

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Дипломске академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Механички преносници

Број индекса: 83/03

Жељко Ј. Весовић
Подмазивање и оштећења зупчастих
преносника снаге
дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Мирко Благојевић, доцент - ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру рада биће дате основне информације о триболошким процесима код зупчастих преносника снаге. Зупчасти преносници снаге представљају врло битне делове машинских система чији су животни век и експлоатацијске карактеристике у директној вези са триболошким карактеристикама. Подмазивање зупчастих преносника директно утиче на повећање поузданости рада, смањење оштећења и продужетак радног века. Недовољно подмазивање зупчастих преносника доводи до оштећења, лома и отказа машинских система. Кандидат треба да изврши класификацију оштећења зупчастих преносника снаге, узимајући у обзир велики број параметара.

Препоручена литература:

- [1] Танасијевић, С., Основи трибологије машинских елемената, Научна књига, Београд, 1989
- [2] Ивковић, Б., Рац, А., Трибологија, Југословенско друштво за трибологију, Крагујевац, 1995
- [3] Танасијевић, С., Вулић, А., Механички преносници, Машински факултет, Крагујевац, 2006

Крагујевац, 2013

ментор:

Др Мирко Благојевић, доцент - ментор

Резиме: Зупчасти преносници снаге су веома заступљени у многим механичким системима због своје високе механичке корисности и поузданости рада. Они представљају виталне делове машина, па се захтева поуздан рад зупчаника да не би дошло до оштећења и лома машина. И поред тога у току рада долази до различитих изненадних отказа зубаца зупчаника што може да проузрокује отказ целог машинског склопа чији је зупчаник део.

После многих испитивања, научници су идентификовали начине изненадних отказа, као и узроке који до отказа доводе. Правилно руковање током монтаже и експлоатације обезбеђује сигуран и поуздан рад током прописаног радног века зупчастог преносника.

Abstract: Gears are the components that are strongly represented in many mechanical systems due to their high mechanical usefulness and reliability. They are vital parts of the machine, and require reliable gear operation to avoid damage and machine breakdown. Nonetheless, in the course of operation a variety of sudden failures of gear teeth which may cause failure of complete mechanical systems whose gears are part.

After many trials, scientists have identified ways of sudden failures and causes that lead to failure. Proper handling during installation and operation ensures safe and reliable operation of the prescribed pinions work life.

САДРЖАЈ:

1. УВОД.....	7
1.1 Трибологија и подмазивање.....	7
1.2 Теорија трења, хабања и подмазивања.....	7
1.3 Карактеристике површина чврстих тела.....	8
1.4 Трење.....	8
1.4.1 Трење клизања.....	8
1.4.2 Трење котрљања.....	10
1.5 Хабање.....	11
1.5.1 Адхезионо хабање.....	11
1.5.2 Абразивно хабање.....	12
1.5.3 Хабање услед замора материјала.....	13
1.5.4 Ерозија.....	14
1.5.5 Хабање услед оксидације.....	14
1.5.6 Хабање услед корозије.....	14
2. ТЕОРИЈЕ ПОДМАЗИВАЊА.....	16
2.1 Дефиниција и класификација подмазивања.....	16
2.2 Гранично подмазивање.....	17
2.3 Хидродинамичко подмазивање.....	18
2.4 Хидростатичко подмазивање.....	18
2.5 Еластохидродинамичко подмазивање.....	18
2.6 Мешовито подмазивање.....	19
3. МАЗИВА.....	20
3.1 Појам, поделе и компоненте мазива.....	20

3.2	Базна уља.....	22
3.2.1	Минерална базна уља.....	22
3.2.2	Синтетичка базна уља.....	22
3.3	Адитиви.....	23
3.3.1	Адитиви за заштиту од хабања.....	24
3.3.2	Адитиви за заштиту од високих притисака и ударних оптерећења.....	24
3.3.3	Адитиви за заштиту од оксидације-Антиоксиданти.....	25
3.3.4	Адитиви за заштиту од корозије-Инхибитори корозије.....	25
3.4	Угушивачи.....	25
3.4.1	Сапунски угушивачи.....	25
3.4.2	Комплексни сапуни.....	26
3.5	Аналитика мазива.....	26
4.	ИЗБОР МАЗИВА.....	27
4.1	Уља за подмазивање мењача и диференцијала моторних возила.....	27
4.1.1	Избор уља за мењаче и диференцијале.....	28
4.2	Редукторска уља.....	29
5.	ОШТЕЋЕЊЕ ЗУПЧАСТИХ ПРЕНОСНИКА.....	31
6.	КЛАСИФИКАЦИЈА ОШТЕЋЕЊА ЗУБАЦА.....	33
6.1	Површинска оштећења.....	35
6.2	Скафинг (огреботине).....	36
6.3	Трајне деформације.....	36
6.4	Заморна површинска оштећења.....	38
6.5	Прслине.....	41
6.6	Лом зупца.....	41

7. ЗУПЧАСТИ ПРЕНОСНИЦИ СНАГЕ.....	44
7.1 Врсте хабања.....	44
7.1.1 Адхезивно хабање.....	45
7.1.2 Абразивно хабање.....	48
7.1.3 Заморно хабање.....	50
7.1.3.1 Заморна оштећења материјала бока зубаца.....	51
7.1.4 Ерозионо хабање.....	51
7.1.5 Кавитационо хабање.....	52
7.1.6 Корозионо хабање.....	53
7.1.7 Оксидационо хабање.....	54
7.1.8 Вибрационо хабање.....	55
8. ЗАКЉУЧАК.....	56
ЛИТЕРАТУРА	

1. УВОД

Коришћење мазива је неизбежан начин за решавање триболошких проблема код већине основних машинских елемената (зупчаника, клизних и котрљајних лежаја, зглобова, ужади, ланаца итд.), различитих машинских система (мотора СУС, пумпи, алатних машина, турбина, компресора и сл.), технолошких процеса обраде метала, као и »*hi-tech*« уређаја као што су компјутери и друга електронска опрема.

Овако широка примена мазива је последица значајне зависности поузданости рада и века трајања поменутих елемената и система од ефикасности подмазивања њихових покретних делова. Значај подмазивања може јасно да се сагледа ако се има у виду чињеница да преко 50% свих оштећења и отказа у раду механичких система настаје због хабања и да је подмазивање најзаступљенији начин за смањење трења и хабања материјала. Материје које се користе у процесу подмазивања називају се једним именом мазива. То значи да се под мазивом подразумева било која материја којом се раздвајају, потпуно или делимично, површине тела у међусобном деловању и релативном кретању са основним циљем да се смањи трење и хабање. Поред наведеног, мазива имају и низ других функција.

Најважнија је свакако хлађење делова машина и уређаја. У појединим конструкцијама мазиво обавља и друге веома важне задатке као што су преношење кретања и снаге код хидрауличких система и аутоматских преносника снаге, амортизацију удара, смањење вибрација и друго, [7].

1.1 Трибологија и подмазивање

Трибологија је научна дисциплина која обухвата испитивање појава и процеса на површинама које су у међусобном деловању, директном или индиректном додиру и релативном кретању.

Назив трибологија потиче од грчке речи **TRIBOS** што значи трење или трљање и речи **LOGOS**-наука. Код проучавања триболошких феномена користе се подручја из више наука: органска и неорганска хемија, физичка хемија, физика, познавање машинских елемената, електроника, механика, наука о металима, термодинамика, технологија, организација производње итд. Иако не сасвим тачно, трибологијом често називамо науку о трењу, хабању и подмазивању. Трибологија је веома важна мултидисциплинарна наука која се, нарочито последњих тридесетак година, интезивно развија.

Основни циљ трибологије је истраживање услова за оптималну експлоатацију производних процеса, односно смањење потрошње енергије, смањење трошкова одржавања машина и повећање поузданости механичких система, [8].

1.2 Теорија трења, хабања и подмазивања

Основни процеси који се јављају при релативном кретању два чврста тела су трење на додирним површинама и хабање додирних површина. Услед појаве трења долази до губитка механичке енергије при раду механичког система. Због појаве хабања долази до промена површина машинских делова током експлоатације.

1.3 Карактеристике површина чврстих тела

Појам површина, у триболошким истраживањима, подразумева површински слој материјала мале дебљине, [8].

Неравнине које се могу уочити на површини могу се поделити на макронеравнине (искривљеност и валовитост површине) и микронеравнине (избразданост површине).

Са аспекта трибологије најзначајнији појам је храпавост површине, односно скуп неравнина које образују рељеф површине. Геометрија површина тела који су у контакту, мења се током времена. У току првог периода контакта промена геометрије површине је интезивнија, што се назива периодом „уходавања“.

1.4 Трење

Трење представља механички отпор који настаје на површини додира два тела при кретању једног тела по другом или при међусобном релативном кретању. Изражава се силом (F_t), која се јавља као отпор појави кретања, [8].

Трење се може поделити у два основна облика:

- унутршње трење
- спољашње трење

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

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

- трење клизања
- трење котрљања

1.4.1 Трење клизања

Трење клизања представља отпор релативном кретању које се јавља када једно чврсто тело клизи по другоме, [8]. Сила трења је пропорционална нормалној сили која делује на површине које су у контакту, што се може приказати следећим изразом:

$$F_t = \mu F_n \quad (1.1)$$

где је:

F_t – сила трења

μ – коефицијент трења

F_n – нормална сила

По овој теорији сила трења не зависи од величине површина које су у додиру и брзине клизања, већ зависи једино од оптерећења, степена храпавости и природе материјала елемената. Међутим, новија испитивања су показала да ова формула не задовољава у потпуности. По теорији *Bowdena*, *Tabora*, *Derjagina* и других, сила трења зависи од нормалног оптерећења, степена храпавости, стварне додирне површине, међумолекулским привлачењима на местима непосредног додира, тврдоће материјала а такође од процеса смицања.

То се може изразити на следећи начин:

$$F = m \{ F_n, v, A_r, F_0, K \} \quad (1.2)$$

где је:

F – сила трења

F_n – нормално оптерећење

A_r – укупна површина непосредних додира

v – брзина клизања

F_0 – допунско оптерећење услед међумолекулског привлачења

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

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

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

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

Да би се извео модел једначине сувог трења, прво се мора дефинисати стварна додирна површина, јер се само на њој одвијају наведене појаве. Када нека тврда плоча клизи по мекшој или обрнуто, а обе имају изразите рељефе, стварна додирна површина (A_r) може се изразити као функција оптерећења (F_n) и тврдоће (p_m) мекше плоче:

$$F_n = p_m A_r \quad (1.3)$$

где је:

F_n – нормално оптерећење

p_m – пенетрацијска тврдоћа (по *Brinellu* или *Vickersu*)

A_r – укупна површина непосредних додира

Једначина се једноставно може објаснити на следећи начин: кад је оптерећење мало, стварна додирна површина ће такође бити мала, јер површине належу једна на другу само преко најистуренијех врхова рељефа, постепеним повећањем оптерећења, неравнине се све више пластично деформишу, належући преко све више истурених врхова. Број непосредних додира све више расте, па расте и стварна додирна површина.

Процес је ограничен тврдоћом тела: промена стварне додирне површине ће расти са оптерећењем толико дуго док се не створи нека површина која ће моћи да поднесе то оптерећење. После тога процес се зауставља. Таква гранична површина зависи од тврдоће: што је тврдоћа већа, површина ће бити мања и обрнуто.

1.4.2 Трење котрљања

Трењем котрљања назива се оптор релативном тангенцијалном кретању који се јавља котрљањем неког предмета по површини, [8]. Ако је додиривање у тачки или линији, што је случај за котрљање идеалне кугле или ваљка по идеалној површини, сила трења (F_t) је управо пропорционална оптерећењу (F_n) а обрнуто пропорционална полупречнику котрљајућег тела (R):

$$F_t = \mu (F_n / R) \quad (1.4)$$

где је:

F_t – сила трења

μ – коефицијент трења

F_n – нормално оптерећење

R – полупречник котрљајућег тела

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

1.5 Хабање

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

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

По дефиницији, хабање је прогресивни процес губитка материјала елемената или делова машина који су у непосредном контакту и налазе се у релативном кретању. Као последица процеса хабања долази до похабаности делова машина, смањења ефикасности њиховог рада, потрошње енергије итд. Може се поделити на механичко и хемијско хабање, [8].

Под механичким хабањем се подразумевају:

- адхезија
- абразија
- замор материјала
- ерозија

Под хемијским хабањем се подразумева:

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

У највећем броју реалних случајева јавља се као последица комбинације механичког и хемијског хабања.

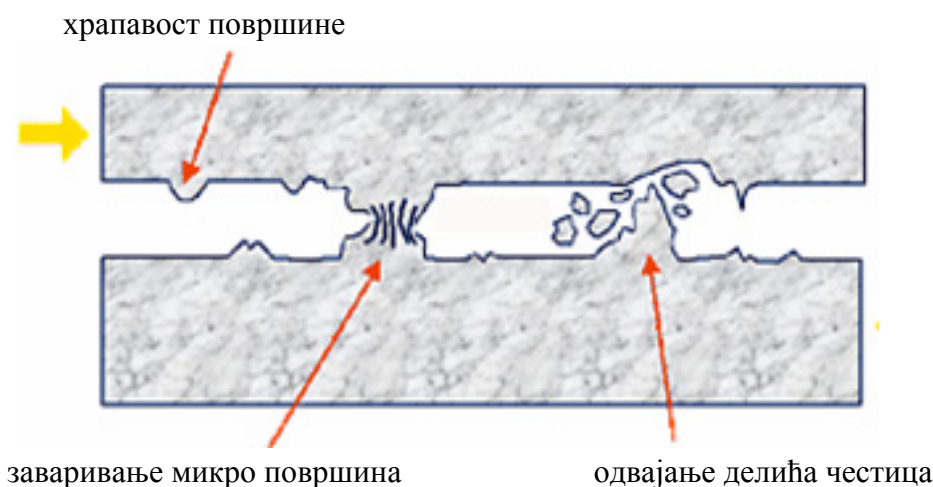
1.5.1 Адхезивно хабање

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

До појаве адхезивног хабања (слика 1.) долази код високооптерећених површина, код којих се, без обзира на присутно мазиво између њих, остварује контакт врхова неравнина. Разлог томе је висока вредност специфичног притиска на месту контакта, што доводи до цепања слоја мазива.

