

12. UZAREA DE COROZIUNE ȘI FRETTING [A6, A7, A13, A18]

12.1 Definiere. Forme specifice

Uzarea de coroziune apare atât la piesele cu mișcare relativă și care transmit forțe și momente (cuple de frecare), cât și la piesele fără mișcare relativă, atunci când mediul de lucru prezintă "agresivitate" chimică. Mediul de lucru poate fi: diferiți acizi, atunci când cupla funcționează într-o instalație chimică specială; lubrifianțul însuși, atunci când este degradat mecanic și chimic; apa, provenită din mediul exterior; lubrifianțul și curentul electric (coroziune galvanică).

În tabelul 9.2 sunt indicate principalele forme de coroziune.

Prin pagubele provocate de mașinile și utilajele, coroziunea este denumită "flagelul secolului".

Acțiunea simultană a factorilor de natură chimică și mecanică, în urma solicitărilor ciclice și în prezența forțelor de frecare, produc o coroziune mecanică sau tribocoroziune.

Procesul de frecare accelerează efectele coroziunii chimice în diferite moduri (fig. 12.1): modificări în starea suprafeței, degajări de energie termică, acumulări de potențial electrostatic, fisurarea stratului superficial etc.

Prezența particulelor abrazive și efectele lor conduc la accelerarea coroziunii chimice. S-a constatat că vitezele reacțiilor chimice - de formare și rupere a stratului de protecție - sunt cu un ordin de mărime mai mare în prezența mișcării de alunecare sau rostogolire, fig. 12.1 b, decât în absența ei.

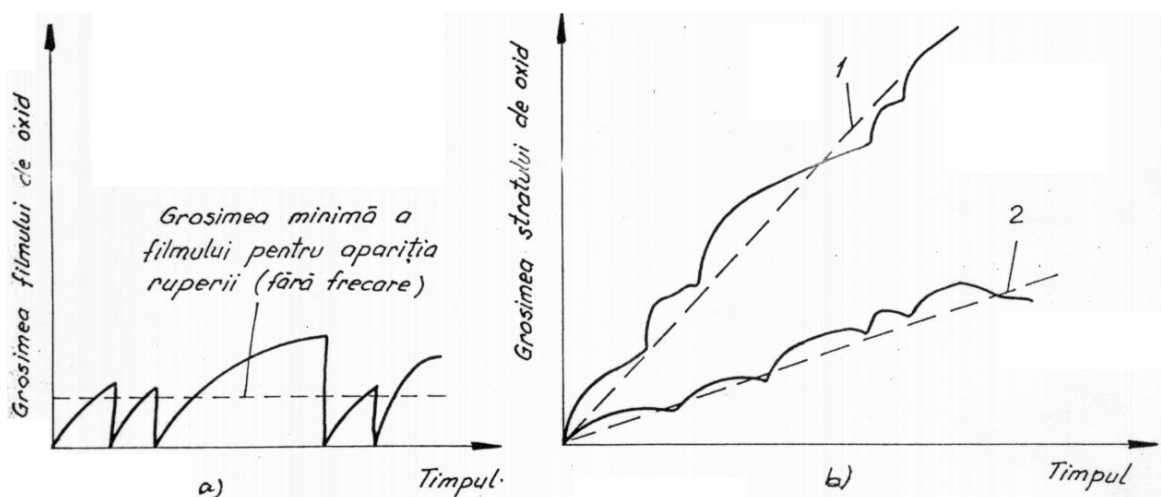


Fig. 12.1 Coroziunea chimică: a) formarea și distrugerea stratului de oxid;
b) viteza medie de uzare; c) 1 - cu forță de frecare (tribocoroziune),
2 - fără forță de frecare.

Coroziunea de fretare ("fretting") se produce în regimuri de contact cu mișcare relativă de mică amplitudine și vibratorie (minim $8 \cdot 10^{-9}$ mm) și în prezența unor agenți corozivi.

Cauzele coroziunii de fretare sunt multiple: deformații elastice și elastoplastice, adeziuni, oboseală superficială, difuzie, microsuduri, abraziune, eroziune, modificare a stării de tensiuni etc.

În principal, uzarea se produce prin oxidare (coroziune uscată) și oboseală superficială. Se întâlnește la toate asamblările prin frecare (asamblarea pe con, inele tronconice, asamblarea presată

etc.), asamblările filetate, asamblările canelate, arcuri lamelare etc.). Din punctul de vedere al intensității de uzare, coroziunea de fretare se caracterizează prin intensități mici și foarte mici, însă efectele acestei intensități sunt mari, constituind pentru piesele respective sursele de fisuri și măbind considerabil viteza de nucleație a fisurilor ce conduc la ruperea prin oboseală.

Reducerea efectelor negative ale coroziunii de fretare se realizează prin reducerea agenților perturbatori (evitarea oxidării, racordări ale zonelor cu concentratori etc.).

Toate măsurile constructive de reducere a tensiunilor sunt utile și pentru reducerea efectelor uzării prin fretare.

12.2 Evaluarea calitativă și cantitativă

În domeniul obișnuit de funcționare al cuplelor de frecare cu regim uscat sau limită prezintă interes uzarea prin oxidare și, în special, a oțelurilor. Cercetările lui K. Dies dovedesc că pe suprafața de frecare a oțelurilor se formează oxizi de $Fe_2O_3 - \alpha$ care protejează suprafața de deteriorare (fig. 12.2). Din fig. 12.2 se observă că produsele de uzură (Fe_2O_3 , FeO sau Fe) ale unui oțel moale în contact cu un oțel dur pe bază de crom variază în funcție de presiunea de contact.

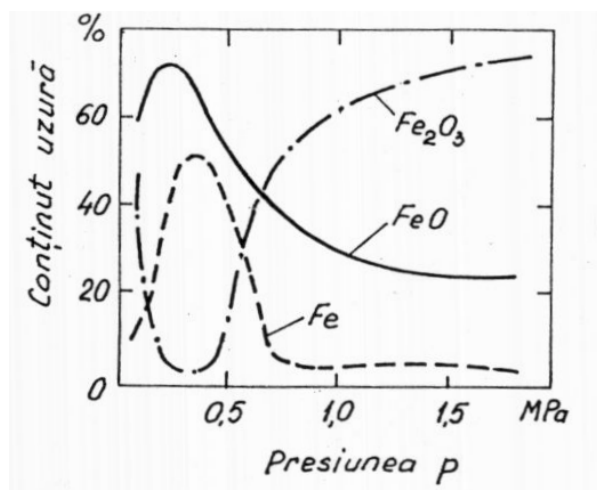


Fig. 12.2 Conținutul produselor de uzare prin oxidare

Procesul de uzare prin oxidare se evaluează calitativ și cantitativ prin următoarele modele:

a) **Modelul Quinn** - procesul de uzare se desfășoară în două faze:

- 1) formarea peliculei de oxid, în timp ce rugozitățile unui element al cuplei nu sunt în contact cu rugozitățile celuilalt element;
- 2) în timp ce rugozitățile se găsesc în contact, continuă formarea stratului, iar atunci când grosimea peliculei de oxid a atins o valoare critică, se produce ruperea stratului în planul de separație metal-oxid.

Suprafețele din oțel care au o mișcare relativă de circa 1m/s se uzează, rezultând particule de oxid de fier. Totodată, la viteze de acest ordin de mărime, temperaturile instantanee sunt suficient de mari pentru a produce oxidarea (circa 700 °C). Transformările martensitice din oțeluri sunt cauze ale vitezelor de uzare ridicate.

La viteze de ordinul de mărime a 1m/s și presiuni de contact reduse, filmul de oxid format este subțire și fragil. La viteze mari (peste 10 m/s) și presiuni de contact ridicate, filmul de oxid este gros și continuu, acoperind întreaga suprafață. În aceste condiții, căldura generată prin frecare este ridicată, metalul fiind izolat de stratul de oxid, care el însuși este suficient de cald ca să se deformeze plastic sau să se topească.

Funcție de viteza de alunecare, se disting două regimuri de oxidare a oțelurilor:

- *un regim de oxidare moderat* pentru viteze de circa 1 m/s (parametrul de viteză $L \approx 50$). Temperaturile instantanee (“flash”) care apar la aceste viteze sunt suficiente pentru oxidarea fierului, dar stratul de oxid este, pentru un interval de timp, “rece” și fragil;
- *un regim de oxidare sever* pentru viteze mari.

Denumirea de oxidare moderată sau severă se referă la gradul de oxidare al suprafeței și nu la viteza de uzare, care, adesea, este mai mică la regimul de oxidare sever.

Model de uzare prin oxidare în regim moderat

Cinetica oxidării fierului se consideră a fi parabolică. Masa de oxigen pe unitatea de suprafață a filmului de oxid, Δm , este

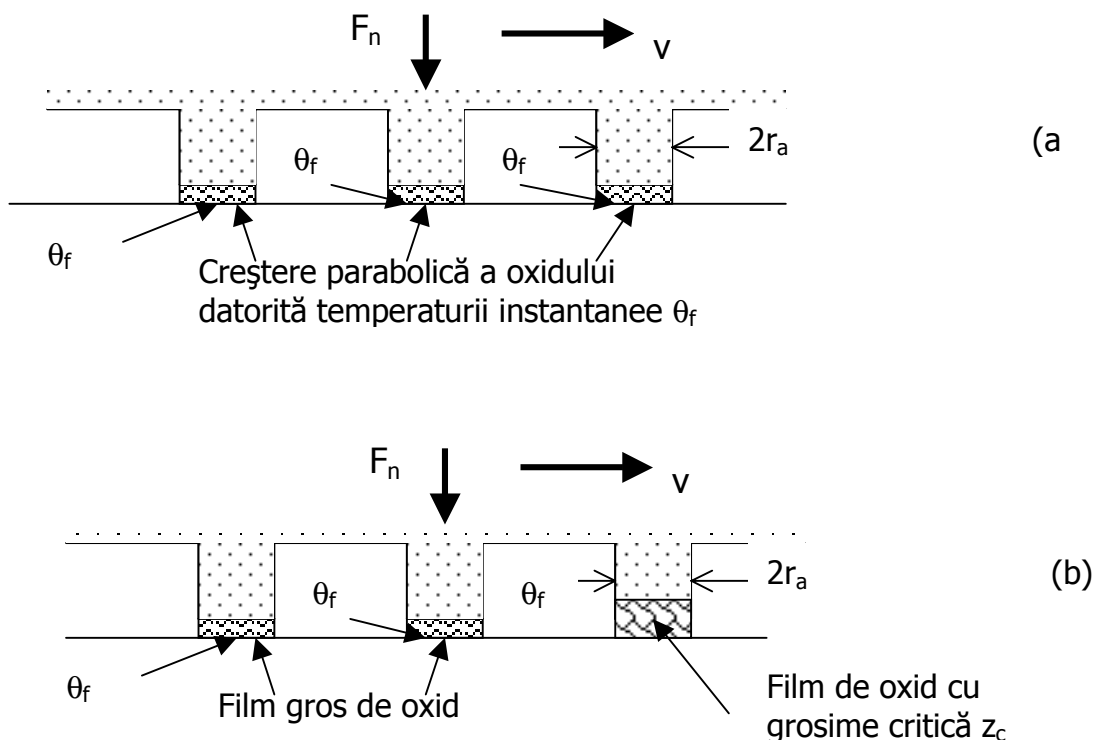
$$\Delta m = \sqrt{k_p t} \quad (12.1)$$

