

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**

Срђан С. Биуковић
Хабање зупчастих преносника снаге
Завршни рад

Крагујевац, 2014.

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Поузданост машинских система

Број индекса: 118/2010

Срђан С. Биуковић

Хабање зупчастих преносника снаге

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Добривоје Ћатић, ред. проф**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да обради следеће теме:

- Природу површина зупчастих преносника
- Механизме хабања зупчастих преносника
- Подмазивање и поделу мазива

Препоручена литература:

[1] Bharat Bhushan: *Introduction to tribology*, The Ohio State University Columbus, Ohio, USA, 2013.

[2] Ivana Atanaskova, Dejan Momčilović: *Uticaj otkaza zubaca na bezbednost mašina*, Stručni članak UDK/UDC: 621.833.01, str. 37-45, Institut za ispitivanje materijala, Beograd, 2007.

[4] Slobodan Stefanović, Dragan Nikolić, *Izbor maziva za podmazivanje mehaničkih prenosnika*, Osmo internacionalna konferencija o tribologiji, Beograd, 2003.

Крагујевац, септембар 2014.

ментор:

Др Добривоје Ћатић, ред. проф.

Резиме:

Зупчасти преносници имају веома широку примену код преноса снаге и кретања јер имају низ предности у односу на друге типове преносника. Од њиховог исправног рада зависи и рад комплетних постројења те се због тога њиховом поузданом раду посвећује посебна пажња. Најновија истраживања у овој области показују да у њиховом раду може да се јави већи број граничних стања која могу да се идентификују на основу стања радних површина. Једно од релевантних граничних стања је њихово хабање. У раду је разматрано хабање зупчастих преносник почевши од физичко-хемијских облика површина, преко механизма и узрока а у светлу најновијих истраживања у овој области. То истраживање резултира прописано подмазивање техничких система, тј самих зупчаника, одабиром мазива погодног за спречавање хабања.

Кључне речи: зупчаници, хабање, подмазивање

Abstract:

Toothed gears are widely used in power transmission and motion because they have many advantages over other types of gear. Their correct operation depends on the work of complete plants and therefore their reliable operation of special attention. The latest research in this field show that their work can appear larger number of boundary conditions that can be identified based on the status of work surfaces. One of the relevant boundary condition is their wear. The paper discusses the gear wear starting with physico-chemical forms of surfaces, through the mechanisms and causes in the highlight of recent research in this area. This research resulted in lubrication provided technical systems, that, gear ourselves, selecting a suitable lubricant to prevent wear.

Keywords: gears, wear, lubrication

САДРЖАЈ

РЕЗИМЕ.....	I
ABSTRACT.....	I
1. УВОД.....	1
2. ПРИРОДА ПОВРШИНА.....	3
2.1 Деформабилни слој.....	6
2.2 Хемијски реагујући слој.....	6
2.3 Физички апсорбујући слој.....	7
2.4 Хемијски апсорбујући слој.....	8
2.5 Анализа храпавости подлоге.....	9
3. ХАБАЊЕ.....	12
3.1 Атхетионо хабање	16
3.2 Абразивно хабање.....	19
3.3 Абразивно хабање услед пластичне деформације.....	21
3.4 Оштећење зубаца зупчаника.....	25
4. ПОДМАЗИВАЊЕ ЗУПЧАСТИХ ПРЕНОСНИКА.....	28
4.1 Основне карактеристике мазива.....	31
4.2 Избор мазива за подмазивање према стандардима.....	32
4.3 Испитивање уља у експлоатацији.....	36
4.4 Одржавање уља.....	38
4.5 Управљање отпадним уљем.....	39
5. ЗАКЉУЧАК.....	40
6. ЛИТЕРАТУРА.....	41

1. УВОД

Реч трибологија се први пут појављује у извештају Јоста 1966. године. Реч потиче од грчке речи трибос што значи трење, а буквалан превод термина би био "Наука о контакту површина". Популарани енглески универзални називи су трење, хабање и подмазивање. Речници дефинишу трибологију као науку о технологији и интеракцији површина у релативном кретању и сродних материјала у пракси. Трибологија примењује оперативне анализе проблема од великог економског значаја, наиме, проучавање поузданости, одржавања и хабања техничких система.

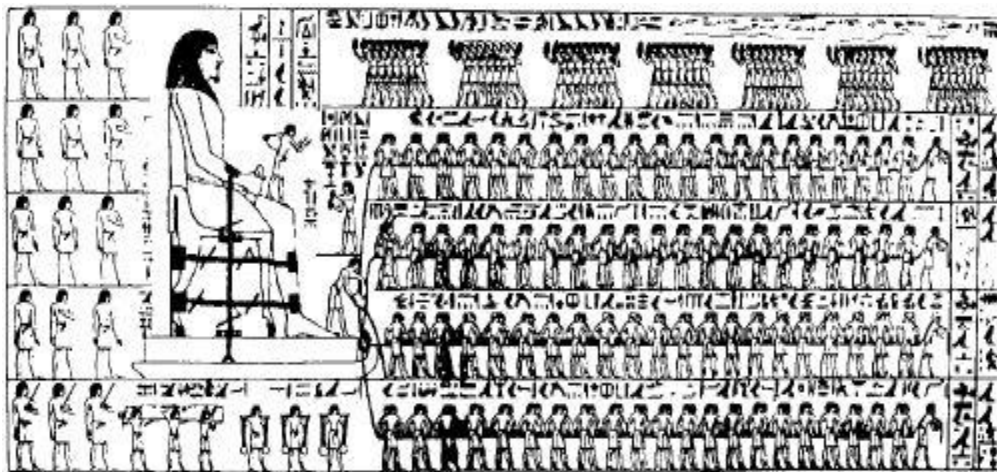
Површинске интеракције у триболошком систему су веома сложене, а њихово разумевање захтева познавање различитих дисциплина, укључујући физику, хемију, примењену математику, механику лома, механику флуида, термодинамику, пренос топлоте, науку о материјалима, подмазивање, дизајн, перформансе и поузданост. Трибологија је од кључног значаја за елементе механизације, за контактне слојеве у трибо механичким системима, који зависе од услова под којима су настале радне површине.

Како је познато, бушилице направљене током палеолита, су опремљене лежајевима направљеним од рогова или костију и коришћењем точкова грнчара и камења су млене житарице. Јасно је да су имали услове за коришћење лежајева. Пронађен је куглични лежај који датира од 40 године пре нове ере, у језеру Ними близу Рима. Записи који показују коришћење точкова од 3500 године пре нове ере, демонстрирају тежњу наших предака за смањењем трења у трансляторном кретању. За тадашње пољопривредне радове коришћена су запрежна кола, која датирају чак од 1338. године пре нове ере приказана на слици 1 [1].



Слика 1. Запрежна кола коришћена за пољопривредне потребе

За превоз великих камених зграда, блокова и споменика, било је потребно знање о трењу и подмазивању, као што су водо-подмазиве санке, приказане на слици 2, која приказује коришћење санки за транспорт тешких кипова. Приказано је, како робови вуку кип дуж дрвене греде, док један од њих придржавајући статуу упоредо сипа течност, највероватније на пут кретања.



Слика 2. Египћани користе подмазивање, којим помажу кретање

Гробница у Египту која датира неколико хиљада година пре нове ере пружа доказ о коришћењу мазива. Кочије пронађене у овој гробници још увек садрже животињске масти, коришћене за подмазивање.

Хабање је много млађи предмет истраживања од трења, које је започето на емпиријској основи. Научне студије хабања развијане су све до средине двадесетог века. Рагнар Холм је један од најранијих значајних научника, који доприноси науци о хабању.

На западу, индустријска револуција (1750-1850) је призната као период брзог развоја производне механизације. Употреба парне машине и каснији развој железнице, аутомобила и авиона, довео је до потребе за поузданијим елементима система. Од почетка двадесетог века, због енормног индустријског раста долази до великих потреба за трибологијом и знањем у свим областима трибологије.

Према неким проценама, губици настали из непознавања трибологије у Сједињеним Америчким Државама износе око 4% бруто националног производа (или око 200 милијарди долара годишње).

Значај смањења хабања контролом не може бити пренаглашен из економских разлога и дугорочне поузданости. Према Јосту, уштеде од око 1% бруто националног производа индустријске нације могу бити реализоване бољом триболошком праксом. Према последњим студијама, очекује се уштеда 50 пута већа у односу на трошкове истраживања. Уштеда је обимна и значајна, и она се може остварити без великих капиталних инвестиција.

Циљ истраживања у трибологији је разумљива минимизација и елиминација губитака насталих услед трења и хабања на свим нивоима технологије где је укључено хабање површина. Истраживања у трибологији доводе до веће ефикасности постројења, бољих перформанси, мање отказа и значајне уштеде.

Од 1800-их година, трибологија је важна у бројним индустријским гранама које захтевају релативно кретање, на пример, железница, аутомобили, авиони и производни процеси машинских делова. Неке од триболошких компоненти машина које се користе у овим гранама укључују лежајеве и зупчанике.

Трибологија је значајно важна за индустрију као и за свакодневни живот. За пример узмимо писање. Писање је триболошки процес. Писање се постиже контролисано преношењем графита или боје оловке на папир. Током писања оловком долази до адхезије између оловке и папира, тако да мала количина графита пређе на папир. Оловка треба да има адекватну жилавост, тврдоћу, тако да се процес писања не прекида.

Трење, хабање и подмазивање веома зависе од површине материјала, облика и радног окружења. Површински слој може променити физичке и хемијске особине првих неколико атомских слојева материјала кроз интеракцију са околином.

У овом раду, кроз поглавља је анализирано хабање на примеру зупчастих преносника снаге, анализиране су природе површина, описан је њихов међусобни контакт, представљене су предности и мане. Обрађена је и област примене зупчастих преносника, представљени су механизми хабања, који су детаљно описани и сликовито приказани. У поглављу о подмазивању описан је начин и примена подмазивања код зупчаника, представљене су улоге и поделе мазива [1].

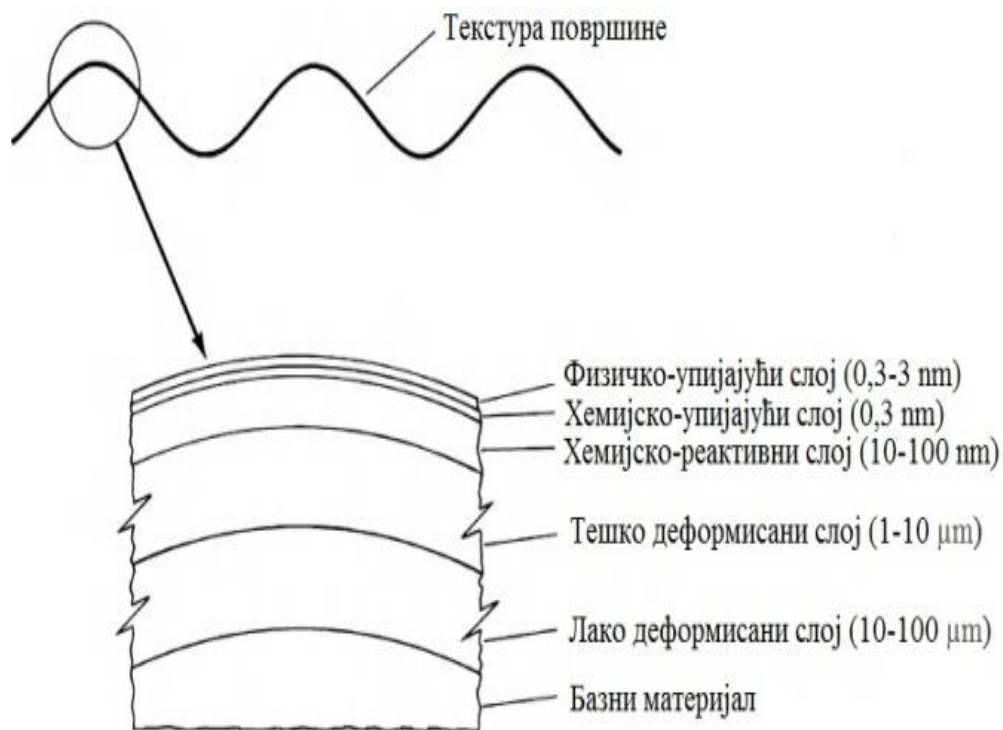
2. ПРИРОДА ПОВРШИНА

Чврсте површине, тачније чврсто-гасовите или чврсто-течне површине, имају сложену структуру и сложена својства која зависе од природе површина, начина припреме површине и интеракције између површине и околине. Својства чврстих површина су од пресудног значаја за површинску интеракцију, јер површинска својства утичу на подручје контакта, трење, хабање и подмазивање. Поред триболошких функција, површинска својства материјала важна су и у другим апликацијама, као што су оптичке, електричне и топлотне перформансе итд.

