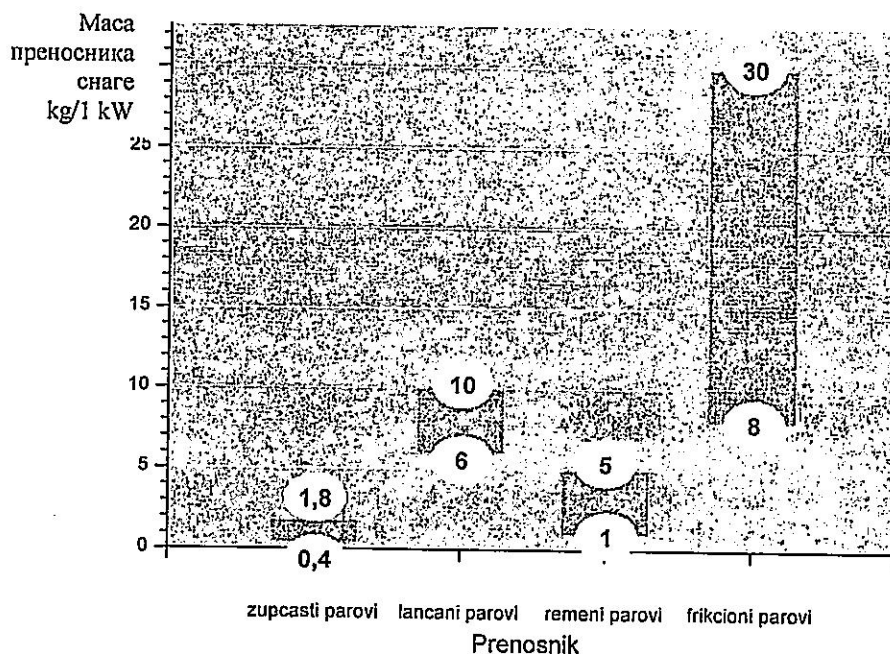
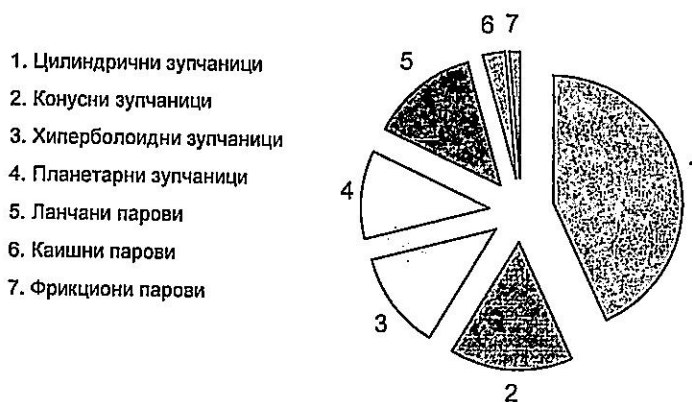


## 1. РЕПАРАТУРА ЗУПЧАСТИХ ПАРОВА

Зупчаник самостално не може обављати ни једну елементарну функцију у машинском систему. Спојен – спрегнут са једним или више зупчаника у зупчасте парове, добијају се машински елементи који обављају елементарну функцију преноса и трансформације снаге. Ову елементарну функцију зупчasti парови обављају сигурно, поуздано и са економског аспекта веома прихватљиво. У поређењу са другим конкурентним машинским елементима, који обављају ису елементарну функцију (фрикциони, каишни и ланчани парови), зупчasti парови имају најећи домен примене.