Код раздвајања две микрозаварене неравнине може доћи до лепљења материјала с једне површине на другу, а често и до одвајања делића од основног материјала, који се касније слободно крећу између површина и доводе до абразивног хабања. Ова појава код микроповршина може се проширити и на појаву адхезивног хабања и заривавања целих површина. Сразмерно са повећањем притиска на површини, пропорционално се повећава број спојева и стварна површина контакта.

Код екстремних притисака, деформација и високих температура, долази до међусобног заваривања микроспојева по значајном делу површина у контакту. Тако заварени спојеви неравнина се раскидају па долази до хабања целе површине. Ако у карактеристичним случајевима оптерећења и контакта дође до интезивног и бројног микрозаваривања, сума отпора смицања може порастати до те величине да се цели систем заустави, односно зарива, [8].

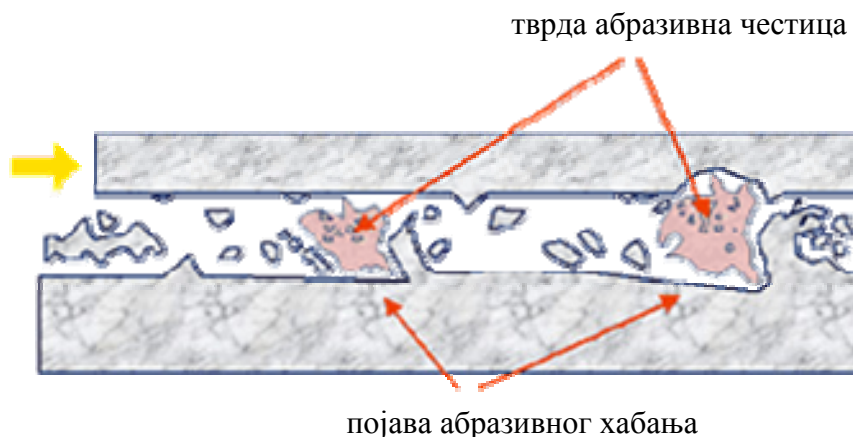


Слика 1. Шематски приказ адхезивног хабања

1.5.2 Абразивно хабање

Абразивно хабање (слика 2.) је облик одстрањивања материјала са површина у контакту као последице задирања неравнина површине веће тврдоће или чврстих делића разног порекла у површину мање тврдоће. Делићи материјала могу бити слободни и понашати се као треће тело, али и утиснути у једну или обе површине. Они могу настати или унутар самог трибомеханичког система као резултат процеса хабања површина или се могу унети средством за подмазивање, [8].

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



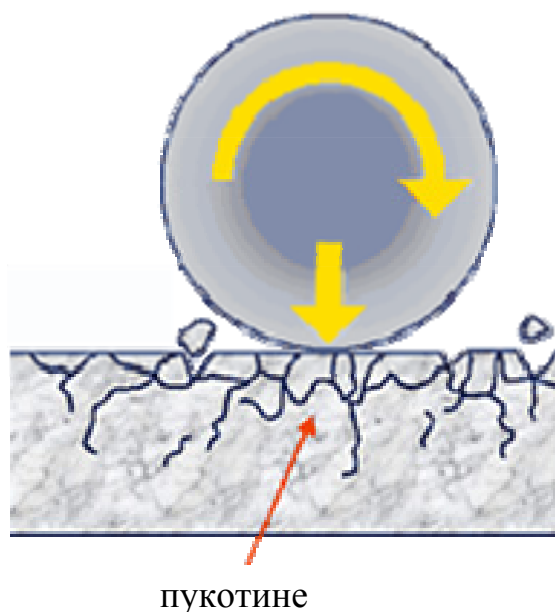
Слика 2. Шематски приказ абразивног хабања

1.5.3 Хабање услед замора материјала

Хабање услед замора (слика 3.) јавља се у случајевима када се површине стално клизају или ваљају по истом путу. Циклуси променљивих оптерећења, као и напрезања на притисак и истезање могу проузроковати површинске и подповршинске пукотине, [8].

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

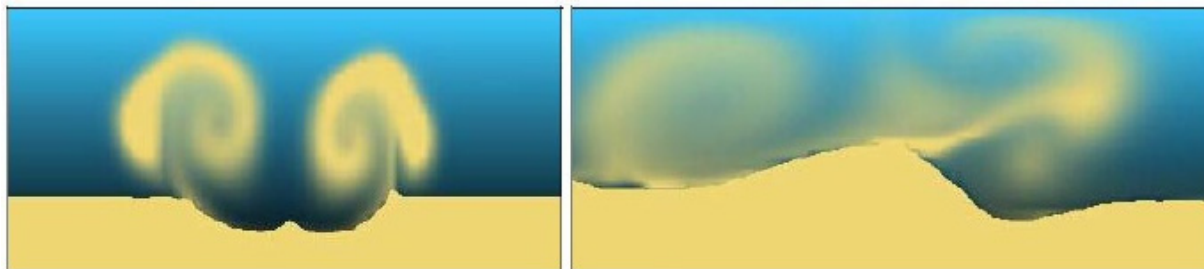
Овај вид хабања није карактеристичан за машинске елементе код којих је присутно стално или врло мало променљиво оптерећење. Често се јавља код зупчаника, свих врста котрљајућих и клизних лежачева, брегастих осовина и др.



Слика 3. Хабање услед замора материјала

1.5.4 Ерозија

Ерозија (слика 4.) настаје када се оштре честице неке чврсте материје залепе на једну од клизних површина. Често се погрешно упоређује с адхезијом. Основна разлика је у томе да је храпавост изазвана ерозијом површине далеко већа, а и механизам је различит. Може бити изазвана и вишеструким деловањем удара тока флуида, што се често јавља на лопатицама турбина и центрифугалних пумпи. Тако настала оштећења суперпонирају се ако флуид носи абразивне честице, [8].



Слика 4. Флуидна ерозија

1.5.5 Хабање услед оксидације

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

Директна оксидација метала у нормалним условима у принципу не представља посебну опасност за површине. Када дебљина оксидног слоја није велика побољшавају се основне триболошке карактеристике површине, смањује се коефицијент трења и повећава тврдоћа површине. Супротно овоме, оксидни слојеви већих дебљина, могу створити проблеме зато што је нееластичан. Он пуца, па се ствара слој подложен хабању, а процес оксидације се проширује у дубину, [8].

1.5.6 Хабање услед корозије

Корозивно хабање (слика 5.) је процес оштећивања површина које клизе у корозивној средини, при чему деловање корозивног медија може бити хемијско или електрохемијско. У зависности од интензитета и степена захваћености површине, оно може бити непрекидно или местимично прекинуто. Кад би површине мировале продукти корозије могли би на њима стварати секундарне заштитне слојеве. Клизањем се, међутим ти спојеви кидају и оштећују, па корозија може даље да се шири, [8].



Слика 5. Шематски приказ хабања услед корозије

2. Теорије подмазивања

2.1 Дефиниција и класификација врста подмазивања

Трајност и поузданост рада машина и различитих механизма битно зависе од правилног избора и примене мазива. Лоше одабрано мазиво или његова погрешна примена је узрок ненормалном, убрзаном хабању површина које су у контакту и појава трајних деформација, односно оштећења. Један од основних критеријума избора је специфичност рада механизма: брзина и облик кретања, специфична оптерећења, температура итд. Уопштено, може се рећи, да се мазива не бирају за машине у целини, већ посебно за различите склопове једне машине. Тако, на пример, код погонске групе неког моторног возила мотор се подмазује моторним уљем, преносни механизам трансмисионим уљем, неке лежачеве мазивим мастима итд.

Будући да је хабање елемената последица трења, а трење отпор релативном кретању, основна улога мазива је да смањи тај отпор. Мазиво се може дефинисати као материја која смањује трење, али осим тога испуњава и неке сасвим одређене и строго постављене захтеве. На пример, савремено моторно уље пре свега мора подмазивати површине, али уједно мора имати способност хлађења, заштите од корозије, заптивања, чишћења и прања елемената мотора и мора бити оксидационо и термички стабилно. Без тих особина оно не би могло задовољити сложеним захтевима савремених мотора, [8].

У зависности од дебљине слоја мазива, његовог међуповршинског распореда, степена геометријске сличности спрегнутих површина и радних услова елемената механичког система могуће је остварити различите видове подмазивања:

- гранично
- хидродинамичко
- хидростатичко
- еластохидродинамичко
- мешовито подмазивање

Врста подмазивања се може одредити према величини (h_g), која се прорачунава према:

$$h_g = h / (R_{a1} + R_{a2}) \quad (1.5)$$

h - дебљина слоја мазива

R_{a1}, R_{a2} - средње одступање од номиналног профила површине

$h_g < 1$ гранично подмазивање

$h_g < 5$ мешовито подмазивање (прелазни облик ка хидрауличком или хидродинамичком подмазивању)

$5 < h_g < 100$ хидростатичко или хидродинамичко подмазивање

2.2 Гранично подмазивање

Гранично подмазивање настаје када слој мазива нема довољну дебљину да спречи контакт површина чврстих тела. Површине елемената су у непосредном додиру и оптерећење се преноси с једне на другу преко спрегнутих неравнина.

Мазиво се налази између контактних површина у облику мономолекуларног слоја који путем физичко-хемијских веза реагује са металном површином. Гранично подмазивање се анализира преко промена коефицијента трења. Вредност коефицијента трења граничног подмазивања одређена је коефицијентом трења у граничном слоју и коефицијентом трења на местима додира чистих метала, [8]:

$$\mu = a_w \mu_m + (1 - a_w) \mu_g \quad (1.6)$$

где је:

μ - коефицијент трења граничног подмазивања

a_w - део стварне површине додира метала

μ_m - коефицијент трења спрегнутих површина метала

μ_g - коефицијент трења граничног слоја

Код случаја граничног подмазивања највише су изражена адхезивна и абразивна хабања материјала, а у мањем обиму су присутни трибохемијски процеси и хабање услед површинског замора материјала. У циљу смањења трења и хабања у процесу граничног подмазивања потребно је обезбедити погодни површински, односно гранични слој. Стварање граничних слојева могуће је постићи: физичком адсорпцијом, хемијском адсорпцијом, хемијским реакцијама.

Физичка адсорпција се јавља када се активни молекули из мазива везују за површине. Поларни адитиви (нпр. масна уља) формирају на површинама метала чврст слој који има способност да се одупре продирању неравнина и на тај начин спречава додир метал-метал. Овај вид стварања граничних слојева погодан је за мала оптерећења, ниже температуре и мале брзине.

Код хемијске адсорпције активни молекули мазива везани су за металне површине хемијским везама, као на пример везивање масних киселина за метале и његове оксиде, при чему настају метални сапуни веома добрих триболошких својстава. Ови гранични слојеви су погодни за средња оптерећења, средње температуре и средње брзине.

Хемијском реакцијом између активних молекула мазива (EP-адитива) и метала стварају се нова хемијска једињења на површинама. Ова мазива у свом саставу садрже хлор, фосфор и сумпор у облику различитих једињења. Делују тако што, услед високих температура, на површинама стварају слојеве хлорида, фосфида и сулфида који штите површину метала од високих оптерећења и екстремних притисака.

2.3 Хидродинамичко подмазивање

Хидродинамичко подмазивање представља начин подмазивања при коме су површине које се подмазују раздвојене континуалним слојем мазива у току кретања, односно где се трење површинских рељефа у потпуности замењује унутрашњим трењем честица мазива. У току мировања, покретања или заустављања површине се налазе у директном контакту.

Елементи механичких система код којих се остварује хидродинамичко подмазивање одликује се следећим триболошким карактеристикама:

- површине које се подмазују раздвојене су континуалним слојем мазива довољне дебљине тако да не долази до њиховог додира, изузев при покретању и заустављању
- оптерећење се преноси с једне на другу површину преко слоја мазива који поседује одређену моћ ношења насталу као резултат релативног кретања површина
- отпор услед трења у систему је одређен величином унутрашњег трења у мазиву

Дебљина уљног слоја, код хидродинамичког подмазивања, мора бити већа од збира висина површинских рељефа клизних површина. Дебљина слоја која је једнака збиру висина површинских рељефа површина назива се критичном и испод ње престају законитости хидродинамичког подмазивања, [8].

2.4 Хидростатичко подмазивање

Да би се обезбедила континуална дебљина слоја мазива између спрегнутих површина, неопходан је притисак у слоју мазива који је већи од оптерећења које делује на површине. Ако се притисак у слоју мазива одржава помоћу посебног уређаја-хидростатичког система, ради се о хидростатичком подмазивању.

Користи се тамо где се морају отклонити недостаци хидродинамичког подмазивања, односно тешкоће стварања хидродинамичких слојева код малих брзина или брзине једнаке нули (покретање и заустављање система). За овај вид подмазивања користи се посебан тип клизних лежајева који се називају хидростатичким. То су лежајеви у којима се моћ ношења уљног слоја остварује сталним додавањем уља под притиском из неког уљног резервоара, [8].

2.5 Еластохидродинамичко подмазивање

За хидродинамичко подмазивање је карактеристично да се оптерећење преноси преко велике површине додира. Међутим постоје многи елементи машина (зупчаници, котрљајни лежајеви, брегасти механизми) код којих се теоријски додир остварује у тачки или по линији.

Стварни додир је по некој малој али коначној површини. Мала додирна површина узрокује висока специфична оптерећења, што изазива еластичне деформације површинских слојева и промену геометрије површине додира. За ове услове важе Херцови (*Hertz*) закони, на основу којих се одређује величина притиска, као и величина додирне површине.

У области додира високо оптерећених спрегнутих површина јавља се притисак који има параболичну расподелу. Изван Херцове области владају закони хидродинамичког подмазивања. На улазу у Херцову област притисак у мазиву је мањи од Херцовог притиска, али довољно висок да би раздвојио површине. У самој Херцовој области притисак у слоју мазива прати расподелу Херцовог притиска.

