

4. PROCESELE DE UZARE

4.1. Indicatori ai procesului de uzare

Uzarea este definită ca "pierdere progresivă de substanță din zona de lucru a două suprafețe cu mișcare relativă".

Conceptul de tribo-sistem consideră că uzarea este un parametru principal. Importanța procesului de uzare este dependentă de funcțiile tribo-sistemului (v. tabelul 4.1).

Pentru analiza proceselor de uzare, se consideră un tribosistem format din :

- (1) primul element al cuplei
- (2) al doilea element al cuplei;
- (3) volumul de material la interfața de contact (atmosfera gazoasă) (de exemplu fig. 4.1).

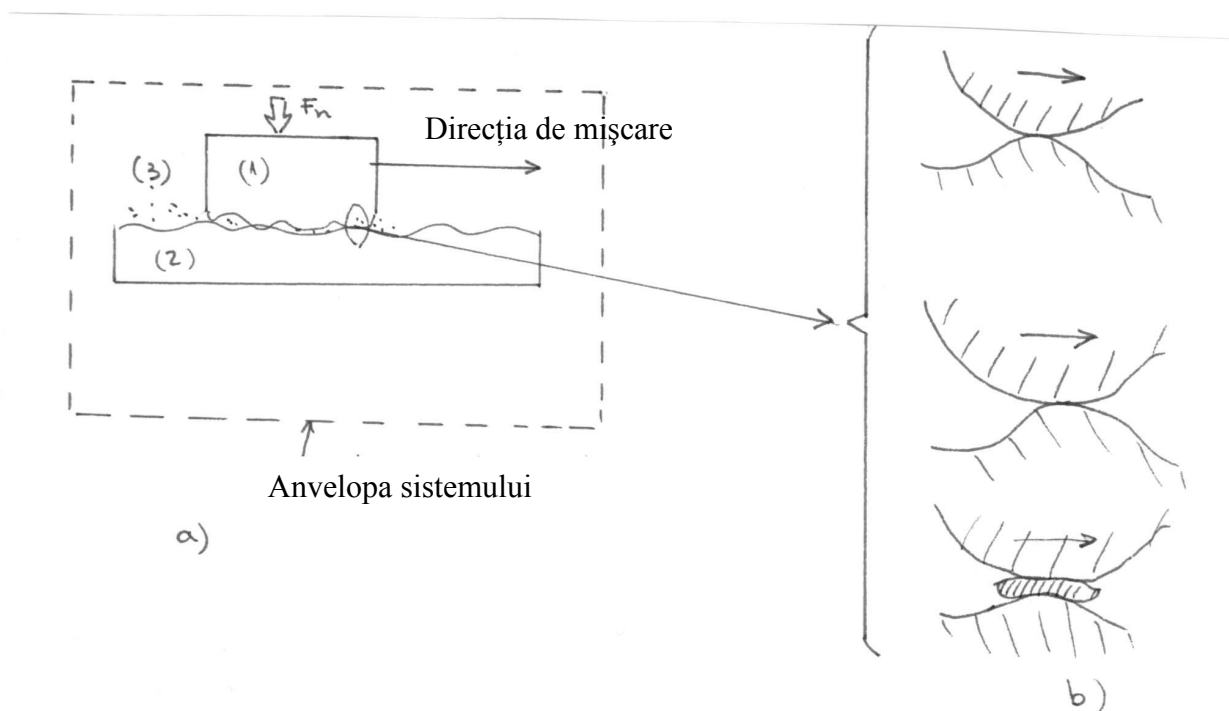


Fig. 4.1. Sistem tribo-mecanic simplu

Dacă se consideră uzura elementului(1), pierderea de material poate fi descrisă :

- i) materialul transferat de la(1) la (2)
- ii) pierderea de material(1) în (3)
- iii) formarea produselor de reacție

În funcție de cantitatea de material care este pierdută de elementul(1), uzarea se clasifică în :

- uzare medie
- uzare severă

Pentru uzarea medie procesele se raportează la grosimea suprafeței exterioare . Suprafețele rămase sunt relativ netede și protejate de grosimea oxizilor generați în timpul frecării. Particulele sunt foarte mici, dimensiunile lor sunt de ordinul nm (nanometru).

Pentru uzarea severă contactul este metalic, suprafețele sunt preponderent rupte și particulele au dimensiuni de ordinul 100 μm .

Exemple:

