

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство
Ниво студија: Мастер академске студије
Модул: Производно машинство
Предмет: Трибомеханички системи
Број индекса: 344/2015

Стефан М. Фурјановић
**Триболошка карактеризација
алуминијумске легуре на
нанотрибометру**
Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Слободан Митровић - ментор
2. _____
3. _____

Датум
одбране: _____

Оцена: _____

Резиме

Предмет овог рада је анализа похабаности алуминијумске легуре у контакту са четири различита материјала. У тексту овог рада биће објашњен принцип испитивања алуминијумске легуре на нанотрибометру у различитим условима нормалног оптерећења и брзине клизања, при чему се добијају одређени резултати похабаности материјала.

Кључне речи: трибологија, трење, хабање, алуминијумска легура

Abstract

The subject of this paper is the analysis of the wear rate of the aluminum alloy in contact with four different materials. The text of this paper will explain the principle of testing the aluminum alloy on a nanotribometer under different conditions of normal load and slip speed, resulting certain wear rate for each of them.

Keywords: tribology, friction, wear, aluminum alloy

Садржај:

1. УВОД.....	1
2. ОСНОВЕ ТРИБОМЕХАНИЧКИХ СИСТЕМА.....	2
2.1 Трење	5
2.2 Хабање.....	11
2.3 Подмазивање и мазива.....	14
2.4 Топографија контактних површина.....	17
3. МЕХАНИЗМИ КОНТАКТА СА ТРИБОЛОШКОГ АСПЕКТА	20
4. МЕХАНИЗМИ ХАБАЊА.....	22
4.1 Адхезивно хабање	22
4.2 Абразивно хабање	25
4.3 Заморно хабање	28
4.4 Трибохемијско хабање.....	31
4.5 Вибрационо хабање (fretting)	33
4.6 Ерозионо и кавитационо хабање	34
5. МЕРНИ УРЕЂАЈ, НАНО ТРИБОМЕТАР	35
5.1 Оптички микроскоп	38
6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ.....	39
6.1 План експеримента.....	39
6.2 Процес испитивања.....	41
6.3 Резултати испитивања	45
7. ЗАКЉУЧАК.....	49
8. ЛИТЕРАТУРА.....	50

1. УВОД

Трибологија је наука и технологија о узајамном дејству две контактне површине при релативном кретању. Трибологија се бави проблемима преноса и расипања маса и енергије у механичким системима. Трибологија је наука и технологија о трењу хабању и подмазивању.

Од почетка 20. века, велики индустријски раст је доводио до потражње за бољим триболошким, пре свега знањем а и применом. Знања о триболошким појавама се изразито ширило од средина 20. века. Трибологија је кључна за савремену машинерију која користи клизне и ваљане површине. Примери продуктивног трења су кочнице, квачила, точкови на вагонима и аутомобилима, вијци и навртке. Примери не продуктивног трења и хабања су мотори са унутрашњим сагоревањем и авионски мотори, зупчаници, осовине, лежајеви и заптивке.

Сврха истраживања триболошких појава је разумљиво минимизирање и елиминисање губитака насталих услед трења и хабања на свим нивојима технологија где је укључено трошење површина. Триболошка испитивања доводе до веће ефикасности фабрика, бољих перформанси, мањих кварова и значајних уштеда. [1]

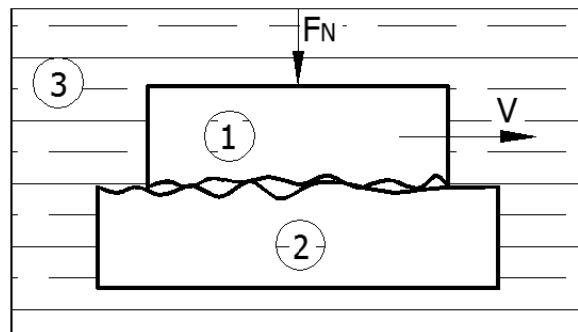
Трибологија се бави применом оперативних анализа за решавање проблема од економског значаја, као што су поузданости, одржавање и хабање техничких система. Триболошки недостаци изазивају огромне економске губитке и одношење материјала на свим машинама у току рада. Посматрано на нивоу сваке машине појединачно губитци су мали, али када се исти губитак понови нпр. На милион машина сличног типа, трошкови постају веома велики. Поред економског аспекта, истраживање трибологије доводи и до очувања необновљивих ресурса, што значи да смањењем неповољних услова триболошких појава доводи до мање количине утрошене енергије.

Трибологија није важна само за индустрију, већ је присутна у свакодневном животу. На пример, писање је триболошки процес. Приликом писања долази до доброг пријањања графита на папир и при томе графит оставља траг на папиру, али треба имати у виду да графит мора имати одређену чврстоћу како не би дошло до ломљења самог графита. Приликом бријања, циљ је да се уклони брада са лица што ефикасније, а да при томе не дође до иритирања коже. Пена за бријање се користи као средство за подмазивање како би се смањило трење између сечива бријача и коже.

Трење је од велике помоћи и при ходању и при вожњи аутомобила. Без адекватног трења, током ходања долазило би до падова, а током вожње аутомобила долазило би до њиховог проклизавања. Трибологија је значајна и у спорту. На пример, током скијања пожељније је што мање трење између скија и снега. [2]

2. ОСНОВЕ ТРИБОМЕХАНИЧКИХ СИСТЕМА

Трибологија је интердисциплинарна наука и технологија о проблемима преноса и расипања маса и енергије у механичким системима, са посебним нагласком на процесе трења, хабања и подмазивања. Под појмом трибомеханички систем подразумева се систем чија се функција одвија кроз интеракцију површина које се релативно крећу, слика 2.1. Трибомеханички систем чине најмање два елемента чије се површине налазе у међусобном контакту у процесу релативног кретања.



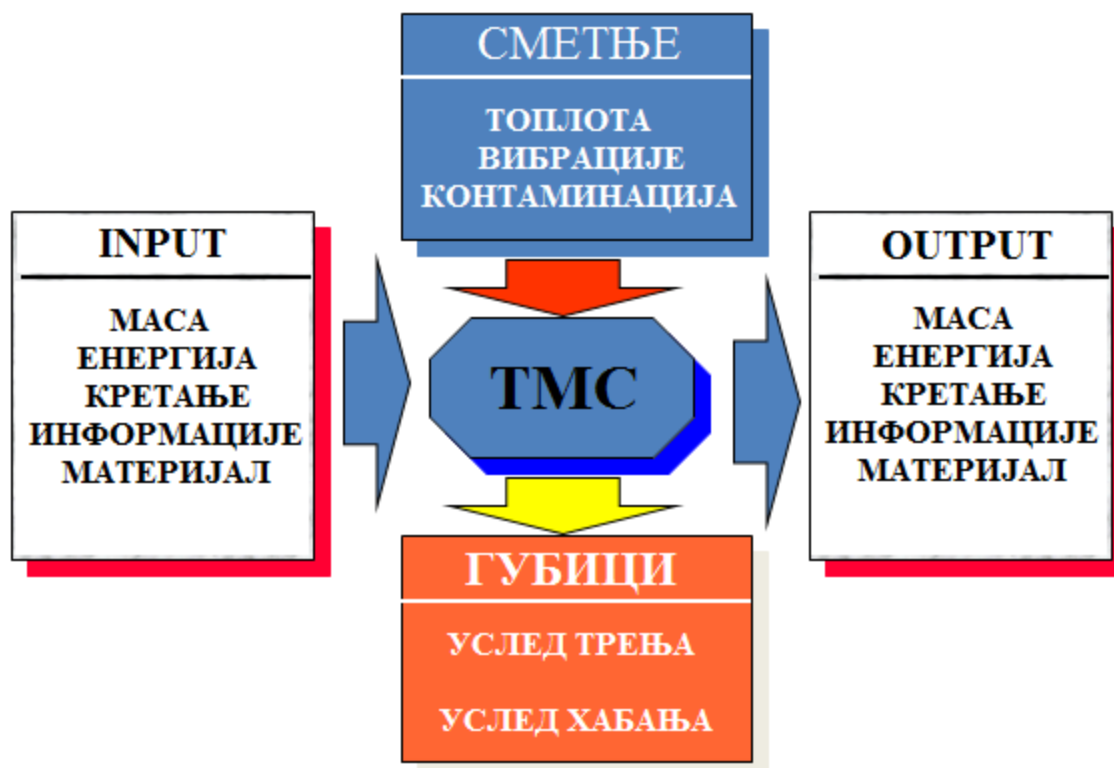
Слика 2.1 Прост трибомеханички систем, 1 – једно тело, 2 – друго тело, 3 – околина [2]

Дефиницију трибомеханичких система задовољавају бројни механички системи који обављају различите функције: кинематске (генерисање, вођење, пренос кретања), динамичке (пренос сила преко контактних површина), транспортне (транспорт чврстих тела, флуида и мешавина), рад и механичка енергија (пренос или трансформисање механичке енергије), обрада и обликовање материјала (израда компоненти, производа и функционалних површина), информационе технологије (генерисање и пренос сигнала).

Основни трибомеханички системи, било којој групи да припадају, имају исте улазне, излазне и изгубљене величине. Улазне величине су маса, енергија, кретање информација и материјал. Излазне и изгубљене величине су исте врсте, али са променљивим количинама. Изгубљене величине су губитак масе који се јавља због постојања процеса хабања у систему, губитак енергије као последица постојања трења у зонама контакта и губитак кретања, који се јавља као последица појаве клизања (слика 2.2).

Претварање улазних у излазне величине система, као и обим изгубљених величина зависе од врсте интеракције између његових елемената. Под врстама интеракције између елемената система подразумевају се:

- врста контакта (клизање, котрљање, удар и др.),
- врсте трења (трење клизања, трење котрљања),
- врсте механизма хабања (адхезивно, абразивно, заморно или трибохемијско),
- врсте подмазивања (континуално, прекидно, хидродинамичко, гранично и др.).



Слика 2.2 Шематски приказ промена у трибомеханичком систему [2]

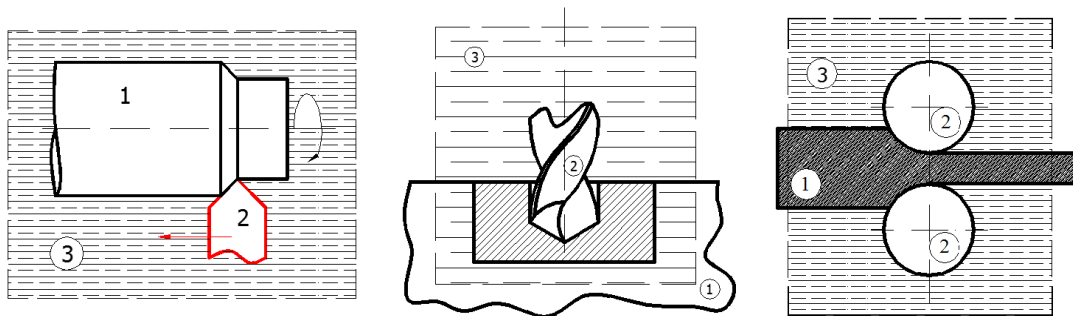
Да би се створили услови за управљање процесима трења и хабања у основним трибомеханичким системима, неопходно је познавати и услове под којима они функционишу. Основне величине са којима се идентификују услови остваривања контакта су: брзина релативног кретања, спољашње оптерећење и температура зоне контакта.

Број трибомеханичких система у једном индустријском систему средње величине у области прераде метала, на пример, може да износи и више десетина хиљада, што зависи од врсте и нивоа коришћене технологије. Трибомеханички систем је скуп елемената повезаних структуром и функцијом. Структуру чине елементи система, карактеристике система и триболошке интеракције елемената система. Карактеристике основних трибомеханичких система, у којима се одигравају процеси трења и хабања, за време трајања производних процеса, зависе од врсте материјала (сва три елемента система) и услова под којим се контакт у њима остварује (брзина релативног кретања, спољашње оптерећење, режим подмазивања и сл.).

Врсте трибомеханичких система су:

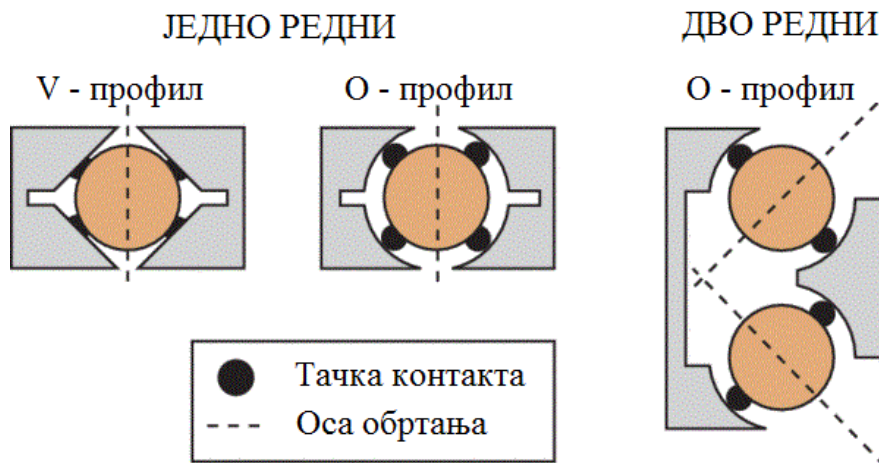
- Трибомеханички системи у обрадним процесима (резање, деформисање, заваривање...),
- Трибомеханички систем за вођење кретања (вођице и сл.),
- Трибомеханички систем за пренос снаге и кретања (каишници, зупчаници, ланчани преносници, хидраулични преносници и др.),
- Трибомеханички систем за пренос информација (давачи и носачи информација)

Код трибомеханичких система у обрадним процесима (слика 2.3), без обзира на врсту обраде (резање, деформисање...), основне трибомеханичке системе чине увек предмет обраде (1), алат (2) и средство за хлађење и подмазивање (3). Разлике постоје у природи материјала елемената система, у оптерећењима зоне контакта и у релативним брзинама, велике разлике постоје и у топографијама контактних површина и температурама зоне контакта.



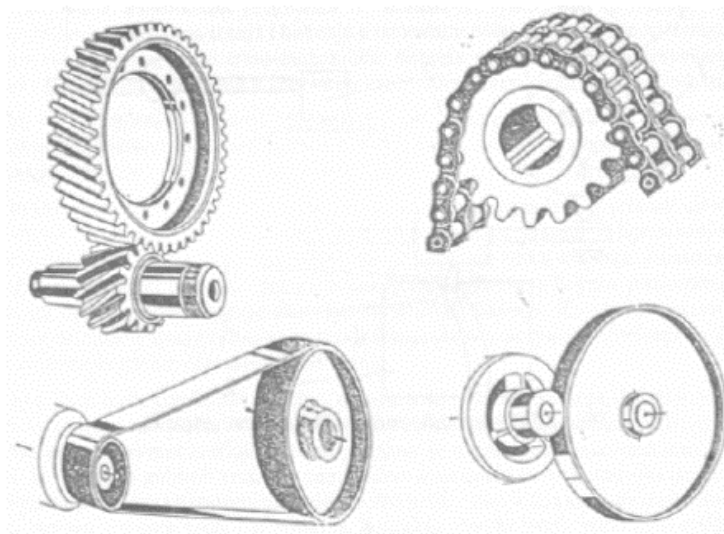
Слика 2.3 Обрадни процеси [2]

Карактеристике трибомеханичких система за вођење кретања су релативно мала оптерећења зоне контакта, мале релативне брзине кретања и ниске температуре зоне контакта (слика 2.4).



Слика 2.4 Системи за вођење кретања [4]

У групи трибомеханичких система за пренос снаге (слика 2.5) и кретања налазе се све врсте преносника који се користе у индустрији и транспорту (зупчаници, ланчани преносници, преносници са ременицама, фрикциони преносници и др.). У основним трибомеханичким системима ове врсте јављају се последњих година све више контакти метал- неметал и неметал-неметал, као и подмазивање чврстим мазивима.



Слика 2.5 Трибомеханички системи за пренос снаге и кретања [2]

Групи трибомеханичких система за пренос информација припадају поред механичких и бројне врсте електричних контаката. Особеност основних трибомеханичких система ове групе је и врста релативног кретања. То су веома често осцилаторна кретања или удар једног елемента по другом.

2.1 Трење

Научни аспект трибологије проистиче из чињенице да два основна феномена трибологије „трење“ и „хабање“, представљају два фундаментална процеса дисипације енергије и материјала при кретању чврстих тела, течности и гасова. Са технолошког становишта значај трибологије се углавном односи на њен економски утицај и потенцијал у смислу штедње енергије и материјала кроз смањење трења и хабања у техничким системима. [2]

Постоје два основна проблема, природа силе трења и механизам дисипације. Постоји неколико уобичајених опсервација, често се узимају у обзир општа правила, која се односе на силу трења:

1. Сила трења не зависи од видљивог подручја контакта,
2. Сила трења је пропорционална нормалном оптерећењу,
3. Сила кинетичког трења не зависи од брзине и мања је од статичке силе трења.

Трење, како се обично назива, односи се на отпор клизања. То је очигледно важно јер је главни механизам губитка енергије у клизним процесима. Разликују се два вида трења, спољашње и унутрашње. Спољашње трење се јавља у зонама контакта елемената трибомеханичких система свих врста. При обликовању предмета било којом врстом обраде деформисањем, у унутрашњости материјала јавља се унутрашње трење као последица релативног кретања између елементарних честица.

Са кинематског аспекта разликује се:

- Трење мировања
- Трење клизања и
- Трење котрљања.

Под трењем мировања подразумева се отпор који тело, у стању мировања, пружа преласку у стање кретања.

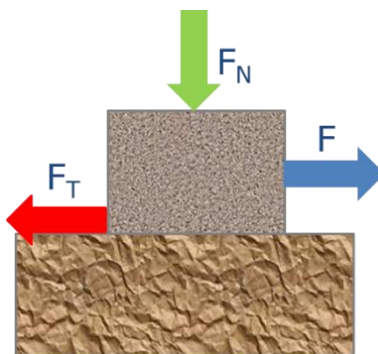
Под трењем клизања подразумева се отпор релативном кретању у тангенцијалном правцу тела у додиру. При томе се разлике у брзинама кретања оба тела једнаке у свим тачкама додира. [8]

Трење котрљања може бити:

- Слободно или чисто котрљање које се може остварити само при котрљању апсолутно тврдих тела и
- Котрљање са клизањем које се јавља у реалним условима.

