



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА



**ПРИМЕНА ТРИБОЛОШКИХ ИСТРАЖИВАЊА НА  
ПРИМАРНИМ ДЕЛОВИМА ВЕНТИЛА У ГАСНИМ  
СИСТЕМИМА ПРИРОДНОГ ГАСА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ментор: Проф. Др Павел Ковач      Кандидат: мр Жељко Алексић

Нови Сад, 2016. године



## КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, <b>РБР:</b>	
Идентификациони број, <b>ИБР:</b>	
Тип документације, <b>ТД:</b>	Монографска публикација
Тип записа, <b>ТЗ:</b>	Текстуални штампани материјал
Врста рада, <b>ВР:</b>	Докторска дисертација
Аутор, <b>АУ:</b>	мр Жељко Алексић, дипл.инж.маш
Ментор, <b>МН:</b>	Др Павел Ковач, редовни професор
Наслов рада, <b>НР:</b>	Примена триболошких истраживања на примарним деловима вентила у гасним системима природног гаса
Језик публикације, <b>ЈП:</b>	Српски
Језик извода, <b>ЈИ:</b>	Српски/Енглески
Земља публикавања, <b>ЗП:</b>	Република Србија
Уже географско подручје, <b>УГП:</b>	АП Војводина
Година, <b>ГО:</b>	2016
Издавач, <b>ИЗ:</b>	Ауторски репринт
Место и адреса, <b>МА:</b>	Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, <b>ФО:</b> (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	11/217/192/37/177/32/0
Научна област, <b>НО:</b>	Машинско инжењерство
Научна дисциплина, <b>НД:</b>	Трибо технологија
Предметна одредница/Кључне речи, <b>ПО:</b>	Трибологија, гранично подмазивање, мазива, трибо материјали
<b>УДК</b>	
Чува се, <b>ЧУ:</b>	Библиотека ФТН Нови Сад
Важна напомена, <b>ВН:</b>	
Извод, <b>ИЗ:</b>	У раду је извршено триболошко истраживање у области граничног подмазивања које се јавља на примарним деловима вентила у системима природног гаса. Истраживања су извршена етапно, у реалним и, лабораторијским условима, користећи савремене методе триболошких експерименталних истраживања. Извршена је замена могућим оптималним материјалима трибо парова у односу на реалне ефектуиране материјале вентила. Креирана су нова мазива за област граничног подмазивања у односу на инострану и извршено је упоређивање по више критеријума. Статистичка, металографска, хемијска и физичка испитивања трибо парова су извршена и упоређивана.
Датум прихватања теме, <b>ДП:</b>	22.10.2015
Датум одбране, <b>ДО:</b>	... 2016
Чланови комисије, <b>КО:</b>	Председник: Др Марин Гостимировић, ред. професор
	Др Душан Голубовић, ред. професор
	Др Богдан Неђић, ред. професор
	Члан: Др Бранко Шкорић, ред. професор
Члан, ментор: Др Павел Ковач, ред. професор	Потпис ментора



## KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, <b>ANO</b> :		
Identification number, <b>INO</b> :		
Document type, <b>DT</b> :	Monographic publication	
Type of record, <b>TR</b> :	Textual material, printed	
Contents code, <b>CC</b> :	Doctoral Thesis	
Author, <b>AU</b> :	Mr. Zeljko Aleksic in Mechanical Engineering	
Mentor, <b>MN</b> :	Prof. Pavel Kovac, Ph.D	
Title, <b>TI</b> :	The application of tribological research on primary parts of valves in gas systems	
Language of text, <b>LT</b> :	Serbian	
Language of abstract, <b>LA</b> :	Serbian/English	
Country of publication, <b>CP</b> :	Republic of Serbia	
Locality of publication, <b>LP</b> :	AP Vojvodina	
Publication year, <b>PY</b> :	2016	
Publisher, <b>PB</b> :	Autors reprint	
Publication place, <b>PP</b> :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovica 6	
Physical description, <b>PD</b> : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	11/217/192/37/177/32/0	
Scientific field, <b>SF</b> :	Mechanical Engineering	
Scientific discipline, <b>SD</b> :	Tribo technology	
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	Tribology, boundary lubrication, grease, tribo materials	
<b>UC</b>		
Holding data, <b>HD</b> :	FTS Library	
Note, <b>N</b> :		
Abstract, <b>AB</b> :	In this paper an experimental tribological research was carried out at the field of boundary lubrication which appear on primary parts of valves in systems of natural gas. Research was carried out in stages, at the real conditions and in the laboratory, using modern methods of experimental research of wear. Replacement of materials was made with possible optimized tribo pairs in relation to the real effectuated materials of valve. The new lubricants were created for boundary lubrication regime with respect to foreign and comparison was made through more criteria. Statistical, metallographic, chemical and physical test were performed with tribo pairs and compared	
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :	22.10.2015	
Defended on, <b>DE</b> :	--.2016	
Defended Board, <b>DB</b> :	President: Prof. Marin Gostimirovic, Ph.D. Prof. Dusan Golubovic, Ph. D. Prof. Bogdan Nedic, Ph. D.	
Member:	Prof. Branko Skoric, Ph.D.	Menthor's sign
Member, Mentor:	Prof. Pavel Kovac, Ph.D	

## **Изрази захвалности**

Користим прилику да се на овом месту захвалим људима који су ми својим учешћем омогућили да ова дисертација буде доведена до краја и добије овај облик.

Првог међу једнакима, поменуо бих свог ментора проф. Др. Павел Ковача на вођству поступка израде тезе. Проф. Др. Марину Гостимировићу на труду који је уложио и помоћи око обликовања садржаја, проф. Др. Богдану Недићу на саветима у вези поставке експерименталних испитивања и опреме у Лабораторији за обраду метала и трибологију Факултета инжењерских наука у Крагујевцу.

Посебно истичем захвалност руководству ФАМ-Крушевац који је препознао заједнички интерес и постигнутим резултатима у досадашњој сарадњи. Истичем уз дужно поштовање Славицу Манојловић, дипл.техн. која је својим несебичним радом и сарадњом допринела да се ова докторска дисертација доведе до краја.

Особу која ме је храбрила и уливала оптимизам током израде тезе, као и својим саветима помињем академика Др. Душана Јешића.

# **Per aspera ad astra**

Посвећујем мојим звездама на небу,  
сину Аљоши и ћерци Вери

### **Списак коришћених ознака:**

$\alpha$  – угао нагиба( ако није другачије наведено)

coll – 25,4 mm

$F_n$  – Нормална сила

$F_T$  – Сила трења

$\mu$  – коефицијент трења

$\omega$  – угаона брзина

$\tau$  – Напон смицања

$S_R$  – Реална додирна површина

$P$  – притисак (ако није другачије наведено)

$A_r$  – укупна површина непосредних додира

$v$  – брзина клизања(ако није другачије наведено)

$p_m$  – пенетрацијска тврдоћа (по Бринелу или Викерсу)

$\gamma$  – коефицијент површинског напона тела(ако није другачије наведено)

$m$  – маса

$t$  – време

$U$  – унутрашња енергија (ако није другачије наведено)

$E$  – Енергија

$A$  – рад (ако није другачије наведено)

$\sigma$  – површинска енергија по јединици површине (ако није другачије наведено)

$Q$  – ослобођена топлота

$A_p$  – адхезивни контакт-површина

$A_a$  – укупна површина контакта

$F$  – Сила (са различитим индексима) ако није другачије напоменуто

$\Psi$  – индекс пластичности

$E$  – модул еластичности

$F_s$  – статичка сила трења

$F_k$  – кинетичка сила трења

$K$  – крутост

$V$  – запремина

$P$  – специфично оптерећење

**Преглед коришћених скраћеница:**

A/D – аналогно дигитални претварач

MIL – (Military standards) Војни стандарди

ASTM – Амерички стандарди за материјале и поступке

PVD – тип превлаке материјала

CVD – тип превлаке материјала

DLC – (diamond-like carbons)-чврсте материје на бази угљеника

TMD – (transition metal dichalcogenides) – прелазни метали дихалогениди

FIB – микроскопија

MD – молекуларна динамика

NFC – (near carbon frictionless) – тип чврстог премаза на бази угљеника

UNCD – (ultrananokristalline diamond) – тип чврстог премаза на бази угљеника

ЗМС – заптивна мазивна средства

ТМС – трибо-механички систем

DLN – дијамантски нанокомпозити

AFM – тип микроскопа ( исто и STM, SEM, TEM, SFM, FTIR)

АЕ – акустична емисиона техника

PTFE – политетрафлуоретилен

**Садржај**

1. УВОДНО РАЗМАТРАЊЕ .....	5
1.1 Циљеви истраживања .....	6
1.1 Хипотезе .....	7
1.2 Очекивани резултати .....	7
2. ТРИБОЛОГИЈА И ИНЖЕЊЕРСТВО ПОДМАЗИВАЊА .....	8
2.1 Трибо-механички систем .....	10
2.2 Структура трибо-механичких система .....	12
2.3 Својства трибо-елемената .....	12
2.4. Конструктивна решења конкретног триболошког система .....	14
3 . ТРЕЊЕ .....	20
3.1 Историјски развој представа о трењу .....	20
3.2 Традиционални приступи трењу .....	23
3.2.1. Унутрашње трење .....	23
3.2.2. Спољашње трење .....	23
3.2.3. Трење клизања .....	23
3.2.4. Трење котрљања .....	24
3.3 Савремене представе о сили трења .....	25
3.3.1 Трење са хабањем и дисипација енергије .....	29
3.3.2 Физичке основе адхезије .....	30
3.3.3 Stick-slip модел трења .....	32
3.3.4 Енергетска теорија трења .....	35
4. ХАБАЊЕ .....	39
4.1 Адхезивно хабање .....	39
4.2 Абразивно хабање .....	40
4.3 Хабање услед замора материјала .....	41
4.4 Ерозија .....	42
4.4.1 Ударна ерозија .....	42
4.4.2 Кавитациона ерозија .....	43
4.5 Хабање услед оксидације .....	44
4.6 Хабање услед корозије .....	44
5. ПОДМАЗИВАЊЕ .....	45
5.1 Врсте подмазивања .....	45
5.1.1 Потпуно подмазивање .....	46
5.1.2 Хидростатичко подмазивање (ХСП) .....	47



5.1.3 Хидродинамичко подмазивање (ХДП) .....	48
5.1.4 Еластохидродинамичко подмазивање (ЕХДП) .....	48
5.1.5 Непотпуно подмазивање.....	50
5.2. Гранично подмазивање .....	52
5.2.1 Основе .....	52
5.2.2 Физичка адсорпција .....	53
5.2.3 Хемијска адсорпција (хемиосорпције).....	53
5.2.4 Хемијска реакција .....	54
5.2.5 Савремена сазнања из области граничног подмазивања.....	55
5.2.6 Експерименталне технике у области граничног подмазивања.....	56
5.2.7 Веза између адхезије и stick-slip феномена .....	57
5.2.8 Модел грубе површине .....	60
5.2.9 Модел завистан од положаја .....	61
5.2.10 Модел stick-slip трења завистан од брзине .....	64
5.2.11 Фазно транзициони модел .....	66
6. МАЗИВО .....	68
6.1 Аналитика мазива.....	68
6.1.1 Конституенти мазива .....	72
6.1.2 Адитиви и њихова улога.....	73
6.1.3 Угушћивачи за мазиве масти .....	76
6.1.4 Методе и тестови на мазивима .....	77
6.2. Чврста мазива .....	81
6.2.1 Нова сазнања и технологије код чврстих мазива.....	83
6.2.2 Површине и контактна површина .....	83
6.2.3 Основе подмазивања чврстим мазивима .....	87
6.2.4 Материјали за чврста мазива.....	91
6.2.5 Ламеларна чврста мазива (Lamellar Solid Lubricants).....	91
6.2.6 DLC мазива .....	93
6.2.7 Графит .....	93
6.2.8 Молибдендисулфид ( $\text{MoS}_2$ ).....	94
6.2.9 Полимери .....	95
6.2.10 Меки метали .....	96
6.2.11 Керамички материјали.....	97
6.3 Мазиво за пуњење тела вентила .....	97
6.3.1 Средство за чишћење вентила .....	98
6.3.2 Мазивна средства за вентиле .....	98
6.3.3 Заптивна мазивна средства (ЗМС).....	98

6.3.4 Начин функционисања .....	102
6.3.5 Заптивање.....	103
6.4. Мазиво у функцији заптивања и подмазивања славина на гасоводном систему ....	104
6.4.1 Основне карактеристике система за подмазивање .....	105
7 МЕТОДОЛОГИЈА ИСПИТИВАЊА .....	108
7.1 Лабораторијска испитивања мазива .....	109
7.1.1 Експериментални приступ испитивању.....	109
7.1.2 Резултати испитивања ваздухом на испитном столу до 6 bar-a .....	111
7.1.3 Обрада резултата испитивања.....	112
7.2 Испитивање ЗМС на реалним условима .....	113
7.2.1 Опис испитивања.....	113
7.2.2 Избор методологије експеримента .....	116
7.2.3 Постављање хипотезе .....	117
7.2.4 Резултати испитивања код славина бр. 2 и бр. 3.....	120
7.2.5 Општа запажања.....	121
7.3 Испитивање триболошких карактеристика мазива на трибометру.....	122
7.3.1 Лабораторијска и мерна опрема.....	122
7.3.2 Услови триболошких испитивања.....	130
7.4 Услови експеримента.....	133
7.4.1 Материјали узорка.....	133
7.4.2 Изглед одабраних узорка за припрему елемената експеримента .....	135
7.4.3 Припрема и обрада изабраних узорка са заменским материјалима .....	138
7.4.4 Металографски снимци узорка .....	143
8. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ ТРИБОЛОШКИХ ИСПИТИВАЊА.....	148
8.1 Резултати прве серије испитивања .....	148
8.1.1 Испитивање са нанетим танким слојем мазива.....	159
8.2 Резултати друге серије испитивања .....	160
8.3 Резултати треће серије испитивања.....	167
8.3.1 Упоредна оцена просечног времена додавања мазива .....	171
8.4 Резултати четврте серије испитивања .....	173
8.5. Топографија површина и трибо парова .....	180
9. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ЕКСПЕРИМЕНАТА.....	187
9.1 Прва серија експеримената .....	187
9.2 Друга серија експеримената.....	189
9.3 Трећа серија експеримената .....	192
9.4 Четврта серија експеримената .....	195

9.5 Карактеристике модификованог мазива .....	199
10. ЗАКЉУЧЦИ.....	200
11. СПИСАК КОРИШЋЕНЕ ЛИТЕРАТУРЕ: .....	202

## 1.УВОДНО РАЗМАТРАЊЕ

Велики део материјалних трошкова (енергија, материјали, алати и др.) зависи од триболошких карактеристика елемената трибо-механичких система. Да би се остварила већа продуктивност у индустрији, која се мери величином додатне вредности остварене у једној години по једном запосленом неопходно је познавање триболошких карактеристика свих елемената трибо-механичких система.

Триболошке карактеристике чврстих материјала (елемената трибо-механичких система) и мазива одређене су :

- Величином силе трења односно коефицијента трења у зони контакта елемената система и
- Величином односно интензитетом хабања критичног елемента система

У индустријским процесима на савладавање силе трења које се јављају у бројним трибо-механичким системима троши се око 60 % укупно утрошене енергије. У транспортним процесима тај проценат је и већи. Смањење утрошка енергије у индустрији и транспорту, није могуће без значајнијег смањења сила трења у основним трибо-механичким системима којих у једном индустријском систему има на десетине хиљада. Процес хабања критичних елемената трибо-механичких система није могуће зауставити али га је могуће успорити у већој или мањој мери у зависности од триболошких знања.

До смањења силе трења, па према томе и утрошка енергије у индустријским системима на критичним елементима система могуће је доћи:

- Избором одговарајућих материјала и технологије обраде контактних површина чврстих елемената
- Применом савремених технологија побољшања триболошких карактеристика контактних слојева (превлаке, физичко-хемијски поступци и др)
- Коришћењем мазива са добрим триболошким карактеристикама и одговарајућег режима подмазивања <sup>1</sup>

Трибологија као мултидисциплинарна наука о трењу-хабању и подмазивању укључује многе традиционалне дисциплине , као што су физика, хемија, наука о материјалима, механика флуида, механика чврстог тела, машинске конструкције и друге. Триболошка истраживања су већином комплексна и захтевају мултидисциплинарни прилаз и тимове.

---

<sup>1</sup> Проф. Др Бранко Ивковић

## 1.1 Циљеви истраживања

Основни циљ истраживања је да се путем експерименталних поступака из две етапе спроведе триболошко истраживање у области граничног подмазивања на примарним деловима вентила у гасним системима. У првој етапи која не спада у стандардизоване тестове и методе, изврши анализа и поређење увозног страног мазива са потенцијално одговарајућим мазивима домаћег произвођача на реалним условима. На основу ове фазе експеримената, изврши одабир оптималног заменског мазива ЗМС (заптивног мазивног средства) за други део експеримента заједно са формулацијом новог ЗМС-а. У другом делу експеримената, типа моделског испитивања, изврши симулација реалних услова контакта са одабраним трибо паровима (чији узорци су узети из реалног система) и потенцијалним еквивалентним трибо материјалима.

Симулацијом понашања триболошких тела у контакту, два трибо пара (из реалног система и потенцијалним еквивалентима) и трећег из групације чврстих мазива, у области граничног подмазивања или делимичног подмазивања, добити валидне податке о понашању изабраних трибо парова у посматраном режиму рада реалних система.

У поступку моделског испитивања другог дела потребно је симулирати, експерименталним путем, велике притиске и мале брзине кретања у зони контакта.

Узорци из кугластих и чепастих славина, тј. трибо парови који ће се користити у другом делу моделског испитивања, су материјали који су већ експлоатисани на запорним органима на систему гасовода Србијагаса, тј. који су уходани у периоду од 15-20 година.

Поређење добијених резултата из изведених експеримената, који треба да дају валидне податке и основу за разумевање самог процеса граничног подмазивања у овим системима и оцену створених специјалних врста ЗМС (посебно формулисаних за ову сврху спрам иностраног), треба да се докаже адхезиона способност задржавања на површинском слоју при великим притисцима и малим брзинама клизања, способност подмазивања без заривања, херметизацију, постојаност на дејство радне средине.

ЗМС ће бити креирана и тестирана стандардизованим методама у лабораторији за мазива ФАМ-Крушевац.

Креирана ЗМС спадају по категоризацији под MIL-стандарде. (MIL- Military standards, Војни стандарди)

## 1.1 Хипотезе

У првом делу експерименталних истраживања постојеће мазиво страног произвођача било је непознато по свим аспектима: од хемијског састава до физичких особина. Експериментални поступак треба да буде тако конципиран да поређењем, при истим условима „скида“ део по део особина и пореди са изабраним домаћим мазивима и материјалима – примарним деловима вентила и путем повратне спреге пружи произвођачу нове информације за креирање нових узорака ЗМС-а.

Експериментални поступак ће се спроводити етапно. По одабиру оптималног ЗМС у реалним условима на систему гасовода Србијагаса, спрам посматраног увозног, лабораторија ФАМ-Крушевац ће на основу добијених резултата и сугестија формулисати нова ЗМС, извршити физичко–хемијску анализу кроз стандардизоване тестове, док ће се триболошка и моделска испитивања спровести у Лабораторији за обраду метала и трибологију Факултета инжењерских наука у Крагујевцу и Лабораторији за обраду скидањем материјала, Факултета техничких наука у Новом Саду.

У оквиру планираних експеримената извршиће се оптимални избор контакта геометријских трибо парова и трећег тела, (увозног мазива и домаћег мазива произвођача ФАМ Крушевац).

## 1.2 Очекивани резултати

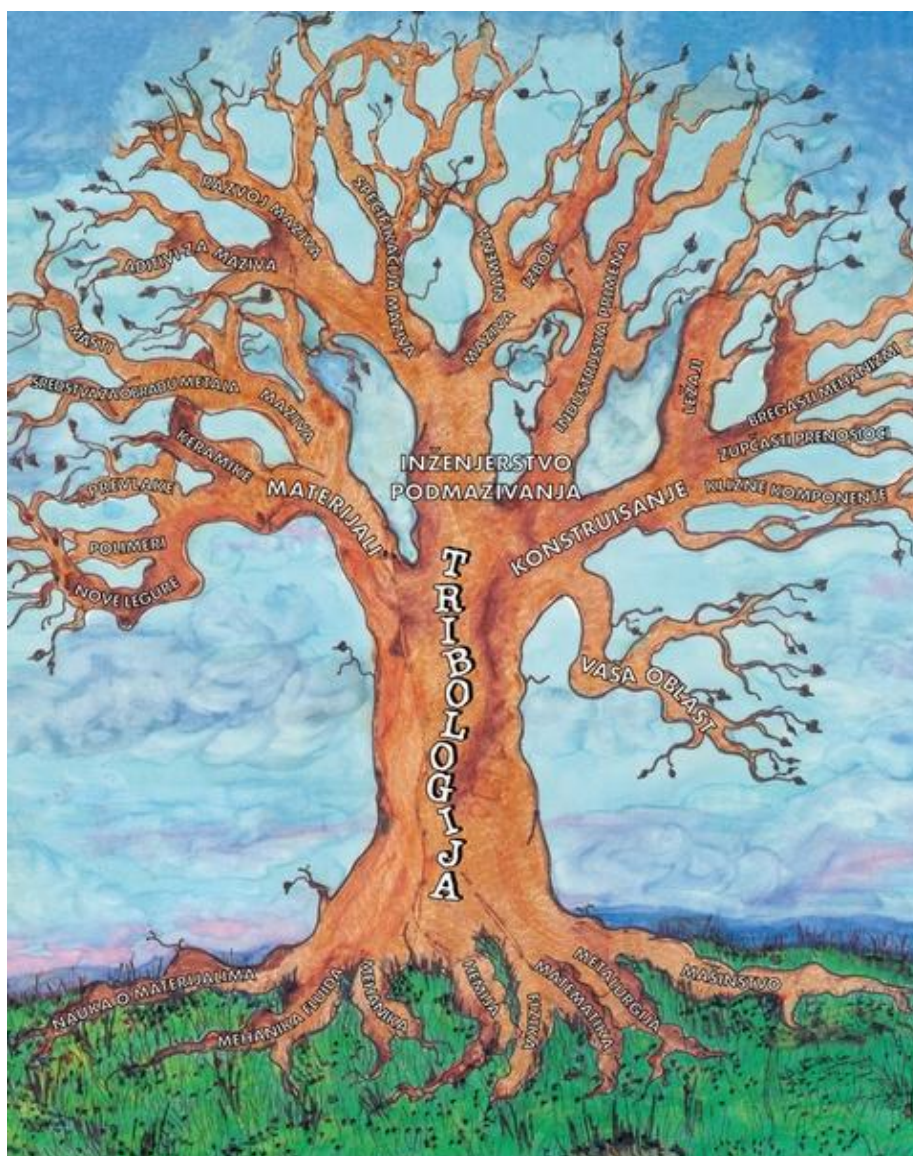
На основу овако осмишљеног експерименталног поступка, очекује се да добијени резултати дају валидну оцену о употребљивости одговарајућег типа мазива у условима граничног подмазивања трибо-механичких система. У поређењу са посматраним увозним мазивом, добијени резултати треба да пруже довољно информација на којим особинама домаћих мазива треба извршити модификацију, које материјале треба користити као могуће заменске трибо парове и прикупљање нових информација из експерименталних поступака у вези са феноменологијом граничног подмазивања посматраних трибо-система.

Креирана ЗМС, треба да изврше замену увозног, као стратешке сировине за сопствене потребе, у сврху коришћења и планирања са могућношћу извоза на друга тржишта у окружењу која имају интерес за оваквим ЗМС.

## 2. ТРИБОЛОГИЈА И ИНЖЕЊЕРСТВО ПОДМАЗИВАЊА

Трибологија је научно-техничка дисциплина која обухвата истраживања процеса **трења** и **хабања** додирних површина, као и поступака за смањење и оптимизацију ових карактеристика код различитих техничких система. Она обухвата проучавање и примену принципа трења, подмазивања и хабања. Трибологија је грана механичког инжењеринга и науке о материјалима. Трибологија обухвата науку и инжењеринг интерактивних површина у релативном кретању.

1966. године, Џостов извештај [61] направљен од стране Британског одсека за едукацију и науку званично је први садржао реч трибологија као опис целог овог поља. Реч трибологија потиче од грчке речи триβ од глагола триβω, трибо („трљам“ у класичном грчком језику) и суфикса -λογία, -логија („учење о“, „знање о“).

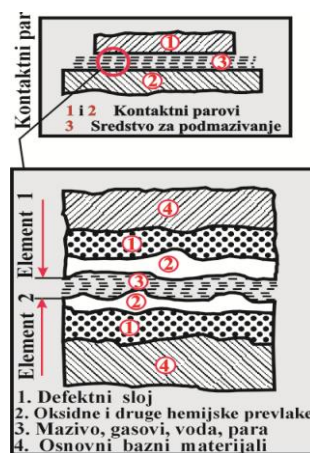


Слика 2.1 Триболошко стабло [62]

Трибологија проучава појаве на и између површина које су у међусобном кретању. У данашње време има све већу улогу у многим подручјима савременог живота. Триболошким проблемима се баве машински, хемијски, технолошки, физико-хемијски, и многи други стручњаци и научни радници. Већ данас, а у блиској будућности свакако још и више, трибологијом ће се бавити информатичари, металурзи, стручњаци који се баве нанотехнологијама, мономолекуларним слојевима у проучавању основног механизма граничних подмазивања и многи други. Трибологија је комплексан појам, који представља велики број подручја и истраживачких интереса, који по правилу, имају врло велики утицај на националне економије и целокупни развој савременог човечанства.

Основни циљ трибологије је истраживање услова за оптималну експлоатацију техничких производних процеса, односно смањење потрошње енергије, смањење трошкова одржавања машина и повећање поузданости механичких система. Основни процеси који се јављају при релативном кретању два чврста тела су трење и хабање додирних површина. Услед појаве трења долази до губитка механичке енергије при раду механичког система. Због појаве хабања долази до промена површина машинских делова током експлоатације. У наведеним процесима трибологија има врло значајну улогу и не може се сматрати само науком или струком која се бави искључиво смањењем трења и бољим подмазивањем. Истраживања даље иду у правцу замене минералних мазива биоразградљивим уљима и мастима тамо где би њихова употреба могла утицати на загађење животне околине, нарочито у пољопривреди и шумарству. Може се претпоставити да ће се у блиској будућности еколошки захтеви у том погледу још више повећати и поштрити. Основни задатак трибологије је смањење хабања на најмању могућу меру и продужење века трајања машина и уређаја, уз употребу, што је више могуће, еколошки прихватљивијих мазива.

На слици 2.2 приказана је шема основног триболошког система кога чине два елемента (1) и (2) у међусобном контакту који се остварује уз присуство средства за подмазивање (3). Појам трибо-механичког система подразумева систем чија се функција састоји у претварању улазних величина у излазне, технички корисне величине које се даље користе у процесу кретања и рада.



Слика 2.2 Структурна шема триболошког система према DIN 50320 са одговарајућим слојевима као параметрима структуре TMC



## 2.1 Трибо-механички систем

У теорији система системом се назива целина у којој су елементи узајамно повезани структурно и међусобно одређеним релацијама. Таква дефиниција одређује трибо-механичке системе као целине чије је успостављање везано узајамним контактним деловањем површина у релативном кретању [7].

Трибо-механички системи (ТМС) у индустрији и транспорту разликују се међу собом по структури коју чине елементи система (Е), њихове физичко-хемијске карактеристике (К) и начин остваривања контакта између њих (I) тј. [1],

$$S = \{E, K, I\}$$

Велике разлике постоје у облицима и димензијама трибо-механичких система. Елемент система (Е) може имати облик диска, зупчаника, резног клина алата, брегасте плоче, прстенасте заптивке, клизне вођице и сл. Облик и димензије елемената трибо-механичких система су геометријске или конструктивне карактеристике

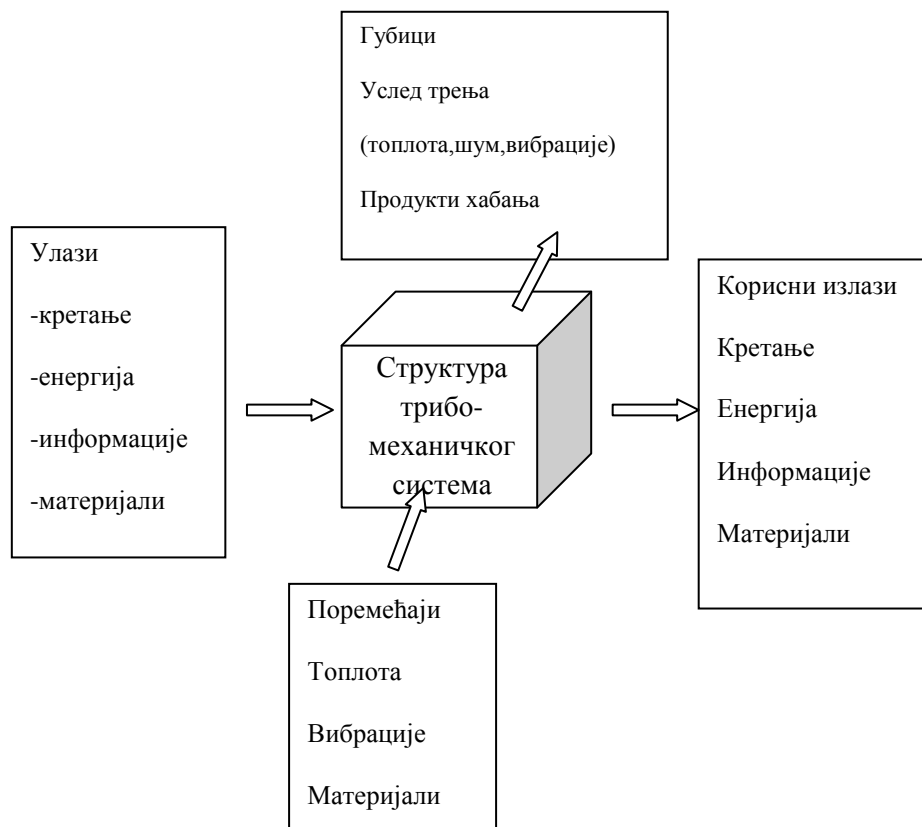
Материјали елемената трибо-механичких система могу бити металне и неметалне основе, тј природе. Хемијски састав, физичке особине разликују се од материјала до материјала (К).

Трећи елемент структуре система (I) је врста узајамног дејства између посматраних елемената система. Чврсти елементи система могу да клизају један по другом, да се котрљају један по другом, да ударају један по другом или да се осцилаторно крећу један по другом. Трећи елемент система који служи као мазиво може делимично или потпуно да раздваја контактне површине чврстих елемената или да само повремено улази у зону контакта [1].

Код триболошки исправне конструкције посебно су значајни извршиоци елементарних функција чије је функционисање успостављено фрикционим контактом елемената при њиховом релативном узајамном кретању. У зони контакта елемената настају сложени нестационарни физичко-хемијски и механички процеси праћени трењем и хабањем контактних површина. Проблеми трења и хабања су у највећој мери проблеми механике контактне деловања, хемијских процеса у зони трења и физике дисипативних процеса површинског слоја [7].

Трибо-механички системи, као извршиоци елементарних функција, од великог су значаја јер исправна конструкција одређује поузданост склопова у 80% случајева отказа. Квалитет конструкције се најчешће одређује квалитетом трибо-механичких склопова. Испитивања су показала да је век функционалног старења машинских система у принципу знатно дужи од века допуштеног хабања елемената система. Физичко хабање елемената (1-2 године) протиче много брже од функционалног старења (5-10 година) машинског система. Основни задатак трибологије је минимизирање прекида између ова два временска интервала до границе могућег [7].

Користећи основну кибернетску и системску методу за истраживање непознатих или врло сложених динамичких система, трибомеханички систем се може посматрати као „црна кутија“ са улазним и излазним величинама сл. 2.3.



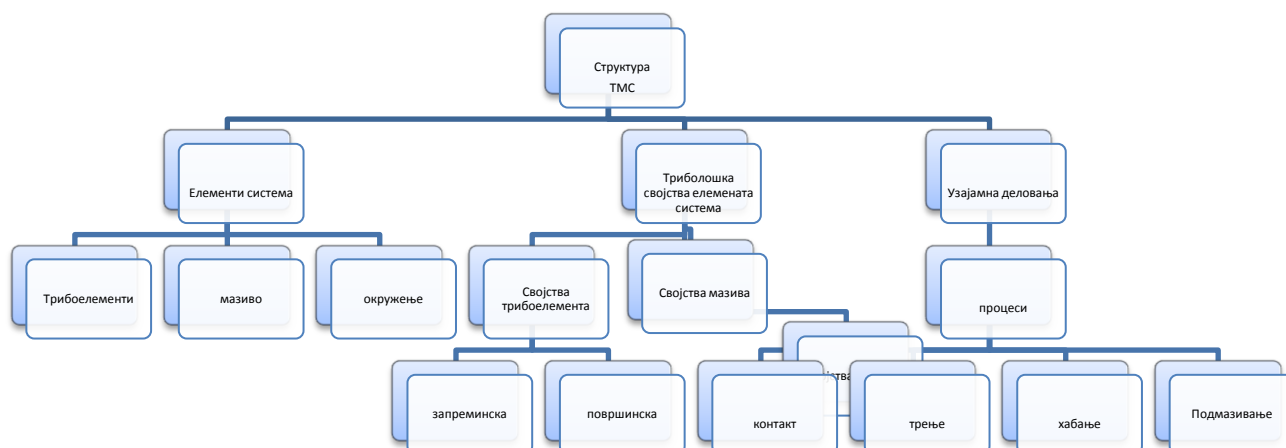
Слика 2.3. Структура ТМС система [7]

Нама су од посебног значаја губици који се јављају у трибо-механичким системима, а нарочито губици на трење и хабање. Трење као процес супротстављању кретању елемената система посебно утиче на механички степен корисног дејства који је најважнији параметар оцене способности ТМС да очува транспортовану енергију. Хабање као облик одвођења материјала са контактних површина утиче на измену техничких параметара и промене у функционисању система [7].

Триболошки процеси одвијају се у основним трибо-механичким системима које чине два елемента у контакту у присуству мазива као трећег елемента. Окружење као четврти елемент употпуњује структуру основног трибо-механичког система [7].

## 2.2 Структура трибо-механичких система

Представљање трибо-механичког система омогућује лакше сагледавање најважнијих утицајних својстава, а као добар илустративни пример структуре ТМС може се представити блок шемом.



Слика 2.4 Представљање структуре ТМС [7]

Мазиво је значајан елемент система обзиром на могућности управљања и регулисања триболошким процесима. Досадашња сазнања и достигнути ниво квалитета мазива упућује нас на његово коришћење кад год је то могуће.

## 2.3 Својства трибо-елемената

Како је на горњој слици 2.4 представљено, од интереса је прокоментарисати запреминска и површинска својства трибо-елемента.

Запреминска својства обједињују границе и контуру трибоелемента као и сам материјал од кога се формира трибоелемент. Представнике запреминских својстава можемо разврстати на:

- Геометријски облик трибоелемента
- Хемијски састав
- Структурна грађа
- Параметри материјала (модул еластичности, тврдоћа, густина, топлотна проводљивост..)

Површинска својства дефинишу атрибути, као што су топографија контактних површина и структура површинског слоја. Топографија контактних површина, као физичка карактеристика рељефа површине, условљена је технологијом обраде, али је и променљива у процесу експлоатације. Површински слој трибо-елемента састоји се од спољашњег и унутрашњег граничног слоја. Спољашњи слој је последица интеракције окружења са контактном површином, а на дебљину, структуру и механичке особине унутрашњег граничног слоја највише утичу врста и режими обраде [1,7].

Мазива, као материје којима се потпуно или делимично раздвајају елементи трибо-механичког система, смањују трење и хабање, али такође обављају и низ других функција. Основна физичко-хемијска својства техничких мазива су: вискозност, хемијска стабилност, техничка стабилност, специфична топлота и корозивност. Односно, основна физичко-хемијска својства техничких масти су: конзистенција, привидна вискозност, оксидациона и механичка стабилност.

Сложени процеси између два трибо-елемента укључују сложена напонска стања, контактне силе и врсте деформација, тј. механику контакта. Процеси контакта укључују физичку и хемијску природу површина које се налазе у контакту, тј молекуларну међузависност материјала и контактних сила [1,7].

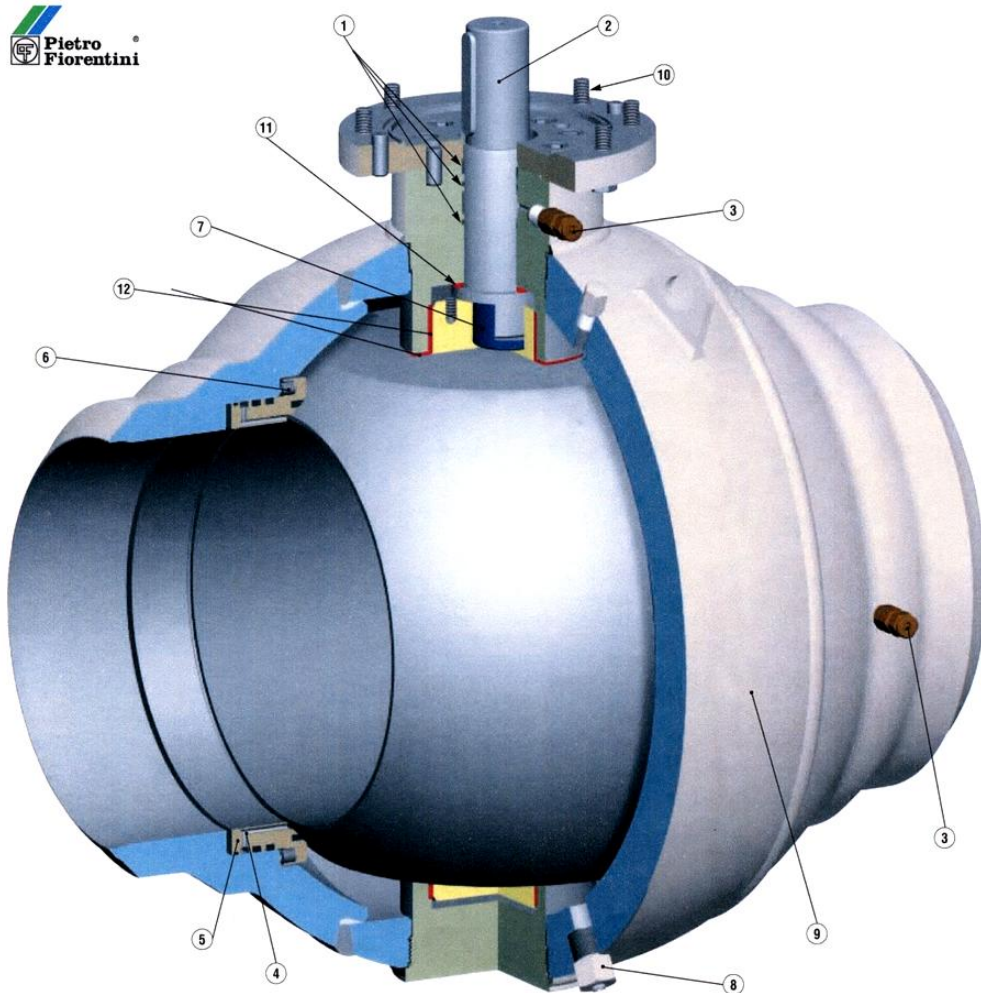
## 2.4. Конструктивна решења конкретног триболошког система

У конкретним примерима који следе, сликама 2.5-2.11 приказаће се више изведених конструктивних решења херметизације, тј. заптивања склопа ободног заптивног прстена и кугле код кугласте славине за природни гас. Такође навешћемо и један пример изведеног заптивања осовине (вретена) кугласте славине.

Представљена имплементирана решења су примењена код водећих светских произвођача кугластих славина за примену на гасоводима и то: Super Cameron, Argus, Pietro Fiorentini, Rockwell, WOM ...

Такође приказаћемо и један пример конструктивног решења конусне подмазиве славине за природни гас произвођача Rockwell. Истичемо да је у оба случаја, како код кугластих славина тако и код чепастих, у овим изведбама, заптивно мазивно средство херметизујући медијум.

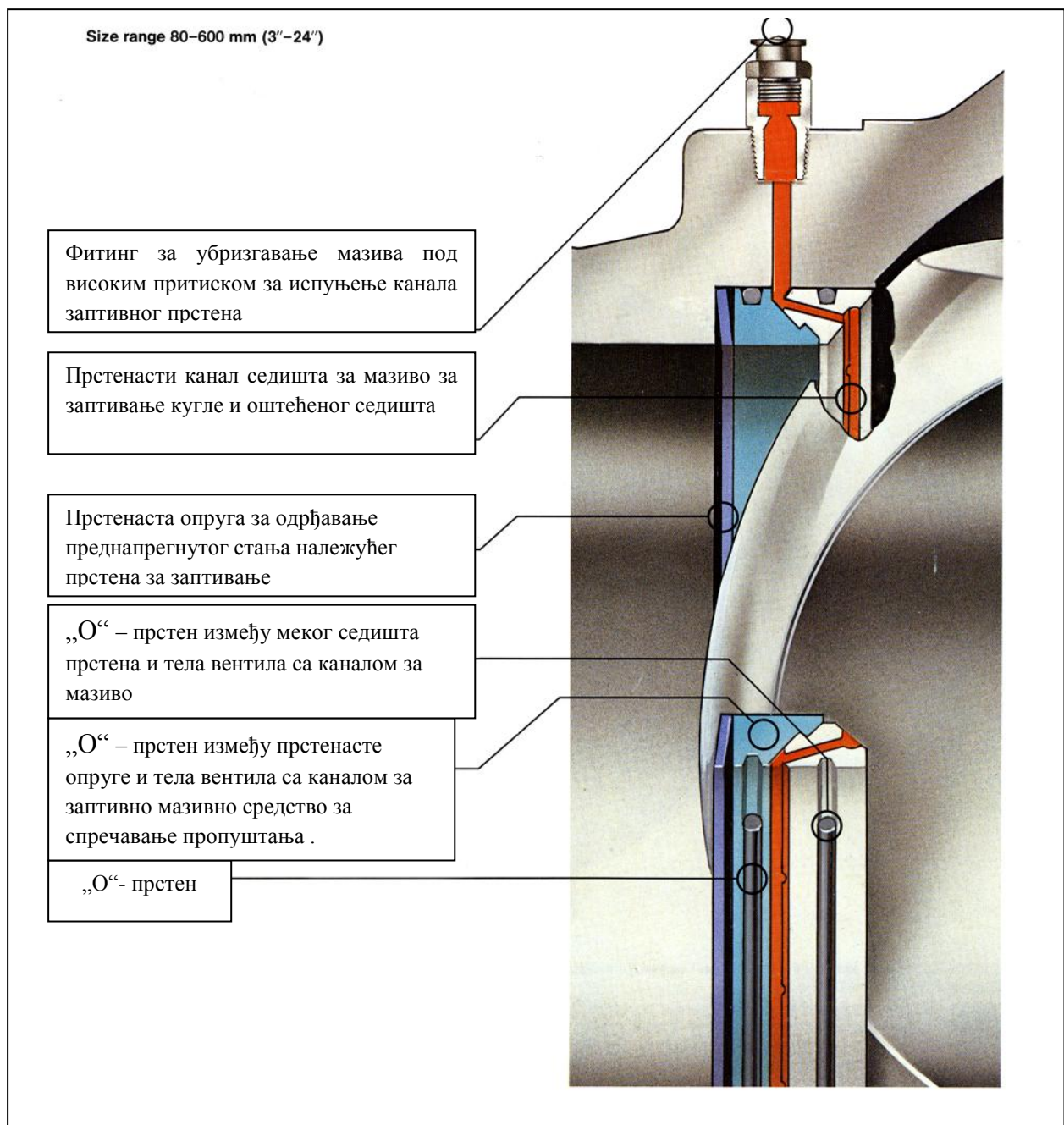
Код кугластих славина је то тзв. секундарно заптивање (Secondary sealing), а код конусних подмазивих, примарно заптивање (primary sealing). Идентично заптивно мазивно средство се може користити и код једног и код другог типа изведених славина за природни гас.



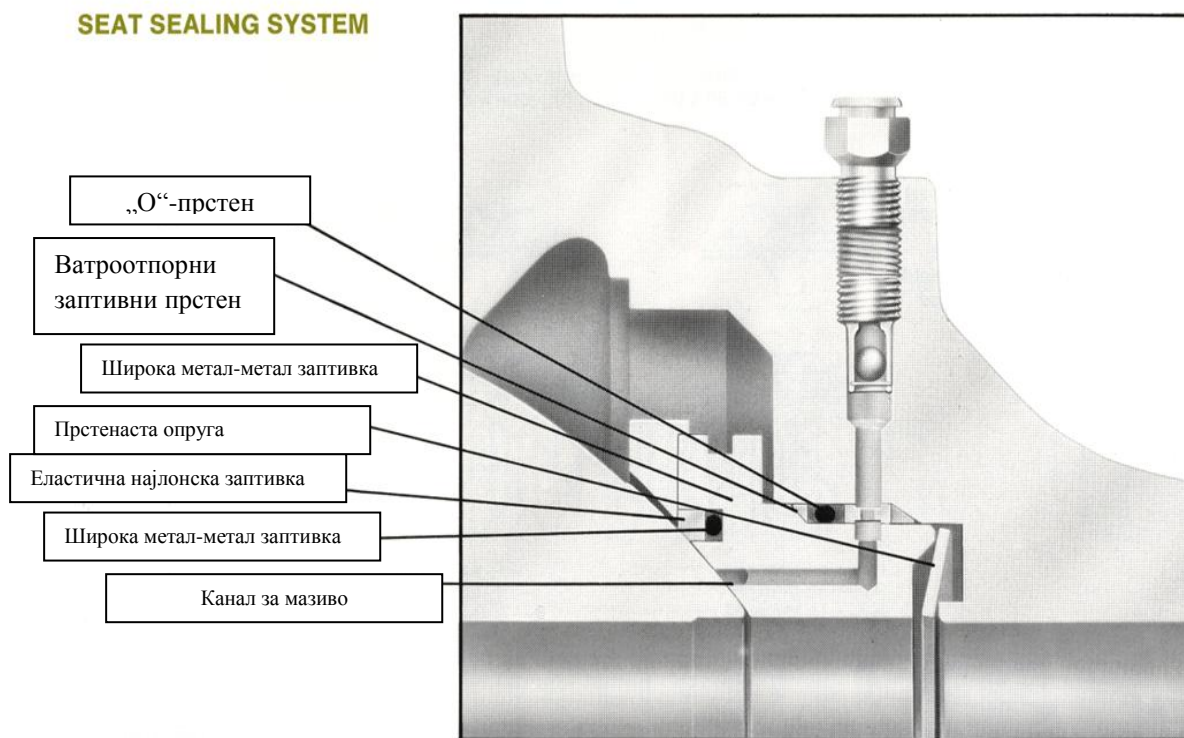
Слика 2.5 Кугласта славина-делимични пресек [28]

Легенда:

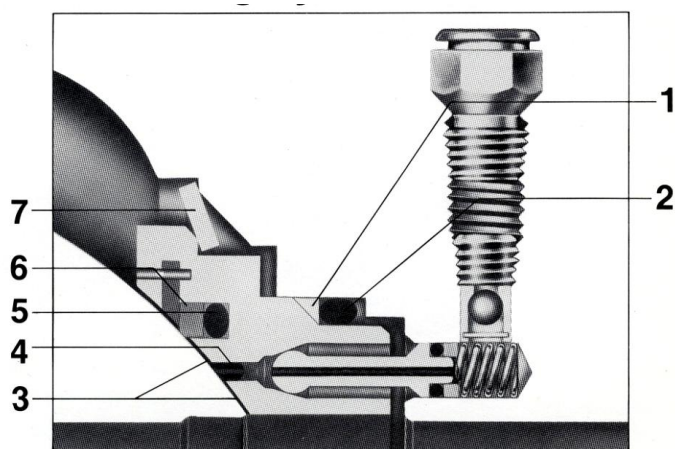
- |   |  |
|---|--|
| 1. троструки заптивни прстен вретена      | 7.регулирајућа лежишна постела осовине |
| 2.вретено са клином                       | 8.испусни фитинг                       |
| 3.сигурносни фитинг вретена               | 9.ковано тело славине и кугле          |
| 4.канал заптивног мазивног средства       | 10.прирубница                          |
| 5.метални прстен са меким седиштем        | 11.“притисни“ обод осовине             |
| 6.преднапрегнуте опруге заптивног прстена | 12.плата обртног постоља               |



Слика 2.6 Конструктивно извођење заптивања кугласте славине I [15]



Слика 2.7 Конструктивно извођење заптивања кугласте славине II [16]

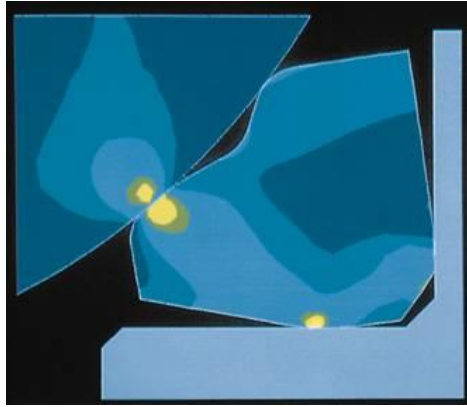


Слика 2.8 Конструктивно извођење заптивања кугласте славине III [16]

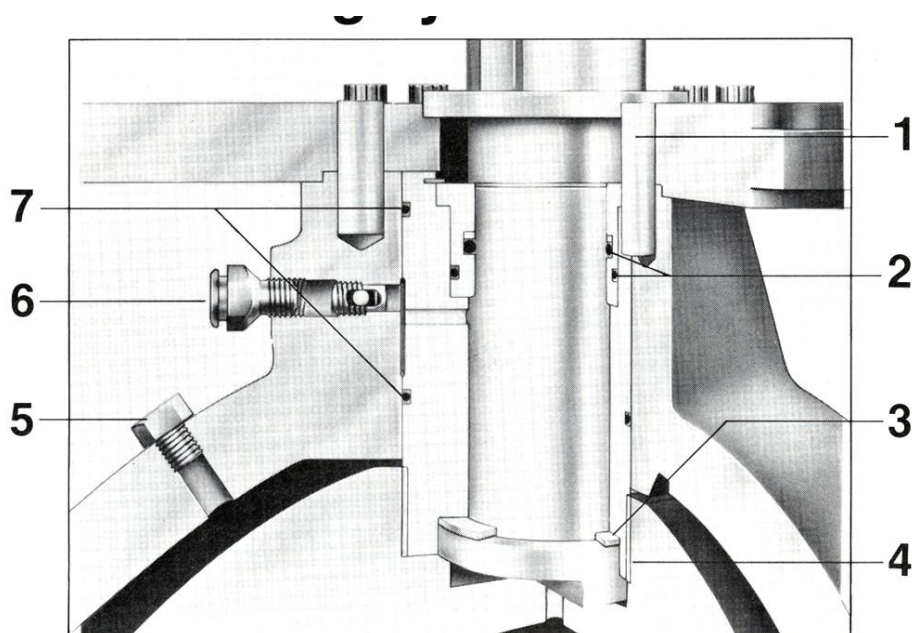
Легенда:

- |  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| 1.челични ватроотпорни прстен          | 4.канал за мазиво                 |
| 2.“O” –прстен                          | 5.еластични заптивни „O“ прстен   |
| 3.широка контактна метал-метал пвршина | 6.најлонска еластична заптивка    |
|  | 7.прстенаста компресибилна опруга |





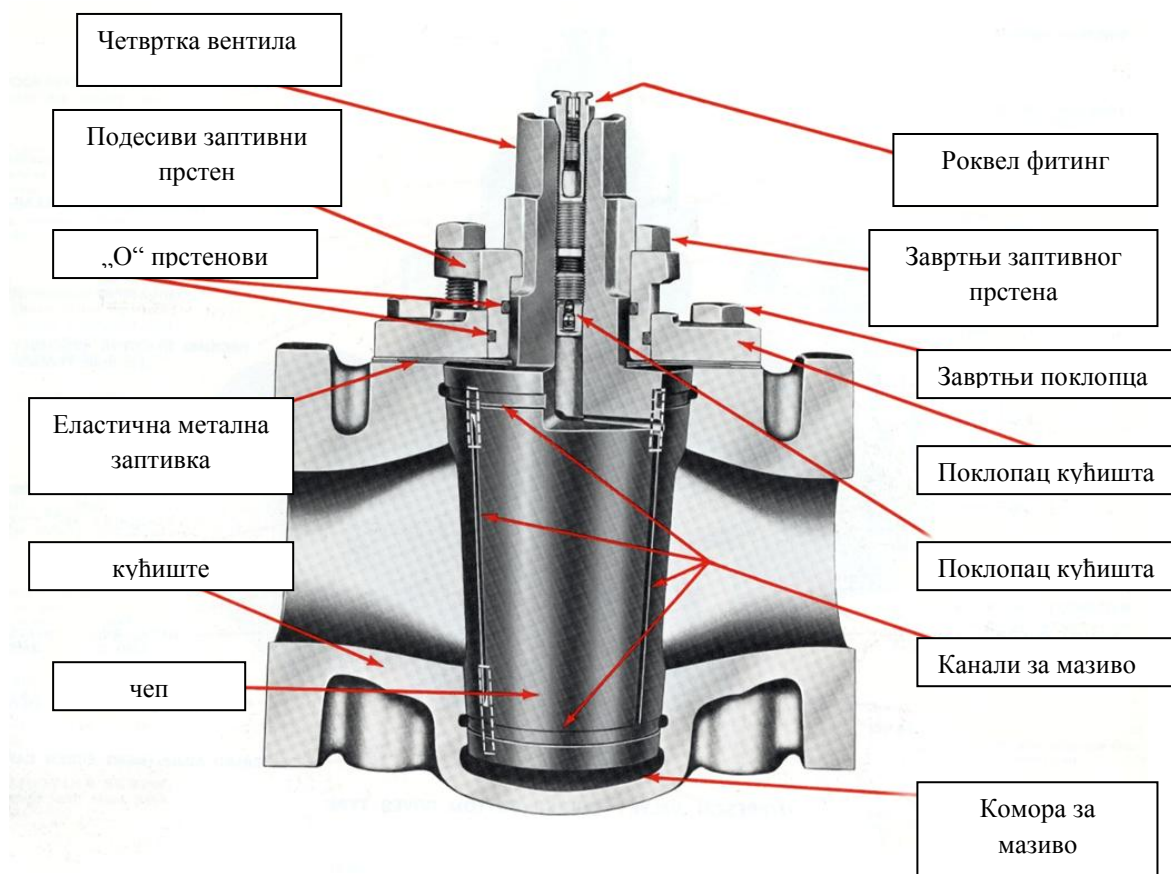
Слика 2.9 Пример контактнoг напрезања заптивке и кугле у непосредном додиру [26]  
(симулирано методом коначних елемената)



Слика 2.10 Пример заптивања вретена славине [15]

Легенда:

1. клин
2. „о“ –прстенови за заптивање вретена
3. тефлонски импрегнирани клизни заптивач
4. тефлонски импрегнирани клизни заптивач
5. тест чеп
6. фитинг за подмазивање вретена
7. непокретни „О“ прстенови



Слика 2.11 Конусна чепаста славина [17]

### 3 . ТРЕЊЕ

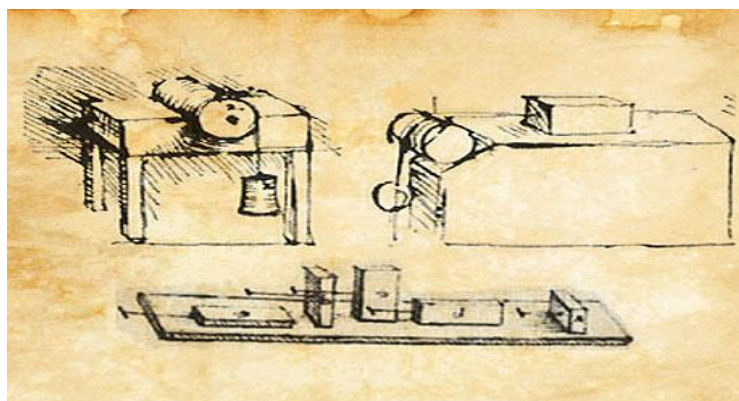
Процес трења представља неизбежну појаву површинских контаката елемената у релативном кретању и међусобном деловању и добрим делом детерминишу функционисање техничког система и одређују његов век трајања [1].

И поред поменуте дефиниције трења и дугог истраживања саме појаве и процеса, манифестација и природа трења није у потпуности теоретски објашњена. Разлог лежи у тешкоћама које прате сам процес, у њеној сложености. Комплетан опис фундаменталних процеса који су у основи трења и један квалитативан модел који се може применити на све ситуације у којима се јавља трење, остаје необухваћен [66].

До сада прикупљена искуства из праксе показују да се у процесу контактеног трења јавља више појава од којих су најизраженије деформације површинског рељефа, промена структурних стања, топлотни ефекти, физичко–хемијске промене материјала у контакту, дифузијски процеси и појаве замора.

#### 3.1 Историјски развој представа о трењу

Први научник који је дошао до неких запажања у вези са трењем вероватно је био Аристотел. Он је анализирао клизање тела по подлози и утврдио је, да би кретање тела било униформно, на њега треба непрекидно деловати на исти начин. Након Аристотела, све до краја 15. века трење није научно третирано јер се тек Леонардо Да Винчи систематски бавио овом проблематиком [75]. Он је заправо први увео појам трења, хабања и подмазивања, који су данас стандардни у овој области. Да Винчи је у експериментима мерио угао стрме равни, при коме тело које се налази на њој почне да клизи, као и тежину којом треба преко котураче деловати на тело које се налази на равној подлози да би дошло до његовог померања, слика 3.1. Коефицијент трења је увео као однос силе трења и масе тела које клизи по подлози.

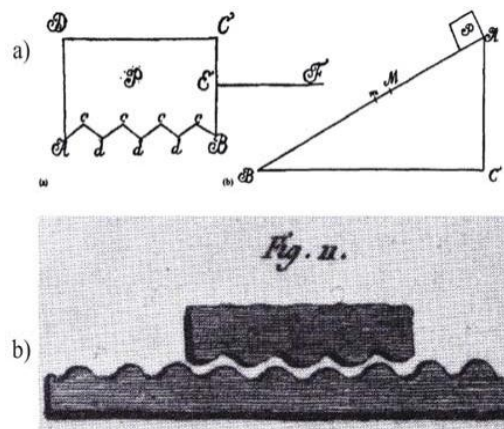


Слика 3.1 Скице о изучавању трења, Леонардо Да Винчи,

На основу резултата истраживања Да Винчи је дошао до два важна закључка: сила трења је два пута већа када се тежина тела два пута повећа и сила трења не зависи од тога како се тело налази на подлози, односно коликом површином налаже на њу. Ова открића није публикувао, тако да су пала у заборав након његове смрти. До истих закључака је, након око 300 година, поново дошао Амонтон и објавио их у извештају Француској Академији наука 1699. године. Два Амонтонова закона сувог трења клизања која, уз мале модификације, и данас важе гласе:

- 1) Сила трења директно је пропорционална нормалној сили којом тело притиска подлогу.
- 2) Интензитет силе трења не зависи од величине додирне површине тела.

Следеће значајно име чији су радови везани за анализу трења је Леонард Ојлер. Он је претпоставио да је сила трења последица гравитационе силе, која тежи да минимизира потенцијалну енергију тела. У Ојлеровом моделу клизање почиње у моменту када нагиб неравнина, за које је претпоставио да су троугласте, на стрмој равни, постане хоризонталан. Уколико је типичан угао нагиба неравнине површи  $\alpha$ , коефицијент трења је  $\mu = \text{tg } \alpha$ . Ојлер је означио коефицијента трења грчким словом  $\mu$  и први увидео разлику између статичког и кинетичког трења сл. 3.2.



Слика 3.2 а)Троугласте неравнине као узрок трења у Ојлеровом моделу,  
б) Интеракција између неравнина као порекло силе трења (Кулонова скица).

Кулон је један век након Амонтона, увео и трећи емпиријски закон трења:

- 3) Од момента проклизавања, сила трења је независна од релативне брзине клизања.

Из тих разлога, ова три закона су данас позната као Да Винчи – Амонтон - Кулонови или Амонтон - Кулонови закони сувог трења клизања.

Кулон се, осим што је проверио Амонтонове законе и поставио трећи закон трења, бавио и суштином његовог настанка. На основу истраживања је предложио, слично Ојлеру, да су *микрометарске неравнине* на месту контакта одговорне за појаву трења.

Кулонови закључци о трењу су доминирали око једног и по века, а многи од његових концепата ни данас нису одбачени тако да се термин „кулоновско трење” још увек може наћи у савременим публикацијама.

Кулон је први указао на одступања од једноставних емпиријских закона трења. Тако је, на пример, утврдио да сила статичког трења расте са временом које тела проведу у стању мировања.

Његова дефиниција се разликује од данас прихваћене по којој је овај коефицијент једнак односу интензитета силе трења и нормалне силе.

Мање је позната чињеница да је Кулон, који је иначе био војни инжењер, за објашњење трења био заинтересован ради учешћа на конкурс Академије Наука у Паризу, која је 1777. године, понудила награду за најбоље решење трења које се јавља код клизања и котрљања и примену код једноставних машина које се користе у морнарици. Како није понуђено ни једно задовољавајуће решење награда није додељена већ је дуплирана, а Кулон је свој рад на ову тему почео 1779. године, а рад на основу кога је добио награду је објављен 1781. године.

Његова књига „Theory of Simple Machines” (1781), садржи практично све што је предмет проучавања трибологије.

Чак је и име инструменту који се користи за мерење у овој области, трибометар, дао Кулон [76,77].

Алтернативно објашњење трења је дао Десагулије увводећи 1734. године тврдњу да је баш молекуларна адхезија најважнија за феномен трења. Интензитет силе која се јавља у овом случају је међутим сразмеран контактної површини, што је у супротности са феноменолошким Другим Амонтоновим законом трења.

Независно од Кулона, Семјуел Винце је 1785. године предложио идеју да је природа статичког трења везана за кохезију и адхезију. Нешто касније је, Џон Лесли, професор физике у Единбургу, разматрао енергијске аспекте трења крутих тела. На основу те анализе је закључио да се они не могу објаснити на основу представе о трењу по којој се неравнине „горњег” тела крећу по неравнинама „доњег” јер би се у том случају потенцијална енергија која се изгуби приликом клизања низ неравнину подлоге надокнађивала у фази пењања по наредној неравнини.

Током индустријске револуције појавили су се многи практични проблеми у овој области који су морали бити решавани: трење у лежајевима воденица, ветрењача и водених кола, трење у кочницама, трење приликом транспорта робе и људи ...

У другој половини 19. века рад на природи трења клизања и котрљања је наставио да цвета појавом радова Хајнриха Херца који је развио, и данас присутне, основе напрезања која се јављају при контакту еластичних тела. Херцова теорија узима у обзир еластичне деформације али не и појаву сила адхезије које се јављају и нарочито су изражене када су површине тела која се додирују јако глатке или када је бар једно од тела направљено од меканог материјала (гума или нека биолошка структура) [66,1,73].

### 3.2 Традиционални приступи трењу

Трење представља механички отпор који настаје на површини додира два идеално крута тела, а при кретању једног тела по другом или при међусобном релативном кретању. Изражава се силом трења  $F_t$ , која се јавља као отпор појави кретања. Може се поделити у два основна облика :

- Унутрашње трење
- Спољашње трење

#### 3.2.1. Унутрашње трење

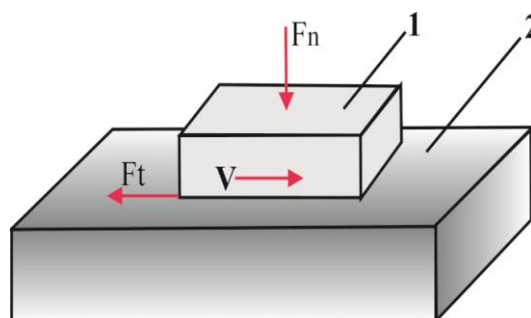
Назива се међусобно деловање молекула флуида, при чему долази до супростављања релативном кретању слојева. Унутрашње трење флуида се назива вискозност.

#### 3.2.2. Спољашње трење

Назива се међуделовање тела које се јавља на местима њиховог непосредног додира, а супроставља се њиховом релативном кретању. У зависности од врсте кретања могу се разликовати: трење клизања и трење котрљања.

#### 3.2.3. Трење клизања

Представља отпор релативном кретању које се јавља када једно чврсто (1) тело клизи по другом (2),  $v$ - брина клизања, слика 3.3.



Слика 3.3 Трење клизања

Сила трења је пропорционална нормалној сили која делује на површине које су у контакту, што се може приказати следећим изразом:

$$F_t = \mu F_n \dots \dots \dots \quad (3.1)$$

где је:

$F_t$  – сила трења

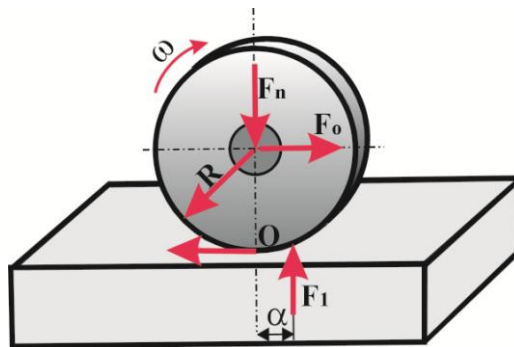
$\mu$  - коефицијент трења

$F_n$  – нормална сила

По овој теорији сила трења не зависи од величине површина које су у додиру и брзине клизања, већ зависи једино од оптерећења, степена храпавости и природе материјала елемената. Међутим, новија испитивања су показала да ова формула не задовољава у потпуности.

### 3.2.4. Трење котрљања

Назива се отпор релативном тангенцијалном кретању који се јавља котрљањем неког предмета по површини, слика 3.5.



Слика 3.5 Котрљање са клизањем

Дејством спољашњег оптерећења  $F_n$  у зони контакта јавља се реакција подлоге  $F_1$ , истог правца а супротног смера, померена за величину  $\alpha$  у односу на осу обртања. Услов за котрљање је неопходност савлађивања спрега сила  $F_n - F_1$ . Из услова једнакости свих момената произилази да је:

$$F_t \cdot R = F_n \cdot \alpha = F \cdot R = F_1 \cdot \alpha \quad (3.2)$$

Из једнакости (3.2) може се одредити израз за силу трења у облику:

$$F_t = \frac{\alpha}{R} \cdot F_n = \mu \cdot F_n \quad (3.3)$$

где је:

$\mu$  - коефицијент трења приликом котрљања.

Величина  $\alpha = \mu R$  назива се коефицијент отпора при котрљању и има димензију дужине. Трење при котрљању знатно је мање од трења при клизању у идентичним условима остваривања контакта.

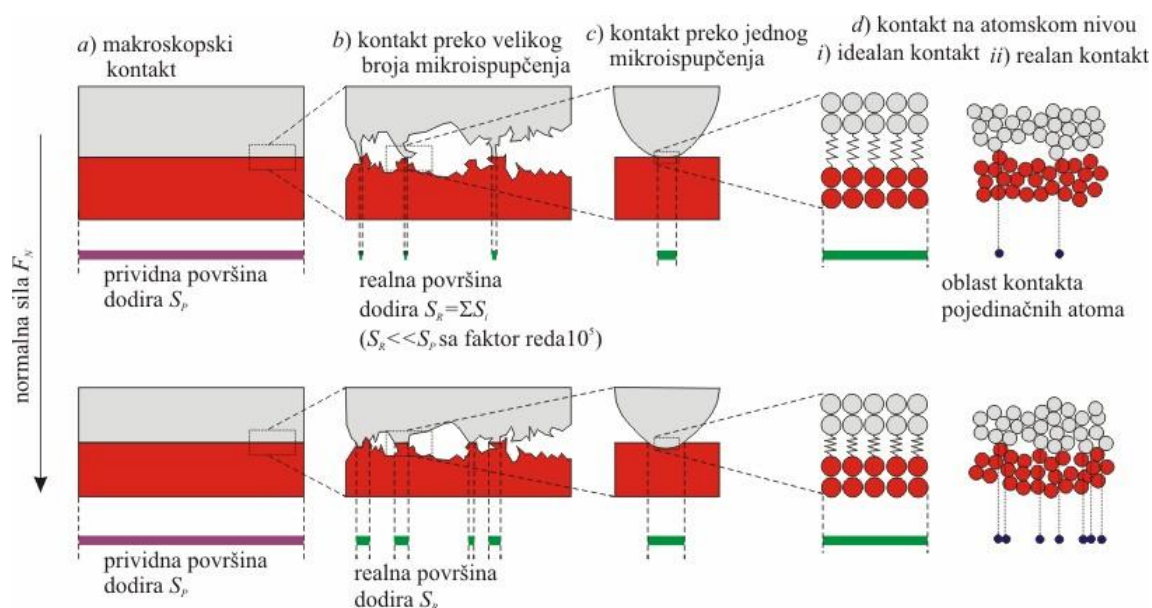
Коефицијент трења ( $\mu$ ) зависи од врсте материјала предмета. Ако су тврдоће котрљајућег тела и подлоге довољно велике, а њихове површине идеалне, може се предпоставити да ће код неког оптерећења додирно место бити тачка.

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 [1].

### 3.3 Савремене представе о сили трења

До даљег напретка у овој области у XX. веку је дошло овладавањем новим техникама експериментисања и моделовања које су омогућиле боље сагледавање структуре и микрогеометрије реалних површи. На основу тога је у радовима Томлинсона и Дерјагина поново разматрана улога адхезије, односно макроскопско испољавање трења каквим га региструјемо као последице молекуларне интеракције и енергијске дисипације [66].





Слика 3.6 Контакт два тела од макроскопског до атомског нивоа [66,73].

Контакт два тела макроскопски изгледа глатко сл. 3.6 *a*), он се међутим састоји од великог броја контаката појединачних микроиспупчења *б*). На наноскали контакт једног микроиспупчења пак изгледа глатак *ц*), али се у ствари састоји од контаката индивидуалних атома *д*). Детаљи контакта на разним скалама при томе могу да зависе и од износа нормалне силе.

Око 1950. године су Боуден и Табор, систематским извођењем експеримената показали да се контакт између макроскопских тела успоставља преко низа малих испупчења/шиљака. На основу тога је уведен појам *реалне* контактне површине која је мања од *привидне/геометријске* додирне површине. У Боуден-Таборовом моделу сила трења је на тај начин сразмерна реалној додирној површини  $S_R$

$$F_r = \tau S_R, \tag{3.4}$$

где константа пропорционалности  $\tau$  представља напон смицања који је повезан са фундаменталним особинама материјала.

