



YUTRIB 2001

SEDMA JUGOSLOVENSKA KONFERENCIJA O TRIBOLOGIJI
SA MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM

UTICAJ FIZIČKIH PARAMETARA NA PRORAČUN ZUPČANIKA NA HABANJE

Blaža STOJANOVIĆ, Mašinski fakultet, Kragujevac

INFLUENCE OF THE PHYSICAL PARAMETERS TO THE GEAR WEAR CALCULATION

Abstract

This paper deals with calculation of carrying capacity related to wear. This calculation is not developed completely yet, due to a fact that wear as a phenomenon depends on many factors which, matematically is very hard to connect all together.

Gear wear is complex depending on physical, chemical, mechanical, termical and other processes. The calculation goes from the wear intensity, which represent the ratio of worn layer thickness and the friction path. In order to define those variables a great number of influences should be taken into account.

The following groups of parameters which influence the wear intensity are presented:

- time (kinetic) parameters
- parameters which define the stress state
- physical - chemical parameters
- termical - physical parameters and
- geometrical parameters.

In scope of this paper will be shown the influence of physical parameters: physical-chemical and termical-chemical. The main problem is to determine precisely these parameters and to interprete their values as close to real working conditions as possible. The problem to archive this is relations among them and impossibility to define every single influence separately.

This paper is another attempt to determine basis for calculations and to define the future ways towards solving it.

Key words: wear, gear, wear intensity

1. UVOD

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 pojedinačna oštećenja i habanja zubaca posveti posebna pažnja, sa ciljem da se one izbegnu.

Zupčanici spadaju u grupu mašinskih elemenata sa najširom primenom u tehnički. Namjenjeni su za prenos snage i obrtnog momenta, ali i obezbeđenje ravnomernog kružnog kretanja radnih organa. Od njihove otpornosti na habanje i čvrstoće u velikoj meri zavise vek trajanja i pouzdanost mehanizama, mašina i mašinskih sistema. Karakteristike zupčanika su: složen geometrijski oblik radnih površina, različiti materijali (metali, ali i nemetalni), različite metode

izrade, rad u raznovrsnim eksploracionim režimima i drugo.

Zavisno od vrste opterećenja i radnih uslova na zupčaniku 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 (piting), abrazivno habanje, scoring, plastično deformisanje, lom zubaca.

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-termičke 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 [4].

2. KA PRORAČUNU ZUPČANIKA NA HABANJE

Otkaz većine mašinskih delova nastaje usled habanja njihovih radnih površina. Međutim nedostatak pouzanih metoda proračuna na habanje otežava mogućnost prognoziranja radnog veka delova konstrukcije prema uslovima habanja kontaktnih površina. Siguran proračun na habanje ne postoji u literaturi, usled veoma velike složenosti fizičko-hemijskih promena koje se odvijaju i raznovrsnosti faktora koji utiču na habanje. U ovom radu učinjen je pokušaj analize opšte šeme proračuna.

2.1. Opšta šema proračuna zupčanika na habanje

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

Poznato je da intenzitet habanja zavisi od velikog broja parametara: fizičkih, hemijskih i mehaničkih svojstava samog materijala, karakteristika maziva, agresivnosti sredine, vrste opterećenja, temperature, topografije kontaktnih površina i drugih parametara. Zato je predhodni proračun ove veličine moguće ostvariti samo u pojedinim slučajevima i to dovoljno približno. U odgovornim proračunima preporučuje se korišćenje eksperimentalnih vrednosti intenziteta habanja, dobijenih u uslovima trenja, koji najviše odgovaraju uslovima rada razmatranog prenosnika. Tačnost proračuna prema dobijenim formulama zavisi pre svega od pravilnog izračunavanja intenziteta habanja, koji je čak i pri stacionarnim spoljašnjim uslovima često promenljiva veličina.