în care t este timpul de lucru, iar k_p este viteza de oxidare constantă, exprimabilă cu o relație de tip Arrhenius

$$k_p = A_o \exp\left[-\frac{Q_o}{R\theta}\right] \quad (12.2)$$

În această expresie, A_o este constanta Arrhenius ($10^6 \text{ kg}^2 / \text{m}^4 \text{ s}$), Q_o – energia de activare a oxidării (138 kJ/mol), R - constanta universală a gazelor și θ este temperatura absolută.

Se consideră că suprafețele cu rugozități au mișcare relativă și pe vârfurile rugozităților, temperatura este suficientă pentru a iniția oxidarea fierului din oțel. Oxidul de pe rugozități se dezvoltă, astfel că la o anumită grosime critică (z_c) se cojește și devine particulă de uzură, așa cum se schematizează în fig. 12.3.



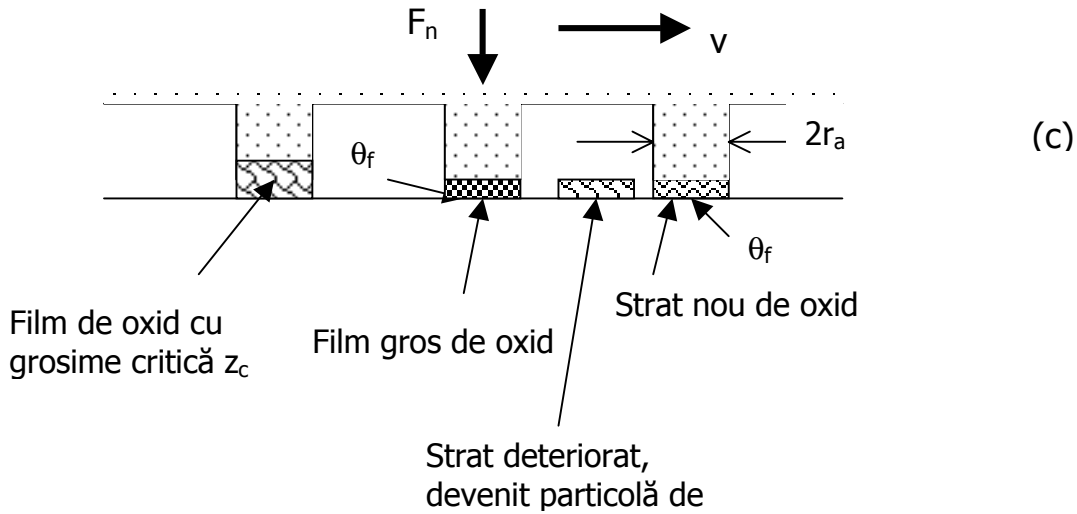


Fig. 12.3 Model idealizat de uzare prin oxidare moderată.

La o compoziție medie de Fe_3O_4 , un mol de Fe necesită $2/3$ mol de O_2 pentru a forma oxid. Dacă un volum pe unitatea de suprafață de fier, ΔV_{Fe} , este oxidat, masa suplimentară câștigată ca urmare a oxidării este

$$\Delta m = \frac{2}{3} \Delta V_{\text{Fe}} \rho_{\text{Fe}} \left(\frac{M_{\text{O}_2}}{M_{\text{Fe}}} \right) \quad (12.3)$$

în care ρ_{Fe} este densitatea fierului, M_{O_2} – greutatea moleculară a oxigenului și M_{Fe} – greutatea moleculară a fierului.

Înlocuind (12.3) în (12.1) și acceptând că grosimea stratului de oxid de pe vârful aceleiași rugozități este constantă ($z = \Delta V_{\text{Fe}}$), rezultă

$$z = C \sqrt{k_p t} \quad , \quad (12.4)$$

cu constanta $C = \left(\frac{3M_{\text{Fe}}}{2M_{\text{O}_2} \rho_{\text{Fe}}} \right)$.

Pentru datele curente privin fierul și oxigenul, $M_{\text{Fe}} = 56$, $\rho_{\text{Fe}} = 7800 \text{ kg/m}^3$ și $M_{\text{O}_2} = 32$, rezultă $C = 3,4 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{kg}$.

În regimul moderat de oxidare se neglijează temperatura medie volumică a corpului. Oxidarea se produce ca urmare a încălzirii instantanee de pe vârfurile rugozității. Timpul (t_c) necesar atingerii unei grosimi critice a stratului de oxid (z_c) se obține din ec. (12.4) și (12.1) pentru o temperatură egală cu temperatura instantanee (“flash”) θ_f

$$t_c = \frac{z_c^2}{C^2 A_o \exp \left[-\frac{Q_o}{R \theta_f} \right]} \quad (12.5)$$

Particulele de uzură apar prin ruperea liberă a oxidului, astfel că volumul de material pierdut de suprafața reală de contact (A_r) la fiecare t_c secunde este $A_r z_c$. În acest timp, lungimea de frecare dintre cele două suprafețe $L_f = vt_c$.

Intensitatea liniară de uzare (I_h) prin oxidare moderată este

$$I_h = \frac{A_r z_c}{vt_c} = \frac{A_r C^2 A_o}{v z_c} \exp \left[-\frac{Q_o}{R \theta_f} \right] \quad (12.6)$$

Ordinul de mărime al grosimii critice a stratului de oxid la care se deteriorează este $8 \dots 10 \mu\text{m}$.

Model de uzare prin oxidare în regim sever

Vitezele de alunecare ridicate (peste 10 m/s) conduc la temperaturi mari. Aceste temperaturi sunt suficiente pentru oxidare și chiar pentru topirea locală a stratului de oxid și transformarea lui în lichid. Până la topire, căldura generată prin frecare este transferată prin conducție. O rugozitate în timpul topirii absoarbe căldură, iar apoi odată topită curge și se răcește, solidificându-se. Prin solidificare, se cedează căldura latentă. În acest fel, rugozitatea este un mijloc de redistribuție a căldurii.

Se consideră că o fracție f_m din materialul topit și resolidificat este pierdut ca particule de uzură. Punctele de contact sunt puternic și complet oxidate ca urmare a temperaturii generate prin frecare (fig. 12.4). Vârfurile rugozităților se topesc și temperaturile sunt limitate de temperatura de topire a oxidului θ_t^{ox} . Ca urmare a redistribuirii căldurii, corpul are o temperatură medie θ_b .

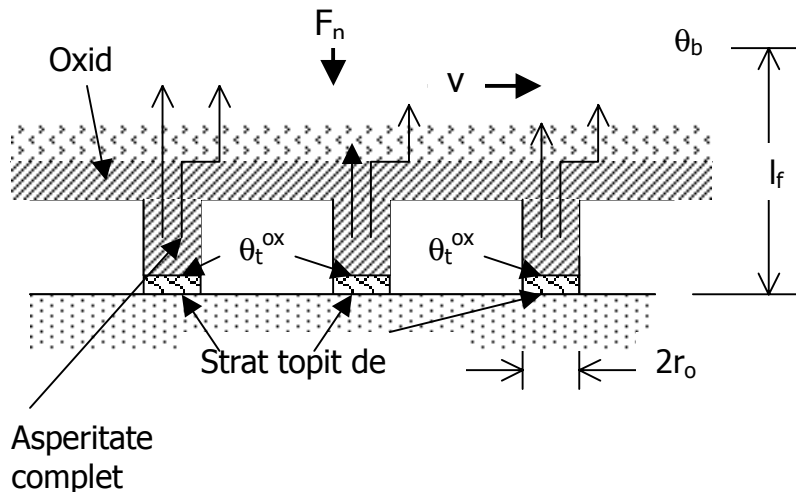


Fig.12.4 Model de uzare prin oxidare în regim sever.

Fluxul de căldură este generat prin frecare și disipat în suprafața cu rugozități (βq , β fiind coeficientul de partiție a căldurii între cele două elemente ce formează cupla de frecare, iar $q = \mu p v$ este fluxul de căldură, μ - coeficientul de frecare, p - presiunea de contact și v - viteza de alunecare). O parte din acest flux se disipă prin conducție în rugozități, iar cealaltă parte contribuie la topirea stratului de oxid:

$$q_1 = \beta q = \beta \mu p v = \frac{\lambda_{ox} (\theta_t^{ox} - \theta_b)}{l_f} \left(\frac{A_r}{A_n} \right) + \lambda_t^{ox} V_t \quad (12.7)$$

în care A_r este aria reală de contact, A_n - aria nominală, λ_{ox} - conductivitatea termică a oxidului, θ_t^{ox} - temperatura de topire a oxidului, l_f - lungimea echivalentă de disipare liniară a căldurii, λ_t^{ox} - căldura latentă de topire a oxidului și V_t - volumul de oxid pe unitatea de suprafață și timp topit.

Dacă se consideră că numai o parte f_m din volumul topit se transformă în particule de uzură, din (12.7) se deduce intensitatea liniară de uzare $I_h = f_m V_t / v$:

$$I_h = f_m \left[\frac{\beta \mu p}{\lambda_t^{ox}} - \frac{\lambda_{ox}}{\lambda_t^{ox}} \frac{A_r}{A_n} \frac{(\theta_t^{ox} - \theta_o)}{I_f v} \right] \quad (12.8)$$

Din analiza celor două modele de oxidare, se poate analiza influența diferiților parametri.

