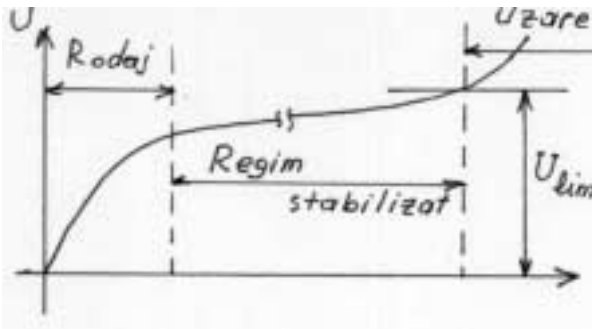


8. UZAREA. DEFINIRE. INDICATORI [A7, A11, A18]

8.1. Definare și indicatori

Uzarea se definește ca un proces de distrugere a stratului superficial al unui corp solid la interacțiunea mecanică cu un alt corp solid sau cu un mediu fluid cu particule solide în suspensie. Dacă interacțiunea mecanică se produce sub forma unei forțe de frecare, atunci se definește uzarea ca uzare prin frecare.

În procesul de uzare, distrugerea are loc într-un volum mic de material, localizat în zona de frecare și se realizează sub forma unei particule de uzură.



Despre mărimea uzării se poate considera ca reducere a dimensiunilor corpului într-o anumită direcție, de obicei perpendiculară pe suprafața de frecare.

Dependența tipică a uzării (U) de timpul de funcționare a unei cuple de frecare (t) evidențiază trei stadii ale procesului: rodaj, regim de uzare stabilizat, uzare distructivă (fig. 8.1).

Uzarea se produce în acele părți ale suprafeței de contact care au cea mai slabă legătură și care sunt părți ale ariei reale de contact. În regim de uzare stabilizat, aria reală de contact este constantă. La alunecarea unui corp peste altul, pe “petele” de contact cu legături (“prinderi”, “adeziuni”) de frecare se produc deteriorări ale legăturilor și apar noi suprafețe în aceeași cantitate cu cele distruse, se realizează în acest fel un nou ciclu de funcționare.

Ruperea legăturilor la nivelul diametrului mediu al petelor de contact poate fi considerat ca proces elementar de interacțiune ce determină uzarea.

Se presupune că volumul de material ΔV, îndepărtat de pe suprafață sub formă de particule de uzură, este proporțional cu aria reală de contact A_r,

$$\Delta V \propto A_r .$$

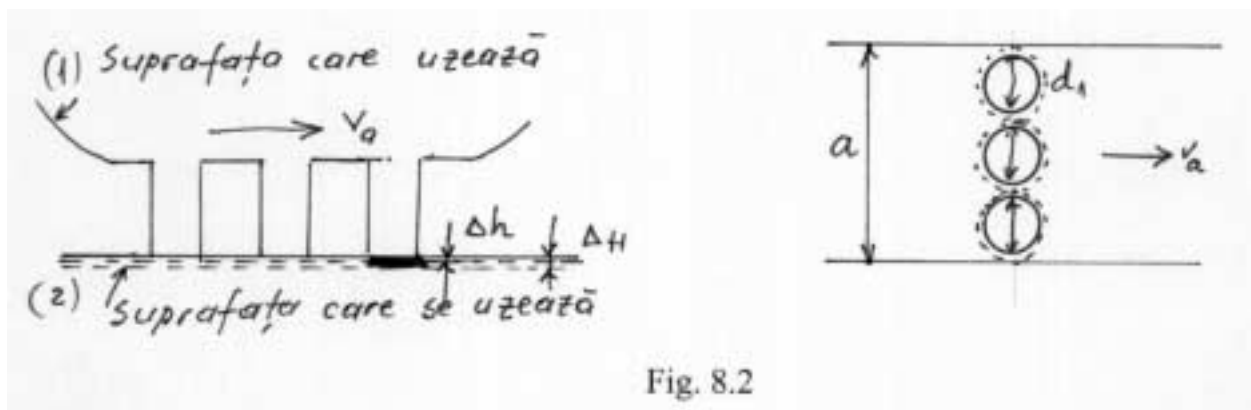


Fig. 8.2

La alunecarea unei pete de contact, caracterizată printr-un diametru mediu, distrugerea poate avea loc în anumite puncte de pe aria A_r. Se consideră că la echilibru, pe fiecare pată de contact s-a îndepărtat un strat de grosime Δh, astfel că

$$\Delta V = \Delta h \cdot A_r . \tag{8.1}$$

La trecerea “petelor” de contact pe suprafață, apar N legături de frecare, astfel că suprafața celeilalte piese se uzează cu mărimea ΔH (fig. 8.2).

Dacă considerăm că suprafața care se uzează are dimensiunea a în direcția perpendiculară pe direcția de alunecare și că diametrul mediu al petei de contact al suprafeței care uzează, în direcția perpendiculară pe direcția viezei, este \bar{d}_1 , atunci numărul interacțiunilor pentru uzarea suprafeței (2) cu ΔH este

$$\frac{a}{\bar{d}_1} N = \frac{a}{\bar{d}_1} \frac{\Delta H}{\Delta h}$$

Dacă densitatea “punctelor” de contact este $\gamma = \frac{n_r}{A_n}$ (n_r – numărul de “puncte” de contact, A_n – aria nominală), atunci numărul necesar de legături de frecare ce apar pe suprafața de frecare este

$$\frac{a}{\bar{d}_1} \frac{\Delta H}{\Delta h} \frac{1}{\gamma}$$

și lungimea de frecare (L_f) în direcția de mișcare

$$L_f = \frac{\Delta H}{\Delta h} \frac{1}{\bar{d}_1 \gamma} \quad (8.2)$$

Relația (8.2) se mai poate scrie

$$\frac{\Delta H}{L_f} = \frac{\Delta h}{\bar{d}_1 \gamma} = \frac{\bar{d}_1 \bar{d}_2}{\Delta A_r} \frac{\Delta h}{\bar{d}_2} \frac{A_r}{A_n} \quad (8.3)$$

unde ΔA_r este suprafața medie a unei pete de contact; \bar{d}_2 - diametrul mediu al petei de contact în direcția de alunecare.

Se definește intensitatea de uzare la nivel macroscopic ca raportul $I_h = \frac{\Delta H}{L_f}$ și la nivelul

microcontactelor $i_h = \frac{\Delta h}{\bar{d}_2} = \frac{\Delta V}{A_r \bar{d}_2}$.

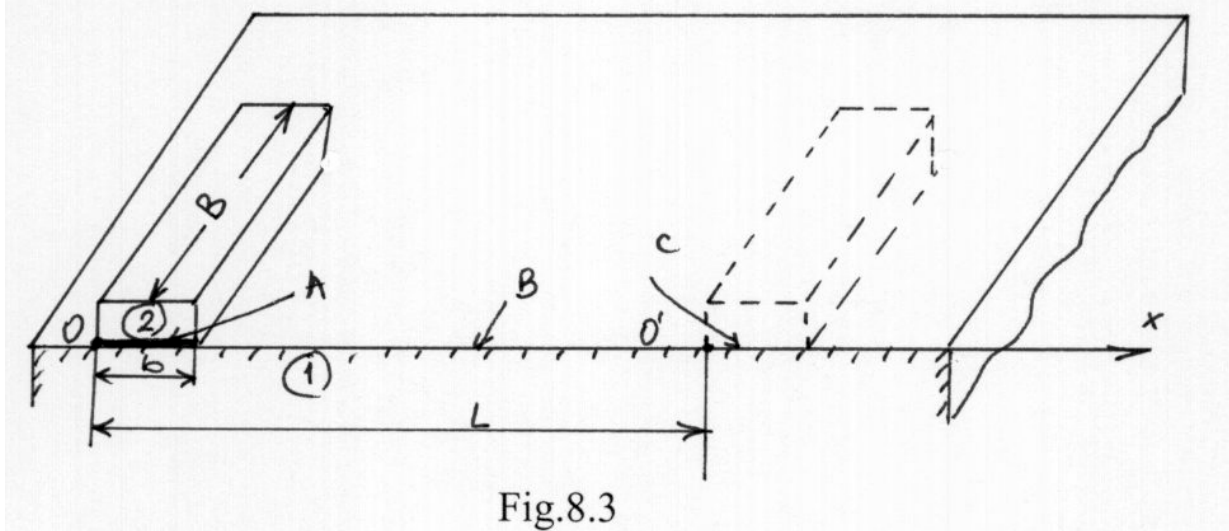
În cazul când rugozitățile sunt sferice, $\bar{d}_1 = \bar{d}_2 = d = \sqrt{\frac{4\Delta A_r}{\rho}}$, astfel că

$$I_h = \frac{4}{\pi} i_h \frac{A_r}{A_n} \approx i_h \frac{A_r}{A_n} \quad (8.4)$$