1. Cuplă de translație (fig. 4.2):

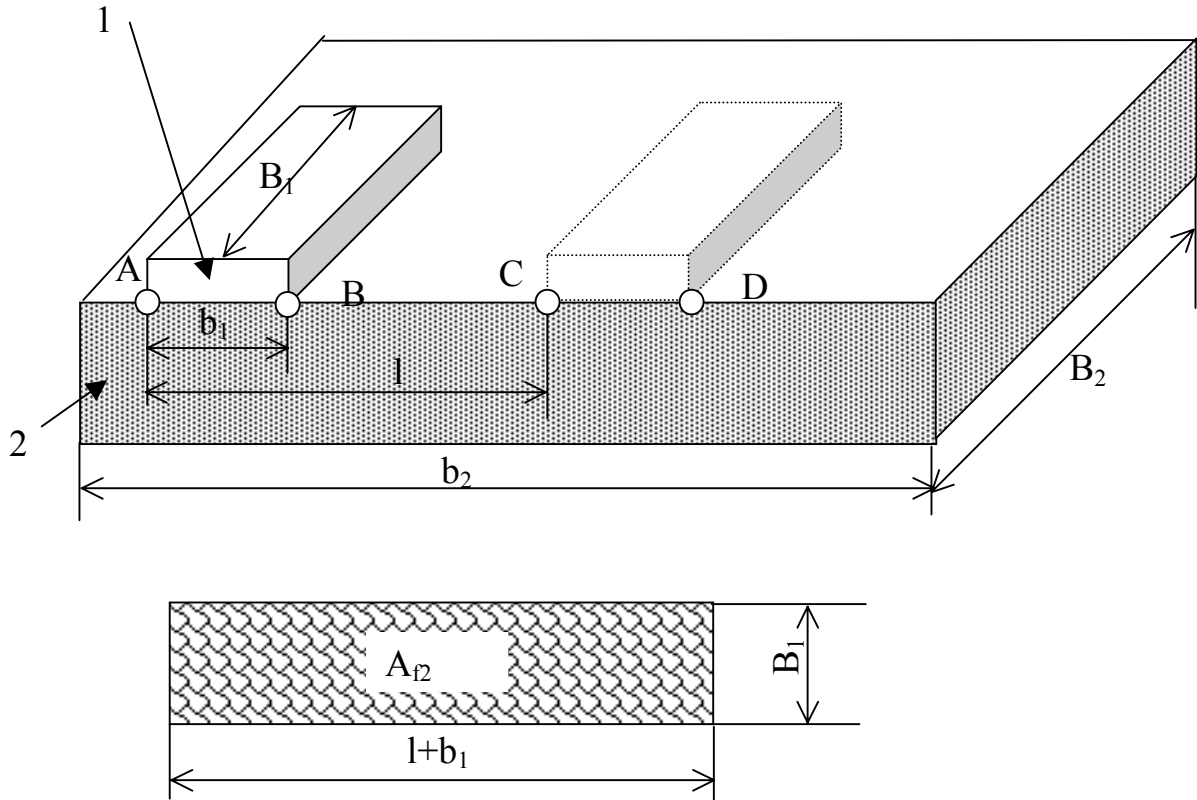


Fig. 4.2

$$A_{n1}=b_1B_1; A_{n2}=b_2B_2, \text{ rezultă } A_n=bB; b=\min(b_1, b_2); B=\min(B_1, B_2)$$

Pentru cazul din schiță:

$A_{f1}=B_1b_1$ (orice punct al elementului 1 de pe suprafața de contact parcurge acest spațiu față de 2) \rightarrow curs (ciclu) \rightarrow 1

$L_{of1}=l$ orice punct al suprafeței 1 parcurge distanța l .

x pentru $x \in [0, b_1] \forall M \in [AB]$ pentru sup. 2;

$L_{of2} = b_1$ pentru $x \in [b_1, 1] \forall M \in [BC]$ pentru sup. 2;

$1-b_1-x$ pentru $x \in [1, 1+b_1] \forall M \in [CD]$

2. Cupla de rotație (fus-cuzinet, bioarticulații) (fig. 4.3)

- $A_n \rightarrow$ contact hertzian liniar $\rightarrow \varphi_0 = f(F, R_1, R_2, E_1, E_2, \mu_{P1}, \mu_{P2}); \quad A_n = 2\varphi_0 R_2 B,$
 $B = \min(B_1, B_2), R_1 \approx R_2 \approx R$ – diferă prin toleranțele de fabricație

- $A_{f1} = 2\pi R_1 B;$

$$A_{f2} = 2\pi R_2 B$$

$$\lambda_1 = \frac{A_{f2}}{A_{f1}} = \frac{\varphi_0}{\pi};$$

rezultă

$$\lambda_2 = \frac{A_n}{A_{f2}} = l$$

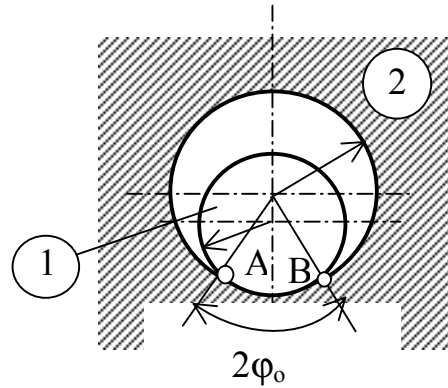


Fig. 4.3

$$L_{of1} = 2\varphi_0 R_2 \quad L_{of2} = 2\pi R_1 \quad \text{pentru orice punct M care aparține arcului AB}$$

$$L_{of1} = 2\varphi_0 R_2 \quad L_{of2} = 0 \quad \text{pentru orice punct M care nu aparține arcului AB}$$

când F are direcția constantă

$$L_{f1,2} = L_{of1,2}; \quad N_c = 60 \cdot n_1 \cdot t_h = 60 \frac{30 \cdot \omega_1}{\pi} t_h; \quad \omega = \text{rad/s}; \quad n_1 = \text{rot/min};$$

$t_h = \text{ore}$

Intensitatea de uzare se poate evalua prin:

- *intensitatea liniară adimensională:* $I_{un} = \frac{dU_h}{dL_f}$

pentru variații mici de timp sau geometrie de frecare constantă

$$I_{uh} = \frac{U_h}{v_f t} = \frac{v_{uh}}{v_f} \in [10^{-3} \dots 10^{-13}]$$

$L_f =$ lungimea drumului de frecare

$v_f =$ viteza de alunecare sau rostogolire.

- *volumetrică* $I_{uv} = \frac{dU_v}{dL_f} \approx \frac{A_f U_h}{L_f} = A_f I_{un}$ unde $A_f =$ aria de frecare

- *gravimetrică* $I_{ug} = \frac{dU_g}{dL_f} = \frac{\rho U_v}{L_f} = \rho I_{uv} = \rho A_f I_{un}$ unde $\rho =$ densitatea

materialului uzat

$$- \text{energetică} \quad I_{ue} = \frac{dU_v}{dL_{mf}} = \frac{dU_v}{d(F_f L_f)} \approx \frac{A_f U_h}{F_f L_f} = \frac{A_f U_h}{f \cdot F_n \cdot L_f} = \frac{I_{uh}}{\tau_f}$$

L_{mf} – lucrul mecanic consumat prin frecare și care a condus la uzura U_v

F_f – forța de frecare; f – coeficientul de frecare; F_n – forța normală.

$$\text{Inversul } e_f^* = \frac{I}{I_{ue}} = \frac{\tau_f}{I_{un}} = \text{energie specifică de}$$

Evoluția uzurii (U) și vitezei de uzare (u)

în timp sunt prezentate în fig.4.4

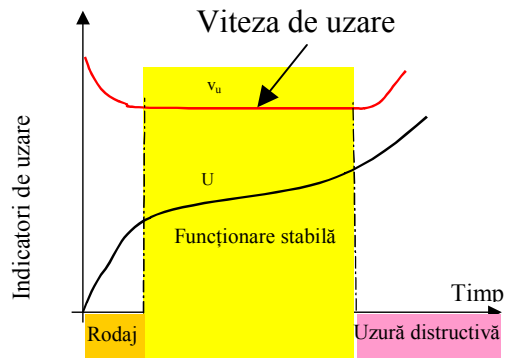


Fig.4.4

Uzura materialelor și biomaterialelor prin frecare uscată sau limită de alunecare, la nivel macroscopic, depinde de natura suprafețelor. Legile generale ale uzurii, la nivel macroscopic:

I. **Viteza de uzare (u) este proporțională cu forța nominală (F_n)**

unde V este volumul materialului uzat pe unitatea de alunecare (l).

$$u = \frac{V}{l} \propto F_n$$

II. **Viteza de uzare (u) este independentă de aria aparentă de contact .**

La nivel microscopic, procesul de uzare este explicat prin interacțiunea suprafețelor reale de contact . Conceptul Archard, prezentat în figura 4.1 b, consideră că aria de contact este circulară de rază a (aria elementară $dA = \pi a^2$).

