

13. RODAJUL - PROCES DE UZARE CONTROLAT [A7, A11, A15]

13.1 Rodajul. Definiere. Procese de bază

Calitatea suprafețelor elementelor unei cuple de frecare, realizată prin procedee tehnologice, se deosebește, uneori esențial, de calitatea suprafețelor, după câteva ore de funcționare (mișcare relativă și presiuni de contact).

Prin rodajul unei cuple de frecare se înțelege procesul de schimbare a microgeometriei suprafețelor conjugate și a proprietăților fizico-mecanice ale straturilor superficiale ale celor două suprafețe, în condițiile funcționării inițiale și în prezența unor viteze și sarcini determinate.

Rolul principal al rodajului este de a minimiza energia consumată prin frecare, temperatura de lucru și intensitatea de uzare, asigurând în acest fel cuplei de frecare o durabilitate maximă.

Trecerea de la starea inițială a suprafeței de frecare la starea "funcțională" este însoțită de transformări ale stratului superficial. Natura acestor transformări este dependentă de procesul de frecare din această perioadă, proces care, la rândul său, este influențat de cuplul de material, viteza de alunecare sau rostogolire, presiunea reală de contact, regimul termic, lubrifianții etc.

Ca atare, în perioada de rodaj se pot evidenția două categorii de aspecte: modificări ale microgeometriei suprafețelor (înălțimea rugozităților, curbura rugozităților, curba de portanță Abbott-Firstone) și modificări ale proprietăților fizico-mecanice ale stratului superficial (duritatea, deformația specifică la rupere, componentele molecular mecanice ale frecării).

13.2 Modificări ale microgeometriei suprafețelor în timpul rodajului

În procesul de rodaj, pe vârfulurile celor mai mari rugozități ale suprafețelor de frecare apar presiuni de contact ridicate, ce depășește limita de curgere a materialului, astfel că, în procesul de alunecare aceste vârfuluri se deformează plastic și la câteva cicluri de solicitare se rup și formează particule de uzură. Pelicula de lubrifianț este întreruptă de vârfulurile celor mai mari rugozități, astfel că procesul de frecare poate fi considerat limită sau mixt.

Deformațiile plastice ale vârfulurilor celor mai mari rugozități conduc la raze de curbură esențial diferite față de cele inițiale. Noile raze de curbură formate sunt optime din punctul de vedere al frecării, oferind cea mai bună stabilitate a peliculei de lubrifianț.

Se definește rugozitatea nou formată în procesul de frecare ca o "rugozitate de echilibru" sau rugozitate "funcțională", rugozitate ce se modifică în continuarea procesului de frecare și uzare foarte puțin.

Multe cercetări experimentale dovedesc că o caracteristică de bază a procesului de rodaj este aceea a dependenței foarte reduse sau chiar independenței rugozității de echilibru de rugozitatea inițială, tehnologică.

Rugozitatea de echilibru este influențată în special de materialul suprafeței de frecare respective, presiunea de contact, temperatura din zona de contact, condițiile de ungere, natura lubrifianțului etc. Această rugozitate este optimă pentru procesul de frecare și conduce la o intensitate de uzare minimă.

Înălțimea rugozității de echilibru poate fi mai mică sau mai mare decât a rugozității inițiale, așa cum se poate observa din fig. 13.1, în funcție de cuplul de material.