Viteza de oxidare (v_u) are o dependență exponențială de temperatura suprafeței (θ) (modelul similar Kubașevskii, Hopkins):

$v_u \approx \exp(-a/\theta)$, unde a este constantă, dependentă de material.

În funcție de temperatura suprafețelor și de viteza de alunecare v , cele două faze ale procesului de oxidare pot avea ponderi diferite asupra vitezei de oxidare. Pentru perioada de timp cât rugozitățile sunt în contact, temperatura este proporțională cu viteza de alunecare $\theta \propto v$ (pentru viteze mici) și $\theta \propto v^{1/2}$ (pentru viteze mari).

Astfel că viteza de oxidare, în cele două faze ale procesului de uzare, are dependența:

- pentru viteze de alunecare mici

$v_{u1} \approx \exp(-a'/v)$ când rugozitățile nu sunt în contact;

$v_{u2} \approx (1/v) \exp(-a'/v)$ când rugozitățile sunt în contact;

- pentru viteze de alunecare mari

$v_{u1} \approx \exp(-a''/v^{1/2})$ când rugozitățile nu sunt în contact;

$v_{u2} \approx (1/v) \exp(-a''/v^{1/2})$ când rugozitățile sunt în contact.

În fig. 12.5 se indică, în unități convenționale, dependența intensității de uzare (I_u) de viteza de alunecare a elementelor cuplei de frecare (v) pentru cele două faze ale procesului de uzare.

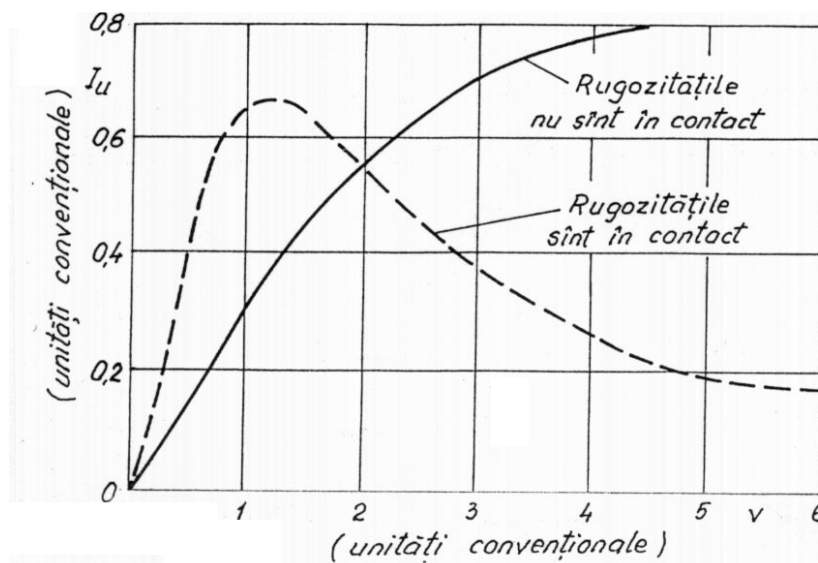


Fig. 12.5 Dependența intensității de uzare prin oxidare de viteza de alunecare

b) Modelul Tao-Yoshimoto - procesul de uzare se desfășoară în trei stadii:

1. difuzia oxigenului în suprafața metalică;
2. creșterea peliculei de oxid;
3. distrugerea peliculei de oxid ca urmare a vitezei de alunecare sau rostogolire și a presiunilor locale de contact; corespunzător acestui model, în funcție de timp și de presiunile de contact, se disting două moduri de desfășurare a procesului de uzare:
 - pelicula de oxid crește, în timp, cu o viteză destul de mică până la o valoare critică a grosimii, însă se deteriorează instantaneu;

- pelicula de oxid se formează într-o perioadă de timp mult mai mică decât în perioada de distrugere a ei (viteza de formare a peliculei este mult mai mare decât viteza de distrugere a ei): Timpul de distrugere a peliculei de oxid depinde de rezistența la forfecare a stratului și de presiunea de contact. Rezistența la forfecare este cu atât mai bună cu cât este mai mic raportul dintre volumul specific al oxidului și al materialului de bază. De exemplu, pentru FeO, raportul este 1,72; pentru Fe_2O_3 - 2,15 și pentru Fe_3O_4 - 2,1.

Viteza de alunecare sau rostogolire influențează procesul de uzare prin oxidare pe două direcții: o primă direcție se referă la determinarea temperaturii în punctele reale de contact și, implicit, la natura oxidului, iar a doua direcție se referă la determinarea grosimii filmului de oxid.

Intensitatea de uzare și grosimea filmului de oxid sunt direct influențate de viteza de alunecare sau rostogolire, punându-se în evidență 7 viteze caracteristice (fig. 12.6), în funcție de grosimea și natura peliculei de oxid (I - uzarea materialului de bază, II - uzarea peliculei de Fe_2O_3 , III - uzarea peliculei de Fe_3O_4).

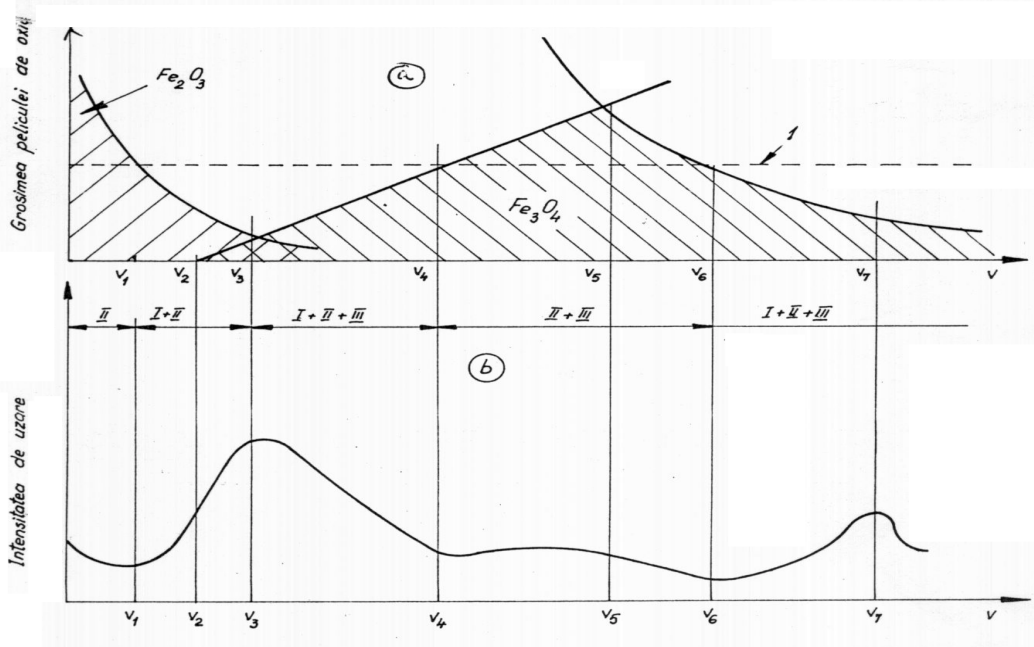


Fig.12.6 Influența vitezei de alunecare sau rostogolire asupra grosimii peliculei de oxid (a) și asupra intensității de uzare (1- grosimea limită a peliculei, I - uzarea metalului de bază, II - uzarea peliculei Fe_2O_3 , III - uzarea peliculei Fe_3O_4)

12.3 Uzarea prin fretting

12.3.1. Definire. Terminologie

Aflat în atenția cercetătorilor încă de la începutul sec. XX, fretting-ul este un fenomen complex, care prin efectele sale afectează tot mai multe domenii ale aplicațiilor tehnice.

În acest sens, Waterhouse afirmă că fretting-ul este un “flagel al industriei”, iar Berthier & Vincent îl califică ca o “pacoste a construcției de mașini”.

Mecanismele de apariție și de dezvoltare ale deteriorării de fretting nu sunt încă pe deplin elucidate, iar soluțiile de prevenire propuse nu sunt în general eficiente în totalitate.

Menționat pentru prima dată de Eden și colaboratorii în 1911 sub denumirea de “Fretting Corrosion” - coroziune de fretaj sau coroziune de contact -, fretting-ul a primit de-a lungul timpului mai multe denumiri și interpretări, nici până în prezent nefiind utilizat un termen unic cu o semnificație unică.

Definiția cea mai adecvată și acceptată precizează că fretting-ul poate fi considerat ca deteriorarea de suprafață, produsă de o alunecare oscilatorie de mică amplitudine între două solide aflate în contact. Această deteriorare implică noțiunile de uzare de fretting și oboseală de fretting.

Uzarea de fretting este înțeleasă ca reprezentând îndepărtarea de material de pe suprafețele în contact ca urmare a acțiunii fretting-ului, în timp ce **oboseala de fretting** reprezintă reducerea duratei de viață datorită fisurilor produse de fretting.

Apariția frettingului este accelerată de prezența reacțiilor chimice între constituenții suprafeței și mediu, dar nu este exclusivă. S-a constatat că fenomenul se produce atât în vid și în gaze inerte, cât și la materiale plastice, compozite, oțeluri inox și chiar în cazul acoperirilor cu metale nobile.

Termenii utilizați pentru denumirea fenomenului de fretting, de diferite asociații și societăți internaționale sunt :

- “fretting”
- “fretting-fatigue” - oboseala de fretting
- “fretting-wear” - uzarea de fretting
- “fretting corrosion” - coroziunea de fretting.

Toți acești termeni și toate definițiile se referă în general la același fenomen, însă nu de puține ori înțelesul lor este diferit. Astfel, este obișnuit să se vorbească de uzare de fretting, când solicitarea de contact acționează singură, sau despre oboseala de fretting, când o solicitare exterioară este suprapusă peste încărcarea de contact.

Pe de altă parte, atât uzarea ca fenomen de detașare de particule de pe primele corpuri, cât și fisurarea ca deteriorare, pot fi întâlnite în ambele cazuri de solicitare în condiții de fretting descrise mai sus.

Considerând denumirea cea mai des utilizată, se poate conchide că deteriorarea de fretting este o formă complexă de deteriorare incluzând forme fundamentale de uzare ca adeziunea, oboseala, abraziunea și coroziunea, manifestându-se în general ca uzare și/sau oboseală de fretting, ce se produce pe suprafețele în contact încărcate cu o sarcină normală și supuse unei deplasări relative oscilatorii de foarte mică amplitudine.