Маса преносника снаге за преношење 1 kW за различите врсте механичких преносника



Степен заступљености механичких преносника снаге

## 2. РАЗАРАЊА И ОПШЕЋЕЊА ПОДНОЖЈА И БОКОВА ЗУБАЦА

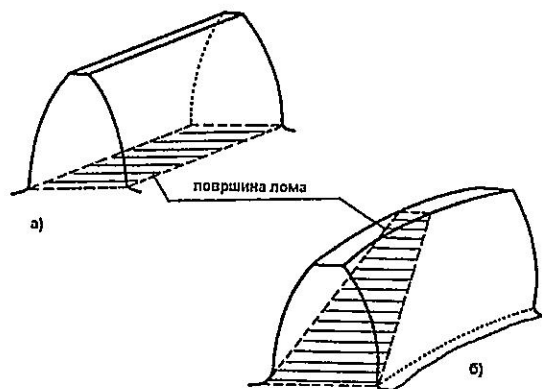
Носивост зупчастих преносника ограничена је запреминским и површинским разарањем зубаца. Запреминско разарање манифестује се ломом зубаца, док се површинско разарање манифестује хабањем и површинским разарањем услед замора - питинга.

**Лом зубаца** може бити насилан - статички или заморан - постепен. **Статички лом** настаје услед изненадних великих ударних оптерећења, која се прорачуном не могу обухватити, а настају услед упадања страног предмета или делова поломљених врхова зубаца у спрегу зубаца, као и смањења димензија подножја зубаца услед површинског разарања, престанка обртања зупчаника због неког другог машинског дела а такође и услед повећања оптерећења при наглом удару. Поред насилног лома зупца као целине, може доћи и до насилног лома врхова зубаца, услед нерав номерне расподеле оптерећења дуж тренутне линије додира.

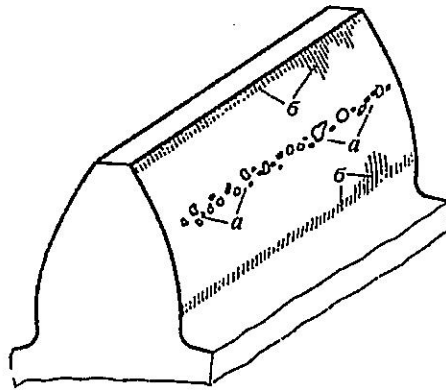
**Заморни лом** настаје под дејством периодично променљивог оптерећења, послешеног утицајем концентрације напона услед појаве зареза после машинске обраде зубаца и/или услед јамица које се јављају на боковима зубаца под дејством великих површинских притисака и/или услед грешке у материјалу. Положај површине лома зупца у односу на бок зупца приказан је на слици 2.41а - код цилиндричних зупчаника с правим зупцима, и на слици 2.41б код цилиндричних зупчаника с косим зупцима.

**Хабање бокова** зубаца последица је додира бокова спрегнутих зубаца који клижу један по другоме. Ово хабање може бити: брусно, клизно и хабање са заједањем - скоринг.

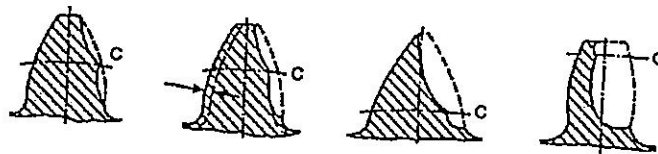
**Брусно хабање** настаје због ситних честица метала преосталих после брушења зубаца на радним деловима бокова зубаца или нанесених на њих путем мазива. Приликом овог хабања настају огреботине у правцу клизања бокова зубаца, слика 2.426. Огреботине су најдубље на врху и у подножју зупца а најплиће су на кинематској линији, линија с-с.



