

10. UZAREA DE ABRAZIUNE [A5, A7, A13, A14, A16]

10.1 Forme și domenii de apariție

Uzarea de abraziune este un proces de natură mecanică cu formele indicate în tabelul 8.4 și se manifestă prin uzarea suprafețelor mai moi de către particulele mai dure sau de către rugozitățile suprafeței mai dure.

Particulele mai dure pot proveni din mediul exterior cuplei (praf, nisip etc.) sau de însăși particulele de uzură desprinse în procesul de adeziune sau de oboseală.

Abraziunea se poate produce prin: **microașchiere** de către părțile ascuțite ale particulei dure sau asperităților; prin **rupere** ca urmare a convergenței fisurilor; prin **oboseală** ca urmare a deformațiilor plastice repetate; prin **smulgerea** grăunților duri din material.

În fig. 10.1 a, b, c, d, e, f, g se exemplifică principalele forme ale uzării de abraziune.

Apariția uneia sau alteia dintre aceste forme depinde, în special, de raportul durităților suprafețelor în contact sau de raportul durității particulei abrazive și a suprafeței și de presiunea reală de contact dintre suprafețele conjugate.

Uzarea de abraziune se manifestă însoțită de alte tipuri. De exemplu, în cuzineții lagărelor, împreună cu sau ca urmare a uzării de adeziune; în cilindrii motoarelor cu ardere internă, împreună cu uzarea de coroziune (pe care o activează), de adeziune și oboseală; la malaxoarele de prelucrare a materialelor plastice, împreună cu uzarea de coroziune și adeziune; la distrugerea unor etanșări din industria chimică prin acțiunea abrazivă a produselor uzării de coroziune etc.

Abraziunea este produsă în urma impactului unei particule dure (fig. 10.1 c) în prezența sau în absența unui mediu fluid, rezultând **eroziunea**.

Microașchiera se poate explica prin două mecanisme de apariție: ruperea materialului prin forfecare în planul cu deformațiile plastice maxime; formarea unor fulgi de material prin brăzdare. Prezența lubrifiantului este un factor care stimulează microașchiera prin particule abrazive. Când există lubrifiant, așchiera apare la penetrații mai mici ale particulei abrazive în material decât atunci când nu există lubrifiant. Această observație implică faptul că atunci când o particulă abrazivă este fixată rigid într-o suprafață moale, în prezența lubrifiantului și a încărcării, particula va accelera procesul de uzare.

Muchiile particulei pot provoca așchii sau deformații plastice care nu conduc la forfecări ale materialului. Particulele abrazive noi, obținute prin spargerea altora mai mari sau prin detașarea ca particule de uzare din materiale fragile, conțin mai multe muchii microașchietoare. La deplasarea particulei apar deformații plastice considerabile care conduc la ecruisarea (durificarea) materialului, ca urmare se reduce intensitatea de uzare și se "rotunjesc" muchiile particulei. Acest proces este schematizat în fig.10.2.

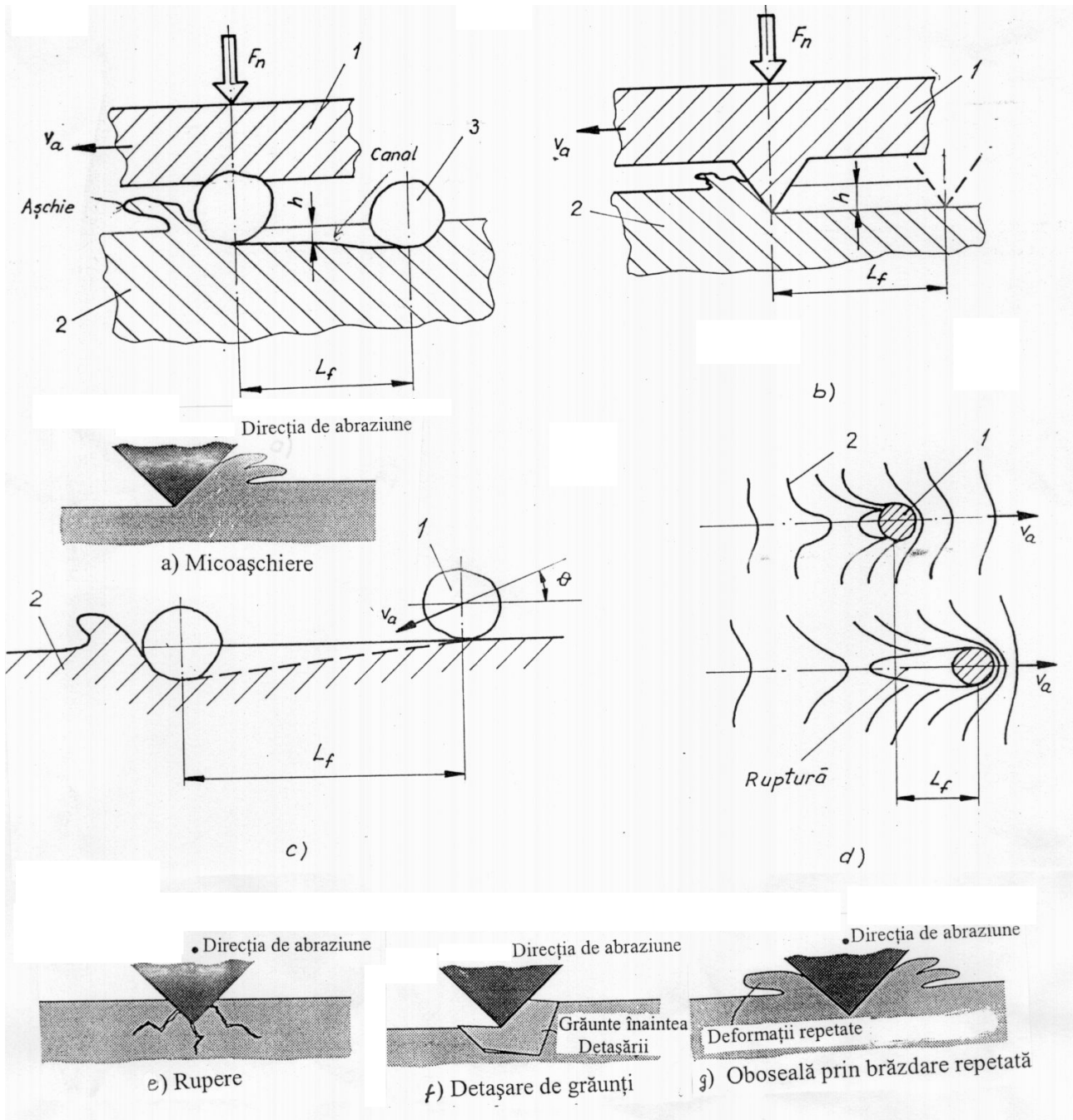


Fig. 10.1 Uzare de abraziune

a) prin particulă dură (3); **b)** rugozitate dură a suprafeței 1;
c) eroziune provocată de particula 1; **d)** abraziune în cazul unui polimer/metal; **e)** rupere;
f) oboseală prin deformare repetată; **g)** detașare de grăunți.

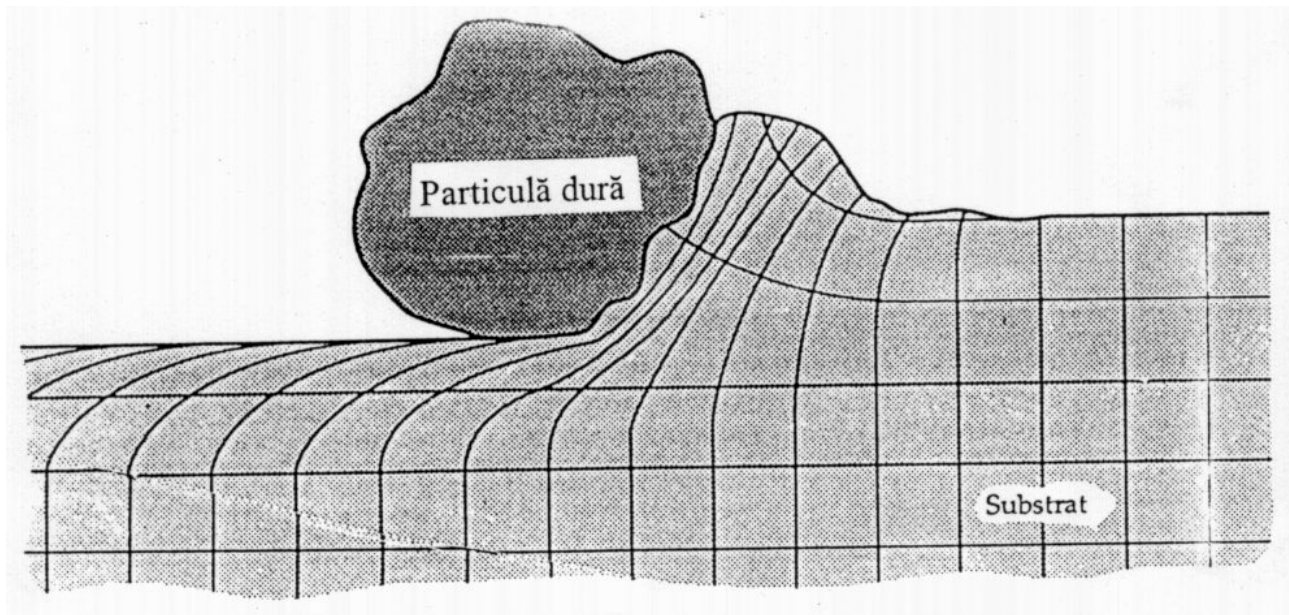


Fig.10.2 Deformația suprafeței la trecerea particulei abrazive

Ruperea a fost evidențiată la materialele fragile (casante) prin studiul generării fisurilor din stratul superficial al unui material transparent de către un penetrator ascuțit, așa cum se observă în fig.10.3.

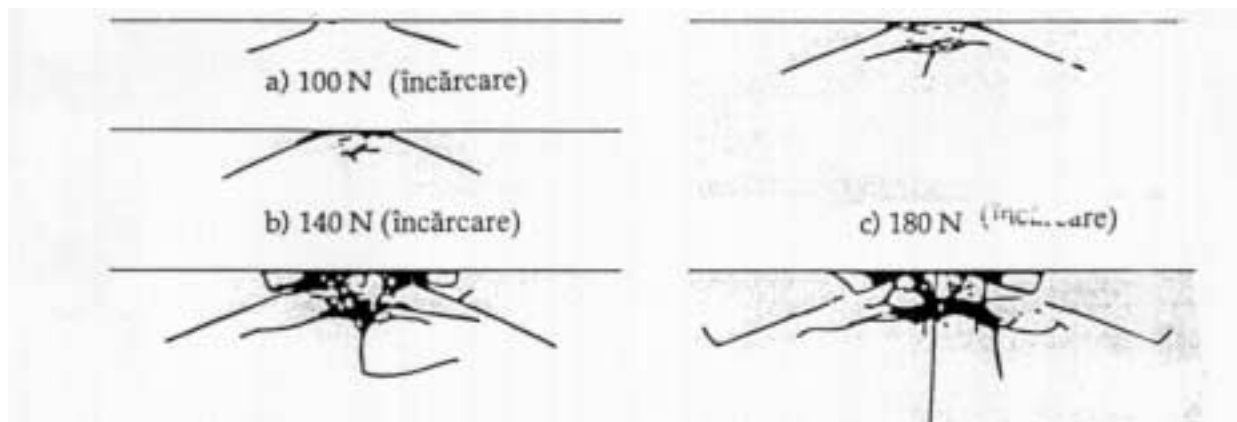


Fig.10.3 Generarea fisurilor în materiale fragile de către un penetrator rigid.

