

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Машински елементи 2

Број индекса: 103/2009

Игор Д. Антић

Облици разарања и могућности репаратуре зупчастих парова

- завршни рад -

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Зорица Ђорђевић, доцент - ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

1. Наведе и објасни основне облике разарања зубаца зупчаника,
2. Објасни технологију репаратуре зупчастих парова,
3. Прикаже и опише примере репаратуре зупчаника топлим и хладним поступком.

Препоручена литература:

[1] Николић, В., *Машински елементи*, Крагујевац, 2004.

[2] Милтеновић, В., Огњановић, М., *Облици разарања зубаца зупчаника*, Зупчаници, Београд, 1991.

[3] Марковић, С., Јосифовић, Д., *Регенерација зупчаника*, Монографија, Крагујевац, 1998.

Крагујевац, 2012.

ментор:

Др Зорица Ђорђевић, доцент

Резиме

У овом раду су описани различити облици оштећења и разарања зубаца зупчаника, услови који до њих доводе као и начини и технологије репаратуре тих зупчастих парова. Детаљније су описани облици оштећења површина бокова зубаца у условима великих оптерећења и недовољног подмазивања, који могу довести до хаварија великих машина и представљају опасност по људе и околину. Приказан је технолошки процес репаратуре зупчастих парова, као и примери технологије репаратуре зупчаника хладним и топлим поступком.

Кључне речи: зупчасти парови, разарање, репаратура.

Summary

In this paper are described different types of damage and destruction of the gear teeth, the conditions that lead up to them and repairing methods and technology of the gear pairs. A detailed description of damage forms of teeth flank surfaces under high loads and insufficient lubrication, which can lead to failure of heavy machinery and pose a risk to humans and the environment. It shows the technological process of repairing gear pairs, as well as examples of technology gear repair with hot and cold process.

Keywords: gear pairs, destruction, repair.

Садржај рада

Резиме.....	4
1. Увод.....	6
2. Основни облици разарања зубаца зупчаника	8
2.1 Површинска оштећења	9
2.2 Зарибавање.....	12
2.3 Трајне деформације.....	12
2.4 Заморна површинска оштећења.....	13
2.5 Задирање и заједање.....	16
2.6 Оштећења чела зубаца	17
2.7 Прслине	17
2.8 Лом зубаца.....	18
3. Технологија репаратуре зупчастих парова	20
3.1 Демонтажа (расклапање)	21
3.2 Чишћење, прање и одмашћивање узорка	22
3.3 Дефектација оштећења (анализа врсте, величине, карактера и положаја оштећења)	24
3.4 Избор оптималне методе репаратуре.....	25
3.5 Техно-економска анализа	25
3.6 Техничка документација.....	25
3.7 Разрада технолошког поступка	26
3.8 Припрема узорка.....	26
3.9 Реализација изабраног поступка репаратуре	26
3.10 Контрола тачности.....	27
3.11 Испитивање зупчастих парова	29
3.12 Монтажа	30
3.13 Уходавање.....	30
4. Технологија репаратуре зупчаника хладним поступком.....	31
5. Технологија репаратуре зупчаника топлим поступком.....	39
6. Закључак	43
Литература	44

1. Увод

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

Тачно прописан редослед операција који треба доследно спровести код оштећених и разорених зупчастих парова 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 показују да запреминска разарања машинских делова у 80-90% случајева настају услед замора материјала. Такође је показано и да машински делови најчешће губе радну способност услед површинских оштећења.

Ризик од лома током рада:

- различити делови машине и њихове везе морају бити у могућности да издрже оптерећење за које су пројектоване ако се користе на начин предвиђен од стране произвођача,
- трајност материјала који су уграђени мора бити усаглашена са природом радног простора који је предвидео произвођач, посебно у погледу појаве замора, старења, корозије и абразије,
- произвођач мора у упутству да наведе тип и учесталост контроле и одржавање које је потребно из безбедносних разлога. Он мора, када је то прикладно, да наведе делове који су изложени хабању као и критеријуме за замену,
- када упркос предузетим мерама постоји и даље ризик од лома или разарања (нпр. као са брусним точком), покретни делови морају бити монтирани и позиционирани тако да у случају лома њихови делови остану повезани.

Тачно прописан редослед операција који треба спровести код оштећених и разорених зупчастих преносника у циљу повратка параметара радне способности, назива се репаратура.

Основни задатак репаратуре је да површински оштећеним (похабаним) и запремински разореним (поломљеним) зупчастим преносницима, врати радну способност. Уместо да се одложи на депонију односно уврсте у расход, похабани и поломљени зупчаници се поступцима репаратуре поново уграђују у машинску конструкцију, уместо нових зупчастих парова. Овим поступком се знатно смањује трошак услед куповине нових зупчастих парова, што доводи до велике примене репаратуре услед економске исплативости.

Историјски посматрано, репаратура се почела интензивно примењивати од 1929. године, у периоду велике економске кризе. У периоду хладног рата (1960-те године), због економских блокада, влада филозофија „магацини пуни резервних делова”. Велика конкуренција, борба за што већи профит, економска, енергетска и еколошка криза (од 1980-тих година), враћа репаратуру поново у фабричке хале и радионице.

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).

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

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

2. Основни облици разарања зубаца зупчаника

Зупчаници спадају у групу машинских елемената са најширом применом у машинству. Намењени су за пренос снаге и обртног момента, пре свега, као и обезбеђење равномерног кружног кретања. Од њихове отпорности на хабање и чврстоће у знатној мери зависе век трајања и поузданост механизма, машина и машинских система. Карактеришу их: изузетно сложен геометријски облик радних површина, израда од различитих материјала (углавном метала, али и неметала), са разним геометријским облицима и димензијама, различитим методама израде, раде у разноврсним експлоатационим режимима и друго. Све ово наводи на закљачак да је регенерација зупчаника доста комплексна. Основну масу зупчаника, који се примењују у машинској индустрији, чине цилиндрични зупчаници са правим зупцима (око 80 %). Примена коничних зупчаника свих типова достиже 12-15%, а цилиндричних зупчаника са косим зупцима 3-5%. При том на зупчанике са модулом до 4mm и пречником који не прелази 300mm отпада око 90% целокупне производње.

Зупчасти преносници снаге су 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 хиперболидне [1].

На зупчаницима у току експлоатације настају разноврсна оштећења венца и тела, као што су: похабаност радних површина, механичка оштећења, деформације облика и димензија, прслине, ломови и друга. Већина зупчаника изашлих из експлоатације може се успешно и поуздано репарисати.

У овом делу ће бити описани различити облици оштећења и разарања зубаца зупчаника и дефинисани основни појмови. Детаљно су описани облици оштећења зубаца високооптерећених зупчастих парова који раде у незаштићеној околини и изложени су утицају атмосферских услова.

У зависности од врсте оптерећења и радних услова на зупцима спрегнутих зупчаника се јавља више од 20 различитих типова оштећења [2]. Основни типови оштећења зубаца зупчаника су:

1. површинска оштећења,
2. зарибавање,
3. трајне деформације,
4. површинска оштећења услед замора,
5. задирање и заједање,
6. оштећења чела зубаца,
7. прслине и
8. лом зубаца.

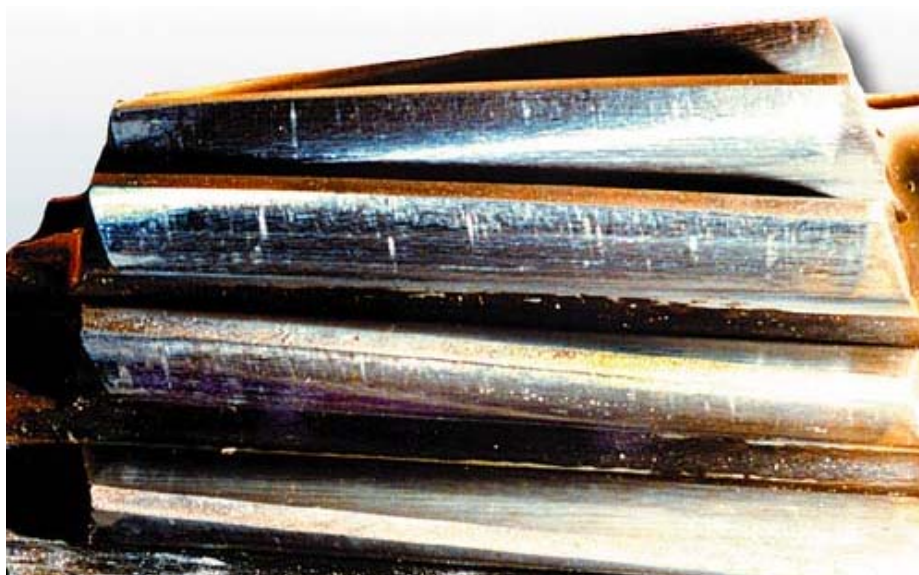
Изучавање основних видова и узрока разарања зупчаника показало је да из погона много чешће испадају погонски зупчаници него гоњени. Обично су у машинама лому изложена два-три пара зупчаника, који су и по прорачуну „ слаби чланови „ машинског система.

2.1 Површинска оштећења

Површинска оштећења се јављају на радним површинама бокова зубаца у облику [2]:

- хабања услед клизања,
- корозије,
- прегревања и
- ерозије.