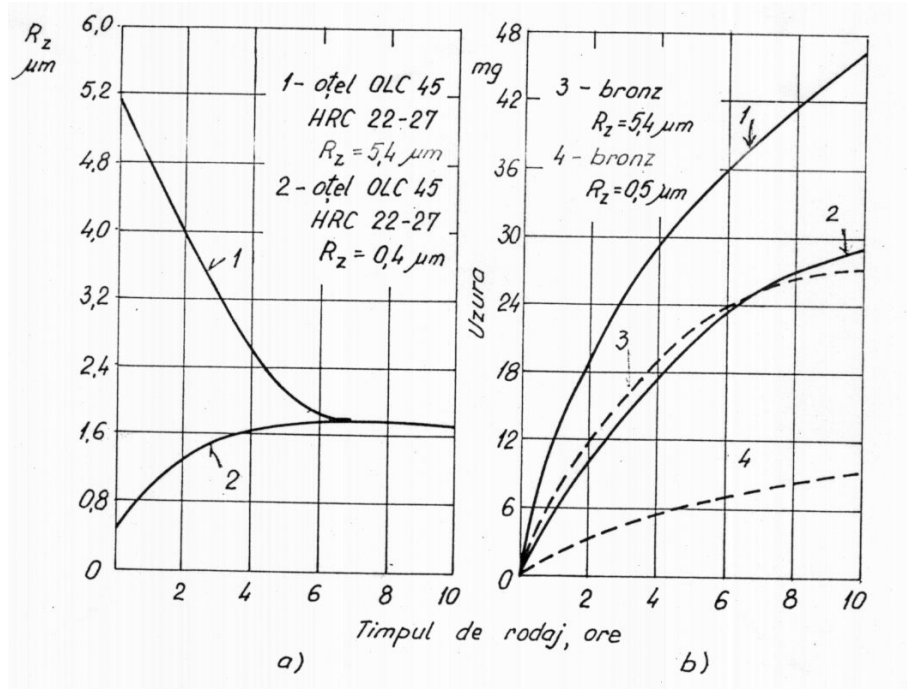


Fig. 13.1 Dependența înălțimii rugozității a) și uzurii fusului din oțel și cuzinetului din bronz b) de timpul de rodaj, la presiunea medie $p = 3 \text{ MPa}$ și viteza de alunecare $v = 5 \text{ m/s}$.

În procesul de rodaj se formează o microgeometrie corespunzătoare presiunii critice (presiunea caracteristică deformațiilor plastice ale vârfurilor rugozității), astfel că noile curburi ale vârfului rugozității asigură, la finele rodajului, apariția deformațiilor elastice.

Sub aspect teoretic, este ilustrativ modelul lui Mihin și Dobîcinîi. Se consideră contactul, inițial plastic, al unui semiplan fără rugozități cu o suprafață cu rugozități sub formă de sfere de aceeași rază, dispuse la înălțimi diferite, corespunzătoare curbei de portanță a unei suprafețe reale.

La prima trecere a unei rugozități pe semiplan, aflată sub sarcina normală F_n și a forței de frecare F_f , materialul se deformează plastic în zona frontală ABC și elastic în zona posterioară, ACD (fig. 13.2 a, $A_p \gg A_e$).

Se consideră un regim de lucru staționar, astfel că o anumită rugozitate, după un anumit timp, alunecă pe una și aceeași urmă făcută la prima trecere. După un număr "n" de treceri ale aceleiași rugozități pe aceeași urmă, scade aria deformată plastic și crește aria deformată elastic, însă $A_p > A_e$ (fig. 13.2 b). Rodajul la sarcina F_n , se consideră încheiat atunci când aria deformată elastic egalează aria frontală deformată plastic (fig. 13.2 c, $A_p = A_e$). În acest caz, semiplanul, inițial fără rugozități, are rugozități sub forma unui "canal" cu adâncimea dependentă de forța exterioară F_n , de coeficientul de frecare și de raza sferei rugozității rigide a contrapiesei.

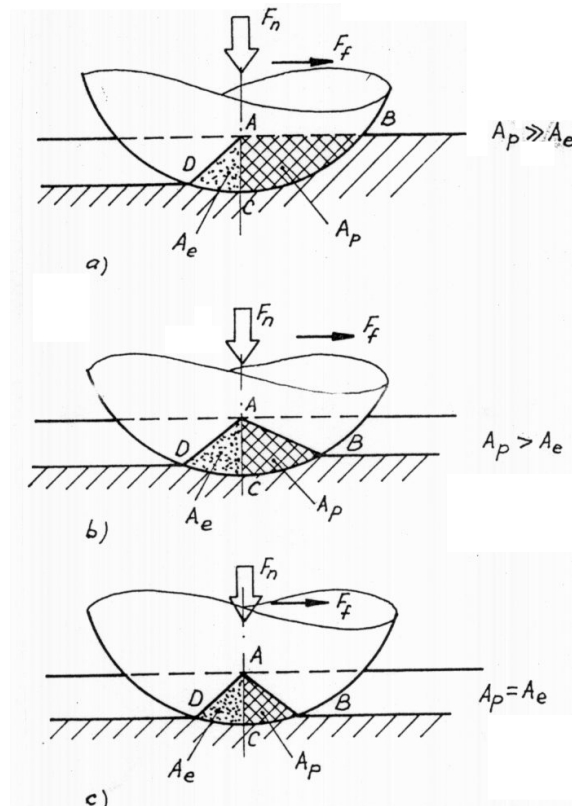


Fig. 13.2 Alunecarea unei rugozități rigide pe un semiplan deformabil (A_e – arie deformată elastic, A_p – arie deformată plastic)

La creșterea sarcinii exterioare F_n , contactul se va face pe două sau mai multe rugozități, astfel încât se vor forma pe semiplan mai multe "canale" cu adâncimi diferite, în funcție de dispunerea în înălțime a rugozităților rigide.