Трење клизања

Трење клизања остварује се у зонама контакта два тела која се релативно крећу једна по другом, неком брзином V и уз присуство спољашњег оптерећења F_N (слика 2.1.1). Да би неко тело пресло из стања мировања у стање кретања неопходно је прво савладати силу трења мировања. Ова сила има исти правац као и вектор брзине али супротан смер, а њена величина већа је од силе трења која се јавља у процесу кретања (слика 2.1.2).

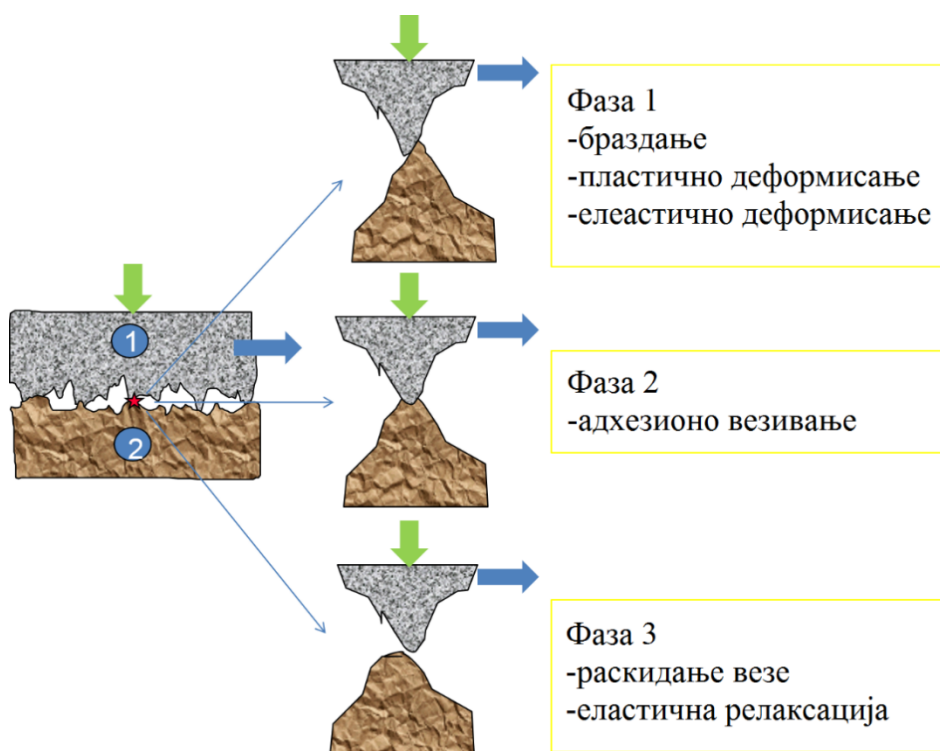


Слика 2.1.1 Трење клизања, F_N – спољашње оптерећење F – сила кретања тела F_T – сила трења [9]

Објашњење порекла силе трења дато је на слици 2.1.3, која приказује појединачан догађај процеса клизања тј. интеракције елементарних контакта две микронеравнине материјала различитих тврдоћа. При чему се могу издвојити 3 фазе њиховог релативног кретања, које су неопходне за разумевање свих механизма настајања силе трења.



Слика 2.1.2 Промена силе трења из стања мировања у кретање [9]



Слика 2.1.3 Интеракција микронеравнина и 3 фазе контакта микронеравнина [9]

Да би се савладали отпори материјала у процесу деформисања, раскидања адхезионих спојева и браздању, потребно је утрошити одређену механичку енергију, тј. савладати појаву отпора релативном кретању, односно појаву трења. Сила трења клизања састоји се од збира четири микрокомпоненте које су и саме збир појединачних компоненти које делују на сваком додиру микронеравнина, и то су: отпор изазван еластичним и пластичним деформацијама материјала, отпор изазван задирањем микронеравнина и отпор изазван кидањем адхезионих веза. [9]

Сила трења је основни параметар којим се квантифицира и мери процес трења. Поред ове величине користе се, за одређивање величине трења, коефицијент трења и коефицијент утрошеног рада на трење. Коефицијент трења представља однос између силе трења и нормалног оптерећења. [8]

$$\mu = \frac{F_T}{F_N}, \quad F_T = \mu F_N$$

Где је: F_T – сила трења, F_N – спољашње оптерећење (нормална сила) у N.

$$\mu = \frac{W_T}{W_U}$$

W_T – рад који се троши на савлађивање силе трења у Nm,

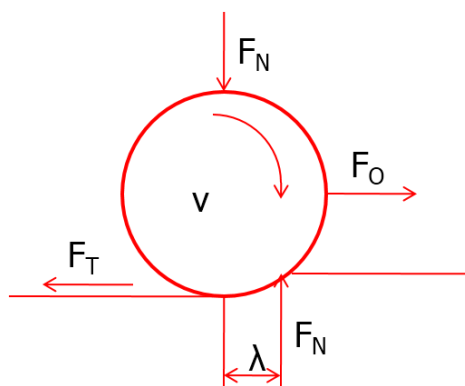
W_U – укупан рад који се троши на остваривање релативног кретања у Nm. [8]

Трење котрљања

Трење котрљања јавља се у трибомеханичким системима различитих врста у којима се један елемент система котрља по другом. У теоријским разматрањима ове врсте контакта разликују се два случаја:

- Слободно или чисто котрљање и
- Котрљање са клизањем

Слободно (чисто) котрљање остварује се само при котрљању једног по другом апсолутно тврдом телу. У реалним контактним ситуацијама односно у реалним трибомеханичким системима оба чврста елемента су у већој или мањој мери деформабилна. Појава еластичних и пластичних деформација у зони контакта при котрљању једног елемента трибомеханичког система па другом узрокује и појаву клизања. Појава клизања у процесу котрљања јавља се и као последица присуства тангенцијалних сила (вучних и кочионих) у трибомеханичким системима ове врсте (слика 2.1.4). [8]



Слика 2.1.4 Котрљање са клизањем [9]

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

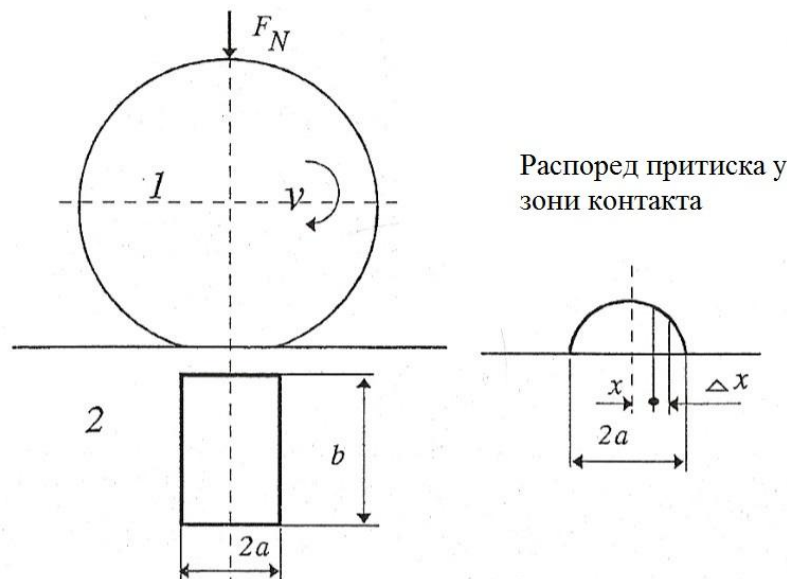
супротним смером. Сила F_N и њена реакција F_N чине момент $M = F_N \lambda$, који треба савладати да би се котрљање остварило. Отпор котрљању савлађује се вучном силом $F_0 R$ тј.

$$M = F_N \lambda = F_0 R = F_T R$$

Котрљање се јавља у следећим случајевима:

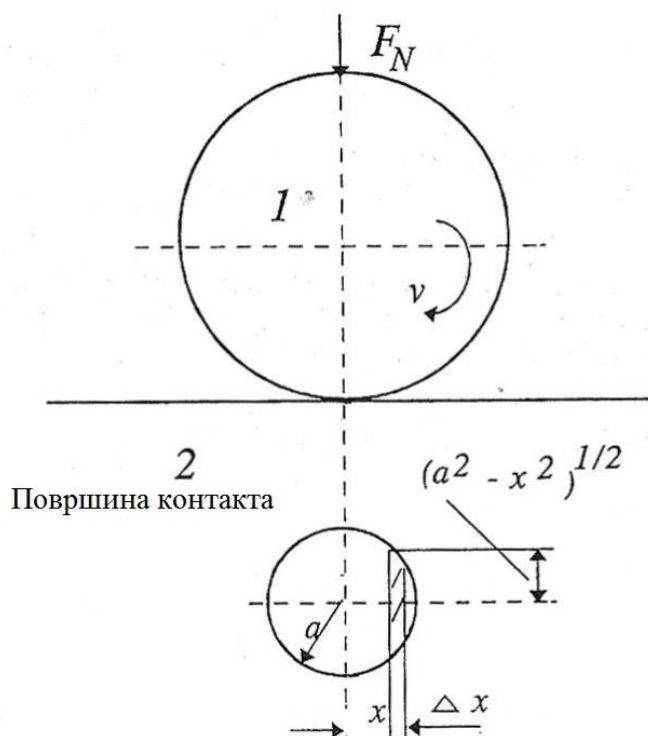
1. Котрљање цилиндра по равной плочи
2. Котрљање кугле по равной плочи
3. Котрљање испупчене плоче по кривој површи

Код кретања цилиндра по равной плочи, цилиндар (1) пречника $2R$ и ширине b котрља се обимном брзином V по равной плочи (2) уз нормално оптерећење F_N . Притисак којим цилиндар делује на равну плочу највећи је у средини контактне површине а најмањи на њеним ивицама. Величина притиска у свакој тачки контактне површине зависи од растојања те тачке од њене средине (слика 2.1.5).



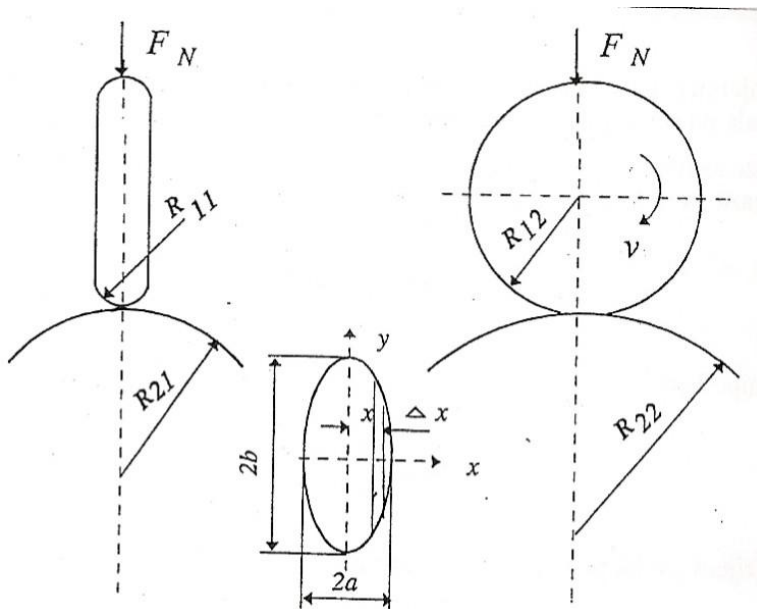
Слика 2.1.5 Котрљање цилиндра по равной плочи [8]

У случају котрљања кугле по равной плочи (слика 2.1.6), контактна површина има кружни облик пречника $2a$ и њена величина зависи како од величине спољашњег оптерећења тако и од деформационих карактеристика оба тела у додиру (кугле и равне плоче). Притисак на контактної површини највећи је у средини а најмањи на ивицама. Величина притиска у свакој тачки контактне површине зависи и од њеног растојања од центра површине.



Слика 2.1.6 Котрљање кугле по равној плочи [8]

Контактна површина при котрљању испупчене плоче по кривој површи (слика 2.1.7) има облик елипсе ширине $2a$ и дужине $2b$. Величине a и b (полуосе елиптичне контакте површине) зависе од полупречника кривина елемената у контакту, спољашњег оптерећења и деформационих карактеристика материјала од кога су израђени. Посебно је сложен утицај величине радијуса кривина, односно геометрије елемената у контакту.



Слика 2.1.7 Котрљање испупчене плоче по кривој површини [8]

2.2 Хабање

Процес хабања развија се на елементима трибо-механичких система као последица рушења њихових контактних слојева (чврста тела) и промене физичко хемијских карактеристика (мазиво). Хабање се дефинише и као прогресиван процес губитка материјала са контактних слојева елемената трибо-механичких система. Промене које се у процесу остваривања контакта јављају на трећем елементу (мазиву) трибо-механичких система обично се не разматрају у основним теоријама хабања и ако оне ограничавају његов век трајања. Када се разматра процес хабања, у зони контакта трибомеханичких система свих врста, идентификују се и прате промене које настају на оба чврста елемента.

Једна од дефиниција трибологије говори о трибологији као науци и технологији о преносу и расипању (дисипацији) масе и енергије у механичким системима. Расипање енергије за време функционисања трибомеханичких система последица је појаве трења у зонама контакта, а расипање масе у систему доводи до хабања сва три елемента система.

По престанку рада трибо-механичког система, на површинама чврстих тела које су биле у међусобном додиру, у мазиву налазе се честице материјала друга два елемента. Губитак масе материјала са контактних слојева оба чврста елемента доводи до промене њихових димензија а често и облика. Губитак масе трећег елемента (мазива), као и присуство честица материјала чврстих елемената система у њему, доводи до промене његових физичко хемијских карактеристика.

Честице материјала које у процесу остваривања контакта одлазе са контактних слојева чврстих елемената трибомеханичких система називају се „продукти хабања“.

Прва груба класификација процеса хабања врши се на основу величине продукта хабања. Ако величина продукта хабања (честица материјала) не прелази $1\text{ }\mu\text{m}$ процес хабања се назива „фино хабање“. Друга врста хабања назива се „грубо хабање“ и у овим процесима величина продукта хабања креће се, обично, између $1\text{ }\mu\text{m}$ и $10\text{ }\mu\text{m}$.

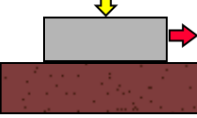
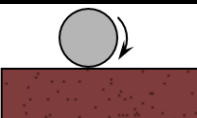
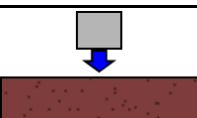
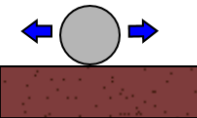
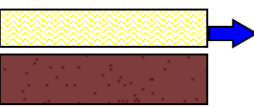
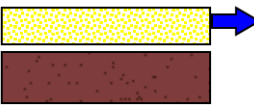
У процесу финог хабања честице материјала (продукти хабања) потичу из спољашњег граничног слоја (абсорбовани слојеви воде, уља и др., оксидни и другим хемијским путем формирани слојеви), док се при грубом хабању продукти хабања формирају рушењем унутрашњег граничног слоја (деформисаног металног слоја).

У зависности од доминантног механизма хабања и услова под којима се контакт између елемента система остварује, извршене су бројне класификације хабања. У литератури је најчешће присутна класификација хабања извршена према врсти механизма хабања на:

- | | |
|----------------------|--------------------------------|
| 1. Адхезивно хабање | 5. Кавитационо, |
| 2. Абразивно хабање, | 6. Корозионо, |
| 3. Заморно хабање, | 7. Оксидационо и |
| 4. Ерозионо, | 8. Фретинг (вибрационо хабање) |

Подела хабања по врстама врши се према врсти релативног кретања у трибо-механичком систему на хабање при клизању, хабање при котрљању и сл. Подела хабања према природи материјала елемената трибо-механичког система (метали, неметали и сл.). Једна од савремених класификација процеса хабања формирана на основу четири врсте механизма хабања и основних карактеристика контакта елемената трибо-механичких система, приказана је на табели 2.2. [8]

Табела 2.2 Класификација процеса хабања

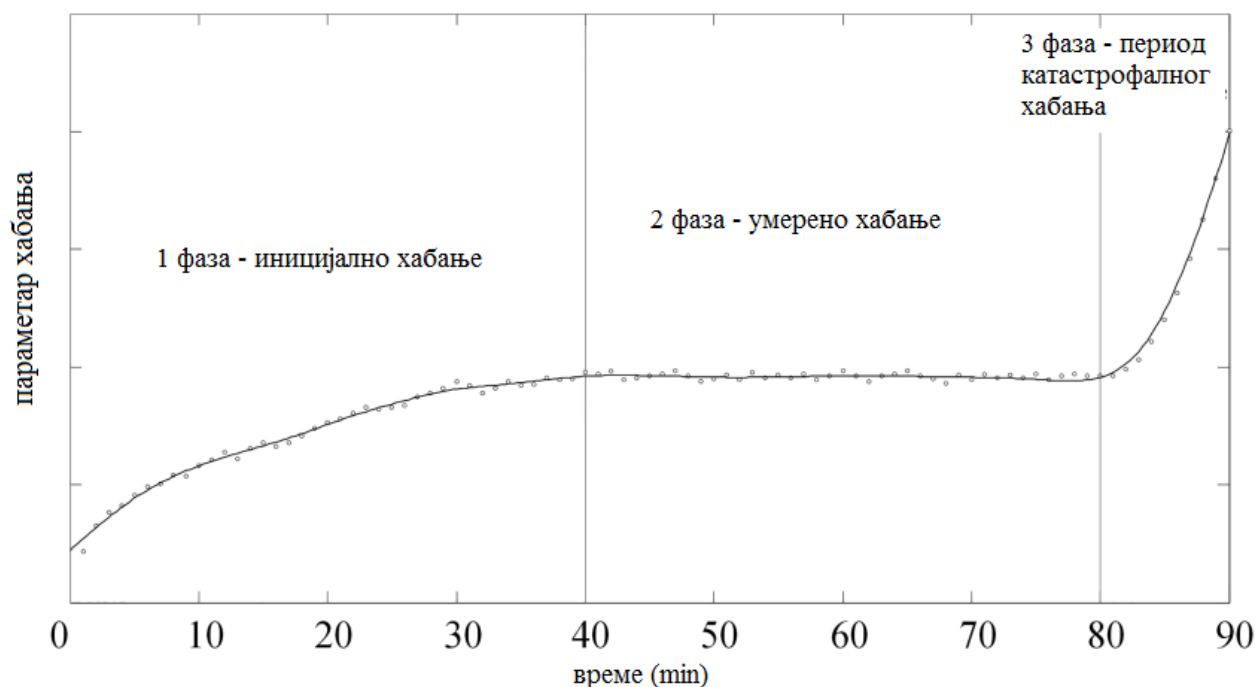
Природа контакта	Тип релативног кретања	Механизми хабања			
		Заморно	Абразивно	Адхезивно	Трибо-хемијско
Контакт чврстог тела са или без подмазивања	 Клизање	Да	Да	Да	Да
	Хабање при клизању				
	 Котрљање	Да	Да	Да	Да
	Хабање при котрљању				
	 Удар	Да	Да	Да	Да
	Хабање при удару				
	 Осциловање	Да	Да	Да	Да
	Хабање услед осцилација (фретинг)				
Контакт чврстог тела и течности	 Струјање	Да	Да		Да
	Кавитационо хабање				
Контакт чврстог тела и флуида испуњеног честицама	 Струјање	Да	Да		Да
	Ерозија флуидом				

Под трибохемијским хабањем подразумевају се све врсте хабања у којима се основни механизам заснива на некој врсти хемијских процеса (корозија, оксидација и сл.). Ови процеси настају реакцијом контактних површина са околином и мазивом као трећим елементом система. Под заморним хабањем подразумевају се и механизми хабања који се развијају у контактним слојевима чврстих елемената трибомеханичких система под дејством флуида (кавитација, ерозија).