Această intensitate de uzare se numește intensitate liniară, fiind vorba despre grosimea stratului uzat, măsurată pe direcția perpendiculară pe suprafața de frecare (Kraghelski, Kombalov etc.). Lungimea de frecare L_f se determină pentru fiecare element al cuplei în parte, în funcție de cinematica și forma elementelor.

Exemple:

a) Cupla de translație (ghidaje, etanșări, mecanisme cu culisă, segment-cilindru, sisteme de copiere etc.).



- Aria nominală de contact:

$$A_n = bB \tag{8.5}$$

- Ariile de frecare (A_f)

$$A_{f1} = (L + b)B \tag{8.6a}$$

$$A_{f2} = bB \tag{8.6b}$$

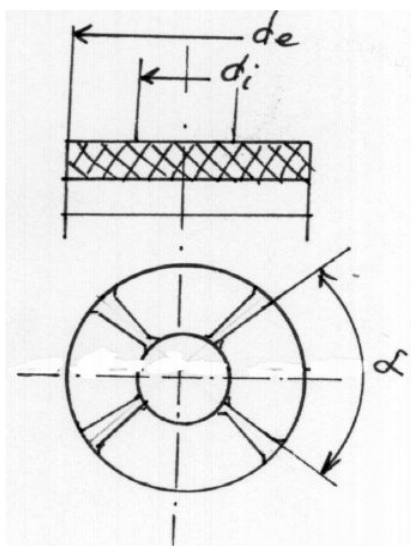
- Lungimile de frecare la un ciclu de mișcare (L_o)

$$L_{o1} \begin{cases} x & \text{pentru un punct situat în zona } 0 \leq x \leq b \text{ (zona A)} \\ b & \text{pentru un punct situat în zona } b < x < L \text{ (zona B)} \\ L+b-x & \text{pentru un punct situat în zona } L \leq x \leq L+b \end{cases} \tag{8.7}$$

- coeficientul de acoperire reciprocă a suprafețelor $\left(\lambda = \frac{A_n}{A_f} \right)$

$$\lambda_1 = \frac{A_n}{A_{f1}} = \frac{bB}{(L + b)B} = \frac{b}{L + b}$$

$$\lambda_2 = 1$$



(8.8a)

(8.8b)

b) Cupla plană de rotație (lagăre axiale, cuplaje prin fricțiune, ambreiaje, frâne disc, etanșări axiale etc.).

- Aria nominală de contact

$$A_n = \frac{1}{2} \left(\frac{d_i}{2} \alpha + \frac{d_e}{2} \alpha \right) \left(\frac{d_e - d_i}{2} \right) Z = \tag{8.9}$$

$$= \frac{\alpha Z}{8} (d_e^2 - d_i^2)$$

unde Z este numărul segmentelor de disc.

- Ariile de frecare (A_f)

$$A_{f1} = A_n = \frac{\alpha Z}{8} (d_e^2 - d_i^2) \quad (8.9a)$$

$$A_{f2} = \frac{\pi}{4} (d_e^2 - d_i^2) \quad (8.9b)$$

Lungimile de frecae la o rotație (L_o)

$$L_{o1} = 2\pi r \text{ pentru } \frac{D_i}{2} \leq r \leq \frac{D_e}{2} \quad (8.10a)$$

$$L_{o2} = r\alpha Z \text{ pentru } \frac{D_i}{2} \leq r \leq \frac{D_e}{2} \quad (8.10b)$$

- Coeficientul de acoperire reciprocă (λ)

$$\lambda_1 = \frac{A_n}{A_{f1}} = 1 \quad (8.11a)$$

$$\lambda_2 = \frac{A_n}{A_{f2}} = \frac{2\pi}{\alpha Z} \quad (8.11b)$$

c) Cupla cilindrică interioară de rotație (lagăr de alunecare, cuplaje etc.)

- Aria nominală de contact

$$A_n = 2\varphi_o RB \quad (R_1 \approx R_2 = R) \quad (8.12)$$

B – lungimea de contact

- Ariile de frecare:

$$A_{f1} = 2\pi RB \quad (8.13a)$$

$$A_{f2} = 2\varphi_o RB \quad (8.13b)$$

- Lungimile de frecare la o rotație (L_o)

$$L_{o1} = 2\varphi_o R \quad (8.14a)$$

$$L_{o2} = 2\pi R \quad (8.14b)$$

- Coeficientul de acoperire reciprocă (λ)

$$\lambda_1 = \frac{A_n}{A_{f1}} = \frac{\varphi_o}{\pi} \quad (8.15a)$$

$$\lambda_2 = \frac{A_n}{A_{f2}} = 1 \quad (8.15b)$$

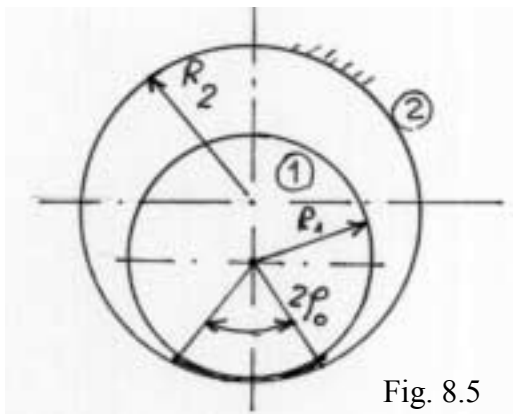


Fig. 8.5

Observație: Unghiul de contact φ_o depinde de încărcare, de proprietățile materialelor 1 și 2 și de geometria elementelor 1 și 2.

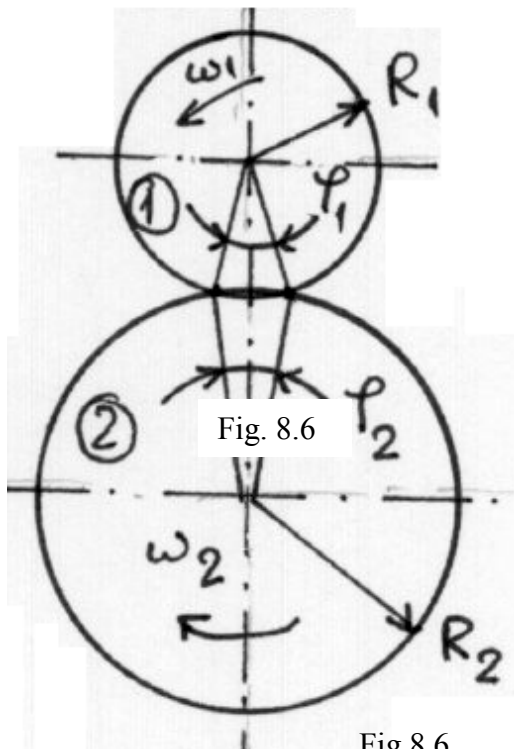


Fig.8.6

$$\lambda_1 = \frac{A_n}{A_{f1}} = \frac{\varphi_1}{\pi} \quad (8.18a)$$

$$\lambda_2 = \frac{A_n}{A_{f2}} = \frac{\varphi_2}{\pi} \quad (8.18b)$$

Observație: Unghiurile de contact φ_1 și φ_2 depind de sarcina exterioară, de proprietățile materialelor și de geometria roților.

