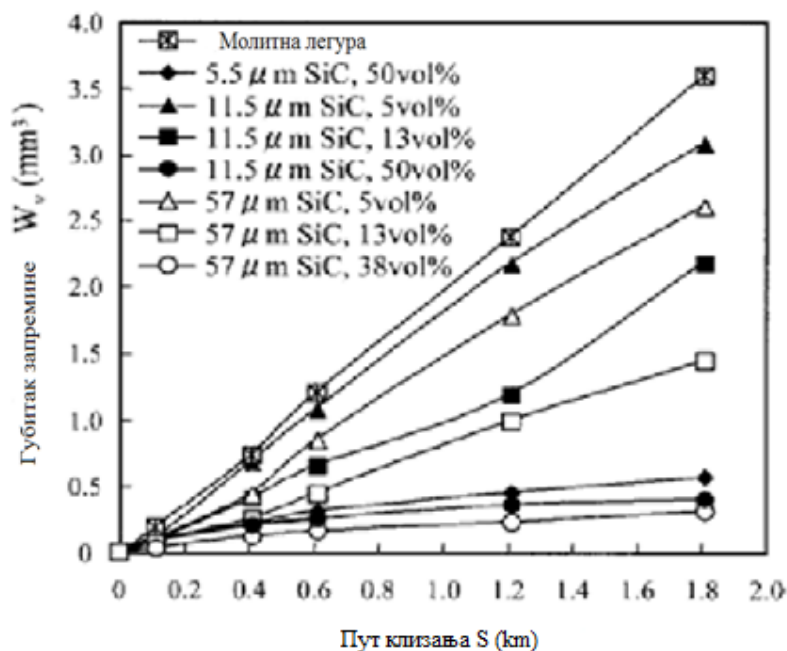
Узорци за тест хабања добијени су сечењем плочица дебљине 2mm од монолитних легура и од композита. Тестови клизања изведени су помоћу трибометра типа "block on ring" (OAT – U, Tokyo Testing Machine Mfg Co. Ltd), чији је нацрт приказан на слици 17. Систем за тестирање састоји се од непомичног узорка који је постављен на држач узорка и ротационог челичног прстена (од CAE 52100 челика термички обрађиваног до 63 HRC) чији је спољашњи пречник 30mm, унутрашњи пречник 16mm, а дебљина 3mm. Приликом тестова клизања примењивано је стандардно оптерећење од 55N.



Слика 17. Шематски приказ а) теста "block on ring", б) носеће површине и правца клизања [25]

3.4.2 Резултати и дискусија

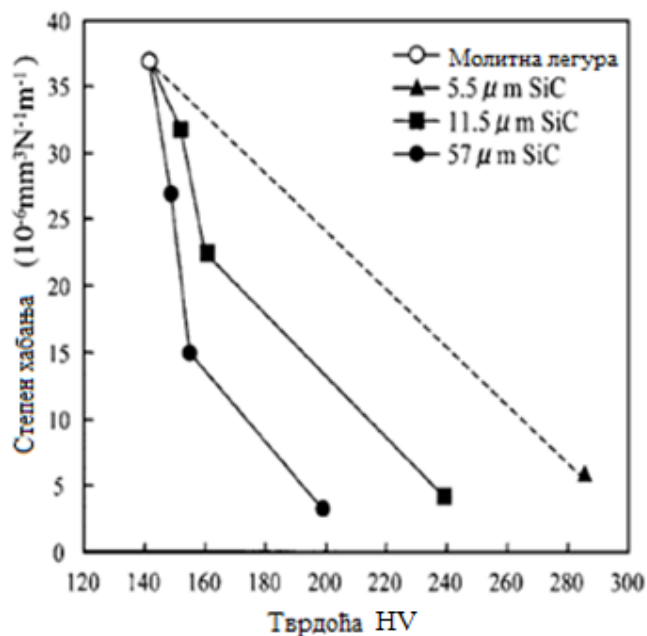
На слици 18. приказан је утицај дужине пута клизања на запремински губитак монолитне легуре и композита током теста хабања у процесу трења без подмазивања при брзини клизања од 0.94 m/s и оптерећењу од 55N. Чини се да је запремински губитак код монолитне легуре у некој мери већи него код узорка композита, а запремински губитак повећава се и код монолитне легуре и код композита са повећањем дужине пута клизања. Отпорност на хабање композита повећавала се са повећањем процентуалног удела и просечног пречника SiC честица. Отпорност на хабање композита са просечним пречником SiC честица од 57 μ m и процентуалним уделом од 37% показала се као највећа у овом експерименту.



Слика 18. Утицај дужине пута клизања на запремински губитак монолитне легуре и композита током теста хабања у процесу трења без подмазивања при брзини клизања од 0.94m/s и оптерећењу од 55 N [25]

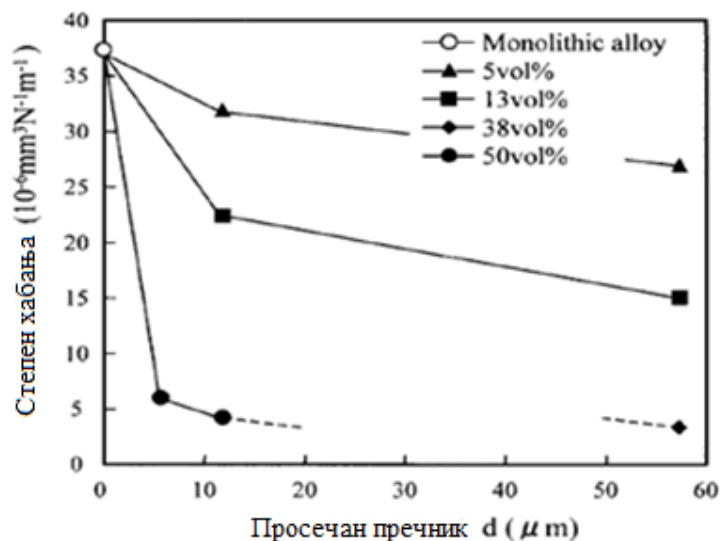
Криве тврдоће монолитне легуре и сваког од композита приказане су на слици 22. На овој слици коришћена је почетна вредност тврдоће узорак, пошто су промене у тврдоћи приликом теста хабања мале.

На слици 19. можемо видети да је отпорност на хабање композита са SiC честицама пречника 57 μm много боља него код композита са пречником честица SiC од 5.5 и 11.5 μm , иако је његова тврдоћа мања него тврдоћа ова друга два композита. Специфични интензитет хабања композита са SiC делићима пречника 57 μm износи $3.3 \cdot 10^{-6} \text{mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$ што је готово упола мање од специфичног интензитета хабања композита са пречником честица SiC од 5.5 и процентуалног удела 50 %.



Слика 19. Степен хабања и тврдоћа HV за молитне легуре и композите [25]

Дакле, са повећањем просечног пречника и процентуалног удела честица SiC смањује се специфични интензитет хабања, што је и приказано на слици 20. Крупније честице SiC и њихов већи процентуални удео спречавају настанак пластичних деформација у процесу хабања; крупније честице теже се раслојавају и избацују из површине изложене хабању.

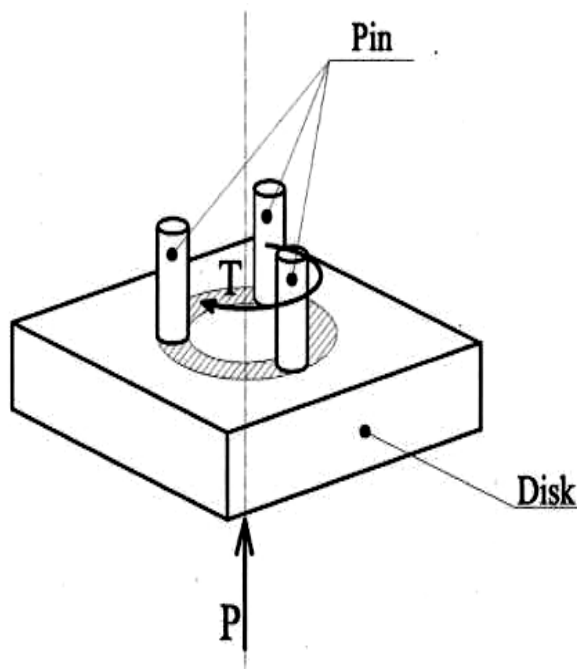


Слика 20. Однос између степена хабања и просечног пречника SiC честица [25]

3.5 Триболошке карактеристике синтероване легуре Al-SiC [26]

Синтерована легура Al-SiC недавно је направљена и користи се као материјал који има повећану отпорност на хабање. Њене триболошке карактеристике испитиване су помоћу трибометра типа "three-pin-on-disk".

"Pin" синтероване Al-SiC легуре која је коришћена у овом експерименту добијена је континуалним топлим пресовањем брзо очврснутог алуминијумског праха добијеног помоћу атомизације ваздухом под великим притиском. Крајња површина "pin" које не садрже SiC израђена је на исти начин са циљем да се испита утицај SiC. Тврдоћа оба "pina" има исту вредност. Материјал од кога је израђен диск је S45C челик. Експериментални резултати показали су да су карактеристике трења синтероване Al-SiC легуре при клизању на површини S45C идентичне карактеристикама трења синтероване Al легуре у ситуацијама у којима се не користи никакво мазиво и у којима се користи подмазивање воденим и уљним купатилом, али синтерована Al-SiC легура показала је много боље триболошке карактеристике и отпорност на хабање од синтероване Al легуре када се врши подмазивање уљним филмом.



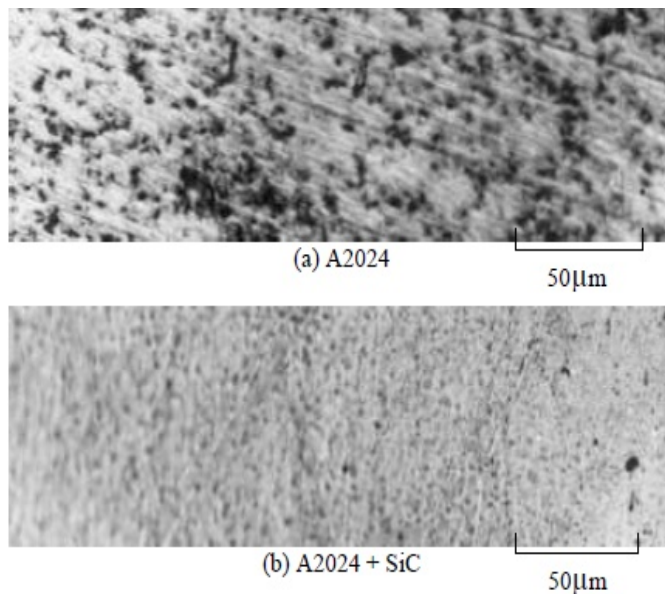
Слика 21. Принцип рада трибометра "three-pin-on-disk" [26]

Механичке карактеристике и грубост површине представљени су у табели 9.

