

3. CARACTERIZAREA MICROGEOMETRIEI SUPRAFETELOR DE FRECARA

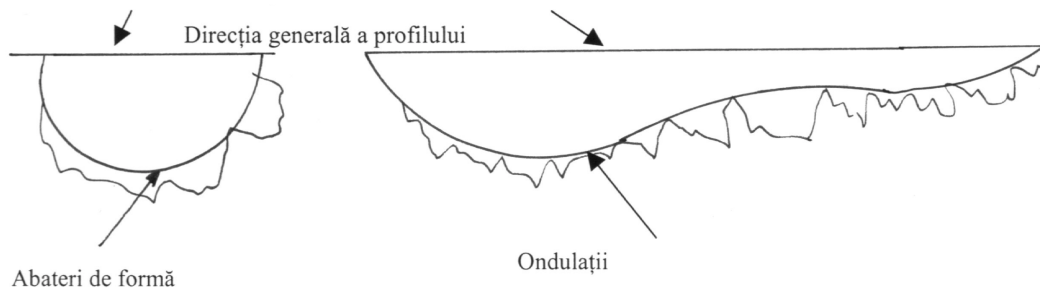
3.1. Mărimi standardizate [A1, A2, A9, A15]

Calitatea suprafețelor de contact a cuplelor de frecare se poate caracteriza prin :

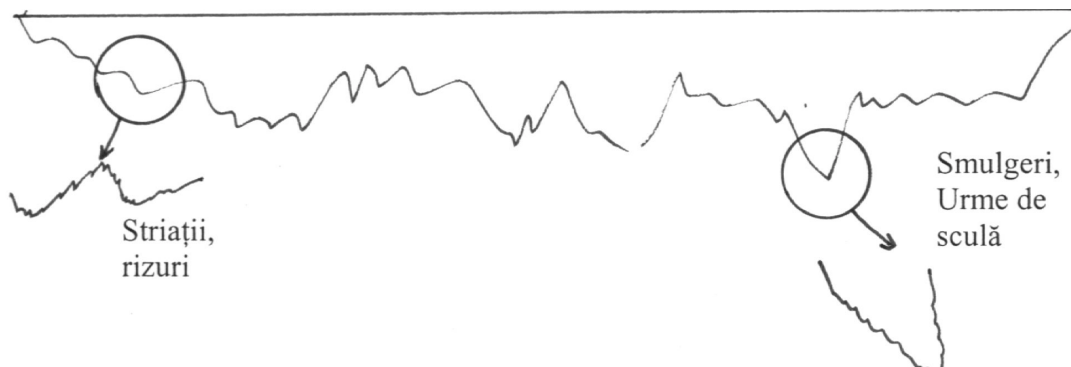
- rugozitatea suprafețelor
- starea fizico-mecanică
- microstructura stratului superficial
- tensiunile remanente cauzate de prelucrare sau de tratamentul termic final.

Suprafețele de contact destinate cuplelor de frecare se obțin prin procedee tehnologice diferite, procedee care concură la generarea profilului total al suprafeței. Pe acest profil se pun în evidență următoarele abateri de la profilul ideal :

- abaterile de la microgeometrie definite prin STAS 7384-85 ca abateri de ordinul 1 sau de formă (se înscriu pe desen conform STAS 7385/1-85)
- undulațiile (W) = ansamblul neregularităților periodice al căror pas este de câteva ori mai mare decât adâncimea lor;



- rugozitățile = ansamblul neregularităților care formază abaterile geometrice de ordinul al 3-lea, striaiții, rizuri periodice sau pseudoperiodice și de ordinul al 4-lea, smulgeri, urme de scule și goluri aperiodice și al căror pas este relativ mic în raport cu adâncimea lor.



Terminologia și definirea parametrilor standardizați ai microgeometriei suprafețelor sunt precizate în STAS 5730/1-85

3.2. Mărimi specifice proceselor tribologice

Rugozitatea suprafețelor de contact, precum și proprietățile fizico-chiice ale stratului superficial sunt determinate de acțiunea simultană a mai multor fenomene, printre care cele mai importante pot fi considerate următoarele: deformații elasto-plastice ale materialului, fenomene

vibratorii influențate de sistemul mașină-sculă-piesă și fenomenele de frezare dintre așchia și fața de degajare, precum și dintre fața de așezare a sculei și piesa de prelucrat.