Cunoscând lungimea de frecare la un ciclu pentru fiecare element al cuplei ($L_{o1,2}$), numărul de cicluri (N_c) și grosimea totală a stratului uzat $\Delta H_{1,2}$, se poate determina intensitatea liniară de uzare pentru fiecare element $I_{h1,2}$, ca indicator al procesului de uzare:

$$1. I_{h1,2} = \frac{\Delta H_{1,2}}{L_{f1,2}} = \frac{\Delta H_{1,2}}{N_c L_{o1,2}} \left[\frac{\mu\text{m}}{\text{km}} \right] \text{ sau } [-] \quad (8.20)$$

Inversul intensității liniare de uzare se mai numește și rezistență la uzare

$$R_u = \frac{1}{I_h} = \frac{L_f}{\Delta H} [-] \quad (8.21)$$

Alți indicatori ai procesului de uzare:

2. Intensitatea volumică de uzare,

$$I_v = \frac{\Delta V}{L_f} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{km}} \right] \quad (8.22)$$

ΔV fiind volumul de material uzat. Dacă suprafața de contact rămâne constantă în timpul uzării (A_n) și grosimea stratului uzat este uniformă, rezultă:

$$I_v = \frac{\Delta V}{L_f} = \frac{A_n \Delta H}{L_f} = A_n I_h \quad (8.23)$$

d) Cupla cilindrică exterioară de rostogolire

(mecanisme cu came, transmisii prin fricțiune, variatoare de turație etc.).

- Aria nominală de contact

$$A_n = \varphi_1 R_1 B = \varphi_2 R_2 B \quad (8.16)$$

(B – lungimea de contact)

- Ariile de frecare:

$$A_{f1} = 2\pi R_1 B \quad (8.17a)$$

$$A_{f2} = 2\pi R_2 B \quad (8.17b)$$

Lungimile de frecare la o rotație (L_o):

- v_a viteza de alunecare (patinare)

$\omega_1 R_1 > \omega_2 R_2$ - roata 1 este conducătoare

$$L_{o1} = |v_a| t_1 = (\omega_1 R_1 - \omega_2 R_2) \frac{\varphi_1}{\omega_1} = \varphi_1 R_1 \left(1 - \frac{\omega_2 R_2}{\omega_1 R_1} \right)$$

$$L_{o2} = |v_a| t_2 = (\omega_1 R_1 - \omega_2 R_2) \frac{\varphi_2}{\omega_2} = \varphi_2 R_2 \left(\frac{\omega_1 R_1}{\omega_2 R_2} - 1 \right)$$

(8.17a,b)

- Coeficientul de acoperire reciprocă (λ)

3. Intensitatea gravimetrică de uzare,

$$I_g = \frac{\Delta G}{L_f} \left[\frac{\text{g}}{\text{km}} \right], \quad (8.24)$$

ΔG fiind masa de material uzat. Dacă densitatea materialului care se uzează este constantă, atunci:

$$I_g = \rho \frac{\Delta V}{L_f} = \rho I_v. \quad (8.25)$$

Pentru cazul în care și suprafața de frecare este constantă (A_n) rezultă:

$$I_g = \rho A_n I_h \quad (8.26)$$

4. Coeficientul de uzare,

$$k = \frac{\Delta V}{PL_f} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \right] \quad (8.27)$$

unde P este forța normală transmisă.

Dacă suprafața de contact rămâne constantă în timpul uzării (A_n):

$$k = \frac{\Delta V}{PL_f} = \frac{A_n \Delta H}{PL_f} = \frac{\Delta H}{p_n L_f} = \frac{I_h}{p_n}, \quad (8.28)$$

p_n fiind presiunea normală de contact.

5. Coeficientul de sensibilitate la uzare,

$$k^* = \frac{\Delta V \cdot \mu}{L_{mf}} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{J}} \right] \quad (8.29)$$

evidențiat de Ratner, în care μ este coeficientul de frecare, iar L_{mf} – lucrul mecanic consumat prin frecare. În cazul în care coeficientul și forța de frecare sunt constante, rezultă

$$k^* = \frac{\Delta V \cdot \mu}{L_{mf}} = \frac{\Delta V}{F_n L_f} = \frac{I_v}{F_n} \quad (8.30)$$

Dacă, în plus, aria de frecare rămâne constantă, rezultă

$$k^* = \frac{I_h}{p_n} = k \quad (8.31)$$

6. Densitatea aparentă de energie

$$e_R^* = \frac{L_{mf}}{\Delta V} \left[\frac{\text{J}}{\text{mm}^3} \right] \quad (8.32)$$

parametru evidențiat de Fleisher

Pentru cazul în care forța de frecare este constantă, $L_{mf} = F_f L_f = \mu P L_f$, rezultă

$$e_R^* = \frac{\mu P L_f}{\Delta V} = \frac{\mu P}{I_v} \quad (8.33)$$

Dacă, în plus, aria de frecare este constantă în timpul procesului de uzare, rezultă

$$e_R^* = \frac{\mu P}{A_n I_h} = \frac{\mu p_n}{I_h} \quad (8.34)$$

7. Sensibilitatea la uzare,

$$\gamma = \frac{\Delta V}{F_f L_f} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \right], \quad (8.35)$$

parametru evidențiat de d. Moore.

Pentru cazul în care forța de frecare este constantă și aria de contact rămâne constantă în procesul de uzare, rezultă

$$\gamma = \frac{A_n \Delta H}{\mu P L_f} = \frac{I_h}{\mu p_n} \quad (8.36)$$

După valorile rezistenței $R_u = \alpha 10^\beta$, materialele pot funcționa, pentru anumite condiții de lucru, în mai multe clase și subclase. Clasele se consideră după constanta β , iar subclasele după constanta α .

Clase	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R_u	10^3-10^4	10^4-10^5	10^5-10^6	10^6-10^7	10^7-10^8	10^8-10^9	10^9-10^{10}	$10^{10}-10^{11}$	$10^{11}-10^{12}$	$10^{12}-10^{13}$

Subclase	1	2	3	4	5
$\lg \alpha$	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-0,10
α	1,0-1,59	1,59-2,51	2,51-3,98	3,98-6,31	6,31-10,0

8.2. Particule de uzură

Mecanismul formării particulelor de uzură are în vedere corelația factorilor de materiale (elasticitate, vâscozitate, plasticitate) cu cei de lucru (presiune, viteză, temperatură). Starea de deformație din zona de contact și natura materialului conduc la mai multe moduri de formare și îndepărtare a particulelor de uzură, așa cum se vede din tabelul 8.1.

a) Modelul energetic al particulei de uzură (modelul Davies-Rabinowicz)

Se consideră că atunci când două suprafețe sunt în contact, există un schimb mutual de energie. Acest schimb este considerat aleatoriu ca spațiu și timp. Când suprafețele se deplasează și se acoperă reciproc, energia se disipă prin difuzie în interiorul materialului, conform ecuației:

$$E = E_0 \exp(-kt) \quad (8.37)$$

unde e este energia la timpul t ; k – constantă; E_0 – energia corpului în condițiile mediului ambiant.

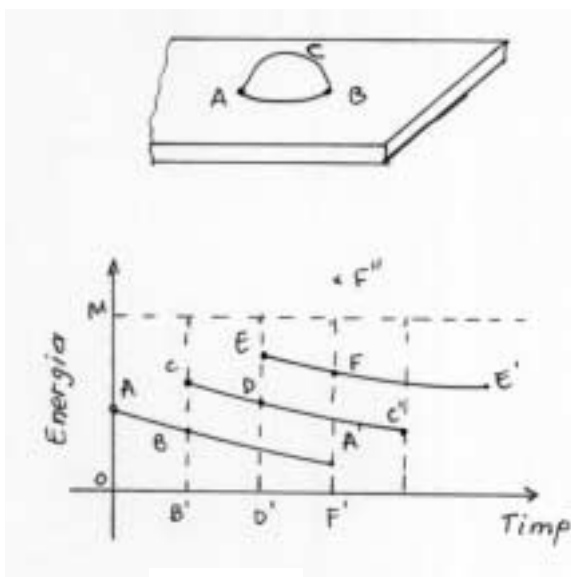


Fig. 8.7

după un timp va avea valoarea DD'.

