

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Дипломске академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Трибологија машинских система

Број индекса: 90/2001

Душан Д. Стевановић

Триболошки процеси код зупчаника

Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Блажа Стојановић-ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру рада разматраће се основне карактеристике зупчаника и триболошких процеса код зупчастих преносника снаге. Зупчасти преносници снаге представљају врло битне делове машинских система чији су животни век и експлоатацијски параметри директно условљени управо триболошким процесима. Подмазивање зупчастих преносника представља један од предуслова за смањење трења и хабања и директно утиче на повећање поузданости рада, радног века и истовремено смањење губитака енергије, трошкова одржавања и замене делова. Кандидат треба да изврши класификацију оштећења зупчастих преносника снаге, као и метода њиховог спречавања.

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, 2019

ментор:

Проф. др Блажа Стојановић

Резиме: Зупчаници су заступљени у многим техничким системима због високог степена искоришћења и поузданости рада као и саме геометрије, односно јединственог начина преноса снаге. Самим тим што представљају изузетно важне делове машина и уређаја, од њих се захтева поуздан рад како би се избегли откази, нежељени застоји и додатни трошкови у процесу производње.

Након многих испитивања, прикупљања и обраде података из самог процеса експлоатације, идентификовани су бројни начини изненадних отказа, као и узроци који до отказа доводе. Правилним руковањем током монтаже и експлоатације и имплементацијом одговарајућих метода одржавања и подмазивања као и одабиром адекватног материјала обезбеђује се сигуран и поуздан рад током прописаног радног века зупчастог преносника, као као и редукација трења и хабања.

Кључне речи: зупчаник, трење, хабање, подмазивање

Abstract: Gears are present in many technical systems due to their high efficiency coefficient and reliability as well as their geometry itself and unique way of power transmission. As they represent vital parts of the machines and appliances, it is required of them reliable gear operation in order to avoid failures, unwanted malfunctions and additional production expenses.

After many examinations, gathering and processing data from exploitation process itself numerous ways of sudden failures are identified, as well as causes that lead to failure. Proper handling during installation and operation and with implementation of suitable methods of maintenance and lubrication as well as selecting adequate material ensures safe and reliable operation of the prescribed gear assembly work life, as well as reduced friction and wear.

Keywords: gear, friction, wear, lubrication

САДРЖАЈ:

1. УВОД.....	1
1.1 Трибологија и подмазивање.....	1
1.2 Теорија трења, хабања и подмазивања.....	2
1.3 Природа контактних површина чврстих тела.....	3
1.4 Трење.....	3
1.4.1 Трење клизања.....	4
1.4.2 Трење котрљања.....	5
1.5 Хабање.....	6
1.5.1 Адхезионо хабање.....	6
1.5.2 Абразивно хабање.....	7
1.5.3 Хабање услед замора материјала.....	9
1.5.4 Ерозија.....	9
1.5.5 Хабање услед оксидације.....	10
1.5.6 Хабање услед корозије.....	10
2. ЗУПЧАНИЦИ-ОСНОВНИ ПОЈМОВИ	11
2.1 Подела зупчаника, зупчастих парова.....	12
2.2 Основне карактеристике зупчастих преносника.....	14
2.3 Материјали за израду зупчаника.....	16
3. ТРИБОЛОШКИ ПРОЦЕСИ КОД ЗУПЧАНИКА.....	18
3.1 Трење зупчастих преносника.....	19
3.1.2 Коефицијент трења.....	20
3.1.3 Силе трења и губици енергије у спрези.....	21

3.2	Класификација оштећења зубаца.....	23
3.3	Номенклатура врста хабања и оштећења зуба зупчаника.....	24
3.4	Најчешће врсте хабања зупчаника.....	27
3.4.1	Заморно хабање.....	28
3.4.2	Хабање као последица разарања мазивог слоја.....	35
3.4.3	Абразивно хабање.....	38
3.4.4	Кавитационо хабање.....	40
3.4.5	Корозионо хабање.....	41
3.4.6	Оксидационо хабање.....	42
3.4.7	Вибрационо хабање.....	43
4.	ТЕОРИЈЕ ПОДМАЗИВАЊА.....	44
4.1	Дефиниција и класификација подмазивања.....	44
4.2	Гранично подмазивање.....	45
4.3	Хидродинамичко подмазивање.....	46
4.4	Еластохидродинамичко подмазивање.....	47
4.5	Мешовито подмазивање.....	48
5.	МАЗИВА.....	48
5.1	Појам, особине, поделе и компоненте мазива.....	48
5.2	Базна уља.....	51
5.2.1	Минерална базна уља.....	51
5.2.2	Синтетичка базна уља.....	51
5.3	Адитиви.....	52
5.3.1	Адитиви за заштиту од хабања.....	53
5.3.2	Адитиви за заштиту од високих притисака и ударних оптерећења.....	53

5.3.3	Адитиви за заштиту од оксидације-Антиоксиданти.....	54
5.3.4	Адитиви за заштиту од корозије-Инхибитори корозије.....	54
5.4	Угушћивачи.....	54
5.4.1	Сапунски угушћивачи.....	54
5.4.2	Комплексни сапуни.....	55
6.	ИЗБОР МАЗИВА.....	56
6.1	Уља за подмазивање мењача и диференцијала моторних возила.....	56
6.1.1	Избор уља за мењаче и диференцијале.....	57
6.2	Редукторска уља.....	58
6.3	Контрола трења уз присуство електро-магнетних поља-нове технологије.....	60
7.	ЗАКЉУЧАК.....	61
	ЛИТЕРАТУРА.....	62

1. УВОД

Зупчасти преносници снаге су витални делови машина, што захтева поуздан рад зупчаника да не би дошло до оштећења и отказа склопова, уређаја и машина. У току рада долази до различитих облика и степена оштећења зупчаника и промене радних карактеристика зупчастих преносника, што може да проузрокује отказ целог машинског склопа чији је зупчаник део. Велика пажња се посвећује изучавању услова експлоатације и отказа зупчаника да би се спречили или бар успорили процеси њиховог настајања и ширења [1].

Оштећења површина углавном су веома комплексна и зависе од бројних услова као што су експлоатациони услови, врста оптерећења, релативне брзине површина у контакту, температура, подмазивање, тврдоћа површине и храпавост, и компатибилност и природа материјала. Хабање је општи појам којим се описује уклањање материјала када две површине клизе један по другој. Овај израз се односи и на уклањање материјала као резултат присуства нечистоћа у мазиву [2].

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, уопште у свакој машини, склопу или уређају који учествује у производном процесу а код кога су заступљени покретни делови као механички преносници снаге или кретања.

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 [3].

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.

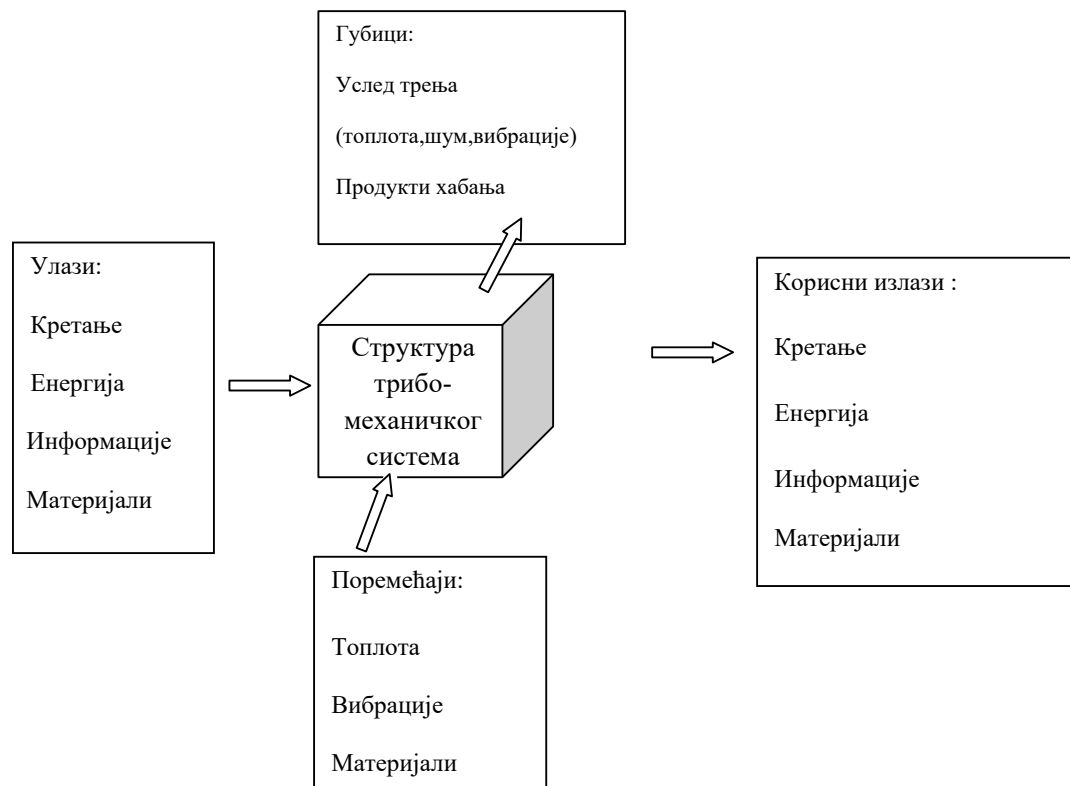
Назив трибологија потиче од грчке речи **TRIBOS** што значи трење или трљање и речи **LOGOS**-наука. Код проучавања триболошких феномена користе се подручја из више наука: органска и неорганска хемија, физичка хемија, физика, познавање машинских елемената, електроника, механика, наука о металима, термодинамика, технологија, организација производње итд. Трибологија је веома важна мултидисциплинарна наука која се, нарочито последњих тридесетак година, интензивно развија [4].

Основни циљ трибологије је истраживање услова за оптималну експлоатацију производних процеса, односно смањење потрошње енергије, смањење трошкова одржавања машина и повећање поузданости механичких система, уз употребу, што је више могуће, еколошки прихватљивих мазива.

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. У сврху разматрања ових процеса уводи се појам трибо-механички систем-ТМС [5].

На слици 1.1 дат је приказ трибо-механичког система са улазним и излазним параметрима, као и поремећајима који утичу на систем и губицима које производи систем а које покушавамо да избегнемо или сведемо на најмању меру.



Слика 1.1. Структура ТМС система [5]

Од посебног значаја су губици који се јављају у трибо-механичким системима, а нарочито губици на трење и хабање. Трење као облик супротстављања кретању елемената система посебно утиче на механички степен корисног дејства који је најважнији параметар оцене способности ТМС да очува транспортовану енергију. Хабање као облик одвођења материјала са контактних површина утиче на измену техничких параметара и промене у функционисању система [5].

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

1.3 Природа контактних површина чврстих тела

Површине чврстих тела преко којих се остварује међусобни контакт представљају танке слојеве материјала чији се састав и особине знатно разликују од особина основне масе материјала тела. Површински слој тврдих тела састоји се из спољашњег граничног слоја, који настаје као резултат интеракције средине са површином и унутрашњег граничног слоја, чија дебљина, структура и механичке особине зависе од поступка обраде коришћеног при обликовању тела [6].

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 интензивнија, што се назива периодом „уходавања“.

На слици 1.2 приказана је структура унутрашњег и спољашњег граничног слоја чврстих тела са уобичајеним дебљинама адсорбованог слоја воде, уља и других органских материјала, адсорбованог гаса и оксидационог слоја.



Слика 1.2. Структура површинског слоја чврстих тела [6]

1.4 Трење

Трење представља механички отпор који настаје на површини додиром 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 [4].

Трење се може поделити у два основна облика:

- унутрашње трење и
- спољашње трење.

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

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

- трење клизања и
- трење котрљања.

1.4.1 Трење клизања

Трење клизања представља отпор релативном кретању које се јавља када једно чврсто тело клизи по другоме [7]. 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 и
- 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 претпоставка није у потпуности тачна. По теорији Боудена, Табора, Дерјагина (*Bowden, Tabor, Derjagin*) и других, сила трења зависи од нормалног оптерећења, степена храпавости, стварне додирне површине, међумолекулских привлачења на местима директног контакта, тврдоће материјала а такође и 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 и
- F_0 – допунско оптерећење услед међумолекулског привлачења.

Кад површине које се додирују нису неким мазивим слојем потпуно раздвојене тада, према теорији Боудена (*Bowden*), долази до колизије 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 [4].

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 Бринелу или Викерсу (*Brinell*, *Vickers*) и

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 налажу једна на другу само преко најистуренијих врхова рељефа, постепеним повећањем оптерећења, неравнине се све више пластично деформишу, налажући преко све више истурених врхова. Број непосредних додира све више расте, па расте и стварна додирна површина.

Процес је ограничен тврдоћом тела: промена стварне додирне површине ће расти са оптерећењем толико дуго док се не створи нека површина која ће моћи да поднесе то оптерећење. После тога процес се зауставља. Таква гранична површина зависи од тврдоће: што је тврдоћа већа, површина ће бити мања и обрнуто [4].

1.4.2 Трење котрљања

Трењем котрљања назива се отпор релативном тангенцијалном кретању који се јавља котрљањем неког предмета по површини [4]. 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 и
- 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 претпоставити 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 временом и своју геометрију, димензије, структуру и својства површинских слојева, а величина и карактер промена зависе од [4]:

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

Хабање је прогресивни процес губитка материјала елемената или делова машина који су у непосредном контакту и налазе се у релативном кретању. Честице материјала које се у периоду контакта дислоцирају са контактних површина чврстих елемената трибомеханичких система представљају „продукте хабања”.

У зависности од доминантног механизма хабања и услова под којима се контакт остварује између елемената разликују се [4]:

- адхезивно хабање,
- абразивно хабање,
- заморно хабање,
- ерозионо хабање,
- кавитационо хабање,
- fretting (вибрационо хабање),
- корозионо хабање и
- оксидационо хабање.

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 трећем клизања, са контактом површина и адхезивним везама молекула тих површина.

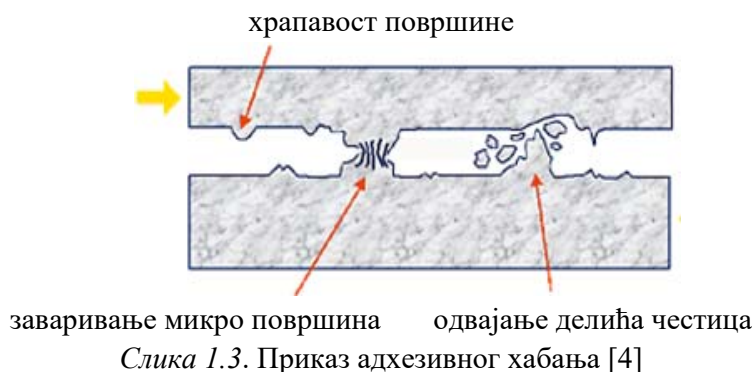
До појаве адхезивног хабања (слика 1.3) долази код високо оптерећених површина, код којих се, без обзира на присутно мазиво између њих, остварује контакт врхова неравнина. Разлог томе је висока вредност специфичног притиска на месту контакта, што доводи до губитка конзистентности слоја мазива.

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 интензивног и бројног

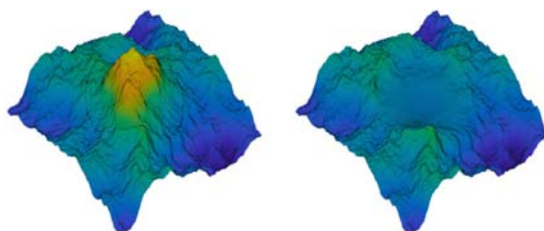
микрозаваривања, сума отпора смицања може порастити до те величине да се цели систем заустави, односно зариба [4].

На слици 1.3 приказан је почетни пар неравнина који затим ступа у контакт када долази до заваривања а потом и одвајања честица одн. продуката хабања.



Слика 1.3. Приказ адхезивног хабања [4]

На слици 1.4 дат је приказ топографије грубе површине пре и после одвајања продукта хабања.