Preporučuje se da se proračun na habanje i radni vek zupčastog kontakta vrši prema karakterističnoj (kontaktnoj) tački na radnom profilu zuba, u uslovima rada, za koje je poznat intenzitet habanja. Ako je poznato, da je u procesu rada (habanja) zuba intenzitet promenljiv, onda se izračunavanje ove veličine može vršiti primenom diferencijalnog računa radnog veka - ukupno vreme rada prenosnika se nalazi sumiranjem vremena habanja debljine zuba za različite intenzitete habanja.

Upoređivanje vrednosti intenziteta habanja dobijenih na različitim mašinama i neposredno na zupčastim prenosnicima, omogućava da se izabere optimalna metodika ispitivanja materijala u

laboratorijskim uslovima za zupčaste prenosnike. U analitičkim transformacijama, podesno je koristiti intenzitet linearнog habanja.

Pri izvođenju osnovne jednačine pretpostavlja se, da je za razaranje površine tela uzrok uglavnom proklizavanje u zoni kontakta zuba, što je potvrđeno praksom.

Intenzitet habanja se izražava odnosom [1]:

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

gde su:

h - debljina pohabanog sloja i

S - put trenja klizanja.

Upotreba datog parametra J_h svršishodna je iz više razloga. Kao prvo: utvrđuje se zavisnost J_h kao funkcije brzine kotrljanja i klizanja, opterećenja, temperature, svojstava sredine itd.; kao drugo: na osnovu intenziteta habanja J_h mogu se ocenjivati i sintetizovati materijali sa stanovišta njihove upotrebljivosti za date uslove trenja.

Debljina pohabanog dela zuba je $h = J_h S$, gde je: S - put trenja klizanja.

Proračun puta trenja za dva zuba u sprezi (na površini kontakta koja se proračunava po Hertz-u) vrši se na sledeći način. Vreme kontakta tela 1 iznosi

$$t_1 = \frac{2b}{v_1}, \text{ tela } 2 \text{ iznosi } t_2 = \frac{2b}{v_2}. \text{ Put koji pređe tačka}$$

na telu 1, za vreme kontakta tela 2 (na površini $2b$)

$$\text{je: } S_1 = \frac{v_1 \cdot 2b}{v_2}. \text{ Analogno, put trenja klizanja za}$$

vreme trajanja kontakta dva zuba iznosi $S = \frac{2b \cdot (v_1 - v_2)}{v_2}$. Zavisnost puta trenja od položaja

$$\text{tačke u kontaktu data je izrazom } S(x) = \frac{(v_1 - v_2)}{v_2} \cdot (x + b).$$

Posle jednostavnih transformacija i usvajanja, da je $v_1 - v_2 = v_{KL}$ brzina klizanja, dobija se formula za proračun debljine pohabanog sloja zuba:

$$h_{1,2} = 2.25 \cdot J_{h1,2} \cdot \sqrt{P \cdot \left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right) \cdot \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \cdot \frac{v_{KL,2}}{v_{1,2}} \cdot z \cdot \tau \cdot n_{1,2}} \quad (2)$$

gde su:

$h_{1,2}$ - habanje u karakterističnoj tački zuba pogonskog i gonjenog zupčanika;

$J_{h1,2}$ - intenzitet habanja materijala pogonskog i gonjenog zupčanika u datim uslovima;

P - pogonsko opterećenje;

$\eta = \frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2}$ - elastična konstanta materijala;

v_1, v_2 - Poisson-ovi koeficijenti;

E_1, E_2 - moduli elastičnosti materijala;

- $\rho = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$ - redukovani radijus krivine u proračunskoj tački;
 $v_{KL,1,2}$ - brzina klizanja u proračunskim tačkama profila zuba pogonskog i gonjenog zupčanika;
 $v_{I,2}$ - brzina kotrljanja zaostale površine (u ovom slučaju tela 2);
 $n_{I,2}$ - broj obrtaja zupčanika 1 i 2;
 z - broj kontaktnih parova posmatranog zupčanika (kod planetarnog prenosnika sa tri satelita za centralni zupčanik $z=3$, za satelit $z=2$) i
 τ - vreme rada.