Se presupune lungimea de frecare prin alunecare $\Delta l = 2a$, particulele sunt semisferice cu raza a și volum $\Delta V = (2/3)\pi a^3$.

Astfel, se obține

$$\frac{\Delta V}{\Delta l} = \frac{\frac{2}{3}\pi a^3}{2a} = \frac{\Delta A}{3}$$

Archard a sugerat ideea că nu se produce particulă de uzură la fiecare interacțiune. Se introduce funcția k , care reprezintă probabilitatea formării unei particule de uzură.

$$\frac{V}{l} = \frac{1}{3} k A_r$$

unde A_r este aria reală (efectivă) . Pentru că A_r este funcție de forța normală, F_n , rezultă că:

- pentru deformarea elastică $\psi < 0,6$:

$$A_r \propto \frac{F_n}{E}; V \propto k \frac{F_n}{E} l$$

unde E este modelul de elasticitate.

- pentru deformarea plastică $\psi > 1$

$$A_r \propto \frac{F_n}{\sigma_c}; V \propto k \frac{F_n}{\sigma_c}$$

unde σ_c este limita de curgere .

Istoriceste, se consideră două criterii de clasificare a proceselor de uzare:

a) clasificarea după tipul de mișcare : alunecare, rostogolire, impact, oscilație, curgere.

b) clasificare după tipul de uzare- oboseală superficială, abraziune, adeziune, tribochimică, cavitație, eroziune etc.

Pentru caracterizarea completă a procesului de uzare, este necesară specificarea următoarelor mărimi:

(i) tipul de mișcare;

(ii) elementele care sunt în interacțiune;

(iii) mecanicismul dominant de uzare;

(iv) marimile de intrare: forța nominală, coeficientul de frecare, deplasarea după inițierea mișcării;

(v) proprietățile materialului care sunt specifice pentru procesul de uzare;



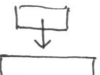
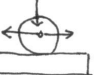
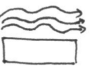

(vi) viteza de uzare;

(vii) aspectul suprafețelor degradate prin uzare.

În tabelul 4.1 se indică clasificarea procesului de uzare după criteriile (i), (ii), (iii) și tipul mișcării.

În tabelul 4.2 se indică aspectul suprafeței pentru principalele forme de uzare.

Tabelul 4.1

Elemente de interacțiune	Mecanismul de uzare Tipul de mișcare relativă	Interacțiunile tensiunilor		Interacțiunilor tensiunilor și materialelor	
		Oboseală	Abraziune	Adeziune	Tribo-chimică
solid /solid (metale , polimeri, minerale etc.) cu sau fără lubrifianți	 alunecare	Uzare prin alunecare			
	 rostogolire	Uzare prin rostogolire			
	 impact	Uzare prin impact			
	 oscilare	Uzare prin "fretting"			
solid –lichid	 curgere	Cavitație			
solid /fluid + particule	 curgere	Eroziune			

Tabelul 4.2

Mecanism de uzură	Aspectul suprafeței deteriorate
Oboseala superficială	Înțepătură, fisură
Abraziune	Dungi, striuri, fisuri
Adeziune	Cratere, flacoane, fisuri
Tribo-chimică	Efectele reacției (particule , filme)

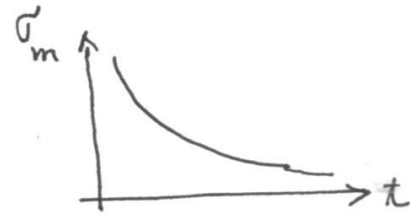
4.2. Oboseala superficială

.Deteriorările care apar în material în zona suprafeței de contact sunt datorate tensiunilor tangențiale variabile. Uzura prin oboseală superficială nu este același lucru cu ruperea volumică prin oboseala clasică a materialului la solicitări variabile:

- fluctuațiile timpului de viață (durată de viață) pentru contactul prin rostogolire sunt mai severe decât pentru contactul clasic;
- pentru ruperea clasică prin oboseală există o limită inferioară a rezistenței pentru care durata de viață este parțial infinită. Pentru uzura prin oboseală superficială nu există o asemenea limită. Durata de viață fără deteriorarea prin oboseală superficială poate fi determinată cu relația empirică de tip Wohler:

$$t = \frac{const.}{\sigma_m^2}$$

unde σ_m este tensiunea elastică maximă admisă.



Complexitatea fenomenelor de contact care au fost prezentate în capitolele 2 și 3 sunt argumente ale influenței forțelor normale și tangențiale asupra tensiunilor.

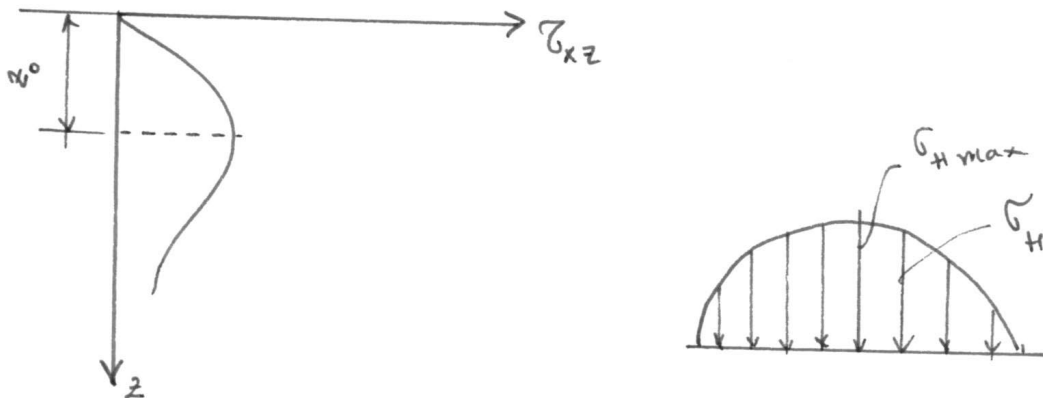


Fig. 4.5. Distribuția presiunilor normale și tensiunilor tangențiale.