Због сличности са Десагулијеовим адхезионим моделом овај модел се зове *Боуден-Таборов адхезиони модел*.

Губитак енергије приликом трења је у овом моделу описан пластичним деформацијама испупчења на површима тела која се додирују. Уколико се број неравнина у реалном контакту (слика 3.6) нпр. повећа дупло онда се у том износу повећава и сила трења што је управо исказано релацијом (3.4). Однос силе трења и реалне површине додира је према томе константан. Општије је међутим претпоставити да овај однос зависи линеарно од примењеног притиска  $P$  на следећи начин

$$\tau = \tau_0 + \alpha P \tag{3.5}$$

Први сабирак  $\tau_0$  описује напон смицања који се јавља услед латералног превлачења сонде „нулте тежине” по узорку материјала а  $\alpha P$  је додатни напон изазван притиском. На основу тих претпоставки се добија

$$F_{tr} = (\tau_0 + \alpha P)S_R = (\tau_0 + \alpha \frac{F_N}{S_R})S_R = \tau_0 S_R + F_N \quad (3.6)$$

За велике притиске се ова једначина своди на Амонтонов закон трења при чему је коефицијент трења једнак  $\alpha$ . Из релације (3.6) се међутим види да трење постоји и када нема притиска. То значи да се коефицијент трења у општем случају састоји од две компоненте: једне за коју се може рећи да је у вези са *адхезијом* (привлачење молекула сонде и узорка) и друге која је у вези са *абразијом* (гребање сонде по узорку). Другим речима може се рећи да коефицијент трења може да се представи као збир  $\mu = \mu_A + \mu_{AB}$  где су сабирци коефицијенти адхезионог и абразивног трења [78]. За нанотрибологију је од највећег интереса адхезиона компонента силе трења јер она омогућује да се визуелизује атомска структура глатке површине узорка.

Колика је стварна додирна површина? Са слике 3.6 се види да одговор зависи од скале на којој се врше мерења као и то да површина има фракталну структуру. У реалним експериментима се она одређује на различите начине. Један од најједноставнијих је оптичка метода заснована на посматрању области додира оптичким микроскопом у циљу одређивања величине и облика њених неравнина. Величина додирне површине се може одредити и мерењем отпорности или проводности која се на додиру два тела мења са променом нормалне силе. Данас су са напретком у области нанотехнологија развијене методе које омогућују мерење реалне површине додира са много већом тачношћу [76].

По теорији Бовдена, Табора, Дерјагина и других, речено на други начин, сила трења зависи од нормалног оптерећења, степена храпавости, стварне додирне површине, међумолекулског привлачења на местима непосредног додира, тврдоће материјала а такође од процеса смицања. То се може изразити на следећи начин:

$$F = \mu \{ F_n, v, A_r, F_0, K \} \dots\dots \quad (3.7)$$

где је:

$A_r$  – укупна површина непосредних додира

$v$  – брзина клизања

$F_0$  – допунско оптерећење услед међумолекулског привлачења

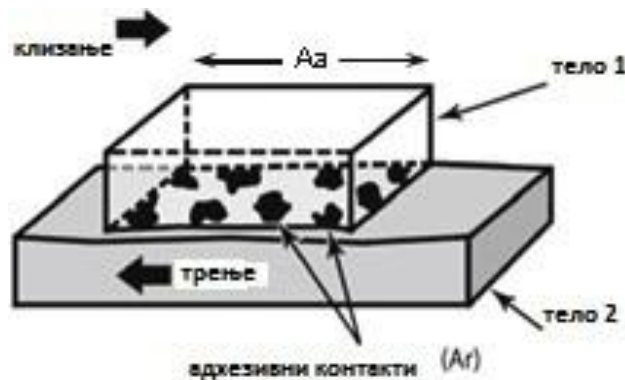
Кад површине које се додирују нису неким мазивим слојем потпуно раздвојене тада, према теорији Бовдена, долази до сударања избочина површинских рељефа. На тим местима се у делићима времена остварује хладно или топло заваривање.

**Хладно заваривање** је појава стварања јаких међуатомских веза (адхезивно привлачење), а јавља се у условима малих брзина клизања. На местима додира, нарочито ако су површине потпуно чисте, јављају се изразита међуатомска привлачења, па и могућност прелаза атома.

**Топло заваривање** је појава која настаје услед велике брзине клизања. Када у таквим условима дође до сударања избочина, на местима судара тренутно се јављају високи притисци и температуре. Ако температура прекорачи критичну тачку топлења једне од компонената, долази до тренутног заваривања на месту додира.

Без обзира о којој се врсти адхезије ради, да би се клизање наставило потребна је нека додатна сила за прекидање веза и настављање смицања. То је нарочито изражено код површина елемената различитих тврдоћа, јер се у тим случајевима избочине тврђег материјала утискују у мекши, изазивајући на њему пластичне деформације уз браздање мекшег материјала. У том случају клизање ће захтевати већу енергију а коначна последица је брзо ерозивно и абразивно трошење.

Да би се извео модел једначине сувог трења који је у сагласности са већ изреченим, али на нивоу микротрибологије, прво се мора дефинисати стварна додирна површина јер се само на њој одвијају наведене појаве. Када нека тврда плоча клизи по мекшој или обрнуто, а обе имају изразите рељефе, стварна додирна површина  $A_r$  може се изразити као функција оптерећења  $F_n$  и тврдоће  $p_m$  мекше плоче, слика 3.7:



Слика 3.7 Приказ додирних површина

$$F_n = p_m A_r \dots\dots\dots (3.8)$$

где је:

$p_m$  – пенетрацијска тврдоћа (по Бринелу или Викерсу)

Једначина се једноставно може објаснити на следећи начин: кад је оптерећење мало, стварна додирна површина ће такође бити мала, јер површине налажу једна на другу само преко најистуренијих врхова рељефа; постепеним повећањем оптерећења, неравнине се све више пластично деформишу, налажући преко све више истурених врхова. Број непосредних додира све више расте, па расте и стварна додирна површина. Процес је ограничен тврдоћом тела: промена стварне додирне површине ће расти са оптерећењем толико дуго док се не створи нека површина која ће моћи да поднесе то оптерећење.

После тога процес се зауставља. Таква гранична површина зависи од тврдоће: што је тврдоћа већа, површина ће бити мања и обрнуто [192].

### 3.3.1 Трење са хабањем и дисипација енергије

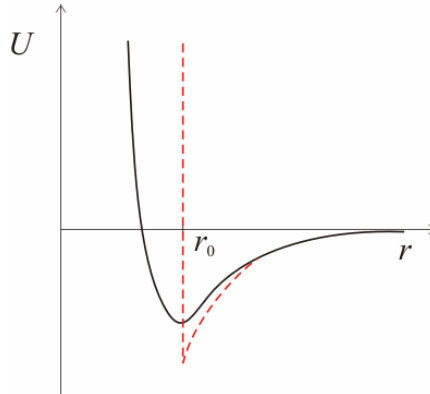
Хабање је по својој суштини процес који се објашњава пластичним деформацијама. С обзиром на то, као и на чињеницу да се тај процес сасвим сигурно одвија кад год постоји додир два тела природно је да се дуго сматрало да је управо хабање одговорно за дисипацију енергије у процесима трења. Уколико се међутим пође од претпоставке да се нпр. механички рад који се врши да би се покренула локомотива троши углавном на хабање точкова услед трења са шинама (приликом кога се одвијају пластичне деформације) прорачуни показују да би се точкови потрошили након свега неколико пређених километара [77]. Иако приликом трења пластичне деформације не могу да се у потпуности занемаре, јасно је да не могу да играју доминантну улогу. Или како је тврдио Томлинсон: „...само мали део атома који учествују у контакту два чврста тела услед тога промени своја места”. Ово тврђење је 1961. године формулисано у облику тзв. Аркардовог принципа: „Већина процеса који се дешавају при трењу се састоје у еластичном деформисању испупчења на површима и њиховом одвајању без оштећења док је оштећење испупчења веома редак догађај”.

То значи да морају да постоје други механизми дисипације који не мењају структуру површина које се додирују. Тачније, одређене инфинитезималне промене се сасвим сигурно одвијају на додирним површинама али те промене нису трајне и након одвајања површина нестају. Управо у таквим процесима који се стално одвијају механички рад се трансформише у топлоту. Сви ти процеси се у основи свде на међуделовање атома које је конзервативно, тј. описује се одговарајућим потенцијалним енергијама па не може без неких додатних претпоставки да опише губитак енергије.

Управо је Томлинсон 1929. године предложио нови дисипациони механизам који је данас познат под називом **Томлинсонов механизам** који се састоји у следећем: *Када један атом пролази крај другог, успостављају се одређена неповратна стања у којима се топлота ослобађа на рачун рада спољњих сила.*

### 3.3.2 Физичке основе адхезије

У основи адхезије је интеракција неутралних атома. Она се апроксимативно може описати Ленард-Донсовим потенцијалом, слика 3.8



Слика 3.8. Ленард-Донсов потенцијал (пуна линија) и једноставнији модел (испрекидана линија)

$$U(r) = \frac{A}{r^{12}} - \frac{B}{r^6} \quad (3.9)$$

где је са  $r$  означено растојање атома, а  $A$  и  $B$  су позитивне константе. Равнотежно растојање  $r_0$  (на том растојању потенцијална енергија има екстремну вредност) је при томе  $r_0 = \left(\frac{2A}{B}\right)^{\frac{1}{6}}$ . Ради једноставнијих израчунавања овај потенцијал може да се замени нешто грубљим моделом задатим релацијом

$$U(r) = \begin{cases} -\frac{B}{r^6} & r \geq r_0 \\ \infty & r < r_0 \end{cases} \quad (3.10)$$

који утиче незнатно на параметре модела али у великој мери олакшава израчунавања. Сличности и разлике ова два потенцијала се лако уочавају на слици 3.8.

На основу модела (3.9) се релативно лако може израчунати да је потенцијална енергија  $U_T$  интеракција два глатка (до атомског нивоа) крута тела чије се површи налазе једна наспрам друге на растојању  $h$ , по јединици њихове површине  $S$  дата изразом [76]

$$\frac{U_T}{S} = -\frac{Q}{h^2} \quad (3.11)$$

где је  $Q = \pi \cdot V \cdot n^2/12$  ( $n$  је концентрација атома у посматраном узорку). Уколико се тела са великог растојања доведу у „директан контакт” (тј. нађу на равнотежном растојању  $r_0$ ), сила интераговања између њих је при томе извршила рад по јединици површине

$$\frac{A}{S} = \frac{Q}{h^2} \quad (3.12)$$

Да би се тела раздвојила деловањем спољашњих сила, мора бити извршен рад који је макар једнак овом. Тиме се заправо формирају две слободне површине а половина тог рада, тј. енергија потребна за формирање једне површине по свом смислу представља коефицијент површинског напона тела  $\gamma = Q/(2r_0^2)$ .

На основу његове вредности може се проценити вредност међумолекуларних сила на следећи начин. Сила по јединици површине два глатка тела која се налазе на удаљености  $h$  се налази дифренцирањем израза (3.11) по  $h$

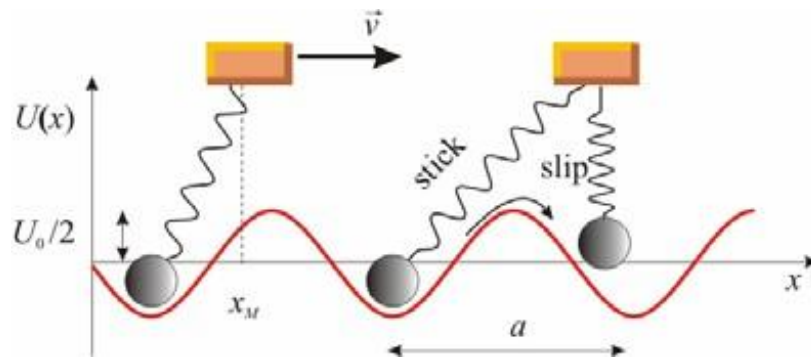
$$\sigma = \frac{F}{S} = -\frac{1}{S} \frac{dU}{dh} = -\frac{2Q}{h^3} \quad (3.13)$$

При „директном контакту“  $h = r_0$ , нормални напон ове силе је

$$\sigma = \frac{F}{S} = -\frac{2Q}{r_0^3} = -\frac{4\gamma}{r_0} \quad (3.14)$$

За вредност  $\gamma = (1-2) \text{ J/m}^2$ , која је типична за већину метала, и за  $r_0 \approx 4 \times 10^{-10} \text{ m}$ , за напон се добија  $\sigma = 10^{10} \text{ N/m}^2$ . На основу овог резултата се лако види да контактна површина само од  $1 \text{ cm}^2$  може да издржи масу од 100 тона. То значи да је теоријска вредност међумолекуларне интеракције две идеално глатке површи много већа него што би се очекивало на бази свакодневног искуства. У реалним системима је ова вредност редукована у највећој мери неравношћу површина у „додиру”.

### 3.3.3 *Stick-slip* модел трења



Слика 3. 9. Узрок трења у Прантл-Томлинсоновом моделу

Без обзира на то што већина данашњих сазнања о узроцима трења потиче из последњих двадесетак година, већина регистрованих ефеката на атомској скали може да се разуме на основу изненађујуће старог модела познатог под називом **Прантл-Томлинсонов модел** из двадесетих година прошлог века. Успех овог модела, његове варијације и генерализације и примена у циљу разумевања трења у различитим условима, је изазвано тиме што се ради о најједноставнијем моделу који укључује две најважније фундаменталне карактеристике сваког система са трењем. Модел описује тело под дејством периодичне конзервативне силе чија је средња вредност нула у комбинацији са дисипативном силом која зависи од брзине. Без конзервативне силе не би могло да постоји статичко трење. Без пригушења не би могла да постоји макроскопска сила трења при клизању. Обе карактеристике су присутне у Прантл-Томлинсоновом моделу. У одређеном смислу и у овом моделу је садржана Кулонова идеја о преплитању неравнина на површима као узрок трења.

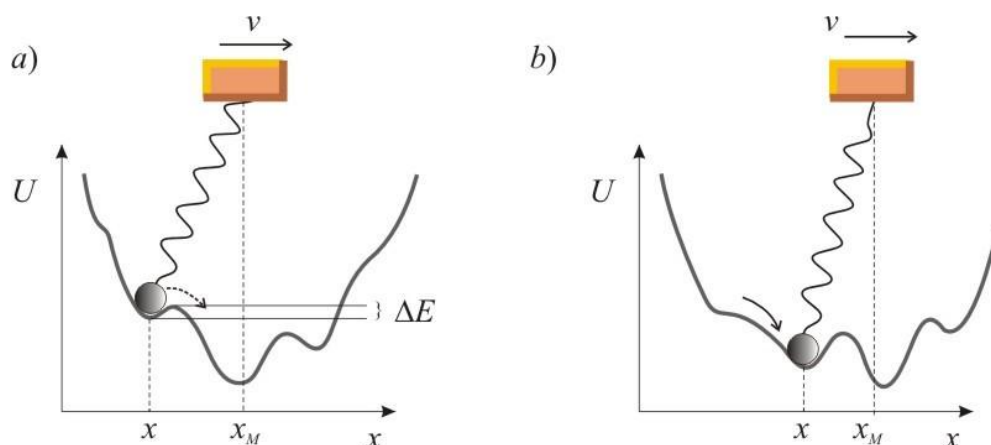
Скица Прантл-Томлинсоновог модела је приказана на слици 3.9. Сонда је приказана једним атомом који је прикачен еластичном опругом крутости  $k$  за тело масе  $M$ . Интеракција сонде и узорка је приказана периодичном потенцијалном енергијом  $U(x)$  у којој је са  $x$  означен тренутни положај сонде док просторна периодичност потенцијала износи  $a$ . Током клизања сонде по узорку, тело масе  $M$  се креће у  $x$ -правцу униформно, брзином  $v_M$ . У складу са тиме, једначина кретања сонде масе  $m$  је облика [80]

$$m\ddot{x} = k(x_M - x) - \frac{\partial U(x)}{\partial x} - \gamma \dot{x} \quad (3.15)$$

Опруга је у равнотежном стању у треницима  $t$  када је  $x_M = v_M t$ . Последњи сабирак описује пригушење са коефицијентом пригушења  $\gamma$ . Оно описује губитак енергије независно од његове праве физичке природе и тренутног канала дисипације (фонони или електронске екситације). Решење ове једначине представља путању сонде  $x(t)$ . Латерална

сила  $F_x$  која покреће сонду у  $x$  правцу може да се израчуна из израза  $F_x = k(x_M - x)$ , при чему сила трења представља њену у времену усредњену вредност  $\overline{F_{tr}} = \overline{F_x}$ . Уколико су брзине клизања мале, аналитичко решење једначине (3.15) може да се добије из претпоставке да је сонда увек у положају стабилне равнотеже који одговара тренутном минимуму укупне енергије

$$E_{tot} = \frac{1}{2}k(x_M - x)^2 + U(x) \quad (3.15)$$



Слика 3.10. Прантл-Томлинсонов механизам.

Одговарајућа енергија је приказана на слици 3.10 за две позиције  $x_M$  и за синусиодални интеракциони потенцијал. На првом делу слике сонда се налази у локалном минимуму. Енергијска баријера висине  $\Delta E$  спречава сонду да достигне следећи енергијски минимум са десне стране. Пошто се конзола креће у  $x$ -правцу, енергијска баријера се смањује што омогућује сонди скок у наредни локални минимум. У складу са периодичношћу интеракционог потенцијала овакав низ „stick” и „slip” процеса се понавља током проласка сонде по површи узорка.

Услови да се ради о локалним минимумима

$$\left( \frac{\partial E_{tot}}{\partial x} = 0 \text{ и } \frac{\partial^2 E_{tot}}{\partial^2 x} > 0 \right) \quad (3.16)$$

омогућују даљу анализу кретања сонде. Наиме њена путања мора да задовољава решење једначине:

$$k(x_m - x) = \frac{\partial U}{\partial x} \quad (3.17)$$

За јако круте опруге, постоји само једно решење за све вредности  $x_M$  које резултује у непрекидном кретању сонде без трења, пошто је у том случају средња вредност латералне

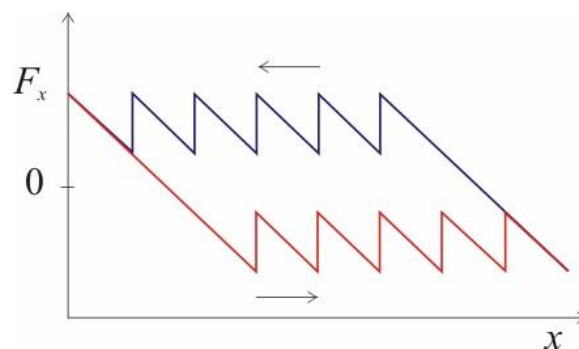


силе једнака нули. Међутим, кретање сонде се драматично мења уколико је задовољен услов

$$k < - \left[ \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right]_{min} \quad (3.18)$$

Сада се сонда креће у трзајевима који одговарају већ помињаном „stick-slip” кретању по површи узорка уз скакаће из једног потенцијалног минимума у други.

Такво кретање је приказано на слици 3.11.



Слика 3.11 Зависност латералне(бочне) силе од пређеног пута

Зависност латералне(бочне) силе од пређеног пута при кретању са лева на десно и повратку у исту тачку

Како је средња латерална сила једнака нули у том случају, овакво кретање доводи до силе трења која је неопходна да се покрене тело  $M$  у  $x$ -правцу. Управо такво кретање се, као што је речено, појављује у микроскопији атомских сила. Потенцијална енергија интеракције сонде и узорка се обично узима у облику;

$$U_{int} = - \frac{U_0}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{a} x_v\right) \quad (3.19)$$

где вредност амплитуде  $U_0$  зависи од вертикалне силе. Уколико се оваква потенцијална енергија убаци у израз (3.18), корисно је дефинисати параметар

$$\eta = 2\pi^2 U_0 / ka^2 \quad (3.20)$$

Уколико је  $\eta > 1$ , услов (3.18) је задовољен и реализује се „stick-slip“ кретање док се непрекидно клизање без дисипације добија ако је  $\eta \leq 1$ .

### 3.3.4 Енергетска теорија трења

Полазна идеја и основна суштина ове теорије јесте чињеница да је процес трења увек дисипативан процес, који узрокује трошење на топлотне, електричне и акустичне појаве, затим на деформације површина и дробљење абразивних честица. Рад силе трења једнак је збиру радова наведених компонената, које се могу с довољном тачности одредити на неки од могућих начина.

Кузнецов (1925) је први покушао утврдити везу између коефицијента трења и структуре хабајућих спојева с енергетске тачке гледишта. При томе је дефинисао теорију по којој се укупни рад утрошен на померање елемената у споју трења састоји у општем случају од збира енергетских губитака на појаве које се јављају у процесу трења;

$$U_A = \Sigma A_t . \quad (3.21)$$

Кузнецов је сматрао да се већи део енергије троши не на деформацијске промене  $A_2$ , него на стварање нових површина  $A_1$ , али је 1947. такав закључак потврдио погрешним. За израчунавање рада, за стварање нових површина дефинисао је формулу ;

$$A_1 = C_I \frac{M}{d} \sigma \quad (3.22)$$

Где је;  $C_I$ -параметар , који зависи од димензија избрушених честица,  $M$ - избрушена маса,  $d$ - гусина материјала,  $\sigma$ - површинска енергија по јединици површине. Битно је то што се за једно и друго може доказати да површинска енергија има одлучујуће значење за фрикциона својства тела која се налазе у споју трења.

Ребиндер(1936) је проучавајући процес дисперзије, анализирао енергетску страну процеса трења, посматрајући га као резултат површинског трошења. Рад, који се утроши на дисперзију материјала он рачуна по формули ;

$$A = \sigma \Delta s + q \quad (3.23)$$

; где је  $\sigma\Delta s$ - рад сачуван у облику слободне површинске енергије:  $q=q_1+q_2+q_3$  – неповратни део рада деформације материјала:  $q_1$  – рад еластичних деформација;  $q_2$  – рад пластичних деформација ;

$q_3$ - рад силе трења, који није праћен дисперзијом. Како се види из дате формуле , својства површинског слоја имају велику важност за трење. [1].

Развој ове теорије налазимо и у радовима Дубинин-а и Рабиновича (Dubinin, Rabinowicz) [93,94].

Костецкиј (1970) [180] је дао најтемељнију разраду процеса трења с енергетског аспекта.

Он сматра да је процес површинског трења у општем смислу само прелаз од макроскопског кретања тела која се додирују на микро и субмикроскопско унутрашње кретање, које је повезано са стварањем топлоте и променом унутрашње структуре танких површинских слојева који учествују у процесу. Теоретско објашњење таквог процеса треба имати као полазну основу за енергетске односе. Коришћењем првог закона термодинамике формулисана је следећа зависност;

$$A=Q+\Delta E_U+ \Delta E_P+ \Delta E_d+ \Delta E_S \quad (3.24)$$

Где је :

$A$  - рад сила трења ;

$Q$  - особођена топлота ,

$\Delta E_U$  - промена унутрашње енергије;

$\Delta E_P$  - прираст површинске енергије;

$E_d$  - енергија површинске дисипације ;

$E_S$  - рад утрошен на смицање и клизање у граничном слоју.

Енергија површинске дисипације  $E_d$  и прираст површинске енергије  $\Delta E_P$  су веома мали и могу се искључити из разматрања. Тако се долази до првог принципијелног става енергетске теорије трења. Рад површинског трења троши се на стварање топлоте и апсорбције енергије;

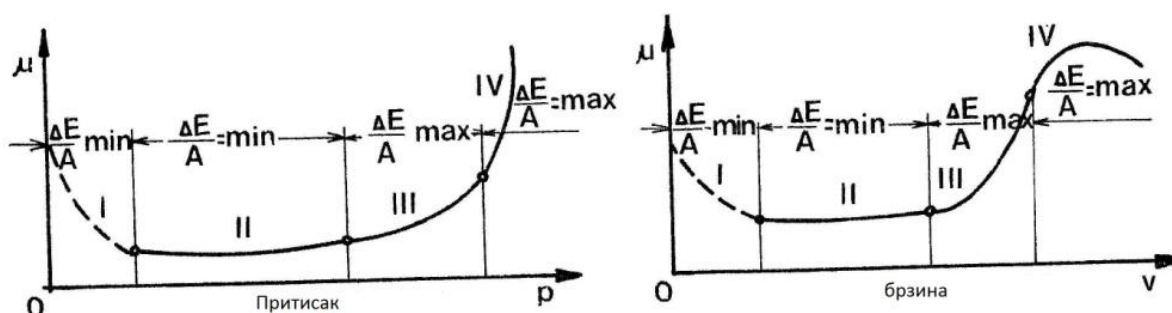
$$A=Q +\Delta E \quad (3.25)$$

где је  $\Delta E$  је опште повећање топлоте споја трења. Рад површинског трења никада не прелази потпуно у топлоту а апсорбована енергија није никада једнака нули.

Однос апсорбоване енергије и рада површинског трења зависи од својстава хабајућих материјала и услова површинског трења :

$$\Delta E/A = \text{const} \text{ и } \Delta E/A = f(p, v, \vec{c}) \quad (3.26)$$

где је :  $p$  - притисак,  $v$  - брзина клизања,  $\vec{c}$  - вектор параметара трења - (својства материјала, средине, температуре итд.). Принципијелна схема енергетских односа за одговарајући распон промене притиска и брзине кретања видљива је из сл .3.12



Слика 3.12 Дијаграм енергетских односа  $\Delta E/A$  за разне области трења (Костецкиј) [180]

I - прелазна област, II - област нормалног трења, III - област поремећаја динамичке равнотеже,

IV - област развоја патолошких процеса

Други принципијелни став енергетске теорије трења даје анализу трења у вези с процесима, који се јављају у зони додира. „Сила трења је у ствари збир сила, које се искористе у току одвијања механичких, физичких и хемијских процеса, који су неизбежни при датим условима додира тела при трењу:  $T = T_1 + T_2 + \dots + T_n$  „

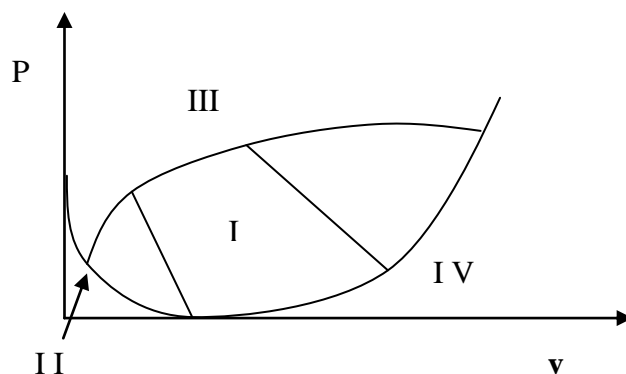
Трећи принципијелни став енергетске теорије трења односи се на стационарни део нормалног трења, који је увек повезан с одређеним обликом трансформације и оштећења површина. Код нормалних услова трења појаве у површинским слојевима хабајућих тела и на граници између њих треба разматрати у оквиру три облика стања напрезања и деформација .(сл. 3.14)

Анализа енергетских односа омогућава јасно дефинисање услова нормалних и патолошких процеса трења. Формулација трећег става енергетске теорије трења на основу тога гласи „ При задатом односу параметара материјала и средине постоји област механичког деловања у којој интеграл односа очуване енергије према раду силе трења по деформисаној запремини добија минималну вредност ,

$$\int \frac{dEu(\lambda)}{A} \tag{3.27}$$

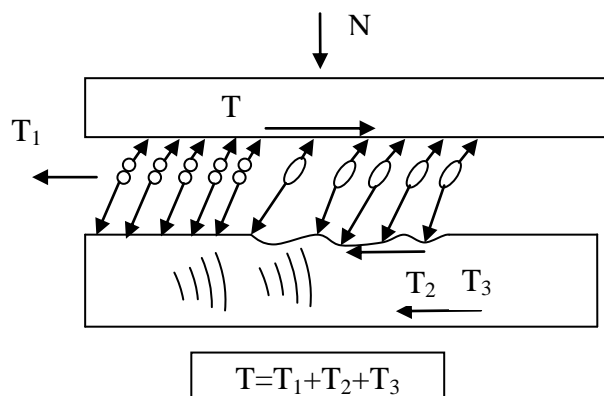
где је  $\lambda$  – запремина „

Шематска област нормалног трења у којој готово сав рад трења прелази у топлоту, види се на сл. 3.13. Према оваквом ставу енергетске теорије трења три наведене поставке теорије омогућују потпуну анализу сложеног процеса трења и његовог управљања .[1.Костецкиј]



Слика 3.13 Распоред области нормалних процеса трења (Костецкиј)

I - нормално трење, II - прелазно трење, III - интензивно механичко оштећење и задор 1 реда, IV - задор 2 реда



Слика 3.14 Три облика стања напрезања и деформације код трења (Костецкиј)

N-нормално оптерећење, T-тангенцијална сила

Везе условњене :T<sub>1</sub> - клизањем граничног слоја, T<sub>2</sub> - правцем деформација, T<sub>3</sub> - еластичним таласним деформацијама

## 4. ХАБАЊЕ

Површине машинских елемената које су приликом кретања у међусобном контакту, мењају с временом и своја својства. Мења се геометрија, величина, структура и својства површинских слојева, а величина и карактер промена зависе од:

- услова оптерећења,
- количине кретања,
- природе материјала елемената који су у контакту,
- састава и својстава околине (влага, ваздух итд.),
- састава и својстава мазива итд.

По дефиницији, хабање је прогресивни процес губитка материјала елемената или делова машина који су у непосредном контакту и налазе се у релативном кретању. Као последица процеса хабања долази до истрошености делова машина, смањења ефикасности њиховог рада, потрошње енергије итд. Може се поделити на *механичко и хемијско хабање*.

Под *механичким хабањем* се подразумевају:

- адхезивно хабање
- абразивно хабање
- хабање услед замора материјала
- ерозија

Под *хемијским хабањем* се подразумева:

- хабање као последица оксидације површине материјала
- хабање услед процеса корозије

У највећем броју реалних случајева присутна је комбинација механичког и хемијског хабања.

### 4.1 Адхезивно хабање

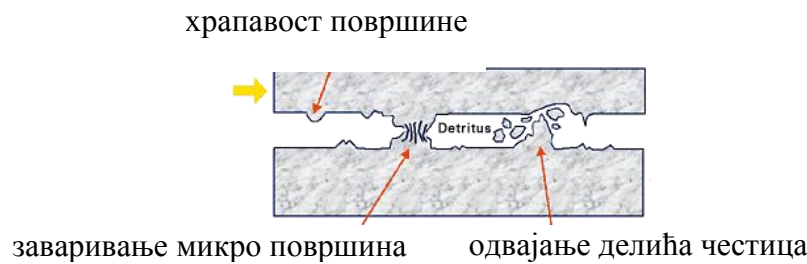
Представља основни вид хабања оптерећених површина које су у контакту. Појава овог вида хабања налази се у директној вези са трењем клизања, са контактом површина и адхезивним везама молекула тих површина.

До појаве адхезивног трошења долази код високооптерећених површина, код којих се без обзира на присутно мазиво између њих, остварује контакт врхова неравнина. Разлог томе је висока вредност специфичног притиска на месту контакта, што доводи до цепања слоја мазива.

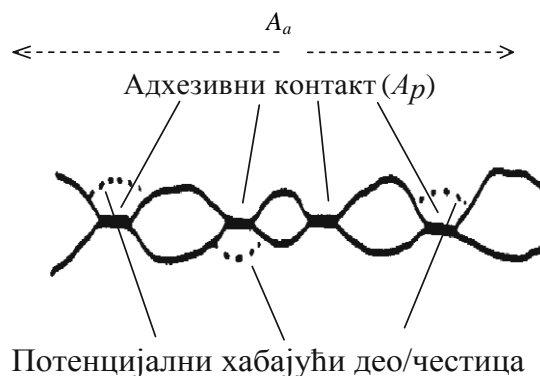
Код раздвајања две микрозаварене неравнине може доћи до лепљења материјала с једне површине на другу, а често и до одвајања делића од основног материјала, који се касније слободно крећу између површина и доводе до абразивног хабања, слика 4.1. Ова

појава код микроповршина може се проширити и на појаву адхезивног хабања и заривавања целих површина. Сразмерно са повећањем притиска на површини, пропорционално се повећава број спојева и стварна површина контакта.

Код екстремних притисака, деформација и високих температура, долази до међусобног заваривања микроспојева по значајном делу површина у контакту. Тако заварени спојеви неравнина се раскидају па долази до хабања целе површине. Ако у карактеристичним случајевима оптерећења и контакта дође до интензивног и бројног микроставаривања, сума отпора смицања може порастати до те величине да се цели систем заустави, односно зарива.



Слика 4.1 Шематски приказ адхезивног хабања



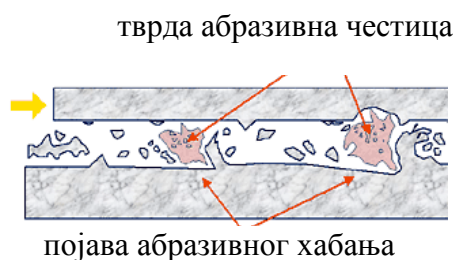
Слика 4.2

На сликама 4.2 и 3.7 приказан је адхезивни контакт између две чврсте површине приказујући  $A_p$  наспрам  $A_a$  под оптерећењем .

## 4.2 Абразивно хабање

Абразивно хабање је облик одстрањивања материјала са површина у контакту као последице задирања неравнина површине веће тврдоће или чврстих делића разног порекла у површину материјала мање тврдоће. Делићи материјала могу бити слободни и понашати се као треће тело, али и утиснути у једну или обе површине. Они могу настати или унутар самог трибомеханичког система, као резултат процеса хабања површина или се могу унети средством за подмазивање.

Честице које су веће или једнаке величини зазора имају највећи утицај на оштећење површина, слика 4.3. Зато је неопходно обезбедити да се између површина нађу само честице чија је величина мања од величине зазора. У циљу спречавања улаза чврстих честица, мора се обезбедити добро заптивање одговарајућих елемената машине, а у системе подмазивања или хидраулике уграђују се уређаји за филтрирање. Абразивно хабање може у значајном смислу имати широку примену код обраде метала слидањем струготине.



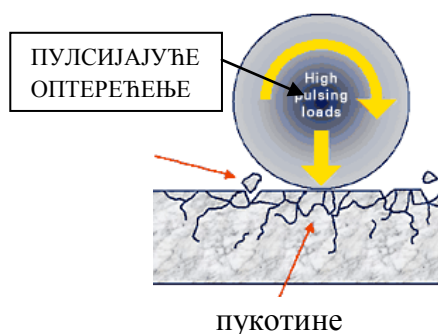
Слика 4.3 Шематски приказ абразивног хабања

### 4.3 Хабање услед замора материјала

Јавља се у случајевима када се површине стално клижу или ваљају по истом путу. Циклуси променљивих оптерећења, као и напрезања на притисак и истезање могу проузроковати површинске и подповршинске пукотине, слика 4.4.

Такође макро и микро неравнине као последица механичке или термичке обраде, погодују настанку површинских микрупукотина. Пукотине се, нарочито услед променљивих оптерећења, прогресивно шире све до момента откидања ситних комадића материјала.

Овај вид хабања није карактеристичан за машинске елементе код којих је присутно стално или врло мало променљиво оптерећење. Често се јавља код зупчаника, свих врста котрљајућих и клизних лежајева и брегастих осовина.



Слика 4.4 Шематски приказ хабања услед замора материјала



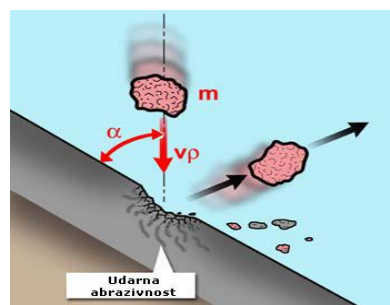
## 4.4 Ерозија

Настаје када се оштре честице неке чврсте материје залепе на једну од клизних површина. Често се погрешно упоређује с адхезијом. Основна разлика је у томе да је храпавост изазвана ерозијом далеко већа, а и механизам је различит. Може бити изазвана и вишеструким деловањем удара тока флуида, што се често јавља на лопатицама турбина и центрифугалних пумпи. Тако настала оштећења суперпонирају се ако флуид носи абразивне честице.

### 4.4.1 Ударна ерозија –

Посебан вид абразивног хабања са разарањем површине као последице поновљених удара чврстих делића на површину. Материјал се са површине при томе одстрањује кинетичким дејством чврстих делића у кретању, слика 4.5. Узроци појаве ударне ерозије: прашина или песак, ношени јаким ветром или њиховим ударом на површине чврстог предмета великом брзином (лопатице и кућишта пумпи, дувалке и цевоводи и хидрауличком и пнеуматском транспорту и др.).

Релативна брзина честице, величине честице и угао удара на површину одређује вредност кинетичке енергије ерозивне струје, а тиме и интензитет ерозивног оштећења.



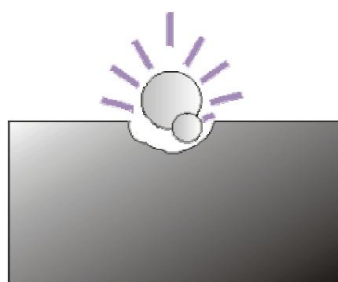
Слика 4.5 Ударна ерозија

За природне материјале ерозивност расте са порастом садржајем кварца и величином ударних честица. Она зависи и од облика честица јер, оштре ивице честица изазивају јаче хабање од округлих. Угао удара је дефинисан нагибом између површине предмета и трајекторије ударне честице. Утицај угла удара зависи и од типа материјала. Еластични и меки материјали трпе највећа оштећења при угловима од  $20^\circ$  до  $30^\circ$ , док крти материјали при правом углу. На површинама кртих материјала удар честица изазива напрстине у облику шкољке са светлим траговима на месту удара. Код еластичних материјала, када су оштећења површина при малим угловима удара, оштећења настају издвајањем материјала са површине слично процесу резања.

Избор материјала нападнуте површине је најзначајнији фактор којим можемо да утичемо на смањење оштећења површина услед ударне ерозије. Крти материјали су у општем случају отпорнији, али оштећења зависе у највећој мери од угла удара честице.

#### 4.4.2 Кавитациона ерозија

Када при струјању течног мазива притисак у течностима падне испод притиска паре течности на радној температури, у течности се појављују парни или гасни мехурићи. При преласку течности поново у област високог притиска долази до разбијања – колапса мехурића. Како се при настајању парних или гасних мехурова течности (не мехурови ваздуха растворених у уљу) троши знатна енергија, то се при њиховом колапсу она ослобађа у облику хидрауличног таласа. Колапс гасних мехурића долази поступно, без оштрих удара, и нормално не оштећује површине, али њихова појава може, евентуално, да смањи носивост лежишта. Колапс парних кавитација наступа са наглим и оштрим ударним таласом локално концентрисаним и високе учестаности, што доводи до површинског замарања материјала и оштећења површине, слика 4.6.



Слика 4.6 Принцип кавитационе ерозије

Поред локалног наглог повећања притиска, долази и до локалног знатног повећања температуре, што помаже одређене убрзане хемијске реакције. При подмазивању водом, емулзијама или суспензијама, или пак присуству воде као контаминанта у систему подмазивања, пропратне хемијске реакције могу бити изразите. Механички удари услед колапса кавитације одстрањују знатни слој оксида, чиме се олакшавају даљи хемијски процеси по дубини, што опет олакшава даље механичко дејство. Због комбинованог механичког и хемијског дејства неки аутори ову врсту ерозије називају кавитациона ерозија.

До наглих промена притиска долази при струјању у хидродинамичком слоју мазивог флуида на местима прелаза са оптерећеног на неоптерећени део у лежишту, где притисци у слоју могу да поприме и негативне вредности. Кавитација се најчешће јавља код дизел-мотора са ниским и средњим бројевима обртаја. Кавитациона истрошења површина материјала за лежишта зависе од тврдоће материјала. Кавитациона истрошења се ретко простиру у дубину материјала. Појава кавитације зависи од притиска паре мазиве течности, наравно у условима високих температура и знатног вакуума на местима где се она јавља, по правилу локално у слоју мазива лежаја. Кавитациона истрошења се могу, понекад, елиминисати употребом вискознијег мазива.

По правилу, појаву кавитационог истрошења морамо сматрати конструктивним проблемом. Одређене конструктивне мере се састоје у:

- смањењу зазора између рукавца и лежаја и
- у повећању притиска уља у циркулацији.

Смањење зазора смањује, до извесне границе, радијално кретање рукавца у лежају, а повећани притисак уља смањује могућност појаве кавитационих мехурића. Свакако је једна од могућности за смањење кавитационог истрошења и примена тврђих материјала за лежајеве.

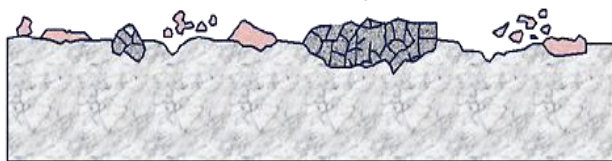
#### 4.5 Хабање услед оксидације

Представља механичко - хемијски процес поступног разарања површина узрокован повезивањем активних пластично деформисаних површинских слојева с кисеоником. Танки слој металне површине, који је ступио у хемијску везу са кисеоником назива се оксидни слој или корозија.

Директна оксидација метала у нормалним условима у принципу не представља посебну опасност за површине. Када дебљина оксидног слоја није велика побољшавају се основне триболошке карактеристике површине, смањује се коефицијент трења и повећава тврдоћа површине. Супротно овоме, оксидни слојеви већих дебљина, могу створити проблема зато што су нееластични. Слој пуца, па се ствара слој подложен хабању, а процес оксидације се проширује у дубину.

#### 4.6 Хабање услед корозије

Представља процес оштећивања површина које клизе у корозивној средини, при чему деловање корозивног медија може бити хемијско или електрохемијско, слика 3.9. У зависности од интензитета и степена захваћености површине, оно може бити непрекинуто или местимично прекинуто. Кад би површине мировале продукти корозије могли би на њима стварати секундарне заштитне слојеве. Међутим клизањем се, ти слојеви кидају и оштећују, па корозија може даље да се шири.[ 1]



Слика 4.7 Шематски приказ хабања услед корозије

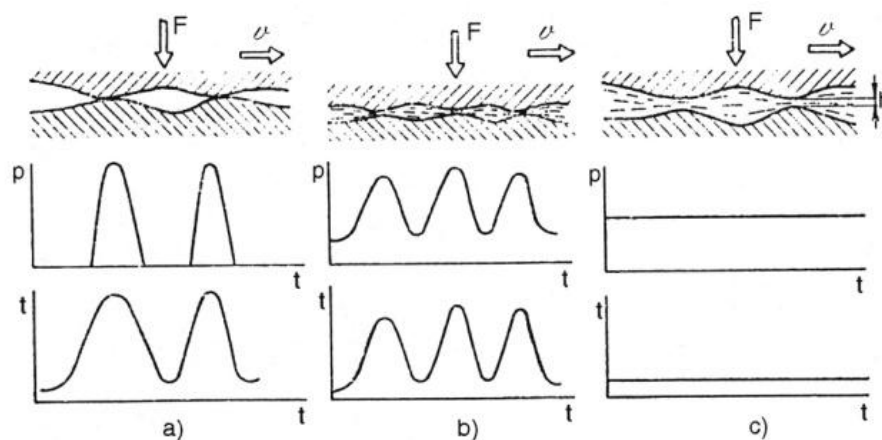
## 5. ПОДМАЗИВАЊЕ

### 5.1 Врсте подмазивања

Подмазивање се дефинише као процес раздвајања спрегнутих површина тела у релативном кретању слојем неке врсте мазива. Под мазивом се подразумева било која материја којом се раздвајају, потпуно или делимично, површине тела у кретању и којом се смањују трење и хабање.

Мазива способност је својство мазивог материјала да смањује силу трења и хабања независно од његове вискозности. Способност мазива узрокује смањење адхезионог и механичког узајамног деловања тврдих тела при трењу, тј. смањења сила фрикционих веза.

Утицај мазива на процесе трења и хабања приказано је на слици 5.1 [7].



Слика 5.1 Утицај мазива на процесе трења и хабања

Трење без подмазивања и мазива сл. 5.1 а) праћено је механичким оштећењем контактних површина, еластопластичним деформисањем, наглим повећањем температуре, настајањем шума и вибрација. Карактеристика овакве врсте контакта је механичко и молекуларно узајамно деловање контактних површина. Остваривање контакта по врховима неравнина проузрокује врло велике реалне притиске у појединим тачкама ( $10^8$ - $10^9$  Pa), чак и при релативно малим спољашњим оптерећењима. Хабање је врло интензивно.

Трење у условима подмазивања (сл. 5.1 б, ц ) протиче у знатно повољнијим условима узајамног деловања контактних површина и карактерише се смањењем силе трења, равномернијом расподелом притиска по контактної површини и мањим интензитетом издвајања топлоте.

Молекуле материја које улазе у састав мазива могуће је поделити у две групе: поларни (активни) и неполарни. Поларни под утицајем молекуларног поља тврдог тела образују структуру граничног слоја а други, значајно слабији, узајамно дејствују са површином тврдог тела.

Отпор релативном померању контактних површина у присуству мазива смањује се услед образовања граничних слојева мазивог материјала и стимулисаног образовања оксидационих слојева. Оксидациони слојеви, смањују механичко узајамно деловање неравнина, поларну активност површинског слоја метала и тако смањују молекуларну компоненту сила трења.

Образовани оксиди, у већини случајева су мањи од висина неравнина и крећу се у границама 0,1-0,5  $\mu\text{m}$ . Механичко узајамно деловање контактних површина не искључује се потпуно, већ се само смањује захвањујући смањеном притиску у тачкама додира. Услед тога деформације контактних површина се не искључују већ се испољавају у блажој форми у танким површинским слојевима метала.

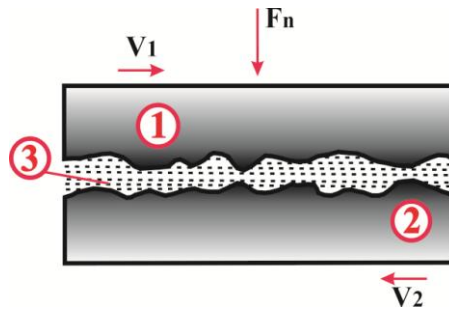
Мазиво смањује трење услед релативног клизања слојева уља. Размештајући се по површини микропарова у додиру оно смањује пластичне деформације, доприноси равномернијој расподели температура и притиска и тако обезбеђује повољније услове рада контактних површина [1].

Зависно од дебљине слоја мазива који се успоставља између површина, међуповршинског распореда мазива, геометрије спрегнутих површина и радних услова могуће је остварити различите облике подмазивања. Разликују се два основна вида подмазивања:

- **потпуно подмазивање и**
- **непотпуно подмазивање.**

### ***5.1.1 Потпуно подмазивање***

Представља такав вид подмазивања при коме су контактне површине елемената у релативном кретању потпуно раздвојене континуалним слојем мазива (слика 5.2). При овом облику подмазивања није могућ директан механички контакт између додирних површина елемената и присутно је само унутрашње трење између слојева мазива. Да би се слој мазива одговарајуће дебљине одржао између површина у кретању и под оптерећењем неопходно је да се у њему оствари притисак способан да носи спољашње оптерећење, односно потребно је да слој има одређену моћ ношења.



Слика 5.2. Додир површина у условима потпуног подмазивања (1 и 2 – контактни елементи; 3 – мазиво)

Потпуно подмазивање се реализује на различите начине:

1. Довођењем флуида под притиском:
  - хидростатичко подмазивање и
  - гасно-статичко подмазивање.
2. Самогенерисањем унутрашњег притиска у флуиду:
  - хидродинамичко подмазивање,
  - еласто-хидродинамичко подмазивање и
  - гасно-динамичко подмазивање.

Ови облици подмазивања заступљени су код највише коришћених машинских елемената: клизних и котрљајних лежајева, зупчастих преносника, брегастих механизма, итд.

### 5.1.2 Хидростатичко подмазивање (ХСП)

ХСП је такав облик потпуног подмазивања код кога се мазиво уводи између површина у релативном кретању под притиском који се остварује и одражава помоћу посебног уређаја из неког спољног извора, што обезбеђује носивост слоју мазива.

У условима хидростатичког подмазивања јавља се мало трење и незнатно хабање, с обзиром да су спрегнуте површине при свим условима рада, укључујући и брзину  $v=0$ , потпуно раздвојене. Предност оваквог начина подмазивања огледа се у могућности рада елемената и механизма у широком опсегу оптерећења и брзина, јер је моћ ношења одређена вредношћу притиска под којом се уље доводи између површина. Једновремено, обезбеђује високу тачност положаја и добру динамичку стабилност.

Недостатак хидростатичког подмазивања огледа се захтевом за коришћењем посебног уређаја за остваривање потребног притиска у мазиву и његово довођење на место додира. Ово са собом повлачи и опасност од могућих отказа елемената или целог додатног уређаја и релативно високе трошкове уградње и одржавања таквих система.

### **5.1.3 Хидродинамичко подмазивање (ХДП)**

Представља облик потпуног подмазивања код кога облик (геометрија) и релативно кретање површина узрокују генерисање притисака у слоју мазива. Приликом мировања површине су у директном додиру, док се притисак јавља само при релативном кретању елемената [1,70]. Притисак који се оствари у условима кретања обезбеђује потребну моћ ношења слоја мазива, а тиме и раздвајање у потпуности спрегнутих површина. Отпор трења при хидродинамичком подмазивању је последица унутрашњег трења у мазиву, а триболошке карактеристике система зависе од физичко-хемијских особина мазива.

Најзначајнија карактеристика мазива у условима хидродинамичког подмазивања је вискозност, јер има утицаја на дебљину слоја мазива, моћ ношења и губитке услед трења. Како код овог вида подмазивања при кретању не постоји директан додир између површина, карактеристични облици хабања који се јављају су: абразивно, кавитационо и ерозивно хабање, а врло често и површински замор материјала.

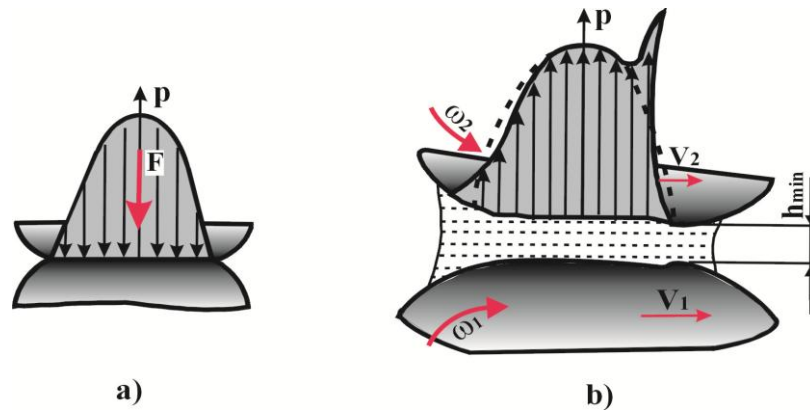
### **5.1.4 Еластохидродинамичко подмазивање (ЕХДП)**

Ово је процес подмазивања површина еластичних деформабилних тела, односно то је поступак подмазивања спрегнутих површина чврстих тела ниске конформности при високим специфичним притисцима [1,70].

Карактеристика еластохидродинамичког подмазивања је да су спрегнуте површине конформне, односно прилагођене једна другој, те је на тај начин омогућено преношење оптерећења преко релативно велике површине. Међутим, код елемената који се најчешће употребљавају у процесу преношења снаге (зупчаници, котрљајни лежајеви, брегасти механизми) додир спрегнутих површина је неконформан, па се целокупно оптерећење преноси преко мале површине додира. Ово за последицу има висока специфична оптерећења, која изазивају знатне еластичне деформације површинског слоја материјала и промену геометрије и величине површине додира.

За овакве услове рада важе Херцови (Hertz) закони, на основу којих се одређује вредност притиска и величина додирне површине. Херцови услови додира имају доминантну улогу код еластохидродинамичког подмазивања, које се дефинише, како је раније наглашено, као процес подмазивања еластичних, деформабилних тела.

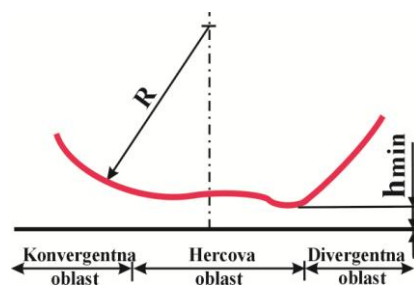
Додир спрегнутих површина оваквих тела у неоптерећеном стању, хипотетички, остварује се у тачки или по линији. У реалним условима, додир се јавља на некој малој, али коначној површини која је изложена дејству оптерећења, а чији облик и величина зависе од низа параметара (геометрија елемената у додиру, вредност оптерећења, својства материјала и сл.). Површина додира назива се Херцова област и карактерише се параболничном расподелом притиска (Херцов притисак) који настаје услед дејства оптерећења (слика 5.3а).



Слика 5.3. Расподела притиска код неподмазаних површина (а) и(б) при ЕХД подмазивању

Приликом подмазивања површина у релативном кретању мазиво при струјању пролази кроз три области: улазну конвергентну, Херцову област (која је мање или више равна) и излазну дивергентну област (слика 5.4) [1,70].

На улазу у Херцову област (почетак контакта) површине конвергирају у смеру струјања мазива стварајући услове за настанак хидродинамичког притиска у слоју мазива, који је, иако мањи од Херцовог притиска, довољан за раздвајање површина (слика 5.3б). У Херцовој области (средина додира) расподела притиска у слоју мазива прати до одређеног степена расподелу Херцовог притиска која се јавља код стационарних и неподмазаних режима. На излазу из Херцове области (зона раздвајања) настаје локално висок притисак (пик), који је последица захтева за одржавањем непрекидности струјања мазива. Мазиво је у овој зони изложено енормној промени вискозитета у изузетно кратком временском периоду, што доводи до његовог преласка у круто стање, па се у току елементарног времена оно понаша као чврсто тело [1,70].



Слика 5.4. Геометрија додира површина у релативном кретању [70]

Основни критеријум за оцену успешности подмазивања јесте вредност дебљине слоја мазива. Дебљина слоја мазива у зони Херцовог притиска једнака је збиру деформације површине и дебљине коју би уљни филм имао да нема еластичне деформације. Код еластохидродинамичког подмазивања дебљина слоја мазива је константна, осим на крају где има најмању вредност, јер на том месту долази до локалне редукције. У случају



великих оптерећења и малих брзина дебљина слоја мазива је мала и може се упоредити са величином локалне деформације, односно померањима изазваним деформацијама материјала. То је и разлог што је, осим на излазном делу додира, расподела притисака у слоју мазива блиска Херцовој расподели. Ако су оптерећења мала, а брзине велике дебљина слоја мазива је већа у поређењу са локалним деформацијама, а расподела притисака је слична оној када су површине круте [67,68].

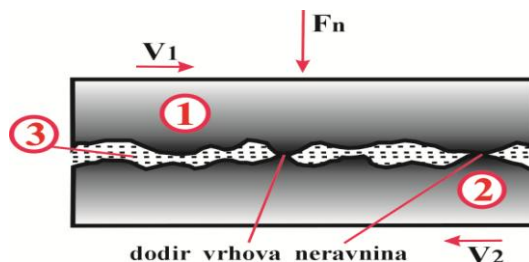
Висока специфична оптерећења проузрокују знатне еластичне деформације површинских слојева материјала, што доводи до промене геометрије и величине додирне површине. Као последица оваквих радних услова долази до хабања које се најчешће испољава кроз површински замор материјала и абразију.

### 5.1.5 Непотпуно подмазивање

Појављује се у ситуацијама када је слој мазива недовољне дебљине да спречи директан додир површина у релативном кретању. Основне врсте непотпуног подмазивања су:

- мешовито подмазивање (МП) и
- гранично подмазивање (ГП).

**Мешовито подмазивање**, представља прелазни облик од потпуног ка граничном подмазивању и означава услове подмазивања код којих је дебљина слоја мазива недовољна да потпуно раздвоји површине или је слој мазива местимично разорен, те је на тим местима присутан додир неравнина спрегнутих површина (слика 5.5.). То указује да се оптерећење са површине једног на површину другог елемената преноси делом преко слоја мазива, а другим делом преко спрегнутих неравнина. Отпор трења је са једне стране последица смицања у самом мазиву, а са друге интеракције неравнина и њиховог смицања при кретању.

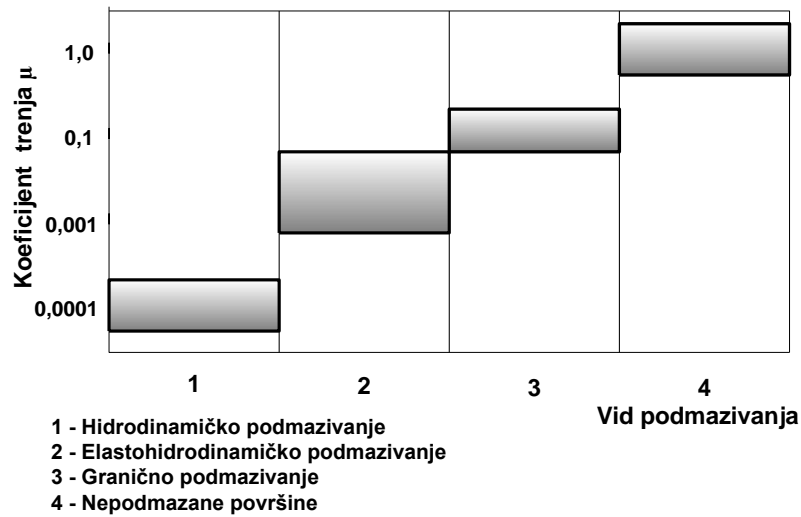


Слика 5.5. Додир површина у условима мешовитог подмазивања

(1 и 2 – контактни елементи; 3 – мазиво)

Мешовито подмазивање је најчешће присутно код елемената који су изложени високим оптерећењима, при релативно малим брзинама кретања. Овакви радни услови стварају предуслове за појаву свих врста хабања елемената система, те су триболошке карактеристике система одређене хидродинамичким ефектима, својствима материјала у контакту и саставом мазива.

Разним квантитативним показатељима могуће је исказати разлике између појединих видова подмазивања, међу којима коефицијент трења заузима једно од најзначајнијих места (слика 5.6). Најмање губитке у преносу енергије, а тиме и најнижу вредност коефицијента трења, имају они механички системи код којих је присутно хидродинамичко подмазивање, док су највећи у ситуацијама кад не постоји подмазивање (случај сувог трења).



Слика 5.6. Оријентационе вредности коефицијента трења за различите режиме подмазивања [1,72]

## 5.2. Гранично подмазивање

### 5.2.1 Основе

Гранично подмазивање (ГП) је врста непотпуног подмазивања код које су величина трења између површина у релативном кретању и величина хабања одређене својствима површина и физичко-хемијским својствима мазива.

Гранично подмазивање има следеће карактеристике;

- Спрегнуте површине су у директном додиру, тако да се остварује знатан контакт неравнина,
- Дебљина слоја мазива тежи нули,
- Хидродинамички ефекти и величина вискозности мазива нису од утицаја на триболошке карактеристике система,
- Триболошке карактеристике система су одређене међусобном интеракцијом веома танких слојева мазива и материјала чврстих површина.

Трибо - механички системи који раде под великим оптерећењем, малим брзинама и високим температурама изложени су условима граничног подмазивања. Често се овакав вид подмазивања може јавити као једини могући начин подмазивања у оваквим системима.

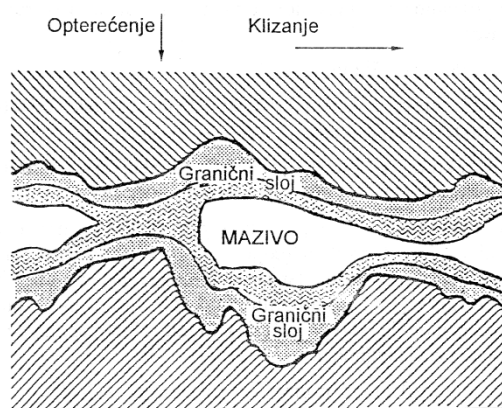
Поредећи овај начин подмазивања са хидродинамичким, еластохидродинамичким или трењем сувих површина, гранично подмазивање је много комплексније због многобројних интеракција материјала и мазива. Физичка и хемијска својства материјала и хемијска својства мазива имају утицај на величину трења и хабања код граничног подмазивања и под великим су утицајем средине у којој трибо-механички систем ради.

Да би се утицај трења и хабања смањио на оптималну меру у случају ГП, потребно је изменити карактеристике површине које су у контакту стварањем површинских слојева или филмова са добрим триболошким својствима [1].

Поменути слојеви се могу остварити претходним и посебним третирањем површина пре уградње појединих елемената трибо - механичког система или што је чешће у пракси применом одговарајућег мазива које ће својим карактеристикама у току експлоатације формирати потребне слојеве на контактним површинама .

Додавањем одговарајућих адитива мазиву омогућава се стварање потребних триболошких карактеристика у смислу формирања слојева који имају улогу да смање површину додира чистих метала и истовремено повећају површину додира у самом граничном слоју.

Као своју карактеристику ови слојеви треба да поседују ниску вредност напона смицања како би трење при релативном кретању површина било што мање, као и да поседују добру постојаност при свим условима рада, нарочито на повишеним температурама.



Слика 5.7 Формирање граничног слоја [1]

Без улажења у теоријски модел концепта трења при ГП, закључићемо да је на основу досадашњег сазнања прорачун коефицијента трења теоријске једначине тешко реализовати, због непознавања одређених параметара.

Механизам и кинетика формирања граничних слојева нису у потпуности разјашњени, али је познато да постоје два начина за стварање ових слојева;

- Адсорпцијом активних молекула мазива на металне површине и
- Хемијском реакцијом између адитива које садржи мазиво и материјали површина.

Гранични слој образује се на површинама као резултат међудејства између чврстог тела и атома, молекула а некад и микрочестица додатих у мазиво. У данашње време у мазиво се додају одређени адитиви који имају улогу смањења хабања и трења. Могу бити адитиви модификатори трења и адитиви за високе притиске. Ова подела је условна јер многи адитиви испољавају мултифункционална дејства и својства.

### 5.2.2 Физичка адсорпција

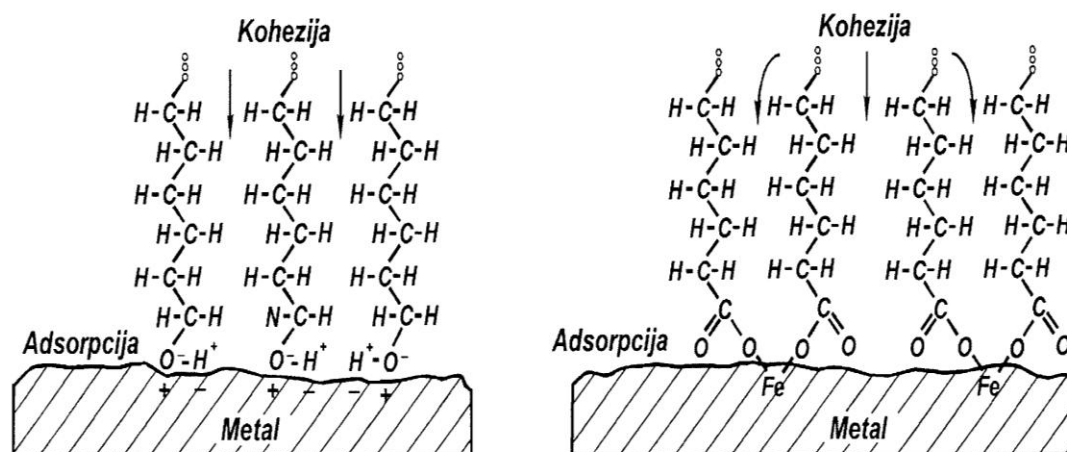
Физичка адсорпција (слика 5.8а) се јавља када се активни молекули из мазива оријентишу према металним површинама. Они образују на металној површини континуални чврст слој који прекрива неравнине и спречава додир чистих метала. Ови слојеви су осетљиви на високе температуре и јака смицања и стабилни су само при малим брзинама, ниским температурама и оптерећењима. Када престане кретање и дејство оптерећења молекули се враћају у мазиво, пошто се ради о реверзибилним процесима.

### 5.2.3 Хемијска адсорпција (хемиосорпције)

Код хемијске адсорпције (слика 5.8б) активни молекули из мазива везују масне киселине за метале и његове оксиде. На тај начин се формирају метални сапуни веома добрих триболошких карактеристика. Слојеви који су формиран преко метала добро подносе умерена оптерећења, брзине и температуре. Процеси хемијске адсорпције су реверзибилни.

### 5.2.4 Хемијска реакција,

За разлику од физичке и делимично хемијске адсорпције, веза активних материја у мазиву и метала или оксида метала је иреверзибилан процес и омогућава образовање слојева који остају стабилни при деловању великих оптерећења и на високим температурама. Адитиви који хемијски реагују са материјалима површина у контакту су антихабајући и адитиви за екстремне притиске (ЕР адитиви) који, како је већ напоменуто, у себи садрже сумпор, фосфор, хлор и њихова једињења.



Слика 5.8. Приказ физичке (а) и хемијске (б) адсорпције

Као мерило ефикасности мазивог уља у условима граничног подмазивања означавају се добра моћ ношења без разарања и низак коефицијент трења.

Остваривање добрих триболошких карактеристика, у конкретном случају, остварује се адекватном термичком обрадом металних површина у додиру (конусне чепасте славине), као што је очвршћавање површинског слоја цементацијом и темперовањем са додатком молибдендисулфида ( $\text{MoS}_2$ ) као основом за стварање антифрикционог слоја (Safeturn) [27]. Исто тако могуће је да се конуси пониклују и обложе са PTFE политетрафлуоретиленом (Тефлоном), осигуравајући површине практично без трења.

Код кугластих славина, постоји више начина изведеног контактнoг споја, а у суштини он се своди на контакт заптивног прстена (израђеног углавном од PTFE са додатком одређеног процента стакла) и спољно отворднуте и добро површински обрађене кугле са којом остварује непосредан контакт.

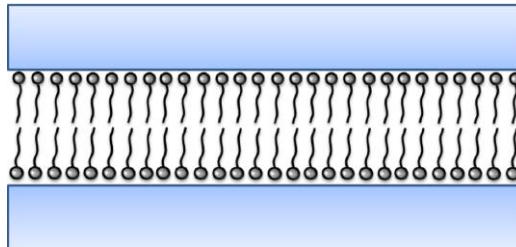
### 5.2.5 Савремена сазнања из области граничног подмазивања

Изнета разматрања у претходном делу представљају, на известан начин, досадашња општа сазнања о механизму понашања у области граничног подмазивања.

У наставку, биће приказана најновија сазнања у вези са феноменологијом у датој области, изражено кроз различите моделе посматраног процеса, експерименталне приступе и методе, објашњења до којих се дошло до данас и начине како су са више или мање успеха објашњени.

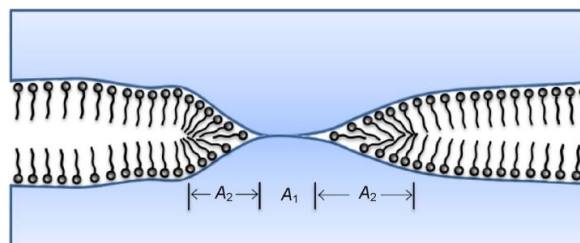
Ефекти подмазујућег филма нису ограничени само на трење и хабање него обухватају и друге аспекте између спојних површина, као што су: површинска енергија, површинске силе, електронске и јонске емисије, електрични двослој, адхезија и кохезија, а који су од великог интереса за праксу.

За разлику од осталих типова подмазивања, **механика флуида није у стању да адекватно опише понашање у режиму граничног подмазивања**. Друга карактеристика слоја филма код граничног подмазивања је да она покрива чврсти супстрат у облику танких молекуларних слојева, од једног слоја до више слојева молекула. Код граничног подмазивања, уколико је чврсти супстрат на атомском нивоу гладак и/или је локални притисак недовољан да раскине гранични филм, оптерећење се преноси преко молекуларно танког слоја као што је приказано на сл. 5.9 [81].



Слика 5.9 Шематски приказ Хардијевог модела граничног подмазивања [50].

Уобичајено је да, спољашње оптерећење бива пренешено преко граничног слоја мазива (филма) и неравнина које су распоређене и које прекидају подмазујући слој у већини инжењерских примена, као што је приказано на сл. 5.10 .



Слика 5.10. Шематски изглед Бовденовог модела граничног подмазивања [50].

Услед релативног клизања једне грубе површине по другој, јављају се различити феномени богати по варијацији, укључујући „stick-slip“ кретање, пораст температуре, генерисање одломака услед хабања, трансфера материјала и формирање трибофилма.

Значај подмазивања у смањењу трења у индустријској примени обично се приказује Стрибековом кривом сл. 5.11, која приказује различите режиме подмазивања и која приказује како кинетички коефицијент трења се мења у зависности од параметра  $B = \eta v / P$ , где је  $\eta$  динамички вискозитет мазива ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ),  $v$  је брзина клизања ( $\text{m/s}$ ),  $P$  је специфично оптерећење дефинисано као  $P = W / DL$  ( $W$  спољашње оптерећење/ $\text{N}$ );  $D$  пречник лежаја/ $\text{m}$ ;  $L$  ширина лежаја/ $\text{m}$ )



Слика 5.11 Стрибекова крива која илуструје режиме подмазивања

### 5.2.6 Експерименталне технике у области граничног подмазивања

Као што је на сл. 5.10 приказано, молекуларно танки слој се налази у сендвичу између два чврста тела са неравнинама у контакту под одређеним оптерећењем. Постоје **барем три** значајне препреке за експериментално изучавање граничног подмазивања [82].

**Прво**, неравнине које се јављају на површини материјала упарују се са другим материјалом у контакту и врло их је тешко дефинисати као величине-површине у контакту до нивоа нано величина.

**Друго**, хетерогене упарене међуповршине су усађене дубоко у два чврста тела која нису међусобно транспарентна и због тога су неприступачне за већину научних описа.

И на крају, **треће**, током процеса клизања, микроструктуре у контакту нису статичне али се развијају како треће напредује.

Из тог разлога развијене су разне технике које су удружене са до сада постојећим методама за проверу триболошких својстава. Поделићемо их у **три групе** и то у зависности када се примењују; **пре процеса**, **за** и **после триболошких тестова**, за испитивање трења и подмазивања.