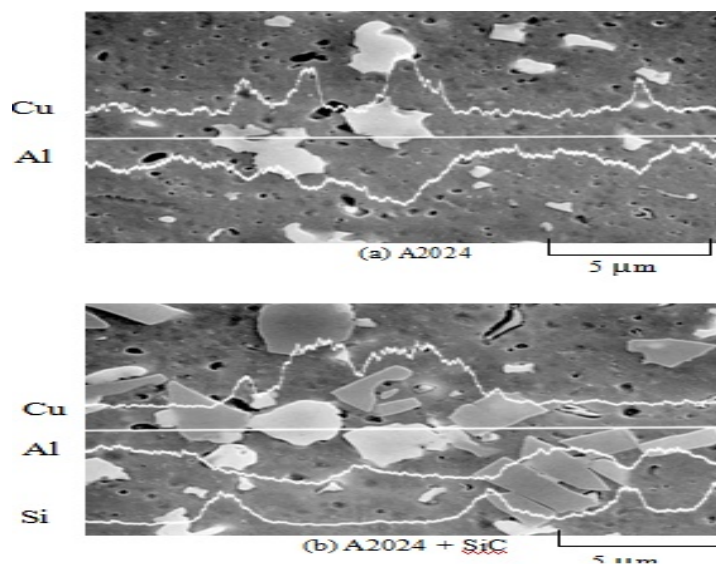
Тест узорак (величина mm)	Материјал Однос %	Механичке карактеристике				Површинска храпавост $\mu\text{m Ry}$
		Yield stress, MPa	Tensile strength, MPa	Јангов модул GPa	Тврдоћа по Викерсу HV	
ИГЛА (PIN) (5Ø5)	A2024 (8.0)	373	454	61	102	0.4 , 2.5
	A2024 +10wt.%SiC (7.0)	365	462	71	114	0.4 , 2.5
ДИСК (40X40X10)	S45C	490	686	206	2200	1,6
	S45C+ TiN	490	686	206	2200	1,6

Табела 9. Механичке карактеристике и грубост површине [26]

На сликама 22. и 23. приказане су оптичке и ЕРМА слике рипа синтероване Al-SiC легуре и рипа синтероване легуре Ал. У обема рипа запажено је присуство мале количине једињења Al-Cu. SiC честице у облику коцкица примећене су само у рип A2024+SiC



Слика 22. Оптичке и ЕРМА слике рипа синтероване Al-SiC легуре [26]



Слика 23. ЕРМА слика рипа синтероване Al-SiC легуре и рипа синтероване Ал [26]

Од мазива су коришћена четири типа минералних парафинских уља наведена у табели 10, а у табели 11. су приказани експериментални услови. Нормално оптерећење подешено је на 490 N (око 8.3 МПа при контактном притиску), а брзина клизања износи 20 mm/s. Испитивани услови подмазивања су одсуство мазива, подмазивање воденим купатилом, подмазивање уљним филмом, и подмазивање уљним купатилом.

При подмазивању уљним филмом испитиване су четири дебљине филма. Коефицијент трења је непрекидно мерен током клизања. Интензитет хабања одређиван је мерењем масе пре почетка теста и по завршетку теста, а изглед површине анализиран је помоћу оптичког микроскопа и СЕМ.

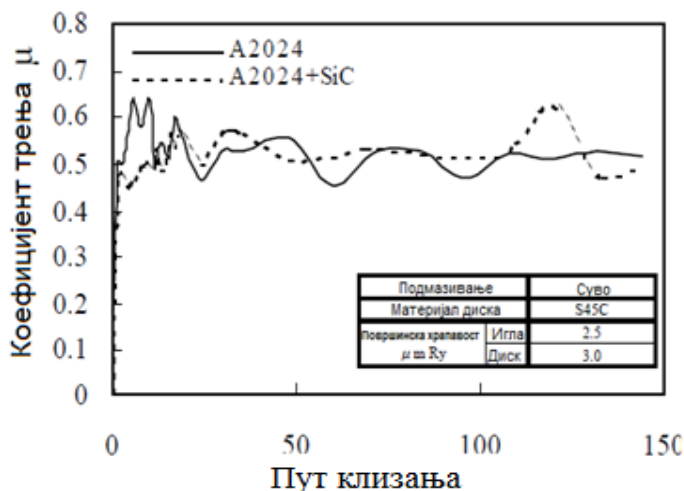
Подмазивање		P2	P10	P100	P460
Вискозност $\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	на 15 °C	3.60	25.3	467	3460
	на 40 °C	2.11	9.87	98.6	493
Сумпор, kg %		0.00	0.95	0.23	0.38
Анализа прстена n-d-m, методом	C _A %	16.8	9.1	7.4	8.3
	C _N %	32.9	26.6	24.4	23.5
	C _P %	50.3	64.3	68.2	68.2

Табела 10. Мазива [26]

Нормално оптерећење, P kN	490
Брзина клизања, mm/s	20
Услови за подмазивање	Суво
	У воденом купатилу
	У уљном купатилу
	Подмазивање у уљном филму (1, 1.5, 3, 5 μm)
Температура °C	20 $\pm$ 1

Табела 11. Експериментални услови [26]

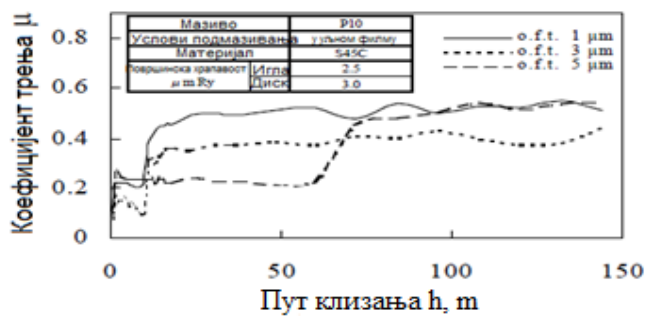
На слици 24. приказан је однос коефицијента трења и пута клизања у одсуству мазива.



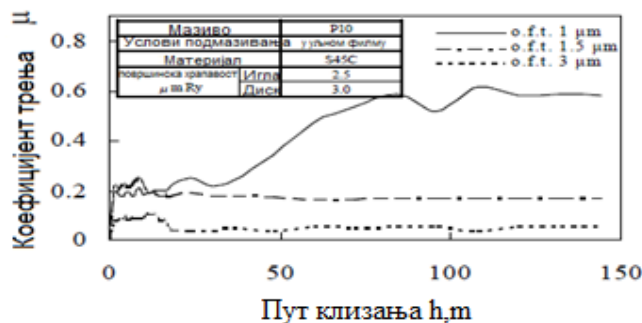
И код "pinova" A2024 и код "pinova" A2024+SiC запажене су високе вредности коефицијента трења од самог почетка клизања. У одсуству мазива није забележена никаква значајна разлика између "pinova" од A2024 и A2024+SiC.

Слика 24. Однос коефицијента трења и пута клизања у одсуству мазива [26]

На слици 25. приказан је однос коефицијента трења и пута клизања у условима подмазивања уљним филмом. За све дебљине филма забележено је нагло повећање коефицијента трења на одређеној тачки пута клизања за "pin" од A2024.



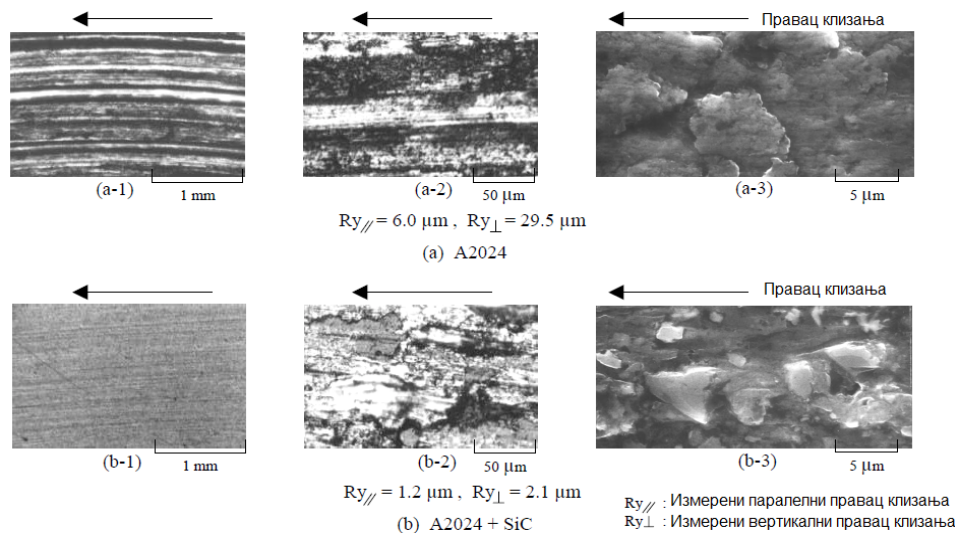
(a) A2024



(b) A2024+SiC

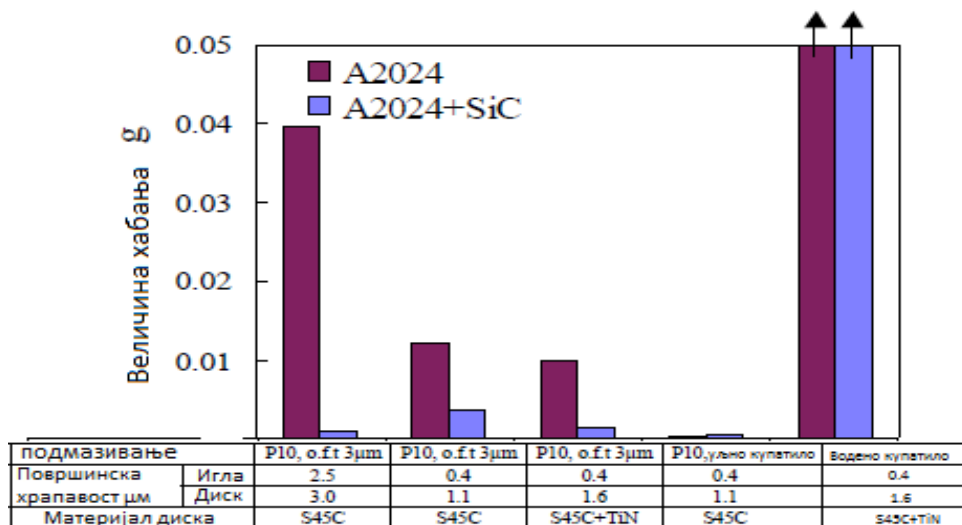
Слика 25. Однос коефицијента трења и пута клизања у условима подмазивања уљним филмом [26]

На слици 26. приказан је изглед површина "pinova" након клизања. У случају A2024 запажамо грубу огреботину и продукте хабања у виду пахуљица. Са друге стране, у случају A2024+SiC нису примећене огреботине, запажено је једино да су SiC честице и једињење Al-Si испупчене.