2.6 Мешовито подмазивање

Мешовито подмазивање представља прелазни облик између потпуног и граничног подмазивања. Када је дебљина слоја мазива недовољна да потпуно раздвоји површине, јавља се местимични директни контакт површина.

Мешовито подмазивање је присутно и у случају малих брзина кретања машинских елеманата при високим оптерећењима.

3. Мазива

3.1 Појам, поделе и компоненте мазива

Појам **мазива** подразумева гасовите, течне и чврсте материјале који се користе за смањење трења између спрегнутих радних површина које се налазе у релативном кретању. Осим тога користе се и за пренос снаге, пренос топлоте, хлађење, заштиту од корозије итд. Најширу примену у пракси имају мазива уља и мазиве масти, [9].

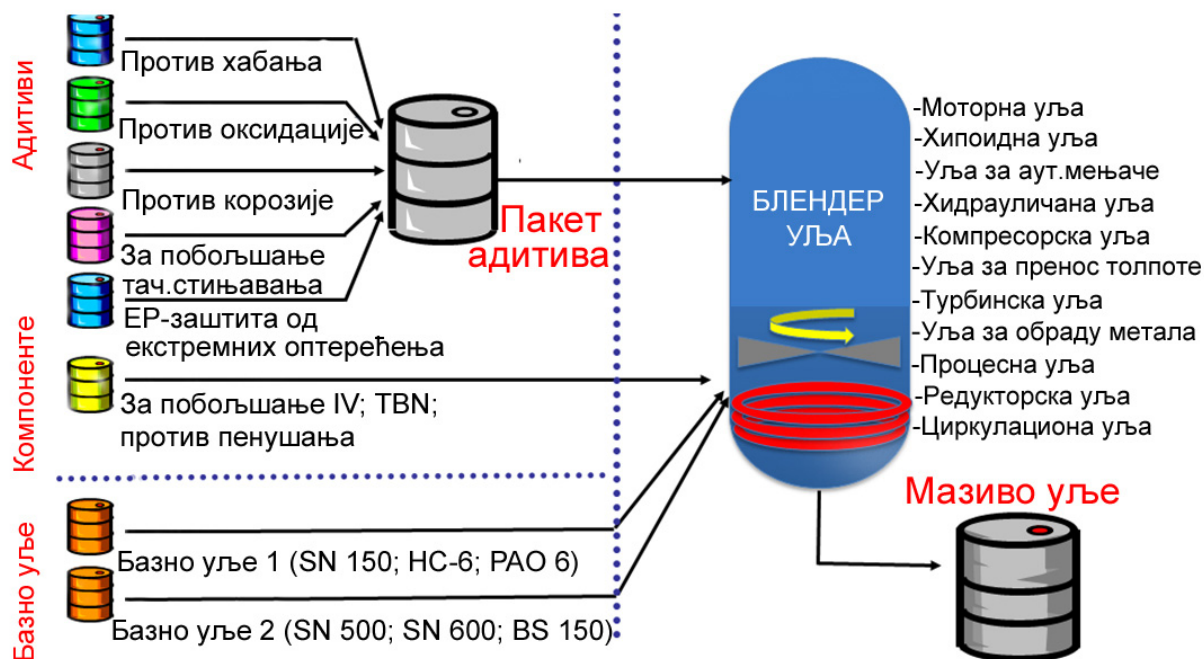
Мазива уља и мазиве масти су конструкциони елементи механичких система. Правилна примена мазива осигурава сигуран и економичан рад, а осим тога обезбеђује и дужи век механичких система. Због тога корисници опреме морају се придржавати препорука произвођача.

Мазива уља садрже две основне групе компонената: базна уља и адитиве различитих функција (слика 6.). Мешањем базних уља одређених вискозних градација и различитих група адитива, добија се широка палета мазивих уља која се међусобно могу разликовати по намени, реолошким, триболошким и другим радним особинама. У зависности од врсте базних уља, финална мазива уља се на тржишту препознају као минерална, хидрокрекована или синтетичка моторна и индустријска уља.

За производњу различитих врста мазивих уља користе се базна уља различитих хемијских и физичких особина и различитих вискозних градација. Адитиви често немају особине мазива, али они базним уљима побољшавају постојеће добре особине а умањују лоше особине. Осим тога адитиви обезбеђују нове добре особине које су неопходне, а које базно уље не може да задовољи.

БАЗНА УЉА	+	АДИТИВИ	=	МАЗИВА УЉА
Конвенционална базна уља: -Рафинати -Рерафинати Неконвенционална базна уља: -Хидрокрекована базна уља (НС) -Синтетички угљоводоници -Синтетички естри -Полигликоли Биљна уља: -Репичино уље -Рицинусово уље		-Детерџенти -Дисперзанти -За заштиту од хабања -За заштиту од високих притисака (EP) -Инхибитори рђе и корозије -Модификатори трења -Депресанти тачке течења -Импрувери индекса вискозности (VI) -Омекшивачи еластомера -Инхибитори оксидације уља -Инхибитори пене -Деактиватори метала		-Уља за четворотактне моторе -Уља за двотактне моторе -Уља за мењаче и диференцијале -Уља за аутоматске мењаче (ATF) -Универзална уља за тракторе (STOU) -Уља за кочнице -Хидраулична и остала индустријска уља

Слика 6. Поступак добијања мазивих уља, [9]



Слика 7. Процес производње мазивих уља, [9]

Мазиве масти се могу дефинисати као чврста или получврста мазива, настала дисперговањем одговарајућег угушљивача у мазивом уљу. Својства мазивих масти зависе углавном од врсте угушљивача који могу бити сапунског или несапунског порекла. Поступак добијања мазивих масти (слика 8.).

БАЗНА УЉА	+	АДИТИВИ	+	УГУШЉИВАЧИ	=	МАЗИВЕ МАСТИ
Конвенционална базна уља: -Рафинати -Рерафинати Неконвенционална базна уља: -Хидрокрекована уља (НС) -Синтетички уљоводно-ници -Синтетички естри -Полигликоли Биљна уља: -Репичино уље -Рицинусово уље		-За заштиту од хабања -За заштиту од високих притисака -Инхибитори рђе и корозије -Инхибитори оксидације -Чврсте материје за побољшавање својства подмазивања (графит, молибдендисулфид)		Сапуни метала -Литијумови -Калцијумови -Натријумови -Алуминијумови -Баријумови Остали угушљивачи: -Бентонит -Полиуретани -Гели		-Вишенаменске масти -Масти за високе температуре -Масти за ниске температуре -Масти за централно подмазивање -Силикагелне масти -Бентонитне масти -Полиуретанске

Слика 8. Поступак добијања мазивих масти, [9]

3.2 Базна уља

Базна уља **минерална** или **синтетичка** чине основу свих мазива, мазивих уља и мазивих масти и битно утичу на њихове основне особине. Минерална се производе прерадом нафте, а синтетичка хемијском синтезом из различитих компонената, [10].

3.2.1 Минерална базна уља

У новије време називају их још и конвенционалним. Састоје се од угљоводоника-једињења угљеника (C) и водоника (H). Молекулске масе им се крећу у распону $C_{20} - C_{35}$. Њихове структуре и остале особине зависе од природе и карактеристика сирове нафте из којих се добијају али и од даљих секундарних или каталитичких поступака обраде, [10].

Прерадом парафинских нафти добијају се минерална базна уља парафинске основе. Користе се за производњу моторних, трансмисионих, редукторских, хидрауличних и компресорских уља.

Доминантни конституенти ових базних уља су сложени или хибридни угљоводоници. Њихови молекули су изграђени од нормалних (линеарних) парафина, изопарафина и циклопарафина. Добре особине су им: високе тачке паљења, висока оксидациона и термичка стабилност, високи индекси вискозности. Индекс вискозности је емпиријски број, без димензија, који означава величину промене вискозности неког уља с променом температуре. Висок индекс вискозности значи релативно малу промену вискозности с променом температуре, док низак индекс вискозности показује велику промену вискозности с променом температуре. Индекс вискозности уља одређује се мерењем кинематичке вискозности на 40°C и 100°C , а употребом посебних таблица долази се до одговарајућег броја. Зависно од дубине рафинације, вредност индекса вискозности може бити висока (95-100), врло висока (до 120) и ултра висока (до 140). Од лошијих особина истичу се високе тачке течења, али се оне побољшавају поступком депарафинације и адитивима.

Прерадом нафтенских нафти добијају се минерална базна уља код којих су доминантни конституенти циклопарафина или нафтени. Добра особина им је ниска тачка течења, а непожељне су знатно нижа оксидациона стабилност и ниски индекси вискозности. Због тога се нафтенска базна уља могу користити само за производњу трафо уља и уља за механичку обраду метала.

3.2.2 Синтетичка базна уља

Синтетичка базна уља производе се хемијском синтезом из различитих компонената различитим технолошким поступцима. У новије време називају их неконвенционалним базним уљима.

За разлику од минералних уља, која представљају сложене мешавине угљоводоника различитих молекулских маса, структура и особина, синтетичка базна уља су угљоводоници или њихове смеше угљоводоника тачно дефинисаних молекулских маса и структура који одређују потребне особине: оксидациону и термичку стабилност, испарљивост, вискозно-температурске особине, температуре паљења и течења итд.

Због пооштрених захтева произвођача модерних механичких система за побољшањем перформанси мазива, синтетичка и полусинтетичка мазива добијају све већи значај. Удео синтетичких мазива у потрошњи је више од 10%, са годишњом стопом раста потражње од 10 - 15%.

Разлог овакве експанзије синтетичких мазива се може објаснити предностима синтетичких мазива над минералним у смислу: више оксидационе стабилности, више термичке стабилности, вишег индекса вискозности, ниже испарљивости, ниже тачке течења, више температуре паљења, биодеградабилности, нетоксичности, дужег века у експлоатацији, односно мањих трошкова одржавања. Главна препрека за интензивнијим развојем је висока цена производње синтетичких мазива. Међутим, разлика између цене синтетичких и минералних уља се временом смањује, што ће у наредном периоду повећати експанзију производње и примене синтетичких мазива.

Потрошња моторног уља огледа се, у првом реду, испаравањем које је много мање код синтетичког (7% – 8%) него код минералног уља (13% - 15%). Осим тога, синтетичко уље ствара мање талоба у мотору у односу на минерално и на тај начин мотор остаје чистији и дуготрајнији. У новије време синтетичка базна уља се све више користе за производњу најновијих верзија моторних уља, неких специјалних мазива и радних флуида.

Синтетичка мазива се првенствено користе тамо где се проблем подмазивања не може успешно решити мазивом минералног порекла, где то захтева спецификација произвођача механичког система и где трошкови производње или експлоатације могу поднети високу цену синтетичког мазива, [10].

3.3 Адитиви

Адитиви су материје које се додају мазивима у циљу побољшања или доношења неких нових особина мазивима, чиме се повећавају експлоатационо-техничка својства уља. То су синтетичке материје које су растворљиве у базном уљу, термички стабилне и врло ниске испарљивости, [11].

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

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

Побољшивачи тачке течења-Депресанти

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

Побољшивачи индекса вискозности-Импрувери

Једна од најважнијих карактеристика неког мазива је стабилност вискозности са променом температуре, односно вискозно-температурна својства. На ниским температурама ови адитиви готово не дејствују, а на високим температурама је пад вискозности мањи услед њиховог угушивачког деловања. Импрувери индекса вискозности су адитиви за побољшање индекса вискозности уља и користе се за производњу мултиградних уља, [11].

Адитиви против пенушања-антипенушавци

Стварање пене настаје продирањем мехурова ваздуха у уље или услед деловања детергентних и антиоксидационих адитива. Пена је врло непожељна нарочито у хидрауличним и редукторским уљима, погоршава подмазивање и узрокује губитак преноса снаге у хидрауличним системима. Антипенушавци спречавају образовање стабилне пене у уљу. Делују тако да смањују површински напон мехурића ваздуха (мехурићи пуцају) и тако доприносе брзој разградњи пене.

3.3.1 Адитиви за заштиту од хабања

Смањују хабање спрегнутих контактних површина брегасте осовине, подизача вентила, радилице, лежајева и др. Најширу примену имали су адитиви на бази цинка. Међутим све се мање користе у производњи уља за савремене моторе због некомпатибилности за догоревање несагорелог горива.

3.3.2 Адитиви за заштиту од високих притисака и ударних оптерећења

Да би се побољшала отпорност уљног филма мазивима се додају посебни адитиви који се према условима примене деле на три основне групе:

- адитиви за побољшање мазивих својстава (поларни адитиви)
- адитиви за смањење процеса хабања (*AW* адитиви)
- адитиви за подношење екстремно високих притисака (*EP* адитиви)

Као адитиви за побољшање мазивих својстава користе се природни естри масних киселина (репичино уље, рицинусово уље), синтетички производи (естри) као и аминске соли масних киселина. Побољшавају мазивост, што значи способност и брзу орјентацију молекула уља према металној површини (поларност) као и ефикасност њихове адсорпције на површини, [11].

Међу поларне адитиве спадају и „модификатори трења“. Као „модификатори трења“ користе се амиди, хлороване масне киселине, биљна уља као и адитиви на бази молибдендисулфида. Код моторних уља смањују трење при чему се смањује потрошња горива. Посебна пажња се посвећује избору овог типа адитива код средстава за обраду метала. Од адитива за смањење хабања (*AW* адитиви) највећу примену имају адитиви чија је метална компонента цинк.

Адитиви на бази цинка имају највећу ефикасност на вишим температурама (преко 1500 °C) при чему знатно смањују коефицијент трења, а тиме и интезитет хабања. У новије време ограничава се употреба адитива који садрже цинк. Ограничена употреба адитива који садрже цинк је посебно изражена код уља за подмазивање мотора савремених аутомобила који имају уграђен катализатор догоревања.