Ako se uzme da je $v_I = \omega_I \cdot \rho_I$, $v_2 = \omega_2 \cdot \rho_2$, gde su ω_I i ω_2 ugaone brzine pogonskog i gonjenog zupčanika dobija se:

$$\frac{v_{KL}}{v_2} = \frac{\omega_1 \rho_1 - \omega_2 \rho_2}{\omega_2 \rho_2} = \left(i_{I,2} \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right) \quad (3)$$

Posle zamenjivanja jednačine (3) u (2) i transformacije, određuje se radni vek zupčastog para:

$$T = \frac{[h]_{I,2}}{2.25 \cdot J_{h,I,2} \cdot n_{I,2} \cdot z \cdot \sqrt{P \cdot \left(\frac{1-v_I^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right) \cdot \rho}} \quad (4)$$

gde je: $[h]_{I,2}$ - dozvoljena veličina habanja zuba.

Za jednake materijale ($\rho_1 = \rho_2 = 0.3$) formula (4) prelazi u:

$$T = \frac{[h]_{I,2} \cdot (E)^{1/2}}{3 \cdot J_{h,I,2} \cdot (P \cdot \rho)^{1/2} \cdot \left(i_{I,2} \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right) \cdot n_{I,2} \cdot z} \quad (5)$$

Dozvoljena vrednost habanja $[h]_{I,2}$ u opštem slučaju predstavlja subjektivni parametar, sa izuzetkom kritičnog stanja, koji se određuje iz uslova loma zubca pri habanju.

Kako pokazuju eksperimenti, u procesu habanja zuba smanjuje se stepen korisnog dejstva prenosnika, dok se sa rastom dinamičkog opterećenja povećavaju šum i buka. Zbog toga se radni vek zupčastog para određuje, po pravilu, na osnovu propisane veličine dozvoljenog habanja $[h]_{I,2}$.

Ako se uzme da je habanje proporcionalno radu sile trenja [2] ($dh = k \cdot f \cdot PCP \cdot v_{KL} \cdot dt$) među zubima, onda se posle nekoliko transformacija formule (2) dobija:

$$h = k \cdot f \cdot P \cdot \frac{v_{KL}}{v_2} \cdot n \cdot z \cdot T \quad (6)$$

gde su:

- k - koeficijent proporcionalnosti i
 f - koeficijent trenja klizanja.

Ostali parametri date formule objašnjeni su ranije. Na taj način, habanje zuba se povećava sa povećanjem koeficijenta trenja klizanja, pogonskog

opterećenja, brzine klizanja, ugaone brzine, broja ozubljenja, vremena rada prenosnika.

Za slučaj abrazivnog habanja tela dobija se sledeća zavisnost :

$$V = c \cdot \frac{P \cdot S \cdot a}{H} \quad (7)$$

gde su :

- V - zapreminske habanje,
 S - put trenja,
 P - opterećenje,
 H - početna tvrdoća materijala,
 a - dimenzija abrazivnog zrna i
 c - koeficijent koji zavisi od abrazivnih svojstava površine.

Posle nekoliko transformacija zavisnost (7) uz pomoć izraza (2) dobija sledeći oblik:

$$h = \frac{c \cdot P_n \cdot a}{H} \cdot \frac{v_{KL}}{v_2} \cdot n \cdot z \cdot T \quad (8)$$

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.

U kontaktu zuba javlja se kotrljanje sa klizanjem, sa izuzetkom trenutnog pola gde se javlja kinematski čisto kotrljanje. Brzine klizanja i kotrljanja utiču na silu trenja, debljinu mazivog sloja, toplotne procese, intenzitet habanja. Pored toga utiču i na mehanizam i kinetiku odvijanja fizičko-hemijskih procesa.

Maksimalna vrednost brzine klizanja nalazi se u početnoj i krajnjoj tački zahvata. Povećanjem brzine klizanja dolazi do razaranja mazivog sloja, povećanja habanja i oštećenja usled istovremenog rasta kontaktnog toplotnog faktora i mehaničkog razaranja mikroneravnina površine.