Слика 26. Изглед површина "pinova" након клизања
(мазива P10; o.f.t.: 3 μm, диск: S45C, 1.1 μm Ry, "pin" : 0.4 μm Ry) [26]

На слици 27. приказан је ниво похабаности p_{10} у различитим условима тестирања. При подмазивању воденим купатилом, продукти хабања теже преко 0.05g и то у случају оба p_{10} . При подмазивању уљним купатилом продукти хабања за оба p_{10} тежи за мање од 0.001g. У условима подмазивања уљним филмом тежина продуката хабања p_{10} од A2024 постаје знатно већа од тежине продуката хабања p_{10} од A2024+SiC.

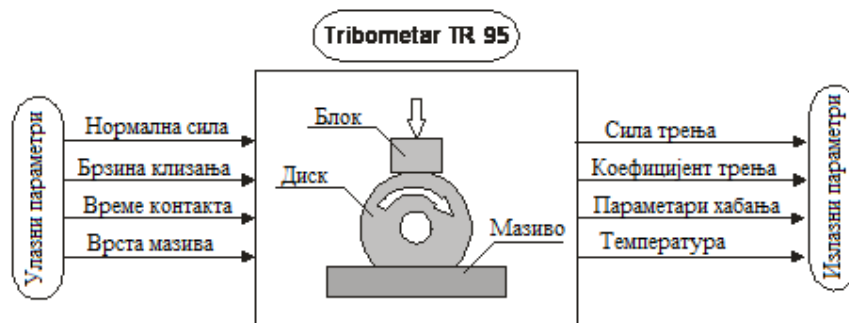


Слика 27. Ниво похабаности p_{10} у различитим условима тестирања [26]

Приликом клизања по површини S45C понашање синтероване легуре Al-SiC при трењу идентично је понашању синтероване легуре Al у одсуству мазива и у условима подмазивања воденим и уљним купатилом, док је у случају подмазивања уљним филмом запажено да синтерована легура Al-SiC показује знатно боље триболошке карактеристике и отпорност на хабање у односу на синтеровану легуру Al.

4. Уређаји за испитивање триболошких карактеристика

Испитивање триболошких карактеристика до сада помињаних челика била су моделског типа и обављена су на унапређеном и компјутерски подржаном трибометру TR-95 са "block-on-disk" контактном геометријом у Центру за трибологију Факултета инжењерских наука у Крагујевцу (слика 28.)



Слика 28. Трибомеханички систем са улазним и излазним параметрима [8]

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.

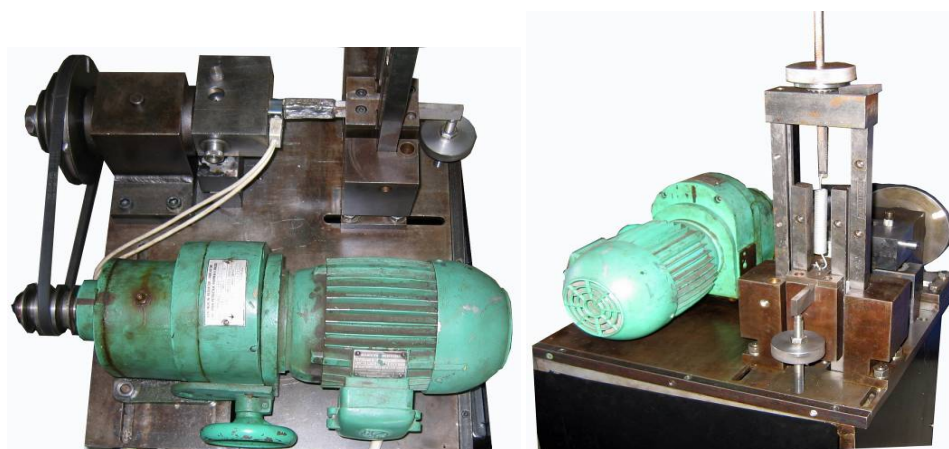
Основну конфигурацију трибометра чине: погонски систем, систем за оптерећење, систем за вођење, систем за подмазивање, систем за самоподешавање блока и мерни систем.

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 лежачева, 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 31.).



Слика 29. Трибометар TP-95 [8]



Слика 30. Детаљи трибометра TP-95 [8]



Слика 31. Носач блока [8]

4.1 Мерни систем

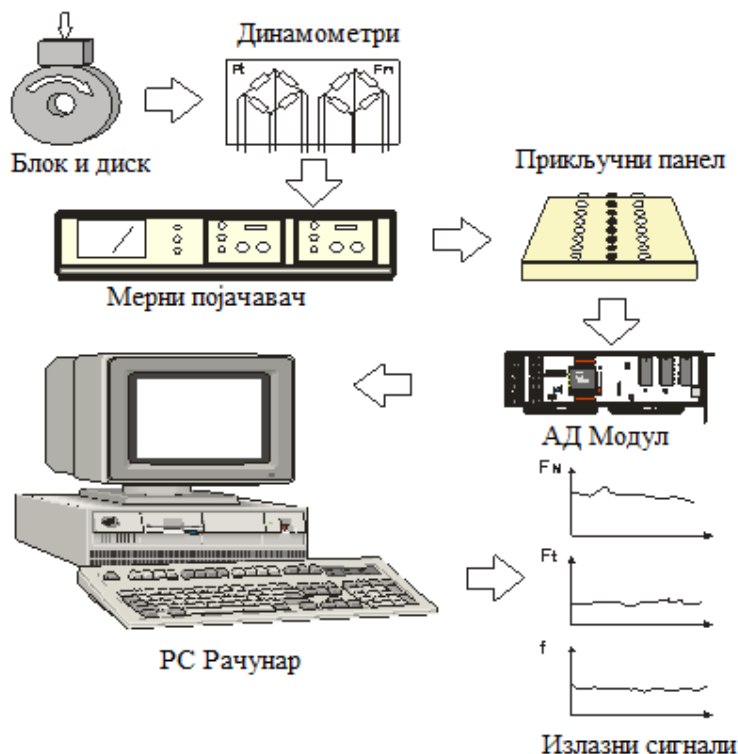
За експериментално испитивање формиран је и одговарајући мерни систем, чија је шема дата на слици 32.

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 33. 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 34. Калибрационе константе су уведене у мерни ланац, тако да је као резултат мерења на излазу добијана вредност мерних величина F_n и F_t и њиховим физичким јединицама (daN)

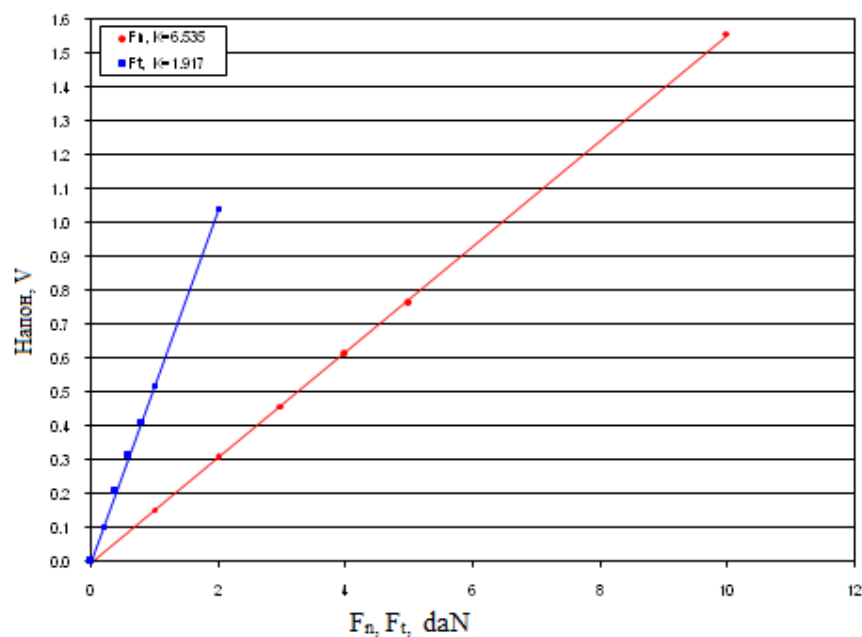


Слика 32. Шема мерног система [8]

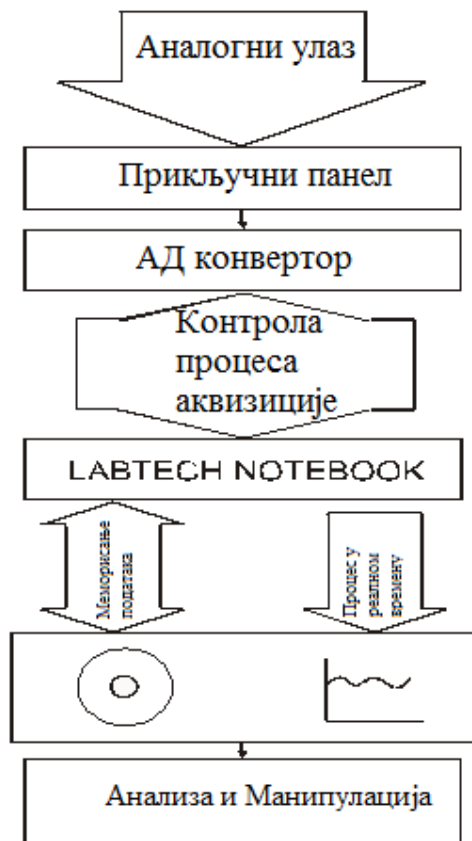


Слика 33. Изглед мерног система [8]

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

Слика 34. Калибрационе зависности F_n и F_t динамометара [8]

Функционисање мерног система одвија се кроз процес АД конверзије и аквизиције сигнала нормалне силе F_n и силе трења F_t , како би се добио рачунски сигнал коефицијента трења. Одвијање АД конверзије, аквизиција података и њихове анализе, приказане су блок дијаграмом на слици 35.