Pentru materialele fragile, ruperea sub penetrator se realizează în trei moduri, astfel: la o anumită forță, fisurile se propagă la circa 30° față de suprafață; la o altă forță mai mare se localizează o fragmentare a materialului fisurat; la o forță critică, fisura se dezvoltă central în adâncime.

Deplasarea succesivă a particulelor pe suprafață conduce la acumularea fisurilor și ca urmare la desprinderea materialului sub forma unor microfragmente.

Oboseala materialului apare în zona deformată de către particula dură. Ca exemplu se consideră a fi cazul în care deformarea laterală a materialului este repetată. În fig. 10.4 se prezintă o secțiune transversală prin zona de trecere a particulei abrazive. Oboseala conduce la intensități reduse și medii de uzare.

Brăzderea reprezintă o formă severă de abraziune, cu rizuri late și adânci, care poate fi produsă direct de contrapiesă (la angrenaje, capul dintelui), de particule mai dure, interpușe (de exemplu, la discurile de frână), de piese metalice și alte materiale dure (la organele active de lucru ale solului).

Zgârierea este forma cea mai blândă de abraziune și se manifestă prin rizuri liniare, paralele, izolate etc.; poate apărea pe diferite piese (flancurile dinților unui angrenaj, cuzinetul unui lagăr, cămașa unui cilindru etc.), fiind produsă tot de interpunerea unor particule mai dure, acțiunea unor rugozități etc.

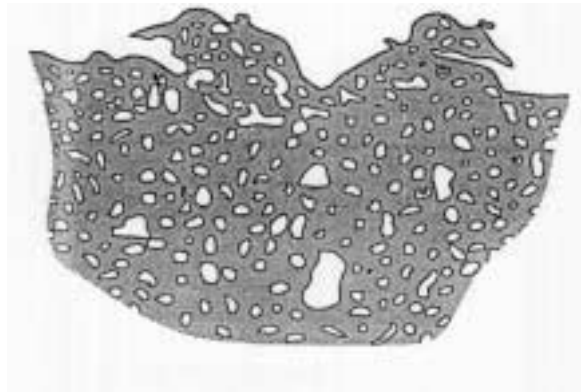
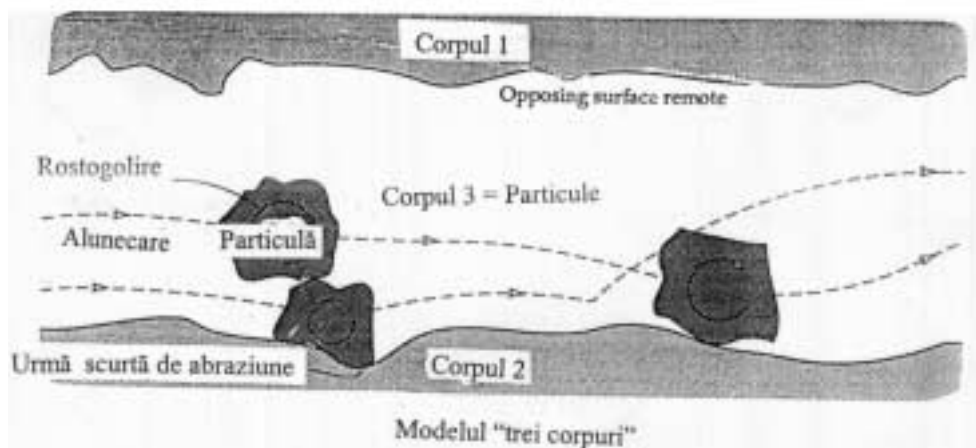
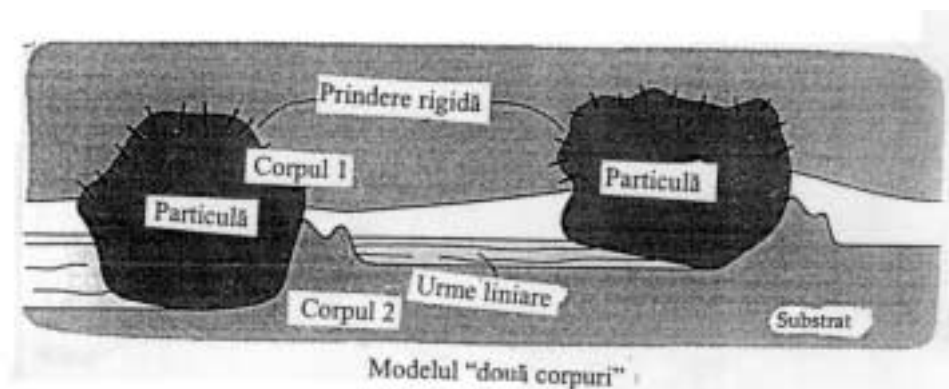


Fig. 10.4 Deformarea laterală a materialului de către particula abrazivă.

Modul de trecere a particulelor abrazive pe suprafața uzată definește două tipuri de uzări, așa cum se observă, schematic în fig. 10.5:

- uzarea cu “două corpuri”;
- uzarea cu “trei corpuri”.



Abraziunea cu două corpuri presupune că particulele sunt fixate într-unul dintre elementele cuplei. Situația poate fi considerată ca fiind similară abraziunii unei suprafețe de către rugozitățile suprafeței conjugate.

Abraziunea cu trei corpuri implică starea liberă a particulelor în interstițiu, particule care se pot rostogoli sau pot aluneca pe suprafață.

Diferența semnificativă dintre cele două moduri de uzare abrazivă este viteza sau intensitatea de uzare. Uzarea cu trei corpuri are viteza de uzare de circa 10 ori mai mică decât uzarea cu două corpuri.

În tabelul 10.1 se exemplifică principalele forme ale uzării de abraziune și vitezele medii de uzare.

Tabelul 10.1

Forme ale uzării de abraziune și valorile medii ale vitezei de uzare

Forma de uzare	Materialul suprafeței	Exemple tipice	Viteza de uzare mm/h
Microașchiere	Oțel austenitic cu mangan	Mori cu ciocane și concasoare	0,127 - 25,4
		Dinții excavatoarelor	0,127 - 12,7
		Cuțitele mașinilor miniere și agricole	0,127 - 2,57
		Căptușeala jgheburilor de ciment	0,0025 - 0,254
Rizare prin deformare	Oțel carbon, slab aliat	Mori cu bile de măcinat minereu în mediu umed	0,0038 - 0,0114
		Mori cu bile de măcinat ciment sub formă de pastă	0,0013 - 0,0038
		Mori cu bile de măcinat ciment uscat	0,0001 - 0,0004
Eroziune	Fontă albă perlitică	Căptușeala aparatelor de amestecat pulberi	2,54 - 25,4
		P o m p e	0,0025 - 0,127
		Paleta amestecătoare	0,0013 - 0,0254

10.2 Elemente de calcul. Evaluare cantitativă

a) Caracterizarea materialelor

Cercetările experimentale și investigațiile teoretice efectuate de M. Hrusciiov și M. Babicev dovedesc că legea de bază a desprinderii particulelor abrazive este de forma

$$I_{uh} \approx U_h / L_f = k(p_n / p_c), \quad (10.1)$$

în care: U_h este grosimea stratului uzat; L_f - lungimea de frecare; k - constantă de proporționalitate; p_n - presiunea nominală de contact; p_c - presiunea de curgere a materialului.

În cazul în care suprafețele de frecare ale elementelor cuplelor se caracterizează prin durități esențial diferite, în zona de contact apar procese de microașchiere.

Rugozitățile suprafeței mai dure, caracterizate prin parametrii curbei de portanță Abbott-Firstone v , b , înălțimea maximă R_{max} și raza de curbura r , brăzdează prin microașchiere suprafața mai puțin

dură, caracterizată prin modulul de elasticitate E , coeficientul lui Poisson μ_p , rezistența de curgere p_c și duritatea HB.

În condițiile aceleiași drum de frecare și aceleiași presiuni nominale de contact, grosimea stratului uzat depinde de duritatea suprafeței de frecare. Luând ca etalon o epruvetă din aliaj pe bază de plumb și cositor, M. Hrusciiov și M. Babicev deduc, experimental, dependența rezistenței relative la uzare : $R_{uz} = h_e/h$, h_e - grosimea stratului uzat al epruvetei etalon (h - grosimea stratului uzat al unei epruvete din materiale diferite) de duritatea suprafeței. În fig. 10.6 a, b, c, d se ilustrează această dependență pentru diferite metale pure (fig. 10.6a), minerale (fig. 10.6 b), oțeluri tratate termic (fig. 10.6 c) și aliaje durificate prin roluire (fig. 10.6 d).