2.2. Određivanje intenziteta habanja

Osnovni problem proračuna na habanje se sastoji u tačnom određivanju intenziteta habanja zupčanika u realnim uslovima eksploatacije. Intenzitet habanja može da se određuje eksperimentalno u laboratorijskim uslovima ili u realnim uslovima eksploatacije. Pošto zupčasti prenosnici rade u različitim eksploatacionim 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 mukotrpan posao, ali i jedino pravilno rešenje. Vrednosti koje se dobijaju, statistički se obrađuju i sređuju 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.

2.3. Uočeni problemi i način njihovog rešavanja

Pri korišćenju dobijenih formula (2), (4), (5) treba imati u vidu sledeće okolnosti. Ako se u ovim zavisnostima zamene početni parametri prenosnika, onda će ocena, sa tačke gledišta radnog veka, biti minimalno ostvarena jer će se zajedno sa habanjem zuba na mestu kontakta korena zuba navedeni radijus krivine povećavati, što dovodi do povećanja brzine kotrljanja i smanjenja kontaktnog pritiska. Ipak treba imati u vidu da se u zavisnosti od habanja, po pravilu povećavaju dinamička opterećenja. Zato dalja preciziranja predloženih formula treba da vode u pravcu izračunavanja kinetike habanja zuba i njegovog uticaja na realne kontaktne karakteristike (geometrijske, brzinske i energetske) prenosnika. Najveći značaj ima eksperimentalno-teorijsko određivanje intenziteta habanja tela u širokom dijapozonu promene kontaktnih parametara i sredine.

U postojećim metodikama proračuna na habanje zupčastih prenosnika [1], koristi se niz prepostavki, koje smanjuju tačnost proračuna. Tako na primer, ne uzima se u obzir ta činjenica, da se za vreme prolaza površine kontakta nad datom tačkom površine pri friкционom kontaktu, menjaju kako širina površine, tako i koeficijent klizanja. Svi proračuni habanja se sprovode za slučaj abrazivnog habanja.

Proračun kontaktnih pritisaka i širine površine kontakta vrši se po teoriji Hertz-a. Pri tome se smatra da su radijusi jednak radijusima krivine evolvenata zuba u tačkama koje se nalaze u sredini zone kontakta.

3. KARAKTERISTIKE PARAMETARA KOJI ULAZE U PRORAČUN

Osnovni problem proračuna na habanje se sastoji u definisanju ključnih parametara za dalji razvoj proračunskih metoda na habanje. Ozbiljan problem

se javlja pri definisanju matematičkog modela procesa habanja.

Iz mehanike i mikrogeometrije friкционog kontakta određuju se naponi i deformacije na površini i dubini pripovršinskih slojeva, debljina mazivog sloja i kompleksne ocene hravavosti.

Analiza naponskog stanja elastičnih tela i zamorne čvrstoće kontaktnih materijala za slučaj istovremenog dejstva normalnog i tangencijalnog opterećenja dovodi do sledećih zaključaka: tangencijalno opterećenje u velikoj meri utiče na naponsko stanje u zoni kontakta i na karakter razaranja materijala. Sa rastom tangencijalnog opterećenja tačka sa najvećim naponom se pomera bliže površini. Pri kotrljanju sa klizanjem tangencijalno opterećenje utiče kako na veličinu, tako i na amplitudu promene komponenata napona u pripovršinskim slojevima materijala i na površini.

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.

$$J_h = f(\Phi_t, \Phi_\sigma, \Phi_{f,h}, \Phi_{t,f}, \Phi_g) \quad (9)$$

Razlikuju se sledeće grupe parametara koje utiču na intenzitet habanja [8]:

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

Poseban uticaj na proračun imaju fizički parametri i to kako fizičko-hemijski tako i toplotno-fizički.

3.1 Fizičko-hemijski parametri

U slučaju fizičko-hemijskog delovanja sredine neophodno je određivanje dopunskih odnosa. Kao rezultat uzajamnog dejstva polja tvrde površine sa poljima atoma i molekula sredine, javlja se koncentracija materije na površini. Pri tome se obrazuju oksidi metalâ, apsorbovani slojevi vode, gasova, i polarnih molekula maziva. Otpornost ili nosivost mazivog sloja se definiše energijom apsorbovane veze, mehaničkim svojstvima površinskih i pripovršinskih slojeva materijala kao i termičkom otpornošću datog sistema.