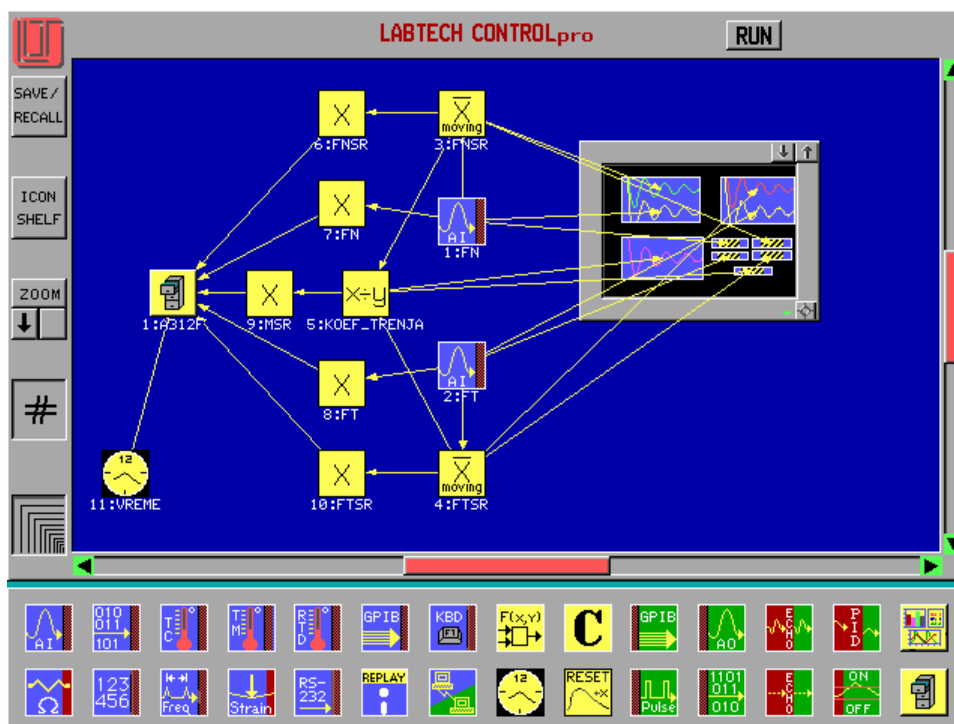
Слика 35. Блок дијаграм процеса аквизиције података [8]

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 36.

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 36. Корисничка апликација израђена у Labtech Notebook-у [8]

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 f 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.

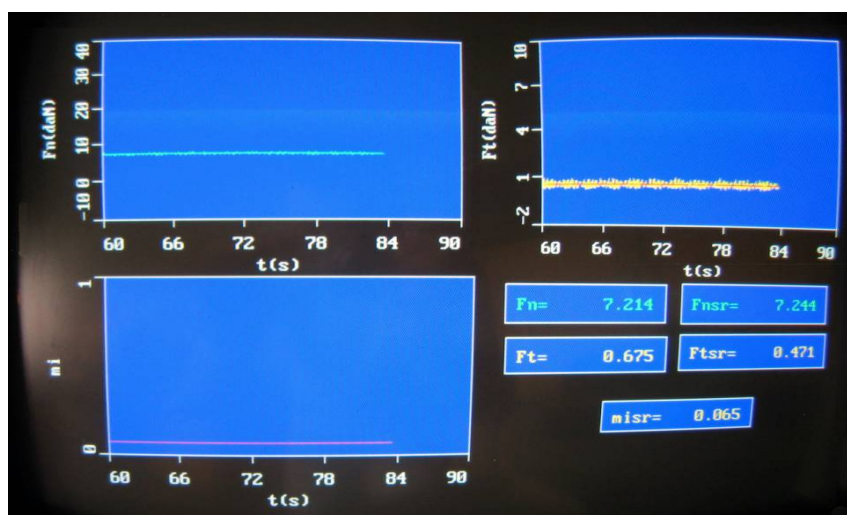
Ова метода се састоји у томе што се уместо сваке реално измерене величине временске серије узима аритметичка средина низа података у коме је она средња. Током мерења коришћена је аритметичка средина 5 тачака, што значи да се првом аритметичком средином замењује трећа тачка, затим аритметичком средином 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, табела 12.

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 37.

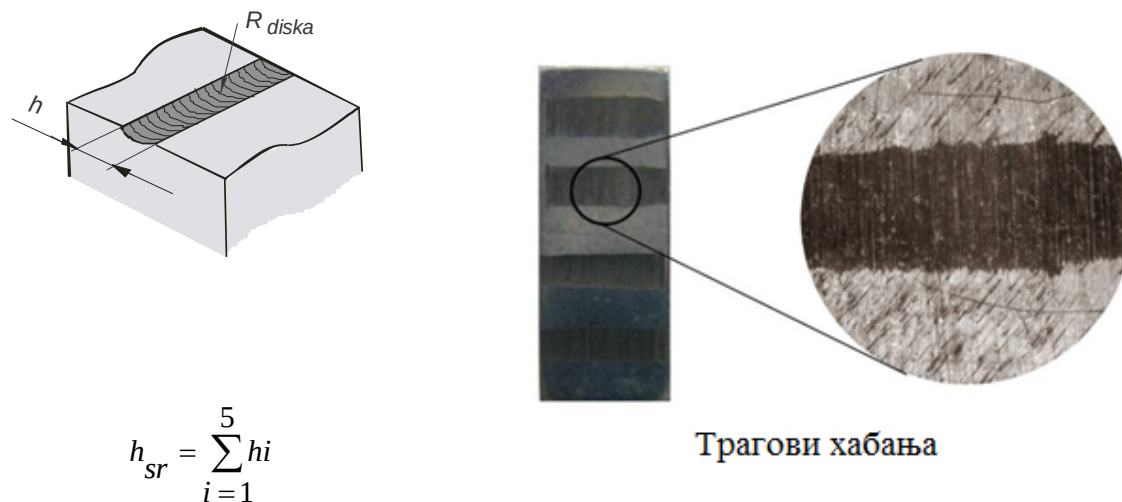
Аквизиција сигнала свих мерених вредности вршена је са 100 тачака у секунди (100 Hz) у времену од 60 секунди.

Табела 12. Изглед креиране датотеке током испитивања [8]

t s	Fn daN	Fn(sr) daN	Ft daN	Ft(sr) daN	f	fsr
0	5.204	5.185	0.553	0.650	0.106	0.125
2	5.168	5.166	0.741	0.654	0.143	0.127
4	5.060	5.173	0.647	0.638	0.128	0.123
6	5.276	5.170	0.516	0.650	0.098	0.126
8	5.024	5.170	0.666	0.640	0.133	0.124
10	5.168	5.177	0.647	0.641	0.125	0.124
12	5.240	5.160	0.581	0.646	0.111	0.125
14	5.096	5.163	0.572	0.630	0.112	0.122
16	5.312	5.171	0.731	0.658	0.138	0.127
18	5.168	5.158	0.637	0.639	0.123	0.124
20	5.060	5.173	0.487	0.649	0.096	0.125
...	...	...	...	...	...	...

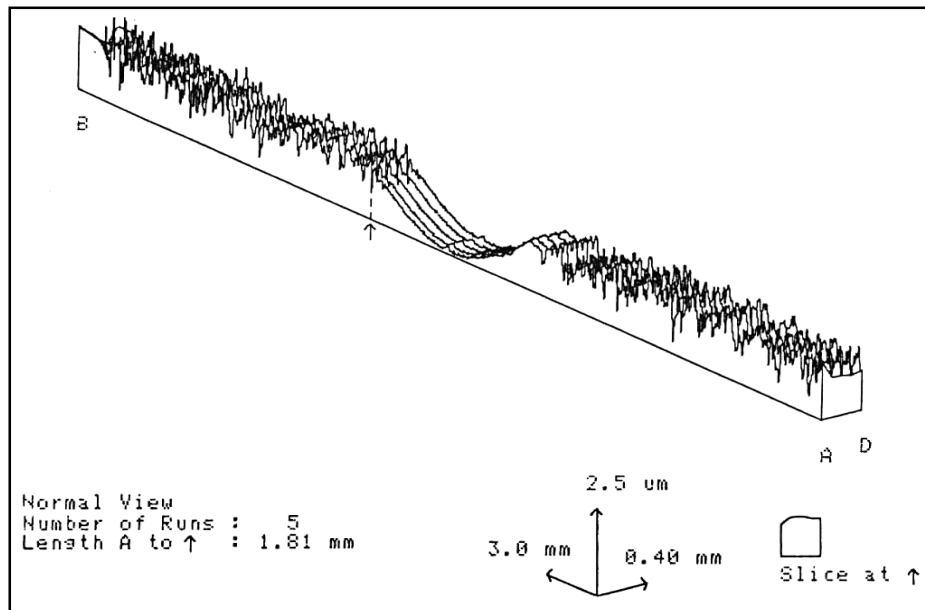
Слика 37. Сигнали тренутних и осредњих вредности F_n , F_t и [8]

Као основни параметар хабања коришћена је ширина трага хабања на контактної површини блока, како је то приказано на слици 38.



Слика 38. Ширина трага хабања на блоку [8]

Мерење је вршено на пет места, а затим је израчунавана средња аритметичка вредност која је узимана као меродавна за поређења ширине трагова хабања. На слици 39. приказан је просторни изглед похабане површине блока, снимљен помоћу мерног уређаја Talysurf 6

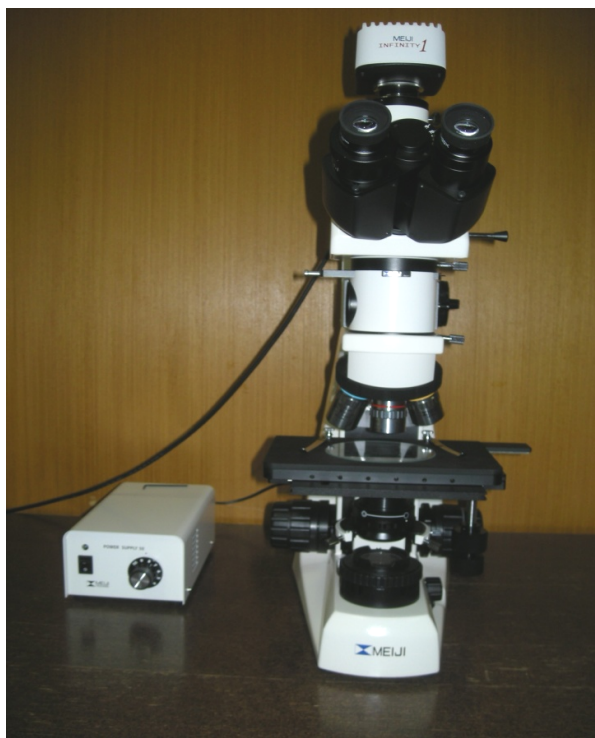


Слика 39. Профилотрисање похабаног дела површине блока [8]

Мерење ширине трага хабања на контактним површинама блока вршена је на универзалном мерном микроскопу UIM-21, слика 40. и на металуршком мерном микроскопу MT8500 слика 41.