У контактним ситуацијама свих врста, присутна су сва четири механизма хабања, осим у случају остваривања контакта између чврстог тела и флуида са и без абразива. У овим случајевима није присутан адхезивни механизам хабања.

Идентификација највеће присутности одређене врсте механизма хабања, у одређеном случају, врши се визуелно на основу изгледа похабане површине.

Без обзира на врсту механизма хабања присутног у зонама контакта елемената трибо-механичких система процес хабања чврстих елемената система развија се са временом на исти начин. У првој фази остваривања контакта брзина процеса хабања (интезитет хабања) опада са временом рада трибо-механичког система. Друга фаза развоја процеса хабања почиње са тренутком у коме брзина хабања почиње полако да расте. Раст брзине хабања траје све до почетка треће фазе хабања која се назива и фазом катастрофалног хабања. У трећој фази процес хабања се развија великом брзином, тако да за кратко време рада трибо-механичког система његови елементи (или само један његов елемент) достижу критичну величину похабаности (слика 2.2.1). [8]



Слика 2.2.1 Крива хабања [10]

Идентификација процеса хабања врши се преко параметара који могу бити: линијски, површински и запремински.

- Линијски параметри хабања – прате промену једне димензије елемента трибо-механичких система на коме се развија процес хабања,
- Површински параметри хабања – прате промене хабања две димензије елемента трибо-механичких система на коме се развија процес хабања (ретко се користе),

- Запремински параметри хабања – одређују се најчешће мерењем масе похабаног материјала (продукта хабања) или масе елемента трибо-механичког система пре и после остваривања контакта.

2.3 Подмазивање и мазива

Један од најчешће коришћених начина за смањење трења и хабања код трибомеханичких система је подмазивање. Код већине основних елемената машина, клизних и котрљајних лежачева, зупчаника, зглобова, ланаца и ужади, затим механичких система као што су машине алатке, мотори СУС, пумпе, турбине, компресори и поступака обраде метала скидањем струготине и деформацијом врши се подмазивање. Без подмазивања рад поменутих елемената и система био би скоро немогућ, односно век трајања би био веома кратак а губици енергије велики.

Подмазивање се дефинише као процес раздвајања спрегнутих површина тела у релативном кретању слојем неке врсте мазива. Тај процес се може остварити коришћењем различитих врста и поступака подмазивања. Изучавање основних теорија подмазивања је од посебног значаја у савременој техници, јер се многе радне и триболошке карактеристике механичких система и њихових елемената прорачунавају на основу поменутих теорија. У зависности од дебљине слоја мазива који се успоставља између површина у релативном кретању, геометрије спрегнутих површина и радних услова различити видови и врсте подмазивања могу да се постигну. Основна два вида су потпуно и не потпуно подмазивање.

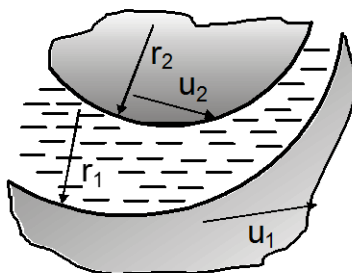
Потпуно подмазивање представља вид подмазивања код кога се између површина у релативном кретању успоставља континуалан слој мазива такве дебљине да су површине потпуно раздвојене. Да би се слој мазива одговарајуће дебљине одржао између површина под оптерећењем, неопходно је да се у њему постигне притисак способан да носи спољашње оптерећење односно потребно је да слој има одређену моћ ношења. Иста се може реализовати на више начина и са различитим врстама мазива, тако да се разликују следеће врсте потпуног подмазивања:

- а) Хидростатичко подмазивање (HSP) са течним мазивом
Гасностатичко подмазивање (GSP) са гасовитим мазивом
- б) Хидродинамичко подмазивање (HDP) са течним мазивом
Гасодинамичко подмазивање (GDP) са гасовитим мазивом
Реодинамичко подмазивање (RDP) са полутечним мазивом
- с) Еластохидродинамичко подмазивање (EHDP) са течним и полутечним мазивом

Од наведених врста потпуног подмазивања хидродинамичко, хидростатичко и еластохидродинамичко су најзаступљеније код основних и најважнијих машинских елемената.

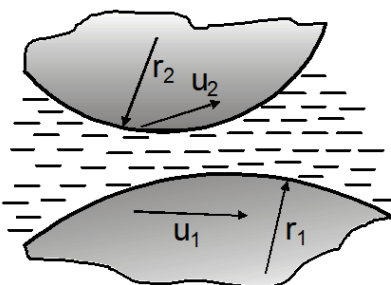
Са гледишта опште геометрије површина, додир тела може бити конфоран и не конфоран. Конфорни додир је приказан шематски на слици 2.3.1, а типичан пример су Клизни лежач рукавца осовина и вратила. За овакав додир је карактеристично да су

површине прилагођене једна другој и да се оптерећење преноси преко релативно велике површине, тако да специфична оптерећења нису изразито велика. Типичне врсте подмазивања које се остварују у условима конформног додира су хидродинамичко и хидростатичко подмазивање.



Слика 2.3.1 Конформан додир површина [18]

Не конформни услови додира (слика 2.3.2) срећу се код котрљајних лежајева, зупчаника и брегастих механизма. Напони на додирним површинама су изузетно високи а слој мазива је мале дебљине. Овакви радни услови су последица мале површине додира код неконформних тела. Висока специфична оптерећења изазивају значајне деформације површина материјала, имају утицаја на величину додирне површине и на промену вискозности мазива са променом притиска. За овакве услове додира карактеристично је еластохидродинамичко подмазивање.



Слика 2.3.2 Не конформан додир површина [18]

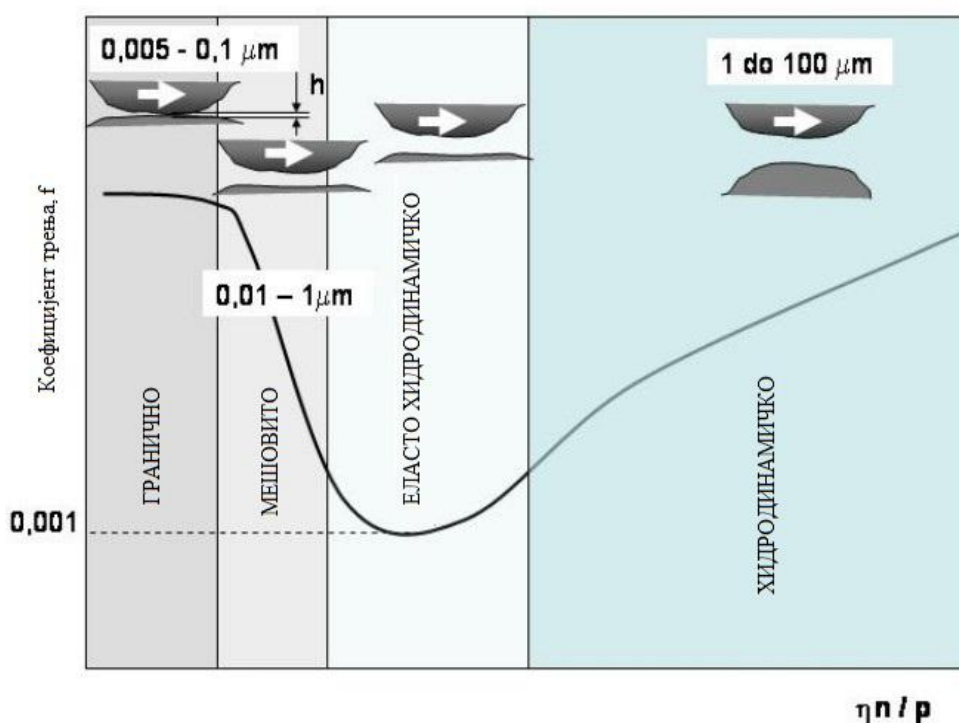
Код већине савремених машина тежи се потпуном подмазивању због тога што су губици услед трења најмањи, а хабање материјала знатно мање него при непотпуном подмазивању. Потпуно подмазивање није увек могуће технички реализовати или економски оправдати његову примену. То је разлог да се код многих елемената и механизма јавља непотпуно подмазивање, било као прелазни или стални вид подмазивања.

Непотпуно подмазивање настаје када се слој мазива недовољне дебљине да спречити директан додир површина. Основне врсте непотпуног подмазивања су:

- а) Мешовито подмазивање (МР) све врсте мазива
- б) Гранично подмазивање (ГР) све врсте мазива

У циљу смањења трења и хабања у условима непотпуног подмазивања неопходно је да се на површинама у додиру и кретању формирају танки заштитни слојеви са погодним триболошким својствима. За те намене мазивима се додају адитиви који имају пресудан утицај на триболошке карактеристике система при мешовитом и граничном подмазивању.

Могућност да се реализује поједини видови или врсте подмазивања зависи како од конструкционог решења посматраног дела машине, тако и од радних услова. Вид подмазивања може да се мења током рада елемента зависно од брзине, оптерећења и температуре. Дијаграм на слици 2.3.3 показује да се вид подмазивања мења са променом вредности бездимензионе величине $\eta n / p$ (η – динамичка вискозност, n – учестаност обртања, p – притисак) од потпуног до непотпуног подмазивања. [8]



Слика 2.3.3 Stribec-ова крива [18]

Под мазивом се подразумева било која материја којом се раздвајају, потпуно или делимично, површине тела у кретању а у циљу смањења трења и хабања. Поред наведеног, мазива имају и низ других функција. Најважнија је свакако хлађење делова машина и уређаја. У појединим конструкцијама мазиво обавља и друге веомаважне задатке као што су преношење кретања и снаге код хидрауличних система и аутоматских преносника, амортизација удара, смањење вибрација, преношење топлоте и друго.

Многобројни и различити задаци који се постављају мазивима током експлоатације машина и немогућност да једна врста мазива задовољи све захтеве подмазивања, условили су да се данас користи низ различитих, а често веома специјалних врста мазива и производа у оквиру сваке врсте. Разлог коришћења већег броја врста мазива лежи и у њиховој цени,

јер је економски неоправдано да се високо квалитетна мазива користе за подмазивање једноставних и мање одговорних делова машина.

Подела мазива може да се изврши на основу више критеријума. Обично се мазива деле према функцији, агрегатном стању, саставу или пореклу и намени. Према функцији разликују се две основне групе мазива:

- Конструкциона мазива која се посматрају као елемент конструкције машина. Избор мазива се врши приликом пројектовања механичког система истовремено са избором осталих материјала и других параметара контактних површина
- Технолошка мазива која се примењују при обради метала резањем и деформацијом у циљу подмазивања и хлађења алата и материјала који се обрађује. При томе се технолошка мазива посматрају као елемент усвојеног технолошког процеса и њихов избор се врши при дефинисању самог процеса

Према агрегатном стању мазива се деле на гасовита, течна, полутечна и чврста. У гасовита мазива спадају ваздух и друге врсте гасова. Течна мазива обухватају више врста течности: уља минералног порекла, синтетичка уља као и уља биљног и животињског порекла. Најзначајнија полутечна мазива су различите врсте техничких масти, које се производе од материјала различитог порекла и сложеног су састава. Задњу групу чине чврста мазива, која уопштено могу бити органског и не органског порекла и веома различитог састава. [8]

Са аспекта практичне примене најзначајније су следеће три врсте мазива:

- Уља за подмазивање
- Мазиве масти
- Чврста мазива

2.4 Топографија контактних површина

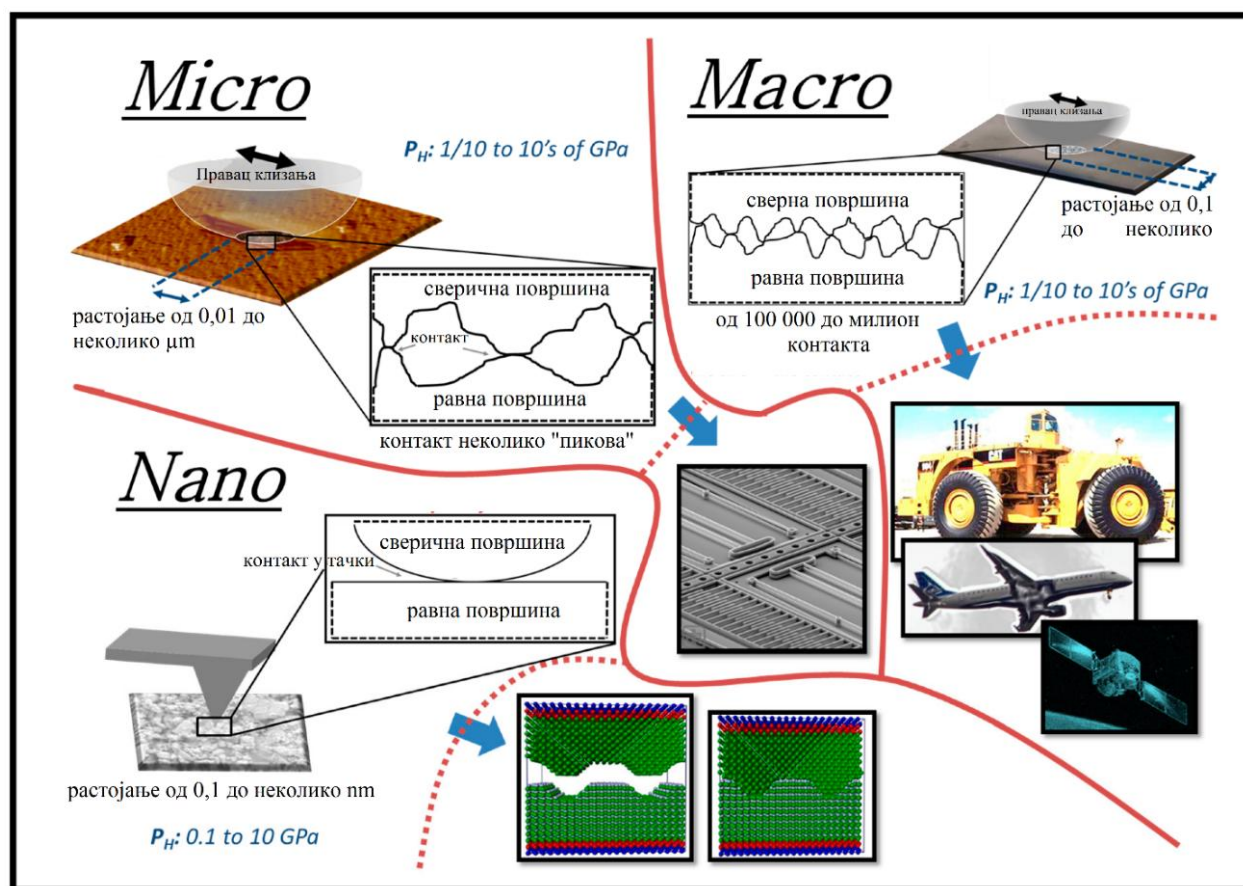
Површине чврстих тела обрађене било којом врстом обраде, садрже на себи мање или веће неравнине у зависности од услова под којима су настале. Како идеално глатких површина нема, додир две површине се остварује у одређеном броју тачака. Број тачака у којима се остварује контакт између два чврста тела у додиру зависи од величине неравнина на њима и од њиховог распореда.

Геометрија неке површине подразумева облик и димензије те површине. Врсте одступања од идеалне површине:

- Макрогеометријска, облик и димензије неравнина на површинама чврстих тела (непаралелност површина, валовитост)
- Микрогеометријска, последица обрадних процеса (избразданост, хрпавост)
- Нанометријска, геометријске границе и неправилности кристалне и молекуларне структуре

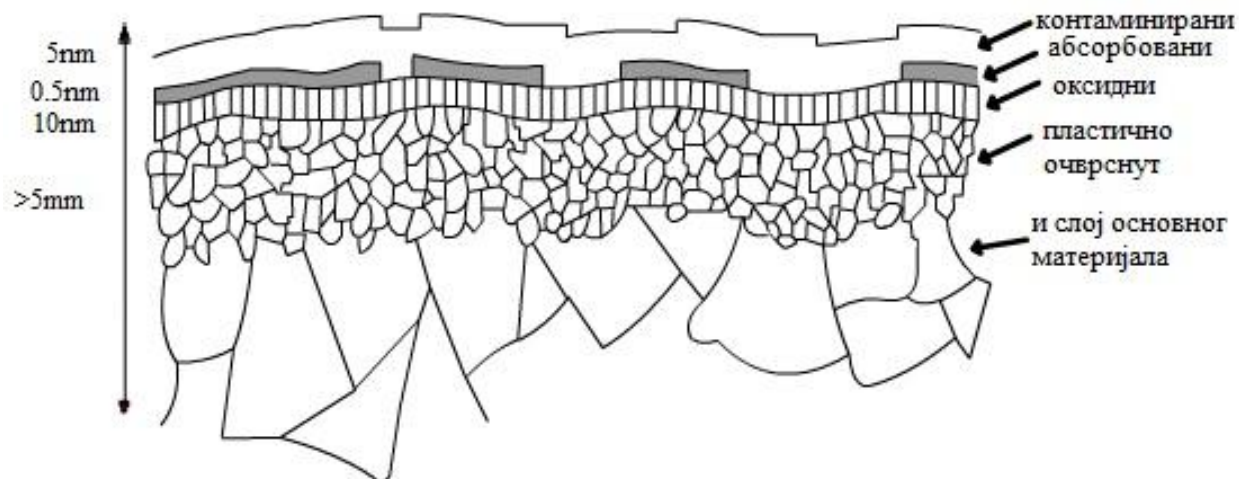
Сва одступања заједно дају површину која се значајно разликује од идеално равне површине. На слици 2.4.1 приказана је разлика у количини контактних тачака посматрано на макро, микро и нано нивоу.