Tensiunea decisivă pentru oboseala de contact, prin rostogolire, poate fi analizată de parametrii următori

- a) suspensiile din substrat (oxizi, incluziuni dure, dislocări etc.);
- b) caracteristicile suprafeței (topografie și textură, tensiuni reziduale, nivele energetice, microstructuri);
- c) defecte superficiale (incluziuni, tăieturi, ciupituri de coroziune);
- d) discontinuități ale geometriei de contact (efectul de muchie, particule în contact);
- e) forțe tangențiale (cu alunecare, rostogolire).

Observațiile experimentale privind oboseala superficială demonstrează că tensiunile din substratul de material influențează inițial fisura și propagarea sa. Se poate explica prin teoria dislocațiilor:

- (i) îngrămădirea dislocațiilor în banda de alunecare.
- (ii) fuziunea a două dislocații și formarea în lungul planului de clivaj.

(iii) fisura se formează la extremitatea înclinată

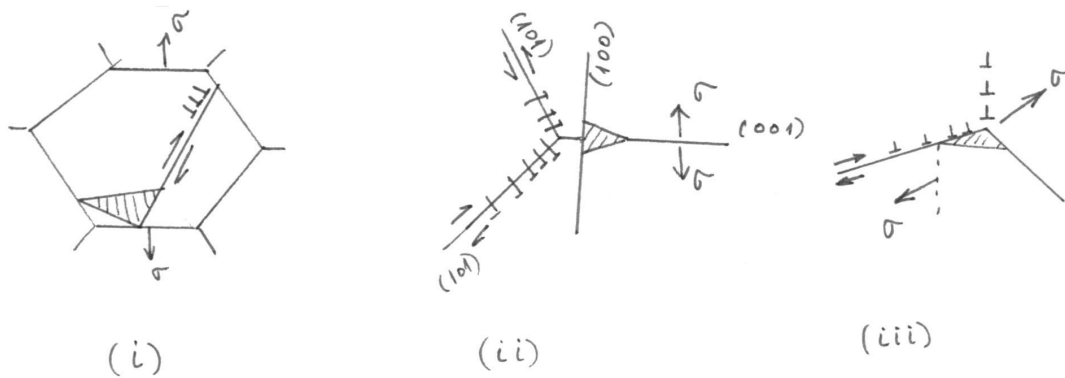


Fig. 4.6. Inițierea și propagarea fisurilor.

Pentru materialele fragile, se consideră ca fiind medii continue. Formarea fisurii, în aceste materiale, poate fi explicată prin teoria lui Griffith.

Se consideră o fisură eliptică cu lungime $2a$ și supusă unei tensiuni σ . Energia necesară formării fisurii este $2\gamma_{cr}\pi a^2$, unde γ_{cr} este energia superficială. Energia elastică acumulată în timp ce suprafața se fisurează este

$$\frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E} \frac{4\pi}{3} a^3$$

unde E este modulul de elasticitate

Energia utilă fisurării

$$\Delta U = 2 \gamma_{cr} \pi a^2 - \frac{\sigma^2}{2E} \frac{4\pi}{3} a^3$$

Când energia, introdusă în material prin aplicarea unor tensiuni, depășește energia superficială a materialului, aria fisurii crește.

În acest punct, tensiunea din fisură este

$$\frac{d\Delta U}{da} = 0$$

și

$$4 \pi a \gamma_{cr} - \frac{\sigma^2}{2E} \frac{4\pi}{3} 3 a^2 = 0 \quad \text{rezultă} \quad \sigma_{cr} = \sqrt{\frac{2 \gamma_{cr} E}{a}}$$

De exemplu, pentru oțel, (considerând $\sigma = 700 \text{ N/mm}^2$, $\gamma_{cr} = 1200 \text{ erg/cm}^2 = 1200 \cdot 10^{-7} \text{ J/cm}^2$) lungimea fisurii care produce rupura este $a = 1 \text{ }\mu\text{m}$.

Pentru caracteristica de abilitate a materialului fragil la fisură se poate utiliza parametrul $k_c = \sigma_{cr} a^{1/2}$.

Pentru materiale care se pot deforma elastic, o parte de energie este absorbită de curgerea plastică în zona de fisură.

Pentru domeniul elasto-plastic, în substratul de contact este posibil ca dislocările să interacționeze și să se formeze particule sub formă de fulgi (teoria uzării prin delaminare). Această teorie explică, de asemenea, formarea straturilor:

- i) generarea dislocațiilor în substrat
- ii) îngrămădirea dislocațiilor;
- iii) formarea de cavități ;
- iv) creșterea cavităților în direcții paralele la suprafață ;
- v) formarea straturilor, când fisura atinge lungimea critică

4.3. Uzarea abrazivă

În practică există multe tipuri de uzare abrazivă, care se pot clasifica în (fig. 4.7 a,b):

- abraziune cu "două corpuri"
- abraziune cu "trei corpuri".

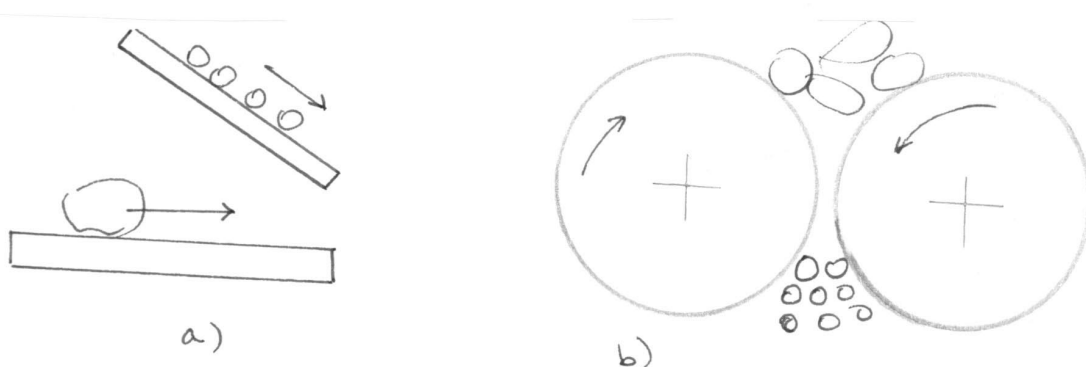


Fig. 4.7. Abraziunea cu "două corpuri" și "trei-corpuri"

În funcție de matura fenomenului, se distinge :

- a) abraziune cu tăiere (dinții de excavator, ciocănelele pulverizatorului cu impact);
- b) abraziune cu eroziune (agitator de fluide, interacțiunea nisipului cu materiale solide);
- c) abraziune cu polisare (bile polisante).