Creșterea sarcinii exterioare trebuie făcută progresiv (continuu sau în trepte), astfel încât fiecare rugozitate (sau grup de rugozități dispuse la același nivel față de un plan de referință) să formeze pe semiplanul deformabil "canale" capabile să conducă la echilibrul ariilor elastice și plastice ($A_e = A_p$).

Desigur, acest model simplu al procesului de rodaj nu poate explica toate procesele fizico-mecanice din zona de contact, însă permite o ilustrare fenomenologică a unora dintre aspecte.

13.3 Modificări ale proprietăților fizico-mecanice ale materialelor în timpul rodajului

Modificările microgeometriei ambelor suprafețe de contact în procesul de rodaj se produc în prezența unor presiuni locale ridicate, presiuni ce egalează tensiunile de curgere ale materialelor.

Totodată, existența mișcării elastice și a frecării conduc la realizarea unui câmp termic cu gradienti ridicați, astfel că în stratul de interacțiune mecanică apar modificări ale proprietăților fizico-mecanice și ale structurii. De exemplu, oțelul cu o structură inițială superficială eterogenă, în procesul de rodaj își formează o structură cu proprietăți rezistente la uzare, prin creșterea durității martensitei constituente.

Această structură secundară se formează nemijlocit în procesul de frecare, ca urmare a deformațiilor plastice și a regimului termic. Dacă deformațiile plastice se produc sub pragul de recristalizare, atunci crește rezistența stratului superficial prin creșterea durității.

Totodată, în procesul de frecare crește rigiditatea stratului superficial pe direcția forței normale și se micșorează rezistența moleculară la alunecare, ca urmare a formării unor oxizi (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4), oxizi ce constituie lubrifianți solizi.

Microduritatea stratului superficial tinde către o valoare optimă, conferind suprafeței o anumită rugozitate, care reprezintă rugozitatea optimă.

13.4 Evaluarea duratei de rodaj și a eficacității rodajului

În procesul de rodaj se interconstrucionează parametrii inițiali (parametri de încărcare-sarcină și viteză, - proprietățile fizico-mecanice ale materialelor, calitatea microgeometriei lubrifianțului) cu parametrii specifici procesului de frecare (coeficient de frecare, deformații elastice și plastice, temperaturi de contact etc.), rezultând o calitate nouă a microgeometriei și proprietăți fizico-mecanice noi ale stratului superficial.

Cuprinderea analitică a acestei interconstrucionări este dificilă, astfel că se explicitează, în continuare, influența separată a diferiților factori, cu ajutorul unor ipoteze simplificatoare.

a) S a r c i n a (forță sau moment) influențează atât calitatea rodajului, cât și durata sa.

Creșterea sarcinii de lucru conduce la creșterea suprafeței cu deformații plastice a stratului superficial, astfel că lucrul mecanic consumat prin frecare se transformă în căldură și energia absorbită ridică activitatea metalului.

Presiunea de contact limită, până la care deformațiile sunt elastice, se numește presiune critică și este dependentă de caracteristicile microgeometriei (parametrii curbei de portanță Abbott-Firstone - ν , b - înălțimea maximă a rugozităților R_{\max} , forma rugozităților - coeficientul c - raza de curbură a rugozităților r) și de caracteristicile mecanice ale materialului (tensiunea de curgere σ_c , modulul de elasticitate E , coeficientul lui Poisson μ_p):

$$p_{cr} = k'_v \Delta^{-\nu} (c_c \theta)^{2\nu} c \sigma_c \quad (13.1)$$

în care:

$$R'_v = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \cdot 5,4^{\frac{2\nu+1}{2}} \cdot \frac{\Gamma(\nu+1)}{\Gamma(\nu+3/2)}, \quad \Gamma(x) \text{ fiind funcția gamma de argument } x;$$

$$\theta = (1/\mu_p^2)/E; \quad \Delta = R_{\max} / (rb^{1/\nu}).$$

În tabelul 13.1 se prezintă raportul critic $p_{cr} / (c\sigma_c)$ pentru câteva tipuri de materiale (pentru rugozități sferice $c = 3$).

