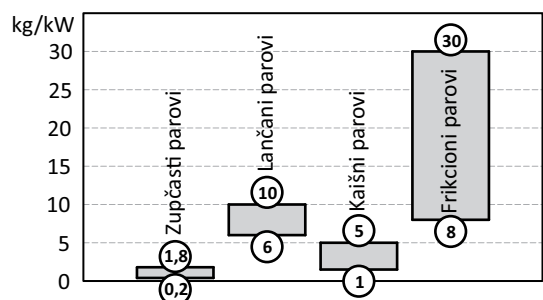
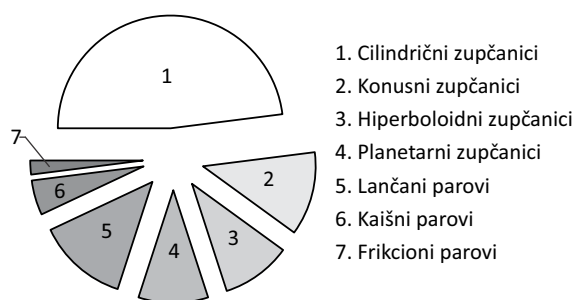


## Reparacija zupčastih parova

Zupčanik samostalno ne može obavljati ni jednu elementarnu funkciju u mašinskom sistemu. Spojen – spregnut sa jednim ili više zupčanika u zupčaste parove, dobijaju se mašinski elementi koji obavljaju elementarnu funkciju prenosa i transformacije snage. Ovu elementarnu funkciju zupčasti parovi obavljaju sigurno, pouzdano i sa ekonomskog aspekta veoma prihvatljivo, jer im je odnos mase i prenešene snage izuzetno nizak, Slika 1a. U poređenju sa drugim konkurentnim mašinskim elementima, koji obavljaju istu elementarnu funkciju (frikcioni, kaišni i lančani parovi), zupčasti parovi imaju naveći domen primene, Slika 1b. Među njima, najzastupljeniji su cilindrični zupčasti parovi.



Slika 1a Masa prenosioca snage za prenošenje 1 kW za različite vrste mehaničkih prenosioca

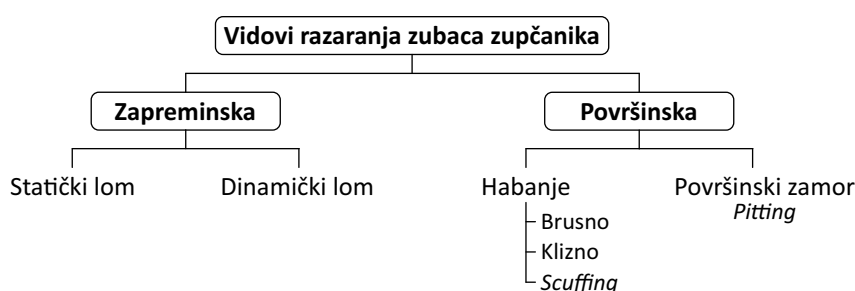


Slika 1b Stepen zastupljenosti mehaničkih prenosioca snage

## Razaranja i oštećenja podnožja i bokova zubaca

Nosivost zupčastih prenosioca ograničena je **zapreminskim** i **površinskim** razaranjem zubaca. Zapreminsko razaranje manifestuje se lomom zubaca, dok se površinsko razaranje manifestuje habanjem i površinskim razaranjem usled zamora - *pittinga*<sup>1</sup>.

Pregled najčešćih<sup>2</sup> vidova razaranja i oštećenja zubaca zupčanika prikazan je na Slici 2. Na osnovu ovog pregleda, može se konstatovati, da su zupci zupčanika u poređenju s drugim mašinskim elementima izloženi velikom broju različitih vidova razaranja i da rade u izuzetno rigoroznim uslovima brzine, opterećenja i temperature.