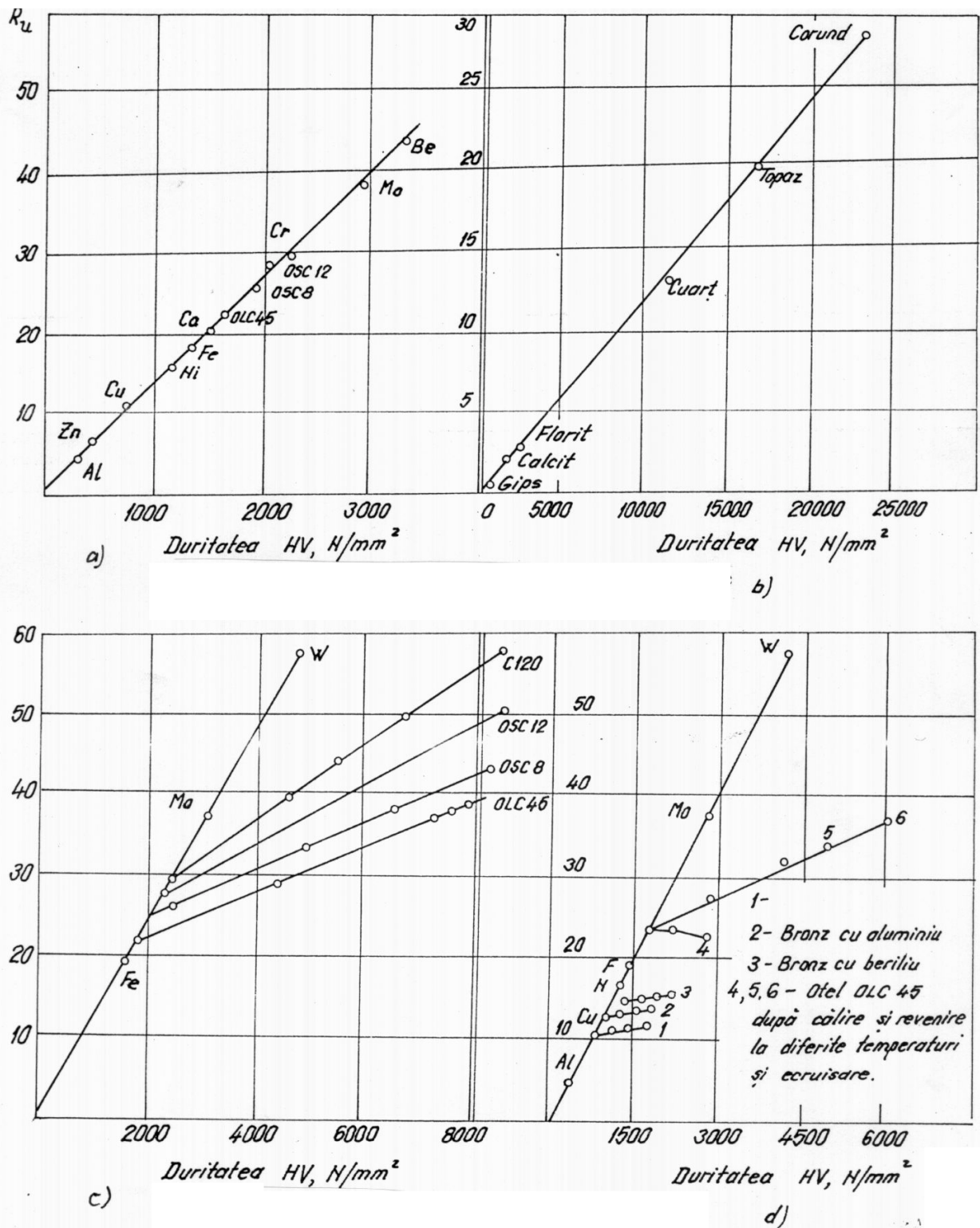


Fig. 10.6 Dependența rezistenței relative la uzare de duritate pentru diferite metale pure (a), minerale (b), oțeluri tratate termic (c) și aliaje durificate prin roluire (d).

Pentru toate categoriile de materiale se observă o dependență liniară a rezistenței relative la uzare de duritatea suprafeței. Prin interpretarea rezultatelor experimentale ale lui M. Hruscirov și M. Babicev, G. Fleischer și colaboratorii deduc dependența intensității adimensionale de uzare de duritate; astfel, pentru metale pure

$$I_{uh} = 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ HV}^{-0,79} \quad (10.2)$$

HV fiind duritatea Vickers în N/mm^2 , iar pentru polimeri

$$I_{uh} = 1,42 \cdot 10^{-3} \text{ HV}^{-0,27} \quad (10.3)$$

Luând în considerare modulul de elasticitate (E) ca parametru al materialelor, aceiași autori deduc pentru metale pure dependența

$$I_{uh} = 209E^{-1,31} \quad (10.4)$$

E fiind în N/mm^2 .

Pentru oțelurile carbon nealiat și netratate termic și pentru aliaje din sistemul Ni-Cu și Pb-Sn, cercetările experimentale dovedesc dependențe ale intensității adimensionale de uzare de modulul de elasticitate de tipul (10.4), însă cu alte valori ale coeficientului de proporționalitate și exponentului. În schimb, oțelurile perlitice, obținute prin durificarea martensitei, deși au același modul de elasticitate, se caracterizează prin intensități de uzare semnificativ mai mici decât celelalte oțeluri.

Un parametru important pentru caracterizarea materialelor din punctul de vedere al rezistenței la uzare abrazivă, este energia moleculară de coeziune pentru polimeri e_c și de sublimare pentru metale e_s . Astfel,

$$I_{uh} = e_s^{-1,72} \quad \text{pentru metale pure}$$

și

$$I_{uh} = 8,6 \cdot 10^{-4} e_c^{-1/2} \quad \text{pentru polimeri,} \quad (10.5)$$

e_s și e_c fiind în kJ/kmol .

Ca indicator al proprietăților materialelor, din punctul de vedere al rezistenței la uzare, se poate aprecia temperatura de topire și volumul atomic.

b) Modele analitice ale uzării abrazive

1) Modelul conului rigid ideal

Se consideră un con rigid, fixat într-o suprafață care se deplasează cu viteza constantă pe cealaltă suprafață perfect netedă și deformabilă plastic (fig.10.7)

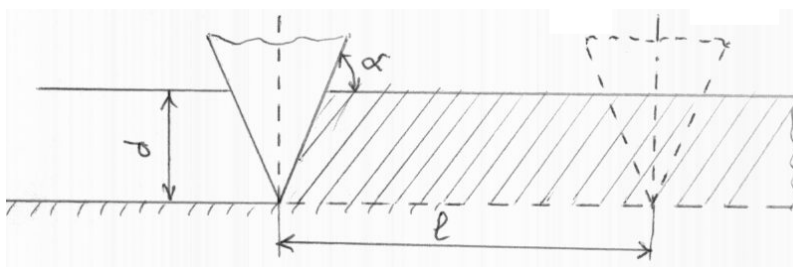


Fig. 10.7 Modelul de abraziune cu con rigid.

Adâncimea de penetrare plastică a conului (d) este funcție de rezistența de curgere a materialului suprafeței, care poate fi considerată ca fiind duritatea (H), de unghiul de “atac” al conului (α) și de forța normală F_n . Condiția de echilibru mecanic impune

$$F_n = 0,5\pi(d \cdot \text{ctg}\alpha)^2 \cdot H \quad (10.6)$$

Volumul ideal de material îndepărtat de con, în deplasarea sa pe distanța L_f , este

$$V_u = L_f \cdot d^2 \cdot \text{ctg}\alpha = \frac{2L_f \cdot \text{tg}\alpha}{\pi H} F_n \quad (10.7)$$

Volumul total de uzură se obține prin însumarea uzurii produse de toate conurile. Considerând toate conurile identice și uniform distribuite și forța normală totală F_{nt} , se deduce

$$V_{ut} = \frac{2L_f \cdot \text{tg}\alpha}{\pi H} F_{nt} \quad (10.8)$$

Intensitatea volumică de uzare (definiția 8.22) este

$$I_v = \frac{V_{ut}}{L_f} = \frac{2 \cdot \text{tg}\alpha}{\pi H} F_{nt} \quad (10.9)$$

Relațiile (10.8) și (10.9) pot fi considerate ca indicatori ai eficienței la abraziune a conului.

2. Modelul conului rigid real

În procesul de penetrare a conului rigid (fig. 10.7) în suprafața contrapiesei, aceasta se deformează în apropierea conului. Funcție de caracteristicile de elasticitate și de plasticitate ale materialului, în apropierea conului apar deformații plastice care pot conduce la curgerea materialului și formarea unor borduri (cazul materialelor tenace, ductile- fig. 10.8 a) sau pot conduce la cratere prin fisurare (cazul materialului fragile, casante- fig. 10.8 b).

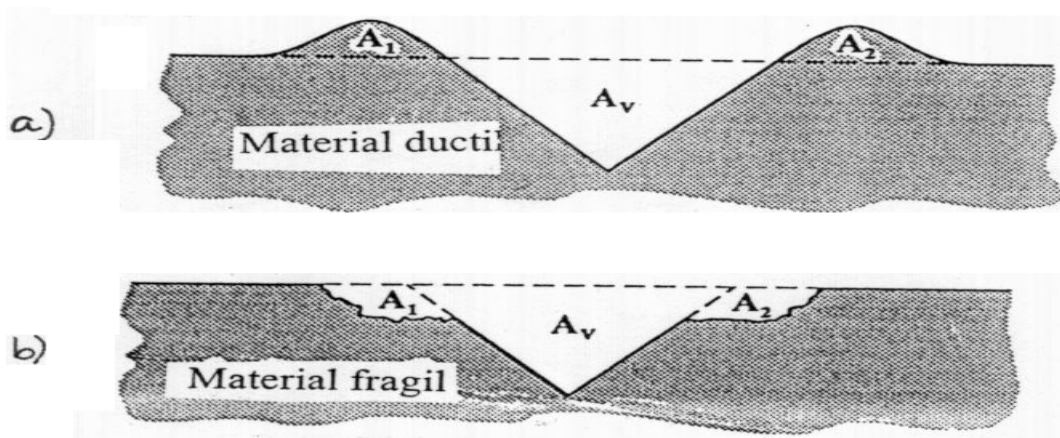


Fig. 10.8 Model pentru abraziunea unui material: a) ductil; b) casant.

Se definește **parametrul de abrazivitate**, f_{ab} , ca raportul dintre volumul de material deplasat în procesul de uzare și volumul urmei de uzură.

Pentru materialele ductile

$$f_{ab} = 1 - (A_1 + A_2) / A_v \quad (10.10 a)$$

Pentru materialele casante

$$f_{ab} = 1 + (A_1 + A_2) / A_v \quad (10.10 b)$$

unde A_v este aria secțiunii transversale a urmei de uzură, iar $(A_1 + A_2)$ este aria secțiunii transversale a bordurilor formate de muchii sau aria secțiunii a craterelor formate de muchii,

Atunci când $f_{ab} = 1$, procesul de uzare se manifestă ca microașchiere ideală, iar când $f_{ab} = 0$, procesul de uzare se manifestă ca microbrăzdare (volumul de material se conservă fără să fie detașat). Pentru materialele tenace $f_{ab} < 1$, iar pentru cele casante $f_{ab} > 1$.

Intensitatea liniară de uzare (I_h) este

$$I_h = V_u / (L_f A) = f_{ab} A_v / A \quad (10.11)$$

unde V_u este volumul de material îndepărtat prin uzare, L_f – lungimea (distanța) de alunecare (frecare), A -aria aparentă de contact dintre cele două elemente ale cuplei.

Raportul dintre aria secțiunii transversale a urmei de uzură A_v și aria aparentă A a fost corelat de Zum Ghar [] ca funcție de de forma abrazivului (ϕ_1), presiunea medie de contact (p) și duritatea materialului mult deformat (H_{def})

$$A_v/A = \phi_1 p/H_{def} \quad (10.12)$$

Pentru particule abrazive piramidale, experimental s-a constatat că parametrul $\phi_1 = 0,1$.

Parametrul de abrazivitate f_{ab} se determină ca funcție de caracteristicile reologice ale materialului deformabil.

Astfel, pentru materialele ductile, pe baza principiilor plasticității, se deduce

$$f_{ab} = 1 - (\phi_{lim} / \phi_s)^{2/\beta} \quad (10.13)$$

unde ϕ_{lim} este deformația plastică limită a materialului uzat; $\phi_{lim} = 2$ este o valoare tipică;

ϕ_s – deformația plastică efectivă realizată de particula abrazivă asupra materialului uzat.

