



Mašinski fakultet u Podgorici

Kotor, 14. i 15. septembar 2000.

SPECIFIČNOSTI PRORAČUNA ZUPČANIKA NA HABANJE

Blaža Stojanović, dipl.ing. Mašinski fakultet u Kragujevcu

U ovom radu se razmatra proračun nosivosti u odnosu na habanje. Ovaj proračun ni do danas nije potpuno razvijen, jer habanje kao svojevrsni prirodni fenomen zavisi od mnogo faktora koje je teško matematički obuhvatiti i povezati. Habanje zupčanika je u suštini kompleksno, jer je posledica fizičkih, hemijskih, mehaničkih, termičkih i drugih procesa. U proračunu se polazi od intenziteta habanja, koji predstavlja odnos debljine pohabanog sloja i puta trenja. Da bi se definisale ove veličine treba uzeti u obzir veliki broj uticajnih parametara. Glavni problem je da se ovi parametri što tačnije odrede i njihove vrednosti približe realnim uslovima. Problem u određivanju su njihove međusobne relacije i nemogućnosti definisanja pojedinačnih uticaja.

1. Uvod

Proces habanja se razvija na elementima mehaničkih sistema kao posledica triboloških procesa na njihovim kontaktnim površinama. Najčešće se habanje definiše kao progresivan proces gubitka materijala sa kontaktnih slojeva predmeta u dodiru koji se relativno kreće jedan po drugom. Gubitak materijala sa kontaktnih slojeva u procesu ostvarivanja dodira dva tela između kojih postoji relativno kretanje prouzrokuje promenu oblika i karakteristika elemenata mehaničkih sistema pa prema tome i njihovih funkcionalnih karakteristika. Analizom pojave trenja i habanja u mehaničkim sistemima dolazi se do zaključka da trenje utiče na odnose između ulaznih i izlaznih veličina sistema (npr. u sistem ulazi jedna količina energije, a izlazi druga količina, jer se deo energije troši na savladavanje trenja), dok habanje utiče na promenu oblika i karakteristika elemenata sistema.

Statistička analiza o oštećenjima kod zupčastih prenosnika snage pokazuje da 60% od svih oštećenja kod prenosnika otpada na zupčanike, 20% na ležaje, a 20% na sve ostale delove prenosnika. Ovaj podatak ukazuje na potrebu da se pojavama oštećenja i habanja zubaca posveti posebna pažnja, sa ciljem da se one izbegnu.

2. Specifičnosti habanja zupčanika

Zavisno od vrste opterećenja i radnih uslova na zupcima zupčanika se pojavljuju različite vrste habanja i oštećenja. Osnovni vidovi habanja i oštećenja zupčanika u zavisnosti od uslova u kojima rade zupčanici, njihovih konstruktivnih i tehnoloških parametara su: zamorno habanje(pitting), abrazivno habanje, scoring, plastično deformisanje, lom zubača itd. Koje habanje će pri određenim radnim uslovima biti kritično zavisi od većeg broja faktora: karaktera rada pogonske i radne mašine, fizičkih, hemijskih i mehaničkih svojstava samog materijala, hemijsko-terminičke obrade, karakteristika podmazivanja, agresivnosti sredine, temperature, topografije kontaktnih površina, mehaničke obrade (predhodne i završne) i dr. Pojava jedne vrste habanja dovodi do povećanja opasnosti od pojave drugih vrsta habanja. Praksa pokazuje da se na zupcima zupčanika javlja čitav niz habanja. Sve ovo otežava istraživanja u ovoj oblasti. U takvim uslovima veoma je teško otkriti dominantan oblik habanja. Zbog toga je neophodno da se proračunom obuhvate svi važniji faktori koji utiču na pouzdan rad zupčanika.

Tokom vremena su razradeni i eksperimentalno potvrđeni sledeći kriterijumi za proračun nosivosti zupčanika [4]:

- Proračun nosivosti po kriterijumu čvrstoće bokova zubaca.
- Proračun nosivosti po kriterijumu čvrstoće podnožja zubaca.
- Proračun nosivosti u odnosu na scoring..
- Proračun nosivosti u odnosu na habanje.