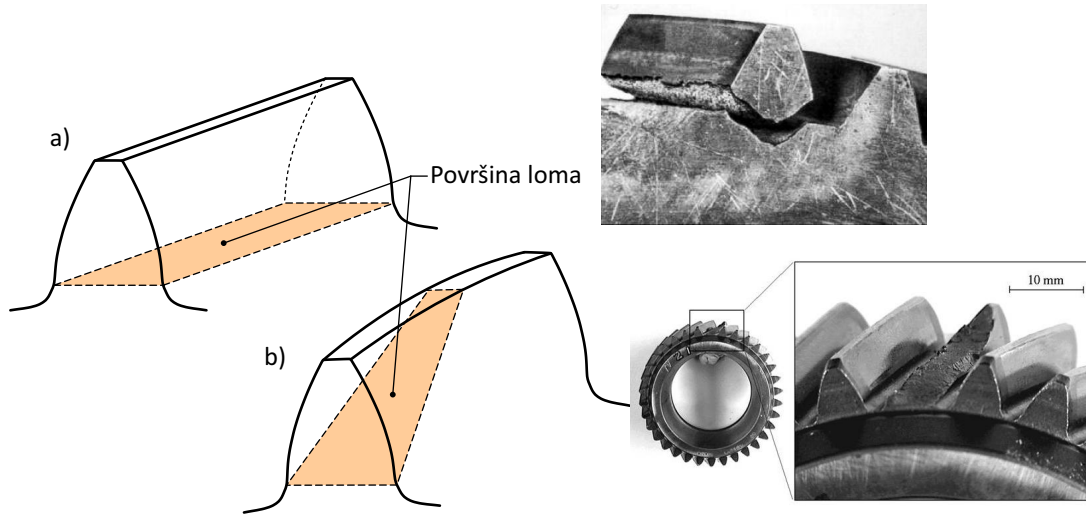
Slika 2 Pregled najčešćih vidova razaranja i oštećenja zubaca zupčanika

**Lom zubaca** može biti nasilan - statički ili zamoran - postepen, dinamički. **Statički lom** nastaje usled iznenadnih velikih udarnih opterećenja, koja se proračunom ne mogu obuhvatiti, a nastaju usled upadanja stranog predmeta ili delova polomljenih vrhova zubaca u spregu zubaca, kao i smanjenja dimenzija podnožja zubaca usled površinskog razaranja, prestanka obrtanja zupčanika zbog nekog drugog mašinskog dela ili zaglavlivanja, a takođe i usled povećanja opterećenja pri naglom udaru.

<sup>1</sup>Termin potiče od engleske reči *pit* što znači jama, jamica

<sup>2</sup>Prema ISO registrovano je preko 20 različitih vidova oštećenja i razaranja bokova i podnožja zubaca

Pored nasilnog loma zupca kao celine, može doći i do nasilnog loma vrhova zubaca (krzanje vrhova), usled neravnomerne raspodele opterećenja duž trenutne linije dodira.



Slika 3 Prelomne površine zapreminski razorenih zubaca

**Zamorni lom** nastaje pod dejstvom periodično promenljivog opterećenja, pospešenog uticajem koncentracije napona usled pojave zarezata posle mašinske obrade zubaca i/ili usled jamica koje se javljaju na bokovima zubaca pod dejstvom velikih površinskih pritisaka i/ili usled greške u materijalu. Položaj površine loma zupca u odnosu na bok zupca prikazan je na Slici 3a - kod cilindričnih zupčanika s pravim zupcima, i na Slici 3b kod cilindričnih zupčanika s kosim zupcima.

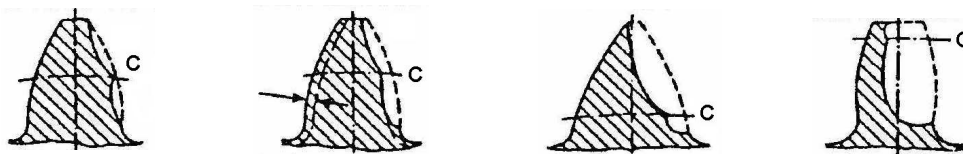
**Habanje bokova zubaca** posledica je dodira bokova spregnutih zubaca koji klizu jedan po drugome. Ovo habanje može biti: brusno, klizno i habanje sa zajedanjem - *scuffing*.

**Brusno habanje** nastaje zbog sitnih čestica metala preostalih posle brušenja zubaca na radnim delovima bokova zubaca ili nanesenih na njih putem maziva. Prilikom ovog habanja nastaju ogrebotine u pravcu klizanja bokova zubaca, Slika 4a. Ogrebotine su najdublje na vrhu i u podnožju zupca, a najpliće su na kinematskoj liniji, linija C-C.