**Прва група** се фокусира на једну или обе површине које треба да буду у контакту током подмазивања. Сврха ове групе техника је да покрије структурне, физичке и хемијске карактеристике у широком опсегу од макроскопских до микроскопских скала. Постоји већи број инструмената који се користе у овој групи, као што су модерни површинско топографски инструменти, оптички микроскопи, стилус профилометри, скенирајући тунелски микроскопи (**STM**), затим **AFM** микроскопи који омогућавају 3d визуелизацију структуре до нивоа нано-скале. Скенирајући електронски микроскоп (**SEM**) и тунелски електронски микроскоп (**TEM**) су постали моћно оруђе за високо резолутни приказ површине и суб-површинске структуре.

Описивање и карактеризација процеса који се одвијају, тј у **току су**, област је коју је најтеже описати. **AFM** се користи за проучавање контаката на нивоу нано-скале или микро скале. Ограничења већине нових техника је у томе што се могу користити само у вакууму. Поменућемо још **FECO** технику, **SFA**, **FTIR** – Фуријеова трансформациона инфрацрвена спектроскопија, **Раманова спектроскопија**, **SFG** – збирно фреквентно генерисање итд. За не транспарентне контакте, **АЕ**-акустично емисиона техника сензора је корисна за детектовање основних феномена током граничног подмазивања.

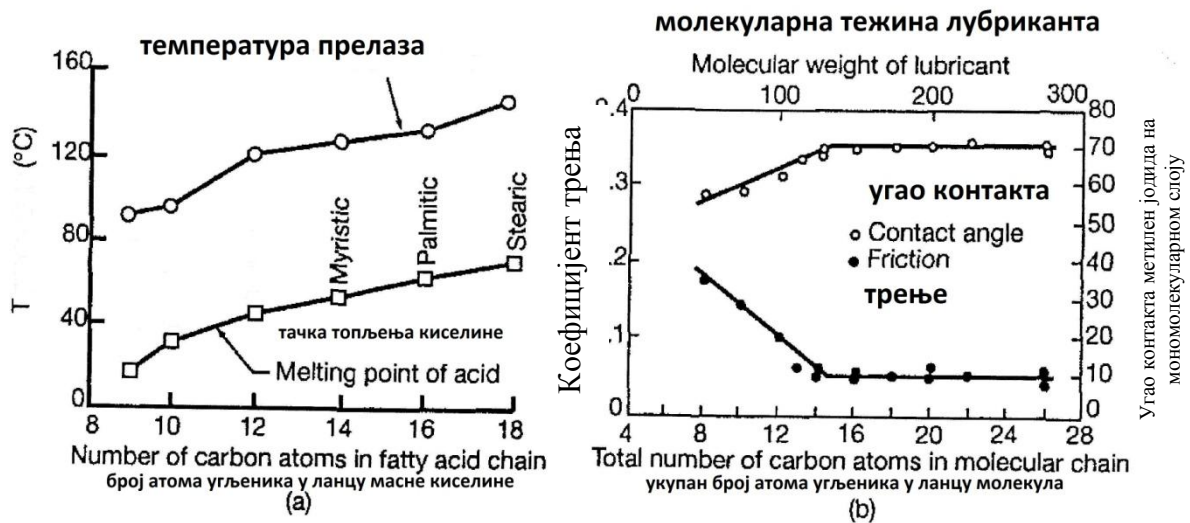
Све технике и инструменти кориштени **пре** су погодни и за коришћење **после** триболошких процеса испитивања [80].

### **5.2.7 Веза између адхезије и stick-slip феномена**

Бовден је приметио да „stick-slip“ се може појавити у условима када је подмазујући гранични филм релативно слаб, тј. лош. Прелаз између „stick-slip“ трења, које је врло штетно за трибопар и континуалног клизања, које је пожељно, се може контролисати преко више фактора [83]. Под истим околностима, континуално клизање са ниским коефицијентом трења је лакше достићи коришћењем стеаринске киселине као мазива, која формира метални сапун на површини челика него коришћење физички адсорбованог филма као што је угљоводоник и алкохол.

Дужина ланца је такође важан параметар у овом случају прелаза из једног у други вид клизања. Уколико се челичне површине подмазују масним киселинама као пример, „stick-slip“ трење се јавља када је дужина ланца кратка а континуално клизање се достиже са приметним падом у коефицијенту трења и хабања, када ланац достигне одређену дужину од 5 или 6 угљеникових атома што кореспондира са молекуларном тежином од око 100.





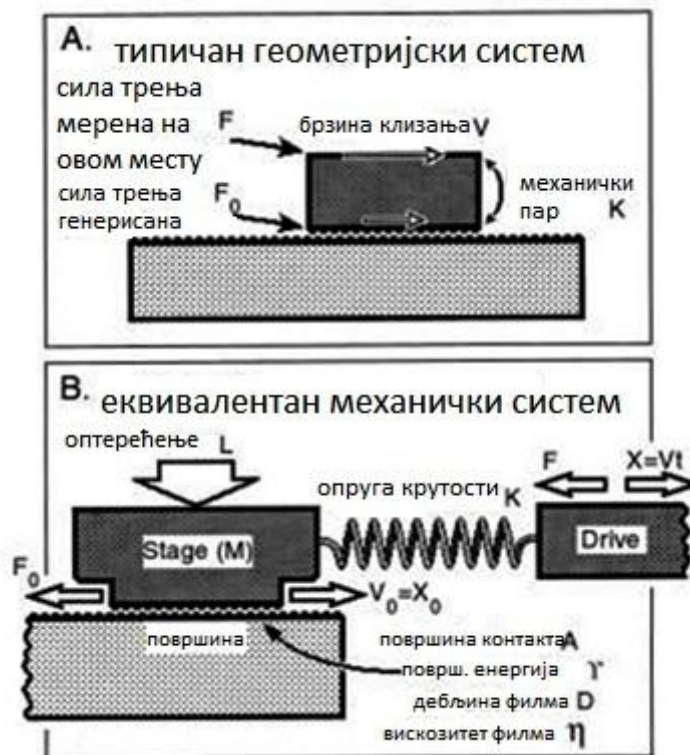
Слика 5.12 Ефекат дужине ланца на ефективност граничног подмазивања [84]

а) критична температура у функцији дужине ланца (Bowden и Tabor, 1950)

б) коефицијент трења као функција дужине ланца (Zisman, 1959)

Други утицајни фактор је температура. Прелаз из континуалног ка stick-slip режиму трења током подизања температуре може се јавити уколико је загревање недовољно да узрокује приметну оксидацију мазива и реверзибилан је током хлађења. За чисте парафине и алкоhole са равним ланцима прелаз се дешава при тачки топљења једињења и температура прелаза је оштра и лако уочљива. Са масним киселинама, температура прелаза тј. транзиције, зависи од оптерећења, брзине, и других експерименталних услова, али је уобичајено виша него тачка отапања једињења масних киселина. Бовден је био уверен да је stick-slip феномен повезан са испрекиданим спојевима узрокованих адхезијом и разарањем површине, али није дао детаљнија појашњења.

**Stick-slip** феномен, који је централна тема у граничном подмазивању је постао од интереса код многих истраживача у разним дисциплинама. Истраживачи stick-slip феномена, карактерисаног као неуниформно релативно кретање између површина у контакту је од виталне важности за разумевање разарања зглобне хрскавице, вибрације амортизера возила и кочионог система [85] несталног кретања код индустријских машина и алата [86] до активне геологије и земљотреса [87-88]. Stick-slip кретање или вибрације узроковане трењем у инжењерском систему се могу описати и предвидети преко динамичког моделовања и симулације трења [89-91].



Слика 5.13 Типичан пример модела клизања [84].

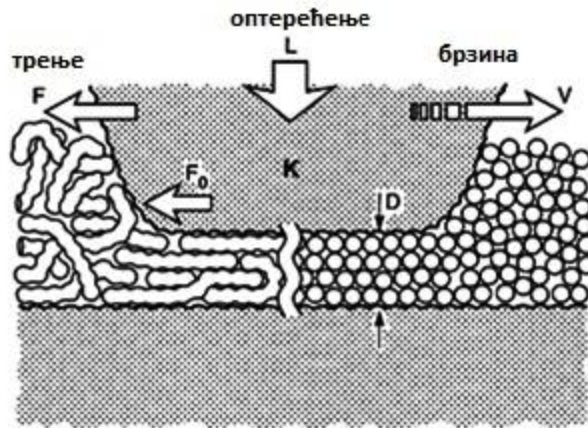
(А) Шематски приказ геометрије две клизајуће површине, илуструју како сила трења  $F_0$ , која је генерисана на површини, мерена је као  $F$  на другом месту. У овом случају механичка спрега два тела се може описати у облику једноставне еластичне крутости -  $K$ , или у облику много комплекснијег нееластичног коефицијента, који зависи од система.

(В) Еквивалентни механички модел за горњу слику применљив је за већину триболошких система. Треба знати да је  $F_0$ , сила генерисана на површини али да је измерена или детектована сила  $F = (X - X_0)K$ . Разлика између сила, брзина и померања на површини и на погону (детектору, сензору) илустрована је графички на сл. 5.15-5.18. (Verman, и Israelachvili, (1999)) [84].

Слика 5.13 приказује основну механичку спрегу и еквивалентни механички модел карактеристичан за већину триболошких система и експеримената. Разлика између  $F$  и  $F_0$  је важна, јер је готово за све практичне случајеве, примењена, измерена или детектована сила,  $F$ , различита од „стварне“ или „истинске“ силе трења  $F_0$  генерисане на површини.  $F$  и  $F_0$  су упарене на начин, да зависе од конструкције механичког система, нпр као вратило точка које је повезано са мотором кола. На датој слици 5.13 спрега је приказана да делује преко материјала који подупире (ослања) на горњу површину што се може моделовати сл 5.13 б), као еластична опруга крутости  $K$  и масе  $M$ . То је најпростији тип механичке спреге и исти је као у SFA и AFM типовима експеримената, приказаних на сл 5.14.

Многи компликованији системи се могу редуковати на систем са опругом и пригушницом, као што је описао Luengo (1997).

У наставку ће се приказати **четири** различита модела stick-slip трења. Она ће бити приказани на сликама сл 5.15-5.18, где је механичка спрега претпостављена као (једноставна) еластична опруга, као што је приказано на слици 5.13 и 5.14. Два прва механизма (сл. 5.15 и 5.16) могу се сматрати као „традиционални“ или „класични“ механизми или модели (Rabinowicz, 1965); док је трећи сл. (5.18) есенцијално исти као модел фазне транзиције, из очвршћавајућег ка топљећем стању.

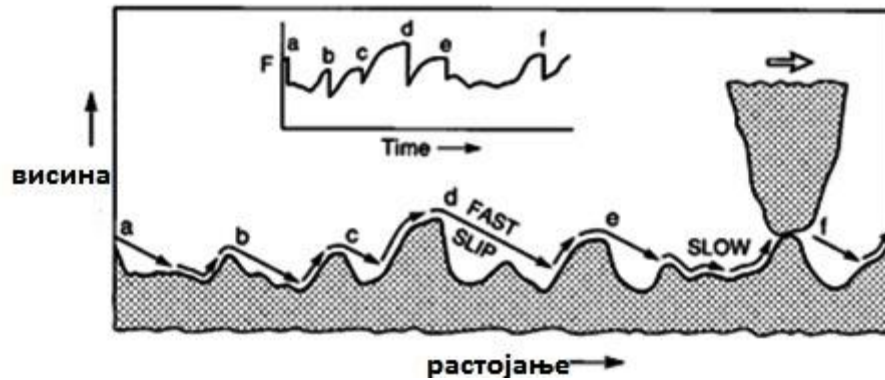


Слика 6.8 Приказ површине раздвојене танким течним филмом [84].

Приказ две хрпаве површине раздвојене танким течним филмом. Геометрија прихваћена код већине pin-on-disk, SFA и AFM експеримената. (Borman A. и Israelachvili, 1999) [84].

### 5.2.8 Модел грубе површине

Нагло клизање (slip) се појављује када год неравнина једне од површина иде преко врхова неравнина друге површине. Као што је на сл. 5.15 приказано, обим „slipa“ ће зависити од висине неравнина и нагиба, од брзине клизања и еластичне компатибилности површина током процеса клизања. Можемо приметити да поред константне брзине кретања ( $v$ ) резултујућа брзина ( $v_0$ ) ће приказати велико клизање (slip). Овај тип stick-slipa је био описан од стране Рабиновича (1965). На атомском нивоу овај тип „stick-slipa“ се може јавити, што је понекад мерено AFM методом (Mc Clelland, 1989, 1990).

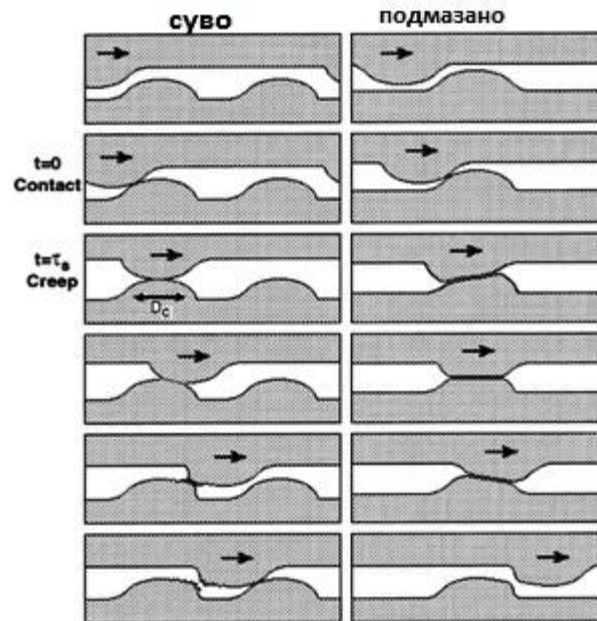


Слика. 5.15 Понашање клизања у зависности од неравнина површине [84].

Слике 5.15 до 5.18 приказују три различита модела трења и stick-slip силе трења наспрам временске осе у коме је посматрано. На горњој слици је Рабиновичев модел за грубе површине које резултују у нерегуларном „stick-slip“ -у када еластична крутост система (која се огледа у нагибу slip линија) није превише висока.

### 5.2.9 Модел завистан од положаја

Још један модел stick-slipa, опажен код клизања између чврстих тела је такав да посматра карактеристично растојање (дистанцу), као и карактеристично време  $\tau_s$  које је време неопходно да две неравнине повећају јачину међусобне адхезије по доласку у непосредни контакт. Оригинално предложено од Рабиновича (1965, 1958), модел сугерише да две грубе макроскопске површине се чврсто држе преко макроскопских неравнина карактеристичне дужине  $D_c$ . Током смицања, свака површина мора пузати по дужини  $D_c$ -по дужини остварених веза-после које површина наставља да клизи али са мањом кинетичком силом трења него са стварном (статичком) вредности. Разлог пада у сили трења, посматрано у просеку, је да се нове везе међу неравнинама требају брже да успостављају него што се старе разграђују, и временски зависна адхезија и трење новостворених ће услед тога бити мања него код старих веза. То се види као илустрација на сл 5.16.



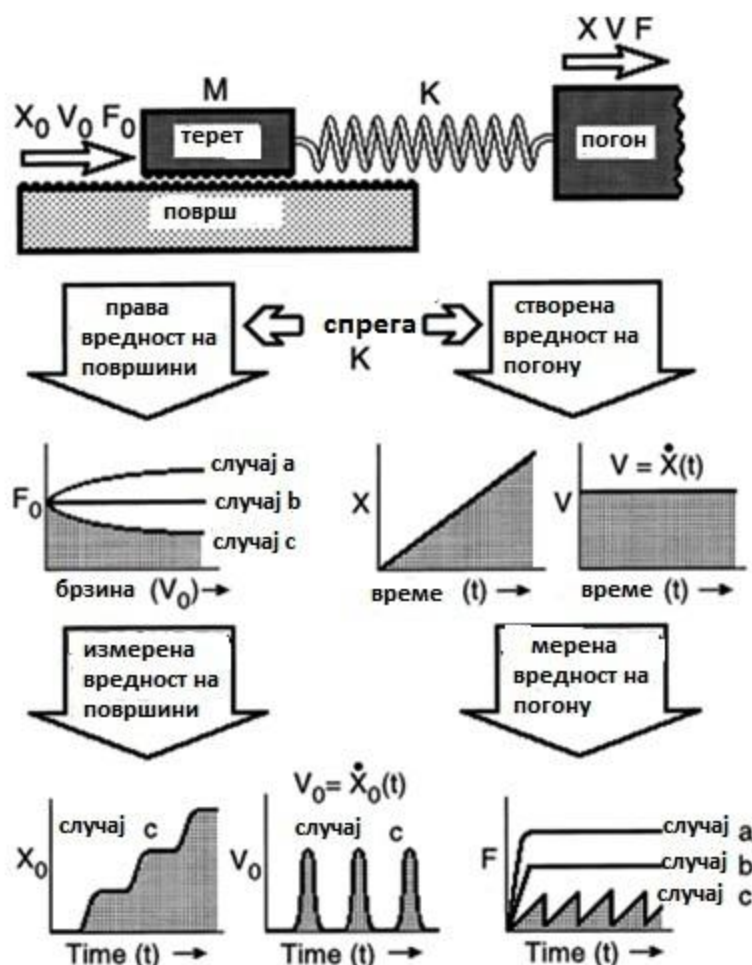
Слика 5.16 Модел трења завистан од положаја ( такође познат и као пузајући модел) [84].

Карактеристична раздаљина  $D_c$ , је потребна да се покрене, и раскине адхезивне везе. Модел има такође карактеристично  $\tau_s$ , као време неопходно за адхезију и силу трења створену по јединици споја како би се уједначио сваки новостворени контакт. (Verma и Israelachvili, 1999)

Сила трења остаје висока током процеса - фазе пузања у току *slip*, али када се површине помере за карактеристичну дужину  $D_c$ , долази до наглог пада трења ка вредности кинетичког трења. Сваки систем у ком кинетичка сила трења је мања од статичке силе трења (или онај који има негативан нагиб на крвој трења на делу криве  $F_0 - v_0$ ) ће произвести или приказати регуларан *stick-slip* режим кретања за одређене вредности од крутости -  $K$ , масе -  $m$  и брзине кретања  $v$ .

Овакав тип трења је опажен у многим случајевима сувог контакта (без мазива) као што су папир по папиру (Baumberger 1994, Heslot 1994) и челик на челику (Rabinowicz, 1958, Sampson, 1943, Neumann, 1954). Овај модел је широко кориштен у геолошким системима за анализу кретања клизања стене по стени (Dietrich, 1978, 1979).

Као оригинално развијен и описан за прилепљене макроскопске везе неравнина, овај модел се може применити и на молекуларно глатке површине. Нпр, мазиве филмове од полимера, карактеристична дужина  $D_c$  би у том случају била уплитање дужина међусобних ланаца, који могу бити веће у ограниченој геометрији пре него у сировом стању.



Слика 5.17 Приказ модела кретања и могућих фаза [84].

Доњи део слике 5.17 приказује етапе или површинско померање  $X_0$ , површинску брзину  $v_0 (=dX_0/dt$  или  $\dot{X}_0$ ) и измерену силу трења  $F$ , као функцију у времену за површине чији је прави коефицијент трења  $F_0$ . У опште,  $F_0$  је функција од  $X_0, v_0$  и  $t$ . Три специфична примера су приказана који кореспондирају са  $F_0$ , као случај;

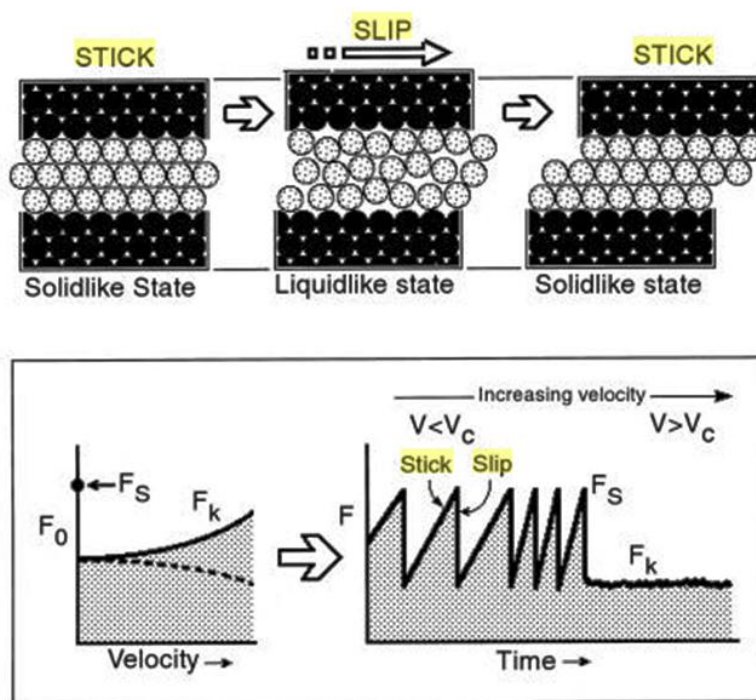
- Где генерисана сила трења  $F_0$  расте монотонно,
- (случај b)  $F_0$  остаје константан
- (случај c) или  $F_0$  опада монотонно са  $v_0$ . Само када  $F_0(v_0)$  има негативни нагиб као резултујуће кретање се јавља stick-slip, карактерисано са врло различитим кретањем и силама трења детектованим на површини (током етапе) и на самом сензору (погона).

**5.2.10 Модел stick-slip трења зависан од брзине**

Ово је један од највише проучаваних механизма stick-slip-а, док није утврђено да је овај модел један од главних узрока stick-slip-а. Уколико сила трења опада са порастом брзине клизања, као што се јавља код граничних филмова испољавајући смањење слоја (истањивање) услед смицања истих, сила  $F_s$  потребна да иницира кретање ће бити већа од силе  $F_k$  потребне да одржи кретање. Таква ситуација је описана на сл 5.17 (случај с) где стварна сила трења  $F_0$  опада са брзином клизања  $v_0$  резултујући да се површина у клизању или етапе у току кретања кретања јављају у периодичном ритму, током сваког циклуса, те је нагло убрзање праћено са наглим успорењем (криве на слици 5.17 за  $X_0$  и  $v_0$ ). Докле год се погон креће одређеном брзином  $v$ , површине ће се кретати у периодичним етапама испрекидано, са наглим заустављањем и кретањем, чија фреквенција и амплитуда зависе не само од функције  $F_0(v_0)$ , него и од крутости  $K$  и масе  $M$  у току етапе кретања и при почетним условима за  $t=0$ .

Овај вид кретања, много прецизније се може представити следећом диференцијалном једначином:

$$M\ddot{X}_0 = (F_0 - F) = F_0 - (X_0 - X)K \tag{5.1}$$



Слика 5.18., Фазна промена“ модела stick-slip-а [84].

Сл.5.18 „ Фазна промена“ модела stick-slip-а, у примеру где танки течни филм наизменично прелази из чврстог (очврснутог) у растопљено стање током смицања, приказано на 22 сферна молекула ограничена између две чврсте кристалне површине. Овај модел се разликује од модела приказаног на сл 5.17 у коме се стварна сила трења  $F_0$  мења

нагло (током транзиције) пре него ли глатко или континуално. Резултујући stick-slip је такође другачији; на пример врхови(максимума) су оштрији и stick-slip нестаје изнад неке критичне брзине  $v_c$ . Треба напоменути да док је slip овде померен са само две решетке размака у многим практичним ситуацијама он је много већи.

Или једначина 5.1 приказана другачије,

$$M\ddot{X}_0 + (X_0 - X)K - F_0 = 0 \quad (5.2)$$

Где је  $F_0 = F_0(X_0, v_0, t)$  је „стварна“ или права сила трења на смицајућој површини која је опште функција од  $X_0$ ,  $v_0 = \dot{X}_0$  и  $t$ ,  $F$  је сила на опрузи (спољно примењеној или мереној сили) и  $F_s = (F_0 - F)$  је сила етапе (фазе). За потпуно решавање једначине 5.1, потребно је познавати иницијалне (почетне) услове при  $t=0$  и динамичку равнотежу (стационарно стање) при коначном  $t$ .

За пример у присутним експериментима, почетни услови су

$$X=0 \text{ за } t=0$$

$$X=vt \text{ за } t > 0, \text{ где је } v=\text{const}$$

У другим системима, одговарајући услови могу бити при  $F=\text{const}$

Различити облици за  $F_0 = F_0(X_0, v_0, t)$  су предложени, углавном феноменолошки, да објасне различите типове stick-slip феномена. Ти модели уопштено претпостављају партикуларну функционалну форму за трење као функцију брзине искључиво,  $F_0 = F_0(v_0)$ , и могу укључивати и друге механичке елементе у моделу (Tomlinson, 1929; Carlson и Langer, 1989). Компликованији модели укључују спектар  $F-v$ , као што је предложио Persson (1994) где ти модели не могу да препознају различите типове ових појава.

Експериментални подаци су искоришћени за израчунавање силе трења као функцију брзине током једног циклуса stick-slip-a (Nasuno и др., 1997). За макроскопски грануларни материјал који се налази између чврстих површина, подаци показују брзину и слабљење силе трења током прве половине slip-a. Такође подаци приказују хистерезисну петљу на графику трење-брзина са различитим понашањем током успорења на половини slip фазе. Слични резултати су примећени за 1-2 nm дебљине течног мазивога филма међу листастим површинама (Bergman, Carlson, Duker). Сви ови резултати указују да је веза између брзине и трења недовољна да опише такве системе и да се мора узети у обзир и стање материјала.



### 5.2.11 Фазно транзициони модел

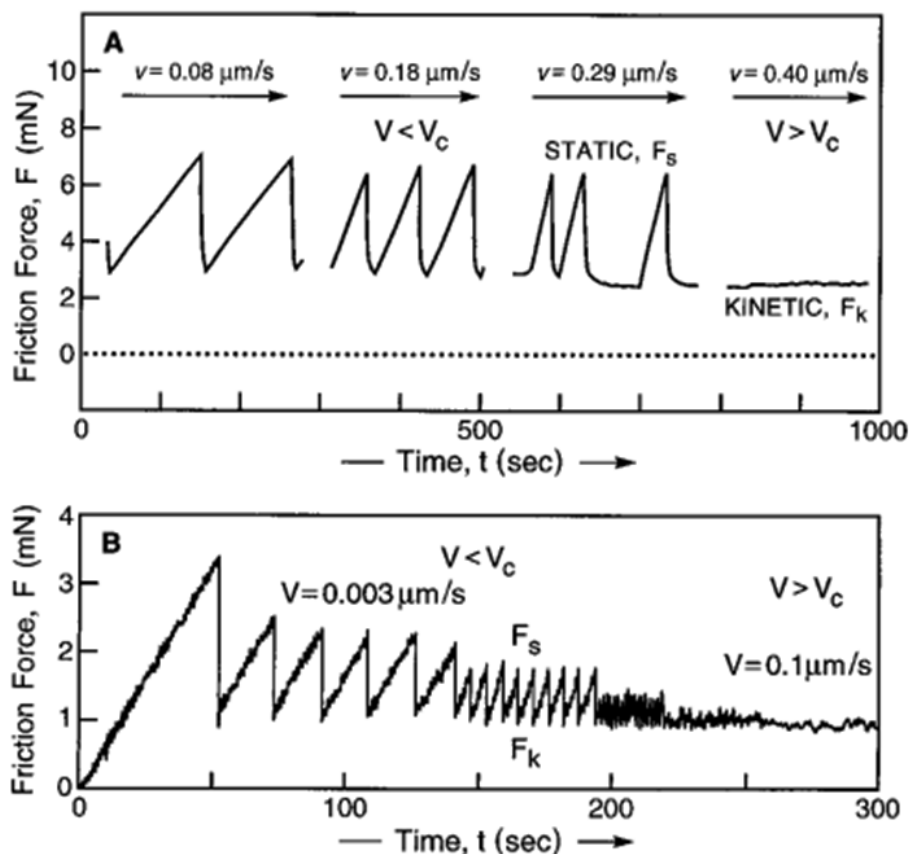
Скорашње молекуларно динамичке компјутерске симулације су откриле да танки међу површински филм пролази почетни фазни прелаз између чврстог (solid like) и течног (liquid like) стања током клизања (Thompson и Robbins 1990, 1991) и да је одговоран за опажено stick-slip понашање једноставних изотропских течности<sup>2</sup> између две чврсте кристалне површине. Са таквом интерпретацијом, примећено је да stick-slip настаје са наглом променом у својствима течног филма током прелазног, транзиционог периода, пре него постепене или континуалне промене, као што је напоменуто у претходном примеру (Israelachvili, 1990, Thompson, 1992). Овакве симулације су, за многе обсервиране особине течности, подврднуте смицању слојева у ултратанким филмовима између молекуларно глатких површина и до сада су понудиле најприхватљивије објашњење за експерименталне податке добијене трењем „stick-slip“-ом.

Нове интерпретације феномена да коефицијент трења опада са повећањем брзине клизања обрађене су и компјутерском симулацијом Thompsona и Robbin-a (1990). Закључили су да није трење које се мења са брзином клизања  $v$ , него је пре време које делови система проведу у stick (лепљењу) и клизајућем моду. Другим речима, током тренутка клизања, трење у било ком локалном „региону“ је увек  $F_s$  или  $F_k$ , кореспондирајући са „статичким“ или „кинетичким“ вредностима. Измерена сила трења је дакако збир свих ових дискретних вредности осредњена преко целе контактне површине. Како  $v$  расте, сваки локални регион проведе више времена у режиму клизања  $F_k$  а мање у режиму stick (лепљења)  $F_s$ , те укупни коефицијент трења пада. Може се приметити, да дата интерпретација **прекреће начин на који традиционални приступ stick-slipu је објашњаван те да је ово много фундаменталнији приступ појашњењу „stick-slip“ феномена којим се изводи стварни пад силе трења са порастом брзине клизања**. Овај приступ је био аналитички проучаван од стране Carlsonsa и Batiste (1996).

**Горње класификације феномена stick-slip-a немају ексклузивност и молекуларни механизми реалних система могу приказати аспекте од више модела симултано.**

---

<sup>2</sup> изотропске течности немају никакав смер док кристали имају јасно дефинисане векторе смера који описују карактеристике структуре решетке



Слика 5.19 Репродукција снимљеног трага силе трења при повећању брзине клизања  $v$

[Berman A, Israelachvili, 1999 ], [84].

Тачна репродукција снимљеног трага силе трења при повећању брзине клизања  $v$  добијена у функцији времена за; (А) течни угљоводоник и (В) гранични мономолекуларни слој (monolayer).

Уопштено, са повећањем брзине клизања, stick-slip врхови (пикови) расту у фреквенцији а опадају са амплитудом. Како се критична брзина клизања  $v_c$  приближава, врхови постају све „умеренији“ са могућим нестајањем при  $v = v_c$ . Са већим брзинама клизања, клизање почиње да се наставља и одвија глатко у режиму кинетичког кретања. Посматрани запис је карактеристичан за једноставна течна мазива и суве граничне подмазујуће системе и могу се описати као „конвенционални“ тип статичко-кинетичког трења. На слици 5.19 је снимак течног филма хексадекана ( $C_{16}H_{34}$ ) између две површине нетретираног лискуна (mica). (В) Блиско збијени површински мономолекуларни слој на лискуну (суво гранично подмазивање) приказујући понашање квалитативно слично са горе приказаним хексадеканом. (Berman A и Israelachvili, 1999).

## 6. МАЗИВО

### 6.1 Аналитика мазива

Особине мазива су одређене особинама базних уља и адитива. Све особине мазива се могу поделити на: физичке, хемијске и експлоатационе.

**Физичке особине:** густина, вискозност, индекс вискозности, тачка паљења, тачка течења, испарљивост, емулзивне особине, способност растварања гасова и издвајања гасова, стварање пене, конзистенција и пенетрација масти, тачка капања, издвајање уља из масти, боја, специфична топлота и топлотна проводљивост и друге.

**Хемијске особине:** оксидациона стабилност, термичка стабилност, водоотпорне особине, неутрализациони број, садржај пепела, садржај кокса, садржај воде, сапонификациони број и друге.

**Експлоатационе особине:** ЕП(EP) својства и отпорност на хабање (тест са четири кугле), отпорност мазивога филма (Тимкен тест), антихабајућа својства мазива код зупчаника (FZG тест или RYDER test), антихабајућа својства хидрауличних уља (Викерс тест) итд.

**Густина** је однос масе и запремине уља:  $d = m / V$ . Одређује се на температури од 15<sup>0</sup>С и изражава се у (kg/m<sup>3</sup>) или (g/cm<sup>3</sup>). Густина се незнатно мења са порастом притиска, али се знатно мења са променом температуре, јер се променом температуре мења запремина течности. Методе одређивања густине су: ISO 3675, ASTM D1298 и IP 160.

**Вискозност** је важна карактеристика течности, а дефинише се као мера унутрашњег трења које делује као отпор на промену положаја молекула при струјању течности када се оно налази под дејством силе смицања, односно то је отпор течности на смицање њених честица. При кретању течности, међу честицама и између честице и површине цеви с којом долазе у додир, настају силе трења узроковане отпором течности према смицању честица, али и због храпавости тих површина. Вискозност је променљива величина и зависи од промене температуре. Што је температура виша, вискозност је мања и обрнуто. Од вискозности зависи квалитет подмазивања, енергетски губици током протицања, рад уљне пумпе, довођење довољне количине уља до свих места која се подмазују, успешност рада пречистача уља, чишћење површина, херметизација места трења итд. У пракси се користе динамичка ( $\eta$ ) и кинематичка ( $\nu$ ) вискозност. Јединице за динамичку вискозност су: Pa.s (Паскал секунда) и mPa.s (мили Паскал секунда). Раније коришћене јединице су: P (Poaz) и cP (centi Poaz). Методе за одређивање динамичке вискозности су: ASTM D2602, DIN 51377.

У пракси се више користи кинематичка вискозност која представља однос динамичке вискозности и густине флуида на одређеној температури и притиску:  $\nu = \eta/d$ . Јединица за кинематичку вискозност је:  $\text{mm}^2/\text{s}$ . Методе одређивања кинематичке вискозности су: ASTM D445, DIN 51562, IP 166, ISO 3104.

**Индекс вискозности** је емпиријска вредност која указује на промену вискозности са променом температуре. Више вредности индекса вискозности указују на мање изражену склоност промени вискозности са променом температуре и обрнуто. Веће вредности индекса вискозности од 100 имају само мултиградна уља. Индекс вискозности израчунава се следећим методама: ISO 2909, ASTM D2270 и DIN 51564.

**Тачка паљења** је најнижа температура до које треба загрејати неко уље у условима при којима ће се ослобођене паре тренутно запалити принетим отвореним пламеном, без трајног горења. Изражава се у  $^{\circ}\text{C}$  и сматра се мерилем испарљивости а значајна је за транспорт и складиштење због опасности од пожара. Основне методе одређивања тачке паљења су: ISO 2592, ASTM D92, IP 36 и DIN 51376.

**Тачка течења** представља најнижу температуру на којој неко мазиво уље, приликом хлађења, још показује тенденцију течења. Непосредно испод ове температуре уље се потпуно стињава. Тачка течења се изражава у  $^{\circ}\text{C}$ , а одређује се методама: ISO 3016, ASTM D97, DIN 51597.

**Испарљивост** подразумева количину уља која испари у одређеном времену на прописаној температури (Noack тест: 1сат на  $250^{\circ}\text{C}$ ). Представља важну карактеристику моторних уља, јер се код уља која имају велику испарљивост јављају разни проблеми у току експлоатације, као на пример: повећана потрошња, угушћивање, а с тим и погоршано подмазивање. Осим тога са повећањем испарљивости расте опасност од пожара. Губитак уља испаравањем на температури од  $40^{\circ}\text{C}$  код већине уља износи око 5%, а смањење испаравања минералног уља се може постићи додавањем синтетичке основе, посебно поли-алфа-олефина. Испарљивост се одређује методом DIN 51581 (Noack тест) или ASTM D943.

**Под емулзивним особинама** подразумева се склоност неког уља да у присуству воде гради стабилну емулзију. Код већине мазивих уља (моторна, индустријска) захтевају се неемулзивне особине, док су код неких (уља за хлађење и подмазивање при машинској обради, тешко запаљива емулзивна хидраулична уља) пожељне добре емулзивне особине. **Емулзивност** уља одређује се методама ASTM D1401 и DIN 51599, а мери се временом потребним за потпуно раздвајање уља и воде. Под појмом **деемулзивност** подразумева се способност уља да ослобађа воду и да не гради емулзију. Изражава се бројем секунди потребних за потпуно раздвајање воде и уља, а одређује се методама: DIN 51589 и IP 19.

**Стварање пене – склоност пенушању.** Под пенушањем се подразумева склоност уља да раствара ваздух и да са њим гради пену. Пена врло неповољно утиче на квалитет подмазивања и има за последицу поремећаје у раду техничких система, повећано хабање, убрзану оксидацију, старење уља итд. Изражава се у запреминским јединицама и стабилношћу пене на различитим температурама, а одређује се методом: ASTM D892.

**Ослобађање ваздуха из уља – деаерација уља.** Под деаерацијом се подразумева способност уља за издвајањем раствореног ваздуха. Важна је особина моторних, хидрауличних, компресорских, турбинских и других мазивих уља. Одређује се методом DIN 51381, а изражава се временом потребним за свођење раствореног ваздуха на 0,2% запреминских.

**Оксидациона стабилност** се дефинише као мерило отпорности мазивих уља на дејство кисеоника. Представља једну од најважнијих особина одговорну за дужину радног века уља, али и за корозивност делова механичких система коју изазивају оксидациони продукти. Парафини оксидацијом прелазе у киселине и поликондензационе смоласте производе. У почетку ти производи су меки и делимично се растварају у уљу, повећавајући му вискозност. У даљој фази употребе ти талози прелазе у чврсто стање, што има за последицу веће штете на склоповима механичких система. Основне методе за одређивање оксидационе стабилности су: ASTM D943, IP 157, DIN 51587 и DIN 51554.

**Термичка стабилност** дефинише се као отпорност уља против разлагања услед дејства топлоте. Изражава се температуром на којој почиње разлагање. Термооксидативно разлагање је веома важно у пракси, јер је познато да се оксидација уља удвостручава са порастом температуре за сваких десет степени изнад прописане. Основне методе за одређивање термичке стабилности су: ASTM D2960 и IP 311.

**Неутрализациони број** дефинише се као мера укупне киселости (садржаја јаких и слабих киселина) мазива. За одређивање неутрализационог броја користе се методе: ASTM D664, IP 177 или ASTM D974, IP139. Изражава се у mgKOH/g узорка уља.

**Киселински број** дефинише се као киселост мазивих уља која потиче само од јаких киселина. Одређује се истим методама као неутрализациони број и изражава се такође у mgKOH/g узорка уља. Разлика између неутрализационог и киселинског броја је у томе што се титрација не завршава при истој вредности рН, па је киселински број за исти узорак уља обично мањи од неутрализационог броја.

**Укупан базни број (TBN)** се дефинише као мера алкалности која потиче од свих материја у мазиву које показују базну реакцију. Изражава се у mgKOH/g узорка уља. То је еквивалент за количину киселине потребне да се неутрализују све базне материје у једном граму узорка мазива. Основне методе за одређивање TBN су: ASTM D 2896 и ASTM D 664.

**Анилинска тачка.** Одређивање анилинске тачке врши се према ISO 2977 (ASTM D611) методи. Представља температуру на којој долази до потпуног мешања анилина и уља. Нижа анилинска тачка показује да уље садржи већу количину аромата. Анилинска тачка је значајна код одређивања особине растворљивости уља.

**Садржај пепела** дефинише се као мерило садржаја једињења метала и других неорганских компонената у мазиву. Пепео у мазивим уљима потиче од несагорелих састојака и може се одређивати у виду оксида – оксидни пепео и виду сулфата – сулфатни пепео. Код уља без адитива пепео се одређује у облику оксида и представља мерило садржаја неорганских нечистоћа. Код уља са адитивима, пепео се одређује у облику сулфата методама: ISO 3987 или ASTM D874. Садржај пепела често је добар показатељ у

којој су мери у неком коришћеном уљу присутни различити метали који потичу од хабања металних површина. На тај начин може се открити место повећаног хабања и превентивно деловати на отказ. Ако моторно уље садржи више од 1,5% пепела из адитива, због могућности прераног паљења горива усијаним пепелом, не препоручују се за бензинске моторе.

**Садржај кокса** користи се за оцену понашања уља у термички оптерећеним механичким системима, а посебно за оцену старости уља у току употребе. Коксни остатак указује и на дубину рафинације, односно квалитет базних уља. Одређује се методом DIN 51551, а изражава у масеним процентима.

**Хидролитичка стабилност** је мерило отпорности уља, односно неких адитива, да ступају у реакцију са водом. Хидролитички нестабилни адитиви се разлажу на компоненте које могу стварати талог, а могу бити и корозивне. При томе се смањује њихов садржај у уљу што има за последицу његову брзу деградацију.

**Садржај воде.** Вода је непожељна у уљу. Њен садржај се мора редовно контролисати јер увек постоји могућност да се у уљу нађе као контаминант, који може врло брзо да хидролитички разгради неке адитиве и да деградира уље пре употребе. Уколико је садржај воде виши од 0,1%, одређивање се врши ксилолном методом, у супротном, мора се користити Karl-Fischer метода (DIN 51 777), а резултати се изражавају у mg/kg, односно ppm (part per million – један део воде на милион делова уља).

**Корозивност** уља подразумева агресивно понашање неких његових компонената према елементима механичких система. Корозивност се мора контролисати ради доношења одлуке о правовременој замени уља. Одређује се методом: ASTM D130 (Cu, 3h, 100°C).

**Сапонификациони број** се сматра мером садржаја материја подложних сапонификацији, као што су на пример природне масти. Изражава се у милиграмима калијумхидроксида потребним за потпуну сапонификацију свих слободних и везаних масних киселина у узорку од једног грама уља (mg KOH/g). Уља која садрже масне киселине ниже молекулске масе имају виши сапонификациони број и обратно. Одређује се методом ASTM D94.

**Јодни број** (g J/100g) даје количину јода у грамима који се веже на 100 g уља. Јод се веже на двоструке везе масних киселина, па се из њега добија увид у степен њихове незасићености. Одређивање јодног броја има значајну улогу за праћење процеса хидрогенације, као и за праћење термооксидационих промена уља када међу осталим продуктима настају и полимери, повезивањем масних киселина или триглицерида преко двоструких веза, што доводи до снижења јодног броја.

**Гранична температура пумпања.** Под овим се подразумевају граничне вредности проуљености мотора (понашање у односу на хабање) након хладног старта. На тој температури, до уљне пумпе још увек дотиче довољно уља, а испод те вредности систем за подмазивање се више не напаја уљем у довољној мери и може доћи до усисавања ваздуха.

**Градијент смицања.** На местима подмазивања уље је, у зависности од броја обртаја и дебљине мазивог слоја, изложено различитим смицајним оптерећењима. Уље које прионе за делове који се не крећу има брзину 0, а на покретним деловима има брзину кретања самог тог дела. Градијент смицања је брзина на покретном делу подељена са дебљином мазивог слоја. Код празног хода износи  $10^5 \text{ s}^{-1}$ , а при пуном оптерећењу  $10^6 \text{ s}^{-1}$ .

**Смична стабилност** је дефинисана као отпорност полимера адитива импрувера индекса вискозности на механичку разградњу под дејством смичућег напрезања и зависи од молекулне масе и хемијској природи полимерног адитива. Што је молекулна маса полимера већа, већа је и вероватноћа да дође до његовог кидања. Када су у примени полимери изложени утицају високог смичућег напрезања, долази до разарања молекула. То је цепање везе угљеник-угљеник на два полимерна радикала. За одређивање смичуће стабилности користе се методе: DIN 51382; ASTM D6278; СЕС L-14-A-93.[72,68]

### **6.1.1 Конституенти мазива**

Појам МАЗИВА подразумева гасовите, течне и чврсте материјале који се користе за смањење трења између спрегнутих радних површина које се налазе у релативном кретању. Осим тога користе се и за пренос снаге, пренос топлоте, хлађење, заштиту од корозије итд. Најширу примену у пракси имају мазива уља и мазиве масти

#### **Мазива уља**

Садрже две основне групе компонената: базна уља и адитиве различитих функција. Мешањем базних уља одређених вискозних градација и различитих група адитива, добија се широка палета мазивих уља која се међусобно могу разликовати по намени, реолошким, триболошким и другим радним особинама. У зависности од врсте базних уља, финална мазива уља се на тржишту препознају као минерална, хидрокрекована, синтетичка или биљна мазива уља. За производњу различитих врста мазивих уља користе се базна уља различитих хемијских и физичких особина и различитих вискозних градација.

Адитиви често немају особине мазива, али они базним уљима побољшавају постојеће добре особине а умањују лоше особине. Осим тога адитиви обезбеђују и нове добре особине које су неопходне, а које базно уље не може да задовољи

#### **Мазиве масти**

Могу се дефинисати као чврста или получврста мазива, настала дисперговањем одговарајућег угушћивача у мазивом уљу. Својства мазивих масти зависе углавном од врсте угушћивача који могу бити сапунског и несапунског порекла. Производе се намешавањем базних уља, адитива и угушћивача према одговарајућој формулацији.

Минерална, синтетичка или биљна базна уља чине основу свих мазива и битно утичу на њихове основне особине. Минерална уља се производе прерадом нафте, синтетичка хемијском синтезом из различитих компонената а биљна базна уља из биљака.

### 6.1.2 Адитиви и њихова улога

Адитиви су материје које се додају мазивима у циљу побољшања или доношења неких нових особина мазивима, чиме се повећавају експлоатационо-техничка својства уља. То су синтетичке материје које су растворљиве у базном уљу, термички стабилне и врло ниске испарљивости.

С обзиром на механизам деловања могу се поделити у три основне групе:

- адитиви који побољшавају физичка својства мазива: побољшивачи тачке течења, побољшивачи индекса вискозности, адитиви против пенушања и адитиви за побољшање отпорности на оптерећење,
- адитиви који побољшавају хемијска својства мазива: антиоксиданти,
- адитиви који штите машинске елементе од штетних материја насталих у уљу: адитиви против корозије, дисперзанти и детерџенти

**Побољшивачи тачке течења – Депресанти.** Да би се омогућио рад на нижим температурама, мазивим уљима се додају материје које снижавају тачку течења. Механизам деловања ових адитива се заснива на обмотавању микроскопски ситне кристале парафина при чему се онемогућава њихово груписање и таложење, тако да уље остаје дуже течљиво. Немају способност спречавања кристализације (стварања кристала) и не утичу на тачку замућења уља.

**Побољшивачи индекса вискозности – Импрувери.** Једна од најважнијих карактеристика неког мазива је стабилност вискозности са променом температуре, односно вискозно-температурна својства. На ниским температурама ови адитиви готово не дејствују, а на високим температурама је пад вискозности мањи услед њиховог угушћивачког деловања. Импрувери индекса вискозности су адитиви за побољшање индекса вискозности уља и користе се за производњу мултиградних уља. Најпознатији полимерни додаци за побољшиваче индекса вискозности су:

- Полиметакрилати (РМА) – полимери на основу дуголанчаних естера метакрилне киселине настали слободно-радикалском полимеризацијом одговарајућих мономера.
- Олефински кополимери (ОСР) – кополимери етилена и пропилена.
- Хидрогеновани стирен-диенски кополимери – разликују се стирен-бутадиенски (SBC) и стирен-изопренски (SIP) кополимери

Најбоље резултате, код нових генерација моторних уља, дају ОСР импрувери.

**Адитиви против пенушања – Антипенушавци.** Стварање пене настаје продирањем мехурова ваздуха у уље или услед деловања детерџентних и антиоксидационих адитива. Пена је врло непожељна нарочито у хидрауличним и редукторским уљима, погоршава подмазивање и узрокује губитак преноса снаге у хидрауличним системима. Антипенушавци спречавају образовање стабилне пене у уљу. Делују тако да смањују



површински напон мехурића ваздуха (мехурићи пуцају) и тако доприносе брзој разградњи пене.

Као **адитиви за побољшање мазивих својстава** користе се природни естри масних киселина (репичино уље, рицинусово уље), синтетички производи (естри) као и аминске соли масних киселина. Побољшавају мазивост, што значи способност и брзу орјентацију молекула уља према металној површини (поларност) као и ефикасност њихове адсорпције на површини. Међу поларне адитиве спадају и “модификатори трења”. Као “модификатори трења” користе се амиди, хлороване масне киселине, биљна уља као и адитиви на бази молибдендисулфида. Код моторних уља смањују трење при чему се смањује потрошња горива. Посебна пажња се посвећује избору овог типа адитива код средстава за обраду метала.

Од **адитива за смањење хабања (AW адитиви)** највећу примену имају адитиви чија је метална компонента цинк. Адитиви на бази цинка имају највећу ефикасност на вишим температурама (преко 150<sup>0</sup>C) при чему знатно смањују коефицијент трења, а тиме и интензитет хабања. У новије време ограничава се употреба адитива који садрже цинк. Ограничена употреба адитива који садрже цинк је посебно изражена код уља за подмазивање мотора савремених аутомобила који имају уграђен катализатор догоревања.

**Адитиви за заштиту од екстремно високих притисака и ударних оптерећења (EP адитиви)** користе се заштиту од високих локалних притисака и ударних оптерећења у **условима граничног подмазивања**. У таквим околностима EP адитиви формирају анорганска једињења са металним површинама, који преузимају на себе улогу чврстог мазива. Интензитет активности атома сумпора, фосфора и хлора, који представљају основу EP адитива, зависи од температуре и притиска на месту контакта.

**Адитиви за заштиту од оксидације.** Антиоксиданти су адитиви који повећавају постојаност уља према дејству кисеоника и представљају најчешће коришћене адитиве. Као продукти оксидације настају слободне и везане киселине, алдехиди, кетони и друга једињења кисеоника, а касније настају (услед реакција оксидације и полимеризације) смоласта и асфалтенска једињења која постају нерастворна и издвајају се као талог. Како су продукти оксидације корозивни, инхибирањем оксидације аутоматски се инхибира и корозија. Ови адитиви врше пасивизацију металне површине и на тај начин смањују каталитичко деловање метала на процес оксидације.

**Адитиви за заштиту од корозије.** Инхибитори корозије (антикорозивни адитиви) штите металне делове машинских елемената који су изложени дејству рђе и корозије. Корозија је електрохемијски процес и настаје агресивним деловањем киселих хемијских продуката, а рђа је вид корозије када ваздух или вода делују агресивно на металну површину. Основни механизам деловања антикорозивних адитива заснива се на формирању заштитног слоја на површини метала физичком и хемијском адсорпцијом.

**Детерцентни адитиви.** То су материје које спречавају талочење нечистоћа на деловима мотора који се налазе под утицајем високих температура. Механизам деловања ових адитива заснива се на њиховој способности да: чисте металне површине од производа оксидације и не допуштају да се накупљају и талоче по површинама и

захваљујући свом алкалном својству могу да неутралишу хемијски агресивне киселе продукте настале сагоревањем горива са повећаним садржајем сумпора. Параметар за ово је Тотални Базни Број (ТВН). Као детерџенти највише се користе сулфонати, фенати и силицилати, од којих фенати и силицилати дају боље резултате. У одређеним случајевима ови адитиви истовремено показују нека својства инхибиције корозије и рђања, па се сврставају у групу вишефункционалних адитива.

**Дисперзантни адитиви.** Имају улогу да држе у дисперзији продукте настале оксидацијом уља (смоле, чађ) у условима ниских и средњих радних температура. Ови продукти настају у моторима у условима “стани-крени” градске вожње на кратким релацијама и у условима подхлађеног мотора. Дисперзанти су безпепелна једињења а механизам деловања састоји се у опкољавању молекула нечистоћа у уљу, одржавају их у дисперзном стању, односно спречавају груписање честица, њихово таложење и зачепљење циркулационих путева.

**Деактиватори метала.** Ови адитиви редукују каталитички утицај метала (металних опиљака) на оксидацију уља. Честице се облажу заштитним слојем који прекида или умањује каталитичко деловање на процес оксидације.

**Адитиви емулгатори.** То су најважнији додаци емулзионим уљима која са водом граде емулзије. Због великих површинских напона у граничним слојевима уље и вода се не мешају. Задатак емулгатора је да смање површински напон и обезбеде стварање стабилне емулзије.

**Адитиви деемулгатори.** Функција деемулгатора је да спречи стварање емулзије у случају продора воде у систем. Механизам деловања се своди на повећање површинског напона између молекула уља и воде и спречавања процеса стварања емулзије.

На почетку увођења еколошки прихватљивих мазива покушало се са коришћењем адитива као за минерална уља, али резултати нису били задовољавајући. Особине мазива се нису довољно побољшале и дошло се до сазнања да је неопходно да се развију потпуно нови адитиви који су нетоксични и не садрже халогене и тешке метале. Данас се додатно захтева биоразградивост самих адитива и ниска угроженост воде (NWH или WGK 1).

### **6.1.3 Угушћивачи за мазиве масти**

Угушћивачи су супстанце које током процеса производње мазиве масти, под одређеним условима стварају у уљу структуре међусобно испреплетаних влакана формирајући сунђерасту структуру и тако претварају уље у мазиву маст. Сапуни на себе вежу од 80-95% базног уља. Угушћивачи могу бити сапунски (калцијумови, натријумови, литијумови, баријумови, алуминијумови итд.), комплексни сапуни и несапунски (гел, бентонит).

**Сапунски угушћивачи** су производ реакције масне киселине и хидроксида алкалних метала. Према врсти угушћивача мазиве масти се називају: литијумове, натријумове, калцијумове, алуминијумове итд. Са циљем добијања мазиве масти одређених карактеристика, могу се помешати два различита сапуна, па се такве масти називају **мешовите**.

**Комплексни сапуни** су сачињени од две комплексно везане соли, од којих је једна обична со више масне киселине, а друга со нискомолекуларне органске киселине. Комплексни сапуни дају мастима особине које се не би могле добити коришћењем једноставних металних сапуна или њиховом комбинацијом.

**Несапунски угушћивачи** дају специјалне карактеристике мастима. Ове масти су термички врло стабилне и углавном немају тачке капања, због чега се најчешће користе за подмазивање на високим температурама или на местима где се захтева отпорност на деловање воде и киселина. Као несапунски угушћивачи користе се: неоргански угушћивачи (високодисперзне модификоване глине, олефилни силицијум диоксид, разни пуниоци и чврста мазива, оксиди метала у облику аморфног праха) и органски угушћивачи (чврсти угљоводоници, чађ, полиуреа, полимери, пигменти). Према врсти несапунског угушћивача мазиве масти се називају: бентонитне, силикагелне, пигментне, полиуреа масти и мазиве пасте [72,68].

**6.1.4 Методе и тестови на мазивима****који се спроводе у лабораторији ФАМ-Крушевац****- Нерадна пенетрација, ASTM D 217**

Овом методом одређује се конзистенција односно тврдоћа мазивих масти. Одређивање се спроводи пенетрометром. У узорак необрађеног узорка свеже мазиве масти који је предходно темперан при 25°C, ослобађа се стандардни конус који пенетрира у маст под властитом тежином 5 секунди. Дубина се читава у десетинкама милиметра и представља нерадну пенетрацију испитиване мазиве масти .

**- NLGI класификација мазивих масти, ASTM D 217**

Класификација која узима у обзир мекоћу и тврдоћу (конзистенцију) мазивих масти без обзира на све остале карактеристике, састав и својства, је NLGI класификација. Развио је Амерички национални институт за мазиве масти – NLGI. У табели 7.1 дата је NLGI класификација. Она садржи 9 конзистентних градација од 000 до 6, дефинисана је дубином пенетрације (продора стандардног конуса у испитани узорак под прописаним условима на температури од 25°C).

Табела 6.1 NLGI класификација мазивих масти [72]

NLGI број	Пенетрациони број (1/10)mm	Намена
<b>000</b>	447-475	Зупчасти преносници, проточна подмазивања, централни системи
<b>00</b>	400-430	
<b>0</b>	355-385	
<b>1</b>	310-340	Котрљајни и клизни лежаји, осовиница, зглобови, ужад и ланци
<b>2</b>	265-295	
<b>3</b>	220-250	
<b>4</b>	175-205	Клизни лежаји мале брзине
<b>5</b>	130-160	
<b>6</b>	85-115	

### Тачка капања, ASTM D 2265

Тачка капања означава температура код које мазива маст, под утицајем властите тежине и у условима програмираног загревања, прелази из пастозног у течну стању и истиче кроз отвор стандардизоване посуднице. Као тачка капања се узима температура, код које у условима прописаним методом ASTM D 226, прва капљица мазиве масти капне с отвора испитне посуднице.

### Издајање уља, BS2000 part. 121

Оцењује се способност мазивих масти да у својој структури задржи уљну компоненту, јер мазиве масти показују тенденцију издајања уља из мазивих масти током складиштења. У уређај који се састоји од поклопаца за оптерећење од 100 g и две посуднице за одвајање и скупљање међусобно одвојених ситом, стави се мазива маст. Испитивање се изводи на температури од 40°C и у трајању од 168 сати (7 дана). Издвојено уље се измери, а резултат се изражава у масеним уделима издвојеног уља.

### Издајање уља, FTMS 791m.321

Ова метода се користи за одређивање тенденције издајања уља на повишеној температури из мазивих масти. Заснива се на загревању мазиве масти (10 g) на мрежици, (жичани конус), при статичким условима у одређеном времену и температури. Одређује се масени проценат уља, издвојеног из жичаног конуса. Тест захтева по стандарду време од 30 h на температури од 100°C

### Водоотпорна својстава мазивих масти – постојаност према води- DIN51807/1

Испитивање отпорности мазивих масти на испирање водом врши се тако што се узорак нанесе на стаклену плочицу у дебљини од 1 mm и излаже деловању непокретне воде загрејане на температуру од 90°C. Након 15 минута, односно 3 сата врши се визуелна оцена стања нанесеног узорка према следећем:

- степен 0: нема промене на узорку,
- степен 1: боја узорка је промењена и постала је светлија,
- степен 2: уочава се почетак растварања мазиве масти и замућење воде,
- степен 3: делимично је или потпуно растворен узорак

**Тест корозије на бакарној плочици, ASTM D 4048**

Одређује се корозовност на стандардној бакарној плочици у различитим мазивим мастима минералне основе што је добра подлога за оцењивање учинка у погледу корозивности истих уља на лежајеве пумпе и осталу индустријску опрему. Тест траје 3 сата, односно 24 сата и изводи се на температури при 100°C. Бакарна плочица се урони у испитивану мазиву маст и након одређеног времена извади, пажљиво очисти од мазиве масти и упореди с еталоном.

Дефинисана је следећа класификација корозивности према обојењима у еталону:

- 1 - мала обојења или мрље (подподела: a, b)
- 2 - умерена обојења (подподела: a, b, c, d, e)
- 3 – тамна обојења (подподела: a, b)
- 4 – корозија (подподела: a, b, c)

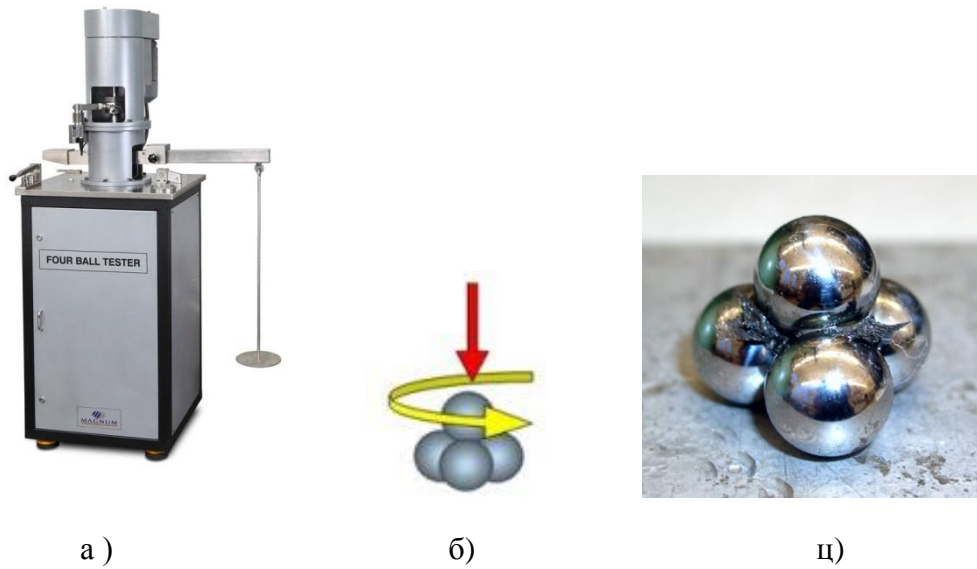
**Одређивање хабања за мазиву маст на уређају са 4 кугле, ASTM D 2266**

На овом уређају одређује се способност подношења оптерећења мазивих масти у клизном контакту. Уређај се састоји од 4 челичне кугле које су уроњене у испитивану мазиву маст. Једна од кугли ротира (1200 min<sup>-1</sup>) под притиском по три фиксирани кугле. Мазива маст је загрејана при 75°C, а тест траје 60 минута. Након тестирања мере се трагови хабања на фиксираним куглама и израчунава се средњи пречник хабања.

**Одређивање EP својста мазивих масти на уређају са 4 кугле – FOUR BOLL test, ASTM D 2596**

На овом уређају одређује се способност ношења оптерећења мазивих масти у условима висог притиска и умерених клизних брзина. Уређај се састоји од 4 челичне кугле које су уроњене у испитивану мазиву маст. Једна од њих ротира под притиском по три фиксирани кугле. Оптерећење се постепено повећава док не дође до заваривања кугли. Оптерећење код којег је дошло до заваривања назива се тачком заваривања. Почетно

зарибавање је област на линији хабања када наступа моментално оштећење или прекид мазивог филма. [слика 6.1, лабораторија ФАМ-а]



Слика 6.1

Изглед апаратуре за тест а), схема оптерећења б) и изглед заварених кугли, ц)

## 6.2. Чврста мазива

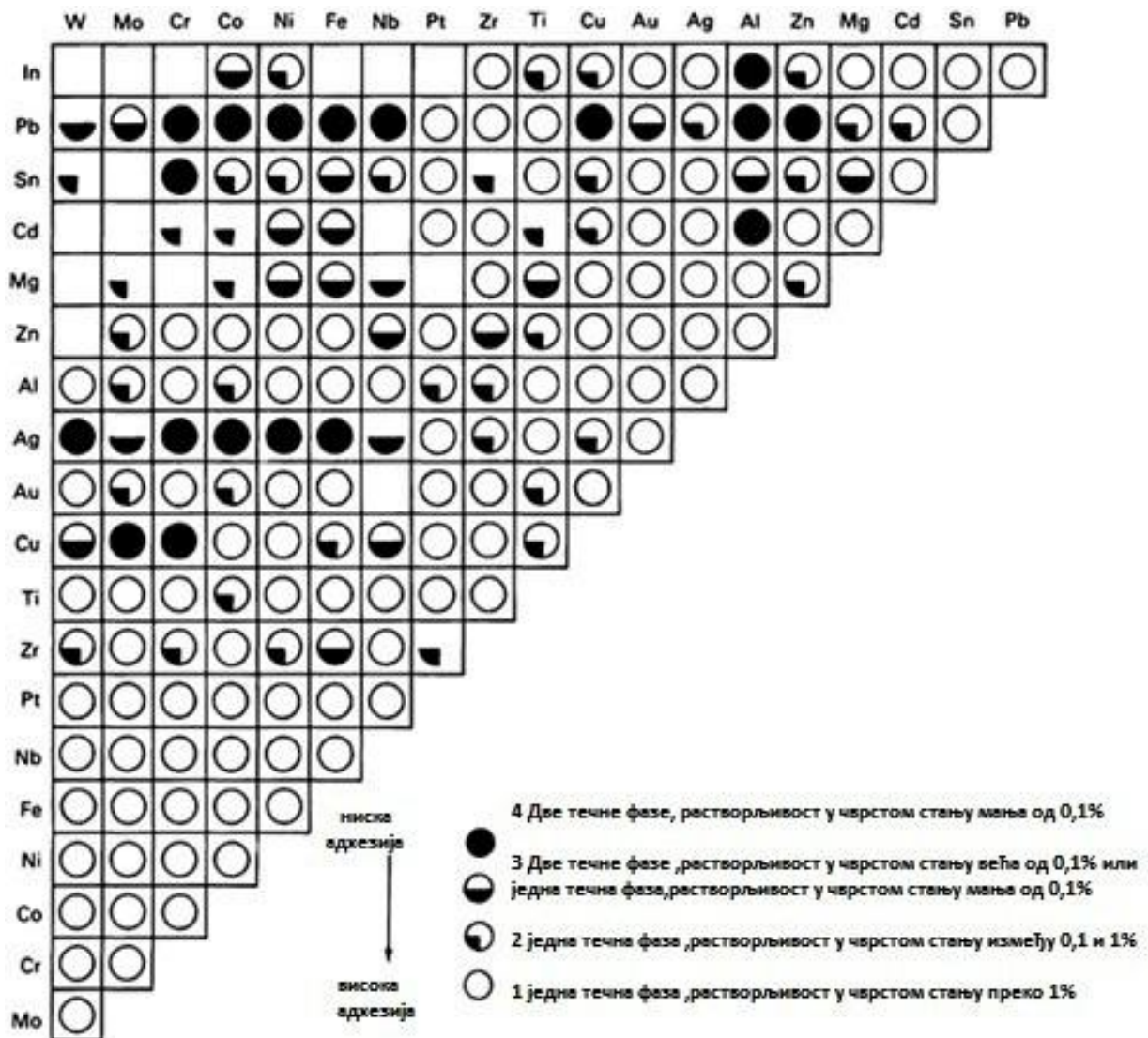
Већина машинских компоненти у покретним механичким склоповима (нпр. лежајеве и зупчаници) произведени су од металних материјала. Површинска интеракција између две равне металне површине, које су доведена до нивоа контакта атома, анализирани су од стране Табора (Tabor) [92]. Ту је описано да везе које се стварају захваљујући „домету“ Ван дер Валсових (Van der Waals) сила образују снажне металне везе као резултат. Касније је постало јасно да је то непожељан феномен по питању перформанси и из перспективе поузданости. Повезивање између сличних (сродних) компатибилних и несродних–некомпатибилних материјала разматрано је у њиховој међусобној растворљивости [93]. Имплицитно у тој анализи је претпоставка да међусобно растворљиви парови образују снажно адхезивно везивање са високим коефицијентом трења док нерастворљиви парови показују способност слабе адхезивне везе и ниског коефицијента трења. Тај приступ проширен је радовима Рабиновича (Rabinowicz) [94], развојем карте компатибилности (сл. 6.2) заснованој на једнакости бинарних фазних дијаграма.

Према Рабиновичу, адхезија и трење ће опадати како један од парова истог материјала који образују чврсту везу (фазу) иде ка материјалима који су нерастворљиви и паровима метал - неметал. Дакако, овај приступ треба да послужи као општи водич, а не као чврсто правило при избору материјала који су у међусобном покретном контакту.

Материјали пројектовани за смањење трења и хабања, познати као триболошки материјали, такође морају задовољити захтеве исказане кроз механичке и физичке карактеристике: чврстоћу, крутост, отпорност на замор, топлотно ширење и способност пригушења (амортизовања). Посматрано с практичне тачке гледишта, постаје готово немогуће наћи баланс међу овако широким захтевима и умањити трење од толико различитих материјала који се користе при избору триболошких компоненти. Трење и хабање могуће је смањити остваривањем слоја између контаката (нпр. танким течним филмом). Када су радни услови такви да није могуће да буде употребљен течни филм (услови високих температура, вакуум) или у ситуацијама када течни филм није у могућности да буде примењен, пажња се окреће ка чврстим мазивима и пресвлакама.

Понашање чврстих мазива која се јављају у природи као графит и молибденит су добро позната.





Слика 6.2 Рабиновичева карта триболошке компатабилности, изведена из бинарних дијаграма стања. (компатибилност ; 4 најбоља, 3 добра, 2 лоша, 1 најлошија) [94,66]

### 6.2.1 Нова сазнања и технологије код чврстих мазива

Развој нових технологија за премазе-облагање (као **PVD** и **CVD** превлаке из парне фазе као и **PECVD** превлаке) су значајно проширили поље употребе материјала за чврста мазива. Неки од веома заступљених материјала за чврста мазива су **DLC** (diamond-like carbons), **TMD** (transition metal dichalcogenides) и пресвлаке на бази композита полимера. Појава површински и субповршински аналитичких техника, као Фото-електрон спектроскопија, скенирајућа Аугерова микроскопија, *time of flight secondary mass spectroscopy*, **FIB** микроскопија, су значајно олакшали фундаментално разумевање синтетско-структурно-триболошке односе и релације у материјалима за чврста мазива. Метода коначних елемената и други методи моделовања континуума су такође коришћени за разумевање и пројектовање архитектуре пресвлака, вишеслојних премаза за специфичне радне режиме. Током последње декаде, симулације молекуларне динамике (**MD**) су коришћене за боље разумевање процеса у **DLC** –у [95-98] молибдендисулфид-у (**MoS<sub>2</sub>**) [99,100] и политетрафлуоретилену (**PTFE**) [101,102] на нивоу атома.

### 6.2.2 Површине и контактна површина

Машински обрађене површине састоје се од неколико слојева како је приказано, на сл. 6.3, без обзира којим поступком обраде материјала су настале.

Површине се састоје од неколико зона које имају своје физичке и хемијске особине што се шематски види на слици 6.3.



Слика 6.3 Приказ типичне површине полираног материјала и слојева са апросимативним дебљинама

Стварна површина контакта  $A_r$  на нивоу посматраних неравнина – храпавости је много мања, реда величине  $10^{-2}$  до  $10^{-6}$ , него стварна површина  $A_a$  тела у контакту (види ранију слику 3.7).  $A_r$  је у функцији површинске топографије, особине материјала и условима површина које су под оптерећењем у контакту. Тај параметар је веома тешко одредити

експериментално или представити визуелно без употребе транспарентних оптичких тела због слојева који га препокривају. Површину стварног контакта  $A_r$  је потребно минимизирати (низак степен интеракције) за мању адхезију. И у случају када је стваран контакт у еластичном напонском стању, локални напони могу прећи границу еластичности напонског стања и остварити пластичне деформације. Отуда, адхезија се сматра да је компонента пластичне деформације неравнина површина која снажно утиче на величину и природу укупних деформација [105,106].

Теорија Гринвуда (Greenwood) и Вилијамсона (Williamson), развијена за грубе површине под статичким нормалним оптерећењем, моделована је за услове где се еластични контакти претварају у пластичне [107]. Њихова теорија претпоставља да су неравнине сферног облика и имају исти радијус закривљености  $R_s$  и да се подвргавају Гаусовој или случајној расподели. Они су закључили да без обзира на облик Гаусове расподеле, у питању су само оне неравнине које су у посматраном опсегу највеће и имају утицаја на површине у интеракцији.