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

3.3.3 Адитиви за заштиту од оксидације-Антиоксиданти

Антиоксиданти су адитиви који повећавају постојаност уља према дејству кисеоника и представљају најчешће коришћене адитиве. Како су продукти оксидације корозивни, инхибирањем оксидације аутоматски се инхибира и корозија. Ови адитиви врше пасивизацију металне површине и на тај начин смањују каталитичко деловање метала на процес оксидације.

3.3.4 Адитиви за заштиту од корозије-Инхибитори корозије

Инхибитори корозије (антикорозивни адитиви) штите металне делове машинских елемената који су изложени дејству рђе и корозије. Корозија је електрохемијски процес и настаје агресивним деловањем киселих хемијских продуката, а рђа је вид корозије када ваздух или вода делују агресивно на металну површину. Основни механизам деловања антикорозивних адитива заснива се на формирању заштитног слоја на површини метала физичком и хемијском адсорпцијом. Антиоксиданти и детерџенти (базни адитиви) су такође инхибитори корозије. Поред ових адитива користе се: детерџентни адитиви, дисперзантни адитиви, деактиватори метала, адитиви емулгатори, адитиви демулгатори, [11].

3.4 Угушћивачи

Угушћивачи су супстанце које током процеса производње мазиве масти, под одређеним условима стварају у уљу структуре међусобно испреплетаних влакана формирајући сунђерасту структуру и тако претварају уље у мазиву маст. Сапуни на себе вежу од 80-95% базног уља. Угушћивачи могу бити сапунски (калцијумови, натријумови, литијумови, баријумови, алуминијумови итд.), комплексни сапуни и несапунски (гел, бентонит), [12].

3.4.1 Сапунски угушћивачи

Сапунски угушћивачи су производ реакције масне киселине и хидроксида алкалних метала. Према врсти угушћивача мазиве масти се називају: литијумове, натријумове, калцијумове, алуминијумове итд.

Са циљем добијања мазиве масти одређених карактеристика, могу се помешати два различита сапуна, па се такве масти називају мешовите.

3.4.2 Комплексни сапуни

Комплексни сапуни су сачињени од две комплексно везане соли, од којих је једна обична со више масне киселине, а друга со нискомолекуларне органске киселине. Комплексни сапуни дају мастима особине које се не би могле добити коришћењем једноставних металних сапуна или њиховом комбинацијом, [12].

Несапунски угушћивачи дају специјалне карактеристике мастима. Ове масти су термички врло стабилне и углавном немају тачке капања, због чега се најчешће користе за подмазивање на високим температурама или на местима где се захтева отпорност на деловање воде и киселина.

Као несапунски угушћивачи користе се:

- неоргански угушћивачи – високодисперзне модификоване глине, олеofilни силицијум диоксид, разни пуниоци и чврста мазива, оксиди метала у облику аморфног (финог) праха
- органски угушћивачи - чврсти угљоводоници, чађ, полиуреа, полимери, пигменти

Према врсти несапунског угушћивача мазиве масти се називају: бентонитне, силикагелне, пигментне, полиуреа масти, мазиве пасте.

3.5 Аналитика мазива

Особине мазива су одређене особинама базних уља и адитива. Све особине мазива се могу поделити на: физичке, хемијске и експлоатационе, [13].

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

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

У **експлоатационе особине** спадају: *EP* својства и отпорност на хабање (тест са четири кугле), отпорност мазивог филма (*Timken* тест), антихабајућа својства мазива код зупчаника (*FZG* тест или *RYDER* тест), антихабајућа својства хидрауличних уља (*Vickers* тест) итд.

4. Избор мазива

4.1 Уља за подмазивање мењача и диференцијала моторних возила

Задатак зупчастих преносника, мењача и диференцијала (слика 9.) је да пренесе снагу мотора на осовине и точкове возила. При томе су зуби зупчаника изложени екстремно високим притисцима. Највећи притисци се јављају при старту и заустављању возила. Развој моторних возила иде у правцу све већих снага и боље стартности, што има за последицу појаву већих сила клизања, односно виших радних температура на зупчаницима мењача и диференцијала, [14].



Слика 9. Изглед мењача и диференцијала

За подмазивање преносника у овако строгим условима рада могу да задовоље само мазива уља произведена на основу висококвалитетних базних уља и одабраног пакета адитива. Базна уља могу бити минерални рафинати, хидрокрекована уља или синтетички угљоводоници. Адитиви који се користе за производњу ових уља су: адитиви за заштиту од корозије и рђе, адитиви за заштиту од високих притисака и хабања, адитиви за побољшање тачке стињавања, адитиви за заштиту од оксидације, деактиватори метала, адитиви против стварања пене и модификатори трења.

Да би се задовољили сви фактори који повећавају тежину радних услова, уљу се додају специјални *EP* (*Extreme Pressure*) адитиви, који дају и различите квалитетне нивое ових уља. *EP* адитиви су на бази сумпора, фосфора или хлора. На повишеним температурама, које су последица високих притисака и ударних оптерећења, наведени адитиви хемијски реагују са металном површином градећи одговарајућа једињења и филмове који штите металну површину од хабања и оштећења зуба зупчаника.

Треба имати у виду да *EP* адитиви могу да изазову корозију на деловима од обојених метала, па се њихова количина у уљу мора избалансирати тако да могу стварати заштитни филм, а да не изазивају корозије на металним површинама. Задатак уља за зупчаничке преноснике: смањење трења и хабања, хлађење, одвођење честица метала и нечистоћа из контактних зона и заштита од корозије.

За избор уља неопходни су подаци о вискозности и подаци о квалитету уља, односно о његовим радним особинама. Као и код моторних уља, *SAE* вискозне градације уља за мењаче и диференцијале се односе искључиво на вискозност и не одређују квалитетни ниво уља.

Према распону вискозности мултиградна уља за мењаче и диференцијале могу се поделити у две категорије

- мултиградна уља уског распона вискозности *SAE 80W-90* и
- мултиградна уља широког распона вискозности *SAE 75W-90*, *SAE 85W-140*

Вискозност има значајан утицај на способност ношења оптерећења, на лакоћу пребацивања брзина у мењачу као и на могуће уштеде горива. Мултиградна уља, која се у последње време све више користе, омогућују компромис између потребне вискозности код високих температура, лаког пребацивања брзина и малог унутрашњег трења приликом покретања возила код ниских температура.

4.1.1 Избор уља за мењаче и диференцијале

Захтеви у погледу квалитета уља за мењаче и диференцијале, [14]:

- путнички аутомобили се одликују великом брзином, а теретна возила и аутобуси великим обртним моментом. Ова уља морају задовољити оба радна услова
- својство против хабања и заривања код екстремних притисака и ударних оптерећења
- добре вискозно-температурне карактеристике, што значи лаки пренос приликом хладног старта и довољна јачина уљног филма на високим радним температурама
- добра оксидациона и термичка стабилност што обезбеђује дуг интервал употребе уља. Код модерних возила температура уљног пуњења може бити и до 140 °C
- заштита од корозије нарочито у присуству воде
- компатибилност са заптивкама
- својство против стварања пене

У погонском систему возила, преносници треба да омогуће оптималну усклађеност између броја обртаја мотора и броја обртаја точка. То се постиже помоћу мењача и диференцијала. Осим тога, код уздужно уграђених мотора ток енергије се мора преусмерити за 90°. Компензациони преносник компензује разлику у броју обртаја код вожње у кривини. При избору уља првенствено треба поштовати препоруке произвођача возила које се односе на вискозне *SAE* градације и одговарајуће *API GL* категорије.

Синхронизовани мењачи: Због синхроних прстенова не дозвољава се употреба високо адитивираних уља *API GL-5* већ се искључиво препоручује *API GL-4*. Неки произвођачи синхронизованих мењача захтевају *API GL-3* па и *GL-1*, а неки чак прописују уља за аутоматске мењаче па и моторна уља, што наравно, треба поштовати.

Несинхрони мењачи су релативно неосетљиви на *EP* адитиве па се могу користити уља обеју спецификација -*API GL-4* или *API GL-5*.

Диференцијали: Пошто пар хипоидних зупчаника подноси веома висока оптерећења преко врло мале додирне површине, скоро тачке, обавезно се за њихово подмазивање препоручују хипоидна уља која одговарају спецификацији *API GL-5*.

За ламеларне (шпер) диференцијале постављају се посебни захтеви у односу на трење. За ове типове диференцијала производе се посебна уља која носе ознаку *LS* (*Limited slip* - ограничено подмазивање).

4.2 Редукторска уља

Савремени индустријски зупчаници и редуктори раде обично у условима хидродинамичког и мешовитог подмазивања. Међутим, у ваљаницама и на рударској опреми често су изложени ударним оптерећењима. То има за последицу пораст радних температура и до 100°C, [15].

За такве услове рада потребно је изабрати уље:

- високе оксидационе и термичке стабилности са *EP* адитивима
- високе тачке кључања и ниске тачке течења
- високог индекса вискозности
- одређене вискозне градијенте према конструкционим карактеристикама склопа

Задатак редукторских уља није само да врши функцију подмазивања лежачега и зупчаника у циљу смањења трења и хабања већ и заштита од корозије, хлађење, заптивање и заштита од високих притисака. Редукторска уља садрже *EP* (*Extreme Pressure*) адитиве који онемогућавају директан контакт метала о метал приликом спрезања зупчаника. Приликом рада долази до повећања температуре у зони спрезања зупчаника тако да се на повишеним температурама (изазване појачаним трењем) активирају *EP* адитиви који формирају заштитни површински слој који онемогућава хабање металних површина.

Најважније особине редукторских уља су:

- вискозност - уље мора да обезбеди довољну јачину уљног филма између зубаца зупчаника у свим радним условима, а истовремено да добро одводи топлоту са места спрегнутих зупчаника
- заштита од високих притисака и ударних оптерећења - редукторска уља садрже *EP* адитиве (*Extreme Pressure*) који спречавају директан контакт метала о метал, који се активирају код повећаног трења, односно повишених температура, формирају заштитни површински слој који спречава хабање металних површина и оштећење зуба зупчаника
- отпорност према оксидацији - редукторска уља садрже адитиве антиоксиданте који спречавају процес оксидације уља (старење), односно спречавају појаву лакова, депозита и киселих продуката

- отпорност према корозији - адитиви против корозије у редукторском уљу спречавају процес корозије металних површина
- отпорност према стварању пене - адитиви антипенушавци спречавају појаву пене која је узрок некавалитетног подмазивања и локалних прегревања
- способност издвајања воде - адитиви демулгатори у редукторском уљу имају улогу одвајања воде из уља, чиме се спречава процес корозије металних делова

За редукторска уља важне су и две посебне особине: способност за брзо издвајање воде (демулговање) и брзо издвајање ваздуха.

5. Оштећење зупчастих преносника

Зупчасти преносници снаге (слика 10.) су витални део машина, па се захтева поуздан рад зупчаника да не би дошло до оштећења и лома машина. И поред тога у току рада долази до различитих облика отказа зубаца зупчаника и промене радних карактеристика зупчастих преносника, што може да проузрокује отказ целог машинског склопа чији је зупчаник део. Велика пажња се посвећује изучавању различитих облика отказа зубаца да би се спречили или бар успорили процеси њиховог настајања и ширења.

Неправилности у току експлоатације зупчастог преносника, које могу довести до оштећења зупчаника, па и до његовог лома, бројне су и обично делују истовремено и удружено, [4].



Слика 10. Зупчасти преносници

Од највећег утицаја за оштећење зубаца зупчаника су: неадекватно подмазивање, одступања геометрије спрезања зубаца зупчастог пара (услед непрецизне монтаже зупчастог пара или као последица похабаности зубаца и осталих делова зупчастог преносника), нехомогености у материјалу зупчаника настале у току израде, неадекватна термичка обрада, ударна оптерећења која прелазе номиналне вредности за које је зупчасти пар прорачунат.

Бокови зубаца зупчаника у захвату циклично су изложени изразито високим контактним притисцима и комбинованом деловању котрљања и клизања. Због критичности тих оптерећења, оштећења бокова зубаца су, поред ломова зубаца у корену, један од најчешћих начина страдања зупчаника при раду. Деле се на површински иницирана оштећења и на она која су иницирана испод површине бока зупца. На појаву површински иницираних оштећења значајан утицај имају храпавост површине и постојећа површинска оштећења, па су зато оштећења чешћа код зупчаника с грубљом површинском обрадом бока зупца који уз то раде у проблематичним условима подмазивања.

Код високооптерећених озубљења с отворднутом и глатком површином бока зупца, за чију се израду примењују квалитетни материјали, чешћа су оштећења која се иницирају испод површине. Код каљених елемената важно је уочити да се од тврде површине према мекшем језгру осим тврдоће мења и с њом повезана заморна чврстоћа материјала.

Због тога осим о интензитету и расподели напрезања положај критично оптерећених места зависи и од вредности тврдоће односно заморне чврстоће материјала, које су постигнуте после његове термичке обраде.

Неповољан међусобни однос напрезања и границе течења какав се често јавља на прелазу између тврдог површинског слоја и мекшег језгра може довести до знатних локалних пластичних деформација материјала. Повремена преоптерећења, која су у погону неизбежна, могу ту појаву додатно интензивирати, што по правилу доводи до акумулације оштећења и коначно до појаве подповршинских пукотина.

Тако настале пукотине у великом броју случајева одређено време напредују испод површине бока зупца, док се не испуне услови за њихово скретање према површини зупца или у дубину према супротном боку, после чега долази до коначног лома и откидања већег комада материјала па и целог зубца.

Утицаји који значајно доприносе настанку споменутих оштећења бокова зубаца зупчаника јесу неодговарајућа дубина отворднутог површинског слоја, неодговарајући профил тврдоће по дубини отворднутог слоја и по висини зубца, прениска тврдоћа језгра, повремена преоптерећења озубљења и неправилности у захвату зубца изазване нетачностима при изради и монтази. Како је већ индиректно назначено, основни узроци појаве споменутих оштећења бокова зубаца, јесу циклични променљива напрезања и деформације материјала, односно његово замарање.

