

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Дипломске академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Механички преносници

Број индекса: 51/96

Милош В. Старчевић

Класификација оштећења зупчастих преносника

дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Блажа Стојановић, доцент - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог дипломског рада кандидат треба да опише различите врсте оштећења и разарања зубаца зупчаника, услове који до њих доводе као и технологије репаратуре тих зупчастих парова. Потребно је истаћи да широка примена зупчастих преносника у различитим гранама индустрије, намеће потребу њиховог сталног усавршавања и објашњења појава које прате њихов рад. Кандидат треба да изврши анализу утицаја појединих фактора на хабање и оштећење зупчаника. Такође, кандидат треба да предложи одговарајуће мере за смањење оштећења и покаже начине за репаратуру зупчаника.

Препоручена литература:

- [1] Танасијевић, С., *Механички преносници*, Машински факултет, Крагујевац, 1994
- [2] Николић, В., *Машински елементи*, Машински факултет, Крагујевац, 2004
- [3] Танасијевић, С., *Основи трибологије машинских елемената*, Научна књига, Београд, 1989

Крагујевац, 2013

ментор:

Др Блажа Стојановић, доцент

Резиме

У оквиру рада најпре је извршена класификација оштећења и хабања великог броја механичких преносника. С обзиром да се од свих механичких преносника највише користе зупчаници, највећи део посвећен је анализи оштећења управо зупчаника. Извршена је класификација оштећења и идентификоване су најчешће врсте хабања. Такође извршена је анализа утицаја појединих фактора на хабање.

У другом делу дипломског рада су приказани основни механизми за смањење оштећења и хабања. Приказане су и анализиране основне врсте подмазивања.

Посебна пажња је посвећена избору мазива за подмазивање зупчастих преносника. На крају су приказане врсте и облици репаратуре зупчаника.

Кључне речи: зупчастих парови, оштећење, хабање, подмазивање, репаратура.

Summary

In the paper, firstly, the classification of wear and tear of a large number of mechanical transmitters is presented. Considering the fact that out of all mechanical transmitters the most commonly used are gears, the largest part of the paper is particularly devoted to the gear damage analysis. The classification of defects has been conducted, as well as the identification of the most common types of wear. Likewise the analysis of the impact that certain factors have on wear has been conducted.

The second part of the paper presents the main mechanisms for reducing wear and tear process. It presents and analyzes the main types of lubrication.

Special attention has been paid to the choice of lubricants used with the toothed gears. At the very end, different types and forms of reparation of gears are presented.

Keywords: gear pairs, damage, wear, lubrication, repair.

САДРЖАЈ:

1. УВОД	6
1.1. Преносници снаге	6
1.2. Зупчасти преносници	8
2. НАЈЧЕШЋЕ ВРСТЕ ХАБАЊА МЕХАНИЧКИХ ПРЕНОСНИКА	12
3. НАЈЧЕШЋЕ ВРСТЕ ХАБАЊА ЗУПЧАНИКА	15
3.1. Заморно хабање	15
3.2. Хабање као последица разарања мазивог слоја	21
3.3. Абразивно хабање	25
3.4. Остале карактеристичне врсте хабања	28
4. ФАКТОРИ КОЈИ УТИЧУ НА ХАБАЊЕ ЗУПЧАСТИХ ПРЕНОСНИКА	32
4.1. Утицај материјала и хемијско-термичке обраде	32
5. ПОДМАЗИВАЊЕ ЗУПЧАСТИХ ПРЕНОСНИКА	36
5.1. Гранична подмазивања	37
5.2. Хидродинамичко подмазивање	38
5.3. Хидростатичко подмазивање	38
5.4. Еластохидродинамичко подмазивање	39
5.5. Мешовито подмазивање	39
5.6. Избор мазива за подмазивање зупчастих преносника	39

6. РЕПАРАТУРА ЗУПЧАНИКА	44
6.1. Значај репаратуре	44
6.2. Општи алгоритам репаратуре	46
7. ЗАКЉУЧАК	49
8. ЛИТЕРАТУРА	50

1. УВОД

Зупчасти преносници снаге су витални део машине, па се захтева поуздан рад зупчаника да не би дошло до оштећења и лома машина. И поред тога у току рада долази до различитих облика отказа зубаца зупчаника и промене радних карактеристика зупчастих преносника, што може да проузрокује отказ целог машинског склопа чији је зупчаник део.

Велика пажња се посвећује изучавању различитих облика отказа зубаца да би се спречили или бар успорили процеси њиховог настајања и ширења.

Тачно прописан редослед операција који треба доследно спровести код оштећених и разорених машинских делова и/или конструкција у циљу повратка параметара (показатеља) радне способности, назива се репаратура.

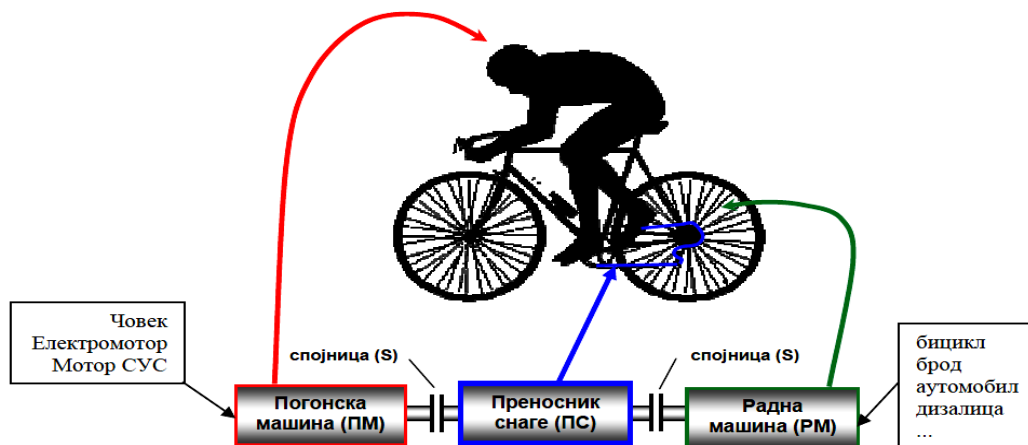
Делови машинских конструкција у току експлоатације, изложени су различитим видовима површинских и запреминских оштећења и разарања. Испитивања су показала да запреминска разарања машинских делова у $(80 \div 90)\%$ настају услед замора материјала. Такође, показано је да машински делови најчешће губе радну способност услед површинских оштећења.

1.1. ПРЕНОСНИЦИ СНАГЕ

Преносник представља скуп функционално повезаних машинских елемената чији је задатак преношење и трансформација механичке енергије и угаоне брзине од излазног вратила погонске машине до радне машине[1].

Преносници у машинама, приборима, механичким уређајима и другим индустријским производима су уређаји који служе за пренос енергије механичког кретања на даљину, као и за преображај њених параметара.

Такав један пример је дат на следећој слици 1.1., где механички преносници снаге (ПС) представљају машинску групу која у машинском систему (аутомобил, дизалица, брод, бицикл...) обавља парцијалне функције преноса и трансформације снаге од погонске (ПМ) до радне машине (РМ).

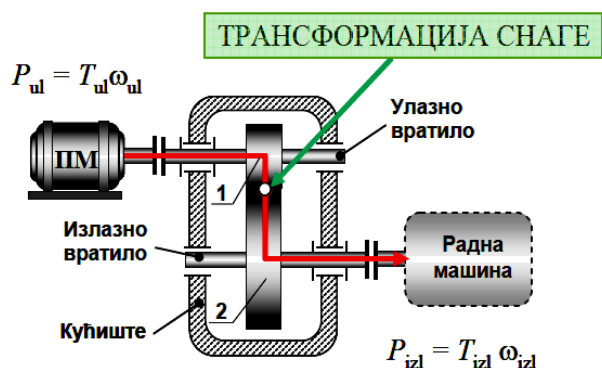


Слика 1.1. Пример механичког кретања

Преносник снаге (ПС):

- преноси (спроводи) снагу од погонске до радне машине;
- трансформише снагу ($P = T\omega$; $P = Fv$), тј. повећава оптерећење (T , F), а смањује брзину (v , ω) или обрнуто - повећава брзину, а смањује оптерећење.

Основни делови преносника снаге су:



Слика 1.2. Преносник снаге

Општа намена преносника чврсто је повезана са извршењем појединих функција међу којима су најкарактеристичније: расподела енергије, смањење или повећање брзине, промена врсте кретања (нпр. обртно у транслаторно), регулисање брзине, покретање заустављање, промена смера и др.)

Пренос енергије и механичког кретања може се остварити на више различитих начина и различитим преносним механизмима, па се стога и преносници деле на:

- механички,
- хидраулички,
- пнеуматски и
- електрични.

Подела механичких преносника према начину преношења кретања:

- механички преносници код којих се кретање преноси трењем: фрикциони преносници, каишни преносници, преносници ужетом;
- механички преносници код којих се кретање преноси захватом: зупчасти преносници, ланчани преносници.

Према положају погонског и гоњеног вратила:

- Преносници с непосредним контактом између погонског и гоњеног елемента: фрикциони преносници, зупчасти преносници;
- Преносници с посредном везом између погонског и гоњеног елемента: каишни преносници, ланчани преносници, пренос ужетом.

Основна величина преносника је преносни однос и представља однос угаоних брзина погонског и гоњеног елемента:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

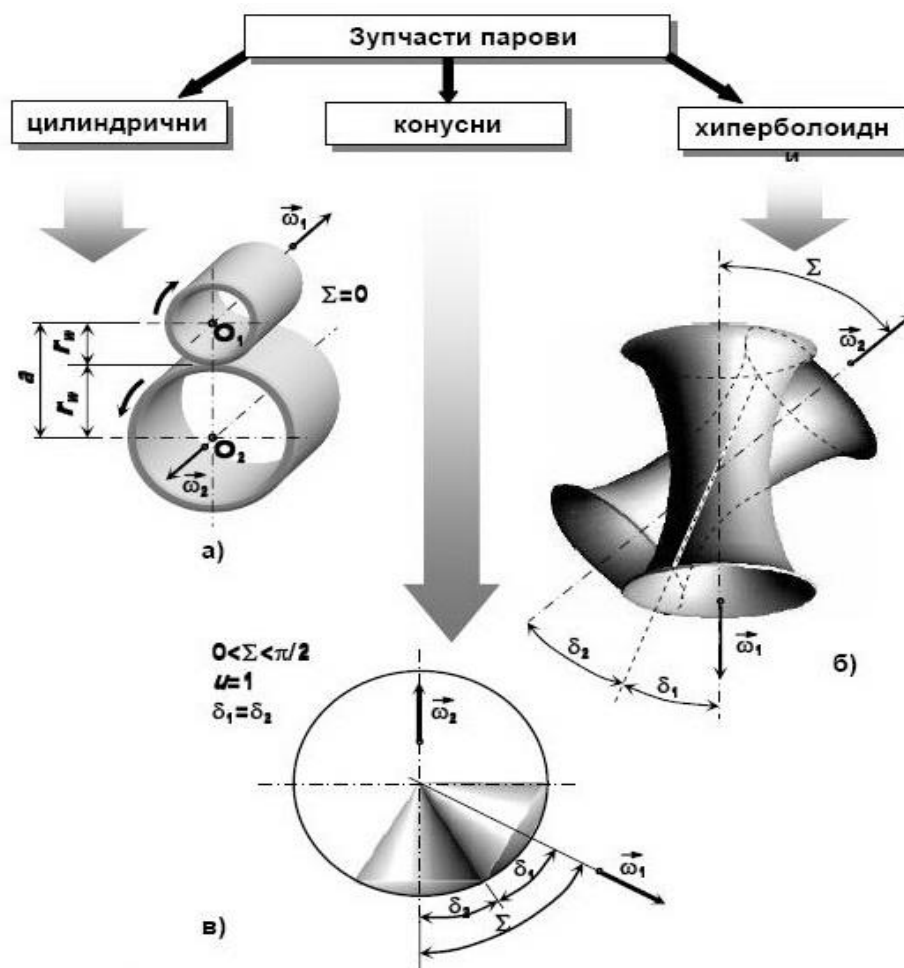
Ако је $\omega_1 > \omega_2$, онда је $i > 1$, за преносник кажемо да је редуктор, јер смањује (редукује) угаону брзину;

Ако је $\omega_1 < \omega_2$, онда је $i < 1$, за преносник кажемо да је мултипликатор, јер повећава (мултиплицира) угаону брзину;

Ако је $i \neq const.$, онда за преносник кажемо да је варијатор.