β - parametru ce descrie înclinarea curbei de deformație cu grosimea stratului deformat. Acest parametru este influențat de ecruisarea materialului uzat. Valoarea tipică $\beta = 1$.

Prin înlocuirea parametrului de abrazivitate f_{ab} (10.13) și a raportului A_v/A (10.12), se deduce expresia intensității liniare de uzare (10.11) pentru materialele ductile I_{hd} .

Pentru materialele casante, intensitatea liniară de uzare, I_{hc} , este

$$I_{hc} = \phi_1 p/H_{def} + \phi_3 A_f D_{ab} p^{1,5} H^{0,5} \mu^2 \Omega / K_{IC}^2 \quad (10.14)$$

unde:

ϕ_3 este un factor ce depinde de geometria craterului format (fig. 10.8 b) în procesul de uzare. Pentru particule piramidale $\phi_3 \approx 0,12$;

A_f – fracția din aria materialului curs sub formă de lamele casante;

D_{ab} – diametrul efectiv al particulelor abrazive [m]. Valori tipice 30 ... 100 μm ;

H_{def} – duritatea materialului deformat [Pa];

H - duritatea materialului uzat în stare nedeformată [Pa];

μ - coeficientul de frecare dintre muchia activă a particulei abrazive și suprafața uzată. Pentru condiții de lucru nelubrificate $\mu = 0,1 \dots 0,5$;

K_{IC} - tenacitatea la rupere prin tracțiune [$\text{m}^{0,5}\text{Pa}$];

Ω - parametrul de încărcare, definit ca

$$\Omega = 1 - \exp(-p / p_{crit})^{0,5} \quad (10.15)$$

unde:

p_{crit} este presiunea critică pe suprafața materialului casant ce conține fisuri sau lamele [Pa], determinabilă ca funcție de caracteristicile materialului casant:

$$p_{crit} = \phi_2 \lambda K_{IIC}^2 / (D_{ab}^2 H \mu^2) \quad (10.16)$$

unde:

ϕ_2 este un factor geometric referitor la eficiența particulei abrazive de a produce particulă de uzură;

λ - distanța medie dintre defectele materialului [m]; de exemplu, pentru oțelurile martensitice $\lambda = 40 \dots 120 \mu\text{m}$;

K_{IIC} - tenacitatea la rupere prin forfecare a materialului uzat [$\text{m}^{0,5}\text{Pa}$]. De exemplu, pentru oțel de scule $K_{IIC} = 10 \dots 20 [\text{m}^{0,5}\text{Pa}]$ și pentru fontă nodulară 30...50 [$\text{m}^{0,5}\text{Pa}$].

În cazul în care $p \leq p_{crit}$, parametrul de încărcare $\Omega = 0$.

Din analiza intensității liniare de uzare a materialelor casante, se observă că pe lângă duritate, o importanță deosebită o are tenacitatea la rupere, ca proprietate a materialului.

Pentru materialele ce prezintă ductilitate și fragilitate cu ponderi diferite, intensitatea liniară de uzare se obține prin însumarea intensităților celor două forme extreme de uzare (ductile I_{hd} și casante I_{hc}).

3. Modelul microașchiei rigid-plastice

Se consideră particula abrazivă fixată sau rugozitatea cu unghiul de atac α (fig. 10.9).

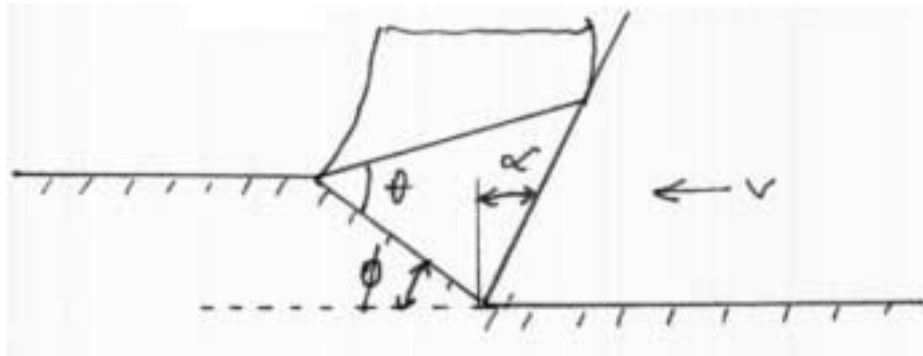


Fig. 10.9 Modelul de formare a așchiei.

Pe baza teoriei plasticității și utilizând liniile de alunecare Hencky se deduce condiția de formare a microașchiei [] și anume unghiul planului de forfecare ϕ trebuie să fie pozitiv. Acest unghi se determină din sistemul de ecuații

$$\begin{cases} \operatorname{tg}\theta = 1 + 2(\pi/4 - \phi) - C_n \\ \theta = \pi/2 + \phi + 0,5 \arcsin(f \sin(2\theta)) - \alpha \end{cases} \quad (10.17)$$

în care: f este coeficientul de adeziune dintre materialul deformabil plastic și particula abrazivă sau rugozitate, definit ca raportul dintre rezistența la forfecare a stratului de aderență și rezistența la forfecare a materialului. Acest coeficient este un indicator al stării de ungere dintre material și particula abrazivă fixată sau rugozitate;

C_n - coeficient de ecrisare a materialului, determinabil experimental; valoarea uzuală $C_n = 1$.

Rezolvarea numerică a sistemului (10.17) conduce la valorile pozitive ale unghiului planului de forfecare ϕ_p ilustrate în fig. 10.10, ca funcție de unghiul de atac α și ca funcție de coeficientul de adeziune f .

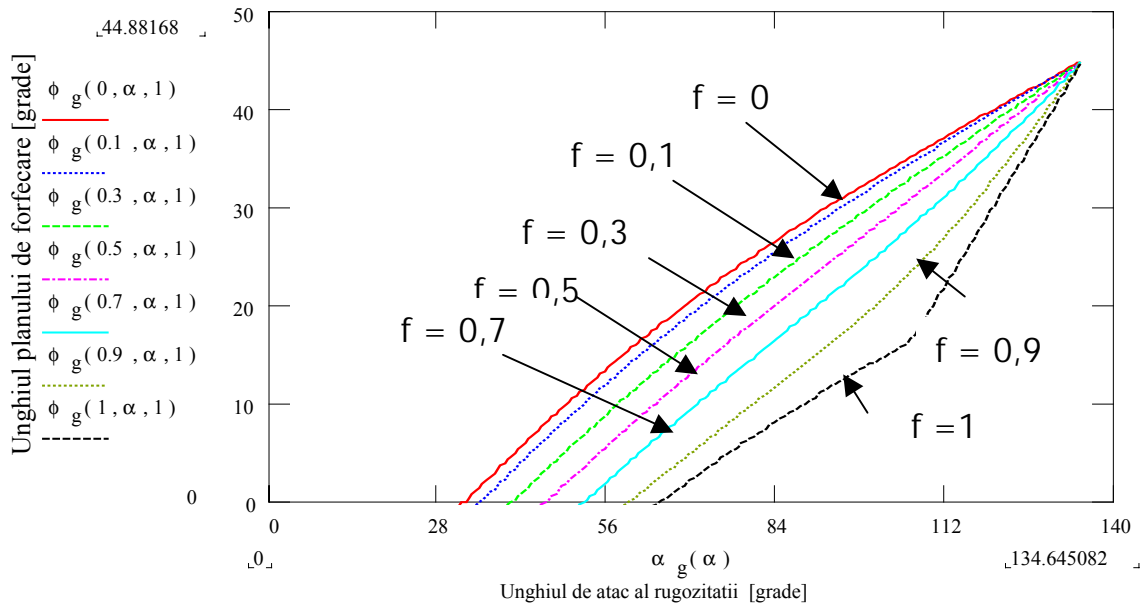


Fig. 10.10 Variația unghiului planului de forfecare ϕ_g cu unghiul de atac al rugozității sau al particulei α_g , pentru diferite valori ale coeficientului de adeziune f .
 Definind coeficientul de uzare, $k_{uz} = V H / (F_n L_f)$, (V – volumul de material uzat, H – duritatea materialului, F_n – forța normală, L_f – lungimea de frecare), se deduce

$$k_{uz} = \frac{3\sqrt{3}}{[1 + 2(\frac{\pi}{4} - \Phi_p)].ctg\Phi_p - 1} \tag{10.18}$$

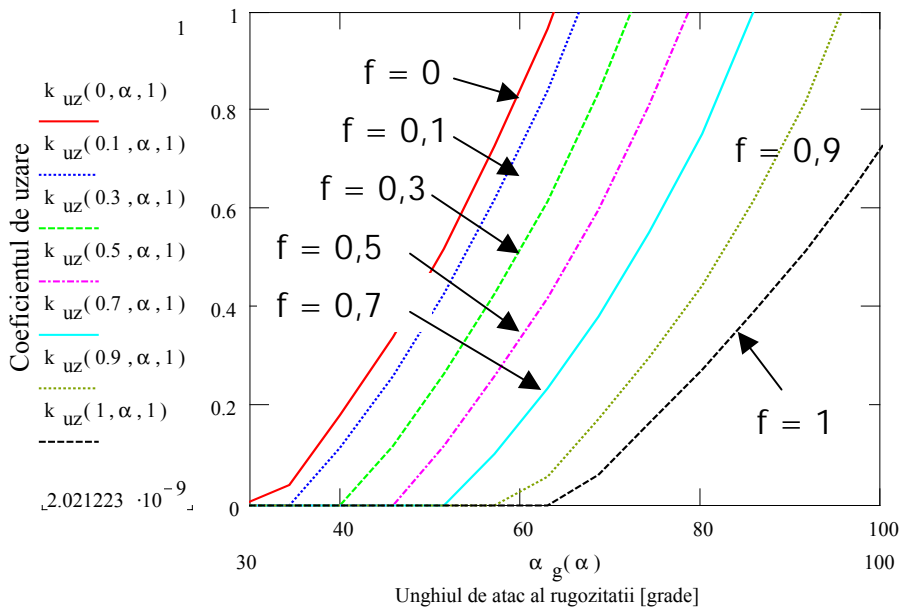


Fig. 10.11 Variația coeficientului de uzare cu unghiul de atac al rugozității sau al particulei α_g , pentru diferite valori ale coeficientului de adeziune f .

În fig.10.11 se prezintă variația acestui coeficient cu unghiul de atac al rugozității sau al particulei fixate, pentru diferite valori ale coeficientului de adeziune f .

4. Model de uzare abrazivă oligociclică

În condițiile uzării prin adeziune, atunci când particula apare la un singur ciclu de solicitare se poate considera ca microașchiere. Astfel, în domeniul deformațiilor elastice, din (9.10) pentru $n=1$ și din intensitatea de uzare (9.15), se deduce

$$I_{uh} = c_{ae} (1 - \mu_p^2) p_n / E, \quad (10.19)$$

în care $c_{ae} = 2\pi \sqrt{v} \Gamma(v + 3/2) / [4(v + 1)\Gamma(v + 1)]$.