Slika 4 a) Brusno habanje bokova zubaca b) razaranje usled površinskog zamora

**Klizno habanje** na bokovima zubaca posledica je sile trenja koja se uvek javlja kod sprege zubaca. Usled toga dolazi do istrošenosti bokova zubaca, Slika 5. Intenzitet i oblik ovog habanja zavise od intenziteta dodirnog pritiska, brzine klizanja, debljine uljnog filma i položaja kinematskog pola (C). Veliki dodirni pritisak i prekid uljnog filma (suvo trenje) toliko pojačavaju intenzitet kliznog habanja da dolazi do habanja sa zajedanjem - *scuffing*.



Slika 5 Oblici kliznog habanja bokova zubaca

**Habanje sa zajedanjem** nastaje usled velikog površinskog pritiska, brzine klizanja i gubitka uljnog filma. U ovakvim uslovima rada, gubitkom uljnog filma javlja se suvo trenje a samim tim i sile trenja velikog inteziteta, koje izazivaju naglo povećanje temperature, lokalno zagrevanje i zavarivanje delova spregnutih bokova zubaca, te nastaje zajedanje - kidanje delova materijala s bokova zubaca. Pored ovoga, velike sile trenja izazivaju tangentne napone u površinskim slojevima bokova zubaca, koji dovode do pomeranja slojeva materijala, i to kod pogonskog zupčanika od kinematske površine ka temenu i podnožju zubaca, stvarajući pri tome žleb na mestu gde se bok zupca seče s kinematskom površinom. Kod zubaca gonjenog zupčanika na mestu gde je presek boka zupca i kinematske površine obrazuje se greben. On se obrazuje usled slojevitog pomeranja materijala od podnožja i vrha zupca ka kinematskoj površini. Pri tom, ako se pojave tangentni naponi čiji je intezitet iznad granice izdržljivosti materijala (na kidanje), može doći i do odvajanja čestica materijala s površine bokova zubaca.

**Površinsko razaranje usled zamora - pitting**, posledica je velikih kontaktnih pritisaka, prisustva maziva na bokovima zubaca, kotrljanja i klizanja dodirnih površina, a manifestuje se pojavom malih jamica – rupica na aktivnim površinama bokova zubaca, Slika 4b. Ako se pojave jamice na aktivnim površinama bokova zubaca, lokalno se povećava i koncentracija opterećenja na neoštećenim delovima bokova zubaca. Pri tome, povećava se intenzitet ovog razaranja i istovremeno stvaraju uslovi za razvoj drugih napred navedenih vidova razaranja bokova zubaca.

Na početku radnog veka aktivne površine spregnutih bokova zubaca međusobno se dodiruju svojim relativno mnogobrojnim mikropovršinama. Na ove mikropovršine deluje izuzetno veliko lokalno opterećenje. Zato se u početku rada u periodu razrađivanja – uhodavanja, za veoma kratko vreme formira relativno velika količina pitinga na aktivnim površinama bokova zubaca, Slika 7, oblast I, tzv. ograničeni (početni, inicijalni) piting.



Slika 7 Faze u razvoju pitinga

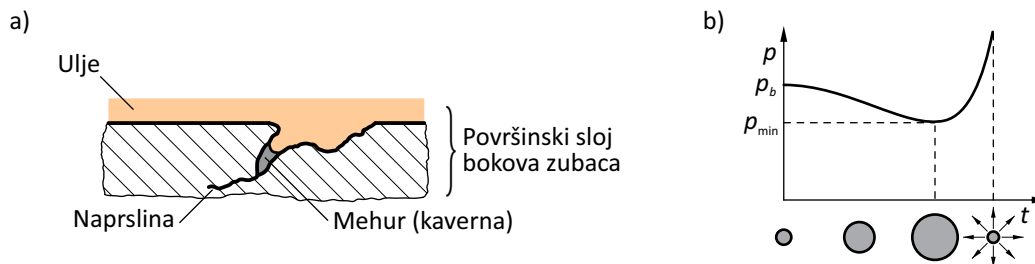
Praksa je pokazala, a eksperimentalno je potvrđeno, da se površinsko razaranje usled zamaranja, odnosno pitinga javlja kako na neotvrdnutim bokovima zubaca zupčanika tako i na otvrdnutim - onim koji su termički obrađeni, koji rade u zatvorenom prostoru i koji se podmazuju uljem. Pri tome, kod mekih - neotvrdnutih bokova zubaca, formirane rupice - jamice usled plastičnih deformacija vremenom isčezavaju. Zupčasti parovi koji rade na otvorenom prostoru (zupčasti parovi poljoprivrednih, građevinskih i rudarskih mašina) gde ima nečistoća, nisu izloženi površinskom razaranju pri zamaranju.