1.2. ЗУПЧАСТИ ПРЕНОСНИЦИ

Зупчасти преносници снаге су непосредни принудни преносници који врше пренос и трансформацију снаге од погонске до радне машине посредством зупчастих парова. Према облику кинематских површина извршена је најопштија подела зупчастих парова на: цилиндричне, конусне и хиперболичне (слика 1.3.).



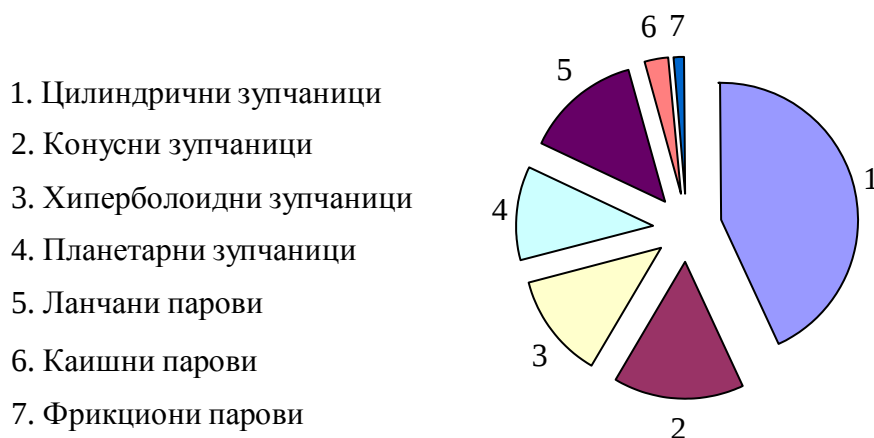
Слика 1.3. Облици кинематских површина зупчастих парова

Цилиндрични зупчасти парови имају кинематске површине у облику цилиндра, а осе обртања су паралелне[2].

Конусни зупчасти парови имају кинематске површине у облику конуса. Осе обртања се секу, па је осно растојање $a=0$.

Хиперболоидни зупчасти парови имају кинематске површине у облику једнограних хиперболида. Средина (грла) хиперboloида налази се на месту најкраћег (нормалног) растојања оса обртања.

На слици 1.4. дат је степен заступљености механичких преносника, који су у примени од најзаступљенијег до најмање заступљеног механичког преносника.



Слика 1.4. Степен заступљености механичких преносника

Хабање и оштећења површина материјала механичких преносника у посредном или непосредном контакту и међусобном релативном кретању своде на врло ниске вредности. То осигурава, у највећем броју случајева, врло споре промене геометријског облика површина или толеранција и димензија машинских елемената и мале промене металуршких и механичких својстава материјала.

Све то повлачи са собом дуг век трајања елемената (поготово машинских), промену њихових перформанси у дозвољеним границама, а тиме и повећану сигурност у изненадном отказивању њихове функционалности.

Поред одређеног умереног хабање материјала површина коју данас сматрамо нормалном појавом, у знатном броју случајева у пракси наилазимо и на појачана и абнормално висока хабања и оштећења површина која, у релативно кратком временском периоду, доводе до отказивања и лома машинског елемента, а тиме и до отказивања рада машина па и целог погона.

Хабање се, у најширем смислу, дефинише као непожељно одстрањење материјала са површине без обзира на узрок. Одређено хабање материјала површина у контакту и међусобно релативном кретању у одређеној средини морамо сматрати нормалном појавом.

Зупчасти парови имају добре и лоше карактеристике које карактеришу сваки зупчасти пар и оне су дате на слици 1.5.



Слика 1.5. Добре и лоше карактеристике зупчастих парова

Од свих преносника ова је група преносника данас најчешће у примени. Израђују се с различитим положајем оси (паралелне, укрштене итд.) од најмањих до највећих снага. Употребљавају се и за веома високе бројеве обртаја те у широком распону преносних односа па је и сходно томе њихов домен примене велики.

Овако велики домен примене зупчастих парова обезбеђен је захваљујући компактности конструкције, великој поузданости и издржљивости у раду, малим губицима при трансмисији снаге и могућношћу примене у широком спектру снага, преносних односа и угаоних брзина (слика 1.6.).



Слика 1.6. Домен примене зупчастих парова

Зупчасти пар се састоји од два спрегнута зупчаника, великог и малог, који су постављени међусобно тако да зуби једног зупчаника улазе у међупростор-међузубље другог зупчаника, слика 1.7.

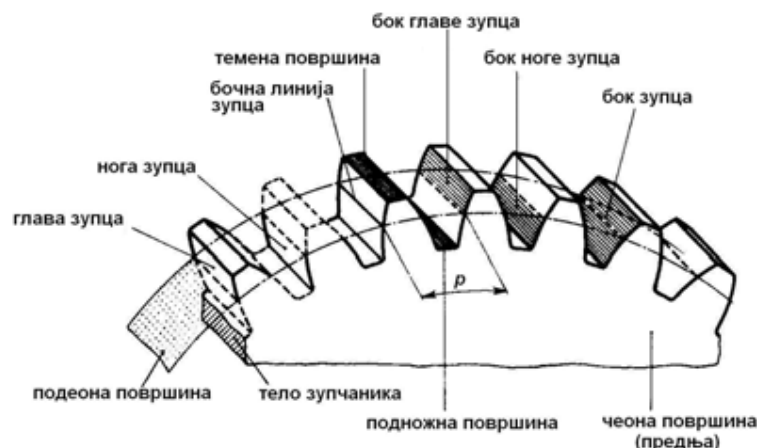


Слика 1.7. Зупчасти пар са косим зупцима

Зупчаник је точак на чијем ободу су формирани и равномерно распоређени зуби истог облика и величине.

Зуби су делови зупчаника помоћу којих се непосредно преноси кретање и оптерећење са једног зупчаника на други. Они су по висини ограничени теменом површином, а по дужини су ограничени чеоним површинама: предњом и задњом[3].

На слици 1.8. дате су основне величине и делови цилиндричног зупчаника са спољашњим озубљењем



Слика 1.8. Основне величине и делови цилиндричног зупчаника

У табели 1. дати су процентуално најчешће заступљени узроци неисправности одређених машинских делова.

Табела 1. Узроци неисправности одређених машинских делова

Узроци неисправности	Зупчаници	Клизни лежајеви	Котрљајни лежајеви
	%		
Неадекватан прорачун и конструкција	6.9	9.1	13.8
Грешке у материјалу	0.8	3.6	1.9
Грешке производње и монтаже	17.6	10.7	14.4
Неадекватна експлатација, одржавање и контрола	36.7	39.1	37.4
Хабање материјала током дуготрајног рада	38.0	30.5	28.5
Остало	—	7.0	4.0

Статистичка анализа оштећења код зупчастих преносника снаге показује да 60% од свих оштећења код преносника отпада на зупчанике, 20% на лежајеви и 20% на све остале делове. Овај податак указује на потребу да се појавама оштећења и разарања зубаца посвети посебна пажња, са циљем да се оне избегну.

2. НАЈЧЕШЋЕ ВРСТЕ ХАБАЊА МЕХАНИЧКИХ ПРЕНОСНИКА

У зони фрикционог контакта механичких преносника и узајамног деловања елемената система настају сложени нестационарни механички и физичко-хемијски процеси, као и процеси трења и хабања.

Процеси трења у механичким преносницима дефинисани су структуром и општом функцијом система.

Спољашње трење које се јавља при спрезању зупчаника је у принципу збир трења клизања и трења котрљања. Како се правци и интензитети брзине клизања и брзине котрљања мењају у периоду спрезања (у интервалу од уласка до изласка зуба 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[4].

Основни параметри који утичу на коефицијент трења, као брзина клизања, мењају величину и правац у периоду спрезања, а други параметри утицаја (оптерећење, одступање геометрије) додатно отежавају општу математичку анализу. Због тога је довољно да се при конципирању конструкције и током целог процеса конструисања користе средње вредности коефицијента трења којих има у многим систематизованим информацијама.

Пужни преносници као хиперболоидни зупчасти парови чије се осе укрштају карактеришу се линијским контактом трибоелемената (пуж-пужни зупчаник). Линијски контакт праћен је релативно великим клизањем спрегнутих елемената, али и формирањем довољно доброг мазивог слоја као трећег елемента трибомеханичког система.

Трење клизања, које може бити велико, условљава низак степен корисног дејства који код мултипликатора може бити испод 0,5. Код примене пужних преносника као редуктора могуће је одговарајућим конструкционим решењима подићи степен корисног дејства и изнад 0,9.

Разлике у геометријским облицима трибоелемената, сложена и различита кинематска кретања, присуство мазива и многи други фактори условљавају и различите механизме настајања трења. Свака врста преносника има своје специфичности функционисања, али и своје карактеристике процеса трења.

Хабање као прогресивни процес губитка материјала са контактних слојева и природни процес који се не може потпуно елиминисати, веран је пратилац сваког трибомеханичког система за пренос снаге у експлоатацији. Утицај великог броја фактора и њихова комплексна повезаност учинили су да се на контактним површинама ТМС јављају различите врсте хабања.

Различите по механизму настајања, интензитету развоја и коначно по општој опасности на век трајања реализоване конструкције. Хабање се не може потпуно елиминисати, али се може минимизирати до границе могућег.

У табели 2. дате су карактеристичне врсте хабања механичких преносника које се најчешће срећу у експлоатацији.

Табела 2. Врсте хабања механичких преносника

Врсте хабања	Механички преносници	Узрок	Опште препоруке за отклањање и успоравање даљег
Заморно хабање (ПИТИНГ)	✓ Зупчасти преносници ✓ Зупчасти каишни преносници ✓ Планетарни преносници ✓ Кардански преносници ✓ Фрикциони преносници (подмазивани) ✓ Каишни преносници (каиш) ✓ Ремени преносници (ремен)	✘ Циклична напрезања у току дужег периода рада ✘ Преоптерећење и концентрација напона напрезања ✘ Укључци у материјалу ✘ Неподесно подмазивање ✘ Неподесна технологија завршне обраде (технолошко наслеђе) ✘ Нарушени режим хемијско-термичких обрада	• Редукција контактних напона и учесталости цикличних напрезања • Смањење оптерећења • Коришћење материјала веће отпорности на заморно хабање • Коришћење мазива веће вискозности и мазива са ЕП адитивима • Коришћење оптималних режима технологија обраде • Коришћење оптималних режима хемијско-термичких обрада
Абразивно хабање	✓ Сви механички преносници	✘ Абразивно-агресивна средина ✘ Преоптерећење ✘ Недовољна тврдоћа контактних површина	• Отклањање извора загађења • Побољшање заптивања (уградња заштитника) • Смањење оптерећења • Повећање тврдоће контактних површина • Повећање дебљине мазивог слоја
Корозионо хабање	✓ Зупчасти пр. ✓ Ланчани пр. ✓ Зупчасти каиш-ни пр. (каишник) ✓ Планетарни пр. ✓ Кардански пр. ✓ Фрикциони пр. ✓ Каишни пр. (каишник) ✓ Ремени пренос. (ременица)	✘ Агресивна средина ✘ Влага ✘ Неподесно подмазивање	• Побољшање заптивања • Коришћење мазива са корозионим инхибиторима • Коришћење материјала отпорних на корозију

Табела 2. наставак - Врсте хабања механичких преносника

Скоринг	✓ <i>Zupčasti prenosnici</i> ✓ <i>Planetarni prenosnici</i> ✓ <i>Kardanski prenosnici</i> ✓ <i>Frikcioni prenosnici (podmazivani)</i>	✘ Преоптерећење ✘ Гранично подмазивање ✘ Неподесно подмазивање ✘ Недовољно подмазивање ✘ Изостанак периода уходавања	. Редукција оптерећења, брзине и температуре . Коришћење компатибилних материјала . Повећање количине мазива . Хлађење мазива . Коришћење мазива веће вискозности . Коришћење адитива за високе притиске . Примена триболошких превлака
Фретинг - корозија	✓ <i>Ланчани преносници (ланац)</i> ✓ <i>Кардански преносници (телескоп)</i>	✘ Вибрације ✘ Недовољна чврстоћа склопа ✘ Агресивна средина	. Елиминисање или апсорбовање вибрација . Коришћење пригушних материјала . Повећање чврстоће склопа . Заштита контактних површина од корозионо-заморних процеса . Побољшање заптивања . Коришћење мазива са корозионим инхибиторима

3. НАЈЧЕШЋЕ ВРСТЕ ХАБАЊА ЗУПЧАНИКА

Зупчаници се разарају тако да долази до деградације зуба, односно његово површинско оштећење. Веома ретко оштећење је изазвано ломом венца зупчаника. Анализа бројних информација показује да се у нормалним условима експлоатације јављају углавном одређене врсте хабања[5].