Această deplasare oscilatorie poate fi produsă de vibrații sau poate rezulta din deformarea unuia din corpurile aflate în contact ca urmare a unei solicitări variabile de tracțiune, încovoiere, torsiune etc.

Domenii de apariție :

- Centrale nucleare în care diferite structuri metalice de oțel inoxidabil sunt exploatate în regim de vibrații sau sarcini variabile puternice, în condițiile unor temperaturi înalte și uneori într-o atmosferă puternic oxidantă - de exemplu, reactoarele cu răcire cu gaz (CO₂ la 40 atm și temperaturi în jur de 873° K) ;

- Motoarele Diesel de mari dimensiuni, deteriorarea de fretting manifestându-se la suprafața de etanșare dintre cămașa cilindrului și blocul motor, între cuzineți și carcasa în care aceștia se montează (lagărele palier, capul bielei) ;

- - Implantele chirurgicale, unde efectul deteriorării de fretting este dublu: slăbirea mecanică a asamblărilor, și, se pare mai grav, intoxicarea organismului prin produsele de uzură care pot fi foarte toxice prin soluțiile rezultate care conțin metale grele periculoase (Co, Cr) ;
- - Diferite organe de mașini, ca lagărele cu rostogolire, penele, cuplajele, angrenajele;
 - asamblări cu pene, caneluri
 - arbori de transmisie
 - asamblări nituite, asamblări cu șuruburi
 - rulmenți
 - angrenaje
 - cabluri cu legături flexibile.
- Contactele electrice specifice conectorilor electrici, se manifestă puternic negativ efectele fretting-ului mai ales prin creșterea rezistenței de contact.

Cu titlu de exemplu edificator, se poate cita accidentul unui elicopter Chinook în Marea Nordului în noiembrie 1986 cu 47 persoane la bord. Experții de la British International Helicopters & Co. au declarat că la originea accidentului a stat o multifisurare de origini diverse, printre care se menționa oboseala de fretting la carcasa transmisiei arborelui rotor principal.

Oboseala de fretting se află în atenția fabricanților de elicoptere, deoarece numeroase piese ale acestor aparate (asamblări presate, asamblări prin caneluri, rulmenți, asamblări prin șuruburi etc) sunt supuse unui regim puternic de vibrații și la solicitări variabile importante.

Statistici stabilite de Eurocopter France și rezultate din reviziile generale ale elicopterelor, au arătat că 60% din cazurile de înlocuire sau reparare ale unor piese au avut drept cauză fretting-ul.

Uzarea de fretting - înțelesă ca detașarea de particule de material de pe suprafețele în contact supuse la fretting, pe lângă modificarea geometriei și a aspectului exterior, poate avea urmări mult mai grave privind aspectul funcțional al cuplei de frecare. Astfel, sunt posibile două situații :

1. Dacă particulele de uzură pot fi evacuate din zona contactului, atunci, la piesele montate cu strângere, aceasta poate duce la pierderea strângerii inițiale.
2. Dacă particulele de uzură nu pot fi evacuate din zona contactului, atunci se poate crea o situație periculoasă pentru ajustajele cu joc, ducând la pierderea jocului și la blocarea pieselor aflate în contact sau chiar la imposibilitatea demontării lor (supape de siguranță și reglare, bolțuri de articulație, în general în contactele distribuite).

Pe de altă parte, oboseala de fretting se manifestă atunci când fisurile de fretting sunt inițiate în interiorul sau la marginea contactelor de fretting, propagarea acestora putând duce la reducerea drastică a duratei de viață sau chiar la rupere.

Acest mod de deteriorare de fretting poate fi observat în general în contactele concentrate, cum ar fi penele verticale, cabluri multifilare, rulmenți etc.

12.3.2. Mecanisme ale deteriorării prin fretting

Așa cum s-a precizat, din punct de vedere tribologic, uzarea de fretting se acceptă în general ca fiind îndepărtarea de material de pe suprafață în condiții de fretting, iar oboseala de fretting constând în reducerea duratei de viață ca urmare a fisurilor produse de fretting în interiorul sau la marginea contactelor. Desigur aceste aspecte trebuie corelate și cu aspectele legate de condițiile de solicitare (prezența sau absența unei sarcini variabile - alta decât sarcina normală - într-unul din cele două corpuri aflate în contact).

Măsura în care cele două aspecte ale deteriorării de fretting se leagă între ele nu este încă elucidată pe deplin. Pot fi făcute însă următoarele observații:

- 1.- pentru un anumit set de condiții de contact, deteriorarea suprafeței și distribuția solicitării de contact sunt similare în cele două aspecte. Factorul primar prezent în cazul oboselii de fretting și care nu este necesar pentru uzarea de fretting, este tensiunea variabilă într-unul din solidele aflate în contact.

2.- ruperile datorate oboselii de fretting apar în zonele care prezintă deteriorări de fretting ale suprafeței, de cele mai multe ori la marginea ariei de contact sau aproape de interfețele de alunecare/nealunecare.

3.- inițierea și propagarea fisurii sunt importante atât în uzarea cât și în oboseala de fretting, ducând la microfisuri și desprinderea de așchii de material (în cazul uzării), și la ruperi la oboseală (în cazul oboselii de fretting).

Se poate pune, de exemplu, întrebarea dacă oboseala de fretting este în primul rând un proces de rupere inițiată la oboseală a suprafeței deteriorate, sau este un efect al concentrărilor locale de tensiuni asociat cu efectul de margine al zonelor de contact. Răspunsul nu este clar, probabil o caracteristică sau alta prevalând în funcție de condițiile concrete de lucru.

Atât uzarea cât și oboseala de fretting sunt guvernate de rata de formare a celui de-al treilea corp între suprafețele inițiale de contact, existând o “cursă” între formarea celui de-al treilea corp și deteriorarea sub-suprafeței, “cursă” care durează doar câteva sute de cicluri sau cel mult câteva mii.

Astfel, uzarea de fretting este caracterizată prin pierderea de material în zonele de contact, ducând la formarea de cratere în aria supusă la fretting. Coroziunea de fretting se consideră o deteriorare prin formarea unui strat de oxid pe suprafață sau prin acumularea particulelor oxidate în punctele de contact, iar oboseala de fretting se consideră ca orice formă de oboseală creată prin fretting.

L. Vincent și colaboratorii consideră că uzarea și oboseala de fretting au origini diferite, dar că ambele forme de deteriorare coexistă, deseori, în același contact supus la fretting.

În aceste condiții, interpretarea rezultatelor este în general dificilă, astfel încât orientarea cercetărilor către studiul separat al celor două forme de deteriorare de fretting pare să fie justificată.

Uzarea prin fretting se poate explica, în principal, prin existența următoarelor etape:

- 1 - procese de deformare a contactului;
 - inițierea și propagarea fisurilor de la suprafața;
 - formarea și ruperea legăturilor adezive;
- 2 - formarea și oxidarea particulelor de uzură;
- 3 - acțiune abrazivă a particulelor de uzură.

Ponderea acestor etape este diferită, în funcție de amplitudinea alunecării.

Astfel, la amplitudini mici ale alunecării, uzarea oxidantă devine predominantă iar comportarea la uzură este mai bună.

La amplitudini mari, se apreciază că uzarea de fretting are loc, astfel:

- rugozitatea suprafeței inițiale este diminuată prin deformarea plastică a fiecărei asperități;
- uzură mecanică- adeziunea devine importantă;
- uzură oxidativă și abrazivă în cadrul unui regim staționar.

Se remarcă complexitatea fenomenului, apreciindu-se că uzarea de fretting implică adeziunea, oxidarea, abraziunea și chiar pittingul.

Explicațiile moderne privind deteriorarea prin fretting au în vedere starea de deformații și tensiuni din zona de contact și comportamentul reologic al materialului deformat.

Considerându-se un contact neconform de tip sferă /plan, s-a găsit că cele două tipuri de deteriorare de fretting pot fi asociate cu trei “solicitări” posibile ale interfeței de contact, astfel:

- “lipire” - nu există alunecare la interfața de contact, deplasarea impusă fiind preluată integral de elementele standului și de suprafețele în contact; nu apare nici un fel de deteriorare, fiind specifică micilor deplasări ($< 15 - 30 \mu\text{m}$);

- “alunecare parțială” - alunecarea apare la periferia ariei de contact în timp ce zona centrală rămâne lipită. Numit și “regim de lipire-alunecare”, este asociat de obicei cu fisurarea de fretting, având ca efect scăderea duratei de viață a componentelor. Se regăsește pentru amplitudini medii ale deplasării ($30 - 50 \mu\text{m}$);

- “alunecare totală” - este asociată, de obicei, cu detașarea de particule, și apare doar peste o anumită valoare a deplasării impuse ($> 50 \mu\text{m}$).

Evident, valorile deplasărilor impuse la care apar cele trei situații arătate mai sus sunt variabile în funcție de diferiți factori.

12.3.3. Model analitic de uzare prin fretting

Frecarea de pe suprafața de contact a două corpuri neconforme, în condițiile unor sarcini tangențiale oscilatorii, implică apariția alunecării la scară microscopică sau a absenței acesteia. Atunci când forța tangențială aplicată depășește forța de frecare minimă, apare alunecarea macroscopică. Dacă forța tangențială este mai mică decât forța de frecare, atunci pe suprafața de contact se disting două zone: o zonă periferică cu microalunecare și o zonă centrală fără alunecare.

Explicația apariției acestor zone se poate face prin modelul Mindlin-Cattaneo.

Se consideră distribuția de presiuni a fi de tip hertzian, iar tensiunile tangențiale de frecare a fi proporționale cu cele normale, coeficientul de proporționalitate fiind chiar coeficientul de frecare convențional. Atunci când se aplică o forță tangențială exterioară, distribuția tensiunilor tangențiale se compară cu cele de frecare. În zonele cu tensiuni tangențiale mai mari decât cele de frecare, apare alunecarea parțială.

Se analizează zona de contact pentru contactul unui cilindru cu un plan și al unei sfere cu un plan.

