

9. UZAREA DE ADEZIUNE [A7, A13, A14, A18]

9.1 Definiere. Forme specifice

Uzarea prin adeziune este o formă de uzare ce se caracterizează prin viteze de uzare ridicate și prin instabilități relativ mari ale coeficienților de frecare. Metalele sunt preponderent supuse la adeziune. În condiții normale de temperatură, presiune și umiditate, adeziunea dintre oricare două obiecte solide este puțin observată din cauza straturilor “contaminate” de oxigen, apă și ulei. Adeziunea se poate reduce, deasemenea, prin creșterea rugozității suprafețelor sau prin creșterea durtății.

Adeziunea metal-metal

Experimentările privind adeziunea realizate în vacuum pentru materialele obișnuite diferă semnificativ de cele realizate în aer la presiunea obișnuită. Stratul de oxid are grosimi foarte mici, câțiva nanometri, și este invizibil. Forța necesară separării a două suprafețe apăsate reciproc cu o forță normală, constituie forța de adeziune. Astfel, în tabelul 9.1 se prezintă forța de adeziune a diferitelor metale (mN) pe fier, atunci când sunt supuse unei forțe normale de 0,2 mN într-o cameră vidată la o presiune de 10^{-10} Torr.

Tabelul 9.1 Forța de adeziune în vacuum a diferitelor metale pe fier

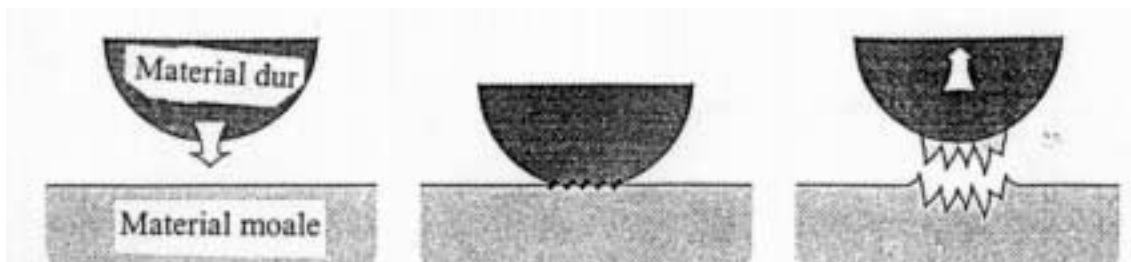
Metal	Solubilitatea în fier (% atomic)	Forța de adeziune pe fier (mN)
Fier		>4,0
Cobalt	35	1,2
Nichel	9,5	1,6
Cupru	<0,25	1,3
Argint	0,13	0,6
Aur	<1,5	0,5
Platina	20	2,5
Aluminiu	22	2,5
Plumb	Insolubil	1,4
Tantal	0,20	2,3

Se observă că pentru toate cazurile forța de separare a suprafețelor (forța de adeziune) este mai mare decât forța normală. Tendința de adeziune dintre metale nu este influențată de solubilitatea mutuală sau de mărimea atomică relativă. Cea mai mare adeziune apare la o serie de metale, ca de exemplu, fier pe fier.

Procesul de adeziune apare instantaneu și poate apare la temperaturi moderate sau reduse. Numeroase experimentări dovedesc că atunci când adeziunile sunt puternice, are loc un transfer de metal “moale” pe cel “tare”, așa cum se vede schematic în figura 9.1.

Adeziunea puternică dintre metale poate fi explicată prin transferul de electroni dintre suprafețele ce formează contactul. Electronii liberi prezenți în metale se pot mișca dintr-un corp în celălalt în zona de contact, atunci când distanța dintre corpuri este suficient de mică, de exemplu, < 1 nm, ordinul de mărime al dimensiunii atomice. Ca urmare, electronii pot “conecta” cele două suprafețe, chiar dacă cele două metale au structuri atomice diferite. Metalul cu densitatea electronică mai mare donează electroni celuilalt metal.

Valorile calculate ale rezistenței adeziunii dintre două metale sunt superioare celor experimentale. Aceste diferențe sunt explicabile prin dificultățile în evaluarea ariei reale de contact dintre atomii suprafețelor conjugate.



Structura cristalină a metalului influențează semnificativ adeziunea. Astfel, s-a observat experimental că metalele cu structură hexagonal compactă au cea mai mică adeziune. În fig. 9.2 se prezintă coeficientul de adeziune, definit ca raportul dintre forța de “desfacere” a contactului și forța normală, pentru diferite metale pure.

Se observă că metale cu aceeași duritate, de exemplu aluminiu și zincul sau plumbul și staniul, au adeziunea esențial diferită, ca urmare a structurii rețelei cristaline.