Зупчаници савремених авионских мотора раде у условима високог оптерећења и велике брзине. Њихови габарити су мали, а век трајања краћи. У оваквим условима најчешће су појаве: скоринга, питинга и лома зупчаника.

Зупчаници гасних турбина раде при температури 200-250°C, а најчешће појаве су разне врсте скоринга.

На зупчаницима парних турбина који раде са нормалним оптерећењем и код којих се тражи дужи век трајања, најчешће хабање је питинг.

Аутомобилски зупчаници раде при високим оптерећењима, релативно мањим брзинама и са променљивим моментом увијања. Појава скоринга је овде ређа, а главна и најчешћа врста хабања је питинг.

Тракторски зупчаници раде са нешто мањим оптерећењима од аутомобилских зупчаника, али и са нешто већим фактором удара. Због услова у којима раде, изложени су утицају атмосфере и појави абразивног хабања. Најчешћи облици хабања су питинг (52%) и абразивно хабање (30%).

Зупчаници машина алатки раде са умереним оптерећењем, а најчешћа врста хабања је питинг.

Лако је уочити да је најчешћа врста хабања која се јавља код зупчастих преносника питинг, а да се остале врсте хабања јављају ређе и под одређеним околностима.

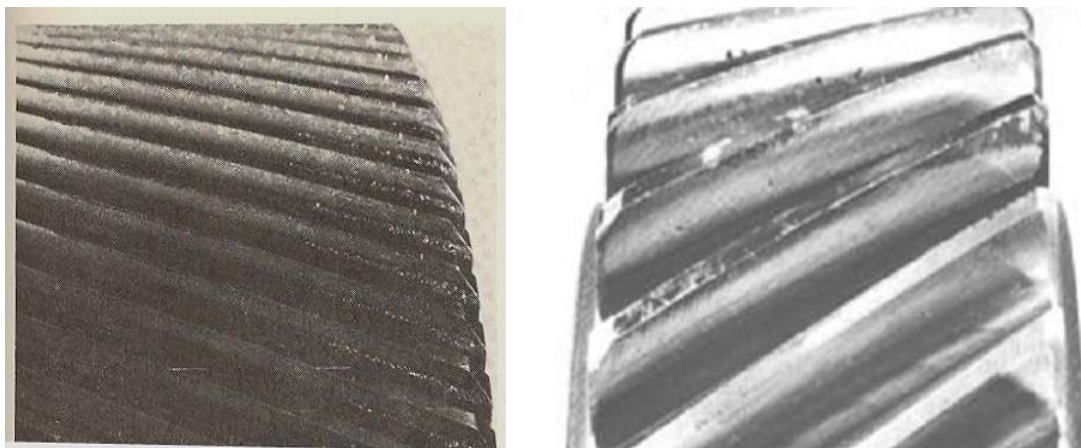
3.1. ЗАМОРНО ХАБАЊЕ (ПИТИНГ)

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

Величина јамица (кратера) на неотврднутим површинама може бити 0.5 до 5 mm у пречнику, па чак и више. На површински отврднутим зупцима, почетни питинг може да се појави као мале поре видљиве само ако се увеличају. Касније током рада, оне расту и постају видљиве голим оком.

У зависности од начина настајања, развоја, облика и утицаја на век трајања и поузданост зупчастих преносника, разликујемо: иницијални и разорни питинг.

Иницијални питинг се јавља у периоду уходавања, најчешће код зупчаника од мекшег материјала и термички необрађених. Испољава се у облику појаве малог броја јамица на додирници или испод ње. Узрок настајања иницијалног питинга је концентрација напрезања на местима изразитијих површинских неравнина (слика 3.1.).

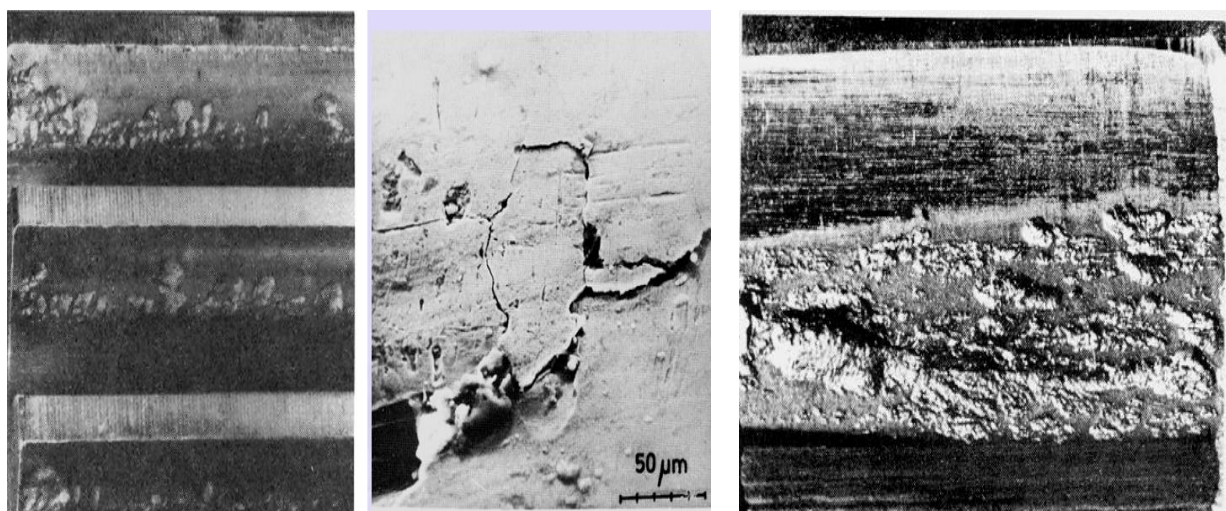


Слика 3.1. Иницијални питинг

Настанак иницијалног питинга није могуће увек спречити али се зато може знатно смањити корекцијом спрезања и тачнијом израдом зупчаника.

Разорни питинг у почетку, на нози зуба зупчаника око подеоног круга, појављују се мале јамице, величине главе чиоде, понекад и крупније (слика 3.2.).

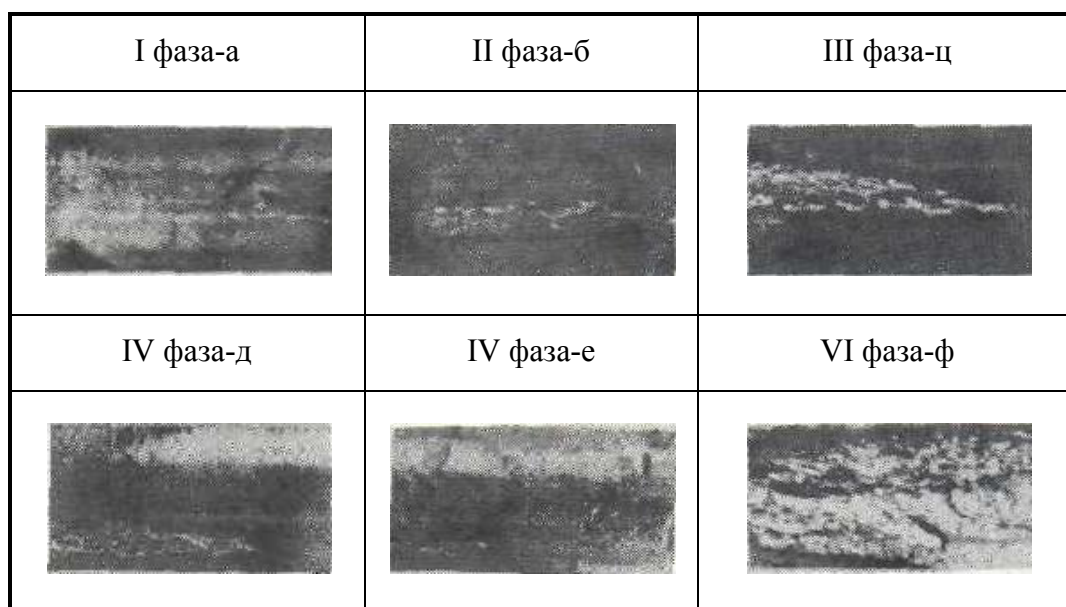
Број јамица непрекидно расте при истовременом повећању неких од њих, услед чега се непрекидно смањује стварна површина додир. Смањењем контактне површине, расту контактни напони који по достизању критичних вредности изазивају деформације или интензивно хабање.



Слика 3.2. Разорни питинг

Развој разорног питинга може се поделити у неколико фаза:

- у првој фази настаје извесно развлачење материјала, површине облика клина и знатно веће од површине иницијалних јамица које ће се појавити нешто касније (слика 3.3. - а);
- у другој фази настаје повећање броја јамица (слика 3.3. - б);
- појава нових јамица које са већ постојећим формирају површину облика клина је карактеристична за трећу фазу (слика 3.3. - ц);
- формиране јамице повећавају своје димензије све док се уклоне границе између јамица и све јамице се не споје у једну површину облика клина (слика 3.3. - д);
- потпуном разарању већег дела активне површине претходи појава јамица већих димензија које се формирају углавном изван области већ обухваћеног питингом (слика 3.3. - е);
- као коначни стадијум разорног питинга је разарање већег дела активне површине, формирају се прскотине, веће и дубље него у ранијим фазама (слика 3.3. - ф).



Слика 3.3. Фазе разорног питинга зупчаника

Најприхватљивија и најправилнија теорија стварања питинга разматра као заморно разарање контактних површина услед деловања контактних напона.

Питинг се појављује углавном на нози зупца зато што је стварни напон на нози зупца већи од стварног напона на глави зупца, иако је Херцов напон једнак. То је зато што је Херцов образац изведен за случај статичког оптерећења и не узима утицај силе трења F_{μ} . Ове силе битно утичу на стање напона у површинском слоју.

Напон на глави зуба настаје као контактни притисак, а напон на површини ноге зуба је затезног карактера. У зони додира, површински слој је изложен напонима у две управне равни, то је притисак (или затезање) зависно од смера силе трења у тангентном правцу и притиску од Херцовог напона у нормалном правцу.

Познато је да у случају затезања или притиска у две управне равни максимални тангенцијални напон је:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}$$

За површину на боку главе зупца, напони σ_x и σ_y имају исти знак (минус, зато што су притисног карактера), па ће у нумеричким вредностима бити од њихових апсолутних вредности. За површину на боку ноге зупца, постоје два напона са различитим знацима (затезање и притисак), па збир њихове апсолутне вредности, и резултујући максимални напон је виши.

Ово је најпростије објашњење чињенице да глава зупца може да издржи вишеструко веће оптерећење у односу на подножје зупца (нога зупца). Експериментално је установљено, да при већим брзинама, уљни филм између зубаца је дебљи а коефицијент трења је мањи, глава зупца и нога зупца могу да издрже приближно исту количину оптерећења.

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

Величина јамица (кратера) на неотврднутим површинама може бити 0.5 до 5 mm у пречнику, па чак и више. На површински отврднутим зупцима, почетни питинг може дасе појави као мале поре видљиве само ако се увеличају. Касније током рада, оне расту и постају видљиве голим оком.