На основу њихове теорије, индекс пластичности ( $\Psi$ ) се може исказати као :

$$\Psi = \frac{E^*}{H} \sqrt{\frac{\sigma_s}{R_s}} \quad (6.1)$$

Где је сложени или редуковани Јунгов модул  $E^*$  :

$$\frac{1}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (6.2)$$

где су :

$E_{1,2}$  и  $\nu_{1,2}$  - респективно модул еластичности и Поасонов однос контактних материјала 1 и 2

$H$  - је тврдоћа материјала који пластично деформише први (мекши),

$\sigma_s$  - је стандардна девијација изражених неравнина ( $\sigma_s^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$ ) и

$R_s$  - је сложени радијус врхова ( $1/R_s = 1/R_1 + 1/R_2$ ).

Квадратни корен из једначине (6.1) је у вези са средњом вредности закривљености површине и може се добити као податак преко профилометра. Индекс пластичности, не димензионе вредности, одређује могућу деформацију (еластичну или пластичну) храпаве површине.

Када је  $\Psi < 0,61$  доминирају еластичне деформације, када је  $\Psi > 1$  велики делови у контакту су у пластичној зони деформације.

$A_r$  се може проценити на основу модела Гринвуда и Вилијамсона (Greenwood and Williamson) за еластичне контакте, (засновано на  $\Psi$  прорачуну) :

$$\frac{A_r}{A_a} \cong \frac{3.2P_H}{E^* \left(\frac{\sigma_s}{R_s}\right)^{1/2}} \quad (6.3)$$

Где је  $P_H$  средња вредност Херцовог контактнoг (напона) притиска. За пластичне контакте (на основу прорачуна  $\Psi$ )  $A_r$  се може проценити на основу следећег односа:

$$\frac{Ar}{Aa} \cong \frac{P_H}{H} \quad (6.4)$$

Због тога што је  $A_r$

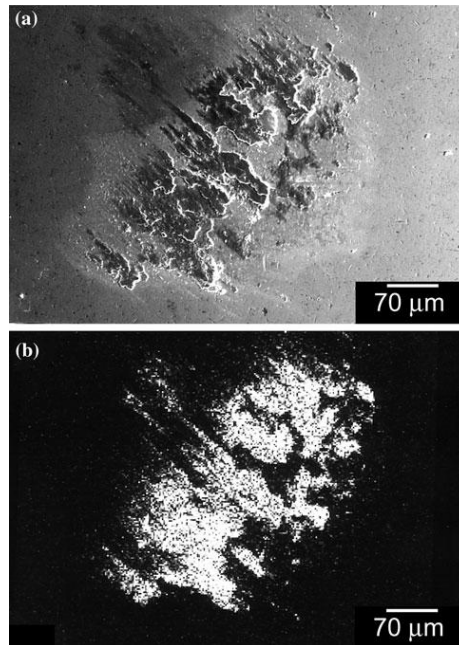
- (а) обрнуто пропорционално са  $H$ ,
- (б) пропорционално нормалном оптерећењу ( $L$ ), и
- (ц) независно од  $A_a$ .

Друге варијације индекса модела пластичности Гринвуда и Вилиамсона укључује Вајтхауса и Арчарда (Whitehouse and Archard) [108] и Бовера и Џонсона (Bower and Johnson) [109] и индексе пластичности. Уопштено, ти индекси сугеришу како адхезивне силе могу бити умањене смањењем  $A_r$  а повећањем  $H$  и  $E$ .

Механика моделовања контакта површина које су у међусобном кретању значајно се усложњава увођењем силе трења. Поред статичких (нормалних) контактних напона, динамичка (условљена трењем) контактна напрезања су произведена испод граничне површине са различитим вредностима главних(основних) напона ( $\sigma_x$  и  $\sigma_z$ ) и максималног напона смицања ( $\tau$ ) за дати однос дубине ( $z$ ) контактне површине ( $A_a$ ).

Главна разлика, тј. промена настаје између статичког ка динамичком (клизном), јер су напонска поља испред (кугле) компресибилна – под притиском док су она иза истегнута (издужена) и да увођење трења подиже максимално напон смицања ка површинским деловима у контакту. Поред трења, пресвлаке на материјалу додатно усложњавају моделовање механике контакта .

Размазивање („наваривање“) честица Al на челичну куглу током теста на трење и хабање апаратуром „ball on disk“ приказано је на слици 6.4 a). SEM слика адхезивног преноса на челичну куглу и припадајући снимак Al снимак X-зрацима (тачкаста мапа) на слици 6.4 b).



Слика 6.4 Размазивање („наваривање“) честица Al на челичну куглу током теста на трење и хабање

Адхезија узрокована трењем контактних површина, може произвести значајне промене у области врло блиској под површинском слоју. У случају контакта метал-метал, природни оксиди могу бити однети током иницијалног уходавања, резултујући нежељеним контактом метал –метал.

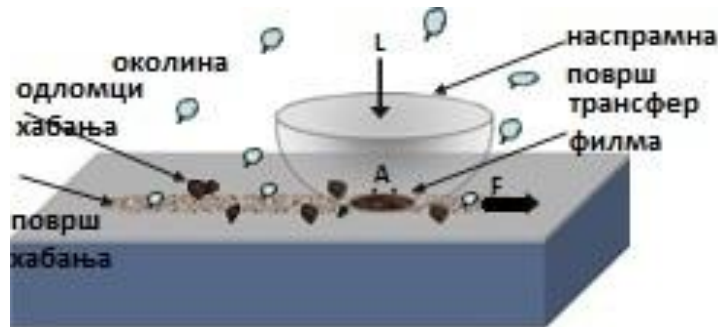
Као пример може се приказати на слици 6.4, алуминијум који је пренешен на чвршћу челичну куглу током теста кугла на диску (ball on disc) за време тестирања коефицијента трења и хабања кроз адхезивни процес трења и хабања.

У одсуству спољног флуида или чврстог мазива, алуминијум може прелазити (тећи) ка чвршћој контактної површини, стварајући додирни слој са мањом смицајном силом и резултујућу у смањеном коефицијенту трења.

На карти сл. 6.2, триболошке компатабилности бинарних дијаграма стања, види се да Al и Fe (челик) имају најлошију компатабилност а најјачу адхезију.

### 6.2.3 Основе подмазивања чврстим мазивима

У складу са класичном теоријом Бовдена и Табора (Bowden and Tabor) [109], сила трења,  $F$  је производ стварне површине у контакту и напона смицања подмазујућег средства (мазива)  $A_r\tau$  (сл.8.4).

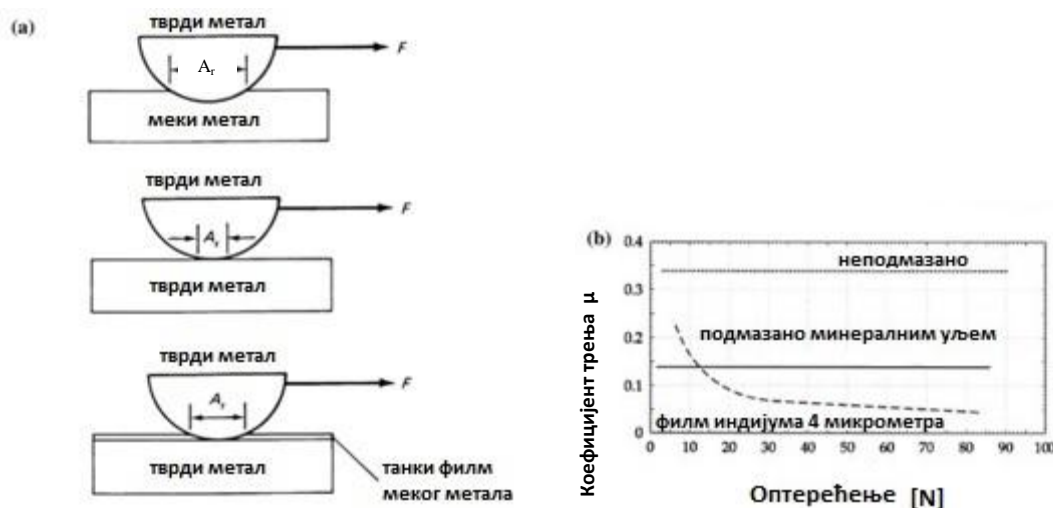


Слика 6.5 Илустрација клизања полусфере на облози од чврстог мазивог субстрата са хабајућом површином у контакту са танким слојем у преносу на наспрамну страну сфере

Тако да се коефицијент трења може представити као

$$\mu = \frac{F}{L} = \frac{A_r\tau}{L} = \frac{\tau}{P_H} = \frac{\tau_0}{P_H} + \alpha \quad (6.5)$$

Где је  $\tau_0$  „међупросторни напон смицања“, „ параметар који се прилагођава брзини „ који је карактеристика међуповршина (граничних површина) и где  $\alpha$  репрезентује зависност притиска од смицања. Константа  $\alpha$  је најнижи коефицијент трења који се може постићи за дати триболошки пар. Према једначини 6.5, коефицијент трења је однос силе трења према примењеној нормалној сили или однос отпорности на смицање наспрам притиска уколико се обе силе поделе са површином у контакту. У принципу, чврсти материјал са „меком превлаком“ требао би да омогући нижи коефицијент трења смањењем  $\tau_0$  а повећањем  $P_H$  (ниско  $A_r$ ). Концепт Бовдена и Табора шематски је приказан на слици 6.6 за општи случај контакта меког и тврдог материјала у контакту. Бовден и Табор верификовали су свој модел, демонстрирајући да када се нанесе пресвлака од индијума, као танког филма, на много тврђи челични супстрат он може да делује као чврсто мазиво .



Слика 6.6 Однос силе трења ( $F = A_r \cdot \tau$ ) према металном тврдом супстрату [109]

а) Модел контакта материјала б) Коefицијент трења у функцији оптерећења

На врху, слика 6.6 а) тврди метал у контакту са меким металом (мало  $\tau$  и велико  $A_r$ ) у средини, два тврда метала упоредне тврдоће у контакту између себе (велико  $\tau$  и мало  $A_r$ ), на дну, два тврда метала компатабилне тврдоће раздвојене танким филмом меког метала нанетог на површину једног (оба  $A_r$  и  $\tau$  су мали). На слици 6.6 б) је експериментални доказ за случај клизајућег контакта челик-индијум (коefицијент трења као функција оптерећења нормалне силе).

Од интереса је такође приметити да, везано за њихова изучавања, коefицијент трења за неподмазане парове челик-челик и за парове челик-челик подмазане минералним уљем, покоравају се првом Амонтоновом закону трења ( $\mu$  је независно од оптерећења), коefицијент трења филма индијума на супстрату од челика опада знатно са порастом нормалног оптерећења. Овде је повећавање деформације подлежућег челика проузроковано повећањем нормалног оптерећења које незнатно увећава стварну површину у контакту. Само незнатно увећање у сили трења како се оптерећење повећава, резултује у одговарајућем опадању коefицијента трења према јед. 6.5. Ово понашање се може објаснити уколико посматрамо „сферу на површини“ као еластични контакт, које је познато као Херцов модел еластичног контакта и где се коefицијент трења може изразити као :

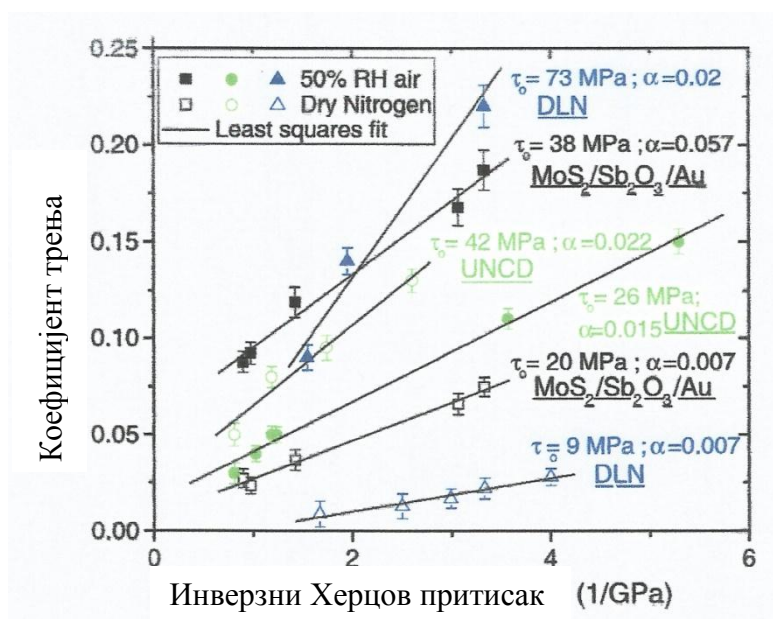
$$\mu = \tau_0 \pi \left( \frac{3R}{4E^*} \right)^{2/3} L^{-1/3} + \alpha \quad (6.6)$$

$R$  радијус сфере .

За разлику од Амонтоновог првог закона трења, Бовден и Тиборова анализа за Херцове контакте претпоставља:

$$\mu \propto L^{-\frac{1}{3}} \quad (6.7)$$

Када су еластичне деформације контакта, коефицијент трења ће опадати са повећањем нормалног оптерећења (или средњег Херцовог притиска), као што је дато на сл 6.6 б за филм индијума. Линеарна веза између  $L^{-1/3}$  и  $\mu$  је такође била експериментално верификована за бројне пресвлаке (чврста мазива) са ниским коефицијентом трења. За меке и танке пресвлаке, притисак је примарно потпомогнут супстратом и повећање еластичног модула супстрата и тврдоће ће умањивати површину контакта за дато нормално оптерећење (притисак), што је у сагласности са једн. 6.3 и 6.4, модела Гринвуда и Вилијамса, респективно. Идеални сценаријо према концепту Бовдена и Табора за достизање ниског коефицијента трења је имати еластично крут и тврд супстрат који ће носити (држати) нормално оптерећење (силу) и одржавати поршину контакта малим, док површинска превлака омогућава прилагођавање смицања и смањује јачину споја, кад супстрат почиње да се истеже и пластично деформише.



Слика 6.7 Линеарна регресија за коефицијенте трења клизања [110,111,112]

На слици 6.7 приказана је линеарна регресија (фитовање) за коефицијенте трења клизања као функција инверзне осредњене вредности Херцовог притиска фитовано-прилагођено за  $\mu = \left(\frac{\tau_0}{P_H}\right) + \alpha$  са вредношћу смицајућег напона ( $\tau_0$ ) приказано за три типа чврстих мазива, отпорних пресвлака:  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на DLN,  $\text{MoS}_2/\text{Sb}_2\text{O}_3/\text{Au}$  и UNCD превлаком  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на UNCD, оба у сувом азоту и влажном ваздуху

Са сл. 6.7 се може видети коефицијент трења креиран у „макроскопским „ величинама реда (mN и већег) спрам микроскопског ( $\mu\text{N}$ ) и наноскопског (nN) реда оптерећења. Девијације у Бовденовој и Таборовој анализи Херцових контаката су одређене и јављају се код „лако“ оптерећених контаката.

Као пример, чврсто мазиво (превлака)  $\text{MoS}_2$ , Au-  $\text{MoS}_2$  и Ti-  $\text{MoS}_2$  [110,111] и дијамантни нанокомпозити (DLN) [112] не прате  $\mu \propto L^{-1/3}$  понашање у микроскопском опсегу оптерећења.



Горе поменуте чињенице су неопходне, али не и довољне да се за већину услова за ниским коефицијентом трења и смањеним хабањем код чврстих мазива реализују. Додатно је да пренос танких слојева или трибо-филмова (трећих тела) који се адхезивно понашају према површини у додиру, треба да минимизују  $\tau_0$  и тако омогуће дужи век хабања преко подесног међуконтакног смицајућег напона. Улога слоја који се преноси тзв, преносног филма (превлаке) је двојака. Прво, мешавина укључака, и закључци спроведених експеримената који укључују хабање и трење [113-115], сугеришу да преносни слој или филм прекрива површину непосредног контакта спречавајући директан додир површина које клизе једна по другој. Друго и битније, ниски коефицијент трења и дугачак период отпорности на хабање ослањају се на пренос филма који омогућује ниски коефицијент смицања у, или непосредној близини контактних површина.

Уколико се „преносни филм“ (превлака) однесе из зоне контакта, долази до повећања коефицијента трења и контактне површине могу заробити или се излизати, осим уколико се „преносни филм“ (превлака) не попуни изнова. Чврста мазива не морају да показују ниску инхерентну способност смицања да би саопштили низак коефицијент трења. Иако је то потребно, ниски напон смицања материјала не може се објаснити Херцовим понашањем (једн. 8.6) или дугим веком хабања пресвлаке чврстог мазива. Иако већина чврстих премаза (мазива) показује особину процеса преноса превлаке (филма), постоје изузеци као што је **NFC** (near carbon frictionless) и **UNCD** (ultrananokristalline diamond) који не оформљују преносне превлаке (филмове).

У прилог адхезивном трењу и хабању, други механизми могу бити укључени до одређеног степена, као што је абразија-браздање једне површине од стране оштрих неравнина друге или кидање мекше површине од стране чврстих честица друге у контакту, резултујући стварањем трајних задеротина над мекшим материјалом. Уколико честице се споје (вежу) на једну од површина у контакту, процес се представља као непокретна абразија .

У случају абразије три тела, абразија је у облику где се губе честице између две контактне површине материјала. Деформације и/или ломови површинских слојева, као што су оксиди могу се јавити у контакту.

Трење и хабање се не ослањају само на физичке и механичке особине материјала у непосредном контакту, то је пре свега систем, који укључује интеракцију парова у контакту и околине која делује. Многи триболошки контакти у свом резултату имају пренос материјала са материјала, који је са пресвлаком на материјалу који је у контакту (друго тело) у хемијској реакцији са околином у коме се налази, познат као трибо-хемијска реакција, и чија је природа хемијске реакције значајно другачија од оне коју поседују понаособ хемијске компоненте у саставу трибо парова. У прилог хемијском понашању трибофилмова (преносних филмова), хемијски састав површина у међусобном клизању, кретању, може утицати нарочито у почетној фази уходавања, када се преносни филм или трибофилм лепи на супротно лице тела у контакту.

Као што се може видети из изложеног у вези материјала чврстих мазива значајну улогу у одређивању триболошког понашања и особина имају: околина, оптерећење, контактни материјал, брзина клизања, итд. Као пример, може се навести да превлаке које се добро понашају у једним условима и околини, значајно одступају у другим условима, што нас наводи на закључак да не постоји универзални материјал за све услове и околности тј. за све радне услове.

#### 6.2.4 Материјали за чврста мазива

Постоје четири групе у које можемо поделити материјале за чврста мазива:

- 1) Материјали на бази угљеника (carbon based materials) (графит, DLCs, nanocrystalline diamond)
- 2) Прелазни метали дикалкогенида ( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ )
- 3) Полимери (PTFE)
- 4) Меки метали (сребро, индијум, калај, злато)

Многи од тих материјала, осим PTFE и његових композита, се могу употребити као танак филм и пресвлака за триболошке компоненте; лежајеве, заптивке, хард дискове итд., за смањење трења, хабања.

#### 6.2.5 Ламеларна чврста мазива (*Lamellar Solid Lubricants*)

У табели 6.2 приказани су чврсти материјали са само – подмазујућим својствима

Табела 6.2 Чврсти материјали са само-подмазујућим својствима [60]

Класификација	Тип	Типичан распон коефицијента трења
Ламеларни чврсти премази ( <i>Lamellar solids</i> )	$\text{MoS}_2$	0.002–0.25
	$\text{WS}_2$	0.01–0.2
	HBN	0.150–0.7
	Graphite	0.07–0.5
	Graphite	0.05–0.15
	fluoride $\text{H}_3\text{BO}_3$	0.02–0.2
	GaSe, GaS, SnSe	0.15–0.25

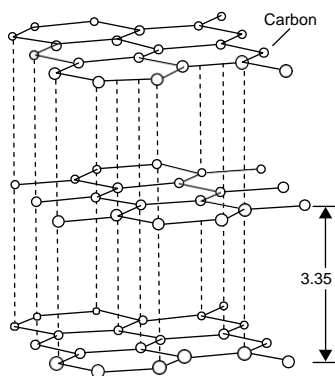
<b>Меки метали (Soft metals)</b>	<b>Ag</b> <b>Pb</b> <b>Au</b> <b>In</b> <b>Sn</b>	0.2–0.35 0.15–0.2 0.2–0.3 0.15–0.25 0.2
<b>Мешани оксиди (Mixed oxides)</b>	<b>CuO–Re<sub>2</sub>O<sub>7</sub></b> <b>CuO–MoO<sub>3</sub></b> <b>PbO–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> <b>CoO–MoO<sub>3</sub></b> <b>Cs<sub>2</sub>O–MoO<sub>3</sub></b> <b>NiO–MoO<sub>3</sub></b> <b>Cs<sub>2</sub>O–SiO<sub>2</sub></b>	<b>0.3–0.1</b> <b>0.35–0.2</b> <b>0.2–0.1</b> <b>0.47–0.2</b> <b>0.18</b> <b>0.3–0.2</b> <b>0.1</b>
<b>Једноставни оксиди (Single oxides)</b>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Re <sub>2</sub> O <sub>7</sub> MoO <sub>3</sub> TiO <sub>2</sub> (sub-stoichiometric) ZnO	0.15–0.6 0.2 0.2 0.1 0.1–0.6
<b>Халиди и сулфатни алкални земни метали (Halides and sulfates of alkaline earth metals)</b>	CaF <sub>2</sub> , BaF <sub>2</sub> , SrF <sub>2</sub> CaSO <sub>4</sub> , BaSO <sub>4</sub> , SrSO <sub>4</sub>	0.2–0.4 0.15–0.2
<b>Чврсте материје на бази угљеника (Carbon-based solids)</b>	Дијамант -Diamond Diamond-like carbon Стаклени угљеник -Glassy carbon Шупље угљеникове нанотеве-Hollow carbon nanotubes Фулерени-Fullerenes Угљеник-угљеник и угљеник графитне основе (Carbon-carbon and carbon-graphite-based)	0.02–1 0.003–0.5 0.15 — 0.15 0.05–0.3
<b>Композитни органски материјали /полимери (composites Organic materials/polymers)</b>	Цинк стеарит -Zinc stearite Восак-Waxes Сапуни-Soaps PTFE	0.1–0.2 0.2–0.4 0.15–0.25 0.04–0.15
<b>Нагомилани или дебели композити Bulk or thick-film (&gt;50 μm) composites</b>	Метал-, полимер-, керамичко матрични композити од графита, WS <sub>2</sub> , MoS <sub>2</sub> , Ag, CaF <sub>2</sub> , BaF <sub>2</sub> (Metal-, polymer-, and ceramic-matrix composites consisting of graphite, WS <sub>2</sub> , MoS <sub>2</sub> , Ag, CaF <sub>2</sub> , BaF <sub>2</sub> , etc.)	0.05–0.4
<b>Танкослојни композити Thin-film (&lt;50 μm) composites</b>	Електропревлаке Ni и Cr филмови са садржајем PTFE, г р а ф и т а , дијаманта, В <sub>4</sub> С, итд., честице као лубриканти Нанокмозити или вишеслојнепревлаке са садржајем MoS <sub>2</sub> , Ti, DLC, итд	0.1–0.5 0.05–0.15

### 6.2.6 DLC мазива

DLC је најпознатији пример материјала на бази угљеника који поседују одличне способности код примене чврстих мазива. Од интереса су различити типови пресвлака на бази DLC-а који су синтетисани за потребе умањеног трења и хабања. За разлику од графита DLC су аморфне природе. Шмеленмајер (Schmellenmeier)[116] а касније и Ајсенберг и Чабот (Eisenberg and Chabot) [117], су били први који су извршили наношење DLC-а као пресвлаке. Дијамант се није посматрао као могући материјал за чврста мазива, међутим, када су честице-зрна величине нанокристала, способност подмазивања је уочена под одређеним околностима као што је присуство кисеоника и водене паре (влаге).

### 6.2.7 Графит

Вероватно најстарије чврсто мазиво у употреби је графит и представља кристални облик угљеника, код кога су атоми хексагонално распоређени у правилним слојевима (сл 6.8). Атоми угљеника у хексагоналној структури су под јаким ковалентним везама, док су везе између слојева слабе Ван дер Валсове кохезионе силе, резултујући у њиховом лакој смицању. Из тих разлога графит даје мало трење али само у присуству воде или влаге. Блиско сложене равни поседују ниску површинску енергију и имају ниску адхезиону моћ међусобно [119,120]. При коришћењу у условима суве средине њихов утицај на карактеристике трења и хабања се погоршава. Графит је постојан до температуре од око 540 °C када почиње да оксидише. Моћ ношења слоја или филма је знатна. Одлично се везује за метале али и друге материјале. Користи се као мазиво у индустрији, нарочито у процесима прераде метала (извлачење жица, цеви, ковању и сл.) Користи се као додатак течним и полутечним мазивима [72].



Слика 6.8 Кристална структура графита

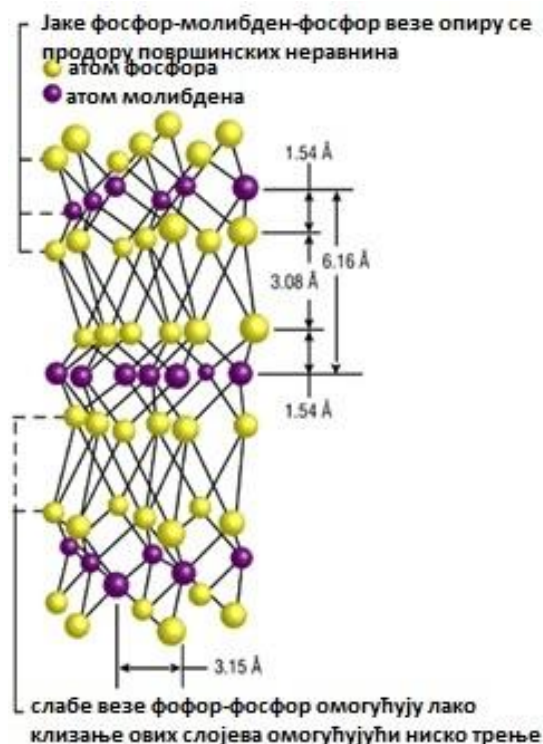


Слика 6.9 Природни графит

### 6.2.8 Молибдендисулфид ( $\text{MoS}_2$ )

Молибден није откривен све до друге половине 18. века и у природи се не јавља у облику метала. Упркос томе његова доминантна појава у виду минерала молибденита коришћена је још у 14. веку када је откривено да јапански мач садржи молибден али је било тешко разликовати од других сличних материјала као што су, олово, галенит и графит. Ове супстанце су заједнички биле познате Грцима по називу „молибдос“, што значи олову сличне. Молибден је први пут идентификован 1778. године од стране Шведског научника, Карла Вилхелма Шилеа. Убрзо након тога, 1782. год. редуковао је молибденит оксид са графитом и добио тамни метални пудер који је назвао „молибден“.

Молибдендисулфид ( $\text{MoS}_2$ ) је, слично графиту, хексагоналне и ламеларне структуре (сл. 6.10). Сваки слој атома молибдена је постављен између два слоја атома сумпора. Везе између слоја молибдена и сумпора су веома јаке. Молекули молибдендисулфида међусобно су повезани slabим силама и то су места на којима се врши смицање, што обезбеђује ниско трење. Он се разликује од графита по томе што његове карактеристике не зависе од присуства влаге. Из тих разлога се може успешно користити у високом вакууму и има знатну примену код космичких летилица  $\text{MoS}_2$  се боље везује за метал него графит.



Слика 6.10 Кристални слојеви структуре молибдендисулфида ( $\text{MoS}_2$ )

Филмови молибдендисулфида се могу наносити на површине делова машина на разне начине. Поред директног наношења на површине,  $\text{MoS}_2$  се користи као додатак код уља за подмазивање и техничких масти, најчешће у виду праха чија је величина зрна 2-3  $\mu\text{m}$ .

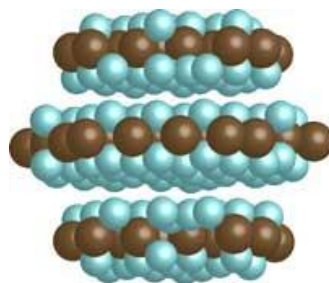
Молибдендисулфид оксидише на  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ , те је то лимитирајући фактор за употребу на високим температурама. Међутим у вакууму овај проблем није изражен те се може користити и до  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ .  $\text{MoS}_2$  поседује изванредна својства пријањања и има високу моћ ношења. [72]

### 6.2.9 Полимери

Међу полимерним материјалима, PTFE је добро познат по својим анти-фрикционим својствима [118]. То произилази из његовог молекуларног састава и услед слабе интермолекуларне кохезије [173]. PTFE не поседује незасићене везе и не поларише се лако. Током контакта (клизања) оформљује сопствени танак преносни филм на супротној површини у споју при ниским контактним напонима ( $7.3\text{-}73\text{Mpa}$ ) али грудvasti створени филм може резултовати у ниском али променљивом трењу до момента док се филм не истањи и „размаже“. Ниска интермолекуларна кохезија одговорна за лако покретање ланца молекула ван кристалне структуре полимера, која подиже ниски коефицијент трења ( $\sim 0,1$  у односу на контактну површину од челика) узрокује као резултат у неприхватљивој величини хабања [173,174].

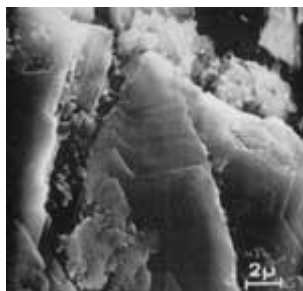
**Из тог разлога је немогуће постићи пожељну комбинацију ниског трења и хабања коришћењем само PTFE-а.** PTFE има ниски коефицијент трења како у вакууму тако и у атмосфери због способности да хемијски не реагује и да на њега не утиче влага и адсорбована испарења. Он поседује ниску површинску енергију као и ниску термичку проводљивост која инхибира топлотну дисипацију, која узрокује прерано отказивање због топљења чиме је ограничен на употребу код ниских брзина клизања ( $v < 1\text{m/s}$ ).

**Без жртвовања карактеристика ниског трења PTFE-а, његова хабајућа својства се могу подићи до фактора 1000 додавањем одређених филера (попуна) у његову матрицу [174].** Унапређена антихабајућа својства, са додацима, могу да буду разлог формирања континуалног и снажно адхезивног филма који се преноси на додирну површину у контакту са PTFE. **PTFE показује на основу опита, пад коефицијента трења са повећањем контактнег напона (оптерећења).**



Слика 6.11 Изглед ланца PTFE - политетрафлуоретилен

На сл. 6.11 приказан је изглед ПТФЕ. ПТФЕ је засићени алифатични флуоро-угљеник (saturated aliphatic fluorocarbon). Микроскопски приказ ПТФЕ је дан на слици 6.12.



Слика 6.12 Микроскопски приказ изгледа ПТФЕ

ПТФЕ се користи као матрица у самоподмазујућим композитима као и у филерима за чврста мазива (vlakна и пудери) у композитима, као нпр. галванизована Ni-ПТФЕ пресвлака, за употребу где се захтева ниски коефицијент трења.

Табела 6.3 Карактеристике ПТФЕ у зависности од додатака стаклене фазе, графита и бронзе [40]

Politetrafluoretilen (PTFE)							
Svojstva	Jedinica mere	Metoda	PTFE	PTFE + 15% staklene faze	PTFE + 25% staklene faze	PTFE + 15% grafita	PTFE + 60% bronzе
Gustina	g/cm <sup>3</sup>	ASIM 1457–81	2,17	2,21	2,24	2,17	3,90
Prekidna jačina	N/mm <sup>2</sup>	ASIM 1457–81	30	22	14	16	19
Prekidno izduženje	%	ASIM 1457–81	450	300	250	160	100
Tvrdoća utiskivanjem kugle	N/mm <sup>2</sup>	ASIM 1457–81	–	–	31	32	42
Deformacija pod opterećenjem 14 N/mm <sup>2</sup> , 100 <sup>h</sup> , 23°C	%	ASIM D621–69	10–12	–	7–14	7	5
Toplotna provodljivost	$\frac{W}{mK}$	DIN 52612	0,2–0,4	0,4	0,35	0,93	0,7
Termički koficijent linearnog širenja	K <sup>-1</sup>	DIN 52328	1,1 · 10 <sup>-4</sup>	1,0 · 10 <sup>-4</sup>	1,0 · 10 <sup>-4</sup>	1,1 · 10 <sup>-4</sup>	0,7 · 10 <sup>-4</sup>
Temperaturna oblast primene	stalna	°C	–	–200 ÷ +260			
	kratkotrajna			+280			

### 6.2.10 Меки метали

У условима трења сувих површина, величина трења зависи у значајној мери од силе неопходне за смицање материјала на месту спрезања. Поједини меки метали имају мали напон смицања тако да се могу успешно користити као мазива. Међу многим металима као мазива могу се користити калај, олово, сребро, злато, индијум и други. За мале брзине и оптерећења, поменути метали се примењују као мазива до температуре коју одређује топљење метала. Меки метали се претежно користе као мазива у вакууму.

### 6.2.11 Керамички материјали

Различити керамички материјали, чисти или у комбинацији са металима (познати под називом **кермет**) примењују се као заштитна и мазивна превлака или облога елемената машина изложених високим температурама. Најпознатији керамички материјали су алуминијум-триоксид ( $Al_2O_3$ ), цирконијум-оксид ( $ZrO_2$ ), волфрам–карбид (WC) и силицијум карбид (SiC). Имају употребу код металуршких и термичких постројења, ракетних мотора, мотора СУС и других машина и опреме [72].

### 6.3 Мазиво за пуњење тела вентила

(Lubricant for valve body filling)

Мазиво за пуњење тела вентила уобичајено се користи у засунима на самим бушотинама где се може очекивати присуство хидрата. Унутрашњост тела вентила је уобичајено испуњена са лаким мазивом као превенција од појаве хидрата, који би се у супротном сакупио у шупљинама самога вентила, довео до смрзавања приликом пригушивања протока или услед пада спољашње температуре испод нуле .

Ова мазива су на бази минералног уља, глине као пуниоца и инхибитора корозије као обавезног састојка. За овај тип мазива је битно да се лако спирају после редовног тестирања вентила и да штите исти од корозије приликом складиштења.

Ово лако мазиво се мора пре уградње у гасовод испрати или истиснути убризгавањем одговарајућег заптивног мазивног средства (ЗМС) како би се спречило евентуално пропуштање на линији уграђеног вентила.

Као пример навешћемо (извод) једног од водећих светских произвођача ЗМС за вентиле, чепасте и кугласте славине, на гасоводним системима.

Табела 6.4 Приказ компонената базног уља и згушњивача мазива за вентиле произвођача "*Rockwell*" [17]

БРОЈ	БАЗНО УЉЕ	ЗГУШЊИВАЧ	АДИТИВ
555	Биљно уље	Неоргански несапунски угушчивач Органски згушњивач	Антиоксидант Модификатор трења
950	Синтетичко	Неоргански несапунски згушњивач	Антиоксидант, бакар Инхибитор корозије

ЗМС- (Sealing lubricants)-назив који се користи у петро-хемијској литератури и терминологији



### **6.3.1 Средство за чишћење вентила**

(Product for valve cleaning)

Средства за чишћење вентила морају задовољити вишеструке захтеве. Дехидратизован природни гас, сув, може утицати на способност самог заптивног мазивног средства да врши своју улогу. Уколико се оставе дуго у вентилима, одређени типови заптивних мазивних средстава губе своју способност и претварају се у чврсте честице које остају од чврстих пуниоца који су коришћени као згушњивачи базног уља у мазиву. У том случају средство за чишћење вентила се користи да дехидратизује згуснуто мазиво (суво) са циљем да се протера кроз канале вентила ван самог вентила тј да се изврши ослобађање комплетног система канала за подмазивање.

Средства за чишћење морају да садрже раствараче који ће разградити чврсте честице као и детерценте који ће олакшати проток кроз канале тј. растворени материјал. Коначно, квалитетно средство за чишћење мора у себи да садржи молибден-дисулфид ( $\text{MoS}_2$ ) како би се заптивна површина могла без проблема међусобно покретати у случајевима када је вентил без заптивног мазивног средства.

### **6.3.2 Мазивна средства за вентиле**

(Lubricants for valves)

Мазивна средства за вентиле се производе тако да су нерастворна у минералном уљу и мастима.

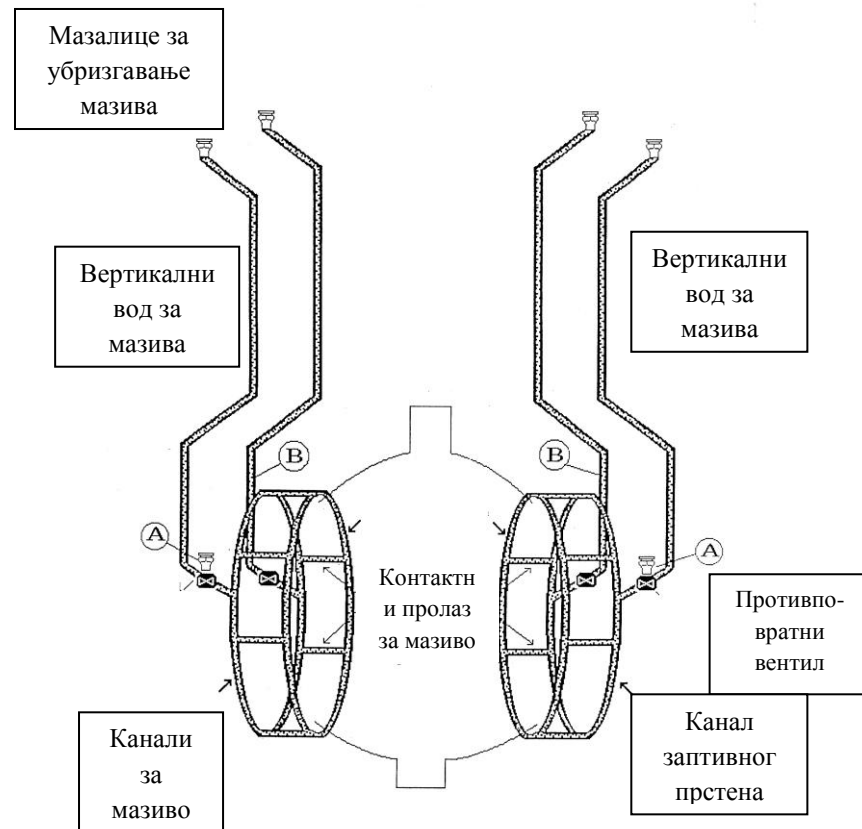
То могу бити модификована биљна уља која су уобичајено мешана (блендирана) са синтетичким уљима, специјалним инхибиторима корозије и другим адитивима како би мазиву дали и повећали адхезивну прионљивост (лепљивост). Ова вискозна и лепљива мазива омогућују одређену заптивну способност, али су уопште препоручена само за нове вентиле и оне код којих је изражено врло мало хабање. Веома је важно да квалитетно мазиво буде отпорно на смицање своје желатинасте структуре под високим притиском који се јавља приликом убризгавања као и енормним силама које су у контактном споју належућих заптивних површина. Такође морају имати температурну стабилност у довољном температурном опсегу.

### **6.3.3 Заптивна мазивна средства (ЗМС)**

(Sealing lubricants)

Заптивна мазивна средства су генерално сачињена на бази истих компонената као мазива за вентиле. Специјални адитиви су додати (блендирани) како би повећали заптивну способност смесе. Заптивна мазивна средства су вискознија од мазива за вентиле и многи произвођачи додају фини пудер од PTFE (teflon) или PTFE флекаца који би извршили заптивање мањих огреботина на належућој површини и попунила неравнине настале услед дејства корозије.

На слици 6.13 дат је принципијелни изглед система за подмазивање кугластих подмазивих славина са својим основним елементима кроз које се допрема мазиво до самих контактних површина на ободу кугле и заптивних прстенова.



Слика 6.13 Системи за подмазивање подземних кугластих славина

На сликама 6.14 до 6.18 дат је физички изглед подземних подмазивих славина које су биле у експлоатацији на систему гасовода различитих произвођача на којима се може уочити изглед самих мазалица, сл. 6.17 и водова до места за подмазивање сл. 6.14, 6.15, 6.16, 6.18.



Слика 6.14 Изглед поземне подмазиве славине са вретеном, каналима –водовима за подмазивање и актуатором на врху (погоном)



Слика 6.15 Изглед детаља подмазујућих водова



Слика 6.16 Изглед бочног вода за подмазивање кугле и заптивног прстена



Слика 6.17 Изглед мазалица на вретену поземне славине (горњи део вретена)



Слика 6.18 Изглед подземног дела кугласте славине другог типа скинутог са система гасовода

#### **6.3.4 Начин функционисања**

Заптивно мазивно средство убризгава се преко мазалица директно у вертикалне водове. Заптивно мазивно средство потом пролази кроз противповратни вентил ка каналима за мазиво. Мазиво потом пролази кружним каналима (жљебовима) заптивног прстена и пролази до контактеног споја кугле и заптивног прстена где долази у контакт са оштећеном површином кугле и уметка седишта (seat insert).

(А) Мазалица се уобичајено налази одмах изнад противповратног вентила осим у случају када је постављена на вод као код подземних славина.

(В) Већина вентила 12<sup>“</sup> и већег пречника има и додатне водове за мазиво постављене са друге стране вентила

### 6.3.5 Заптивање

Заптивање није само битан триболошко-експлоатациони регулатор већ и веома важан елемент машинског система, зато што од радне способности заптивних склопова зависи поузданост система у целини. При отказу заптивања, у већини случајева, повећава се вероватноћа хаварије већ се при томе може угрозити и сигурност људи.

Заптивање је, говорећи уопштено, начин раздвајања разноликих средина, различитим по својим природним и физичким својствима.

У многим случајевима је то спречавање и смањење до допуштених граница истицања средина кроз зазоре самог елемента система. Заптивање се врши техником заптивања и заптивним склоповима са коначним циљем херметизације елемената, склопова или машинског система, односно потреба да се постигне непропустљивост за течности, гасове или тврде фазе дисперзионих система.

Значај заптивања предодредио је развој херметологије, научне дисциплине која изучава законе херметизације, особености конструисања заптивних склопова, херметичке материјале, као и друге области везане за обезбеђење херметичности спрегнутих елемената система.

Заптивни склопови машинских система у складу са природом трења и хабања могу се поделити по следећим обележјима: по постојању релативне брзине између спрегнутих површина, по карактеристикама релативних брзина, по присуству трења у зони спрезања.

Контактна заптивања претежно су заступљена у техници и њихова непропустљивост за раздвојене средине се образује путем спрегнутих елемената [7].

#### **6.4. Мазиво у функцији заптивања и подмазивања славина на гасоводном систему**

Развој метода експерименталних истраживања представља посебну област истраживања заснованог на научним принципима.

Циљ развоја метода је прикупљање објективних доказа о изучаваној појави. Сам поступак и развој методе у многоме зависи од: изучаване појаве, могућих начина за прикупљање објективних доказа (опреме) и свакако најважније, умешности самог експериментатора за поставком експеримента [3].

Поставком експеримента на реалним условима, тежило се добијању максималне веродостојности тражених података и утврђивању начина понашања ЗМС на реалним условима у односу на изабрани еталон.

Овде је потребно истаћи да је корелација резултата стандардизованих лабораторијских тестова спрам практичних захтева добро познат проблем. Немогућност симулације (моделовања) реалних услова не представља једину потешкоћу. Шта више, одређени реални захтеви који постоје нису прецизно дефинисани, а као последица лабораторијски тестови не могу бити у складу са захтеваним реалним техничким условима.

Важно је нагласити да је посебно тешко симулирати спирање мазива (wash-out), тј. отпор мазива против спирања са површина чврстог тела на коме је мазиво нането.

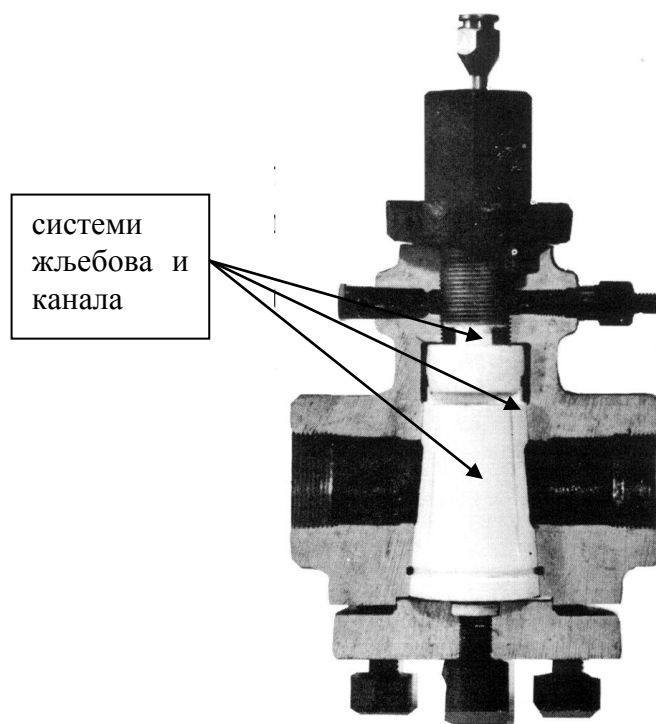
Напред изнете тврдње су закључак и препорука Lotar Kanne [9], који тврди да једино осмишљени експерименти на реалним условима могу да омогуће добијање поузданих података у случају када постојећи стандарди или методе не дају довољно јасну и прецизну слику о посматраном мазиву.

На систему за производњу и транспорт природног гаса, као један од саставних елемената налазе се славине са чепом и кугласте славине, које имају задатак да прекину проток или изврше одвајање делова гасоводне инсталације. Одређени типови таквих славина имају конструктивну могућност за примену примарног и секундарног заптивања и подмазивања.

#### 6.4.1 Основне карактеристике система за подмазивање

##### Системи са примарним заптивањем (primary sealing)

У типичног представника овог система подмазивања спадају конусне (чепасте ) славине (Plug valve), чији је пример приказан на слици 6.19.



Слика 6.19 Пресек конусне подмазиве славине – Hyperseal [26 ]



У пракси се могу срести четири врсте оваквих славина;

- Славине са конусним чепом,
- Нуперсеал, односно славине са доњим улазом (обрнута конусна славина),
- Славине у динамичкој равнотежи и
- Славине са цилиндричним чепом

Начин функционисања овох славина дати су у наставку:

Убризгавањем заптивног мазивног средства под високим притиском (~ 700 бара), на за то предвиђеним местима - мазалицама (фитинзима) на кућишту славине и осовине конусног чепа, преко система унутрашњих канала и жљебова на конусном чепу, врши се облагање заптивним мазивним средством површине чепа као и конусног кућишта чепа у седишту вентила, чинећи их клизавим и остварујући лакше окретање при смањеној обртној сили.

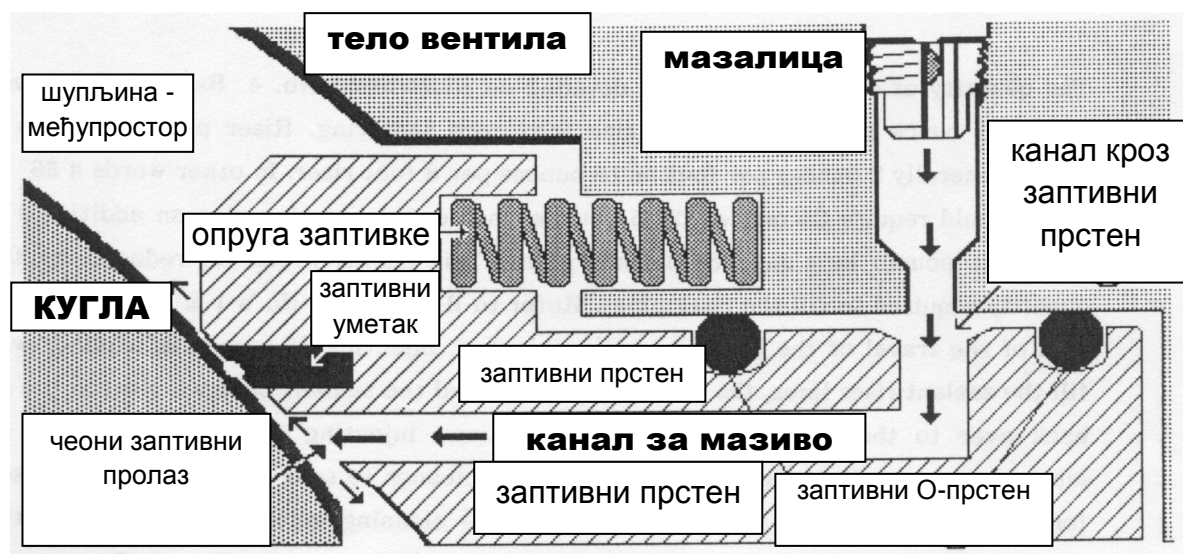
Код већине конусних славина, примена заптивног мазивног средства под притиском издиже конусни чеп из његовог конусног седишта.

Најважнија особина заптивног мазивног средства је да делује као заптивач; заптивно мазивно средство треба да испуни празан простор између чепа и седишта славине у кућишту како би се спречило пропуштање славине и избегао директан контакт метал на метал.

Учестаност поновног подмазивања зависи од отпорности заптивног средства на испирање и истискивање услед притиска.

### Системи са секундарним заптивањем (Secondary sealing)

У представнике овог система заптивања спадају кугласте славине (Ball valve), слика 6.20



Слика 6.20 Систем са секундарним заптивањем (Secondary sealing) [18]

Овај систем додатног заптивања користи се у случају оштећења заптивних прстенова, система примарног заптивања или саме кугле, услед чврстих честица или нечистоћа које могу да се налазе у природном гасу (рђа из гасовода, талози, прљавштине, муља, страних чврстих честица или старих стврднутих средстава за заптивање), и захтеване непропусности да би се привремено или стално затвориле славине на деоници гасовода за потребе одржавања или других неопходних радњи.

Убризавањем заптивног средства под високим притиском (~ 600–700 bara), путем мазалица на телу кугласте славине, преко система канала-капилара који се налазе у оквиру заптивних прстенова, формира се заптивни-подмазиви филм између тела кугле и заптивних прстенова остварујући при том захтевану непропусност.

### Радна средина и услови за ЗМС

Поменуте славине налазе се на инсталацијама система за производњу, сабирање и транспорт природног гаса. Просечан хемијски састав природног гаса је у односу 95-98% метана и 2-5% осталих угљоводоника и примеса.

Табела 6.5: Просечан састав природног гаса

[извор: Лабораторија за гаснохроматографску анализу „СРБИЈАГАС“-а ]

metan C <sub>1</sub>	etan C <sub>2</sub>	propan C <sub>3</sub>	I-butan IC <sub>4</sub>	N-butan NC <sub>4</sub>	pentan C <sub>5+</sub>	azot N <sub>2</sub>	uglj.dio. CO <sub>2</sub>	donja topl.vr. kJ/m <sup>3</sup>	gustina gasa kg/m <sup>3</sup>
97,92	0,53	0,24	0,054	0,044	0,02	0,88	0,28	33,989	0,696
*44,6	0,98	0,134	0,072	0,1165	0,128	8,99	44,91	16,35	1,27

\* друга колона представља састав природног гаса богатог N<sub>2</sub>,CO<sub>2</sub>

Услови које заптивно мазиво треба да испуни су;

- Препоручени момент за отварање и затварање вентила
- Отпорност на раствараче
- Водоотпорност
- Отпорност на клизање (Shear force reaction)
- Постојаност на ниским и високим температурама
- Деградациони тест (degradation test)
- Заптивност (sealability)
- Еколошки захтеви

## **7 МЕТОДОЛОГИЈА ИСПИТИВАЊА**

## 7.1 Лабораторијска испитивања мазива

### 7.1.1 Експериментални приступ испитивању

Ради што квалитетније интерпретације и праћења резултата мерења непропусности и постојаности на испирање извршена је упоредна анализа карактеристика мазива за славине, еталонског мазива (А-1) и мазива из производног програма ФАМ Крушевац.

Испитивање је обављено у лабораторији ФАМ-а, а резултати су дати у табели.

Табела 7.1 Упоредне карактеристике мазива

НАЗИВ ПРОИЗВОДА		ЕТАЛОН МАЗИВО	ФАМ 1	ФАМ 2	ФАМ 3
Карактеристика	Метода				
Боја	Визуелно	Тамно-браон	Тамно-браон	Црна	Црна
Изглед на 20 <sup>0</sup> С	Визуелно	Хомогено	Хомогено	Хомогено	Хомогено
Нерадна пенетрација,mm/10	ASTM D 217	85-115	40-80	175-205	220-250
NLGI	ASTM D 217	6	7	4	3
Тачка капања, <sup>0</sup> С	ASTM D 2265	>300	Мин.135	>300	Мин.190
Издавање уља,%	BS 2000 part.121	0	0	0	0
Склоност према клизању 4h/100 <sup>0</sup> С	GOST 19538-74	Без промене облика и издвајања	Без промене облика и издвајања	-	-
Постојаност према води,степен	DIN 51 807/1				
15 мин/90 <sup>0</sup> С		0/1	0	0	0
3 h/90 <sup>0</sup> С		1	1	1	1
Корозија Cu,3h/100 <sup>0</sup> С	ASTM D 4048	1	1a	1	1a
Корозија Cu,24h/100 <sup>0</sup> С	ASTM D 4048	1	1	1	1

Ради добијања што веродостојнијих података релевантног испитиваног фактора приликом самог експерименталног мерења, кориштена је методологија једнофакторног експеримента. Она се састоји у томе да се могући необухваћени фактори, који могу утицати на саму појаву изучавања или мерење, понашају у складу са следећим претпоставкама;

- да је утицај необухваћених фактора занемарљиво мали
- да се необухваћени фактори задржавају на константном нивоу
- ако је утицај ових фактора случајан, методама статистичке математике њихово дејство може се одвојити од дејства контролисаног фактора у виду грешке експеримента

Тако би се само главни фактор од интереса за посматрање и мерење, могао на најбољи начин издвојити. Сагласно са таквим начелом, у току извођења експеримента спољни фактори су држани на константном нивоу и то[3] :

- исто место извођења испитивања
- иста мазалица за убризгавање заптивног мазивног средства-мазива
- исти испитни сто
- исти руковаоц
- исти испитни медијум
- исте испитне конусне (чепасте) славине
- исто дотезање конусног клипа приликом сваке поновне монтаже

За ове факторе претпоставља се да се понашају као случајне величине са нормалном расподелом.

Да би се утицај грешке мерења приликом извођења експеримента свео на минимум, за сваку испитну конусну славину отвора 2" класе притиска ANSI 300, које су изабране на случај а пре тога су се налазиле у експлоатацији дужи низ година (15-20), извршено је више серија мерења са једним пуњењем мазива при константном испитном притиску.

У том случају, резултат мерења је средња вредност (аритметичка средина) броја отварања и затварања славине при константном притиску са једним пуњењем мазива до регистрованог пропуштања .

Пре извођења експеримента извршена је визуелна контрола стања спољних належућих површина чепа и његовог седишта.

Током испитивања, свака славина је пре убризгавања другог заптивног мазивног средства детаљно испрана, очишћена и одмашћена.

### 7.1.2 Резултати испитивања ваздухом на испитном столу до 6 bar-a (лабораторијска испитивања)

Резултати испитивања су приказани у табелама 7.2-7.4. У колонама испод "мазиво" тј еталон мазиво, ФАМ 1, ФАМ 2, ФАМ 3, налазе се вредности броја отварања-затварања испитиване славине до регистрованог пропуштања при једном пуњењу славине тј серије. Испод сваке колоне дата је средња вредност, стандардна девијација (одступање)  $\sigma$  за све серије .

Табела 7.2 Резултати за славину 1

славина 1				
број понављања (серија)	мазиво			
	еталон мазиво	ФАМ 1	ФАМ 2	ФАМ 3
1	24	18	38	33
2	31	29	40	35
3	25	19	43	38
Средња вредност	26,67	22,00	40,33	35,33
Стандардна девијација $\sigma$	3,79	6,08	2,52	2,52

Табела 7.3 Резултати за славину 2

славина 2				
број понављања (серија)	мазиво			
	еталон мазиво	ФАМ 1	ФАМ 2	ФАМ 3
1	71	41	55	69
2	65	30	80	70
3	55	32	75	65
Средња вредност	63,67	34,33	70,00	68,00
Стандардна девијација $\sigma$	8,08	5,86	13,23	2,65

Табела 7.4 Резултати за славину 3

Славина 3				
број понављања (серија)	мазиво			
	Еталон мазиво	ФАМ 1	ФАМ 2	ФАМ 3
1	30	36	36	33
2	19	26	40	35
3	34	47	45	19
Средња вредност	27,67	36,33	40,33	29,00
Стандардна девијација $\sigma$	7,77	10,50	4,51	8,72

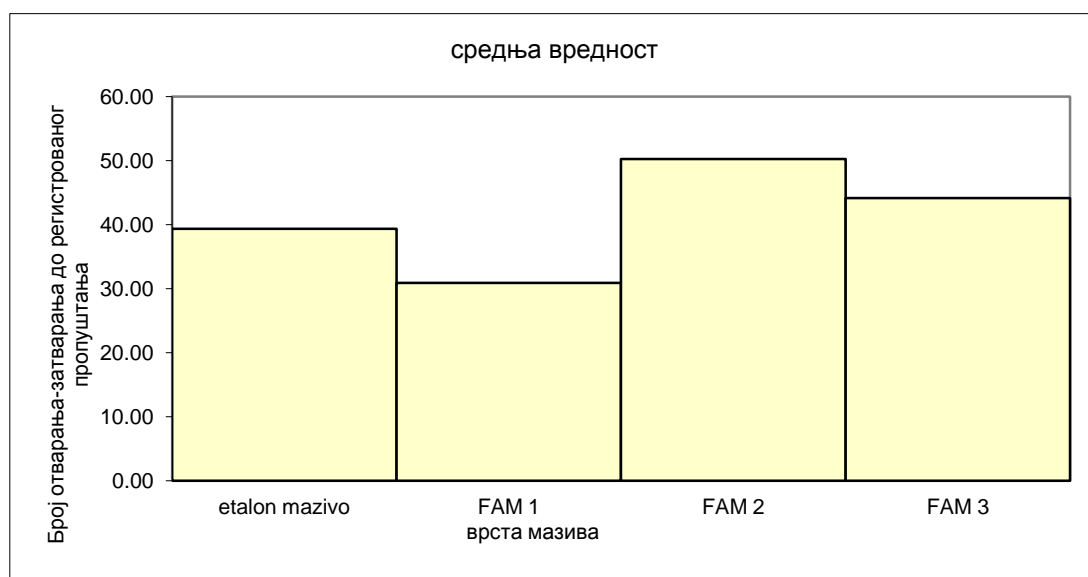
### 7.1.3 Обрада резултата испитивања

Како је већ горе наведено, као меродавна процена ваљаности мазива, за дате услове испитивања, за испитивано својство (фактор) служи средња вредност и стандардно одступање  $\sigma$ .

Из датих табела се може видети да испитивано мазиво ФАМ 2 има највеће средње вредности за сваку испитивану славину, тј. највећи просечан број отварања-затварања до регистрованог пропуштања.

Мазиво ФАМ 3 је друго по просечном броју отварања-затварања до регистрованог пропуштања. Следе "еталонско мазиво" и ФАМ 1 са најмањим бројем отварања-затварања до регистрованог пропуштања.

Све ово горе наведено се може на најбољи начин графички илустровати уколико се прикаже укупан просек по испитиваном мазиву, слика 10.8.



Слика 7.1 Графички приказ броја отварања и затварања до пропуштања

И поред очекивања да ће мазиво ФАМ 1 услед своје велике тврдоће (конзистенције)-NLGI 7 показати најбоља својства, прилично заостаје за мазивима ФАМ 2 и ФАМ 3 који су са мањим NLGI вредностима, респективно 4 и 3, што указује да тврдоћа поред недорађених осталих карактеристика мазива ФАМ 1 не игра доминантну улогу како се претпоставило.

Мазиво ФАМ 2 је на овим условима испитивања, показао најбоље особине и то како у погледу највећег броја отварања-затварања до регистрованог пропуштања тако и особину да изузетно добро врши подмазивање, што се манифестовало у смањеном

моменту потребном за затварање-отварање испитиване славине тако и у изузетној прионљивости на клизне површине.

Мазиво ФАМ 3 је исказало нешто слабије резултате али и они су врло задовољавајући, како у погледу прионљивости на клизне површине тако исто и у смањеном моменту потребном за отварање-затварање славине.

Из свега овог се може закључити да постоје одличне предиспозиције да се крене у даља испитивања са мазивима ФАМ 2 и ФАМ 3, док се мазиво ФАМ 1 може прикључити уз евентуалну дораду .

## 7.2 Испитивање ЗМС на реалним условима

### 7.2.1 Опис испитивања

Сврха ове фазе испитивања је да се у реалним условима изврши селекција и верификација заптивног мазивог средства (ЗМС) које је до сада кроз прву фазу на испитном столу и ваздухом до 6 bar-а, дало најбоље резултате. Испитивања су спроведена на систему Ј.П. „Србијасгас“ на Главном разводном чвору у Новом Саду, слика 7.2.

Узорци славина који су коришћени у претходној фази, на случај изабране конусне чепасте славине, које су биле у експлоатацији 15-20 година, су пре укључења у овај део експеримента биле детаљно расклопљене, прегледане и потом „препаковане“, тако да су на испитном столу под хидростатичким притиском од 50 bar-а, показале способност заптивања. Испитивање овог типа конусних славина је извршено са претходно напуњеним, убризганим заптивним мазивним средством.

На сликама од 7.2 - 7.6 приказано је испитно место и узорци конусних подмазивих славина коришћени током експеримента.



Слика 7.2 Физички изглед Главног разводног чвора са изведеним обилазним водом–локација Нови Сад





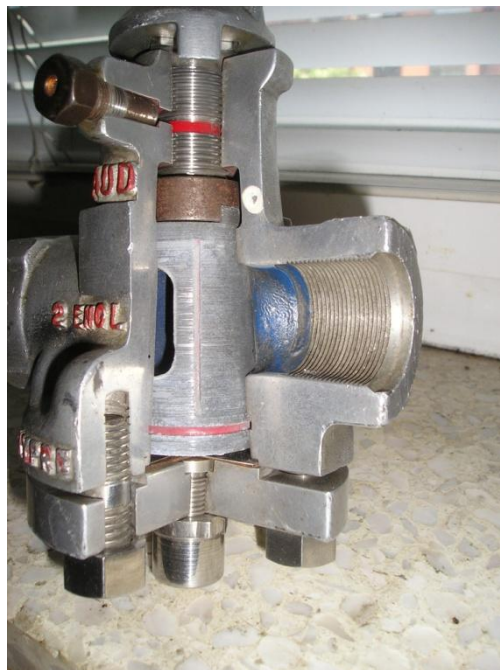
Слика 7.3 Испитно место



Слика 7.4 Конусне подмазиве славине кориштене у експерименту



Слика 7.5 Пресек модела конусне подмазиве славине



Слика 7.6 Детаљнији изглед површине конуса, рисева на исеченом моделу

### 7.2.2 Избор методологије експеримента

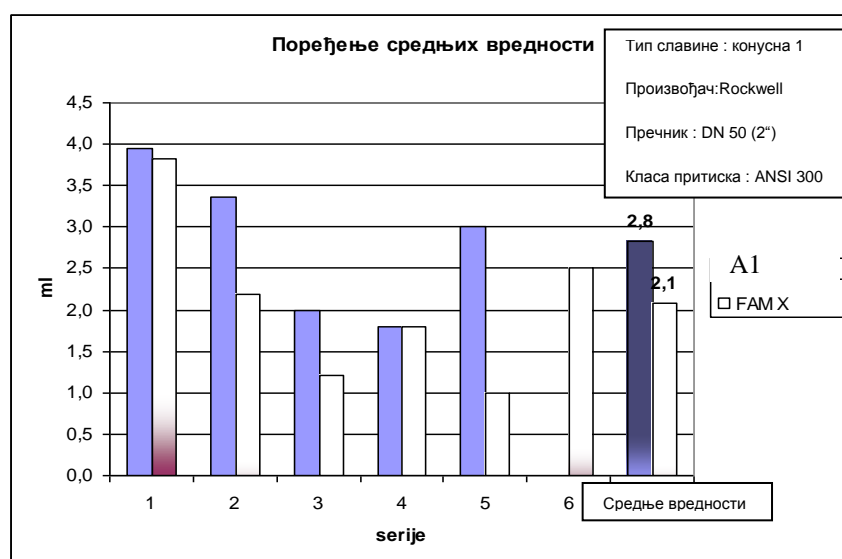
Као и у првој фази испитивања, тако је и у другој фази примењена методологија једнофакторног експеримента. Сагласно са тим, понављамо да су спољни фактори од интереса држани на константном нивоу и то;

- исто место извођења испитивања
- иста мазалица за убризгавање заптивног мазивног средства-мазива
- исто место- припремљени обилазни вод
- исти руковаоц
- исти испитни медијум – природни гас
- исте испитне конусне(чепасте) славине
- исто дотезање конусног клипа приликом сваке поновне монтаже
- исто се предпоставља да се ови фактори понашају као случајне величине са нормалном расподелом.

После сређивања и одбацивања екстремних вредности код еталон мазива А-1 средње вредности истекле количине у ml су дати у табели 7.5:

Табела 7.5 Истекле количине у ml

узорак	A1	FAM X
1	3,94	3,81
2	3,36	2,18
3	2,00	1,21
4	1,80	1,80
5	3,00	1,00
6		2,50
ср.вредност	2,82	2,085



Слика 7.7 Графички приказ вредности ЗМС

### 7.2.3 Постављање хипотезе

На основу до сада представљених података из експеримента, пречишћеним од екстремних вредности, као најмеродавнији тест који постављамо је хипотеза о једнакости средњих вредности ова два скупа (једнакости испитиваних својстава заптивних мазивних средстава) и изражавамо је као

$$H_0(\bar{x}_R = \bar{x}_F),$$

Тврдимо да не постоји разлика у средњим вредностима истеклих количина у ml (приликом отварања-затварања испитиване славине) до регистрованог пропуштања између ова два посматрана заптивна мазивна средства.

У том циљу користимо Студентову расподелу за случај малих узорака ( $n \leq 30$ ). Резултати статистике дати су у следећој табели 7.6 (обрађено у Excel-у), уз претпоставку да је  $\alpha = 0,01$ ; тј. 1% ризик

Табела 7.6 Резултати статистике

t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	A1	FAM X
Mean	2,821	2,085
Variance	0,826	1,042
Observations	5	6
Pooled Variance	0,946	
Hypothesized Mean Difference	<b>0</b>	
df	9	
<b>t Stat</b>	<b>1,249</b>	
P(T<=t) one-tail	0,121	
t Critical one-tail	2,821	
P(T<=t) two-tail	0,243	
<b>t Critical two-tail</b>	<b>3,2498</b>	

Идентични резултати су добијени и програмским пакетом Statistica 6.0  
(T-test for independent samples)

Табела 7.6а Т – тест за независне узорке

	Mean	Mean	t-value	df	p	Valid N	Valid N	Std.Dev.	Std.Dev.	F-ratio	p
FAM X vs.A1	2,085669	2,821616	-1,24924	9	0,243091	6	5	1,021141	0,908997	1,261962	0,845486

На основу добијених вредности за  $t=1,249$  и  $t_{\text{krit}}=3,250$  се закључује да је

$$t < t_{\text{krit}}$$

Чиме прихватамо хипотезу о једнакости средњих вредности  $H_0(\bar{x}_R = \bar{x}_F)$  са ризиком од 1% .

Од интереса је и следећи закључак, уколико се узме у разматрање средње вредности, тј.  $\bar{x}_R = 2,8$  и  $\bar{x}_F = 2,1$  упоредне измерене средње вредности укупног просека по заптивном мазивном средству, изражено у истеклој количини у ml (седма колона на графику) и изврши поређење просека ове две групе преко средњих вредности добија се да је однос средњих вредности  $\bar{x}_R / \bar{x}_F = 1,33$ , тј готово 33 % у корист FAM X.

Уколико овај резултат упоредимо са првом фазом експеримента, у лабораторијским условима, видимо да постоји добра корелација посматрајући средње вредности, с тим да су односи средњих вредности у нешто нижем проценту јер су испитивања спроведена у реалним условима и на притисцима распона 25-29 bar-a.

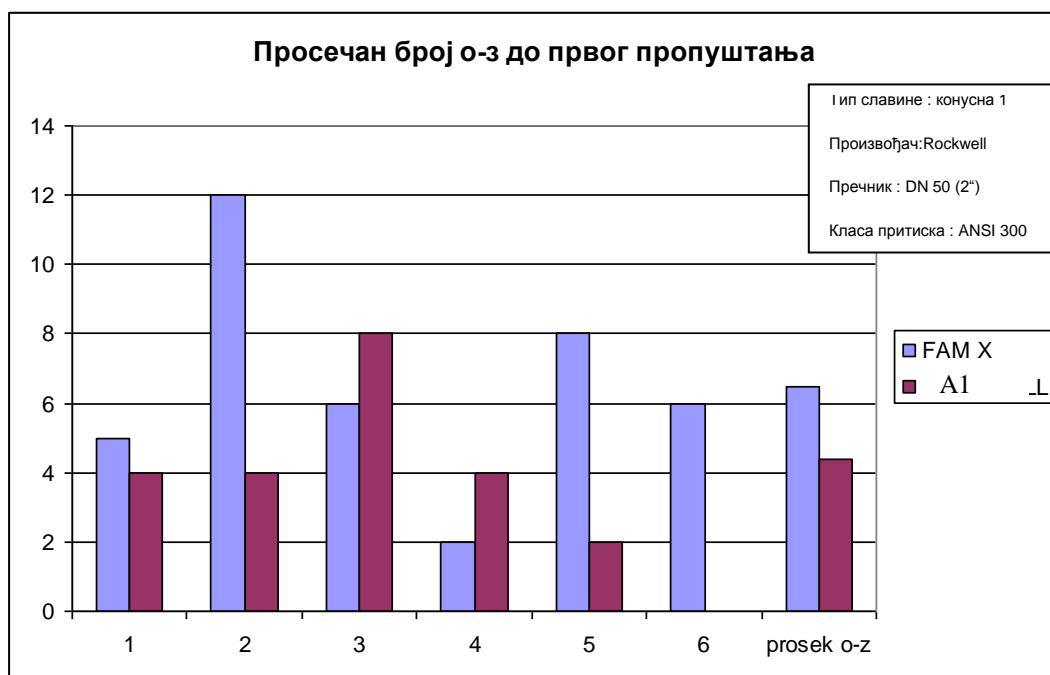
Још једна анализа се може направити на основу добијених експерименталних података.