Danas se kao aktuelni problem javlja prelaz od kvalitativnog na kvantitativni opis procesa trenja i habanja u uslovima graničnog podmazivanja. Apsor-

pcija mazivih komponenata je određena prirodnom, strukturu apsorbata i apsorbenta, mehanizmom molekularnih i atomskih uzajamnih delovanja. Pri tome dolazi do "izvlačenja" molekula, atoma ili jona gasova (tečnosti) na površinu tvrdog tela. Hemiska apsorpcija se odlikuje obrazovanjem hemijskih veza (jedinjenja) na osnovu sila uzajamnog dejstva. Pri fizičkoj apsorpciji molekuli se pod dejstvom sila, analognih *Van der Waals*-ovim silama u gasovima, koncentrišu na površini tvrdog tela u obliku tankog sloja, zadržavajući svoju specifičnost. Veličina apsorpcije zavisi od temperature i pritiska gase odnosno koncentracije materije. Temperatura smanjuje fizičku apsorpciju, a povećava hemijsku apsorpciju.

Povećanje topotne apsorpcije dovodi do pozitivnog isticanja mazivih svojstava i povećanja otpornosti na habanje tela. U slučaju fizičke apsorpcije kao dominantan može se uzeti sledeći parametar:

$$\Phi_{TP,AD} = \frac{RT}{Q} - \text{parametar, koji karakteriše postojanost graničnih mazivih slojeva, gde su:}$$

R - univerzalna gasna konstanta;

T - apsolutna temperatuta i

Q - temperatuta apsorpcije.

Apsorpcija molekula površinski aktivnih komponenata maziva može da izazove smanjenje otpornosti deformisanja tvrdih tela tj. apsorpciono plastificiranje metala (efekat Rebindera). Uzakani efekat u velikoj meri zavisi od sastava, strukture i svojstava molekula apsorbenta. Složene fizičko-hemijske pojave, koje određuju kinetiku apsorpcionih procesa, formiranje graničnih slojeva, modifikaciju površinskog sloja, danas su veoma malo izučene i ne postoje generalizovani proračuni koji bi bili pogodni za ocenu otpornosti na habanje kontaktnih tela. Zato se zadržavamo na kriterijumu $\Phi_{TP,AD}$, koji u određenoj meri karakteriše svojstva vezana za otpornost na habanje pri graničnom podmazivanju apsorpcione prirode.

Hemiska modifikacija površina trenja zavisi od hemijski aktivnih supstanci u mazivu, koje su u uzajamnom dejstvu sa metalnim poršinama i koje smanjuju sklonost površine za obrazovanjem metalnih veza, koje su smetnja u zahvatu. Tribohemijske reakcije se odvijaju u početku u diskretnim tačkama kotrljanja, zatim obuhvataju veliki deo površine trenja.

U svojstvu kriterijuma (invarijante), koji uzima u obzir brzinu hemijske reakcije može se uzeti zavisnost $\Phi_{TP,X}$:

$$\Phi_{TP,X} = \frac{RT}{E_X} - \text{parametar koji definiše hemijsku modifikaciju površine trenja, gde je:}$$

E_X - energija aktivacije raspada međuatomskih veza površinskih jedinjenja.

Otpornost na habanje treba da zavisi od odnosa brzine habanja modifikovanih slojeva i njihovog

obrazovanja u procesu trenja, a takođe od fizičko-mehaničkih svojstava tih slojeva i njihovih dimenzija (dubine). Hemiska aktivnost maziva zavisi od temperature, pritiska, stepena deformacije neravnina (površine), katalitičkog dejstva materijala, od mehaničke aktivacije pripovršinskih slojeva. Površinska aktivacija je u vezi sa defektima kristalne rešetke, sa elektronskom strukturu površine i pripovršinskih slojeva, sa intenzitetom izlaza dislokacija i vakansija (upražnjena slobodna mesta) na površinu.