Interacțiunea acestor fenomene, precum și variația aleatoare a unora dintre mărimile care intervin în procesul de formare și desprindere a așchii conduc la concluzia că microgeometria, sub aspectul înălțimii rugozității, se caracterizează ca o mărime aleatoare, provenind dintr-o mărime deterministă (calculabilă pe baza cinematicii mașinii și geometriei părții așchietoare a sculei) și o mărime aleatoare care ar îngloba aspectele aleatoare ale procesului.

Generarea microgeometriei implică suprapunerea unor aspecte cinematice periodice și deterministe cu unele aleatoare. Atunci când predomină, atât în profil longitudinal, cât și în profil transversal, aspectele aleatoare, suprafața de frezare se consideră a fi suprafață aleatoare de ordinul 1 și este caracteristică cuplurilor de frezare de tip cuzineți obținuți prin frezare, rectificare, alezare sau rectificare după o singură direcție.

În cazul obținerii suprafețelor de frezare prin strunjire de finisare, strunjire urmată de rectificare, aspectele cinematice periodice, deși cu pondere mică, au importanță destul de mare în caracterizarea rugozității din punctul de vedere al periodicității asperităților. Astfel de suprafețe pot fi considerate ca suprafețe aleatoare de ordinul al 2-lea, suprafețe care trebuie cunoscute și sub aspectul periodicității rugozității prin luarea în considerație a lungimii de undă a rugozității.

Dacă considerăm că profilul rugozității în plan transversal este o funcție $y(x)$, atunci aceasta se poate scrie ca sumă a două funcții:

$d(x)$ - funcție periodică specifică cinematicii regimului de așchiere și $p(x)$ - funcție aleatoare,

$$y(x) = d(x) + p(x) \quad (3.1)$$

În cazul în care apreciem asperitățile ca niște corpuri distribuite spațial în sistemul x, y, z , atunci înălțimea acestora (z) va fi suma a două funcții: deterministă ($d(x,y)$) și aleatoare ($p(x,y)$).

$$z(x, y) = d(x, y) + p(x, y) \quad (3.2)$$

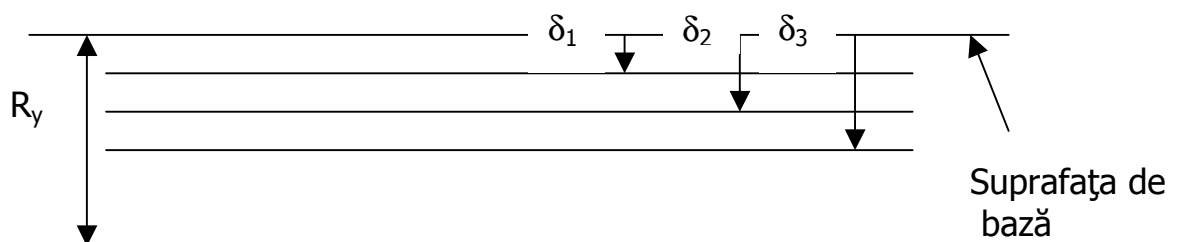
Înălțimea teoretică (deterministă) a asperităților (R_d) caracterizează amplitudinile deterministe $d(x)$ și se poate calcula pe considerente geometrice și cinematice.



Suprafețe cu aceeași înălțime medie a rugozității R_a

a) Mărimi deterministe

Descrierea matematică a profilului rugozității se poate face cu ajutorul unor mărimi simplificatoare. Dacă se apreciază fenomenologic procesul de deformare sub sarcină a rugozităților ca fiind esențial, se consideră că numărul rugozităților (N_i) și aria secțiunii normale a acestora (Δ_i) la o anumită distanță (δ) de vârful rugozităților caracterizează portanța microgeometriei.