Чврсте површине, садрже неправилности структуре материјала на површини и по запремини, стога знатно утичу на триболошка својства. У чврстим материјалима присутне су несавршености структуре, као неправилности подељене у запремини материјала, које настају за време експлоатације или током деформација.

Поред површинских одступања, сама површина састоји се од неколико зона које имају физичко-хемијске особине својствене за структуру самог материјала, приказано на слици 3. Као резултат процеса формирања метала и легура, ту је зона рада каљеног или деформисаног материјала. Деформисани слојеви су такође присутни код керамике и полимера. Ови слојеви су изузетно важни јер су њихове особине површине гледано са хемијске стране, потпуно другачије од жареног материјала. Исто тако, њихово механичко својство је такође под утицајем висине и дубине деформације површинског слоја.

Многе површине су хемијски реактивне. Са посебним изузетком племенитих метала, сви метали и њихове легуре и многи неметали формирају површинске слојеве оксида у ваздуху, и у другим срединама формирају друге слојеве (на пример, нитриди, сулфиди, и хлориди). Осим хемијски корозионог филма, постоје и апсорбујући филмови. То су филмови произведени било физички или хемијски услед кисеоника, водене паре, и угљоводоника, из животне средине [1].



Слика 3. Детаљи чврсте површине, површинска текстура (увеличано по вертикалној оси) и типични површински слојеви

Повремено, биће масних или уљних филмова из окружења. Ови филмови се налазе и на металним и неметалним површинама. Присуство површинских филмова утиче на трење и хабање. Ефекат апсорбовања филмова, чак тањих слојева, је значајан за површинске интеракције. Понекад су филмови дотрајали у периоду уходавања, а касније немају ефекта. Ефекат масног или сапуњавог филма, уколико је присутан, смањује озбиљност површинске интеракције често један или више редова величине.

Поред хемијске реактивности површина и тенденције молекула да апсорбују, за важно својство сматра се површински напон или слободна енергија површине. Ово утиче на понашање апсорпције површине. Детаљи о различитим површинским слојевима биће представљени у наредним поглављима.

2.1 Деформабилни слој

Металуршка својства површинског слоја метала, легуре или керамике могу варирати значајно због масе материјала. Варирају као резултат процеса припреме површине материјала. На пример, при брушењу или полирању површинских слојева који су пластично деформисани. Са или без температурних градијената постају веома затегнути. Заостали напони могу бити ослобођени, тако да довољно утичу на димензионалну стабилност. Затегнути слој се зове деформабилни (или побољшани) слој и саставни је део самог материјала у области те површине. Деформабилни слој се такође може произвести у току процеса трења.

Количина деформисаног материјала представља и степен деформације која се јавља у функцији два фактора:

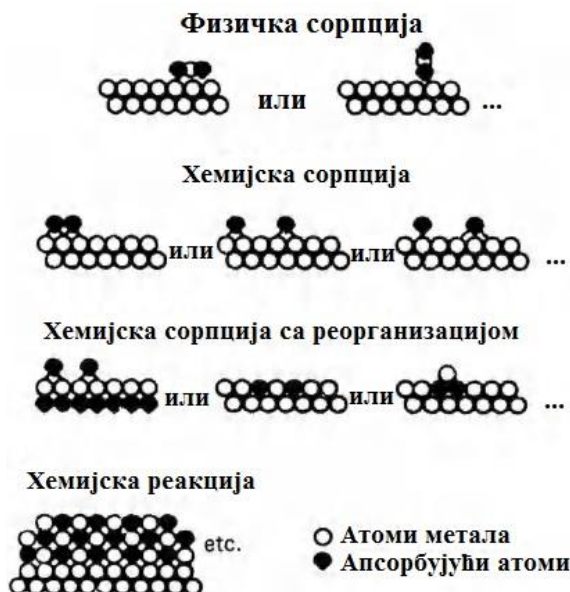
- количине рада или енергије која је употребљена у процесу деформације и
- природе материјала. Неки материјали су много више склони деформацијама и побољшању него остали.

Дебљина лако и тешко деформисаних слојева обично се креће од 1 до 10 и 10 до 100 μm . Својства деформисаних слојева могу бити потпуно другачија од побољшаних материјала. Исто тако, њихова механичка својства зависе од величине и дубине деформације површинских слојева.

2.2 Хемијски реагујући слој

Са изузетком неких племенитих метала (као што су злато и платина), сви метали и легуре реагују са кисеоником из ваздуха и образују оксидни слој. Међутим, у другим срединама, они формирају друге слојеве (нитриде, сулфиде, и хлориде). На пример, силицијум изложен ваздуху лако формира слој силицијум-диоксида. У случају оксида, на пример, алуминијум-оксид, кисеоник је интегрални део структуре, па се оксидни слој не очекује. Полимери обично не формирају оксидни слој. Интеракција површина са гасовима, престаје са формирањем неког апсорбованог слоја, приказано на слици 4.

Ако је машински елемент изложен континуираном излагању површине, интеракција са спољашњом средином доводи до формирања веће дебљине филма. Дебљина оксида и других хемијски реактивних слојева зависи од реактивности материјала на спољашњу средину, реакционе температуре, и времена реакције. Типичне дебљине ових слојева у распону су од 10 до 100 nm , мада се могу формирати много дебљи слојеви. Оксидни слојеви се такође могу произвести у току обраде или процеса трења [1].



Слика4. Схематски дијаграми физичке сорпције, хемијске сорпције и хемијске реакције

Ослобођена топлота у току процеса трења, убрзава процес оксидације и доводи до неколико типова оксида. Током процеса трења, због повећања температуре, хемијска реакција са околином је убрзана. Када метални фриксиони пар ради у ваздуху, реакција се може одвијати између оксидних слојева две површине. Присуство мазива и адитива узрокује формирање чврстих реакционих слојева који су важни у површинској заштити.

2.3 Физички апсорбујући слој

Поред хемијски реактивног слоја који се формира на металима у реактивним срединама, апсорбујући слојеви се могу формирати из спољашње средине како на металним, тако и на неметалним површинама. Најчешћи саставни део апсорбујућих слојева су молекули водене паре, кисеоника или угљоводоника из ваздуха који се могу кондензовати и бити физички апсорбовани на чврсту површину. Овај слој може бити и до 0,3 nm дебљине [1].

Код физичке сорпције, нема одвијања размене електрона између молекула апсорбујућих и оних апсорбованих. Процес физичке сорпције обично подразумева Ван Дер Валсову везу, која је релативно слаба у поређењу са везама које делују у инертним гасовима. Потребно је веома мало енергије (1 до 2 kcal/mol) да уклони физичку апсорпцију из чврсте површине, а све површине у високом вакууму су ослобођене физичке апсорпције.

Повремено ће бити масног или уљаног филм, који може делимично истиснути апсорбовани слој из окружења. Ови филмови средстава за подмазивање могу бити добијени из различитих извора, као што су капи уља, које се могу наћи у већини индустријских окружења или мазива која су примењена током припрема површина.

2.4 Хемијски апсорбујући слој

У хемијској апсорпцији, за разлику од физичке апсорпције, постоји стварно дељење електрона или размена електрона између хемијског слоја и чврсте површине. Чврста површина се веома снажно везује за апсорпциони слој преко ковалентне везе.

Када је једном површина покривена слојем, хемијска сорпција престане, свако накнадно формирање слоја би било физичка апсорпција или хемијска реакција.

Низ квалитативних критеријума је доступан за утврђивање разлике између две врсте апсорпције.

Први критеријум је вредност топлоте апсорпције. Познато је да су хемијске везе јаче од физичких, топлота хемијске сорпције ће бити већа од топлоте апсорпције. Типична физичка сорпција има вредности у распону од 1 до 2 kcal/mol али типичном хемијском апсорпцијом вредности се крећу од 10 до 100 kcal/mol ($1 \text{ kcal/mol} = 4,187 \text{ kJ/mol} = 0,1114 \text{ eV/atom}$).

Други критеријум за разликовање два типа апсорпције је температурни опсег у коме се процес може одвијати. За разлику од физичке апсорпције, хемијска апсорпција може се одвијати на температурама знатно вишим од тачке кључања апсорпције. Ако се апсорпција одвија на одређеној температури и притиску (p) на којем је притисак засићене паре $p = p_0$, онда се обично не дешава физичка апсорпција док однос p/p_0 не достигне вредност 0,01. Овај критеријум не може се сматрати апсолутним како за неке активне апсорпције, посебно оне са фином порозном структуром.

За већи степен хемијске сорпције, потребна је одређена активациона енергија. Ово може бити због постојања прага температуре испод којег хемијска сорпција не почиње.

Како физичкој сорпцији није потребна енергија, одржаће се у одређеној стопи било које температуре, наиме, све док апсорпција не дође до чврсте површине. Исто тако, хемијска сорпција, за разлику од физичке, зависи од чистоће апсорбујуће површине. Напротив, физичка сорпција одвија се на свим површинама. Још једна разлика између ове две врсте апсорпције је дебљина апсорбованог слоја [1].

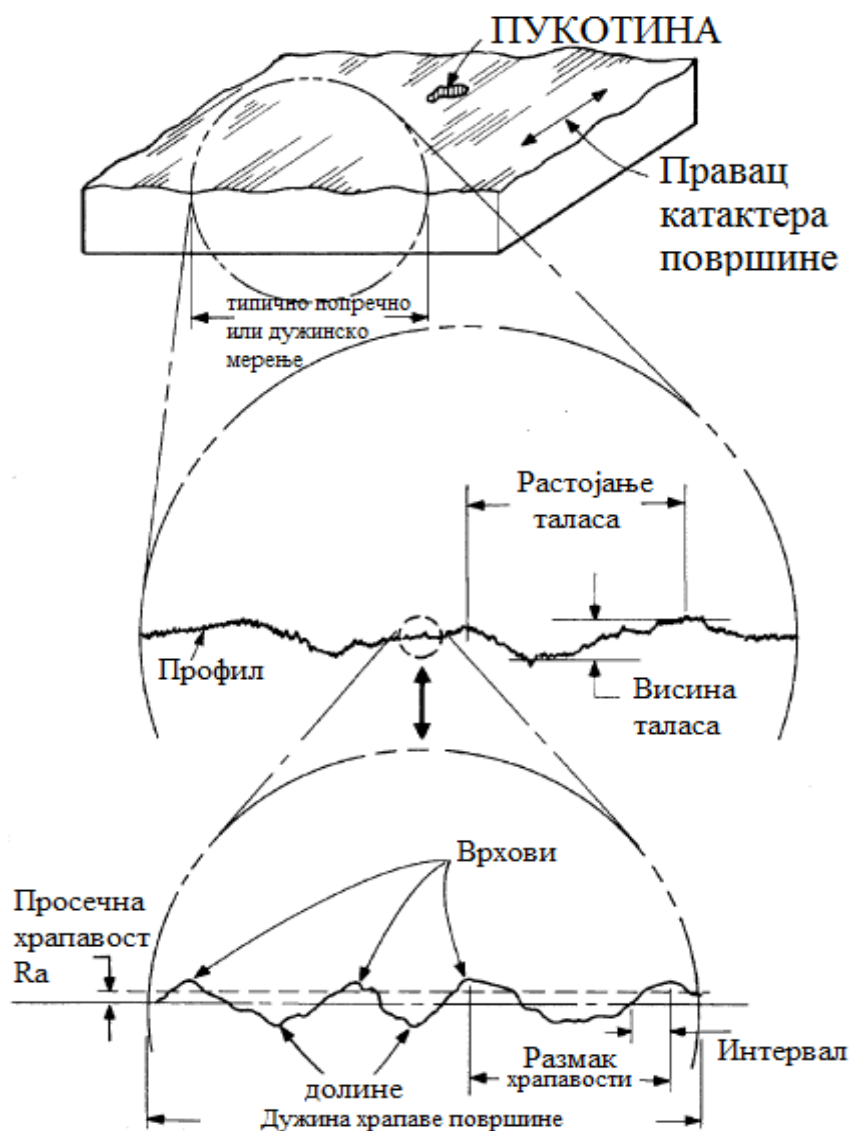
2.5 Анализа храпавости подлоге

Површинска текстура је поновљиво или случајно одступање од номиналне површине која формира тродимензионалну топографију површине [1].

Површинска текстура укључује:

- храпавост (нано и микро храпавост),
- таласање (макро храпавост),
- карактеристике и
- грешке.