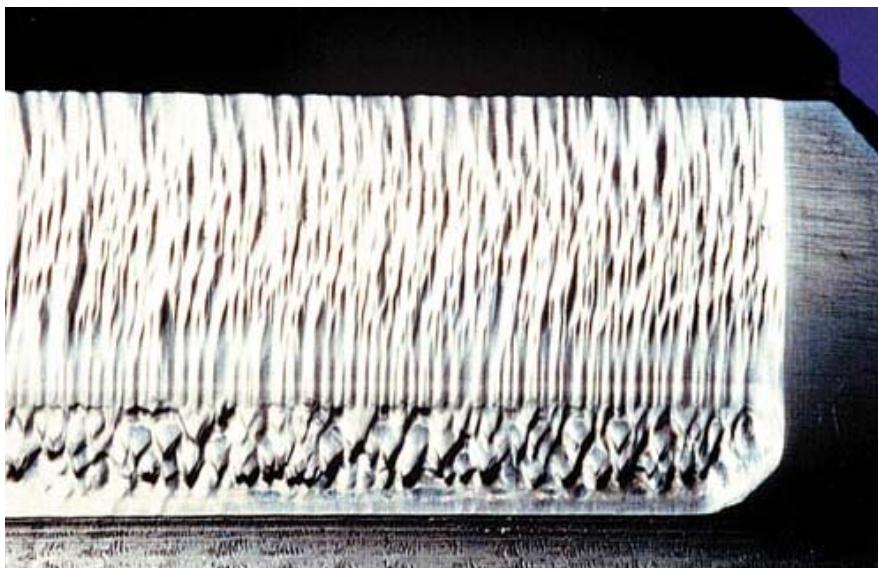
Хабање услед клизања спада у најчешће облике оштећења зубаца. Хабање као општи појам се односи на уклањање материјала са површина које клизе једна по другој. Он обухвата и абразивно дејство штетних примеса у мазиву – абразивно хабање, и хабање због локалног лепљења и одвајања честица материјала зубаца – адхезионо хабање (сл. 1).



Слика 1. Адхезионо хабање

Абразивно хабање је изазвано присуством страних тела, минералних или металних честица међу додирним површинама зубаца. Такво хабање доминира при недовољној заштити преносника од нечистоћа и слабој филтрацији уља. Подмазивање смањује абразивно хабање, али га не елиминише. Ово хабање се најчешће јавља у преносницима рударских машина. Карактерише се великим интензитетом и у већини случајева је водеће. Без обзира што се материјал зупчастих преносника рударских машина, као по правилу, подвргава термичкој обради и поседује високу тврдоћу, зупчаници се најчешће ремонтују услед прекомерног хабања радних површина и зупци се регенеришу. Абразивно хабање радних површина зубаца доводи до слабљења подножја зубаца и деформисања еволвентног профила.

На (сл.2) је приказан један карактеристичан пример интензивног абразивног хабања.



Слика 2. Интензивно абразивно хабање

Хабање услед клизања јавља се у току експлоатације од самог почетка у виду удубљења у зони велике брзине клизања. Прво се јавља између кинематског и подножног круга, а затим између кинематског и теменог круга и шири се на целу површину активног дела бока зупца.

На почетку рада зупчастог пара јавља се тзв. хабање у току разраде, које има позитиван ефекат на расподелу оптерећења у спреси два зупца, јер доводи до глачања површине машински обрађеног бока зупца. Може се јавити у виду умереног хабања и у виду полирања. Код умереног хабања примећује се да је материјал скинут са површина главе и ноге зупца, док је полирање веома спор процес хабања у току којег се хрпаваост контактних површина постепено смањује до сјаја огледала. Хабање које после одређеног периода рада достиже критичан обим дефинише се као прекомерно хабање, (сл. 3).



Слика 3. Прекомерно хабање

Посебни облици хабања услед клизања су: умерено гребање, изражено гребање и интерферентно хабање. Код умереног гребања јављају се ситни жлебови у правцу клизања, неправилно распоређени по боковима зупца. Изражено гребање је врста абразивног хабања са присутним углачаним линијским жлебовима у правцу клизања зупца, као последица копања површина спрегнутих зубаца оштрим ивицама храпавих површина или тврдим честицама прилепљеним за њих. Интерферентно хабање је хабање врха једног зупца и/или подножја зупца који је с њим у спрези. Као резултат овог хабања јављају се удубљења у подножјима и заобљења на врховима зубаца два спрегнута зупчаника.

Хабање се може смањити избором мазива и повећањем квалитета обраде радних површина, као и избором материјала. Бокови зубаца малог зупчаника треба да имају већу тврдоћу, јер трпе већи број промена оптерећења у току рада.

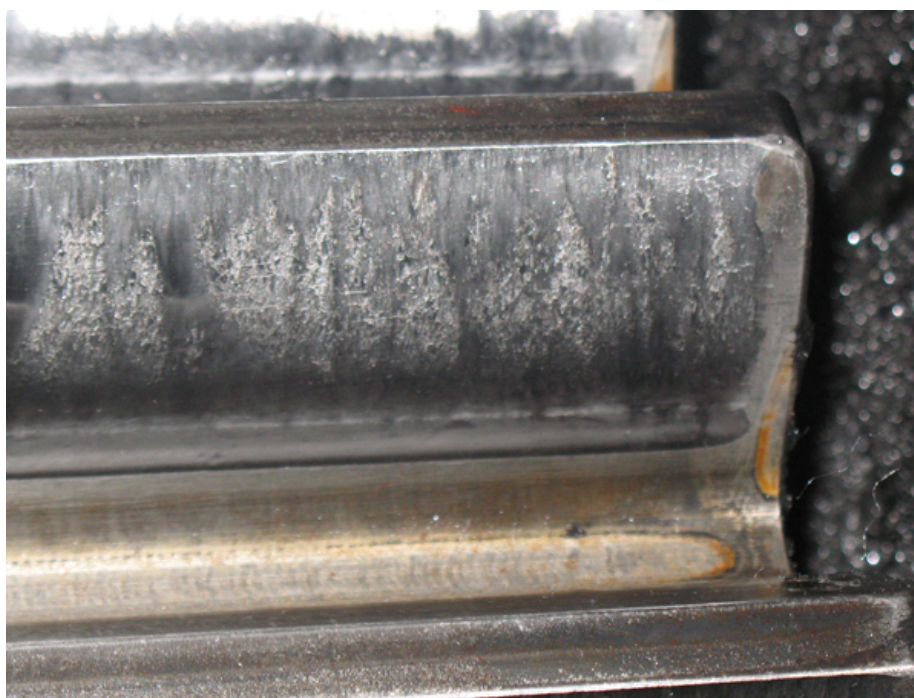
Корозија је вид површинског разарања бокова зубаца. Хемијска корозија представља деградацију површинских слојева материјала под хемијским дејством примеса из мазива. Контактна корозија је површинско оштећење због понављања малих померања једне контактне површине по другој, што доводи до убрзаног оштећења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

При раду зупчастих парова могу се јавити високе температуре које доводе до **прегревања** праћеног похабаном зоном и пластичном деформацијом бокова зубаца.

Посебан вид оштећења површина бокова зубаца је **ерозија**: кавитацијска, хидраулична или електрична. Кавитацијска ерозија настаје због високофреквентних вибрација или када је мазиво загађено водом, ваздухом или другим гасовима. Хидрауличну ерозију изазива дејство млаза или струје течности, која садржи ваздух и ситне честице. Електрична ерозија се јавља при пражњењу електричног лука или варница између спрегнутих бокова, праћена малим кратерима глатких ивица на боковима зубаца и некад, већим сагорелим областима.

2.2 Зарибавање

Зарибавање је оштећење бокова зубаца од дејства великих површинских притисака и брзина клизања, а јавља се као вид специфичног хабања са браздама и зарезима у смеру клизања. *Хладно зарибавање* се јавља при обимним брзинама испод 4m/s, код зупчаника израђених од побољшаног челика са нижим квалитетом обраде, а *топло зарибавање* настаје при великим брзинама клизања и површинским притисцима, код термички обрађених цилиндричних зупчаника. Пример израженог зарибавања због великог одступања паралелности оса спрегнутих зупчаника је дат на (сл.4).



Слика 4. Изражено зарибавање

2.3 Трајне деформације

Трајне деформације се појављују као утиснута места на боковима зубаца при пролазу страних честица кроз захват у виду: валовитости, бразди или храпавих ивица. Деформисање зубаца се појављује на радним површинама тешко оптерећених зупчаника, израђених од меких челика. Тада долази до пластичног померања честица материјала по радној површини једног истог зупца. У том случају настаје деформисање (кривљење) облика зубаца. На радним површинама једног зупчаника стварају се урези (жлебови), а по другом избочине. Оваква оштећења зупчаника често настају при пуштању у рад јако оптерећених вратила. При дужем раду, услед отврдњавања деформацијом, повећавају се механичка својства материјала и смањује пластично деформисање. Ради избегавања пластичног деформисања радних површина зубаца врши се уходавање зупчаника под већим оптерећењем од радног.

Валовитост су трајне деформације настале на местима највећег оптерећења бокова зубаца. Ове деформације имају облик малих гребена, нормалних на правац клизања. Гребени су валовити и дају површини бокова изглед сличан песку или талогу, у мањој мери растуреном ветром или водом.