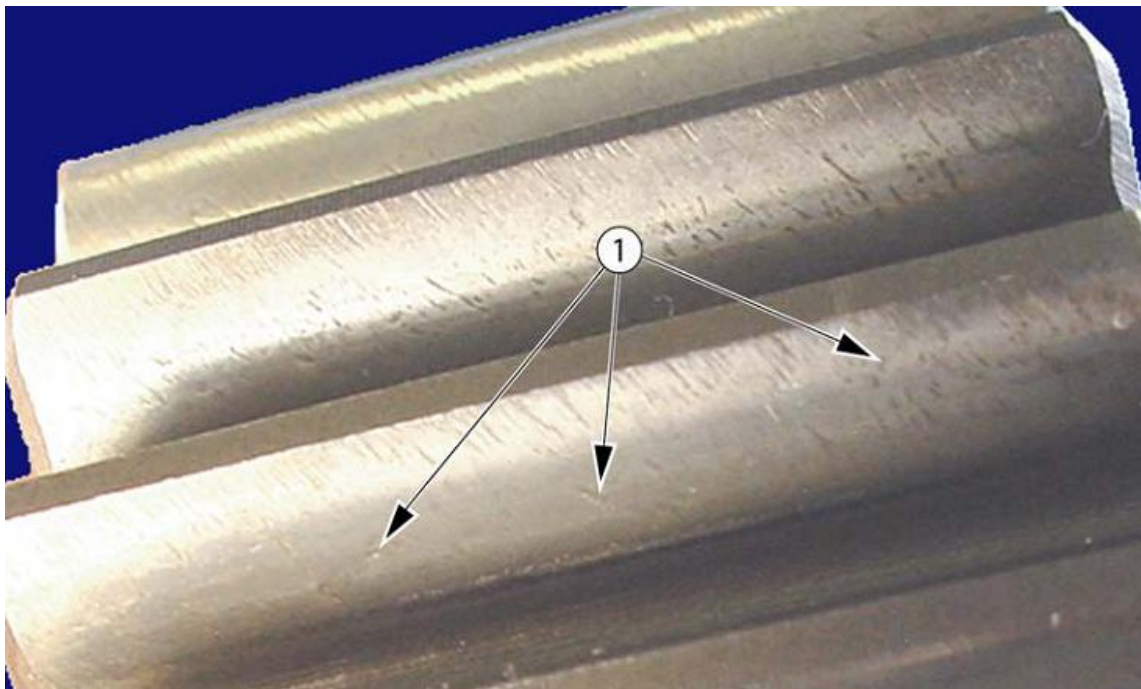
Питинг може бити спречен одабиром димензија и материјала зупчаника које задовољавају задато оптерећење, и обезбеђујући исправну расподелу оптерећења дуж бочне линије зупца између зубаца. Једна важна функција је правилно подмазивање уљима, где слој не би требао да буде сувише танак.

Главна функција мазива ја да формира уљни филм између зубаца у додиру. Када је уље веће вискозности теже је утиснути у контактну површину, и према томе, дебљи уљни слој доприноси мањем оштећењу површине зубаца. Дебљи слој уља обезбеђује влажнији додир приликом монтирања зупчаника а вибрације зупчаника прикива, на тај начин смањује ниво буке зупчастих парова у раду.

Према томе, најчешће се користе зупчаници који раде са мали и средњим брзинама и зупчаници који користе уља велике вискозности. Како се брзина повећава, енергија се троши услед повећања узбурканости уља, и тада долази до смањења вискозности.

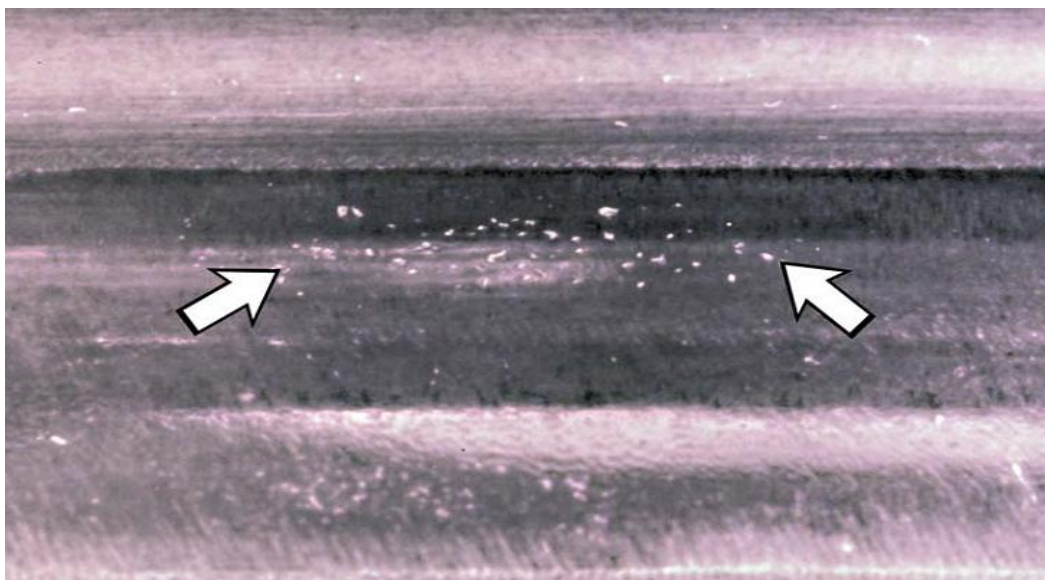
Иницијалне јамике су косог положаја ка површини, орјентисаног нагиба у односу на правац силе трења. Ако се две површине налазе у релативном кретању (котрљање са проклизавањем) под оптерећењем, код површине која је у заостајању, место изласка иницијалне пукотине је испред правца клизања, а код површине у претицању – позади.

Овакав распоред иницијалних пукотина услов је да се јамице образују само на површини која заостаје при релативном кретању (слика 3.4.).



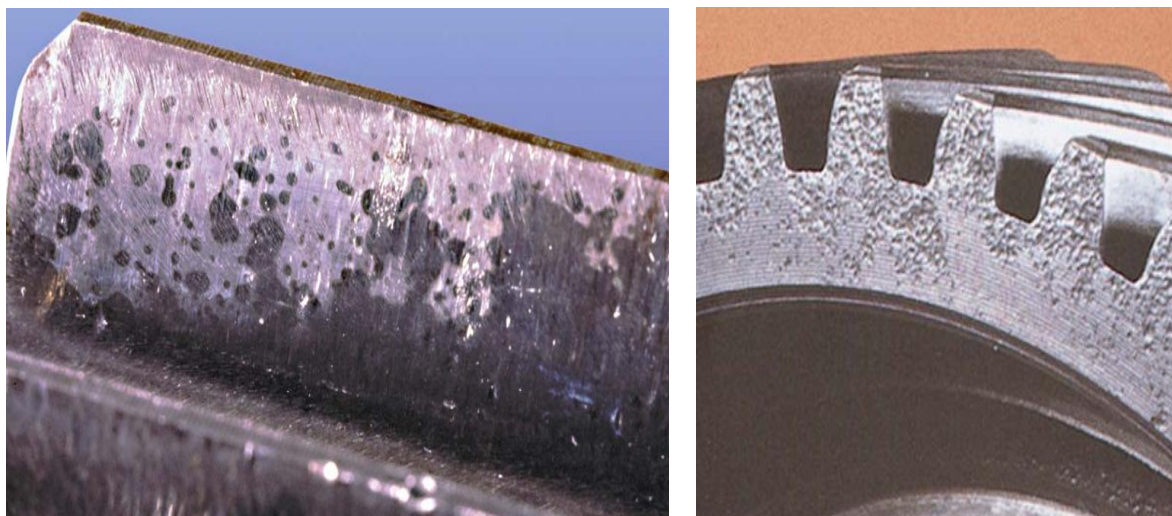
Слика 3.4. Иницијални питинг који не напредује у разорни питинг

Раст иницијалне пукотине на активној површини која заостаје при релативном кретању, продужава се све док се не одвоји комадић метала и не образује карактеристични облик јамице (слика 3.5.).



Слика 3.5. Раст иницијалног питинга

По настајању првих јамица, разорни питинг се непрекидно шири, пролазећи кроз раније већ описане фазе повлачења из употребе или до заморног лома (слика 3.6.)[6].



Слика 3.6. Формирани разорни питинг

Резултати великог броја испитивања у експлоатацијским и лабораторијским условима, могу се свести на неколико основних закључака:

- 1) Питинг захвата површински слој, најчешће до дубине $15 \mu m \div 25 \mu m$;
- 2) За развој питинга неопходно је подмазивање зупчаника;
- 3) Питинг се развија у првом реду на оним деловима активних површина зуба на којима долази до концентрације напрезања;
- 4) Питинг се јавља обично на нози зуба, ређе на глави;
- 5) При подмазивању уљима веће вискозности, отежана је појава и развој питинга;
- 6) Тврдоћа површинског слоја утиче на развој питинга;
- 7) Питинг не настаје или се не развија при интензивном хабању (на пр. при присуству абразивних честица у уљу)
- 8) Питинг настаје најчешће код цилиндричних зупчаника са правим и косим зубима, ређе код коничних и скоро никада код хипоидних.
- 9) Питинг се не јавља код отворених преносника, преносника који раде без подмазивања или се подмазују козистетним мазивима.

На настајање и развој питинга утиче велики број фактора као и њихово сложена узајамност, условљавају да је феномен питинг и данас још увек недовољно разјашњен.

3.2. ХАБАЊЕ КАО ПОСЛЕДИЦА РАЗАРАЊА МАЗИВОГ СЛОЈА - скоринг

При већим оптерећењима, на контактним површинама активних површина зуба, настају посебни услови подмазивања. У слојевима мазива настају веома високи притисци услед чега вискозност уља нагло порасте. Оптерећење се једним делом преноси преко хидродинамичког слоја, а другим делом преко неравнина површинског слоја.

Истраживања показују да при сваком оптерећењу, дебљина мазива може бити мања од збира висине неравнина спрегнутих површина зато што под оптерећењем неравнине се еластично деформишу.

Различити су узроци нарушавања целовитости мазивог слоја, а основни би били:

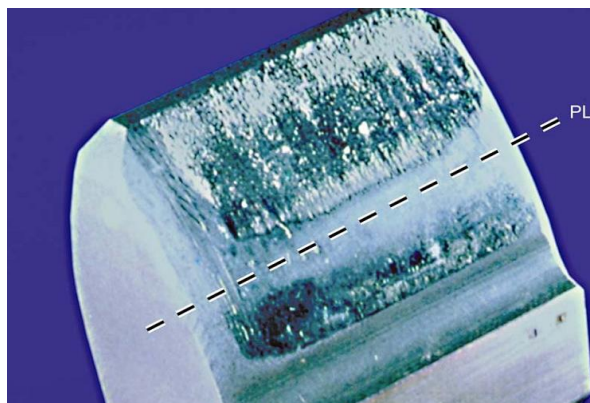
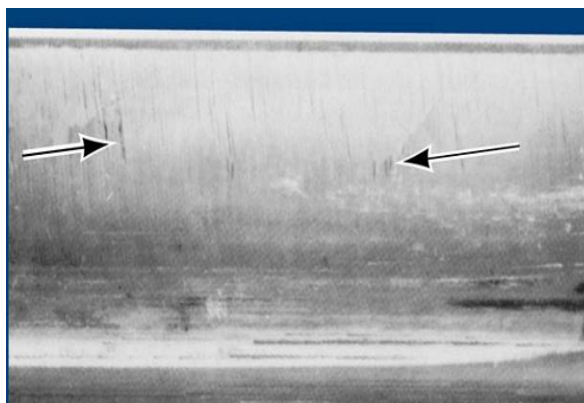
- високо загревање уља у његовом површинском слоју;
- примена непогодних уља (на пр. недовољна вискозност);
- недовољна количина уља при подмазивању;
- недовољан квалитет радних површина зуба;
- велика оптерећења.

Као последица разарања слоја мазива могу настати различите врсте хабања, од којих је најкарактеристичнија, а истовремено и најопаснија скоринг. Скоринг се може појавити у више различитих облика (cold welding, scuffing, seizing, galling, itd.).

Скоринг се јавља као исход већег оптерећења, микронеравнине пробијају слој уља, настаје контакт метал о метал, долази до заваривања микронеравнина, и затим до њиховог кидања.

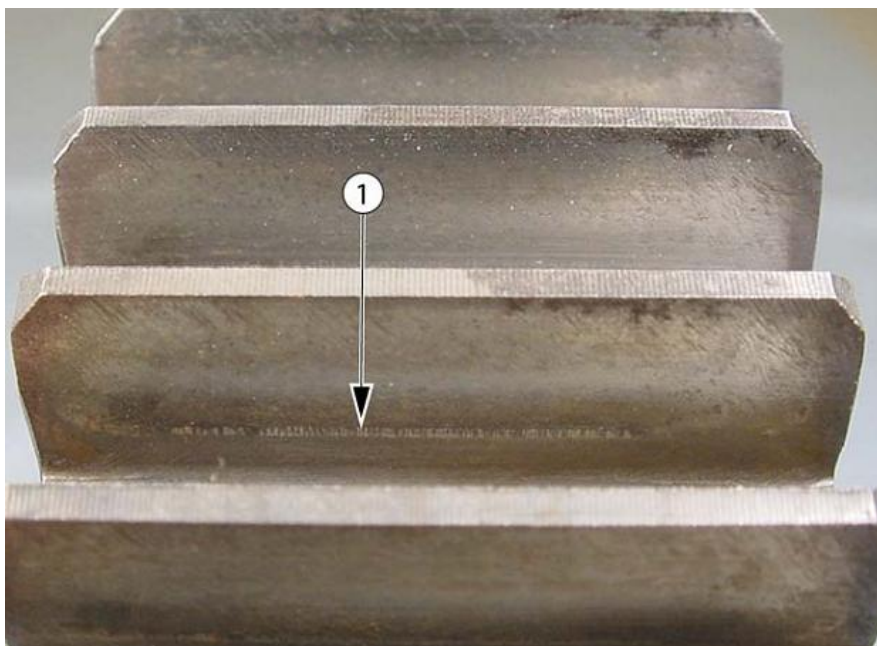
Скоринг је веома брзо одвођење метала са активне површине зуба и карактерише се знатним повредама зуба у облику пруге, бразде, кидања метала, итд., орјентисаних у правцу кидања. У почетном стадијуму скоринг има форму мањих рисева који прелазе у огреботине, а у даљем стадијуму у бразде, пруге, кидање метала. Настале повреде покривају целу активну површину или поједине делове ове површине.