Слика 5. даје приказ текстури површине са једносмерном карактеристиком.



Слика 5. Приказ текстури површине

Нано и микро храпавости се формирају осцилацијама на површини кратких таласних дужина. Карактеришу се брдима (локални максимум) и долинама (локални минимум) од различитих амплитуда и размака, који су већи у односу на молекуларне димензије. Оштрина врхова у профилу (две димензије) и врхова на мапи површине (три димензије).

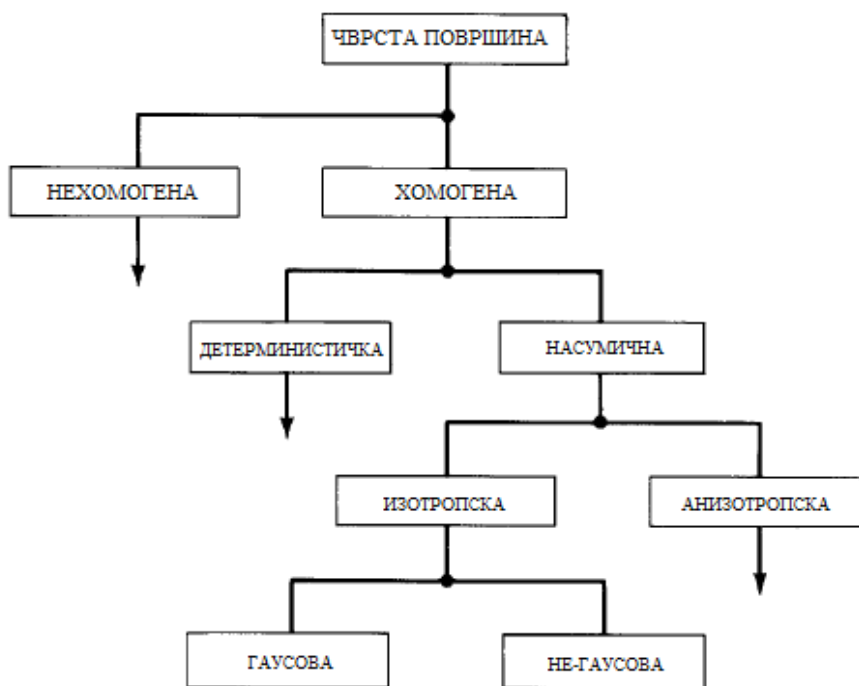
Нано и микро храпавост укључују оне функције својствене процесу производње. Таласање површина је неправилност дужих таласних дужина и назива се макро храпавост.

Таласање може проузроковати неколико фактора:

- машина,
- вибрације,
- термичка обраде или
- напрезање.

Таласање укључује све неправилности чији је распон већи од дужине храпавости узорка и мањи од дужине таласања узорка.

Општи типови чврсте површине дати су на слици 6. Површинске текстуре могу су детерминистички проучавати, аналитичким и емпиријским методама, њихово детаљно описивање је једноставно [1].



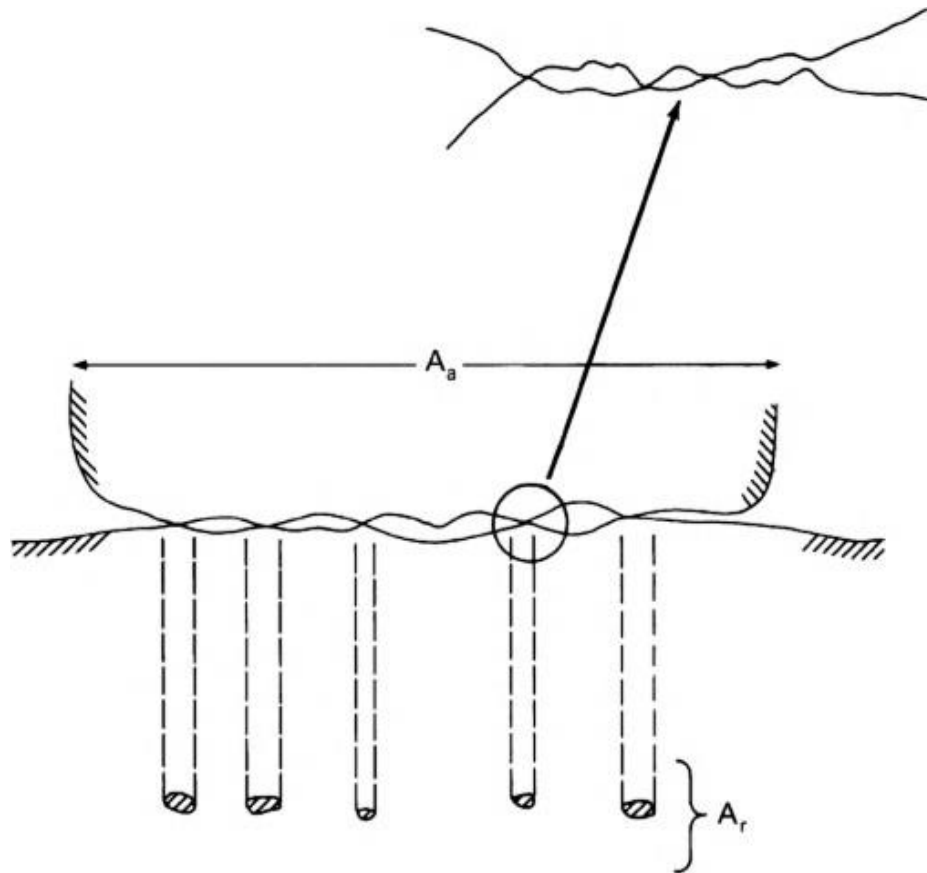
Слика 6. Општи типови површина

Међутим, текстуре већине површина су случајне, или изотропски или анизотропски, и било Гаусове или не-Гаусове. Да ли је површинска расподела изотропска или анизотропска и Гаусова или не-Гаусова зависи од природе метода обраде.

Процеси у једној тачки (као што је укључивање и обликовање) и екстремна вредност процеса (при брушењу и глодању) генерално доводи до анизотропске и не-Гаусове површине. Гаусова (нормална) расподела је постала један од главних стубова класификације површина [1].

3. ХАБАЊЕ

Када су две номинално равне површине у контакту, храпавост површина изазива контакт који се јавља у појединим тачкама, као што је приказано на слици 7. Сума свих области контактних тачака, представља стварну површину контакта. За већину материјала са применом оптерећења, то ће бити само мали део привидне (номиналне) површине контакта (десиће се само, ако је површина била савршено глатка).



Слика 7. Схематски приказ међупростора, показује очигледне и стварне области контакта типична величина неког контакта је од субмикронског до неколико μm

Права површина контакта је функција површинске текстуре, особина материјала и међуповршинских услова оптерећења. Храпавост површине узрокује атхезионе контакте изазване међуатомским интеракцијама. Када се две површине крећу једна у односу на другу, сила трења доприноси атхезији и ових и других извора површинских интеракција. Поновне површинске интеракције, резултирају хабању честица. Мање стварно подручје контакта резултује мањи степен интеракције, заснива се генерално на нижим вредностима хабања.

Проблем у вези хабања површина и својства материјала генерално подразумева одређивање стварне површине контакта. Дакле, разумевање трења и хабања захтева разумевање механике контакта чврстих тела.

Током контакта две површине, контакт се у почетку јавља само у неколико тачака где се јавља нормално оптерећење (сила). Како се повећава нормално оптерећење, услед међусобне интеракције површина у контакту, контакт јача и може поднети веће оптерећење.

Деформација се јавља у зони контакта, где се супротставља оптерећењу.

Врсте површинских деформација могу бити:

- еластичне,
- пластичне,
- вискоеластичне или
- вископластичне,

а зависи од номинално нормалног и смицајног напона, храпавости површине и својстава материјала.

Локални напон на контактним местима је много већи од номиналног напона. Иако номинални напон може бити у опсегу еластичности, локални напони могу прећи границу еластичности и контакт ће довести до границе пластичности, у контакту две чврсте површине, велике храпавости, различитих облика и димензија које су у међусобном контакту. Типови површинске храпавости чврстих тела се понекад сматрају сферно обликованим, тако да се контакт два макроскопска тела може свести на проучавање низа сферних контактних деформација врхова [1].

Хабање је оштећење површине или уклањање материјала са једне или обе површине два чврста тела услед клизања, котрљања, или комбинованог кретања. У већини случајева, хабање настаје услед површинске интеракције у зони додира.

Оштећењима услед хабања претходи стварни губитак материјала. Дефиниција хабања се углавном заснива на губитку материјала, али треба нагласити да процес настао услед међусобног премештања материјала (видљиво микроскопски), без промене нето тежине или запремине. Хабање може бити добро или лоше.

Примери продуктивног хабања су:

- писање оловком,
- машинска обрада и
- полирање, који захтевају контролисано хабање.

Хабање је непожељно у скоро свим деловима машина, а то су:

- лежајеви,
- зупчаници,
- осовине и
- вратила итд.

У неким случајевима замена елемената изложених хабању потребна је након релативно мале количине материјала која је уклоњена са површине. У добро осмишљеним триболошким системима, уклањање материјала је веома спор процес, али је стабилан и континуиран.

Последице хабања, посебно у деловима система где су растојања мала у односу на похабане величине честица, могу бити већи проблем од стварне величине хабања.

Зупчасти преносници снаге су карактеристични по погледу њиховог отказа у току рада, тада долази до промене радних карактеристика зупчаника, отказа зубаца, што доводи до отказа читавог система или неког од делова система чији је зупчаник део. Тежи се томе да се процес настанка успори и спречи.

Многе неправилности у току експлоатације доводе до оштећења зупчаника, до његовог лома, а при томе делују паралелно [2].

У току експлоатације зупчаника хабање настаје услед:

- неадекватног подмазивања,
- одступања геометрије зубаца зупчастог пара,
- нехомогености у материјалу настале током израде,
- неадекватне термичке обраде и
- ударних оптерећења, која прелазе дозвољене вредности које су дате прорачуном.

У зависности од врсте оптерећења и радних услова зупчаника, поред двадесет различитих типова оштећења према стандардима и испитивањима сведено је на свега неколико најважнијих [1].

Основни типови оштећења зубаца зупчаника су:

- површинска оштећења,
- заривавање,
- трајне деформације,
- површинска оштећења услед замора материјала,
- прслине и
- лом.

Хабање код зупчастих преносника настаје механичким и/или хемијским средствима услед трења, прегревања (или термо средстава). Хабање обухвата неколико група, сасвим различитих феномена који имају само једну заједничку ствар, уклањање чврстог материјала услед клизања површина [1].

Услед клизања површина у контакту могу се јавити различити облици хабања као што су:

- атхезионо хабање,
- абразивно хабање,
- хабање услед замора материјала,
- утицај ерозије и удара,
- хемијско хабање (корозија).

Ово нису различити механизми, већ комбинација атхезионе, корозионе и абразивне врсте хабања. Према неким проценама, две трећине глобалног хабања је у индустријским ситуацијама, јер се дешава услед атхезионог и абразивног механизма хабања. Хабање у свим облицима набројаних механизма, изузев заморног механизма, настаје постепеним уклањањем материјала.

Од поменутих механизма хабања, један или више могу се срести одједном. У многим случајевима, хабања се иницира услед једног механизма и може довести до других механизма.

3.1 Атхезионо хабање

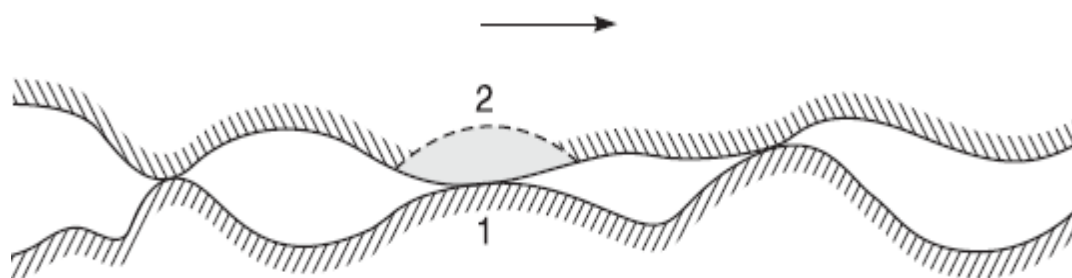
Атхезионо хабање се јавља када два номинално равна чврста тела (зупци зупчаника) долазе у контакт услед клизања, подмазана или не. Атхезија (или везивање) се јавља на површинама контакта зубаца зупчаника, и ти контакти доводе до смицања, што резултује одвајањем материјала са једне површине и његовог везивања за другу површину.