Se consideră o asperitate semisferică CAB, menținută pe o suprafață plană pe interfața AB. Asperitatea are o anumită energie de adeziune cu substratul.

Când se depășește această energie ca urmare a solicitării mecanice și/sau termice, asperitatea se detașează de corpul principal al metalului.

Se consideră acum că o asperitate are la un moment dat, considerat timpul zero, o anumită energie (punctul A de pe figură). Se presupune că energia primită instantaneu (OA) prin ciocnire scade exponențial în timp (curba AA'). După un timp energia scade la valoarea BB', dar instantaneu, prin ciocnire primește energia BC=OA. Procesul se repetă, energia scăzând după curba CC', astfel că

La un moment dat (F') ca urmare a surplusului de energie, se va depăși energia de adeziune (OM) a asperității ($FF'' > OM$), astfel că asperitatea se va detașa, formând o particulă din uzură prin desprinderea de pe suprafață sau din substrat.

La aplicarea sarcinii, joncțiunile se deformează plastic. Ariile interfaciale ale joncțiunilor nu sunt egale, astfel că mărimea unei joncțiuni este diferită de celelalte joncțiuni vecine. Cele mai mici joncțiuni sunt mai numeroase, dar ele pot crește la creșterea sarcinii normale sau ca rezultat a tracțiunii tangențiale.

O joncțiune rămâne atașată de materialul suport atâta timp cât creșterea ei nu depășește o mărime critică. Peste această mărime, materialul se fragmentează și se detașează sub formă de particulă de uzură.

Se consideră o asperitate de volum V , dintr-un material caracterizat prin tensiunea de curgere σ_c și modulul de elasticitate E și care este etășată de substratul materialului de bază.

Energia totală ce o poate înmagazina este $\frac{1}{2} \frac{\sigma_c^2 V}{E} \left(E_n = \frac{1}{2} \sigma \epsilon V = \frac{1}{2} \sigma \frac{\sigma}{E} V \right)$.

Tabelul 8.1

Material (tipul de frecare)	Modul de uzare	Parametrii de dependență	Autori (anul)
Metal • Alunecare cu asperități de tip pană	• Curgere a suprafeței moi • Curgere pe suprafața dură a asperității	1. Raportul durităților: $r = H_2 / H_1$. 2. Unghiul asperității: θ .	T. Kayaba K. Kato K. Hokkirigawa (1983)
• Alunecare cu asperități sferice	• Așchiere • Formarea unei pene în direcția de mișcare • Brăzdare	1. Gradul de penetrare: $D_p = \delta / R$. 3. Tensiunea de forfecare $f = \tau / \sigma_c$; R – raza sferei, σ_c – tensiunea de curgere; τ – tensiunea de forfecare.	K. Kato K. Hokkirigawa (1985)

<p>Oțel</p> <ul style="list-style-type: none"> Alunecare: știft-disc; fără ungere 	<ul style="list-style-type: none"> Gripare Uzare prin topire Uzare prin oxidare severă Uzare prin oxidare medie Uzare prin plasticizare Uzare foarte redusă 	<p>1. Presiunea medie de contact</p> $\bar{F} = \frac{P}{A_o H_o} = \frac{p_o}{H_o}$ <p>2. Viteza de alunecare</p> $\bar{v} = \frac{v_a r_o}{a}$	<p>S.C. Lim, M.F. Ashby (1987)</p>
<p>Aliaje de aluminiu</p> <ul style="list-style-type: none"> Alunecare: știft-disc; știft inel fără ungere 	<ul style="list-style-type: none"> Formarea de particule fine Delaminarea sub formă de particule Delaminarea unui strat de aliaj de al Transfer de material Uzare prin topire Uzare prin oxidare 	<p>P – forța normală; A_n – aria de contact; H_o – duritatea; p_o - presiunea de contact; v_a – viteza de alunecare; r_o – raza de contact; a – difuzivitatea termică</p>	<p>R. Antoniou C Subramanian (1988) Y. Liu, R. Asthana R. Rohatgi (1991)</p>
<p>Ceramice</p> <ul style="list-style-type: none"> Alunecare și rostogolire 	<ul style="list-style-type: none"> Formare de fulgi Formare de pulbere Brăzdare 	<p>1. $S_c = \frac{p_{max} R_y^{1/2}}{K_{1c}}$</p> <p>2. Coeficient de frecare μ</p> <p>1. $S_c^* = \frac{H_v R_y^{1/2}}{K_{1c}}$</p> <p>2. Coeficient de frecare μ</p> <p>p_{max} – presiunea maximă de contact; R_y – înălțimea maximă a rugozității; K_{1c} – tenacitatea materialului; H_v – duritatea materialului.</p>	<p>K. Hokkirigawa K. Kato (1989, 1990)</p>
<p>Politetrafluor- etilena (PTFE)</p> <ul style="list-style-type: none"> Alunecare cu asperitate rigidă; fără ungere 	<ul style="list-style-type: none"> Formare de așchii Fisurare Brăzdare vâscoplastică Brăzdare vâscoelastică 	<p>1. tgθ (asperitate conică) sau r/R (asperitate sferică)</p> <p>2. E/σ_c</p> <p>E – modulul de elasticitate; σ_c – tensiunea de curgere.</p>	<p>B.J. Briscoe P.D. Evans (1989)</p>

Se apreciază că o parte din această energie (de exemplu 10%) este energie reziduală provenind din interacțiunea asperității cu cealaltă suprafață. Dacă W este lucrul mecanic specific de adeziune și A este aria interfeței, atunci energia de adeziune a asperității care se menține atașată de materialul de bază este WA.

Dacă se acceptă asperitatea ca fiind semisferică cu diametrul 2r, volumul este $V = \frac{2}{3}\pi r^3$ și $A = \pi r^2$.

Particula de uzură se va forma dacă energia înmagazinată este mai mare decât energia de adeziune:

$$\frac{1}{20} \frac{\sigma_c^2}{E} \frac{2}{3} \pi r^3 \geq W \pi r^2 \quad (8.38)$$

$$\text{sau } r \geq \frac{30EW}{\sigma_c^2} \quad \text{sau } 2r \geq \frac{60EW}{\sigma_c^2}.$$

În ipoteza, acceptată pentru metale, $\sigma_c = \frac{H}{3}$ și $\frac{\sigma_c}{E} \approx 3 \cdot 10^{-3}$ (H – duritate), rezultă

$$2r \geq 60.000 \frac{W}{H} \quad (8.39)$$

Rabinowicz a observat că în cazul oțelului, mărimea critică a particulei de uzură a fost de $12 \cdot 10^{-3}$ cm, înainte de a se detașa din materialul de bază.

Raportul W/H este o mărime ce caracterizează comportarea la uzare. Metalele dure au tensiuni ridicate și energii superficiale reduse, astfel că diametrul critic $2r$ este mic.