6. Класификација оштећења зубаца

Овде ће бити описани различити облици оштећења и разарања зубаца зупчаника и дефинисани основни појмови. Детаљно су описани облици оштећења зубаца високооптерећених зупчастих парова који раде у незаштићеној околини и изложени су утицају атмосферских услова, какви су у овом раду посебно испитани, [5].

У зависности од врсте оптерећења и радних услова на зупцима спрегнутих зупчаника се јавља више од 20 различитих типова оштећења. Према анализама различитих аутора, дефиницијама оштећења зубаца према стандарду *ISO 10825*, као и на основу искуства из испитивања зупчастих парова изведених у Институту за испитивање материјала, основни типови оштећења зубаца зупчаника су:

1. Површинска оштећења
2. Огреботине
3. Трајне деформације
4. Површинска оштећења услед замора
5. Прслине и
6. Лом зубаца

1. Површинска оштећења, разлози који могу довести до површинских оштећења бокова зубаца су: хабање услед клизања, корозије, прегревања и ерозије.

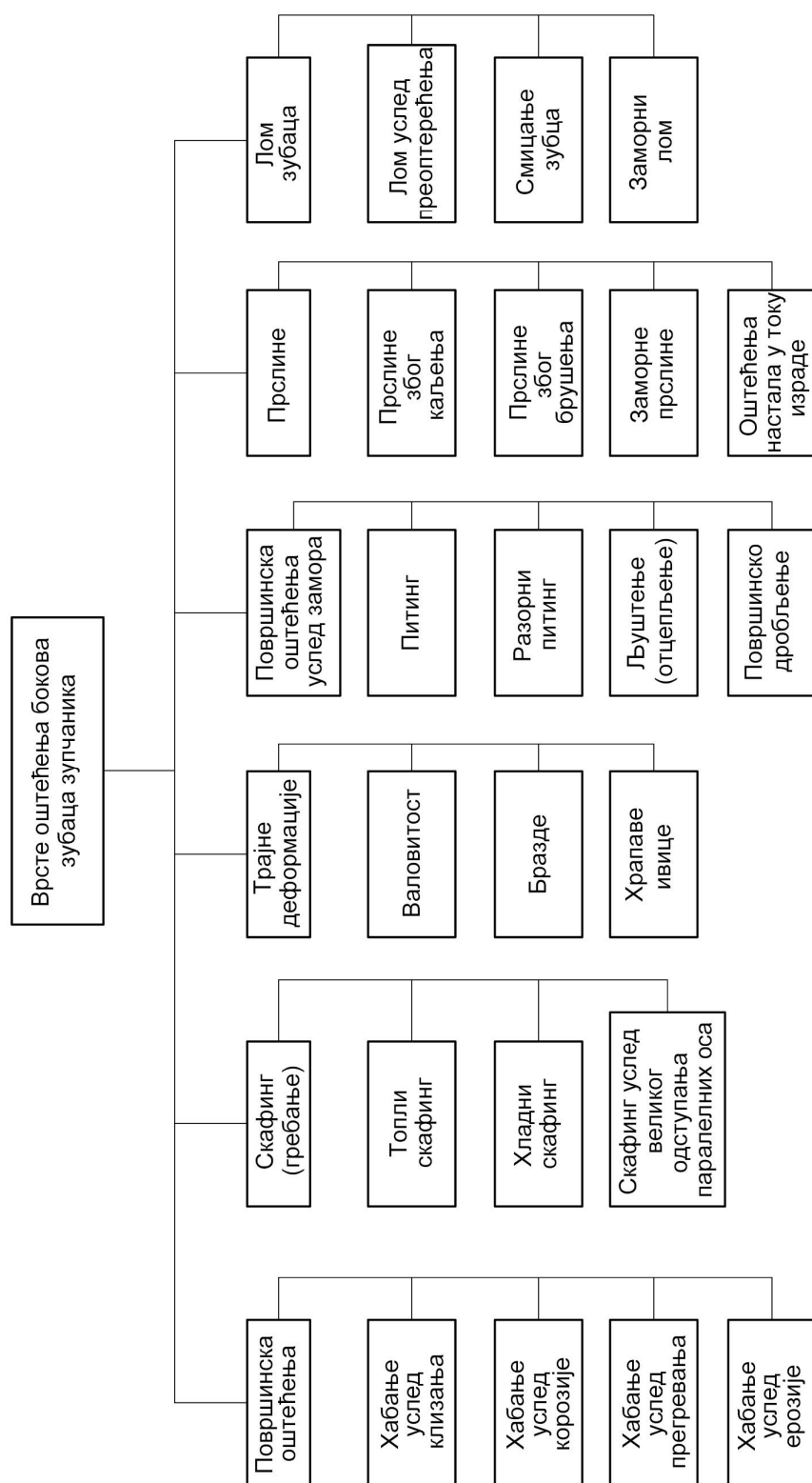
2. Скафинг (гребање). Под дејством великих површинских притисака и брзина клизања, а јавља се као вид специфичног хабања са браздама и зарезима у смеру клизања.

3. Трајне деформације се појављују као утиснута места на боковима зубаца при пролазу страних честица кроз захват у виду: валовитости, бразди или храпавих ивица.

4. Заморна оштећења површине материјала настају због поновљених оптерећења бокова зубаца у току рада, уклањањем дела материјала и формирањем прслина.

5. Прслине зубаца настају због каљења, брушења или замора.

6. До лома зупца може доћи због преоптерећења, смицања зупца, после пластичне деформације и због замора.



Слика 11. Табеларни приказ врста оштећења зубаца

6.1 Површинска оштећења

Разлози који могу довести до површинских оштећења која се јављају на радним површинама бокова зубаца су:

- хабања услед клизања
- корозије
- прегревања и
- ерозије

Хабање услед клизања спада у најчешће облике оштећења зубаца. Хабање као општи појам се односи на уклањање материјала са површина које се клизају једна по другој. Он обухвата и абразивно дејство штетних примеса у мазиву - абразивно хабање, и хабање због локалног лепљења и одвајања честица материјала зубаца - адхезионо хабање.

Хабање услед клизања јавља се у току експлоатације од самог почетка у виду удубљења у зони велике брзине клизања. Прво се јавља између кинематског и подножног круга, а затим између кинематског и теменог круга и шири се на целу површину активног дела бока зупца. На почетку рада зупчастог пара јавља се тзв. хабање у току разраде, које има позитиван ефект на расподелу оптерећења у спрези два зупца, јер доводи до глачања површине машински обрађеног бока зупца. Може се јавити у виду умереног хабања и у виду полирања.

Код умереног хабања примећује се да је материјал скинут са површина главе и ноге зупца, док је полирање веома спор процес хабања у току којег се хапавост контактних површина постепено смањује (до сјаја огледала). Хабање које после одређеног периода рада достиже критичан обим дефинише се као прекомерно хабање.

Посебни облици хабања услед клизања су: умерено гребање, изражено гребање и интерферентно хабање. Код умереног гребања јављају се ситни жлебови у правцу клизања, неправилно распоређени по боковима зупца. Изражено гребање је врста абразивног хабања присутним углачаним линијским жлебовима у правцу клизања зупца, као последица копања површина спрегнутих зубаца оштрим ивицама храпавих површина или тврдим честицама прилепљеним за њих.

Интерферентно хабање је хабање врха једног зупца и/или подножја зупца који је с њим у спрези. Као резултат овог хабања јављају се удубљења у подножјима и заобљења на врховима зубаца два спрегнута зупчаника. Хабање се може смањити избором мазива и повећањем квалитета обраде радних површина, као и избором материјала. Бокови зубаца малог зупчаника треба да имају већу тврдоћу, јер трпе већи број промена оптерећења у току рада.

Корозија је вид површинског разарања бокова зубаца. Хемијска корозија представља деградацију површинских слојева материјала под хемијским дејством примеса из мазива. Контактна корозија је површинско оштећење због понављања малих померања једне контактне површине по другој, што доводи до убрзаног оштећења абразијом.

Љуспање се јавља због процеса оксидације у току термичке обраде, [16]. При раду зупчастих парова могу се јавити високе температуре које доводе до прегревања, праћеног зоном и пластичном деформацијом бокова зубаца. Посебан вид оштећења површина бокова зубаца је ерозија: кавитацијска, хидраулична или електрична.

Кавитацијска ерозија настаје због високофреквентних вибрација или када је мазиво загађено водом, ваздухом или другим гасовима.

Хидрауличну ерозију изазива дејство млаза или струје течности, која садржи ваздух и ситне честице. Електрична ерозија се јавља при пражњењу електричног лука или варница између спрегнутих бкова, праћена малим кретањима глатких ивица на боковима зубаца и некад, већим сагорелим областима.

6.2 Скафинг (гребање)

Гребање изазива оштећење бокова зубаца. Под дејством великих површинских притисака и брзина клизања, а јавља се као вид специфичног хабања са браздама и зарезима у смеру клизања. Хладно суво гребање се јавља при обимним брзинама испод 4 m/s, код зупчаника израђених од побољшаног челика са нижим квалитетом обраде, релативно ретко, а топло гребање настаје при великим брзинама клизања и површинским притисцима, код термички обрађених цилиндричних зупчаника. Пример израженог гребања зупчаника (слика 12.).



Слика 12. Изражено гребање

6.3 Трајне деформације

Трајне деформације се појављују као утиснута места на боковима зубаца при пролазу страних честица кроз захват у виду: валовитости, бразди или хрпавих ивица, [17].

- **Валовитост** представља скуп периодичних, редовно поновљених, блиских по димензијама испуста и удубљења. Ове деформације имају облик малих гребена, нормалних на правац клизања. Гребени су валовити и дају површини бокова изглед сличан песку или талогу, у мањој мери растуреном ветром или водом.

- **Бразде** су посебан вид оштећења од изразитих гребена и жлебова, који настају пластичном деформацијом, али понекад и додатним хабањем бокова зубаца.

Најчешће се јавља на зупцима спороходних зупчаника, израђених од материјала мале тврдоће, са великом компонентом клизања у правцу линије контакта зубаца.

- **Храпаве ивице** представљају деформацију у облику грубих, често оштрих, издужених ивица на крајевима зубаца, насталих услед великих оптерећења праћених клизањем или услед сувог клизања, а понекад у току производних операција.

- **Пластична деформација** се јавља најчешће у случајевима прегревања зупчаника, комбиновано са недовољним подмазивањем, [5].



Слика 13. Пластична деформација у облику таласа (*Rippling*)

Риплинг је (слика 13.) периодични талас налик формацији који се јавља под правим углом на правац клизања, има изглед рибље крљушти и најчешће се јавља на каљеним зупчаницима. То је пластична деформација у микро форми, и најчешће се јавља због танког слоја уља.



Слика 14. Пластична деформација зупчаника

Оваква оштећења (слика 14.) се могу јавити и услед недовољне тврдоће материјала и преоптерећења зупчаника.

6.4 Заморна површинска оштећења

Заморна оштећења површине материјала настају због поновљених оптерећења бокова зубаца у току рада, уклањањем дела материјала и формирањем прслина. Јављају се у виду питинга, љуспастог питинга, љуштења и површинског дробљења, као последица површинских и потповршинских напона од контактеног оптерећења. Најчешће се јавља питинг (слика 15.) у виду малих јамица величине од неколико десетина μm до 0,2 mm. Питинг се углавном појављује након више од 10^4 промена оптерећења, односно спрезања истог пара зубаца. Прслине које настају обично су под углом од 5° до 20° у односу на бочну површину, и леже у правцу нормале на главни нормални напон.

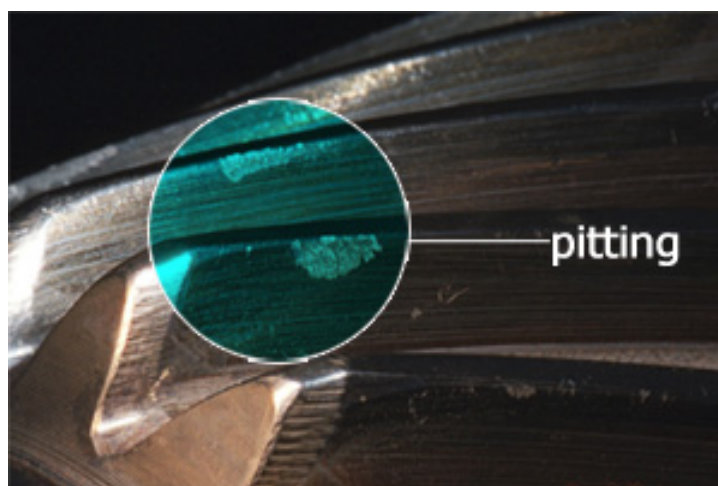
Експериментална испитивања, су показала да су активне површине бокова зубаца испод кинематске површине (нога зупца) више изложене питингу него површине бокова изнад ње код погонског и код гоњеног зупчаника, али је чешће код погонског зупчаника. Разликују се почетни, прогресивни и микро питинг, [5].

Почетни питинг се јавља на почетку рада зупчастог пара, чак и одмах после разраде. Препознаје се као оштећење у виду малих, плитких јамица, које су последица неправилне обраде површина а може прећи у прогресивни питинг. Почетни питинг може елиминисати почетне неправилности контактних површина и тиме зауставити заморно оштећење.

Микро питинг је појава мреже микро јамица или микро прслина, као резултат недовољне дебљине уљног филма у односу на оптерећење.