1) - *Cazul contactului unui cilindru cu un plan* (lățimea de contact $2a$) - frecarea elimină alunecarea într-o zonă centrată, caracterizată prin lățimea $2c$ (fig.12.7):

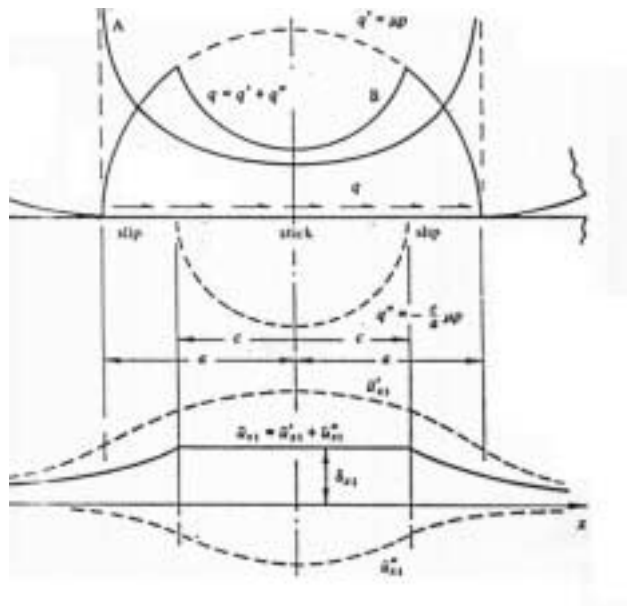


Fig. 12.7. Contactul cilindrilor cu axe paralele

Pentru distribuția hertziană de presiuni,

$$p(x) = \frac{2P}{\pi a^2} (a^2 - x^2)^{1/2} \quad p_0 = \frac{2P}{\pi a} = \left(\frac{PE^*}{\pi R} \right)^{1/2} \quad (12.9)$$

cu P forța normală pe unitatea de lungime a cilindrului, R - raza cilindrului și E^* modulul de elasticitate redus al celor două materiale în contact.

În ipoteza că nu există alunecare între cilindru și plan, tensiunile tangențiale $q(x)$, determinate de o forță tangențială Q pe un semispațiu elastic, au o distribuție de forma

$$q(x) = \frac{Q}{\pi(a^2 - x^2)^{1/2}} \quad (12.10)$$

Tracțiunea $q(x)$ (curba A din fig.12.7) tinde către infinit pe muchia contactului, astfel că ori apare alunecare, ori coeficientul de frecare tinde către infinit.

Dacă forța tangențială este superioară valorii μP (μ - coeficientul de frecare la alunecare, considerat constant pe banda de contact), distribuția tracțiunii este

$$q'(x) = \mu p(x) = \mu p_0 (1 - x^2/a^2)^{1/2} \quad (12.11)$$

Dacă nu apare alunecare în centrul contactului ($x = 0$), se poate scrie deplasarea tangențială, similar cu aceea produsă de distribuția tensiunilor normale:

$$\bar{u}'_{x1} = \delta'_{x1} - (1 - \nu_1^2) \mu p_0 x^2 / (a E_1) \quad (12.12)$$

în care δ'_{x1} este deplasarea centrului cilindrului, iar ν_1 este coeficientul contracției transversale (coeficientul Poisson).

Deplasarea centrului cilindrului după direcția forței tangențiale se determină pe baza ipotezelor lui Hertz, care pentru cazul concret are expresia:

$$\delta'_{x1} = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} \mu P \left(2 \ln \frac{4R}{a} - 1 \right) \quad (12.13)$$

Pentru existența și a altor puncte, din apropierea centrului, fără alunecare (zona de lipire), se introduce o tracțiune adițională de forma

$$q''(x) = -\frac{c}{a} \mu p_0 (1 - x^2/c^2)^{1/2} \quad (12.14)$$

care acționează în zona $-c \leq x \leq c$ ($c < a$), ca în fig.12.7 (curba B).

Deplasarea tangențială produsă de această tracțiune adițională este analoagă cu (12.12), astfel:

$$\bar{u}''_{x1} = \delta''_{x1} - \frac{c}{a} (1 - \nu_1^2) \mu p_0 x^2 / (c E_1) \quad (12.15)$$

cu deplasarea centrului cilindrului de forma

$$\delta''_{x1} = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} \mu P \left(2 \ln \frac{4R}{c} - 1 \right) \quad (12.16)$$

Dacă se suprapun cele două tracțiuni q' și q'' , rezultanta deplasărilor în zona centrală, $-c \leq x \leq c$, este constantă

$$\bar{u}_{x1} = \bar{u}'_{x1} + \bar{u}''_{x1} = \delta'_{x1} - \delta''_{x1} = \delta_{x1} = \frac{2(1 - \nu_1^2)}{\pi E_1} \mu P \ln \frac{c}{a} \quad (12.17)$$

Ca urmare, distribuția rezultantă de tracțiuni este

$$q(x) = q'(x) + q''(x) = \mu p_0 \left\{ (a^2 - x^2)^{1/2} - (c^2 - x^2)^{1/2} \right\} / a \quad (12.18)$$

și care este mai mică decât μp în orice punct.

În zona muchiei de contact, $c \leq |x| \leq a$, apare alunecarea și

$$q(x) = \mu p(x)$$

Pentru determinarea zonei de lipire și a celor două zone periferice de alunecare, atunci când forța normală este P și forța tangențială Q , se scrie condiția de echilibru mecanic pe direcția tangențială

$$Q = \int_{-a}^a q(x) dx = \int_{-a}^a q'(x) dx + \int_{-c}^c q''(x) dx = \mu P - \frac{c^2}{a^2} \mu P \quad (12.19)$$

Din această condiție, se deduce zona centrală cu lipire (stick) și zona periferică cu alunecare (slip):

$$\frac{c}{a} = \left(1 - \frac{Q}{\mu P}\right)^{1/2} \quad (12.20)$$

Din această expresie se observă că atunci când forța tangențială Q este variabilă și cea normală P este constantă, zona de lipire este semnificativ modificată, funcție și de coeficientul de frecare.

Pentru a evidenția efectul forței tangențiale asupra zonelor de lipire și alunecare, se consideră că inițial cilindrul este solicitat numai de o forță normală P_0 (fig.12.8), iar apoi se aplică o forță F , înclinată față de cea inițială cu unghiul α .

Sub acțiunea forței P_0 , semilățimea hertziană de contact, a_0 , este

$$a_0^2 = 4P_0R/(\pi E^*)$$

În timpul aplicării forței oblice F , creșterile elementare ale forței normale dP și a celei tangențiale dQ sunt:

$$dP = dF \cos \alpha \quad \text{și} \quad dQ = dF \sin \alpha \quad (12.21)$$

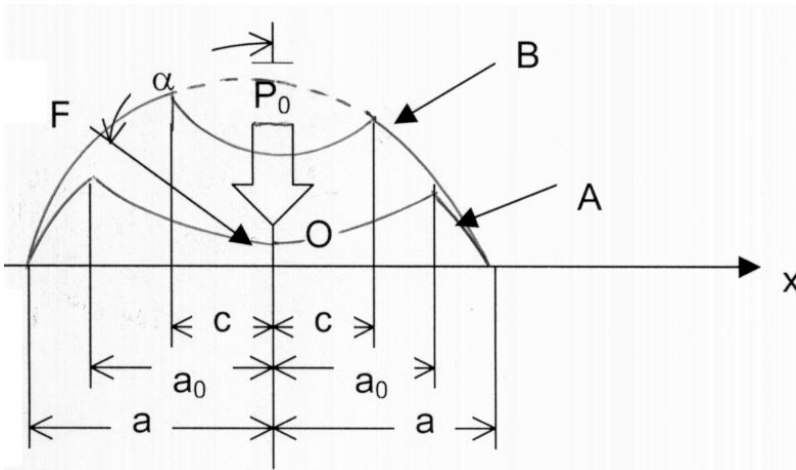


Fig.12.8. Contactul liniar supus unei forțe înclinate.

Creșterea elementară a ariei de contact se poate evalua pe baza creșterii semilățimii hertziane de contact

$$a^2 = 4P R/(\pi E^*) \quad \text{și diferențiind rezultă} \quad 2ada = 4RdP/(\pi E^*) = \frac{4R}{\pi E^* \tan \alpha} dQ \quad (12.22)$$

Se consideră inițial că forța tangențială elementară nu conduce la alunecare, astfel că distribuția de tensiuni tangențiale elementare în direcția x este de forma (12.10)

$$dq(x) = \frac{dQ}{\pi(a^2 - x^2)^{1/2}} \quad (12.23)$$

Pentru cunoașterea acestei distribuții de tensiuni tangențiale, se integrează (12.23), ținând seama de (12.22) pentru un anumit unghi α . Limitele de integrare sunt diferite, după cum punctele de contact se găsesc pe aria inițială de contact $(-a_0, a_0)$ sau pe noua arie de contact, în curs de formare $(-a_1, -a_0) \cup (a_0, a_1)$, ca urmare a creșterii forței F de la 0 la o valoare F_1 . Semilățimea hertziană a_1 corespunde forței normale totale P_0 și F_1 .

Astfel,

$$q(x) = \frac{E^* \tan \alpha}{3R} \int_{a_0}^{a_1} \frac{da}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} = (\sqrt{a_1^2 - x^2} - \sqrt{a_0^2 - x^2}) \frac{E^* \tan \alpha}{3R} \text{ pentru } x \in [0, a_0] \quad (12.24)$$

$$q(x) = \frac{E^* \tan \alpha}{3R} \int_x^{a_1} \frac{da}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} = (\sqrt{a_1^2 - x^2}) \frac{E^* \tan \alpha}{3R} \text{ pentru } x \in [a_0, a_1] \quad (12.25)$$

Presiunea hertziană normală de contact pe noua suprafață formată este

$$p(x) = \left[\frac{(P_0 + F_1 \cos \alpha) E^*}{\pi a_1 R} \right]^{1/2} \sqrt{a_1^2 - x^2} \quad (12.26)$$

și

$$a_1 = \left(\frac{4(P_0 + F_1 \cos \alpha) R}{\pi E^*} \right)^{1/2}$$

Din compararea tensiunilor tangențiale $q(x)$, (12.25) sau (12.24), cu cele de frecare $q_f(x) = \mu p(x)$ cu $p(x)$ din (12.246) (curba A din fig.12.8), se constată că pentru a nu exista alunecare în nici-un punct, trebuie respectată restricția

$$q(x) \leq q_f(x) = \mu p(x) \text{ sau } \tan \alpha \leq \mu \quad (12.27)$$

Pe de altă parte, componenta tangențială Q a forței oblice F , indiferent de unghiul α , va defini o zonă de alunecare, conform modelului Mindlin, pe baza expresiei (12.18) (curba B din fig.12.8):

$$1 - \frac{c^2}{a^2} = \frac{F \sin \alpha}{\mu(P_0 + F \cos \alpha)} \quad (12.28)$$

Limita zonei de alunecare se găsește în interiorul suprafeței hertziane inițiale, astfel că alunecarea începe ($c = 0$), când

$$F = \frac{\mu P_0}{\cos \alpha (\tan \alpha - \mu)} \quad (12.29)$$

În cazul în care cilindrul nu este solicitat inițial de forța normală P_0 , rezultatul se reduce la legea simplă a frecării uscate, potrivit căreia mișcarea de alunecare se inițiază numai când unghiul α depășește unghiul de frecare.