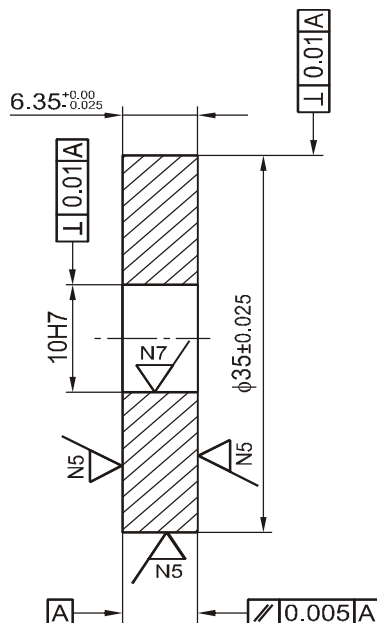
Слика 40. Универзални мерни микроскоп UIM-21 [8]



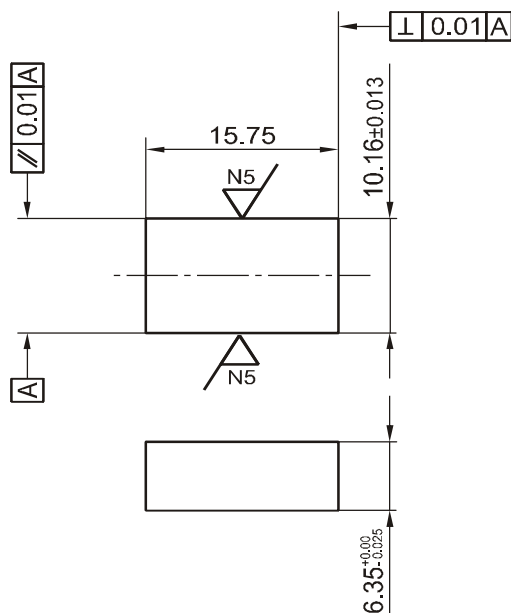
Слика 41. Металуршки микроскоп MT8500 [8]

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 42. и 43).



Слика 42. Димензије диска према ASTM G 77 стандарду [8]



Слика 43. Димензије блока према ASTM G 77 стандарду [8]

Дискови су израђивани од челика $\check{C}$ 6980 тврдоће 62 - 64 HRC са брушеним површинама, храпавости $Ra=0.45 \mu m$, а блокови од испитиваних челика домаће производње $\check{C}$ 5630 и француске производње 35NCD16T са додатком ZA-27 и SiC у брушеном стању површина. Фотографски приказ блока и диска као и контактна геометрија, дат је на слици 44.

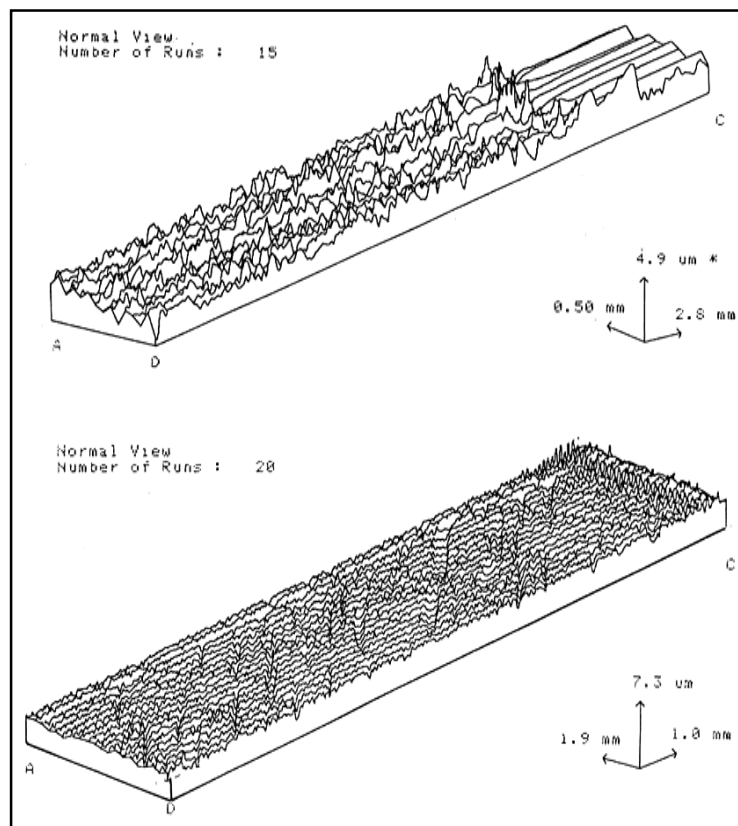


Слика 44. Диск и блок [8]

4.3 Микрогеометрија контактних површина

Микрогеометрија контактних површина представља значајану карактеристику структуре испитиваног трибомеханичког система, која има динамички карактер.

Овај значај проистиче из чињенице да почетно стање микрогеометрије утиче на интензитет почетних триболошких процеса. Наиме, зависност процеса хабања од времена остваривања контакта карактерише постојање иницијалног периода интензивног хабања у току којег се завршава процес уходавања површина. У том процесу разарају се почетне микронеравнине, образују се нове и на тај начин се ствара микрогеометрија измењене структуре (слика 45).



Слика 45. Површина пре и после уходавања [8]

У оквиру мерног система коришћен је и компјутеризован мерни уређај Talysurf 6 (слика 46.), који омогућава комплексно дефинисање стања контактних површина. Овај уређај одликује широк спектар могућности, као што су:

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



Слика 46. Мерни уређај Talysurf-6 [8]

Коришћењем овог мерног система добијена је представа о почетној микрогеометрији контактних површина испитиваних материјала.

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

R_{max} - максимална висина профила на дужини оцењивања,

R_z - средња висина профила на дужини оцењивања,

R_a - средње аритметичко одступање профила на дужини оцењивања,

и преко допунских параметра храпавости:

Криве ношења профила - дијаграм који представља однос између вредности релативне дужине ношења и нивоа пресека профила,

Расподела амплитуда - број тачака чија се одступања профила налазе у зони између две линије паралелне средњој линији у функцији средњег растојања ових двеју паралелних линија од средње линије.

5. Резултати испитивања отпорности на хабање композита са основом ZA-27 ојачаних честицама SiC

Триболошке карактеристике у великој мери зависе од контактних услова, као на пример што је контактна геометрија, вид кретања, брзина релативног кретања тела у контакту, нормалног оптерећења, механичких карактеристика материјала у контакту, топографије површина и многих других који у одређеним контактним ситуацијама заузимају веома значајну улогу.

Циљ овог испитивања је одређивање отпорности на хабање, композита са основом ZA-27 ојачаних честицама SiC (1 %, 3 %, 5%). Испитивања су вршена без подмазивања при различитим вредностима нормалног оптерећења и брзине клизања. Треба напоменути да је приликом испитивања нормално оптерећење и брзина клизања константни.

5.1 Материјал

5.1.1 Домаћи композити на бази ZnAl легура

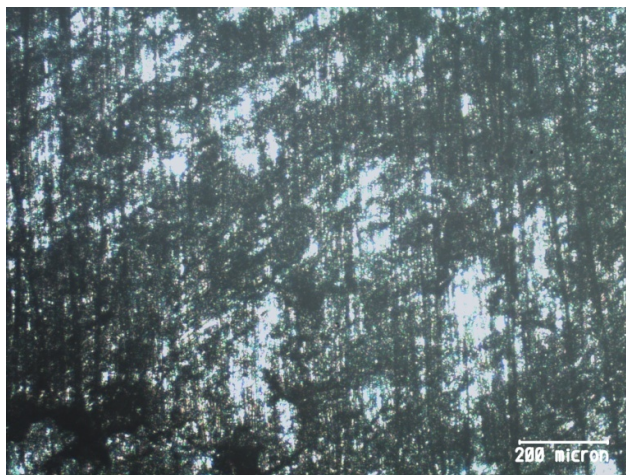
Легура ZA-27 је једна од најчешће коришћених из групе легура цинка са повећаним садржајем алуминијума (ZnAl легура). Поред добре ливкости, која омогућава примену готово свих познатих ливачких технологија за добијање производа, ова легура поседује најповољнији однос физичких и механичких особина, а уз то има и најмању запреминску масу у односу на остале легуре цинка. Поред тога, термичка обрада омогућава побољшање квалитета производа од ове легуре [10].

Ова легура (ZA-27) сматра се најперспективнијом за добијање композитних материјала, јер је погодна као основа за примену више метода за добијање композита. Поред тога погодна је за термичку обраду и пластичну прераду, тако да је могуће накнадно утицати на механичке особине добијених производа.

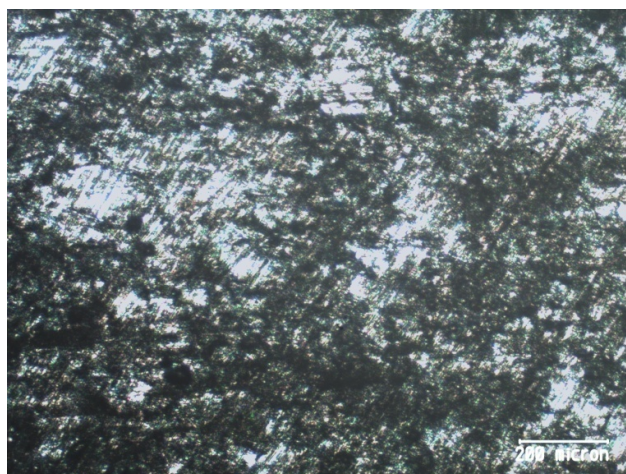
Из тих разлога, у Лабораторији за материјале Института за нуклеарне науке "Винча", развијени су композитни материјали са основом од ZA-27 легуре уз додатак честица SiC (са масеним уделима од 1, 3 и 5 % SiC и величинама честица од 39 μm) као ојачавача. Затим је извршено истраживање триболошких карактеристика добијених композитних материјала што представља и циљ овог рада.

Анализом очвршћавања ZA-27 легуре, процењено је да је компокастиг поступак оптималан начин добијања композита са основом од ZA-27 легуре.

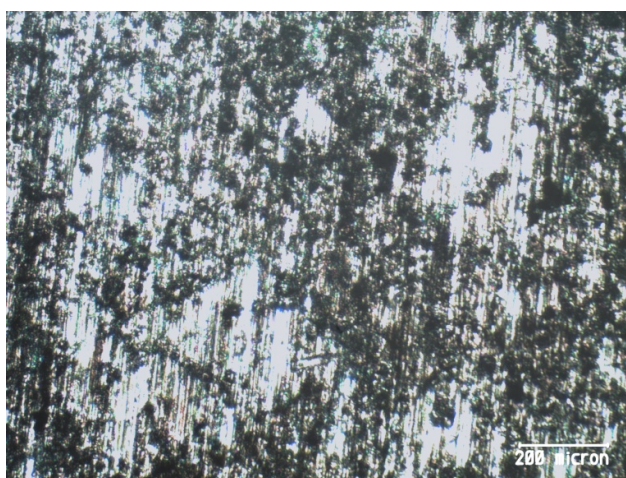
На сликама 47, 48 и 49 дат је изглед контактних површина композита са 1%, 3% и 5 % SiC.