Funcție de forma idealizată a rugozităților, se poate scrie:

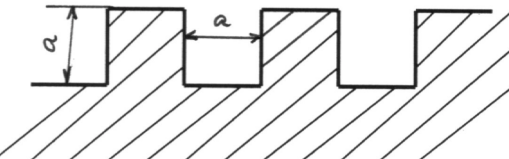

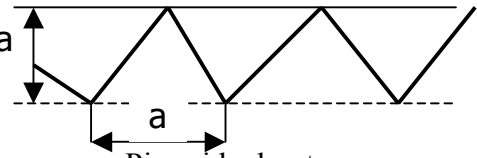
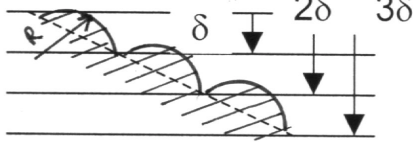
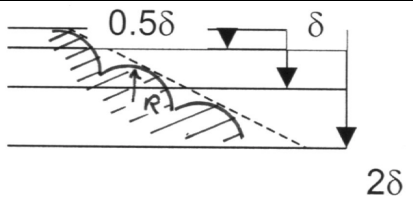
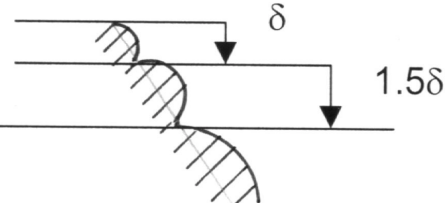
$$N_i = C_0 \delta^m = C_0 R_y^m \epsilon^m \tag{3.3}$$

$$\Delta_i = C_1 + C_2 \delta^n = C_1 + C_2 R_y^n \epsilon^n \tag{3.4}$$

$\epsilon = \frac{\delta}{R_y}$ - deformație relativă

unde C_0, C_1, C_2, m, n sunt constante dependente de forma rugozităților și sunt prezentate în tabelul de mai jos.

Tabel 3.1

Modelul profilului (lungimea L)		C_0	m	C_1	C_2	n
 Cuburi		$L^2/4a^2$	0	$L^2/4$	0	-
 Semisfere		$L^2/4R^2$	0	0	$\pi L^2/2R$	1
 Piramide drepte		L^2/a^2	0	0	L^2/a	1
Liniară	Dispunerea înălțimilor 	$L^2/36R^2\delta^2$	2	0	$\pi L^2/4R$	1
		$L/9R\delta^2$	2	0	$\pi L^2/8R$	1
Liniară		$L/40R\delta^4$	4*	0	$\frac{7\pi L^2}{36R}$	1

*) Mărimi aproximative

b) Distribuția statistică a înălțimii

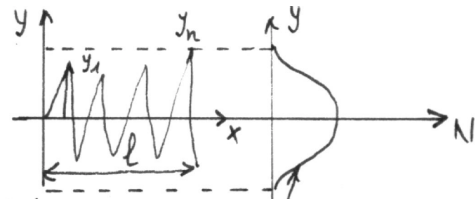
$$\phi = \frac{\sum N_i}{N_{tot}} \quad N_i = \text{număr de rugozități de înălțime } i.$$

- abaterea medie aritmetică

$$R_a = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |y(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (3.5)$$

- abaterea medie pătratică a profilului

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} y^2(x) dx} \approx \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (3.6)$$



Curba distribuției tuturor ordonatelor

! notație internațională $\sigma = \text{RMS} = R_2$.

- distribuția statistică a înălțimii

$$\phi = \frac{2N_i}{N_{tot}}, \quad \text{unde } N_i - \text{numărul de rugozități de înălțime "i" de pe lungimea de referință } \ell.$$

N - numărul total de rugozități de pe lungimea "l".

În multe situații, distribuția înălțimilor rugozităților este de tip Gauss (normală).

$$\phi = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) \approx \frac{35}{32} \cdot \frac{1}{R_a} [1 - (y/R_a)^2]^3 \rightarrow \text{aproximare cu un polinom} \quad (3.7)$$

cu $\sigma = R_q$ R_q - notație STAS 5730/1-85)