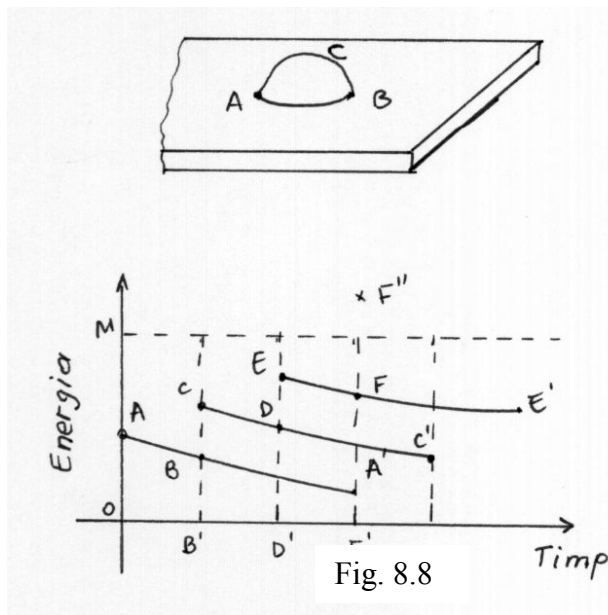
Utilizarea practică a acestui efect este întâlnită la rodajul suprafețelor din materiale dure, când devin foarte netede.

Pe de altă parte, mărimea particulelor de uzură a suprafețelor moi (raportul W/H este ridicat) face ca în timpul alunecării suprafața să devină rugoasă.

b) Modelul obozelii elastice prin frecare al particulei de uzură

Se consideră că o rugozitate (asperitate) este solicitată ciclic la o amplitudine a tensiunii echivalente de contact care nu depășește limita de elasticitate a materialului. În prezența mișcării apare o forță de frecare și implicit tensiuni de tracțiune (τ) pe suprafața de contact. Aceste tensiuni variază în timpul procesului de frecare, deoarece fiecare asperitate trece peste asperitățile suprafeței conjugate existând perioade de timp când asperitatea nu este solicitată sau, funcție de cinematica relativă a suprafețelor, asperitatea este solicitată la tensiuni de frecare (τ) de semne opuse (mișcare alternativă). Cercetările experimentale dovedesc că în cazul obozelii prin frecare, curbele de tip Wöhler (tensiune – număr de cicluri) nu prezintă un palier ca pentru cazul ruperii prin oboseală al corpurilor masive (rupere volumică).

Caracterul linear al curbelor (experimentale, reprezentate în scară logaritmică, indică o relație de forma



$$\tau^t N = \text{const.} \quad (t - \text{parametrul de oboseală}) \quad (8.40)$$

Paralelismul curbelor de rupere prin oboseală și a curbelor de rupere prin oboseală de frecare indică, că parametrul t poate fi considerat ca o constantă de material.

Ținând seama că în zona de contact există și tensiuni normale (σ). Se determină o tensiune echivalentă de oboseală prin frecare ($\sigma_e = k\tau$, k fiind constantă determinată pe baza ipotezelor de rupere).

Cu aceste precizări relația (8.40) poate fi scrisă sub forma:

$$\tau_e^t N = \text{const.} \quad \text{sau} \quad (k\tau)^t N = \text{const.} = \sigma_r^t \quad (8.41)$$

unde σ_r este tensiunea de rupere uniaxială

la un singur ciclu de solicitare. În tabelul alăturat (8.2) se prezintă câteva valori ale tensiunii σ_r și ale parametrului t .

Tabelul 8.2

Material	σ_r , N/mm ²	t	Material	σ_r , N/mm ²	t
Poliformaldehidă	147	1,3	Retinax FK 240	1180	2-3
Policarbonat	840	2,9	Electrografit	250	6,9
Fluoroplast M	63	5,0	Cauciuc butadientrilic	16	3-4

Poliamidă	180	2,0	Fontă cenușie	660	4-5
Policaprolan	700	2-3			

Cunoscând starea de tensiuni din zona de contact (normale și tangențiale) se determină tensiunile principale (σ_1 , σ_2 , σ_3) din punctul considerat ca fiind cel mai sollicitat și tensiunea echivalentă.

De exemplu, pentru contactul elastic al unui cilindru cu un semispațiu, tensiunile principale sunt:

- în limitele zonei de contact ($\alpha=0$):

$$\sigma_1 = p_0 [\mu(1 + \cos\beta) - \sin\beta]$$

$$\sigma_2 = 2\nu p_0 [\mu \cos\beta - \sin\beta]$$

(8.42)

$$\sigma_3 = -p_0 [\mu(1 - \cos\beta) + \sin\beta]$$

unde p_0 – presiunea maximă din centrul de contact; μ - componentă moleculară; ν - coeficientul de frecare; ν - coeficientul lui Poisson;

- pe suprafața semispațiului înaintea rugozității ($\beta=\pi$)

$$\sigma_1 = -2p_0 \mu e^{-\alpha}$$

$$\sigma_2 = -2\nu p_0 \mu e^{-\alpha}$$

(8.43)

$$\sigma_3 = 0$$

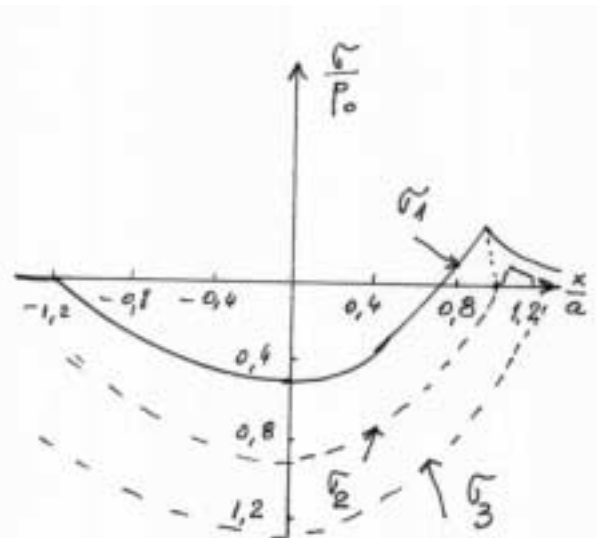
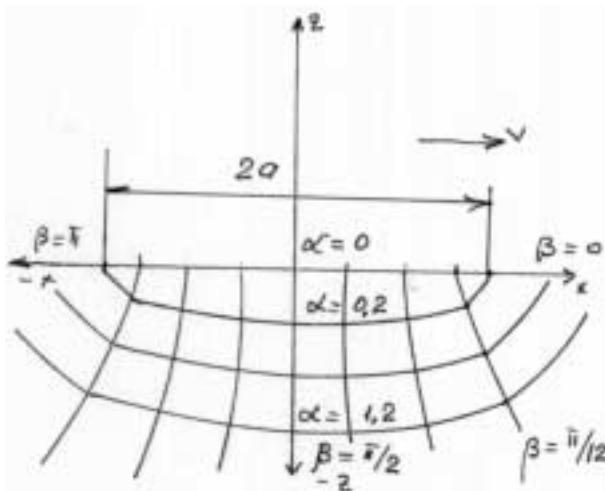
- pe suprafața semispațiului după rugozitatea ($\beta=0$)

$$\sigma_1 = 2p_0 \mu e^{-\alpha}$$

$$\sigma_2 = 2\nu p_0 \mu e^{-\alpha}$$

(8.44)

$$\sigma_3 = 0$$



Ciclul de încărcare al microvolumului deformat elastic al semispațiului se situează pe suprafață, descris, simplu, astfel: în prima jumătate a ciclului, pe suprafața frontală materialul este comprimat, $\sigma_{3\max} = -p_0 (\mu + \sqrt{1 + \mu^2})$, iar în a doua jumătate materialul este întins, $\sigma_1 \neq \sigma_2$ și $\sigma_{3\max} = 2\mu p_0$.

Pentru materiale la care rezistența la întindere (tracțiune) uniaxială σ_t este sensibil mai mică decât rezistența la compresiune (σ_{comp}), cea mai periculoasă este partea a doua a ciclului.

În această categorie pot fi considerate materialele cu elasticitate și rezistență foarte mari.

Pentru materialele cu $\sigma_t \approx \sigma_{com}$, periculoasă este prima jumătate a ciclului de solicitare, când mărimea absolută a încărcării este maximă.

În tabelul 8.3 se prezintă tensiunea echivalentă (σ_e) a suprafeței semispațiului elastic în cea de-a doua jumătate a ciclului de încărcare.