Naime, aktivne površine bokova zubaca stradaju usled abrazivnog dejstva nečistoća pre nego što se na njima pojave prvi znaci zamora materijala. Takođe, ako nisu stavljena sredstva za podmazivanje - ulje, način razaranja bokova zubaca pri zamaranju se menja. Naprsline na aktivnim površinama bokova zubaca ne postaju prave jamice, pošto se površinski slojevi razaraju, odnosno drobe pre nego što se formiraju jamice.

### Uticaj kavitacije

Ako nastanu jamice na aktivnim površinama bokova zubaca brzohodnih zupčanika, mogu se širiti kako pod dejstvom periodično promenljivog opterećenja tako i usled kavitacije (Slika 8). Pod kavitacijom se podrazumeva stvaranje mehurova - kaverni u masi fluida koji struji površinom tela. Kaverne se javljaju na glatkim površinama, ali su izraženije na hrapavim površinama a naročito na površinama sa udubljenjima.

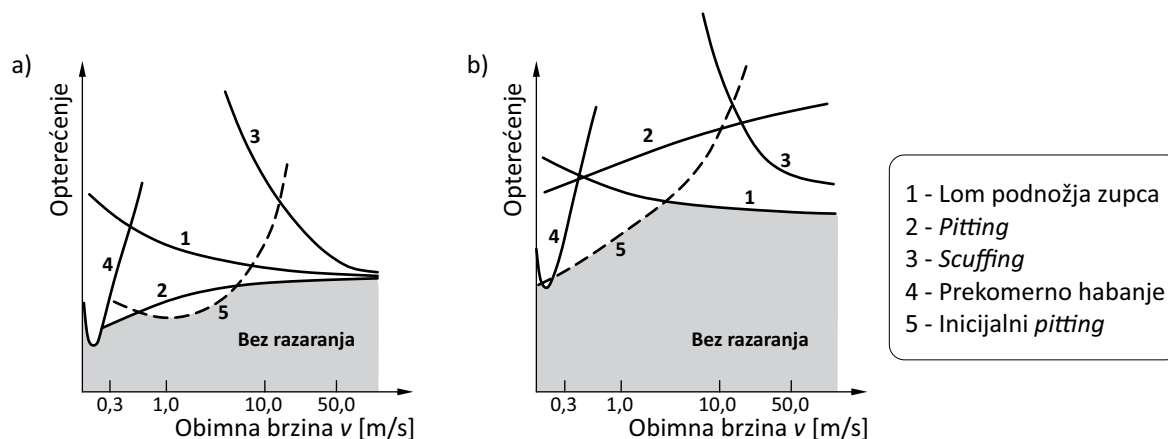
Kavitacija je pojava praćena šumom, vibracijama, erozijom materijala i gubitkom energije. Jamice na bokovima zubaca predstavljaju pravo „leglo“ za formiranje mehurova - kaverni. U uslovima smanjenog pritiska u nastalim jamicama mogu se formirati mehurići ispunjeni parom ili mešavinom pare i gasa, Slika 8a. Ovi mehurići predstavljaju jezgro kavitacije. Ako pritisak odgovara temperaturi isparavanja sredstva za podmazivanje - ulja, s površine formiranog mehura tečnost isparava, te se mehur sve više i više povećava, Slika 8b. U zoni povećanog pritiska, usled kondenzacije pare kavitacioni mehur iščezava, Slika 8b. U trenutku iščezavanja mehura javljaju se energetski impulsi koji razorno deluju na površinu tela izazivajući kavitacionu eroziju.