Pentru microașchiera în domeniul plastic, intensitatea de uzare (9.19), în condițiile $n = 1$, devine

$$I_{uh} = c_{ap} (p_n / HB) (p_c / p_n)^{1/2}, \quad (10.20)$$

în care $c_{ap} = \left\{ 1 / [2(v + 1)b^{1/2}] \right\} \cdot [vR_{max} / (2r)]^{1/2}$.

5. Uzarea suprafețelor ca urmare a particulelor abrazive antrenate în interstițiu

În cazul în care în zona de contact pătrund particule abrazive, fie ca urmare a lubrifiantului incorect filtrat, fie ca urmare a suspensiilor abrazive din mediul ambiant, de obicei praf, intensitatea de uzare ia în considerare atât caracteristicile mecanice ale suprafețelor de frecare și elementele geometrice și cinematice ale elementelor cuplei de frecare.

În fig. 10.12 a, b se indică schema unui contact hertzian care antrenează particule abrazive. Aceste contacte sunt caracteristice rulmenților, roților dințate, camelor, variatoarelor cu fricțiune, lanțurilor, lagărelor cu lunecare cu mișcare continuă și oscilantă etc.

În interstițiu particula abrazivă poate fi distrusă prin spargere, dacă tensiunea de contact depășește o valoare critică, caracteristică materialului.

Astfel, pentru cuarț, tensiunea critică $\sigma_a \approx 400 \text{ N/mm}^2$, iar pentru corund $\sigma_a \approx 1000 \text{ N/mm}^2$. Notând cu r_a - raza medie a particulelor abrazive, cu h_a - deformația abrazivului și cu H - duritatea, se prezintă în fig. 10.13 condițiile de distrugere a particulelor a particulelor de cuarț și corund.

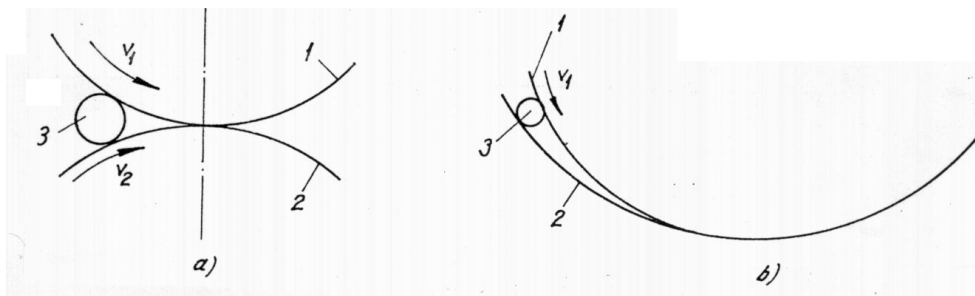


Fig.10.12. Schema contactului unei cuple hertziene cu contact exterior (a) și interior (b) în prezența particulelor abrazive (1,2 - elementele cuplei, 3 - pariculă abrazivă)

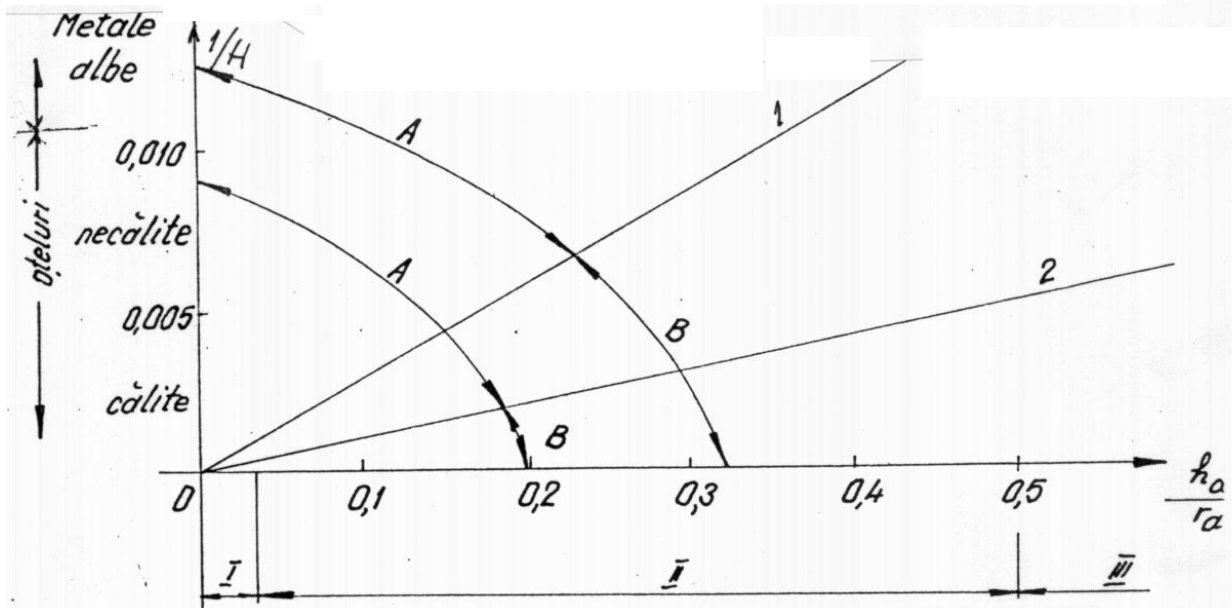


Fig. 10.13. Condițiile distrugerii particulei abrazive în interstițiu
 (A - zonă fără distrugere, B - zonă cu distrugere;
 I - contact elastic, II - contact plastic, III - microașchiere;
 1 - cuarț, 2 - corund).

I. Kraghelski și G. Yampolski au studiat mecanismul formării particulei de uzură în condițiile antrenării particulei abrazive în interstițiul celor două elemente ale cuplei de frecare, luând în considerație fenomenele de oboseală generate de deformarea repetată a suprafețelor.

Prin interpretarea rezultatelor teoretice ale lui I. Kraghelski și G. Yampolski, se deduce dependența intensității de uzură I_{uh} de principalii parametri ai adezivului (A) ai materialelor (M) și de regimul cinematic (K):

$$I_{uh} = 3,5 \cdot 10^{-10} AK/M \quad (10.21)$$

Parametrul abrazivului A are forma

$$A = \varepsilon_a^{2/3} r_a^{0,5} \sigma_a^{2,5} \quad (10.22)$$

în care ε_a este concentrația particulelor abrazive în lubrifianț sau în mediul de lucru, în %; r_a - raza medie a particulelor abrazive, în mm; σ_a - rezistența de rupere a particulei abrazive în MPa.

Grupa factorilor de material (M):

- pentru materialul elementului 1

$$M_1 = \varepsilon_{01}^t HB_1^{1,5} HB_2 \quad (10.23)$$

- pentru materialul elementului 2

$$M_2 = \varepsilon_{02}^t HB_1 HB_2^{1,5} \quad (10.23')$$

unde $\varepsilon_{01}, \varepsilon_{02}$ - deformațiile relative la rupere ale celor două materiale, în [%]; t - exponent caracteristic curbei de oboseală; HB_1, HB_2 - duritățile Brinell ale suprafețelor, în $[daN/mm^2]$.

Grupa factorilor cinematiци K:

- pentru elementul 1 al cuplei:

$$K_1 = \sqrt{\rho_R} \frac{n_{\omega 1}}{\alpha v_1 + \beta v_2} \quad (10.24)$$

- pentru elementul 2 al cuplei:

$$K_2 = \sqrt{\rho_R} \frac{n_{\omega 2}}{\alpha v_1 + \beta v_2} \quad (10.24')$$

unde ρ_R - raza de curbura redusă din zona respectivă de contact, în [mm]; $n_{\omega 1}$, $n_{\omega 2}$ - numărul ciclurilor de solicitare pentru elementul 1, respectiv 2 al cuplei de frecare, în [cicluri/h]; v_1 , v_2 - vitezele tangențiale din punctul de contact, în [m/s]; α , β - probabilitățile medii de fixare a particulei abrazive pe suprafața elementului 1 și respectiv pe 2:

$$\alpha = \frac{HB_2}{HB_1 + HB_2}; \quad \beta = \frac{HB_1}{HB_1 + HB_2}.$$

În funcție de particularitățile geometrice ale diferitelor cuple de frecare (angrenaje, rulmenți, lagăre cu alunecare, variatoare cu fricțiune, lanțuri, piston-cilindru etc.) se pot deduce expresiile factorului cinematic K și indicarea cazului cel mai defavorabil.

6. Modele de uzare abrazivă prin eroziune

În cazul în care particulele solide abrazive, aflate în suspensie în fluidul de lucru al unor cuple de frecare (paletele turbinelor, elicele motoarelor cu reacție, coturilor unor conducte prin care se transportă fluide etc.), sau particule de lichid lovesc o suprafață solidă, în zona de contact au loc procese de alunecare ale particulei și de deformare a suprafeței. Prezența mișcării relative a particulelor și acțiunea lor repetată asupra suprafeței fac ca în zona de contact să apară particule de uzură, modificând treptat forma suprafeței, astfel că după un anumit timp suprafața să fie scoasă din funcționare. Investigațiile și observațiile experimentale ale diferiților cercetători dovedesc că procesul de uzare prin eroziune este influențat de direcția și viteza jetului purtător de particule solide precum și de caracteristicile mecanice ale suprafeței.

În fig. 10.14 se schematizează principalele mecanisme posibile de apariție a eroziunii.

Eroziunea prin particule solide.

Pentru analiza principalilor parametri care influențează uzarea prin eroziune, se definește intensitatea de uzare prin eroziune (I_{er}) ca raportul dintre masa materialului îndepărtat prin uzare de pe suprafață (m_{uz}) și masa particulelor abrazive care au contribuit la uzare (m_{ab}) și care se consideră de formă sferică:

$$I_{er} = \frac{m_{uz}}{m_{ab}} = \frac{V \rho_m}{\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{ab} n_{ab}} \quad (10.25)$$

unde: V este volumul de material uzat; ρ_m - densitatea materialului suprafeței uzate; r - raza particulei abrazive, considerată de formă sferică; ρ_{ab} - densitatea materialului particulei abrazive; n_{ab} - numărul particulelor abrazive ce lovesc suprafața respectivă. Pentru calculul intensității de uzare prin eroziune se consideră modelul lui Nepomiascii, potrivit căruia apariția particulei de uzură are la bază oboseala cauzată de frecarea particulei abrazive în procesul de ciocnire și deformare a suprafeței.