Слика 47. Оптичка микроскопија контактне површине композита са 1% SiC



Слика 48. Оптичка микроскопија контактне површине композита са 3% SiC



Слика 49. Оптичка микроскопија контактне површине композита са 5% SiC

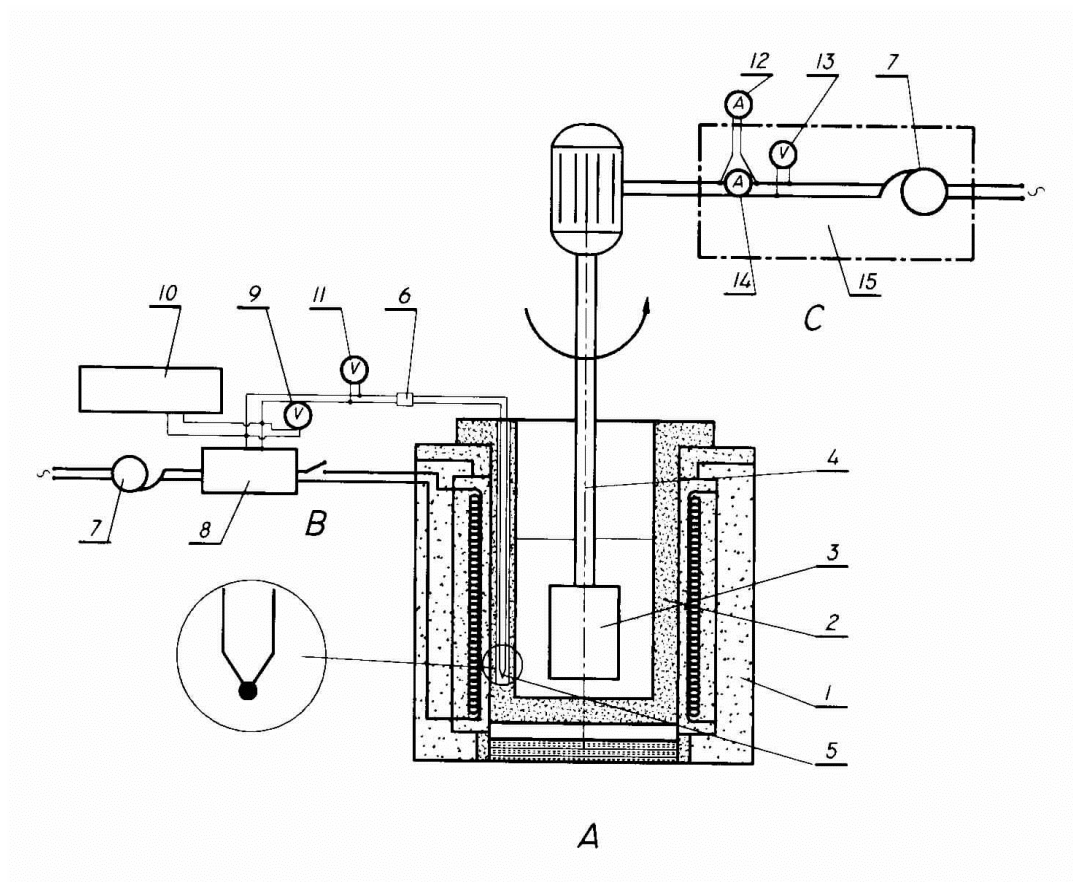
5.2 Апаратура за добијање композита

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 (Б) и дела за мерење и контролу електричних параметара рада мешача (Ц) [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 компокаст TiNg 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 50). Основне димензије посуде су: спољни пречник 85 mm, унутрашњи 75 mm.

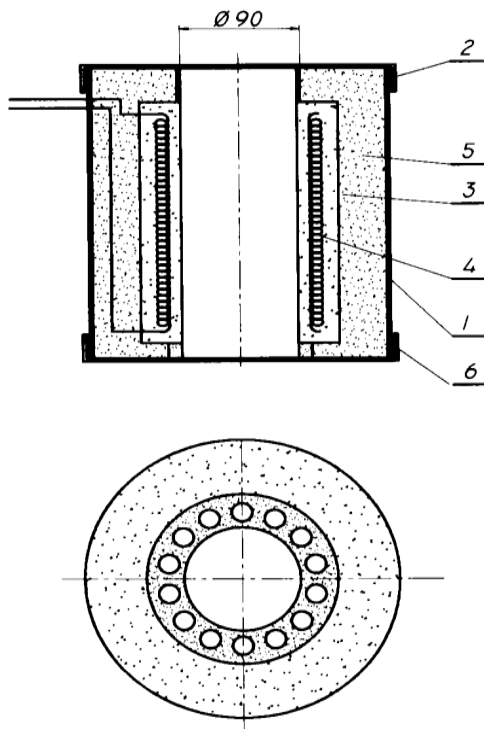
Процесном делу апаратуре припада и лабораторијски мешач (5, слика 51) снаге 250 W при максималном броју обртаја од 600 о/мин, и напону од 220V, са уграђеним потенциометром за ручно подешавање брзине обртања. Као активни део мешача коришћена је плоча од челичног лима на којој је плазма-поступком нанесен танак слој алуминијум оксида. Пречник круга коју описује плоча при обртању (дужина доње ивице плоче) је 40 mm.



- А. Процесни део, Б. Део за контролу и регулацију температуре,
 Ц. 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 50. Шематски приказ апаратуре за добијање композита [10]

Део апаратуре за мерење, контролу и регулацију температуре (слика 50.Б) 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 51. Шематски приказ лабораторијске електроотпорне пећи [27]

5.3 План испитивања

Контактни услови:

- Узорак – Узорак – Легура ZA-27 са додатком SiC (честица величине 39 μm)
 - ZA27+1%SiC
 - ZA27+3%SiC
 - ZA27+5%SiC,
- Контра тело – челични диск Š6980
- Тип кретања – клизање
- Укупни пут клизања -600m,
- Нормално оптерећење – 10N, 20N и 30N, константно,
- Брзине клизања – 0.25 m/s, 0.5 m/s, и 1 m/s константна

Мерени су само основни технолошки параметри: ширина трага хабања и све то у циљу одређивања отпорности на хабање и њене зависности од контактних параметара и масеног удела ојачивача SiC.

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

5.4 Резултати испитивања

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

Додатак SiC %	Брзине клизања mm/s	Нормално оптерећење, N		
		10 N	20 N	30 N
		Ширина трага хабања, h		
1%	0.25 m/s	3.21	3.31	3.43
1%	0.50 m/s	2.68	2.92	3.26
1%	1 m/s	2.17	2.59	2.89

Табела 13. ZA27+ 1% SiC

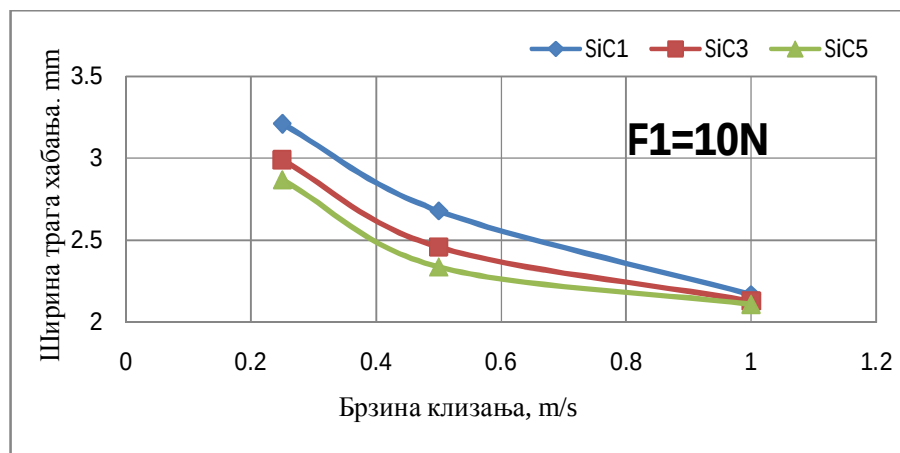
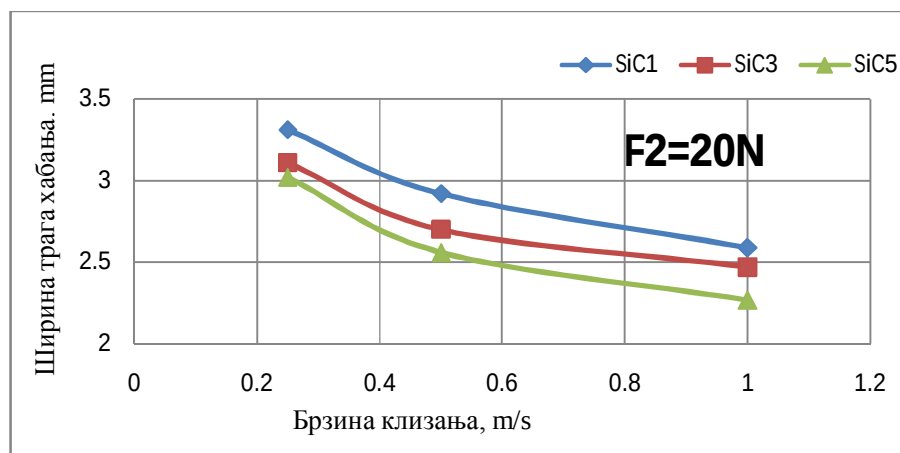
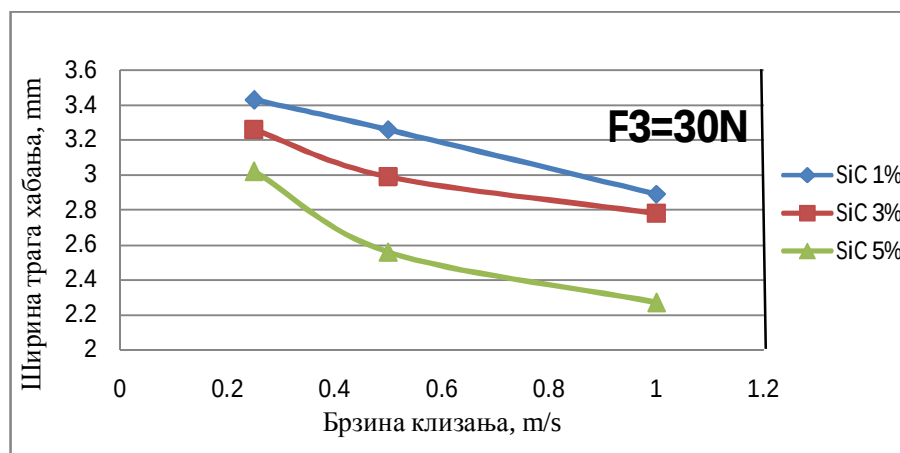
Додатак SiC %	Брзине клизања mm/s	Нормално оптерећење, N		
		10 N	20 N	30 N
		Ширина трага хабања, h		
3%	0.25 m/s	2.99	3.31	3.26
3%	0.50 m/s	2.46	2.7	2.99
3%	1 m/s	2.13	2.47	2.78