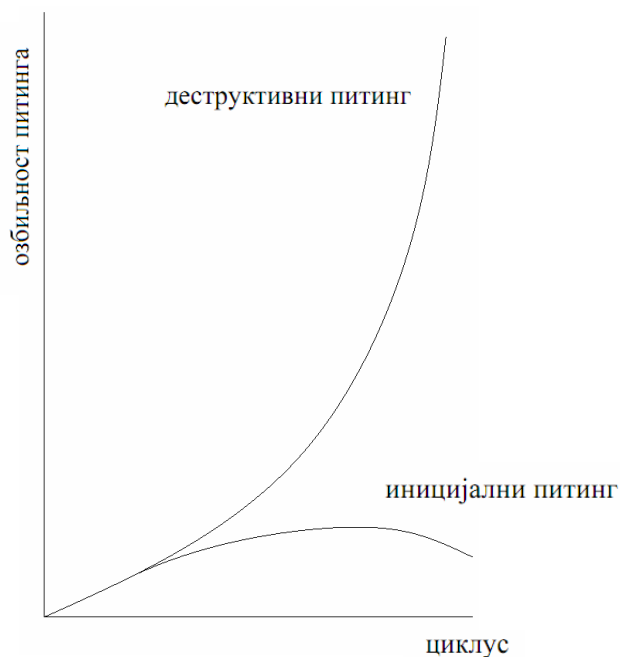
Разорни питинг је вид оштећења површине зупца који укључује пробијање и избацивање танких љуспица материјала у великој области, чиме се стварају плитке шупљине приближно константне дубине, облика троуглова са врхом надоле.

Љуштење-отцепљење је оштећење слично љуспастом питингу, при чему откинуте честице често захватају дубину већу од дубине каљења. Обично се јавља код отворднутих површина бокова цилиндричних зупчаника са правим зупцима. Површинско дробљење је тежак облик љуштења због раста прслина уз цепање већих делова површински каљеног челика.



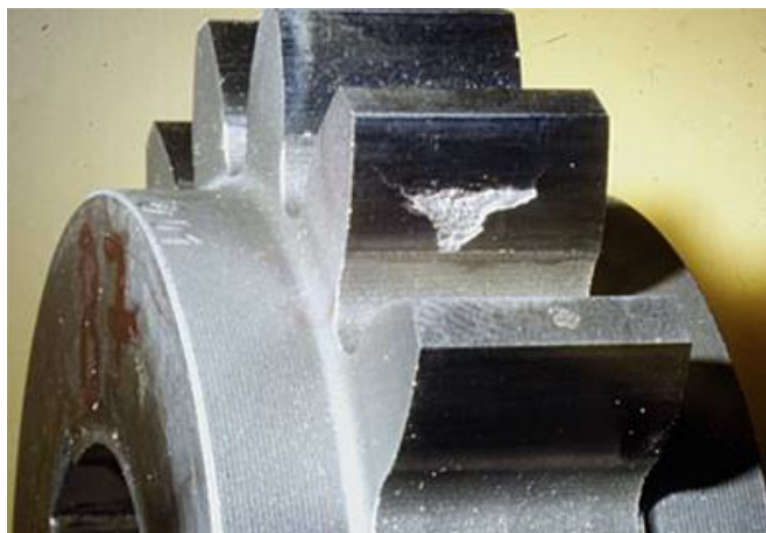
Слика 15. Питинг

Енглеским појмом *flake pitting* (енгл. *flake* = пахуљица танки лист) означава се оштећење тространог облика на ширем подручју бока зупца. Настаје одвајањем танких љускица материјала од основног материјала зупца, [18].



Слика 16. Дијаграм развоја питинга

На дијаграму (слика 16.) се види да иницијални питинг врло брзо прераста у деструктивни, после кога долази до лома зупца.



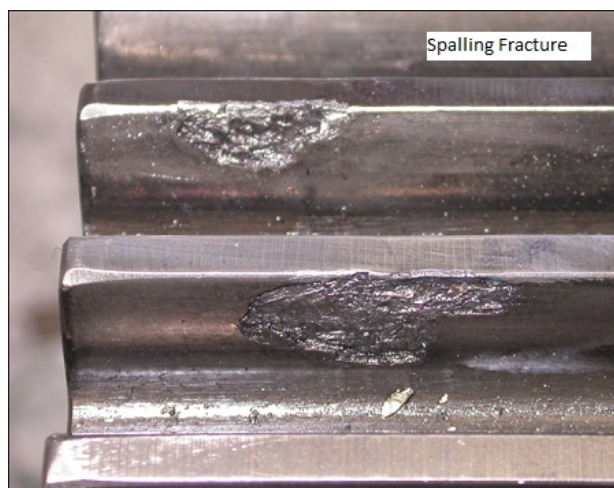
Слика 17. Оштећење зупца (*flake pitting*-танка пахуљица)

Енглески појам *spalling* (енгл. *spall* = крхотина) назив је за исподповршински иницирано оштећење слично тзв. *flake pittingu* које се такође по правилу простире преко веће површине бока зубца, али код којег су честице веће дебљине (слика 18.).

Инициране пукотине се у почетку шире испод површине зупца и то паралелно с њом, да би након достизања одређене величине скренуле према површини зупца.

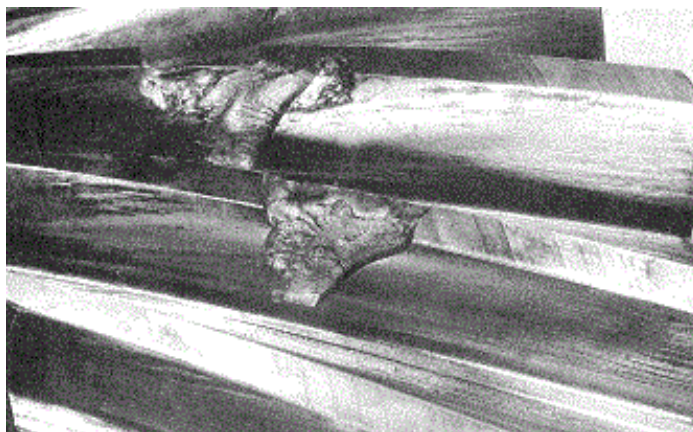
Код зупчаника с површински отворнутим зубима после тога долази до одвајања већег комада површинског слоја зупца, при чему на боку остаје значајно оштећење у облику плитке јаме чије се дно по правилу налази на прелазу између тврдог површинског слоја материјала и мекшег језгра.

Код прокаљених или неотворнутих зупчаника реч је о масовним скуповима повезаних и међусобно преклапајућих плитких јамица сличних онима код јамичења, али већих размера, [6].



Слика 18. Spalling (Крхотина)

Енглеским називом *case crushing* (слика 19.) означава се специфично оштећење узроковано значајним преоптерећењима, које се појављује углавном на зупцима с цементираним боковима испод отворнутог површинског слоја, материјал се у значајној мери пластично деформише, што доводи до иницијације заморних пукотина. Поновљено деловање оптерећења подстиче њихово ширење паралелно с површином бока те после одређеног времена скретање према језгру и/или према површини зуба. Због свега наведеног, у захваћеном делу, језгра престаје пружати адекватан ослонац површинском слоју те се он у великим комадима одваја од основног материјала зупца, [5].

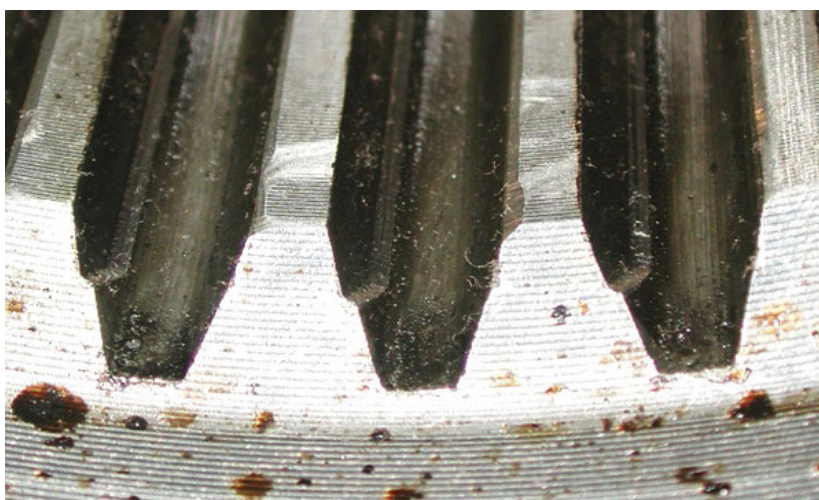


Слика 19. Оштећење изазвано великим преоптерећењем (*case crushing*)

6.5 Прслине

Прслине зубаца настају због каљења, брушења или замора. До прслина због каљења долази при термичкој обради због прекомерних унутрашњих напона. Ове прслине се често откривају тек после одређеног времена рада или при брушењу. Прслине због брушења јављају се у току или после обраде брушењем, и углавном имају правилан распоред.

Ове прслине су кратке, не много дубоке, јављају се као серије приближно паралелних прслина, најчешће нормално на правац путање брусног точка или у облику решетке од прслина. Заморне прслине резултат су понављања наизменичних или цикличних оптерећења, чији су интензитети најчешће знатно мањи од затезне чврстоће материјала.



Слика 20. Оштећења настала у изради

Хоризонтална оштећења (слика 20.) су настала током процеса производње. Ова оштећења су последица грубе обраде. Оваква оштећења изгледају као пукотине настале у процесу експлоатације, али нису. Потребно је применити неки од метода за проверу да би се утврдило право стање и евентуално зупчаник користио.

Тоцила су на овом зубу зупчаника оставила трагове који могу изгледати као липинг, али нису. Обрадни процес може оставити трагове и на ивици зупца зупчаника. Током експлоатације одпадају и изазивају додатна оштећења. Овакве ивице могу настати и као последица великог притиска на зупце и лошег подмазивања током експлоатације, [18].

6.6 Лом зупца

До лома зупца може доћи због преоптерећења, смицања зупца, после пластичне деформације и због замора (слика 21.). Лом услед преоптерећења је резултат једнократног или малог броја дејства великог оптерећења. Овај лом се јавља као крт, жилав или квази-крт лом, [6].



Слика 21. Зупчаник са поломљеним зупцима



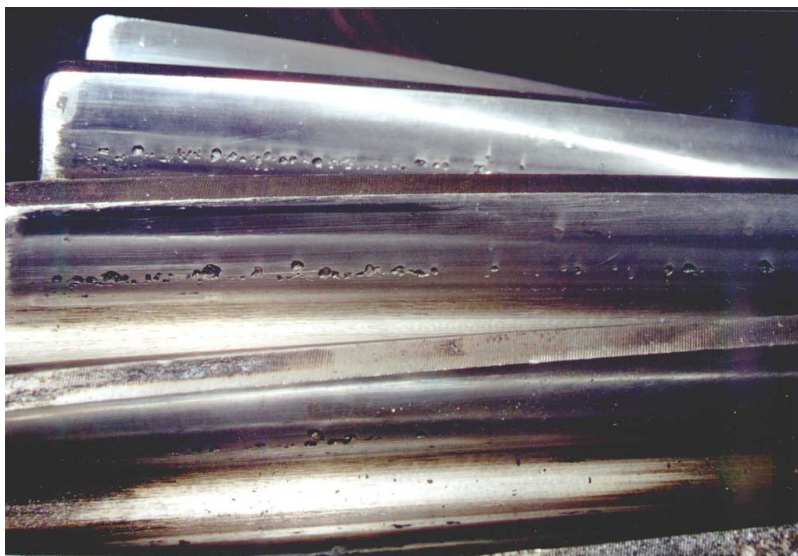
Слика 22. Пример типичног ломљења зупца

Смицање зупца је лом са површином одсеченом слично машински обрађеној површини. Овај отказ се јавља код зупчаника од материјала ниске чврстоће, спрегнутог са зупчаником од јачег материјала, при једнократном преоптерећењу. Заморни лом се јавља због завојног оптерећења или као лом дела зупца.

Заморни лом од савијања настаје због раста прслине током великог броја циклуса оптерећења. На површини лома издвајају се две зоне: површина замора и површина коначног лома. У зони замора нема знакова пластичне деформације, а површина зоне коначног лома је глатка и често испресеца на затвореним линијама, често и са стријама узастопног раста прслине.

Заморни лом дела зупца настаје на крајевима зубаца цилиндричних и коничних зупчаника, због концентрације оптерећења уз изражени питинг, који иницира заморну прслину у суседном зупцу.

Сложено оптерећење зубаца изазива различите видове оштећења, који подстичу једно друго. Зато је потребно прорачуном носивости зупчаника обухватити све критеријуме: чврстоћу бокова и подножја зубаца, *scuffing* (зарибавање) и хабање, [17]. Примери почетног (слика 23.) и прогресивног питинга (слика 24.).



Слика 23. Питинг бока зупца-почетни



Слика 24. Питинг бока зупца-прогресивни

7. Зупчасти преносници снаге

Отпор који се јавља при релативном померању два тела у додиру или тела у средини која га окружује, а који називамо трењем, прати и рад зупчастих преносника. Основне последице трења у зупчаницима су расипање енергије, различити степени искоришћења, хабање и повреде зупчаника. Параметри којима се најчешће квантифицира трење у зупчаницима су: коефицијент трења и губици енергије у спреси, [1].

7.1 Врсте хабања

У зависности од доминантног механизма хабања и услова под којима се контакт између елемената система остварује, извршене су бројне класификације, [5].

Најприсутнија је следећа:

- Адхезивно хабање (механичко)
- Абразивно хабање (механичко)
- Заморно хабање (механичко)
- Ерозионо хабање (механичко)
- Кавитационо хабање (механичко)
- Корозионо хабање (хемијско)
- Оксидационо хабање (хемијско)
- Вибрационо хабање (фретинг)

Адхезивно хабање настаје када дође до директног контакта два зупчаника, због недовољног подмазивања.

Абразивно хабање је облик одстрањивања материјала са површина у контакту као последица задирања неравнина површине веће тврдоће или чврстих делића разорног порекла у површину мање тврдоће.

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

Ерозионо хабање настаје када се оштре честице неке чврсте материје залепе на једну од клизних површина.

Кавитационо хабање је посебан облик ерозије у коме мехурићи паре у течности који се формирају у зони ниског притиска, а затим имплодирају (урушавају се) у зони високог притиска, па тада откидају делиће чак и каљеног материјала.

Корозионо хабање је хемијско-физички процес чији је резултат промена и слабење својства метала услед дејства спољашње средине у којој се метал налази.

Оксидационо хабање. Кисеоник, активна компонента ваздуха, реагује необично брзо са свим металима, осим племенитих.

Вибрационо хабање, хабање између две површине до којег долази до осцилаторног кретања релативно малих амплитуда или вибрација.