На слици 3.7. дат је пример деловања скоринга на зуб испод и изнад уцртане линије у почетном облику када се још може стабилизовати, уколико се благовремено и успешно елиминишу узроци настајања скоринга, у противном постаје прогресиван.



Слика 3.7. Подручје деловања скоринга на зуб (испод и изнад линије)

Изглед ране фазе формирања скоринга дат је на слици 3.8. [7] (број 1), где је на зубу зупчаника формиран скоринг који се у овом облику још може стабилизовати да не пређе у тежак скоринг.



Слика 3.8. Рана фаза формирања скоринга

Тежак скоринг може да покрије целу радну површину на зупцима и чак заваривање и кидање већих делова површине (слика 3.9.). Услед овог оштећења зупчаници могу да постану потпуно неупотребљиви.



Слика 3.9. Озбиљно оштећење зуба

Оштре ивице могу да изазову концентрацију напона и сасвим прекину уљни слој у почетку ангажовања зупца. Модификација профила је такође обећавајућа метода у заштити од скоринга зато што смањује оптерећење зупца у почетку његовог ангажовања.

Ако су зупчаници подложни скорингу, врх ивица зубаца требао би се заоблити и потпуно исполирати (слика 3.10.).



Слика 3.10. Оштећење врха зуба

Важно је смањити брзину клизања у улазу и излазу зуба из захвата. У зависности од радних услова, а према механизму настајања и развоја скоринг може бити: **атхезиони и режући**.

Скоринг атхезионог типа се може поделити у две групе:

- 1) у случају малих брзина клизања и релативно ниских температура, скоринг носи карактер искиданих дубоких бразда (cold welding);
- 2) при средњим и вишим брзинама клизања, праћеним релативно високим температурама активних површина, јавља се скоринг у облику равномерних малих бразда, често са траговима отапања метала (scuffing).

Развој атхезионог скоринга пролази кроз три фазе:

- 1) у првој фази настају тангенцијалне пластичне деформације површинског слоја;
- 2) у другој фази долази до настајања месних фрикционих веза између атома метала на местима оголелих површина;
- 3) у трећој фази долази до раскидања местних металних веза услед релевантног кретања спрегнутих површина.

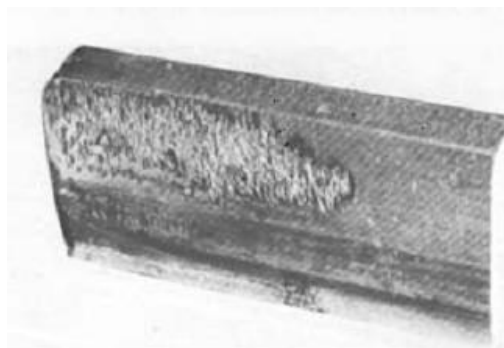
За разлику од атхезионог скоринга, **режући скоринг** се не јавља као резултат настајања металних веза.

Режући скоринг је карактеристичан за цементирање и каљење зупчаника великих тврдоћа и релативно меког основног материјала, а настаје у условима доброг подмазивања уљима и формираног отпорног уљног слоја (слика 3.11.). Тако отпорни уљани слој се ствара додавањем адитива отпорних на скоринг, основном уљу.



Слика 3.11. Режући скоринг

Режући скоринг настаје као резултат великих сила трења и пластичних деформација активних површина (слика 3.12.). При оваквим условима спрезања настаје издвајање кртих, веома тврдих честица каљеног цементираног слоја, подвргнутих ојачању под дејством сила и температура трења, поновном кидању или очувању своје првобитне тврдоће.



Слика 3.12. Деформација активних површина

Овако издвојене честице, смештене у зони контакта, дејствују као оштра абразивна зрна. Са развојем скоринга издвајају се честице све већих димензија које у почетном стадијуму изазивају зарезе на активним површинама, а затим све дубље и шире бразде. Услед отежаних режима трења и високих температура, режући скоринг је често праћен значајним пластичним деформацијама.

Оптерећење при коме долази до појаве режућег скоринга је по правилу веће него код појаве скоринга атхезионог типа, услед деловања заштитног уљног слоја образованог додавањем антискоринг адитива.

Поред скоринга, најчешћег и најкарактеристичнијег хабања, насталог као последица разарања мазивог слоја, услед преоптерећења, високих брзина трења и неодговарајућих подмазивања могу настати и друге врсте хабања.

Неочекивани скоринг може да настане кваром система за подмазивање: кваром пумпе за уље, запушавањем филтера или млазнице, разарањем уљних цеви, итд. Хабање зубаца се чешће јавља код зупчаника који су недовољно подмазани или нису заштићени од контанимације. Тако прекомерно хабање се дешава код спороходних, слабо подмазиваних зупчаника направљених од меких челика.

Ови зупчаници имају велики степен сигурности подножја зупца, па се обично дозвољава рад све док зупци не постану оштри као нож.

Обично се велико хабање јавља код зупчаника који се користе у пољопривредној механизацији, код зупчаника који се налазе у машинама за изградњу путева и грађевинских машина. Интензитет хабања може да буде око 0.1mm за 1000 радних сати. Зато што зупци ових зупчаника површински отворднути, њихов експлоатациони век зависи од дебљине отвордног слоја и квалитета заптивања.

Интензивно хабање може да се јави код контакта између каљених зупчаника, поготово код погонског зупчаника, ако каљење зубаца није завршено. Храпава и тврда површина отвордног зубаца ради као турпија и одлама делиће другог зуба.

Прегревање може довести до веома интензивног хабања и повреда активних површина зуба, услед смањења тврдоће под дејством високих температура (слика 3.12.).



Слика 3.12. Деформација зуба под дејством високих температура

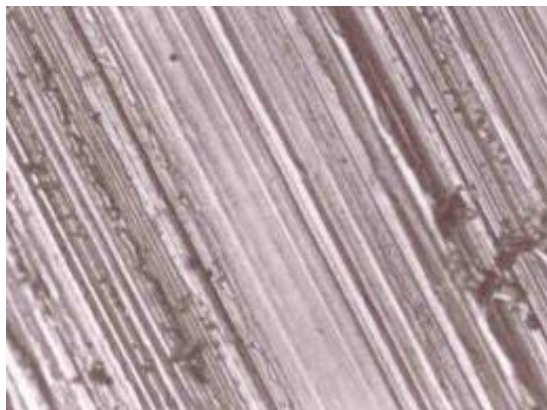
3.3. АБРАЗивно ХАБАЊЕ

Абразивно хабање подразумева појмове као што су задирање, резање и браздање – претежно трајне пластичне деформације материјала на површини или непосредно испод ње.

Дефинише се као одстрањење материјала са површине у контакту и релативном кретању, као последице:

- задирања неравнина тврђе површине по површини мекшег материјала или
- услед деловања делића разног порекла на или између површина материјала.

Абразивно хабање заједно са адхезивним хабањем представља основни вид механичког трошења код машина и опреме (слика 3.13.).



Слика 3.13. Абразивно хабање

Код зупчастих преносника абразивно хабање је типично за отворене преноснике, мада се у мањем броју јавља и код затворених преносника. Абразивно хабање код лежаја је карактеристичан вид хабања. Мотори са унутрашњим сагоревањем имају изражено абразивно хабање, с обзиром да они усисавају у току рада директно из атмосфере огромне количине ваздуха потребног у процесу сагоревања.

Контаминати (тврди делићи атмосферског порекла) по правилу су:

- неметалне нечистоће,
- дим или прашина из ваздуха,

која у зависности од локалитета или врсте експлоатисане минералне сировине, може имати веома различити састав.

Ипак, главни састојак, по правилу је:

- силицијум-диоксид (SiO_2),
- а често се налазе и оксиди калијума, магнезијума чак и гвожђа и алуминијума, понекад угљеника и других различитих материјала.

Величина честица атмосферске нечистоће варирају у широким границама од $0.1 \mu\text{m}$ до $1 \mu\text{m}$ (честице дима) и од $1 \mu\text{m}$ до $150 \mu\text{m}$ (зрно песка), за атмосферску прашину. Гранулометријски састав зрна нечистоће атмосферске прашине варирају слично саставу атмосферске прашине.

Абразивно трошење зависи у великој мери од концентрације и гранулометријског састава нечистоћа. У случају да су величине абразива мање од дебљине мазивог слоја, постоји могућност њиховог несметаног кретања између елемената, па је њихов утицај на развој абразивног хабања мали. У супротном ефекти утицаја абразива су знатно већи.

Абразивно хабање површина мекших материјала може бити изазвано неравнинама површина тврђих материјала. Из овога је јасно да абразивно хабање представља једним делом, секундарну компоненту адхезивног хабања.

При великим разликама у тврдоћи материјала у контакту, хабање површина је изузетно високо и претежно је абразивног карактера. Међутим треба рећи да при адхезивном хабању временом трошења опадну и устале се на ниској вредности.

Технолошке нечистоће (задржале су се на површинама елемента и у систему подмазивања машина):

- ливачки песак,
- тврди делићи металних оксида,
- остаци при ливењу,
- остаци различитих поступака механичке обраде.

Чак и када у систему подмазивања машине постоје одговарајући пречистачи уља (филтери), делови таквих крупних нечистоћа остају утиснути и углављени у меке метале нпр. за лежаје, док знатни део врло ситних честица и даље слободно циркулише кроз систем.

Абразивне честице могу у машинским склоповима потицати од трошења унутрашњих површина машине:

- различитим видовима механичког трошења или
- корозије.

Абразивно хабање услед дејства тврђих материјала на површине у кретању је редовно врло изразито као и чврсти продукти потпуног или непотпуног сагоревања горива у комори за сагоревање код мотора.

При довољној дебљини уљног слоја у неком елементу машине, посебно у случају хидродинамичког или хидростатичког подмазивања слојем веће дебљине, честице страних материја слободно пролазе са флуидом кроз зазоре елемената проузрокујући само малим делом оштећења површина.

У случају мањих дебљина уљног слоја, непотпуног, мешовитог или граничног подмазивања, и мањи делићи тврдых страних материја могу изазвати врло знатна хабања материјала површина.

Дуже дејство тако малих довољно чврстих честица огледа се у облику ситних огреботина (рисева), најчешће на површини меког материјала тј. метала. Дејство је, у овом случају, слично врло умереном али грубом брушењу – гребању површина које је познато у енглеској литератури под називом *scratching*.

Веће тврде честице пролазе са мазивим флуидом кроз зазоре са оштрим задирањем површина и урезивање жлебова (*growing*) и бразди (*plowing, ridging*) знатне дубине.

Меки метали, као што су бели метал, олово и др., имају способност да прихвате у себе (утапају) стране тврде делиће и да их на тај начин елиминишу из циркулације и учине безопасним. Слично је и у случају релативно тврде основе материјала за лежиште која је прекривена танким слојем меканог метала. Међутим, у одређеним случајевима, овакво својство овог материјала може бити узрочник веома озбиљним абразивним оштећењима обе клизне површине у контакту.

И меке честице страних материја, као што су агломерати чађи и кокса, могу ако су у већим количинама, изменити структуру површине и постати узрочник оштећења површина (површина постаје неравна, са кружним оштећењима у облику усечених тамних мрља).

У свим случајевима интензитет абразивног хабања зависи од односа тврдоће абразивног тела или делића (абразива) и тврдоће материјала површине на коју абразив делује.