Слика 1.4. Топографија грубе површине [8]

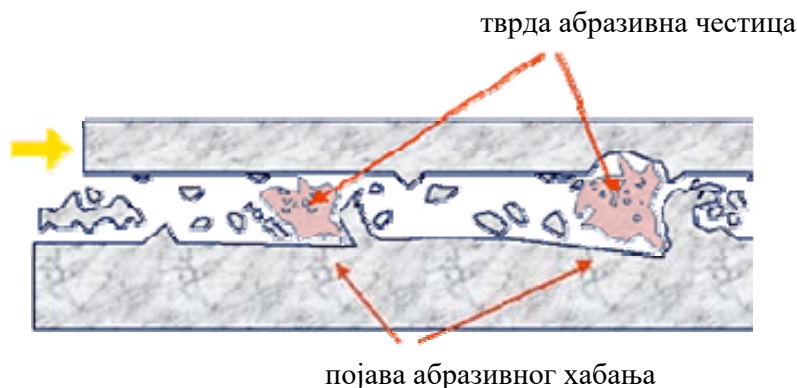
Зависно од почетне топографије, својстава контактних површина и карактера самог контакта, два основна сценарија хабања су могућа. У првом сценарију, процес хабања мења површинску топографију на такав начин да после почетне фазе, нема даљег хабања. Уместо тога нова топографија распоређује примењено оптерећење на такав начин, да се хабање своди на минимум по додирним површинама, ово се још зове „смирујућим хабањем”. Са друге стране, постоји континуирано прогресивно хабање које се моделира грубим крутим врховима који тангенцијално клизе преко иницијално глатке површине [8].

1.5.2 Абразивно хабање

Абразивно хабање (слика 1.5) представља одстрањивање материјала са површина у контакту услед 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.

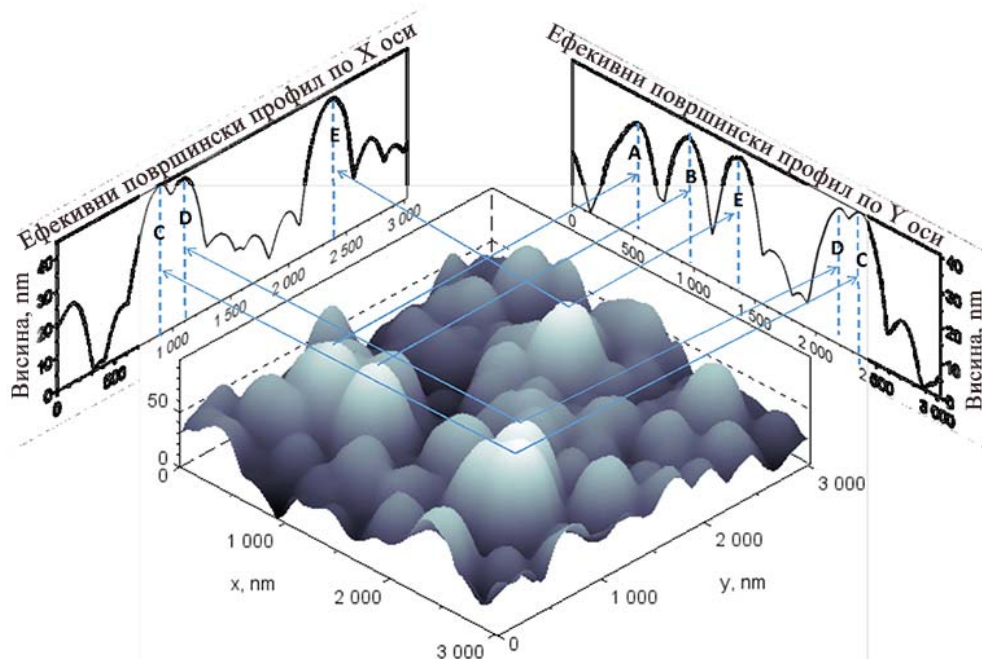
Честице које су веће или једнаке величини зазора имају највећи утицај на оштећење површина. Зато је неопходно обезбедити да се између површина нађу само честице чија је величина мања од величине зазора. У циљу спречавања улаза чврстих

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 [4].



Слика 1.5. Приказ абразивног хабања [4]

Нова испитивања самог абразивног хабања подразумевају праћење модела ефективних површина и измена параметара у току времена којима се предвиђа механизам хабања. Често се симулирање оваквих услова изводи чврстим абразивима као што је DLC (*diamond like carbon*) по мекшим металним или керамичким површинама. На слици 1.6 је приказан ефективни профил површине чије се промене параметара прате у реалном времену у току самог процеса хабања где А, В, С, D и Е представљају врхове неравнина [9].



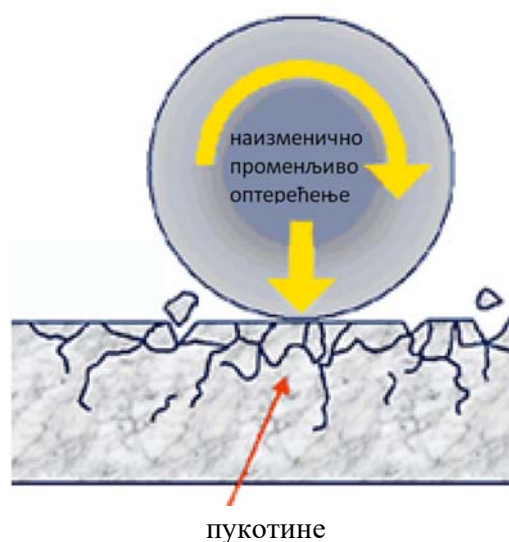
Слика 1.6. Приказ ефективног површинског профила [9]

1.5.3 Хабање услед замора материјала

Хабање услед замора (слика 1.7) јавља се у случајевима када се површине стално клизају или котрљају по истом путу. Циклуси променљивих оптерећења, као и напрезања на притисак и истезање могу проузроковати површинске и подповршинске пукотине [4].

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

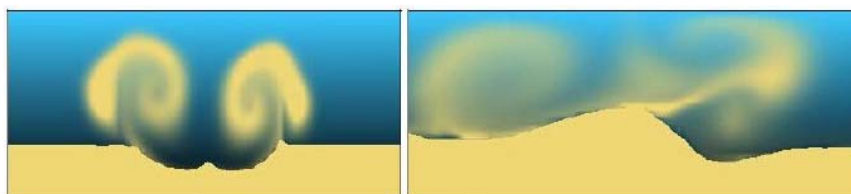
Овај вид хабања није карактеристичан за машинске елементе код којих је присутно стално или врло мало променљиво оптерећење. Често се јавља код зупчаника, свих врста котрљајућих и клизних лежачева, брегастих осовина и др.



Слика 1.7. Хабање услед замора материја [4]

1.5.4 Ерозија

Ерозија (слика 1.8) 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 [4].



Слика 1.8. Флуидна ерозија [4]

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 су нееластични. Они пуцају, па се стварају слојеви подложни хабању, а процес оксидације се проширује у дубину [4].

1.5.6 Хабање услед корозије

Корозивно хабање (слика 1.9) 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 [4].



Слика 1.9. Шематски приказ хабања услед корозије [4]

Бројни захтеви у вези здравствених и еколошких аспеката као и питања личне безбедности радника и послужилаца, условили су значајну редукцију инхибитора корозије као и течности за расхлађивање са додацима против корозије у самом производном процесу. Ово за последицу има повећан ризик од корозије у току самог производног процеса, а појаву корозије у току производног процеса могуће је уочити и након једног сата.

Један од начина санације овакве корозије је фино пескарење стакленим прахом, употребом бољих челика отпорнијих на корозију, што опет са собом повлачи већу цену производње итд.

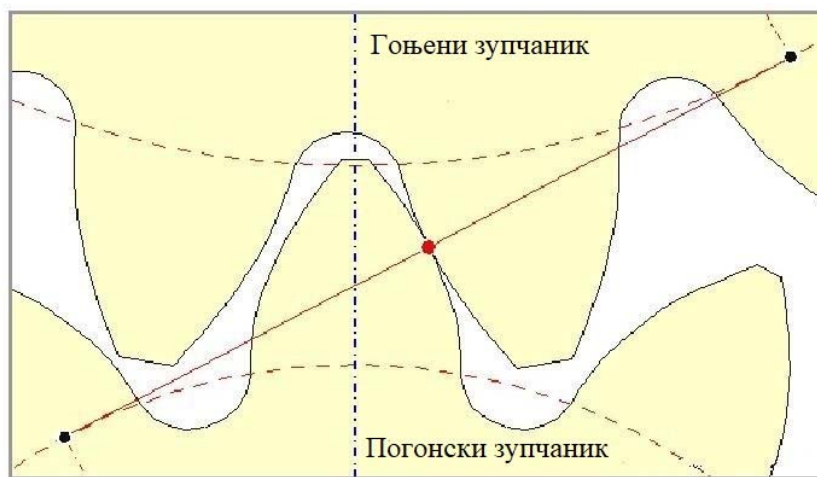
Ефикасна метода је такође и изотропни суперфиниш површина који се постиже хемијски убрзаним вибрационим финиширањем (*CAVF* - *chemically accelerated vibratory finishing*) [10].

Појава корозије у току саме производње делова или њихове експлоатације је сасвим реалан и готово изванредан исход а уколико се изведе детаљнија анализа трошкова производње, при којима горе поменути начини превенције рентабилно учествују у самом процесу њихова имплементација је сасвим оправдана.

2. Зупчаници-основни појмови

Зупчаници су машински елементи код којих се кретање односно обртни момент преноси принудно без клизања посредством зубаца са једног вратила на друго, при чему се врши одређена трансформација броја обртаја и обртног момента. Два упарена зупчаника који раде заједно називају се спрегнути зупчаници при том је један погонски а други гоњени, обимне брзине додирних кругова зупчаника су једнаке и супротног су смера [12].

При спрезању два зупчаника, тачка додира се код погонског зупчаника помера од подножја ка темену, а код гоњеног зупчаника од темена ка подножју зупца. Део бока на коме се остварује контакт зубаца зове се активни део бока (слика 2.1).

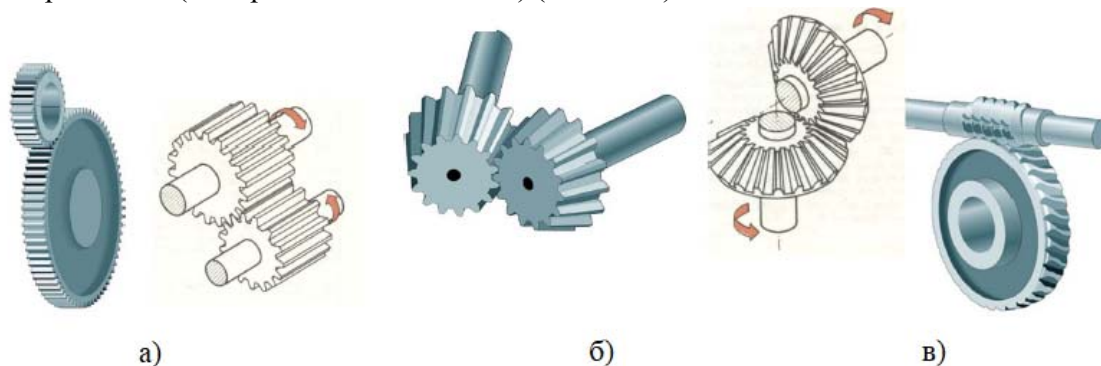


Слика 2.1. Додирница два спрегнута зупчаника [11]

Спрезање зупчаника је могуће уколико су испоштовани захтеви у вези облика зубаца који морају бити међусобно прилагођени, а да би се преносио жељени обртни момент, зупци морају бити довољно отпорни и издржљиви. Све ово упућује на озбиљност приступа триболошком аспекту зупчастих преносника снаге који има директан утицај на све горе поменуте параметре.

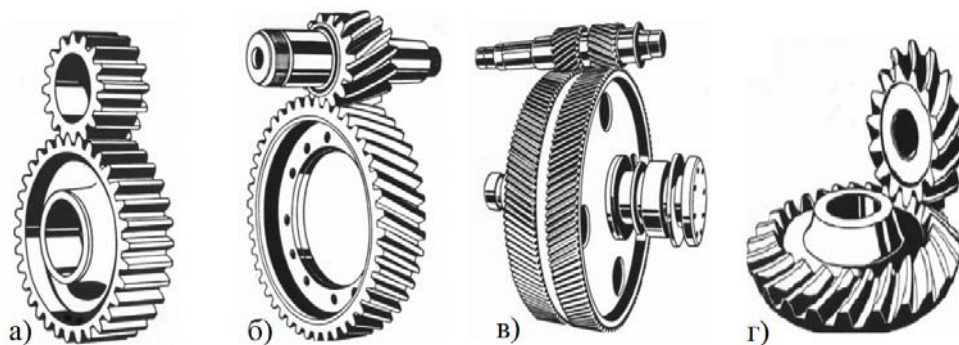
2.1 Подела зупчаника, зупчастих парова

Према међусобном положају оса вратила погонског и гоњеног зупчаника разликују се: цилиндрични (осе вратила су паралелне), конични (осе вратила се секу) и хиперболични (осе вратила се мимоилазе) (слика 2.2).



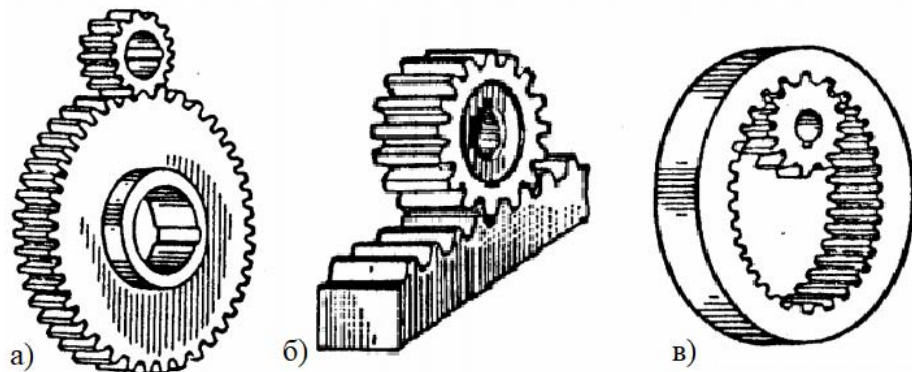
Слика 2.2. Цилиндрични (а), конични (б) и хиперболични (в) зупчасти парови [12]

Према облику зубаца, зупчаници могу бити са: правим (а), косим (б), стреластим (в) и завојним зупцима (г) (слика 2.3).



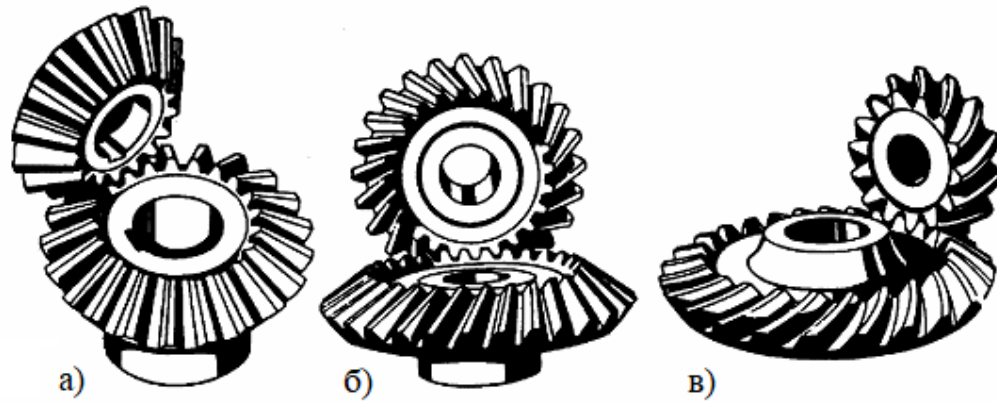
Слика 2.3. Зупчаници са правим (а), косим (б), стреластим (в) и завојним зупцима (г) [12]

Цилиндрични зупчасти парови се деле на: спољашње (а), равне (б) и унутрашње зупчасте парове (в). (слика 2.4).



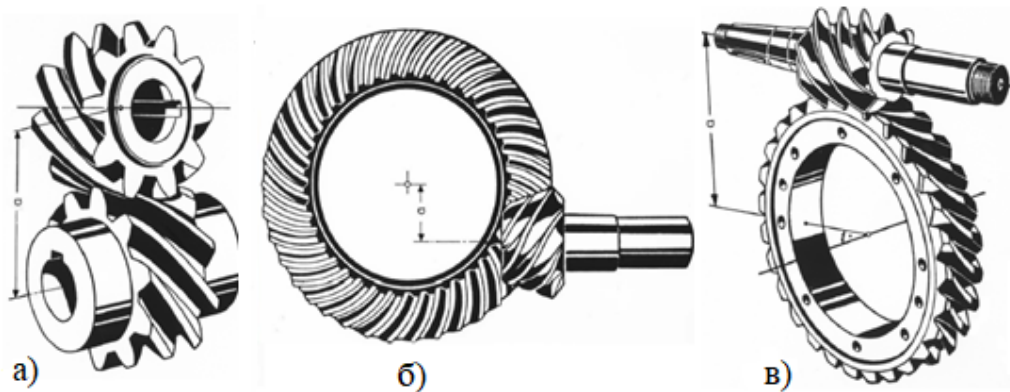
Слика 2.4. Спољашњи (а), равни зупчасти парови (б) и спољашњи/унутрашњи (в) [12]

Конични зупчасти парови према облику зубаца могу бити са: правим, косим и завојним зупцима (слика 2.5).