Хабање услед атхезије и одвајања материјала зупца јасно се види на слици 8 [2].



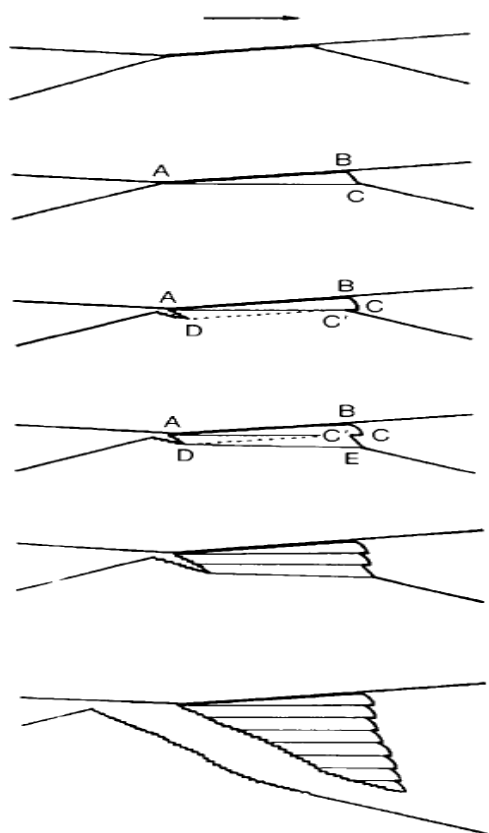
Слика 8. Атхезионо хабање зупчаника

Неколико механизма је предложено за описивање одвајања материјала са површина. У раној теорији хабања услед клизања, предложено је да се може десити смицање у зони додира или у најслабијем региону једног од два тела у контакту (слика 9). У већини случајева се очекује да међу просторна атхезија буде мања у поређењу са снагом кидања околних локалних региона, тако да се пауза током смицања јавља у зони додира (путања 1) у већини контаката и без хабања се јавља се у том клизном циклусу. У малом делу контакта, пауза се може јавити у било ком од два тела (путања 2) и мали део (осенчена област на слици 9) може се везати за другу површину.



Слика 9. Схема показује две могућности прекида (1 и 2) током смицања

Прелазни материјал је неправилно и коцкасто обликован. У другом механизму, пластичног смицања неколико узастопних слојева у виду оштрина контакта резултира одвајањем похабаног материјала. Према овој теорији, пластично смицање више узастопних слојева засновано на принципу клизања дуж линије области, јавља се облику пукотине, дуж које се материјал одваја (слика 10).



Слика 10. Схема приказује одвајање материјала услед смицања узастопних слојева једне неравнине контакта

Као резултат претходно описаног процеса добија се честица материјала танког клинастог облика. Материјал је одвојен од једне површине и прелази на другу површину услед атхезије. Даље клизање изазива хабање више честица материјала услед овог механизма. Честице материјала остају на површини, услед преласка са једне на другу површину. Честице могу бити једнаке величине у свакој димензији.

Иако пријањање похабаних честица материјала чини јаку везу између површина, стваран губитак материјала дефинише слаба веза. Губитак честица материјала често резултира услед хемијских промена. Велика површина похабаног материјала има тенденцију да лако оксидира, а то смањује снагу атхезије и она исчезава.

Други механизам одговоран за хабање честица укључује преосталу еластичну енергију честица материјала. Када дође између две површине, честица материјала је оштећена у великој мери. Како се друге површине померају, само заостали напони остају еластични. Ако је еластична енергија већа од енергије атхезије, честице се дефинишу као честице хабања.

У комбинацијама различитих материјала, формиране су похабане честице оба материјала, иако се формирају прво честице мекшег материјала, које су веће у односу на честице чвршћег материјала. Због дефеката и пукотина у оквиру чвршћег материјала, постоје локални региони мале снаге. Ако се локални региони мале снаге чвршћег материјала поклапају са локалним регионима веће снаге мекшег материјала у контакту, формирају се честице чвршћег материјала. До формирања честица чвршћег материјала може такође доћи услед одвајања материјала пренешеног атхезијом. Исто тако и услед замора материјала као последица бројних циклуса прелазака честица материјала са једне на другу површину.

Прелазак материјала са једне површине на другу је проучавало неколико научника. У раним 1950-им годинама, ауторадиографском методом коришћен је један радиоактиван материјал који је клизао и преносио радиоактивни материјал на наспрамне површине. Током клизања, приказан је прелазак честица материјала, постављањем фотографског филма у контакт две површине током међусобног контакта, а касније развијањем истог филма се добијала ауторадиографија похабаних честица. Црна утиснућа у развијеном филму представљала су те честице.

Електронским микроскопом (СЕМ) снимак приказује површину вратила од нерђајућег челика после хабања услед атхезије, услед клизања у лежишту од нерђајућег челика, где су лежајеви изложени неподмазаним условима као што је приказано на слици 11. Докази о атхезији и пукотинама могу се јасно видети, током клизања, где је површинска храпавост под утицајем пластичне деформације. Испод површине такође долази до пластичне деформације и великог напрезања. СЕМ микрографија попречног пресека површине вратила под дејством атхезионог хабања показује видљиве пластичне деформације са 25 μm дебелим слојем.

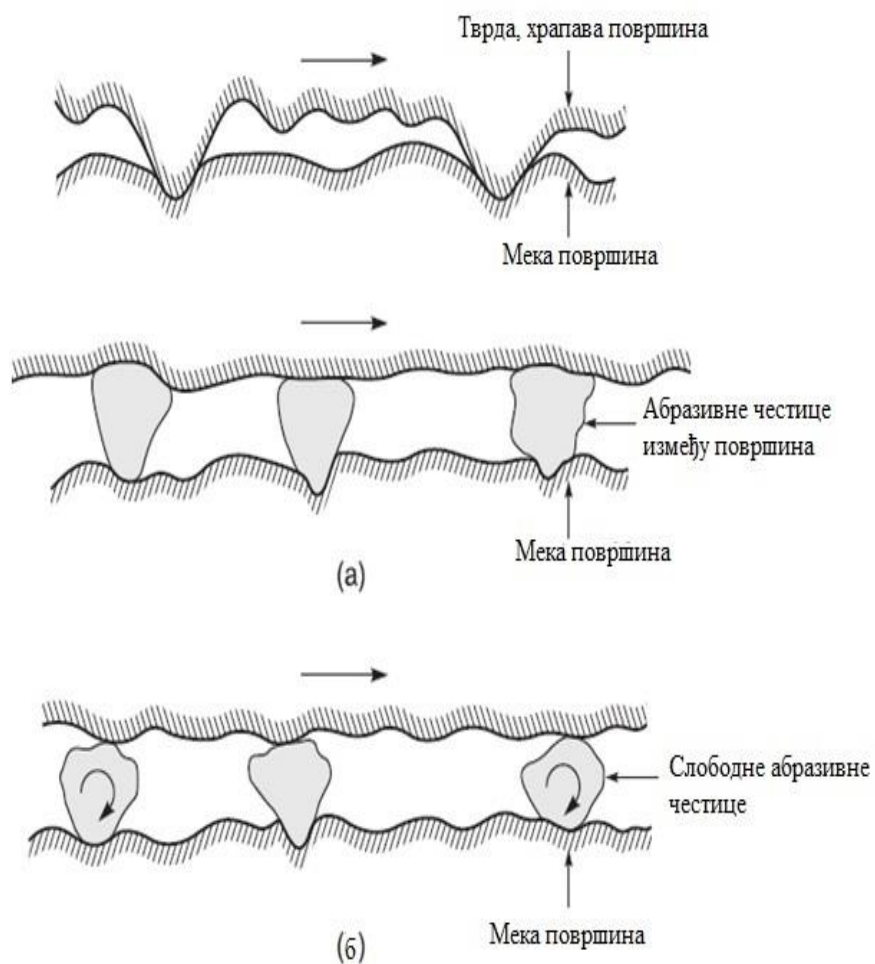


Слика 11. СЕМ микрографија површине вратила од нерђајућег челика након атхезионог хабања у условима неподмазивања, клизни правац је дуж вертикалне осе

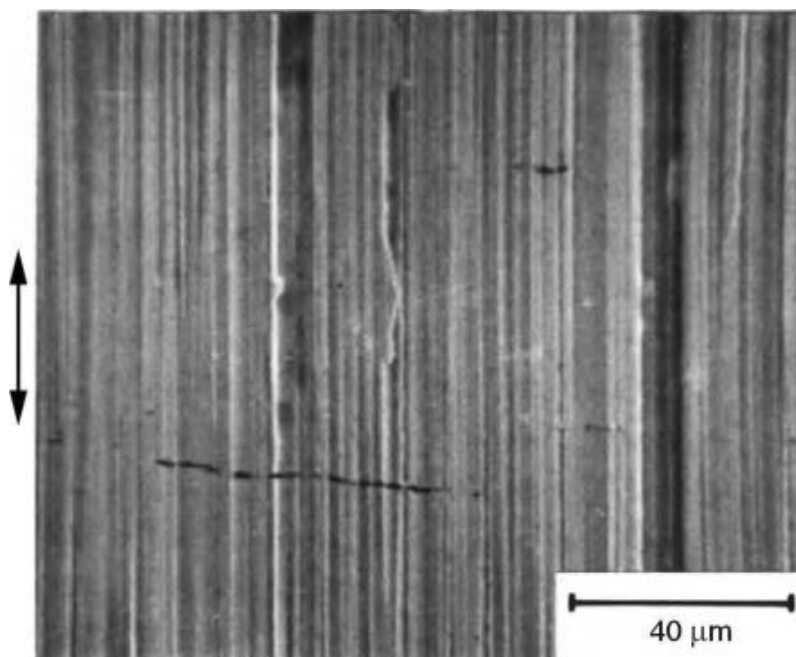
3.2 Абразивно хабање

Абразивно хабање се јавља када храпавост грубе, чврсте површине или чврстих честица које клизају на мекшој површини оштећују зону додира услед пластичне деформације. Постоје две опште ситуације за абразивно хабање (слика 12). У првом случају, једна површина је тврђа у клизању две површине (хабање два тела), на пример, при механичким операцијама, као што су брушење, сечење итд. У другом случају, тврдих површина где је треће тело, генерално мала абразивна честица, између две површине довољно тврда, да је у стању да похаба једну или обе површине (хабање три тела). У многим случајевима, механизам хабања на почетку је атхезија, која генерише хабање честица које се налазе између површина, што резултира хабање три тела абразивним хабањем.

У већини ситуација абразивног хабања, скрецинг (у преводу гребање, углавном мекших површина) се посматра као серија жлебова паралелних правцу клизања. Испитивања електронском микрографијом површине материјала од нерђајућег челика, након абразивног хабања у присуству алуминијумских честица у условима не подмазивања приказано је на слици 13. Скрецинг у правцу клизања може се јасно видети, СЕМ испитивањем пресека узрокованог абразивним хабањем. Потповршинска пластична деформација, али не ни приближна оној услед атхезионог хабања. Остали облици абразивног хабања су учестали гребањем, скорингом или удубљеним скорингом, зависно од степена тежине.



Слика 12. а) Груба, чврста површина или површина са абразивним честицама које услед клизања прелазе на мекше површине и б) Слободне абразивне честице између површина са једном од површина мекшиом од саме абразивне честице



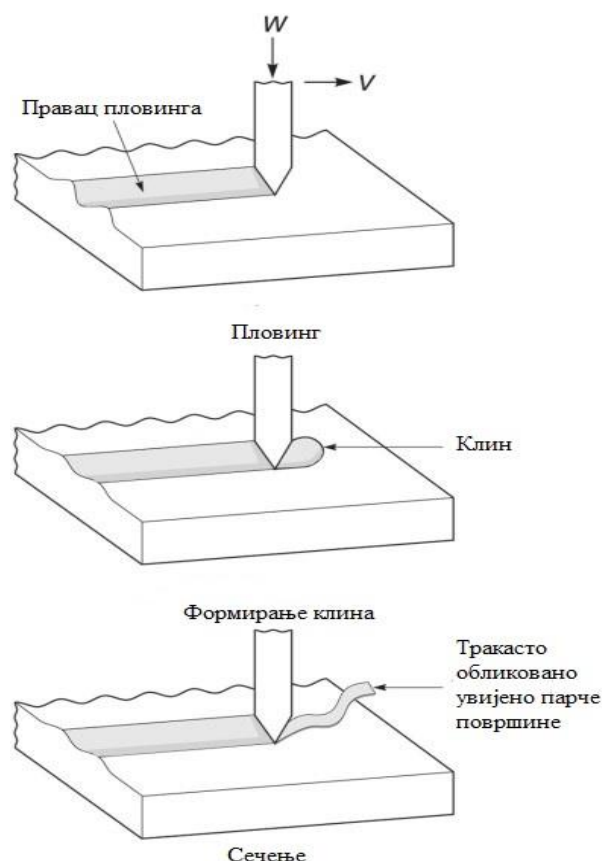
Слика 13. СЕМ микрографија површине вратила од нерђајућег челика, након абразивног хабања у условима без подмазивања, клизни правац је дуж вертикалне осе

3.3 Абразивно хабање услед пластичне деформације

Уклањање материјала са површина услед пластичне деформације током хабања може да се јави од стране неколико деформацијских режима који укључују пловинг, односно формирање честица материјала у облику клина (слика 14). Пловинг се манифестује у низу жлебова као резултат пластичне деформације мекшег материјала. У том процесу (такође названим гребена формација), материјал се дислоцира из жлеба (слика 14 а)). Међутим, након неколико процеса пловинга на површини, скидање материјала може се десити услед ниског циклуса механизма замора. Када се јави пловинг, жлебови се јављају дуж страница пловинга без обзира на то да ли се формирају честице хабања или не. Ови жлебови постају спљоштени, или напреди након поновљеног процеса преласка и враћања честица. Пловинг такође изазива потповршинску пластичну деформацију и може допринети нуклеацији површина и њиховој површинској пукотини. Даљи прелазак и повратак честица узрокује ове пукотине и већ постојеће прелине и на крају на површини долази до танког хабања површина [1].