Развој триболошких процеса у зонама контакта тврђих тела зависи, у великој мери од карактеристика спољашњих и унутрашњих граничних слојева оба тела у додиру (слика 2.4.2. [2])

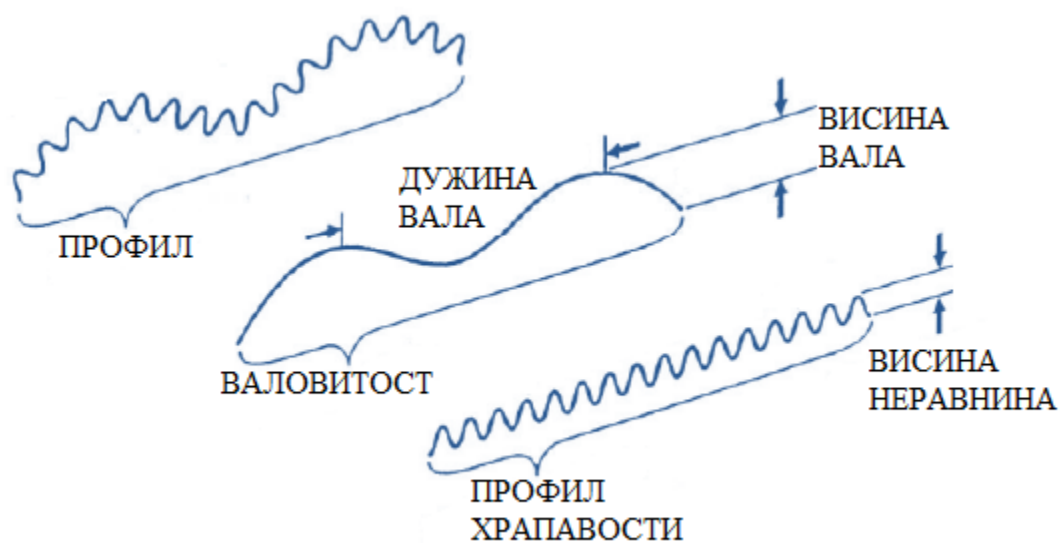


Слика 2.4.1 Топографија контактних површина на макро микро и нано нивоу [5]

Од макронеравнина које се јављају на активној површини машинских елемената, најчешће је присутна валовитост. Под валовитишћу површина подразумевају се неравнине које се јављају на површинама у валовима (таласима). Профил валовитости представља профил који приказује неправилности већих таласних дужина (неправилности које се јављају на већим растојањима). Овај профил добија се из основног профила применом одређених (профилних) филтера, (слика 2.4.3). Профил хрпавости представља профил који проузрокује неправилности мањих таласних дужина (неправилности које се налазе на краћем растојању). Добија се из основног профила занемаривањем компоненти већих таласних дужина. Обично је проузрокована обликом алата, стањем његових резних ивица и низом других мање или више релевантних фактора (вибрације, крутост система, и др.) (слика 2.1.3). [7]



Слика 2.4.2 Површински слој чврстих тела по дубини, конкретно на површини зуба зупчаника [6]

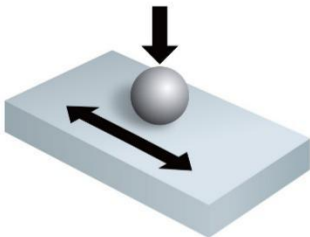
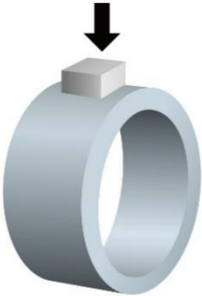
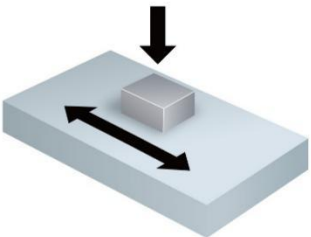
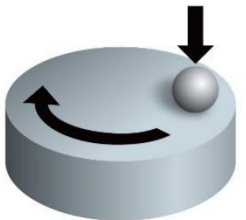
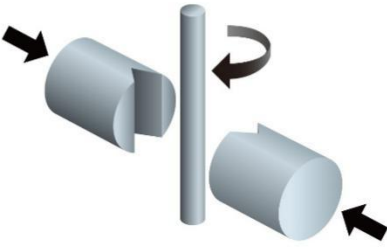
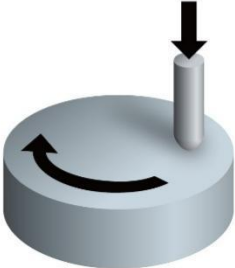


Слика 2.4.3 Профил површине, профил валовитости и профил храпавости [7]

3. МЕХАНИЗМИ КОНТАКТА СА ТРИБОЛОШКОГ АСПЕКТА

У трибометрима на којима се мери сила трења или прати развој процеса хабања једног или више елемената система, контакт између два чврста елемента може бити остварен у тачки, по линији и по површини са елементима различите геометрије (слика 3.1). У зависности од начина на који се остварују ове три врсте контакта, разликујемо следеће типове трибометра:

- PIN ON DISK (контакт у тачки)
- DISK ON DISK (линијски контакт)
- BLOCK ON DISK (површински контакт)

КОНТАКТ У ТАЧКИ	КОНТАКТ ПО ЛИНИЈИ	КОНТАКТ ПО ПОВРШИНИ
 Куглица по плочи	 Блок по прстену	 Блок по плочи
 Куглица по диску	 Пар "V" блокова по пину	 Пин по диску

Слика 3.1 Могући типови контакта [19]

Контакт у тачки могуће је остварити додиром сферне чеоне површине цилиндра малог пречника (pin-a) и обимне или чеоне површине диска. Ова геометрија контакта остварује се и додиром два цилиндра са укрстеним осама под углом од 90° .

Контакт по линији могуће је остварити додиром обимних површина два диска са паралелним осама и додиром равне чеоне површине цилиндра малог пречника и обимне површине диска.

Контакт по површини остварује се или између равних чеоних површина цилиндра и диска или између криве површине блока и обимне површине диска.

Избор врсте трибометра врши се на основу геометрије контакта у реалном трибомеханичком систему у чијој структури се налази и елемент од материјала за који се на пример, експерименталним путем утврђује утицај термичке обраде на величину силе трења и интензитет хабања.

У производној и другој опреми у индустрији, као и у транспортним средствима, највише су присутни трибомеханички системи у којима се релативно кретање остварује клизањем. Процес клизања присутан је и у другим врстама кретања (котрљање, удар, осцилаторно кретање) у већој или мањој мери. Због тога су информације о триболошким карактеристикама елемената трибомеханичких система при клизању посебно интересантне за индустријску праксу. Највећи број постојећих трибометара у лабораторијама института и индустријских система користи клизање као релативно кретање. Са гледишта геометрије контакта у истраживачкој и индустријској пракси, за одређивање триболошких карактеристика материјала сва три елемента система, најчешће се користе контакти у тачки и по линији.

Геометрија контакта зависи од облика чеоне површине пин-а. При додиру равне површине пин-а и обимне површине диска остварује се контакт по линији. Коришћењем пин-а са чеоном површином у облику полусфере контакт са обимном површином диска остварује се у тачки. Контакт по површини остварује се при коришћењу пина са кривом чеоном површином, чији је полупречник једнак полупречнику диска. Трибометар мора да има своју погонску јединицу која обезбеђује релативно кретање обимне површине диска по чеоној површини пина.

Нормално оптерећење зоне контакта остварује се најчешће, теговима преко система полуга, постоје и друге методе (хидраулички, пнеуматски и сл.).

Трибометар мора да располаже са двокомпонентним динамометром који за време остваривања контакта истовремено мери спољашње оптерећење и силу трења. Динамометри се обично граде са мерним тракама, а сила трења и спољашње оптерећење мере се величинама отпора у струјном колу у коме се налази и Винстонов мост. Струјни импулси могу да буду упућени директно на одговарајући вишекомпонентни писач или преко AD конвертора у рачунар.[8]

4. МЕХАНИЗМИ ХАБАЊА

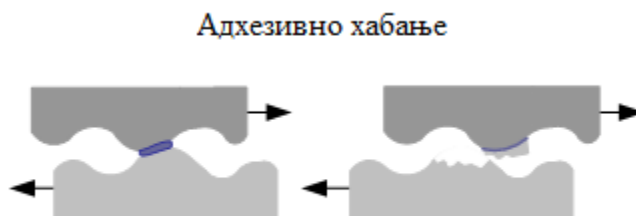
Као што је већ поменуто механизми процеса хабања се могу класификовати као:

- Адхезивно хабање
- Абразивно хабање,
- Заморно хабање,
- Ерозионо и кавитационо,
- Трибохемијско (корозионо и оксидационо) и
- Фретинг (вибрационо хабање)

4.1 Адхезивно хабање

У процесу тангенцијалног релативног кретања контактних површина, долази до разарања микрозаварених спојева насталих између микронеравнина услед јаких адхезионих сила. Раскидање се одвија у зони мекшег материјала у контакту, чиме се остварује процес преноса материјала са једне на другу контактну површину.

Адхезивно хабање не узрокује стварање продуката хабања, већ се манифестује само на нивоу преноса материјала са једне на другу површину, и јавља се у највећем броју случајева трења (слика 4.1).



Слика 4.1 Киданье завареног споја код адхезивног хабања [12]

Адхезивна теорија хабања развијена је, као и друге теорије хабања, ради формирања израза помоћу којих је могуће, са довољном тачношћу, вршити прорачун количине продуката хабања (најчешће, запремине продуката хабања) насталих у зони контакта два елемента трибо-механичког система за време његовог функционисања.

Прорачун запремине продуката хабања, насталих у зони контакта два елемента трибо-механичког система као последица адхезивног механизма, који је развио Archard, а

који је касније коришћен и модификован од стране других истраживача из ове области, заснива се на адхезивној теорији трења и две основне претпоставке.

Полазећи од дискретне природе контакта Archard је претпоставио да су реалне површине свих елементарних додира кружног облика и једнаког полупречника r (прва претпоставка). Archard је такође претпоставио да продукти хабања настали на путу клизања $2r$ по сваком додиру имају облик полусфере запремине (друга претпоставка).

$$\Delta V_j = \frac{2}{3} \pi r^3$$

Укупна запремина продуката хабања створених по јединици дужине пута клизања, уз ове претпоставке, одређена је изразом:

$$\Delta V = \sum_1^n \frac{2}{3} \frac{\pi r^3}{2r} = \frac{1}{3} \sum_1^n \pi r^2 = \frac{\pi r^2}{3} n$$

- где је n број остварених додира (фрикционих веза) на путу клизања.

Спољашње оптерећење распоређено је по свим додирима, подједнако (на n додира) и уравнотежено је збиром унутрашњих одбојних сила. У условима равнотеже спољашње оптерећење (нормална сила у зони контакта) одређено је изразом:

$$F_N = \sigma_y \pi r^2 n, \quad \pi n r^2 = \frac{F_N}{\sigma_y}$$

- где је σ_y напон на граници течења материјала мање тврдоће.

Израз за укупну запремину продуката хабања, сведену на јединицу дужине пута клизања, има облик

$$\Delta V = \frac{F_N}{3\sigma_y}$$

Archard је претпоставио да на свим местима додира неће доћи, у процесу остваривања контакта, до појаве продуката хабања. Он је израз за прорачун запремине продукта хабања, насталих на јединици дужине пута клизања, увео константу K којом се узима у обзир вероватноћа појаве продуката хабања на местима на којима се остварује елементарни додир t_j .

$$\Delta V = K \frac{F_N}{3\sigma_y}$$

Константа K назива се коефицијент адхезивног хабања и као и коефицијент трења нема димензију. Укупна запремина продуката хабања, насталих на путу клизања L , одређена је изразом:

$$V = K \frac{F_N}{3\sigma_y} L$$

На основу овако изведеног основног закона адхезивног хабања може се закључити да је:

- Запремина похабаног материјала пропорционална величини пута клизања,
- Запремина похабаног материјала пропорционална је величини спољашњег оптерећења (нормалне силе F_N),
- Запремина похабаног материјала обрнуто је пропорционална напону на граници течења материјала мање тврдоће.

Експериментална истраживања у овој области указују, међутим, да се овако формиран закон адхезивног хабања може прихватити само за апроксимацију друге фазе процеса хабања (други део криве хабања) и то само у условима остваривања клизања које карактерише релативно мали интензитет хабања. У првој и трећој фази хабања веза између запремине похабаног материјала, спољашњег оптерећења и пута клизања је експоненцијалне природе.

Трибомеханички системи у којима се остварује процес клизања садрже, најчешће и трећи елемент – мазиво. У случају да постоји слој мазива између контактних површина, у израз за прорачун запремине продукта хабања насталих на јединици пута клизања уводи се коефицијент β .

У случају остваривања контакта без подмазивања јавља се суво трење а додир између два тела је металне природе тј.

$$\Delta V = K_m A_m$$

где је:

- K_m карактеристика металног контакта (клизање без подмазивања),
- A_m реална површина металног контакта.

Увођењем у зону контакта мазива реална површина додиром између металних елемената се смањује, јер се део додиром остварује преко мазива. Однос између реалних површина контакта два елемента при употреби мазива и без њега увек је мањи од јединице тј.

$$\beta = \frac{A}{A_m}$$

При лошем (недовољном) подмазивању коефицијент β тежи јединици. Са побољшањем подмазивања величина овог коефицијента тежи нули.

Израз за прорачун запремине продукта хабања, насталих на јединици пута клизања и на укупном путу клизања имају облик:

$$\Delta V = K_m \beta A_m; \quad A_m = \frac{F_N}{\sigma_y}; \quad \Delta V = K_m \beta \frac{F_N}{\sigma_y}; \quad V = K_m \beta \frac{F_N}{\sigma_y} L$$

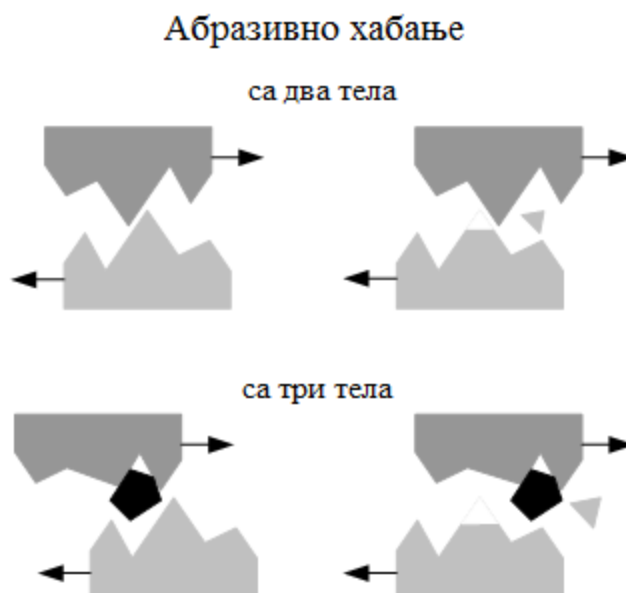
Константа K_m представља карактеристику металног контакта и зависи од особина материјала оба чврста елемента трибомеханичког система, а коефицијет β карактерише особине мазива и режим подмазивања.

4.2 Абразивно хабање

Абразивно хабање је врста механизма хабања елемената трибо-механичких система присутна у индустрији у великој мери. Сматра се да више од 50% продуката хабања у индустрији настаје као последица абразивног механизма хабања. Абразивно хабање настаје кретањем врхова неравнина тврдих тела кроз површински слој тела мање тврдоће, при чему се остварују микрорезање и деформација материјала контактних слојева (слика 4.2.1).

Постоји више класификација абразивног хабања. По једној од њих разликују се три основна типа абразивног хабања.

- Абразивно хабање при удару
- Абразивно хабање у условима великих притисака
- Абразивно хабање у условима малих притисака



Слика 4.2.1 Абразивно хабање [12]

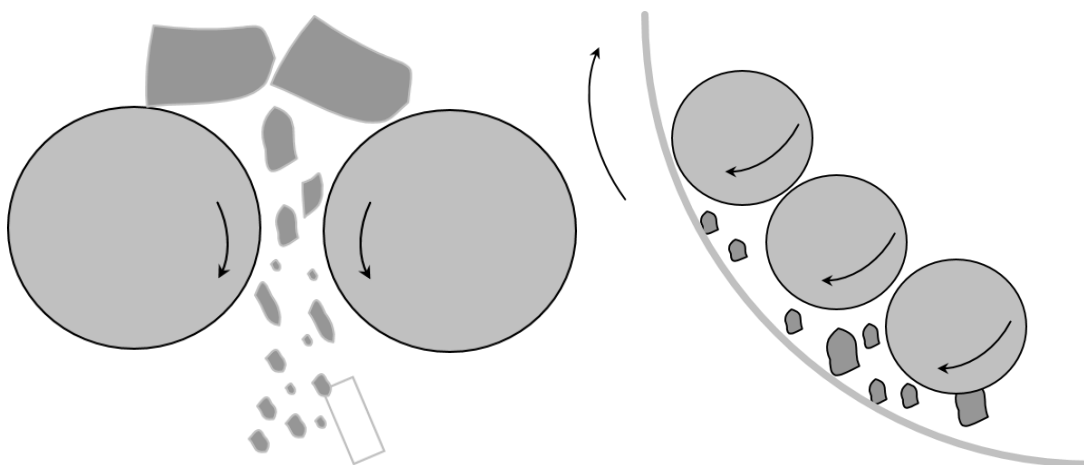
Први тип абразивног хабања јавља се при удару тврдог тела о површину тела мање тврдоће. Ова врста хабања јавља се при транспорту растреситих материјала (камена, руда, угља и сл.). Похабана површина тела мање тврдоће (транспортне стазе на пример) пуна је

јамица, које остају као последица одласка продуката хабања из зоне додира. На слици 4.2.2 приказан је трибо-механички систем у коме се јавља ова врста абразивног хабања и који се користи при транспорту растреситих материјала. Разлика у тврдоћи елемената растреситог материјала, који се транспортује и трака преко којих се транспорт остварује је, по правилу, велика.