Бразде су посебан вид оштећења од изразитих гребена и жлебова, који настају пластичном деформацијом, али понекад и додатним хабањем бокова зубаца. Најчешће се јавља на зупцима спороходних зупчаника, израђених од материјала мале тврдоће, са великом компонентом клизања у правцу линије контакта зубаца.

Храпаве ивице представљају деформацију у облику грубих, често оштрих, издужених ивица на крајевима зубаца, насталу услед великих оптерећења праћених клизањем или услед заривавања, а понекад у току производних операција.

2.4 Заморна површинска оштећења

Заморна оштећења површине материјала настају због поновљених оптерећења бокова зубаца у току рада, уклањањем дела материјала и формирањем прслина. Јављају се у виду питинга, љуспастог питинга, љуштења и површинског дробљења, као последица површинских и потповршинских напона од контактнoг оптерећења.

Један од најраспрострањенијих видова разарања зупчаника је заморно хабање, или такозвани *питинг* радних површина зубаца. Он се јавља у виду малих јамица величине од неколико десетина μm до 0,2 mm. Питинг се углавном појављује након више од 10.000 промена оптерећења, односно спрезања истог пара зубаца. Прслине које настају обично су под углом од 5° до 20° у односу на бочну површину (сл. 5), и леже у правцу нормале на главни нормални напон.



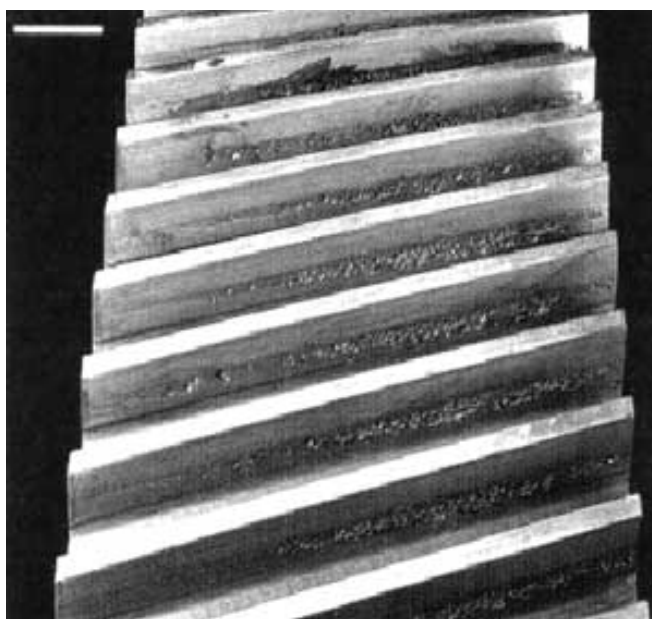
Слика 5. Правац прслина испод површине бока зупца

Експериментална испитивања су показала да су активне површине бокова зубаца испод кинематске површине (нога зупца) више изложене питингу него површине бокова изнад ње код погонског и код гоњеног зупчаника, али је чешће код погонског зупчаника.

Разликујемо три врсте питинга:

- ограничени, или почетни – иницијални, који одговара периоду уходавања зупчастог пара и ограничен је тим периодом,
- прогресивни – разорни, који постепено расте и доводи до разарања радних површина зубаца,
- микро питинг.

Ограничени – иницијални питинг радних површина зубаца може настати код зупчаника израђених од материјала мање тврдоће, а веће жилавости. Он је изазван концентрацијом оптерећења на малим деловима радних површина, или на њеним посебним неравнинама и обично се јавља у почетном периоду рада зупчастог преносника. Почетни питинг може елиминисати почетне неправилности контактних површина и тиме зауставити заморно оштећење. Препознаје се као оштећење у виду малих, плитких јамица, које су последица неправилне обраде површина а може прећи у прогресивни питинг (сл. 6). После хабања ових делова, када се настала оптерећења прерасподеле и захвате велики део радних површина, процес се прекида. Ограничени питинг практично не показује битан утицај на век трајања зупчастог преносника.



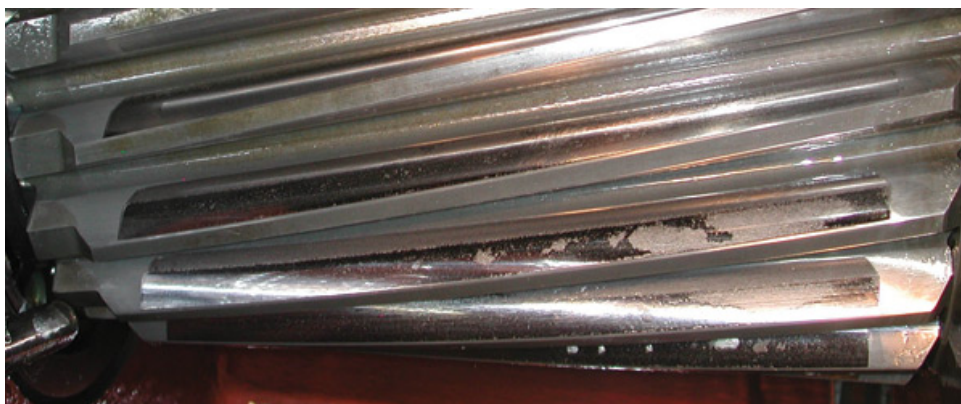
Слика 6. Питинг бока зупца

Прогресивно заморно хабање – разорни питинг се може одвијати у почетном периоду рада само код зупчаника чије радне површине имају високу тврдоћу. Код зупчастих преносника израђених од тврдых или меких материјала прогресивно хабање се може одвијати у току целокупних времена рада. Хабање метала почиње на местима највећих контактних напона и појављује се услед замора површинског слоја зупца. Танки површински слој, који је подвргнут непрекидном отврдњавању деформацијом, пуца и разара се. Настале јамице су величине главе чиоде или мало веће. Прве јамице се појављују испод кинематског круга. Затим је таквом дејству подвргнут следећи слој.

Разарање се распростире у дубину материјала и захвата све већи део радне површине зупца. Временом ово осипање захвата целу површину и разара је. При том је нарушена тачност спрезања, то јест зупчасти преносник почиње рад са ударима, што на свој начин доприноси убрзаном хабању радне површине. Настало осипање на површинама зубаца од вискозних материјала, при даљем раду преносника, сразмерно расте. Истовремено се појављује и развија ново осипање.

Стварање и развој осипања одиграва се све док контактни напони на радним површинама зубаца, неоштећених питингом, не порасту до величине која превазилази границу течења материјала. После тога настаје промена површине, њено интезивно хабање или задирање. Развој процеса питинга последица је замора танких слојева материјала радних површина зубаца. Интезитет хабања зависи од заморне чврстоће материјала, подмазивања, величине и смера релативног клизања радних површина зубаца, брзина обртања зупчаника, а такође и од квалитета површинске обраде. Прогресивном питингу доприноси смањење тврдоће цементационог слоја, које настаје као последица грешака при цементацији (декарбонизација, то јест смањење количине угљеника на површини – слабо засићење површинског слоја) или термичкој обради. Недовољна тврдоћа цементационог слоја погодује појави површинске пластичне деформације и промени облика профила зупца. При томе долази до појаве повећане силе трења, што изазива повећање температуре конкретних површина и могућност отпуштања површинског слоја.

Микро питинг (сл.7) је појава мреже микро јама или микро прслина, као резултат недовољне дебљине уљног филма у односу на оптерећење.

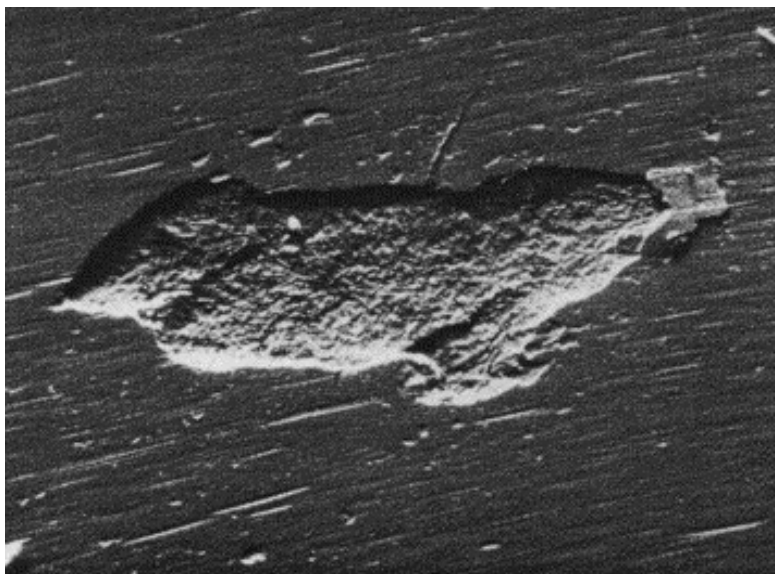


Слика 7. Појава микро питинга на боковима зубаца

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

Љуштење-отцепљење је оштећење слично љуспастом питингу, при чему су сломљени комади материјала често дебљи од каљеног слоја и неправилног су облика. Обично се јавља код отворднутих површина бокова цилиндричних зупчаника са правим зупцима.