Слика 2.5. Конични зупчасти парови са правим (а), косим (б) и завојним зупцима (в) [12]

Хиперболоидни зупчасти парови се деле у три групе: цилиндрични зупчаници са хеликоидним зупцима за мимоилазна вратила (вијчаници), хипоидни зупчасти парови и пужни парови (слика 2.6).



Слика 2.6. Хиперболоидни зупчасти парови: цилиндрични зупчаници са хеликоидним зупцима за мимоилазна вратила (вијчаници) (а), хипоидни зупчасти парови (б) и пужни парови (в) [12]

2.2. Основне карактеристике зупчастих преносника

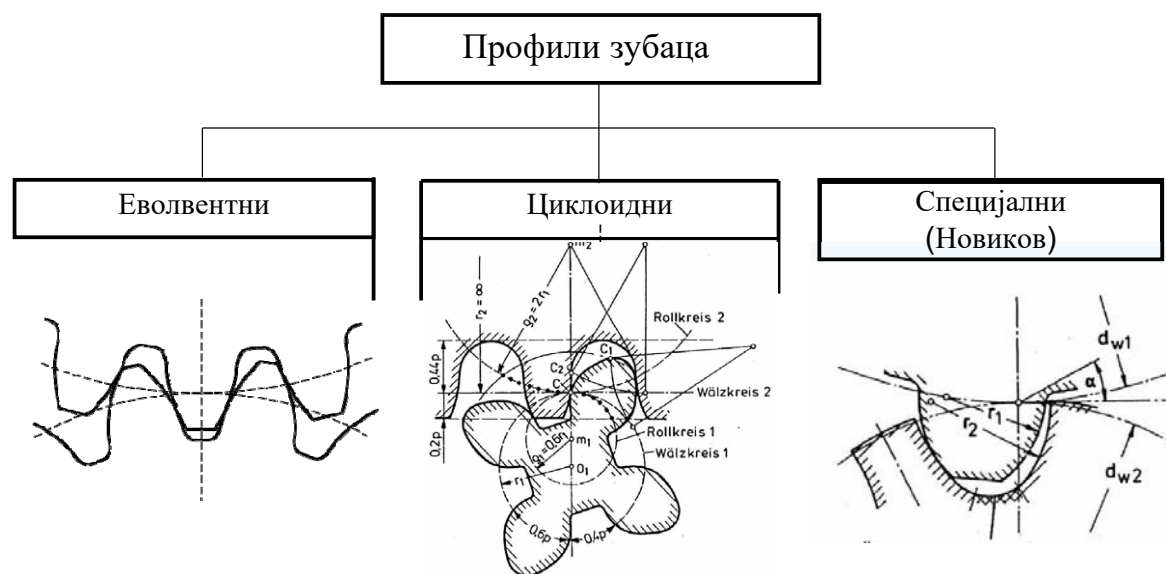
Зупчасти преносници су механички преносници код којих се оптерећење са једног вратила на друго преноси помоћу зубаца у непосредном додиру. Зупчасти преносни парови одликују се:

- тачним преносним односом,
- малим габаритима у односу на оптерећење које преносе,
- високим степеном искоришћења и
- високом издржљивошћу и трајношћу.

Зупчаник чини тело зупчаника и зупчасти венац. Тело зупчаника омогућује стабилан положај зупчастог венца, спајање и ослањање на вратило, преношење обртног момента и сила које делују на зупце и сл. Зупчасти венац чине зупци, међузубља и прстен (венац) испод подножног цилиндра. Зупци су по висини ограничени теменом и подножном површином, а у аксијалном правцу чеоном површином. Темена површина је дефинисана теменим цилиндром пречника d_a , подножна површина – подножним цилиндром d_a .

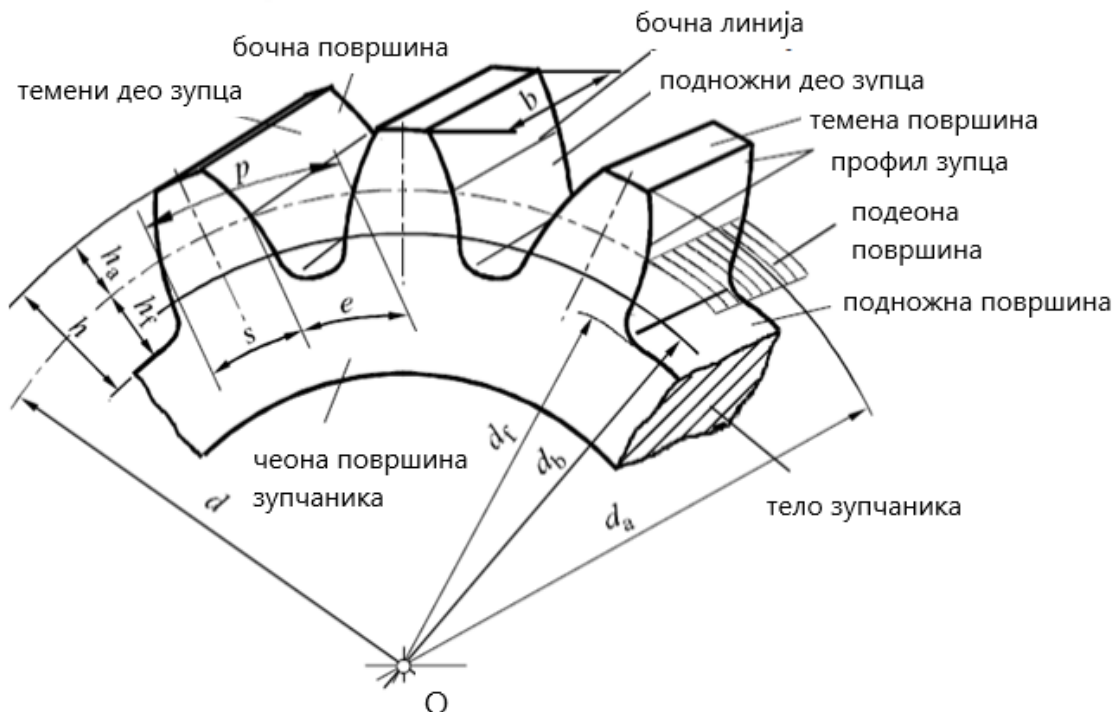
Простор између два суседна зубаца је међузубље. Зупци и међузубља су ограничени левим и десним бочним површинама. Спрезање зубаца се врши преко бочних површина.

Профил зупца је пресек бочне површине зупца и равни управне на осу обртања зупчаника. На слици 2.7 приказани су различити профили зубаца [12]



Слика 2.7. Поједини карактеристични профили зубаца [12]

На слици 2.8 приказане су основне величине код цилиндричних зупчаника са правим зупцима.



Слика 2.8. Основне величине код цилиндричних зупчаника са правим зупцима [13]

Зупци су подеоним цилиндром подељени на темени део (главу зупца) висине h_a и на подножни део (ногу зупца) висине h_f .

Корак профила је лучно растојање истоимених профила двају суседних зубаца, на одређеном кругу, па тако обухвата један зубец и једно међузубље.

Да би се омогућило континуално преношење обртног кретања са једног зупчаника на други, сваки зупчаник има зупце по целом обиму. Број зубаца z је важна карактеристика зупчаника. Обим подеоног круга, једног зупчаника, пречника d састоји се од онолико корака (подеони корак - p) колико тај зупчаник има зубаца, односно:

$$\begin{aligned} z \cdot p &= d \cdot \pi \\ d &= \frac{p}{\pi} z ; \quad m = \frac{p}{\pi} \\ d &= m \cdot z ; \quad p = m \cdot \pi \end{aligned} \quad (2.1)$$

где је:

m - модул зупчаника.

То је основни геометријски параметар величине зубаца и зупчаника као целине, на основу којег се одређују све друге димензије зупчаника. Због алата за израду зупчаника, модул је параметар који је стандардизован у три степена приоритета. Најједноставнији зупчасти преносник састоји се од два зупчаника у спреси која чине зупчасти пар [12].

Предности:

- тачан кинематски преносни однос,
- мале димензије у односу на снагу и обртни момент који преносе,
- велики степен искоришћења (изузев хиперболоидних з.п.),

- велика издржљивост и трајност у раду и
- примена у веома широком дијапазону снага, бројева обртаја, преносних односа.

Недостаци:

- захтевају велику тачност израде,
- хабање и трошење у раду,
- велика крутост система и
- присуство вибрација и буке.

Зупчасти преносници представљају најраспрострањенију и најважнију групу механичких преносника. Област примене им је врло широка – од механизма код часовника до трансмисије код хеликоптера и других механичких система [12].

2.3. Материјали за израду зупчаника

Избор материјала за зупчанике зависи од својства која зупчаник мора имати, а то су: носивост, обрадивост, цена, тражени квалитет, те услови експлоатације. Цена зависи од технолошког поступка којим се може добити зупчаник траженог квалитета и својстава, а технолошки поступак од материјала.

За мала оптерећења и мале брзине могуће је зупчанике израдити од ливеног гвожђа са необрађеним зупцима који су погодни за рад у релативно нечистој средини, за нешто јача оптерећења може се употребити челични лив.

Најчешћи материјал зупчаника је челик, за умерена и јака оптерећења и умерене брзине зупчаници се израђују од конструкционог челика или челика за цементацију. За врло јака оптерећења и брзине користи се легиран челик и термички обрађен челик (побољшање, цементирање и каљење, нитрирање).

Квалитет челика диктира и цену, посебно термички обрађен челик, због тога се у случају већих пречника зупчаника ($D > 400 \text{ mm}$), венац зупчаника прави од скупљег а квалитетнијег челика а тело зупчаника од јефтинијег материјала, сивог лива, челичног лива или слабијег челика заваривањем.

Ради смањења буке у раду, могуће је један од спрегнутих зупчаника израдити од неметалног материјала, при том је правило да венац буде од неметала, мада има и супротних решења. Овакви зупчаници нису погодни за јака оптерећења и брзине.

У табели 2.1 су приказани материјали за израду зупчаника у SRPS и аналогним DIN ознакама, где карактеристика К представља коефицијент издржљивости зубаца на гњечење, зависи од Бринеловог броја и вискозности употребљеног мазива [14].

Ознаке за термичку обраду су:

- I – нормализовање,
- II – побољшање,
- III – цементација и каљење,
- IV – каљење после загревања у пламену или индукционог загревања и
- V – каљење после загревања у купатилу цијана.

Табела 2.1. Материјали за израду зупчаника [13]

Ред.бр.	Материјал	Ознака SRPS- EN10027-1	Ознака DIN	Термичка обрада	Карактеристика: К
1	Челични лив	ČL0500			1,9
2		ČL0600			2,5
3	Сиви лив	SL 18			1,6
4		SL 22			2,2
5		SL 26			2,8
6	Угљенични челик	R St 44-2		I	1,7
7		E295,E295GF	ST50-2	I	2,5
8		E335	ST60-2	I	3,2
18		E360	ST70-2	I	4,3
9	Челици за побољшање	C22	C22	II	2,1
10		C45	C45	II	3,4
11		C60	C60	II	4,8
12		34Cr4	34Cr4	II	7,0
13		37MnSi5	37MnSi5	II	7,0
14		42CrMo4	42CrMo4	II	8,0
15		34CrNiMo6	34CrNiMo6	II	10,7
16	Челици за цементацију	C15	C15	III	42,0
17		17MnCr5	17MnCr5	III	45,0
18		19MnCr5	19MnCr5	III	45,0
19		14NiCr6	15CrNi6	III	45,0
20		18CrNi8	18CrNi8	III	45,0
21	Челици за побољшање	C45E	Ck45	IV	38,0
22		37MnSi5	37MnSi5	IV	34,0
23		41Cr4	41Cr4	IV	37,0
24	Челици за побољшање	37MnSi5	37MnSi5	V	37,0
25		41Cr4	41Cr4	V	38,0

3. Триболошки процеси код зупчаника

У зони контакта зупчастих преносника снаге и узајамног деловања елемената система настају комплексни механички и физичко-хемијски процеси у које спадају и трење и хабање.

Неправилности у току експлоатације зупчастог преносника, утицаји материјала, средине, подмазивања, вибрације које могу бити и саставни део радног процеса и многи други чиниоци, могу довести до оштећења зупчаника, па и до његовог лома. Сви они су бројни и обично делују истовремено и удружено [1].

Мерило дејства свих ових фактора јесу триболошке карактеристике које се директно запажају на овом типу механичких преносника након одређеног периода експлоатације, а трење и хабање су саставни део сваког процеса обраде, па и самог контакта површина зубаца зупчаника. На слици 3.1 илустративно су приказани зупчаници-лево, а десно на слици 3.2 је приказ редуктора са зупчаницима дуплог стреластог озубљења.



Слика 3.1. Зупчасти преносници [15]



Слика 3.2. Редуктор [16]

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 високо оптерећених 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 отвореног површинског слоја, неодговарајући профил тврдоће по дубини отвореног слоја и по висини зубца, нижа вредност тврдоће језгра, повремени преоптерећења озубљења и неправилности у захвату зубца изазване нетачностима при изради и монтажи. Основни узроци појаве наведених оштећења бокова зубаца, јесу поменута циклично променљива напрезања и деформације материјала, односно његово замарање [17].

3.1 Трење зупчастих преносника

Отпор који се јавља при кретању 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 оштећења зупчаника. Параметри којима се најчешће квантификује трење у зупчаницима су коефицијент трења и губици енергије у спрези.

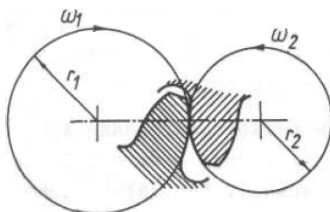
Трење које се јавља при раду зупчаника је у принципу збир трења клизања и трења котрљања. Како се правци и интензитети брзине клизања и брзине котрљања мењају у периоду спрезања, односно у интервалу времена од уласка зуба у спрегу до његовог изласка из спреге, логично је да се и трење мења у том истом интервалу. Постоје тренутне вредности силе и коефицијента трења и оне зависе од тренутног положаја контакта спрегнутих зуба.

Дефинисање тренутних вредности коефицијента трења у свакој тачки контакта у току периода спрезања је веома тешко. Основни параметри који утичу на коефицијент трења, као брзина клизања, мењају величину и правац у периоду спрезања, а други параметри утицаја (оптерећење, одступања и геометрија) усложњавају општу математичку анализу [17].

3.1.1 Коефицијент трења код зупчаника

Анализом кинематике спрезања зупчаника и услова које зупчаници притом морају да испуне долази се до закључка да компоненте тренутних брзина неке тачке додира у правцу заједничке тангенте на бокове спрегнутих зубаца нису и не морају бити једнаке. То имплицира да се бокови зубаца клизају један по другом, а једино у централној тачки додира се јавља котрљање а коефицијент клизања је једнак нули.

Контакт два спрегнута зупчаника могуће је апроксимирати моделом контакта два ваљка и посматрајући површине бокова као делове површина два замишљена ваљка са полупречницима једнаким полупречницима кривина на месту додира [18].



Слика 3.3. Модел контакта два спрегнута зупчаника [18]

Ако су угаоне брзине ваљака ω_1 и ω_2 , обимне брзине $r \cdot \omega_1$ и $r \cdot \omega_2$ могу се сматрати брзинама кривих у тачки додира. Брзина клизања је тада:

$$V_{kl} = \omega_1 r_1 - \omega_2 r_2 \quad ; \quad \omega_1 > \omega_2 \quad (3.1)$$

$$\text{Релативни полупречник спрегнутих ваљака је } \frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \quad \text{одн.} \quad r = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}$$

Он се може упоредити са релативним полупречником кривине на додирници цилиндричног зупчаника:

$$r_s = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} \cdot \sin \alpha, \quad \text{где је } \alpha \text{ угао додирнице.} \quad (3.2)$$

Комбиновањем теоријских разматрања и података добијених резултата из експеримената долазимо до емпиријске формуле за израчунавање средњег коефицијента трења:

$$\mu_s = \frac{K}{\eta^\alpha + r^\beta + V_E^\gamma} \quad (3.3)$$

$$\text{где су : } V_E = \omega_1 r_1 + \omega_2 r_2 \quad \text{збир обимних брзина} \quad (3.4)$$

К- константа,

η - вискозност уља за подмазивање и

α, β, γ - константе са вредностима мањим од 1.