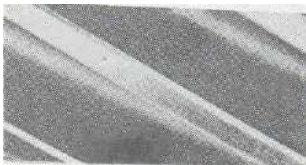
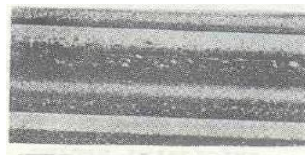
3.4. ОСТАЛЕ КАРАКТЕРИСТИЧНЕ ВРСТЕ ХАБАЊА

Данас је у научно-техничкој информацији присутна велика шароликост у терминологији триболошких процеса, па се тако једна те иста врста хабања назива различитим називима.

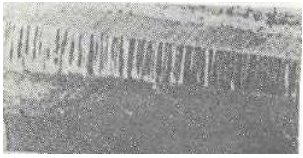
Осим питинга, скоринга и абразивног хабања, најчешћих врста хабања, постоји велики број различитих врста хабања, табела 3[5].

Изложена номенклатура врста хабања и повреда зуба зупчаника је за сада једина систематска анализа могућих врста хабања и повреда. Коришћењем ове номенклатуре могућа је успешна идентификација триболошких појава код зупчастих преносника.

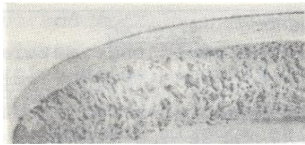
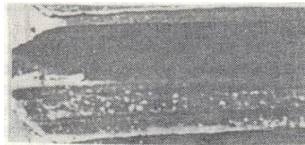
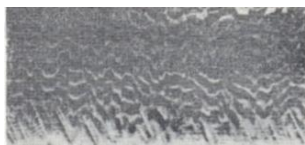
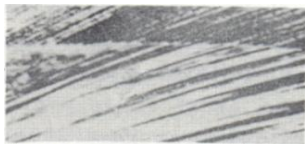
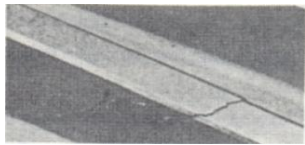
Табела 3. Номенклатура врста хабања и повреда зуба зупчаника

ХАБАЊЕ Хабање је општи термин којим се описује губитак материјала са контактних површина зуба зупчаника		НОРМАЛНО ХАБАЊЕ (ПОЛИРАЊЕ) то је споро одвођење метала са контактних површина. Нормално хабање не утиче на рад преносника у интервалу времена за који је преносник конструисан.
		УМЕРЕНО ХАБАЊЕ је брже одвођење метала са контактних површина. Век зупчаника се не смањује.
		РАЗОРНО ХАБАЊЕ је повреда, разарање или измена облика површине зуба зупчаника услед хабања. При оваквом хабању знатно се скраћује век и нарушава равномерност рада зупчаника.
		АБРАЗивно ХАБАЊЕ је врста разорног хабање које се карактерише повредама контактних површина услед деловања прљавштине, механичких примеса у уљу или продуката хабања зупчаника и лежишта.

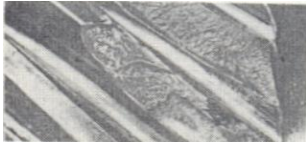
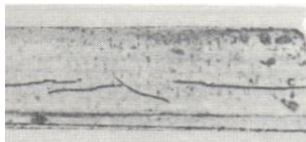
Табела 3. наставак - Номекултура врста хабања и повреда зуба зупчаника

ХАБАЊЕ		SCRATCHING је тежа форма абразивног хабања које се карактерише огреботинама и кратким зарезима у правцу клизања.
		SCORING је брзо одвођење метала, изазвано кидањем малих делова, заварених при непосредном додиру контактних површина, Карактерише се дубоким браздама у правцу клизања.
		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 прекривена и јамицама. У тежим случајевима јављају се и изражене бразде.
		КОРОЗИОНО ХАБАЊЕ је повреда зуба услед хемијског дејства киселих материјала, влаге или примеса садржаних у уљу. Најчешће се карактерише ситним јамицама које се губе током времена, али је при томе хабање врло интензивно.
		ЉУСПАЊЕ је врста хабања при коме се са површине одваја метал у облику врло танких љуспица, а на контактним површинама остаје мала, мутна и хрпава површина.
		ПРЕГРЕВАЊЕ настаје као резултат дејства врло високих температура. Као последица ове појаве могу настати разни облици интензивног хабања.
		ИНИЦИЈАЛНИ ПИТИНГ се испољава у облику ситних јамица на додирници или нешто испод ње. Овај питинг није посебно опасан будући да га је лако odstrанити, а осим тога практично је непрогресиван.

Табела 3. наставак - Номекултура врста хабања и повреда зуба зупчаника

ХАБАЊЕ		РАЗОРНИ ПИТИНГ се обично јавља испод додирнице. Број јамица, као и њихове димензије се непрекидно увећавају, што коначно доводи до повлачења зупчаника из употребе.
		SPALLING се карактерише љуспањем врха и бокова ивица зупчаника. Образоване прскотине су веће и дубље од јамица разорног питинга.
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 образовању таласастих гребена под правим углом на правац клизања. Јавља се углавном код цементираних, хипоидних погонских зупчаника
		ОБРАЗОВАЊЕ ГРЕБЕНА (БРАЗДАЊЕ) је чести случај пластичног течења. Карактерише се појавом гребена распоређених по до дијагонали контактне површине. У неким случајевима повреде имају стреласти облик у правцу клизања.
ЛОМ Под ломом се подразумева потпуни прелом		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.

Табела 3. наставак - Номекултура врста хабања и повреда зуба зупчаника

ЛОМ		ЛОМ УСЛЕД ПРЕОПТЕРЕЋЕЊА најчешће настаје при деловању изненадних, веома високих оптерећења. Код тврдих и кртих метала, лом има изглед свиласте нити, а за жилаве метале изглед покиданих влакана.
		КАЉЕНА ПУКОТИНА настаје као резултат концентрације унутрашњих напона при термичкој обради. 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 термообrade пукотине су узрок разорног лома, а у неким случајевима проузрокују разарање само контактне површине праћено љуспањем.

Из претходних разматрања, очигледно је да као последица триболошких процеса на зупчастим преносницима могу настати различите врсте хабања. Оне се разликују међу собом по начину настајања и развоја, по облику и интензитету, као и по крајњим последицама које остављају на активним површинама зуба зупчаника.

Понекад је могућа и појава више врста хабања одједном, што отежава и онако сложену идентификацију и анализу.

Све ово указује на комплексну природу триболошких процеса, чији поједини феномени нису ни до данас потпуно проучени.

4. ФАКТОРИ КОЈИ УТИЧУ НА ХАБАЊЕ ЗУПЧАСТИХ ПРЕНОСНИКА

Хабање зупчастих преносника зависи од великог броја различитих фактора: физичких, хемијских и механичких својстава самог материјала, хемијско-термичке обраде, карактеристика подмазивања, агресивности средине, температуре, топографије контактних површина, радних услова (брзине и оптерећења), типа преносника, механичке обраде и др.[5].

Велики број фактора као и њихова комплексна повезаност отежавају квантификације њихових утицаја. Веома често промена и само једног параметра изазива ланчану промену и многих других.

4.1. УТИЦАЈ МАТЕРИЈАЛА И ХЕМИЈСКО-ТЕРМИЧКЕ ОБРАДЕ

Савремене тенденције развоја науке и технике усмерене су ка смањењу габарита зупчаника, интензивном порасту оптерећења, повећању брзине и температуре у зони контакта, што истовремено значи и оштријим условима експлоатације машина.

У вези с`тим, утицај материјала и хемијско термичке обраде на решавање проблема отпорности на хабање зупчастих преносника постаје један од водећих фактора.

Основна пажња се поклања условима оптерећења трибомеханичког система (брзини, притиску, температури) и карактеристикама окружења. Метали су били и остају основни материјали за склопове и елементе у додиру.

Анализа литературних података из последњих година показује веома интензивну ангажованост у области стварања нових материјала отпорних на хабање. Стварају се нови метални системи, разрађени на основу челика, гвожђа, бакра, алуминијума и других легура.

Својства метала су у суштини одређена њиховом електронском грађом и структуром, која у себи укључује: фазни састав, тип и карактер кристалне решетке, као и број и карактер расподеле дефеката кристалне решетке.

Отпорност на хабање метала у великој мери зависи од њихове структуре, типа састава, количине, морфологије и њиховог узајамног положаја.

Са повећањем састава угљеника расте тврдоћа и отпорност на хабање. Свака од структурних компонената поседује различита и само своја својства, која свакако треба узети у обзир при избору технологије обраде метала за различите режиме рада трења. Велики утицај на отпорност на хабање показује тип кристалне решетке и оријентација правца клизања при трењу.

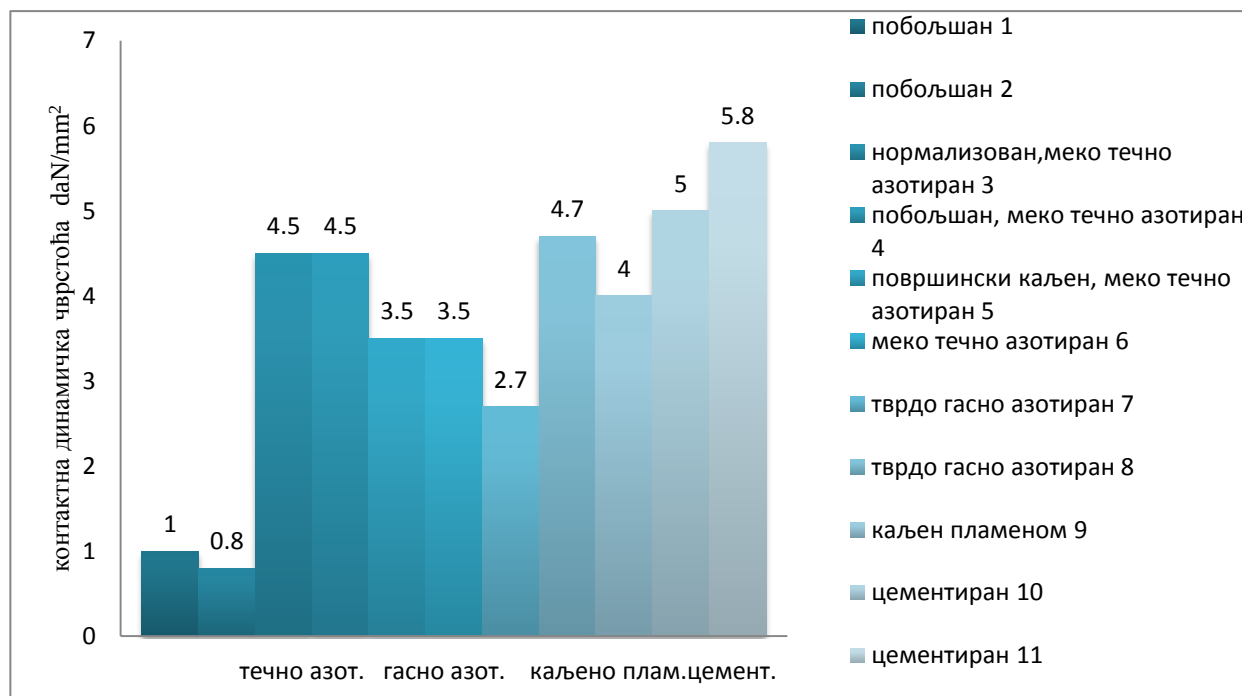
Побољшање антифрикционих својстава и повећање отпорности на хабање зупчаника, данас се углавном остварује методама хемијско-термичких обрада које се састоје у дифузионом засићењу контактне површине или модифицирању њихових једињења хемијски активним елементима, коришћењем хемијских реакција.

Хемијско-термичке обраде се остварују у тврдим, течним и гасним срединама. Дужина процеса зависи од хемијског састава, коришћене средине и температуре.

По карактеру процеса и по добијеним резултатима, хемијско-термичке обраде метала деле се на две основне групе:

- 1) Група хемијско-термичких обрада којима се на рачун повећања тврдоће контактних површина повећава и отпорност на хабање. У ову групу спадају широко примењивани процеси: цементација, азотирање, нитроцементација, цијанирање, борирање.
- 2) У другу групу спадају хемијско-термичке обраде које стварају танак површински слој метала, обогаћују хемијска једињења са активним елементима, побољшавају противзадирна својства и спречавају месна везивања и задирања при трењу. У ову групу спадају: сулфидирање, сулфацијанирање, селенирање, телурирање, обрада у јодид-кадмијевом соном купатилу. При оваквом виду обраде, тврдоћа површине се не повећава или скоро не повећава. Њихово деловање се огледа у смањеном коефицијенту трења и локализацији почетног задирања.