У овој анализи посматраћемо број отварања-затварања до првог регистрованог пропуштања на оба заптивна мазивна средства.

У следећој табели 7.7 дат је број о-з до првог пропуштања са просеком:

Табела 7.7 Поређење вредности отварања-затварања до пропуштања

СЕРИЈЕ	FAM X	A1
1	5	4
2	12	4
3	6	8
4	2	4
5	8	2
6	6	-
просек о-з	6,5	4,4

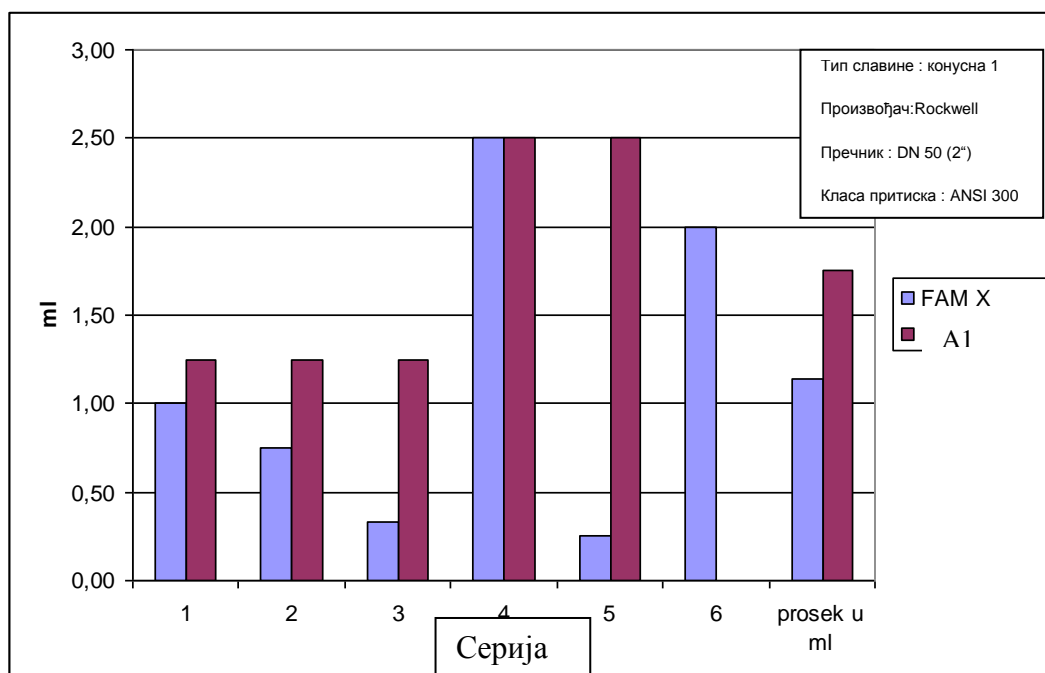


Слика 7.8 Графички приказ просечног броја о-з до првог пропуштања

Следећа табела 7.8 представља средње вредности пропуштених количина у ml

Табела 7.8 Пропуштене количине у ml

СЕРИЈЕ	FAM X	A1
1	1,00	1,25
2	0,75	1,25
3	0,33	1,25
4	2,50	2,50
5	0,25	2,50
6	2,00	-
Просек у ml	1,14	1,75



Слика 7.9

Из приложеног графика на слици 7.9 може се видети да је и просечно истекла количина до првог пропуштања приликом отварања – затварања мања код FAM X .

#### 7.2.4 Резултати испитивања код славина бр. 2 и бр. 3

Подаци:

Произвођач: Rockwell  
Пречник: (2<sup>“</sup>)-DN 50

Тип славине: конусна чепаста  
Класа притиска : ANSI 300

Славина бр. 2 је приликом испитивања са ФАМ X пропустила после 4 циклуса отварања-затварања, а потом после сваког циклуса на поновљених 15 циклуса.

Приликом коришћења мазива А1 код исте славине дошло је до пропуштања после једног циклуса о-з, а потом у следећих 12 понављања .

Славина бр. 3 је приликом испитивања са ФАМ X пропустила после првог циклуса о-з , а потом у следећих 15 поновљених.

Коришћењем мазива А1 на истој славини, регистровано је пропуштање после једног циклуса о-з, а потом у следећих 15 поновљених .

Даља испитивања на овим славинама нису рађена.

Напомена:

Славине бр.2 и бр. 3 су по свом стању, похабаности унутрашњих површина, створеним рисовима на чепу и телу славине биле у најлошијем стању, на шта су указивали и резултати испитивања у првој фази када су и при нивоу притиска од 6 bar-a, показивале најлошије резултате.

Но и поред тога, примењена мазива, еталон – А1 и ФАМ Х, успели су да и код оволиког оштећења належућих површина, по убризганом заптивном мазивом средству издрже, тј остваре непропусност на радном притиску од 25-30 bar-а.

### **7.2.5 Општа запажања**

Примењени експериментални поступак на реалним условима пружио је довољно квалитетних података о понашању изабраног домаћег ЗМС ФАМ Х и посматраног иностраног еталона А1 . На основу добијених експерименталних података могуће је извршити добру процену употребљивости и понашања ЗМС на реалним условима.

Примењена експериментална метода и поступак истраживања је прилог могућег обликовања експеримента у односу на стандардизоване методе.

Напомена : ФАМ Х = ФАМ 2

- Ознака ANSI 300 је ознака за класу притиска у гасно-нафтној привреди (англосаксонског порекла) и еквивалентна је максималном радном притиску од 50,6 bar-а
- ANSI 600 = 101 bar , максимални радни притисак



### 7.3 Испитивање триболошких карактеристика мазива на трибометру

Ради потпуног сагледавања понашања мазива и његовог утицаја на перформансе система врше се триболошка испитивања мазива. Триболошка испитивања омогућују одређивање карактеристика материјала (металних и неметалних) и мазива са енергетског аспекта (мерење силе трења и коефицијента трења) и са аспекта поузданости и века трајања (мерење хабања елемената трибосистема). Сврставају се у групу моделских испитивања којима се симулирају реални услови контакта.

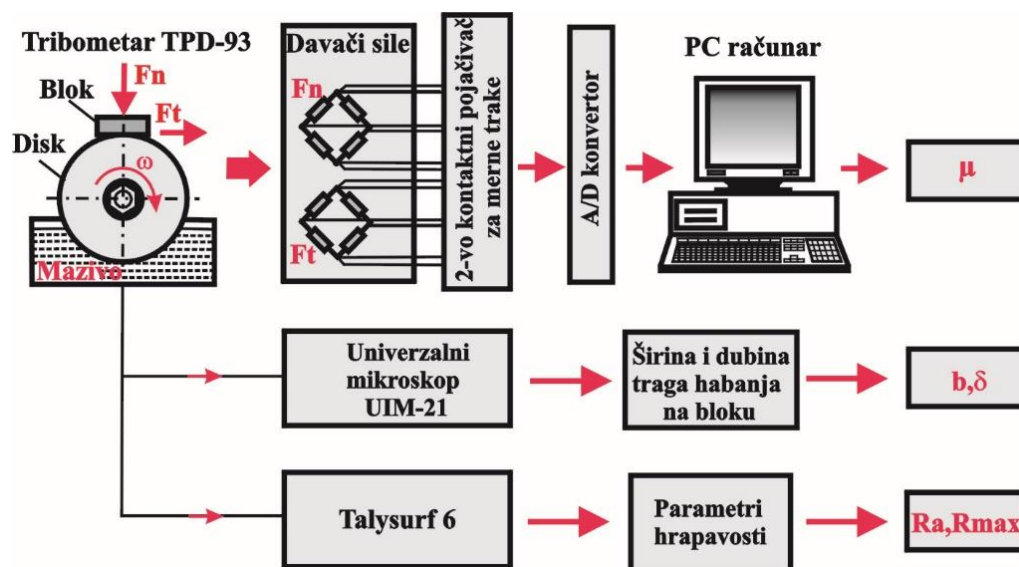
Одређивање триболошких карактеристика испитиваних мазива, у оквиру овог рада, вршено је у Лабораторији за обраду метала и трибологију Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

#### 7.3.1 Лабораторијска и мерна опрема

Приликом извођења експеримента који је обухватио мерење силе трења, коефицијента трења и параметара хабања коришћена је следећа лабораторијска и мерна опрема:

- Трибометар TPD-93,
- A/D конвертор,
- Појачавач – НВМ двоканални мерни мост KWS273.A2,
- РС рачунар 486 DX133MHz,
- Уређај за мерење хрпавости Talysurf (Taylor-Hobson),
- Универзални алатни микроскоп UIM-21.

На слици 7.10 приказан је мерни ланац триболошких испитивања коришћен при реализацији експеримента.



Слика 7.10 Мерни ланац триболошких испитивања коришћен при реализацији експеримента

**Трибометар TPD-93** развијен је у Центру за ревитализацију индустријских система тадашњег Машинског факултета у Крагујевцу, слика 7.11. Он омогућава остварење услова контакта у тачки („disk on disk“), по линији („pin on disk“) и по површини („block on disk“) са елементима различите геометрије. У свим наведеним случајевима контакт се може остварити са и без подмазивања. Трибометар је типа *"pin on disk"* или *"block on disk"*, с тим да се увођењем контактних елемената могу реализовати и други типови трибометара (нпр. *"block on ring"* итд.). Геометрија контактних парова може да буде различита, при чему се испитивање може вршити са подмазивањем и без подмазивања. Најчешћи облик подмазивања је урањање диска у уље, чиме се постиже захватање уља диском и формирање уљног филма ради граничног подмазивања.



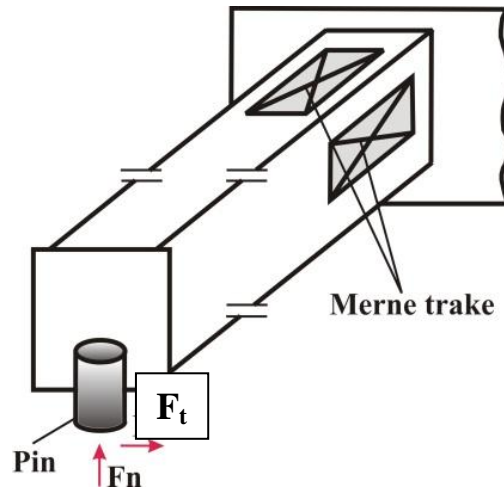
Слика 7.11 Трибометар TPD-93 са мерном и рачунарском опремом

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

Погонски систем чини електромотор са ременицама, каишем и варијатором. Главно вретено, у кога се поставља диск, је преко ременице и каиша повезано са електромотором снаге  $P=1,1$  KW. Могућа варијација броја обртаја је у распону од  $0\div 1400$  o/min. Главно вретено је улежиштено у кућишту двоструким радиоаксијалним улежиштењем. Систем за оптерећење помоћу тегова или навојним паром конципиран је тако да се може вршити избор жељеног оптерећења контактних парова у распону од 0 до 500 N. Систем за вођење је реализован помоћу линеарних ваљкастих лежаја, 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.

Динамометар, слика 7.12 је најзначајнији део трибометра. Он представља врсту полуге која омогућава мерење спољашњег оптерећења зоне контакта, односно нормалне силе  $F_n$  и

силе трења  $F_t$  путем давача силе који ради на принципу мерних трака везаних у пун Винстонов мост. Претходним преднапрезањем полуге врши се елиминисање утицаја тежине елемената.



Слика 7.12 Шема динамометра

Мерни сигнали са давача силе се појачавају уз помоћ двоканалног мерног моста (појачавача) типа НВМ КWS273.А2, до нивоа неопходног за улаз у А/D конвертор. Са А/D конвертора сигнал се преко RS 232 серијског порта уноси у рачунар снабдевен одговарајућим софтвером за мониторинг процеса.

Софтверска подршка обезбеђена је преко вишенаменског програмског пакета LABTECH CONTROLpro, која даје следеће могућности:

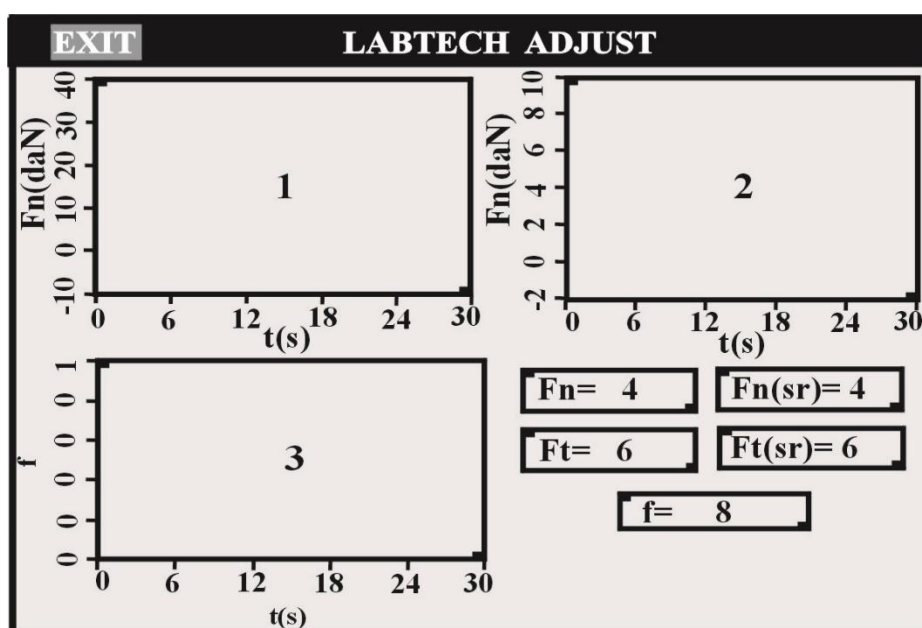
- прикупљање података са трибометра у току испитивања,
- приказивање вредности мерених величина у реалном времену на монитору рачунара током испитивања,
- (ауто)калибрацију физичких величина мерених на трибометру,
- креирање текстуалних датотека у којима се чувају резултати извршених мерења и
- приказ и/или штампање резултата мерења.

За време реализације испитивања помоћу софтвера се прикупљају подаци са А/D конвертора о вредности мерених величина (нормална и сила трења) у складу са дефинисаним условима у SETUP процедури. Програмски пакет даје могућност за формирање више канала за улаз података који представљају резултат одређених математичких операција између појединих канала. Ова могућност веома је погодна за филтрирање података и статистичку обраду, а нарочито долази до изражаја при аутоматском генерисању канала са подацима о коефицијенту трења у реалном времену, који су добијени дељењем дискретних вредности сила трења са одговарајућим дискретним вредностима нормалне силе.

„INPUT“ функција обезбеђује аутоматско одвијање трансформације низа A/D конверзијом дигитализованих података исказаних у волтима (V) у одговарајуће податке изражене конкретним физичким јединицама (N; °C). Ово се остварује одређивањем и уношењем калибрационих константи за сваки канал засебно.

Измерене вредности жељених параметара складиште се на хард диску рачунара у облику ASCII датотека.

Прегледно радно окружење (екран) представља још један од квалитета софтвера, слика 7.13, које својом поставком пружа могућност праћења, не само бројних вредности величина које се мере за време испитивања, већ даје и дијаграмску илустрацију нормалне силе, силе трења и коефицијента трења.



Слика 7.13 Радно окружење током испитивања

**Talysurf 6** је компјутеризовани мерни систем за мерење и анализу храпавости, који даје основне карактеристике микрогеометрије контактних површина слика 7.14 Идентификација промена стања на контактним површинама (*параметари топографије површине*) врши се мерењем параметара храпавости површине, реализованих управо на уређају Talysurf 6.



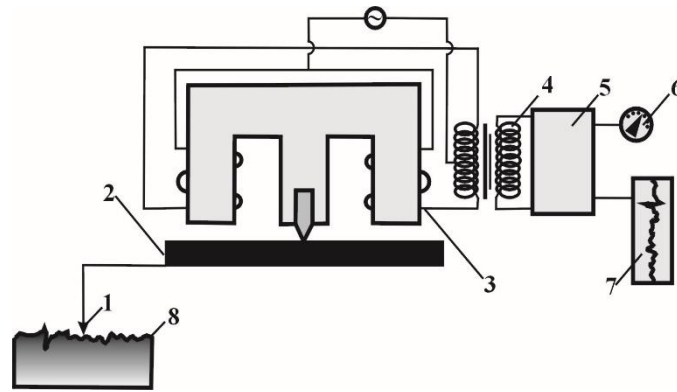
Слика 7.14 Уређај за мерење храпавости Talysurf 6

Уређај је повезан са компјутером и даје могућност комплексног дефинисања стања површина. Обезбеђује широк спектар могућности које се могу примењивати за:

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

Применом наведеног мерног система стиче се представа о променама микрогеометрије на испитиваној површини у различитим фазама хабања. На овај начин уређај се може искористити за идентификацију и квантификовање хабања које прелази ниво микрогеометрије. Овај мерни систем је преко паралелне везе LPT 1 повезан са рачунаром, чиме су омогућени снимање сигнала профила топографије површине на диск рачунара и даља обрада сигнала. На овај начин су проширене могућности уређаја Талусурф-6 и омогућена је графичка презентација резултата мерења коришћењем различитих софтвера.

Основу уређаја сачињава профилометар приказан на слици 7.15, који даје могућност читавања параметара храпавости или валовитости.



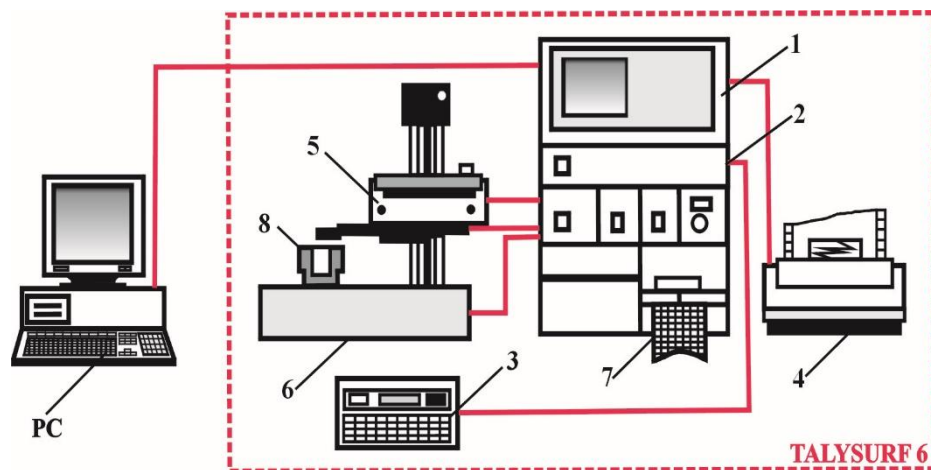
Слика 7.15 Шема профилометра

За време кретања дијамантске игле (1) по неравној површини, слика 7.15, игла додирује неравнине профила и осцилује при чему преноси те осцилације на котву (индуктивни давач) (2). Због осциловања котве долази до промене зазора између котве и система магнета састављеног од језгра (4) и калема (3). Ова промена изазива промену напона индуковане струје на излазу диференцијалног трансформатора (6). Образовани сигнал се помоћу појачивача смештеног у електричном блоку (7) појачава, трансформише и преноси на индикаторску јединицу (скала инструмента (8) и плотер (9)). Очитавање параметара храпавости врши се на екрану, штампа или записује на електротермичкој траци. Дијамантска игла се помера дуж површине помоћу електромотора.



Слика 7.16 Дијамантска игла профилометра

Уређај Talysurf је повезан са рачунаром и уз коришћење одговарајућег софтверског програма омогућава, поред осталог, смештај података у одговарајуће датотеке. Шематски приказ основних компоненти уређаја Talysurf дат је на слици 7.17.



Слика 7.17 Мерни систем за аквизицију података

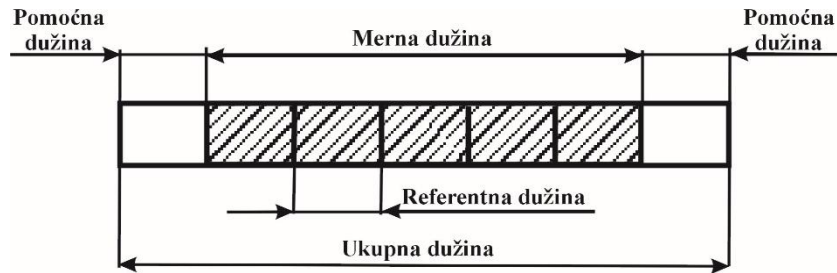
Talysurf 6 сачињавају следећи елементи, слика 7.17:

- (1) процесор TALYDATA 2000 са видео јединицом,
- (2) појачивач,
- (3) тастатура са уграђеним принтером,
- (4) спољашњи принтер (плотер),
- (5) 120 mm траверзна јединица,
- (6) постолје са лењиром за вертикална померања,
- (7) линеарни писач и
- (8) помоћни прибор.

TALYDATA 2000 процесор (1) садржи програме за генерисање сигнала, израчунавање и приказивање параметара, контролисање траверзе (5) и омогућује везу са спољашњим уређајем-принтером (4). Наведена веза се остварује путем серијског RS 232 порта, што је искоришћено за повезивање са PC рачунаром.

Персонални рачунар је припојен са модулом PS SICOMP16 са радним тактом процесора од 12 MHz. За време снимања површине добијени аналогни сигнал се путем уграђеног AD конвертора преводи у дигитални сигнал. У системском ROM-у процесора TALYDATA 2000 постоји софтвер за обраду снимљеног сигнала. Подаци добијени обрадом сигнала у виду математичких вредности се шаљу путем порта RS 232 до плотера (4), где се исцртава профил. Вредности које се добију се након тога шаљу до PC рачунара, где се обрађују софтвером развијеним на катедри за Производно машинство Факултета инжењерских наука у Крагујевцу.

Мерење параметара храпавости и валовитости врши се на пет референтних дужина, што представља мерну дужину. Укупна дужина садржи и две помоћне дужине које служе за израчунавање размере и додатна израчунавања, слика 7.18. Референтна дужина садржи 230 референтних тачака, што значи да мерна дужина има 1150 тачака. То значи да датотеке које се формирају путем наведеног софтвера имају по 1150 тачака.



Слика 7.18 Однос мерне и укупне дужине снимања

**Универзални микроскоп UIM-21**, слика 7.19, коришћен је за *мерење ширине и трага хабања на контактної површини*, као и за анализу добијених резултата. Том приликом врши се упоређивање вредности промене висине површине која се хаба, а у односу на неку установљену референтну основу. Мера промене висине (дубине) површине која се хаба у односу на ту основу представља линијски интензитет хабања. За референтну основу коришћен је део површине који се не хаба, а налази се непосредно уз похабану површину.

Наком мерења ширине трага хабања на блоку, дубина трага хабања се израчунава рачунским путем изразом:

$$\delta = \frac{D - \sqrt{D^2 - 4(b/2)^2}}{2} \quad (7.1)$$

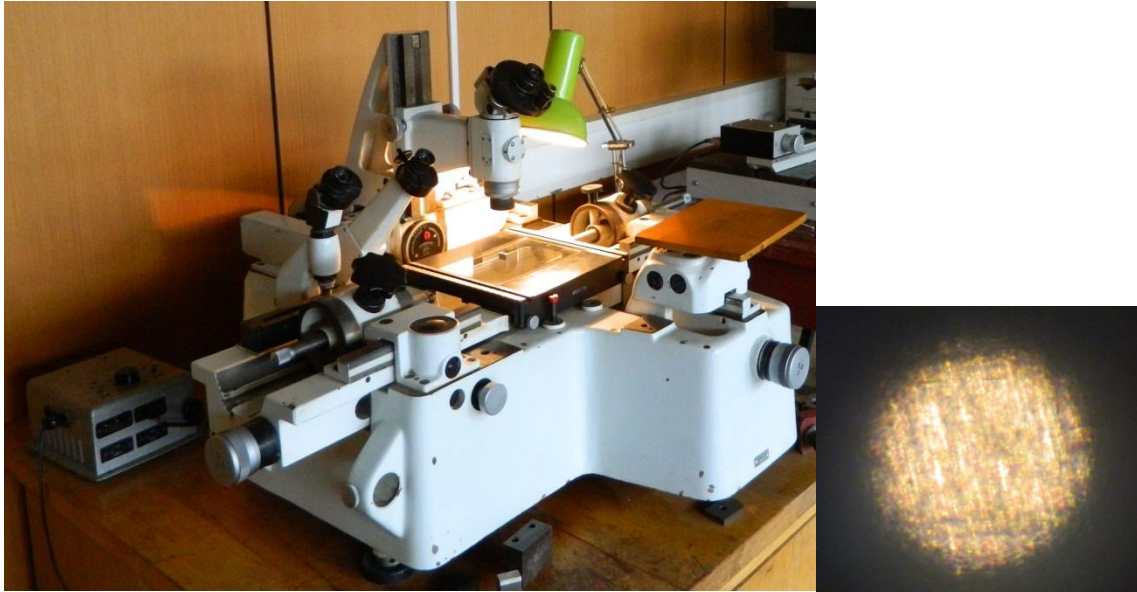
где су:

$\delta$  - дубина трага хабања на блоку

$D$  - пречник диска

$b$  - ширина трага хабања на блоку





Слика 7.19 Универзални микроскоп УИМ-21 са изгледом површине блока

По извршеном одређивању дубине хабања, применом раније описаног мерног система, реализовано је снимање профила похабане површине, а промене висине (дубине) површине која се хаба у односу на ту основу представља линијски интензитет хабања. На тај начин се добија и визуелна представа о величини похабаног дела контактних елемената.[извор: Лабораторија за обраду метала и трибологију, Ф.И.Н. Крагујевац]

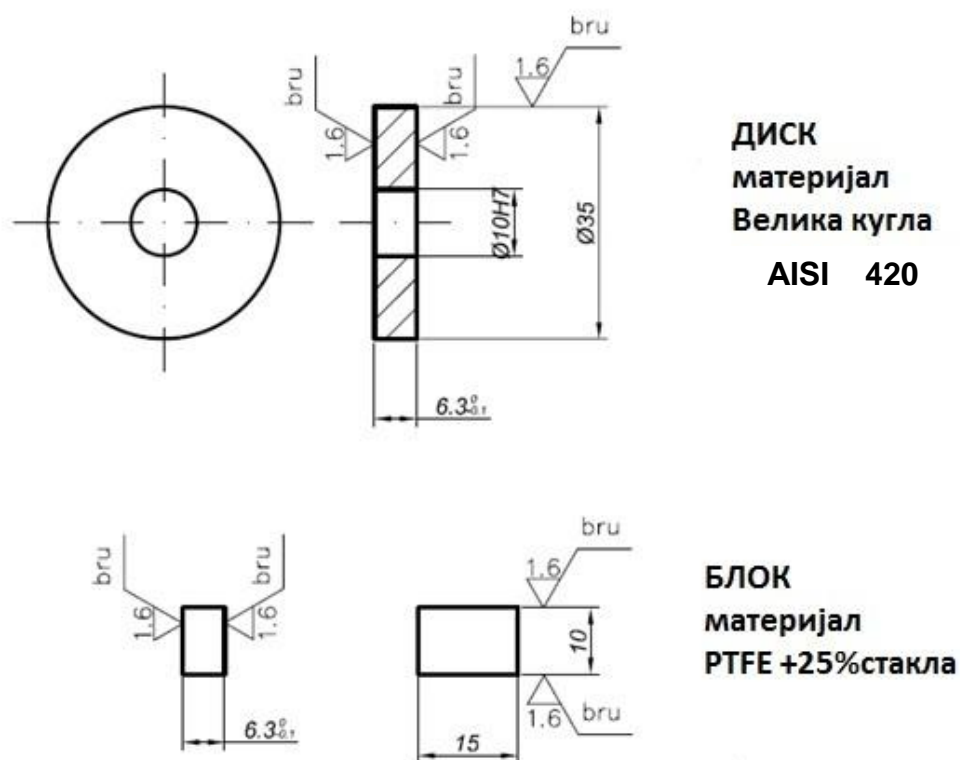
### 7.3.2 Услови триболошких испитивања

Пре триболошких испитивања треба одредити услове испитивања, односно дефинисати материјале контактних парова, нормално оптерећење, брзину клизања, начин подмазивања, геометрију контакта и време испитивања. Пре почетка испитивања мере се параметари топографије дискова и блокова ради провере њихове храпавости. Уколико храпавост неког елемента значајно одступа од осталих, он се поновно бруси или се изоставља из испитивања.

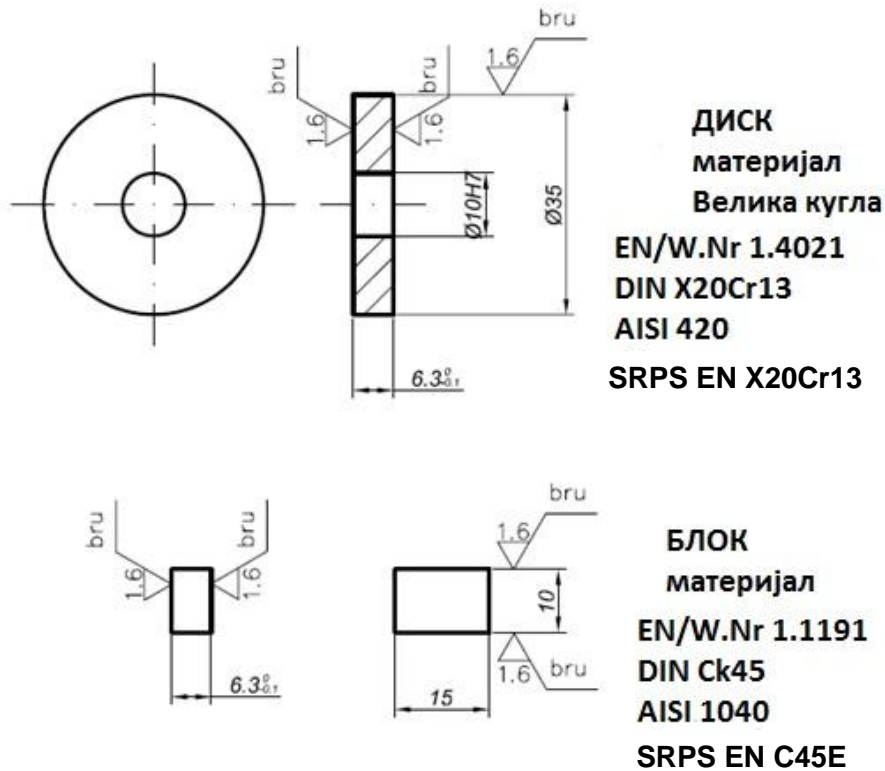
Триболошким испитивањима типа „block on disk“ подвргнута су три узорка мазива и два трибо - пара . Подмазивање је вршено проласком доњег дела диска кроз резервоар са мазивом за подмазивање, тако да је диск захватао одређену количину мазива и вршио гранично подмазивање контакта. Између површине блока и обимне површине диска оствариван је линијски контакт. Специјална конструкција носача блока обезбеђује у сваком тренутку потпуно налагање блока целом дужином контакта.

Укупно време трајања испитивања, брзине клизања, оптерећења и др. је дефинисано код сваке серије експеримената. Извршено је четири серије експерименталних мерења.

Материјал дискова и блокова је приказана на сликама 7.20 и 7.21



Слика 7.20 Геометрија диска и блока



Слика 7.21. Геометрија диска и блока

Основни показатељ триболошких својстава материјала је промена коефицијента трења у току времена. Ради добијања што јасније слике о самом карактеру коефицијента трења у појединим временским интервалима, вредности коефицијента трења евидентиране су сваке 2 секунде. На тај начин добија се информација о динамици самог процеса који се одвија на трибометру.

## 7.4 Услови експеримента

Узорци који су кориштени у експерименту узети су са арматуре-славина, које су биле у експлоатационој употреби 20-25 година на систему Србијагаса. Разлог узимања узорка који су били у експлоатационој употреби је добијање што реалније слике о понашању приликом триболошких испитивања, јер су прошле период уходавања и ефектуирања материјала од којег су израђене.

### 7.4.1 Материјали узорка

Механичке и физичко – хемијске карактеристике одабраних материјала су наведене на основу извештаја самих произвођача (каталожке и техничке документације) и експерименталних метода.

Материјал за израду кугле, кугласте славине AISI 420 са следећим карактеристикама хемијског састава и механичким особинама, табела 7.9.

Табела 7.9 Хемијски састав и механичке особине AISI 420

C%	Si%	Mn%	Cr%	P%	S%	Затезна чврстоћа Rm	Граница течења Re
0,15	Max 1	Max 1	12-14	0.04max	0,03max	650-800 МПа	450 МПа

(Мартензитни челик)

Материјал за израду заптивног прстена кугле, при додиру метал-метал је

AISI 1040, еквивалент EN/W. Nr 1.1191, DIN Ck45, SRPS EN C45E (Ћ.1531)

Табела 7.10 Хемијски састав и механичке особине AISI 1040

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%	Затезна чврстоћа Rm	Граница течења Re
0,42-0,50	0,40	0,50-0,80	0,035	0,035	0,40	0,10	0,40	650-800 МПа	430 МПа

AISI 1040 је челик за побољшање, користи се искључиво у побољшаном стању а просечна вредност тврдоће у окаљеном стању је до 58 HRC. Примењује се како у побољшаном тако и у нормализованом стању. Отпоран је према хабању, посебно после каљења и нитрирања. [41,42,43]

Материјал за израду чепа, чепасте славине је ASTM A216 WCB са следећим карактеристикама хемијског састава и механичким особинама, табела 7.11

Табела 7.11 Хемијски састав и механичке особине ASTM A216 WCB

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%	Затезна чврстоћа Rm	Граница течења Re
0,30 max	0,60 max	0,7 max	0,04 max	0,045 max	0,5 max	0,20 max	0,50 max	485-655 MPa	250 MPa

(Нормализован ливени челик)

Карактеристике изабраних материјала трибо парова су дати у наставку.

Материјал диска : EN/W.Nr 1.4021, DIN X20Cr13, AISI 420, SRPS EN X20Cr13(Č.4172), табела 7.12.

Табела 7.12 Хемијски састав и механичке особине

C%	Si%	Mn%	Cr%	Ni%	Mo%	Затезна чврстоћа Rm	Граница течења Re
0,20	Max 1	Max 1	13,5	-	-	650-800 MPa	450 MPa

Напомена: механичка својства су у побољшаном стању

SRPS EN X20Cr13 је високолегирани хром нерђајући челик који се користи за одговорне конструкционе елементе, тако и за нерђајуће алате од којих се захтева висока тврдоћа и **отпорност према хабању**. Отпоран је према води, воденој пари и различитим киселинама у фино брушеном стању или полираном стању, као и према масним киселинама до 150 °C [41,42,43] .

Особине термопластичног материјала PTFE (политетрафлуоретилен) за блокове дате су у табели 7.13

Табела 7.13 Физичко-механичке и термичке особине PTFE

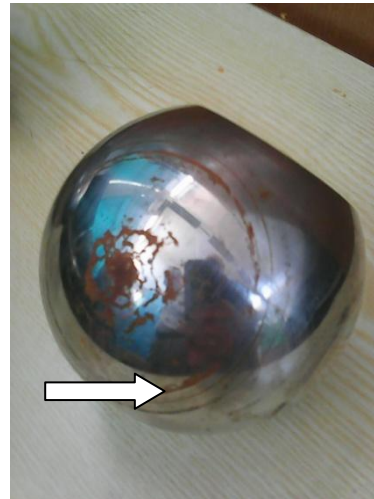
Politetrafluoretilen (PTFE)							
Svojstva	Jedinica mere	Metoda	PTFE	PTFE + 15% staklene faze	PTFE + 25% staklene faze	PTFE + 15% grafita	PTFE + 60% bronzе
Gustina	g/cm <sup>3</sup>	ASIM 1457– 81	2,17	2,21	2,24	2,17	3,90
Prekidna jačina	N/mm <sup>2</sup>	ASIM 1457– 81	30	22	14	16	19
Prekidno izduženje	%	ASIM 1457– 81	450	300	250	160	100
Tvrdoća utiskivanjem kugle	N/mm <sup>2</sup>	ASIM 1457– 81	–	–	31	32	42
Deformacija pod opterećenjem 14 N/mm <sup>2</sup> , 100h, 23°C	%	ASIM D621–69	10–12	–	7–14	7	5
Toplotna provodljivost	$\frac{W}{mk}$	DIN 52612	0,2–0,4	0,4	0,35	0,93	0,7
Termički koeficijent linearnog širenja	K <sup>-1</sup>	DIN 52328	1,1 · 10 <sup>-4</sup>	1,0 · 10 <sup>-4</sup>	1,0 · 10 <sup>-4</sup>	1,1 · 10 <sup>-4</sup>	0,7 · 10 <sup>-4</sup>
Temperaturna oblast primene	stalna	°C	–	–200 ÷ +260			
	kratkotrajna			+280			

#### 7.4.2 Изглед одабраних узорака за припрему елемената експеримента

На сликама 7.22 и 7.23 види се узорак кугле са дејством абразије и хабања. Остале слике (7.24-7.32) приказују изглед кугласте славине, належућих површина и заптивних прстенова.



Слика 7.22 Изглед кугле и дејства абразије



Слика 7.23 Трагови хабања услед заптивања



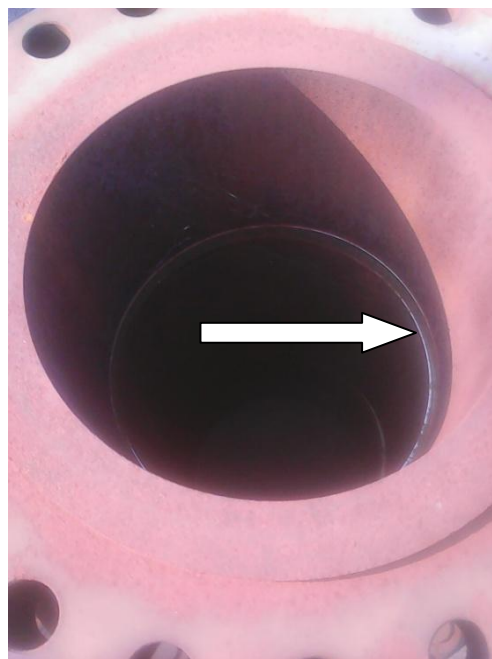
Слика 7.24 Изглед належућих површина  
кугласте славине



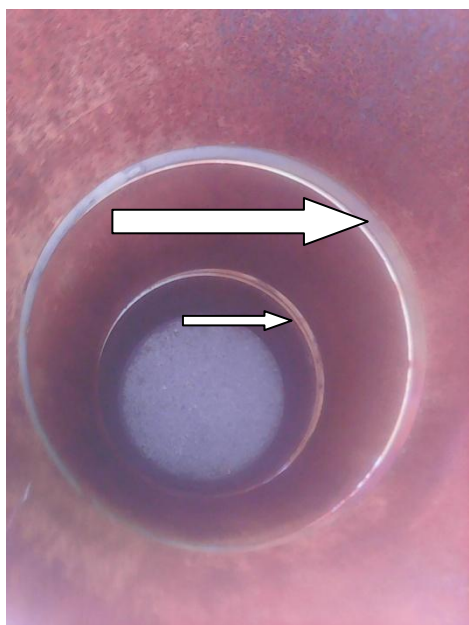
Слика 7.25 Изглед расклопљене  
кугласте славине и належућих површина



Слика 7.26 Изглед дводелне кугласте славине



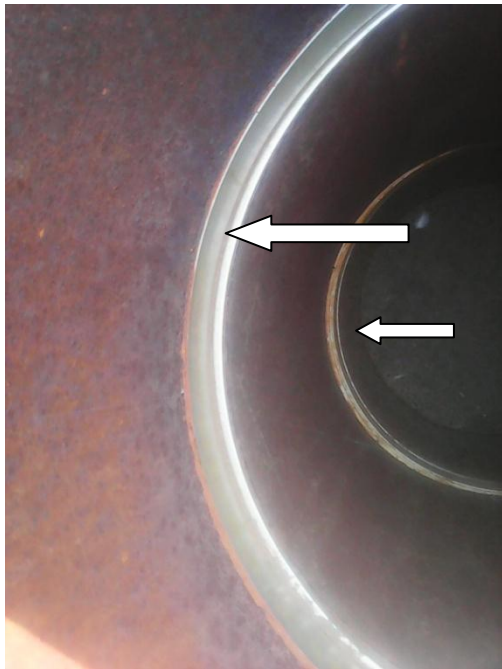
Слика 7.27 Изглед унутрашњости тела славине



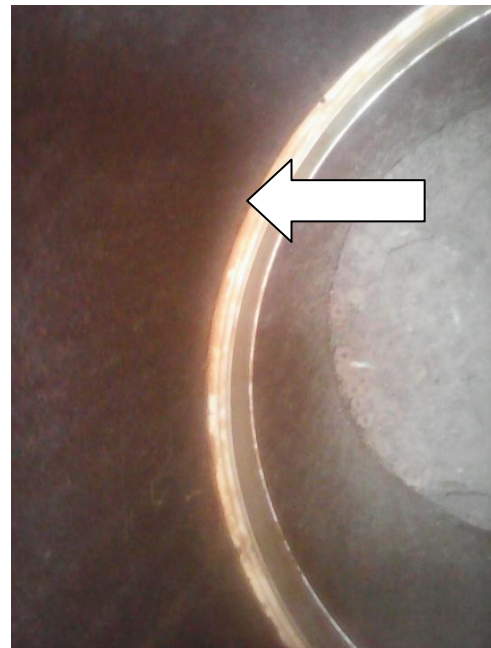
Слика 7.28 Видљиви заптивни прстенови кугласте славине



Слика 7.29 Тело славине



Слика 7.30 Изглед заптивних прстенова



Слика 7.31 Увећани део дела метала кугле, тела славине и заптивног прстена PTFE (изгубљена геометрија контакта услед процеса експлоатације)



Слика 7.32 Изглед славине пречника 12 colla и класе притиска ANSI 600 са мазалицом за убризгавање ЗМС



### *7.4.3 Припрема и обрада изабраних узорака са заменским материјалима за трибо-механички систем диск и блок*

На сликама 7.33 и 7.34 приказан је изглед извађеног дела конусне чепасте славине а на слици 7.35 је изглед унутрашњости чепасте подмазиве славине



Слика 7.33 Чеп славине



Слика 7.34 Чеп славине



Слика 7.35 Унутрашњост чепасте славине

На сликама 7.36 и 7.37 види се пресек тела узорка кугле, кугласте славине као и израда дискова из истог материјала



Слика 7.36 Пресек узорка кугле, кугласте славине



Слика 7.37 Поступак израде дискова од одабраног материјала кугле из експлоатације

На сликама 7.38 и 7.39 види се припрема материјала, кугласте славине и чепа за израду потребних трибо парова.



Слика 7.38 Елементи чепасте и кугласте славине у припреми



Слика 7.39 Елементи чепа и кугле



Слика 7.40 Изглед дискова од кугласте славине



Слика 7.41 Заменски материјал

На сликама 7.40 и 7.41 обрађени дискови од материјала кугле и заменског материјала SRPS ENX20Cr13

На слици 7.42 приказана је израда блокова од заменског материјала SRPS EN C45E



Слика 7.42 Израда блокова



Слика 7.43 Изглед блока и диска заменског материјала



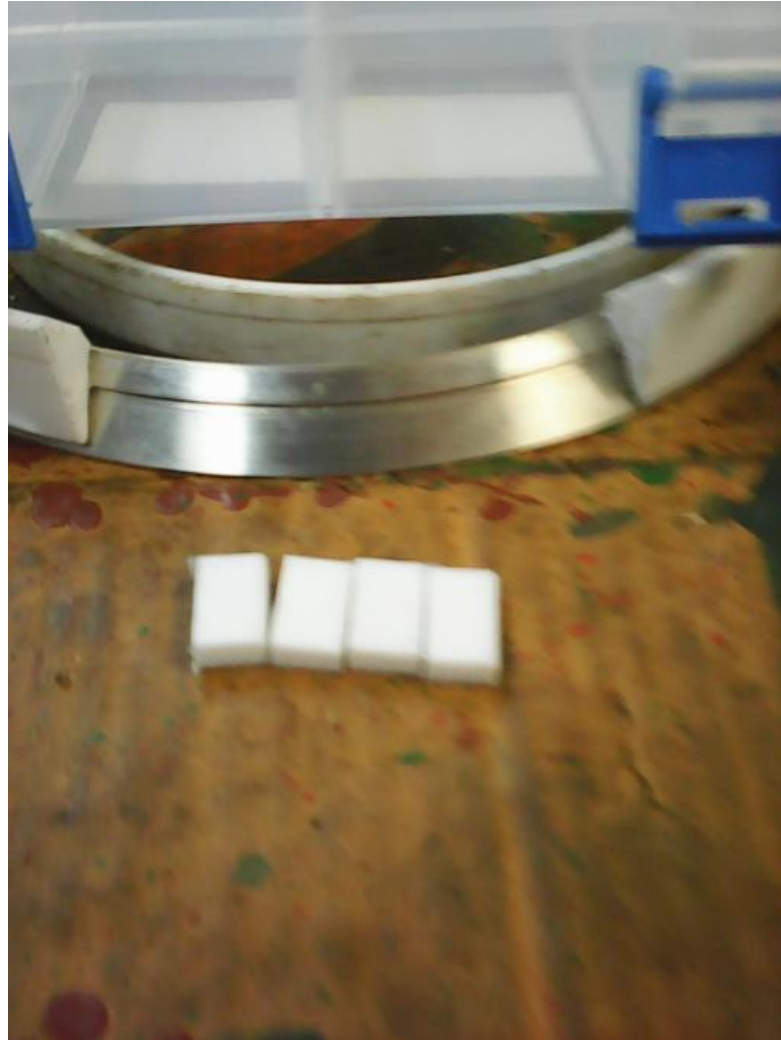
Слика 7.44 Изглед заптивних прстенова



Слика 7.45 Заптивни прстен

На сликама 7.44 и 7.45 приказан је изглед оригиналних заптивних прстенова скинутих са кугластих славина 12 и 8 colla (1 coll = 25,4 mm).

На слици 7.46 Приказана је израда блокова од РТФЕ за трибо парове од оригиналног прстена кугласте славине

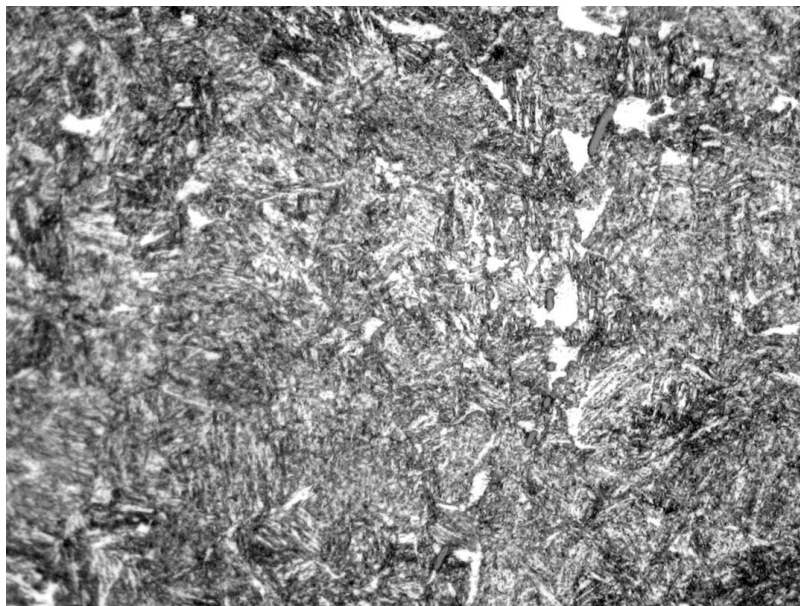


Слика 7.46 Изглед блокова израђених од оригиналног материјала заптивног прстена

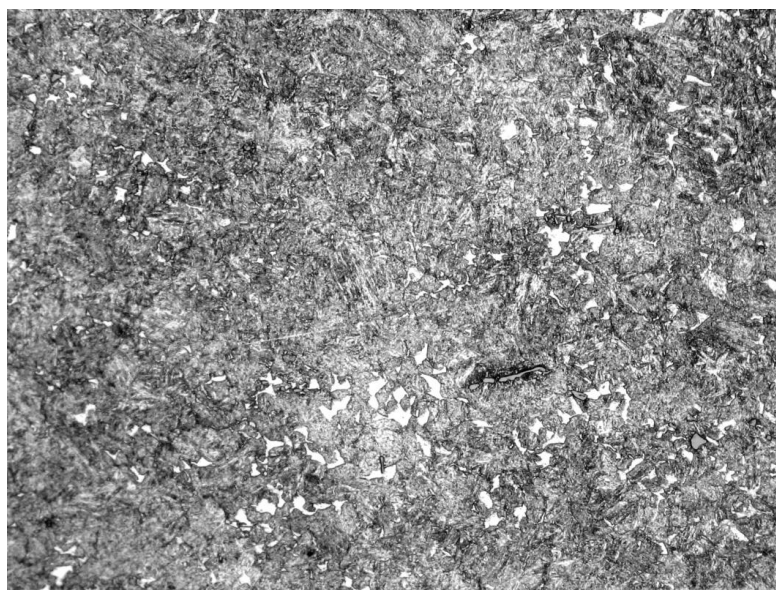
#### 7.4.4 Металографски снимци узорака

На сликама које следе, виде се металографски снимци коришћених узорака и заменских материјала за извођење експеримента са својом структурном основом. Снимци су урађени на микроскопу Orthoplan - Ernst Leitz увећања од 20-500 пута.

Металографски снимак узорка конусне-чепасте славине материјала ASTM A216 WCB, приказано је на сликама 7.47 и 7.48 где се види феритно – перлитна структура са већим садржајем перлита.

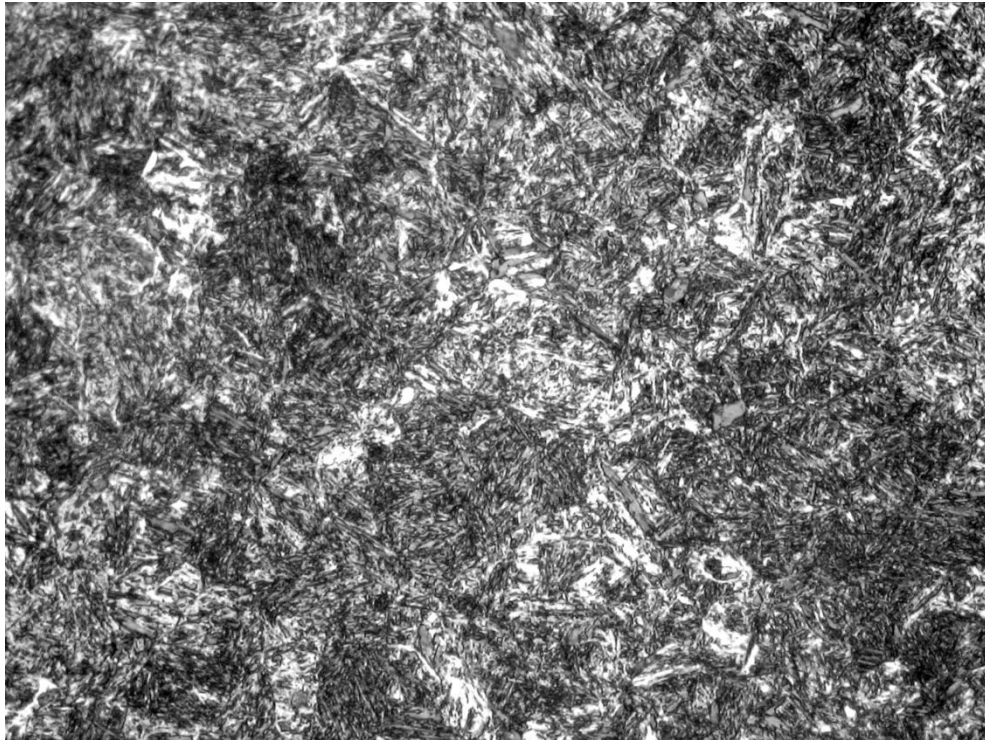


Слика 7.47 ASTM A216 WCB, увећање 500 x, нагрижено нитал-ом

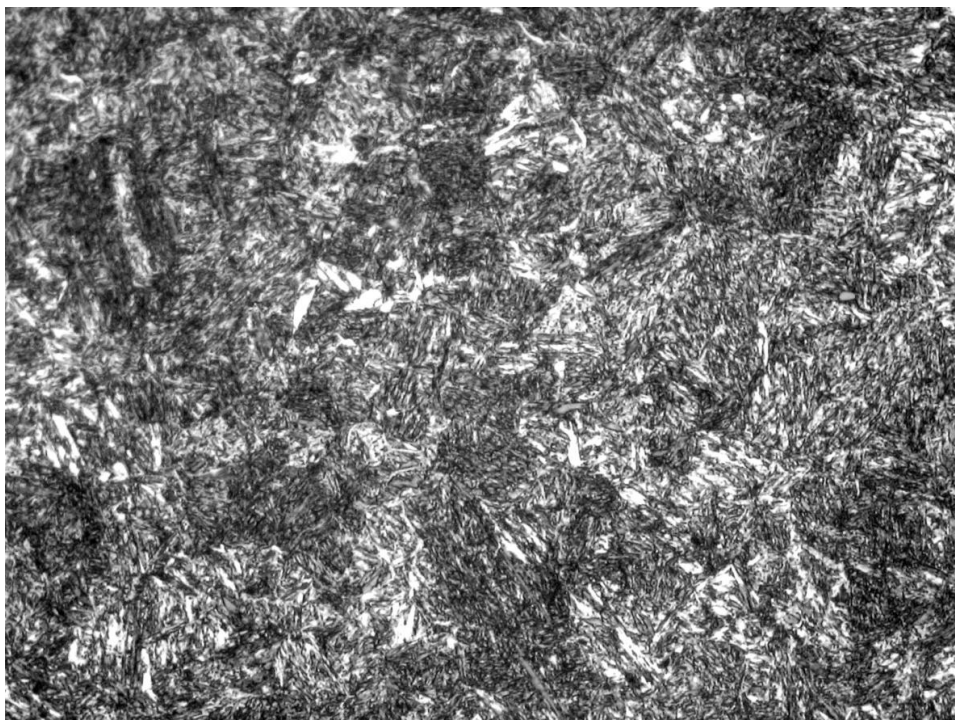


7.48 ASTM A216 WCB увећање 200x, нагрижено нитал-ом

Металографски снимак материјала SRPS EN C45E (побољшан) приказан је на сликама 7.49 и 7.50. На слици 7.49 и 7.50 види се структура после каљења .

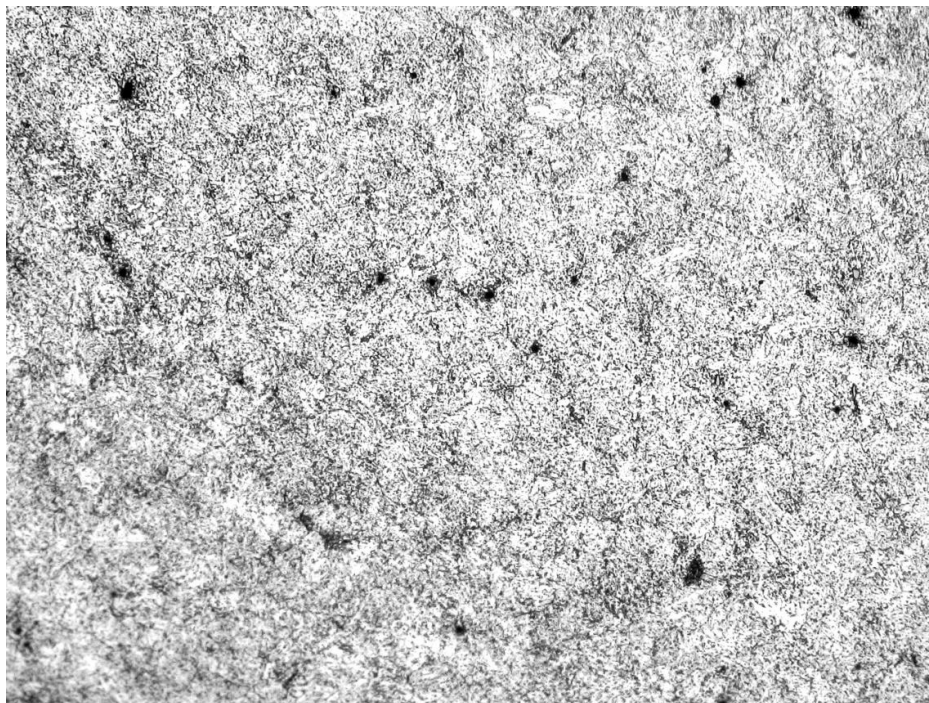


Слика 7.49 SRPS EN C45E увећање 200x, нагрижено нитал-ом

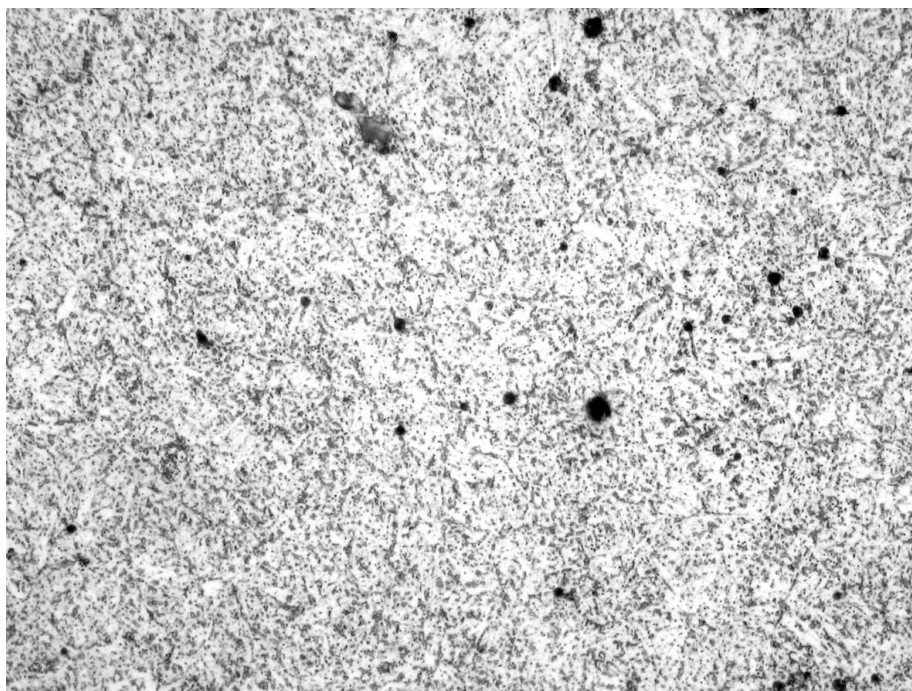


Слика 7.50 SRPS EN C45E увећање 500 x, нагрижено нитал-ом

Металографски снимак материјала SRPS EN X20Cr13 је приказан на сликама 7.51 и 7.52. На сликама се види мартензитна структура са ~ 13% Сг а укључци су ниског процента С и других хемијских елемената који су слабо уочљиви.



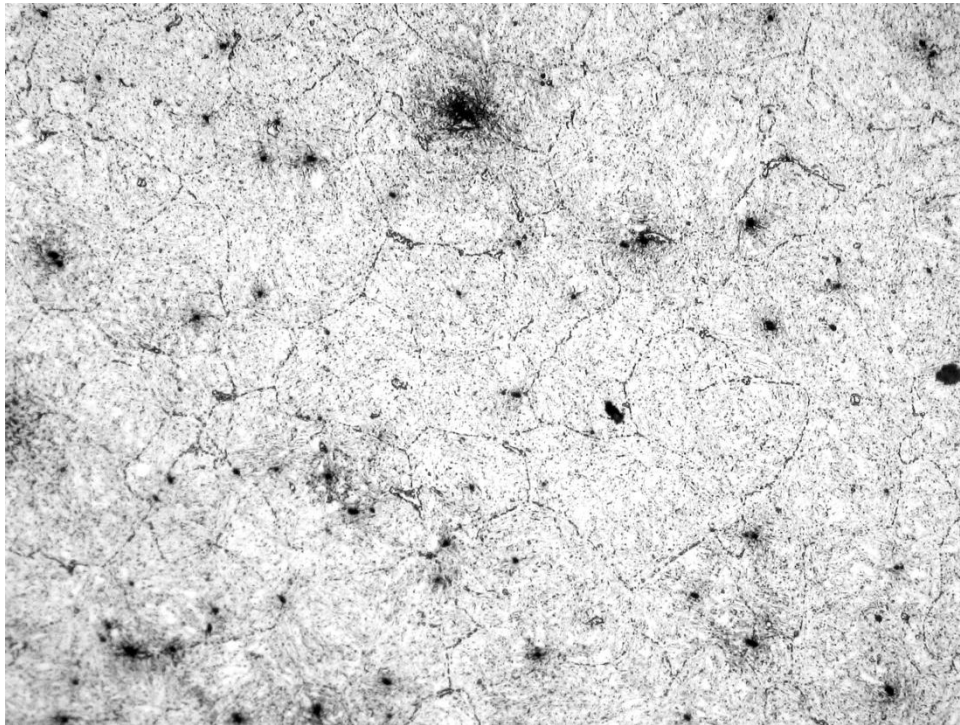
Слика 7.51 SRPS EN X20Cr13 увећање 200х, нагрижено царском водом



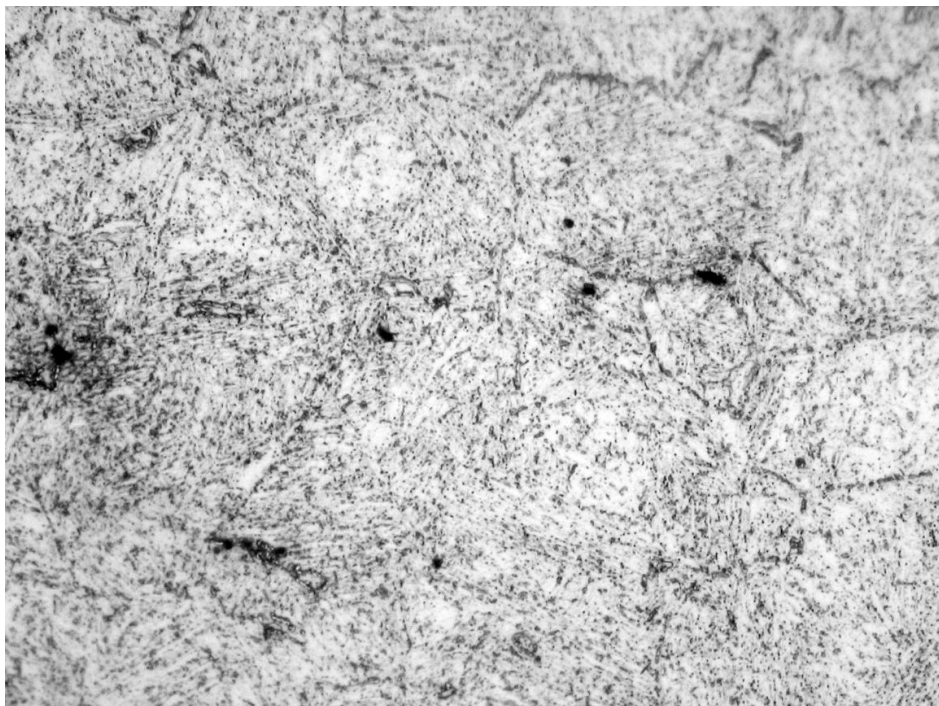
Слика 7.52 SRPS EN X20Cr13 увећање 500 х, нагрижено царском водом



Металографски снимак материјала кугле AISI 420 приказан је на сликама 7.53 и 7.54 где се може уочити готово идентична структурна основа као и код SRPS EN X20Cr13.



Слика 7.53 AISI 420 увећање 200x, нагрижено царском водом



Слика 7.54 AISI 420 увећање 500 x, нагрижено царском водом

Измерене тврдоће узорака Rokvelovom методом утискивања купе су:

Измерене вредности:

- на челу, ASTM A 216 WCB: средње вредности 28 HRC
- SRPS EN C45E : средње вредности 56 HRC
- SRPS EN X20Cr13 :средње вредности 26, HRC
- Кугла, AISI 420 : средње вредности 28 HRC

## 8. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ ТРИБОЛОШКИХ ИСПИТИВАЊА

У овом поглављу приказани су резултати експерименталних испитивања добијени у Лабораторији за обраду метала и трибологију Факултета инжењерских наука у Крагујевцу. Приказани су експериментални податаци из четири серије експеримената са материјалима који су припремљени и описани у поглављу 7.3 и 7.4. Испред сваке серије експеримената дати су услови под којима су вршена испитивања, типови материјала и мазива .

### 8.1 Резултати прве серије испитивања

Прво испитивање ове серије обухватило је одређивање коефицијента трења трибо пара „блок (PTFE) –диск (велика кугла AISI 420)“ уз примену мазива ФАМ 2. Током испитивања мерена је брзина клизања и нормално оптерећење. Добијени резултати приказани су на дијаграмима слика 8.1 – 8.4.