Генерално се јавља однос смицања површина у односу на релативну висину у расутом стању. У овој ситуацији, само су неки од материјала измештени из жлеба, а преостали материјал формира се у облик клина (слика 14 б)). У овом облику абразивног хабања, формира се абразивни врх са великим углом „клина“ у односу на жлеб и уклања материјал у виду дисконтинуалних трака у облику сличном онима који се производе у операцији резања метала (слика 14 ц)). Овај процес резултира генерално значајним

уклањањем материјала и премештањем материјала у односу на величину жлеба, који је веома мали.



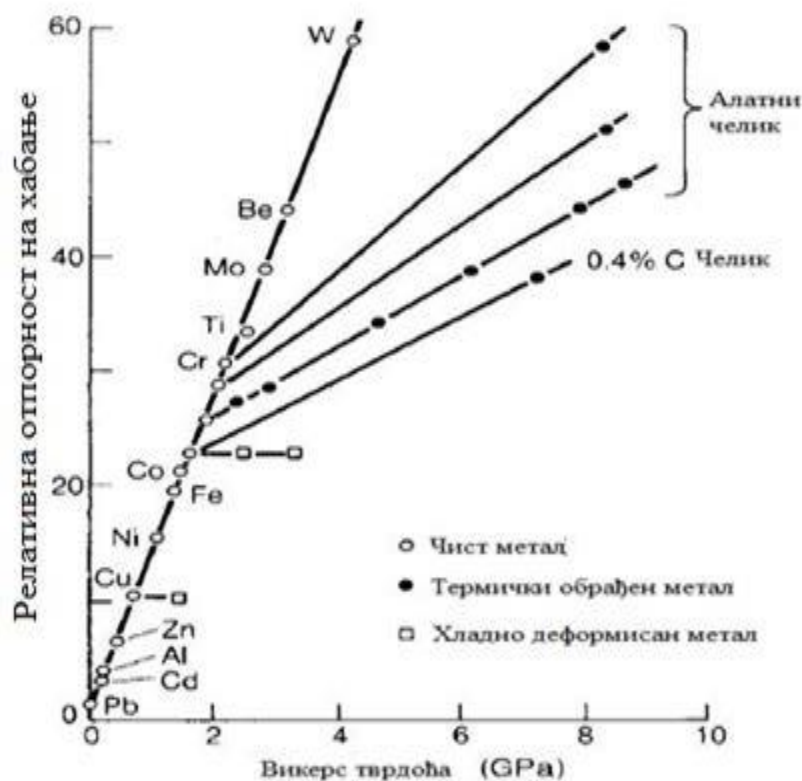
Слика 14. Схема абразивног процеса хабања као последица пластичне деформације површине

Постоје значајни експериментални докази да је стопа хабања два тела услед абразије, генерално обрнуто пропорционална тврдоћи и пропорционална нормалном оптерећењу и брзини клизања за многе чисте метале. Легуре често испољавају сложенија понашања. Тврдоћа је важан параметар за абразивну отпорност на хабање.

Хабање (пропорционално $1/\text{стопа хабања}$) од прекаљених чистих метала генерално директно пропорционална њиховој тврдоћи, али је више комплексна за легуре (слика 15).

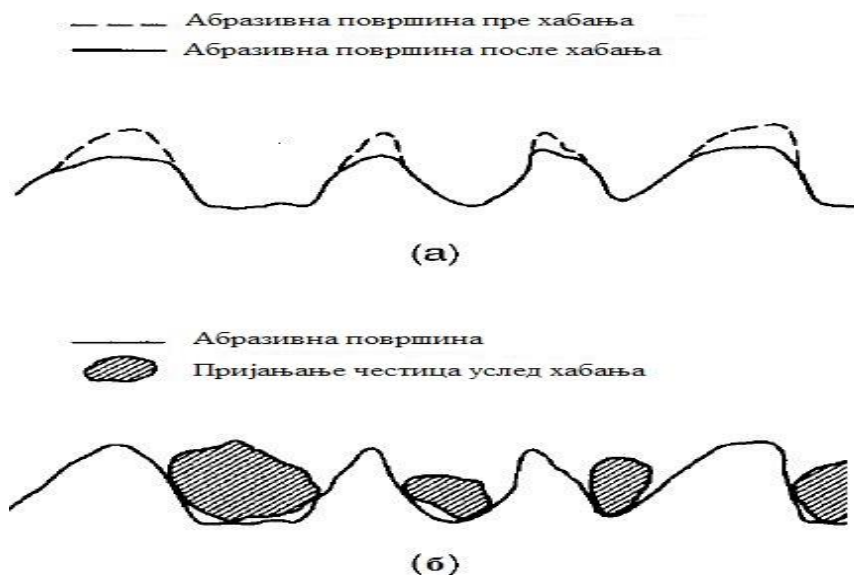
Претходно радно каљење чистог метала и легура имало је ефекта на интензитет хабања. Хладно деформисан угљенични челик за 0,4% резултирао је значајним повећањем запреминске тврдоће али није имао никаквог ефекта на његову отпорност на хабање. Ови и други експерименти показују да деформација површина метала постаје пластична током абразије, достиже максималну вредност. Ова вредност тврдоће је итекако важна за отпорност на хабање. Такође, треба имати на уму да ако материјал очврсне, генерално постаје крт.

Крти материјали могу да произведу веће честице, што резултира високим интензитетом хабања.



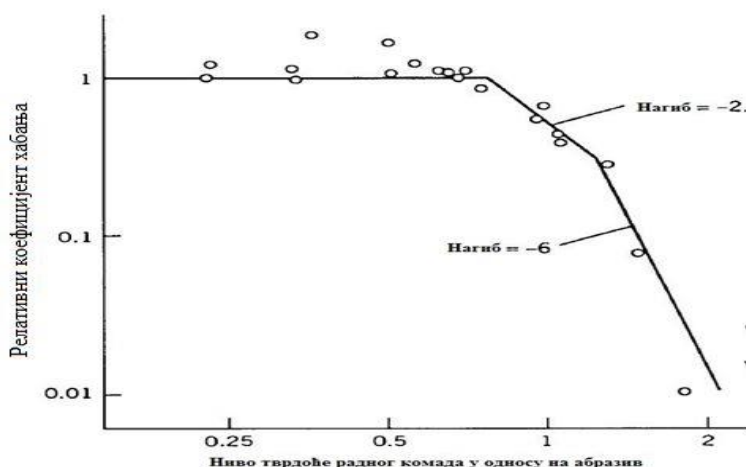
Слика 15. Релативна отпорност на хабање чистих метала, термички обрађеног и хладно деформисаног челика као функција тврдоће у абразији два тела

Интензитет хабања генерално се повећава линеарно са повећањем примењеног нормалног оптерећења, често се линеарна веза не одржава на великим оптерећењима (слика 16). Поред тога, затварањем абразивне површине, долази до брушења површина током процеса хабања. Ако би у било ком степену, остаци хабања били већи од абразивних честица, исти би били измештени са површина, изнад нивоа абразивних честица и не би било додатног хабања [1].



Слика 16. а) Абразивна површина пре и после хабања, и б) Абразивна површина након пријањања честица услед хабања

У хабању два и три тела током абразије, уколико је медиј брушења мекши од површине, коефицијент хабања не остаје константан. Познато је да је тврдоћа површине у односу на абразивне честице мања од уобичајене, а коефицијент хабања остаје приближно константан, међутим, ако је однос једнак или већи од уобичајеног, коефицијент хабања брзо опада са повећањем односа тврдоће (слика 17). Када је тврдоћа површине истог реда величине као тврдоћа абразивних честица, хабање површине има спорији процес, јер се деформација јавља како у абразивним честицама, тако и у самој површини и хабање се углавном јавља у оба [1].



Слика 17. Релативни абразивни коефицијентом хабања материјала, покривен низом тврдоћа, као функција количника тврдоће површине и абразивне тврдоће

3.4 Оштећења зубаца зупчаника

Зупци зупчаника се разарају тако да влада њихова деградација, веома ретко оштећење је изазвано ломом венца зупчаника. Неке опште врсте оштећења зуба зупчаника су приказане у овом поглављу.

Лом зубаца може бити изазван тренутним преоптерећењем када неко оптерећење утиче на зупчаник, приказано на слици 19 а). Углавном, оштећење зубаца је заморног карактера (слика 19 б). Иницијална заморна пукотина је оријентисана под правим углом, повезује се са површином и постепено мења правац према супротној страни истог зуба. Носивост зубаца који нису површински отворднути (каљењем, нитрирањем, цементацијом) је обично ограничена контактном чврстоћом радних површина зупчаника. У нормалним условима експлоатације, лом ових зуба може бити последица неједнаке расподеле оптерећења дуж правца зупца (слика 19 в)) или последица тешког хабања које може смањити попречни пресек зуба (слика 19 е)).

Код површински отворднутих зубаца (нитрирањем, цементацијом), носивост радних површина зупчаника се повећава три до пет пута, док се напон савијања повећава у распону од 1,5 до само 2 пута. Према томе, у површински отворднутим зупчаницима, степен сигурности бокова од оштећења зуба је релативно мали (у поређењу са неотворднутим зупчаницима), и ова оштећења се чешће јављају.

Неотворднути зупци су мање осетљиви на неравномерну расподелу оптерећења.

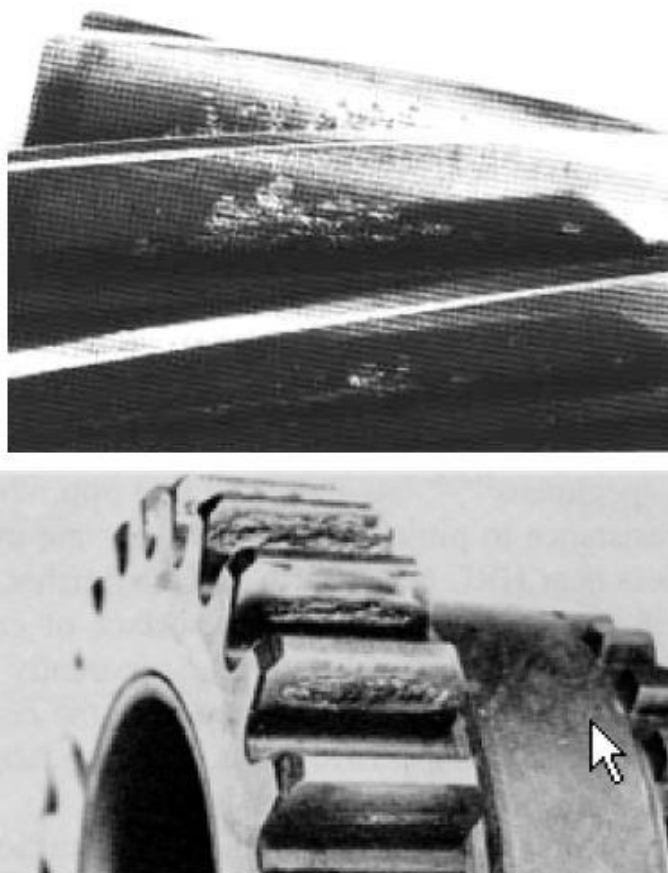
Површински отворднути зупци су отпорнији на хабање. Њихов веома мали степен сигурности бокова зубаца против оштећења доводи до велике осетљивости на коса оптерећења.