3.1.2 Силе трења и губици енергије у спрези

Постоји више начина да се дефинишу губици енергије у спрези. Једна од новијих теорија разматра силу трења као директно зависну од тренутних вредности коефицијената трења и по њој су зупчаници у спрези изложени различитим силама трења.

Уколико посматрамо зубе зупчаника као крута тела у спрези израз за кинетичку енергију система би био : $E = \frac{I_1 \omega_1^2}{2} + \frac{I_2 \omega_2^2}{2}$, трење које се јавља у систему изазива промену енергије по јединици времена па је промена енергије у бесконачно малом тренутку времена једнака $dE = \left(I_1 \omega_1 \dot{\omega}_1 + I_2 \omega_2 \dot{\omega}_2 \right) dt$.

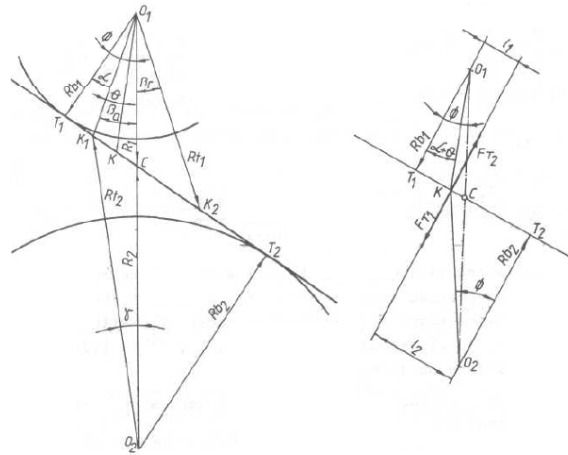
За време Δt један зуб клиза по другом дуж малог растојања dx па је израз за примену енергије услед дејства силе трења :

$$dE = \mu \cdot F_N \cdot dx \quad (3.5)$$

μ -тренутна вредност коефицијента трења и

F_N -нормална сила између зуба у контакту.

На слици 3.3 приказане су геометријске величине и силе које су релевантне за разматрање услова спрезања и губитака енергије у спрези.



Слика 3.4. Геометрија спрегнутих зупчаника и приказ сила које учествују у спрези [18]

Након решавања једначина и бројних трансформација долазимо до израза за силу трења погонског и гоњеног зупчаника који се знатно разликују од конвенционалног израза за силу трења, конкретно за погонски зупчаник је $F_{T1} = 4.65 \cdot \mu \cdot F_N$ и то за случај да је

$$i_{21} = \frac{1}{2} ; \alpha = 5^\circ \text{ и } \phi = 20^\circ$$

Општа једначина за силу трења гоњеног зупчаника је

$$F_{T2} = \frac{i_{21} \cdot I_2 \cdot \mu \cdot F_N (1 + i_{21}) R_{b1} [\operatorname{tg} \phi - \operatorname{tg}(\alpha + \theta)]}{(I_1 + i_{21}^2 I_2) [(R_{b1} + R_{b2}) \operatorname{tg} \phi - R_{b1} \operatorname{tg}(\alpha + \theta)]} \quad (3.6)$$

поред тога што се обе силе знатно разликују од израза $F_T = \mu \cdot F_N$, долазимо до закључка да су оне зависне од поларних момента инерције, преносног односа и тачке у којој је однос остварен.

Анализа трења и параметара трења не укључује молекуларно-механичку природу контакта већ је у неком смислу упрошћена, али и поред тога она оставља простор за добијање многих корисних информација што се тиче самог пројектовања.

Губици енергије у зупчастом преносу зависе од типа зупчаника, лежишта, тачности израде, топографије контактних површина и осталих фактора а исказују се преко степена искоришћења и крећу се од 0.5 до преко 80 % [18], [19].

За брзе анализе степена искоришћења или у случају да не располажемо подацима везаним за приближна израчунавања губитака у спрези може се користити табела 3.1 :

Табела 3.1. Опсег губитака у спрези у зависности од типа зупчаника [18]

Тип зупчаника	Опсег губитака у спрези (%)
Цилиндрични хеликоидни (спољашње озубљење)	0,5 - 3
Цилиндрични хеликоидни (унутрашње озубљење)	0,5 - 3
Конични	0,5 – 3
Пужни	2 – 50
Спироидни	2 – 50
Хипоидни	2 – 50
Цилиндрични хеликоидни са мимоилазним вратилима	5 - 50

Како апсолутни степен искоришћења (100%) не може егзистирати ни у теоријским разматрањима и с обзиром на све већу вредност и значај енергије, задатак је конструктора да учини све како би губитке енергије у преносу минимизирао до границе могућег [18].

3.2 Класификација оштећења зубаца

Овде ће бити описани различити облици оштећења и разарања зубаца зупчаника и дефинисани основни појмови. Описани су облици оштећења зубаца и високо оптерећених зупчастих парова који раде у незаштићеној околини и изложени су утицају атмосферских услова [1].

У зависности од врсте оптерећења и радних услова на зупцима спрегнутих зупчаника се јавља више од 20 различитих типова оштећења. Према анализама различитих аутора [17],[21], 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:

- површинска оштећења
- огреботине
- трајне деформације
- површинска оштећења услед замора
- прслине и
- лом зубаца

Површинска оштећења бокова зубаца су узрокована хабањем услед клизања, појавом корозије, прегревања и ерозије.

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

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

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

Прслине зубаца настају због каљења, брушења или замора.

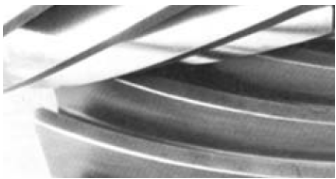
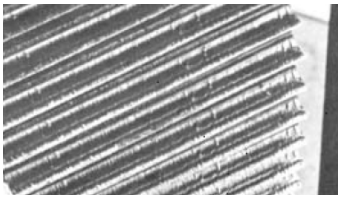
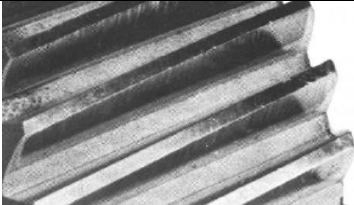
До **лома зупца** може доћи због преоптерећења, смицања зупца, после пластичне деформације и због замора [1].

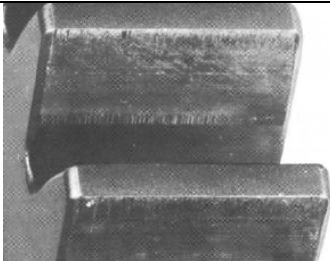
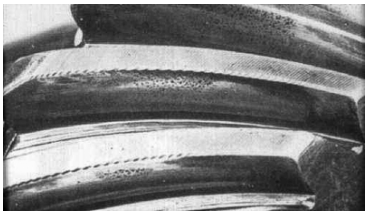
3.3 Номенклатура врста хабања и оштећења зуба зупчаника

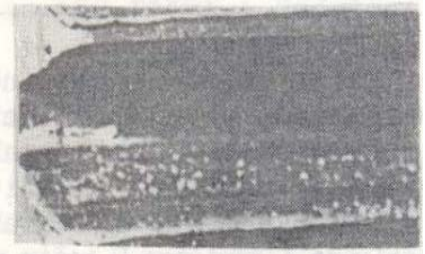
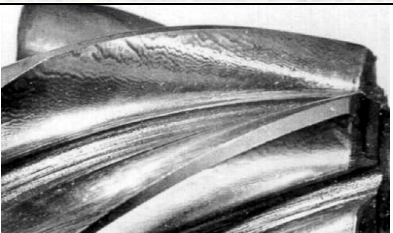
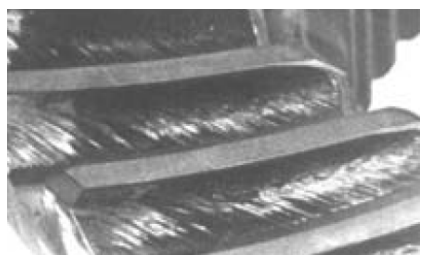
У научно-техничкој заједници је данас свеприсутна шароликост у погледу класификације и уопште терминологије триболошких процеса, тако се једна иста врста хабања назива различитим именима.

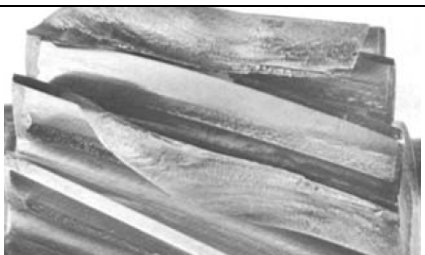
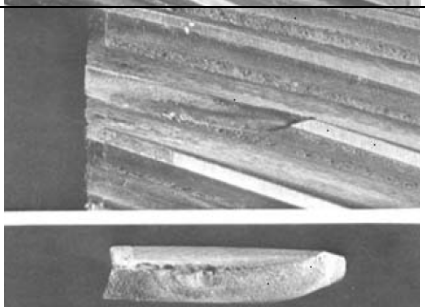
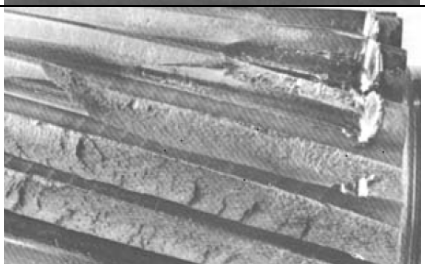
У табели су изложене различите врсте хабања и оштећења а термини из енглеског језика су задржани као интернационални и опште прихваћени [18].

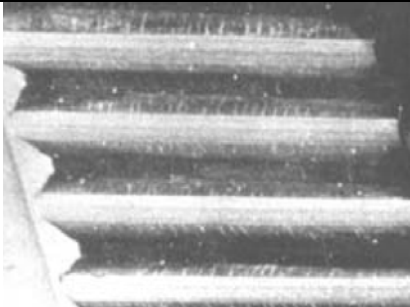
Табела 3.2. Номенклатура врста хабања и оштећења зуба зупчаника
(*AGMA STANDARD*) [18]

ХАБАЊЕ Хабање је општи термин којим се описује губитак материјала са контактних површина зуба зупчаника		НОРМАЛНО ХАБАЊЕ (ПОЛИРАЊЕ) То је споро одвођење материјала са контактних површина. Нормално хабање не утиче на рад преносника у интервалу времена за који је преносник конструисан.
		УМЕРЕНО ХАБАЊЕ То је брже одвођење материјала са контактних површина. Век зупчаника се не смањује.
		РАЗОРНО ХАБАЊЕ је оштећење, разарање или измена облика површине зуба зупчаника услед хабања. При оваквом хабању знатно се скраћује век и нарушава уједначен рад зупчаника.
		АБРАЗивно ХАБАЊЕ је врста разорног хабања које се карактерише повредама контактних површина услед деловања прљавштине, механичких примеса у уљу или продуката хабања зупчаника или лежишта.
		SCRATCHING је тежа форма абразивног хабања које се карактерише огреботинама и кратким зарезима у правцу клизања
		SCORING је брзо одвођење метала изазваног кидањем малих делова, заварених при непосредном додиру контактних површина. Карактерише се дубоким браздама у правцу клизања.

ХАБАЊЕ		ПОДСЕЦАЊЕ ЗУБА се јавља услед неправилног или нетачног спрезања. Најчешће се јавља у облику уских трака на којима је приметно интензивније хабање. Ова места су понекад покривена и јамицама. У тежим случајевима јављају се и изражене бразде.
		КОРОЗИОНО ХАБАЊЕ се јавља услед неправилног или нетачног спрезања. Најчешће се јавља у облику уских трака на којима је приметно интензивније хабање. Ова места су понекад покривена и јамицама. У тежим случајевима јављају се и изражене бразде.
		ЉУСПАЊЕ је врста хабања при којем се са површине одваја метал у облику врло танких љуспица, а на њеном месту остаје мала, мутна и храпава површина
		ПРЕГРЕВАЊЕ Настаје као резултат дејства врло високих температура. Као последица ове појаве могу настати разни облици интензивног хабања.
		ИНИЦИЈАЛНИ PITTING се испољава у облику ситних јамица на додирници или испод ње. Овај питинг није посебно опасан будући да га је лако одстранити, а осим тога практично је не прогресиван.
		РАЗОРНИ PITTING се обично јавља испод додирнице. Број јамица, као и њихове димензије се непрекидно увећавају, што коначно доводи до повлачења зупчаника из употребе
		SPALLING је тежа форма абразивног хабања које се карактерише огреботинама и кратким зарезима у правцу клизања

ПЛАСТИЧНО ТЕЧЕЊЕ Деформације површинског метала услед великог оптерећења		ВАЉАЊЕ И ОЈАЧАЊЕ се скоро увек јављају истовремено. Карактеришу се појавом гребена на врху и бочним ивицама зуба, деформисањем заобљења врха зуба, образовањем удубљења на погонском и гребена у зони додира гоњеног зупчаника
		ТАЛАСАЊЕ се испољава у облику таласастих под правим углом у односу на правац клизања. Јавља се углавном од цементираних, хипоидних погонских зупчаника
		ОБРАЗОВАЊЕ ГРЕБЕНА , БРАЗДАЊЕ је чести случај пластичног течења. Карактерише се појавом гребена распоређених по дијагонали контактне површине. У неким случајевима оштећења имају стреласт облик у правцу клизања.

ЛОМ ЗУБА ЗУПЧАНИКА		ЗАМОРНИ ЛОМ је најраспрострањенији вид лома зуба. Испољава се у виду пукотине на оптерећеној страни зуба, обично у области ивице попречног пресека. Пукотина се шири дуж ноге зуба по дијагонали све до потпуног лома.
		ЛОМ УСЛЕД ПРЕВЕЛИКОГ ХАБАЊА Може настати као резултат интензивног питинга, љуспања или абразије
		ЛОМ УСЛЕД ПРЕОПТЕРЕЋЕЊА Најчешће настаје при деловању изненадних, веома великих оптерећења. Код кртих и веома тврдих метала лом има изглед свиласте нити, а за жилаве метале изглед покиданих влакана.

ЛОМ ЗУБА ЗУПЧАНИКА		КАЉЕНА ПУКОТИНА Настаје као резултат концентрације унутрашњих напона услед термичке обраде. Обично су изгледа капиларних пукотина које пресецају главу зуба или су смештене по радијусу заобљења ноге зуба.
		ПУКОТИНЕ УСЛЕД БРУШЕЊА Настају услед неправилне технологије брушења или нарушеног режима термо обраде. Пукотине су узрок разорног лома а у неким случајевима проузрокују разарање само контактне површине праћено љуспањем

3.4 Најчешће врсте хабања зупчаника

По дефиницији *AGMA Standard-a 1010-E95*, “хабање је термин којим се описује свака промена на зубу зупчаника која укључује одстрањивање или дислоцирање материјала услед механичког, електричног или хемијског дејства” [7].

Зупчаници се разарају тако да долази до деградације зуба, односно до његовог површинског оштећења. Веома ретко долази до оштећења изазваног ломом венца зупчаника.

Зупчаници савремених авионских мотора раде у условима високих оптерећења и великих брзина. Њихови габарити су мали, а век трајања је краћи. Најчешће појаве хабања су питинг, скоринг и лом зупчаника.

Код зупчаника гасних турбина најчешћи облик хабања је скоринг а код зупчаника парних турбина где је захтеван дужи век трајања, не мањи од 100 000 сати највише се јавља питинг.

Питинг се јавља још код машина алатки, код аутомобилских зупчаника код којих је изражен рад при високим оптерећењима, релативно мањим брзинама и са променљивим моментом увијања.

Код тракторских зупчаника код којих је рад при високим оптерећењима мање заступљен него код аутомобила али је фактор удара већи, питинг је заступљен у 52% а абразивно хабање услед заступљених услова рада учествује са 30%.

Према подацима изнетим на међународној конференцији у Белгији 1956 појава питинга је у периоду од 1946-1956 представљала 90 % свих појава на индустријским и бродским зупчаницима.