Услови извођења експеримента прве серије били су :

Врста мазива : маст ФАМ 2, произвођач ФАМ Крушевац

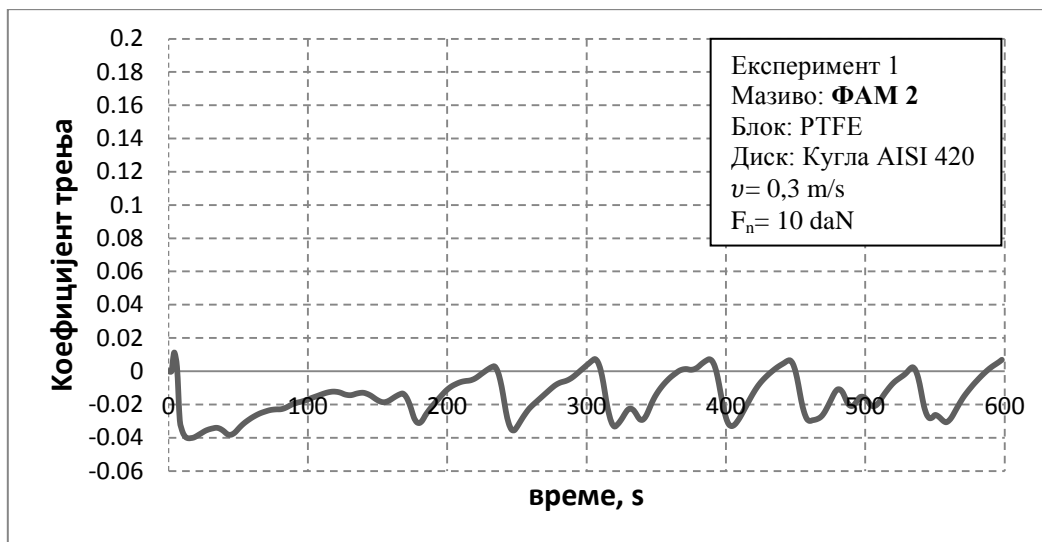
Блок : Политетрафлуоретилен –PTFE

Диск: Велика кугла-ВК, материјал AISI 420

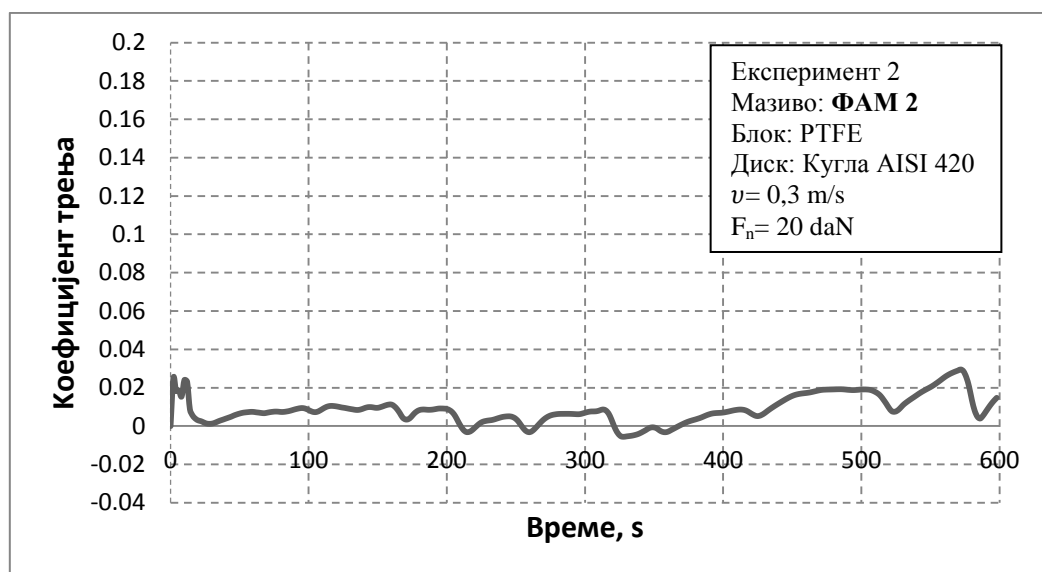
Нормално оптерећење :  $F_n = 10 \text{ daN}, 20 \text{ daN}$  (1daN=10N)

Време испитивања :  $t=10 \text{ min}$

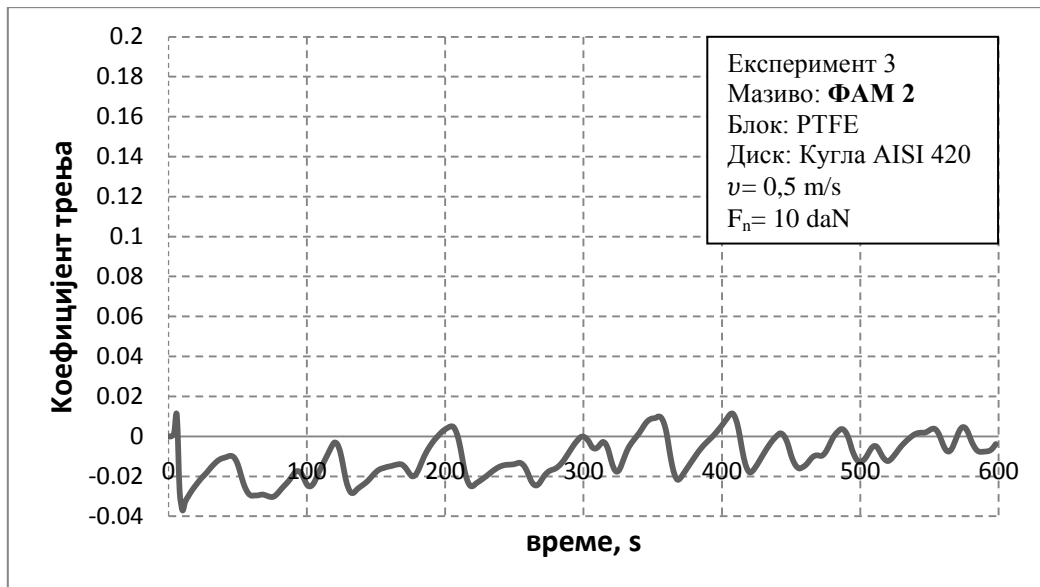
Вредности брзине клизања :  $v=0,3 \text{ m/s}, 0,5 \text{ m/s}$



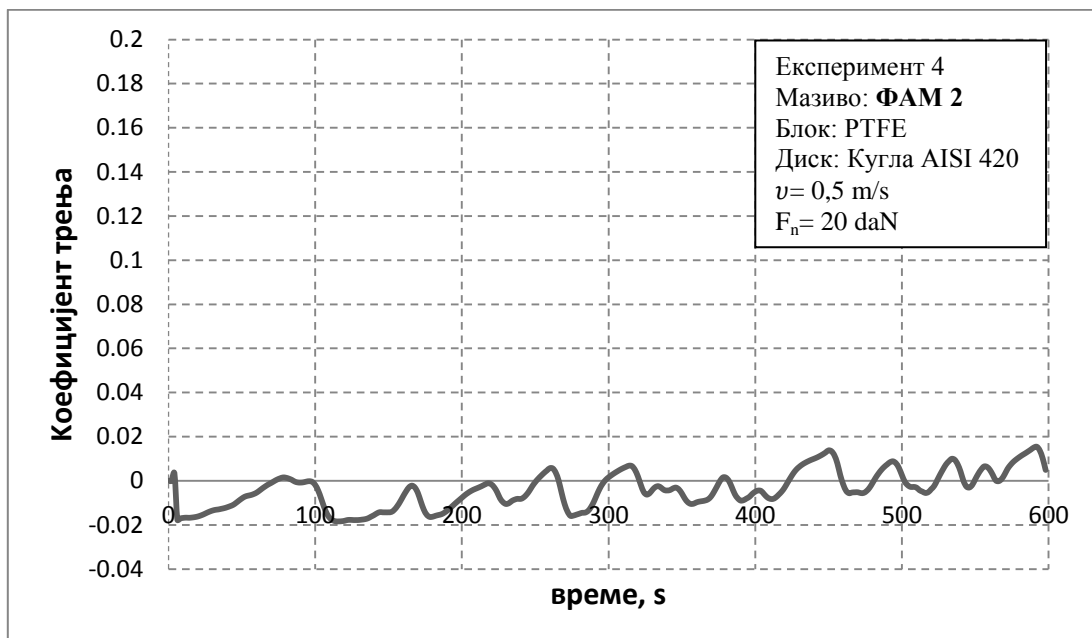
Слика 8.1 Коефицијент трења у зависности од времена испитивања ( $v = 0,3 \text{ m/s}$  и  $F_n = 10 \text{ daN}$ )



Слика 8.2 Коефицијент трења у зависности од времена испитивања ( $v = 0,3 \text{ m/s}$  и  $F_n = 20 \text{ daN}$ )



Слика 8.3 Коефицијент трења у зависности од времена испитивања

 $(v = 0,5 \text{ m/s}$  и  $F_n = 10 \text{ daN}$ )

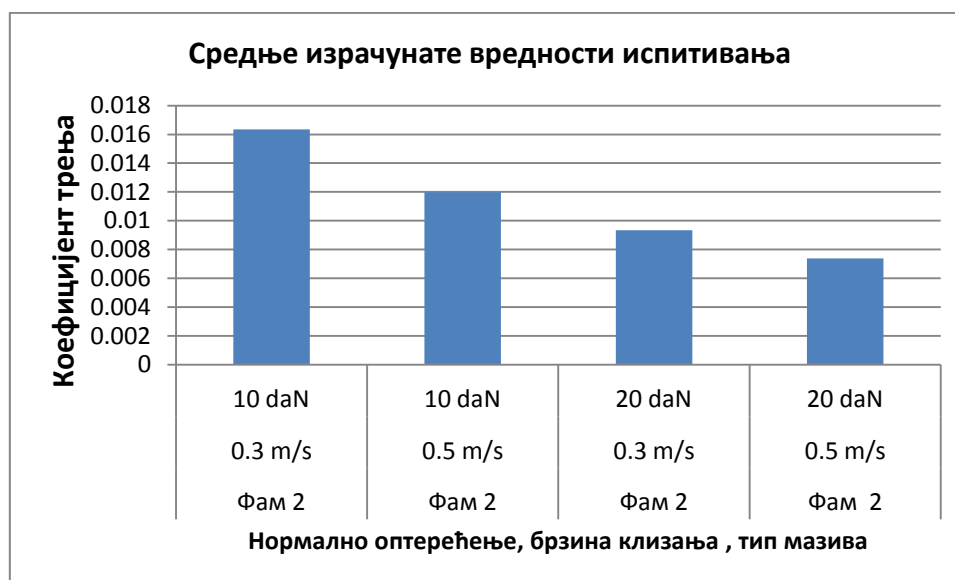
Слика 8.4 Коефицијент трења у зависности од времена испитивања

 $(v = 0,5 \text{ m/s}$  и  $F_n = 20 \text{ daN}$ )

Табеларни приказ брзина клизања, нормалног оптерећења и просечне вредности - „израчунате вредности“ коефицијента трења током првог испитивања уз мазиво ФАМ 2 и трибо пара ; блок – РТФЕ и диска – кугле АИСИ 420, приказан је у табели 8.1. Графички приказ ових вредности приказан је на дијаграму 8.1.

Табела 8.1 Средње – израчунате вредности коефицијента трења за дате услове испитивања

Мазиво	ФАМ 2	ФАМ 2	ФАМ 2	ФАМ 2
Брзине клизања	0.3 m/s	0.5 m/s	0.3 m/s	0.5 m/s
Нормално оптерећење	10 daN	10 daN	20 daN	20 daN
Средња вредност коефицијента трења	0.01635	0.011981	0.009349	0.007387



Дијаграм 8.1 Средње вредности коефицијента трења добијене прерачунавањем измерених вредности

Напомена око начина израчунавања коефицијента трења

Мазиво се услед велике густине и велике адхезионе прионљивости на диск нагомилавала на блок непосредно до контакта, тешко је пролазила између истих и мерну конзолу са блоком потискивала уназад-супротно од правца обртања диска. Из тих разлога је мерна апаратура регистровала „негативни коефицијент трења“.

У овим дијаграмима коефицијент трења треба заменити другим називом-„израчунатом вредности“ као количник између мерене силе која оптерећује носач блока у правцу брзине клизања и нормалног оптерећења  $F_n$ .

Због ове појаве на мерној апаратури, а у циљу одмеравања добијених средњих вредности током ове серије испитивања, извршено је дељење на сегменте добијених вредности криве која је у негативном подручју, а њено приказивање је изражено као апсолутна вредност одмерених вредности како би се добила мера за „коэффициент трења“, која, гледано са физичког аспекта не може бити негативна.

У наставку испитивања, одређени су коэфиицијенти трења, али уз коришћење мазива ФАМ 3, слика 8.5 – 8.8. Средње израчунате вредности коэфиицијента трења дати су у табели 8.2 и дијаграма 8.2.

Услови извођења експеримента друге серије били су :

Врста мазива : маст ФАМ 3, произвођач ФАМ Крушевац

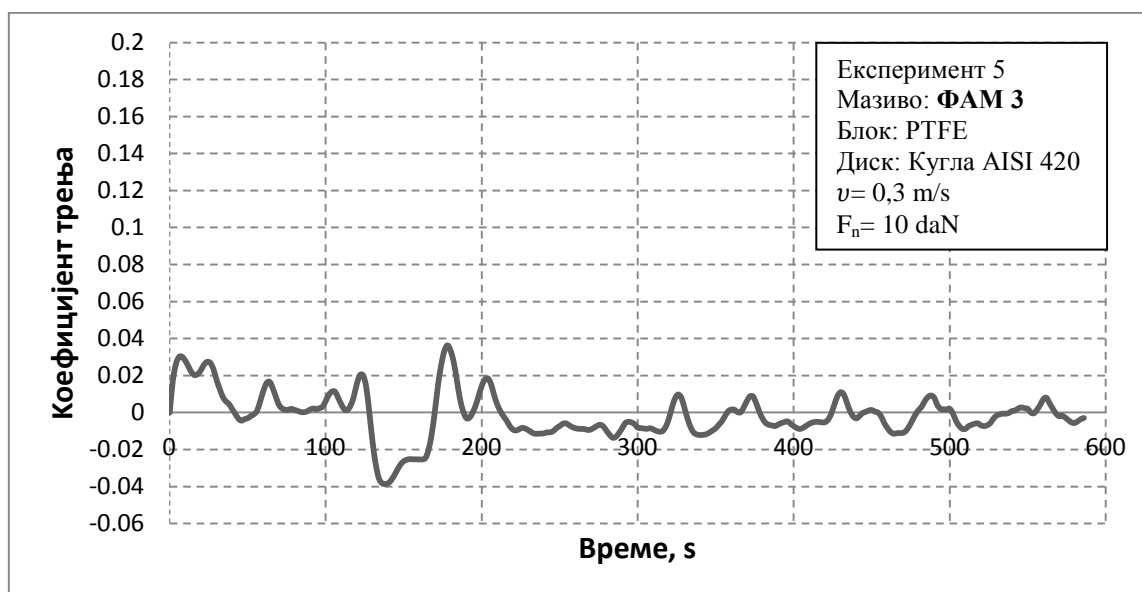
Блок : Политетрафлуоретилен –PTFE

Диск: Велика кугла-ВК, материјал AISI 420

Нормално оптерећење :  $F_n = 10 \text{ daN}, 20 \text{ daN}$  (1daN=10N)

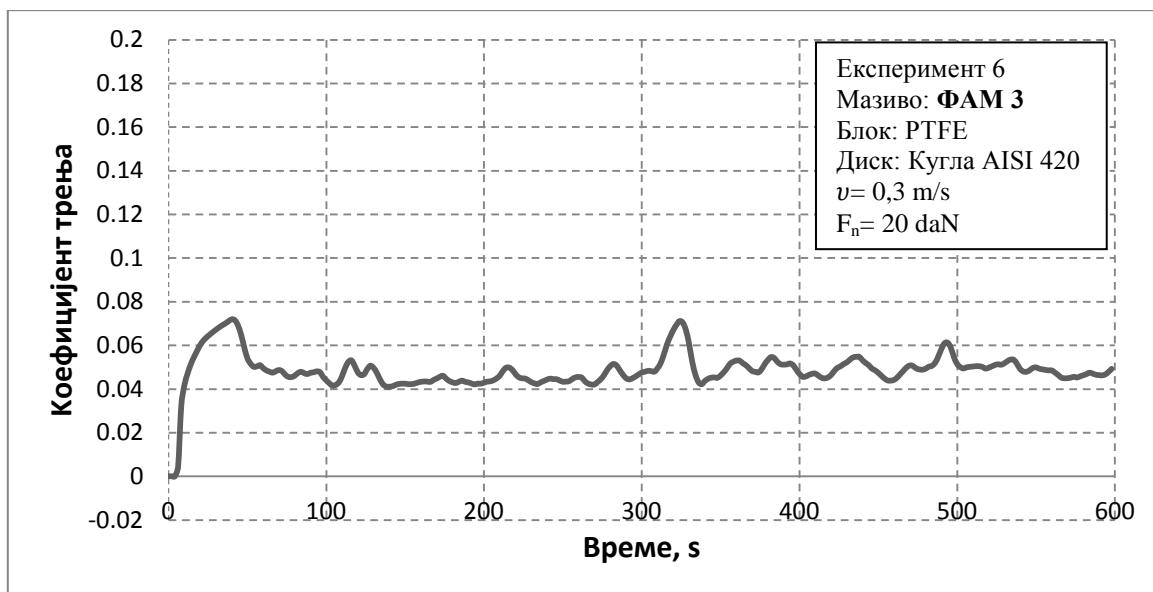
Време испитивања :  $t=10 \text{ min}$

Вредности брзине клизања :  $v=0,3 \text{ m/s}, 0,5 \text{ m/s}$

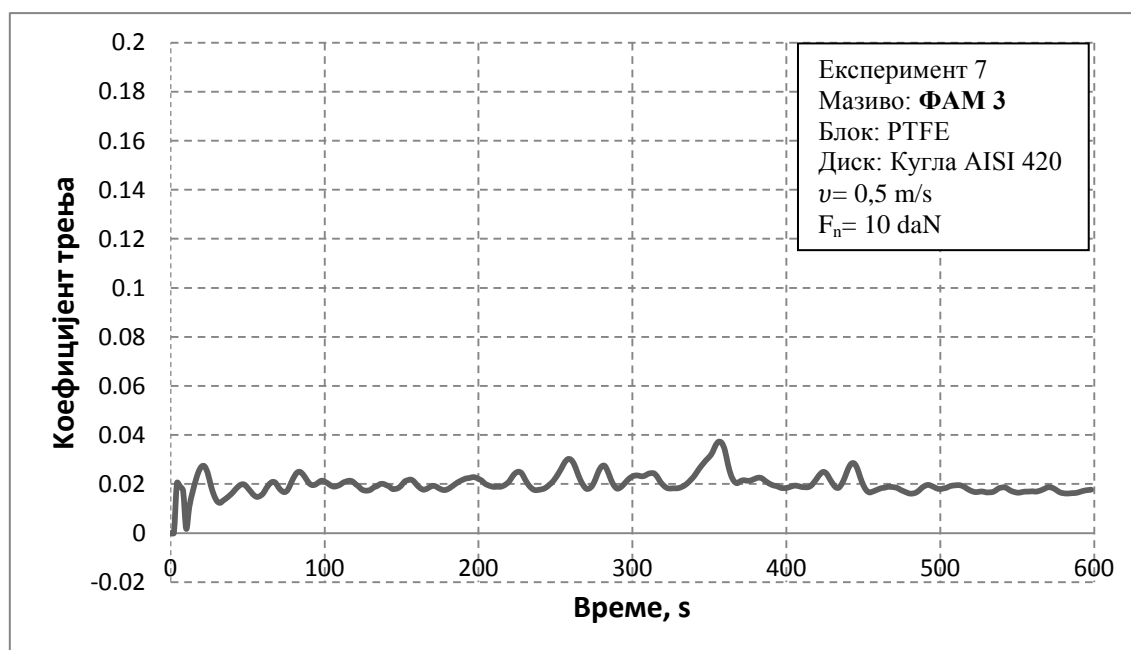


Слика 8.5 Коэффициент трења у зависности од времена испитивања,

( $v = 0,3 \text{ m/s}$  и  $F_n = 10 \text{ daN}$ )

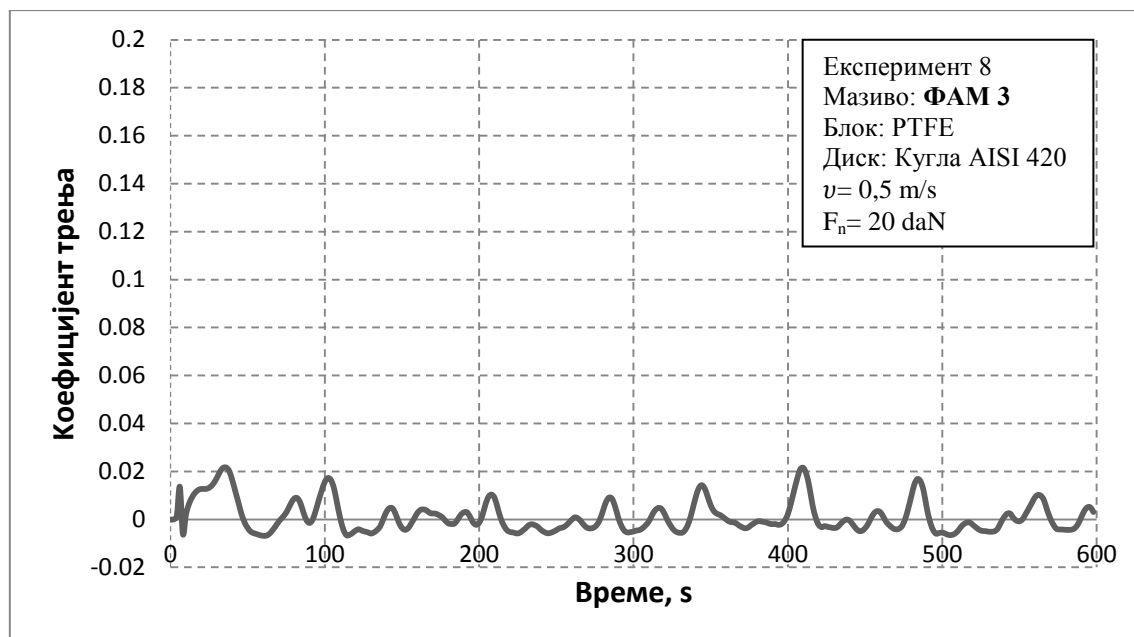


Слика 8.6 Коефицијент трења у зависности од времена испитивања,  
( $v = 0,3 \text{ m/s}$  и  $F_n = 20 \text{ daN}$ )



Слика 8.7 Коефицијент трења у зависности од времена испитивања,  
( $v = 0,5 \text{ m/s}$  и  $F_n = 10 \text{ daN}$ )

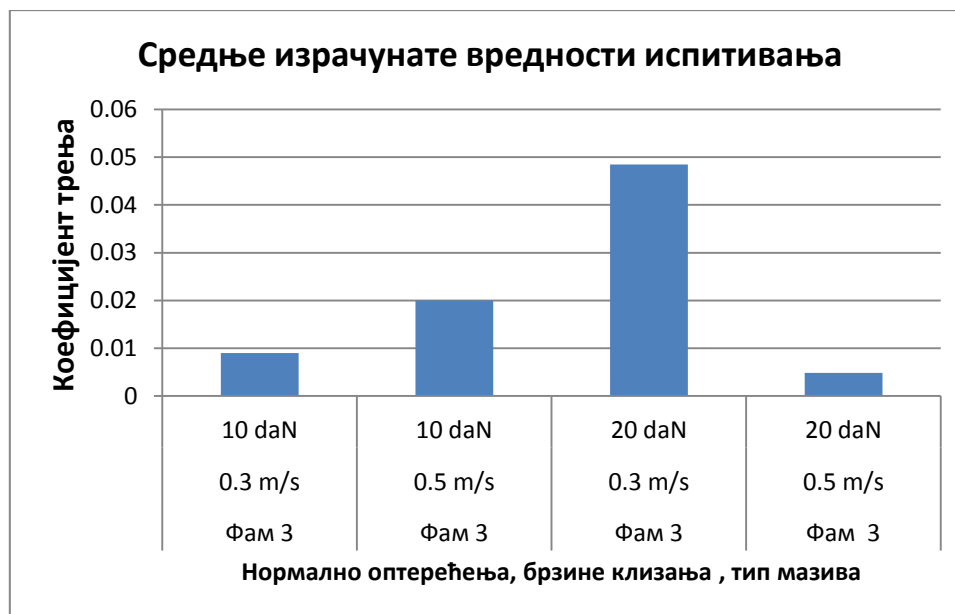




Слика 8.8. Коэффициент трења у зависности од времена испитивања,  
( $v = 0,5 \text{ m/s}$  и  $F_n = 20 \text{ daN}$ )

Табела 8.2. Средње –израчунате вредности коэффицијента трења за дате услове испитивања

Мазиво	ФАМ 3	ФАМ 3	ФАМ 3	ФАМ 3
Брзине клизања	0.3 m/s	0.5 m/s	0.3 m/s	0.5 m/s
Нормално оптерећење	10 daN	10 daN	20 daN	20 daN
Средња вредност коэффицијента трења	0.009021	0.020024	0.048457	0.00483



Дијаграм 8.2 Средње вредности коефицијента трења добијене прерачунавањем измерених вредности

Исти поступак је примењен и у овом случају за криве коефицијента трења у негативном подручју, као и начин израчунавања средњих вредности.

У наставку испитивања, одређени су коефицијенти трења, али уз коришћење мазива А 1, слика 8.9 – 8.12. Средње израчунате вредности коефицијента трења дати су у табели 8.3 и дијаграма 8.3.

Услови извођења експеримента треће серије били су :

Врста мазива : маст А 1, инострани произвођач

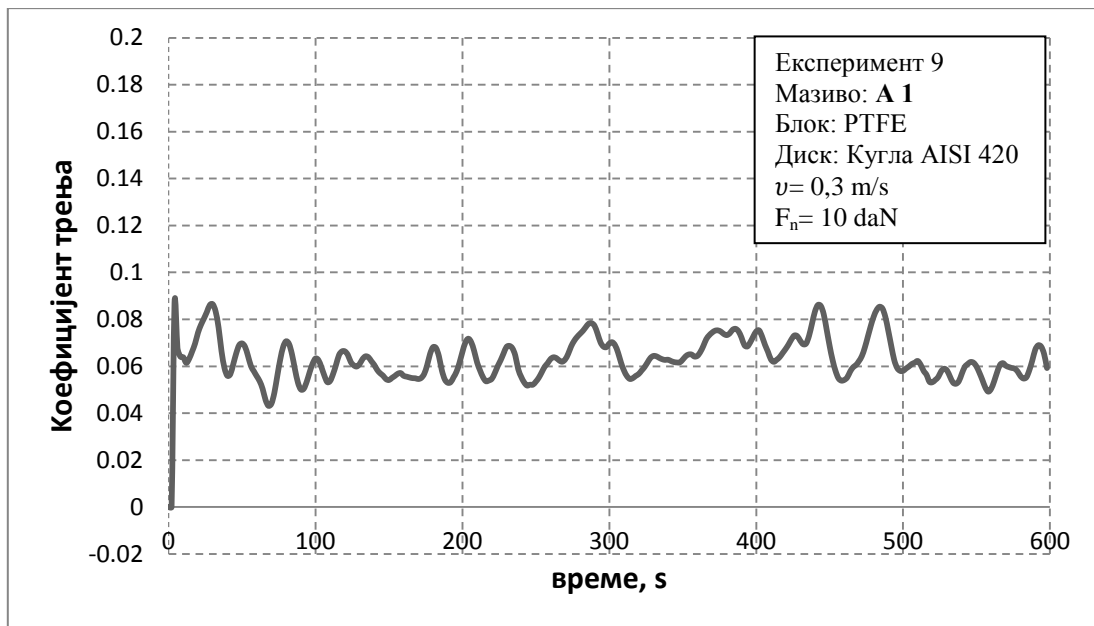
Блок : Политетрафлуоретилен –PTFE

Диск: Велика кугла-ВК, материјал AISI 420

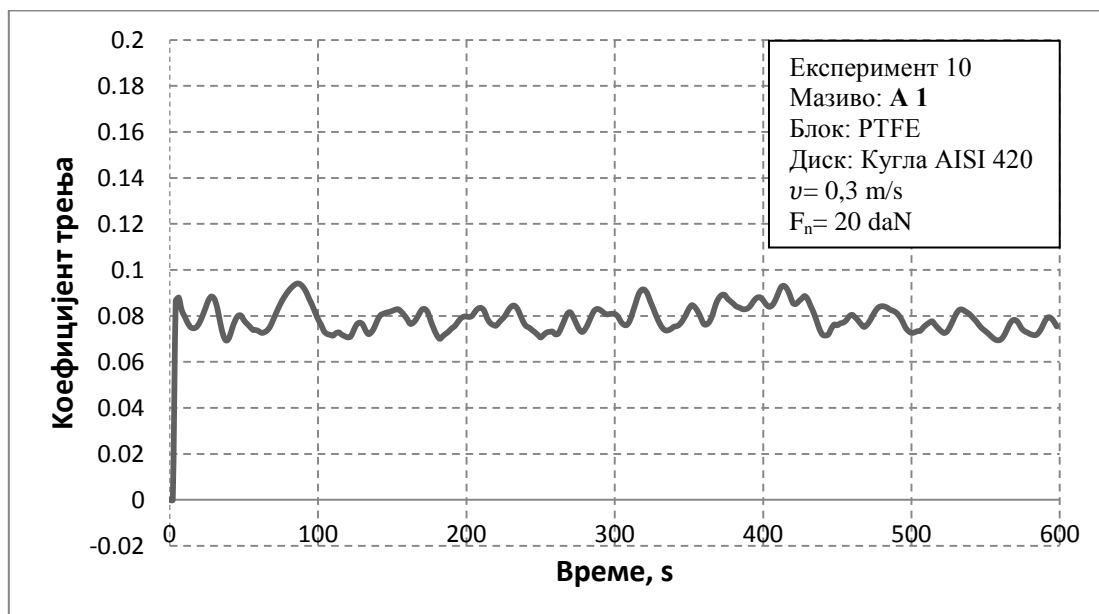
Нормално оптерећење :  $F_n = 10 \text{ daN}, 20 \text{ daN}$  (1daN=10N)

Време испитивања :  $t=10 \text{ min}$

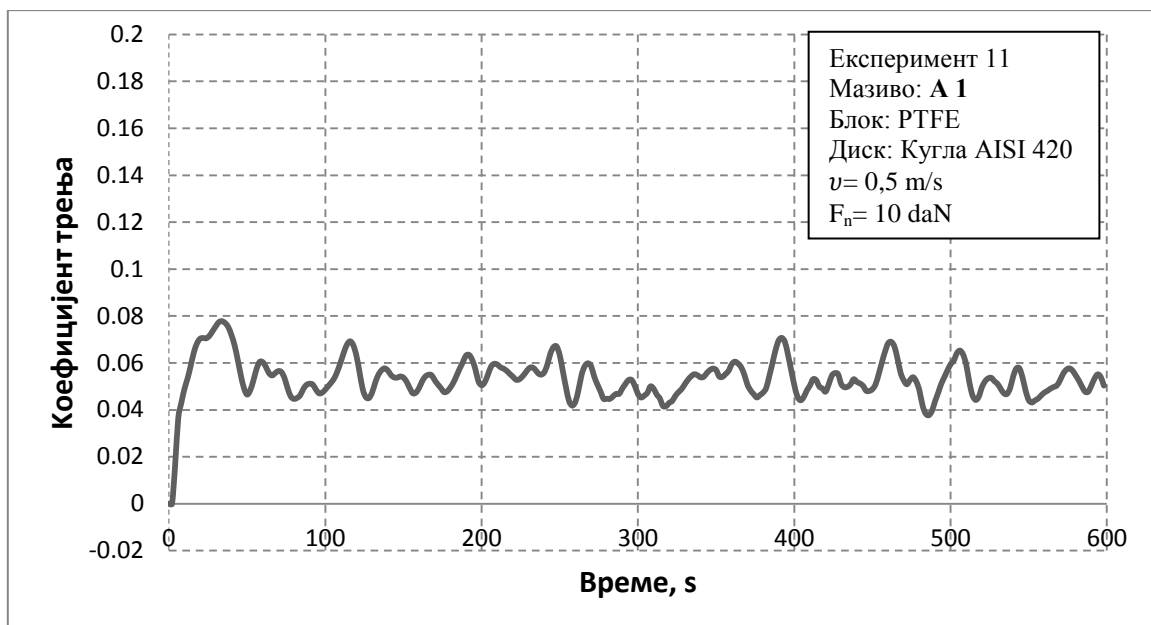
Вредности брзине клизања :  $v=0,3 \text{ m/s}, 0,5 \text{ m/s}$



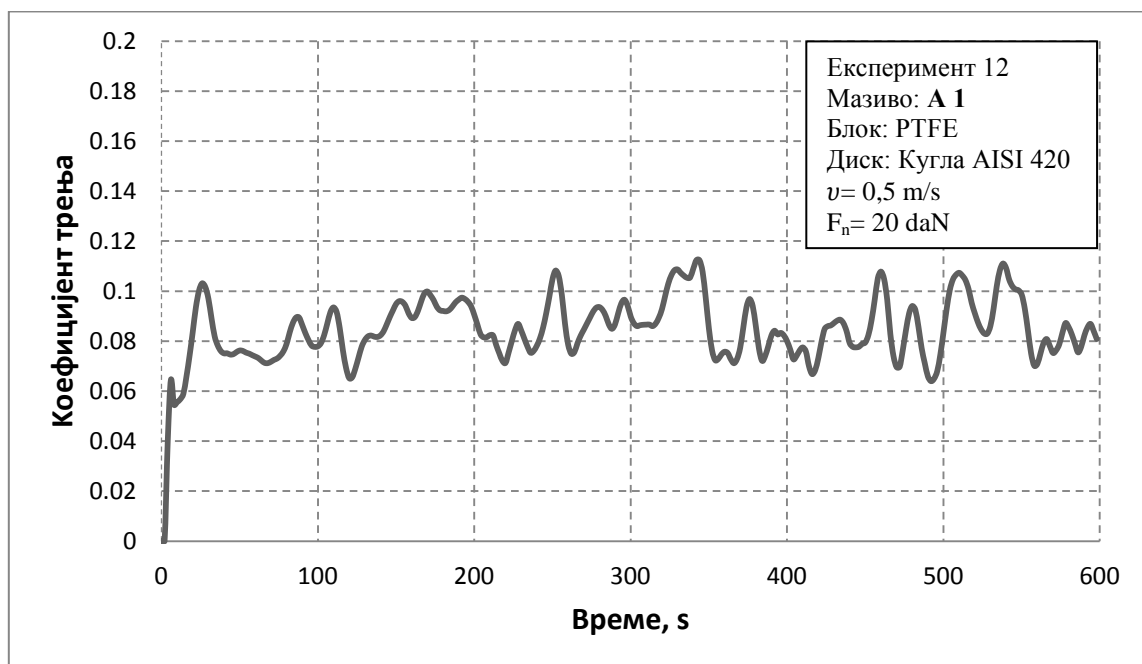
Слика 8.9 Коефицијент трења у зависности од времена испитивања,  
( $v = 0,3 \text{ m/s}$  и  $F_n = 10 \text{ daN}$ )



Слика 8.10 Коефицијент трења у зависности од времена испитивања,  
( $v = 0,3 \text{ m/s}$  и  $F_n = 20 \text{ daN}$ )



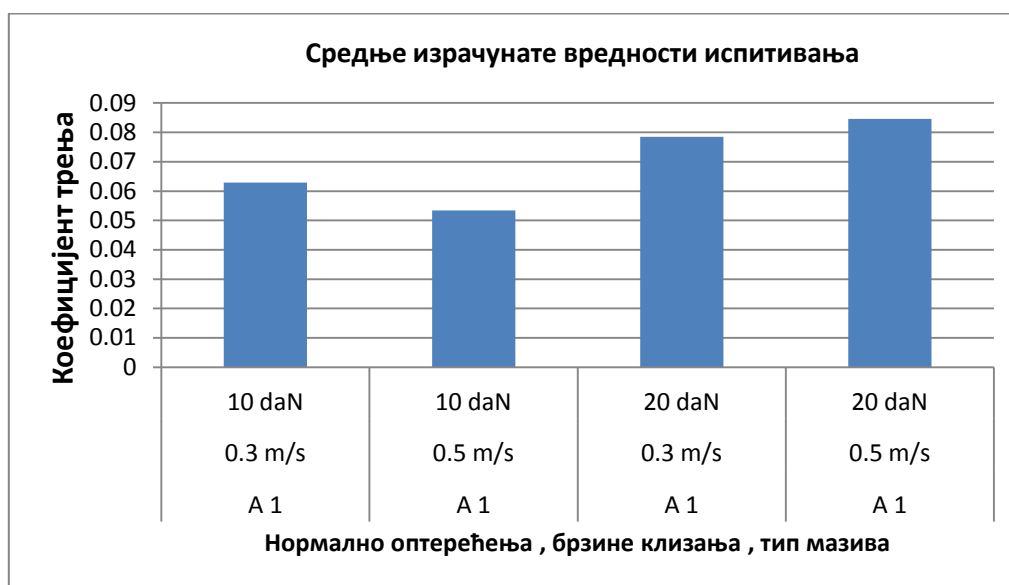
Слика 8.11 Коэффициент трења у зависности од времена испитивања,  
( $v = 0,5 \text{ m/s}$  и  $F_n = 10 \text{ daN}$ )



Слика 8.12 Коэффициент трења у зависности од времена испитивања,  
( $v = 0,5 \text{ m/s}$  и  $F_n = 20 \text{ daN}$ )

Табела 8.3 Средње - израчунате вредности коефицијента трења за дате услове

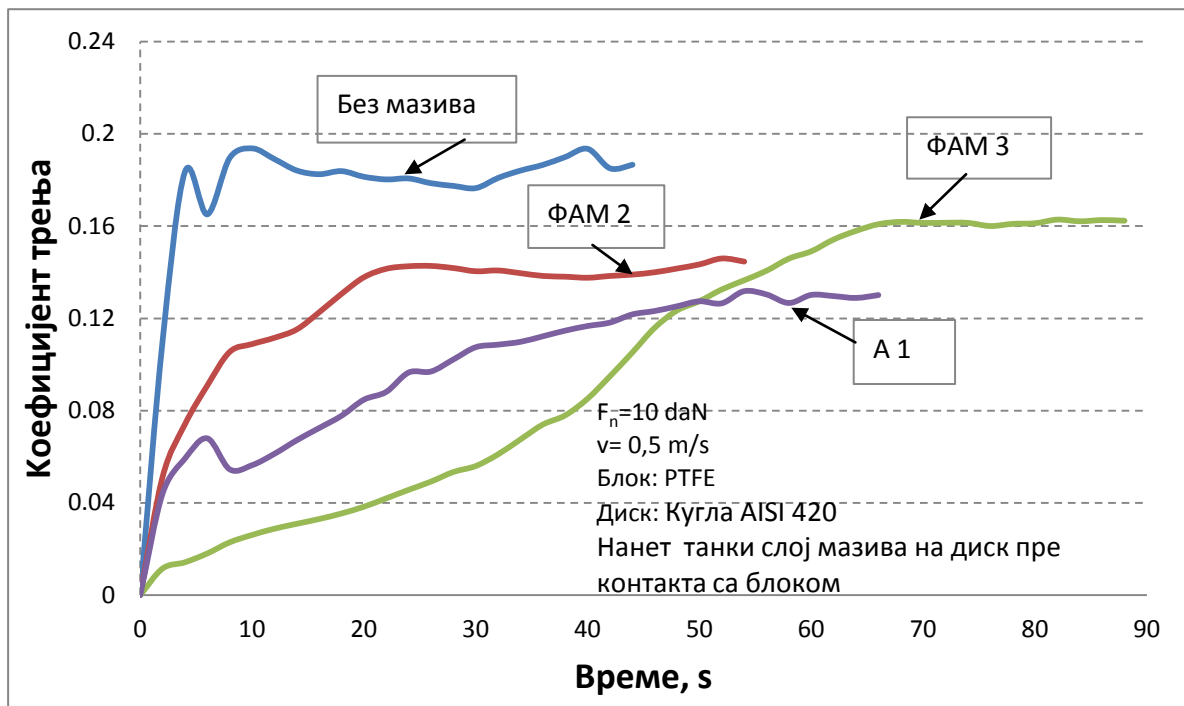
Мазиво	A 1	A 1	A 1	A 1
Брзине клизања	0.3 m/s	0.5 m/s	0.3 m/s	0.5 m/s
Нормално оптерећење	10 daN	10 daN	20 daN	20 daN
Средња вредност коефицијента трења	0.062873	0.053402	0.07852	0.084601



Дијаграм 8.3 Средње вредности коефицијента трења

### 8.1.1 Испитивање са нанетим танким слојем мазива

Додатно испитивање у трајању до 90 секунди извршено је у циљу мерења коефицијента трења, за услов наношеног танког слоја мазива на блок од PTFE. Са слике 8.13 се може видети којом брзином „одлази“ мазиво и при томе долази до изразитог пораста коефицијента трења због стања сувог трења.



Слика 8.13 Упоредне вредности коефицијента трења у зависности од времена испитивања, за три типа мазива и случај сувог трења

## 8.2 Резултати друге серије испитивања

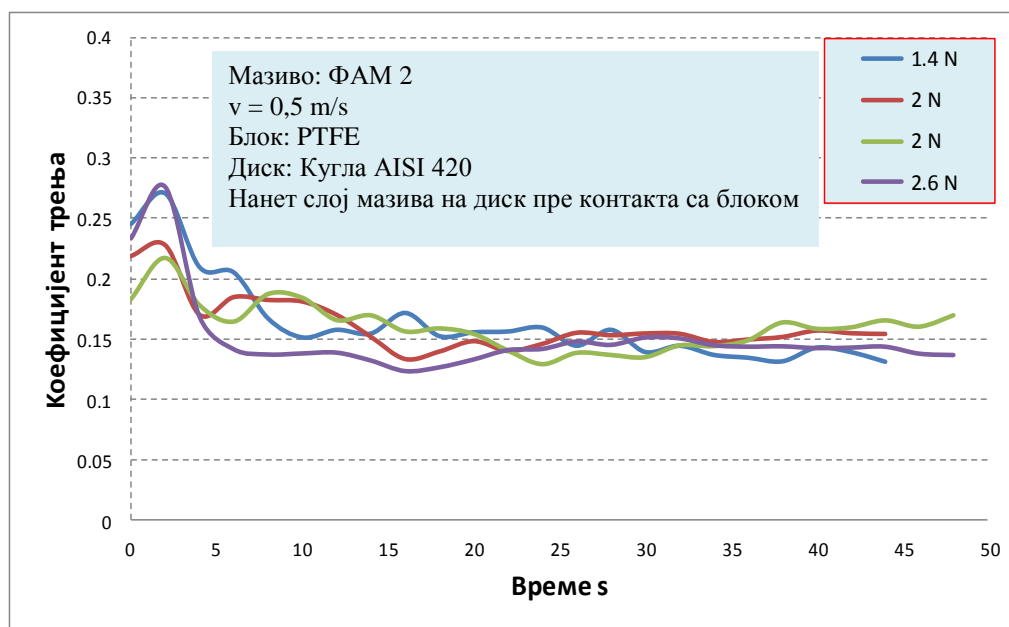
Друга серија испитивања извршена је са малим силама оптерећења  $F_n=(1,4 ; 2 \text{ и } 2,6 ) \text{ N}$ , у контакту блок - диск : метал-полимер (PTFE) и метал – метал.

У овој серији испитивања на диск је претходно нанет слој мазива дебљине  $0,3 \div 0,5 \text{ mm}$ , при чему су коришћена мазива ФАМ 2, ФАМ 3 и А-1.

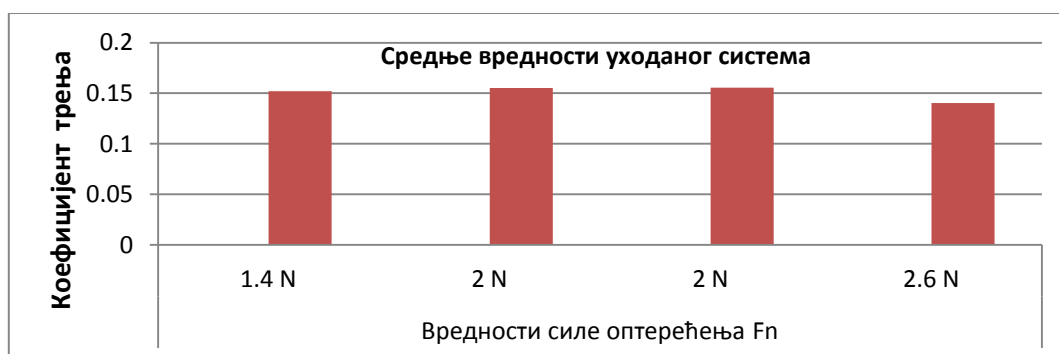
У оквиру ових испитивања мерен је и коефицијент трења за иста оптерећења без мазива.

Остали услови извођења експеримента обухватили су брзину клизања  $v= 0,5 \text{ m/s}$  и време испитивања  $t= 50 \div 60 \text{ s}$ .

Измерене вредности коефицијента трења, при малим оптерећењима, за мазиво ФАМ 2 приказани су на слици 8.14, а средње вредности у дијаграму 8.4.



Слика 8.14. Вредности коефицијента трења са малим силама оптерећења за ФАМ 2

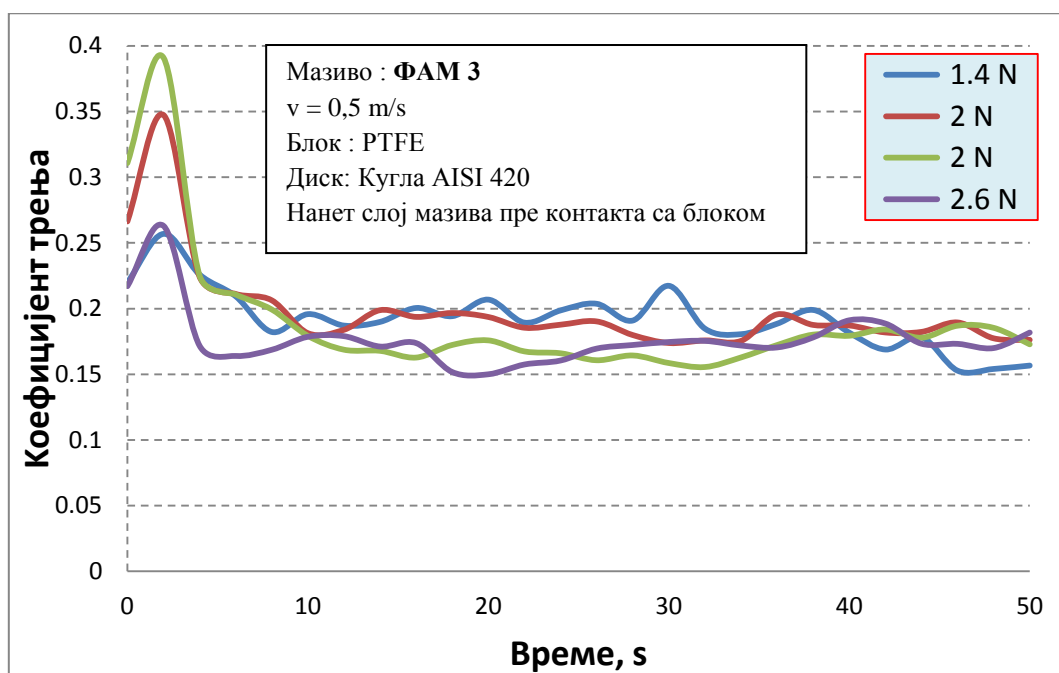


Дијаграм 8.4 Средње вредности коефицијента трења од момента уходавања система (за процењених 6 секунди )

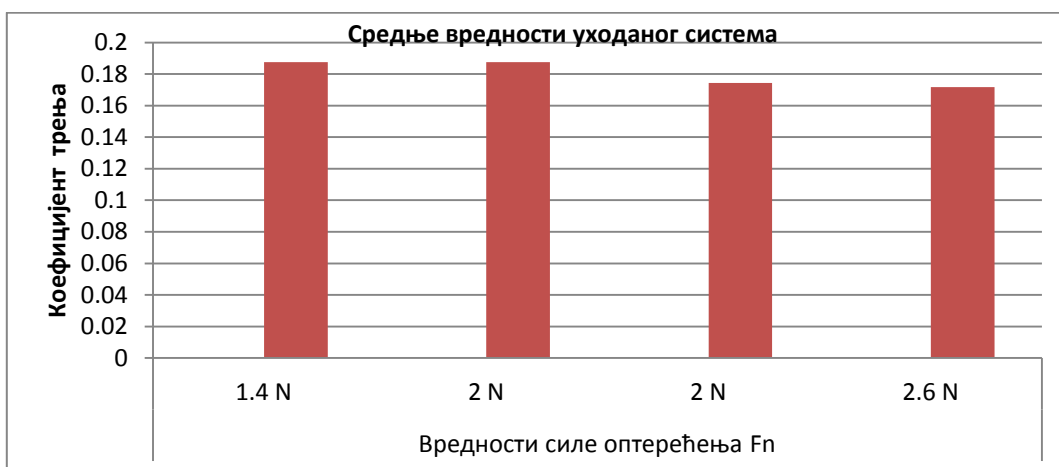
Таблица 8.4. Средње вредности коефицијента трења уходаног система

Вредности силе оптерећења $F_n$			
1.4 N	2 N	2 N	2.6 N
Средња вредност коефицијента трења			
0.152027	0.155102	0.15538	0.140427

Измерене вредности коефицијента трења за мазиво ФАМ 3 приказано је на слици 8.15. а средње вредности на дијаграму 8.5 и табlici 8.5.



Слика 8.15 Вредности коефицијента трења са малим силама оптерећења, ФАМ 3



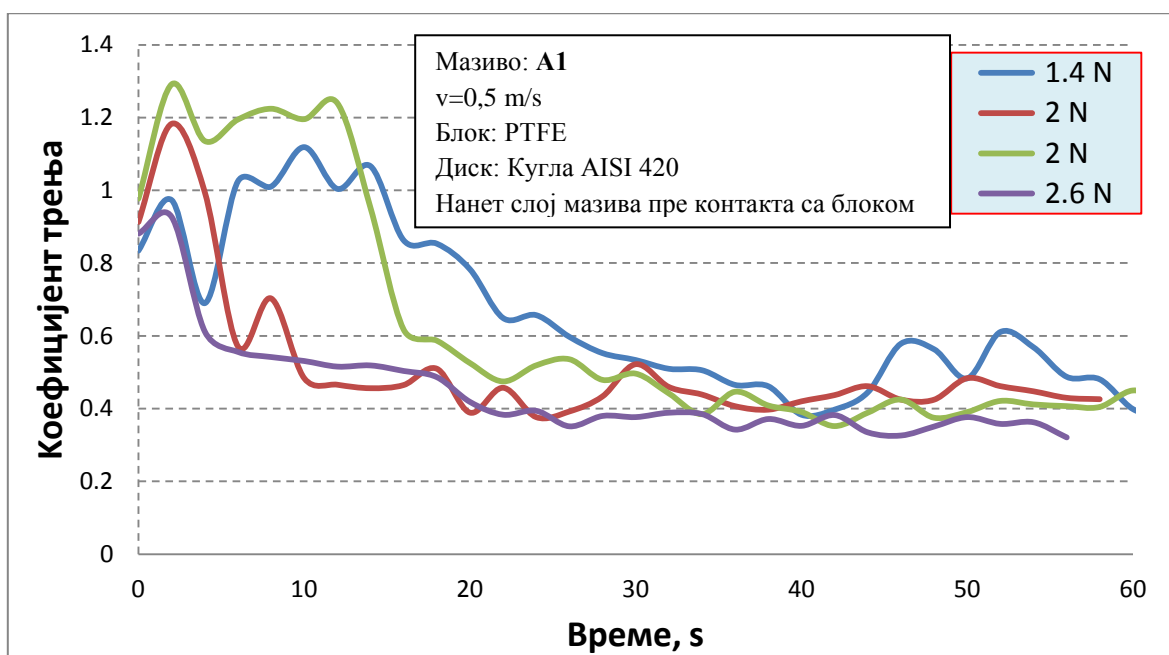
Дијаграм 8.5 Средње вредности коефицијента трења од момента уходавања система (за процењених 6 секунди )



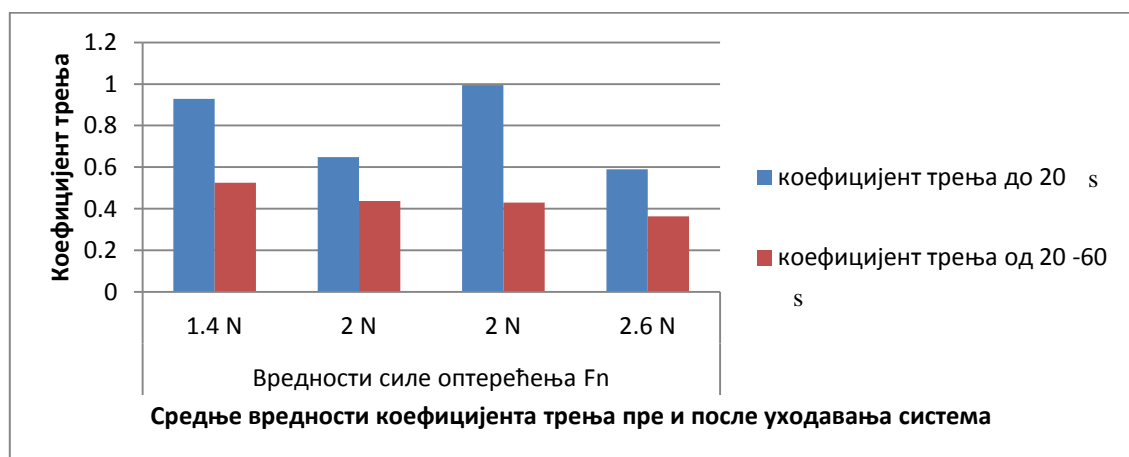
Таблица 13.5 Средње вредности коефицијента трења уходаног система

Вредности силе оптерећења $F_n$			
1.4 N	2 N	2 N	2.6 N
Средња вредност коефицијента трења			
0.187444	0.187499	0.174397	0.171621

Измерене вредности коефицијента трења за мазиво А1 приказано је на слици 8.16 а средње вредности на дијаграму 8.6 и табlici 8.6.



Слика 8.16. Вредности коефицијента трења са малим силама оптерећења, А 1

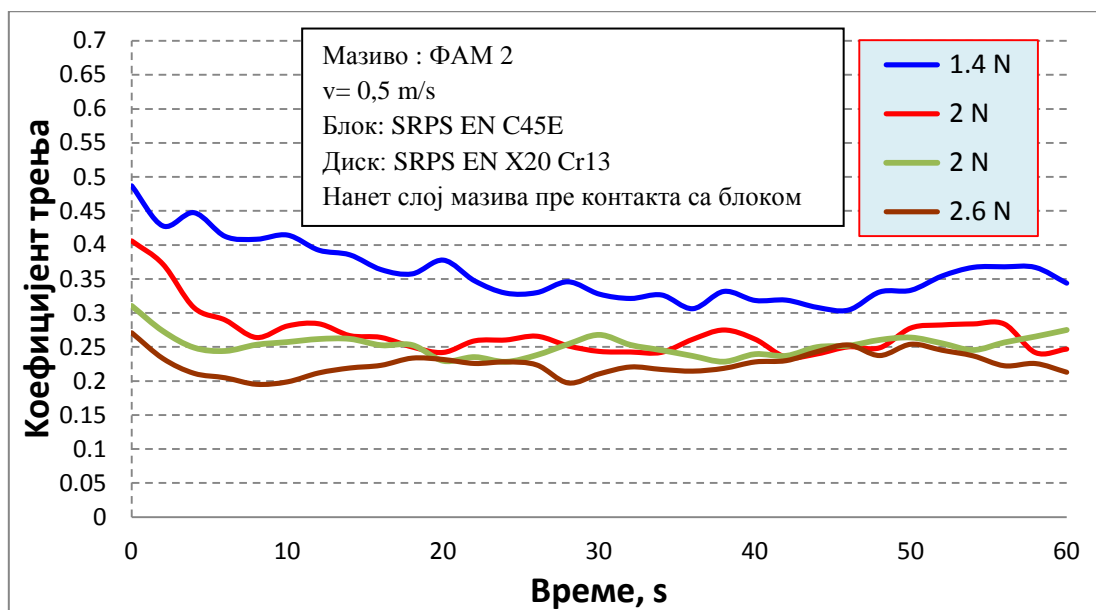


Дијаграм 8.6 Средње вредности коефицијента трења за време уходавања и од момента уходавања система

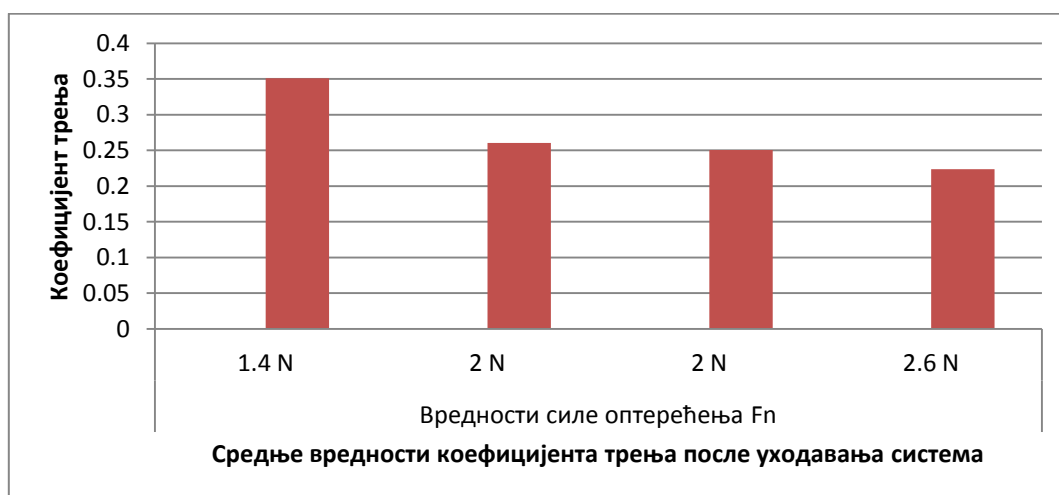
Таблица 8.6 Средње вредности коефицијента трења

време	Вредности силе оптерећења $F_n$			
	1.4 N	2 N	2 N	2.6 N
0-20 s	0.929066	0.648296	0.994856	0.59044536
20-60 s	0.525075	0.43715422	0.430708	0.36344211

Измерене вредности коефицијента трења за мазиво ФАМ 2 при контакту метал-метал дати су на слици 8.17, дијаграму 8.7 и табlici 8.7.



Слика 8.17 Вредности коефицијента трења са малим силама оптерећења, ФАМ 2

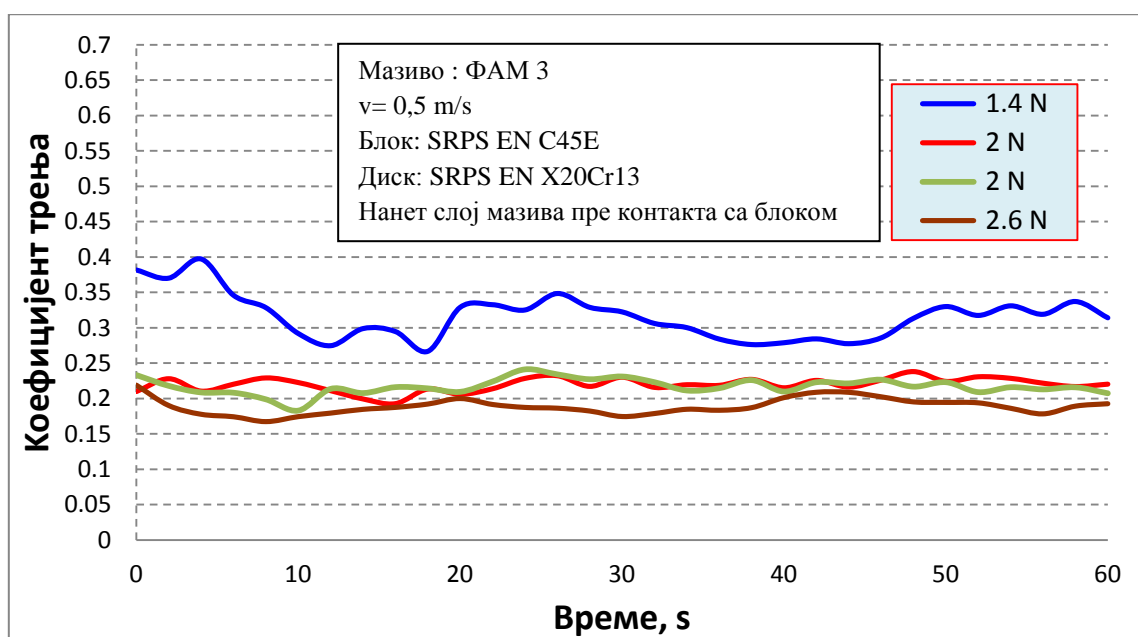


Дијаграм 8.7 Средње вредности коефицијента трења од момента уходавања система (за процењених 6 секунди), ФАМ 2

Таблица 8.7. Средње вредности коефицијента трења уходаног система

Вредности силе оптерећења $F_n$			
1.4 N	2 N	2 N	2.6 N
Средња вредност коефицијента трења			
0.350903	0.26046817	0.250527	0.223614

Измерене вредности коефицијента трења са мазивом ФАМ 3 при контакту метал-метал дато је на слици 8.18 , дијаграму 8.8 и табlici 8.8.



Слика 8.18. Вредности коефицијента трења са малим силама оптерећења, ФАМ 3

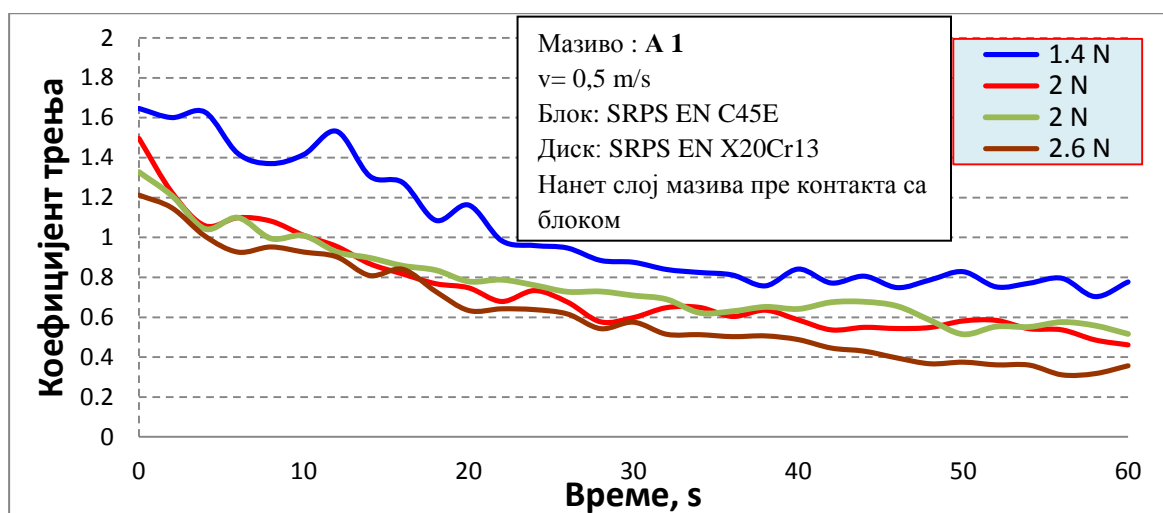


Дијаграм 8.8 Средње вредности коефицијента трења од момента уходавања система (за процењених 6 секунди ), ФАМ 3

Таблица 8.8. Средње вредности коефицијента трења уходаног система

Вредности силе оптерећења $F_n$			
1.4 N	2 N	2 N	2.6 N
Средња вредност коефицијента трења			
0.308051	0.219439	0.2157	0.189

Измерене вредности коефицијента трења са мазивом А1 при контакту метал-метал дато је на слици 8.19, дијаграму 8.9 и табlici 8.9.



Слика 8.19. Вредности коефицијента трења са малим силама оптерећења, А 1

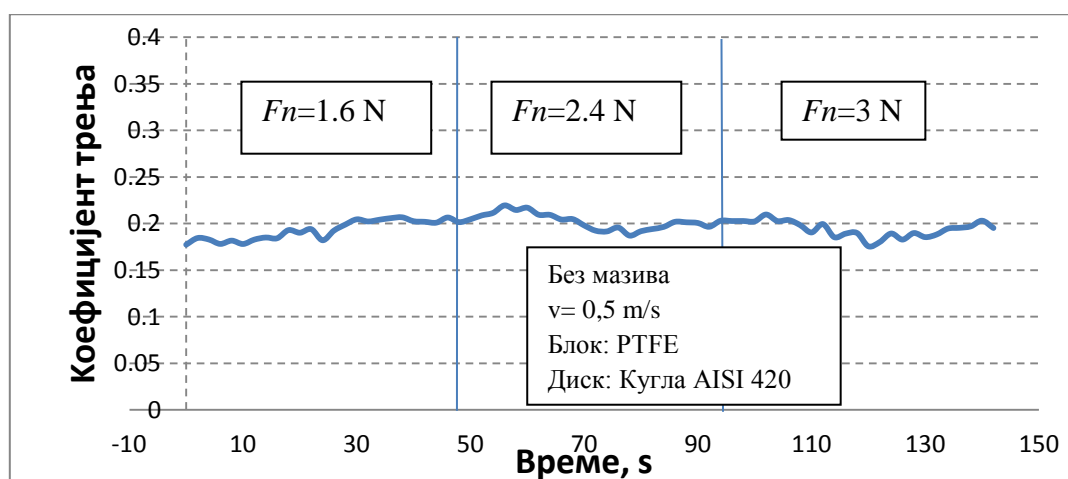


Дијаграм 8.9 Средње вредности коефицијента трења од процењених 20 секунди, тј од момента уходавања(ефектуирања) система, за мазиво А1

Таблица 8.9 Средње вредности коефицијента трења уходаног система

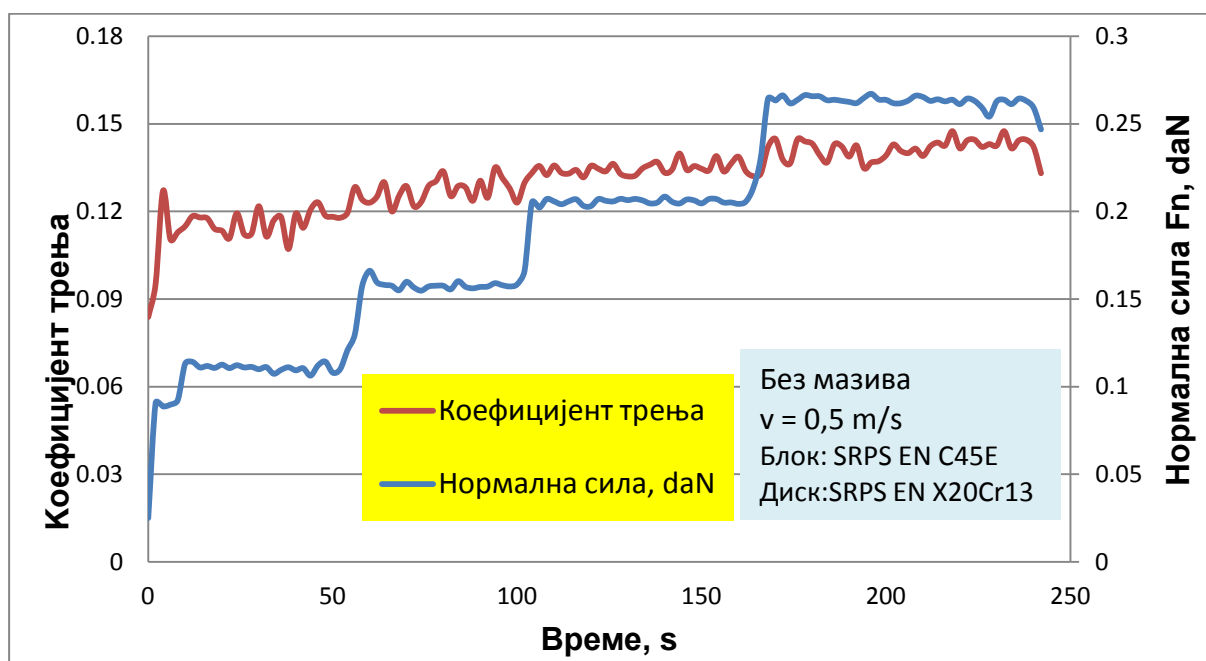
Вредности силе оптерећења $F_n$			
1.4 N	2 N	2 N	2.6 N
Средња вредност коефицијента трења			
0.82382257	0.595852	0.637977	0.458206

На крају друге серије испитивања измерен је коефицијент трења без коришћења мазива, слика 8.20.



Слика 8.20 Вредности коефицијента трења у контакту PTFE и метала без мазива

Измерен коефицијент трења без мазива у контакту метал-метал са дискретним повећањем оптерећења, приказано на слици 8.21.

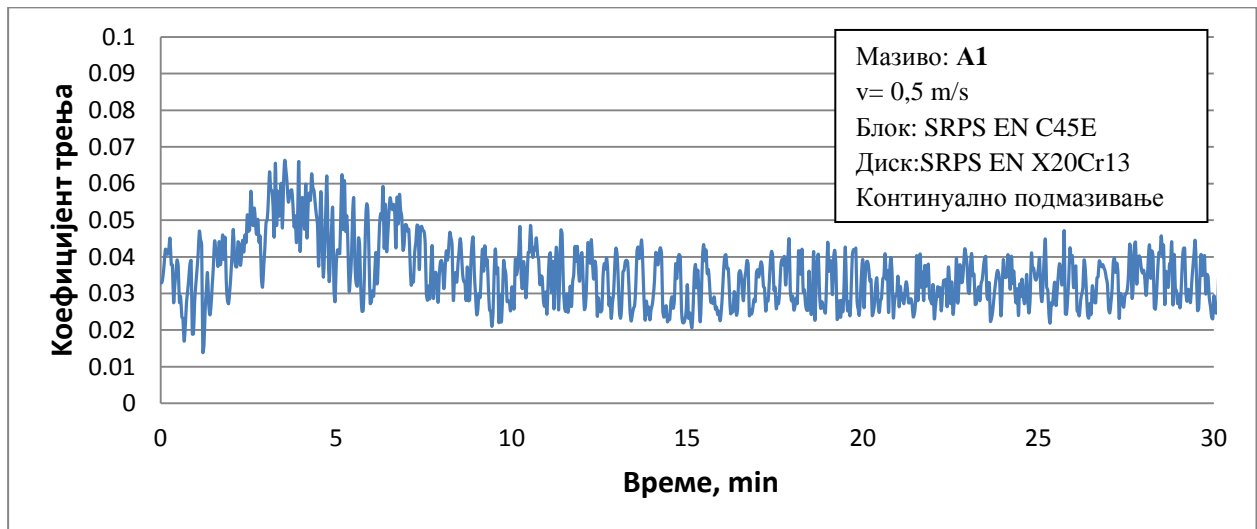


Слика 8.21 Вредности коефицијента трења у контакту метал-метал, без мазива

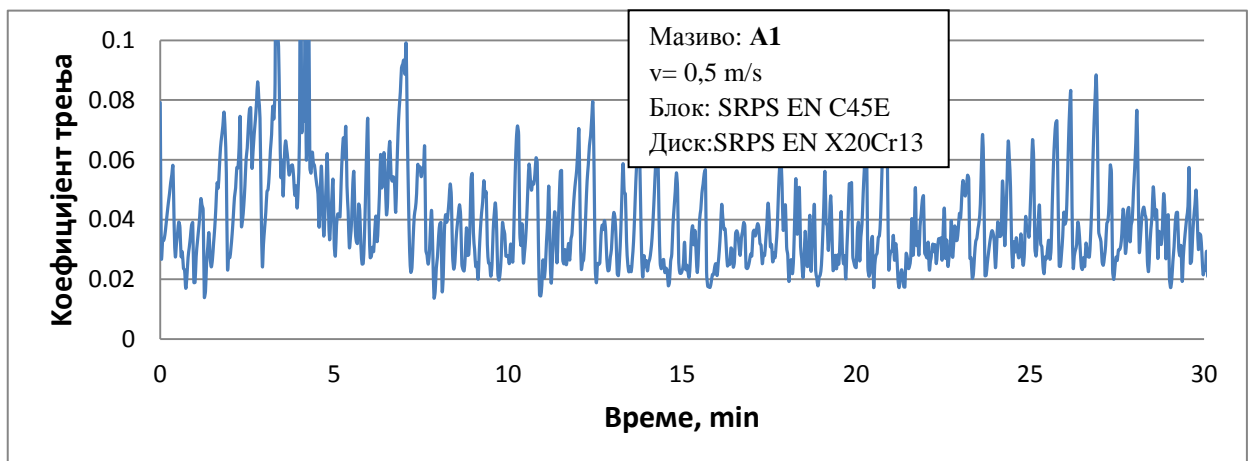
### 8.3 Резултати треће серије испитивања

У трећој серији испитивања, у контакту блок – диск :метал-метал и мазивима А1, ФАМ 2, ФАМ 3, извршена су два мерења промене коефицијента трења, тј. при континуалном подмазивању и додавањем мазива након пораста коефицијента трења.

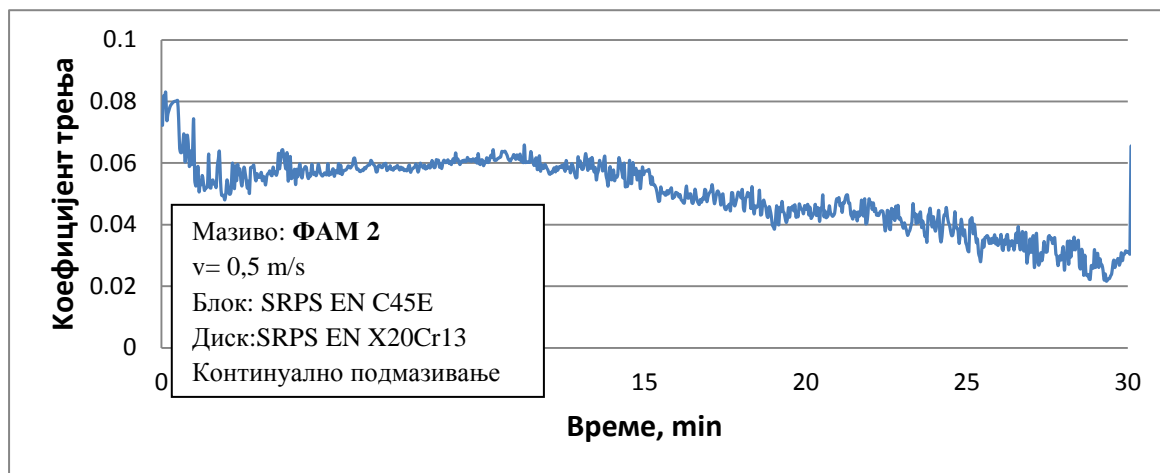
Услови извођења експеримента одвијали су се при следећим параметрима: брзина клизања  $v=0,5$  m/s, сила оптерећења 20 daN и време испитивања  $t=30$  min. Добијени мерења приказана су на сликама од 8.22 до 8.27.