Хабање услед кидања опиљака приказаних на слици 19 г), јавља се код површински отворднутих зуба. Ова грешка може бити изазвана крутошћу отворднутих слојева, додирним оптерећењем које делује у области врха зуба, или са могућношћу прегревања или чак микропрслинама услед брушења. Хабање услед кидања опиљака може бити спречено модификацијом профила врха зупца, заобљавањем оштрих ивица, и спречевањем грешака, које настају услед брушења.

Врсте оштећења радних површина зупца могу бити услед:

- питинга,
- скоринга,
- пластичне деформације и других.

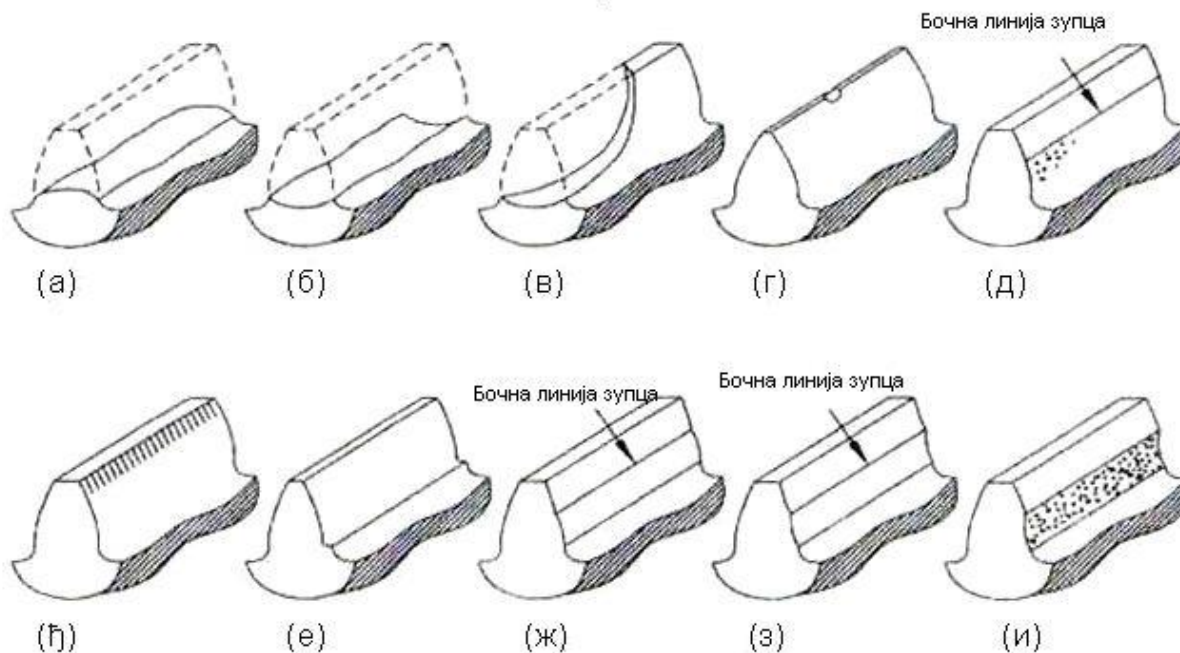
Питинг је најчешћа врста оштећења радних површина, а да није хабање услед абразије. Питинг је специфично заморно оштећење површинског слоја као последица цикличног променљивог контактнoг оптерећења. Препознатљив је по заобљеним јамицама са тамним дном, без металног сјаја, које су настале одвајањем љуспица (материјала) од метала. Обично се јамике појављују на боку ноге зупца (испод бочне линије зупца) (слика 18) [2].



Слика 18. Питинг бока зупца, почетни (горе) и прогресивни (доле)

Једна од битних врста оштећења површина је скоринг (хабање са заједањем). Скоринг се јавља као исход већег оптерећења, микронеравнине пробијају слој уља, настаје контакт метала о метал, долази до заваривања микронеравнина и затим до њиховог кидања. Ово оштећење је лагано гребање (слика 19 ђ)), које се обично јавља у области где има више клизања, у близини врха или подножја зуба. Правац гребања се подудара са смером клизања, дуж зуба. Тежак скоринг може да покрије целу радну површину на зупцима и заваривања и да чак доведе до кидања већих делова површине. Услед овог оштећења зупчаници могу да постану потпуно неупотребљиви.

Хабање зубаца се чешће јавља код зупчаника који су недовољно подмазани или нису заштићени од контанимације. Слика 19 е) приказује јако хабање зуба. Тако прекомерно хабање се дешава код спороходних, слабо подмазиваних зупчаника направљених од меког челика. Ови зупчаници имају велики степен сигурности подножја зупца, па се обично дозвољава њихов прекомерни рад [3].



Слика 19. Оштећења зубаца зупчаника

Питинг приказан на слици 13 д) изазван је неједнаком расподелом оптерећења дуж бочне линије зупца. После одређеног локалног оптерећења и његове прерасподеле, даље ширење питинга је вероватно заустављено. Али ако зупчаник није димензионисан како треба (мањих је димензија од потребних), питинг коначно прекрива целу површину ноге зупца, и тада се може појавити и на глави зупца.

Средњи локални питинг не смањује функционалност зупчаника. А похабани делићи метала прљају уље, и оно треба да буде филтрирано или очишћено на било који начин (на пример, магнетном сондом).

Величина јамица (кратера) на неотврднутим површинама може бити од 0,5 до 5 mm у пречнику, па чак и више. На површински отврднутим зупцима, почетни питинг може да се појави у виду малих пора видљивих само микроскопски. Касније током експлоатације се шире и постају видљиве голим оком.

Главна функција мазива ја да формира уљни филм између зубаца у додиру. Када је уље веће вискозности теже је утиснути у контактну површину и према томе, дебљи уљни слој доприноси мањем оштећењу површине зубаца. Дебљи слој уља обезбеђује влажнији додир приликом монтирања зупчаника а вибрације зупчаника су минимизоване, на тај начин се смањује ниво буке зупчастих парова у раду. Према томе, најчешће се користе зупчаници који раде са малим и средњим брзинама и зупчаници који користе уља велике вискозности.

Када су радне површине зупца мало или средње отврднуте, може се приметити притисак дуж бочне линије зупца гоњеног зупчаника (слика 13 ж)) и оштећења у овој области код погонског зупчаника приказане су на слици 13 з).

Оштећење радних површина зуба обично је мање опасно од запреминског лома зупца осим када је оштећен већи део површине. У осталим случајевима, ово оштећење је зависно од времена, може се очекивати ширење оштећења одређене величине тако да ће се спречити скорије оштећење зупчаника.

У пракси, вема често, локални питинг или осредњи скоринг могу да буду изазвани неједнаком расподелом оптерећења у почетном стадијуму, а касније, током експлоатације површине могу да се поравнају.

Ипак прогресиван питинг може да прекрије већину површине бока зупца што може да изазове велике промене у облику зупца. Бок ноге зупца може постати конкаван (слика 13 и)), и отпорност зуба на савијање може да се смањи.

4. ПОДМАЗИВАЊЕ ЗУПЧАСТИХ ПРЕНОСНИКА

Клизање чврстих површина, генерално карактерише висок коефицијент трења и тешко хабање због специфичних својстава површине, као што су ниске тврдоће, висока површинска енергија, реактивност и узајамна растворљивост. Чисте површине лако апсорбују честице страних супстанци, као што су органска једињења из окружења. Новоформиране површине генерално имају много мањи коефицијент трења и хабања него чисте површине. Присуство слоја страног материјала на површинама не сме учествовати током процеса клизања, стога, мазива се намерно примењују за нижи степен трења и хабања.

Подмазивање се примењује у:

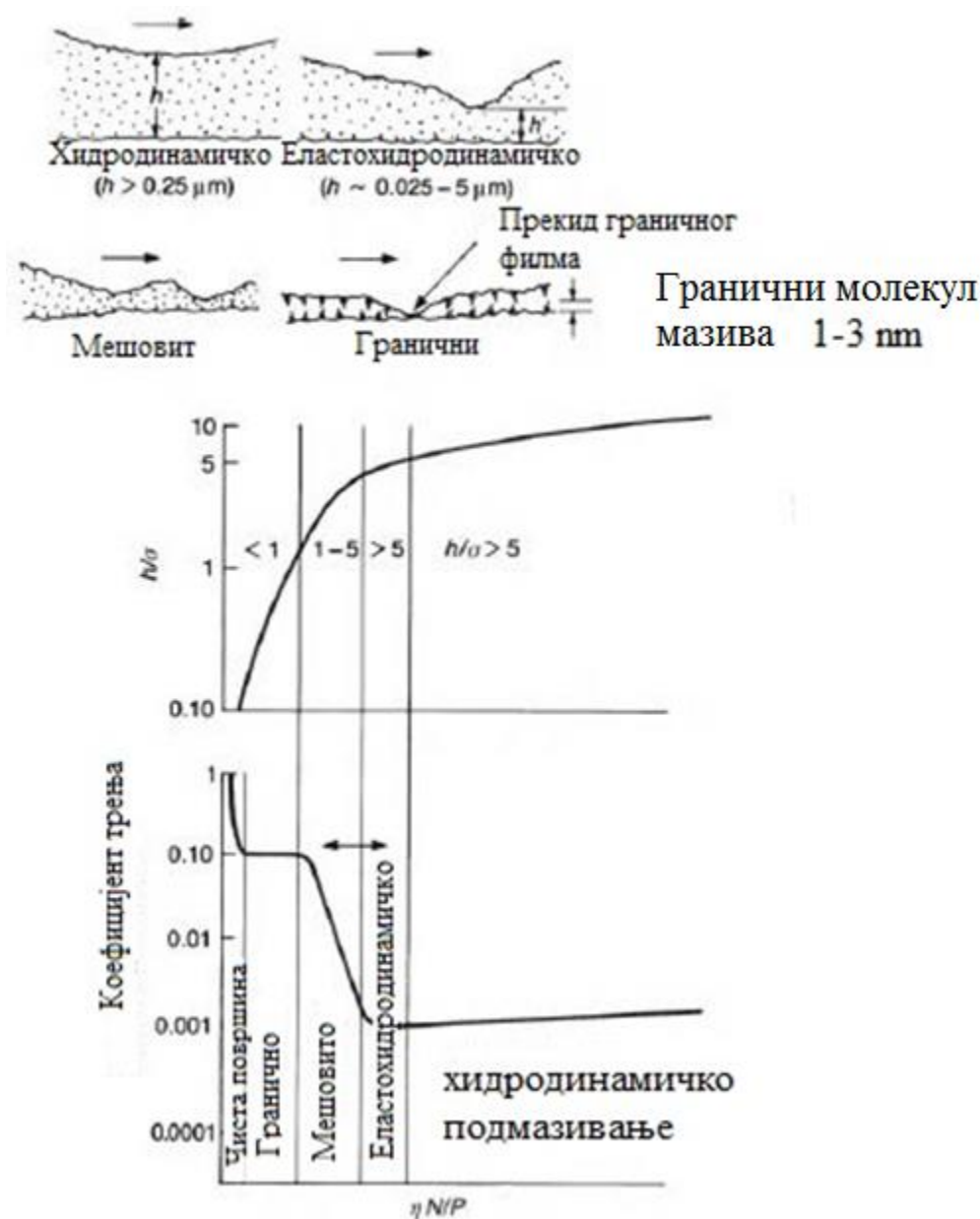
- чврстом и
- течном (течном или гасовитом) облику.

Чврсто мазиво је средство за подмазивање које се користи као прах или танак, чврсти филм на површини који пружа заштиту од оштећења током релативног кретања смањењем трења и хабања.

Чврста мазива се користе за апликације у којима се јавља било какав клизни контакт. На пример, лежај ради на великим оптерећењима и малим брзинама и хидродинамички подмазан лежај захтева Старт/Стоп операције. Термин чврстих мазива подразумева неколико врста мазива која обезбеђују добру отпорност на хабање. Користе се и у случају екстремних радних услова.

Танак филм мазива између површина у покрету, резултира релативно низак степен трења и хабања, у контакту две чврсте површине. Дебљи течни филм између две површине у релативном кретању спречава контакт две чврсте површине и може да пружи низак степен трења (у опсегу од 0,001-0,003) и занемарљиво хабање. Флуид може бити течан или гасовит, чак и дебљи слој ваздуха транспонованог између две покретне површине је метод доброг подмазивања. У овом поглављу, описани су различити режими течног подмазивања, дати су подаци и математичке анализе и њихова примена на подмазивању зупчаника.