Dacă se consideră că încărcarea medie, presiunea p_r , din zona de contact este dată de relațiile lui Hertz și tensiunea tangențială de tracțiune $\tau = \mu p_r$, se determină din (8.41) numărul de cicluri de solicitare după care stratul de grosime δ se rupe prin oboseală de frecare

$$(k\mu p_r)^t N = \sigma_r^t \Rightarrow N = \left(\frac{\sigma_r}{k\mu p_r} \right)^t \quad (8.45)$$

De exemplu, pentru o rugozitate sferică (raza r , materialul caracterizat prin modulul de elasticitate E , coeficientului lui Poisson ν , rezistența la rupere uniaxială σ_r) mărimile de contact, determinat cu relațiile lui Hertz, sunt:

$$a = \left(\frac{3p_r}{4E^*} \right)^{1/3}; \quad \delta = \frac{a^2}{R}; \quad p_r = p_m = \frac{P}{\pi a^2} = \frac{2}{3} p_o; \quad E^* = \frac{E}{1-\nu^2} \Rightarrow p_m = \frac{2}{\pi} E^* \sqrt{\frac{\delta}{r}}$$

La alunecarea acestei rugozități peste rugozitățile celeilalte suprafețe, cu prezența unei frecări, caracterizate prin coeficientul de frecare μ , vor fi necesare N cicluri de solicitare pentru a se rupe stratul δ prin oboseală de frecare

$$N = \left(\frac{\pi}{2k\mu} \frac{\sigma_r}{E^*} \sqrt{\frac{r}{\delta}} \right)^t \quad (8.46)$$

Acest număr poate fi considerat ca număr de rugozități al suprafeței conjugate deformate de rugozitatea considerată.

Dacă se consideră contactul unei rugozități sferice, rigide cu o suprafață perfect plană elastică, caracterizată prin σ_r și E^* , atunci prin N se înțelege numărul de cicluri (treceri) ale rugozității pentru a deteriora prin oboseală superficială stratul elastic de grosime δ .

Tabelul 8.3

Nr. crt.	Ipoteza de rupere	Relația de calcul pentru starea bidimensională de tensiuni σ_e	Tensiunea echivalentă σ_e , pentru $\alpha=0, \beta=0$.	Constanta de echivalență ($\sigma_e=k\tau$)
1	Încărcarea normală maximă Încărcarea tangențială maximă	$\sigma_e = \sigma_1$	$\sigma_e = 2\mu p_o = 3\tau$	3
2	Energia de formă	$\sigma_e = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2}$	$\sigma_e = 2\mu p_o \sqrt{1+\nu^2} - \nu =$ $= 3\tau \sqrt{1+\nu^2} - \nu$ Pentru $\nu=0,5; \sigma_e=2,25\tau$	$3\sqrt{1+\nu^2} - \nu$

3	P.P. Balandin	$\sigma_e = \frac{1-c}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2}\sqrt{(1-c)^2 \cdot \sqrt{(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + 4c(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2)}}$ <p>cu $c = \frac{\sigma_t}{\sigma_{comp}}$</p>	Pentru $c \rightarrow 1 \Rightarrow$ $\sigma_e = 4\mu p_o \sqrt{1+v^2} - v = 6\tau \sqrt{1+v^2} - v$	$6\sqrt{1+v^2} - v$
4	I.N. Miroliubov	$\sigma_e = \frac{1-c}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1+c}{2}\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2}$	La $c \rightarrow 0$ $\sigma_e = \mu p_o [(1+v) + \sqrt{1+v^2} - v] = 1,5[(1+v) + \sqrt{1+v^2} - v]$	$1,5[(1+v) + \sqrt{1+v^2} - v]$
5	Energia potențială totală	$\sigma_e = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\nu\sigma_1\sigma_2}$	$\sigma_e = 2\mu p_o \sqrt{1-\nu^2} = 3\tau \sqrt{1-\nu^2}$ Pentru $\nu=0,5 \Rightarrow$ $\sigma_e = \frac{3}{2}\sqrt{3}\tau \approx 2,55\tau$	$3\sqrt{1-\nu^2}$
6	Deformații liniare maxime	$\sigma_e = \sigma_1 - \nu\sigma_2$	$\sigma_e = 2\mu p_o (1-\nu^2) = 3\tau(1-\nu^2)$ Pentru $\nu=0,5 \Rightarrow \sigma_e = \frac{9}{4}\tau$	$3(1-\nu^2)$
7	Ecrusarea Moore	$\sigma_e = \sigma_1 - c\sigma_3$	Pentru $c \rightarrow 0 \Rightarrow$ Cazul 1	

c) Modelul ruperii plastice prin frecare a particulei de uzură

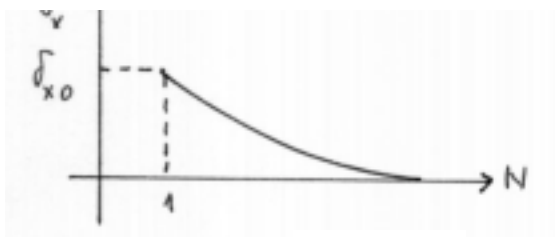


Fig. 8.10

Ruperea prin deformații plastice are loc după un număr de cicluri relativ mic (solicitări oligociclice), N ,

$$N = \left(\frac{\delta_{t0}}{\delta_x} \right)^t \quad (8.47)$$

unde δ_{t0} și t sunt parametrii curbei de oboseală prin frecare; δ_x – amplitudinea deformației

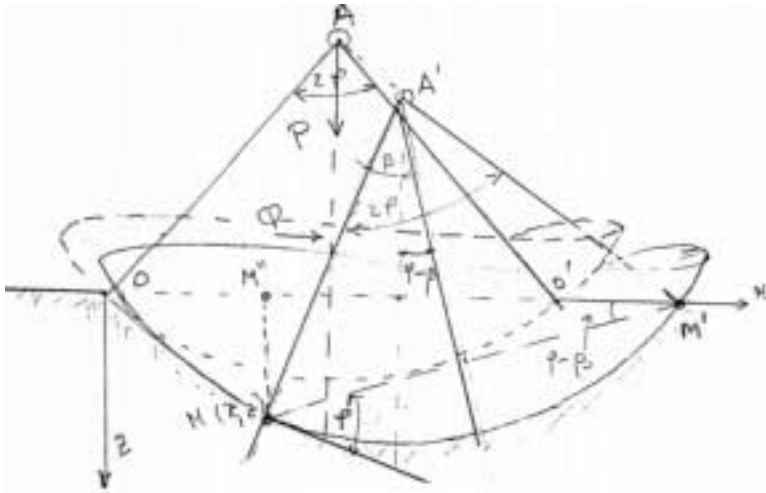
relative plastice.

Amplitudinea deformației relative δ_{x0} diferă puțin de amplitudinea deformației relative de rupere la solicitare uniaxială.

Parametrul $t \cong 2 \dots 3$, deci valori mult mai mici decât în cazul obosealii elastice prin frecare. Pentru contactul unei sfere rigide de rază r cu un semispațiu perfect plastic, se analizează deformația semispațiului.

Sub acțiunea unei forțe normale P sfera rigidă deformează perfect plastic semispațiul formând o calotă sferică cu diametrul $OO' = 2a$ și unghiul solid 2ϕ .

Se consideră sistemul de axe xOz, cu originea în punctul de contact situat la extremitatea sferei după deformare.



Sub acțiunea unei forțe tangențiale Q sfera se deplasează în sensul pozitiv al axei Ox.

Ținând seama că după începerea mișcării, contactul are loc numai pe suprafața frontală din fața sferei (deformarea inițială fiind plastică), astfel că centrul sferei A se va deplasa atât în direcția de mișcare (Ox) cât și-n direcția Oz, la un moment dat fiind în A'.