Slika 8 Nastajanje parnih mehurića i njihovo iščezavanje

Ovo razorno dejstvo posledica je naglog porasta pritiska. Impulsi pritiska deluju na veoma malu površinu, usled čega nastaju veliki pritisci, koje nijedan materijal duže vreme ne može da izdrži. U početku se javljaju elastične deformacije u površinskom sloju zida. Vremenom se menja struktura a potom se, zbog razvijenog procesa erozije, gubi i masa materijala. Na proces erozije utiče mnogo faktora a naročito: vrsta materijala, stanje površine, tvrdoća bokova zubaca, vrsta sredstva za podmazivanje i primese u njemu. Uticaj kavitacije na površinsko razaranje bokova zubaca je u početnoj fazi istraživanja.

Iz priloženog se zaključuje da zupčasti parovi rade u ekstremno rigoroznim uslovima rada. Na Slici 9 ilustrovane su granične krive glavnih oštećenja u zavisnosti od obimne brzine i opterećenja. Sa dijagrama je očigledno da površinski otvrdnuti zupčanici (Slika 9b) mogu da podnesu veća opterećenja od neotvrdnutih (Slika 9a). Takođe se može videti da je pitting dominantan vid oštećenja kod neotvrdnutih zupčanika, odnosno zamor (dinamički lom) podnožja zubaca kod otvrdnutih zupčanika. Habanje je ključno pri relativno malim brzinama i velikim opterećenjima, a *scuffing* pri izrazito visokim obimnim brzinama.



Slika 9 Granične krive najčešćih vidova razaranja: a) površinski neotvrdnutih zupčanika, b) površinski otvrdnutih zupčanika

## Reparacija površinskih oštećenja zubaca

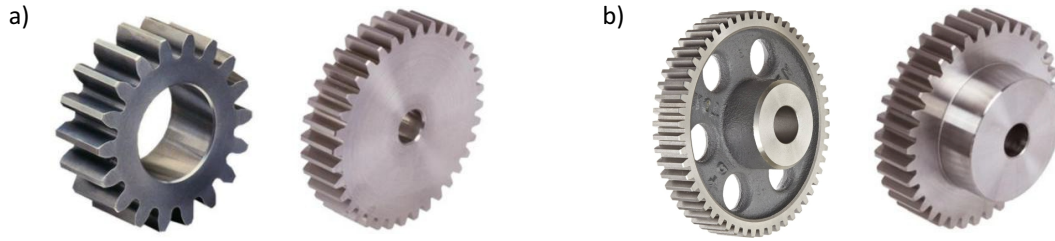
### Metoda angažovanja neaktivnih bokova zubaca zaokretanjem zupčanika zupčastog para za 180°

Zupčasti parovi najčešće rade samo sa jednim smerom obrtanja. Kod ovih zupčastih parova opterećenje se prenosi preko aktivnih bokova zubaca, dok drugi neaktivni bokovi ne učestvuju u prenošenju opterećenja. Na Slici 10 prikazan je jedan ekstreman slučaj površinskih oštećenja isključivo aktivnih bokova zubaca. Evolventni profil aktivnih bokova zubaca je potpuno izgubljen, a pohabana je značajna količina materijala. Neaktivni bokovi sačuvali su svoj polazni oblik i geometriju. Kada razaranja i oštećenja aktivnih bokova zubaca dostignu kritičnu vrednost, što se reflektuje pojavom zagrevanja, vibracije i buke, tada se zupčasti par ili samo zupčanik sa oštećenim bokovima zubaca zamenjuje drugim zupčastim parom ili zupčanikom.