Intenzitet habanja materijala se na osnovu apsorpcionih procesa i hemijskog modifikovanja u prvoj aproksimaciji može izraziti jednačinom:

$$J_{\Phi,X} = k_{\Phi,X} \cdot \left(\frac{p \cdot V \cdot \tau_0}{HB \cdot d_\Phi} \right)^m \cdot (\Phi_i)^n \cdot L_{ti}^\psi \quad (10)$$

gde su:

$$\frac{p}{HB} \cdot \frac{V}{d_\Phi} \cdot \tau_0 = \Phi_{KIN} - \text{kinetički faktor, bezdimenzijsko vreme fizičko-hemijskih promena u oblasti kontaktata;}$$

$$\Phi_{KIN} = \Phi_{TP,X} - \text{pri hemijskom modifikovanju i obrazovanju zaštitnih prevlaka usled delovanja aditiva;}$$

$$\Phi_{KIN} = \Phi_{TP,AD} - \text{pri graničnom podmazivanju athezione prirode;}$$

$$L_{ti} - \text{vremenski simpleks, izražen odnosom predhodno određenih karakterističnih vremena i}$$

$$m, n, \psi - \text{faktori koji u opštem slučaju mogu biti veći i manji od nule, a takođe se u proračunima može uzeti } m=n=\psi=1.$$

3.2. Topotno-fizički parametri

Ovi parametri postaju sve definisani sa rastom opterećenja, brzine i povećanjem srednje temperaturе eksploracije. Temperatura ubrzava sve hemijske procese, smanjuje debljinu mazivog sloja, dovodi do desorpcije i oštećenja zaštitnih prevlaka, smanjuje mehaničku čvrstoću materijala, izaziva unutrašnje napone, menja strukturu, fazna stanja i druge karakteristike. Treba težiti što tačnijem određivanju temperature na mestima kontakta mikroneravnina.

U svojstvu bezdimenzijskih kompleksa koji karakterišu uticaj topotnih procesa na intenzitet habanja J_T , neophodno je definisati:

$$\Phi_{KT} = \frac{T_K}{T_{KP}} - \text{parametar uticaja kontaktne temperature, gde su:}$$

T_K - temperatuta na mestu kontakta tela;

T_{KP} - kritična temperatuta npr. temperatuta tečenja materijala (T_f), temperatuta fizičko-hemijskih strukturnih promena.

$\Phi_{\Gamma,TC} = \left(\frac{q}{\lambda} \right) \cdot \left(\frac{\delta_T}{T_T} \right)$ - parametar koji definiše uticaj temperaturskog gradijenta i toplotne pograničnog sloja, gde su:

q - specifični toplotni fluks koji deluje na telo (gustina toplotnog fluksa);

λ - koeficijent toplotne provodljivosti materijala
 δ_T - debljina pograničnog toplotnog sloja.

$\Phi_{\Pi,H} = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{(1-v) \cdot \sigma_{PP}}$ - parametar koji karakteriše termičke napone pripovršinskog sloja, od koga u mnogim slučajevima bitno zavisi habanje; gde su:

E - modul elastičnosti;

α - koeficijent linearog toplotnog širenja;

ΔT - porast temperature u pograničnom sloju;

v - Poason-ov koeficijent i

σ_{PP} - granični napon u pograničnom sloju.

Ovi parametri se koriste za nalaženje sledeće veze:

$$J_{T,\Phi} = \Phi \left(\frac{T_K}{T_T}, \frac{q}{\lambda_{1,2}}, \frac{\delta_T}{T_{KP}}, \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{(1-v) \cdot \sigma_{PP}} \right) \quad (11)$$

Ova zavisnost omogućava dobijanje proračunske zavisnosti za određivanje intenziteta habanja. Uzima u obzir uticaj toplotnih procesa - temperaturu na mestu kontakta, toplotni gradijent, veličinu toplotnog pograničnog sloja, toplotnu postojanost kontaktnih tela, karakteristične temperature koje utiču na sastav, strukturu materijala, fizičko-hemijske promene.