Данас се углавном у пракси за повећавање отпорности на хабање зупчаника користи прва група хемијско-термичких обрада, и то: **цементација, азотирање и нитроцементација**. Уз термичку обраду (каљење), ово су најчешћи начини повећања отпорности на хабање зупчастих преносника.



Слика 4.1. Преглед контактне динамичке чврстоће

На слици 4.1., дат је упоредни преглед контактне динамичке чврстоће за различите челике и различите термичке и хемијско-термичке обраде.

Азотирање и нитроцементација представљају данас прогресивне методе за повећање отпорности на хабање и продужавање века трајања зупчаника. Азотирање обогаћује површински слој нитридами на дубину и повећава површинску тврдоћу до HRC 49-68. Уједно, азотирани слој поседује повећану кртост.

Код зупчаника израђених из челика и хемијско-термички обрађеним (цементација, азотирање, нитроцементација) треба обезбедити и одржавати следеће основне параметре: ефективну дубину слоја засићења (до тврдоће HRC 50) у граници $0.2 \div 0.25$ од модула, тврдоћу површине HRC 59-62 при постојању структуре ситно-игличастог мартензита са изолованим деловима дисперзивног заосталог аустенита.

У цементираном слоју допуштено је не више од 25% заосталог аустенита, у нитроцементираном до 40%. Такође је допуштено $0.8 \div 1.05\%$ угљеника у цементираном слоју и $0.7 \div 0.9\%$ угљеника и $0.2 \div 0.4\%$ азота у нитроцементираном слоју. Тврдоћа основног материјала треба бити у границама HRC 29-43, са структуром нискоугљеничког мартензита или беинита без издвајања структурно слободног ферита.

Челици за зупчанике требају бити наследно ситнозрнасти. При хемијско-термичкој обради пожељно је достизање минималне деформације зупчаника, што је нарочито важно при масовној производњи зупчаника који се накнадно не подвргавају механичкој обради. О утицају тврдоће хемијско-термички обрађених зупчаника, нема засада јединственог мишљења.

Нека истраживања показују да при једнаким тврдоћама цементирани челици могу имати различиту отпорност на хабање. Понекад већој тврдоћи може одговарати мања отпорност на хабање.

Тако на пример, при обради хлађењем цементираног челика са повећаном количином заосталог аустенита, тврдоћа се знатно повећава, а контактна динамичка чврстоћа се не повећава, већ се понекад чак и смањује.

Установљено је да на издржљивост и век трајања зупчаника, знатно више, а често и одлучујуће утиче градијент расподеле тврдоће по дубини слоја. Тако на пример, при увећању дубине слоја тврдоће HB 680 од 0.05 на 0.3, контактна динамичка чврстоћа бокова зуба расте $2.5 \div 3.5$ пута.

За зупчанике који раде под великим оптерећењима, посебно је важна отпорност на скоринг. Спроведена испитивања показују да је при избору челика и режима хемијско-термичке обраде неопходно обезбедити у површинском слоју одсуство немартензитних структура, повећати тврдоћу (HRC 57), повећати количину легираних карбида глобуларне форме (више од 10%) и повећати количину заосталог аустенита (до 40%). Челици са високим садржајем никла имају мању отпорност на скоринг него челици са хромом и молибденом.

Сулфидирање, сулфацијанирање, селенирање, итд. представљају такође веома перспективне методе повећања отпорности на хабање машинских елемената.

Плазмено наношење користи се за наношење тешкотопљивих превлака: оксида алуминијума, волфрама, молибдена, силицијума, карбида, борида и др.

Преимућство нитроцементације је у брзини засићења у односу на гасну цементацију. При томе површински слој поседује већу отпорност на хабање захваљујући присуству азота и мекшем зрну. За зупчанике који раде под великим оптерећењима, посебно је важна отпорност на скоринг.

Сprovedена испитивања показују да је при избору челика и режима хемијско-термичке обраде неопходно обезбедити у површинском слоју одсуство немартензитних структура, повећати тврдоћу (HRC 57), повећати количину легираних карбида глобуларне форме (више од 10%) и повећати количину заосталог аустенита (до 40%). Челици са високим садржајем никла имају мању отпорност на скоринг него челици са хромом и молибденом.

Сулфидирање, сулфацијанирање, селенирање, итд. представљају такође веома перспективне методе повећања отпорности на хабање машинских елемената.

Данас се у свету веома интензивно ради на разради постојећих и развоју нових метода за повећање отпорности на хабање машинских елемената.

Наведимо само неке од перспективних метода: гасоплазмена метализација, електро-лучна, плазмена, високофреквентна индукциона метализација и детонационо наношење превлака.

5. ПОДМАЗИВАЊЕ ЗУПЧАСТИХ ПРЕНОСНИКА

Основни циљ и задатак подмазивања зупчаника је смањење хабања, па је зато улога и утицај мазива веома важна и одговорна. Добро одабрани зупчаници при постојаном подмазивању могу радити више година без изразитијег хабања и обрнуто, при недовољном и неправилном подмазивању, зупчаници већ после $0.5 \div 1.0$ часа рада могу изаћи из употребе[8].

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.

Мазива уља садрже две основне групе компонената: базна уља и адитиве различитих функција. Мешањем базних уља одређених вискозних градација и различитих група адитива, добија се широка палета мазивих уља која се међусобно могу разликовати по намени, реолошким, триболошким и другим радним особинама. У зависности од врсте базних уља, финална мазива уља се на тржишту препознају као минерална, хидрокрекована 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 и нове добре особине које су неопходне, а које базно уље не може да задовољи.

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, поједини лежајеви мазивим маслима, итд.

У зависности од геометријских карактеристика, експлоатационих услова, начина подмазивања, дебљине слоја мазива и др. (слика 5.1.), разликујемо следеће основне режиме подмазивања зупчастих преносника:

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



Слика 5.1. Подмазивање зупчаника

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

$$h_g = \frac{h}{R_{a1} + R_{a2}}$$

где су:

h – дебљина слоја мазива,

R_{a1}, R_{a2} – средње аритметичко одступање профила од средње линије профила,

$h_g < 1$ – гранично подмазивање

$h_g < 5$ – мешовито подмазивање

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

5.1. ГРАНИЧНО ПОДМАЗИВАЊЕ

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

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

$$\mu = a_w \cdot \mu_m + 1 - a_w \cdot \mu_g$$

где су:

a_w – део стварне површине додира метала,

μ_m – коефицијент трења спрегнутих површина метала,

μ_g – коефицијент трења граничног слоја.

Код граничног случаја 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 (ЕР- 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.

5.2. ХИДРОДИНАМИЧКО ПОДМАЗИВАЊЕ

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

Елементи механичких система код којих се остварује хидродинамичко подмазивање 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 уљног слоја, код хидродинамичког подмазивања, мора бити већа од збира висина површинских рељефа клизних површина.

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

5.3. ХИДРОСТАТИЧКО ПОДМАЗИВАЊЕ

Да би се обезбедила континуална дебљина слоја мазива између спрегнутих површина неопходан је притисак у слоју мазива који је већи од оптерећења које делује на површине. Ако се притисак у слоју мазива одржава помоћу посебног уређаја- хидростатичког система, ради се о хидростатичком подмазивању. Користи се тамо где се морају отклонити недостаци хидродинамичког подмазивања, односно тешкоће стварања хидродинамичких слојева код малих брзина или брзине једнаке нули (покретање и заустављање система).

За овај вид подмазивања користи се посебан тип клизних лежајева који се називају хидростатичким. То су лежајеви у којима се моћ ношења уљног слоја остварује сталним додавањем уља под притиском из неког уљног резервоара.

5.4. 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. 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.

5.5. 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

5.6. ИЗБОР МАЗИВА ЗА ПОДМАЗИВАЊЕ ЗУПЧАСТИХ ПРЕНОСНИКА

За подмазивање отворених преносника и једним делом затворених преносника са малим бројем обртаја, најчешће се користе чврста мазива и техничке масти, док се за подмазивање затворених механичких преносника искључиво користе уља[9].

У погонској пракси за подмазивање механичких преносника углавном се користе два система за подмазивање зуба зупчаника уљем и то: систем потапања зуба зупчаника у уљно купатило и систем убризгавања тј. довођење уља под притиском помоћу мазалица (дизни) у међузубље зупчаника непосредно при њиховом спрезању.

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

Подмазивање убризгавањем уља се користи за веће брзине зупчаника и предност оваквог начина подмазивања се огледа у сталној циркулацији једног те истог уља у систем за подмазивање. Ово је врло битно са аспекта потрошње уља јер смањује потребу сталне замене уља. Треба рећи, да за подмазивање затворених зупчастих преносника код техничких система (машина) са малим бројем обртаја, користе се за подмазивање течне мазиве масти.

Количина мазиве масти (полутечне масти) је одређена габаритом самог преносника, док се начин подмазивања изводи континуално тј. по принципу истом као код подмазивања уљем.

Замену уља треба вршити сваких 1000-5000 часова рада у зависности од врсте оптерећења преносника. У периоду уходавања система (у почетном периоду рада тј. разрађивања система) замену уља вршити после сваких 20-30 часова рада.

Препоруке за избор уља за подмазивање зубаца зупчаника се карактеришу вискозношћу уља у зависности од снаге и брзине механичког преносника, табела 4.

Табела 4. Подаци о вискозности уља за подмазивање зуба зупчаника $\eta_{Pa,s}$ 50°C

Обимна брзина зупчаника (m/s)	$Ft/(b \cdot n) m$		
	Ft – обимна сила зупчаника, m_n – модул зупчаника		
	12.5	12.5-30	30
0.5	0.135	0.274	0.410
0.5-2	0.720	0.135	0.274
2-6	0.049	0.720	0.135
6-12	0.036	0.049	0.720

Поред основне наведене табеле о избору уља за зупчасте преноснике даје се и препорука избора мазива за отворене зупчасте преноснике према стандарду SRPS ISO 19378 :2012 (табела 5.).

Табела 5. Препорука избора мазива за отворене зупчасте преноснике

<u>Врста мазива</u>	<u>Метода подмазивања</u>
Мазива на бази битумена	Ручно подмазивање, четком
Мазива са растварачима који остављају чврст филм након испаравања	Ручно или аутоматско, напрскавањем
Уље високе вискозности са ЕП адитивима	Капањем, напрскавањем, континуално или повремено

Препоруке избора начина подмазивања и врсте мазива зупчастих преносника на техничким системима биће приказане у табели 6., према стандарду ISO.

Tabela 6. Препоруке избора начина подмазивања и врсте мазива према стандарду ISO

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

За подмазивање елемената механичких преносника снаге код моторних возила, рударско-грађевинских машина, пољопривредних машина користе се опште препоруке за избор мазива које су табеларно приказане у табели 7.

Табела 7. Препоруке за избор мазива

<u>Возила</u>	<u>Механички</u> <u>мењачи-</u> <u>преносници</u>	<u>Аутоматски мењачи-</u> <u>преносници</u>	<u>Диференцијал</u> <u>(хипоидни)</u> <u>преносници</u>	<u>Диференцијални</u> <u>преносник</u>
Путничко возило	SAE 80 (EP)* SAE 90 (EP) или мултиградно	Флуиди за аутоматске преноснике, ATF	SAE 90 (EP) или мултиградно	/
Теретно возило	SAE 80 (EP)* SAE 90 (EP) или мултиградно	SAE 80 (EP) за полуаутоматске мењаче, ATF Флуид за аутоматске мењаче	/	SAE 140 или мултиградно

У табели 8. су приказане оријентационе вредности градације моторних уља и уља за мењаче и диференцијале према SAE градацији.

Табела 8. Моторна уља и уља за мењаче и диференцијале према SAE градацији

<u>SAE градација</u> <u>(SAE број)</u>	<u>Степен-Englera °E</u>	<u>Назив вискозитне градације</u>
<i>Код моторних уља SAE</i>		
10 W (зимски услови)	2.5-3.35 / 50°C	Врло лако,
20 W (зимски услови)	3.35-6.75	Зимско лако,
30 W (зимски услови)	3.34-6.62	Зимско лако, Средње
40 W (зимски услови)	6.62-9.84	Тешко
50 W (зимски услови)	9.84-14.20	Врло тешко
<i>Код уља за мењаче и диференцијале SAE</i>		
75 W	3.0-4.0 / 50°C	Врло лако
80 W	7.0-10.0	Лако
90 W	12.0-25.0	Средње
140 W	3.4-5.6/ 100°C	Тешко
250 W	Изнад 5.6	Врло тешко

AGMA (American Gear Manufactures Association), за индустријске зупчасте преноснике прописује 9 група уља за подмазивање индустријских зупчаника које по величини вискозности одговарају ISO групама од 46 до 1000.