Поједини аутори ипак не сврставају питинг у хабање, већ га разматрају као резултат дејства заморног контакта [7].

Поред питинга размотриће се скоринг, абразивно хабање, адхезивно и друге учесталије форме хабања.

3.4.1 Заморно хабање

Питинг - *pitting* 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, обично након 10^4 промена оптерећења. Препознатљив је по јамицама са тамним дном, без металног сјаја, које су настале одвајањем љуспица (материјала) од метала. Обично су јамце под углом 5° до 20° у односу на бочну површину а величине су од неколико десетина μm до $0,2 mm$, па чак и више и леже у правцу нормале на главни нормални напон.

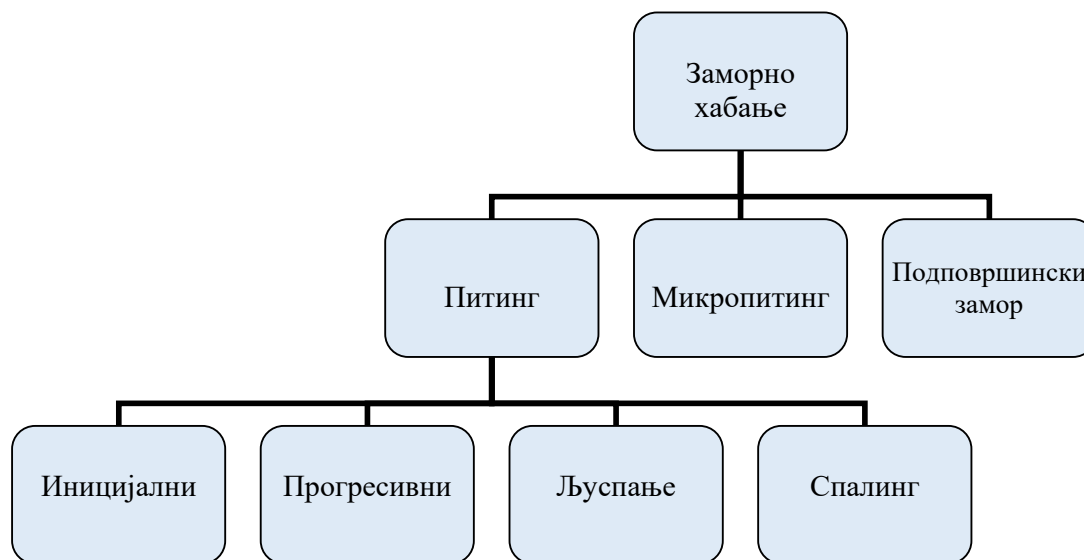
Испитивања су показала да су активне површине бокова зубаца испод кинематске површине више изложене питингу него површине изнад ње код погонског и гоњеног зупчаника али су чешће код погонског [1].

У зависности од тога како настају, развоја, облика и утицаја на век и поузданост зупчастих преносника разликујемо иницијални и разорни питинг.[18]

Још један начин класификације по *AGMA STANDARD*-у (1010 E95) описује питинг зупчаника као контактни замор и дели га у три општа облика: питинг(макропитинг), микропитинг и под површински замор.

Макропитинг се дели на посебне облике или степене: иницијални, прогресивни, љуспање и спалинг [22].

На слици 3.5 приказана је класификација заморног хабања, илустрација је преузета из NASA-ине публикације о евалуацији оштећења зупчаника.



Слика 3.5. Класификација заморног хабања, извор NASA/TM [22]

Почетни-иницијални питинг (по неким ауторима и корективни питинг) се јавља на почетку рада код зупчаника од мекших материјала или термички необрађених. 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.

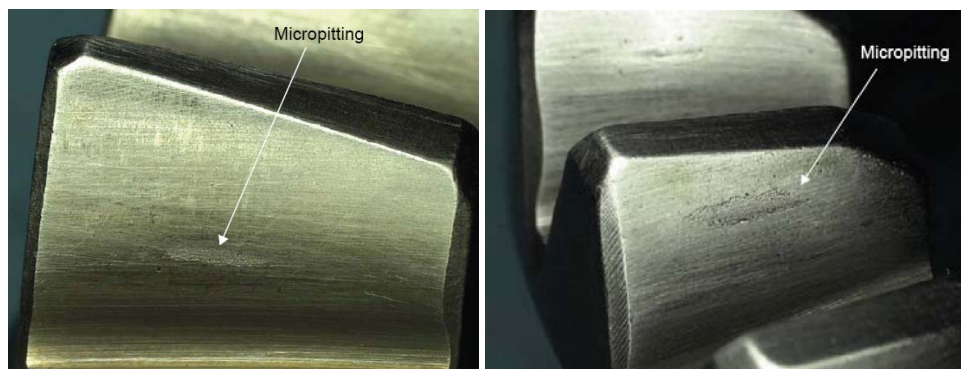
Узрок настајања је концентрација напрезања на местима изразитијих неравнина. Број јамица расте док се врхови неравнина не одстрани а стварна површина додира постане довољно велика да прихвати оптерећење без оштећења. Њега није могуће увек спречити али се може смањити корекцијом спрезања и тачнијом израдом зупчаника.

На слици 3.6 илустрован је иницијални питинг са теже уочљивим јамицама.



Слика 3.6. Иницијални питинг [24]

Микро питинг – Површина зупчаника изгледа као да је смрзнута, матирана или има сиве мрље. Под увећањем површина изгледа покривена веома финим јамицама. Узрокован је недовољним слојем уљног филма.



Слика 3.7. Микропитинг- профил зуба је неизмењен [24]

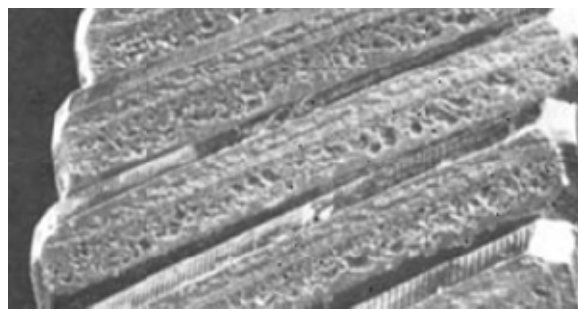
Spalling је хабање којим се описује веће одвајање материјала од остатка површине бока зупца, при том се инициране пукотине у почетку шире испод површине зупца и то паралелно са њом, да би по достизању одређене величине скренуле према површини зупца.

Код зупчаника с површински отворднутим 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 (слика 3.8).

Код прокаљених или неотворднутих зупчаника реч је о масовним скуповима повезаних и међусобно преклапајућих плитких јамица сличних онима код јамичења, али већих размера (слика 3.9) [23].



Слика 3.8. Иницијални питинг који је прерастао у тежи *spalling* [23]



Слика 3.9. *Spalling* настао комбиновањем већег броја јамица на једном месту. [23]

Енглеским називом *case crushing* (слика 3.10) означава се специфично оштећење узроковано значајним преоптерећењима, које се појављује углавном на зупцима с цементираним боковима испод отвореног површинског слоја, материјал се у значајној мери пластично деформише, што доводи до иницијације заморних пукотина.

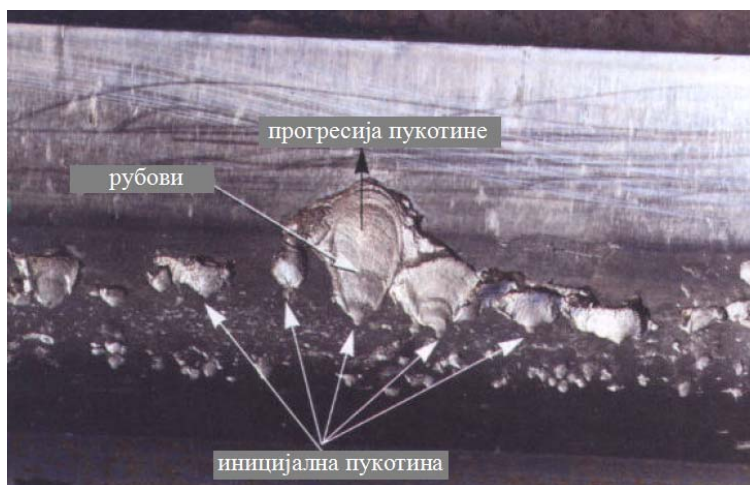
Поновљено деловање оптерећења подстиче њихово ширење паралелно с површином бока те после одређеног времена скретање према језгру и/или према површини зубца. Због свега наведеног, у захваћеном делу, језгро престаје пружати адекватан ослонац површинском слоју те се он у великим коадима одваја од основног материјала зупца. Ово се такође може сматрати и формом *spallinga* [23].



Слика 3.10. Оштећење изазвано великим преоптерећењем (*case crushing*) [24]

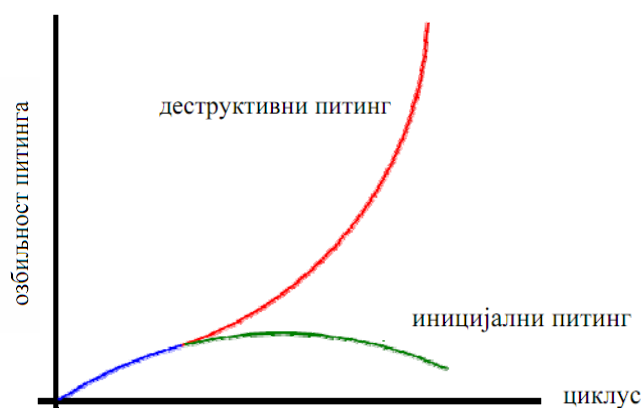
Разорни, прогресивни питинг је вид оштећења површине зупца који укључује пробијање и избацивање танких љуспица материјала у великој области, чиме се стварају плитке шупљине приближно константне дубине, облика троуглова са врхом надоле.

На слици 3.11 приказана је локација иницијалне пукотине и смер њене прогресије у току процеса хабања.



Слика 3.11. Разорни питинг [25]

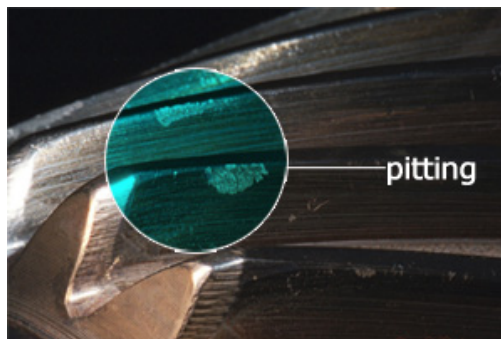
На слици 3.12 приказан је дијаграм развоја питинга у зависности од циклуса оптерећења. У почетку разорни питинг је истог интензитета као и иницијални, али у току времена се процес погоршава и далеко надмашује иницијални питинг који се уствари временом и коригује односно смањује.



Слика 3.12. Дијаграм развоја питинга [26]

Јамице код разорног питинга се у почетку појављују на нози зуба, оне су величине чиоде, понекад и веће. Број јамица непрекидно расте при чему долази и до увећања димензија појединих јамица и истовременог смањивања стварне површине контакта. Тада расту контактни напони, који при достизању критичних вредности изазивају пластичне деформације или интензивно хабање.

На слици 3.13 приказана је јамица узрокована питингом која осликава смањену стварну површину контакта.



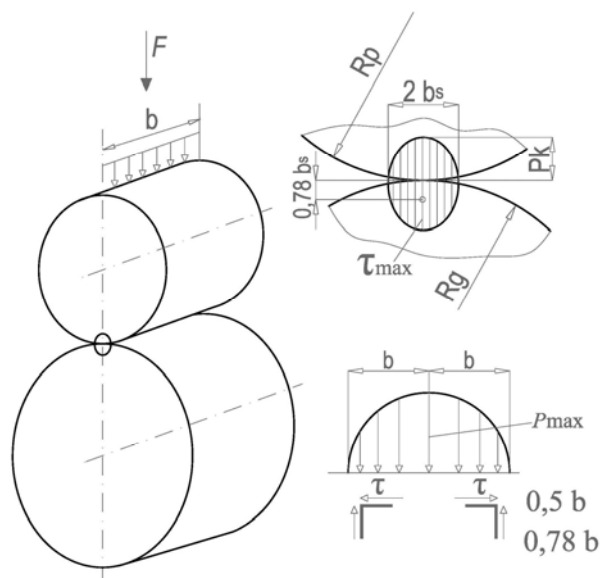
Слика 3.13. Питинг [27]

Развој разорног питинга се одвија у следећим фазама:

- у првој фази настаје извесно развлачење материјала површине облика клина и знатно веће од површине иницијалних јамица које ће се појавити нешто касније
- у другој фази се увећава број новоформираних јамица
- трећу фазу карактерише појава нових јамица које са постојећим формирају површину облика клина
- у даљем развоју питинга формиране јамице увећавају своје димензије док се границе између њих потпуно не уклоне и споје у једну површину облика клина
- пре него што наступи последња фаза разорног питинга јављају се јамице већих димензија изван области претходно захваћених питингом. Најчешће је то област кинематског круга
- Коначни стадијум представља разарање већег дела активне површине, формирају се прскотине веће и дубље него у претходним фазама.

Опште прихваћена теорија појаве и развоја питинга сугерише да се услед деловања контактних напона при међусобном спрезању два зупчаника јавља заморно разарање.

Разматрање напона на додирним површинама два спрегнута зупца, у теорији се обично своди на разматрање напона на додиру два ваљка (слика 3.14). При томе се узима да површине бокова зуба представљају делове површине два замишљена ваљка са полупречницима кривине на местима додира.



Слика 3.14. Напони на додирним површинама два спрегнута зупца [18]

Услед деловања оптерећења, у зони додира два ваљка са паралелним осама образују се нормални напони, односно површински притисак. Максимални површински притисак настаје на површини додира и смањује се удаљавањем од површине. У зони додира образују се такође и тангенцијални напони смицања. Ови напони достижу свој максимум $\tau_{\max} = 0,30 \cdot p_{\max}$ на растојању $Z = 0,78 \cdot b$ испод површине, где је $p_{\max}$ максимални површински притисак и постављени су под углом од 45° у односу на контактну површину. За време котрљања две површине, главни напони смицања расту од нуле до своје максималне вредности и поново опадају до нуле. Зато се ови напони веома често називају и пулсирајући напони. Напони смицања, паралелни са површином додира и управни на нормалну силу оптерећења, разликују се од главних напона смицања. То су променљиви напони чија се максимална вредност мења између $\tau = +0,25 \cdot p_{\max}$ и $\tau = -0,25 \cdot p_{\max}$, на дубини $Z = 0,5 \cdot b$ испод површине. Данас је опште прихваћено да су ови напони узрок настајању иницијалних пукотина које настају испод површине када тангенцијални напони пређу вредност границе издржљивости материјала. Оваква слика расподеле напона важи само за спрегу зуба на кинематском кругу. У случају додира зуба изван кинематског пола, услед клизања бокова зуба, јављају се силе трења које повећавају тангенцијалне напоне на местима додира. Нарочито велике силе трења и велики тангенцијални напони настају у случају додира ивице једног зуба са боком другог зуба. Овакав додир настаје због деформације зуба и разлика у корацима при улажењу односно излажењу једног пара зуба из спреге. Промена интензитета тангенцијалних напона зависи од величине коефицијента трења и највећу вредност достиже у слоју мањем од $0,5 \cdot b$. Са порастом коефицијента трења, највећи тангенцијални напони се померају у правцу деловања тангенцијалних сила и ближе ка површини. При коефицијенту $\mu = 0,4$ излазе на површину и достижу вредност $\tau_{\max} = 0,4 \cdot p_{\max}$. Код добро подмазиваних зупчаника, коефицијент трења је мањи од 0,1 па је и његов утицај на величину напона мањи. Из претходних разматрања јасно се може уочити да су тангенцијални напони смицања главни узрок настајању иницијалних пукотина из којих ће у наредним фазама и после одређеног броја циклуса настати питинг. Активне површине зуба су током целог процеса спрезања виšekратно наизменично подвргнуте нормалним и тангенцијалним напонима, а питинг настаје кад ови напони пређу вредност граничне издржљивости материјала [18].

У току спрезања иницијална пукотина прилази додиру својим истуреним површинским слојем који први доспева у зону максималног хидродинамичког притиска уља. Други подповршински слој се налази у зони мањег притиска, и то утолико мањег интензитета уколико је пукотина дужа. Услед великих контактних напона, уље се сабија у пукотину, додатно оптерећује њене зидове и приморава је да се шири још више. Код активних површина које су у претицању у зону максималног напона прво улази подповршински крај пукотине, па се уље истискује из пукотине и она се не шири.