Numeroase rezultate experimentale demonstrează că volumul materialului dislocat (V_u) prin frecare și uzare este proporțional cu forța normală și cu distanța de alunecare, L_f :

$$V_u \propto F_n; V_u \propto L_f$$

Se definește rezistența la uzare

$$\epsilon = \frac{L_f}{V_u}$$

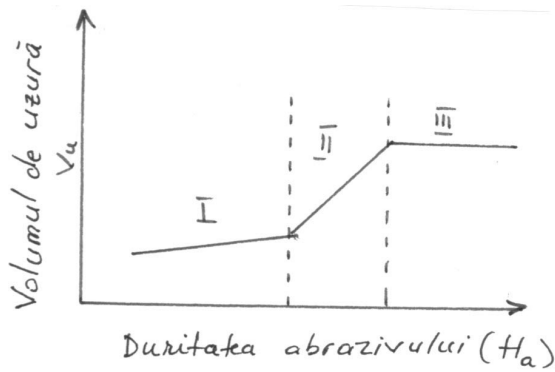


Fig. 4.8. Influența durității asupra volumului de uzură

(ridicată) $H_a > H_m$.

Condiția necesară pentru a avea uzare moderată și care este demonstrată prin această corelație este $H_m \approx 1,3 H_a$.

Pentru determinarea proprietăților materialului privind comportamentul de abraziune în regiunea cu uzare ridicată au fost testate multe materiale.

și rezistența relativă la uzură

$$\epsilon_{\mu} = \frac{\epsilon_{\text{specimen}}}{\epsilon_{\text{standard(etalon)}}}$$

Corelația uzării abrazive a materialului cu duritatea abrazivului (H_a) și duritatea materialului respectiv este cunoscută ca legea Hrusciiov-Babicev.

Schema de uzare este ilustrată în fig. 4.8.

Se pot deosebi trei zone:

I – regiune cu uzare miderată,

$H_a < H_m$;

II – regiune tranzitorie, $H_a \sim H_m$

III – regiune cu uzare mare

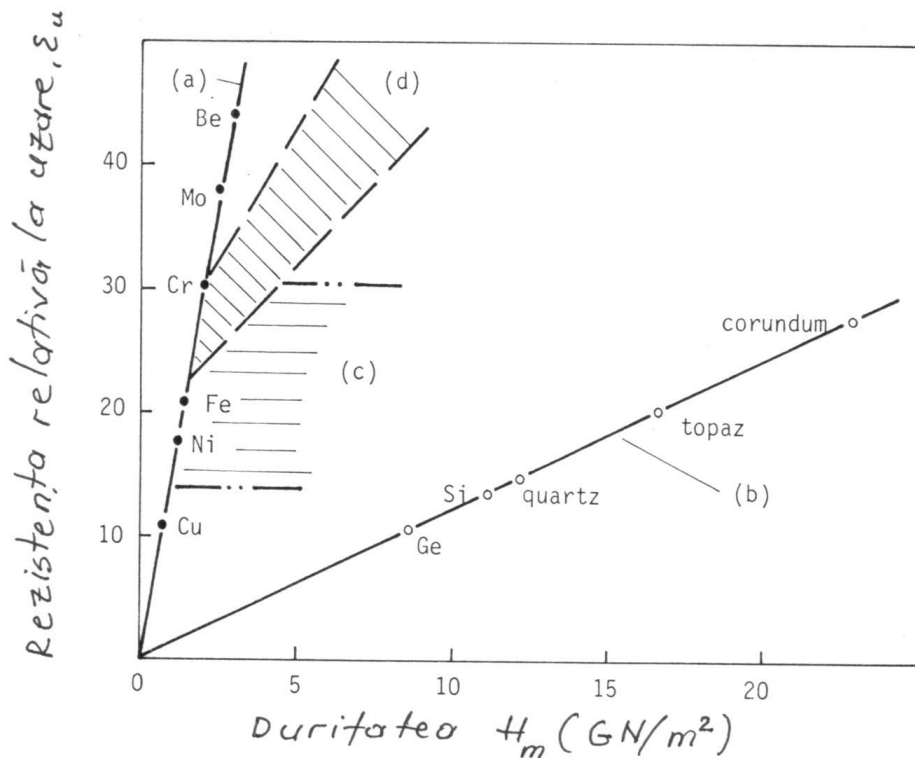


Fig. 4.9. Diagrama Hrusciiov-Babicev – rezistența la uzare în funcție de duritate

În figura 4.9 este ilustrată rezianța relativă la uzare în funcție de duritatea materialului în regiunea III.

Rezultatele sunt obținute prin utilizarea corindonului ca abraziv (care are $H=22,9 \text{ N/mm}^2$) și a aliajului de tip Babbitt (plumb cu conținut de antimoniu) ca material etalon. Duritatea materialului este determinată înainte de utilizare.

Concluzii care se pot trage din diagrama Hrusciiov-Babicev:

a) pentru metale pure (curba (a) din fig. 4.9)

$$\varepsilon_u = C_{\text{metal}} H_m \quad \text{unde } C_{\text{metal}} = 13,8 \cdot 10^{-3} \text{ N}^{-1} \text{mm}^2.$$

b) pentru materiale dure și minerale (curba (b) în fig. 4.6)

$$\varepsilon_u = C_{\text{mineral}} H_m \quad \text{unde } C_{\text{mineral}} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ N}^{-1} \text{mm}^2.$$

c) pentru materiale metalice durificate prin deformații, rezistența la uzare nu depinde de duritatea materialului (zona c din fig. 4.9).

d) pentru oțeluri durificate prin tratamente termice, rezistența la uzare crește cu duritatea materialului.

Corelarea rezistenței relative la uzare abrazive cu modulul de elasticitate (E măsurat în daN/mm^2) este

$$\varepsilon_u = 0,49 \cdot 10^{-4} E^{1,3}$$

Relația liniară între rezistența la uzare abrazivă și rezistența materialului poate fi verificată pentru medelul simplu al "brăzdarului" conic (fig. 4.10).