Tabelul 13.1 Raportul critic de rodaj $p_{cr} / (c\sigma_c)$

Material	Proprietăți mecanice		$\Delta = \frac{R_{\max}}{rb^{1/\nu}}$	$\frac{p_{cr}}{c\sigma_c}$
	$c\sigma_c \cdot 10^{-3} \text{ MPa}$	$\theta \cdot 10^6, \text{ MPa}^{-1}$		
Metale "negre"	2	4,5	$10^{-1} - 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^6 - 7,5 \cdot 10^4$
Metale "albe"	0,8	9	$10^{-1} - 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-4}$
Mase plastice	0,1	400	$10^{-1} - 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-1}$

Din punctul de vedere al presiunii critice se disting două metode de rodaj: rodajul în domeniul elastic ($p < p_{cr}$) și rodajul în domeniul plastic și elastic ($p > p_{cr}$), p fiind presiunea reală de contact.

Pentru rodajul în domeniul elastic ($p < p_{cr}$), sarcinile de încercare se modifică în timp, astfel încât presiunile reale să fie elastice, însă în apropierea celor critice. Modificările curburilor și

înălțimilor rugozităților fac ca presiunile la aceeași sarcină să scadă. Pentru calculul duratei și regimului optim de rodaj în domeniul elastic se acceptă următoarele ipoteze simplificatoare:

- calitatea microgeometriei se apreciază prin rugozități de forma sferică, de aceeași rază, cu durabilitate constantă de dispunere pe suprafață și situate la nivele aleatoare după legea Gauss;
- deformațiile sunt elastice și determinate cu relațiile lui Hertz;
- uzarea suprafețelor noi se produce prin oboseală la număr mic de cicluri (oliociclică) și microașchiere ca urmare a acțiunii abrazive a rugozităților suprafeței cu duritatea mai mare sau a particulelor abrazive, atunci când rodajul este accelerat prin utilizarea particulelor abrazive calibrate.

Cu aceste ipoteze, la sarcina inițială F_{n1} , astfel aleasă pe baze experimentale și teoretice, încât deformațiile să fie elastice și cât mai apropiate de presiunea critică, se determină durata de rodaj

$$t_1 = \frac{R_z}{v_{u1}} \left(1 - \sqrt[3]{2 - \psi}\right) \quad (13.2)$$

în care

- R_z este rugozitatea medie a suprafeței elementului cuplei cu rugozitatea cea mai mare;
- v_{u1} - viteza inițială de uzare la sarcina F_{n1} , determinată experimental pentru materialul respectat și eventualele particule abrazive);
- ψ - coeficient de creștere a sarcinii, determinat pe baza scăderii presiunilor ca urmare a modificării rugozităților $\psi = 1,1 \dots 1,3$).

Sarcina maximă de rodaj $F_{n \max}$ se acceptă ca fiind 5% din forța medie de exploatare a cuplei de frecare respective. Rodajul se efectuează în trepte de sarcină, astfel că sarcina pe treapta i este $F_{ni} = F_{n1} \psi^{i-1}$, iar numărul treptelor

$$n_t = \frac{\lg \frac{\psi F_{n \max}}{F_{n1}}}{\lg \psi} \quad (13.3)$$

Durata totală de rodaj în domeniul elastic va fi $T = t_1 n_t$.

Pentru rodajul în domeniul plastic și elastic ($p > p_{cr}$), sarcinile de încercare se modifică în timp, astfel încât presiunile reale să depășească presiunile critice, domeniul de deformare al rugozităților fiind plastic, însă fără apariția fenomenului de gripare. În acest caz, trebuie cunoscută sarcina maximă de la care începe griparea în condițiile aceleiași viteze, F_{ng} , și sarcina critică $F_{n cr}$ a suprafeței respective în stare nerodată (sarcina limită, la care deformațiile rugozităților nerodate devin plastice $F_{n cr} = p_{cr} A_n$, A_n - aria de contact).