Слика 4.2.2 Абразивно хабање при удару [13]

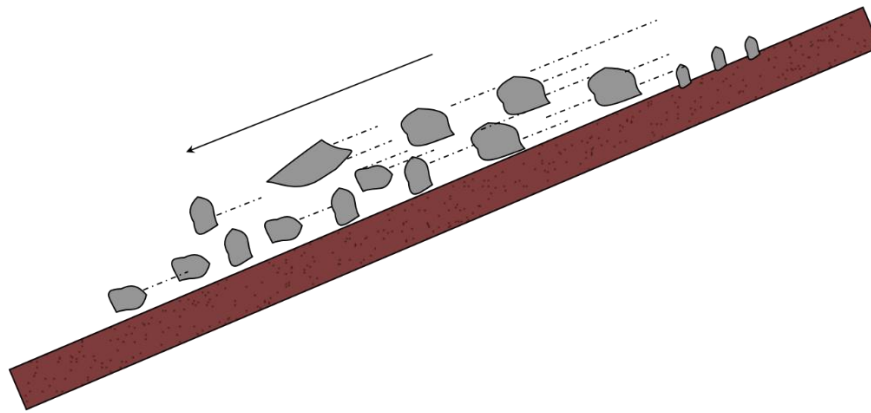
Други тип абразивног хабања јавља се у условима појаве великих притисака у зонама додира елемената трибо-механичких система. Овај тип абразивног хабања јавља се при ломљењу (ситњењу, млевењу) руда, угља и других материјала у млиновима са ваљцима или куглама (слика 4.2.3).



Слика 4.2.3 Абразивно хабање у условима великих притисака [14]

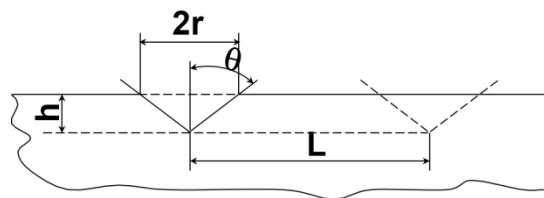
Трећи тип абразивног хабања јавља се у условима контакта које карактеришу релативно мали притисци у зонама додира елемената трибо-механичких система. Овај тип абразивног хабања присутан је у трибо-механичким системима у којима се један елемент креће (клиза) по другом без додатног спољашњег оптерећења. Нормална сила у зонама додира потиче од споствене тежине тела које се креће (слика 4.2.4).

Друга подела абразивног хабања врши се према броју елемената трибо-механичког система у коме се ова врста хабања јавља. Према овој подели првој групи припадају трибо-механички системи у којима се абразивни елементи крећу по површини другог елемента. Другој групи припадају трибо-механички системи у којима се абразивни елементи налазе између два друга елемента.



Слика 4.2.4 Абразивно хабање у условима малих притисака [14]

Величина продуката хабања је по правилу, већа од величине продуката других врста механизма хабања. На површинама које су биле изложене абразивном хабању налазе се трагови у виду бразди, односно канала (последица микрорезања) или бројних јамица које су последица локалних деформација и чупања материјала са површинског слоја. При прорачуну запремине продуката хабања најчешће се користи упрошћени модел контакта у коме врх неравнине тврђег тела пролази кроз контактни слој тела мање тврдоће (слика 4.2.5).



Слика 4.2.5 Модел контакта при абразивном хабању [14]

Запремина продуката хабања насталих на путу клизања L :

$$V = Lnr^2 \cot \theta = L \frac{2F_N}{\pi \sigma_y} \cot \theta$$

Запремина продуката хабања пропорционална је дужини пута клизања, нормалној сили и углу конуса неравнина, а обрнуто пропорционална напону на граници течења материјала мање тврдоће. Израз за запремину продуката абразивног хабања у пракси (стварни облик неравнина се разликује од облика модела коришћеног за формирање израза за прорачун запремине продуката абразивног хабања):

$$V = K_a \frac{F_N}{HB}$$

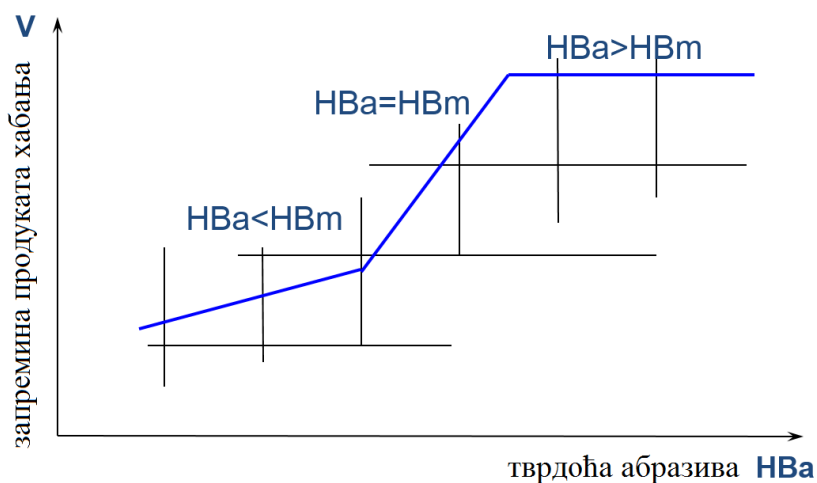
K_a – абразивна константа зависна од услова остваривања контакта

HB – тврдоћа материјала мекшег елемента трибо-механичког система

Експериментална испитивања у области абразивног хабања, вршена у бројним лабораторијама и институтима, показала су да од тврдоће материјала оба елемента у контакту зависи веома много интензитет процеса абразивног хабања и запремина продуката хабања насталих за време трајања контакта. На слици 4.2.6 приказана је зависност запремине продуката хабања од тврдоће абразива H_{Ba} .

Ако је тврдоћа абразива H_{Ba} мања од тврдоће материјала елемента H_{Bm} по коме се абразиви крећу ($H_{Ba} < H_{Bm}$) запремина продуката абразивног хабања веома споро расте са порастом тврдоће абразива. Абразивно хабање у овом случају назива се „меко“ или „лако“ абразивно хабање. Изразито велики утицај на промену запремине продуката хабања има промена тврдоће абразива у трибо-механичким системима у којима су тврдоће абразива и другог елемента система приближно једнаке ($H_{Ba} \approx H_{Bm}$).

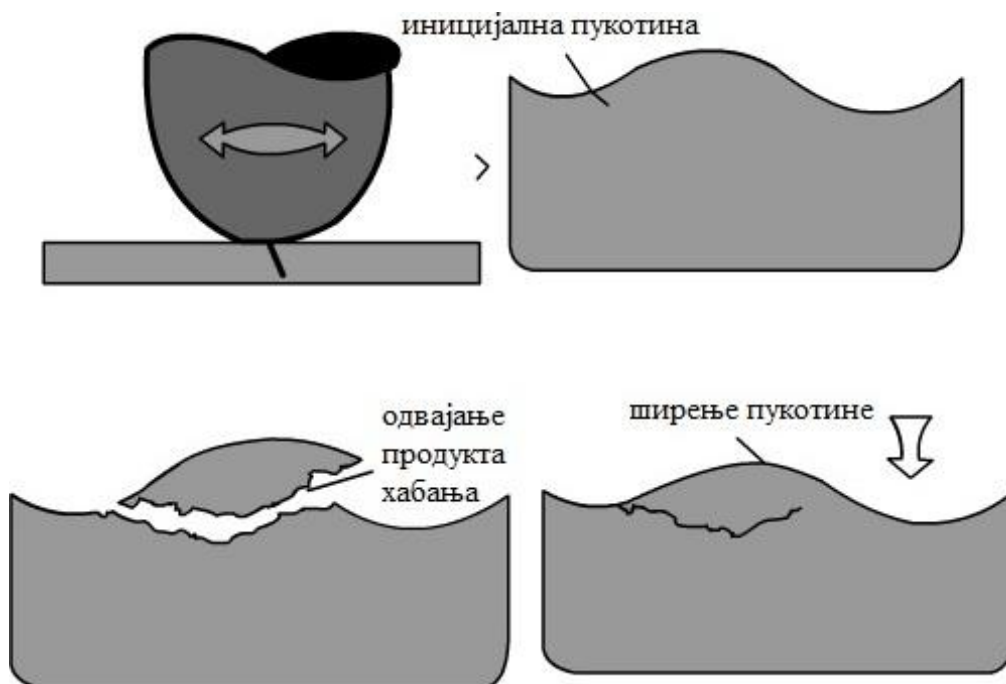
Промена тврдоће абразива има најмањи утицај на величину запремине продуката абразивног хабања у трибо-механичким системима у којима је $H_{Ba} > H_{Bm}$, али је величина запремине продуката хабања у овом случају врло велика. У пракси се ова врста абразивног хабања назива „тврдо“ или „тешко“ абразивно хабање.



Слика 4.2.6 Утицај тврдоће на запремину продуката хабања [14]

4.3 Заморно хабање

Механизам заморног хабања присутан је у свим врстама трибомеханичких система и у свим условима под којим се контакт између елемената трибомеханичких система остварује. У трибо-механичком систему, у коме се остварује процес клизања, врхови неравнина тела веће тврдоће креће се кроз контактни слој материјала тела мање тврдоће. При томе се у контактном слоју материјала тела мање тврдоће јавља напон на притисак испред, а напон на истезање иза врхова неравнина тврдог тела (слика 4.3.1).



Слика 4.3.1 Процес одвијања заморног хабања [15]

У току рада трибо-механичких система двосмерно наизменично оптерећење контактеног слоја материјала мање тврдоће понавља се у циклусима p пута, а као последица јавља се замор материјала и стварање продуката хабања. Као последица замора материјала, у контактном слоју тела мање тврдоће, јављају се прво пукотине, а после њих и продукти хабања. Бројним експерименталним истраживањима утврђено је да на количину продуката хабања, који настају као последица замора материјала у контактном слоју утичу, пре свега, микрогеометрија контактних површина, механичка својства материјала елемената у контакту, спољашње оптерећење и услови под којима ради трибо-механички систем.

Напон у контактном слоју елемента трибо-механичког система мање тврдоће, при коме настају продукти хабања, пропорционална је јединичној сили трења.

$$\sigma_0 = K\tau = K\mu_m P_r$$

Константа K износи за крпе материјале 5, а за материјале са добрим еластичним својствима 3.

Интезитет линијског хабања (однос дебљине похабаног материјала ΔH и дужине пута клизања L):

$$I_h = \frac{\Delta H}{L} = \frac{V}{A_n L}$$

V – запремина похабаног материјала са површине A_n насталог на путу L .

Процес хабања развија се за време остваривања контакта само на реалној површини контакта. Специфични интезитет хабања дефинише се као однос средње дебљине похабаног материјала и дужине пута клизања једнаке пречнику елементарне површине контакта d , тј.

$$I_h = \frac{\Delta H}{d} = \frac{\Delta V}{A_r d}$$

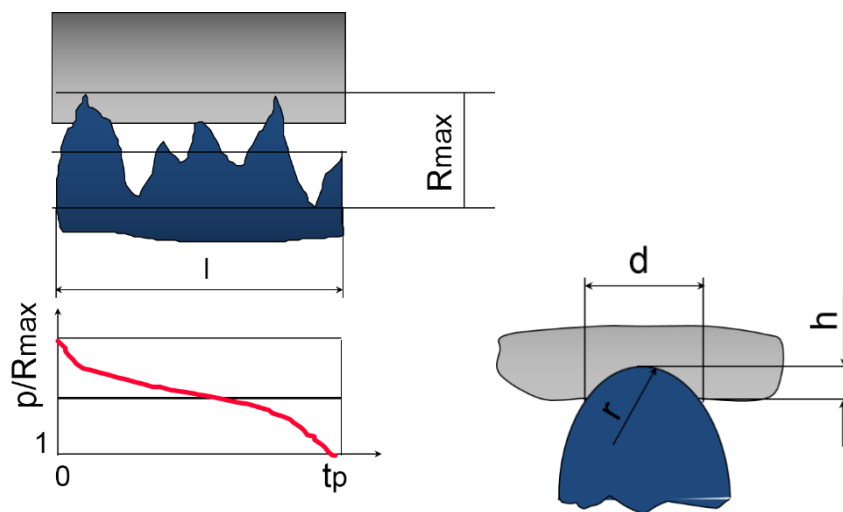
ΔV – запремина похабаног материјала са реалне површине контакта A_r насталог на путу d при једном оствареном контакту. Између интензитета хабања I_h и специфичног интензитета хабања i_h постоји следећа веза.

$$I_h = i_h \frac{A_r}{A_n} = i_h \frac{P_n}{P_r}$$

Запремина похабаног материјала настала после n поновљених контакта на путу клизања дужине d износи

$$V_r = n \Delta V$$

Прорачун интензитета хабања и запремине продуката хабања, насталих услед замора материјала у контактном слоју тела мање тврдоће, врши се, уз одређене апроксимације реалних услова остваривања контакта. У литератури је присутан поступак прорачуна запремине продуката заморног хабања и интензитета заморног хабања за случај остваривања контакта између апсолутно тврдог хrapавог тела и апсолутно глатког деформабилног тела (тела са еластично-пластичним карактеристикама). На слици 4.3.2 приказан је случај контакта између два чврста тела са кривом отпорности на хабање.



Слика 4.3.2 Контакт између апсолутно тврдог хrapавог тела и апсолутно глатког деформабилног тела [14]

Ако се претпостави да у процесу деформисања и заморног хабања учествују само оне неравнине апсолутно тврдог тела које су продрале у контактни слој материјала тела мање тврдоће, запремина продуката заморног хабања одређена је изразом.

$$V = \int_0^h A_r dh = A_c R_{max} \int_0^\varepsilon b \varepsilon^v d\varepsilon = \frac{A_r h}{v+1}$$

За овај случај остваривања контакта два чврста тела израз за специфични интензитет хабања има облик:

$$i_h = \frac{h}{(v+1)dn}$$

Број циклуса n до појаве разарања контактнoг слоја материјала тела у контакту мање тврдоће и стварања продуката заморног хабања одређен је, за случај остваривања еластичног контакта, експоненцијалном функциом облика:

$$n = \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_r} \right)^{t_y}$$

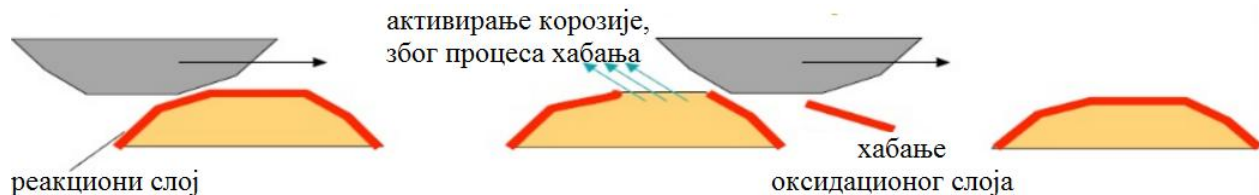
Где је: σ_r – напон у контактном слоју материјала тела мање тврдоће,

σ_0 - напон на граници кидања материјала мање тврдоће и

t_y – параметар фрикционог замора материјала.

4.4 Трибохемијско хабање

Адхезионо, абразивно и заморно хабање настају као последица интеракције између чврстих елемената трибо-механичких система, односно појава деформација и фрикционих веза у зонама контакта. Трибохемијско хабање настаје, међутим, као последица интеракције трећег елемента трибо-механичких система односно средине у којој се контакт остварује са друга два елемента (слика 4.4). У процесу остваривања контакта обе контактне површине реагују са средином у којој се контакт остварује, односно мазивом као трећим елементом ових система, тако да се на њима стварају хемијске превлаке различитих врста. При клизању једног елемента по другом настаје разарање формираних хемијских превлака и појава продуката хабања ове врсте.



Слика 4.4 Трибохемијско хабање [16]

Полазећи од претпоставке да је потребно $1/k$ поновљених додира на врху једне неравнине, да би се на њему створио оксидни слој критичне дебљине ξ , при којој настаје његово разарање у току даљег остваривања контакта, долази се до израза за време трајања

контакта до његове појаве. Време трајања јединичног контакта до појаве критичне дебљине ξ оксидног слоја износи:

$$t = \frac{t_c}{k}$$

t_c – време трајања једног контакта. Он зависи од величине елементарне површине додира и брзине клизања v .

$$t_c = \frac{d}{v}$$

d – пречник елементарне површине додира, v – брзина клизања.

Време трајања контакта до појаве оксидног слоја критичне дебљине ξ износи:

$$t = \frac{d}{vK}$$

Веза између масе оксидног слоја формираног на елементарној површини додира ΔA_r ($\Delta A_r = 1$) и времена трајања контакта (време трајања оксидације) одређена је изразом

$$\Delta m = (K_p t)^{0.5}; \quad \Delta m = \Delta A_r \xi \rho = \xi \rho \text{ за } \Delta A_r = 1$$

K_p – оксидна константа, а ρ густина оксидног слоја,

Веза између критичне дебљине оксидног слоја ξ и времена трајања контакта има облик:

$$\xi^2 = K_p \frac{t}{\rho^2}$$

Константа K која се назива статистички коефицијент хабања а говори о вероватноћи појаве продуката хабања на оствареном додиру одређена је изразом:

$$K = \frac{K_p d}{v \rho^2 \xi^2}$$

До израза за прорачун запремине продуката трибохемијског хабања долази се коришћењем познатог Archard-овог израза за запремину продуката хабања насталих на путу клизања L .

$$V = K \frac{F_N}{3\sigma_y} L; \quad V = \frac{K_p d}{v \rho^2 \xi^2} * \frac{F_N}{3\sigma_y} L$$

Константа K_p , густина оксидног слоја ρ и критична дебљина оксидног слоја ξ зависе од природе материјала сва три елемента трибо-механичког система и од услова под којима

се контакт између елемената остварује (спољашње оптерећење, брзина клизања, температура у зони додира и др.). [8]

4.5 Вибрационо хабање (fretting)

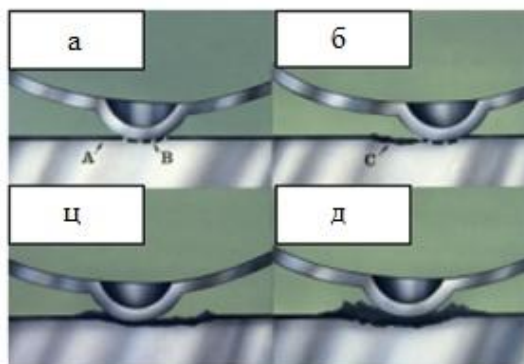
Термин „fretting“, преузет из енглеског језика, користи се и у другим језичким подручјима да означи процес хабања у зонама контакта трибо-механичких система у којима се остварује осцилаторно релативно кретање са врло малим амплитудама (мањим од 0.2mm). Најпогоднији термин за ову врсту хабања у српском језику је „вибрационо хабање“. Трибомеханички системи у којима се јавља ова врста контакта и хабања су чврсти спојеви више машинских елемената (пресовани спојеви), зупчaste спојнице и сл. изложени динамичком оптерећењу.