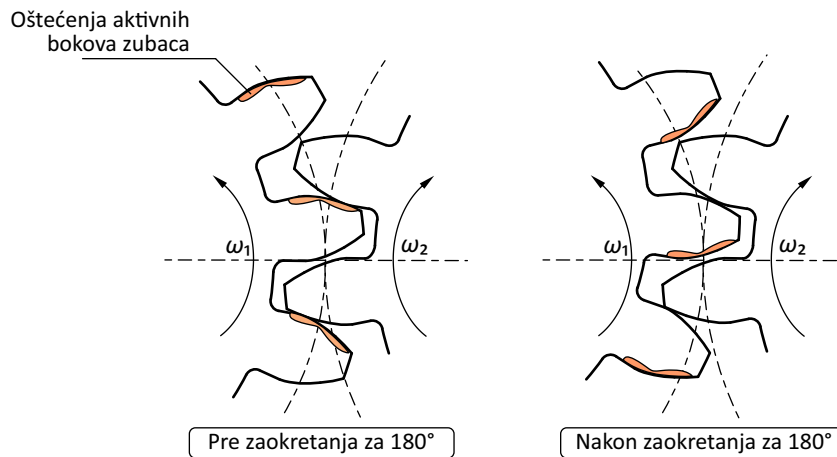
Slika 10 Ekstreman primer razaranja aktivnih bokova zubaca kod zupčastog para sa jednim smerom obrtanja

Ova zamena se obavlja uprkos tome što su neaktivni bokovi zubaca neoštećeni (novi). Ako su tela spregnutih zupčanika simetrična, Slika 11a, tada se njihovim zaokretanjem za 180° mogu aktivirati, angažovati neoštećeni bokovi zubaca u prenošenju opterećenja. Ova metoda reparacije je komplikovana kada su u pitanju zupčanici sa nesimetričnim telima, Slika 11b, ali je i dalje izvodljiva uz određene modifikacije.



Slika 11 Primeri zupčanika sa: a) simetričnim telom, b) sa nesimetričnim telom

Zaokretanjem spregnutih zupčanika za  $180^\circ$  smanjena je nosivost (čvrstoća) podnožja zupca. Podnožje zubaca je iz jednosmerno promenljivog naponskog stanja dovedeno u naizmenično promenljivo stanje. Ovim novim naponskim stanjem, čvrstoća (nosivost) podnožja zupca smanjena je (prema preporukama iz literature) za 30%. Radni vek zupčastog para određen je radnim vekom podnožja zubaca. Zato, pre usvajanja ove metode reparature bokova zubaca treba proveriti radni vek podnožja zubaca.



Slika 12 Angažovanje neaktivnih bokova zubaca zaokretanjem zupčanika za  $180^\circ$

Prvo treba proveriti da li su zupci zupčanika dimenzionisani da rade u oblasti trajne ili vremenski ograničene dinamičke čvrstoće podnožja zupca. Ako su ispunjeni sledeći uslovi:

$$S_{F1} = \frac{\sigma_{DF1}}{\sigma_{F1}} > S_{F\min} \quad \text{i} \quad S_{F2} = \frac{\sigma_{DF2}}{\sigma_{F2}} > S_{F\min},$$

gde su:

$S_F$  – stepen sigurnosti protiv dinamičkog loma zupca u podnožju ( $S_{F\min} = 1, 25$ ),

$\sigma_{DF}$  – trajna dinamička čvrstoća podnožja zupca,

$\sigma_F$  – radni napon u podnožju zubaca zupčanika,

zupčasti par je radio u oblasti trajne dinamičke čvrstoće podnožja zubaca (neograničeni radni vek).

Izraz za trajnu dinamičku čvrstoću podnožja zupčanika:

$$\sigma_{DF} = \sigma_{Flim} \cdot Y = \sigma_{Flim} \cdot Y_{NT} \cdot Y_{ST} \cdot Y_{\delta T} \cdot Y_{RT} \cdot Y_X \cdot Y_R,$$

gde je  $\sigma_{Flim}$  trajna dinamička čvrstoća podnožja zupca etalon zupčastog para, a faktori korekcije kritičnog napona su:

$Y_{NT}$  – faktor radnog veka,

$Y_{ST}$  – faktor koncentracije i korekcije napona ( $Y_{ST} = 2$ ),

$Y_{\delta T}$  – faktor osetljivosti materijala na koncentraciju napona,

$Y_{RT}$  – faktor stanja površine – hrapavosti,

$Y_X$  – faktor veličine zupca,

$Y_R$  – faktor asimetrije napona.