На (сл.8) је приказан изглед овог оштећења код зупчаника са правим зупцима, и микрографски снимак, на којем се види развој потповршинске прслине.



Слика 8. Љуштење цепањем

Површинско дробљење је тежак облик љуштења због раста прслина уз цепање већих делова површински каљеног челика.

2.5 Задирање и заједање

Задирање настаје због тренутног прекида слоја мазива између радних површина, или његовог истискивања услед нарушавања режима подмазивања. Прекид заштитне способности мазивног слоја изазван је великим локалним загревањем и пластичном деформацијом површинског слоја. Сувише густо средство за подмазивање може бити узрок задирања. Тренутни метални контакти, који настају при прекиду уљног филма, углавном су последица великих оптерећења и великих брзина. Као резултат тога при узајамном клизању материјала тврдих површина настају бразде на мекшем материјалу.

Заједање се јавља као резултат великог локалног загревања контактних површина. Карактерише се великим честицама материјала, које се одкидају од једне површине и „заварују“ на другу, што и одређује степен оштећења зубаца. У циљу заштите зупчаника који се користе у брзоходним и преносницима средњих брзина, као и тешко оптерећеним спороходним преносницима, примењују се уља великог вискозитета са додатком адитива на бази сумпора или хлора. Ови елементи спречавају заваривање честица.

2.6 Оштећења чела зубаца

Укључивање и искључивање зупчаника у аксијалном смеру (на пример код мењача) обично доводи до оштећења чела зубаца. При пребацивању зупчаника из једне у другу брзину, чела зубаца ударају једна о друга. Последица је постепено хабање чеоних ивица. Гребане честица цементног слоја при чеоним ударима зубаца олакшано је повећаном кртошћу тог слоја и великим заосталим напонима, који настају у вези са структурном хетерогеношћу зона цементационог слоја. Непотребно засићење површина зубаца угљеником и оштро смањење његове концентрације по дубини слоја доводи до појаве велике количине заосталог аустенита на површини. Ту појаву прате заостали напони затезања. Под утицајем отврдњавања деформацијом, које настаје на челима зубаца при промени брзине, заостали аустенит спољашње зоне цементираног слоја прелази у мартензит. Ова појава је праћена проширењем језгра и настанком великих унутрашњих напона. При недостатку високе тврдоће чела зубаца запажа се њихово хабање, или гњечење; при прекомерно високој тврдоћи – крто разарање, које води распадању чела зубаца. При меком језгру и тврдој површини чела зубаца настаје пробијање површинског слоја. Постоји низ мера које подразумевају произвођачи, усмерених ка смањењу хабања чела зубаца мењачких зупчаника. Смањење испадања зупчаника из погона постигнуто је:

- применом одговарајућег заобљења чела зубаца,
- побољшањем термичке обраде чела зубаца,
- применом савремених модела рационалних кочних система у машинама и механизмима и синхронизацијом.

2.7 Прслине

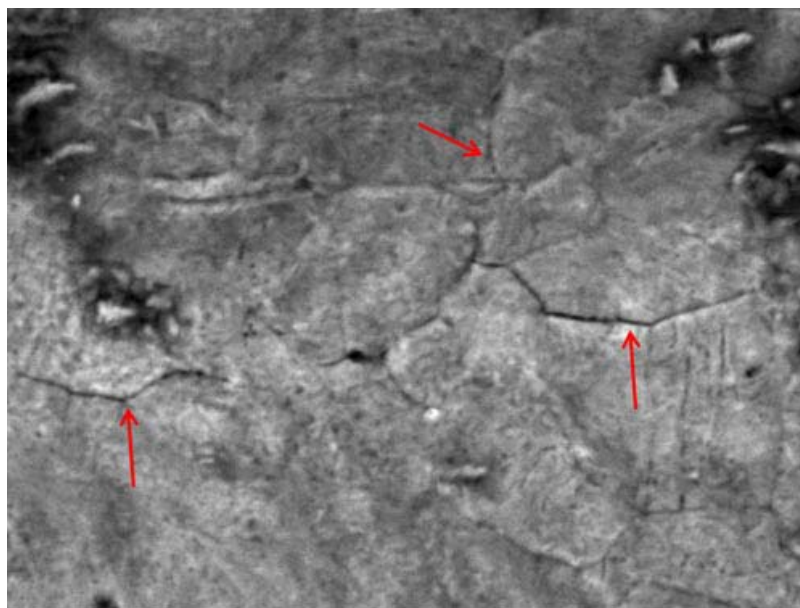
Прслине зубаца настају због каљења, брушења или замора.

До *прслина због каљења* долази при термичкој обради због прекомерних унутрашњих напона. Ове прслине се често откривају тек после одређеног времена рада или при брушењу.

Прслине због брушења јављају се у току или после обраде брушењем, и углавном имају правилан распоред. Ове прслине су кратке, не много дубоке, јављају се као серије приближно паралелних прслина, најчешће нормално на правац путање брусног точка или у облику решетке од прслина.

Заморне прслине резултат су понављања наизменичних или цикличних оптерећења, чији су интензитети најчешће знатно мањи од затезне чврстоће материјала.

На (сл.9) је приказан изглед заморних прслина на једном зубу зупчаника.



Слика 9. Изглед заморне прслине

2.8 Лом зубаца

Лом зубаца изазива изненадно нарушавање радне способности механизма и целе машине. Он најчешће настаје услед стварања заморних прслина у корену зупца при раду преносника. Ови ломови могу бити изазвани: вишеструко понављајућим (цикличним) оптерећењима на савијање и малобројним, али значајним по величини, преоптерећењима динамичког или статичког карактера.

Лом се јавља у корену зупца због малог радијуса заобљења ноге зупца и рисева од резног алата, што ствара повећану концентрацију напона. При томе настале заморне прслине у почетку се развијају управно на заобљење, а затим распростиру по дубини и дуж зупца. Лом зубаца у корену настаје и услед дејства заосталих напона затезања у зони међузубља, који настају при термичкој и термо – хемиској обради. Често се лом зубаца у корену објашњава дубоким каљењем и, самим тим, слабом отпорношћу на удар. Посматрања показују да код дужих зубаца често не настаје лом целог зупца, већ само његовог дела. Ако на зупчанику са таквим оштећењем нису оштећени остали зупци, он се може користити за поновну експлатацију.

Лом зубаца настаје услед конструктивних, технолошких, експлатационих и поремећајних узрока. Тако, лом зубаца може настати због великих статичких преоптерећења у случају недовољне чврстоће зубаца на савијање, или услед динамичких оптерећења, при којима настаје прекорачење динамичких карактеристика материјала. При великом хабању радних површина зубаца у преноснику настаје пораст динамичких оптерећења и неравномерна расподела оптерећења дуж бока зупца. Поред тога, услед смањења њихове дебљине долази до смањења чврстоће зубаца.

Лом зубаца може бити изазван тренутним преоптерећењем или великим оптерећењем зупчаника. До лома зупца може доћи и због смицања зубаца, после пластичне деформације и због замора.

Лом услед преоптерећења је резултат једнократног или малог броја дејства великог оптерећења. Овај лом се јавља као крт, жилав или квази-крт лом.

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

Заморни лом се јавља због савојног оптерећења или као лом дела зупца. Заморни лом од савијања настаје због раста прслине током великог броја циклуса оптерећења. На површини лома издвајају се две зоне: површина замора и површина коначног лома. У зони замора нема знакова пластичне деформације, а површина зоне коначног лома је глатка, мат и често испресецана затвореним линијама (сл. 8). Заморни лом дела зупца настаје на крајевима зубаца цилиндричних и коничних зупчаника, због концентрације оптерећења уз изражени питинг, који иницира заморну прслину у суседном зупцу.



Слика 8. Заморни лом због савијања

Сложено оптерећење зубаца изазива различите видове оштећења, који подстичу једно друго. Зато је потребно прорачуном носивости зупчаника обухватити све критеријуме: чврстоћу бокова и подножја зубаца, заривавање и хабање.

3. Технологија репаратуре зупчастих парова

Под репаратуром оштећених зупчаника подразумева се такав редослед технолошких операција, који има за циљ повратак њихових изгубљених радних карактеристика. Репаратуром се морају обезбедити називне мере и захтевани квалитет обраде површина, као и правилан геометријски облик и очување (или чак побољшање) основних механичких карактеристика материјала регенерисаног зупчаника.

Да би се све ово успешно остварило неопходно је добро познавање: узрока који изазивају оштећења, карактеристика насталих оштећења и њихових димензија, метода за утврђивање оштећења, опреме за регенерацију, основних технолошких и физичко-механичких карактеристика металних слојева који се наносе на оштећене површине и других параметара.

Репаратура зупчаника обухвата откривање њихових оштећења, узрока и карактера истих, примену најрационалнијег и најпоузданије методе регенерације и ојачања радних површина зубаца, као и завршну контролу и испитивање регенерисаних зупчаника.

Да би се донела одлука о репаратури машинског дела на основу техноекономске анализе, 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 операција.

Технолошки процес репарације зупчастих парова чине следеће операције:

1. Демонтажа зупчаника,
2. Чишћење, прање и одмашћивање зупчаника,
3. Дефектација оштећења (анализа врсте, величине, карактера и положаја оштећења),
4. Избор оптималне методе репаратуре,
5. Техно-економска анализа,
6. Техничка документација,
7. Разрада технолошког поступка,
8. Припрема узорка,
9. Реализација изабраног поступка репаратуре,
10. Контрола тачности,
11. Испитивање зупчастих парова,
12. Монтажа,
13. Уходавање.