Corespunzător acestui tip de rodaj, viteza de creștere a sarcinii (dF_n / dt) este de forma

$$\frac{dF_n}{dt} = k \left(\frac{F_{ng} - F_{n cr}}{F_n - F_{n cr}} \right)^x \quad (13.4)$$

în care k este o constantă ce se stabilește pe baza sarcinii maxime de rodaj $F_{n \max}$ (aproximativ 50% din sarcina medie de exploatare) și x un exponent dependent de natura materialelor suprafețelor și tipul lubrifianului; de exemplu, pentru aliaje din metale "albe", în contact cu oțelul OLC 45, duritatea HRC 42-45 și lubrifiate cu ulei slab aditivat, $x \approx 2$. Din (13.4) se deduce funcția de creștere a sarcinii de rodaj F_n cu timpul t :

$$F_n = F_{n cr} + (F_{ng} - F_{n cr}) \left(t / T \right)^{\frac{1}{x+1}} \quad (13.5)$$

T fiind durata maximă de rodaj corespunzătoare atingerii limitei de gripare.

Pentru o sarcină $F_{n \max}$, din (13.5) se deduce durata de rodaj, t_{\max} ,

$$t = T \left(\frac{F_{n \max} - F_{n \text{ cr}}}{F_{ng} - F_{n \text{ cr}}} \right)^{x+1} \quad (13.6)$$

b) Eficacitatea rodajului se apreciază prin realizarea unei intensități minime de uzare, intensitate care să asigure, în continuare, cuplei de frecare o durabilitate maximă, în condițiile unor sarcini de exploatare cunoscute. Pe baza teoriei molecular mecanice a frecării și a dependenței intensității de uzare prin oboseala rugozităților de coeficientul de frecare, Kraghelski a dedus expresia optimului parametrului complex al microgeometriei Δ , $\Delta = R_{\max} / rb^{1/v}$, R_{\max} fiind înălțimea maximă a rugozităților, r - raza de curbură a acestora, b , v - parametrii curbei de portanță Abbott-Firstone), funcție de caracteristicile de material (coeficientul pierderilor prin histerezis, α_h - parametrul de elasticitate, θ - proprietățile de adeziune ale cuplului de material, τ_0 și β și presiunea de contact, p_a).

Potrivit teoriei lui Kraghelski, intensitatea de uzare este minimă când valoarea coeficientului de frecare este minimă.

Așa cum s-a arătat în cap. 5, coeficientul de frecare, în regim elastic de deformație, μ_e , conform teoriei molecular-mecanice, are expresia de forma

$$\mu_e = A \Delta^{-v/(2v+1)} + \beta + B \Delta^{v/(2v+1)} \quad (13.7)$$

unde

$$A = \frac{\tau_0}{p_a} \left(1,257 \frac{p_a \theta}{k_v} \right)^{\frac{2v}{2v+1}} \quad \text{și} \quad B = \frac{1,5\alpha_h}{k_v^{2(v+1)/(2v+1)}} \times (1,257 p_a \theta)^{1/(2v+1)}.$$

Dacă se consideră că în procesul de rodaj, la sarcină constantă pe treapta respectivă, parametrii A , B și v rămân constanți, atunci μ_e este minim în raport cu Δ , atunci când $d\mu_e/d\Delta = 0$ și $d^2\mu_e/d\Delta^2 > 0$ și deci

$$\Delta_{\text{optim}} = k_1 \alpha_h^{-1-\frac{1}{2v}} \cdot (\tau_0 \theta)^{\frac{2v+1}{2v}} \cdot (p_a \theta)^{-1/v} \quad (13.8)$$

unde $k_1 = 180 \cdot (0,67)^{1/v} \cdot (v+1)^{1+1/2v} k_v^{-1/v}$.

Pentru cazul cel mai frecvent, $v \approx 2$, astfel că (13.8) devine

$$\Delta_{\text{optim}} = 16\alpha_h^{-1,25} \cdot (\tau_0 \theta)^{5/4} \cdot (p_a \theta)^{-1/2} \quad (13.9)$$

Expresiile (13.8) și (13.9) evidențiază că, dacă în timpul rodajului se înrăutățesc condițiile de ungere și, deci, creșterea lui τ_0 , atunci crește Δ_{optim} față de valoarea sa inițială. Totodată, se observă că atâta timp cât presiunea de contact crește, însă se găsește sub valoarea critică (deformațiile sunt elastice), parametrul Δ_{optim} se micșorează, fapt observat experimental de mai mulți cercetători.

Cunoașterea microgeometriei optime din punct de vedere funcțional (coeficient de frecare și intensitate de uzare minime) permite stabilirea unui program de rodaj cu durată minimă și eficacitate maximă. Programul de rodaj trebuie să aibă în vedere variația în timp a sarcinii și vitezei, precum și condițiilor de ungere, în funcție de microgeometria inițială a asuprafeței și de microgeometria optimă, caracteristică cuplei respective de frecare.