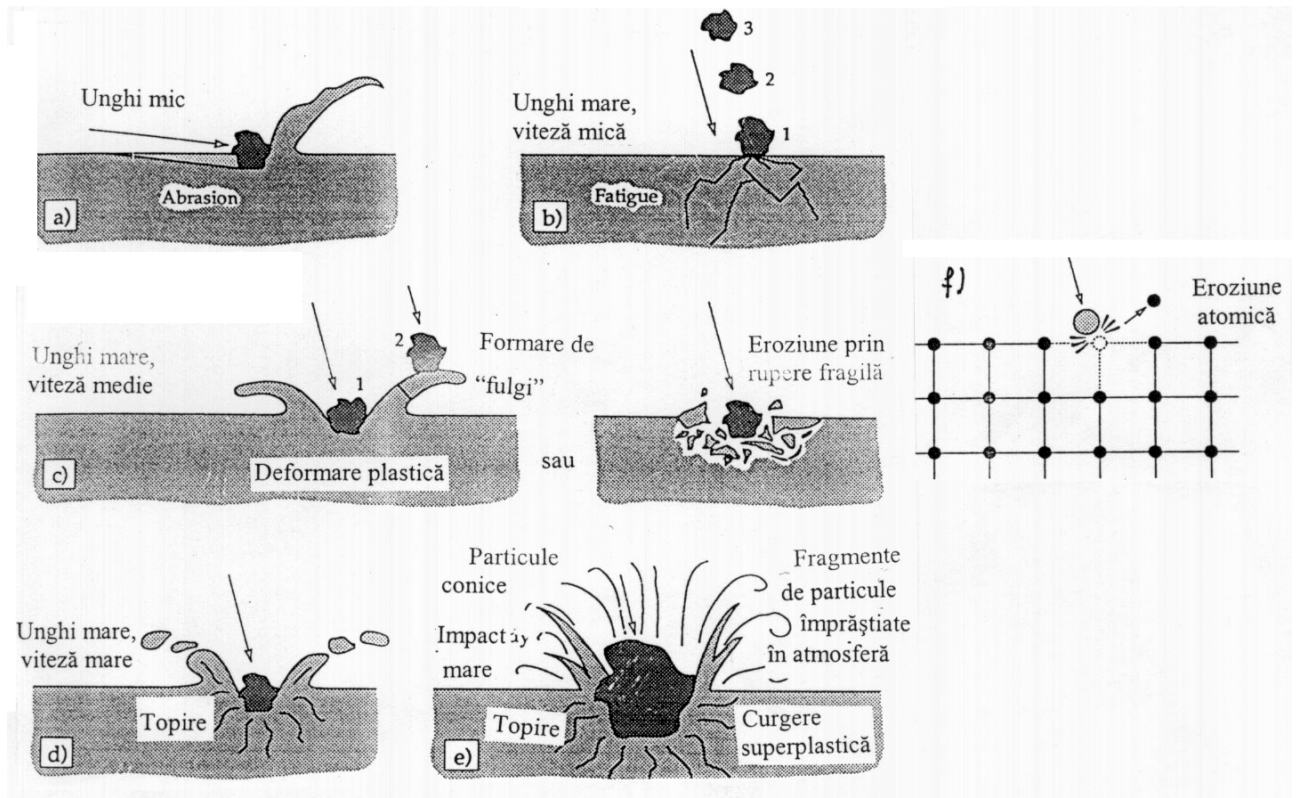


Fig. 10.14 Mecanisme de apariție a eroziunii: a) abraziune la unghiuri de impact mici; b) oboseală superficială la viteze mici și unghiuri de impact mari; c) rupere fragilă sau deformații plastice multiple cu viteze medii și unghi mare de impact; d) topirea suprafeței la viteze de impact mari; e) eroziune macroscopică cu efecte secundare; f) degradarea rețelei cristaline prin impactul atomilor.

În acest caz, se consideră particula abrazivă ca fiind perfect rigidă, de formă sferică (raza r) și care lovește suprafața sub unghiul α_0 , viteza particulei la atingerea suprafeței fiind v_0 . În fig. 10.15 se prezintă schema de calcul, originea axelor fiind centrul particulei sferice în momentul în care sfera atinge planul. Abscisa Ox este paralelă cu suprafața, iar ordonata Oh este pe direcția normală la suprafață.

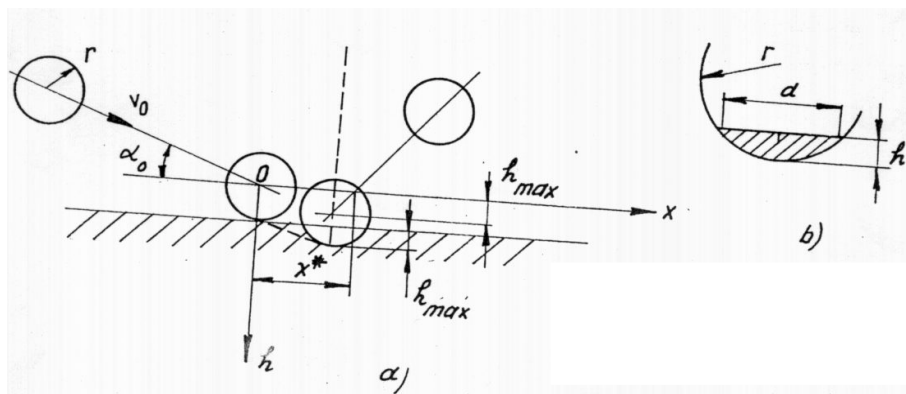


Fig. 10.15 Interacțiunea particulei abrazive cu suprafața uzată prin eroziune (a) și volumul de material deformat (b)

Sub acțiunea energiei cinetice, particula abrazivă deformează suprafața și alunecă relativ față de aceasta, generând o forță de frecare. Drumul elementar de frecare se determină pe baza dimensiunilor suprafeței de contact, astfel volumul elementar de material uzat al suprafeței este:

$$dV = \frac{V_d}{na} dx \quad (10.26)$$

în care V_d este volumul de material deformat de particula abrazivă; n - numărul ciclurilor la care apare particula de uzură; a - diametrul suprafeței de contact.

La deformații (h) mici ale particulei abrazive, $\frac{h}{r} \ll 1$, rezultă:

$$a = 2[r^2 - (r-h)^2]^{1/2} \approx 2\sqrt{2rh} \quad \text{și} \quad V_{do} = \pi rh^2 \quad (10.27)$$

V_{do} fiind volumul de material deformat de o particulă.

Dacă în același moment interacționează cu suprafața n_{ab} particule, atunci

$$V_d = n_{ab} V_{do} = n_{ab} \pi rh^2. \quad (10.28)$$

Numărul ciclurilor la care apare particula de uzură depinde de starea de deformație a suprafeței. Pentru deformații elastice, n se determină cu (9.11):

$$n_e = \left[\frac{3\pi\sigma_o\theta}{4k\mu} \sqrt{\frac{r}{h}} \right]^t = k_e \left(\frac{r}{h} \right)^{t/2},$$

k_e fiind constantă în raport cu lungimea de frecare, $k_e = \frac{3\pi\sigma_o\theta}{4k\mu}$, iar pentru deformații

plastice cu (9.18), înlocuind $\bar{d}_r = a = 2\sqrt{2rh}$ și $K_{iv} \approx 1$,

$$n_p = \left(\frac{e_o}{2} \sqrt{\frac{\sigma_c - 2\mu HB}{\sigma_c + 2\mu HB}} \right)^t \left(\frac{r}{h} \right)^{t/2} = k_p^t \left(\frac{r}{h} \right)^{t/2},$$

k_p fiind constantă în raport cu lungimea de frecare $k_p = \frac{e_o}{2} \sqrt{\frac{\sigma_c - 2\mu HB}{\sigma_c + 2\mu HB}}$.

Astfel că

$$n = \begin{cases} k_e^t \left(\frac{r}{h} \right)^{t/2} & \text{– pentru deformatii elastice} \\ k_p^t \left(\frac{r}{h} \right)^{t/2} & \text{– pentru deformatii plastice} \end{cases} \quad (10.29)$$

Se reamintește semnificația mărimilor din expresiile lui k_e și k_p : μ - coeficientul de frecare; θ - parametrul de elasticitate; σ_o - tensiunea de rupere la tracțiune a materialului; k - constantă ce ia în considerare ipoteza de rupere (9.10); e_o - deformația relativă la rupere prin întindere; σ_c - rezistența la curgere a materialului; HB - duritatea, în unități Brinell, a suprafeței.

Din fig. 10.15 se observă că în timpul în care particula erozivă se găsește în contact cu suprafața, particula curge pe o direcție paralelă cu suprafața distanța x^* . Cu această precizare și înlocuind (10.27) și (10.29) în (10.26), volumul de material uzat în regim elastic de deformare V_e sau plastic V_p va fi

$$V_{e,p} = \frac{\pi}{2} n_{ab} k_{e,p}^{-t} r^{\frac{1-t}{2}} \int_0^{x^*} h^{\frac{t+3}{2}} dx. \quad (10.30)$$

Pentru a rezolva această integrală, trebuie cunoscută legea de variație a deformației suprafeței de către particula erozivă și limita de integrare x^* .

În acest scop se analizează impactul particulei, considerată sferă rigidă, cu suprafața plană deformabilă elastic sau plastic.

1) Cazul deformației elastice

Ecuția diferențială a mișcării în timpul ciocnirii este de forma

$$m \frac{d^2 h}{d\tau^2} = -F_n(h); \quad m \frac{d^2 x}{d\tau^2} = -F, \quad (10.31)$$

unde $m = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{ab}$ reprezintă masa particulei; τ - timpul; F_n - forța normală preluată de particulă și care determină tensiunile din zona deformată; F - forța tangențială.

În cazul în care forța tangențială F este determinată numai de frecarea dintre particulă și suprafață ($F = \mu F_n$, μ fiind coeficientul de frecare), din (10.30) rezultă

$$\mu \frac{d^2 h}{d\tau^2} = \frac{d^2 x}{d\tau^2}. \quad (10.32)$$

Prin integrare rezultă:

$$\mu \frac{dh}{d\tau} = \frac{dx}{d\tau} + c, \quad (10.33)$$

constanta de integrare c determinându-se din condițiile la limită; la momentul $\tau=0$, viteza particulei este V_o cu componentele $V_{ox}=V_o \cos \alpha_o$ și $V_{oh}=V_o \sin \alpha_o$, astfel că $c=V_o(\mu \sin \alpha_o - \cos \alpha_o)$. Ecuția diferențială (10.33) devine

$$dx = \mu dh - V_o(\mu \sin \alpha_o - \cos \alpha_o) d\tau \quad (10.34)$$

Pentru deformații elastice ale suprafeței la interacțiunea cu particula rigidă, corelația dintre forța F_n și deformația h este dată de relația lui Hertz, $F_n = \frac{1,37}{\theta} r^{1/2} h^{3/2}$ cu $\theta = \frac{1 - \nu_p^2}{E}$, (10.35)

ν_p - fiind coeficientul lui Poisson și E - modulul de elasticitate al materialului suprafeței.

Din condiția de conservare a energiei

$$m \frac{V_{oh}^2}{2} - \frac{m}{2} \left(\frac{dh}{d\tau} \right)^2 = \int_0^h F_n dh \quad (10.36)$$

și înlocuind (10.35), rezultă

$$\frac{dh}{d\tau} = \pm \sqrt{V_o^2 \sin^2 \alpha_o - \frac{4h^{5/2}}{5\pi r_{ab} \theta r^{5/2}}}, \quad (10.37)$$

semnul "+" se referă la coincidența semnelor vitezei cu sensul axei Oh și corespunde perioadei de timp când deformația crește de la 0 până la o valoare maximă (h_{max}), iar "-" - pentru perioada de timp când deformația scade de la valoarea maximă h_{max} la valoarea minimă zero.