3.1 Демонтажа (расклапање)

Демонтажа односно расклапање (сл.9) је прва операција у технолошком процесу репарације зупчастих парова и није увек неопходна као на пример код зупчаника великих димензија где се репарација врши на лицу места.

Приликом демонтаже потребно је водити рачуна:

- да се не оштете делови склопа,
- да не дође до допунског оштећења већ оштећеног зупчастог пара,
- да се сачувају изворно настала оштећења.

Како не би дошло до ових појава мора се прописати технолошки поступак демонтаже зупчастог пара који се састоји од:

- врсте алата потребног за демонтажу,
- стручног кадра,
- опреме,
- мера безбедности и заштите на раду.

Такође је неопходна и одговарајућа техничка документација.



Слика 9. Операција демонтаже односно расклапања

3.2 Чишћење, прање и одмашћивање узорака

Како би се открило стање оштећених површина зупчастих парова у погледу врсте и количине оштећења, потребно је прво их детаљно очистити. Чишћење зупчастих парова подразумева уклањање нечистоћа са оштећених површина и других наслага које се јављају при њиховој експлоатацији, као и њихово прање и одмашћивање (сл.10).

Најчешће нечистоће и насlage прљавштина су:

- остаци уља и масти настали приликом подмазивања, сервисирања и поправки,
- металне честице које се јављају услед хабања и различитих оштећења,
- корозија која настаје услед лоше заштите и места експлоатације,
- боје које настају приликом љуштења са заштићених и офарбаних површина,
- гареж који се јавља приликом прекомерног загревања елемената,
- каменац који настаје услед воде и раду под водом,
- старе заштитне превлаке.

Квалитет технологије репаратуре у великој мери зависи од квалитета реализације операције чишћења. Због тога се ова операција мора исправно спровести и редовно контролисати.

За чишћење могу да се користе различита средства као што су:

- вода (хладна, топла, врућа),
- хемијска средства (киселине, базе,...),
- ваздух,
- суви лед.



Слика 10. Чишћење, прање и одмашћивање узорака

Прање и одмашћивање се најчешће обављају уређајем за прање и одмашћивање који користи воду и различита хемијска средства за скидање масноћа (сл.11).



Слика 11. Уређај за прање и одмашћивање

Осим овог поступка постоји и вибрациони поступак као и поступак чишћења пескарењем код кога се компресором избацује ваздух са честицама песка које нагризају површину елемента.

Такође се користи и метода чишћења потапањем (ултразвучно прање) у води или неком другом хемијском средству за одмашћивање.

У последње време се све више користи савремени поступак чишћења сувим ледом. Овај поступак чишћења је веома једноставан, брз и доста ефикасан, он истовремено уклања насlage и нечистоће са оштећених површина и одмашћује их.

3.3 Дефектација оштећења (анализа врсте, величине, карактера и положаја оштећења)

При дефектацији зупчаника посебна пажња се усмерава на степен хабања, правилност облика као и тврдоћу радних површина зубаца. При том се проверава да ли постоје нагњечења, прслине, ломови или задори на зупцима, венцу, главчини и жлебовима. Најчешће коришћени методи дефектације су визуелни и компаративни метод, метод техничких мерења и лабораторијска испитивања.

Анализа оштећења се спроводи у циљу утврђивања основног узрока лома или оштећења машинских делова.

Након чишћења оштећених површина зупчастих парова следи анализа:

- насталих оштећења у погледу врсте, количине оштећења и њиховог положаја (локација),
- услова израде,
- услова монтаже,
- услова експлоатације,
- конструкционих услова (на основу техничке документације).

На основу оваквих анализа треба утврдити који су услови имали доминантан утицај на формирање насталих оштећења машинских делова. У циљу заштите машинских делова од наредних разарања исте врсте (истог механизма разарања), треба предложити одговарајућу конструкцију у погледу конструкционих услова, услова израде, монтаже и експлоатације.

Како би се ове анализе спровеле у дело, потребно је прикупити следеће податке:

- степен похабаности,
- толеранције дужинских мера,
- толеранције облика и положаја,
- храпавост површина,
- прслине, видљиве и скривене,
- делимични или потпуни ломови,
- врста основног материјала.

Ови подаци се добијају испитивањем односно мерењем и коришћењем одговарајућих метода. Степен успешности репаратуре зупчастог пара у многоме зависи од поузданости прикупљених података. Веома је важно да се похабано подручје или лом детаљно анализирају ради доношења исправне одлуке [4].

3.4 Избор оптималне методе репаратуре

Код зупчаника хабању су највише изложени зупци, а затим отвори, ожлебљени отвори и жлебови за клин на главчинама. Узрок репаратуре зупчаника може бити прслина у телу, главчини или венцу зупчаника.

На основу спроведених анализа оштећења насталих у квалитативном и квантитативном погледу, врста основних материјала, функција и домена примена машинских делова, врши се избор метода репаратуре. Репаратура зупчастих парова зависно од начина извођења може бити механичка (хладна) и топлотна.

Механичка репаратура се изводи без уноса топлоте.

Механичке методе репаратуре су:

- активирање неоштећених површина машинског дела,
- постављањем уметка,
- пресовањем (чврстим налегањем).

Топлотну репаратуру прати унос великих количина топлоте, што се одражава на појаву деформација и заосталих напона, па је неопходна додатна термо-хемијска обрада. И поред оваквих проблема топлотне репаратуре су доминантније у репаратури машинских делова. Најновија истраживања усмерена су на разради технолошког поступка за примену додатних материјала који не захтевају велике уносе топлоте.

Топлотне методе репаратуре су:

- заваривање,
- наваривање,
- метализација.

3.5 Техно-економска анализа

Избором оптималне методе репаратуре стичу се услови за спровођење техно-економских анализа о оправданости примена прописаних технологија репаратуре.

Следеће фазе технологија репаратуре се спроводе само ако техно-економски критеријуми показују оправданост примене усвојених технологија. У супротном врши се набавка новог дела.

3.6 Техничка документација

Врло важан сегмент репаратуре зупчастих парова заузима исправна техничка документација оштећеног елемента. Уколико оштећени машински део нема пратећу техничку документацију, она се мора израдити на основу снимања, мерења потребних геометријских, кинематских и механичких карактеристика.

3.7 Разрада технолошког поступка

У разраду технолошког поступка спадају:

- избор алата и прибора потребног за извршење репаратуре,
- избор додатног материјала,
- избор температуре предгервања,
- заштита површина које се не третирају.

3.8 Припрема узорка

Након разраде технолошког поступка репаратуре зупчастог пара наступа фаза припреме узорка за реализацију изабране методе репаратуре.

3.9 Реализација изабраног поступка репаратуре

На основу изабране оптималне методе репаратуре врши се механичка (хладна) или топлотна репаратура.

Репаратура главчине зупчаника

На главчинама (сл.12) највише се хабају места контакта са вратилима. Овако оштећени зупчаници регенеришу се електролучним наваривањем похабаних површина. Након тога се те површине обрађују на номиналне или ремонтне мере. Репаратура главчине зупчаника наваривањем је рационалнија од регенерације вратила на коме се обрће зупчаник истом методом.



Слика 12. Изглед оштећене главчине зупчаника

Репаратура венца зупчаника

Најодговорнија репаратурна операција је репаратура зубаца зупчаника (сл.13). Може се извести хладном методом ремонтних мера или браварским методама врућим наваривањем.



Слика 13. Изглед оштећеног венца зупчаника

3.10 Контрола тачности

Тачност зупчастих преносника се карактерише:

- кинематским грешкама,
- цикличним грешкама,
- празним ходом.

Под кинематском грешком преносника се подразумева грешка померања гоњеног зупчаника, која је представљена у облику функције од угла заокретања погонског зупчаника. Основни узрок кинематских грешака је ексцентрицитет зупчаника.

Циклична грешка се јавља као грешка спрезања зубаца. Таква грешка настаје због грешака профила и корака зубаца. Она се јавља у виду високофреквентних грешака обртања зупчаника и прати је веома оштра промена функције угаоне брзине гоњеног зупчаника, а понекад чак и прекид те функције.

Празан ход зупчастог преносника се манифестује на тај начин што се при покретању преносника гоњени зупчаник не доводи у обртање у исто време као и погонски, већ након заокретања погонског зупчаника за неки угао. То се објашњава на тај начин што се при покретању:

- јављају зазори између зубаца (јавља се кинематски „мртви ход“),
- дешавају еластичне деформације вратила и зубаца зупчаника услед промене смера сила (појава еластичног мртвог хода).

Контрола зупчаника се дели на:

- контролу тела зупчаника,
- контролу зубаца зупчаника,
- контролу зупчастог пара.

Контрола тела зупчаника обухвата мерење радијалног и аксијалног бацања тела зупчаника.

Контрола зубаца зупчаника може бити:

- појединачна (диференцијална) контрола,
- контрола спрезањем (функционална, комплексна).