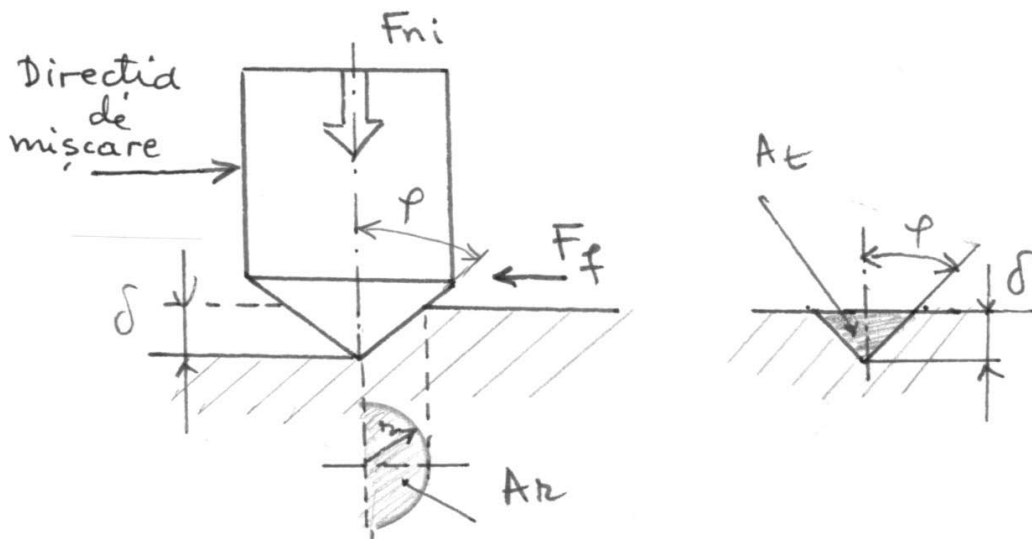


Fig. 4.10. Modelul brăzdarului conic al uzării abrazive

Pentru forța normală F_{ni} , aria reală este (sau aria efectivă):

$$A_r = \frac{F_{ni}}{\sigma_c} = \frac{1}{2} \pi r^2 \quad r = \sqrt{\frac{2 F_{ni}}{\pi \sigma_c}}$$

unde σ_c este rezistența la curgere a materialului.

Volumul materialului dislocat pe lungimea de alunecare, L_f , este

$$\Delta V_u = \frac{l}{2} \cdot 2r \cdot \delta \cdot L_f = \frac{2 F_{ni}}{\pi \sigma_c} L_f \operatorname{ctg} \varphi$$

$$\frac{\Delta V_u}{L_f} = \frac{2 \operatorname{ctg} \varphi}{\pi \sigma_c} F_{ni}$$

După ipoteza lui Archard, există doar o proporție k dintre toate contactele care produc particule de uzură. Astfel că

$$\frac{V_u}{L_f} = k \frac{2 \operatorname{ctg} \varphi}{\sigma_c} F_n$$

dar $\sigma_c \approx H_m$ și prin urmare

$$V_u = \frac{\text{constant}}{H_m} \quad \varepsilon_u = c H_m$$

Duritatea este considerată o proprietate tribologică a materialului pentru comportamentul uzurii abrazive.

4.4. Uzarea prin adeziune

Interacțiunea materialelor este foarte importantă pentru adeziunea celor două corpuri care sunt în contact. Apar forțe de tip Van der Waals cu rază lungă de acțiune la inițierea contactului, iar apoi acționează la distanțe foarte mici (~ 1 nm) forțele cu rază mică de acțiune. În acest fel se formează adezivă care este dependentă de material. Ruperea joncțiunii adezive se poate produce în substratul unuia sau celui de al doilea material (fig. 4.11).

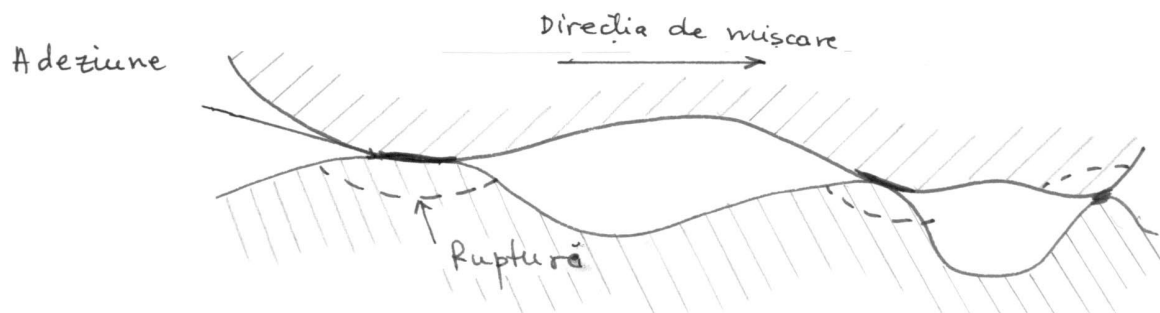


Fig. 4.11. Uzarea adezivă

În contrast cu mecanismul de uzare abrazivă pentru care este necesar un timp de deteriorare și o valoare critică a durității, uzarea adezivă poate apare imediat, prin "griparea" sau "blocarea" elementelor cu mișcare relativă.

De exemplu, pentru cuplul oțel-oțel se observă transferul materialului de adeziune și formarea de joncțiuni "reci" și dure.

Deoarece formarea joncțiunilor adezive și ruperea lor sunt influențate de imperfecțiunile și impuritățile suprafeței și de efectele mediului înconjurător este dificil de făcut o corelație între parametrii uzării adezive și proprietățile volumice ale materialului.

În vid, unde influențele mediului sunt eliminate, pentru cuplul metal-metal, se observă următoarele legi pentru uzarea adezivă :

(i) interacțiunile adezive la interfață nu sunt direct dependente de stabilitatea metalului;
 (ii) structura cristalină influențează uzura adezivă. Metalele cu o structură hexagonală au adeziunea inferioară celor cu structură cubică și volum centrat. Aceste diferențe pot fi explicate prin mecanisme de deformare și prin numărul planelor de alunecare.

(iii) Orientarea cristalină influențează uzura adezivă. Metalele cu o densitate atomică ridicată au viteza de uzare mai redusă.

(iv) Dacă sunt puse în contact metale diferite, procesul de uzare se derulează prin transfer de particule ale metalului cu coeziune mai mică la cel cu coeziune superioară.

(v) Cantități mici ale elementelor aliajului, de exemplu C și S, sunt suficiente pentru reducerea uzurii adezive. Carbonul și sulful, activate de energia termică de frecare, difuzează la suprafața metalică și diminuează uzura de o manieră semnificativă.