Слика 2.41. - Облици површине сломљених зубаца



Слика 2.42. - Брусно хабање бокова зубаца (б) и разарање услед замора (а)



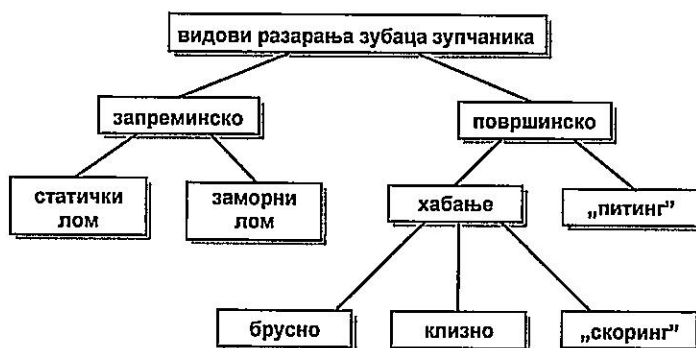
Слика 2.43.а - Облици клизног хабања бокова зубаца

**Клизно хабање** на боковима зубаца последица је силе трења која се увек јавља код спреге зубаца. Услед тога долази до истрошености бокова зубаца, слика 2.43а. Интензитет и облик овог хабања зависе од интензитета додирног притиска, брзине клизање, дебљине уљног филма и положаја кинематског пола (с). Велики додирни притисак и прекид уљног филма (суво трење) толико појачавају интензитет клизног хабања да долази до разарања, хабања са заједањем - скоринг.

**Хабање са заједањем** настаје услед великог површинског притисака, брзине клизања и губитка уљног слоја. У оваквим условима рада, губитком уљног филма јавља се суво трење а самим тим и силе трења великог интензитета, које изазивају нагло повећање температуре, локално загревање и заваривање делова спрегнутих бокова зубаца, те настаје заједање - кидање делова материјала с бокова зубаца. Поред овога, велике силе трења изазивају тангентне напоне у површинским слојевима бокова зубаца, који доводе до померања слојева материјала, и то код погонског зупчаника од кинематске површине ка темену и подножју зубаца, стварајући при томе жлеб на месту где се бок зупца сече с кинематском површином. Код зубаца гоњеног зупчаника на месту где је пресек бока зупца и кинематске површине образује се гребен. Он се образује услед слојевитог померања материјала од подножја и врха зупца ка кинематској површини. При том, ако се појаве тангентни напони чији је интензитет изнад границе издржљивости материјала (на кидање), може доћи и до одвајања честица материјала с површине бокова зубаца.

**Површинско разарање услед замора - питинг**, последица је великих контактних притисака, присуства мазива на боковима зубаца, котрљања и клизања додирних површина, а манифестује се појавом малих јамица - рупица на активним површинама бокова зубаца. Ако се појаве јамице на активним површинама бокова зубаца, повећава се концентрација оптерећења на неоштећеним деловима бокова зубаца. При томе, повећава се интензитет овог разарања и истовремено стварају услови за развој других напред наведених видова разарања бокова зубаца.

Преглед најчешћих<sup>1</sup> видова разарања и оштећења зубаца зупчаника приказан је на слици 2.43(б). На основу овог прегледа, може се констатовати, да су зупци зупчаника у поређењу с другим машинским елементима изложени великом броју различитих видова разарања.

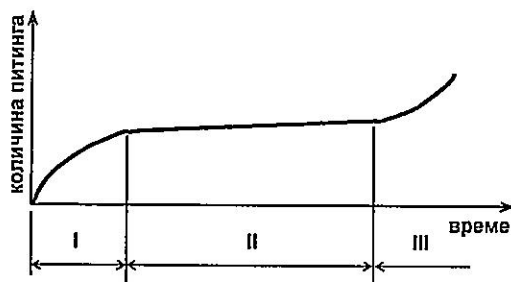


Слика 2.43(б) - Преглед најчешћих<sup>2</sup> видова разарања и оштећења зубаца зупчаника

На почетку радног века активне површине спрегнутих бокова зубаца међусобно се додирују својим релативно многобројним макроповршинама.

На ове макроповршине делује изузетно велико оптерећење. Зато се у почетку рада у периоду разрађивања, за веома кратко време формира релативно велика количина **питинга** на активним површинама бокова зубаца, слика 2.44, област I, тзв. ограничени (почетни) **питинг**.