Din condiția de deformare maximă $\frac{dh}{d\tau} = 0$, rezultă

$$h_{max} = r \left[\frac{5}{4} \pi \rho_{ab} \theta V_o^2 \sin^2 \alpha_o \right]^{2/5} \quad (10.38)$$

Notând $\varepsilon = \frac{h}{h_{max}}$ și $\xi = \frac{x}{h_{max}}$ și înlocuind în (10.37) iar apoi în (10.34), rezultă ecuația

diferențială a mișcării centrului sferei în coordonate adimensionale

$$d\xi = \left(\mu \pm \frac{\text{ctg}\alpha_o - \mu}{\sqrt{1 - \varepsilon^{5/2}}} \right) d\varepsilon. \quad (10.39)$$

Limitele de integrare x^* din (10.30) se determină pe baza observației că în momentul "ieșirii" particulei din materialul suprafeței deformate elastic, $V_x = \frac{dx}{d\tau} = 0$, astfel că din (10.34) rezultă

$$\frac{dh}{d\tau} = h_{\max} \frac{d\varepsilon}{d\tau} = V_o \sin \alpha_o \left(1 - \frac{\text{ctg}\alpha_o}{\mu} \right). \quad (10.40)$$

Din (10.37) și din (10.38) rezultă

$$\frac{dh}{d\tau} = h_{\max} \frac{d\varepsilon}{d\tau} = \pm V_o \sin \alpha_o (1 - \varepsilon^{5/2})^{1/2} \quad (10.41)$$

și deci

$$\varepsilon^* = \left[1 - \left(\frac{1}{\mu \text{tg}\alpha_o} - 1 \right)^2 \right]^{2/5} \quad (10.42)$$

Notând cu I integrala din (10.30), $I = \int_0^{x^*} h^{\frac{t+3}{2}} dx$, și ținând seama de (10.39) și (10.42), rezultă

$$I = h_{\max}^{\frac{t+5}{2}} \int_0^{\varepsilon^*} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} \left(\mu \pm \frac{\text{ctg}\alpha_o - \mu}{\sqrt{1 - \varepsilon^{5/2}}} \right) d\varepsilon. \quad (10.43)$$

Rezolvarea acestei integrale impune luarea în considerare a cinematicii particulei cu suprafața, distingându-se trei cazuri:

i) componenta tangențială a vitezei particulei se anulează la creșterea deformației suprafeței ($\frac{dx}{d\tau} = 0$ și $\frac{d\varepsilon}{d\xi} > 0$) și are loc atunci când $\text{ctg}\alpha_o - \mu < 0$, adică $\mu \text{tg}\alpha_o > 1$, rezultând

$$I_1 = h_{\max}^{\frac{t+5}{2}} \int_0^{\varepsilon^*} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} \left(\mu + \frac{\text{ctg}\alpha_o - \mu}{\sqrt{1 - \varepsilon^{5/2}}} \right) d\varepsilon = h_{\max}^{\frac{t+5}{2}} \left[\frac{2\mu}{t+5} \varepsilon^{*\frac{t+5}{2}} + (\text{ctg}\alpha_o - \mu) \int_0^{\varepsilon^*} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} \left(1 - \varepsilon^{5/2} \right)^{-\frac{1}{2}} d\varepsilon \right] = \quad (10.44)$$

$$= h_{\max}^{\frac{t+5}{2}} H_1(\mu, t, \alpha_o),$$

$H_1(\mu, t, \alpha_o)$ fiind funcția din paranteză, $H_1(\mu, t, \alpha_o) = [\dots]$.

Integrala se poate calcula numeric acceptând circa 6 subintervale ale interalului $[0, \varepsilon^*]$.

ii) Componenta tangențială a vitezei particulei se anulează la scăderea deformației suprafeței ($\frac{dx}{d\tau} = 0$ și $\frac{d\varepsilon}{d\xi} < 0$) și are loc atunci când $0,5 \leq \mu \text{tg}\alpha_o \leq 1$, rezultând

$$I_2 = h_{\max}^{\frac{t+5}{2}} \int_0^{\varepsilon^*} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} \left(\mu + \frac{\text{ctg}\alpha_o - \mu}{\sqrt{1 - \varepsilon^{5/2}}} \right) d\varepsilon = h_{\max}^{\frac{t+5}{2}} \left[\frac{2\mu}{t+5} \varepsilon^{*\frac{t+5}{2}} + (\mu - \text{ctg}\alpha_o) \Gamma \right] = h_{\max}^{\frac{t+5}{2}} H_2(\mu, t, \alpha_o) \quad (10.45)$$

iii) Componenta tangențială a vitezei particulei nu se anulează în procesul de deformare și are loc atunci când $\mu \text{tg}\alpha_o < 0,5$, rezultând $\varepsilon^* = 1$, astfel că (10.43) devine

$$I_3 = h_{\max}^{\frac{t+5}{2}} \left[\mu - (\operatorname{ctg} \alpha_o - \mu) \int_0^1 \frac{\varepsilon^{\frac{t+3}{2}}}{\sqrt{1-\varepsilon^{5/2}}} d\varepsilon \right] = h_{\max}^{\frac{t+5}{2}} \left[\mu - (\operatorname{ctg} \alpha_o - \mu) \frac{8\sqrt{\pi}}{5} \frac{t}{2t+5} \frac{\Gamma\left(\frac{t}{5}\right)}{\Gamma\left(\frac{t}{5} + \frac{1}{2}\right)} \right] = \quad (10.46)$$

$$= h_{\max} H(\mu, t, \alpha_o)$$

Analiza teoretică a funcțiilor integrale I_1, I_2, I_3 demonstrează că I_3 are valoarea cea mai mare pentru același t , valori diferite μ și α_o , dar condiționate prin $\mu \operatorname{tg} \alpha_o < 0,5$.

Pentru deformațiile elastice ale suprafeței cauzate de particulele erozive rigide, intensitatea de uzare (10.25), cu luarea în considerare a relației (10.30) pentru cele trei cazuri posibile i), ii), iii), devine

$$I_{er} = \frac{8 \rho_m}{3 \rho_{ab}} \left(\frac{4k\mu}{3\pi\sigma_c\theta} \right)^t \left(\frac{5\pi}{4} \rho_{ab} \theta V_o^2 \sin^2 \alpha_o \right)^{\frac{t+5}{5}} H_{1,2,3}(\mu, t, \alpha_o) \quad (10.47)$$

Din această expresie, se observă dependența intensității de uzare a suprafeței de caracteristicile fizice ale particulelor erozive (ρ_{ab}) și anume crește cu densitatea, $I_{er} \approx \rho_{ab}^{t/5}$. În funcție de proprietățile mecanice ale materialului suprafeței (σ_c, E), intensitatea de uzare scade cu σ_c , $I_{er} \approx \sigma_c^{-t}$ și crește cu modulul de elasticitate pentru unele materiale cu $t < 5$, $I_{er} \approx E^{\frac{4t-5}{5}}$ sau scade pentru materialele cu $t \geq 5$.

O influență puternică asupra intensității de uzare o are viteza particulelor erozive atât ca mărime (V_o) cât și ca direcție (α_o), $I_{er} \approx (V_o \sin \alpha_o)^{\frac{2(t+5)}{5}}$.

Apariția microașchierii suprafeței, de către particula erozivă, are loc atunci când direcția vitezei $\alpha_o > \alpha_{cr}$, α_{cr} fiind unghiul critic și se determină pe baza condiției de apariție a particulei de uzură la un singur ciclu de solicitare (în relația (10.26), $n=1$):

$$\alpha_{cr} = \arcsin \left(\frac{3\sigma_o}{4k\mu} \right)^{5/2} \frac{\pi^2 \theta^2}{V_o \sqrt{5\rho_{ab}}} \quad (10.48)$$

Intensitatea de uzare în condițiile microașchierii se determină tot cu relația (10.47) însă acceptând $n_e=1$, deci $t=0$.

2) Cazul deformațiilor plastice

Ecuția diferențială a mișcării în timpul ciocnirii plastice este de forma (10.31), însă

$$F_n = \pi r h c \sigma_o \text{ și } F = \mu F_n \quad (10.49)$$

c fiind coeficient dependent de forma particulelor erozive (pentru sferă $c \approx 3$); σ_c - rezistența de curgere a materialului suprafeței care se uzează.

Prin integrarea ecuației (10.31), în condițiile la limită $\frac{dh}{d\tau} = V_o \sin \alpha_o$ pentru $\tau=0$ și ținând seama de (10.49), se obține:

$$\frac{dh}{d\tau} = \pm \sqrt{V_o^2 \sin^2 \alpha_o - \frac{3}{4} \frac{c\sigma_c}{\rho_{ab} r^2} h^2}, \quad (10.50)$$

și $h=h_{\max}$, pentru $\frac{dh}{d\tau} = 0$, rezultă

$$h_{\max} = 2V_o r \sin \alpha_o \sqrt{\frac{\rho_{ab}}{3c\sigma_c}}. \quad (10.51)$$

Analog cu cazul deformațiilor elastice, notând $\varepsilon = \frac{h}{h_{\max}}$ și $\xi = \frac{x}{h_{\max}}$, din (10.40), pentru $\frac{dx}{d\tau} = 0$, rezultă ecuația diferențială a mișcării centrului sferei în coordonate adimensionale

$$d\xi = \left(\mu \pm \frac{\text{ctg}\alpha_0 - \mu}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \right) d\varepsilon. \quad (10.52)$$

Limita de integrare x^* din (10.30) se determină pe baza observației că în momentul "ieșirii" particulei din materialul suprafeței deformat plastic, $V_x = \frac{dx}{d\tau} = 0$, astfel că din (10.34) rezultă (10.40),

$$\frac{dh}{d\tau} = h_{\max} \frac{d\varepsilon}{d\tau} = V_0 \sin \alpha_0 \left(1 - \frac{\text{ctg}\alpha_0}{\mu} \right).$$

Înlocuind în această expresie (10.50) și (10.51) rezultă:

$$\frac{dh}{d\tau} = h_{\max} \frac{d\varepsilon}{d\tau} = \pm V_0 \sin \alpha_0 \sqrt{1-\varepsilon^2}, \quad (10.53)$$

$$\text{și deci } \varepsilon^* = \left[1 - \left(\frac{1}{\mu \text{tg}\alpha_0} - 1 \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (10.54)$$

Integrala din (10.30), $I = \int_0^{x^*} h^{\frac{t+3}{2}} dx$ pentru deformații plastice va avea expresia

$$I = h_{\max}^{\frac{t+5}{2}} \int_0^{\varepsilon^*} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} \left(\mu \pm \frac{\text{ctg}\alpha_0 - \mu}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \right) d\varepsilon. \quad (10.55)$$