У појединачну контролу зубаца зупчаника спадају:

- контрола профила зубаца,
- контрола бочних линија зубаца,
- контрола дебљине зупца и ширине међузубља,
- контрола мере преко зубаца,
- контрола основног корака бокова зубаца, и контрола центричности и аксијалности, односно радијалног бацања зубаца.

У контролу зубаца зупчаника спрезањем спадају:

- тангенцијална контрола спрезањем,
- радијална контрола спрезањем,
- контрола међусобног положаја оса ротације, која се дели на контролу основног растојања и контролу паралелности контакта спрегнутих зупчаника,
- контрола квалитета површина зубаца,
- контрола шума.

Код тангенцијалне контроле зупчасти пар се налази на номиналном (називном) осном растојању. При контроли се региструје промена угла обртања гоњеног зупчаника, у правоугаоном или поларном координатном систему. Распон, разлика екстремних вредности у току једног обртаја зупчаника представља укупно тангенцијално одступање.

Код радијалне контроле зупчасти пар се спреже без бочног зазора, односно на минималном осном растојању. Ово се постиже сталним еластичним потискивањем једног зупчаника у односу на други. При контроли се региструје промена осног растојања зупчастог пара у правоугаоном или поларном координатном систему. Укупно радијално одступање представља разлику између екстремних вредности осног растојања за један обртај зупчаника.

3.11 Испитивање зупчастих парова

Испитивање на контактну чврстоћу, гњечење и хабање зупчаника

Многи од фактора који утичу на контактну чврстоћу, гњечење и хабање зупчаника, имају подједнак значај на њих тако да настаје и сличност метода испитивања и самих уређаја за испитивање. Методе испитивања се разликују по режимима испитивања и критеријумима оцене губитака радне способности површина у контакту. Уређаји се разликују према сопственој опремљености, односно разноликости мерних апарата и прибора који су уграђени у саме уређаје за испитивање. Сви уређаји и методе за испитивање зупчастих преносника, са отвореним и затвореним колом снаге, могу се применити за испитивање на контактну чврстоћу, гњечење и хабање зупчастих и пужних преносника.

Испитивања на савојну чврстоћу и тврдоћу зупчаника

Циљ испитивања је оцена заморне, ударне, вишеструко ударне и статичке чврстоће и тврдоће зубаца. Ова испитивања омогућавају оцену утицаја врсте материјала, карактера термичке обраде као и ојачања површина на границу издржљивости и век трајања зупчаника. Такође дају и могућност одређивања утицаја конструктивних карактеристика на чврстоћу и век трајања зупчаника и откривање узрока превремених ломова. Испитивања на заморну чврстоћу се првенствено спроводе на специјалним уређајима пулзирајућег дејства и на пулзаторима и резонантним машинама опште намене, опремљеним специјалним уређајима и приборима. Ова испитивања имају предности које се састоје у погодности одвојене оцене утицајних фактора, могућности спровођења већег обима испитивања са малим бројем зупчаника, могућности испитивања зубаца са великим модулима и зубаца великих модула чији су зупчасти венци засебно израђени. Поред тога, ова испитивања се одликују простом организацијом и једноставним спровођењем испитивања. Резултати добијених испитивања на пулзаторима користе се као упоредни. У општем случају неопходна је корекција ових резултата на основу компарације са резултатима испитивања зупчастих преносника при обртању.

Испитивања издржљивости зубаца на савијање и додирни (Херцов) притисак при променљивим режимима оптерећења

Зупчасти преносници у механизмима и машинама, као по правилу, раде при променљивим режимима оптерећења. Испитивања издржљивости на савијање и контактни притисак зупчастих преносника при променљивим режимима оптерећења омогућавају проналажење резерви повећања носивости.

Анализа услова рада универзалних стругова, транспортних и других машина показује да режими оптерећења њихових зупчастих преносника зависе од великог броја случајних фактора и имају већи фактор вероватноће појаве оштећења.

Динамичка испитивања

Циљ ових испитивања је одређивање динамичких оптерећења у преносницима у зависности од брзине, грешака израде, чврстоће спрегнутих зупчаника, и одређивање фреквенције сопствених осцилација. Одређују се у циљу оцене учестаности динамичких процеса, најчешће за проверу преносника ради елиминисања резонанце. Испитивања се спровode на уређајима са затвореним колом оптерећења, на уређајима са неротирајућим зупчаницима, који симулирају вибрационе процесе, и на зупчастим преносницима машина у експлоатационим условима [3].

3.12 Монтажа

Један од последњих процеса у репарацији зупчаника је монтажа односно уградња репарисаног зупчаника (сл.14) у склоп и његово пуштање у експлоатацију.



Слика 14. Монтажа репарисаног зупчаника у редуктор и пуштање у експлоатацију

3.13 Уходавање

Након процеса монтаже репарисаног зупчаника следи процес његовог уходавања у процесу експлоатације.

4. Технологија репаратуре зупчаника хладним поступком

Зупчасти парови најчешће раде само са једним смером обртања. Код ових зупчастих парова оптерећење се преноси преко активних бокова зубаца, док други неактивни бокови не учествују у преношењу оптерећења. Када разарања и оштећења активних бокова зубаца достигну критичну вредност, што се рефлектује појавом загревања, вибрације и буке, тада се зупчасти пар или само зупчаник са оштећеним боковима зубаца замењује другим зупчастим паром или зупчаником. Ова замена се обавља упркос томе што су неактивни бокови зубаца неоштећени (нови). Ако су тела спрегнутих зупчаника симетрична, тада се њиховим заокретањем за 180° могу активирати, ангажовати у преношењу оптерећења, неоштећени бокови зубаца.

Заокретањем спрегнутих зупчаника за 180° смањена је новивост (чврстоћа) подножја зупца. Подножје зубаца је из једносмерно променљивог напонског стања доведено у наизменично променљиво стање. Овим новим напонским стањем, чврстоћа (носивост) подножја зупца је смањена (према препорукама) за 30%. Радни век зупчастог пара одређен је радним веком подножја зубаца. Зато, пре усвајања ове методе репаратуре бокова зубаца треба проверити радни век подножја зубаца.

Пре свега треба проверити да ли су зубци зупчаника димензионисани да раде у области трајне или временски ограничене динамичке чврстоће подножја зупца.

У колико су испуњени следећи услови:

$$S_{F1} = \frac{[\sigma_{F1}]}{\sigma_{F1}} \geq S_{Fmin} \quad (4.1)$$

$$S_{F2} = \frac{[\sigma_{F2}]}{\sigma_{F2}} \geq S_{Fmin} \quad (4.2)$$

где су:

$$S_{Fmin} = 1,25,$$

$$[\sigma_F] = \sigma_{Flim} \cdot Y_i$$

σ_{Flim} - трајна динамичка чврстоћа подножја зупца еталон зупчастог пара,

Y_i - фактори корекције,

σ_{F1}, σ_{F2} - радни напони у подножју зубаца погонског одн. гоњеног зупчаника, зупчасти пар ради у области трајне динамичке чврстоће подножја зубаца (неограничени радни век).

Након тога треба проверити да ли репарирани зупчасти пар (заокренут за 180°) може да ради бесконачно дуго са аспекта подножја зупца.

У колико су испуњени следећи услови:

$$S_{F1r} = 0,7 \cdot \frac{[\sigma_{F1}]}{\sigma_{F1}} \geq S_{Fmin} \quad (4.3)$$

$$S_{F2r} = 0,7 \cdot \frac{[\sigma_{F2}]}{\sigma_{F2}} \geq S_{Fmin} \quad (4.4)$$

где је $S_{Fmin} = 1,25$,

Репарирани зупчасти пар радиће бесконачно дуго са аспекта чврстоће подножја зупца. У супротном уколико овај услов није испуњен, репарирани зупчасти пар има ограничени радни век.

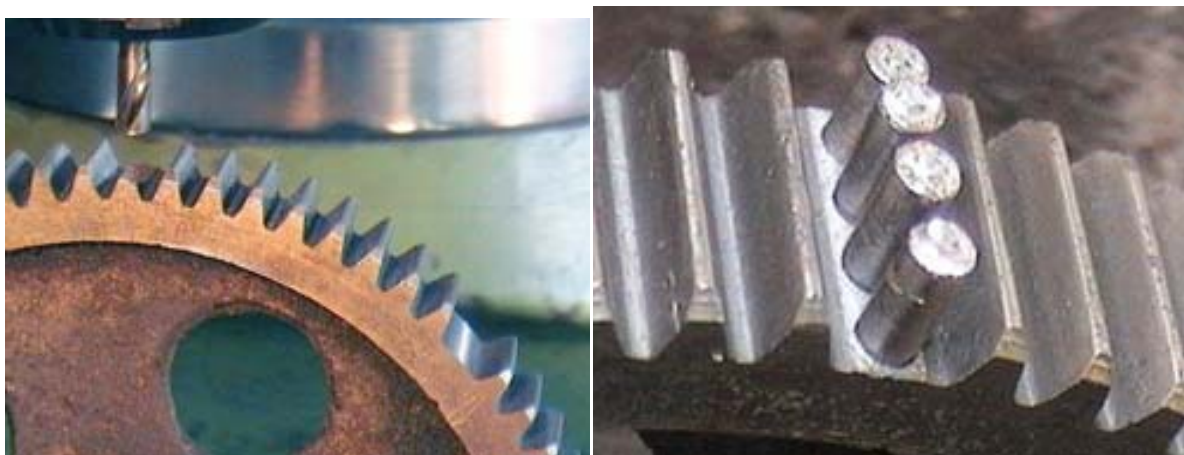
Одређивање радног века репарiranог зупчастог пара се изводи помоћу следећих образаца:

$$\sigma_{DF(-1)}^m N_D = \sigma_F^m \cdot N \quad (4.5)$$

$$N = N_D \left(\frac{\sigma_{DF(-1)}}{\sigma_F} \right)^m = N_D \left(\frac{0,76 \cdot \sigma_{DF(0)}}{\sigma_F} \right)^m \quad (4.6)$$

$$n = \frac{N}{1,25} \quad (4.7)$$

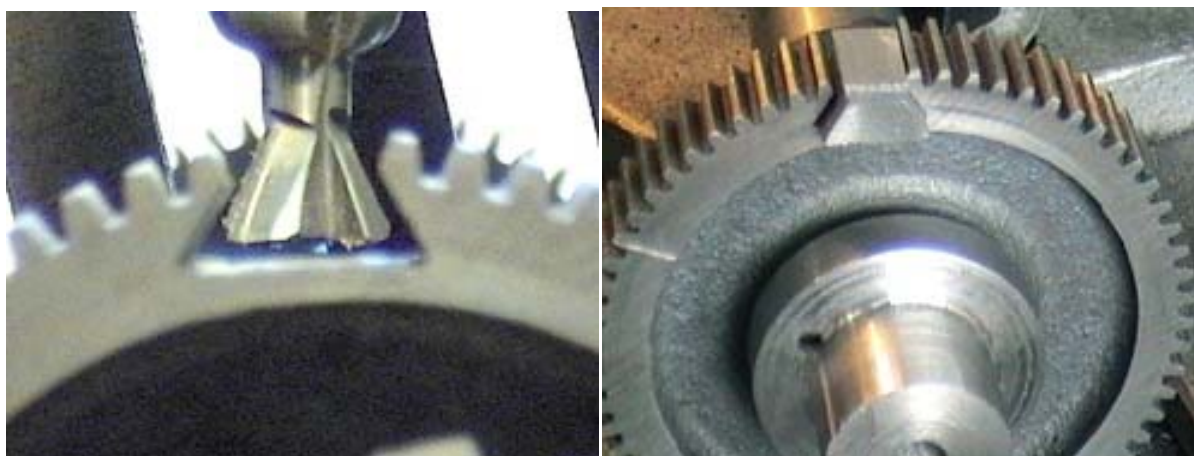
Зупчаници спороходних преносника регенеришу се углавном хладним методама помоћу завртњева или уметака. Регенерација применом завртњева (сл.15) могућа је при лому појениних зубаца, али не више од 2 узастопна, код зупчаника великих модула. Деформисани зубац се одсече или одруби до основе. Затим се у телу зупчаника, на очишћеним површинама, пробуши неколико рупа, по целој ширини венца, пречника $0,5 \div 0,8$ од дебљине зупца. Број рупа зависи од ширине венца. У те рупе урезају се навој, а у њега се уврћу челични завртњи (шипови), који имају пречник једнак дебљини зупца. Завртњи се заваре у основи и профил зупца се обрађује на глодалици или се турпија ручно (према шаблону).



Слика 15. Регенерација применом завртњева (шипова)

Једна од савршенијих варијанти хладне методе регенерације зубаца зупчаника састоји се у следећем поступку. Очишћено место сломљеног зупца се отпушта. Суседни зупци, ради избегавања оштећења при отпуштању, премазују се смешом састава: 50% ватроотпорна глина, 45% иситњени (меки) азбест и 5% водено стакло. После отпуштања заштитна смеша (премаз) се удаљује. На месту где је био зубац изводи се жлеб у облику ластиног репа дубине $1/4 \div 1/3$ висине зупца. У тај жлеб се са стране ставља зубац, или уметак, раније припремљен, који се учвршћује навојним спојем, завртњем са упуштеном главом, или се са чела осигура електролучним заваривањем. Затим се, уколико је потребно, врши обрада на тачан облик репа.

Уколико бушење отвора за завртње, или урезивање „ластиног репа“ (сл.16), слаби пресек венца зупчаника, препоручује се регенерација зупчаника применом додатка. За постављање додатка са чела венца се праве жлебове дубине $0,4 \div 1,0$ модула. Ширина жлеба бира се на тај начин да додатак захвата са сваке стране по један неоштећени зубац. Додатак се поставља у жлебове и учвршћује завртњевима. Крајеви додатка се учвршћују завртњима, који се постављају испод венца зупчаника. Да би се ограничило савијање крајева додатка, на завртњеве се постављају дистантне чауре. После подешавања додатка зупци се обрађују на обичним универзалним глодалицама.



Слика 16. Операција урезивања „ластиног репа“

При хабању (питингу) или лому неколико узастопних зубаца, репарација челичних зупчаника се врши постављањем уметака са одговарајућим бројем зубаца. После одрубљивања или одсецања оштећених зубаца, у венац се укопа жлеб дубине $1/4 \div 1/2$ висине зупца, у облику ластиног репа. Затим се у њега постави уметак, израђен од челика истог као и зупчаник. Уметак се учвршћује на венцу, с бока, завртњима или електролучним заваривањем. При великој дужини уметак се учвршћује с чела завртњима. Пре почетка регенерације венац зупчаника, на месту укопавања жлеба, треба отпустити. Места која не подлежу отпуштању треба прекрити премазом.

Нумерички пример хладне репаратуре

На зупцима малог зупчаника зупчастог пара за погон транспортних колица појавила су се површинска оштећења $\delta = 1\text{ mm}$. Тело зупчаника је симетрично и зупчаник ради у једном смеру обртања. Проверити могућност репаратуре зупчаника поступком заокретања зупчаника за 180° .

Подаци су:

$b = 70\text{ mm}$, $\frac{z_1}{z_2} = \frac{23}{92}$, $m = 4\text{ mm}$, $x_1 = x_2 = 0$, $\beta = 10^\circ$, $N_D = 3 \cdot 10^6$, $F_t = 17000\text{ N}$.
материјал зупчаника је Č 4130 (34Cr4).

Прорачун:

Стандардни модул

$$m_n = m = 4\text{ mm}$$

Стандардни профил

$$\alpha_p = 20^\circ, u_p = 1, c_p = 0,25 \cdot m_n = 1\text{ mm}$$

$$h_{fp} = m_n + c_p = 4 + 1 = 5\text{ mm}$$

$$h_{ap} = m_n = 4\text{ mm}$$

$$h = h_{fp} + h_{ap} = 9\text{ mm}$$

Угао нагиба бочне линије

$$\beta = 10^\circ$$

Угао нагиба профила алата

$$\tan \alpha_t = \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} = \frac{\tan 20^\circ}{\cos 10^\circ} = 0,369$$

$$\alpha_t = 20,28^\circ$$

$$\alpha_n = 20^\circ$$

Модул

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta} = \frac{4}{\cos 10^\circ} = 4,061\text{ mm}$$

Бројеви зубаца зупчаника

$$z_1 = 23$$

$$z_2 = 92$$

Кинематски преносни однос

$$u = z_2 / z_1 = 4$$

Корак на подеоном кругу

$$p_t = m_t \cdot \pi = 4,061 \cdot \pi = 12,758 mm$$

Корак на основном кругу

$$p_{bt} = p_t \cdot \cos \alpha_t = 12,758 \cdot \cos 20,28^\circ = 11,967 mm$$

Пречници подеоних кругова

$$d_1 = m_t \cdot z_1 = 4,061 \cdot 23 = 93,403 mm$$

$$d_2 = m_t \cdot z_2 = 4,061 \cdot 92 = 373,612 mm$$

Ширина зупчаника

$$b = 70 mm$$

Пречници основних кругова

$$d_{b1} = d_1 \cdot \cos \alpha_t = 93,403 \cdot \cos 20,28^\circ = 87,613 mm$$

$$d_{b2} = d_2 \cdot \cos \alpha_t = 373,612 \cdot \cos 20,28^\circ = 350,452 mm$$

Угао нагиба зупца на основном кругу

$$\sin \beta_b = \sin \beta \cdot \cos \alpha_n = 0,163$$

$$\beta_b = 9,374^\circ$$

Нулто осно растојање

$$a_d = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{93,403 + 373,612}{2} = 233,507 mm$$

Коефицијенти померања профила

$$x_1 = 0$$

$$x_2 = 0$$

Померање профила

$$v_1 = x_1 \cdot m_n = 0$$

$$v_2 = x_2 \cdot m_n = 0$$

Угао додирнице

$$\alpha_{wt} = \alpha_t = 20,28^\circ$$

Осно растојање

$$a = a_d = 233,507mm$$

Пречници подеоних кругова

$$d_{w1} = d_1 = 93,403mm$$

$$d_{w2} = d_2 = 373,612mm$$

Пречници подножних кругова

$$d_{f1} = d_1 - 2 \cdot h_{fp} + 2 \cdot x_1 \cdot m_n = 83,403mm$$

$$d_{f2} = d_2 - 2 \cdot h_{fp} + 2 \cdot x_2 \cdot m_n = 363,612mm$$

Пречници темених кругова ($c = c_p = 1$)

$$d_{a1} = 2 \cdot a - d_{f2} - 2 \cdot c = 101,402mm$$

$$d_{a2} = 2 \cdot a - d_{f1} - 2 \cdot c = 381,611mm$$

Лучна дебљина зупца на подеоном кругу

$$s_{t1} = m_t \cdot \left(\frac{\pi}{2} + 2 \cdot x_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_n \right) = 6,379mm$$

$$s_{t2} = m_t \cdot \left(\frac{\pi}{2} + 2 \cdot x_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_n \right) = 6,379mm$$