Табела 14. ZA27+ 3% SiC

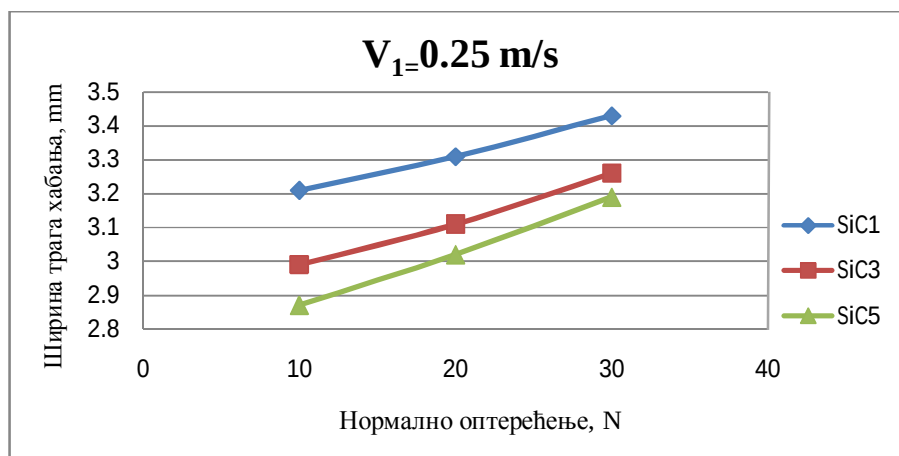
Додатак SiC %	Брзине клизања mm/s	Нормално оптерећење, N		
		10 N	20 N	30 N
		Ширина трага хабања, h		
5%	0.25 m/s	2.87	3.02	3.19
5%	0.50 m/s	2.34	2.56	2.79
5%	1 m/s	2.11	2.27	2.56

Табела 15. ZA27+ 5% SiC

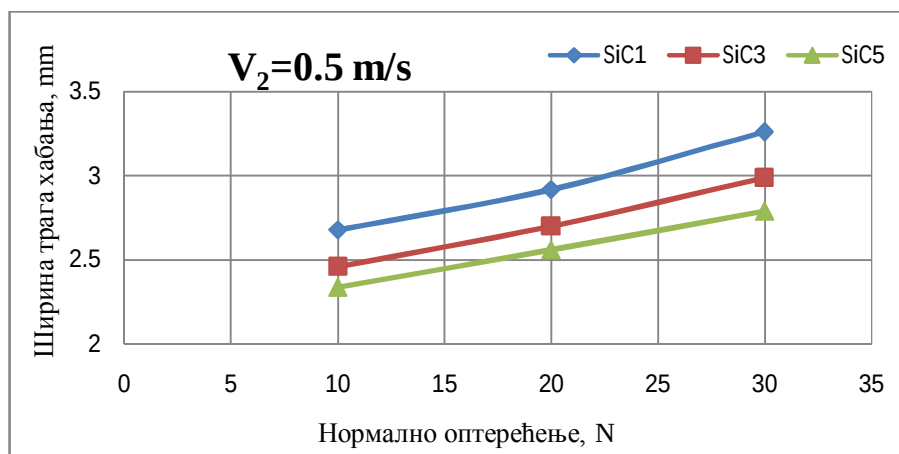
На основу добијених табела формиране су дијаграмске зависности ширине трага хабања од брзине клизања и нормалног оптерећења (слике 52-54).

Слика 52. Зависност ширине трага хабања од брзине клизања (за $F_1=10\text{N}$, 1, 3, 5 % SiC)Слика 53. Зависност ширине трага хабања од брзине клизања (за $F_2=20\text{N}$, 1, 3, 5 % SiC)Слика 54. Зависност ширине трага хабања од брзине клизања (за $F_3=30\text{N}$, 1, 3, 5 % SiC)

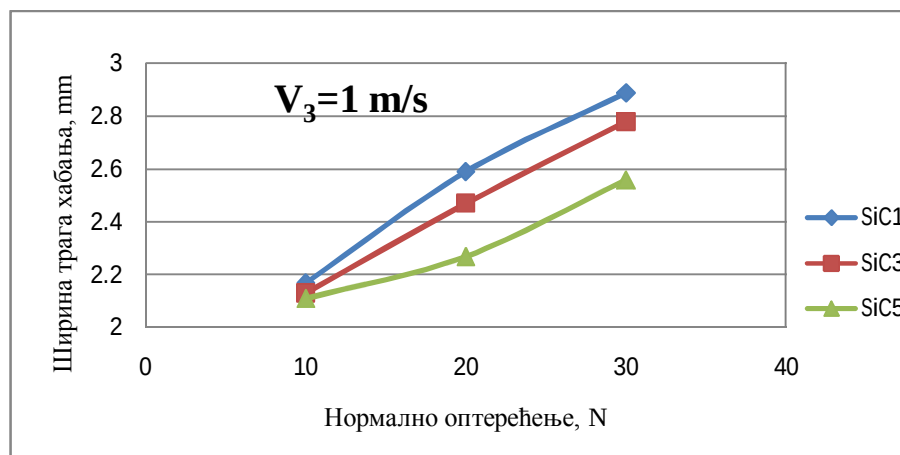
Са дијаграмских приказа (слике 52- 54) утврђено је да са порастом брзине клизања за константне вредности нормалног оптерећења (10, 20 и 30N) ширина трага хабања опада за све испитиване узорке. Овај тренд пада вредности ширине трага хабања је готово идентичан при сви контактним условима. Такође уочено је да ширина трага хабања опада са повећањем масеног удела SiC у свим испитним условима, што је у складу са очекивањима и теоријским основама које су представљене у претходним поглављима овог завршног рада.



Слика 55. Зависност ширине трага хабања од нормалног оптерећења ($V_1 = 0.25 \text{ m/s}$ за $F = 10\text{N}$, 20N и 30N)



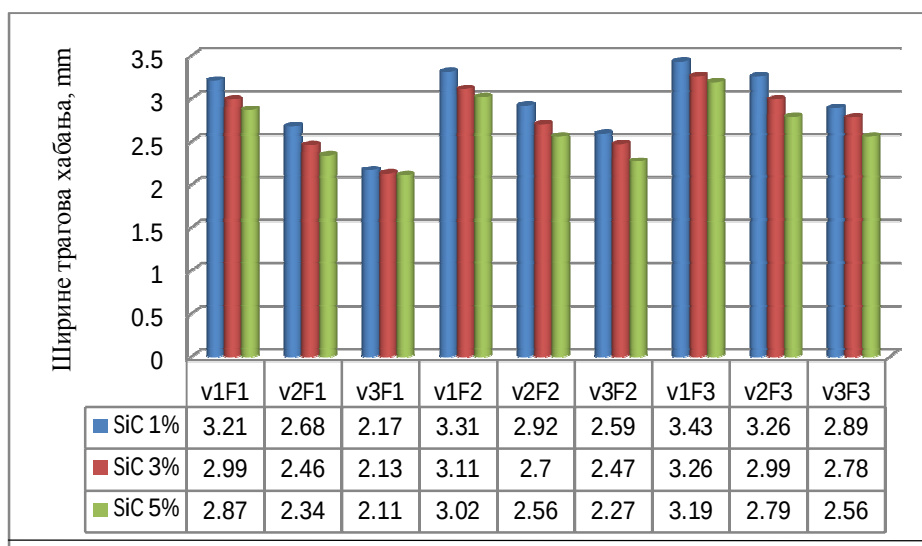
Слика 56. Зависност ширине трага хабања од нормалног оптерећења ($V_2 = 0.5 \text{ m/s}$ за $F = 10\text{N}$, 20N и 30N)



Слика 57. Зависност ширине трага хабања од нормалног оптерећења ($V_3 = 1 \text{ m/s}$ за $F = 10 \text{ N}$, 20 N и 30 N)

Са дијаграмских приказа (слике 55-57.) утврђено је да са порастом нормалног оптерећења за константне вредности брзине клизања (0.25 m/s , 0.5 m/s и 1 m/s) ширина трага хабања опада за све испитиване узорке. Овај тренд пада вредности ширине трага хабања је готово идентичан при сви контактним условима. Такође уочено је да ширина трага хабања опада са повећањем масеног удела SiC у свим испитним условима, што је у складу са очекивањима и теоријским основама које су представљене у претходним поглављима овог завршног рада.

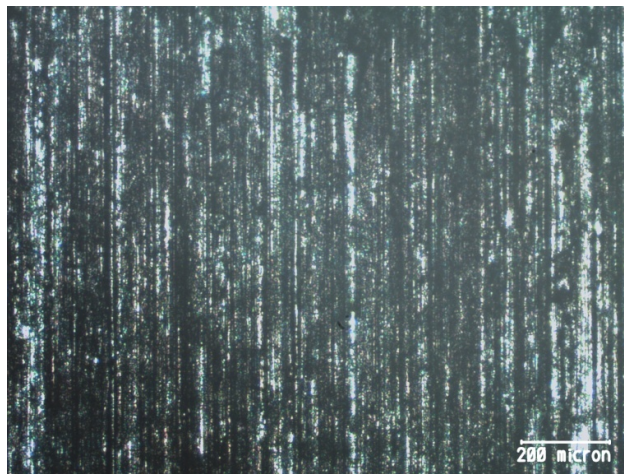
На слици 58. дат је хистограмски приказ зависности ширине трага хабања од промене контактних услова, ради бољег сагледавања и квантификације утицаја масеног процента ојачивача у матрици композита. Хистограм указује да при свим комбинацијама испитних услова (брзине клизања и нормалног оптерећења) са повећањем масеног процента ојачивача долази и до побољшања отпорности на хабање.



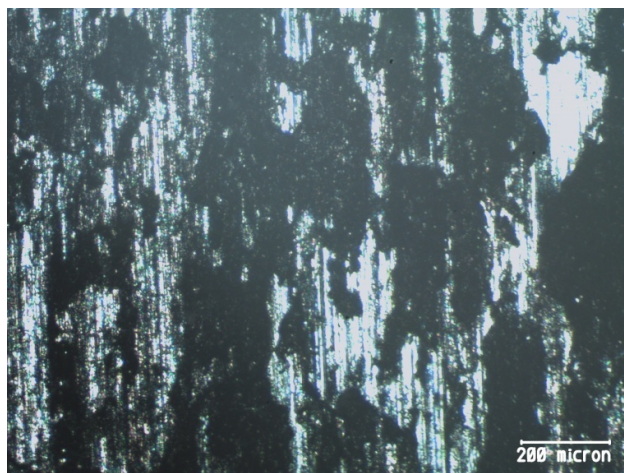
Слика 58. Хистограмски приказ зависности ширине трага хабања од промене контактних услова.