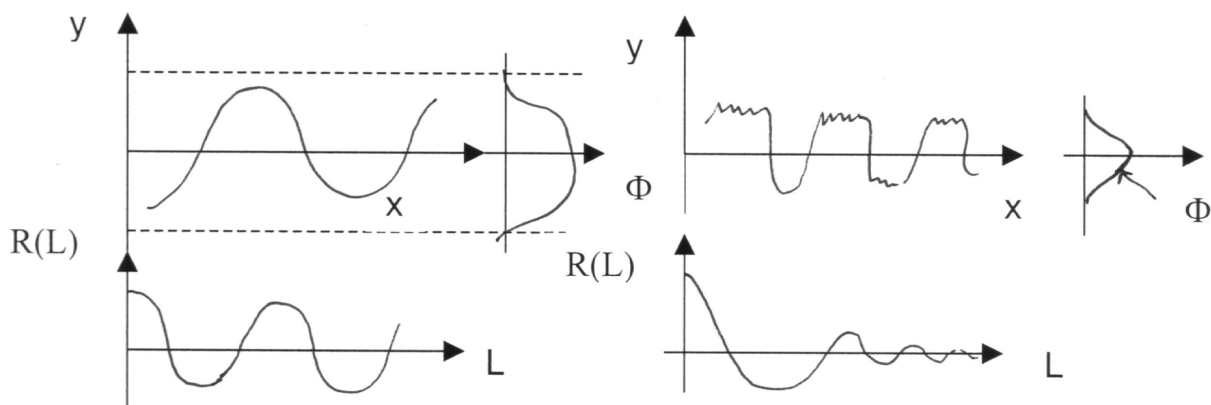
$$R_y = \sqrt{\frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} y^2 dx} \approx \sqrt{\frac{1}{n} \sum y_i^2}$$

c) Funcția de autocorelație a înălțimii

Variația periodică a înălțimii rugozității se evidențiază prin funcția de autocorelație R(L).

Pentru un profil continuu

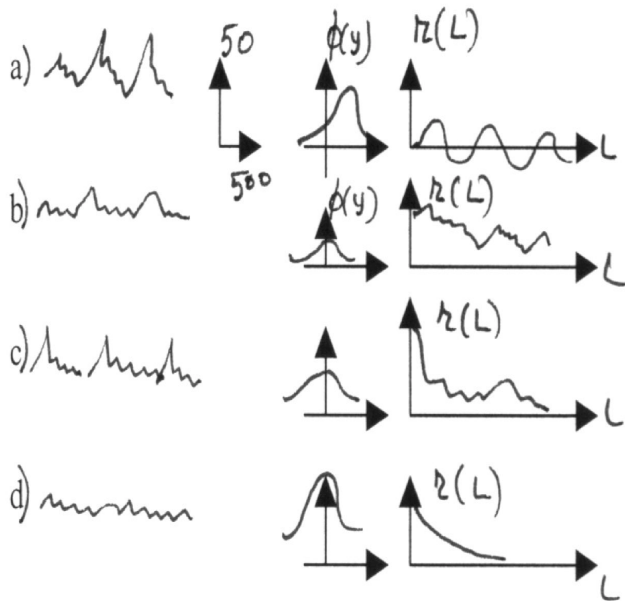
$$R(L) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{\ell} \int_{-\ell/2}^{\ell/2} y(x)y(x+L) dx \approx \frac{1}{N-L_t} \sum_{x=1}^{N-L_t} y(x)y(x+L) \quad (3.8)$$



Suprafața A

Suprafața B

unde L este distanța dintre un punct original și un alt punct translatat; N - numărul total de rugozități de pe lungimea de referință l; L_t - numărul de rugozități de pe lungimea de translatare L.



R(L)

Dacă $L = 0 \Rightarrow R(L) = \sigma = R_q$.
 Funcția de autocorelație în formă standardizată $r(L)$,

$$r(L) = \frac{R(L)}{\sigma^2} \quad (3.9)$$

$r(L)$ are valoarea maximă, $r(0) = 1$, pentru $L = 0$.

În general, $r(L)$ scade cu creșterea lui L .