Исчезавањем појединих врхова неравнина услед локалних пластичних деформација, долази до стабилизације питинга (област II на слици 2.44). Промена експлоатационих режима рада, односно услед повећања оптерећења на неоштећеним деловима бокова зубаца јавља се прогресивно разарање бокова зубаца, (област III на слици 2.44).



Слика 2.44. - Фазе у развоју питинга

Пракса је показала, а експериментално је потврђено, да се површинско разарање услед замарања, односно питинга јавља како на неотврднутим боковима зубаца зупчаника тако и на отврднутим - оним који су термички обрађени, који раде у затвореном простору и који се подмазују уљем. При томе, код меких - неотврднутих бокова зубаца, формиране рупице - јамице услед пластичних деформација временом исчезавају. Зупчasti парови који раде на отвореном простору (зупчasti парови пољопривредних, грађевинских и рударских машина) где има нечистоћа, нису изложени површинском разарању при замарању. Наиме, активне

<sup>1</sup> према ISO извршена је класификација великог броја оштећења и разарања бокова и подножја зубаца

<sup>2</sup> према ISO извршена је класификација великог броја оштећења и разарања бокова и подножја зубаца

површине бокова зубаца страдају услед абразивног дејства нечистоћа пре него што се на њима појаве први знаци замора материјала. Такође, ако нису стављена средства за подмазивање - уља, начин разарања бокова зубаца при замарању се мења. Напрслине на активним површинама бокова зубаца не постају праве јамице, пошто се површински слојеви разарају, односно дробе пре него што се формирају јамице.

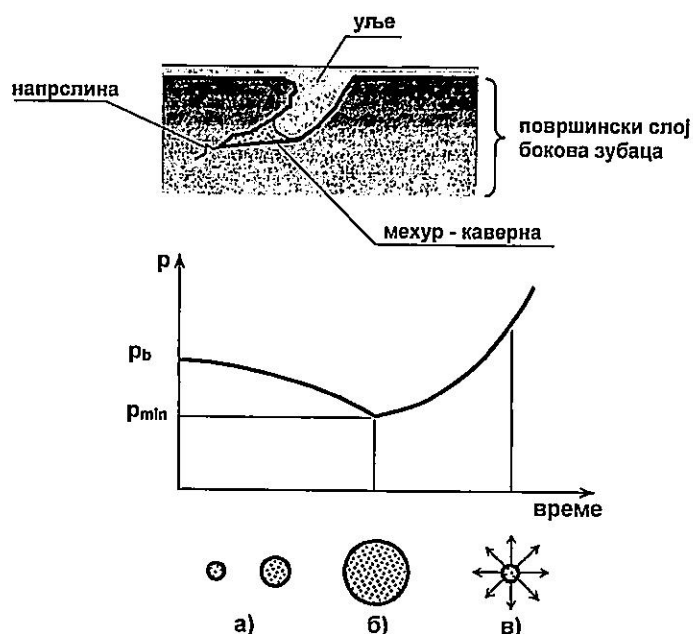
## УТИЦАЈ КАВИТАЦИЈЕ

Ако настану јамице на активним површинама бокова зубаца брзоходних зупчника, могу се ширити како под дејством периодично променљивог оптерећења тако и услед кавитације (сл. 2.45г). Под кавитацијом се подразумева стварање мехура - каверни у маси флуида који струји површином тела. Каверне се јављају на глатким површинама, али су израженије на храпавим површинама а нарочито на површинама са удубљењима.

Кавитација је појава праћена шумом, вибрацијама, ерозијом материјала и губитком енергије. Јамице на боковима зубаца представљају право „легло“ за формирање мехура - каверни. У условима смањеног притиска у насталим јамицама могу се формирати мехурићи испуњени паром или мешавином паре и гаса, слика 2.45г и 2.45а. Ови мехурићи представљају језгро кавитације. Ако притисак одговара температури испаравања средства за подмазивање - уља, с површине формираног мехура течност испарава, те се мехур све више и више повећава, слика 2.45б. У зони повећаног притиска, услед кондезације паре кавитациони мехур ишчежава, слика 2.45в. У тренутку ишчежавања мехура јављају се енергетски импулси који разорно делују на површину тела изазивајући кавитациону ерозију.