În precesele de uzare severă, se pot remarca următoarele fenomenele:

a) dezvoltarea unor joncțiuni în care tensiunea de contact depășește limita de curgere; sensul dezvoltării joncțiunii este contrar celui vitezei de alunecare.

b) fisurarea materialului la finele joncțiunii și detașarea prin transfer pe celălalt material.

Pentru înțelegerea acestor fenomene, Buckley a făcut următorul experiment:

deplasarea unui știft de cupru cu structură cristalină pe o suprafață de cupru bi-cristalină (fig. 4.12).

Un grăunte al bicristalului are orientarea în plan cristalin (111) și în altul (210).

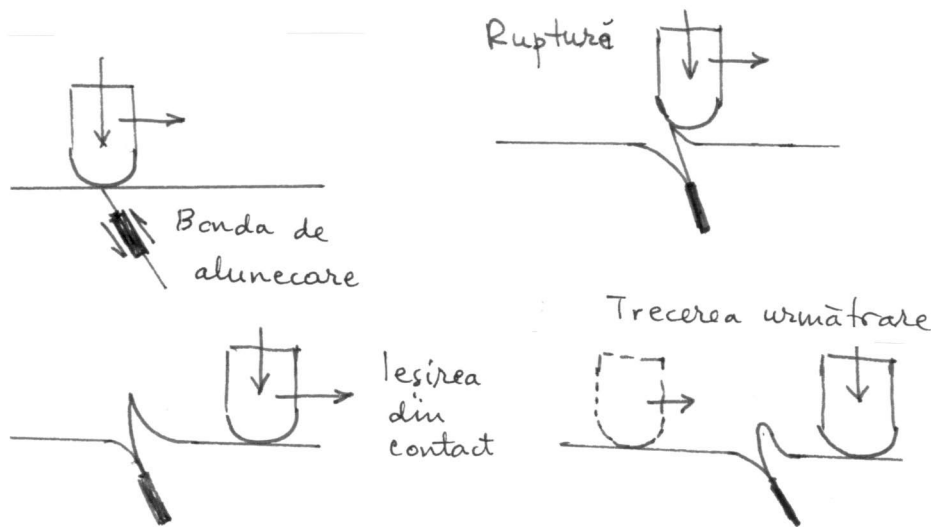


Fig. 4.12. Originea ruperii și formării particulei de uzură

Pentru o singură trecere în lungul suprafeței, fisurile în grăunte sunt dezvoltate la temperatura ambiantă. Dacă privim atent fisurile, se remarcă margini foarte fine, lise. În spatele materialului față de direcția de deplasare, se formează o buclă dedesubtul planului de separație. Unghiul dintre fisură și orientarea suprafeței corespunde bazei de alunecare a bicristalului. (fig. 4.9).

Se produce adeziunea bicristalului de știft. Din cauza mișcării tangențiale, ruperea se produce în lungul benzii de alunecare, unde forțele deplasează planurile atomice. Pentru o anumită forță tangențială, știftul se detașează de bicristal și bucla metalului se formează de

deasupra suprafeței. La trecerea următoare, știftul va forfecă adeziunea situată deasupra suprafeței și astfel se formează particula de uzură.

Legea uzării prin adeziune este

$$V = k F_n \frac{L_f}{H}$$

unde V este volumul de material uzat; H - duritatea; F_n –forța normală ; L_f – lungimea de frecare; k – coeficientul de uzare adezivă.

4.5. Uzarea tribo-chimică

În procesele de alunecare și/ s-au rostogolire, elementele cuplei de frecare interacționează cu mediul de lucru. Mediul de lucru poate fi un lubrifiant special sau mediul natural.

Interacțiunile între elemente (1 și 2) și mediul ambiant pot fi considerate ca un proces ciclic cu două etape :

i) În prima etapă, suprafețele (1) și (2) interacționează cu mediul ambiant și rezultă produse de reacție (1)-(3) și (2)-(3) și care sunt localizate pe suprafețele (1) și (2).

ii) În etapa a doua a frecării dintre produsele de reacție, care pot fi abrazive sau nu, se pot forma fisuri, ruperi. Suprafețele devin "imaculate" și procesele reîncep cu prima etapă.

Produsele de reacție sunt adăugate proceselor de frecare și uzare și duc la modificări energetice în zona de contact :

- reactivitatea se dezvoltă în timpul creșterii temperaturii asperității, astfel că se accelerează formarea stratului superficial;

- proprietățile mecanice ale stratului se modifică și apare tendința la rupere fragilă a asperității .

Pe baza acestei ipoteze fenomenologice, se poate defini o grosime critică a stratului superficial care, prin rupere, produce particule de uzură.

Astfel, Quin explică uzarea prin oxidarea oțelului :

Dacă se consideră t_c durata contactului unei singure rugozități care se poate rupe cu probabilitatea k, atunci un strat de oxid de grosime h_u se va deteriora după timpul t

$$t = \frac{t_c}{k}$$

Dacă se consideră că viteza de alunecare este constantă, v, și că în timpul t lungimea de frecare este L_f , rezultă

$$t = \frac{L_f}{vk}$$

Masa de oxid pe unitatea de suprafață care se formează în timpul t este

$$\Delta m = \sqrt{k_p t}$$

unde k_p este viteza de oxidare.

Dar $\Delta m = \rho h_u$ (ρ – densitatea oxidului) și rezultă

$$h_u = \sqrt{\frac{k_p t}{\rho^2}}$$

Semnificația coeficientului statistic de uzare k este

$$k = \frac{L_f k_p}{V \rho^2 h_u^2}$$

Pentru legile de oxidare se consideră că viteza de uzare este de tip Arrhenius

$$k_p = A_c \exp\left(-\frac{Q}{RT_c}\right)$$

unde A_c este constanta Arrhenius, Q este energia de activare, R la constanta universală a gazelor, T_c temperatura din zona de contact.

Ținând cont de aceste relații, coeficientul statistic de uzare tribo- chimică devine

$$k = \frac{L_f A_c \exp\left(-\frac{Q}{RT_c}\right)}{h_u^2 \rho^2 v}$$

Pentru contactul plastic (indicele de plasticitate $\Psi > 1$), $p_c = H$, unde p_c este rezistența la curgere, H –ditatea materialului, volumul de material uzat este:

$$V = \frac{k}{3H} F_n \cdot l = \frac{L_f A_c \exp\left(-\frac{Q}{RT_c}\right)}{3 h_u^2 \rho^2 v H} F_n l$$

unde F_n este forța normală și l este lungimea totală de frecare.