Exemple de rugozitate

Suprafață rectificată	$R_a = 1,6 \mu\text{m}$	a)
Suprafață turnată fin	$R_a = 1,4 \mu\text{m}$	b)
Suprafață șlefuită	$R_a = 1,0 \mu\text{m}$	c)
Suprafață superfinisată	$R_a = 0,18 \mu\text{m}$	d)

d) Înclinarea și curbura rugozității

Pentru reprezentarea profilului rugozității prin $y = y(x)$, înclinarea rugozității se pune în evidență prin parametrii derivatei profilului

$$\dot{y} = \frac{dy(x)}{dx} \quad (3.10)$$

Înclinarea, ca variabilă aleatoare, se caracterizează prin densitatea de repartiție $f(\dot{y})$ și funcția de repartiție: $F(\dot{y}) = \int_{-\infty}^{\dot{y}} f(\dot{y})d\dot{y}$.

Pentru estimarea aproximativă a statisticii înclinării rugozității, sunt necesare doar media aritmetică (\dot{y}_a) și media pătratică ($\dot{y}_{ap} = \dot{\sigma}$) a derivatei.

Media pătratică \dot{y}_{ap} se poate aprecia în cazul unei distribuții normale a înclinării, cu ajutorul mediei pătratice a înălțimii rugozității ($R_{ap} = R_q = \sigma$) și a densității medii a profilului (D_0).

$$\dot{y}_{ap} \approx \pi D_0 R_{ap} \quad (3.11)$$

Densitatea medie a profilului (D_0) este definită ca raportul dintre numărul intersecțiilor profilului $y(x)$ cu linia medie (ox) și lungimea de referință a profilului.

Orientarea rugozității față de direcția normală a profilului se determină prin parametrul Myers (\dot{y}_M):

$$\dot{y}_M = \frac{\sum (\Delta x_i)_p - \sum (\Delta x_i)_n}{\ell} \quad (3.12)$$

în care $(\Delta x_i)_p$ și $(\Delta x_i)_n$ reprezintă intervalul măsurat pe linia medie $0 - x$, pentru care $\dot{y} > 0$, respectiv $\dot{y} < 0$; la lungimea de referință.

Curvura rugozității este definită pe baza ecuației profilului

$$\ddot{y} = \frac{d^2 y(x)}{dx^2} \quad (3.13)$$

Caracteristicile curburii din punct de vedere aleator se apreciază prin densitatea de repartiție $f(\ddot{y})$, media aritmetică (\ddot{y}_a) și pătratică (\ddot{y}_{ap}).

Deși curvura diferă ca distribuție de legea normală, totuși atunci când profilul $y(x)$ este distribuit după legea normală, se poate estima media pătratică a curburii (\ddot{y}_{ap}) pe baza mediei pătratice a profilului,

$$\ddot{y}_{ap} \approx \pi D_0 D_e R_{ap} \quad (3.14)$$

în care D_e reprezintă densitatea punctelor de extrem (minime și maxime) definită ca raportul dintre numărul extremelor (minime și maxime) și lungimea de referință pe care se găsesc aceste extreme.

Dată fiind ponderea mare a sarcinii în contactele reale ale cuplelor de frecare de către vârful rugozității situate deasupra liniei medii ($\dot{y} > R_{ap}$), se consideră utilă cunoașterea razei de curbură a diferitelor puncte de pe profil. Potrivit relațiilor din geometria diferențială, curvura (K) și implicit inversa acesteia (raza de curbură $\rho = 1/K$) ale unui punct i de pe profil, vor fi:

$$K_i = \frac{1}{\rho_i} = \frac{\ddot{y}}{(1 + \dot{y}_i^2)^{3/2}}; \quad \rho_i = \frac{(1 + \dot{y}_i^2)^{3/2}}{\ddot{y}_i} \quad (3.15)$$

În cazul în care profilul $y(x)$ este distribuit după legea normală, atunci raza de curbură medie, pe lungimea de referință considerată, se poate determina prin înlocuirea în (3.15) a expresiilor (3.11) și (3.14)

$$\rho_a = \frac{[1 + (\pi D_0 R_{ap})^2]^{3/2}}{\pi^2 D_0 D_e R_{ap}} \quad (3.16)$$

Se exemplifică în tabelul 3.2 înclinarea și curvura rugozității unor suprafețe de frecare executate din oțel, prin diferite procedee tehnologice.