Режим подмазивања, у коме се танак филм одржава између две површине са мало или без релативног кретања, зове се хидростатичко подмазивање. Сажетак режима подмазивања посматран без икаквог додатног подмазивања приказан је на слици 20 [1].



Слика 20. Параметар филма мазива (h / σ) и коефицијента трења у функцији $\eta N / P$ показује различите режиме подмазивања посматраног подмазивања без спољног упумпавања уља

Ова теза хипотетичког течног-подмазивања зупчаника представља коефицијент трења у функцији производа апсолутне вискозитета (η) и ротационе брзине у режиму по јединици силе (N) подељеног оптерећења по јединици површине зупчаника (P). Крива је минимум, који одмах указује да је више од једног елемента укључено у подмазивање. Режиме подмазивања понекад идентификује мазиво или параметар филма једнак h/σ - (значи дебљину слоја).

У техничким системима користе се различите врсте подмазивања, а то су:

- хидростатичко,
- хидродинамичко,
- еластохидродинамичко,
- мешовито и
- гранично подмазивање.

Код хидростатичког подмазивања неопходна моћ слоја мазива обезбеђује се тако што се мазиво доводи између површина у контакту под притиском оствареним помоћу посебног уређаја (хидростатичког система). То омогућава да се површине одрже потпуно раздвојеним. Овакав начин подмазивања је заступљен код клизних лежаја турбина, пумпи, машина алатки и код клизних вођица. При томе могу да се користе течна и гасовита мазива.

У случају хидродинамичког подмазивања притисак у слоју мазива настаје као природна последица релативног кретања тела одређене геометрије при одређеној брзини. Притисак се генерише у мазиву само при кретању посматраних елемената, док су при мировању њихове површине у директном додиру. И у овом случају користе се различите врсте течних и гасовитих мазива. Овај начин подмазивања има најзначајнију примену код радијалних и аксијалних клизних лежаја.

Високо специфично оптерећење јавља се између делова у кретању, као код котрљајних лежаја, зупчаника и брегастих механизма. Високо специфично оптерећење има два основна ефекта. Оно узрокује пораст вискозности мазива и мења геометрију додира, повећавајући додирну површину као резултат еластичних деформација површинских слојева спрегнутих површина. Моћ слоја мазива одређује еластична својства материјала и хидродинамичких ефеката, па се такав режим подмазивања назива еластохидродинамички.

Мешовито подмазивање је прелазак са хидродинамичког/еластохидродинамичког и граничног подмазивања на режим познат као мешовито подмазивање у коме функционишу два механизма подмазивања. Контакти, између незаштићених металних површина, могу довести до циклуса пријањања, атхезије метала, формирају се честице као последица хабања. Мешовити режим се такође понекад назива квази-хидродинамички, услед делимичне течности, или танког филма (типично 0,025-2,5 μm) подмазивања [1].

До граничног подмазивања долази у случају када се површине налегања, које на себи имају танки, али тврди гранични слој мазива, оксида, влаге или нечистоћа, додирују само у најистуренији тачкама површинских неравнина у којима је пробијен гранични слој. Својство мазива да створи гранични слој назива се мазивост. То је способност на коју утичу својства површине метала и молекуларна својства мазива. Минерална уља, као најчешће употребљивана мазива, имају својство стварања нарочито отпорног слоја. Посебан случај граничног подмазивања, са посебно високом вредношћу коефицијента (граничног) трења, јесте подмазивање при кретању и трење које настаје при сасвим малим брзинама и при којем се гранични слој пробија на великом броју места.

Трење које се јавља на површинама зубаца зупчаника при спрезању односно при кретању зупчаника, може се знатно ублажити подмазивањем. Улога мазива није само у ублажавању дејства трења као нежељене последице, већ и у обезбеђивању исправног

хлађења зупчаника. Хлађење се изводи обилним довођењем мазива (најчешће уља) у зони подмазивања.

Подмазивање зубаца зупчаника је сложен процес и није у потпуности остварљив. Разлози леже у следећим случајевима који се јављају при подмазивању и то да се при малим брзинама зупчаника не може створити потребан хидродинамички притисак у слоју мазива, па тада долази до непотпуног подмазивања. При великим брзинама зупчаника услед дејства центрифугалне силе мазиво се тешко задржава на боковима зубаца зупчаника, па се јавља појава подмазивања полуоквашених површина, што је такође нежељена појава при подмазивању. Да би се ове појаве ублажиле, тј. разлози који доводе до непотпуног подмазивања елиминисали, врши се убризгавање мазива под притиском у међузубља зубаца зупчаника (нарочито је овај поступак битан код подмазивања зубаца зупчаника који имају велики број обртаја [4].

4.1 Основне карактеристике мазива за подмазивање зубаца зупчаника

За подмазивање зубаца зупчаника примењују се следеће врсте мазива и то:

- чврста мазива код зубаца зупчаника који се крећу брзинама до 3 m/s (најчешће примењено мазиво је легирана маст са адитивом молибдендисулфида),
- техничке масти (течна мазива) код зубаца зупчаника који се крећу брзинама до 2,5 m/s и
- уља (минерална и синтетичка).

Да би се извршио правилан избор мазива за подмазивање зубаца зупчаника, неопходно је класификовати карактеристике које мазиво мора да поседује како би процес подмазивања био оптималан. Задовољење ових карактеристика мазива доводи до правилног избора мазива, а тиме и до правилног подмазивања.

Мазива морају да задовоље одређене карактеристике:

- да буду стабилна у експлоатацији, тј. да задрже своја хемијска и физичка својства при промени брзине струјања, радне температуре и притиска,
- да имају добра мазивна својства,
- да имају добру топлотну проводљивост,
- да имају малу промену вискозности са променом температуре и притиска у радном опсегу,
- да су отпорна на појаву пене и стварања емулзије (мешање са водом),
- да имају добру отпорност према старењу и оксидацији,
- да су што мање активна према гуми (гуменим заптивкама), металима, пластичним масама, заштитним премазима и сл. и
- да не садрже чврсте примесе.

Поред набројаних основних карактеристика које мора да испуни мазиво, за правилан

његов избор у технологији подмазивања зубаца зупчаника потребно је обратити пажњу и на две основне карактеристике радне течности у које спадају [4]:

- брзина издвајања ваздуха, која показује којом ће се брзином ваздушни мехурићи појавити на површини течности (уља) за подмазивање и
- својство радне течности да пенуша, тј. брзина разбијања мехурића издвојених на површини течности за подмазивање (уља) у облику пене.

4.2 Избор мазива за подмазивање механичких преносника према важећим стандардима

За подмазивање отворених преносника и једним делом затворених преносника са малим бројем обртаја, најчешће се користе чврста мазива и техничке масти, док се за подмазивање затворених механичких преносника искључиво користе уља. У погонској пракси за подмазивање механичких преносника углавном се користе два система за подмазивање зубаца зупчаника уљем и то, систем потапања зубаца зупчаника у уљно купатило и систем убризгавања, тј. довођење уља под притиском помоћу мазалица (дизни) у међузубље зубчаника непосредно при њиховом спрезању [4].

Код подмазивања потапањем, зупчаник својим доњим делом урања у уљно купатило толико, да дубина потапања износи 1-5 модула зупчаника. Подмазивање потапањем се користи за обимне брзине зупчаника до 15 m/s.

Подмазивање убризгавањем уља се користи за веће брзине зупчаника и предност оваквог начина подмазивања се огледа у сталној циркулацији једног те истог уља у систем за подмазивање. Ово је врло битно са аспекта потрошње уља, јер смањује потребу сталне замене уља. Да би овакав систем за подмазивање могао да функционише неопходно је да садржи следеће основне компоненте:

- погонски агрегат за обезбеђење сталне циркулације уља (циркулациону пумпу),
- систем за хлађење циркулационог уља (хладњак),
- цевни систем са арматуром за проток циркулационог уља (термометар и манометар).

За правилно подмазивање зубаца зупчаника овим начином, неопходно је обезбедити да радна температура не прелази вредност 60-80°C, јер при већим температурама долази до брзог старења уља.

Треба рећи, да за подмазивање затворених зупчастих преносника код техничких система (машина) са малим бројем обртаја, користе се за подмазивање течне мазиве масти. Количина мазиве масти (полутечне масти) је одређена габаритом самог преносника, док се начин подмазивања изводи континуално, тј. по принципу истом као код подмазивања уљем.

Препоруке за избор уља за подмазивање зубаца зупчаника се карактеришу вискозношћу уља у зависности од снаге и брзине механичког преносника. Приказ ових карактеристика је дат у табели 1 [4].

Табела 1. Подаци о вискозности уља η ($\text{Pa} \cdot \text{s}/50^\circ\text{C}$) за подмазивање зубаца зупчаника

Обимна брзина зупчаника (m/s)	$Ft / (b \cdot \text{mm})$		
	Ft - Обимна сила на зупчанику, mN - модул зупчаника		
	12,5	12,5-30	30
0,5	0,135	0,274	0,410
0 5-2	0,720	0,135	0,274
2-6	0,049	0,720	0,135
6-12	0,036	0,049	0,720

Напомена: Уља за подмазивање зупчаника су легирана (уља са додатком EP адитива) и то за јака оптерећења и хипоидна уља веће носивости.

Горња напомена важи за подмазивање свих врста зупчаника на техничким системима (машинама) у општем машинству. Замену уља треба вршити сваких 1000-5000 часова рада у зависности од врсте оптерећења преносника. У периоду уходавања система (у почетном периоду рада, тј. разрађивања система) замену уља вршити после сваких 20-30 часова рада.

Поред основне наведене табеле о избору уља за зупчaste преноснике даје се и препорука избора мазива за отворене зупчaste преноснике према стандарду SRPS B.НЗ.270-274 приказана у табели 2 [4].

Табела 2. Подаци о избору мазива према стандарду SRPS B.НЗ.270-274

Врста мазива	Метода подмазивања
Мазива на бази битумена	Ручно подмазивање, четком
Мазива са растварачима која остављају чврст филм након испаравања	Ручно или аутоматско, напскавањем
Уље високе вискозности са додатком EP адитива	Капањем, напскавањем, континуално или повремено

Препоруке избора начина подмазивања и врсте мазива зупчастих преносника на техничким системима биће приказане у табели 3. према стандарду ISO.

Табела 3. Препоруке избора начина подмазивања и врсте мазива за техничке системе

Ознака мазива (уља)	Вискозност на $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	Индекс вискозности	Тачка паљења $^{\circ}\text{C}$	Тачка стињавања $^{\circ}\text{C}$
ISO L-CKC 68	68	95	220	- 25
ISO L-CKC 100	100	95	220	- 20
ISO L-CKC 150	150	95	220	- 18
ISO L-CKC 220	220	95	230	-15
ISO L-CKC 320	320	95	235	-12
SAE градација				
80 W	11	90	165	-27
80-90 W	14	95	180	-27
85-90 W	17	95	180	-19
85-140 W	26	90	200	-12
90 W	18	90	180	-19
140 W	31	80	210	-12

Напомена: Ово је група високо квалитетних уља са ЕП својствима за индустријске зупчасте преноснике који раде у области температура од 15-120 $^{\circ}\text{C}$. Користе се за подмазивање високо оптерећених преносника свих врста озубљења и оптерећења.

За подмазивање елемената механичких преносника снаге код моторних возила, рударско-грађевинских машина, пољопривредних машина користе се опште препоруке за избор мазива које су табеларно приказане у табели 4 [4].

Табела 4. Опште препоруке за избор мазива код моторних возила, грађевинских и пољопривредних машина

Возила	Механички мењачки преносници	Аутоматски мењачки преносници	Диференцијални (хипоидни) преносници	Диференцијални преносник (конични са лучним зупцима) (пужни)
Путничка возила	SAE 80 (EP)* SAE 90 (EP) или мултиградно	Флуиди за аутоматске преноснике, ATF	SAE 90 (EP) или мултиградно	-
Теретна возила	SAE 80 (EP)* SAE 90 (EP) или мултиградно	SAE 80 (EP) за полуаутоматске мењаче, ATF флуид за аутоматске мењаче	-	SAE 140 или мултиградно

Напомена: При избору уља са ЕП адитивима мора се водити рачуна о компатибилности са материјалима од којих су израђени елементи мењача.