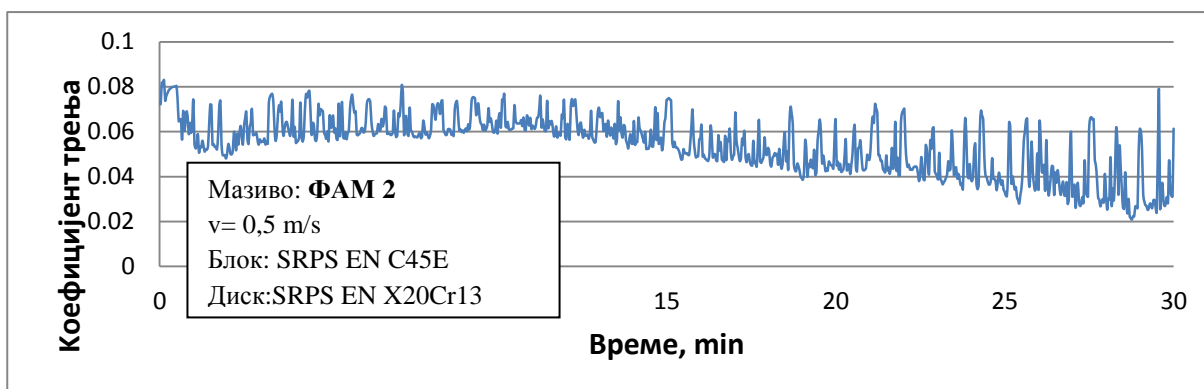
Слика 8.22 Коефицијент трења мазива А 1 при континуалном подмазивању



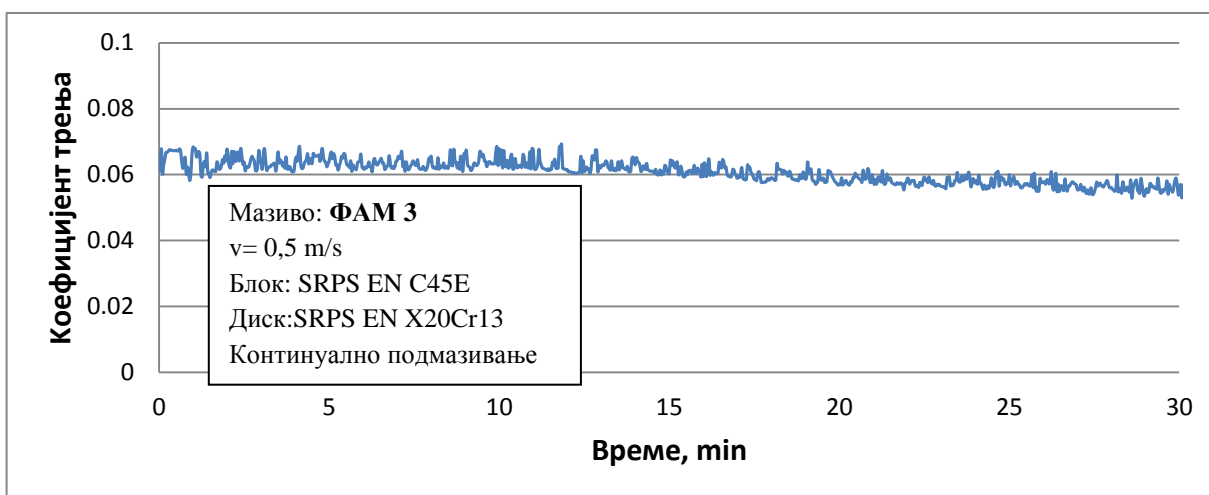
Слика 8.23 Коефицијент трења мазива А 1 при повременом подмазивању након повећања коефицијента трења



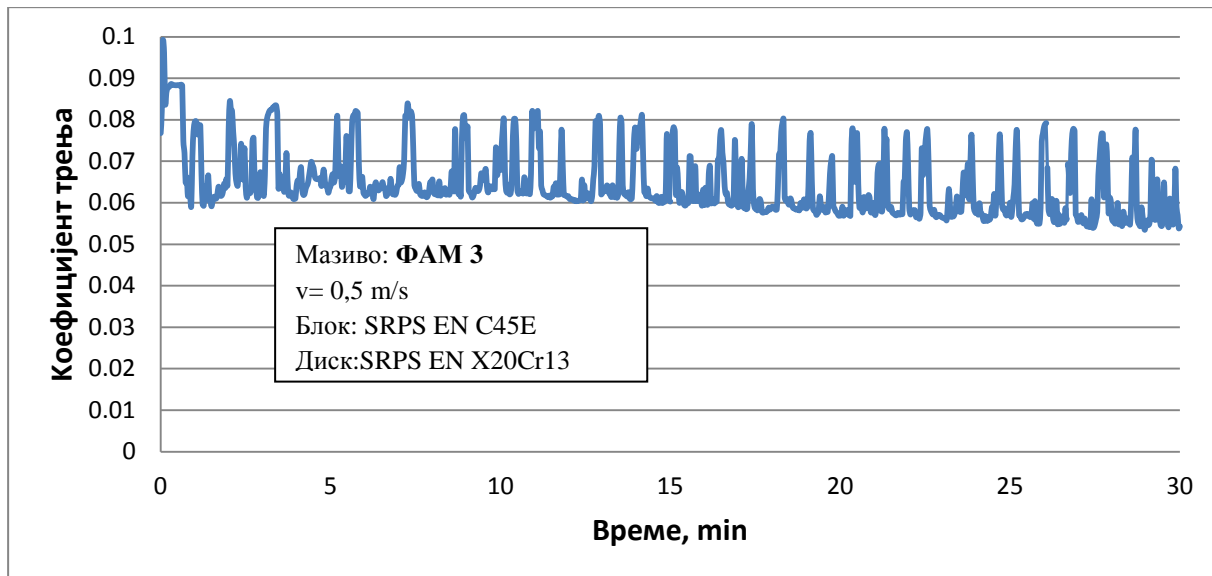
Слика 8.24 Коефицијент трења мазива ФАМ 2 при континуалном подмазивању



Слика 8.25 Коефицијент трења ФАМ 2 при повременим подмазивању (при повећању коефицијента трења)

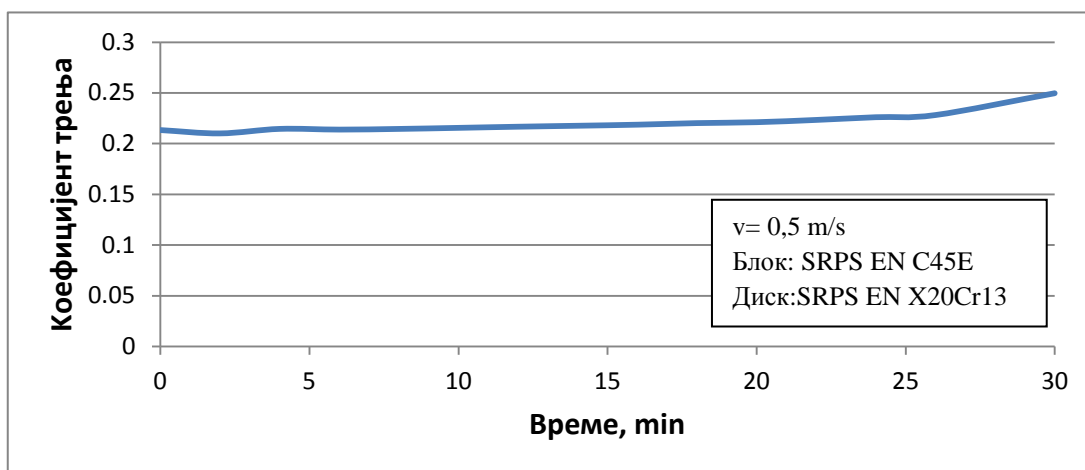


Слика 8.26 Коефицијент трења при континуалном подмазивању ФАМ 3



Слика 8.27 Коефицијент трења при повременим подмазивању (при повећању коефицијента трења) ФАМ 3

На слици 8.28 измерен је коефицијент трења без присуства мазива.



Слика 8.28 Вредности коефицијента трења без присутног мазива



У табели 8.1 приказане су вредности ширине и дубине трага хабања на блоку измерене при комбинацијама материјала диск и блок уз три врсте мазива .

Табела 8.1 Приказ комбинација материјала, мазива, ширине и дубине трагова хабања

Експеримент		Диск материјал	Блок материјал	Ширина трага хабања (mm)		Дубина трага хабања (mm)	
				Повремено подмазивање	Континуално подмазивање	Повремено подмазивање	Континуално подмазивање
1	Мазиво ФАМ 2	SRPS EN X20Cr13	SRPS EN C45 E	1.206	1.1	0.0104	0.0086
2	Мазиво ФАМ 3			0.925	0.875	0.0061	0.0055
3	Мазиво А1			1.635	1.42	0.0191	0.0144

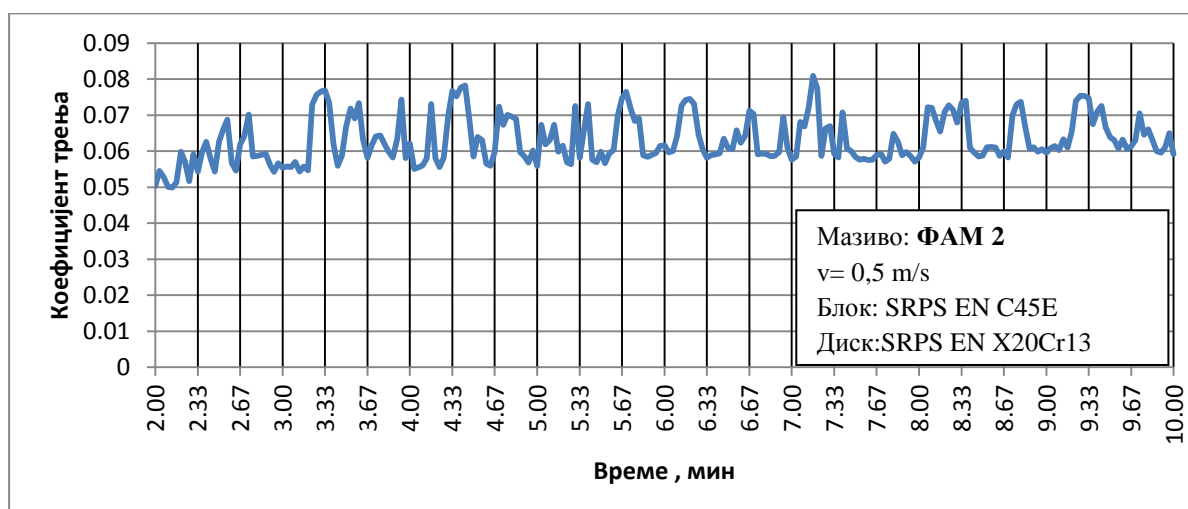
### 8.3.1 Упоредна оцена просечног времена додавања мазива

Приликом оцене међусобних односа, као квалитативни показатељ у посматраном интервалу од 2-10 минута извршено је одмеравање (квантификовање) броја подмазивања као показатеља адхезионе прионљивости мазива да се задржи на површини трибоелемента. Посматрани интервал узет је као репрезентативан за сва три типа мазива, тј да има довољно података за поређење и да је прошао период уходавања система.

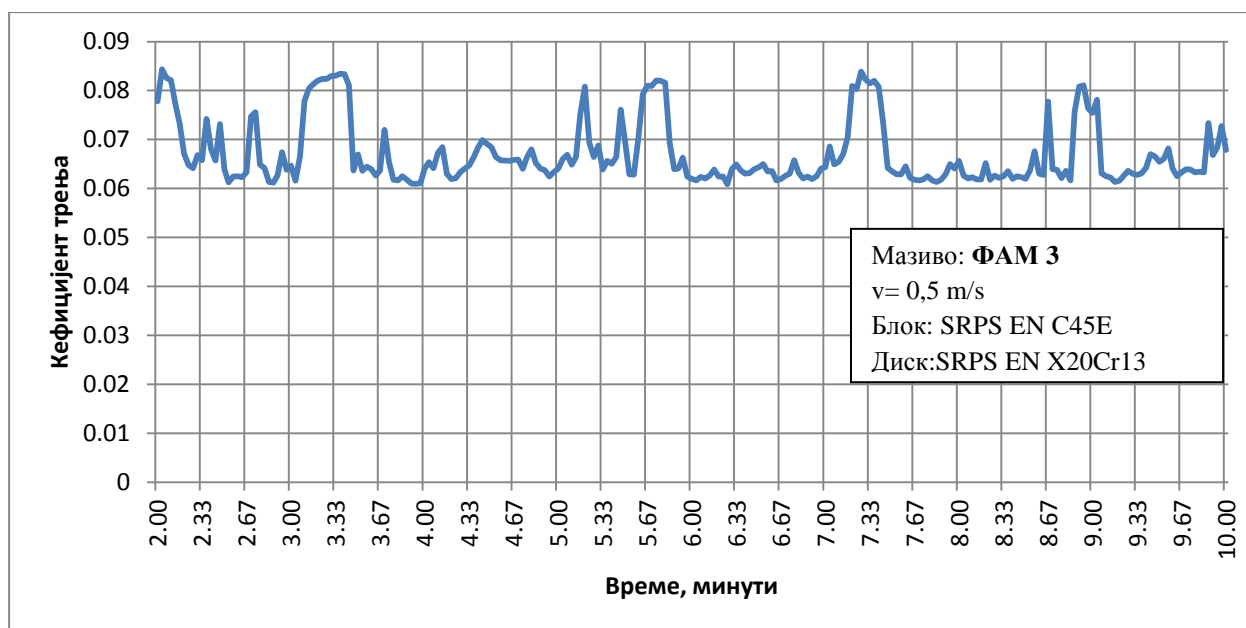
На сликама 8.29 –8.31 приказани су интервали који су служили за поређење док је просечан број приказан на дијаграму 8.10.



Слика 8.29. Интервал у коме је вршено пребројавање броја додавања мазива А1

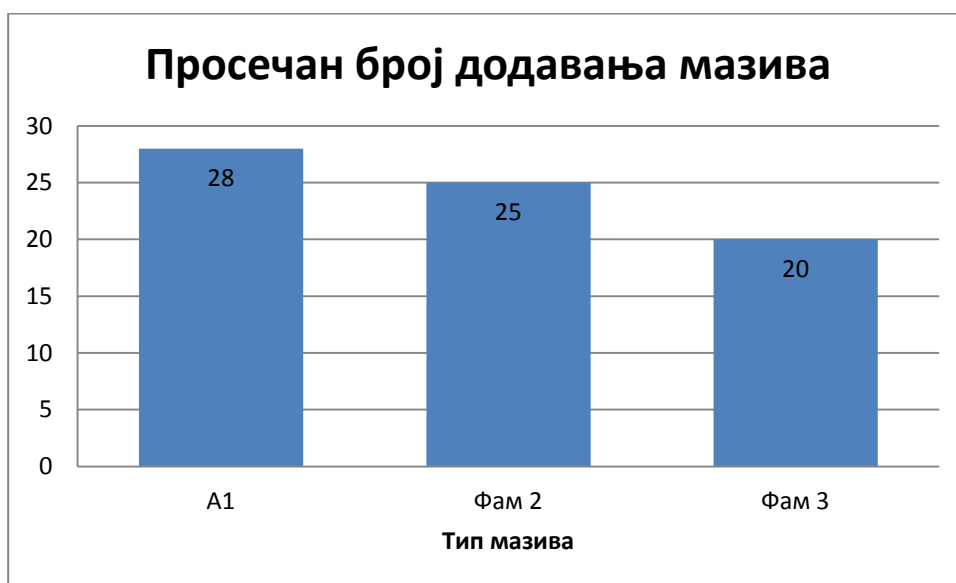


Слика 8.30. Интервал у коме је вршено пребројавање броја додавања мазива ФАМ 2



Слика 8.31 Интервал у коме је вршено пребројавање броја додавања мазива ФАМ 3

На дијаграму 8.10 приказан је међусобни однос просечног броја додавања мазива у посматраном интервалу .



Дијаграм 8.10 Просечан број додавања мазива у интервалу од 2-10 минута

Добијени односи приликом упоређивања просечног броја додавања мазива :

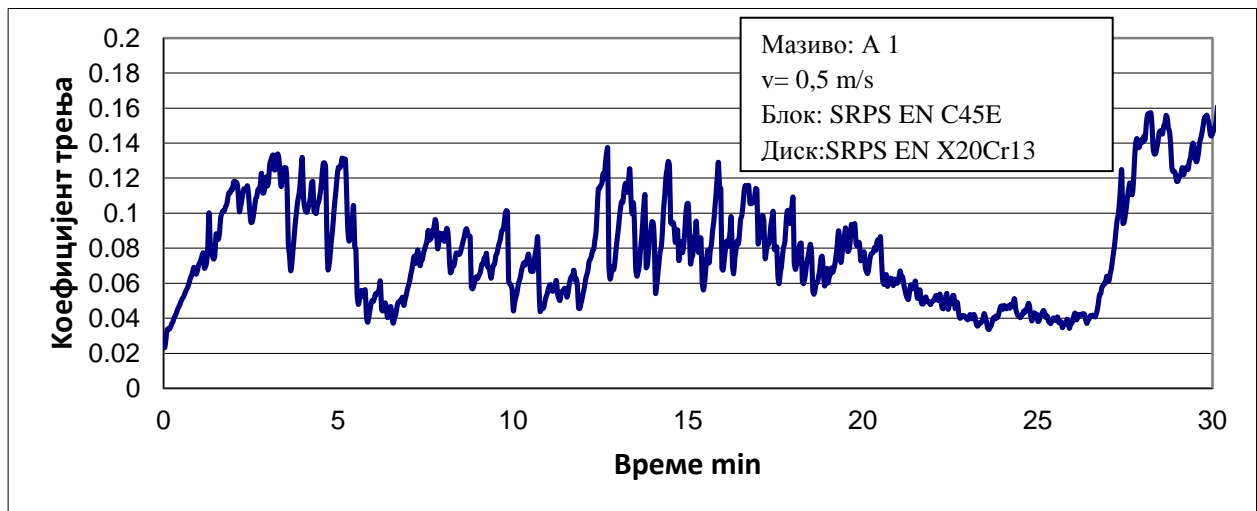
$$A1/\text{Фам 2} = 16,6\% (12\%-16,6\%)$$

$$\text{Фам 2}/\text{Фам 3} = 25\%$$

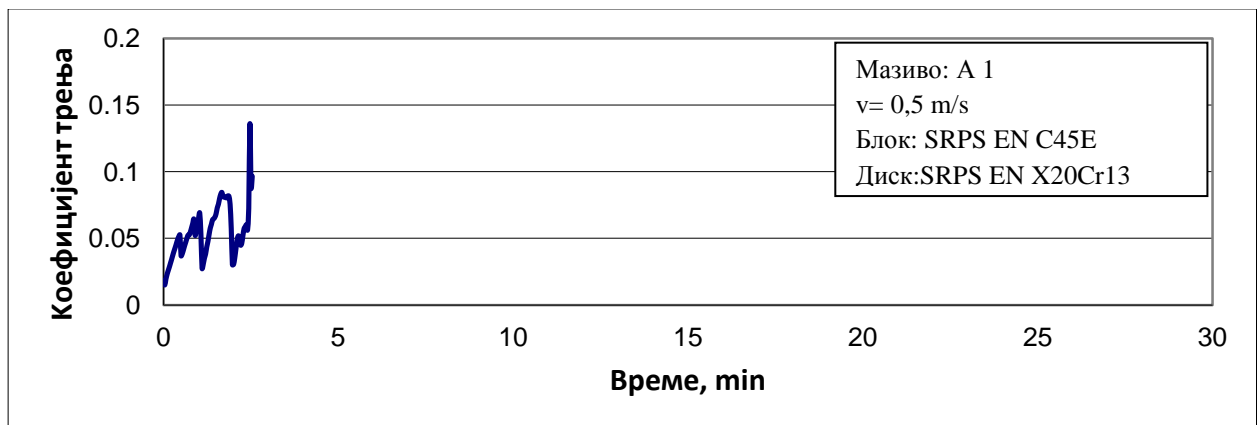
$$A1/\text{Фам 3} = 40\%$$

#### 8.4 Резултати четврте серије испитивања

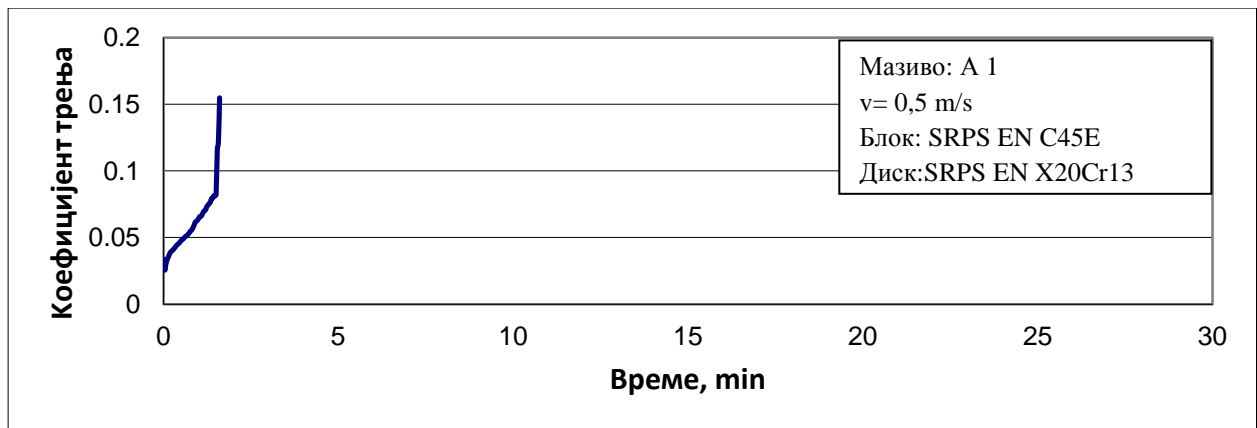
У четвртој серији експерименталних испитивања извршено је мерење коефицијента трења трибо пара метал-метал, блок: SRPS EN C45E -диск:SRPS EN X20Cr13 са мазивима А 1, ФАМ 2, ФАМ 3 и варираним оптерећењем од 10, 20, 30 daN са једним слојем мазива (мазиво је претходно нането на диск) и то до констатованог заривавања трибо пара при брзини  $v = 0,5 \text{ m/s}$  што је приказано на сликама 8.32÷8.40.



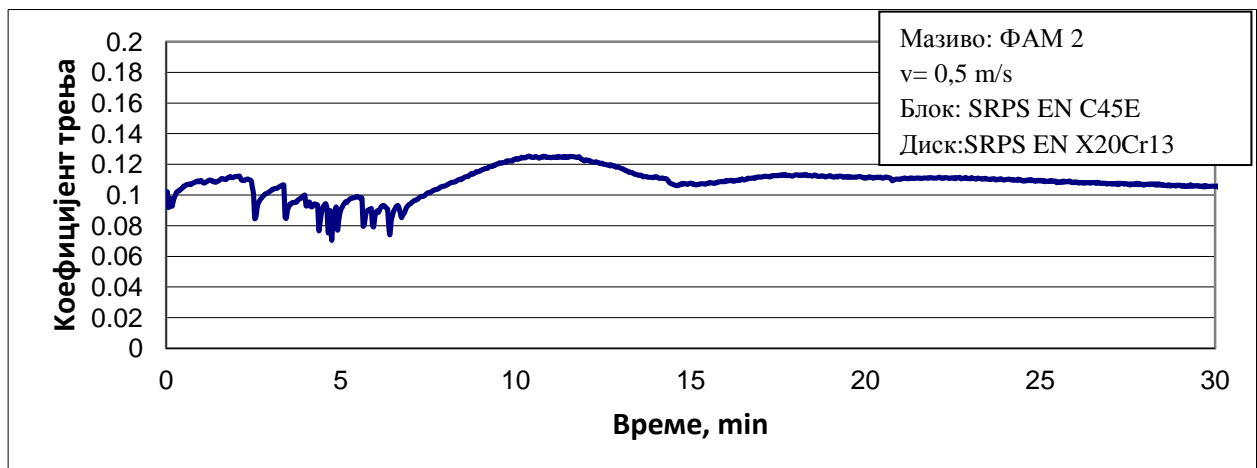
Слика 8.32 Коефицијент трења мазива А1 под оптерећењем од 10 daN



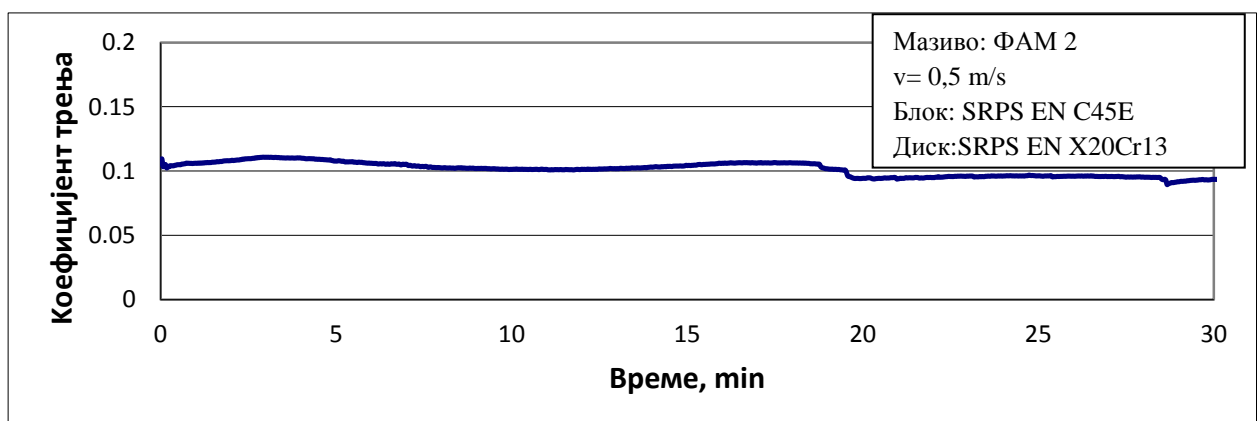
Слика 8.33 Коефицијент трења мазива А1 под оптерећењем од 20 daN до заривавања



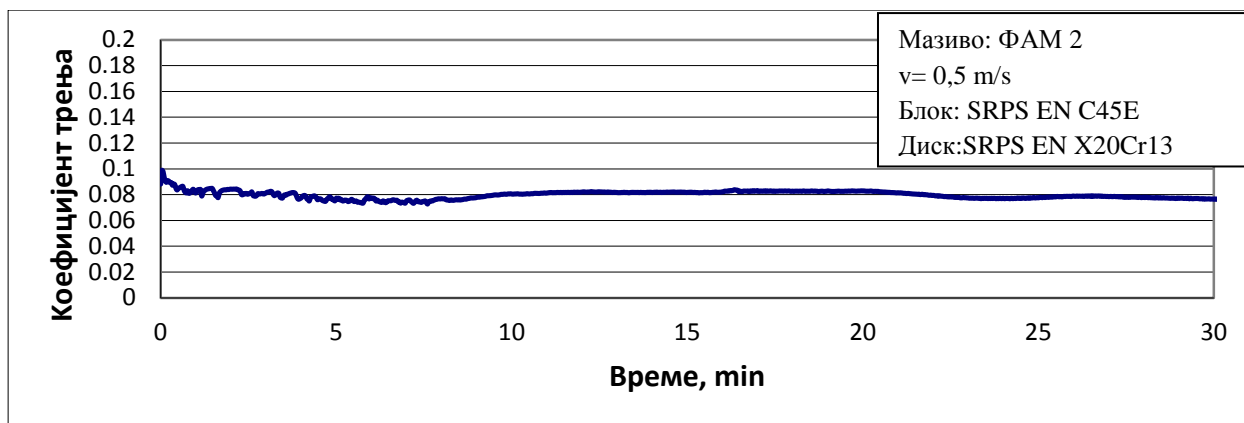
Слика 8.34 Коефицијент трења мазива А1 под оптерећењем од 30 daN до заривавања



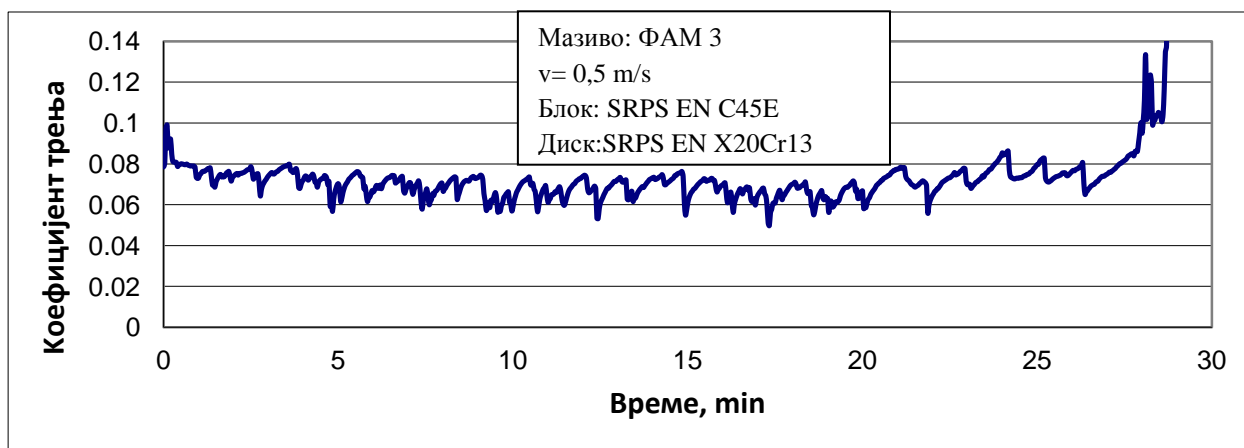
Слика 8.35. Коефицијент трења мазива ФАМ 2 под оптерећењем од 10 daN



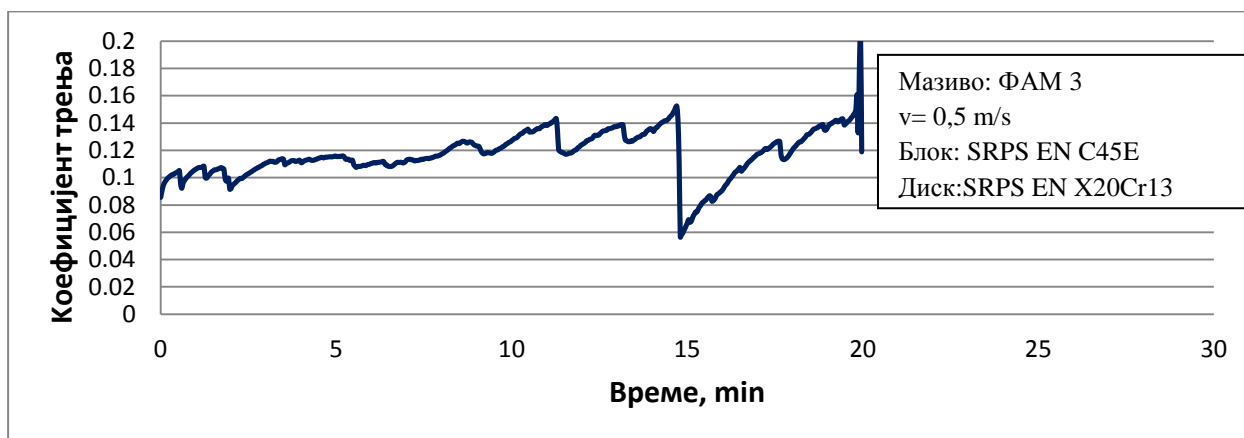
Слика 8.36. Коефицијент трења мазива ФАМ 2 под оптерећењем од 20 daN



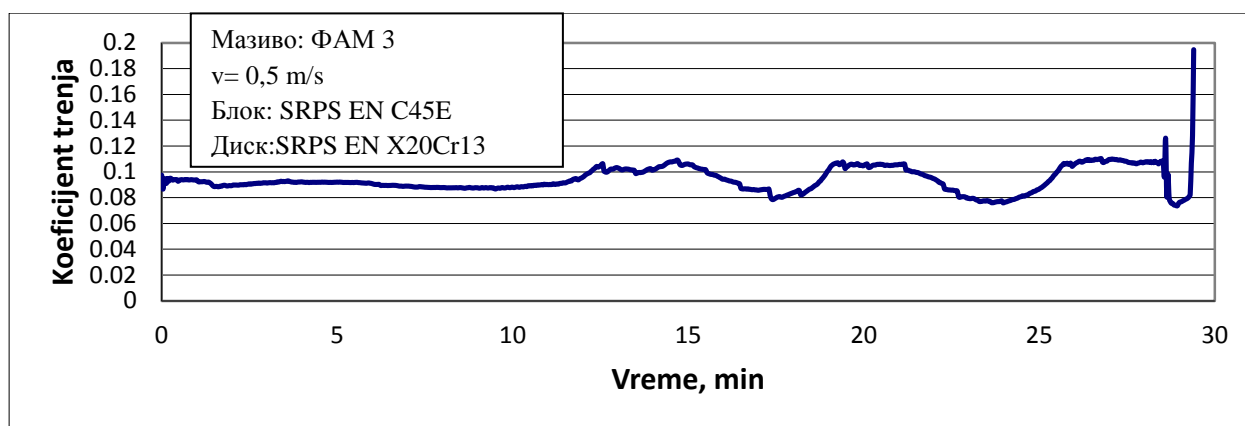
Слика 8.37 Коефицијент трења мазива ФАМ 2 под оптерећењем од 30 daN



Слика 8.38 Коефицијент трења мазива ФАМ 3 под оптерећењем од 10 daN до заривавања



Слика 8.39 Коефицијент трења мазива ФАМ 3 под оптерећењем од 20 daN до заривавања



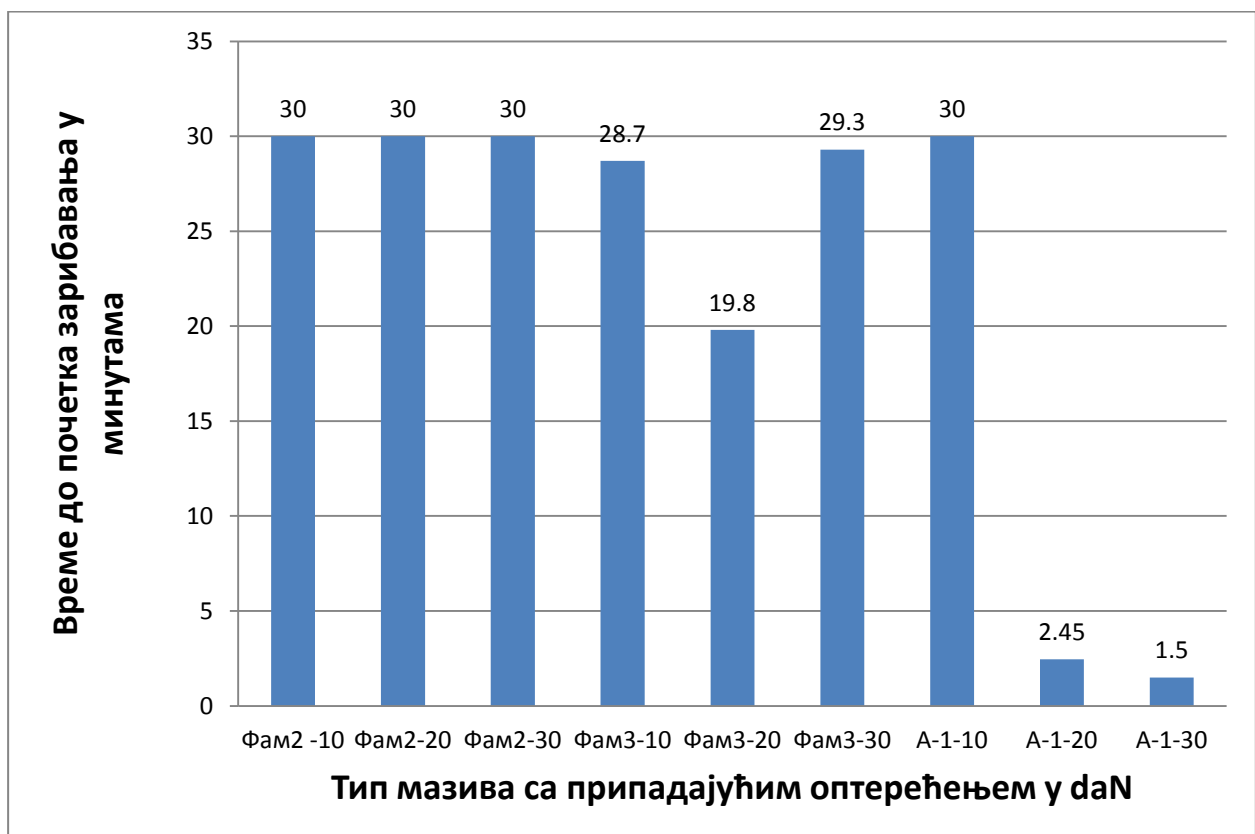
Слика 8.40 Коефицијент трења мазива ФАМ 3 под оптерећењем од 30 daN до заривавања

Табела 8.2 Измерене вредности током четврте серије експеримента

Тип мазива са вредностима оптерећења у daN	Време до почетка заривавања ( мин.)	Ширина трага хабања на блоку (mm)	Дубина трага хабања (mm)
ФАМ 2 -10	30	0.75	0.0040
ФАМ 2-20	30	0.795	0.0045
ФАМ 2-30	30	0.74	0.0039
ФАМ 3-10	28.7	0.335	0.0008
ФАМ 3-20	19.8	0.6	0.0026
ФАМ 3-30	29.3	0.667	0.0032
A-1-10	30	1.177	0.0099
A-1-20	2.45	0.5	0.0018
A-1-30	1.5	0.59	0.0025

Табела 8.2 приказује вредности оптерећења, тип мазива, комбинације диска и блока, те времена до почетка заривавања у минутима, као и ширину измереног трага хабања током експеримента са дубинама трагова хабања за сваку комбинацију.

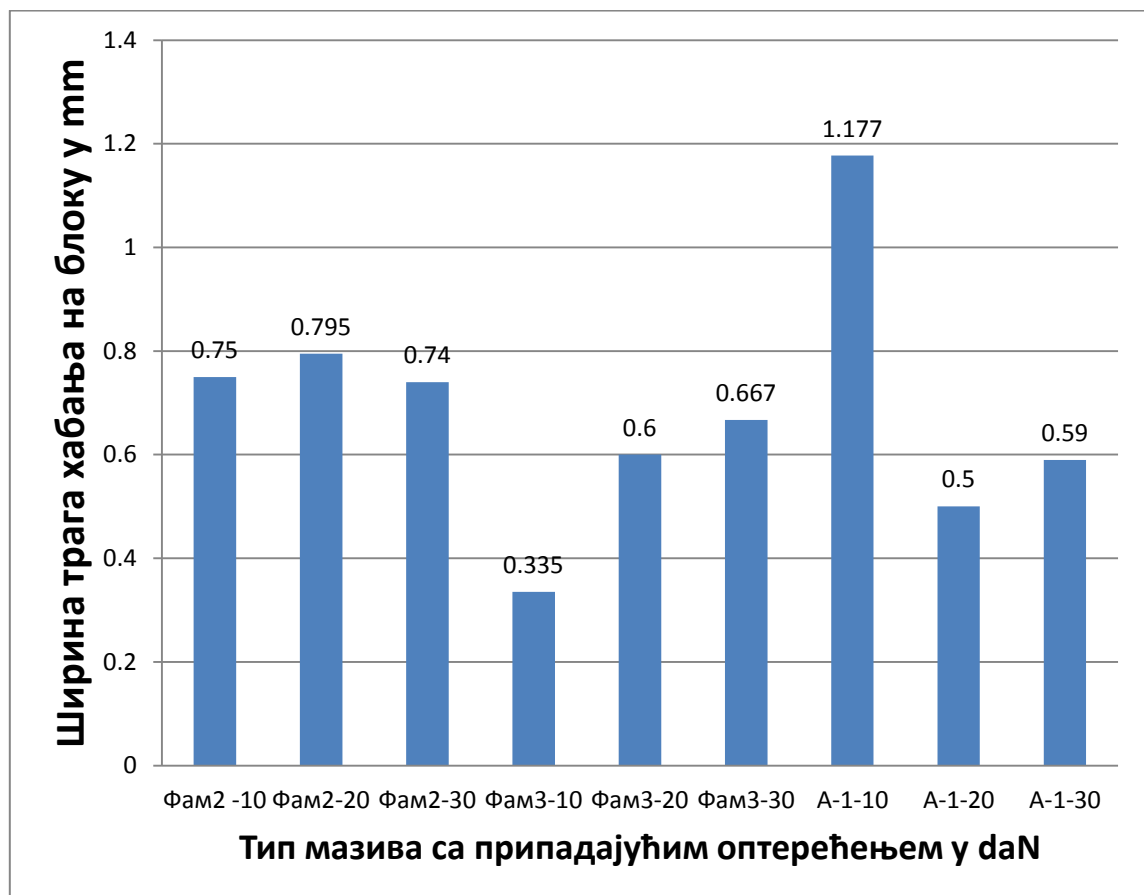
Тип мазива са припадајућим оптерећењем у daN и време до почетка заривавања у минутима приказано је на дијаграму 8.11.



Дијаграм 8.11 Добијене вредности са временима до заривавања

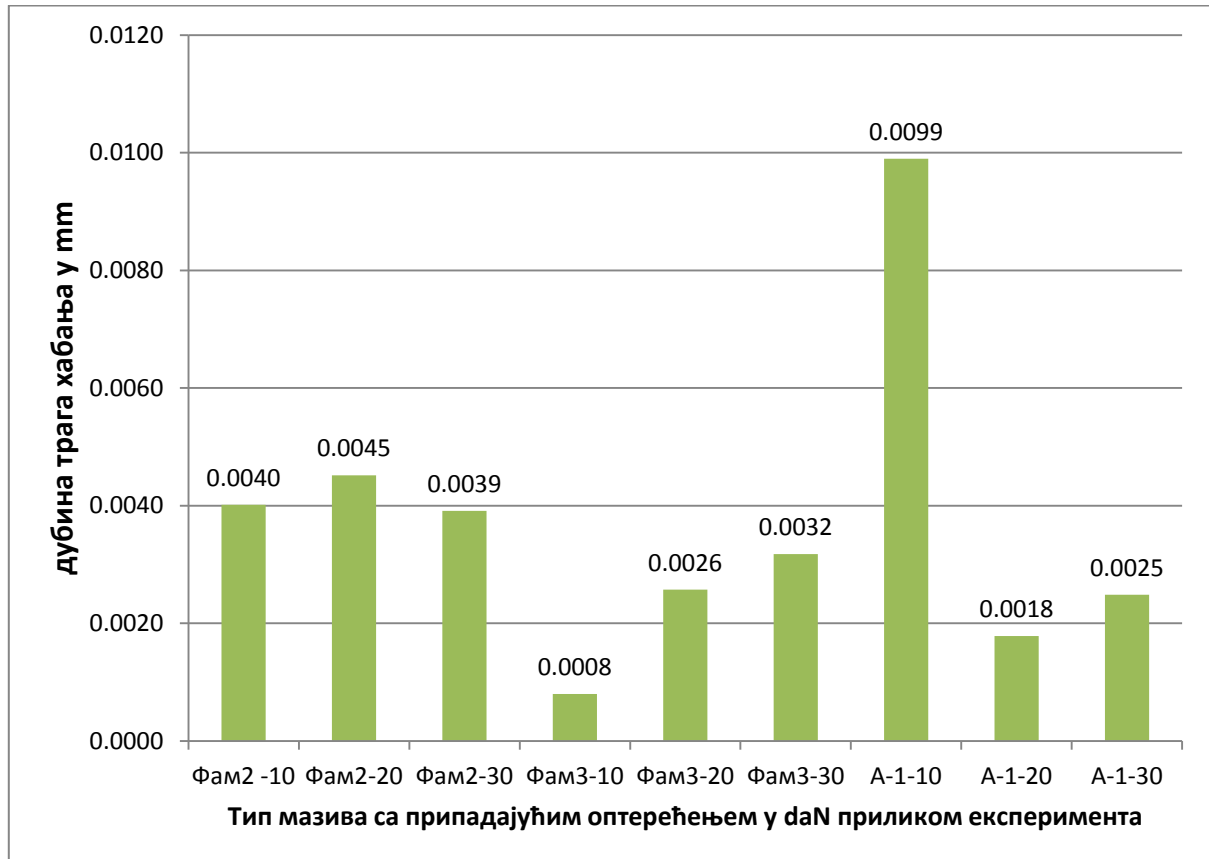


Тип мазива са припадајућим оптерећењима у daN и добијене вредности за ширину трага хабања приказан је на дијаграму 8.12.



Дијаграм 8.12 Добијене вредности ширине трага хабања

Тип мазива са припадајућим оптерећењем у daN са дубинама трага хабања приказан је на дијаграму 8.13



Дијаграм 8.13 Добијене вредности дубине трага хабања

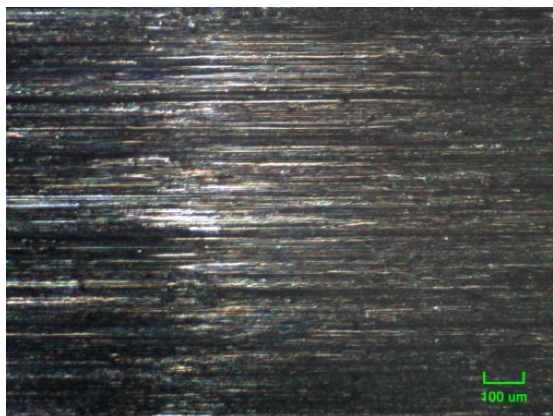
### 8.5. Топографија површина и трибо парова

Пре почетка реализације последње, четврте серије експеримента где се пратила способност моћи ношења мазива до констатованог заривавања, извршена су мерења хрпавости површина дискова и блокова помоћу уређаја Talysurf . Параметри топографије површине блока и диска, који су измерене наведеним уређајем, приказани су у табели 8.3.

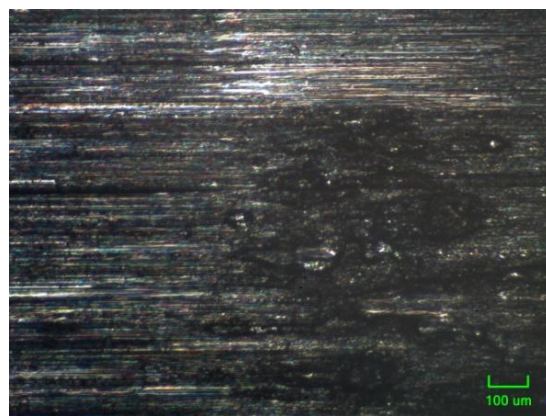
Табела 8.3 Параметри топографије површине измерени уређајем Talysurf-6

Rt1 - Rt5, $\mu\text{m}$	Максималне висине профила на референтним дужинама,
<b>Ra, <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Средње аритметичко одступање профила на дужини оцењивања</b>
Rq, $\mu\text{m}$	Средње квадратно одступање профила на дужини оцењивања
Ry, $\mu\text{m}$	Максимална висина профила, максимална Rти вредност
Rtm, $\mu\text{m}$	Средња Rти вредност
Rv, $\mu\text{m}$	Највећа дубина удубљења профила
Rp, $\mu\text{m}$	Највећа висина испупчења профила
Sm, $\mu\text{m}$	Средњи корак испупчења профила
$\Delta q, ^\circ$	Средњи квадратни угао нагиба профила
Rsk	Коефицијент асиметрије профила, мера симетрије криве расподеле амплитуда
Rku	Куртосис, мера заострености криве расподеле амплитуда
S, $\mu\text{m}$	Средњи корак локалних испупчења профила
R3z, $\mu\text{m}$	Средња вредност растојања трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтној дужини профила
Rpm, $\mu\text{m}$	Средња вредност Rпi одређених на референтним дужинама
R3y, $\mu\text{m}$	Највеће растојање трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтној дужини.

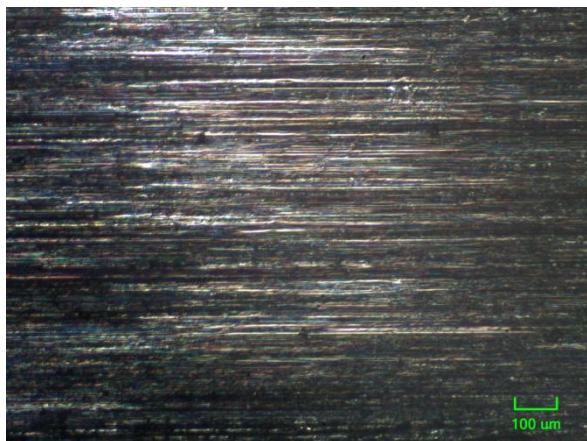
Површински снимци блокова SRPS EN C45E код дејства мазива A1, пре и после заривавања дати су на сликама 8.41 до 8.44.



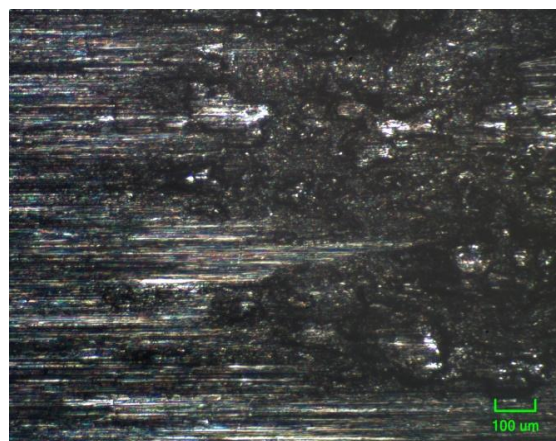
Слика .8.41. A1 - 20 daN пре заривавања



Слика 8.42 A1 - 20 daN после заривавања

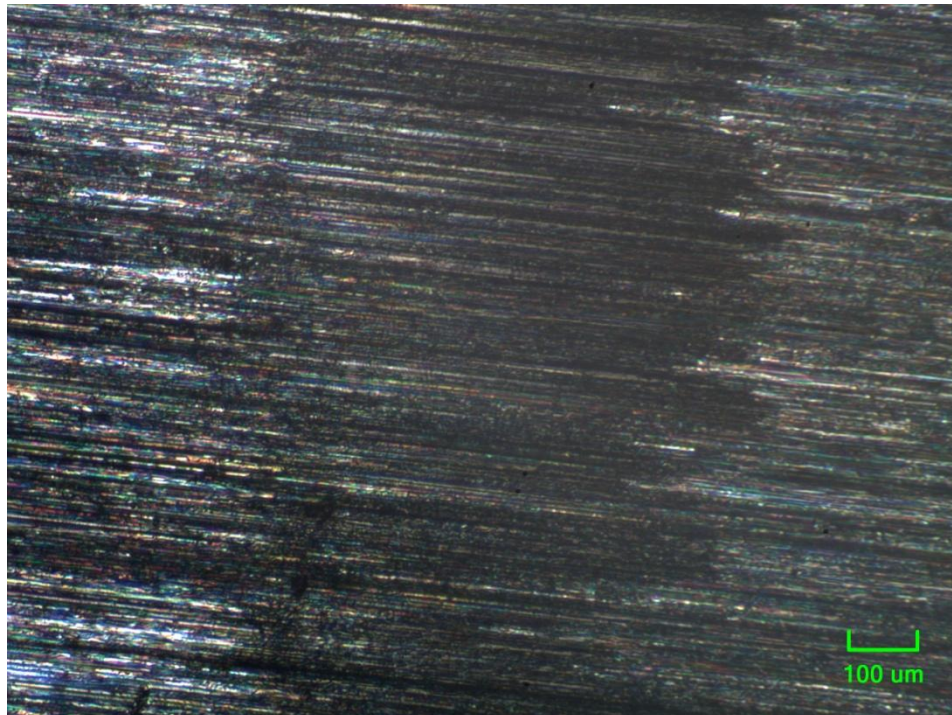


Слика .8.43. A1 - 30 daN пре заривавања



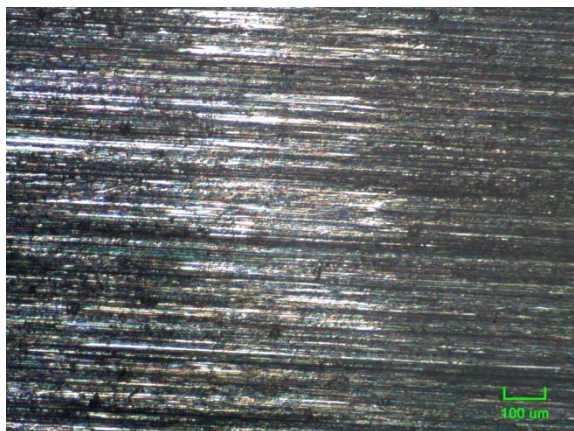
Слика 8.44 A1 - 30 daN после заривавања

Изглед блока SRPS EN C45E код дејства мазива ФАМ 2 после 30 минута оптерећења, без заривавања приказано је на слици 8.45.

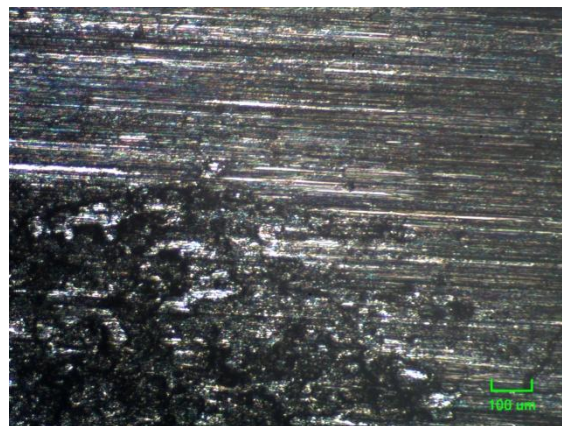


Слика 13.48 Изглед трагова хабања без заривавања за ФАМ 2 при 30 daN

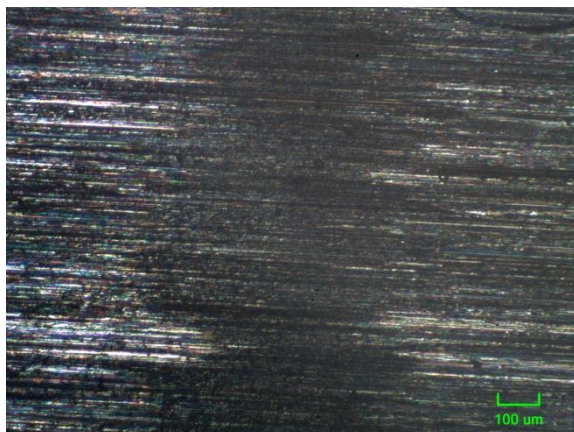
Изглед трагова за мазиво ФАМ 3, пре и после заривавања код свих режима оптерећења за материјал блока SRPS EN C45E приказано је на сликама 8.46-8.51.



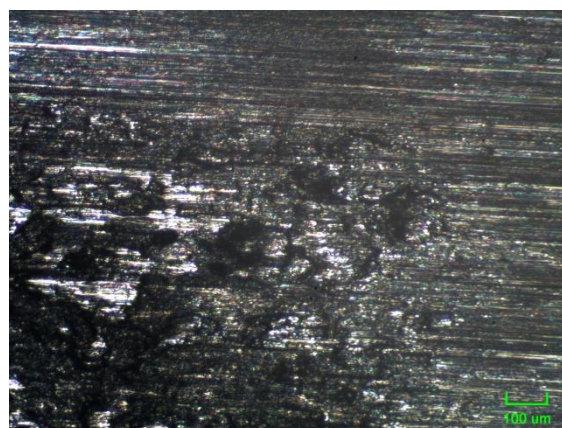
Слика 8.46 ФАМ 3- 10 daN без заривавања



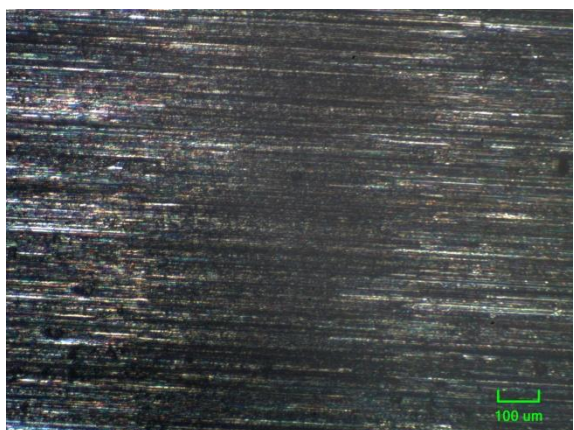
Слика 8.47 ФАМ 3-10 daN после заривавања



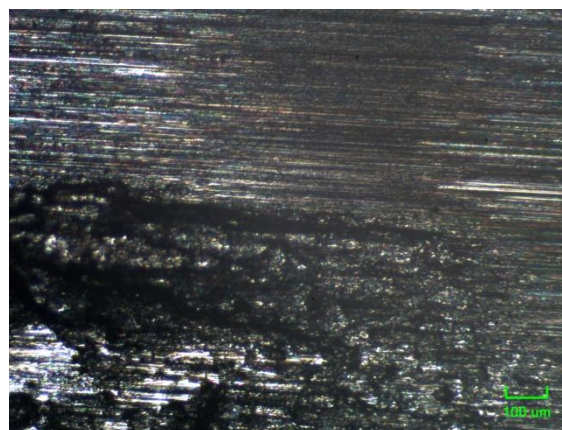
Слика 8.48 ФАМ 3 -20 daN без заривавања



Слика 8.49 ФАМ 3- 20 daN после заривавања



Слика 8.50 ФАМ 3-30 daN без заривавања



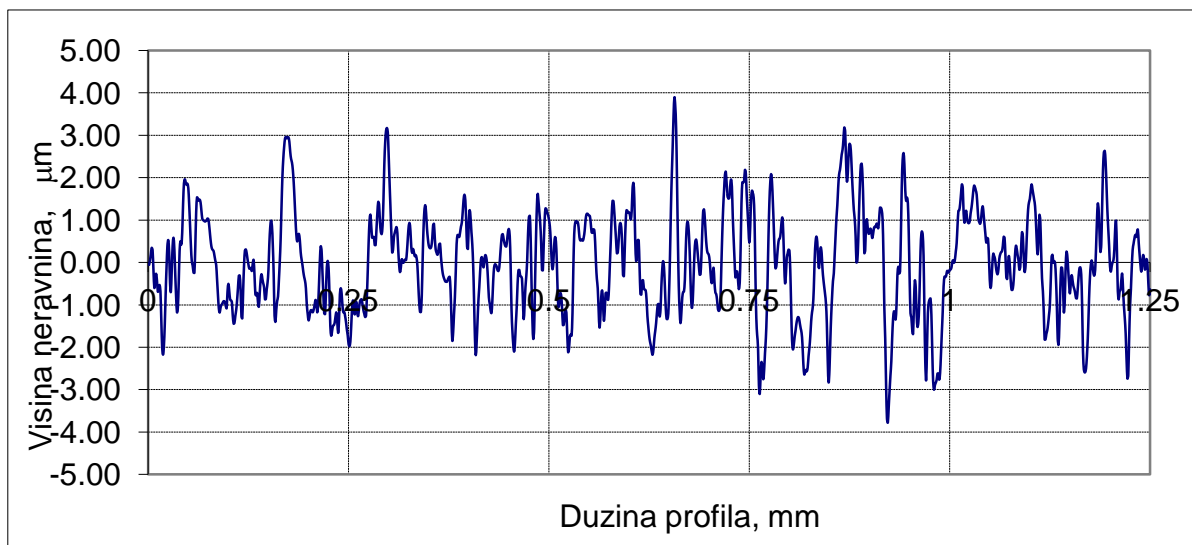
Слика 8.51 Фам 3- 30 daN после заривавања

Параметри топографије површине новог диска SRPS EN X20Cr13 приказани су у табели 8.4.

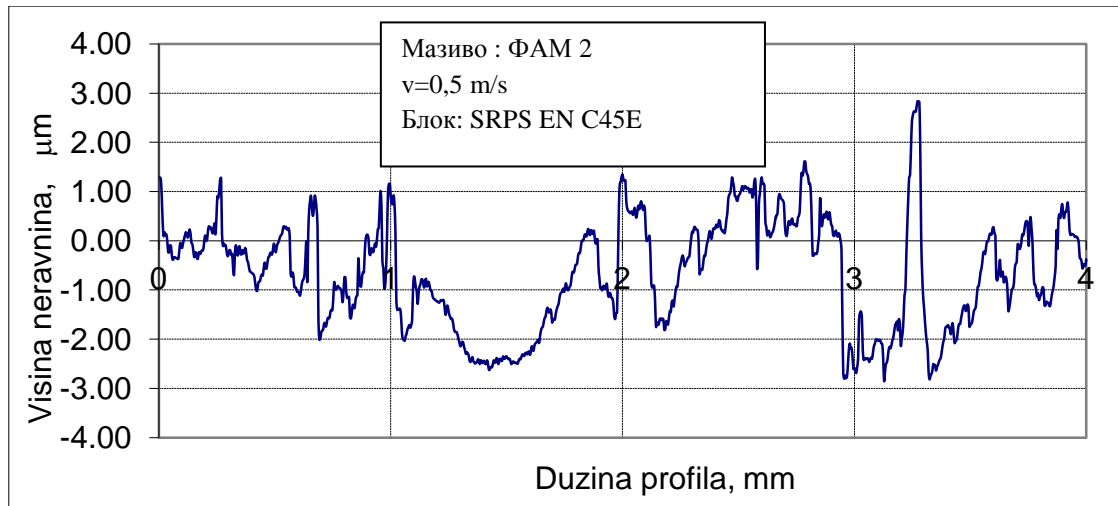
Табела 8.4 Вредности параметара топографије површине пре испитивања

Rt1 =5.14	$\mu\text{m}$	<b>Ry = 6.97</b>	$\mu\text{M}$	Sm = 23.5	$\mu\text{m}$
Rt2 =5.36	$\mu\text{m}$	Rtm = 5.78	$\mu\text{m}$	S = 10.6	$\mu\text{m}$
Rt3 = 6.07	$\mu\text{m}$	Rv = 3.78	$\mu\text{m}$	$\Delta q = 19.2$	deg
Rt4 = 6.97	$\mu\text{m}$	Rp = 3.9	$\mu\text{m}$	Rsk = 0	
Rt5 =5.37	$\mu\text{m}$	R3z = 3.93	$\mu\text{m}$	Rku = 3.1	
<b>Ra = 0.956</b>	$\mu\text{m}$	Rpm = 3.18	$\mu\text{m}$		
Rq =1.208	$\mu\text{m}$	R3y = 5.59	$\mu\text{m}$		

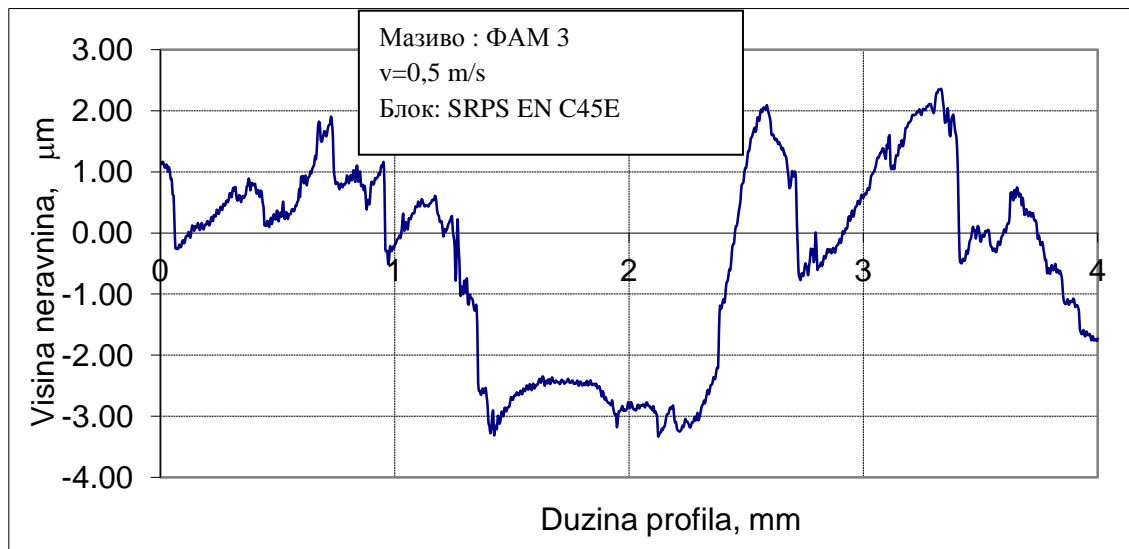
На сликама од 8.52 до 8.56 се налазе снимци топографије површина на референтној дужини новог диска и блока после испитивања узорака мазива.



Слика 8.52 Топографија површине новог диска на референтној дужини

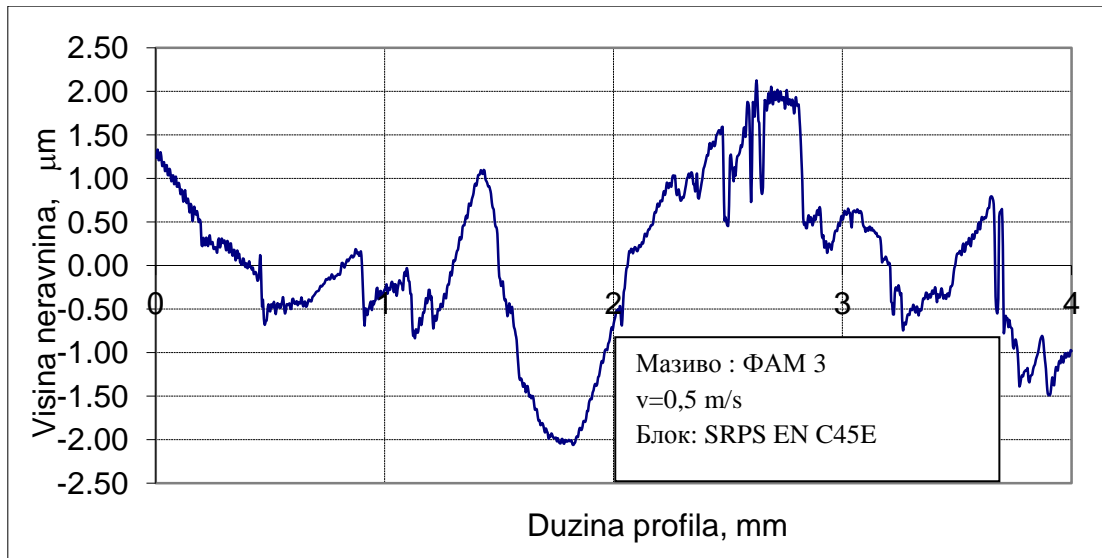


Слика 8.53 Топографија површине блока после испитивања код мазива ФАМ 2 при 30 daN

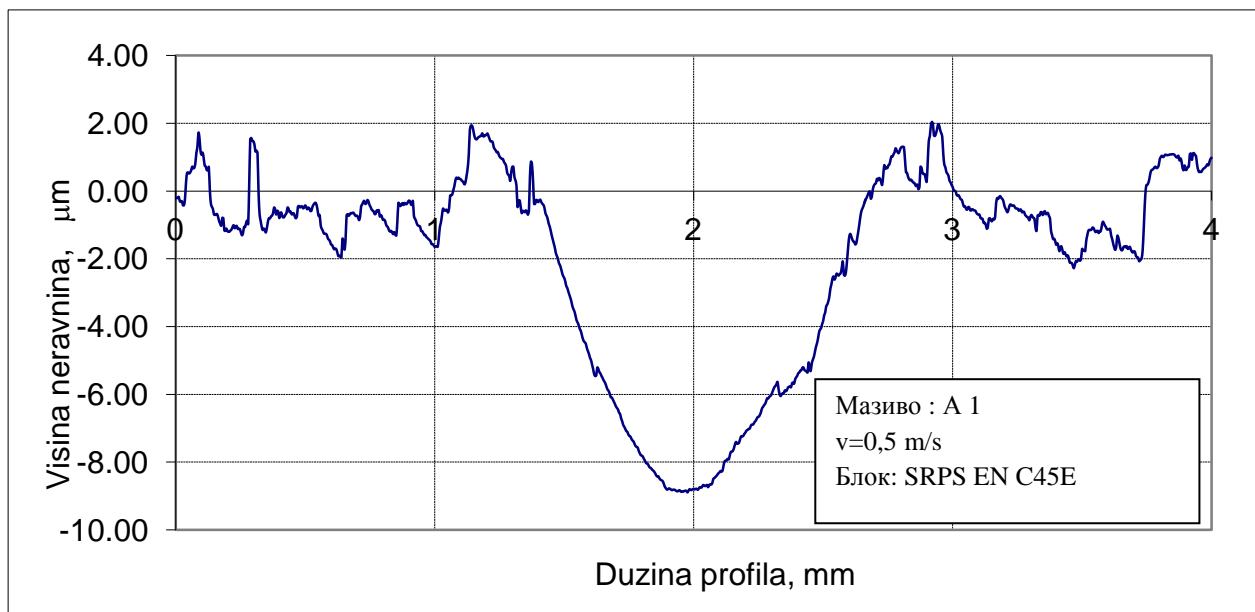


Слика 8.54 Топографија површине блока после испитивања мазива ФАМ 3 при 20 daN





Слика 8.55 Топографија површине блока после испитивања мазива ФАМ 3 при 30 daN

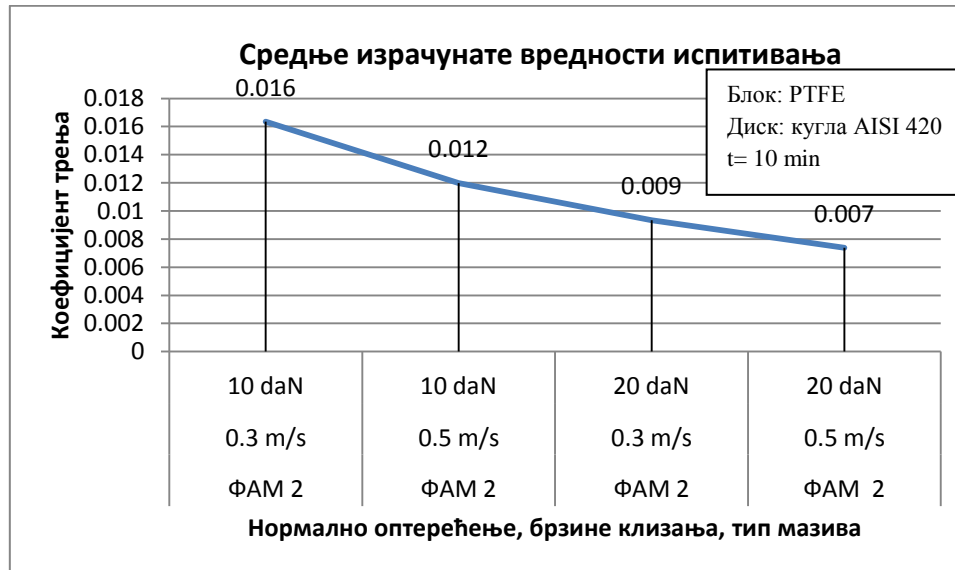


Слика 8.56 Топографија површине блока после испитивања мазива А1 при 10 daN

## 9. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ЕКСПЕРИМЕНАТА

### 9.1 Прва серија експеримената

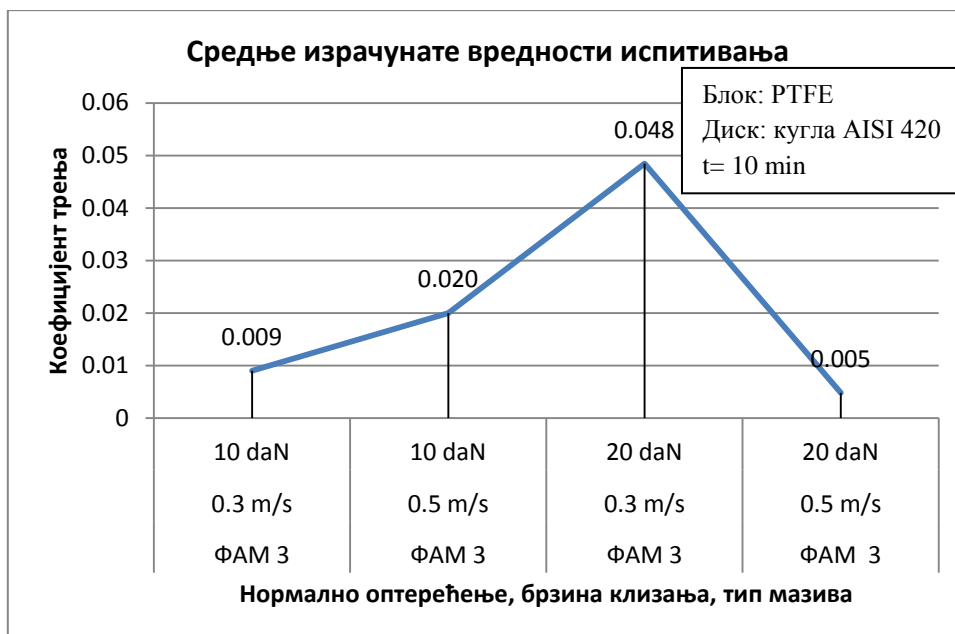
Код мазива ФАМ 2 (учешће  $\text{MoS}_2$  у саставу) констатована је велика адхезиона прионљивост (способност) задржавања на површини. То је узроковало нагомилавање мазива испред диска и блока. Као последица тога, долазило је до померања мерне конзоле у супротном смеру, те је тако мерни уређај регистровао „негативни „ коефицијент трења који је у ствари, овде исказан као израчуната вредност. Израчуната вредност, приказује карактеристичне особине, да са порастом оптерећења се смањују измерене вредности, са 20 daN ка 10 daN. Што је приказано на следећем дијаграму 9.1;



Дијаграм 9.1 Средње вредности добијене прерачунавањем измерених вредности

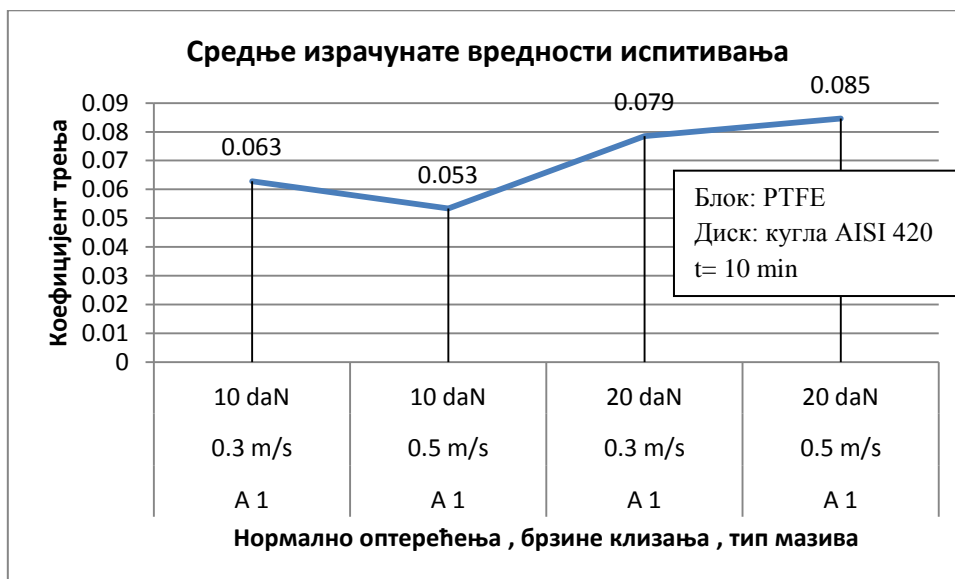
Исто се може видети у табели 8.1 где су дате бројчане вредности.