Tabelul 3.2

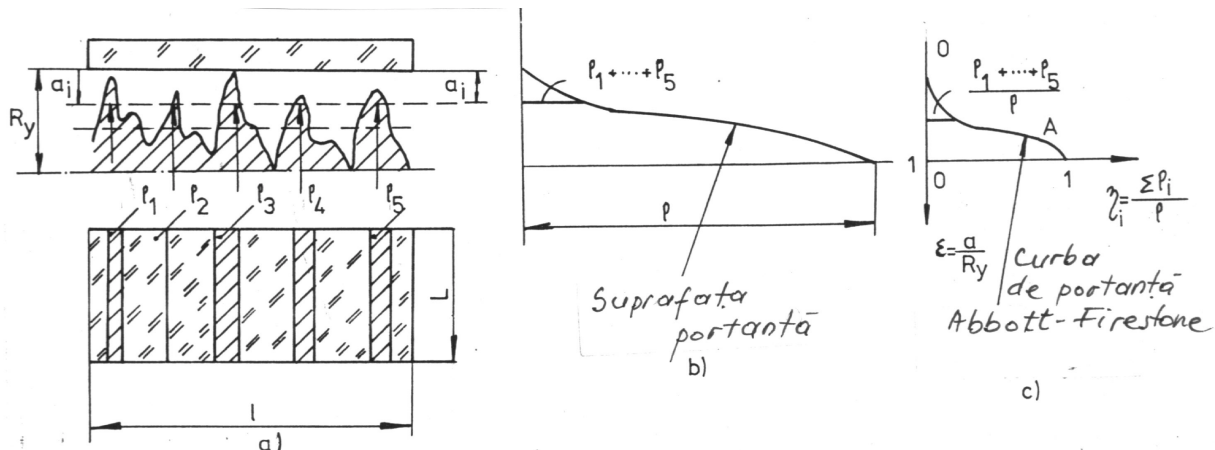
Forma suprafeței	Tipul de prelucrări mecanice	Clasa de rugozitate	Profil transversal		Profil longitudinal		$\frac{n_r}{n}$ % la ϵ		
			ρ_{at} [μm]	I_{opt} [$^\circ$]	ρ_{ae} [μm]	I_{apl} [$^\circ$]	0,1	0,2	0,4
Cilindrică exterioară	Strunjire	9	20	20	60	10	30	60	95

unde n_r - numărul de rugozități; n - numărul total de rugozități.

e) Curba de portanță Abbott-Firstone

Curba de portanță a profilului rugozității pe o anumită direcție, dedusă de Abbott și Firstone, pune în evidență comportarea microgeometriei în timpul preluării sarcinii exterioare.

Curba de portanță este similară parametrului standardizat $t_p =$ procentajul lungimii portante: $t_p = \eta_p / \ell$; $\eta_p = \sum_{i=1}^n l_i$. Pentru curba de portanță se consideră secționarea profilului începând cu planul $p_0 - p_0$ (de preluare inițială a sarcinii).



Pentru exemplul din profilogramă:

$$l_1 = \sum_{i=1}^5 l_{1i}; \quad l_2 = \sum_{i=1}^5 l_{2i}; \quad l_p = \sum_{i=1}^5 l_{pi} = \ell;$$

În exprimare adimensională $t_p = \frac{\eta_p}{\ell} = \frac{\sum l_i}{\ell}$ și $\epsilon = \frac{\delta}{R_y}$, curba $t_p = f(\epsilon)$ este

curba Abbott-Firstone.

Din modul de construire a curbei de portanță Abbott-Firstone reiese faptul că se poate obține aceeași alură a curbei, pentru profilograma esențial diferite. Acest inconvenient se elimină pe baza observației că la același tip de prelucrare mecanică, însă cu regimuri de așchiere diferite, nu apar niciodată curbe de portanță identice. Pentru a se evita unele confuzii este recomandat ca orice curbă de portanță se fie însoțită și de denumirea procedurii tehnologice prin care s-a realizat suprafața.

Analizând modul de obținere al curbei de portanță și ținând seama de aspectul alatoriu al înălțimii rugozității se poate aprecia că estimatorul de verosimilitate maximă al funcției de repartiție a înălțimii rugozității, pe o anumită direcție, este chiar curba de portanță.