Od predhodno navedenih proračuna najviše se koriste proračun nosivosti po kriterijumu čvrstoće bokova zubaca (zasnovan na *Hertz*-ovoj teoriji o kontaktnim naprezanjima) i proračun nosivosti po kriterijumu čvrstoće podnožja zubaca. Savremena streljenja konstruktora: smanjenje gabarita i mase mašina, povlači sa sobom i postepeno povećanje mehaničkih i toplotnih napona na kontaktnim površinama zupčastih prenosnika. Saglasno tome, normalan rad savremenih zupčanika se odvija na granici postojanja kontaktno-hidrodinamičkog sloja maziva. Kao posledica razaranja mazivog sloja nastaju različite vrste habanja, od kojih je najopasniji scoring [3]. Usled ovih okolnosti, u poslednje vreme se sve više koristi proračun nosivosti na scoring. Što se tiče proračuna nosivosti na habanje on se još uvek nalazi u fazi ispitivanja, zbog nedovoljnog broja informacija i složenih procesa u realnim sistemima.

3. Ka proračunu zupčanika na habanje

Otkaz većine mašinskih delova nastaje usled habanja njihovih radnih površina. Međutim nedostatak pouzdanih metoda proračuna na habanje otežava mogućnost prognoziranja radnog veka delova konstrukcije prema uslovima habanja kontaktnih površina. Siguran proračun na habanje ne postoji, usled veoma velike složenosti fizičko-hemijskih promena koje se odvijaju i raznovrsnosti faktora koji utiču na habanje.

Primena opšte šeme proračuna omogućava da se pri poznatom intenzitetu habanja odredi radni vek prenosnika ili na osnovu poznatog radnog veka prenosnika nađe srednji intenzitet habanja. Proračun se može koristiti za različite tipove zupčastih prenosnika, kao i za različite mehanizme habanja.

Poznato je da intenzitet habanja materijala zavisi od velikog broja parametara: fizičkih, hemijskih i mehaničkih svojstava samog materijala, karakteristika maziva, agresivnosti sredine, uslova opterećenja, temperature, topografije kontaktnih površina itd. Predhodni proračun je moguć samo u nekim slučajevima i to dovoljno približno. U odgovornim proračunima preporučuje se da se koristi eksperimentalni intenzitet habanja, dobijen u uslovima trenja koji su najpribližniji uslovima rada prenosnika koji se proračunava. Tačnost proračuna na osnovu dobijenih formula zavisi pre svega od tačnosti određivanja intenziteta habanja, koji je čak i pri stacionarnim spoljašnjim uslovima često promenljiva veličina.

Intenzitet habanja se izražava odnosom [1]:

$$J_h = \frac{dh}{dS} \approx \frac{h}{S} \quad (1)$$

gde su: h-debljina pohabanog sloja; S- put trenja klizanja.

Debljina pohabanog sloja se određuje na sledeći način:

$$h_{1,2} = 2.25 \cdot J_{h_{1,2}} \cdot \sqrt{P \cdot \left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right) \cdot \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \cdot \frac{V_{KL_{1,2}}}{V_{F_{1,2}}} \cdot i \cdot \tau \cdot n_{1,2}} \quad (2)$$

gde su: $h_{1,2}$ - habanje u karakterističnoj tački zuba pogonskog i gonjenog zupčanika; $J_{h_{1,2}}$ - intenzitet habanja materijala zupčanika 1 i 2 u datim uslovima; P - specifična proračunska sila; v_1, v_2 - Poason-ovi koeficienti; E_1, E_2 - moduli elastičnosti materijala; $\rho = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$ - redukovani radius krivine u proračunskoj tački; $V_{KL_{1,2}}$ - brzina klizanja u proračunskim tačkama profila zuba pogonskog i gonjenog zupčanika; $V_{F_{1,2}}$ - brzina posmeranja zajedničke tačke po profilu zuba (u proračunskoj kontaktnoj tački) pogonskog i gonjenog zupčanika; $n_{1,2}$ - broj obrtaja zupčanika 1 i 2; i - broj sprezanja; τ - vreme rada.

Veličina habanja h predstavlja kvantitativnu meru procesa habanja mehanizma. Ona može biti zadata od strane konstruktora u obliku maksimalno dozvoljene [h] ili se određuje računskim putem iz polazne zavisnosti. Za određivanje [h] neophodno je da se izračuna put trenja klizanja radne tačke profila mehanizma, za koju se obično bira tačka sa maksimalnim habanjem. Za zupčanik ovu tačku određujemo pomoću obrasca:

$$S_{1,2} = 2.25 \cdot \sqrt{P \cdot \left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right) \cdot \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \cdot \frac{V_{KL_{1,2}}}{V_{F_{1,2}}} \cdot i \cdot \tau \cdot n_{1,2}} \quad (3)$$

Radni vek prenosnika se dobija odgovarajućom transformacijom:

$$T = \frac{[h]_{1,2} \cdot V_{F_{1,2}}}{2.25 \cdot J_{h_{1,2}} \cdot V_{KL_{1,2}} \cdot n_{1,2} \cdot i \cdot \sqrt{P \cdot \left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right) \cdot \rho}} \quad (4)$$

gde je $[h]_{1,2}$ - dozvoljeno habanje zuba pogonskog i gonjenog zupčanika.