Ово разорно дејство последица је наглог пораста притиска. Импулси притиска делују на веома малу површину, услед чега настају веома велики притисци, које ниједан материјал дуже време не може да издржи. У почетку се јављају еластичне деформације у површинском слоју зида. Временом се мења структура а, потом се, због развијеног процеса ерозије, губи и маса материјала, слика 2.45г.

На процес ерозије утиче много фактора а нарочито: врста материјала, стање површине, тврдоћа бокова зубаца,



Слика 2.45. - Настајање парних мехурића и њихово ишчежавање

врста средстава за подмазивање и примесе у њему. Утицај кавитације на површинско разарање бокова зубаца је у почетној фази истраживања.

### 3. РЕПАРАТУРА ПОВРШИНСКИХ ОШТЕЋЕЊА ЗУБАЦА

*Метода ангажовања неактивних бокова зубаца  
заокретањем зупчаника зупчастог пара за 180°*

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 смањена је (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.

Прво треба проверити да ли су <sup>II</sup>зубци зупчаника димензионисани да раде у области трајне или временски ограничене динамичке чврстоће подножја зупца.

Ако су испуњени следећи услови

$$S_{F1} = \frac{\sigma_{DF1M}}{\sigma_{F1}} \geq S_{Fmin} \quad S_{F2} = \frac{\sigma_{DF2M}}{\sigma_{F2}} \geq S_{Fmin}$$

Где су:

$$S_{min} = 1,25 \quad \sigma_{DFM} = \sigma_{DF} \cdot Y_i$$

$\sigma_{DF}$  – Трајна динамичка чврстоћа подножја зупца еталон зупчастог пара

$Y_i$  – фактори корекције

Зупчасти пар је радио у области трајне динамичке чврстоће подножја зубаца (неограничени радни век).

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

Ако су испуњени следећи услови:

$$S_{F1} = 0,7 \frac{\sigma_{DF1}}{\sigma_{F1}} \geq S_{Fmin} \quad S_{F2} = 0,7 \frac{\sigma_{DF2}}{\sigma_{F2}} \geq S_{Fmin}$$

где је  $S_{min} = 1,25$ .

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

### Одређивање радног века репарираног зупчастог пара

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

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

### Метода корекције профила спрегнутих зубаца

Ако спрегнути зупчаници раде са променљивим смером обртања или тела зупчаника нису симетрична, тада се метода заокретања спрегнутих зупчаника за  $180^\circ$  не може применити. Такође, ова метода се не може применити ако се прорачуном покаже да ће радни век репарираног зупчастог пара бити веома кратак. У том случају треба испитати могућност примене методе корекције профила зубаца.

Ова метода се заснива на скидању оштећеног површинског слоја са бокова зубаца поступком скидања струготине. Потребно померање алата (основне зупчасте летве) одређује се на основу измерене дубине површинског оштећења:

$$m \cdot x_k = m \cdot x - \frac{\delta}{\operatorname{tg} \alpha}$$

где су:

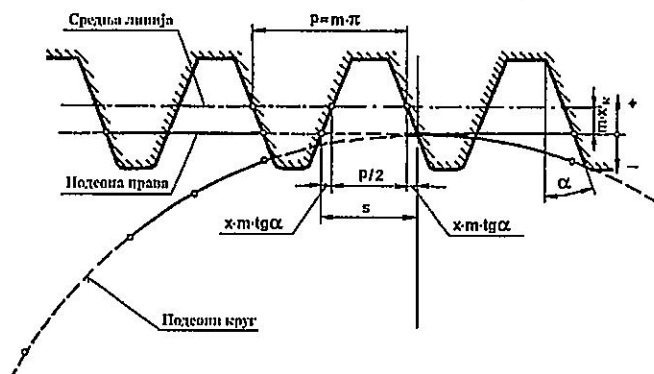
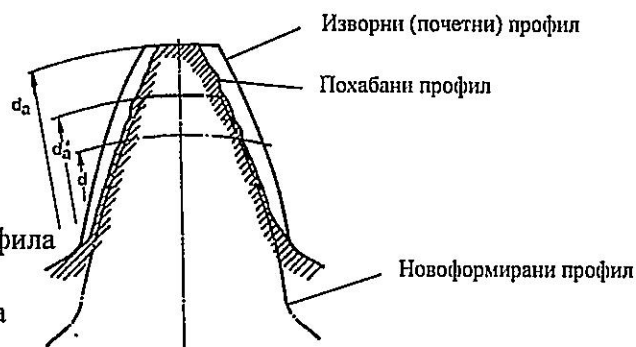
$m$  – модул зупчаника

$x$  – коефицијент померања изворног профила

$x_k$  – коефицијент померања новоформираног профила

$\alpha$  – угао нагиба профила алата

$\delta$  – дубина површинског оштећења бокова зубаца



Да би се са новоформираним профилима зубаца задржала првобитна (изворна) вредност бочног зазора, неопходно је кориговати првобитно (изворно) осно растојање.

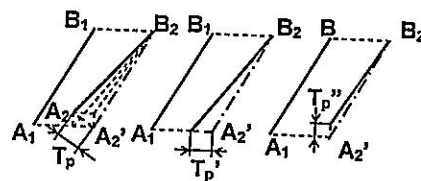
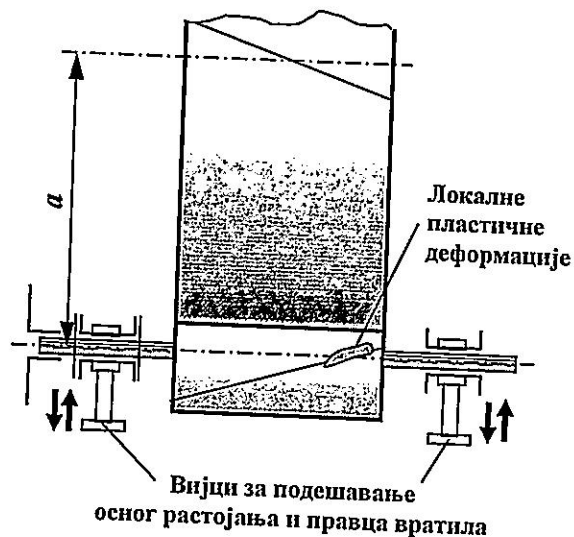
$$\Delta a = a \left( 1 - \frac{\cos \alpha_{1v}}{\cos \alpha_{wk}} \right)$$



где су:

$$\text{inv} \alpha_{\text{wk}} = 2 \cdot \frac{x_{1k} + x_{2k}}{z_1 + z_2} \text{tg} \alpha + \text{inv} \alpha,$$

## ANALIZA OŠTEĆENJA ZUPČASTOG PARA KUGLIČNOG MLINA



$$Z_1 \ll Z_2$$

### Метода уметка

Лом зубаца зупчаника код спороходних зупчастих парова се решава постављањем одговарајућег уметка на месту поломљеног зуба зупчаника. При томе, уметак може имати коначни облик зуба или неки други облик, који се накнадном машинском обрадом доводи у коначни облик зубаца.

Технолошки поступак репарације:

1. Отпуштање сломљеног места
2. Заштита суседних зубаца од топлотног утицаја (премазују се ватроотпорним материјалом)
3. Израда жлеба у облику ластиног репа или бушење рупе
4. Учвршћивање навојним спојем или неким другим постуком (заваривањем)
5. Завршна обрада