Pentru suprafețe de frecare izotrope curba de portanță este aceeași în toate direcțiile. În cazul suprafețelor anizotrope (cazul cel mai frecvent), se recomandă cunoașterea curbelor de portanță după două direcții perpendiculare, astfel încât una dintre ele să coincidă cu direcția vitezei de alunecare relativă a elementelor cuplei de frecare.

Densitatea extremelor și implicit lungimea portantă a profilului au valori maxime pentru suprafețele de frecare izotrope, rezultând necesitatea alegerii corespunzătoare a procedurilor tehnologice.

Curba de portanță Abbott-Firstone ia în considerație nu numai forma asperităților, ci și dispunerea înălțimii acestora, fapt ce a determinat pe mulți cercetători să considere această curbă

ca fiind indicatorul cu cele mai multe informații asupra comportării la frecare și uzare a suprafețelor.

Curba de portanță t_p și, în special, pe prima sa porțiune, se poate scrie sub forma:

$$t_p = b\varepsilon^v \quad \text{cu} \quad \varepsilon = \delta / R_y \quad (3.17)$$

δ - distanța absolută față de vârful rugozității;

R_y - înălțimea medie a rugozității.

b, v - parametrii curbei de portanță care depind de materialul suprafeței și de procedeul tehnologic.

Parametrii curbei de portanță (b, v) se calculează pe baza profilogramelor suprafețelor, considerând modelul discretizat al rugozității sub forma unor tije de înălțimi diferite (modelul Kraghelski). Din profilogramă se alege o lungime de referință l , pe care se pun în evidență față de înălțimea cea mai mare a rugozității. Aceste vârfuri au înălțimi y_i față de linia de fund a celei mai mari asperități și se ordonează într-un șir descrescător. Considerând că lungimea de portanță, la o anumită înălțime y_i , este proporțională cu numărul asperităților ce intersectează acest plan și că pe lungimea de referință se găsesc N vârfuri, prin logaritizarea expresiei (3.17) se deduc:

$$v = \frac{1}{3} \left[\frac{\ln(n_2 / n_1)}{\ln(\varepsilon_2 / \varepsilon_1)} + \frac{\ln(n_3 / n_1)}{\ln(\varepsilon_3 / \varepsilon_1)} + \frac{\ln(n_3 / n_2)}{\ln(\varepsilon_3 / \varepsilon_2)} \right],$$

$$b = \frac{1}{3N} \left(\frac{n_1}{\varepsilon_1^v} + \frac{n_2}{\varepsilon_2^v} + \frac{n_3}{\varepsilon_3^v} \right) \quad (3.18)$$

în care n_1, n_2, n_3 sunt numerele vârfurilor ce se găsesc la nivele de deformație ale rugozității p_1, p_2, p_3 și corespund deformațiilor relative $\varepsilon_1 = \delta_1 / R_y, \varepsilon_2 = \delta_2 / R_y, \varepsilon_3 = \delta_3 / R_y$.

Pe baza rezultatelor obținute pe profilograme ale suprafețelor, se pot determina valorile parametrilor v, b ai curbei de portanță.

f) Parametrul complex al microgeometriei

Pentru procesele de frecare și uzare se definește parametrul

$$\Delta = \frac{R_y}{\rho b^{1/v}}; \quad \rho - \text{raza de curbă medie a rugozităților.}$$

Se va demonstra ulterior că evoluția coeficientului de frecare, pentru regimul uscat și tehnic uscat, admite un minim pentru un parametru complex optim (Δ_0). Procesele de frecare și uzare, în sisteme închise, conduc la minimizarea coeficientului de frecare și vitezei de uzare atunci când parametrul Δ are valoarea optimă.

g) Rugozitatea echivalentă a două suprafețe în contact

Fie în contact două suprafețe caracterizate prin rugozități: $R_{y1}, R_{y2}, R_{a1}, R_{a2}, R_z, R_{z2}, \sigma_1, \sigma_2, b_1, b_2, v_1, v_2, \rho_1, \rho_2$.

Cum se evaluează pentru procesele de contact rugozitatea ?