Procesul de fretting apare atunci când în contact apar mici oscilații, astfel că se analizează situația în care forța tangențială Q variază între $-Q_0$ și $+Q_0$, iar forța normală P_0 rămâne constantă și implicit forța de frecare μP_0 .

La aplicarea unei forțe tangențiale Q în direcția pozitivă a axei x , se formează cele două zone cu alunecare și fără alunecare, conform expresiei (12.18)

$$\frac{c}{a} = \left(1 - \frac{Q}{\mu P_0}\right)^{1/2} \quad \text{și} \quad \frac{Q}{\mu P_0} = 1 - \frac{c^2}{a^2}$$

Distribuția de tensiuni tangențiale este precizată prin expresiile (12.11) și (12.16), corespunzător celor două zone (curba A pe fig.12.9 a).

Când forța tangențială atinge valoarea Q_0 , deplasarea tangențială corespunde punctului A din fig. 12.9 b și este determinată cu expresia (12.17) și (12.20). Forța tangențială începe să descrească și care reprezintă o aplicare a unei sarcini elementare tangențiale negative.

În punctul A

$$\frac{Q_0}{\mu P_0} = 1 - \frac{c_0^2}{a^2} \quad (12.30)$$

În timpul descărcării

$$\frac{Q}{\mu P_0} = \frac{Q_0}{\mu P_0} - \frac{\Delta Q}{\mu P_0} = \left(1 - \frac{c_0^2}{a^2}\right) - 2 \left(1 - \frac{c_1^2}{a^2}\right) \quad (12.31)$$

și asigură alunecarea inversă c_1/a . În punctul B, forța tangențială este 0, astfel că, din (12.31) se deduce

$$\frac{c_1}{a} = \sqrt{0,5(1 + c_0^2/a^2)} \quad (12.32)$$

Deplasarea tangențială în timpul descreșterii forței Q se determină din (12.16), (12.17) și (12.32):

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_0 - \Delta\delta = \frac{\mu P_0}{\pi} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} - \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \left[2 \ln \left(\frac{c_0}{a} \right) - 4 \ln \left(\frac{c_1}{a} \right) \right] = \\ &= \frac{2\mu P_0}{\pi} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} - \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \left[0,5 \ln \left(1 - \frac{Q_0}{\mu P_0} \right) - \ln \left(1 - \frac{Q_0 - Q}{2\mu P_0} \right) \right] \end{aligned} \quad (12.33)$$

Această deplasare tangențială este prezentată prin curba ABC din fig. 12.9 b.

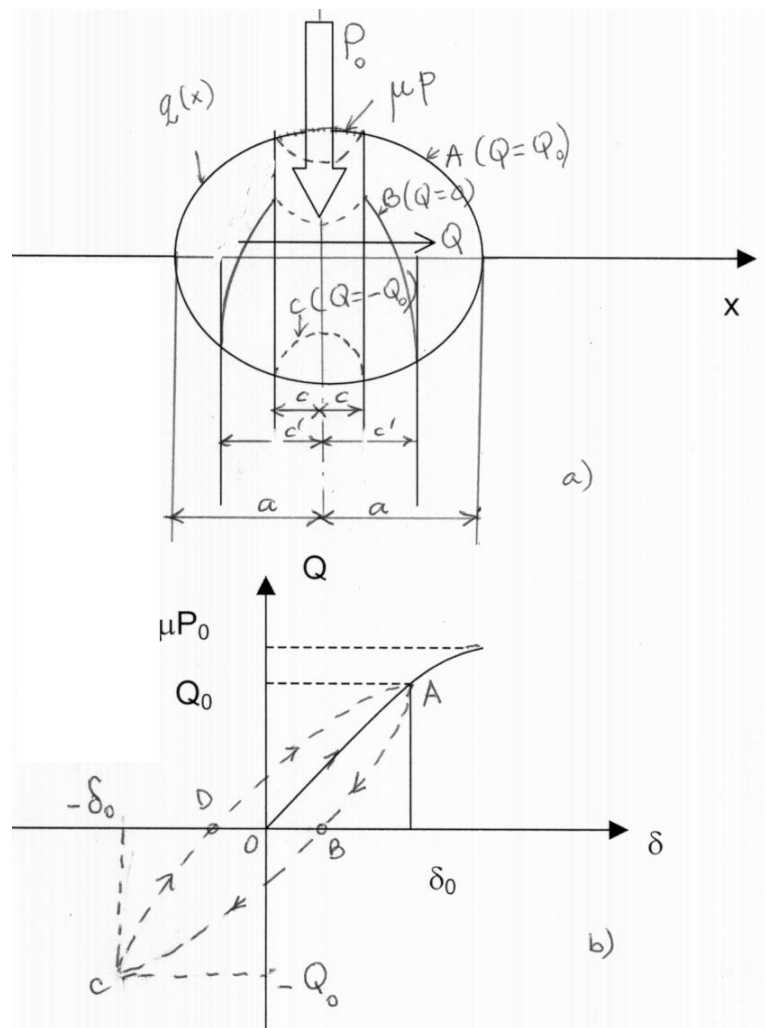


Fig.12.9. Contactul liniar supus unei sarcini tangențiale alternant simetrice.

În punctul C, forța tangențială $Q = -Q_0$, iar deplasarea $\delta = -\delta_0$. La creșterea forței tangențiale de la $-Q_0$ la Q_0 , deplasarea elastică δ este simetrică cu aceea din timpul descreșterii forței tangențiale, astfel că se obține o curbă închisă, perfect simetrică ABCDA.

Lucrul mecanic efectuat de forța tangențială la un ciclu complet constituie cauza principală de acumulare și de disipare a energiei, astfel că reprezintă un criteriu de apariție a particulelor de uzare. Cunoscând dependența deplasării tangențiale de forța tangențială (12.33), se deduce expresia lucrului mecanic pentru unitatea de lungime a contactului cilindric:

$$L_m = \int_{-\delta_0}^{\delta_0} Q d\delta = 4 \frac{2(\mu P_0)^2}{\pi} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \left(0,5x_0y_0 - \int_{x_1}^{x_0} (y_0 - 2 + 2\sqrt{1-y_0}e^{-x}) dx \right) \quad (12.34)$$

unde $y_0 = Q_0/(\mu P_0)$, $x_0 = 0,5 \ln(1-y_0)$ și $x_1 = \ln\left(\frac{2\sqrt{1-y_0}}{2-y_0}\right)$

Notând energia adimensională pierdută pe un ciclu,

$$L_{.ma} = \frac{L_m \pi}{8(\mu P_0)^2 \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}$$

se prezintă în fig. 12.10 ca funcție de amplitudinea forței tangențiale adimensionale y_0 .

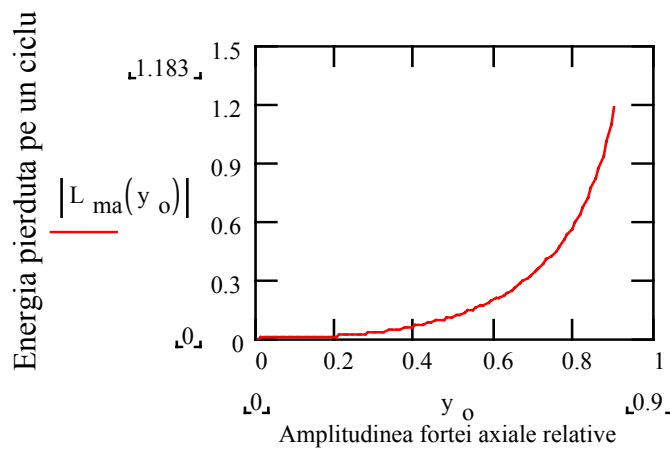


Fig. 12.10. Energia pierdută pe un ciclu de solicitare tangențială.

2) - *Cazul contactului unei sfere cu un plan* (diametrul cercului de contact $2a$) - frecarea elimină alunecarea într-o zonă centrată, caracterizată prin diametrul $2c$ (fig.12.7):

Analiza zonei de contact se face similar cu aceea a contactului cilindric cu axe paralele. Deosebirile fiind determinate de distribuțiile de tensiuni radiale și tangențiale.

Pentru distribuția hertziană radială de presiuni,

$$p(r) = \frac{2P}{\pi a^2} (a^2 - r^2)^{1/2} \quad (12.35)$$

$$p_0 = \frac{3P}{2\pi a^2} = \left(\frac{6PE^{*2}}{\pi^3 R^2} \right)^{1/3},$$

cu P forța normală pe sferă, R- raza sferei și E* modulul de elasticitate redus al celor două materiale în contact.

În ipoteza că nu există alunecare între sferă și plan, tensiunile tangențiale q(r), determinate de o forță tangențială Q pe un semispațiu elastic, au o distribuție de forma

$$q(r) = \frac{Q}{\pi(a^2 - r^2)^{1/2}} = q_0(1 - r^2/a^2)^{-1/2} \quad (12.46)$$

în care $q_0 = Q/(2\pi a^2)$ este valoarea maximă a tensiunii tangențiale.

Deplasarea elastică produsă de tensiunile tangențiale are forma

$$\bar{u}_x = \frac{\pi(2-\nu)}{4G} q_0 a \quad (12.37)$$

astfel că, pentru deplasarea relativă dintre două puncte ale celor două corpuri elastice (sfera și planul) este

$$\delta_x = \frac{Q_x}{8a} \left(\frac{2-\nu_1}{G_1} + \frac{2-\nu_2}{G_2} \right) \quad (12.38)$$

Tracțiunea q(r) tinde către infinit pe muchia contactului, astfel că ori apare alunecare, ori coeficientul de frecare tinde către infinit.