Код термички обрађених зупчаника, карактеристична је појава повећања тврдоће у току експлоатације, а која настаје услед хладне деформације при чему се деформише и зрно и постаје тврђе.

Код термички необрађених зупчаника циклично деловање смицајних напона изазива пластичне деформације материјала при чему правац пластичног течења има правац клизања. Заостали напони услед деформисања у комбинацији са топлотном енергијом трења деформишу зрно у зони питинга. Ту се јавља рекристализација зрна и оно постаје грубо. Око области питинга зрно је мекше и погодно за рекристализацију а микротврдоћа је нижа. Испод овог слоја тврдоћа је већа.

На слици 3.15 види се резултат дејства разорног питинга на зупчанике.



Слика 3.15. Разорни питинг код ојачаних зупчаника [23]

Резултати бројних испитивања у лабораторијским и експлоатационим условима упућују на следеће закључке [18] :

- 1) Питинг захвата површински слој дубине до $15\mu m \div 25\mu m$
- 2) За развој питинга неопходно је подмазивање зупчаника
- 3) Питинг се јавља на оним деловима активних површина зуба где је концентрација напона увећана
- 4) Питинг се обично јавља на подножју зуба, ретко на глави
- 5) Појава и развој питинга су отежани при подмазивању уљима веће вискозности
- 6) Тврдоћа површинског слоја утиче на појаву питинга
- 7) Питинг не настаје при интензивном хабању (на пример при присуству абразивних честица у уљу)
- 8) Питинг најчешће настаје код цилиндричних зупчаника, ређе код коничних и готово никада код хипоидних.
- 9) Питинг се не јавља код отворених преносника, преносника који раде без мазива или код којих се подмазивање врши конзистентним мазивима [18].

Питинг може бити спречен правилним димензионисањем и одабиром материјала, сходно оптерећењима у раду чиме се између осталог постиже правилна расподела оптерећења дуж бочне линије зупца. Правилно подмазивање такође елиминира или умањује овај вид хабања, са друге стране неадекватни услови подмазивања доводе до прогресивнијег хабања или неких других врста хабања и оштећења.

3.4.2 Хабање као последица разарања мазивог слоја

На активним површинама зубаца у контакту при условима високих оптерећења јављају се посебни услови подмазивања, при чему у мазиву настају високи притисци услед чега се мења и вискозност уља односно мазивог слоја. Оптерећење се једним делом преноси преко хидродинамичког слоја, а другим преко неравнина површинског слоја.

Услед оптерећења долази до еластичних деформација неравнина површинског слоја што узрокује слој мазива мање дебљине у односу на збир висина неравнина спрегнутих површина.

Смањење габарита и маса преносника, машина и уређаја као општи трендови савременог конструисања повлаче са собом и повећање механичких и топлотних напона на контактним површинама зупчастих преносника.

Када наруши конзистентност граничног мазивог слоја долази до непосредног контакта активних површина зуба а најосновнији узроци овога су :

- загревање уља у његовом површинском слоју,
- употреба неадекватних уља (недовољне вискозности и слично),
- недовољна количина уља при подмазивању,
- недовољни квалитет радних површина и
- велика оптерећења.

Scoring је најкарактеристичнија и истовремено најопаснија врста хабања која настаје као последица разарања мазивог слоја. Може се појавити у више различитих облика који су у енглеском говорном подручју познати под називима: *cold welding*, *scuffing*, *seizing*, *galling* итд.

Када се оствари директан контакт метала о метал пробијањем граничног слоја уља, микронеравнине које учествују у том процесу се међусобно заварују а потом долази до њиховог кидања и даљег одвођења материјала. Ово се карактерише знатним повредама зуба у правцу клизања у виду пруга, бразда и кидања метала итд.

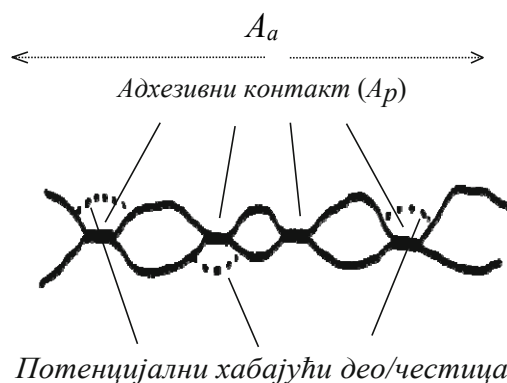
У зависности од радних услова а према механизму настајања и развоја скоринг може бити адхезиони и режући [1].

Адхезиони скоринг се дели у 2 групе:

- 1) Хладни скоринг (*cold welding*) настаје у условима малих брзина и релативно ниских температура а карактеришу га искидане дубоке бразде
- 2) *Scuffing* настаје при средњим и вишим брзинама у условима релативно високих температура активних површина и то у облику равномерних малих бразда, често са траговима отапања метала.

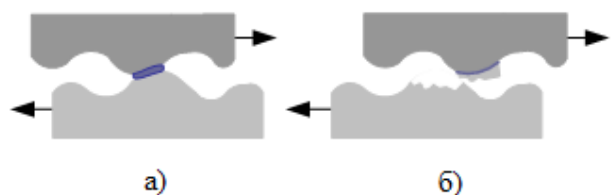
Адхезиони скоринг пролази кроз три фазе развоја:

- 1) У првој настају тангенцијалне пластичне деформације површинског слоја, које морају бити довољно интензивне како би се разорила конзистентност слоја мазива и на том месту оголиле спрегнуте површине.
- 2) У другој фази долази до локалних фрикционих веза између атома метала на местима оголелих површина. Везивање настаје када растојање између спрегнутих површина постане довољно мало како би се формирале металне везе.
- 3) У трећој фази услед релативног кретања спрегнутих површина долази до раскидања остварених металних веза, при томе долази до откидања честица метала при чему поједине поново приањају на друго место контакта и даље и саме доприносе развоју хабања. На слици 3.16 илустрован је адхезивни контакт уз приказ више зона контаката и односа A_p и A_a под оптерећењем.



Слика 3.16. Приказ адхезивног хабања [28]

На слици 3.17 приказане су фазе настанка адхезивног хабања када се формира микро-вар и потом откида од основног материјала.



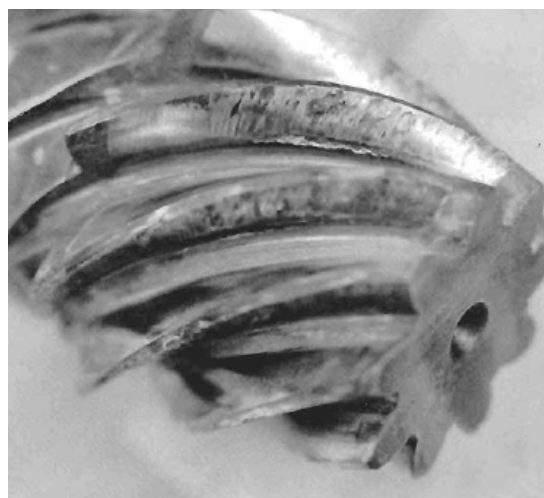
Слика 3.17. Фазе настанка адхезивног хабања: микро-вар, крхотина [29]

Адхезивно хабање настаје када притисак на површинама постане довољно висок да изазове пластичне деформације а када оне наступе енергија се апсорбује и трансформише у топлоту услед трења. Први видљиви знак је углачана, глазирана површина која се у фазама трансформише. Како фрикциона топлота расте, материјал омекшава и адхезивни процеси долазе до изражаја, наступају даље пластичне деформације а топлота је довољно велика да локално потпуно утиче на микроконституенте на површини (слика 3.18).

У даљем процесу наступа одвођење материјала-*galling*, веће површине почињу да се заварују а затим и откидају. Поједине честице односно делићи, који су толико отврднути услед промене микро структуре, постају абразиви који се усецају у површине у додиру (слика 3.19) [17].



Слика 3.18.
Профил зуба (увећање x100) [17]



Слика 3.19.
Сјај, *galling* и адхезија преко активне површине зуба [17]

Режући скоринг, за разлику од адхезивног не наступа по формирању металних веза, настаје обично код цементираних и каљених зупчаника великих тврдоћа и релативно меког основног материјала и то у условима доброг подмазивања уљима-отпорни уљни слој се ствара додавањем адитива отпорних на скоринг.

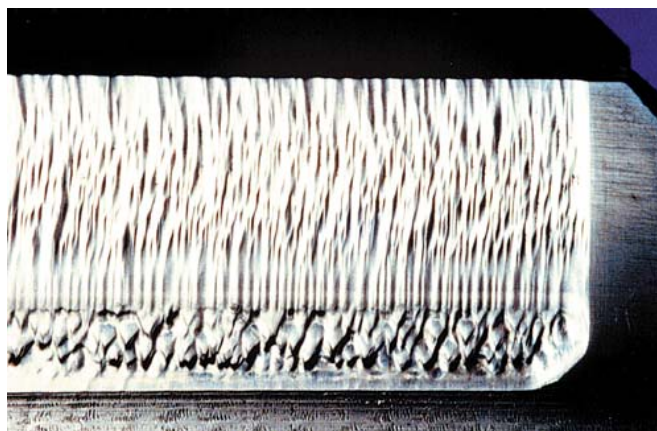
Процес се одвија услед дејства великих сила трења и пластичних деформација активних површина. При оваквим условима спрезања издвајају се крте, веома тврде честице каљеног цементираног слоја које се додатно појачавају под дејством сила и температура трења. Овакве честице делују као оштра абразивна зрна и у почетном стадијуму изазивају зарезе на активним површинама а касније све дубље и шире бразде. Интензитет и дубина оштећења су знатно већи него код адхезивног скоринга који се манифестује у танком површинском слоју.

Код режућег скоринга, оптерећење при коме он наступа је по правилу веће него код адхезивног типа скоринга због деловања заштитног уљног слоја коме су додани антискоринг адитиви. Режући скоринг расте релативно споро са повећањем оптерећења за разлику од адхезивног скоринга који настаје у већини случајева по достизању одговарајућег критичног оптерећења.

3.4.3 Абразивно хабање

Абразивно хабање је облик одстрањивања материјала са површина у контакту као последица 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.

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 [4]. На слици 3.20 је приказана избраздана површина услед абразивног хабања.



Слика 3.20. Изглед површине под утицајем абразивног хабања [30]

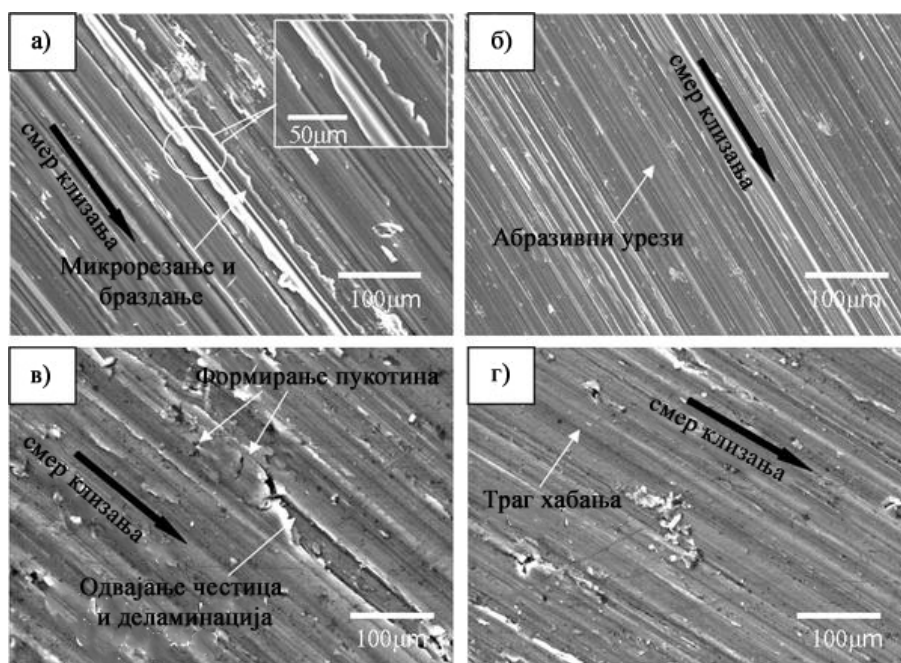
Битно је истаћи да ни затворени зупчасти преносници који раде у контаминираним срединама нису у потпуности заштићени од продирања абразивних честица. То се објашњава томе што мале честице (величине $30 \mu m$) поседују способност задржавања у ваздуху и продирања у кућиште поред било како успешно

решеног заптивања. Продирући у картер, нарочито при картерском подмазивању, абразивне честице након неког одређеног времена експлоатације засите присутно уље. Осим абразивних честица из спољне средине у уље доспевају и продукти хабања, најчешће ојачане честице и оксиди метала који имају већу тврдоћу од почетне тврдоће активних површина. Са порастом интензитета хабања расту и димензије продуката хабања. Кад димензије абразивних честица постану веће од дебљине мазивог слоја долази до разарања уљног филма и активне површине ступају у интеракцију као и у условима сувог трења [20].

Контаминанти атмосферског порекла су дим или прашина и неметалне нечистоће, мада су најдоминантнији силицијум-диоксид (SiO_2) и оксиди калијума, магнезијума, гвожђа и алуминијума и сл.

Технолошке нечистоће које су се задржале на површинама елемената и у систему подмазивања су ливачки песак, тврди делићи металних оксида, остаци при ливењу и остаци различитих поступака механичке обраде [1].

На слици 3.21 дат је приказ абразивног хабања по фазама где су видљиви различити степени оштећења површина.

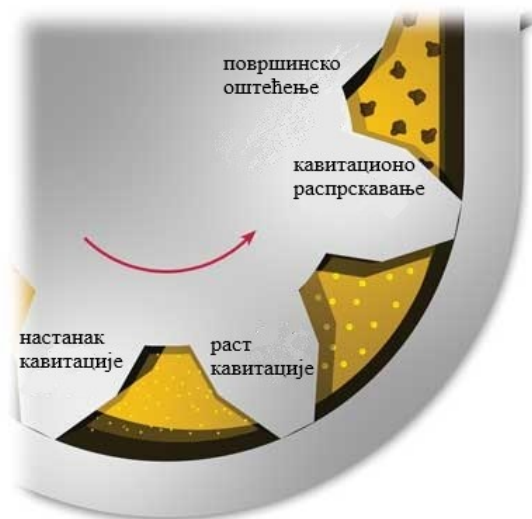


Слика 3.21. Изглед различитих фаза абразивног хабања [31]

3.4.4 Кавитационо хабање

Кавитација је посебан облик ерозије у коме се мехурићи паре у течности формирају у зони ниског притиска, а затим имплодирају (урушавају се) у зони високог притиска - приказано на слици 3.22. Наиме, када при струјању течног мазива, притисак у течности падне испод притиска паре течности на радној температури, у течности се појављују парни или гасни мехурићи. При преласку течности поново у област високог притиска долази до разбијања – колапса мехурића.

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.



Слика 3.22. Оштећења изазвана кавитацијом могу да доведу до уништења делова [32]

На слици 3.23 приказан је апроксимативни модел услова при којима долази до кавитације.



Слика 3.23. [32]

Смањење овог вида хабања обезбеђује се: коришћењем тврдых метала, као што је алатни челик, редуковањем вибрација, брзина протицања и притисака, избегавањем честих промена правца протицања флуида и избегавањем ниског притиска испаравања, појаву воде у уљу, појаву ваздуха у уљу.

3.4.5 Корозионо хабање

Корозија је хемијско-физички процес чији је резултат промена и слабљење својства метала, услед дејства спољашње средине у којој се метал налази – приказано на слици 3.24.



Слика 3.24. Уколико се корозија не открије правовремено може доћи до корозивног питинга [33]

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 утицајима (нпр. атмосферским факторима, дејству морске воде и сл.), већ и код унутрашњих површина механичких система [6].

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 повремених, сезонских 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 знатног 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 [34].

3.4.6 Оксидационо хабање

Кисеоник, активна компонента ваздуха, реагује необично брзо са свим металима, осим племенитих. Практично су све површине таквог материјала покривене слојем оксида (слика 3.25). До оксидационих процеса долази и када површине нису на изглед у контакту са ваздухом нпр. површине покривене апсорбованим или хидродинамичким слојем мазива, јер се кисеоник налази апсорбован на свим површинама и растворен у свим флуидима који се са ваздухом налазе или су се налазили у контакту.