Лучна ширина међузубља

$$e_{t1} = p_t - s_{t1} = 6,379mm$$

$$e_{t2} = p_t - s_{t2} = 6,379mm$$

Парцијалне дужине додирнице

$$g_a = \frac{1}{2} \sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} - \frac{d_{w1}}{2} \cdot \sin \alpha_{wt} = 9,339mm$$

$$g_f = \frac{1}{2} \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} - \frac{d_{w2}}{2} \cdot \sin \alpha_{wt} = 10,766mm$$

Дужина активног дела додирнице

$$g_a = g_a + g_f = 20,105 \text{ mm}$$

Парцијални степени спрезања

$$\varepsilon_a = \frac{g_a}{p_{bt}} = 0,780$$

$$\varepsilon_f = \frac{g_f}{p_{bt}} = 0,900$$

Степен спрезања профила

$$\varepsilon_\alpha = \varepsilon_a + \varepsilon_f = 1,68$$

Степен спрезања бочних линија

$$\varepsilon_\beta = b \cdot \frac{\tan \beta}{p_t} = 0,967$$

Степен спрезања бокова

$$\varepsilon_\gamma = \varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta = 2,647$$

Радни напон у подножју зубаца

$$\sigma_F = Y_{Fa} \cdot Y_{Sa} \cdot Y_\varepsilon \cdot Y_\beta \cdot \frac{F_t}{b \cdot m} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta}$$

$$Y_{Fa} = 2,792 ; Y_{Sa} = 1,636 ; Y_\varepsilon = 0,696 ; Y_\beta = 1 - \varepsilon_\beta \cdot \frac{\beta}{120^\circ} = 1 - 0,967 \cdot \frac{10}{120} = 0,919$$

$$K_A = 1,25 ; K_V = 1,802 ; K_{F\alpha} = 1,2 ; K_{F\beta} = 1,302$$

$$\sigma_F = 2,792 \cdot 1,636 \cdot 0,696 \cdot 0,919 \cdot \frac{17000}{70 \cdot 4} \cdot 1,25 \cdot 1,802 \cdot 1,2 \cdot 1,302 = 624,268 \text{ N/mm}^2$$

Критични напон подножја зупца

$$[\sigma_F] = \sigma_{Flim} \cdot Y_{NT} \cdot Y_{ST} \cdot Y_{\delta relT} \cdot Y_{RrelT} \cdot Y_X$$

$$\sigma_{Flim} = 450 \text{ N/mm}^2$$

$$Y_{NT} = 1$$

$$Y_{ST} = 2$$

$$Y_{\delta relT} = 1$$

$$Y_{RrelT} = 1,05$$

$$Y_X = 1$$

$$[\sigma_F] = 450 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1,05 \cdot 1 = 945 \text{ N/mm}^2$$

Степен сигурности подножја зупца

$$S_F = \frac{[\sigma_F]}{\sigma_F} = \frac{945}{624,268} = 1,514$$

Коментар: Зупчаник ради у области трајне динамичке чврстоће.

Прорачун степена сигурности репарираног зупчаника

$$S_{Fr} = \frac{0,7 \cdot 945}{624,268} = 1,06$$

Коментар: Радни век износи $N = N_D = 3 \cdot 10^6$ циклуса, зато што је $1 < S < 1,25$.

5. Технологија репаратуре зупчаника топлим поступком

Најсавременији начин репарације оштећених зубаца зупчаника (сл.17) јесте наваривањем. Репарација димензија похабаних зубаца челичних зупчаника врши се наваривањем. Наваривање може бити електролучно, ручно или полуаутоматско, или гасно, помоћу окси-ацетиленског пламена.



Слика 17. Изглед оштећеног зупчаника

Површина за наваривање се претходно припреми чишћењем челичном четком до металног сјаја. Под припремом зубаца за наваривање се, поред чишћења од масноће, оксида и антикорозивних премаза, подразумева и уклањање напрелина и оштећених делова зубаца, као и потенцијалних извора концентрације напона (оштрих ивица). У овој фази се одстрањује и отврднути (цементирани) слој радних површина зубаца. Ови припремни радови се изводе механичким путем, најчешће брушењем. На (сл.18) приказан је изглед зупчаника након операције чишћења и брушења.



Слика 18. Изглед зупчаника након чишћења и брушења

Да би се избегло бацање зупчаника, наваривање зубаца се не врши узастопно (један за другим), већ сваки 5÷10 зубаца. Ради избегавања бацања, зупчаник се потапа у воду тако да непотопљено остане само место које се наварује. Оно се прекрије азбестном траком са прорезом за наваривање. Поред тога могуће је предгревање зупчаника до 200÷260°C. Предгревање (сл.19) се врши да би се смањила прокаљивост основног материјала и навара, да би се смањили напони услед наваривања и деформације зубаца и зупчаника, да би се спречио настанак гасних мехурова и појава напрслина у навару и зони под утицајем топлоте, као и да би се повећала способност везивања основног материјала и нанетог слоја.



Слика 19. Предгревање зупчаника

Основни захтеви при извођењу поступка наваривања (сл.20) су да се топлота уноси што равномерније (ради избегавања локалних термичких напрезања) и да се наваривање врши од делова већих дебљина ка мањим. Зупци велике дужине се наварују у смеру од замишљене симетрале ка крајевима и од основе корена зупца ка глави. Смер наваривања мора бити управан на правац клизања ради повећања отпорности навареног слоја на хабање.



Слика 20. Поступак наваривања

После наваривања зупчаник се отпушта, ради уклањања напона насталих услед наваривања, под условом да се не захтева висока тврдоћа радних површина зубаца. Затим се врши механичка и термичка обрада. Механичка обрада се врши на глодалицама или рендисаљкама за израду зупчаника (сл.21 и 22). У неким случајевима, када се не захтева велика тачност, могућа је ручна обрада зубаца турпијањем или ручним електричним брусилицама.



Слика 21. Механичка обрада глодалицом



Слика 22. Усецање зубаца зупчаника

На (сл.23) је приказан поступак механичког озубљења зупчаника.



Слика 23. Озубљење зупчаника

Код зупчаника са малим модулом наваривање посебних зубаца замењује се потпуним наваривањем зупчастог венца, које се врши по целом његовом обиму. Затим се на њему нарезују зупци.

При репарацији зупчаника великих модула пожељно је наварити зупце помоћу шаблона, израђеног од бакра или месинга. Шаблон са регенерисаним зупцем образује затворену запремину која се попуњава растопљеним металом. Да би се задржао корак између зубаца, шаблон мора имати ослањање на суседни зубац.

На (сл.24) је приказан изглед финалног производа (зупчаника) након свих механичких и термичких обрада.



Слика 24. Изглед зупчаника након свих механичких и термичких обрада

6. Закључак

Имајући у виду да је заступљеност зупчаника у машинској индустрији огромна могло би се претпоставити колики би се губици јавили одбацавањем оштећених зупчаника, који се могу вратити у експлоатацију применом различитих поступака репаратуре, па чак и имати боље радне карактеристике од нових зупчаника.

Досадашња истраживања у области регенерације зупчаника показала су да је репаратурно наваривање оштећених радних површина најпоузданија метода обнављања облика, димензија и радних карактеристика зубаца зупчаника. При регенерацији зупчастих парова могућ је топао и хладан технолошки поступак репаратуре. За правилан избор адекватне методе репаратурног наваривања неопходно је познавати механизме хабања површина у контакту. Сама регенерација зупчаника наваривањем је комплексан процес састављен од већег броја технолошких операција, чији редослед извођења је веома битан и тачно утврђен.

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. На примерима репаратуре похабаних зупчаника показано је да је поступак наваривања поуздан и економски оправдан.

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. Применом правилно одабраног поступка репаратурног наваривања могуће је добити регенерисани зупчаник са бољим радним карактеристикама (дужим радним веком) од новоизрађеног, уз знатне материјалне уштеде.

Литература

- [1] Николић, В., *Машински елементи*, Крагујевац, 2004.
- [2] Милтеновић, В., Огњановић, М., *Облици разарања зубаца зупчаника*, Зупчаници, Београд, 1991.
- [3] Марковић, С., Јосифовић, Д., *Регенерација зупчаника*, Монографија, Крагујевац, 1998.
- [4] Масларевић, А., *Репаратура зупчастих парова*, Београд, 2009.
- [5] Марковић, С., *Оцена квалитета зупчаника после репаратуре електролучним наваривањем*, Заваривање и заварене конструкције, Бр.2, 2000., стр.69-74.
- [6] Марковић, С., *Компаративне карактеристике репаратурно наварених зубаца зупчаника*, ИМК-14 Истраживање и развој, Бр. 24-25, 2006., стр. 25-34.