Процес вибрационог хабања започиње појавом фрикционих веза (заварених спојева) на местима елементарних додира под дејством нормалног оптерећења и њиховим рушењем при релативном клизању једног чврстог елемента по другом. Први продукти хабања, који при томе настају гомилају се у удубљењима на контактним површинама (слика 4.5а).

У другој фази остваривања контакта продукти хабања, чија је тврдоћа већа од тврдоће материјала оба елемента у контакту, делују као абразивне честице стварајући нове продукте хабања, а величина зоне хабања се повећава (слика 4.5б).

Када продукти хабања достигну одређену количину они не могу више да се задржавају само у почетној зони хабања већ излазе из ње и нагомилавају се у удубљењима ван елементарних површина додира (слика 4.5ц).

Контакт између два елемента постаје, после нагомилавања велике количине продуката хабања, еластичне природе јер се остварује преко врло тврдых честица које на обе контактне површине производе јамице чије дубине и пречници расту са временом трајања контакта (слика 4.5д).



Слика 4.5 Процес развоја вибрационог хабања [17]

Вибрационо хабање може да се смањи смањењем вибрација, коришћењем материјала веће тврдоће за израду елемената у контакту и применом чврстих мазива.

4.6 Ерозионо и кавитационо хабање

Термин „ерозионо“ хабање користи се и у индустријској пракси и у литератури да означи процес хабања површина чврстих тела преко којих се креће неки флуид са или без абразивних честица. Ерозионо хабање површина чврстих тела, које настаје као последица деловања абразивних честица ношених флуидом, у пракси је више присутно од ерозионог хабања које се јавља као последица деловања чистим флуидом. У основи ерозиони процеси су последица абразивног деловања чврстих честица ношених флуидом и замора материјала на контактним површинама чврстих тела. Ово значи да су ерозиони процеси последица абразивног и заморног механизма хабања.

Интензитет ерозионог хабања и запремина продуката ерозионог хабања, зависе од истих оних фактора од којих ове величине зависе у процентима заморног, абразивног и трибохемијског хабања, али и од угла под којима абразивне честице падају на контактну површину чврстог тела.

Под кавитацијом подразумева се процес формирања слободних мехура гаса или паре течности, који се јавља као резултат кретања чврстих тела у течности. У зависности од тога да ли се јављају мехури гаса или паре течности разликује се гасна и парна кавитација.

Термин кавитационо хабање означава процес губитка масе материјала са контактне површине, који се јављају на местима додира са флуидом, као последица нестајања раније формираних парних мехурова. Нестајање парних мехурова праћено је појавом високих локалних притисака и температура, чиме се и стварају услови за појаву продуката хабања са одговарајућих површина.

У трибомеханичким системима свих врста осим оних у којима се остварује контакт између флуида и чврстих тела, присутна су сва четири основна механизма хабања адхезивни, абразивни, заморни и трибохемијски. Веома је тешко и при прорачунима и при експерименталним мерењима раздвајати продукте хабања по врстама механизма хабања по којима су настали. Анализом развоја процеса хабања, у трибо-механичким системима свих врста долази се до закључка да се, у општем случају, процес хабања развија у три фазе.

- У првој фази остваривања контакта настају реакције између контактних површина и средине у којој се контакт остварује (појава различитих хемијских превлака) и стварају се прве фрикционе везе (адхезивни процеси).
- У другој фази релативно кретање у зони контакта узрокује разарање формираних фрикционих веза (појављују се први продукти адхезивног хабања), еласто-пластичну деформацију контактеног слоја материјала мање тврдоће, као и појаву продукта абразивног и трибохемијског хабања (разарање хемијских превлака и дела материјала тела мање тврдоће кретањем врхова неравнина тела веће тврдоће кроз контактни слој мекшег тела).
- У трећој фази, после одређеног броја понављених додира (циклуса), појављују се и продукти заморног хабања.

5. МЕРНИ УРЕЂАЈ, НАНО ТРИБОМЕТАР

Испитивање триболошких карактеристика алуминијумске легуре EN AW-6082 (AlMiSi1) извршена су на компјутерски подржаном трибометру CSM који се налази у центру за трибологију Факултета инжењерских наука у Крагујевцу (слика 5.1).

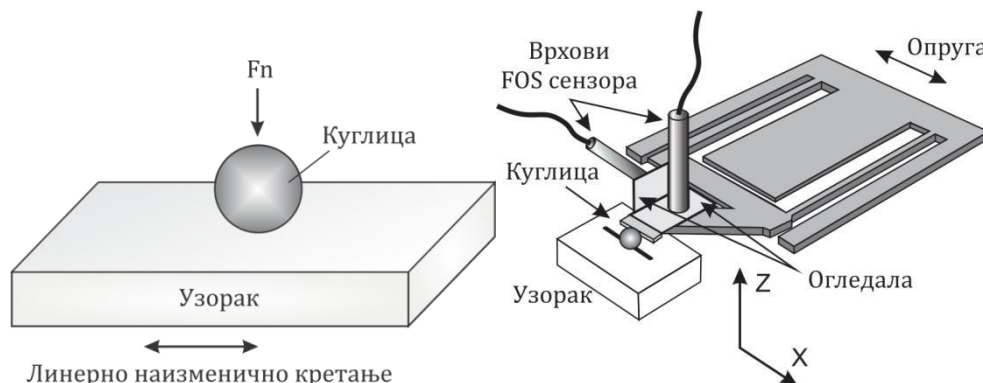


Слика 5.1 CSM нано трибометар [20]

Контактна геометрија овог уредјаја може бити куглица на равној површини (ball on plate, слика 5.2a), пин на равној површини (pin on plate) и плоча по плочи (plate on plate). Овај нано трибометар садржи ултра прецизан пиезо електричне моторе, прецизно калибрисање мере трења и хабања, линеарно (10 – 1000 μm) и ротирајуће (са распоном радијуса од 30 μm – 10 мм) померање узорака, аутоматско искључивање прага коефицијента трења или укупан број окрета. Могуће је тестирање у течностима и контролисати влажност или у гасовима са кућиштем од плексигласа. Тестирање је компатибилно са стандардима ASTM G99 и DIN 50324. Могуће је континуирано мерење дубине хабања, континуирано снимање карактеристика. Дубина продирања може бити од 100 μm , са прецизношћу од 20 nm. Линеарно наизменично померање узорака се користи за симулацију већег броја реалних врста кретања. [20]

Стандардно оптерећење се креће у опсегу од 50 μN до 1 N са резолуциом од 1 μN . Опсег силе трења је од 10 μN до 1 N са прецизношћу од 1 μN . Контакт између куглице и равне површине узорака се остварује тачно дефинисаном силом. Мерни елемент нанотрибометра је кантиливер са тачно пројектованом тангенцијалном силом (F_t) и нормалном крутости (F_n). Конзола је монтирана директно на мереј глави уређаја и може се скидати, а повезана је са два оптичка FOS сензора (fiber optic sensors) за мерење нормалног

и бочног одступања (слика 5.2б). Пре сваког теста неопходно је калибрисати сваки FOS сензор. Два осетљива оптичка огледала, постављена близу главе конзоле (на X и Z осу), мере осцилације конзоле током клизања куглице по површинском слоју узорка, који се креће линеарно наизменично. Примљени сигнал се конвертује у електричне сигнале помоћу оптичко – електронских претварача. Коефицијент трења се одређује мерењем померања еластичног дела конзоле у оба правца, у хоризонталној и вертикалној равни, помоћу два FOS сензора. [21]

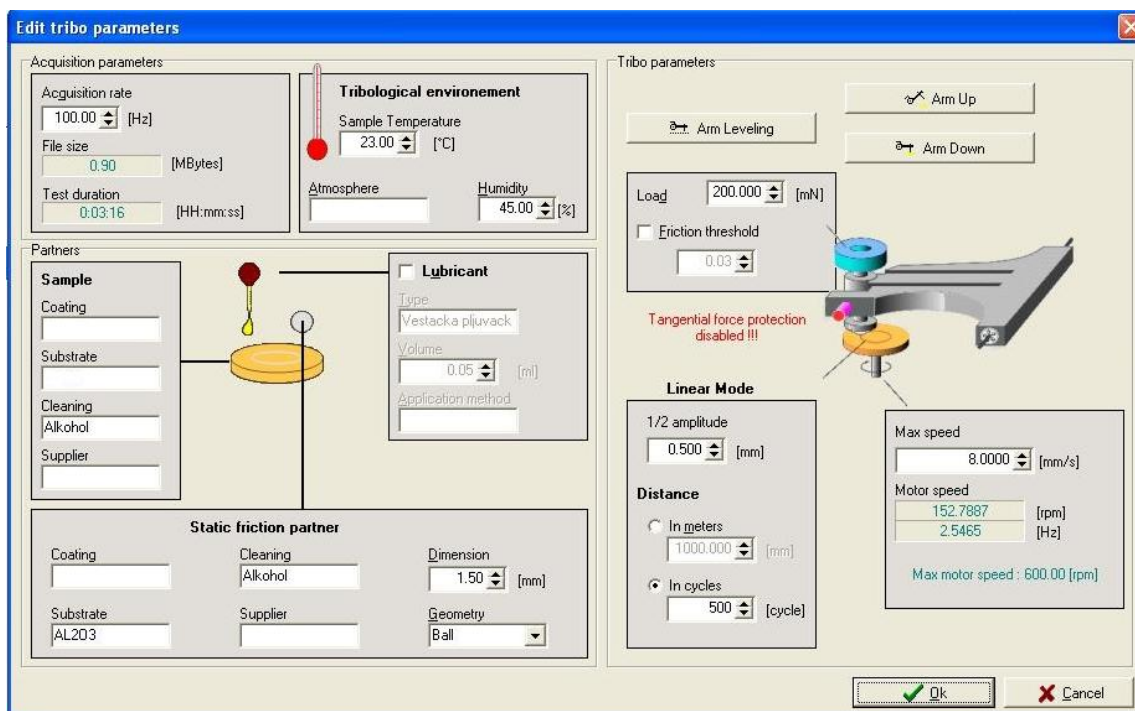


Слика 5.2 а) контактна геометрија (ball on plate); б) конзола [21]

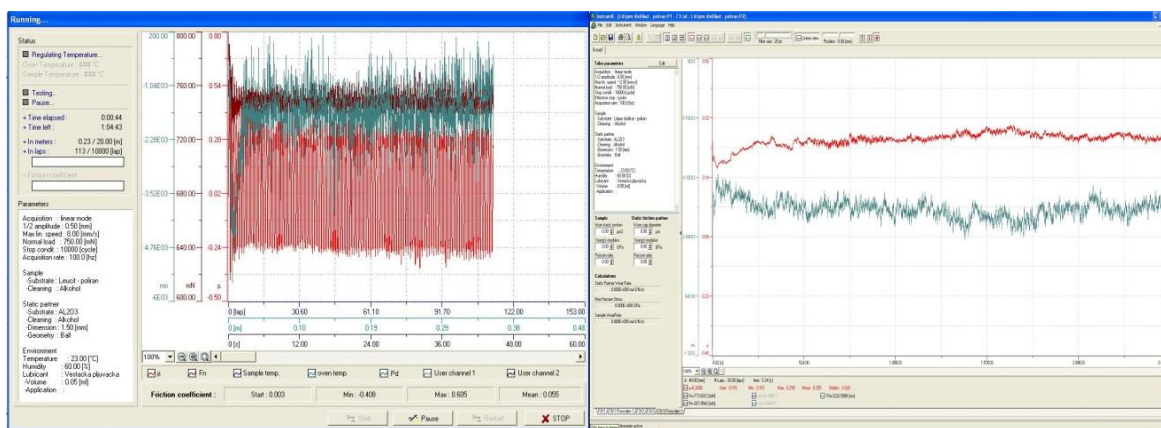
Два тела у контакту (куглица и површина узорка) се доводе путем софтверског управљања, потпуно аутоматски. Величине нормалне силе, брзине клизања и дужина путање задају се такође софтверским путем. Софтвер садржи комплетан сет опција за подешавање улазних параметара (Слика 5.3). Аутоматски прикупља следеће податке током триболошког теста:

- број циклуса,
- дужину пређеног пута [m],
- вредност нормалне силе и силе трења [mN],
- коефицијент трења и дубину продирања.

Током трајања теста, софтвер даје приказ нормалне силе, коефицијента трења и дубине продирања у реалном времену, као функције пређеног пута, броја циклуса и времена (Слика 5.4). Софтвер има и могућност филтрирања сигнала и аутоматског израчунавања вредности коефицијента трења. На крају теста, софтвер нанотрибометра може аутоматски генерисати извештај резултата у форми .pdf фајла, при чему се представљају криве коефицијента трења, силе трења и дубине продирања.



Слика 5.3 Приказ подешавања улазних параметара у софтверу нанотрибометра [21]



а)

б)

Слика 5.4 а) Изглед приказивања вредности у реалном времену; б) изглед филтрираног сигнала након завршеног теста [21]

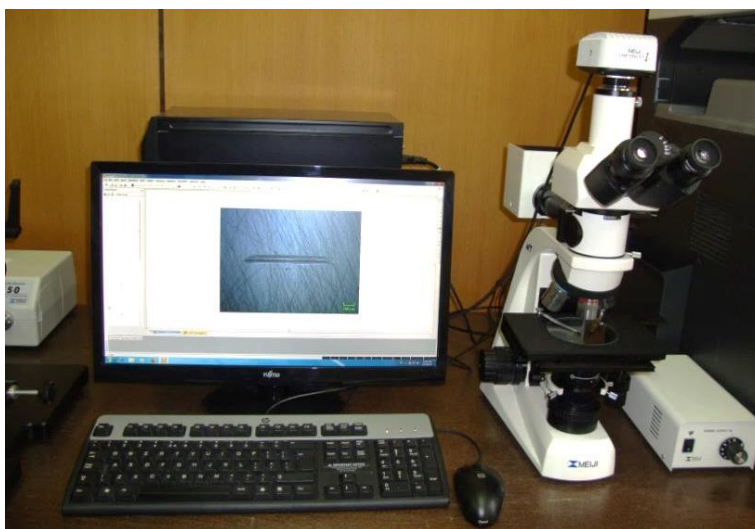
Испитивања се могу вршити у условима са подмазивањем и без подмазивања, при чему се подмазивање врши наношењем мазива микропипетом на саму контактну површину која се испитује. Контролисани испитни параметри као што су брзина, фреквенција и контактни притисак, време трајања и услови испитивања (температура, влажност и мазиво) помажу да се веома прецизно симулирају реални експлоатациони услови при којима настаје хабање контактних елемената. Пре сваког испитивања куглицу и плочицу треба очистити алкохолом. [21]

5.1 Оптички микроскоп

За анализу површина свих припремљених узорака коришћен је оптички микроскоп MEIJI Techno (слика 5.1.1). Микроскоп је компјутерски подржан и опремљен камером велике резолуције, објективима увећањима 5х, 10х, 20х, 50х и 100х и сопственим илуминатором. Овај микроскоп поседује филтере и софтверска подешавања која доприносе бољем квалитету приказа испитиваних површина. Пратећи софтвер нуди велики број могућности за обраду и анализу направљених слика.

Претходном калибрацијом микроскопа одговарајућем објективу пружа се могућност мерења разних металуршких феномена. Мерења могу бити у погледу линијских и површинских димензија, при чему је могуће извршити мерења површина неправилних облика.

Приказан оптички микроскоп одликује лакоћа руковања, и оба микроскопа су опремљена са покретним радним столовима који омогућавају померање узорака у правцу X, Y и Z осе. [21]



Слика 5.1.1 MEIJI Techno металуршки оптички микроскоп [21]

6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ

Циљ експеримента је карактеризација и особине алуминијумске легуре после контакта са четири врсте материјала (четири куглице) које клизају по површини алуминијумске легуре у реалним условима посматрано на микронивоу. За различите услове (параметре тестирања) брзину клизања, нормално оптерећење, температуру и дужину клизања врши се селекција мерљивих параметара хабања, тј. површина похабаног дела и дужина трага хабања из чега се прорачунски добија количина (запремина) похабаног дела. На основу прикупљених резултата коментарише се однос Al легуре са сва четири материјала и одређује најповољнији и најнеповољнији услови контакта.

6.1 План експеримента

Да би се извршила триболошка карактеризација алуминијумске легуре помоћу нанотрибометра потребно је припремити узорак алуминијумске легуре (у овом случају припремци димензија 13x16mm и 14x16mm дебљине 12mm) и обрадити га да се добије што равнија површина (у овом случају полирањем на брусном папиру са додатком пасте за полирање).

Плочице су од алуминијумске легуре EN AW – 6082 (AlMgSi1) T651. Ова легура је легура високе чврстоће за високо оптерећене структурне примене. Типичне примене су делови железничких возила, контејнери, покретне дизалице као и разних врста скела и др. Захваљујући финој зрнастој структури ова легура показује добру отпорност на динамичке услове. Хемијски састав ове легуре приказан је у табели 6.1. [22]

Табела 6.1 хемијски састав EN AW – 6082 [22]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	остало	
0,7 – 1,3	Max 0.5	Max 0.1	0.4 – 1	0.6 – 1.2	Max 0.25	Max 0.2	Max 0.1	сваки	укупно
								–	–

Карактеристике ове легуре су:

- Густина 2,7 g/cm³,
- тачка топљења 555 °C,
- термално ширење 24*10⁻⁶ / K,
- модул еластичности 70 GPa,
- темичка проводност 180 W/m.K,
- електрична отпорност 0,038*10⁻⁶ Ω.m,

- затезна чврстоћа је 255 – 300 МПа,
- издужење 9%,
- тврдоћа по Бринелу 91 НВ. [23]

Триболошко испитивање је спроведено користећи механизам контакта куглица по плочи (ball on plate), на „CSM instrument Basalt – pt CSMAN“ нанотрибометру на собној температури од 25° С.