Слика 3.25. Изглед зупчаника којег је захватила оксидација [35]

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.

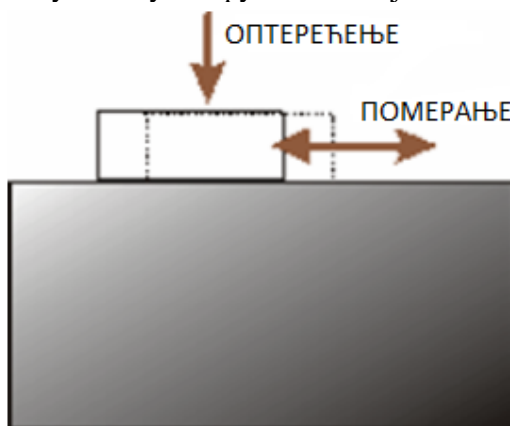
Метали као што су алуминијум, хром, калај и неки други метали дају танке слојеве оксида. Код легура, афинитет појединих метала који је чине, према кисеонику не одговара афинитету тих метала када не формирају легуру. Легирани челици са релативно малом количином хрома дају оксидни слој хромног оксида (Cr_2O_3) који заштићује површине челика од корозије на високим температурама [34].

3.4.7 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 ($\approx 1\mu\text{m}$) контактних површина под оптерећењем. Због мале амплитуде кретања, велики број честица насталих адхезивним хабањем се не износи из контактне зоне. 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 [34].

На слици 3.26 је приказан модел два тела која су међусобном контакту и осцилаторном кретању једно у односу на друго а под дејством оптерећења.



Слика 3.26. Приказ услова при којима долази до *Fretting* корозије [36]

Смањење овог вида хабања обезбеђује се:

- редукијом или потпуном елиминацијом вибрација помоћу споја са што мањим зазорима или што већим оптерећењем,
- побољшавањем подмазивања између површина са већом храпавошћу,
- коришћењем уља нижег вискозитета,
- подмазивањем веће учесталости и
- коришћењем инхибитора оксидације у уљу.

Проблем се пре свега разматра као конструкцијски. Нова конструкцијска решења треба да омогуће елиминацију и смањење могућности релативног кретања површина у контакту, смањењем или елиминисањем вибрација, или пак смањењем приступа кисеоника из ваздуха адекватним заптивањем [37].

4. Теорије подмазивања

4.1 Дефиниција и класификација врста подмазивања

Подмазивање се дефинише као процес раздвајања спрегнутих површина тела у релативном кретању слојем неке врсте мазива. Под мазивом се подразумева било која материја којом се раздвајају, потпуно или делимично, површине тела у кретању и којом се смањују трење и хабање. 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 лежајеве мазивим мастима итд [37].

Обзиром 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 [37].

Подмазивање зупчаника има и друге функције: смањење губитака трења, хлађење, смањење шума, итд. Све ово говори о веома важној улози подмазивања, па се решавању овог проблема у развоју триболошких процеса мора посветити пуна пажња.

У зависности од геометријских карактеристика, експлоатационих услова, начина подмазивања и др. разликујемо следеће основне режиме подмазивања зупчастих преносника:

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

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

$$h_g = h / (R_{a1} + R_{a2}) \quad (4.1)$$

h - дебљина слоја мазива,

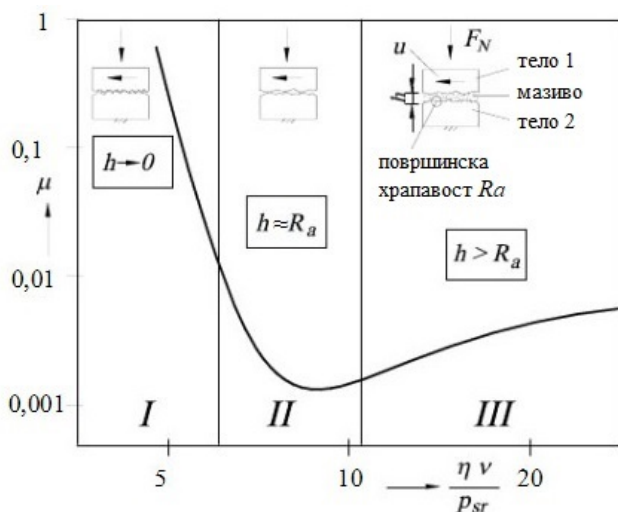
R_{a1}, R_{a2} - средње одступање од номиналног профила површине,

$h_g < 1$ гранично подмазивање,

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

$5 < h_g < 100$ хидростатичко или хидродинамичко подмазивање.

На слици 4.1 приказана је Стрибекова крива и видови подмазивања у односу на дебљину слоја мазива h .

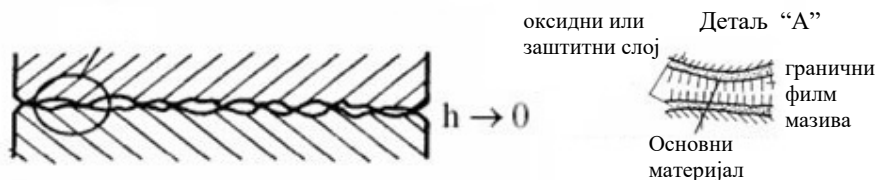


I – гранично подмазивање
 II- мешовито подмазивање
 III- хидродинамичко подмазивање

Слика 4.1. Стрибекова крива и видови подмазивања [38]

4.2 Гранично подмазивање

Гранично подмазивање (слика 4.2) настаје када слој мазива нема довољну дебљину да спречи контакт површина чврстих тела. Површине елемената су у директном додиру и оптерећење се преноси с једне на другу преко спрегнутих неравнина.



h – дебљина слоја мазива

Слика 4.2. Приказ граничног подмазивања [37]

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, [37]:

$$\mu = a_w \mu_m + (1 - a_w) \mu_g \quad (4.2)$$

где је:

μ - коефицијент трења граничног подмазивања,
 a_w - део стварне површине додира метала,
 μ_m - коефицијент трења спрегнутих површина метала и
 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.

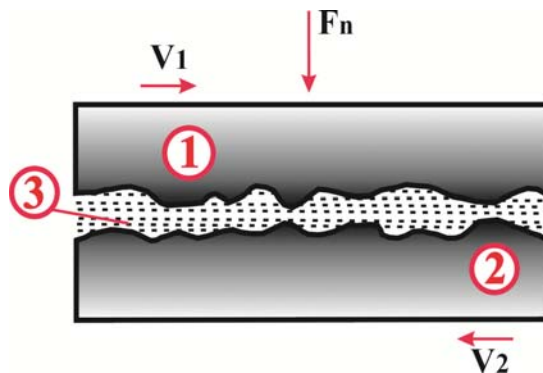
Код хемијске адсорпције активни молекули мазива везани су за металне површине хемијским везама, као на пример везивање масних киселина за метале и његове оксиде, при чему настају метални сапуни веома добрих триболошких својстава. Ови гранични слојеви су погодни за средња оптерећења, средње температуре 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 [37].

4.3 Хидродинамичко подмазивање

Хидродинамичко подмазивање се карактерише тиме што оптерећење преноси мазиви слој који се налази између спрегнутих профила. Дебљина слоја мазива у најужем делу $h_{\min}$ већа је од збира $|R_{z1} + R_{z2}|_{\max}$ максималних неравнина оба профила $|R_{z1} + R_{z2}|_{\max}$. При хидродинамичком подмазивању, спрегнуте површине потпуно су раздвојене мазивним слојем, $h_{\min} > |R_{z1} + R_{z2}|_{\max}$ [18].

Хидродинамичко подмазивање приказано на слици 4.3, 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.



Слика 4.3. Приказ хидродинамичког подмазивања [39]

Елементи механичких система код којих се остварује хидродинамичко подмазивање одликују 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.

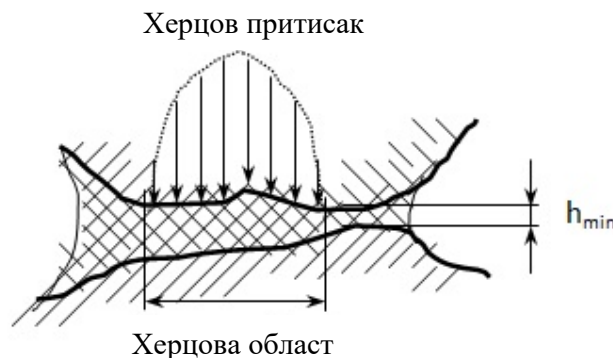
Дебљина слоја која је једнака збиру висина површинских рељефа површина назива се критичном и испод ње престају законитости хидродинамичког подмазивања, [37].

4.4 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 (слика 4.4). 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.

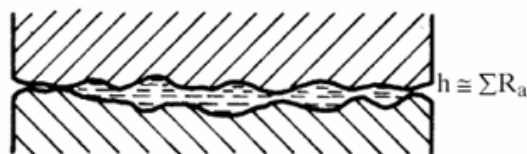


Слика 4.4. Расподела Херцовог притиска у слоју мазива [37]

4.5 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 елемената при високим оптерећењима (слика 4.5).



h - дебљина слоја мазива

R_a - средње аритметичко одступање

Слика 4.5. Приказ мешовитог подмазивања [37]

Код мешовитог подмазивања дебљина мазивог слоја је приближно једнака суми средњих аритметичких одступања неравна површина у контакту.

5. Мазива

5.1 Појам, особине, 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 [37].

Правилна примена мазива осигурава сигуран и економичан рад, а обезбеђује и дужи век механичких система. Због тога корисници опреме морају се придржавати препорука произвођача.

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

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

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

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

Мазива уља садрже две основне групе компонената то су базна уља и адитиви различитих функција (Таблица 5.1). Комбиновањем базних уља различитих вискозних градијација и одређених група адитива, добија се широка палета мазивих уља која се међусобно могу разликовати по намени, реолошким, триболошким и другим радним

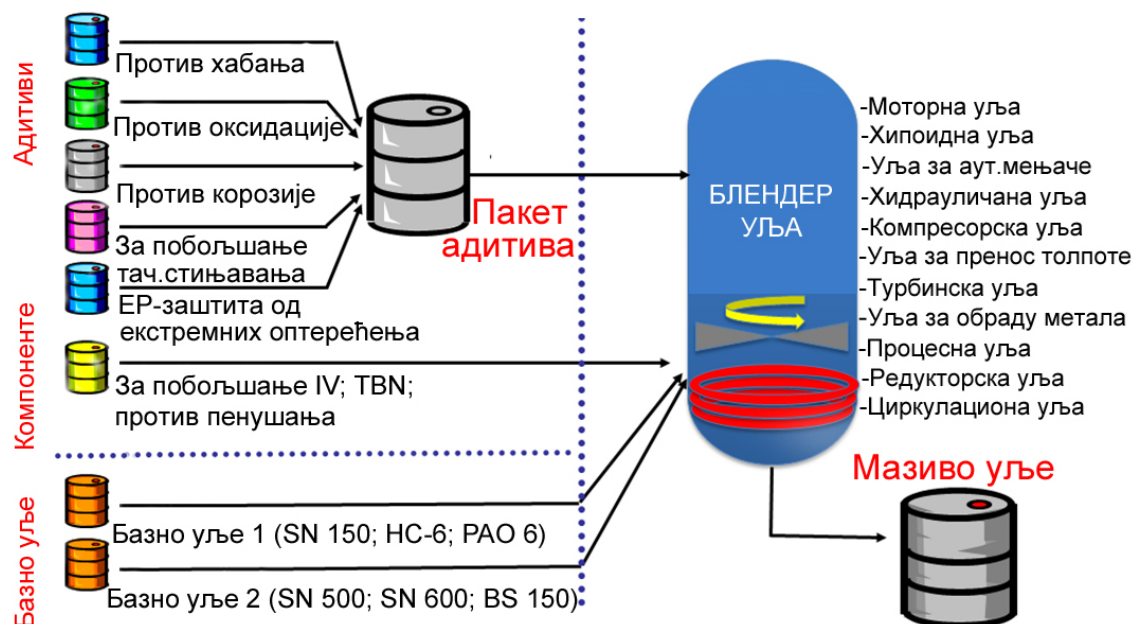
особинама. У зависности од врсте базних уља, финална мазива уља се на тржишту препознају као минерална, хидрокрекована или синтетичка моторна и индустријска уља.

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.

Таблица 5.1. Компоненте мазивих уља и мазива уља [37]

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 -Дисперзант -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

На слици 5.1 илустративно је приказан процес производње мазивих уља кроз синтезу базних уља, компонената и адитива преко њиховог сједињавања, све до коначног производа.



Слика 5.1. Процес производње мазивих уља [37]

Мазиве масти се дефинишу као чврста или получврста мазива, настала дисперговањем одговарајућег угушћивача у мазивом уљу. Својства мазивих масти зависе углавном од врсте угушћивача који могу бити сапунског или несапунског порекла. Приказ компоненти које улазе у састав мазивих масти дат је у Таблици 5.2.

Таблица 5.2. Компоненте мазивих масти и мазиве масти које оне чине [37]

БАЗНА УЉА	+	АДИТИВИ	+	УГУШЋИВАЧИ	=	МАЗИВЕ МАСТИ
Конвенционална базна уља: -Рафинати -Рерафинати Неконвенционална базна уља: -Хидрокрекована уља (НС) -Синтетички угљоводо-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 угушћивачи: -Бентонит -Полиуретани -Гели		-Вишенаменске масти -Масти за високе температуре -Масти за ниске температуре -Масти за централно подмазивање -Силикагелне масти -Бентонитне масти -Полиуретанске

5.2 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, [37].

5.2.1 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 [37].

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.

5.2.2 Синтетичка базна уља

Синтетичка базна уља производе се хемијском синтезом различитих компонената разним 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 поштрених 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 и термичке стабилности, вишег индекса вискозности, ниже испарљивости и тачке течења, више температуре паљења, биоразградивости, нетоксичности, дужег века у експлоатацији, односно мањих трошкова одржавања. Главну препреку интензивнијем развоју представља 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 [37].

Потрошња моторног уља огледа се, у првом реду, испаравањем које је много мање код синтетичког (7% – 8%) него код минералног уља (13% - 15%). Синтетичко уље ствара мање талога 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 [37].

5.3 Адитиви

Адитиви су материје које се додају мазивима у циљу побољшања постојећих или стварања неких нових особина мазива, чиме се унапређују експлоатационо-техничка својства. То су синтетичке материје које су растворљиве у базном уљу, термички стабилне и поседују врло ниску испарљивост.

У односу на механизме 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 и
- адитиви који штите машинске елементе од штетних материја насталих у уљу: адитиви против корозије, дисперзанти и детерџенти.

Побољшивачи тачке течења-Депресанти

Експлоатација на нижим температурама условљава примену мазивних уља са доданим материјама које снижавају тачку течења. Механизам деловања ових адитива се заснива на обмотавању микроскопски ситних кристала парафина при чему се онемогућава њихово груписање и таложење, тако да уље остаје дуже течљиво. Немају способност спречавања кристализације (стварања кристала) и не утичу на тачку замућења уља.

Побољшивачи индекса вискозности-Импрувери

Једна од најважнијих карактеристика неког мазива је стабилност вискозности са променом температуре, односно вискозно-температурна својства. На ниским температурама ови адитиви готово не дејствују, а на високим температурама је пад вискозности мањи услед њиховог угушивачког деловања. Импрувери индекса вискозности су адитиви за побољшање индекса вискозности уља и користе се за производњу мултиградних уља, [37].

Адитиви против пенушања-антипенушавци

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

5.3.1 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.

5.3.2 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) и
- 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, [37].

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

Адитиви на бази цинка имају највећу ефикасност на вишим температурама (преко 150°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.

5.3.3 Адитиви за заштиту од оксидације-Антиоксиданти

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

5.3.4 Адитиви за заштиту од корозије-Инхибитори корозије

Инхибитори корозије (антикорозивни адитиви) штите металне делове машинских елемената који су изложени дејству корозије. Корозија је електрохемијски процес и настаје агресивним деловањем киселих хемијских продуката, као и ваздуха или воде 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, [37].

5.4 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) [37].

5.4.1 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.

5.4.2 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 [37].