Pri određivanju radnog veka zupčastih prenosnika poželjno je da se u predhodnoj formuli zamene stvarne vrednosti faktora opterećenja, geometrije, kinematike koji se menjaju u skladu sa habanjem zubaca tj. u vremenu funkcionisanja zupčastog prenosnika.

Ako izračunate vrednosti predstavljaju površinska razaranja, tj. habanje, koje je definisano dimenzijom i brojem međusobnih kontakata i ne zavise od brzine klizanja i kotrljanja, onda se na osnovu [1] dobija formula:

$$h_{1,2} = 2.25 \cdot J_{h_{1,2}} \cdot \sqrt{P \cdot \left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right) \cdot \frac{\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot i \cdot \tau \cdot n_{1,2}}{\rho_1 + \rho_2}} \quad (5)$$

Osnovni problem proračuna na habanje se sastoji u tačnom određivanju intenziteta habanja zupčanika u realnim uslovima eksploracije. Intenzitet habanja može da se određuje eksperimentalno u laboratorijskim uslovima ili u realnim uslovima eksploracije. Pošto zupčasti prenosnici rade u različitim eksploracionim uslovima (opterećenja, temperatura, spoljašnja sredina, mazivo, stanje kontaktne površine, vrsta materijala itd.) vrlo je teško napraviti odgovarajući matematički model koji bi sve te uticaje uzeo u obzir. Za eksperimentalno određivanje intenziteta habanja postoje dve mogućnosti:

Prvi način se sastoji u sledećem: posle određenog vremena rada zupčanika vrši se merenje debljine pohabanog sloja h , zatim se na osnovu jednačine (1) određuje intenzitet habanja J_h . Problem koji se pri tome javlja je veliki broj mogućih kombinacija radnih uslova. Za svaku kombinaciju je potrebno da se vrše nova ispitivanja i određivanje intenziteta habanja za date uslove. Ovo predstavlja dugotrajan i mukotran posao, ali i jedino pravilno rešenje. Vrednosti koje se dobijaju, statistički se obraduju i sreduju tabelarno. Nakon toga formira se baza podataka u koju se ubacuju dati podaci. Cilj ovakvog sređivanja podataka je njihova laka upotrebljivost kada su određeni uslovi u pitanju.

Drugi način za određivanje intenziteta habanja se nadovezuje na prvi. U slučaju da imamo određene uslove eksploracije koji su približno jednaki već poznatim uslovima, vrši se formiranje matematičkog modela sa poznatim parametrima, uz dodatak novih faktora. Na osnovu toga se skraćuje put određivanja intenziteta habanja.

4. Karakteristike parametara koji ulaze u proračun

Određivanje debljine pohabanog sloja h eksperimentalnim putem predstavlja težak i često komplikovan posao. U cilju što lakšeg izračunavanja debljine pohabanog sloja treba težiti analitičkom određivanju ove vrednosti. Pri određivanju debljine pohabanog sloja h polazimo od jednačine (2). Za izračunavanje h potrebna je vrednost intenziteta habanja za realne uslove eksploracije. Analiza ovog problema pokazuje da intenzitet habanja predstavlja složenu funkciju koja zavisi od velikog broja parametara.

$$J_h = f(\Phi_i, \Phi_\sigma, \Phi_{f,h}, \Phi_{t,f}, \Phi_g) \quad (6)$$

Razlikuju se sledeće grupe parametara koje utiču na intenzitet habanja.

- vremenski (kinetički) parametri Φ_i ,
- parametri koji definišu naponsko stanje Φ_σ ,
- fizičko-hemijski parametri $\Phi_{f,h}$,
- toplotno-fizički parametri $\Phi_{t,f}$ i
- geometrijski parametri Φ_g .