Traectoria descrisă de punctul sferei ce face ultimul contact cu semispațiul plastic (punctul M(x,z)), $z=z(x)$ se determină din următoarele condiții:

- se consideră diametrul de contact al sferei cu planul (2a) și implicit unghiul 2φ ca fiind constante (materialul plastic își menține proprietățile inițiale (nu se ecrusează și nici nu-și reduce tensiunea de curgere), rezultă $\overline{OO'} = \overline{MM'}$;

- notează cu β unghiul descris de punctul M și centrul sferei A' cu direcția axei Oz; rezultă că tangenta în punctul M la curba $z=z(x)$ este

$$\frac{dz}{dx} = \operatorname{tg}\beta; \tag{8.48}$$

- geometric se poate stabili că unghiul $M'M''M$ este $(\varphi-\beta)$ și că

$$\operatorname{tg}(\varphi - \beta) = \frac{MM''}{M'M''} = \frac{z}{\sqrt{4a^2 - z^2}}; \tag{8.49}$$

- ținând seama de mărimea unghiului φ (mic) și că $\beta \leq \varphi$, se poate aproxima $\operatorname{tg}(\varphi-\beta) \approx \operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\beta$, astfel că

$$\frac{dz}{dx} \approx \operatorname{tg}\varphi - \frac{\frac{z}{2a}}{\sqrt{1 - \left(\frac{z}{2a}\right)^2}} \tag{8.50}$$

Integrând această ecuație diferențială și considerând că traectoria se inițiază în punctul O, se obține

$$\bar{x} = \left(\frac{\alpha}{2} - k^2 \alpha^3 \right) \ln \frac{k\alpha + \bar{z}}{k\alpha - \bar{z}} + \alpha^2 \left(k\bar{z} - \sqrt{1 - \bar{z}^2} + 1 \right) + \frac{\alpha^3}{2} \ln \frac{\sqrt{1 - \bar{z}^2} + \alpha}{\sqrt{1 - \bar{z}^2} - \alpha} - \frac{\alpha^3}{2} \ln \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha}, \tag{8.51}$$

$$\bar{z} \leq \alpha k$$

în care: $\bar{x} = \frac{x}{2a}, \bar{z} = \frac{z}{2a}; k = \operatorname{tg}\varphi; \alpha = (k^2 + 1)^{-1/2}$. La încetarea mișcării pe direcția x

($Q \leq \mu P$, μ - coeficientul de frecare), $\frac{dz}{dx} = 0$ și $\bar{z} = \alpha k \left(\beta = 0, \operatorname{tg}\varphi = \frac{z}{\sqrt{4a^2 - z^2}} \Rightarrow \bar{z} = \alpha k \right)$. Dacă

se consideră că prima penetrație $\bar{z}_o = \frac{1-\alpha}{2k\alpha}$, $z_o = R - R \cos \varphi = \frac{a}{\sin \varphi} - \frac{a}{\sin \varphi} \cos \varphi = a \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}$,

$$\bar{z}_o = \frac{z_o}{2a} = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}, \quad \operatorname{tg} \varphi = k = \frac{2 \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}}{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}} \Rightarrow \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \frac{-1 + \sqrt{1+k^2}}{k} = \frac{1-\alpha}{\alpha k} \quad \text{și că unghiurile } \varphi_k \text{ sunt}$$

mici, se deduce că

$$\frac{\bar{z}_k}{\bar{z}_o} \approx 4, \quad \left(\frac{\bar{z}_k}{\bar{z}_o} = \frac{\alpha_k 2k\alpha}{1-\alpha} = \frac{2 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}{(1 - \operatorname{tg}^2 \varphi)(1 - \cos \varphi)} = 4 \cos^2 \frac{\varphi}{2} \approx 4 \right)$$

ceea ce arată că penetrarea crește de aproape patru ori în prezența alunecării și-n condițiile aceleași sarcini normale.

Analiza ecuației (8.51) arată că pentru $\bar{z} \rightarrow \alpha k$, $\bar{x} \rightarrow \infty$; acest rezultat contravine rezultatelor experimentale, ceea ce arată că în zona deformațiilor mari apare ecruisarea materialului și proprietățile de elasticitate nu mai pot fi neglijate.

Ținând seama de elasticitatea materialului, se poate considera că în urma rugozității, materialul de bază își păstrează parțial forma sa inițială, stabilită ca urmare a alunecării, în aceste condiții unghiul $\beta = \beta_e > 0$.

Abscisa punctului suprafeței deformate (\bar{x}_e), ce corespunde începutului alunecării stabilizate, se determină din (8.51) considerând \bar{z} ca fiind

$$\bar{z}_e = \frac{k - \operatorname{tg} \beta_e}{\sqrt{1 + (k - \operatorname{tg} \beta_e)^2}}$$

$$\sin(\varphi - \beta_e) = \frac{z_e}{2a} = \bar{z}_e \quad (8.52)$$

$$\sin(\varphi - \beta_e) = \frac{\operatorname{tg}(\varphi - \beta_e)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi - \beta_e)}} = \frac{k - \operatorname{tg} \beta_e}{\sqrt{(1+k^2)(1 + \operatorname{tg}^2 \beta_e)}}$$

Mărimea limită a deformației (δ_x) pe direcția de alunecare (x) se poate determina cu relația

$$\frac{\delta_x}{2a} = \bar{x}_e + 0,5 \left(\frac{\sin \beta_e}{\sin \varphi} - 1 \right) \quad (8.53)$$

$$\sin(\varphi - \beta_e) = \frac{M_e M_e''}{M_e' M_e'} = \frac{z_e}{2a} = \bar{z}_e$$

$$\delta_x = x_e + \frac{a}{\sin \varphi} \operatorname{tg} \beta_e = a$$

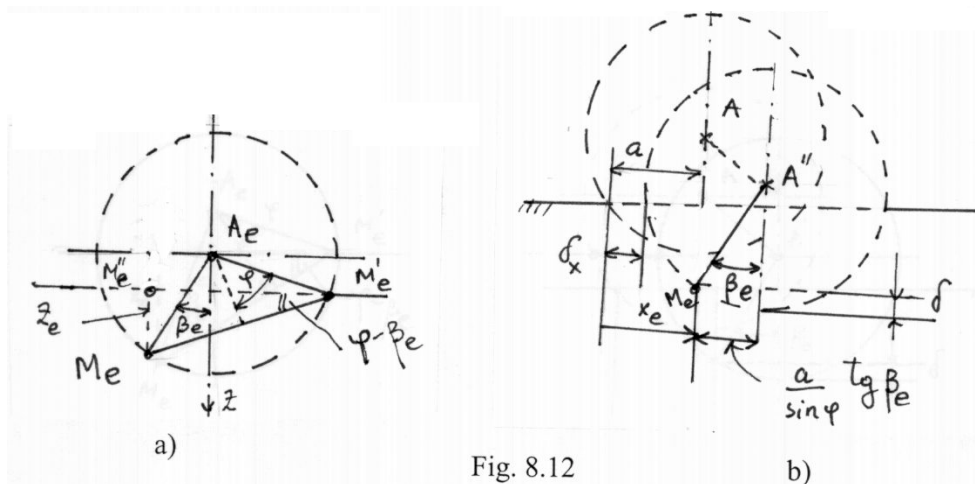


Fig. 8.12

La penetrarea unei rugozități sferice într-un material, trecerea de la deformații elastice la plastice are loc atunci când raportul $\frac{\delta}{r} \approx 10^{-3} \dots 10^{-4}$ (δ fiind adâncimea de penetrare, r – raza).

Dacă considerăm $\frac{\delta}{r} \approx 10^{-3}$, rezultă $\text{tg} \beta_e = \sqrt{\frac{\delta}{R}} = 0,031$; pentru $k=1/3$, rezultă din (8.52) $\bar{z}_e = 0,287$ și din (51) $\bar{x}_e \approx 1,9$.

În final, calculând cu (8.53) rezultă $\frac{\delta}{2a} \approx 1,45$.