Dacă forța tangențială este superioară valorii μP (μ - coeficientul de frecare la alunecare, considerat constant pe cercul de contact), distribuția tracțiunii este

$$q'(x, y) = \mu p(x, y) = \mu p_0 (1 - r^2/a^2)^{1/2} \quad (12.39)$$

Dacă nu apare alunecare în centrul contactului ($x = 0, y = 0$), se poate scrie deplasarea tangențială în direcția x a forței Q și în direcția y:

$$\bar{u}_x' = \frac{\pi\mu p_0}{32Ga} [4(2-\nu)a^2 + (4-\nu)x^2 + (4-3\nu)y^2] \quad (12.40 a)$$

$$\text{și } \bar{u}_y' = \frac{\pi\mu p_0}{32Ga} 2\nu xy \quad (12.40 b)$$

Pentru existența și a altor puncte, din apropierea centrului, fără alunecare (zona de lipire), se introduce o tracțiune adițională de forma

$$q''(x, y) = -\frac{c}{a} \mu p_0 (1 - r^2/c^2)^{1/2} \quad (12.41)$$

care acționează în zona $r \leq c$.

Deplasarea tangențială produsă de această tracțiune adițională este analoagă cu (12.40), astfel:

$$\bar{u}_x'' = -\frac{c}{a} \frac{\pi\mu p_0}{32Gc} [4(2-\nu)c^2 + (4-\nu)x^2 + (4-3\nu)y^2] \quad (12.42 a)$$

$$\bar{u}_y'' = -\frac{c}{a} \frac{\pi\mu p_0}{32Gc} 2\nu xy \quad (12.42 b)$$

Dacă se suprapun cele două tracțiuni q' și q'' , rezultanta deplasărilor în zona centrală, $r \leq c$, este constantă

$$\bar{u}_{x1} = \bar{u}'_{x1} + \bar{u}''_{x1} = \frac{\pi\mu P_0}{8a} \left(\frac{2-\nu_1}{G_1} \right) (a^2 - c^2) \quad (12.43 a)$$

$$\bar{u}_{y1} = 0 \quad (12.43 b)$$

Ca urmare, deplasarea rezultantă în interiorul cercului cu lipire (stick) este constantă

$$\delta_x = \bar{u}_{x1} - \bar{u}_{x2} = \frac{3\mu P}{16} \left(\frac{2-\nu_1}{G_1} + \frac{2-\nu_2}{G_2} \right) \frac{a^2 - c^2}{a^3} \quad (12.44)$$

Pentru determinarea zonei circulare de lipire și a zonei inelare periferice de alunecare, atunci când forța normală este P și forța tangențială Q , se scrie condiția de echilibru mecanic pe direcția tangențială

$$Q = \int_{-a}^a q(x) dx = \int_{-a}^a q'(x, y) dx + \int_{-c}^c q''(x, y) dx = \mu P - \frac{c^3}{a^3} \mu P \quad (12.45)$$

Din această condiție, se deduce zona centrală cu lipire (stick) și zona periferică cu alunecare (slip):

$$\frac{c}{a} = \left(1 - \frac{Q}{\mu P} \right)^{1/3} \quad (12.46)$$

Analog cu contactul liniar, și din această expresie, se observă că atunci când forța tangențială Q este variabilă și cea normală P este constantă, zona de lipire este semnificativ modificată, funcție și de coeficientul de frecare.

Pentru a evidenția efectul forței tangențiale asupra zonelor de lipire și alunecare, se consideră că inițial sfera este solicitată numai de o forță normală P_0 (fig.12.11), iar apoi se aplică o forță F , înclinată față de cea inițială cu unghiul α .

Sub acțiunea forței P_0 , raza cercului hertzian de contact, a_0 , este

$$a_0^3 = 3P_0 R / (4E^*) \quad (12.47)$$

În timpul aplicării forței oblice F , creșterile elementare ale forței normale dP și a celei tangențiale dQ sunt:

$$dP = dF \cos \alpha \quad \text{și} \quad dQ = dF \sin \alpha \quad (12.21)$$

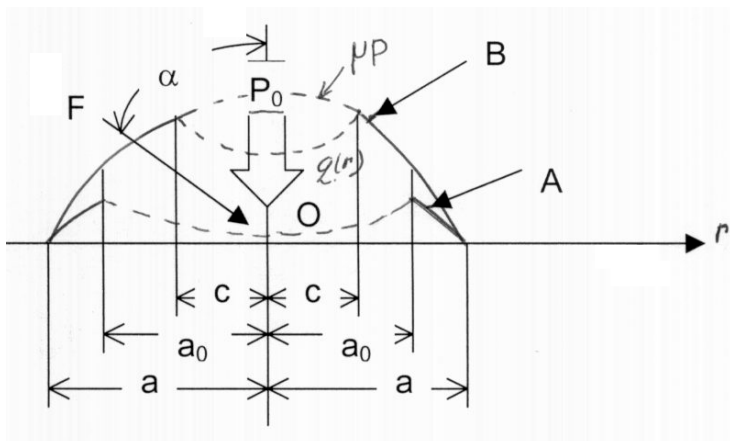


Fig.12.11. Contactul punctual hertzian supus unei forțe înclinate.

Creșterea elementară a ariei de contact se poate evalua pe baza creșterii razei hertziene de contact

$$a^3 = 3P R / (4E^*) \quad \text{și} \quad \text{diferențind rezultă} \quad 3a^2 da = 3R dP / (4E^*) = \frac{3R}{4E^* \tan \alpha} dQ \quad (12.48)$$

Se consideră inițial că forța tangențială elementară nu conduce la alunecare, astfel că distribuția de tensiuni tangențiale elementare în direcția x este de forma (12.46)

$$dq(r) = \frac{dQ}{2\pi a(a^2 - r^2)^{1/2}} \quad (12.49)$$

Pentru cunoașterea acestei distribuții de tensiuni tangențiale, se integrează (12.49), ținând seama de (12.48) pentru un anumit unghi α . Limitele de integrare sunt diferite, după cum punctele de contact se găseau pe aria circulară inițială de contact de rază a_0 sau pe noua arie inelară de contact, în curs de formare, de raze a_1 și a_0 , ca urmare a creșterii forței F de la 0 la o valoare F_1 . Cercul exterior hertzian de rază a_1 corespunde forței normale totale P_0 și F_1 .

Astfel,

$$q(r) = \frac{2E^* \tan \alpha}{\pi R} \int_{a_0}^{a_1} \frac{da}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}}} = (\sqrt{a_1^2 - r^2} - \sqrt{a_0^2 - r^2}) \frac{2E^* \tan \alpha}{\pi R} \text{ pentru } r \in [0, a_0] \quad (12.50)$$

$$q(r) = \frac{2E^* \tan \alpha}{\pi R} \int_r^{a_1} \frac{da}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}}} = (\sqrt{a_1^2 - r^2}) \frac{2E^* \tan \alpha}{\pi R} \text{ pentru } r \in [a_0, a_1] \quad (12.51)$$

Presiunea hertziană normală de contact pe noua suprafață formată este

$$p(r) = \left[\frac{3(P_0 + F_1 \cos \alpha)}{2\pi a_1^3} \right] \sqrt{a_1^2 - r^2} = \frac{2E^*}{\pi R} \sqrt{a_1^2 - r^2} \quad (12.52)$$

și

$$a_1 = \left(\frac{3(P_0 + F_1 \cos \alpha)R}{4E^*} \right)^{1/3}$$

Din compararea tensiunilor tangențiale $q(r)$, (12.50) sau (12.51), cu cele de frecare $q_f(r) = \mu p(r)$ cu $p(r)$ din (12.52), se constată că pentru a nu exista alunecare în nici-un punct, trebuie respectată restricția

$$q(r) \leq q_f(r) = \mu p(r) \text{ sau } \tan \alpha \leq \mu \quad (12.53)$$

Pe de altă parte, componenta tangențială Q a forței oblice F , indiferent de unghiul α , va defini o zonă de alunecare, conform modelului Mindlin, pe baza expresiei (12.18) (curba B din fig.12.8):

$$1 - \frac{c^3}{a^3} = \frac{F \sin \alpha}{\mu(P_0 + F \cos \alpha)} \quad (12.54)$$

Limita zonei de alunecare se găsește în interiorul suprafeței circulare hertziane inițiale, astfel că alunecarea începe ($c = 0$), când

$$F = \frac{\mu P_0}{\cos \alpha (\tan \alpha - \mu)} \quad (12.55)$$

În cazul în care sfera nu este solicitată inițial de forța normală P_0 , rezultatul se reduce la legea simplă a frecării uscate, potrivit căreia mișcarea de alunecare se inițiază numai când unghiul α depășește unghiul de frecare.

Procesul de fretting apare atunci când în contact apar mici oscilații, astfel că se analizează situația în care forța tangențială Q variază între $-Q_0$ și $+Q_0$, iar forța normală P_0 rămâne constantă și implicit forța de frecare μP_0 .