Această expresie indică principalele elemente de dependență ale uzării tribochimice::

- variabilele de lucru (F_n , v , l , T_c);
- constantele generale și parametrii de material (A_c , Q , R , ρ , H);
- caracteristicile de interacțiune (L_f , T_c , h_u).

4.6. Forme complexe de uzare

Principalele forme de uzare (oboseală superficială, abraziune, adeziune și uzare tribo- chimică) există ca atare sau în diferite combinații în funcție de parametrii de lucru și de ponderea unora sau altora în procesul de frecare.

De exemplu, uzarea prin “fretting” conține toate formele de uzare. Acest tip de uzare apare atunci când corpurile solide se deplasează prin oscilare relativă cu amplitudini foarte mici ($< 100 \mu\text{m}$) și se întâlnește în următoarele cuple de frecare: articulații, caneluri, asamblări presate, etanșări statice metalice, cuplaje etc.

Procesul de uzare prin fretting poate fi schematizat astfel:

- în prima etapă se inițiază fisurile prin mișcarea de oscilație și se propagă;
- în etapa a doua se formează particulele de uzură ca urmare a procesului de oboseală superficială și / sau de adeziune. În această etapă se produc reacții tribo-chimice.
- în timpul celei de-a treia etape, particulele de uzare se detașează și multe dintre ele pot fi abrazive.

Astfel, procesul se reia.

În orice proces de uzare, se poate aplica principiul suprapunerii efectului. Pentru cazul unei cuple de frecare cu două elemente cu funcționare în atmosferă gazoasă, trebuie analizate următorii parametri:

- caracteristicile fizice ale materialelor, M^1 , M^2 ;
- mediul gazos, G ;
- zonele deformate ale materialelor, D^1 , D^2 ;
- materiale retransferate D_1^1 ; D_2^2
- le materiale deformate și retransformate D_2^1 , D_1^2 ;
- produse de reacție, R^1 , R^2 ;
- produse de reacție transferate, R_2^1 , R_1^2
- produse de uzare ale materialelor, Z^M ;

- produse de uzare ale stratului de reacție, Z^R ;
- I gaze adsorbite, G_3^1, G_3^2 .

Schimbările componentelor materialelor în sistemul tribo- mecanic sunt ilustrate în fig. 4.10. Studiul sistematic și sistemic al procesului de uzare este specific fiecărei cuple de frecare și permite deducerea principalelor legi de uzare și limitele de aplicare ale lor.

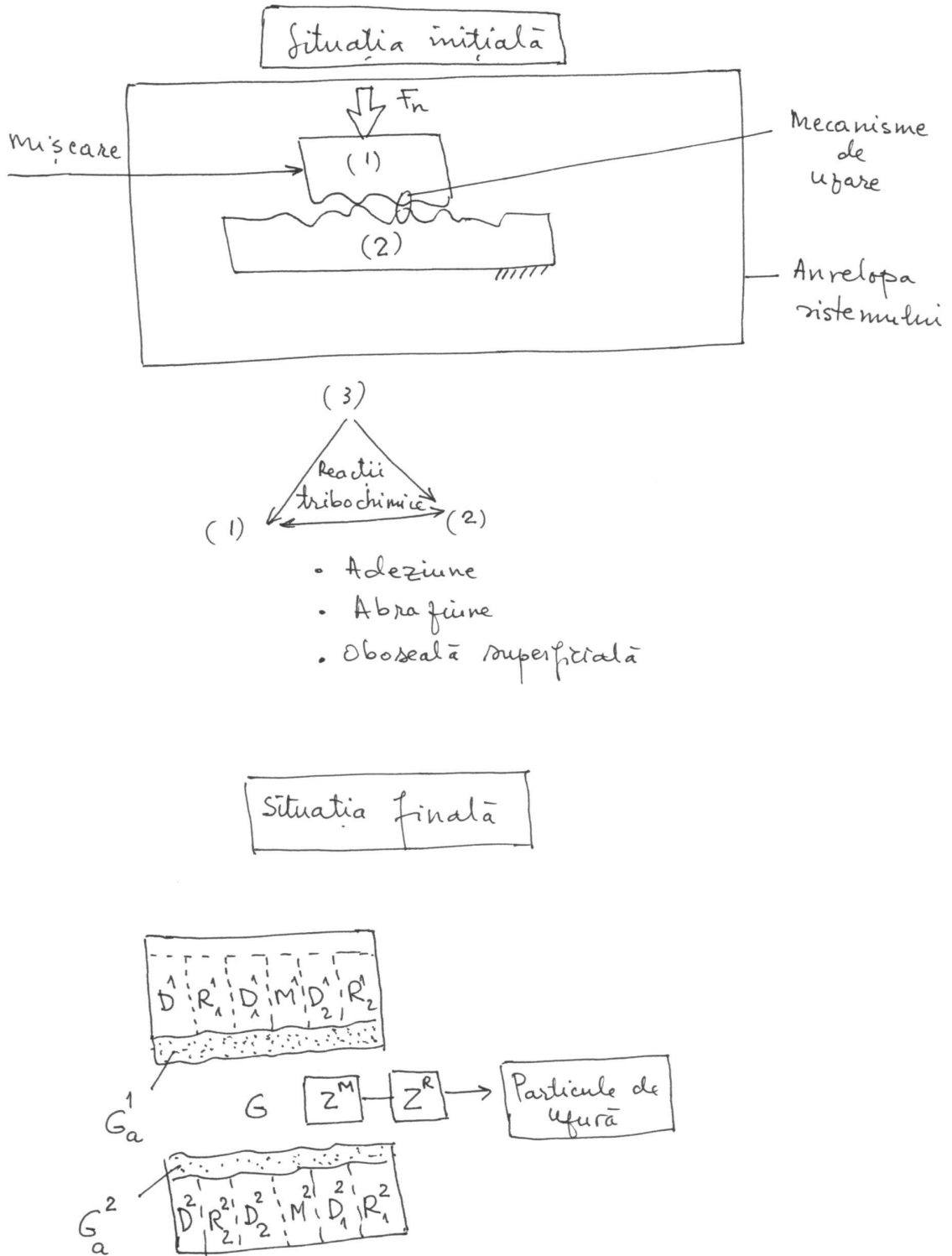


Fig.4.13. Suprapunerea mecanismelor de uzare