Se consideră contactul dintre o suprafață ideală fără rugozități și o suprafață cu rugozitatea echivalentă, caracterizată prin $R_y = R_{y1} + R_{y2}$ - înălțimea maximă; $v = v_1 + v_2$;

$$b = k_v b_1 b_2 (R_{y1} + R_{y2})^{v_1+v_2} / (R_{y1}^{v_1} + R_{y2}^{v_2}) \quad \text{parametrii curbei de portanță}$$

unde $k_v = \frac{v_1 v_2 \Gamma(v_1) \Gamma(v_2)}{(v_1 + v_2) \Gamma(v_1 + v_2)}$, unde $\Gamma(x)$ este funcția a de argument x .

3.3. Caracterizarea fractală a microgeometriei

a) Conceptul de dimensiune neîntregă

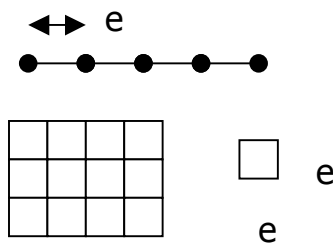
O linie dreaptă are lungimea (a)

$$L = \Sigma e^1$$

unde e este unitatea de măsură.

Similar pentru o suprafață (b)

$$\text{aria } A = \Sigma e^2.$$



În general, măsura M a unui obiect este Σe^D , unde este dimensiunea obiectului.

Dacă obiectul este divizat în N părți egale, astfel că

$$M = Ne^D, \text{ și } N \approx e^{-D}.$$

Astfel, lungimea L a unui obiect cu dimensiunea D este dată de

$$L = Ne \approx e^{1-D}.$$

Lungimea cu dimensiune neîntregă depinde de unitatea de măsură a mărimii e.

b) Natura fractală a suprafețelor ingineresti

Pentru multe suprafețe ingineresti, se observă că profilul este repetat la diferite mărimi \Rightarrow - similaritatea a două imagini \Rightarrow profilul suprafeței

$$z(x) \begin{cases} \text{auto - similar} \rightarrow z(mx) \approx m \\ \text{auto - alfine} \rightarrow z(mx) \approx m^\alpha \end{cases} \quad \text{unde} \begin{cases} m - \text{este factorul de scară pe orizontală} \\ \alpha - \text{număr real.} \end{cases}$$

Suprafețele care sunt auto - similare sau auto - alfine nu sunt niciodată perfect netede la orice scală de lungime. În acest sens, panta locală (d_z/d_x) nu este definită.

Funcția Weierstrass - Mandelbrot este utilizată pentru studiul proprietăților fractale:

$$z(x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{\cos \gamma^n x}{\gamma^{(2-D)n}} \tag{1}$$

unde D este dimensiunea fractală și $\gamma > 1$.

Funcția satisface două proprietăți importante ale unei suprafețe fractale:

1. Deși suma seriei z(x) este convergentă, $\frac{d_z}{d_x}$ este divergentă \Rightarrow z este nediferențabilă;

2. Funcția este auto - alfină: $z(\gamma_x) = \gamma^{2-D} z(x)$.

Puterea spectrală poate fi:

$$S(\omega) = \frac{1}{(2 \ln \gamma) \omega^{5-2D}} \tag{2}$$

\Rightarrow Abaterea medie pătratică R_q (r.m.s. average)

$$R_q^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega \tag{3}$$

Limitele superioare și inferioare ale frecvenței rugozității γ^x , obținute pe profilul suprafeței, pot fi utilizate la evaluarea integralei. Minimum lui γ^n este când $\omega_{\min} = \frac{2\pi}{L}$, L fiind lungimea

epruvetei. Maximul lui γ^n este când $\omega_{\max} = \frac{2\pi}{d}$, d fiind distanța dintre două puncte consecutive sau pixeli \Rightarrow

$$R_q^2 = \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} S(\omega) d\omega = \frac{1}{2 \ln \gamma} \cdot \frac{1}{4 - 2D} \cdot \left(\frac{1}{\omega_{\min}^{4-2D}} - \frac{1}{\omega_{\max}^{4-2D}} \right) \quad (4)$$

Deoarece $\omega_{\max} \gg \omega_{\min}$, se poate observa că $R_q \approx L^{2-D}$.

În coordonate logaritmice $R_q = f(L) \Rightarrow$ dreaptă.

Pentru - oțeluri303 $D \approx 1.1$

Pantele suprafeței și curburii sunt independente de ω_{\min} și ω_{\max} .