Acceptând că ruperea superficială a materialului semispațiului plastic se produce la deformația relativă δ_{x_0} , se poate deduce din (8.45) numărul de cicluri de solicitare după care este îndepărtat, prin uzare, un strat de grosime δ .

d) Modelul curgerii plastice prin frecare (Childs, Challen, Oxley)

Se consideră o rugozitate dură în contact cu o suprafață mai moale. Deteriorarea suprafeței moi se poate realiza în trei moduri (observate experimental):

- Rugozitatea permite materialului mai moale să curgă în fața sa sub forma unei unde, fără să se detașeze materialul la prima trecere; detașarea va avea loc la o trecere ulterioară; este cazul unei rugozități cu unghi de atac mai mic (rugozitate “tocită”, “rotunjită”);
- Rugozitatea așchiază materialul moale de la prima trecere; așchia apare prin curgerea materialului pe rugozitate; este cazul rugozităților “ascuțite”;
- Rugozitățile cu unghiuri intermediare pot produce sau nu așchii, în funcție de starea de tensiuni din zona de contact.

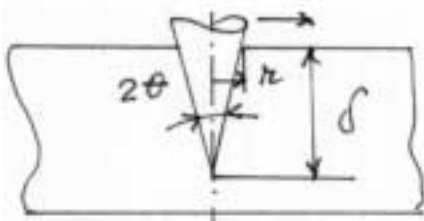


Fig. 8.13

Se acceptă o rugozitate dură de formă conică (unghiul conului θ), tensiunea de forfecare interfacială τ_s și tensiunea de curgere plastică la forfecare a materialului k .

Pe baza teoriei liniilor de alunecare în starea plană de deformații, Childs a demonstrat că formarea prin frecare a unei deformații în fața asperității se produce când

$$\theta \leq 0,5 \arccos \frac{\tau_s}{k}, \quad (8.54)$$

iar producerea așchii când

$$\theta \geq \frac{\pi}{2} - 0,5 \arccos \frac{\tau_s}{k}. \quad (8.55)$$

Aceste condiții limită sunt reprezentate în fig.8.14, prin intermediul curbelor AB, respectiv BC. Între aceste curbe (zona ABC) nu este sigură curgerea materialului.

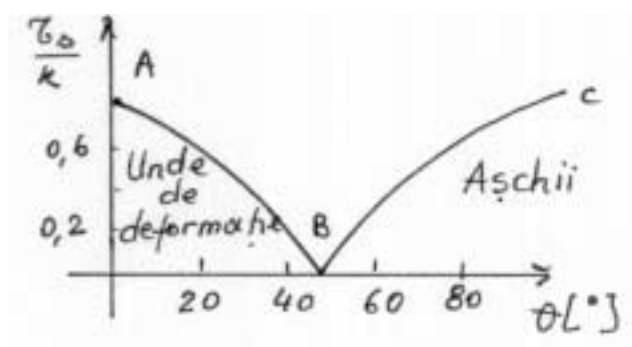


Fig. 8.14

8.3 Forme de uzare

Multitudinea cuplelor de frecare și complexitatea proceselor de frecare și uzare fac ca, în funcție de ponderea unuia sau mai multor parametri de influență, să se admită ca fiind preponderente patru tipuri fundamentale de uzări: adeziune, abraziune, oboseală și coroziune, fiind menționate și alte forme derivate sau particulare. Acest punct de vedere este în concordanță cu clasificarea lui F.T Barwell.

În tabelul 8.4 se indică principalele tipuri de uzare, natura și exemple de cuple de frecare afectate de uzare.

Se subliniază că, practic, tipurile de uzare nu apar de obicei singular, ci asociate: adeziune-abraziune, abraziune-coroziune, oboseală-coroziune etc., sau multiple: adeziune-abraziune-coroziune, adeziune-abraziune-oboeseală-coroziune, cum este cazul uzării prin ciocnire (impact).

Tabelul 8.4. Principalele tipuri de uzare

Tipuri de uzare fundamentale și derivate	Natura uzării	Tipuri de cuple de frecare (organe de mașini) afectate
Adeziune Transfer de material Adeziune moderată Adeziune severă: gripaj incipient, gripaj total	Mecanică, metalurgică și termică	Cele mai multe și variate cuple de frecare: asamblări demontabile, fus-cuzinet, glisiere, ghidaje, piston-cilindru, angrenaje, variatoare, scule așchietoare etc.
Abraziune Microașchiere Rizare prin deformare Eroziune abrazivă Brăzdare Zgâriere		Organele active (brăzdare, cupe, ciocane etc.) ale mașinilor de lucru în mediu abraziv, incintele respective, lanțurile de antrenare, cuplele de frecare insuficient protejate (piston-cilindru, lagăre cu alunecare, rulmenți, angrenaje etc.) sau supuse direct acțiunii abrazive în prezența mediului fluid (palete, angrenaje etc.).

Oboseală Oboseală mecanică pitting incipient, distructiv, exfoliere Oboseală termo- mecanică: fisuri de oboseală termomecanică	Mecanică Termo- mecanică	Organele cu solicitări hertziene ciclice mari în prezența lubrifianului (angrenaje, rulmenți, șuruburi cu bile, camă-tachet, role de lanț) Organele solicitate periodic cu frecare uscată sau supuse unui tratament termic defectuos (rolă, șină-bandaj, angrenaje etc.). Tratamente termice defectuoase care produc fisurarea stratului durificat.
Coroziune Coroziune chimică Ruginire	Chimică	Organele de mașini supuse acțiunii corozive (lagăre unse cu acizi) sau în prezența lubrifianului degradat, a apei (piston-cilindru, lagăre cu alunecare, rulmenți); piese neprotejate.
Coroziune galvanică Ciupire electrică	Electrochimică	Cuple de frecare unse și sub acțiunea curentului electric (lagăre cu alunecare, rulmenți, piston cilindru, angrenaje etc.) Flancurile unor angrenaje, bandaj-cale, contacte electrice supuse acțiunii curentului electric.
Coroziune biochimică	Biochimică	Ghidaje și conductele lichidului de ungere-răcire de la mașini-unelte.
Tribocoroziune Coroziune de fretare	Mecanochimică	Organe de mașini în prezența lubrifianului degradat și a forței de frecare (piston-cilindru), ghidaje, lagăre etc.). Fuzete, rulmenți, caneluri, asamblări filetate etc. supuse coroziunii și unor mici deplasări.
Cavitație	Mecanotermo- chimică	Suprafețele unor organe de mașini supuse imploziilor de gaze, în apă și ulei (palete de turbine, pompe, elice de nave, lagăre cu alunecare, angrenaje etc.).
Impact		Corpurile de mărunțire, unele semicuple, angrenaje
Cojire		Flancuri de angrenaje, rulmenți, organe active de mărunțire etc.
Deformare la rece (rulare)	Mecanică	Suprafețele unor organe de mașini supuse (angrenaje, rulmenți, camă+tachet etc.) deformat plastic în urma unor puternice solicitări mecanice.
Încrêțire		Flancuri de angrenaje solicitate și imperfect unse.
Brinelare		Căi de rulare la rulmenți, flancuri de angrenaje etc.
Interferență		Flancurile unor roți necorijate sau imperfect corijate.
Fisurare de rectificare	Termomecanică	Organe de mașini cu defecte de rectificare (corpuri filetate, angrenaje etc.)
Fisurare de tratament termic		Organe de mașini cu fisuri în urma tratamentului termic și solicitările mecanice (angrenaje, role, corpuri filetate etc.).
Deformare la cald	Termică	Suprafețele unor organe de mașini (rulmenți, angrenaje, ghidaje, discuri de frână etc.) deformat plastic datorită încălzirii și solicitărilor mecanice.
Decolorare (pătare)		Suprafețe supraîncălzite (cămăși de cilindru, flancuri de angrenaje, discuri de frână etc.)

--	--	--