7.1.1 Адхезивно хабање

Адхезивно хабање представља основни вид механичког трошења или хабања материјала при клизању површина у међусобном контакту (слика 25.). Зависно од параметара који дефинишу услове контакта и кретања, адхезивно хабање може имати различити интензитет и различите последице, [16].

У најопштијем случају адхезивно хабање, после периода уходавања и прилагођавања површине, прелази у стационарно стање, које се манифестује у равномерном и умереном одношењу материјала са површине машинског елемента и поступној измени макрогеометрије елемента. То је нормално адхезивно хабање.

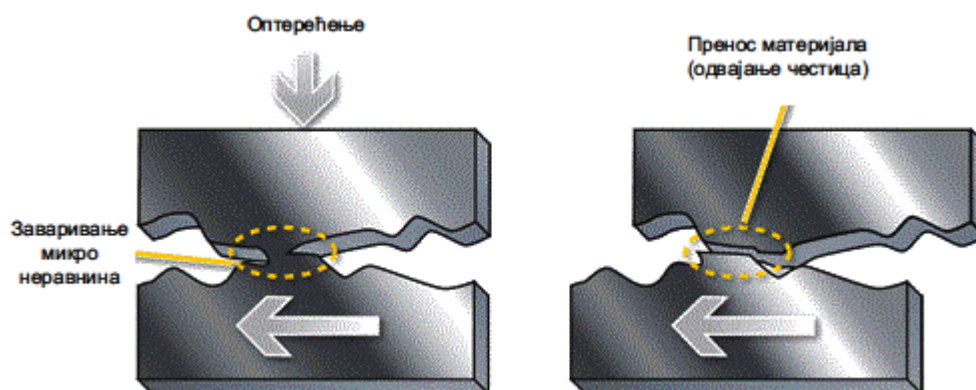
До адхезивног хабања (слика 28.) долази при контакту два метала, због прегревања тј. недовољног подмазивања површина у контакту. У случају адхезивног хабања формирају се микро – варови.

Постоје две врсте адхезивног хабања:

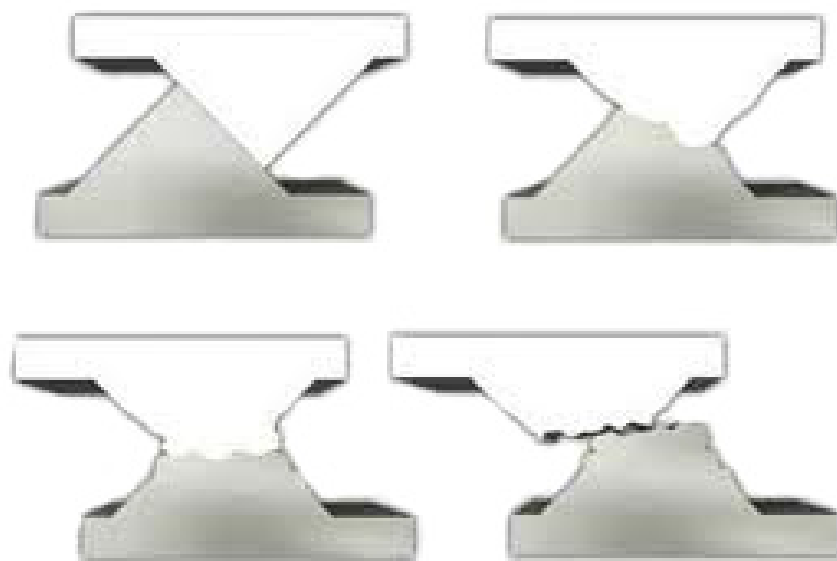
- тешко: има за последицу ослобађање релативно великих честица метала (од 50 до 200 микрона) које се називају “*scuffing*” и које доводе до отказа мотора
- умерено: има за последицу формирање слојева оксида на контактним површинама

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

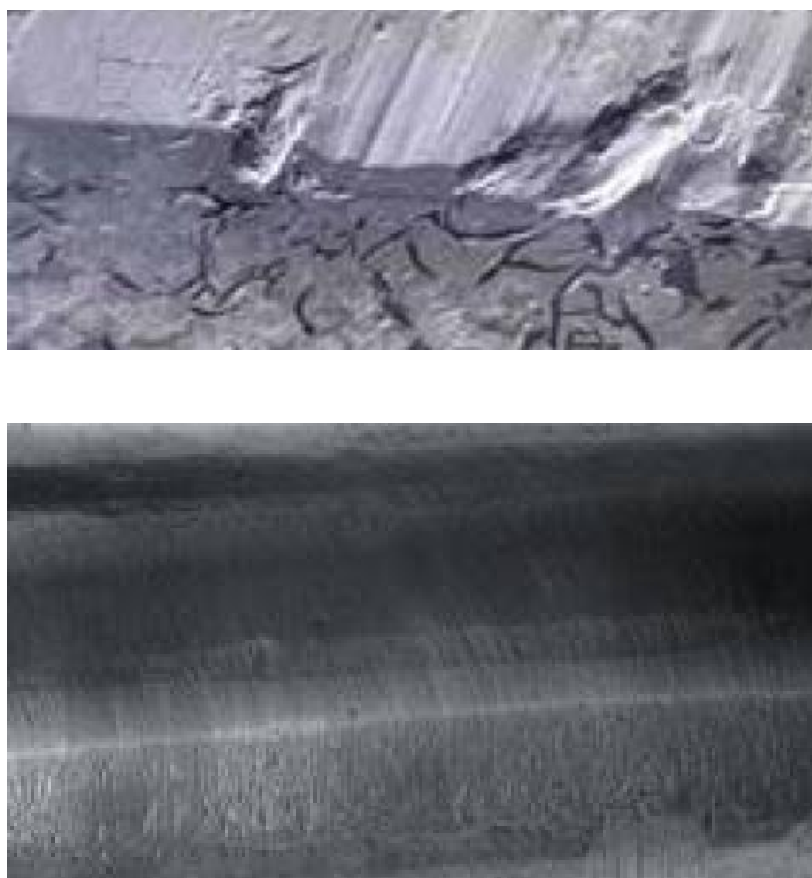
Адхезивно хабање се може избећи употребом мазива која у свом саставу имају *EP* и *AW* адитиве и наравно одговарајућу вредност вискозитета.



Слика 25. Шематски приказ адхезивног хабања



Слика 26. Фазе настанка адхезивног хабања: микро-вар, крхотина



Слика 27. Последице адхезивног хабања



Слика 28. Адхезивно хабање

У најопштијем случају адхезивно хабање, после периода уходавања и прилагођавања површине, прелази у стационарно стање, које се манифестује у равномерном и умереном одношењу материјала са површине машинског елемента и поступној измени макрогеометрије елемената, [5].

То је нормално адхезивно хабање (слика 29.).



Слика 29. Дијаграм нормалног адхезивног хабања

У условима нормалног хабања неподмазаних површина или при непотпуном подмазивању и за стационарне услове је запремина издвојеног материјала (ΔV) приближно пропорционална нормалној сили која делује на површине (F_p) и дужине клизног пута (s):

$$\Delta V = k F_p s \quad (1.7)$$

где је:

k – фактор пропорционалности је карактеристично својство материјала и назива се специфични фактор хабања (променљива величина)

F_p – нормална сила која делује на површине

s – дужина клизног пута

Те променљиве величине су на пример температура која може променити својства материјала нарочито његову тврдоћу која у значајној мери утиче на величину свих врста механичког трошења. Иако има реципрочну вредност напона (mm^2/N), изражава се бројчано у mm^3 однесеног материјала по јединици силе и јединици клизног одстојања ($mm^3/Nmm=mm^2/N$).

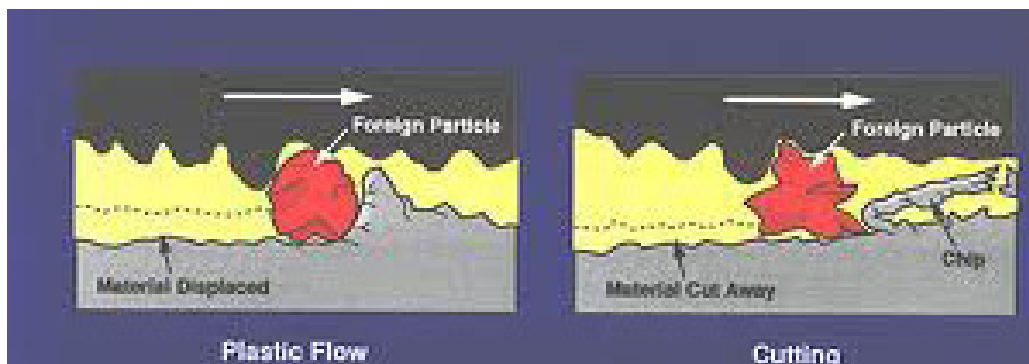
Фактор p_v [N/ms] је веома значајан параметар за процену величине механичких истрошења за одређени материјал. Фактор p_v се често усваја за процену века трајања клизних лежаја или других клизних елемената и представља одређени критеријум за сигурност рада у одређеном временском периоду.

Адхезивно хабање је изузетно сложени физичко-механички, термички и хемијски процес у коме непосредне адхезивне везе врхова неравна површина у контакту и релативном кретању учествују делимично, и у различитој мери, зависно од материјала површина, врсте подмазивања и радних услова.

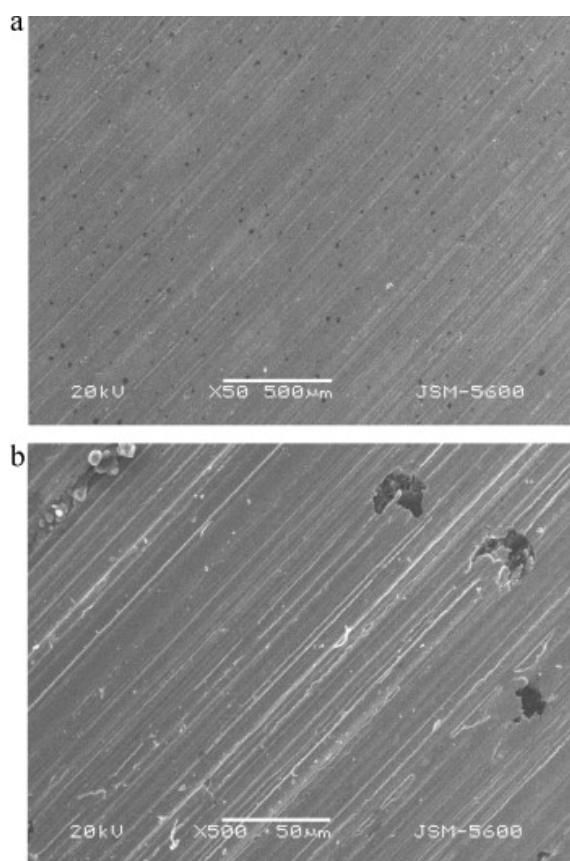
7.1.2 Абразивно хабање

Абразивно хабање је облик одстрањивања материјала са површина у контакту као последица задирања неравна површине веће тврдоће или чврстих делића разог порекла у површину мање тврдоће (слика 30.). Делићи материјала могу бити слободни и понашати се као треће тело, али и утиснути у једну или обе површине. Они могу настати или унутар самог трибомеханичког система као резултат процеса хабања површина или се могу унети средством за подмазивање, [5].

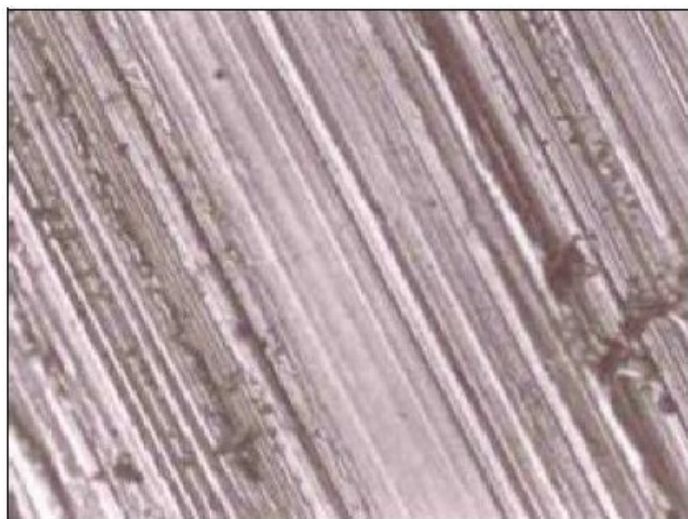
У циљу спречавања улаза чврстих честица, мора се обезбедити добро заптивање одговарајућих елемената машине, а у системе подмазивања или хидраулике уграђују се уређаји за филтрирање.



Слика 30. Шематски приказ абразивног хабања



Слика 31. Изглед различитих фаза абразивног хабања



Слика 32. Абразивно хабање

Блага абразија

Блага абразија је примећена када постоји продор финих честица абразивне природе у уље за подмазивање. Пошто изазива врлоfino брушење, стопа скидања метала је врло мала, па је потребно много времена да се ова појава примети, [17]. Површине зубаца изгледају као да су finely полиране (слика 33.).



Слика 33. Спирални конусни зупчаник са фином абразијом

Смањење интензитета овог вида хабања обезбеђује се:

- бољим филтрирањем, побољшањем система запивања (чешћим проверавањем), прањем система и чешћим заменама уља
- повећањем тврдоће металних површина
- коришћењем чистог уља

7.1.3 Заморно хабање

Хабање услед замора се јавља у случајевима када се површине стално клижу или ваљају по истом путу. Циклуси променљивих оптерећења, као и напрезања на притисак и истезање могу проузроковати површинске и подповршинске пукотине. Такође макро и микро неравнине као последица механичке или термичке обраде, погодују настанку површинских микропукотина, [5].

Пукотине се, нарочито услед променљивих оптерећења, прогресивно шире све до момента откидања ситних комадића материјала. Често се јавља код зупчаника, свих врста котрљајућих и клизних лежајева, брегастих осовина и др.