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

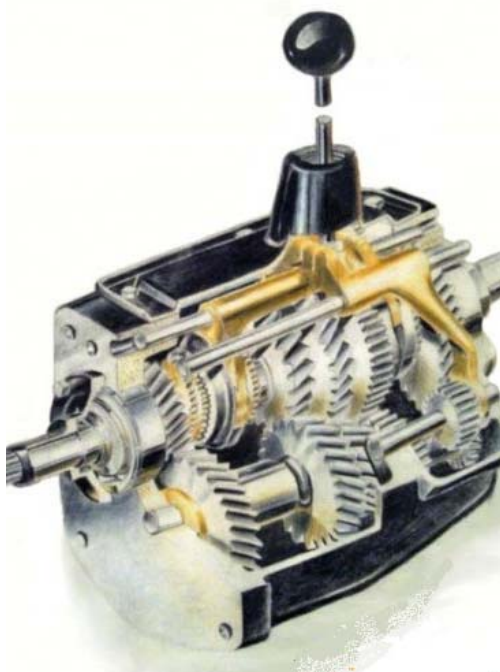
Као несапунски угушћивачи користе се:

- неоргански угушћивачи – високодисперзне модификоване глине, олефилни силицијум диоксид, разни пуниоци и чврста мазива, оксиди метала у облику аморфног (финог) праха и
- органски угушћивачи - чврсти угљоводоници, чађ, полиуреа, полимери, пигменти.
- Према врсти несапунског угушћивача мазиве масти се називају: бентонитне, силикагелне, пигментне, полиуреа масти, мазиве пасте [37].

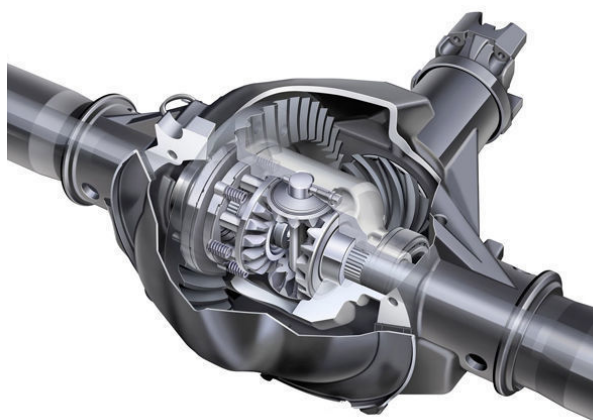
6. Избор мазива

6.1 Уља за подмазивање мењача и диференцијала моторних возила

Задатак зупчастих преносника, мењача и диференцијала (слика 6.1) је да пренесе погонску снагу мотора на осовине и точкове возила, при чему су зуби зупчаника изложени врло високим притисцима. Највећи притисци се јављају при старту и заустављању погонског агрегата одн. мотора. 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 [37].



Слика 6.1. Изглед мењача [40]



Слика 6.1. Изглед диференцијала [40]

За подмазивање преносника у овако захтевним 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, адитиви за заштиту од високих притисака и хабања, адитиви за побољшање тачке стишавања, адитиви за заштиту од оксидације, деактиватори метала, адитиви против стварања пене и модификатори трења.

Да би се задовољили сви фактори који утичу на сложеност радних услова, уљу се додају специјални *EP* (*Extreme Pressure*) адитиви, који дају и различите нивое квалитета 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 уравнотежити тако да могу

стварати заштитни филм, а да не изазивају корозију на металним површинама. Задатак уља за зупчасте 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 (*Society of Automotive Engineers*) за мењаче и диференцијале се односе искључиво на вискозност и не одређују квалитетни ниво уља.

Дефинисане су две серије вискозних градација: са ознаком “*W*” и без те ознаке. Уља са ознаком “*W*” представљају моноградна уља за зимске услове рада. Дефинишу се максималном вискозношћу и пумпабилности на ниским температурама и минималном кинематском вискозношћу на 100°C (*SAE 10W*, *SAE 20W*). Ова уља морају обезбедити довољно ниску вискозност на ниским температурама да би се мотор покренуо и да уље крене у циркулацију након стартовања мотора. Уља без ознаке “*W*” представљају моноградна уља за летње услове рада. Дефинишу се минималном и максималном кинематском вискозношћу на 100°C, и минималном вискозношћу након смицања на високим температурама 150°C. Комбиновањем две вискозне градације добијају се мултиградна уља која задовољавају како летње тако и зимске услове рада (*SAE 15W-40*, *SAE 10W-40*). Дефинишу се максималном вискозношћу и пумпабилности уља приликом покретања мотора на ниским температурама и максималном и минималном кинематском вискозношћу на 100°C.

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.

6.1.1 Избор уља за мењаче и диференцијале

Захтеви у погледу квалитета уља за мењаче и диференцијале [37]:

- 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).

6.2 Редукторска уља

Савремени индустријски зупчаници и редуктори раде обично у условима хидродинамичког и мешовитог подмазивања. Међутим, у ваљаоницама и на рударској опреми често су изложени ударним оптерећењима. То има за последицу пораст радних температура и до 100°C [37].

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 градације према конструкционим карактеристикама склопа

Задатак редукторских уља није само да врши функцију подмазивања лежајева 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 [37].

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. Редукторска уља, у зависности од примене, производе се од минералних базних уља, полиалфаолефина, синтетичких естера и полиалкиленгликола.

У прехранбеној индустрији, где постоји могућност додира са храном, користе се редукторска уља на бази синтетичких естера,

У рудницима и каменоломима, нпр. код дробилица, где су ударна оптерећења и високи притисци, користе се редукторска уља са додатком молибдендисулфида (MoS_2) који обезбеђује боље подмазивање, заштиту од хабања, појаве питинга и пукотина,

За редукторе који су изложени највећим оптерећењима и за зупчанике израђене од различитих материјала (челик – бронза) користе се редукторска уља на бази полиалкиленгликола. Ова уља се употребљавају на температурама од -40 до $1700^{\circ}C$. Важно је знати да се ова уља не смеју мешати са минералним уљима,

За хидродинамичке преноснике, турбо или хидрауличне спојнице и редукторе са претварачем обртног момента користе се специјална уља ниже вискозности ($30 \text{ mm}^2/\text{s}$ на $40^{\circ}C$) са специјалним пакетом адитива. Ова уља морају задовољити захтеве спецификације *VOITH 3.90-8* и *MTU 3.3.1 (Motoren Und Turbinen Union)* [37].

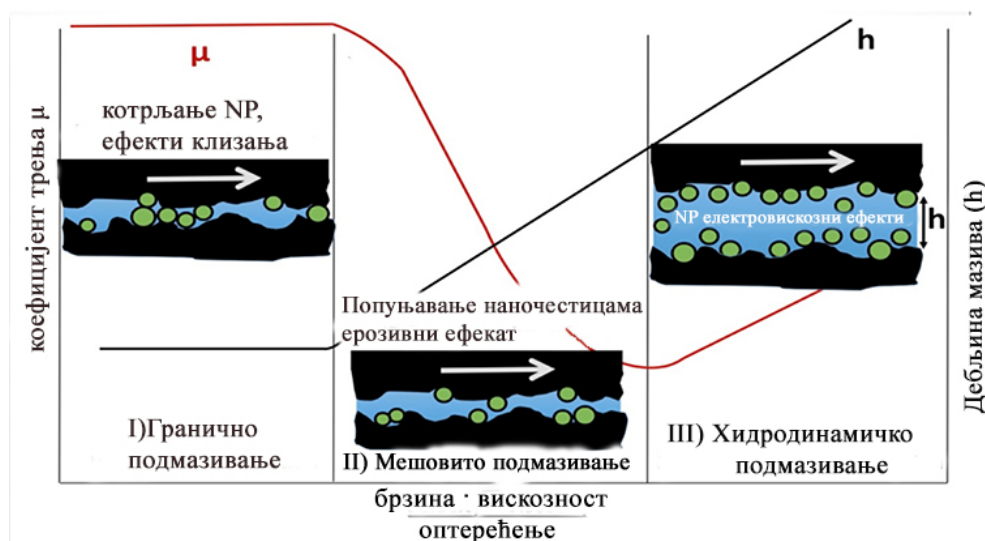
6.3 Контрола трења уз присуство електро-магнетних поља-нове технологије

Најновији приступи проблематици подмазивања у светлу усвајања нових технологија подразумевају тзв. активну контролу процеса трења. Контрола и манипулација адхезије и трења у клизном контакту је од изузетног значаја за најразличитије примене од нанотехнологија до макротехнолошког нивоа. Циљ је да се успешно укључе и/или прилагоде материјали на молекуларном нивоу. Постизање *in situ* контроле над нивоима трења без демонтаже, замене делова или лубриканта који се налази у неприступачним склоповима представља велики изазов за нанотрибологију. Примена електричних или магнетних поља су начини који делују обећавајуће и доживљавају велику експанзију на пољу „активне” или „паметне” контроле на молекуларном нивоу у пољу које се сада зове „трибо-троника”.

Слика 6.2 представља Стрибекову криву шематски приказану преко молекуларног нивоа нано честица (*NP-nanoparticles*) или молекула доданим лубриканту где је коефицијент трења $\mu = F_\mu / F_N$ приказан у односу на $f \cdot \nu$: $\frac{\eta \cdot \nu}{F_N}$

Коефицијент трења је нелинеарна функција оптерећења, вискозности мазива и брзине мазива и његова крива је подељена на три области: гранично подмазивање, мешовито подмазивање и хидродинамичко подмазивање. За константне вредности вискозности и оптерећења, коефицијент трења је приметно независан у односу на брзину у области граничног подмазивања где може да се пореди и са Куломовим (*Coulomb*) или „сувим” контактом. Ово је због тога што врхови неравнина носе пуно оптерећење чврстих тела која су у контакту. Како брзина расте постоји и прогресивна транзиција до Стоуксовог (*Stokes*) режима хидродинамичког подмазивања који се карактерише линеарном зависношћу трења у односу на брзину са чврстим површинама које су потпуно раздвојене слојем мазива.

Активна контрола се постиже индуковањем поља које утиче на мазиво, адитиве у мазиву, граничне површине и/или на сама чврста тела која су у контакту [42].



Слика 6.2. Шема Стрибекове криве у присуству спољашњег поља [42]

7. ЗАКЉУЧАК

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 а поред њих учествују и трошкови обуставе процеса рада. 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.

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.

Општи закључак је да 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] Атанасковска И., Момчиловић Д., *Утицај отказа зубаца на безбедност машина- Испитивање и анализа*, Институт за испитивање материјала, Београд
- [2] https://www.geartechnology.com/articles/1192/Classification_of_Types_of_Gear_Tooth_Wear_-_Part_I/, *Classification of Types of Gear Tooth Wear - Part I* - November/December 1992 - приступио 28.05.2019.
- [3] Рац А., *Мазива и подмазивање машина*, Машински факултет Београд, 2007
- [4] <http://www.maziva.org/podmazivanje/tribologija/>, *Трибологија* - приступио 29.05.2019.
- [5] Танасијевић С., *Триболошки исправно конструисање*, Машински факултет, Крагујевац, 2004
- [6] Ивковић Б., Рац А., *Трибологија*, Југословенско друштво за трибологију, Крагујевац, 1995
- [7] Hanks B., *Assessing And Monitoring Girth Gearing Wear*, 2005
- [8] Popov V.L., Pohrt R., *Adhesive wear and particle emission: Numerical approach based on asperity-free formulation of Rabinowicz criterion*, open access at Springerlink.com, 2018
- [9] <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmech.2019.00031/full>, *A Concept of the Effective Surface Profile to Predict the Roughness Parameters of Worn Surface*, 2019 - приступио 08.06.2019.
- [10] <https://gearsolutions.com/departments/materials-matter-gear-corrosion-in-the-manufacturing-process/>, Idlebird D., *Gear Corrosion in the Manufacturing Process*, 2017 - приступио 10.06.2019.
- [11] http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/textbooks_dvd_only/DAN/gears/meshing/meshing.html#top - приступио 05.06.2019.
- [12] <http://omk.mas.bg.ac.rs/files/elementi2/smena3/2-Uvod-zupcasti%20prenosnici.pdf> - приступио 01.05.2019
- [13] <https://www.scribd.com/document/411608969/ME-IV-Predavanje-Slajdovi> -приступио 01.05.2019
- [14] Витас Д., Трбојевић М., *Машински Елементи III*, Научна књига, Београд, 1978
- [15] <https://www.shutterstock.com/image-photo/manufacturing-metal-machine-part-steel-industry-555980401> - приступио 21.05.2019.
- [16] <http://www.rws-company.rs/english/gears-reducers.html> - приступио 21.05.2019.
- [17] Љубојевић Б., *Преглед уобичајених видова оштећења зупчаника у току експлоатација преносника*, Пети СЕВЕР симпозијум о механичким преносницима, Суботица, 1995
- [18] Танасијевић С., *Основи трибологије машинских елемената*, Научна књига, Београд, 1989
- [19] Чупић А., Букумировић М., *Одржавање процесних система у пошти*, Техничка дијагностика, Број 2, 2005

- [20] Alban E.L., *Systematic Analysis of Gear Failures*, Metals Park, Ohio, 1985
- [21] ISO 10825:1995 – *Gears – Wear and damage to gear teeth – Terminology*, 1995
- [22] NASA/TM, *Continued Evaluation of Gear Condition Indicator Performance on Rotorcraft Fleet*, 2013
- [23] Rexnord industries, *Failure analysis gears, shafts, bearings, seals*, Milwaukee, 1978
- [24] <http://marinersrepository.blogspot.com/p/gear-wear-and-failures.html>, *Gears:Wear and Failure* - приступио 05.05.2019
- [25] <http://www.steeldata.info/macro/demo/data/2094.html>, *Fatigue failure (pitting) - Gear defects - Other defects* - приступио 05.05.2019
- [26] <http://www.cscos.com/wp-content/uploads/Mechanical-NY1620-Gears-and-How-Their-World-is-Changing-Neville-Sachs.pdf>, N. W. Sachs, *Gears and How Their World is Changing*, 2014 - приступио 06.05.2019
- [27] <https://www.stork.com/en/products-services/equipment-manufacturing-repair/gears-services/gears-products-services/diagnostics/root-cause-analysis>, *Gearbox maintenance - lubrication & vibration analysis* - приступио 10.06.2019
- [28] Prasad S.V., *Tribology of Au-Nanocomposites for Sliding Electrical Contacts*, Materials Science & Technology, Conference & Exhibition, Montreal, 2013
- [29] http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear&s=mechanism, Kopilovich D., *Mechanisms of wear* - приступио 08.05.2019.
- [30] <https://www.machinerylubrication.com/Read/150/gear-failures>, Errichello B., Muller J., *How to Analyze Gear Failures* - приступио 08.05.2019
- [31] <https://link.springer.com/article/10.1007/s12666-017-1237-0>, Mahajan Y., *Effect of Temper Conditions on Abrasive Wear Behavior of AA7010 Alloy* -приступио 20.05.2019
- [32] <https://www.machinerylubrication.com/Read/380/cavitation-wear-hydraulic>, Fitch E.C., *Cavitation Explained and Illustrated* - приступио 20.05.2019.
- [33] https://www.pirate4x4.com/tech/billavista/PR-ARB/articles/Yukon_14b_Gear_Review/, Ansell B., *Yukon 14-bolt Gears & Install Kit Review* - приступио 20.05.2019
- [34] http://www.rgf.rs/predmet/RO/VII%20semestar/Eksploatacija%20i%20odrzavanje%20ga-sovodnih%20sistema/Predavanja/EiOGasS_12.pdf, *Експлоатација и одржавање гасоводних система* - приступио 18.05.2019.
- [35] <https://www.wisegeek.com/what-is-oxidation.htm#> - приступио 20.05.2019
- [36] <https://corrosion-doctors.org/Forms-fretting/fretting.htm> - приступио 23.05.2019
- [37] <http://www.maziva.org/podmazivanje/teorije-podmazivanja/>, *Теорије подмазивања* - приступио 20.05.2019.
- [38] <https://dokumen.tips/documents/fsb-lezajevi-tadic.html>, Тадић Б., *ФСБ Лежајеви* – приступио 18.05.2019.

- [39] <http://websrv3.viser.edu.rs/download.php?id=23445>, Систем за подмазивање мотора CVC – приступио 28.05.2019
- [40] <http://kereta.info/comparison-automatic-or-manual-gear-transmission-auto-vs-manual-car/> - приступио 29.05.2019
- [41] <https://www.cgtrader.com/3d-models/science/other/automobile-differential-gearbox-e1e534ec-832a-4b33-8f63-17ae423a5bae> - приступио 29.05.2019
- [42] <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmech.2019.00022/full>, Krim J., *Controlling Friction With External Electric or Magnetic Fields* - приступио 09.06.2019