Sada treba proveriti da li reparirani zupčasti par (zaokrenut za  $180^\circ$ ) može da radi beskonačno dugo sa aspekta podnožja zupca. Ako su ispunjeni sledeći uslovi:

$$S_{Fr1} = \frac{\sigma_{DFr1}}{\sigma_{F1}} > S_{Fmin} \quad \text{i} \quad S_{Fr2} = \frac{\sigma_{DFr2}}{\sigma_{F2}} > S_{Fmin},$$

gde je  $\sigma_{DFr}$  – trajna dinamička čvrstoća podnožja zupca repariranog zupčanika, i reparirani zupčasti par radiće beskonačno dugo sa aspekta čvrstoće podnožja zupca. U suprotnom, ako ovaj uslov nije ispunjen, postoji opasnost od zapreminskog razaranja podnožja zubaca repariranog zupčastog para.

### Određivanje radnog veka repariranog zupčastog para

Ako se proračunom dobije da je stepen sigurnosti podnožja manji od 1 to znači da će reparirani zupčanik imati ograničen broj ciklusa do razaranja, odnosno da radi u oblasti vremenski ograničene čvrstoće, Slika 13. Radni vek repariranog zupčastog para u oblasti vremenski ograničene čvrstoće dobija se iz jednačine Velerove krive:

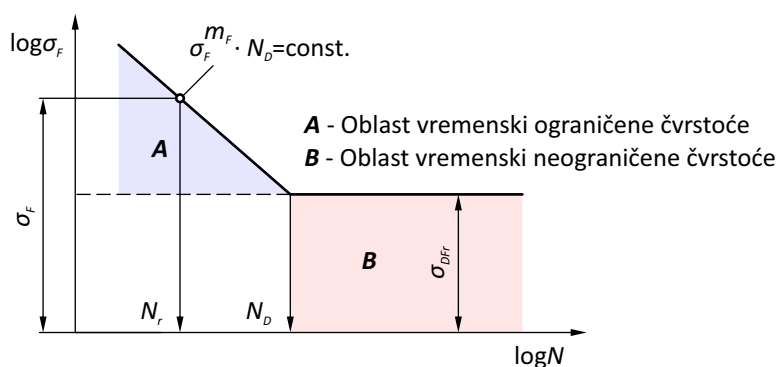
$$\sigma_{DFr}^{m_F} \cdot N_D = \sigma_F^{m_F} \cdot N_r \Rightarrow N_r = \left( \frac{\sigma_{DFr}}{\sigma_F} \right)^{m_F} \cdot N_D,$$

gde je:

$N_D$  – granični broj ciklusa  
( $3 \cdot 10^6$  ciklusa),

$N_r$  – broj ciklusa do razaranja  
repariranog zupčanika,

$m_F$  – eksponent Velerove krive  
( $m_F = 6,25$  za opšte konstrukcione čelike;  $m_F = 8,70$  za cementirane i poboljšane čelike).



Slika 13 Velerova kriva podnožja zupca zupčanika

### Korišćena literatura

1. Ristivojević M. (2021) **Reparacija mašinskih delova i konstrukcija**, izvodi sa predavanja;
2. Ristivojević M. (2013) **Reparatura – Imperativ u XXI veku**, Procesna tehnika;
3. Ristivojević M. (2009) **Reparatura u funkciji ekonomske, energetske i ekološke efikasnosti**, Mašinstvo 58;
4. Vaserman R. (2012) **Kako se štede milioni tehnikom reparaturnog zavarivanja**, Messer Tehnogas.
5. Ristivojević M. (2005) **Zupčnici 1– kinematika i kontrola**, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva Beograd;
6. Marković S. (1994) **Regeneracija zupčastih i ožlebljenih sprega**, Vojnotehnički glasnik 2;
7. Albertini H. (2017) **Repair of large, surface-degraded industrial gears – a new approach**, Gear Technology;
8. Mayo P.A. (1987) **Gear Repair**, ASSCT;
9. TIMKEN (2016) **Using bearing repair to extend bearing life – for heavy industries**;
10. SKF (2018) **Remanufactured by SKF**;
11. FAG Industrial Services (2007) **Reconditioning and Repair of Rolling Bearings**;
12. Gostović N. (2007) **Reparatura turbinskog vratila A8 na HE Đerdap II**, Castolin Eutectic;