За мазиво ФАМ 3, обзиром на свој састав (додаци PTFE), добијају се предвиђене тј. пројектоване перформансе, које се огледају у значајно смањеном коефицијенту трења спрам мазива ФАМ 2, уз истовремено задржавање велике адхезионе прионљивости што се види из следећег дијаграма 9.2 и таблице 8.2 где су дате бројчане вредности.



Дијаграм 9.2 Средње вредности добијене прерачунавањем измерених вредности

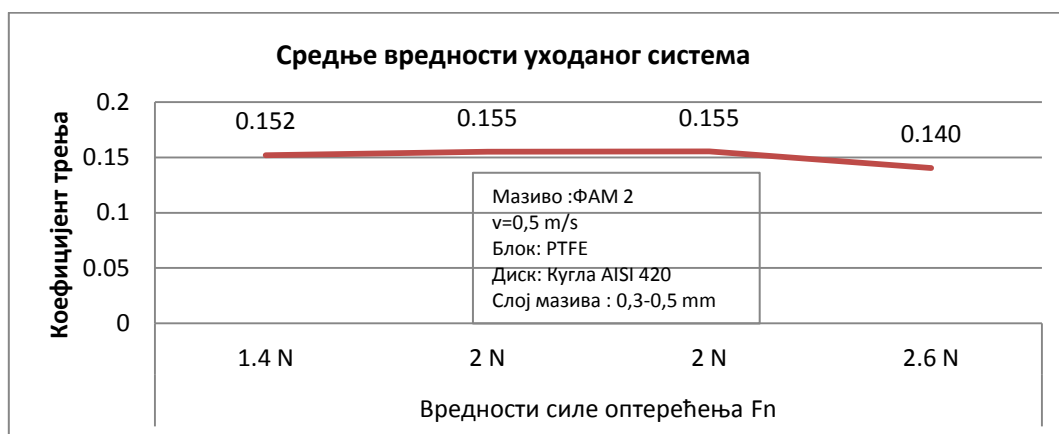
Мазиво А1 задржава своје понашање при датим режимима експеримента, уједначен коефицијент трења, али већи од претходна два мазива са одличним адхезионим својствима, што је приказано на дијаграму 9.3 и табlici 8.3.



Дијаграм 9.3 Средње вредности коефицијента трења

## 9.2 Друга серија експеримената

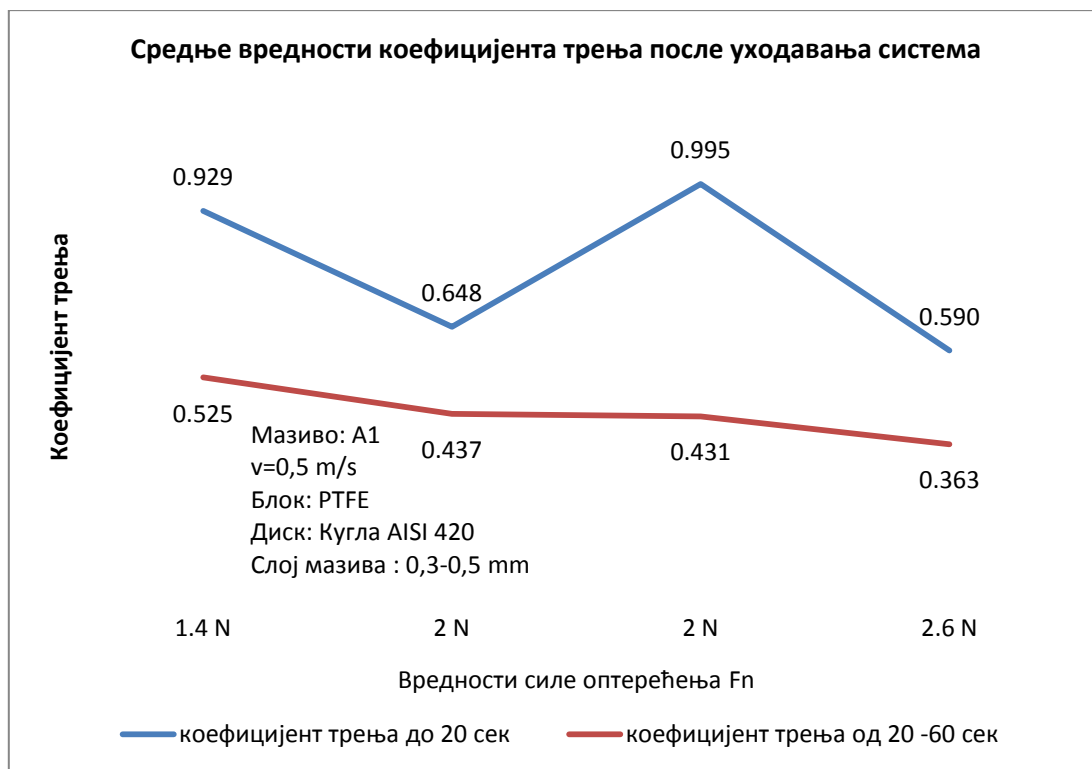
У овој серији извршено је мерење коефицијента трења са значајно мањим силама оптерећења у циљу сагледавања уједначености коефицијента трења, брзине уходавања (ефектуирања) система и стабилности задржавања мазива. Ради реалније процене и могућности поређења упоредних карактеристика сва три типа мазива, извршено је „одсецање“ на временској оси, после процењених 6 секунди, тј од тренутка ефектуирања система, када се све криве стабилизују. Испитивања су вршена за обе комбинације трибо парова: Кугла AISI 420-PTFE и метал-метал. Добијене вредности коефицијента трења у трибо пару метал-полимер код мазива ФАМ 2 и ФАМ 3 су значајно ниже (око 50 %) него код трибо пара метал-метал, што се може видети из дијаграма 9.7 и 9.8.



Дијаграм 9.4 Средње вредности коефицијента трења од момента уходавања система (за процењених 6 секунди)

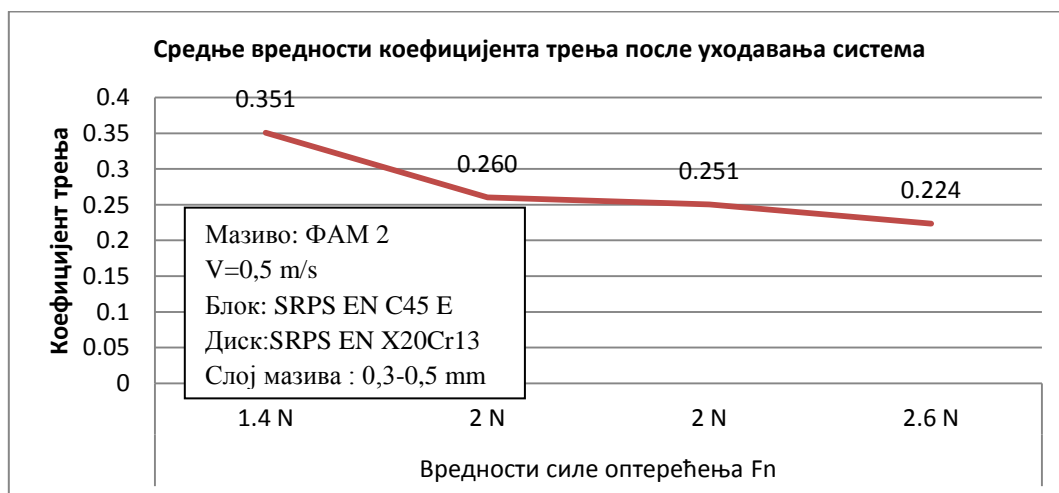


Дијаграм 9.5 Средње вредности коефицијента трења од момента уходавања система (за процењених 6 секунди)

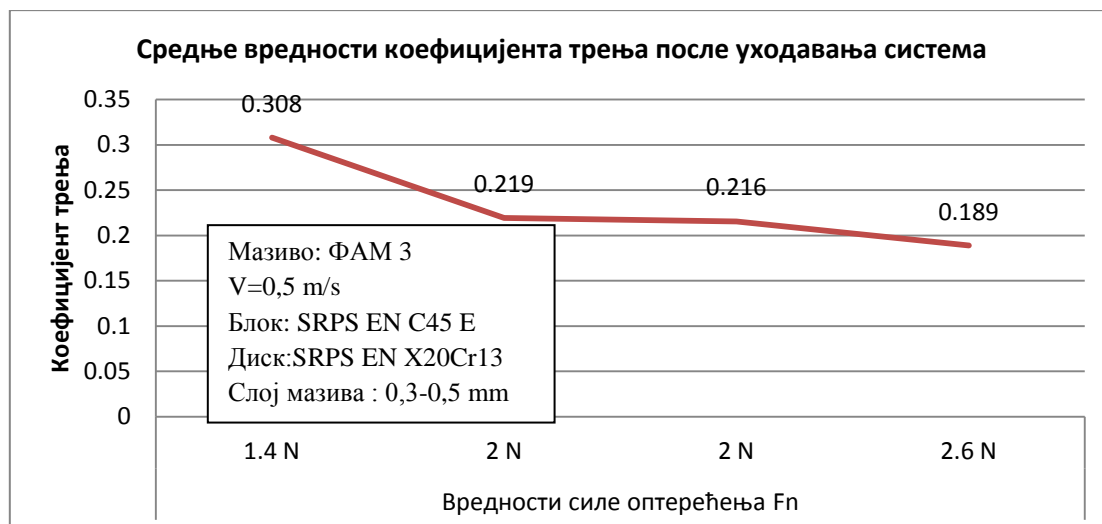


Дијаграм 9.6 Средње вредности коефицијента трења од 0-20 s и од 20 - 60 s, за време уходавања и од момента уходавања система за А1

Специфичност резултата добијених код мазива А1 огледа се у томе да је требало узети веће време до ефектуирања система (у овом случају 20 секунди) и остатак од 20 ÷ 60 s. ефектуираног дела . Са дијаграма 9.6 може се видети упоредно приказане вредности до и од ефектуираног времена система. Са дијаграма 9.6 се јасно виде, да се после ефектуирања система коефицијент трења стабилизује на константном нивоу, који је значајно већи у односу на претходна два. Почетак уходавања система показује велику вредност коефицијента трења, која је готово 2,5 пута већа од мазива ФАМ 2 и ФАМ 3, дијаграм 9.4 и 9.5.

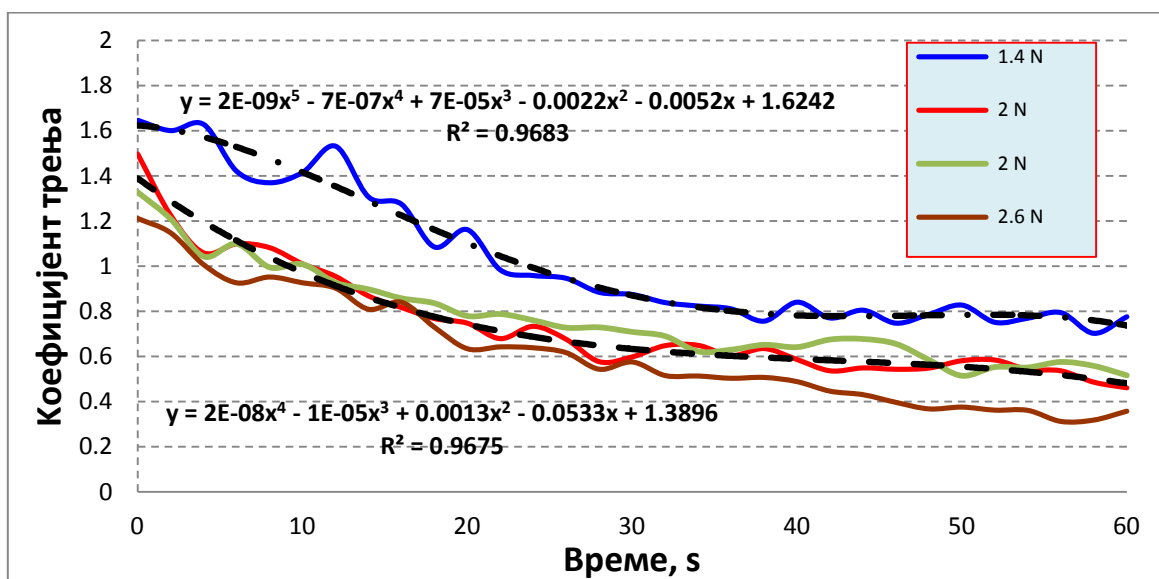


Дијаграм 9.7 Средње вредности коефицијента трења од процењених 6 секунди, тј од момента уходавања система ФАМ 2



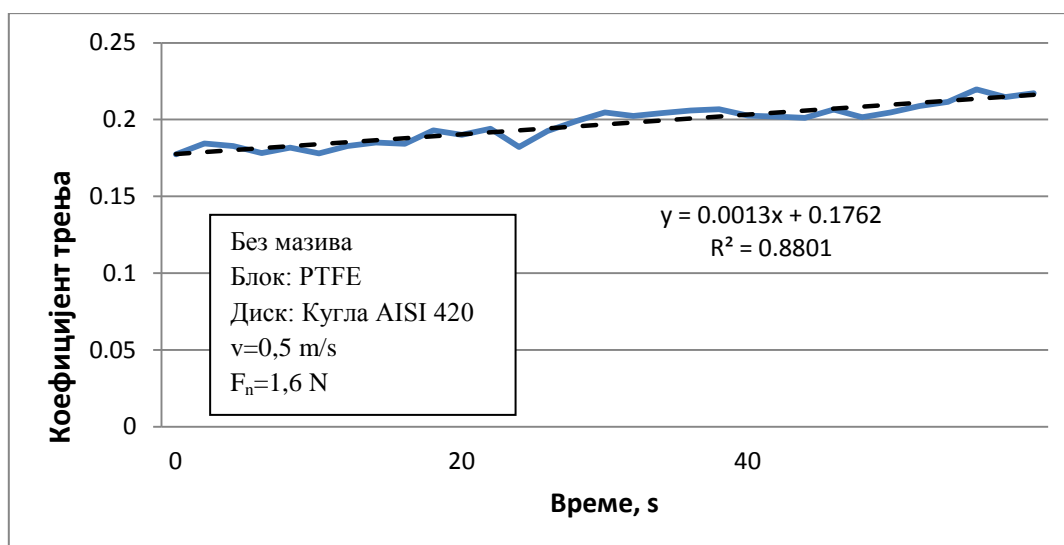
Дијаграм 9.8 Средње вредности коефицијента трења од процењених 6 секунди, тј од момента уходавања система ФАМ 3

На слици 9.1 извршена је апроксимација тренда добијених вредности кривих са полиномном кривом која је дала јак корелациони коефицијент реда  $R=0,96$ . за А 1, слике 8.19.



Слика 9.1 Апроксимација тренда коефицијента трења полиномом 4-ог и 5-ог реда

На слици 9.2, дата је апросимација тренда извршеног мерења коефицијента трења код трибо пара Кугла AISI 420-PTFE без мазива где се може видети, са јаким корелацијом  $R=0,88$ , слагање са измереним подацима досадашњих истраживања у постојећој литератури, (Рабинович, Табор ) [172,173] да долази до пораста коефицијента трења при контакту метал – полимер (PTFE).



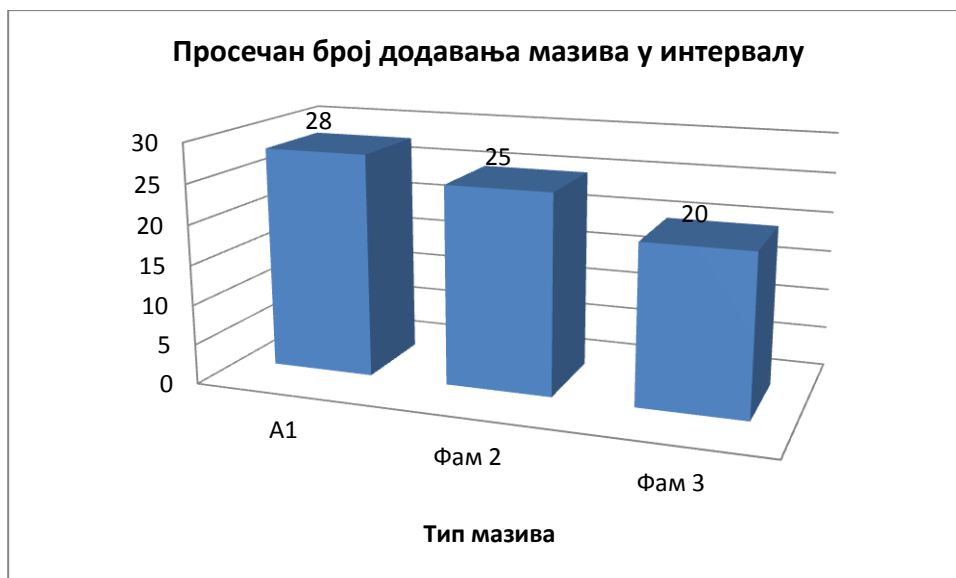
Слика 9.2 Вредности коефицијента трења у контакту PTFE и метала AISI 420

Интересантан је и график на слици 8.21, где се уочава феномен пораста коефицијента трења у зависности од пораста оптерећења (у овом случају урађен са малим порастом при континуалном процесу мерења) при контакту метал-метал, што је исто приказано у литератури [93].

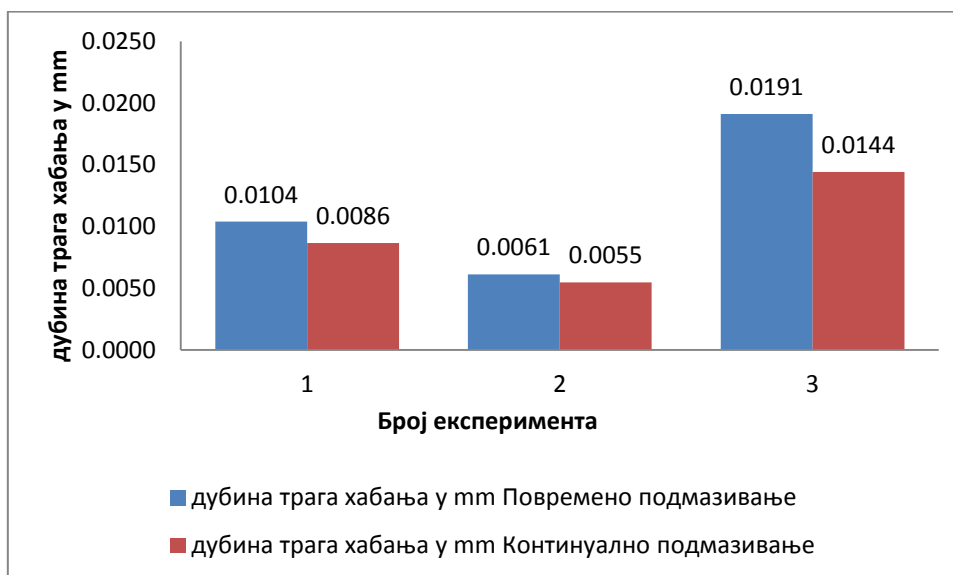
### 9.3 Трећа серија експеримената

Код ове серије експеримената извршено је мерење коефицијента трења при контакту трибо пара метал –метал са континуалним и повременим додавања мазива (код уоченог пораста коефицијента трења).

Као квантитативни показатељ упоредних вредности коефицијента трења, извршена је њихова подела на интервал од 2 до 10 минута и извршено мерење броја подмазивања у том интервалу. Ово је значајно због ефекта који се јављају на вентилима и славинама гасовода као квалитет „одношења „ мазива тзв спирања (wash out) са површина. Добијено „премеравање“ показало је одлично слагање са експериментима на реалним условима где је мазиво ФАМ 2 за 17% било боље од А1, што се и овом приликом манифестовало (у граници од 12%-16,6%), те однос ФАМ 2/ФАМ 3 за 25% и као врло значајан параметар вредност односа А1/ФАМ 3 за 40%, што је графички приказано и на дијаграму 9.9.



Дијаграм 9.9 Просечан број додавања мазива у интервалу од 2-10 минута

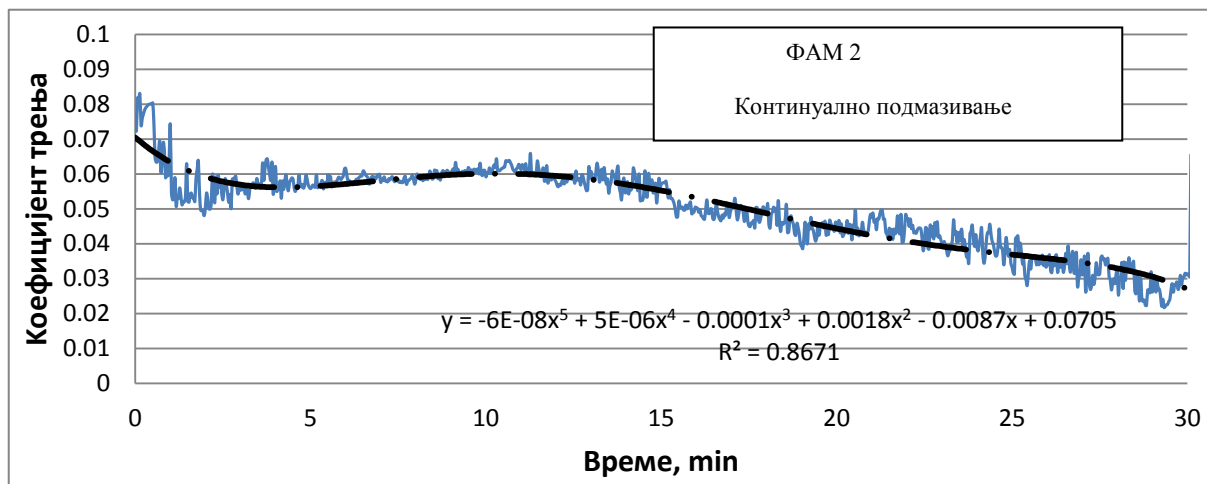


Дијаграм 9.10. Упоредне вредности дубине трага хабања за континуално и повремено подмазивање

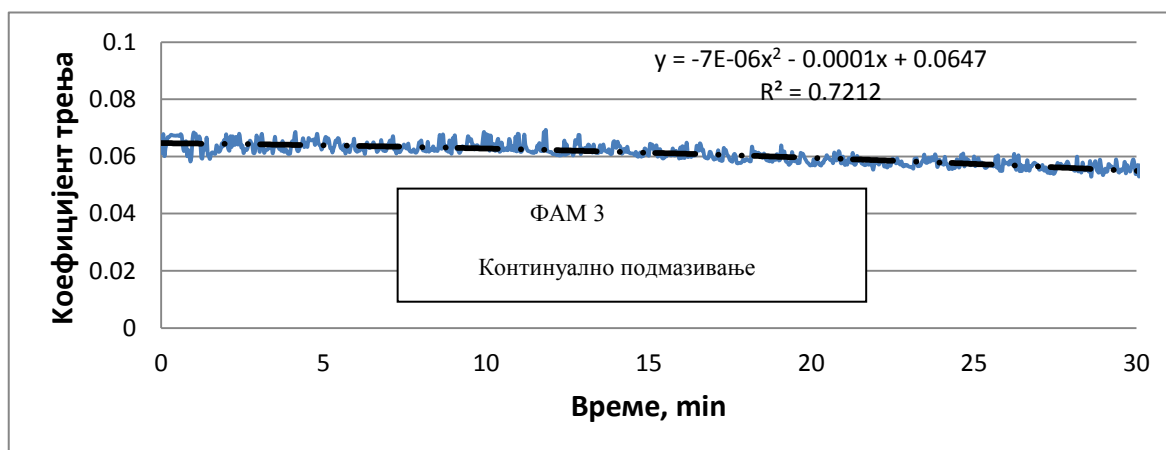
Док се са приказаног дијаграма 9.10 могу видети упоредне вредности дубине трага хабања за континуално и повремено подмазивање, као добар квалитативно – квантитативни показатељ.



Као илустрација тренда понашања мазива у посматраном интервалу, извршена је апроксимација добијених вредности на слици 8.24, полиномном кривом која је приказана на сл.9.3 за ФАМ 2 и слике 8.26 на сл. 9.4. за ФАМ 3.

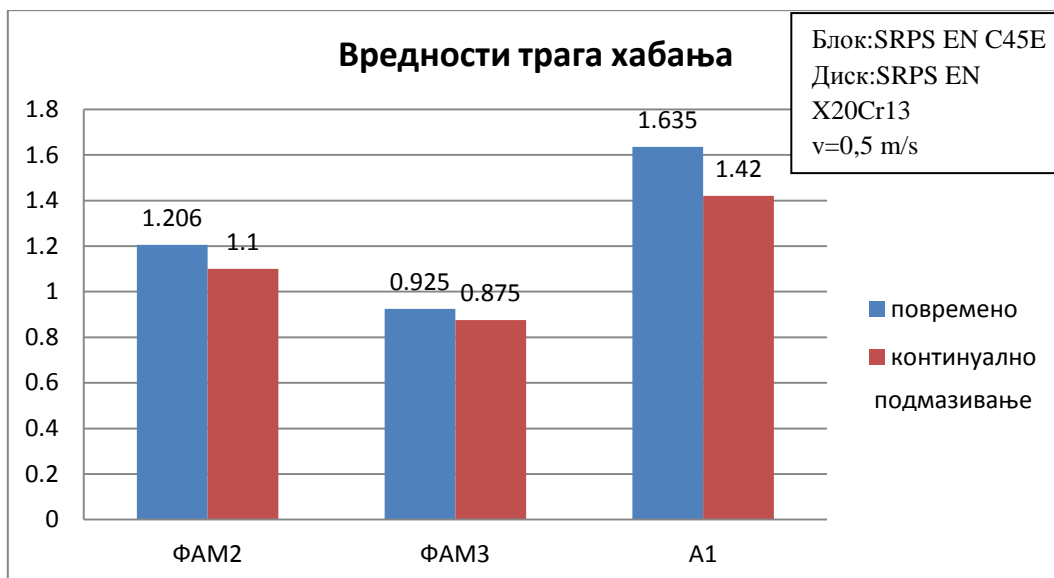


Слика 9.3 Апроксимирани коефицијент трења мазива ФАМ 2 при континуалном подмазивању



Слика 9.4 Апроксимирани коефицијент трења мазива ФАМ 3 при континуалном подмазивању

Исто тако извршено је мерење ширине трага хабања, видети табела 8.1, при повременом и континуалном подмазивању за сва три типа мазива и одабране трибо парове метал-метал. Из добијених вредности хабања јасно се уочава да је најмање хабање (при континуалном и повременом домазивању) остварило мазиво ФАМ 3,



Дијаграм 9.11 Вредности дубине трага хабања

#### 9.4 Четврта серија експеримената

У овој серији експеримената извршено је мерење коефицијента трења изабраног трибо пара метал-метал SRPS EN X20Cr13 и SRPS EN C45E са мазивима А1, ФАМ 2, ФАМ 3 и варираним оптерећењем од 10, 20, 30 daN, са једним слојем мазива (мазиво је претходно нането на диск) до констатованог заривавања трибо пара при брзини  $v = 0,5 \text{ m/s}$ .

Ови резултати бацају ново светло на досадашње резултате приказујући изузетно слабу способност подмазивања мазива А 1, које је за врло кратко време, 2-2,5 минута довело до заривавања трибо пара. Креирано мазиво ФАМ 2 је показало изузетно стабилан рад у целом опсегу од 30 минута при свим оптерећењима без заривавања.

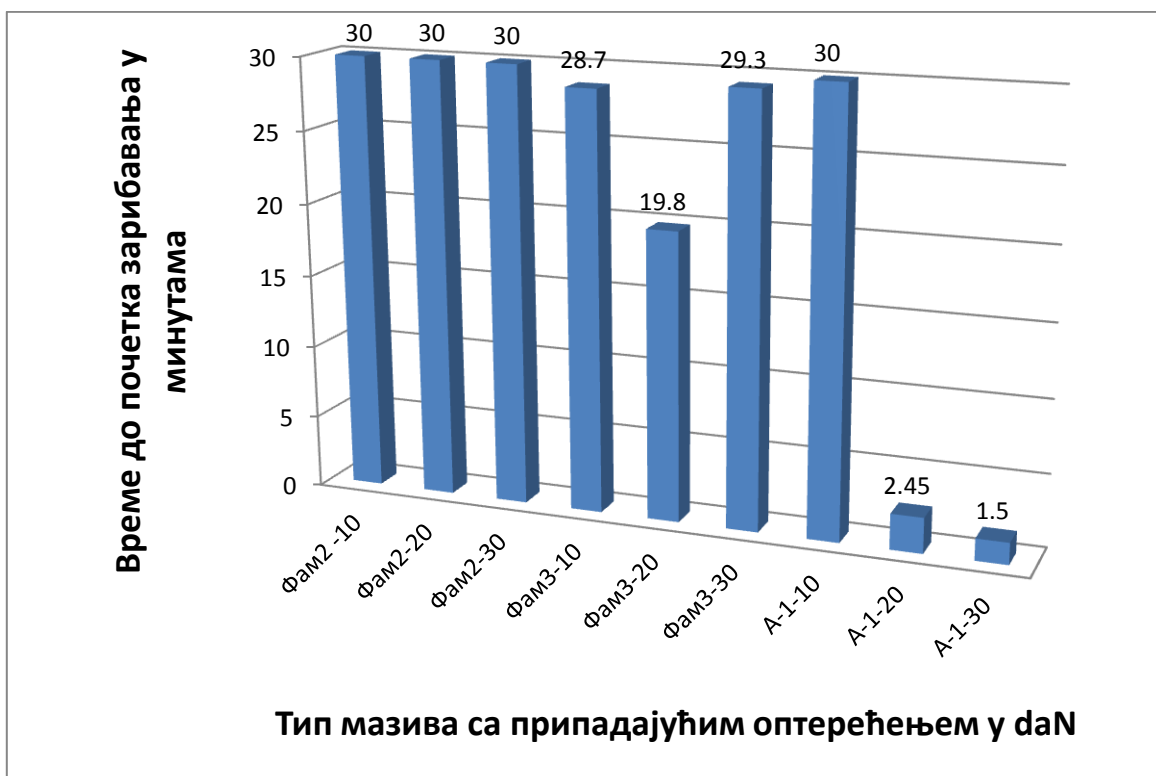
Мазиво ФАМ 3 је показало нешто лошије резултате при овом тесту али и они су далеко стабилнији и поузданији у односу на мазиво А1, јер се прво заривавање одиграло после 20 –ог минута при 20 daN, док при осталим оптерећењима није било заривавања током целог интервала, што би се могло сматрати неком недоследности у мерењу.

Добијене вредности могу се тумачити, при томе упоређујући ФАМ 2 и ФАМ 3 да је разлика исказана због друкчијих адитива који су унети у њих, мазиво ФАМ 2 са додатком  $\text{MoS}_2$  док је ФАМ 3 са додатком PTFE. Разлика у адитивима, који су као компоненте састава предметна два мазива, су и одабрана због различитих услова при којима би деловали. Таква формулација је добила своје пуно оправдање кроз добијене резултате и адхезиону способност истих. Мазиво ФАМ 2 је креирано за стандардне услове-редован режим рада док је мазиво ФАМ 3 креирано као „тешко“ тј „Heavy duty“ за екстремне

услове и попуно оштећења на заптивном делу прстена и кугле, тј. као последња брана од „пропуштања“ - губитка херметизације.

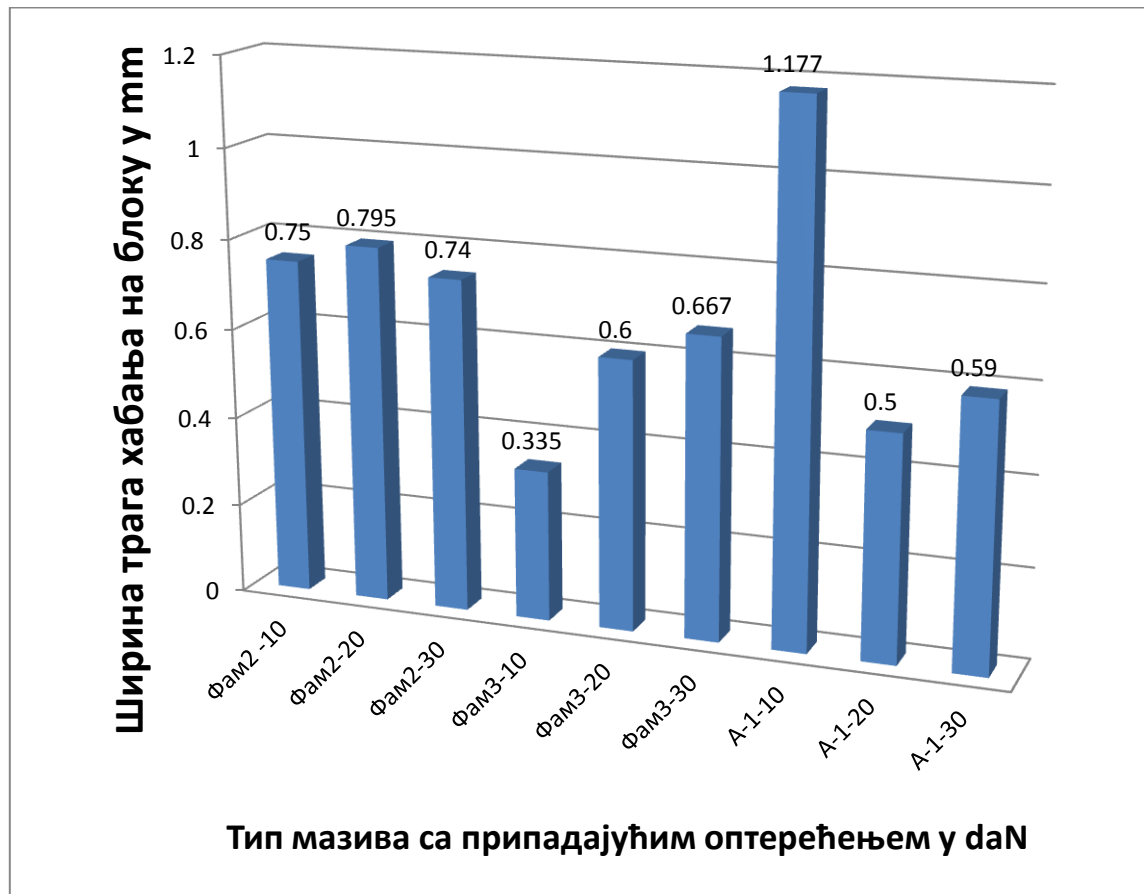
Из следећих дијаграма 9.12 јасно се уочавају наведене разлике.

Тип мазива са припадајућим оптерећењем у daN и време до почетка заривавања у минутима приказано на дијаграму 9.12.



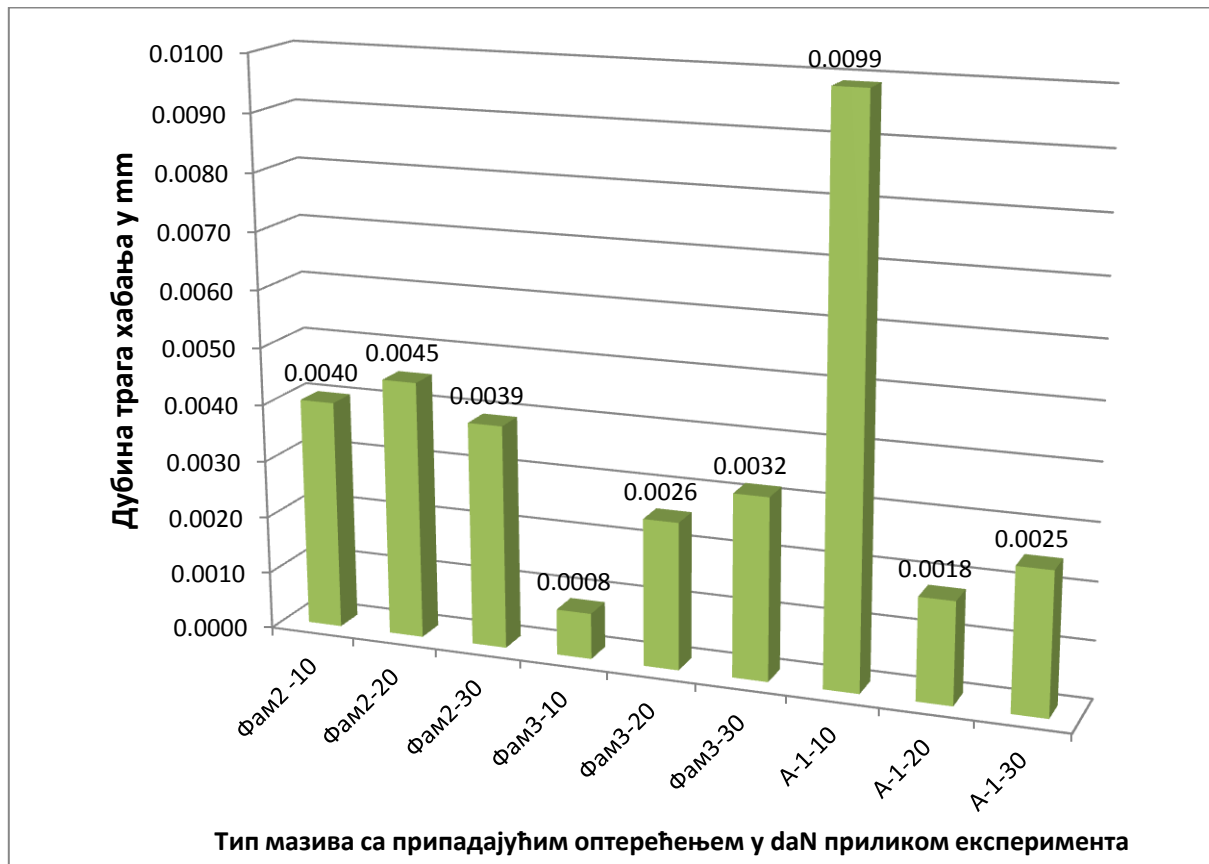
Дијаграм 9.12 Време до почетка заривавања

Тип мазива са припадајућим оптерећењима у daN и добијене вредности за ширину трага хабања приказан на дијаграму 9.13.



Дијаграм 9.13 Добијене вредности ширине трага хабања

Тип мазива са припадајућим оптерећењем у daN са дубинама трага хабања приказан је на дијаграму 9.14.



Дијаграм 9.14 Добијене вредности дубине трага хабања

**9.5 Карактеристике модификованог мазива****за заптивање и подмазивање славина на гасоводном систему**

Фабрика мазива Крушевац

Табела 9.1 Вредности добијене за мазиво ФАМ 3 у лабораторији стандардизованим тестовима

Р.бр	Карактеристике / Назив производа	Метода	ФАМ 3
1.	Боја	Визуелно	црна
2.	Изглед на 20 <sup>0</sup> С	Визуелно	хомогено
3.	Тип базног уља	-	минерално
4.	Угушћивач	-	несапунски чврсти додаци
5.	Нерадна пенетрација, mm/10	ASTM D 217	200
6.	NLGI	ASTM D 217	4
7.	Тачка капања, °С	ASTM D 2265	>300
8.	Издвајање уља, 168 /40 <sup>0</sup> С,%	BS 2000 part.121	0.5
9.	Издвајање уља, 30h /100 <sup>0</sup> С,%	FTMS 791m. 321	0.7
10.	Постојаност према води, 15 min./ 90°С, stepen	DIN 51 807/1	0
11.	Постојаност према води, 3h / 90°С, stepen		0/1
12.	Корозија Cu, 3h/100°С, stepen	ASTM D 4048	1
13.	Корозија Cu, 24h/100°С, stepen		1
14.	Средњи пречник хабања,mm	ASTM D 2266	0.60
15.	FOUR BOLL- test, - поч.зарибавања,N	ASTM D 2596	1000
16.	FOUR BOLL- test, - тачка сваривања,N		5000

Извор : лабораторија ФАМ Крушевац

## 10. ЗАКЉУЧЦИ

### Закључци триболошких истраживања

Циљ истраживања је био да се путем експеримената, спроведу триболошка истраживања у области граничног подмазивања на примарним деловима вентила у гасним системима који су изложени малим брзинама клизања и екстремним силама притиска. У оквиру истраживања формулисана су два нова заменска мазива у односу на инострано и одговарајући трибо парови.

На основу задатих циљева истраживања и постављених хипотеза, резултати добијени у експерименталном поступку, из првог дела, на реалним условима остварених у лабораторији за Мерење и регулацију, као и на систему гасовода, главном разводном чвору у Новом Саду, Ј.П. Србијагас-а, тако и моделским испитивањем у Лабораторији за обраду метала и трибологију Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, Лабораторији за обраду скидањем материјала, Факултета техничких наука у Новом Саду, исказали су своју пуну сврсисходност проучавања услова граничног подмазивања који се јављају на посматраним трибо-механичким системима, кугластим и чепастим славинама са могућношћу подмазивања.

Триболошко понашање оствареног слоја чврстог мазива на основу експерименталних истраживања потврђује да је оно одређено основним карактеристикама које су:

- добра адсорпциона способност према металној површини
- малим коефицијентом трења узрокованим адитивима и њиховој решетки која га чини
- високој хемијској стабилности на услове средине
- отпорности према повећању температуре
- оствареној херметизацији

Трајање слоја чврстог мазива у највећој мери зависе од адхезије створеног слоја и тврдоће основног материјала на који је нанет тј депонован. Може се закључити да је молекуларна компонента коефицијента трења значајно већа у односу на механичку, што је у сагласности са до сада обављеним експерименталним истраживањима.

Формулисана чврста мазива ФАМ 2 и ФАМ 3 обезбеђују експлоатациону поузданост као и адекватно изабрани трибо парови.

Понашање превлака чврстих мазива условљена су условима радне средине, структуром триболошког система и не може се генерализовати константним вредностима у ширем дијапазону триболошких параметара.

Добијени експериментални резултати својим упоредним, међусобним вредностима са великим степеном поузданости у изучаваној области, где се одвија проучавана контактна феноменологија трибо парова, при малим брзинама клизања и великим оптерећењима, дефинишу карактеристике створених стратешких ЗМС као и заменских материјала трибо парова.

Карактеристике створених чврстих мазива (ЗМС) и адекватно изабраних материјала трибо парова (чији узорци су узети са реалног ефектуираног тела из експлоатације, као и одабраних материјала заменских трибо парова), оствареним перформансама оправдавају тврдњу да креирана мазива имају велику адхезиону прионљивост на контактне површине трибо парова. Квалитет се манифестује кроз значајно умањен коефицијент трења, оствареним ширинама трагова и дубини хабања као и оствареној херметизацији.

На основу спроведених експерименталних истраживања, створена мазива су адекватна замена иностраним (који потпадају у групу стратешких производа и сврставају се у MIL-стандарде) у системима који обављају своју функцију у области граничног подмазивања и то; гасовода, нафтовода, термо-енергетских постројења, као и у војној употреби код извесних оруђа и оружја, тј. код свих оних система код којих се јављају енормна оптерећења у контакту трибо пара и мале брзине клизања.

#### **Правци даљих истраживања:**

Постоји објективни потенцијал, на основу добијених експерименталних резултата, у даљем продубљивању и разумевању феноменологије у области граничног подмазивања, стварањем нових формулација чврстих мазива и сходно томе новим избором материјала трибо парова .



**11. СПИСАК КОРИШЋЕНЕ ЛИТЕРАТУРЕ:**

- [1] Б. Ивковић, А. Рац „Трибологија“, Југословенско друштво за трибологију, Крагујевац, 1995
- [2] Д. Станивуковић, „Метод научног рада“, ФТН Нови Сад, последипломске студије, тезе за предавања, 2003
- [3] И. Пантелић, „Увод у теорију инжињерског експеримента“, ФТН Нови Сад, 1986
- [4] М. Шамић, „Како настаје научно дело“, Сарајево, 1980
- [5] Н. Милосављевић, „Основи научно-истраживачког рада“, Научна књига, Београд, 1989
- [6] З. Поповић, „Како написати и публиковати научно дело“, Академска мисао, Београд, 1999
- [7] С. Танасијевић, „Триболошки исправно конструисање“, монографија, Крагујевац, 2004
- [8] Machinery Lubrication, Noria publishing, Tulsa Oklahoma, July-August 2003
- [9] Lothar Kanne, “How does water influence lubricating greases and their characteristic and How can this be tested in the laboratory?”, p.258-262, Intertribo 2002
- [10] Стрелец, “Плинарски приручник“, 5 издање, Енергетика маркетинг, Загреб, 1995
- [11] стандард ЈУС М.Ц5.013-“Цевни затварачи, технички услови испоруке, врсте контроле и испитивања”
- [12] стандард API 6D-Specification for Pipeline Valves (Gate, Plug, Ball and Check Valves)
- [13] стандард API 598- Valve Inspection & Testing
- [14] каталози произвођача Fischer – Rosemount
- [15] каталози фирме ARGUS, Ettlingen, Немачка
- [16] каталози фирме Cooper Camerun, Huston, Texas,
- [17] каталози фирме Rockwell-Nordstrom, Huston, Texas
- [18] каталози фирме Sealweld, Calgary, Canada
- [19] каталози фирме Val-Tex, Huston, Texas
- [20] Жељко Алексић, „Унапређење методе мерења заптивености запорних органа“- YUNG., Југословенска конференција са међународним учешћем, 2002

- [21] Željko Aleksić, "Grease in function of sealing and lubrication applied on natural gas pipelines valves- experimental determination of necessary characteristic- INTERTRIBO 2002, VII<sup>th</sup> International symposium in cooperation with International tribology council, London, UK
- [22] Željko Aleksić, " A possible approach of developing the new product based on experimental research-contribution of developing domestic grease for sealing on natural gas pipeline valves" – BALKANTRIBO 2005
- [23] A.Rogachev,G. Gorbachevich,“Sealed materials for tribotechnical systems“, p. 170-172, Intertribo 2002
- [24] Ивковић Б.,“Средства за хлађење и подмазивање“, Југословенско друштво за трибологију, Крагујевац, 2001
- [25] Светозар Вукадиновић,“Елементи теорије вероватноће и математичке статистике“,Привредни преглед, Београд,1981
- [26] "Pipeline and gas Journal" , Oildom Publishing Co.Texas, 2000-2005
- [27] “Piping Equipement“, Trouvay and Cauvin,France, 1998
- [28] каталози фирме , "Pietro Fiorentini", Italija , 2004
- [29] Web site: [www.nordstronautco.com](http://www.nordstronautco.com) , 2000-2012
- [30] Web site: [www.womusa.com](http://www.womusa.com) , Huston ,Texas, 2000-2016
- [31] <http://www.asme.org/> , American Society Of Mechanical Engineers,2000-2016
- [32] <http://prci.com/default.htm> , Pipeline Research Council International, Inc. (PRCI), -2008
- [33] <http://www.valveexperts.com/relatedlinks/>, 2000-2016
- [34] [www.api.org](http://www.api.org) , American Petroleum Institute, "Represents America's Oil and Natural Gas Industry" .,1996-2016
- [35] [www.vma.org](http://www.vma.org) , Valve Manufacturers Association, 2000-2016
- [36] [www.fluidsealing.com](http://www.fluidsealing.com) , Fluid Sealing Association Manufacturers, 2000-2010
- [37] [www.ansi.org](http://www.ansi.org) , American National Standards Institute,2000-2016
- [38] <http://www.valve-world.net/index.asp> , community for valve professionals, 2000-2010
- [39] <http://www.igu.org/> , International Gas Union , 2000-2016
- [40] SEP , машински приручник, МБТ, 1997, Београд
- [ 41] <http://www.celici.rs>, 2015

- [42 ] Радојка Глигорић, Машински елементи, Пољопривредни факултет Нови Сад, 2015
- [43 ] Владислав Ђукић, „Метални материјали“ ,Научна књига ,Београд,1984
- [44 ] Жељко Алексић, „ Савремени прилаз развоју новог производа на основу експерименталних истраживања-прилог развоју домаћег мазива за вентиле на гасоводним системима“ , магистарска теза, Нови Сад, ФТН, 2006
- [45 ] П. Ковач, Методе планирања и обраде експеримената, ФТН издаваштво, Нови Сад, 2011
- [46 ] М. Лазић, Б. Недић, С. Митровић, Технологија обраде метала резањем, Крагујевац, 2002
- [47 ] М. Гостимировић, Д. Миликић, М. Секулић, Основе технологије обраде скидањем материјала, ФТН издаваштво, Нови Сад, 2015
- [48 ] D.Golubovic, P. Kovač, D. Jesic, M. Gostimirovic, V .Pucovski, Wear Intensity of Different Heat Threated Nodular Iron, Metalurgija-Metallurgy, Vol 51(2012), No.4, pp. 518-520
- [49 ] M Gostimirovic, P Kovac, B Skoric, M Sekulic, Effect of Electical Pulse Parameters on the Machining Performance in EDM, Indian Jurnal of Engineering and Material Sciences, Vol.18(2011), pp 411-415
- [50 ] T. W. Scharf, S.V. Prasad, Solid lubricants: a review, Springer Science Media , New York , 2012, J Mater Sci (2013) 48 :511-531
- [ 51] D. Jesic, Tribological properties of nodular cast iron, Monography, Sofia 2000
- [52 ] Д. Јешић, Машински материјали, Крагујевац, 1999
- [53 ] NASA , George C. Marshall Space Flight Center, Lubrication Handbook for space industry, 1985
- [54 ] War office , USA, Boudary lubrication , Scientific and technical applications forecast, 1972
- [55 ] Bernard J. Hamrock, Steven R. Schmid, Bo O. Jacobson, Fundamentals of fluid film lubrication, New York, Basel, 2004
- [56 ] Pierre E. Dupont, Eric P. Dunlap, Friction Modeling and control in boudary lubrication, Aerospace and mechanical engineering, Boston University, Boston , MA 02215
- [57 ] C. Kajdas, Tribochemistry, Warshaw Univerity of technology, Institute of Chemistry in Plock, Poland , 2014
- [ 58] Tehnička keramika, priručnik za primjenu, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2004

- [ 59] Raymond Parnes, Solid Mechanics in engineering, John Wiley and sons ltd, New York, Singapore, Toronto, 2001
- [60] Ali Erdemir, „Solid lubricants and self lubricating films“, Ch.22, U.S. Department of Energy, 2001
- [61] P.Jost, Department of Education and Science „Lubrication” (Tribology), Education and Research –A report on the present Position and Industry’s Needs”, London 1966
- [62] Tribološko stablo, naslovna strana časopisa „Lubrication Engineering“ Vol. 42. No.1
- [ 63] Танасијевић С., Основи трибологије машинских елемената, Научна књига, Београд, 1989
- [ 64] E.Rabinowicz, „Gaps in our knowledge of friction and wear“, Materials Technology, New York 1976
- [ 65] Рац А., Основи трибологије, Машински факултет Универзитета у Београду, 1991
- [66] Нешић Јб, Прокић В. ; Сила трења – од фундаменталних процеса до макроскопских закона, ПМФ Ниш , 2010
- [66] V. Ivušić , Tribologija , Univerzitet u Zagrebu, 1988
- [67] Voronjec K., Obradović N., Mehanika fluida, Naučna knjiga, Beograd,1965
- [68] Ивковић Б., Рац А., Савић В., Трибологија и техника подмазивања, Београд 1995
- [69] Pešić Z., Osnovi tribologije, monografija, Vojna akademija, Beograd 2007
- [70] Savić Z., Inžinjersko mašinski priručnik, Beograd 1987
- [71] Рац А., Погонске материје III део (мазива), Машински факултет, Београд, 1991.год
- [72] Рац А., Мазива и подмазивање машина, Машински факултет Београд, 2007. год
- [73] D. Halliday, R. Resnick and J. Walker, Fundamentals of Physics 7<sup>th</sup> edn (New York: Wiley), 2005
- [73] U. Besson, L. Borghi, A. De Ambrosis and P. Mascheretti, Am. J. Phys. **75**(12) 1106, 2007
- [74] J. Gao, W. D. Luedtke, D. Gourdon, M. Ruths, J. N. Israelachvili and Uzi Landman, J. Phys. Chem, **B**, 108, 3410, 2004
- [75] V. L. Popov, Contact Mechanics and Friction, Physical Principles and Applications, Springer-Verlag Berlin Heidelberg ,2010

- [76] E. Meyer, R. M. Overney, K. Dransfeld, T. Gyalog, *Nanoscience: Friction and Rheology on the Nanometer Scale*, World Scientific, Singapore, 1998
- [77] V. Dedkov, *Physics - Uspekhi* **43**(6) 541, 2000
- [78] University of California, Berkeley. "Climbing The Walls? New Adhesive Mimics Gecko Toe Hairs." *ScienceDaily*, 30 Jan. 2008.
- [79] H. Holscher, A. Schirmeisen and U. D. Schwarz, *Phil. Trans. R. Soc. A* **366** 1383, 2008
- [80] Jun Zhang, Yonggang Meng, *Boundary lubrication by adsorption film*, *Friction* 3 (2) 115- 147, 2015
- [81] Szeri A. Z, *Fluid film Lubrication: Theory and Design*, Cambridge: Cambridge University Press, 1988
- [82] Barnes A M, Batle K D, Thibon V R A , A review of zonc dialkylditiophosphates (ZDDPS), *Tribology Int* 34(6): 389-395 , 2001
- [83] Bowden F P, Gregory J N, Tabor D, *Lubrication of metal surfaces by fatty acids*, *Nature* 156 (97-101), 1998
- [84] Bhushan B. (Ed), *Handbook of Micro/Nanotribology*, 2<sup>nd</sup> ed. CRC Press, Boca Raton, FL, 1988
- [85] Galvanetto U, Bishop, *Mechanical stick slip vibrations*, *Int J Bifurcat Chaos* 5 , 1995
- [86] Karnopp D, *Computer simulation of stick- slip friction in mechanical dynamic systems*, *J Dyn Syst Meas Control* 107 , 1985
- [87] Johnson P A , Savage H, Knuth M, Gomberg J, Marone C. *Effect of acoustic waves on stick-slip in granular media and iimplications for earhquakes*, *Nature* 451 , 2008
- [88] Walker D M , Tordesillas A, etc, *A complex system analysis of stick-slip dynamics of a laboratory fault*, *Chaos* 24, 2014
- [89] Wojewoda J, Stefanski A etc, *Hysteresis effect of dry friction: modeling and experimental studies*, *Philos T R Soc A366*, 2008
- [90] Saha A , Wahi P, *An analitical study of time-dependent control of friction-induced vibrations in system with dynamition model*, *Int J Neoln Mech* 63, 2014
- [91] Wang D, Mo J, etc, *Experimental and numerical studies of friction induced vibration and noise of groove –textured surfaces*, *Mech Syst Signal Process* 46, 2014
- [92] Tabor D *J Lubr Tech* 103:169, 1981
- [93] Rabinowicz E *Friction and wear of materials*, 3rd edn. Wiley, New York, p 34, 1995
- [94] Rabinowicz E *ASLE Trans* 14:198, 1971

- [95] Gao GT, Mikulski PT, Harrison JA *J Am Chem Soc* 124: 7202, 2002
- [96] Heo S-J, Sinnott SB, Brenner DW, Harrison JA In: Bhushan B (ed) *Nanotribology and nanomechanics: an introduction*. Springer, Heidelberg, p 623, 2005
- [97] Szlufarska I, Chandross M, Carpick RW *J Phys D Appl Phys* 41:123001, 2008
- [98] Pastewka L, Moser S, Moseler M *Tribol Lett* 39:49, 2010
- [99] Liang T, Sawyer WG, Perry SS, Sinnott SB, Phillpot SR *Phys Rev B* 77:104105, 2008
- [100] Jang I, Burris DL, Dickrell PL, Barry PR, Santos C, Perry SS, Phillpot SR, Sinnott SB, Sawyer WG *J Appl Phys* 102:123509, 2007
- [101] Barry PR, Chiu PY, Perry SS, Sawyer WG, Phillpot SR, Sinnott SB *Langmuir* 27:9910, 2011
- [102] Prasad SV, Michael JR, Christenson TR *Scripta Mater* 48:255, 2003
- [103] Jungk JM, Michael JR, Prasad SV *Acta Mater* 56:1956, 2008
- [104] Johnson KL *Contact mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1985
- [105] Larsen-Basse J *ASM handbook, vol 18: friction, lubrication, and wear technology*, p. 30, 1992
- [106] Greenwood JA, Williamson JBP *Proc R Soc (Lond) A* 295:300, 1966
- [107] Whitehouse DJ, Archard JF *Proc R Soc (Lond) A* 316:97, 1970
- [108] Bower AF, Johnson KL *J Mech Phys Solids* 34:471, 1989
- [109] Bowden FP, Tabor D *The friction and lubrication of solids*. Clarendon Press, Oxford, pp 112–120, 1986
- [110] Stoyanov P, Chromik RR, Goldbaum D, Lince JR, Zhang X *Tribol Lett* 40:199, 2010
- [111] Stoyanov P, Strauss HW, Chromik RR *Wear* 274–275: 149, 2012
- [112] Chromik RR, Wahl KJ *World Tribology Congress III. American Society of Mechanical Engineers, New York*, pp 829–830, 2005
- [113] Singer IL, Dvorak SD, Wahl KJ, Scharf TW *J Vac Sci Technol A* 21:S232, 2003
- [114] Wahl KJ, Sawyer WG *MRS Bull* 33:1159, 2008
- [115] Strauss HW, Chromik RR, Hassani S, Klemberg-Sapieha JE *Wear* 272:133, 2011
- [116] Schmellenmeier H *Exp Tech Phys* 1:49, 1953
- [117] Eisenberg S, Chabot R *J Appl Phys* 42:2953, 1971
- [118] Braithwaite ER *Solid lubricants and surfaces*. Clarendon Press, Oxford, p 139, 1964
- [119] Deacon RF, Goodman JF *Proc R Soc Lond A* 243:464, 1958

- [120 ] Roselman IC, Tabor D *J Phys D* 9:2517, 1976
- [121 ] Buckley DH *Surface effects in adhesion, friction, wear and lubrication*. Elsevier, Amsterdam, 1981
- [122 ] Skinner J, Gane N, Tabor D *Nature* 232:195, 1971
- [123 ] Savage RH *J Appl Phys* 19:1, 1948
- [ 124] Ramadanoff D, Glass SW *Trans Am Inst Electr Eng* 63:825, 1944
- [125 ] Yen BK, Schwickert BE, Toney MF *Appl Phys Lett* 84:4702, 2004
- [126 ] Robertson J *Adv Phys* 35:317, 1986
- [127 ] Tallant DR, Parmeter JE, Siegal MP, Simpson RL *Diam Relat Mater* 4:191, 1995
- [128 ] Erdemir A, Donnet C (eds) *Tribology of diamond-like carbon films: fundamentals and applications*. Springer, New York, 2008
- [129 ] Robertson J *Mater Sci Eng R* 37:129, 2002
- [130 ] Erdemir A, Donnet C *J Phys D Appl Phys* 39:R311, 2006
- [131 ] Koidl P, Wagner C, Dischler B, Wagner J, Ramsteiner M *Mater Sci Forum* 52:41, 1990
- [132 ] Tamor MA, Vassell WC, Carduner KR *App Phys Lett* 58:592, 1991
- [133 ] Donnet C, Fontaine J, Lefevre F, Grill A, Patel V, Jahnes C *J App Phys* 85:3264, 1999
- [134 ] Weiler M, Sattel S, Giessen T, Jung K, Ehrhardt H, Veerasamy VS, Robertson J *Phys Rev B* 53:1594, 1996
- [135 ] Erdemir A, Eryilmaz OL, Fenske G *J Vac Sci Tech A* 18:1987, 2000
- [136 ] Erdemir A *Proc Inst Mech Eng J* 216:387, 2002
- [137 ] Scharf TW, Ohlhausen JA, Tallant DR, Prasad SV *J Appl Phys* 101:0635211, 2007
- [138 ] Grill A *Wear* 168:143, 1993
- [139 ] Donnet C *Surf Coat Technol* 100–101:180, 1998
- [140 ] Scharf TW, Singer IL *Tribol Lett* 14:137, 2003
- [141 ] Kester DJ, Brodbeck CL, Singer IL, Kyriakopoulos A *Surf Coat Technol* 113:268, 1999
- [142 ] Scharf TW, Singer IL *Tribol Trans* 45:363, 2002
- [143 ] Prasad SV, Dugger MT, Christenson TR, Tallant DR *J Manuf Process* 6:107, 2004
- [144 ] Scharf TW, Singer IL *Tribol Lett* 36:43, 2009
- [145 ] Sa´nchez-Lo´pez JC, Erdemir A, Donnet C, Rojas TC *Surf Coat Technol* 163–164:444, 2003
- [146 ] Chromik RR, Strauss HW, Scharf TW *J Manag* 64:35, 2012

- [147 ] Fontaine J, Le Mogne T, Loubet JL, Belin M *Thin Solid Films* 482:99, 2005
- [148 ] Fontaine J, Belin M, Le Mogne T, Grill A *Tribol Int* 37:869, 2004
- [149 ] Erdemir A, Fontaine J, Donnet C In: Donnet C, Erdemir A (eds) *Tribology of diamond-like carbon films: fundamentals and applications*. Springer, New York, p 237, 2008
- [150 ] Erdemir A, Halter M, Fenske GR, Zuiker C, Csencsits R, Krauss AR, Gruen DM *Trib Trans* 40:667, 1997
- [151 ] Erdemir A, Fenske GR, Krauss AR, Gruen DM, McCauley T, Csencsits RT *Surf Coat Technol* 121:565, 1999
- [152 ] Konicek AR, Grierson DS, Gilbert PUPA, Sawyer WG, Sumant AV, Carpick RW *Phys Rev Lett* 100:235502–235505, 2008
- [153 ] Grierson DS, Sumant AV, Konicek AR, Abrecht M, Birrell J, Auciello O, Carlisle JA, Scharf TW, Dugger MT, Gilbert PUPA, Carpick RW *J Vac Sci Tech B* 25:1700, 2007
- [154 ] Prasad SV, Zabinski JS *Nature* 387:761, 1997
- [155 ] Singer IL In: Singer IL, Pollock HM (eds) *Fundamentals of friction: macroscopic and microscopic processes*. Kluwer, Dordrecht, p 237, 1992
- [156 ] Brainard WA *NASA TN* D5141, 1969
- [157 ] Sliney HE *Tribol Int* 15:303, 1982
- [158 ] Prasad SV, Zabinski JS *J Mater Sci Lett* 12:1413, 1993
- [159 ] Prasad SV, Zabinski JS, McDevitt NT *Tribol Trans* 38:57, 1995
- [160 ] Zabinski JS, Donley MS, Prasad SV, McDevitt NK *J Mater Sci* 29:4834. doi:10.1007/BF00356530, 1994
- [161 ] Muratore C, Bultman JE, Aouadi SM, Voevodin AA *Wear* 270:140, 2011
- [162 ] Wahl KJ, Dunn DN, Singer IL *Wear* 230:175, 1999
- [163 ] Scharf TW, Kotula PG, Prasad SV *Acta Mater* 58:4100, 2010
- [164 ] Hu JJ, Wheeler R, Zabinski JS, Shade PA, Shiveley A, Voevodin AA *Tribol Lett* 32:49, 2008
- [165 ] Muratore C, Voevodin AA *Ann Rev Mater Res* 39:297, 2009
- [166 ] Hilton R, Fleischauer PD *Surf Coat Technol* 54–55:435, 1992
- [167 ] Zabinski JS, Donley MS, Walck SD, Schneider TR, McDevitt NT *Tribol Trans* 38:894, 1995
- [168 ] Teer DG *Wear* 251:1068, 2001



- [169] Fox VC, Renevier N, Teer DG, Hampshire J, Rigato V Surf Coat Technol 116–119:492, 1999
- [170] Scharf TW, Prasad SV, Dugger MT, Kotula PG, Goeke RS, Grubbs RK Acta Mater 54:4731, 2006
- [171] Scharf TW, Diercks DR, Gorman BP, Prasad SV, Dugger MT Tribol Trans 52:284, 2009
- [172] Bahadur S, Tabor D Wear 98, 1984
- [173] Briscoe BJ, Tabor D Wear 34:29, 1975
- [174] Burris DL, Boesl B, Bourne GR, Sawyer WG Macro Mater Eng 292:387, 2007
- [175] Dellacorte C, Sliney HE Lubric Eng 48:877, 1992
- [176] Dellacorte C, Edmonds BJ, Benoy PA NASA TM-210944, 2001
- [177] Prasad SV, Zabinski JS Wear 203:498, 1997
- [178] Prasad SV, Walck SD, Zabinski JS Thin Solid Films 360:107, 2000
- [179] Zabinski JS, Sanders JH, Nainaparampil J, Prasad SV Tribol Lett 8:103, 2000
- [180] I.V. Kosteckij, „Friction, wear and lubrication in machines“, Tekhnika, Kyew, 1970
- [181] Mohseni H, Scharf TW J Vac Sci Technol A 30: 01A149-1, 2012
- [182] Rebholz C, Ziegele H, Leyland A, Matthews A J Vac Sci Technol A 16:2851, 1998
- [183] Saito T, Honda F Wear 237:253, 2000
- [184] Koskilinna JO, Linnolahti M, Pakkanen TA Tribol Lett 24:37, 2006
- [185] Erdemir A, Fenske GR, Erck RA Surf Coat Technol 44:588, 1990
- [186] Erdemir A, Erck RA, Robles J Surf Coat Technol 49:435, 1991
- [187] Dvorak SD, Wahl KJ, Singer IL Tribol Trans 45:354, 2002
- [188] Lovell M, Deshmukh P, Sawyer WG, Mobley A Wear 260:1295, 2006
- [189] Doll GL, Mensah BA, Mohseni H, Scharf TW J Therm Spray Technol 19:510, 2010
- [190] Prasad SV, Scharf TW, Kotula PG, Michael JR, Christenson TR J Microelectromech Syst 18:695, 2009
- [191] Erdemir A, In Bhushan B (eds) Handbook of modern tribology. CRC Press, Boca Raton, FL, p 787, 2001
- [192] [www.maziva.org](http://www.maziva.org)