Након одабира алуминијумске легуре и припреме плочице потребно је извршити одабир куглице која ће клизати по површини алуминијумске плочице. Типови куглице које су се користиле за испитивања су:

- Керамичке, пречника 1,5 mm:
 - *Silicon Nitride Si_3N_4* , силицијум нитрид има одлична својства материјала, његова микроструктура омогућава одличну отпорност на топлоту (до 1600°C) и хабање и чини је отпорном на ударе. Овај материјал има веома ниску густину (3.21 g/cm³) и добру отпорност на савијање. [24]
 - *Ceramic Al_2O_3* , овај материјал је отпоран на хабање и има одличне диелектричне особине, отпорна је на разне агресивне хемијске елементе, има добру топлотну проводљивост, високу чврстоћу и крутост. [25]
- Челичне, пречника 1,5 mm:
 - *Inox 440C*, нерђајући челик високе чврстоће од угљеника са умереном отпорношћу на корозију и могућности да добије и задржи одличну тврдоћу, такође отпоран на хабање. [26]
 - *AC 100Cr₆*, висококвалитетни легирани челик, припада групи висококвалитетних легираних хром-манган челика, велике тврдоће (34 HRC). [27]

Куглица се монтира на носач трибометра (слика 5.1.1). Постављени услови тестирања су све могуће комбинације следећих параметара (нпр. нормална сила 600mN, брзина клизања 30mm/s или нормална сила 900mN, брзина клизања 10mm/s итд.) :

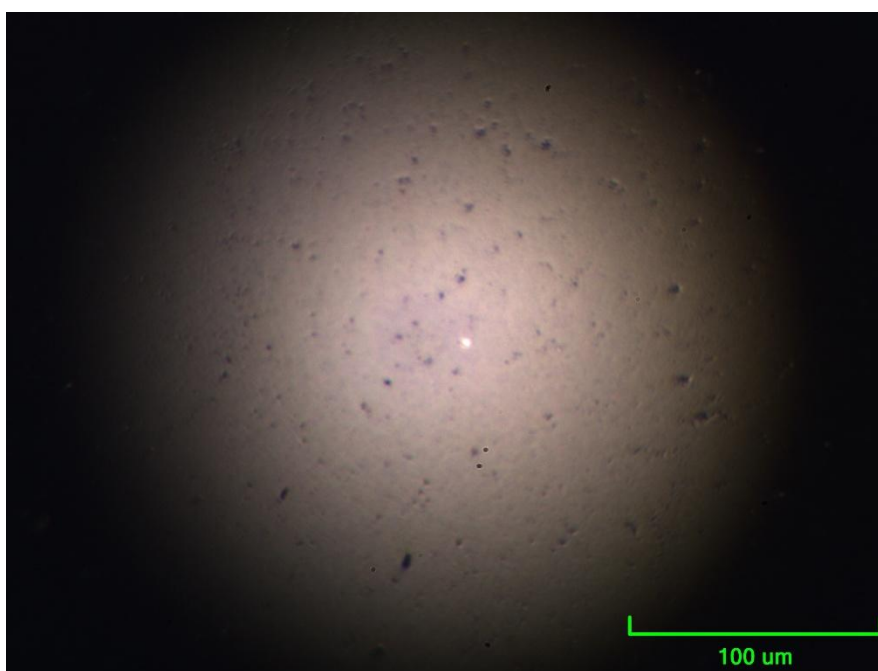
- Нормална сила оптерећења од 300 mN, 600 mN и 900 mN,
- Брзина клизања од 10 mm/s, 20 mm/s, 30 mm/s,
- Дужину хабања 500mm (500 циклуса од по 1 mm)

Максимално оптерећење нанотрибометра је 1N, па су зато коришћене дате вредности. Минимална вредност дужине контакта куглице и алуминијумског припремка је

око 500мм, за неко оптималније и меродавније мерење требало би да та дужина буде доста већа (око 10000mm и више), али због самог трајања експеримента коришћена је минимална дужина. Коришћени су праволинијски циклични процеси (померање куглице у једном смеру 1мм, а затим у контра смеру за исту вредност).

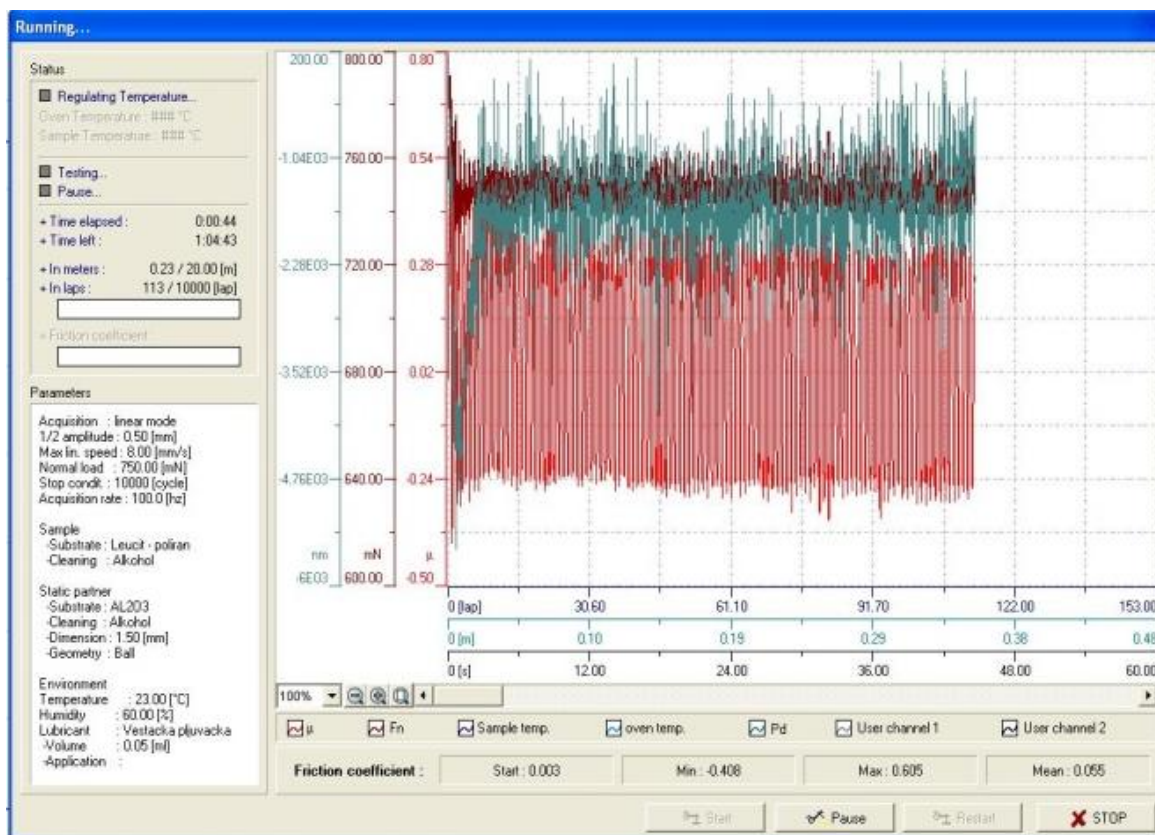
6.2 Процес испитивања

Пре почетка сваког тестирања, куглица треба да се постави у такав положај да површина буде не оштећена (слика 6.2.1). Након тога треба је очистити алкохолом од масноће и других нечистоћа, такође треба очистити и алуминијумску плочицу. Преко рачунарског софтвера се покреће процес клизања на нанотрибометру.

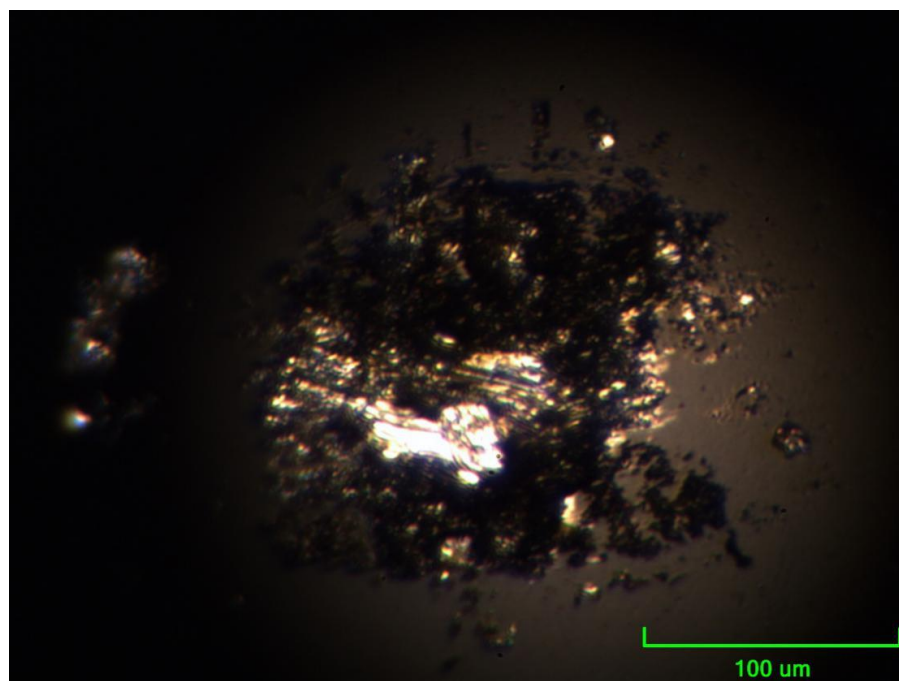


Слика 6.2.1 Не оштећена куглица од силицијум нитрида Si_3N_4

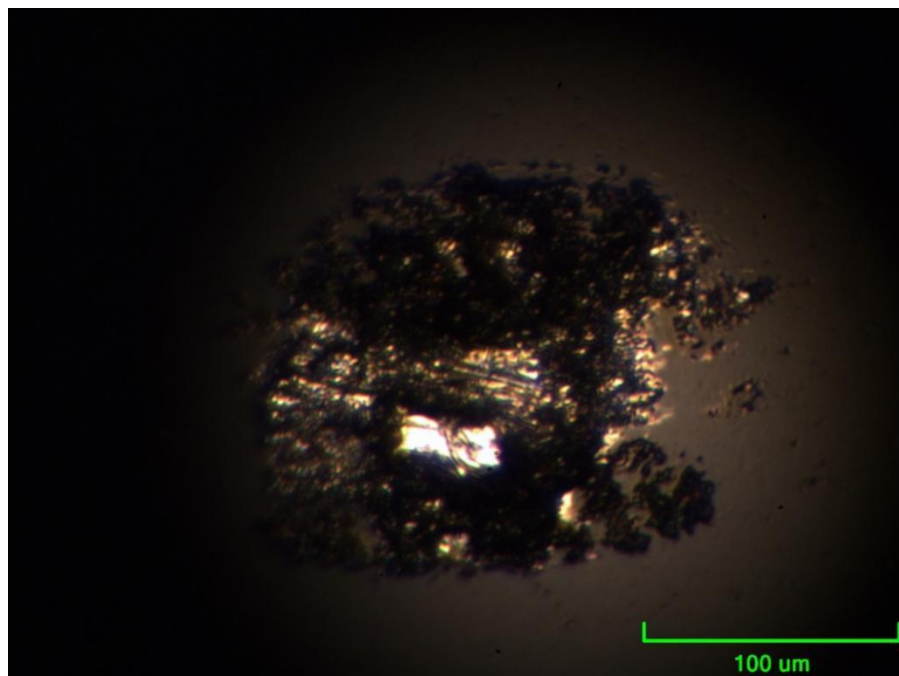
Приступа се подешавању параметара у софтверу и покретању процеса. Софтвер током рада бележи коефицијент трења и прати његову промену кроз временски интервал, такође прати и варирање нормалног оптерећења (слика 6.2.2). Након завршеног процеса приступа се снимању изгледа куглице, при чему се не чисти од продуката хабања (слика 6.2.3). По завршеном снимању, куглица се алкохолом чисти од продуката хабања и поново снима (слика 6.2.4), због упоређивања. Такође исто је урађено и за алуминијумску плочицу (слика 6.2.5).



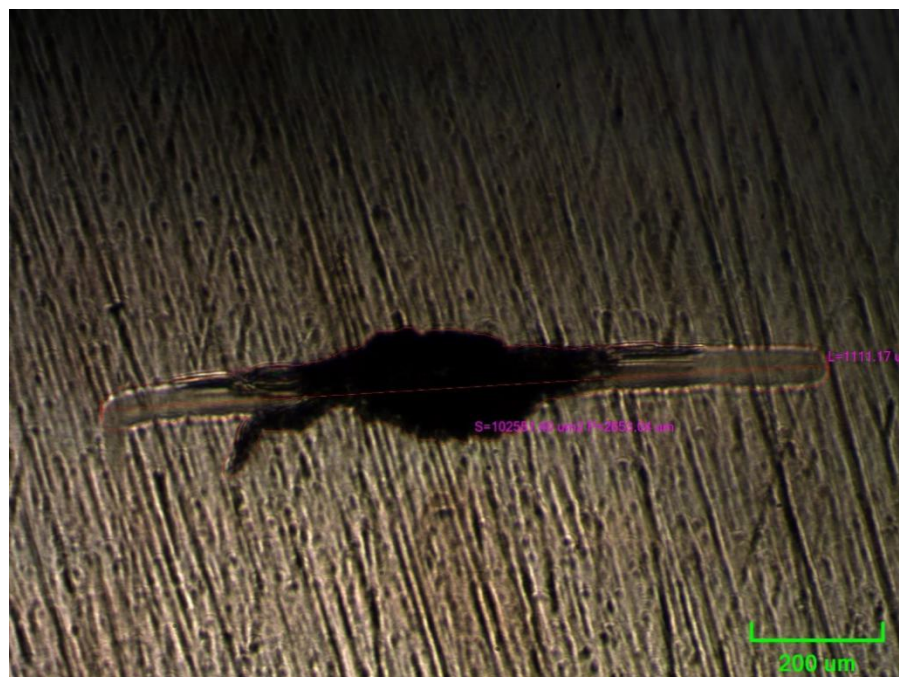
Слика 6.2.2 График зависности коефицијента трења од времена трајања процеса



Слика 6.2.3 Изглед куглице Si_3N_4 после процеса са продуктима хабања (нормално оптерећење 900mN, брзина клизања 30mm/s)



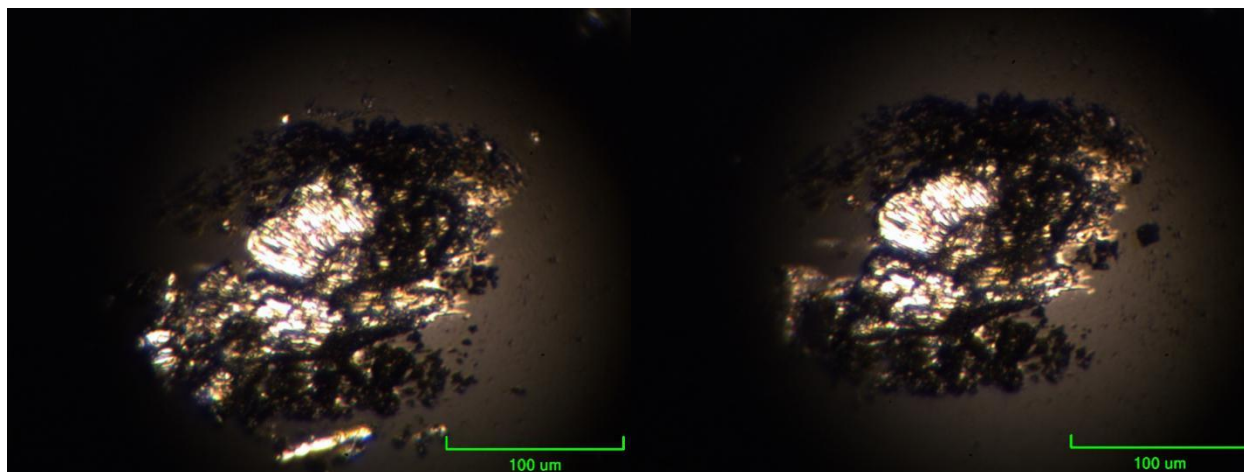
Слика 6.2.4 Изглед куглице Si_3N_4 после процеса без продуктима хабања (нормално оптерећење 900mN, брзина клизања 30mm/s)



Слика 6.2.5 Траг хабања на алуминијумској плочици са обележеном површином и дужином (нормално оптерећење 900mN, брзина клизања 30mm/s)

Може се приметити да су се након процеса клизања продукти хабања задржали око оштећеног дела куглице, након чишћења могуће је јасно уочити границе похабане куглице.

Да би резултати експерименталног истраживања били меродавнији, потребно је поновити експеримент. Већим бројем понављања експеримента добија се већа тачност, али због трајања експеримента урађено је само једно понављање. На слици 6.2.6 може се видети изглед куглице Si_3N_4 после поновљеног процеса клизања, са и без продукта хабања (нормално оптерећење 900mN, брзина клизања 30mm/s), док је на слици 6.2.7 приказан траг хабања за поновљени процес клизања.