Смањење интензитета овог вида хабања обезбеђује се:

- смањењем оптерећења и учестаности промене оптерећења
- коришћењем технологије вакум ливења
- коришћењем чистог уља, вишег вискозитета

7.1.3.1 Заморна оштећења материјала бока зубаца

За време трајања захвата бокови зубаца зупчаника међусобно се одвајају, при чему се истовремено котрљају, у већој мери, клизају један по другом. Будући да се притом с погонског на гоњени зупчаник преноси снага, површине бокова зубаца у контакту међусобно су притиснуте нормалним силама, а због трења додатно су оптерећене и тангентијалним силама.

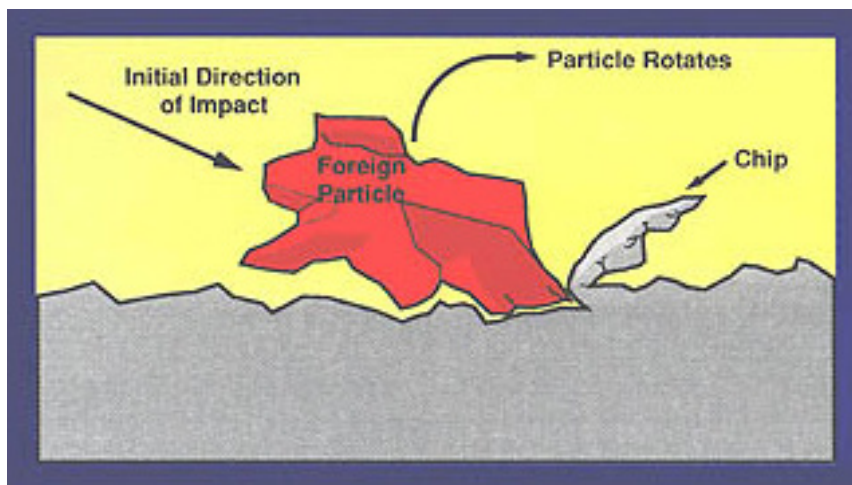
Због велике сличности геометрије тела у контакту, услови контакта те врсте и начина деловања оптерећења, готово идентична оштећења појављују се и код котрљајућих лежајева и точкова и шина, [5].

У *ISO* норми којом су класификована оштећења зупчаника, оштећења површинског слоја материјала узрокована замором наведена су као једна од основних категорија. Иако до замора и оштећивања површинског слоја материјала бока зубаца долази због дуготрајног цикличног котрљајно-клизног оптерећивања, због различитости геометрије озубљења, услова захвата, особина материјала и његове термичке обраде, споменута се оштећења могу манифестовати на различите начине.

7.1.4 Ерозионо хабање

Ерозија настаје када се оштре честице неке чврсте материје залепе на једну од клизних површина (слика 34.). Често се погрешно упоређује с адхезијом. Основна разлика је у томе да је храпавост изазвана ерозијом површине далеко већа, а и механизам је различит.

Може бити изазвана и вишеструким деловањем удара тока флуида, што се често јавља на лопатицама турбина и центрифугалних пумпи. Тако настала оштећења умножавају се ако флуид носи абразивне честице, [19].



Слика 34. Шематски приказ ерозивног хабања

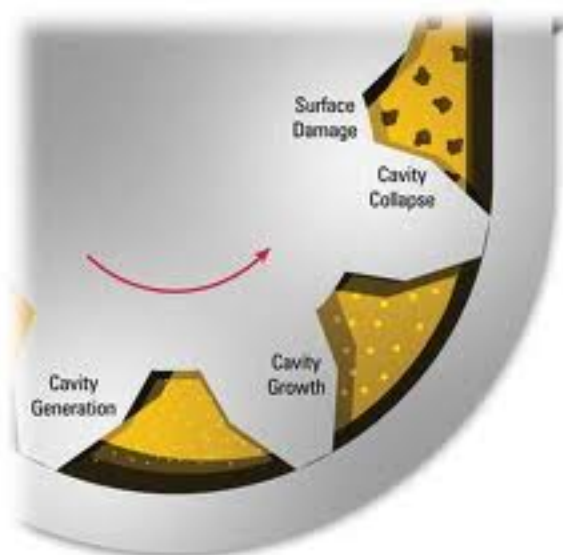
Смањење интензитета овог вида хабања обезбеђује се:

- уклањањем абразивних честица филтрирањем, побољшањем система запивања (честим проверама), чешћим интервалима замене уља
- повећањем тврдоће металних површина
- редуковањем вредности угла под којим честице ударају у површину метала
- коришћењем уља које нема абразивних честица
- коришћењем уља вишег вискозитета

7.1.5 Кавитационо хабање

Кавитација је посебан облик ерозије у коме мехурићи паре у течности који се формирају у зони ниског притиска, а затим имплодирају (урушавају се) у зони високог притиска (слика 35.). Имплозија може бити довољно снажна да створи рупе или јамице, чак и на металној површини велике површинске тврдоће.

Овај тип хабања се најчешће јавља код хидрауличних пумпи, посебно код оних које имају ограничену усисну моћ или раде на високим надморским висинама. Ограничен усис уља на усисном прикључку пумпе редукује притисак и тиме тежи ка стварању више мехурића паре, [19].



Слика 35. Оштећења изазвана кавитацијом могу да доведу до уништења делова



Слика 36. Ситуација у којој долази до кавитације

Смањење овог вида хабања обезбеђује се:

- коришћењем тврдых метала, као што је алатни челик
- редуковањем вибрација, брзина протицања и притисака
- избегавати пуно промена праваца протицања флуида
- избегавати низак притисак испаравања, појаву воде у уљу, појаву ваздуха у уљу

7.1.6 Корозионо хабање

Корозија је хемијско-физички процес чији је резултат промена и слабљење својства метала, услед дејства спољашње средине у којој се метал налази (слика 37.). Просто речено, ово означава губитак електрона метала при реакцији са водом или кисеоником. Слабљење метала услед оксидације је типичан пример електрохемијске корозије, [19].



Слика 37. Уколико се корозија неоткрије брзо може довести до корозивног питинга

Корозионо хабање је процес оштећивања површина које клизе у корозивној средини, при чему деловање корозионог медија може бити хемијско или електрохемијско.

У зависности од интензитета и степена захваћености површине, оно може бити непрекинуто или местимично прекинуто. Клизањем се, међутим ти слојеви кидају и оштећују, па корозија може даље да се шири. Проблем хемијског разарања метала услед корозије не јавља се само код спољних површина машина, постројења и опреме која је изложена различитим утицајем (нпр. атмосферијама, дејству морске воде и сл.), већ и код унутрашњих површина механичких система.

Ова појава посебно долази до изражаја код машина, возила, мотора и њихових делова који дуже време нису у употреби због дуготрајног транспорта, складиштења или због повремениог, сезонског рада (пољопривредна и грађевинска механизација, војна опрема). У тим условима, уколико нису предузете одговарајуће мере заштите, може доћи до појаве корозије, што касније у току рада уређаја доводи до знатно хабања материјала.

Површине елемената машина у релативном кретању могу бити изложене корозији, са последицом израженог хабања, и усред директног деловања киселина или других агресивних материја. Порекло ових материја може бити различито. Оне могу бити последица продора из околине или средине у којој се користи уређај, што је чест случај у хемијској индустрији или могу настати током рада уређаја, као на пример сагоревањем у моторима.

7.1.7 Оксидационо хабање

Кисеоник, активна компонента ваздуха, реагује необично брзо са свим металима, осим племенитих. Практично су све површине таквог материјала покривене слојем оксида (слика 38.). До оксидационих процеса долази и када површине нису на изглед у контакту са ваздухом нпр. површине покривене адсорбованим или хидродинамичким слојем мазива, јер се кисеоник налази адсорбован на свим површинама и растворен у свим флуидима који се са ваздухом налазе или су се налазили у контакту, [19].



Слика 38. Изглед зупчаника којег је захватила оксидација

Главни представници оксидационе корозије јесу директна оксидација и фретинг. Процес директне оксидације се, по правилу, брзо зауставља јер сам слој оксида спречава даљи контакт кисеоника са металом по дубини. Дебљина оксидног слоја зависи од врсте метала и од порозности створеног оксида, тј. од могућности дифузије кисеоника кроз слој оксида-оксидни слој богат кисеоником на површини док је слој оксида у контакту са металом сиромашан кисеоником.

Метали као што су алуминијум, хром, калај и неки други метали дају танке слојеве оксида. Код легура, афинитет појединих метала који је израђују, према кисеонику не одговара афинитету тих метала када не формирају легуру. Легирани челици са релативном малом количином хрома дају оксидни слој хромног оксида (Cr_2O_3) који заштићује површине челика од корозије на високим температурама.

7.1.8 Вибрационо хабање

Хабање између две површине до којег долази због осцилаторног кретања релативно малих амплитуда или вибрација. Фретинг се јавља код осцилаторног кретања са малим померањима ($\approx 1\mu m$) контактних површина под оптерећењем. Због мале амплитуде кретања, велики број честица насталих адхезивним хабањем се не износи из контактне зоне, [19]. Те честице доприносе повећању интензитета хабања абразијом.

Фретинг је честа појава у упресованим челичним спојевима, нпр. упресованим површинама котрљајућих лежаја, у статичким спојницама (навојни спојеви, заковице код шасија аутомобила), зупчастим или карданским спојницама и др.

Смањење овог вида хабања обезбеђује се:

- редукцијом или потпуном елиминацијом вибрација помоћу споја са што мањим зазорима или што већим оптерећењем
- побољшати подмазивање између површина са већом храпавошћу
- коришћењем уља нижег вискозитета
- подмазивањем веће учесталости
- коришћењем инхибитора оксидације у уљу

8. ЗАКЉУЧАК

Због својих добрих карактеристика, зупчасти преносници снаге су нашли примену у свим областима индустрије. Најчешће представљају виталне делове механизма, машина, па су последице отказа веома озбиљне. Због тога се изнад свега захтева њихов поуздан рад.

У току рада зупчаника на зупцима се јављају различити облици оштећења који, ако постану критични, могу довести до неправилности у спрези или до отказа зупчастог преносника. Изненадни отказ зупца, поред тога што доводи до потпуног отказа преносника, најчешће и целог система, може довести и до лома и оштећења машина. Последице отказа су вишеструке. Поред последица које настају самим изненадним престанком рада машине или машинског склопа, јављају се и непредвиђени трошкови набавке или израде, и замене оштећених делова машине, који често могу да буду веома велики. Због тога се посвећује велика пажња изучавању различитих облика отказа, да би се спречили, или бар успорили механизми настајања.

Код зупчаника без термичке обраде бокова зубаца, критична је носивост зупца, док је за термичке обрађене зупчанике критична носивост подножја зубаца. Оштећења и ломови зубаца и откази великих и јако оптерећених зупчастих преносника представљају опасност у погледу безбедности особља и могу бити узрок велике материјалне штете. Испитивање зупчастог пара је приказано да би се истакла сложеност процеса испитивања оштећења зубаца зупчаника и анализе резултата.

Испитивању зупчаника не сме се приступити само са становишта рутинског испитивања методама без разарања, већ истовремено са становишта познавања геометрије, материјала и функционисања зупчастих парова, и разумевања разлика између различитих врста оштећења. Такав приступ омогућава дефинисање корективних мера у експлоатацији зупчаника, које ће довести до веће поузданости и безбедности рада машина чији су зупчаници део.

Од највећег утицаја за оштећење зубаца зупчаника су: неадекватно подмазивање, одступања геометрије спрезања зубаца зупчастог пара (услед непрецизне монтаже зупчастог пара или као последица похабаности зубаца и осталих делова зупчастог преносника), нехомогености у материјалу зупчаника настале у току израде, неадекватна термичка обрада, ударна оптерећења која прелазе номиналне вредности за које је зупчасти пар прорачунат.

Дакле, изненадни отказ зупчастог преносника може изазвати веома велике последице. Међутим, придржавањем мера и препорука произвођача о условима монтаже, руковања и експлоатације смањује се ризик од изненадног отказа и обезбеђује поуздан и безбедан рад машина и машинских склопова.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Танасијевић, С., Основи трибологије машинских елемената, Научна књига, Београд, 1989
- [2] Ивковић, Б., Рац, А., Трибологија, Југословенско друштво за трибологију, Крагујевац, 1995
- [3] Танасијевић, С., Триболошки исправно конструисање, Машински факултет, Крагујевац, 2004
- [4] Љубојевић, Б., Преглед уобичајених видова оштећења зупчаника у току експлоатација преносника, Пети СЕВЕР симпозијум о механичким преносницима, Суботица, 1995
- [5] Институт а испитивање материјала, Београд, Булевар војводе Мишића 43
- [6] Милтеновић, В.: “Машински елементи – облици, прорачун, примена“, Унивезитет у Нишу – Машински факултет, Ниш, IV – издање 2002
- [7] Рац, А., Мазива и подмазивање машина, Машински факултет, Београд, 2007
- [8]http://www.maziva.org/index.php?option=com_content&view=article&id=48&Itemid=54
- [9]http://www.maziva.org/index.php?option=com_content&view=article&id=50&Itemid=55
- [10]http://www.maziva.org/index.php?option=com_content&view=article&id=77&Itemid=65
- [11]http://www.maziva.org/index.php?option=com_content&view=article&id=78&Itemid=66
- [12]http://www.maziva.org/index.php?option=com_content&view=article&id=79&Itemid=67
- [13]http://www.maziva.org/index.php?option=com_content&view=article&id=80&Itemid=89
- [14]http://www.maziva.org/index.php?option=com_content&view=article&id=81&Itemid=79
- [15]http://www.maziva.org/index.php?option=com_content&view=article&id=86&Itemid=84
- [16]<http://www.xtek.com/pdf/wp-gear-failures.pdf>
- [17]<http://www.machinerylubrication.com/Read/1375/wear-modes-lubricated>
- [18]<http://www.scribd.com/doc/.../80/Classification-of-Gear-Failure-Modes>
- [19] Prof. K. Gopinath & Prof M. M. Mayuram. Mchine gesing II 1981 Indian Institute of Technology Madras