4.1. Vremenski (kinetički) parametri

Kinetički procesi formiranja i razaranja površinskih jedinjenja zavise od vremenskih parametara. Razlikuju se četiri karakteristična vremena [2]:

1. $t_{K,\phi}$ - srednje vreme jediničnog kontakta. Od njega zavise strukturne i fazne promene u podpovršinskim slojevima materijala i hemijski procesi na površini.
2. $t_{K,CB}$ - srednje (nezavisno) vreme do sledećeg kontakta. Definiše glavni način odvijanja hemijskih procesa i obrazovanje hemijskih jedinjenja.
3. $t_{K,H}$ - vreme kontakta po nominalnoj površini kontakta. Karakteriše prosečno sve kontaktne pojave, koje zavise od vremena.
4. t_{CH} - nezavisno vreme do pojave narednog nominalnog kontakta, veoma je važno za ciklično povratne kontakte. U toku ovog vremena spoljašnja sredina pokazuje fizičko-hemijsko dejstvo na slobodnu površinu delova.

4.2. Parametri koji definišu naponsko stanje

U slučaju dejstva opterećenja na površinu trenja definišu se sledeći parametri:

Φ_a - faktor koji definišu naponsko stanje kontakta, odnosno bezdimenzijsku površinu stvarnog kotlanja tela (primenjuje se u proračunima pri athezionom i abrazivnom mehanizmu habanja).

Φ_{CM} - parametar koji definiše relativnu debljinu mazivog sloja.

Φ_Y - parametar koji karakteriše zamornu čvrstoću tamnih površina.

Φ_h - parametar koji uzima u obzir uticaj hravrosti.

4.3. Fizičko-hemijski parametri

U slučaju fizičko-hemijskog delovanja sredine neophodno je određivanje dopunskega odnosa. Svojstvo graničnog podmazivanja apsorpcione prirode može se definisati parametrima sledećeg oblika:

$\Phi_{GR,AD}$ - parametar koji karakteriše postojanost graničnih mazivih slojeva.

$\Phi_{GR,X}$ - parametar koji definiše hemijsku modifikaciju površine trenja.

4.4. Toplotno-fizički parametri

U svojstvu bezdimenzijskih kompleksa koji karakterišu uticaj toplotnih procesa na intenzitet habanja neophodno je definisati:

Φ_{KT} - parametar uticaja kontaktne temperature.

Φ_{FTC} - parametar koji definiše uticaj temperaturskog gradijenta.

$\Phi_{H,H}$ - parametar koji karakteriše termičke napone podpovršinskog sloja, od koga u mnogim slučajevima bitno zavisi habanje.

4.5. Geometrijski parametri

Dalji pravac tačnog određivanja proračunske zavisnosti je određivanje geometrijskih parametara mehanizma u procesu habanja, koji mogu da se menjaju u velikoj meri i dovedu do pojave dinamičkih opterećenja. Za ocenu neravnomernosti habanja radne

površine mehanizma predlaže se definisanje koeficijenta neravnomernosti habanja:

$$k = \frac{h_{\max}}{h}, \text{ gde su: } h_{\max} - \text{maksimalno habanje, } h - \text{srednje habanje.}$$

5. Zaključak

Otkaz zupčanika nastaje usled habanja kontaktnih površina. Usled toga neophodno je da se proračunom obuhvate svi faktori koji utiču na habanje. U radu je data analiza jednog od postojećih proračuna na habanje. Pored toga dat je pregled klučnih parametara koji utiču na intenzitet habanja. Zbog svoje kompleksnosti i složenosti ovaj proračun je još uvek u fazi ispitivanja.

6. Literatura

- [1] Дроздов Ю. Н., Павлов Б. Г., Пучков В. Н.: *Трение и износ в экстремальных условиях*. – "Машиностроение", 1986. – 224 с.
- [2] Дроздов Ю. Н.: *Определение интенсивности изнашивания деталей машин*. – "Вестник машиностроения", 1980, № 6.
- [3] Танасијевић С.: *Основи трибологије машичких елемената*. "Народна књига", Београд, 1989.
- [4] Милтеновић В.: *Машински елементи: облици, прораčун, примена*. – "Машински факултет", Ниш, 1997.

SPECIFIC FEATURES OF GEAR WEARING CALCULATION

This paper deals with calculation of load capacity in relation to wearing. So far, this calculation has not been completely developed, because wearing, as a distinctive natural phenomenon, depends on numerous factors, which hardly could be comprehended and associated mathematically. Gear wearing is substantially complex, because it is result of physical, mechanical, thermal and other processes. Opening point in the calculation is wearing intensity, which represents ratio of the worn off layer and friction path. In order to define these variables, one should take into account numerous influential parameters. The main problem here is to determine all these factors as accurately as possible and to approximate their values to real conditions. Their interrelations and impossible definition of individual influences represent the problem in such determination.

Blaža Stojanović dipl.ing.
Mašinski fakultet u Kragujevcu
Sestre Janjić 6
e-mail: blaza@infosky.net