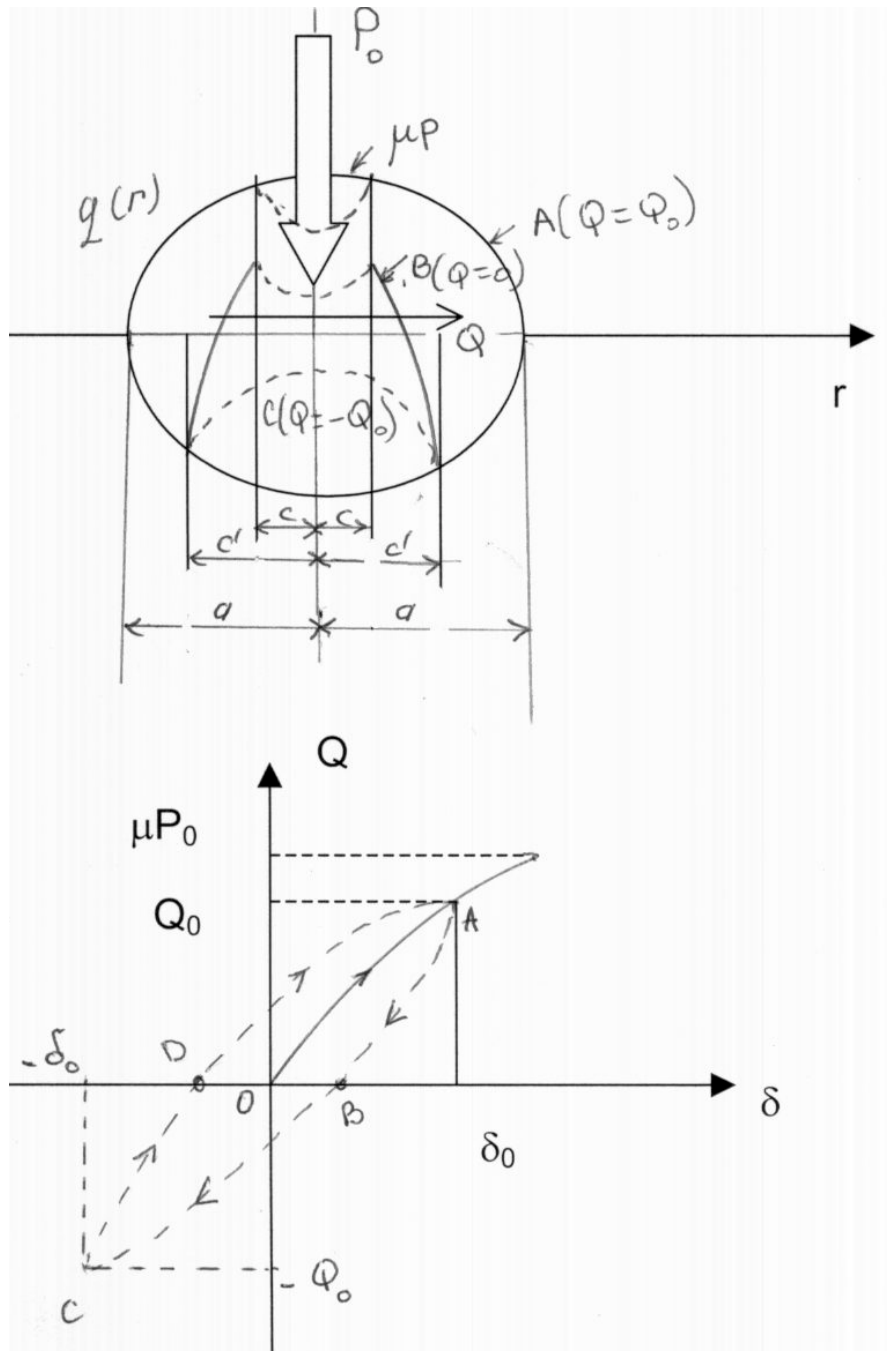


Fig.12.12. Contactul circular hertzian supus unei sarcini normale constante P_0 și unei sarcini tangențiale oscilante de amplitudine Q_0 .

La aplicarea unei forțe tangențiale Q în direcția radială r , se formează cele două zone cu alunecare și fără alunecare, conform expresiei (12.46)

$$\frac{c}{a} = \left(1 - \frac{Q}{\mu P_0}\right)^{1/3} \quad \text{și} \quad \frac{Q}{\mu P_0} = 1 - \frac{c^3}{a^3}$$

Distribuția de tensiuni tangențiale este precizată prin expresiile (12.50) și (12.51), corespunzător celor două zone (curba A pe fig.12.12 a).

Când forța tangențială atinge valoarea Q_0 , deplasarea tangențială corespunde punctului A din fig. 12.12 b și este determinată cu expresia (12.44) și (12.46):

$$\delta_x = \frac{3\mu P_0}{16a} \left(\frac{2-\nu_1}{G_1} + \frac{2-\nu_2}{G_2} \right) \left[1 - \left(1 - \frac{Q_x}{\mu P_0} \right)^{2/3} \right] \quad (12.56)$$

sau
$$Q_{ax} = \frac{Q_x}{\mu P_0} = 1 - (1 - \delta_{ax})^{3/2} \text{ cu } \delta_{ax} = \frac{\delta_x 16a}{3\mu P_0 \left(\frac{2-\nu_1}{G_1} + \frac{2-\nu_2}{G_2} \right)}$$

Forța tangențială începe să descrească și care reprezintă o aplicare a unei sarcini elementare tangențiale negative.

În punctul A

$$\frac{Q_0}{\mu P_0} = 1 - \frac{c_0^3}{a^3} \quad (12.57)$$

În timpul descărcării

$$\frac{Q}{\mu P_0} = \frac{Q_0}{\mu P_0} - \frac{\Delta Q}{\mu P_0} = \left(1 - \frac{c_0^3}{a^3} \right) - 2 \left(1 - \frac{c_1^3}{a^3} \right) \quad (12.58)$$

și asigură alunecarea inversă c_1/a . În punctul B, forța tangențială este 0, astfel că, din (12.58) se deduce

$$c_1/a = \left[0,5 \left(1 + \frac{c_1^3}{a^3} \right) \right]^{1/3} \quad (12.59)$$

Deplasarea tangențială în timpul descreșterii forței Q se determină din (12.56), (12.58) și (12.59):

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_0 - \Delta\delta = \frac{3\mu P_0}{16a^3} \left(\frac{2-\nu_1}{G_1} + \frac{2-\nu_2}{G_2} \right) \left[(a^2 - c_0^2) - 2(a^2 - c_1^2) \right] = \\ &= \frac{3\mu P_0}{16a} \left(\frac{2-\nu_1}{G_1} + \frac{1-\nu_2}{G_2} \right) \left[2 \left(1 - \frac{Q_0 - Q}{2\mu P_0} \right)^{2/3} - \left(1 - \frac{Q_0}{\mu P_0} \right)^{2/3} - 1 \right] \end{aligned} \quad (12.60)$$

Această deplasare tangențială este prezentată prin curba ABC din fig. 12.12 b.

În punctul C, forța tangențială $Q = -Q_0$, iar deplasarea $\delta = -\delta_0$. La creșterea forței tangențiale de la $-Q_0$ la Q_0 , deplasarea elastică δ este simetrică cu aceea din timpul descreșterii forței tangențiale, astfel că se obține o curbă închisă, perfect simetrică ABCDA.

Lucrul mecanic efectuat de forța tangențială la un ciclu complet constituie cauza principală de acumulare și de disipare a energiei, astfel că reprezintă un criteriu de apariție a particulelor de uzare. Cunoscând dependența deplasării tangențiale de forța tangențială, se deduce expresia lucrului mecanic:

$$L_m = \int_{-\delta_0}^{\delta_0} Q d\delta = \frac{9(\mu P_0)^2}{10a} \left(\frac{2-\nu_1}{G_1} + \frac{1-\nu_2}{G_2} \right) \left[1 - \left(1 - \frac{Q_0}{\mu P_0} \right)^{5/3} - \frac{5Q_0}{6\mu P_0} \left[1 + \left(1 - \frac{Q_0}{\mu P_0} \right)^{2/3} \right] \right] \quad (12.61)$$

Notând $y_0 = Q_0/(\mu P_0)$, energia adimensională pierdută pe un ciclu,

$$L_{.ma} = \frac{L_m 10a}{9(\mu P_0)^2 \left(\frac{2-\nu_1}{G_1} + \frac{1-\nu_2}{G_2} \right)}$$

se prezintă în fig. 12.13 ca funcție de amplitudinea forței tangențiale adimensionale y_0 .

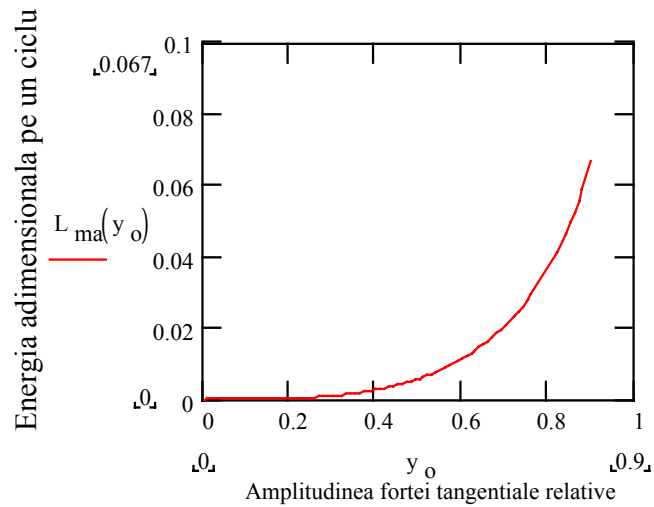


Fig. 12.13. Energia pierdută pe un ciclu de solicitare tangențială.

Din analiza graficelor energiei pierdută pe un ciclu de solicitare tangențială pentru contactul hertzian liniar și cel punctual (fig. 12. 10 și 12.13), se observă diferența semnificativă la aceeași amplitudine a forței tangențiale, în sensul că la contactul liniar pierderile sunt mai mari.

Acumularea energiei conduce la apariția particulelor de uzură, particule care pot fi sau nu evacuate din zona de lipire.

Particulelor de uzură produc jocuri dacă în cupla inițială a fost strângere și strângere dacă în cupla inițială a fost joc.

Reducerea uzării prin fretting se poate realiza prin reducerea zonei de alunecare. Soluțiile de reducere a zonei de alunecare au în vedere forma adecvată a corpurilor din zona de contact (fig. 12.14) și utilizarea unor acoperiri sau a unor lubrifianți solizi.

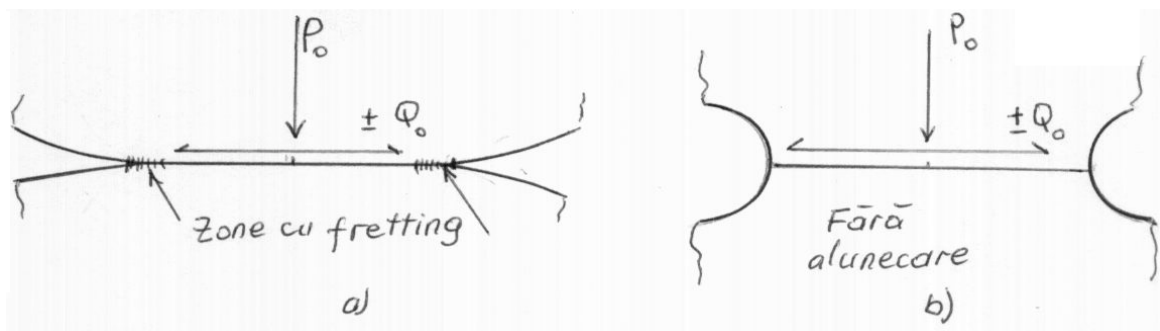


Fig. 12.14. Influența profilelor corpurilor în contact asupra ,microalunecărilor și frettingului.