Након избора одговарајуће врсте уља, следећи задатак за подмазивање је праћење стања уља у систему током рада. Праћење стања уља током експлоатације представља превентивно оруђе и може бити кључ за одлуке. Предности које показује правилна дијагностика мазива, су да се на тај начин добијају информације о стању посматраног механичког система и стања мазива без потребе заустављања машине и његове демонтаже. Лабораторијска дијагностика уља се може сматрати делом целокупног програма дијагностике стања механичког састава, што представља сувремени приступ одржавању техничких система. Поред организацијских питања, програм дијагностике стања уља мора обухватити селекцију машина и опреме у којима ће уље бити предмет сталних испитивања, те предвидети и учесталост узимања узорак уља. Одређивање карактеристика уља које треба испитивати, уобичајено се врши на темељу договора са произвођачем уља и на темељу познавања промена које се очекују у уљу током употребе.

Уља у току експлоатације у зупчастим преносницима, а под утицајем средине у којој се налазе, постепено мењају своја примарна физичка и хемијска својства. У пракси овај процес се назива "старење" уља [5].

Промене које настају у уљу испољавају се кроз:

- хемијске промене у основном (базном) уљу,
- промене у адитивима и
- промене услед контаминације (прљања) разним страним материјама.

Све ове промене се јављају са различитим интензитетом у зависности од врсте мазива, услова експлоатације и општих услова одржавања.

Квалитативна и квантитативна контрола продуката који долазе у уље и самог уља омогућава да се утврди узрок промена у уљу. Хемијске промене основног уља настају процесом оксидације, тј. сједињавање угљоводоника са кисеоником из ваздуха. Практично се овај процес јавља у повећаној мери само на повишеним температурама.

Као последица оксидације настају киселине, смоле и испарљиве материје из уља. Адитиви се у току рада мање мењају, али се троше на све процесе против којих делују. Тако се нпр. инхибитори оксидације троше услед спречавања појаве продуката оксидације, па ће и њихово трошење (деградација) бити утолико брже уколико су утицаји на оксидацију јачи.

Трећи утицајни фактор на промене у уљу јесте контаминација различитим нечистоћама које доспевају у уље. Састав нечистоћа у уљу је различит, и оне се могу дефинисати као скуп материја које су у уљу непожељне.

Од ових материја препознатљиви су:

- остаци материјала употребљеног при изради и ремонту машине (ливачки песак, опилци метала, заптивни материјал, итд.),
- материјал из атмосфере или радне средине (вода, прашина, разне индустријске нечистоће итд.),
- материјал настао хабањем делова или корозијом, продирање нечистоћа у систем може се спречити или барем умањити правилним одржавањем заптивача, филтера и других елемената система.

4.3 Испитивање уља у експлоатацији

За уља може да се каже да је и оно машински елемент, да има своје димензије, физичке и хемијске карактеристике и да се исте мењају током рада због чега је потребно континуирано пратити стање уља и процењивати његов век трајања, а не на бази времена рада или календарског времена. Препоручује се узимање узорка уља у одређеним временским интервалима или по потреби и испитивање у лабораторији. При узорковању уља потребно је придржавати се одређених упутстава да би се за анализу осигурали услови добијања репрезентативног узорка (чиста и сува амбалажа, топло стање уља, измешаност уља, означити узорак итд.). Препоруке за учесталост узимања узорка уља зупчастих преносника, за теже услове рада, су 150-300 часова рада, а за лакше услове рада то је 500 до 1000 часова рада [5].

Методe испитивања уља су дефинисане различитим стандардима или спецификацијама.

Пракса је показала да следећа испитивања служе као добар показатељ општег стања уља за зупчасте преноснике:

- изглед,
- вискозност,
- садржај воде и деемулзивност,
- киселински број,
- садржај нечистоћа,
- температура паљења,
- пењење,
- врста и садржај присутних метала.

Изглед укључује вредности као што су:

- мирис,
- боја,
- провидност и
- присутан талог.

Ово је најједноставнији компаративни тест који може указати на стање уља у експлоатацији, али се не могу узети као једино мерило квалитета уља.

Боја уља се мења током времена употребе и њена контрола заједно са појавом оштрог мириса индицира на промене у уљу. Боја уља се мења са напредовањем процеса оксидације и бива све више тамнија у поређењу са новим уљем. Ако се боја уља мало променила и мирише на свеже уље, а нема других знакова на промену уља, онда се испитује вискозност и киселински број.

Вискозност је најважнија појединачна карактеристика редукторских уља. Мери се вискозиметром на одређеној температури. Промена вискозности током експлоатације уља настаје из више разлога. За очекивати је да се са временом експлоатације вискозност повећава, због оксидационих и других процеса. Искуствени подаци показују да промена вискозности уља не сме излазити ван граница од $\pm 15\%$ њене почетне вредности [5].

Садржај воде у уљу је непожељан због опасности од корозије метала са којим долази у додир и ефекта стварања емулзије. Како је у већим уљним системима чешћи проблем

присуство воде него страних материја у виду нечистоћа, за новија уља се тражи да имају врло добру способност издвајања воде, тј. да имају добра деемулзиона својства. Вода у уљном пуњењу може вући порекло из саме технологије рада постројења, неадекватног складиштења и других манипулативних поступака са уљем, као и услед кондензације влаге из ваздуха. Због свега наведеног, важно је спречити продирање воде и механичких нечистоћа у уље, а ако се то и догоди, треба на одговарајући начин воду и нечистоће уклонити из уља и система за подмазивање. Према препорукама произвођача уља, а и према искуственим показатељима, код редукторских уља садржај воде 1-2% не узрокује значајне потешкоће, али треба настојати да садржај воде у уљном пуњењу не прелази 0,5%.

Киселински број одређује укупне органске и неорганске киселине у уљу. Органске киселине су слабе киселине и оне не изазивају корозију металних делова. Део ових киселина потиче од адитива у уљу, па се због тога укупна неутрализација коју број не сме узети као издвојену вредност за оцену квалитативних промена уља и његове агресивности на метал. Зависно према намени, свежа уља могу показивати киселу или алкалну реакцију, у зависности од присутних слободних киселина или алкалија. Код већине редукторских уља, почетна вредност киселинског броја је висока, што је условљено додатком одређеног пакета адитива.

У току употребе уља, киселински број показује пад вредности да би после одређеног времена та вредност почела да расте.

Садржај нечистоћа које се налазе у коришћеном уљу могу бити присутне у већој или мањој количини, а као непожељни састојци представљају квалитативне промена у уљу. Поступак одређивања садржаја нечистоћа у уљу се састоји у томе да се узорак уља прво центрифугира у прописаним епруветама при 155 o/min, добијени талог се суши и веже се н-хептоном и бензолом.

Осушени талог представља садржај нерастворених чврстих материја у уљу, као што су:

- кокс,
- прашина,
- металне честице,
- смоле и
- друга једињења настала оксидацијом уља.

Уопштено код редукторских уља, вредност нетопивог н-хептаном не сме прећи вредност од 0,25%. Количина материја присутних у уљу, које су нерастворљиве у бензолу се узима као мера нетопивих страних материја у уљу, као што су каменац, прашина, чађ, честице хабања и друге честице. У зависности од начина подмазивања и врсте уља та вредност се сме кретати до 0,1%.

Температура паљења је она температура код које се испарења испитиваног уља приликом загревања у прописаној апаратури, када дођу у додир са искром или пламеном, први пут на тренутак запале. Овај податак за редукторска уља даје и врло корисну информацију о испарљивости уља. Што је тачка паљења виша, то је испарљивост уља нижа. Испарљивост уља додатно утиче на потрошњу уља, а и на утврђивање одређених талоба [5].

Пенушавост настаје услед мешања ваздуха и уља, током рада система. Пену изазива повећање температуре уља и уколико уље прелази из стања већег у стање мањег притиска, тада ваздух има тенденцију излажења из уља при чему се стварају мехурићи који су узрок пенушавости. Ова појава може изазвати слабљење уљног филма између фрикционих површина, а тиме и хабање.

Неки од узрока пењења су конструкционо-експлоатационе природе и јављају се на самом месту подмазивања, а други узроци пењења могу бити:

- погрешан избор вискозитета уља
- количина и квалитет уља.

Одређивање метала у мазиву врши се различитим методама спектрографије и ферографије. Порекло метала у испитиваном узорку мазива може бити из разних извора, у зависности од саме конструкције механизма који се подмазује и система подмазивања. Повећана количина метала у уљу редуктора указује на одређене недостатке у самој конструкцији или експлоатацији, те исту појаву треба анализирати и донети одговарајућа решења за отклањање недостатака.

Поступак дијагнозе и прогнозе обухвата, у основи, следеће активности:

- прикупљање информација,
- обраду и анализу и
- доношење одлуке и прогнозу.

Све евентуалне величине и резултати претходно набројаних карактеристика испитиваног уља користе се за формирање базе података чијом се обрадом и анализом успоставља дијагноза. Обрада информација се састоји из поређења измерених вредности са дозвољеним или претходно измереним. Анализа обухвата и упоређење података са активностима у одржавању, али и резултатима других метода одржавања. На основу тих информација и анализа утврђују се мере и обим радова у циљу успостављања оптималних услова рада система и спречавање тежих оштећења и отказа, као и наредна испитивања и прогноза преосталог века експлоатације уља.

4.4 Одржавање уља

Одржавање уља је правовремено и коректно третирање процеса подмазивања током животног циклуса система и обухвата следеће активности:

- правилно складиштење и руковање,
- тачна процедура замене,
- контрола радних параметара уља (ниво уља, притисак, температура, итд.),
- пречишћавање уља и
- освежење уља или допуна са адитивима (по потреби).

Свака од ових активности мора да се обави уз поштовање свих техничких норми, заједно са оценом стања уља, активности на његовом одржавању треба да допринесу оптимизацију века употребе и смањење нежељених ефеката на зупчасти преносник, као што су корозија и хабање. Замена уља врши се истакањем старог уља, чишћењем кућишта

тј. резервоара уља, промена пречистача (уложака) уља и пуњење система новим уљем са одговарајућом количином. За чишћење редуктора и његових саставних елемената, у новије време се користе посебна уља за чишћење и испирање, која се у одређеној количини сипају у редуктор у старо топло уље и тако одради одређено време, након чега се старо уље испушта из система. На тај начин редуктор се очисти од свих продуката старења уља. Стање испуштеног, старог уља даје показатеље на основу којих се дефинишу неопходне активности његовог даљег третирања. У првом реду то је поступак пречишћавања уља који је посебно економски оправдан у великим индустријским системима. За пречишћавање се обично користе различити филтерски системи и центрифуге. Осим тога, систем пречишћавања може да се одвија периодично (једнократно) са делимичним или пуним протоком.

Освежење уља се врши допуњавањем уља у систему са свежим уљем, чиме се трајање уља повећава. При томе је нарочито значајно да се уље надопуњава увек са истом врстом и квалитетом уља, јер би се функција неких адитива могла међусобним реакцијама поништити. За освежење уља постоје и адитиви који се додају уљу у одређеном односу. Ови адитиви садрже додатке против хабања, за изразите притиске, инхибиторе корозије, те антиоксидансе и компоненте пријањања. Овим активностима се продужује радни век уља [5].

4.5 Управљање отпадним уљем

У овом поглављу је наведено да током употребе мазива долази до промена у хемијском саставу због процеса оксидације, термичке разградње, контаминације металним честицама, водом, бактеријама итд. Доказано је да експлоатисана уља имају знатно виши канцерогени потенцијал него свежа уља. То налаже посебан опрез у руковању са мазивима, нарочито половним, јер као таква исказују штетна својства по људе и околину. Зато се искоришћено уље мора одложити у складу са важећим позитивним прописима. Не контролисано одлагање отпадних уља, осим здравствених и еколошких негативности, има и економски утицај, јер та уља представљају корисну секундарну сировину, посебно значајну за земље увознице нафте [5].

6. ЛИТЕРАТУРА

[1] Bharat Bhushan: *Introduction to tribology*, The Ohio State University Columbus, Ohio, USA, 2013.

[2] Ivana Atanaskova, Dejan Momčilović: *Uticaj otkaza zubaca na bezbednost mašina*, Stručni članak UDK/UDC: 621.833.01, str. 37-45, Institut za ispitivanje materijala, Beograd, 2007.

[3] Mileta Ristivojević, *Oštećenja zupčanika*, materijal sa predavanja, Univerzitet u Beogradu, 2007.

[4] Slobodan Stefanović, Dragan Nikolić, *Izbor maziva za podmazivanje mehaničkih prenosnika*, Osma internacionalna konferencija o tribologiji, Beograd, 2003.

[5] Fehim Fejzić, Jasmin Fejzić, I drugi, *Dijagnostika ulja za zupčaste prenosnike u cilju utvrđivanja kvaliteta i optimalnog vijeka upotrebe*, Druga Konferencija „Održavanje 2012“, Zenica, 2012.