У табели 9. извршена је **AGMA** подела уља за затворене зупчасте преноснике.

Табела 9. Препоруке за избор уља за затворене зупчасте преноснике

<u>AGMA број</u>	<u>ISO вискозна група</u>	<u>AGMA број</u>	<u>ISO вискозна група</u>
1	46	6, 6EP	320
2. 2EP	68	7 comp, 7 EP	460
3. 3EP	100	8 comp, 8 EP	680
4. 4EP	150	8A comp	1000
5. 5EP	220		

Такође у табели 10 извршена је **AGMA** подела уља за затворене пужне преноснике.

Tabela 10. Препоруке за избор мазива за затворене пужне преноснике

<u>Осно расстој. (mm)</u>	<u>Врста пужног преносника</u>	<u>Број обртаја пужа (o/min)</u>	<u>AGMA број</u>		<u>Број обртаја пужа преко (o/min)</u>	<u>AGMA број</u>	
			<u>Температура околине</u>			<u>Температура околине</u>	
			-10 do 15	10 do 15		<u>°C</u>	
до 150	Цилиндрични глобоидни	700	7 comp	8 comp	700	7 comp	7 comp
		700	8 comp	8A comp	700	8 comp	8 comp
од 150 до 300	Цилиндрични глобоидни	450	7 comp	8 comp	450	7 comp	7 comp
		450	8 comp	8A comp	450	8 comp	8 comp
од 300 до 450	Цилиндрични глобоидни	300	7 comp	8 comp	300	7 comp	7 comp
		300	8 comp	8A comp	300	8 comp	8 comp
од 450 до 600	Цилиндрични глобоидни	250	7 comp	8 comp	250	7 comp	7 comp
		250	8 comp	8A comp	250	8 comp	8 comp
изнад 600	Цилиндрични глобоидни	200	7 comp	8 comp	200	7 comp	7 comp
		200	8 comp	8A comp	200	8 comp	8 comp

Напомена: Сва уља садрже адитиве против корозије и оксидације. Групе 7 comp, 8 comp, и 8A comp садрже од 3% до 10% масних уља.

6. РЕПАРАТУРА ЗУПЧАНИКА

6.1. ЗНАЧАЈ РЕПАРАТУРЕ

Тачно прописан редослед операција који треба доследно спровести код оштећених разорених машинских делова и/или конструкција у циљу повратка параметара (показатеља) радне способности, назива се репаратура [10].

Делови машинских конструкција у току експлоатације, изложени су различитим видовима површинских и запреминских оштећења и разарања. Испитивања су показала да запреминска разарања машинских делова у $80 \div 90\%$ настају услед замора материјала. Такође, показано је да машински делови најчешће губе радну способност услед површинских оштећења.

Основни задатак репаратуре је да површински оштећеним (похабаним) и запремински разореним (поломљеним) машинским деловима, врати радну способност. Уместо да се одложе на депонију „стarih делова”, похабани и поломљени делови се поступцима репаратуре поново уграђују у машинску конструкцију, уместо нових резервних делова.

Технологија репаратуре поступцима заваривања, наваривања и метализацијом, толико је усавршена, да се данас не примењује само код хаварисаних делова, већ се све више користи код нових делова. Наиме, основну масу машинског дела чине мање квалитетни материјали, а завршни површински радни (хабајући) слој се формира од квалитетног материјала поступцима репаратуре.

Посматрано на нивоу фабрике (предузећа), применом репаратуре:

- смањују се депоније старих делова,
- редукују магацини резервних делова,
- смањују трошкови због прекида производње услед изненадних отказа (хаварија)

Репаратуром се многе хаварије могу отклонити на лицу места, често без демонтаже целог постројења. Тиме су избегнути велики економски трошкови због прекида производње и ангажовања великих ресурса, материјалних и људских.

Посматрано глобално, на нивоу планете, применом репаратуре значајно се може редуковати:

- потрошња необновљивих извора енергије;
- потрошња рудног богатства;
- загађење планете.

Зато репарататура, ако већ није, она ће бити императив, не само код високоразвијених или мање развијених земаља, већ код свих.

Репаратура се примењује у свим гранама индустрије (прехрамбена, машинска, текстилна, процесна, енергетика, ливнице, алатнице ...).

У свакој грани индустрије имамо механичке преноснике снаге, тј. посреднике између погонских и радних машина. Код механичких преносника снаге:

- има доста покретних делова: вртила, лежаји, зупчаници, ланчаници ...
- радна средина може бити агресивна или са високом радном температуром
- најчешћи видови разарања су замор материјала и површинска оштећења у виду хабања.

На слици 6.1. имамо оштећен зупчаник на коме су похабани зуби, где се приступа репаратури површински оштећених зуба.



Слика 6.1. Репаратура површински оштећених – похабаних зуба

На слици 6.2. имамо оштећен зупчаник на коме су разорени (поломљени) зуби где се приступа репаратури поломљених зуба, методом наваривања која је и најзаступљенија метода у примени репаратуре зупчаника.



Слика 6.2. Репаратура запремински разорених (поломљених) зуба

Репаратура има велику примену и у железничком и бродском саобраћају, као и у хемијској индустрији.

6.2. ОПШТИ АЛГОРИТАМ РЕПАРАТУРЕ

Да би се донела одлука, на основу техноекономске анализе, о репаратури машинског дела, неопходно је разрадити технолошки поступак репаратуре. Технолошки поступак репаратуре сваког машинског дела има одговарајуће специфичности.

Међутим, општи – заједнички технолошки поступак репаратуре машинских делова састоји се од низа репарација.

Редослед операција:

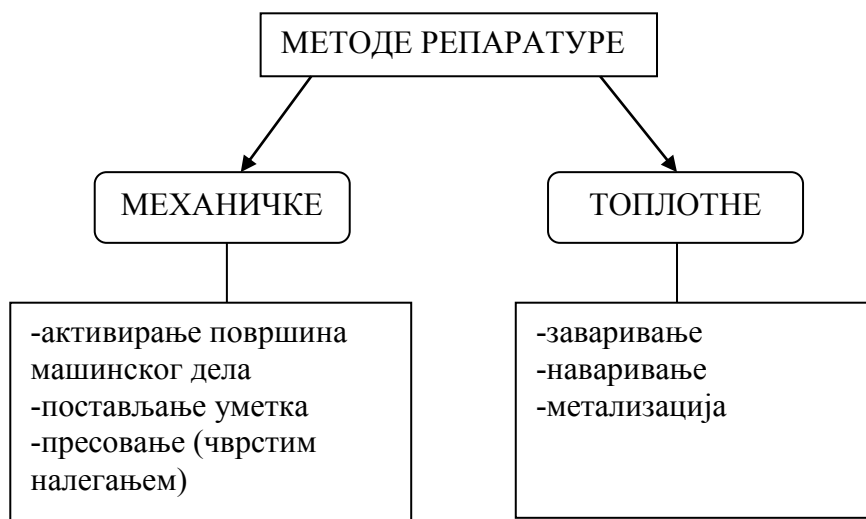
1. Демонтажа (расклапање)
2. Чишћење узорака
3. Анализа оштећења
4. Избор методе репаратуре
5. Техно-економска анализа
6. Техничка документација
7. Разрада технолошког поступка
8. Припрема узорка
9. Реализација изабраног поступка репаратуре
10. Контрола
11. Испитивање
12. Монтажа
13. Уходавање
14. Метода репаратуре

На основу спроведене анализе насталих оштећења у квалитативном и квантитативном погледу, врсте основног материјала, функције и домена примене машинског дела, врши се избор методе репаратуре. Генерално, репаратура зависно од начина извођења може бити механичка(хладна)и топлотна. Механичка репаратура се изводи без уноса топлоте.

Топлотну репаратуру прати унос велике количине топлоте, што се рефлектује на појаву деформација и заосталих напона, па су неопходне додатне термохемијске обраде. И поред ових проблема топлотна репаратура је доминантна у репаратури машинских делова. Најновија истраживања усмерена су на разради технолошког поступка за примену додатних материјала који не захтевају велики унос топлоте.

Избором методе репаратуре, стекли су се услови за спровођење техноекономске анализе о оправданости примене прописане технологије репаратуре (слика 6.3.).

Следеће фазе технологије репаратуре се спроводе само ако су техноекономски критеријуми показали оправданост примене усвојене технологије. У супротном набавља се нови део.



Слика 6.3. Приказ избора методе репаратуре

Основни задатак репаратуре је да површински оштећеним (похабаним) и запремински разореним (поломљеним) машинским деловима, врати радну способност. Уместо да се одложи на депонију „стarih делова”, похабани и поломљени делови се поступцима репаратуре поново уграђују у машинску конструкцију, уместо нових резервних делова[11].

На слици 6.4. приказан је пример репарираног зуба, на коме су се налазиле две прслине које су успешно репариране методом заваривања на делу где је дошло до пуцања.



Слика 6.4. Репаратура две прслине код зуба

Репаратура је нашла велику примену из више фактора, а то су : велика конкуренција, борба за што већи профит, економска, енергетска и еколошка криза.

Хладном репаратуром зупчаника се постижу већи економски ефекти (мала улагања) и може се применити само код репаратуре површинских оштећења зубаца.

Топла репаратура се примењује и код површинских и код запреминских оштећења зубаца и може се комбиновати са хладном репаратуром, у том случају постижу се максимални економски ефекти, јер је машински део максимално искоришћен.

Приказан је поступак наваривања зуба код великих зупчаника који трпе огромна оптерећења (слика 6.5.), где се може закључити економска исплативост репаратуре јер израда новог би била велики финансијски удар, а поред тога дошло би и до заустављања процеса производње.



Слика 6.5. Враћање целог зуба

Репаратура машинских делова и конструкција налаже велико научно и стручно знање из различитих области, (познавање материјала, врсте оштећења, прорачун машинских делова и конструкција,...), зато репаратуру не може да ради „један човек“ већ добро укомпонован тим.

7. ЗАКЉУЧАК

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. Код зупчаника без термичке обраде бокова зубаца, критична је носивост зуба, док је за термички обрађене зупчанике критична носивост подножја зуба.

Оштећења и ломови зуба и откази великих и јако оптерећених зупчастих преносника представља опасност у погледу безбедности особља и могу бити узрок велике материјалне штете.

Анализа оштећења и хабања зупчастих преносника показује који су најчешћи узроци који доводе до отказа. Да би продужио радни век зупчаника потребно је извршити избор одговарајућег материјала и његове термичке обраде. У раду је дата детаљна анализа утицаја материјала на хабање.

Посебну улогу у смањењу хабања заузима избор правовременог и правилног подмазивања зупчастих преносника. Недовољно и неблаговремено подмазивање доводи до директног контакта две (најчешће) металне површине, што за последицу има повећано хабање и смањење радног века.

Уколико до оштећења, односно лома зуба ипак дође један од начина обнове зупчаника представља репаратура.

8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Митровић, Р., *Машински елементи 2*, Београд,
- [2] Танасијевић, С., *Механички преносници*, Машински факултет, Крагујевац, 1994
- [3] Николић, В., *Машински елементи*, Машински факултет, Крагујевац, 2004
- [4] Танасијевић, С., *Триболошки исправно конструисање*, монографија, Крагујевац 2004
- [5] Танасијевић, С., *Основи трибологије машинских елемената*, Научна књига, Београд, 1989
- [6] <http://www.xtek.com/pdf/wp-gear-failures.pdf>
- [7] Gopinath K., Mayuram M.M., *Machine design II*, Indian Institute of Technology Madras, 1981.
- [8] http://www.maziva.org/index.php?option=com_content&view=article&id=48&Itemid=54
- [9] Стефановић, С., Николић, Д., *Избор мазива за подмазивање механичких преносника*, „Алатница“ ЕИ Holding corporation, Београд, 2003.
- [10] Масларевић, А., *Репаратура зупчастих парова*, Београд, 2009
- [11] Марковић, С., Јосифовић, Д., *Регенерација зупчаника*, Монографија, Крагујевац, 1998