Rezolvarea acestei integrale impune luarea în considerare a cinematicii particulei cu suprafața, distingându-se, analog cu cazul deformațiilor elastice, trei cazuri. Deci

$$I = \begin{cases} h_{\max}^{\frac{t+5}{2}} H'_1(\mu, t, \alpha_0), & \text{pentru } \mu \text{tg}\alpha_0 > 1 \\ h_{\max}^{\frac{t+5}{2}} H'_2(\mu, t, \alpha_0), & \text{pentru } 0,5 \leq \mu \text{tg}\alpha_0 \leq 1 \\ h_{\max}^{\frac{t+5}{2}} H'_3(\mu, t, \alpha_0), & \text{pentru } \mu \text{tg}\alpha_0 < 0,5 \end{cases} \quad (10.56)$$

Funcțiile integrale H'_1, H'_2, H'_3 au expresii asemănătoare cu expresiile obținute pentru deformații elastice, astfel

$$\begin{aligned} H'_1 &= \frac{2\mu}{t+5} \varepsilon^{*\frac{t+5}{2}} + (\text{ctg}\alpha_0 - \mu) \int_0^{\varepsilon^*} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} (1-\varepsilon^2)^{\frac{1}{2}} d\varepsilon \\ H'_2 &= \frac{2\mu}{t+5} \varepsilon^{*\frac{t+5}{2}} - (\text{ctg}\alpha_0 - \mu) \int_0^{\varepsilon^*} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} (1-\varepsilon^2)^{\frac{1}{2}} d\varepsilon \\ H'_3 &= \mu - (\text{ctg}\alpha_0 - \mu) \sqrt{\pi} \frac{t+1}{t+3} \frac{\Gamma\left(\frac{t+1}{4}\right)}{\Gamma\left(\frac{t+3}{4}\right)} \end{aligned} \quad (10.57)$$

Pentru aceeași valoare a lui t și pentru diferite valori ale lui μ și α_0 dar respectând restricția $\mu \tan \alpha_0 < 0,5$, $H'_3 = \max(H'_1, H'_2, H'_3)$.

Cu valorile funcțiilor $H'_{1,2,3}$, pentru cazuri concrete ale parametrilor μ , t , α_0 , se obține volumul de material uzat în regim plastic de deformare (10.46) și intensitatea adimensională de uzare erozivă în regim plastic (10.41), obținându-se:

$$I_{er} = \frac{8 \rho_m}{3 \rho_{ab}} \left(2 \sqrt{\frac{1 + \frac{2\mu HB}{\sigma_c}}{1 - \frac{2\mu HB}{\sigma_c}}} \right)^t \left(2V_0 \sin \alpha_0 \sqrt{\frac{\rho_{ab}}{3c\sigma_c}} \right)^{\frac{t+5}{2}} H'_{1,2,3} \quad (10.58)$$

Pe baza expresiei intensității adimensionale de uzare se observă creșterea acestei intensități cu densitatea particulelor erozive (ρ_{ab}), $I_{er} \approx \rho_{ab}^{\frac{t+3}{2}}$. Intensitatea de uzare scade cu creșterea tenacității suprafeței (σ_c) și scăderea durtății.

Influență puternică asupra intensității de uzare o are viteza particulelor erozive atât ca mărime (V_0), cât și ca direcție α_0 , $I_{er} \approx (V_0 \sin \alpha_0)^{\frac{t+5}{2}}$.

Apariția microașchierii ($n_p=1$) are loc atunci când $\alpha_0 > \alpha_{cr}$, α_{cr} , pentru condițiile deformării plastice având expresia

$$\alpha_{cr} = \arcsin \left[\frac{e_0^2}{4V_0} \frac{1 - \frac{2\mu HB}{\sigma_c}}{1 + \frac{2\mu HB}{\sigma_c}} \sqrt{\frac{3c\sigma_c}{\rho_{ab}}} \right] \quad (10.59)$$

Intensitatea de uzare în cazul microașchierii se determină cu (10.58), dar acceptând $t=0$, pentru care $n_p=1$.

Cercetările experimentale dovedesc dependențele calitative indicate de (10.57), (10.58) sau (10.58), (10.59) pentru procesele de uzare ale cauciucului, maselor plastice, metale tehnice pure și diferite aliaje metalice.

Abraziune prin ezoziunea provocată de lichid.

Lichidul poate deteriora prin abraziune suprafețele solide, în special la viteze mari, mai mult chiar decât particulele solide.

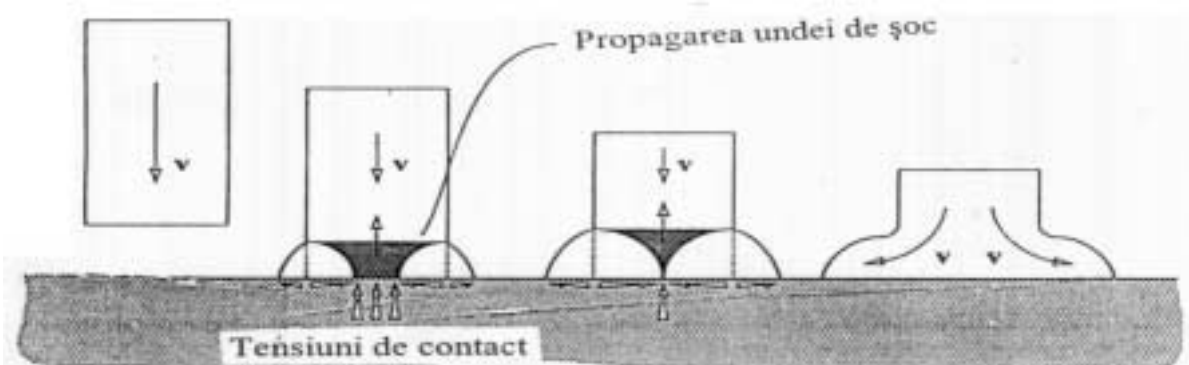


Fig. 10.16 Mecanismul de uzare prin eroziune cu particule de lichid.

Ca exemple se pot enumera deteriorarea aripilor de avion la zborul printre nori și a paletelor de la turbinele de abur.

Explicația fenomenologică a efectelor erozive ale picăturilor de lichid asupra suprafețelor solide are

la bază apariția undelor elastice de șoc sau undele de presiune care traversează lichidul. În fig. 10.16 se prezintă o schemă conceptuală a mecanismului de eroziune cu particule cilindrice de fluid care lovesc după direcția normală o suprafață.

Presiunea de contact la impact poate fi estimată cu relația

$$p = \rho v_s v \quad (10.60)$$

unde p este presiunea de contact la impact [Pa];

ρ - densitatea fluidului [kg/m^3];

v_s - viteza sunetului în fluid [m/s];

v - viteza fluidului la impact [m/s].

Presiunea de contact generată prin impactul fluidului poate fi foarte înaltă. De exemplu, pentru picături de apă care au viteza de impact de 250 m/s, rezultă presiunea

$$p = 1000 \times 1500 \times 250 = 375 \text{ MPa.}$$

Durata impactului sub presiunea p este determinată de viteza undelor din centrul picăturii. Undele se deplasează cu viteza sunetului (1500 m/s în apă) și pentru un diametru al picăturii de apă de 3 mm rezultă o durată a impactului de 1 μs .

Procesul de uzare are loc ca urmare a tensiunilor de contact pulsatoare provocate de lichid. La viteze mici de impact, materialul suprafeței este uniform excavat, formând niște rugozități uniforme, după care craterele devin aleatoare. Marginea muchiiilor craterelor vor fi deteriorate la următoarele impacturi ale particulelor de lichid. La viteze mari de impact se formează ciupituri și scobituri. Dacă materialul este casant, procesul de uzare se manifestă prin ruperea (spargerea) materialului.

10.3 Posibilități și căi de reducere a uzării de abraziune

Uzarea de abraziune este dependentă atât de caracteristicile materialelor suprafeței care se uzează cât și de caracteristicile elementului abraziv (rugozitățile contrapiesei, particule abrazive provenite din mediul de ungere sau din mediul exterior).

În cazul cuplelor de frecare la care suprafața de contact a unuia dintre elemente este semnificativ mai dură decât suprafața conjugată funcțional, intensitatea de uzare se reduce prin utilizarea unor materiale cu modul de elasticitate cât mai ridicat în condițiile aceleași presiuni de contact și microgeometrie a suprafeței dure. Calitatea suprafeței dure influențează semnificativ uzarea abrazivă a contrapiesei, indicându-se o microgeometrie cu rugozități cât mai uniforme ca înălțime și cu raze de curbura cât mai mari. Din acest punct de vedere, prelucrarea finală prin roluire este mai indicată oricărei prelucrări mecanice prin așchiere.

În cazul cuplelor de frecare cu durități apropiate ale suprafețelor, dar cu funcționare în medii abrazive (particule exterioare sau provenite din particulele de uzură adezivă), se indică utilizarea unor materiale cu duritatea suprafețelor ridicată dar și cu tenacitate cât mai ridicată (deformațiile relative la rupere cât mai ridicate). Orice mijloc de evitare a pătrunderii particulelor abrazive în interstițiul funcțional al cuplei de frecare (filtrare, curățire, etanșare etc.) este o cale sigură de scădere a intensității de uzare și deci de creștere a durabilității. Particulele abrazive ce intră în interstițiu influențează intensitatea de uzare atât sub aspectul geometriei lor (rază de curbura, concentrație) cât și al caracteristicilor mecanice (tensiunea de rupere).

În cazul cuplelor cu uzare prin eroziune, materialele utilizate trebuie să posede tenacitate și modul de elasticitate ridicat. Geometria acestor cuple trebuie să ia în considerare direcția vitezei jetului eroziv, astfel că intensitatea de uzare să fie cât mai mică. Ca și pentru cazul anterior, orice

mijloc de eliminare totală sau parțială a particulelor erozive (dacă funcțional este posibil) este o sursă sigură de creștere a durabilității.

În tabelul 10.2 se indică metodele unanim recunoscute, de indicare a rezistenței la uzare abrazivă a materialelor și efectele lor asupra stării de frecare a suprafeței.

Tabelul 10.2 Metode de creștere a rezistenței de uzare abrazivă

Metoda	Domeniul de utilizare	Efect asupra suprafeței de frecare
Straturi galvanice (crom, nichel)	Majoritatea metalelor "colorate" și "negre"	Strat superficial dur, neted și subțire
Depuneri anodice	Aluminiu, magneziu, zinc	Strat de oxid dur și subțire
Saturare (cementare, cianurare, cianurare în mediu gazos)	Oțeluri cu conținut redus de carbon	Durificarea suprafeței
Depunerii (metalizare, pulverizare cu metale, pulverizare cu materiale ceramice)	Materiale de bază metalice și nemetalice	Strat de interacțiune prin oxidare a particulelor
Durificarea suprafeței prin sudură	Metale "colorate" și "negre"	Strat dur de sudură sau de carbură
Turnarea în cochilă	Fontă cenușie, oțeluri	Strat de fontă albă
Călire prin flacără	Fontă și oțel	Strat superficial dur