4. ZAKLJUČAK

U stvaranju proračunskih metoda proračuna na habanje neophodno je uzeti u obzir sledeće osobine:

1. Bitnu zavisnost procesa habanja od fizičko-hemijskog uticaja spoljašne sredine (maziva).
2. Stohastičku raspodelu površinskih sila, toplotnih izvora kao i jačinu njihovog delovanja i veliku brzinu odvijanja hemijskih reakcija.
3. Pojavu značajnih gradijenata polja napona, deformacija, temperature, difuzionih procesa prenosa mase.
4. Zavisnost intenziteta habanja od kinematike kontakta (klizanje, kotrljanje, kotrljanje sa klizanjem).
5. Veliku deformaciju površinskih i pripovršinskih slojeva, pojavu koncentracije napona, mehaničko-termičku aktivaciju, eventualne dinamičke, strukturne, fazne i hemijske promene, pojavu različitih hemijskih površinskih jedinjenja. Zatim raznorodnost i neizotropnost svojstava materijala, koji učestvuju u procesu trenja i habanja.
6. Izmenu makro i mikrogeometrije kontaktnih tela u procesu habanja.

Pored toga treba pratiti promenu dimenzija u vremenu i to u različitim uslovima rada, posebno u

periodu uhodavanja i u slučaju pojave kritičnih uslova, koji dovode do katastrofnog brzog habanja i izbacivanja mehanizma iz upotrebe.

Značaj određenih zakona za proračun je opšte priznat. Međutim javlaju se određene teškoće u širokom praktičnom korišćenju, jer količina faktora koji deluju na habanje i varijacije kontaktnih situacija pri trenju značajno prevazilaze mogućnosti postojećih proračunskih metoda. Zajedno sa tim eksperimentalna ispitivanja i praktični eksperiment se koriste samo u konkretnim oblastima njihove realizacije, pri čemu se ne dobijaju dovoljna uprošćenja kriterijalnih odnosa (fizičkih koordinata procesa habanja), koji dozvoljavaju uopštavanje podataka za najširu oblast korišćenja.

Osnovni problem proračuna na habanje sastoji se u definisanju ključnih parametara za dalji razvoj proračunskih metoda na habanje. Pri tome se može primetiti i ograničeni fizički smisao ovih proračuna kada je u pitanju njihova široka praktična upotreba. Problemi nastaju zato što količina faktora koji deluju na habanje kao i varijacije kontaktnih situacija pri trenju, značajno prevazilaze mogućnosti postojećih proračunskih metoda.

Između ostalog ozbiljne teškoće se javlaju pri konstrukciji matematičkog modela procesa habanja, koji bi bio pogodan za široku klasu praktičnih problema.

U ovom slučaju se posmatra kinematski najopštiji slučaj kotrljanja sa klizanjem tela, koji se javlja kod mnogih mehanizama (bregastih, zupčastih, frikcionih valjaka i dr.). Metod dobijanja parametara i neki pri tom dobijeni odnosi mogu se koristiti i za slučaj kinematskog kotrljanja (ili klizanja) tela.

5. LITERATURA

1. Дроздов Ю. Н., Павлов Б. Г., Пучков В. Н.: *Трение и износ в экспериментальных условиях*, "Машиностроение", 1986. - 224 с.
2. Дроздов Ю. Н.: *Определение интенсивности изнашивания деталей машин*, "Вестник машиностроения", 1980., Бр. 6.
3. Танасијевић С.: *Основи трибологије машичких елемената*, Начнија књига, Београд, 1989.
4. Милтеновић В.: *Машински елементи: облици, прорачун, примена*, Машички факултет, Ниш. 1997.
5. Милтеновић В.: *Савремени приступ пројектовању и конструисању зупчастих преносника снаге*, IRMES 95, 283-292 с.
6. Дроздов Ю. Н., Нажескин Б. П., Смирнов Н. И.: *Развитие методов расчета на износ зупчатых колес*, "Вестник машиностроения", 1990., Бр. 11.
7. Дроздов Ю. Н.: *К расчету зубчатых передач на износ*, "Машиностроение", 1969, Бр. 2.
8. Стојановић В.: *Специфичности прорачуна зупчаника на habanje*, IRMES 2000, Котор.