Овакав резултат је последица присуства честица SiC у релативно мекој легури ZA27, односно може се закључити да су инфилтриране честице ојачивача носиоци оптерећења и да се контакт у појединим случајевима одвијао само преко поменутих честица.

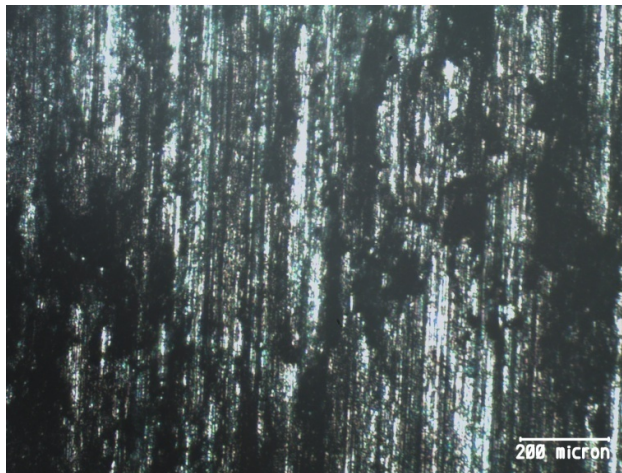
На сликама 59, 60 и 61 је приказана оптичка микроскопија трага хабања композита са 1% , 3% и 5 % SiC.



Слика 59. Оптичка микроскопија трага хабања композита са 1% SiC, при брзини клизања 1 m/c и нормалном оптерећењу 30 N, након 600 m



Слика 60. Оптичка микроскопија трага хабања композита са 3% SiC, при брзини клизања 1 m/c и нормалном оптерећењу 30 N, након 600 m



Слика 61. Оптичка микроскопија трага хабања композита са 5% SiC, при брзини клизања 1 m/s и нормалном оптерећењу 30 N, након 600 m

На основу приказаних трагова хабања (слике 59-61) може се закључити да је доминантни механизам хабања абразивно хабање, што се уочава по паралелним браздама у самом трагу хабања. Међутим, због природе контакта, односно због саме геометрије контакта може се рећи да је на почетку остваривања контакта доминантно адхезивно хабање. То се пре свега може рећи због тога што се контакт између блока и диска остварује по линији, односно посматрано са микро нивоа по малом броју врхова неравнина. При тако оствареном контакту долази до генерисања високих Herz-ових притисака, који се зависно од величине нормалног оптерећења налазе у границама од 30-60 МПа.

Такође, у самим траговима се могу приметити и тамнија поља за која можемо претпоставити да су места на којима су се налазиле честице SiC. Тако можемо рећи да честице SiC које се додају са циљем повећања отпорности на хабање у случају када се нађу слободне у зони контакта делују као абразив и због своје тврдоће значајно оштећују контактне површине како диска, тако и блока.

6. Закључак

Легура ZA-27 сматра се најперспективнија за добијање композитних материјала, јер је погодна као основа за примену више метода за добијање композита. Пажљивим избором материјала ојачивача и производног процеса, могу се добити композити који имају јединствена, сасвим нова и другачија својства у односу на саставне компоненте.

Предности добијених композитних материјала у поређењу са основом (ZA-27 легуром), огледају се у побољшању механичких особина, пре свега у повећању отпорности према хабању, повећању специфичног модула еластичности и у већој чврстоћи, отпорности на корозију и високе температуре, хемијску инертност, издржљивост и постојаност.

Резултати експерименталних испитивања показују да је променом масеног удела и величина честица ојачивача SiC могуће утицати на триболошке карактеристике испитиваних композита са основом од ZA-27 легуре.

На основу представљених радова можемо навести нека мишљења аутора. Ојачавање алуминијумске матрице делићима SiC побољшало је отпорност на хабање свих тестираних композита у контакту са свим коришћеним абразивима, отпорност на абразивно хабање композита повећавала се са повећањем процентуалног удела SiC честица у проучаваном распону, онда отпорност на хабање је много веће код композита него код монолитних легура, и да расте са повећањем пречника и процентуалног удела честица SiC.

Тврдоћа композита смањивала се са повећањем просечног пречника SiC честица, док се показало да је отпорност на хабање директно пропорционална просечном пречнику. Сходно томе можемо рећи да није само тврдоћа та која утиче на отпорност на хабање композита, и величина и пропорционални удео SiC честица имају значајан утицај. Са повећањем просечног пречника и процентуалног удела честица SiC смањује се специфични интензитет хабања, што је и приказано. Крупније честице SiC и њихов већи процентуални удео спречавају настанак пластичних деформација у процесу хабања; крупније честице теже се раслојавају и избацују из површине изложене хабању.

Конкретно, својим радом који се односио на испитивањем триболошких карактеристика композитних материјала са основом од ZA-27 легуре ојачане честицама SiC, можемо закључити следеће:

- са порастом нормалног оптерећења за константне вредности брзине клизања, ширина трага хабања опада за све испитиване узорке,
- са порастом брзине клизања за константне вредности нормалног оптерећења, ширина трага хабања опада за све испитиване узорке,
- са повећањем масеног процента SiC ојачивача долази и до побољшања отпорности на хабање,
- честице SiC које се додају са циљем повећања отпорности на хабање у случају када се нађу слободне у зони контакта делују као абразив и због своје тврдоће значајно оштећују контактне површине како диска, тако и блока,
- Интензитет хабања свих испитиваних композитних материјала је мањи у односу на легуру ZA-27 за све вариране брзине клизања и нормална оптерећења.

Предмет новијег истраживања су новији композити, истовремено ојачавање матрице са тврдим честицама (Al_2O_3 , SiC) и честицама графита или неког другог чврстог мазива. Ови композити истовремено показују повећану отпорност на хабање (због присуства тврдих честица као ојачивача) и смањену вредност трења због присуства графита.

Такође, предмет новијих истраживања су наноккомпозити, композити чија величина ојачивача не прелази $10\mu\text{m}$.

7. Литература / Reference

- [1] Babić M., Mitrović S.: Osnovi tribologije-tribomehanički sistemi, predavanje, Fakultet inženjerskih nauka u Kragujevcu, 2011.
- [2] Stojmenović M., Jelić T.: Kompozitni materijali - Seminarski rad, Tehnički fakultet Čačak, 2010.
- [3] Schwartz Mel., Composite Materials Handbook, Metals and Metals Processing; Sikorsky Aircraft-Division of United Technologies, 1995.
- [4] Clyne T., Withers P. J.: An Introduction to Metal Matrix Composites, Cambridge University Press, 1995.
- [5] Indof J., Đ. Španiček: Materijali i tehnološki razvoj, Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, Zagreb, 2002.
- [6] Indof J.: 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.
- [7] Adamović D.:Kompozitni materijali (AS)- predavanje, Fakultet inženjerskih nauka u Kragujevcu, 2009.
- [8] Babić M., Mitrović S.: Tribološke karakteristike kompozita na bazi ZnAl legura, Fakultet inženjerskih nauka u Kragujevcu, 2007.
- [9] Rutheford J.D.: ZA8 Hot Chamber Die Casting Alloy and Process Development, SDCE Internacional Die Casting Congress and Exposition 1, June 3-6, Milwaukee, 1985.
- [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] Goodwin F. , Ponikvar A.: Engineering properties of zinc alloys, Third edition, ILZRO, 1989.
- [12] Ninković R.: Cink-Aluminijumske legure kao tribomaterijal za klizne ležaje, Magistarska teza, Fakultet inženjerskih nauka u Kragujevcu, 2000.
- [13] Božić B.: Fizička metalurgija, Naučna knjiga, Beograd, 1972.
- [14] ASTM Standard B 791-88.
- [15] Kubel E.J. , Expanding Horizons for ZA Alloys, Advances Materials and Process, vol. 7, 51-57, 1987.
- [16] Babić Miroslav, Mitrović Slobodan, Jeremić Branislav, 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, ISSN 0301-679, 2010.

- [17] Babić Miroslav, Aleksandar Venci, Slobodan Mitrović, Ilija Bobić, Influence of T4 Heat Treatment on Tribological Behavior of Za27 Alloy Under Lubricated Sliding Condition, Tribology Letters, Vol.36, No.2, pp. 125-134, ISSN 1023-8883, 2009.
- [18] Babić Miroslav, Mitrović Slobodan , Bobić Ilija , Živić Fatima, Wear behavior of composites based on ZA-27 alloy reinforced by Al₂O₃ particles under dry sliding condition, Tribology Letters, Vol.38, No.3, pp. 337-346.
- [19] Miroslav Babić, Slobodan Mitrović, Fatima Zivić, 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.
- [20] S. Mitrović, M. Babić, F. Zivić, I. Bobić, D. Dzunić, M. Pantić, Influence Of Al₂O₃ Particle Content On The Sliding Wear Behaviour Of Za-27 Alloy Composite, Journal of the Balkan Tribological Association, Vol.-, No.-, pp. -, ISSN 1310-4772, Doi Ref. No. 928/06.12.2011, 2012.
- [21] Miroslav Babić, Slobodan Mitrović, Dragan Džunić, Branislav Jeremić, Ilija Bobić, Tribological Behavior of Composites Based on Za-27 Alloy Reinforced With Graphite Particles, Tribology Letters, Vol.37, No.2, pp. 401-410.
- [22] 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, 19-21. June.
- [23] Kassim S. Al-Rubaie , Humberto N. Yoshimura , Jose´ Daniel Biasoli de Mello: Two-body abrasive wear of Al–SiC composites, Wear 233–235 (1999), pages 444–454, 1999, Brazil.
- [24] Tiwari S. , Balasubramaniam R. , Gupta M.: Corrosion Behavior of SiC Reinforced Magnesium Composites, Corrosion Science 49 (2007) pages 711–725 National University of Singapore, 2006.
- [25] Zou G.H. , Miyahara H. , Yamamoto K. , OGI K. : Sliding wear behaviour of Al – Si – Cu composites reinforced with SiC particles, Kyushu University, Hakozaki 6-10-1, Higashi-ku, Fukuoka, 812 – 8581 Japan, 2003.
- [26] Dohda K. , Wang Z. , Taniguchi Y.: Tribo-Characteristics of Al-SiC Sintered Alloy, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan.
- [27] Babić M.: Doprinos istraživanju triboloških svojstava kontaktnih slojeva kroz razvoj tribometrije, Doktorska disertacija, Kragujevac, 1989.