Слика 6.2.6 Изглед куглице Si_3N_4 после поновљеног процеса са и без продуктима хабања (нормално оптерећење 900mN, брзина клизања 30mm/s)

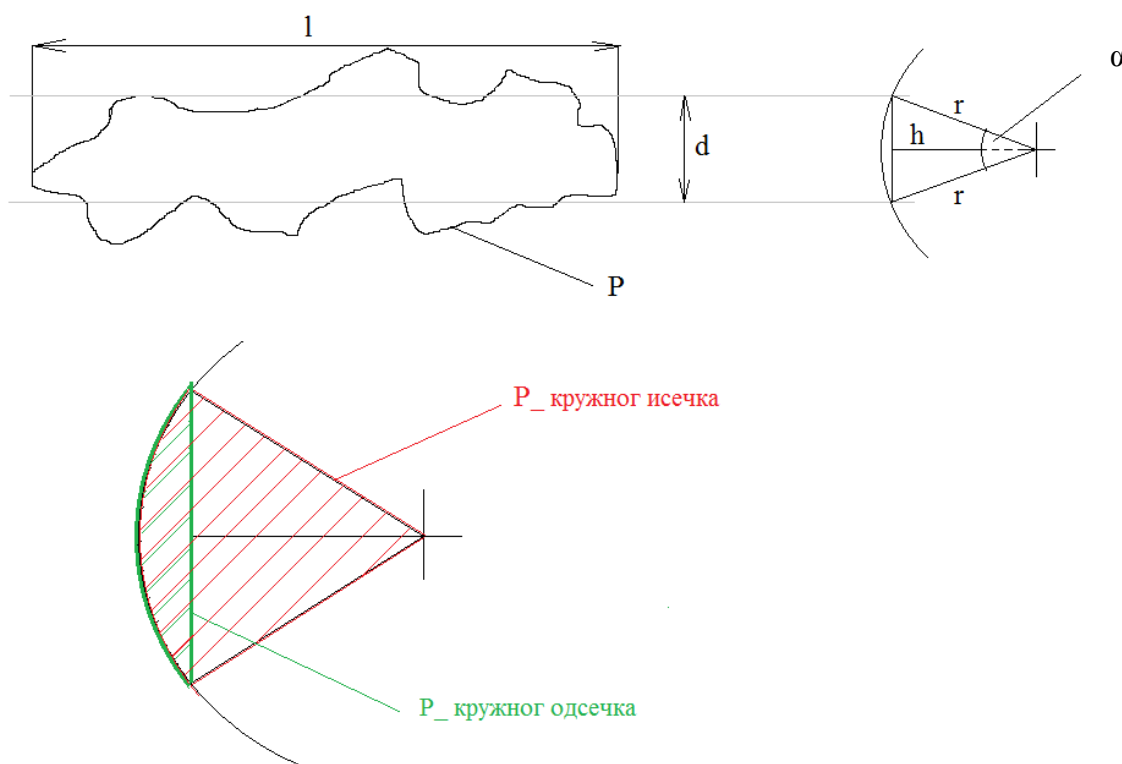


Слика 6.2.7 Траг хабања на алуминијумској плочици после поновљеног процеса клизања са обележеном површином и дужином (нормално оптерећење 900mN, брзина клизања 30mm/s)

Може се приметити да су трагови хабања на алуминијумској плочици сличне геометрије. Вредност површине трага хабања после првог процеса клизања је $102551,4\mu\text{m}^2$ и дужина трага хабања је $1111,17\mu\text{m}$. Код другог трага хабања површина износи $106457,86\mu\text{m}^2$ и вредност дужине трага је $1062,57\mu\text{m}$. Такође су и вредности површине и дужине трага хабања сличне. Мерење површине трага хабања вршило се на рачунарском софтверу у склопу оптичког микроскопа. Приближним одређивањем граница површине трага хабања (превлачењем мишем) рачунар израчунава површину трага хабања, а затим и једноставним алатом израчунава се и дужина трага хабања. Након прикупљања свих ових параметара за све трагове, приступа се прорачуну за одређивање количине хабања.

6.3 Резултати испитивања

Параметри који су познати су: материјал куглице, пречник куглице, број циклуса (један циклус је 1mm), пут клизања, нормално оптерећење, брзина клизања, површина трага хабања и дужина трага хабања. На слици 6.3.1. приказан је траг хабања.



Слика 6.3.1. Траг хабања

Површина трага хабања обележена је са (P), дужина трага хабања са (l), средња вредност ширине трага хабања (d) израчуната је дељењем површине трага и дужине трага.

Да би се добила површина кружног одсечка (зелена површина на слици 6.3.3), која је потребна за израчунавање количине похабаног дела, прво се треба израчунати површина

кружног исечка (црвена површина). Површина кружног исечка израчунава се на следећи начин:

$$P_{ki} = \frac{r^2}{2 * \alpha} [mm^2]$$

Где је: r – полупречник куглице, α – угао који се добија из троугла на слици 6.3.3.

Потребна је вредност угла α у радијанима, прво се израчунава вредност у степенима:

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{\frac{d}{2}}{h}$$

$$\frac{\alpha}{2} = \tan^{-1} \frac{\frac{d}{2}}{h}$$

Висина троугла (h) се израчунава:

$$h = \sqrt{r^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} [mm]$$

Ширина трага, $d = \frac{P}{l} mm$

За израчунавање кружног одсечка потребно је да се претходно израчуна површина троугла.

$$P_{\Delta} = \frac{h * d}{2} [mm^2]$$

Површина кружног одсечка:

$$P_{ko} = P_{ki} - P_{\Delta} [mm^2]$$

Када се добије вредност површине кружног одсечка, могуће је израчунати количину похабаног дела, и то множењем вредности површине кружног одсечка и дужине трага.

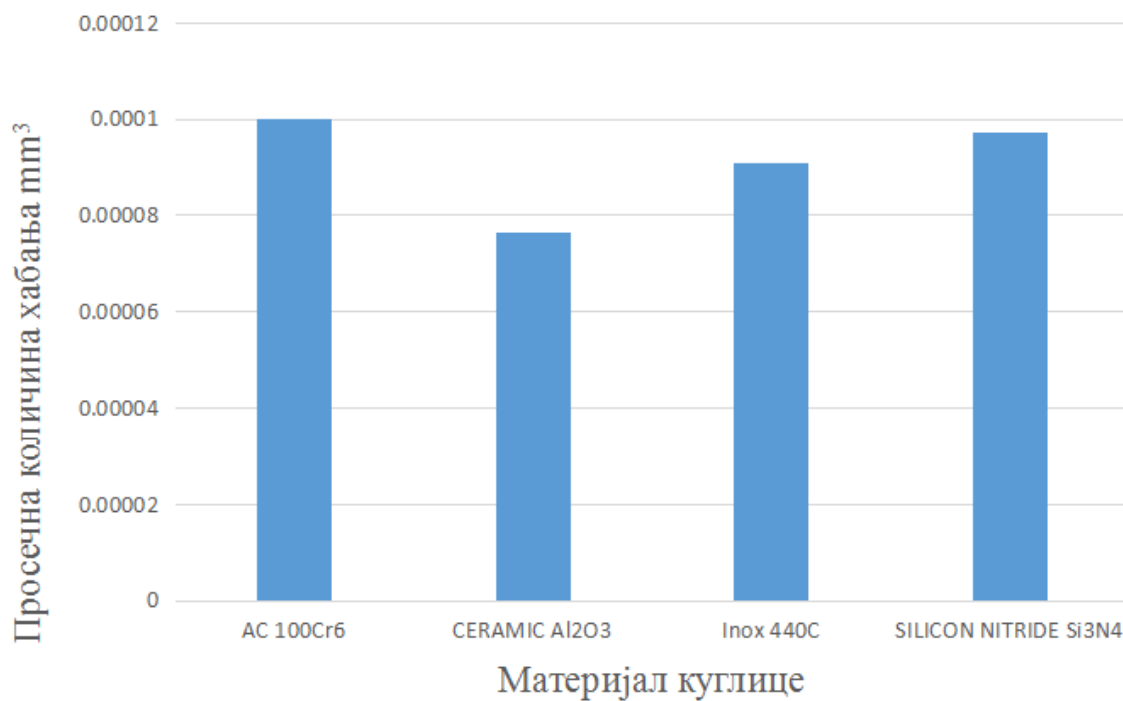
$$Wear vol = P_{ko} * l [mm^3]$$

Специфична стопа хабања рачуна се на следећи начин:

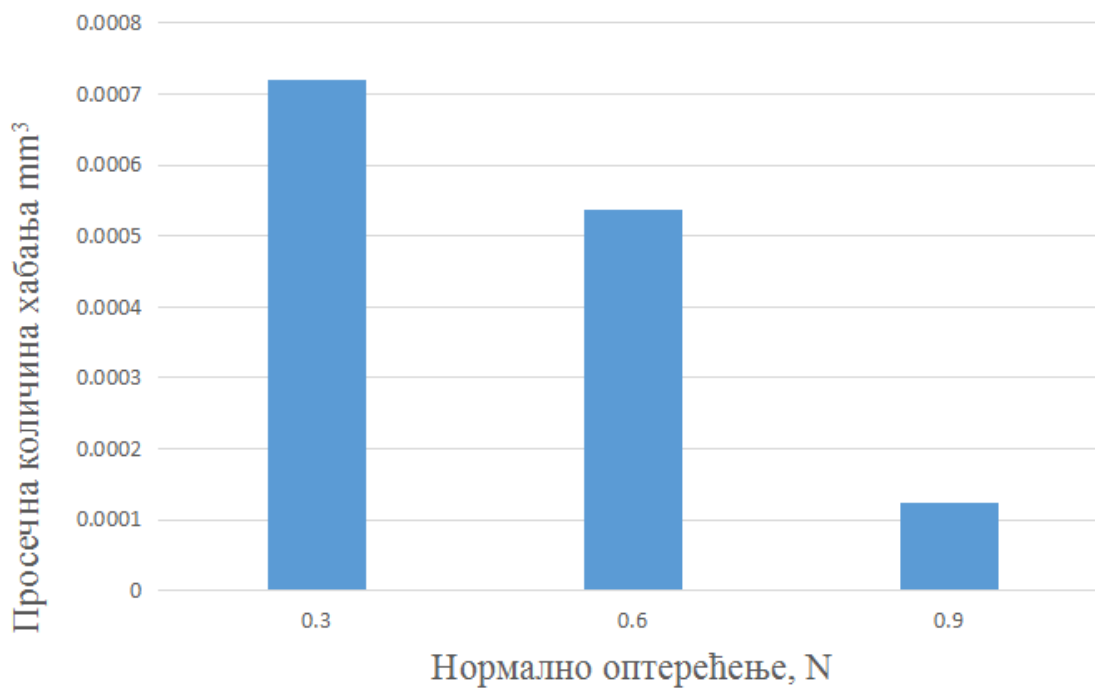
$$Spec. wear rate = \frac{Wear vol}{Normalno opterećenje * put klizanja} \left[\frac{mm^3}{Nm} \right]$$

Након израчунавања количине производа хабања за све могуће варијације параметара и куглица, добијени резултати су забележени у додатку (прорачуну) овог рада. Забележене су неки од карактеристичних резултата. Зависност просечне количине

похабаног материја (Al легуре) од материјала куглице за све варијације испитивања (слика 6.3.2).

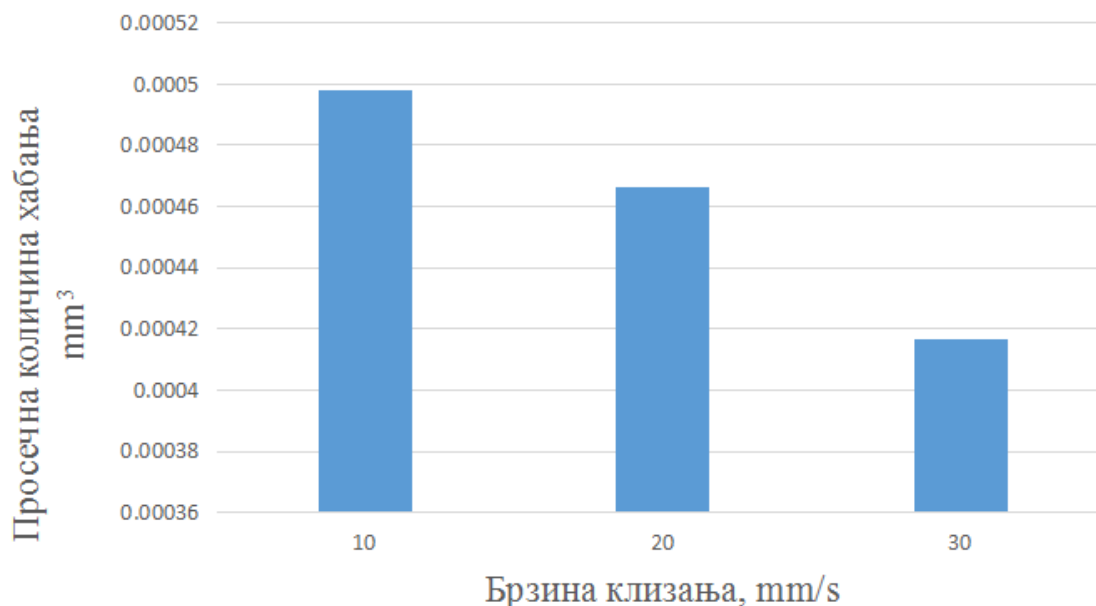


Слика 6.3.2 Зависност просечне количине хабања од материјала куглице



Слика 6.3.3 Зависност просечне количине хабања од нормалног оптерећења

Може се приметити да најмање продуката хабања настаје при контакту керамичке легуре Al_2O_3 са тестираном алуминијумском легуром, док са осталим куглицама има нешто већу вредност продуката хабања. На слици 6.3.3 се види драстична разлика у количини продуката хабања у зависности од нормалног оптерећења 0.9N, и пропорционално расте са смањењем оптерећења. Зависност просечне количине похабаности, за све куглице, и брзине клизања је приказана на слици 6.3.4. Примећује се да са повећањем брзине клизања од 10 до 30 mm/s количина продуката хабања опада.



Слика 6.3.4 Зависност просечне количине хабања од брзине клизања

Закључује се да је оптималнији рад, тј. контакт између површина алуминијумске легуре и материјала куглице на већим брзинама клизања и са већим оптерећењем, што значи да је ова легура погоднија за системе (механизме) код којих су брзине кретања материјала у контакту веће и под већим оптерећењем. Знајући да је алуминијум као материјал релативно „мек“, са превеликим оптерећењем би други материјал само продрао, што значи да не би издржао превелика оптерећења. Са друге стране нема велику густину, тако да је његова маса мања и даје му предност за коришћење код механизма који захтевају мању масу.

Примећује се да се губитак материјала није јавио само на алуминијумској плочици, него и на куглицама. Јавио се узајамни трансфер материјала са плочице на куглицу и обрнуто, дакле уочено је и адхезионо хабање. Паралелно са тим настало је абразивно хабање услед кидања материјала у зони контакта. Поред тога претпоставка је да се у неком тренутку контакта јавило и заморно хабање услед великог броја циклуса.

7. ЗАКЉУЧАК

Трибологија је значајно утицала на развој и унапређење индустрије, тј. на смањење великих трошкова који су настајали због трења и губитка материјала. Примена средстава за подмазивање у великој мери смањило је трошкове које је проузроковало трење у контакту било којих машинских делова и склопова. Средства за подмазивање, тј. мазиве масти, уља, превлаке, свакодневно се развијају и унапређују.

Да би се одредило адекватно подмазивање машинских делова и механизма раде се тестирања материјала који су у контакту са параметрима приближним реалним условима рада неког механизма (нормално оптерећење, температура, брзина кретања, и други утицаја из спољне средине). Тестирања се обављају помоћу трибометара и микроскопа, при чему се бележе одређене карактеристике (варијације силе трења у зависности од брзине клизања, нормалног оптерећења и др.).

Контакте два материјала описаних у овом раду могуће је упоређивати на различите начине. У раду су описани контакти четири врсте материјала. Један од интересантних карактеристика је укупна количина похабаности материјала за сваки од тестираних материјала, где је најмања похабаност код керамичке легуре. Примећује се да се са повећањем нормалног оптерећења смањује количина хабања, такође и са повећањем брзине кретања материјала у контакту остварују се бољи услови, тј. мања је количина хабања.

Испитивања материјала помоћу трибометра представља добар и јефтин начин сазнања карактеристика тих материјала и њиховог понашања у различитим условима. Симулирање контакта два материјала на трибометру не може се поредити са контактом у реалним условима рада али нам даје приближне резултате.

8. ЛИТЕРАТУРА

1. Приручник о нано и микро трибологији, В.В.Бушан, 1999.
2. Трибологија као наука и технологија скрипта, Слободан Митровић, 2017.
3. Модерна трибологија, приручник, В.В.Бушан, 2001.
4. Интернет страница, <https://www.newport.com/n/stage-components-considerations> приступљено 10.9.2017.
5. Ефекат скалирања у трибологији од макро до микро, Pantcho Stoyanov и Richard R. Chromik.
6. Интернет страница <http://nptel.ac.in/courses/112102015/29> приступљено 10.9.2017.
7. Морфологија површине, Александар Милетић, интернет страница http://www.dpm.ftn.uns.ac.rs/dokumenti/Laboratorija_TO/Nanotehnologije/Nano%20-%20Morfologija%20povrsine.pdf приступљено 16.9.2017.
8. Трибологија, Југословенско друштво за трибологију, Ивковић Б., Рац А. 1995
9. Трење, теорије трења, врсте, механизми, скрипта, Слободан Митровић, 2017.
10. Интернет страница, <http://tribology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=2588988> , приступљено 18.9.2017.
11. Трибометрија, скрипта, Слободан Митровић, 2017.
12. Интернет страница, http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear приступљено 20.9.2017.
13. Интернет страница, <http://machinerylubrication.com/Articles/Print/1375> , приступљено 21.9.2017.
14. Хабање, теорије хабања и механизми, скрипта, Слободан Митровић, 2017.
15. Интернет страница, <http://nptel.ac.in/courses/112102015/14> , приступљено 21.9.2017.
16. Интернет страница, <https://www.slideshare.net/yozenmen/tribological-properties-of-metalonmetal-hip-implants> , приступљено 25.9.2017.
17. Интернет страница, <http://www.brakeandfrontend.com/tech-tip-so-what-s-this-fretting-corrosion-stuff-anyway/> , приступљено 25.9.2017.

18. Трибомеханички системи, подмазивање и мазива, скрипта, Слободан Митровић, 2017.
19. Интернет страница, http://www.face-kyowa.co.jp/english/en_science/en_theory/en_what_friction/ , приступљено 23.10.2017
20. Интернет страница, <http://www.asi-team.com/asi%20team/csm/csm%20data/nano%20tribometer.pdf> , приступљено 26.11.2017
21. Докторска дисертација, Марко Пантић , Факултет Инжењерских наука, Крагујевац.
22. Интернет страница, <https://www.nedal.com/wp-content/uploads/2016/11/Nedal-alloy-Datasheet-EN-AW-6082.pdf> , приступљено 27.11.2017
23. Интернет страница, http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy_6082-T6~T651_148.ashx , приступљено 27.11.2017
24. Интернет страница, <https://www.ceramtec.com/ceramic-materials/silicon-nitride/> , приступљено 5.4.2018.
25. Интернет страница, <http://accuratus.com/alumox.html> , приступљено 5.4.2018.
26. Интернет страница, <http://www.supplieronline.com/propertypages/440C.asp> , приступљено 5.4.2018.
27. Интернет страница, <http://www.otaisteel.com/products/bearing-steel-and-gear-steel/100cr6-steel/> , приступљено 5.4.2018.