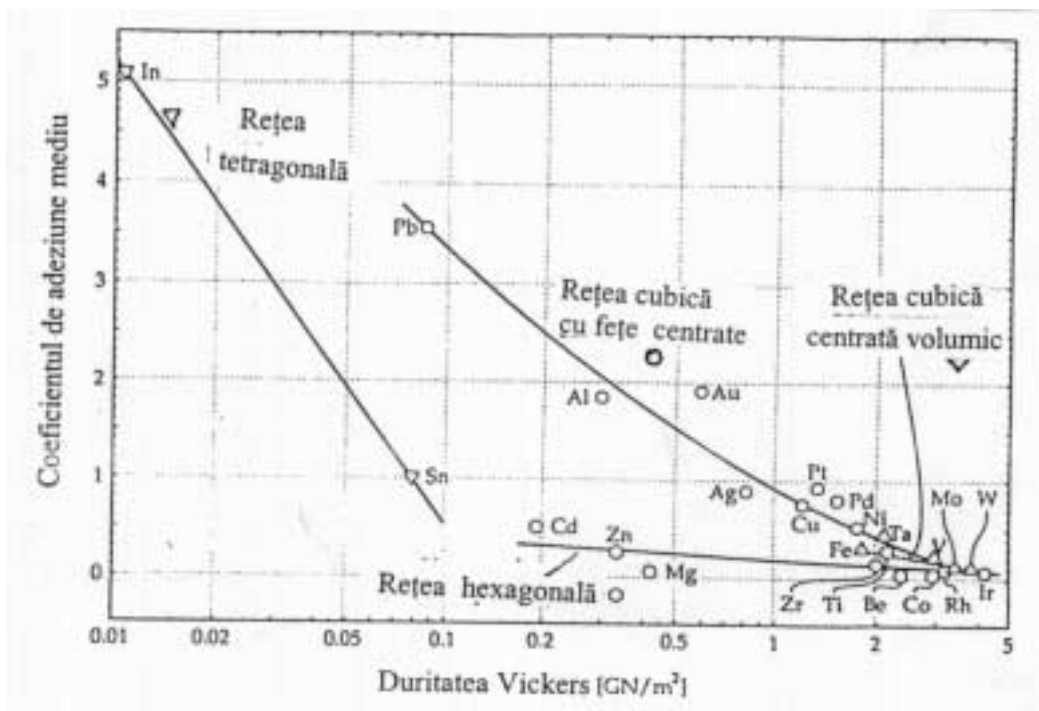


Fig.9.2 Coeficientul de adeziune pentru diferite metale ca funcție de duritate.

Metalele cu structura hexagonal compactă au planele de alunecare mai distanțate și sunt metale mai puțin ductile decât cele cu structura cu fețe centrate sau cubic centrate.

Adeziunea este influențată și de reactivitatea chimică sau electropozivitatea fiecărui metal. Metalele chimic active, ca de exemplu aluminiu, au adeziuni puternice în comparație cu metalele nobile.

Un factor limită în adeziune este forța care determină curgerea plastică și la care se stabilește contactul real între suprafețe.

Adeziunea metal – polimer

Transferul de material polimeric pe metal are ca explicație prezența în polimer a unor substanțe nemetalice reactive, ca de exemplu fluorina. Deasemenea, forțele de tip Van der Waals contribuie la adeziunea polimerului pe metal.

Adeziunile puternice dintre polimer și metal au la bază interacțiile chimice ale polimerului cu metalul.

Polimerul care poate fi exemplificat ca model de transfer este politetrafluoretilena (PTFE), a cărei structură moleculară și cristalină este prezentată în fig. 9.3. Lipsa grupurilor laterale și forma aproximativ cilindrică a moleculelor de PTFE asigură mobilitatea moleculelor sub tensiunile exterioare aplicate. Structura cristalină constă din straturi de material cristalin situate între zone de material amorf. Un bloc de PTFE care alunecă pe o suprafață metalică se uzează sub forma unor lamine, rezultând o frecare foarte redusă, însă o viteză de uzare ridicată. Mecanismul de uzare prin alunecare a PTFE este schematic ilustrat în fig. 9.4.

Majoritatea polimerilor și compozitelor polimerice se transferă pe suprafețele metalice sub forma unor “bulgări”, role. Acest mecanism de transfer în procesul de uzare este prezentat în fig. 9.5. Mărimea bulgărilor este de circa $1\mu\text{m}$ ca diametru mediu. Deoarece diametrul este foarte mic în comparație cu filmul planar transferat de PTFE, capacitatea majorității polimerilor de a se transfera pe suprafețe metalice este redusă. Forma de transfer prin bulgări nu contribuie la caracteristici de frecare și uzare mai bune, ceea ce face ca acești polimeri să nu fie utilizați ca materiale performante tribologice.

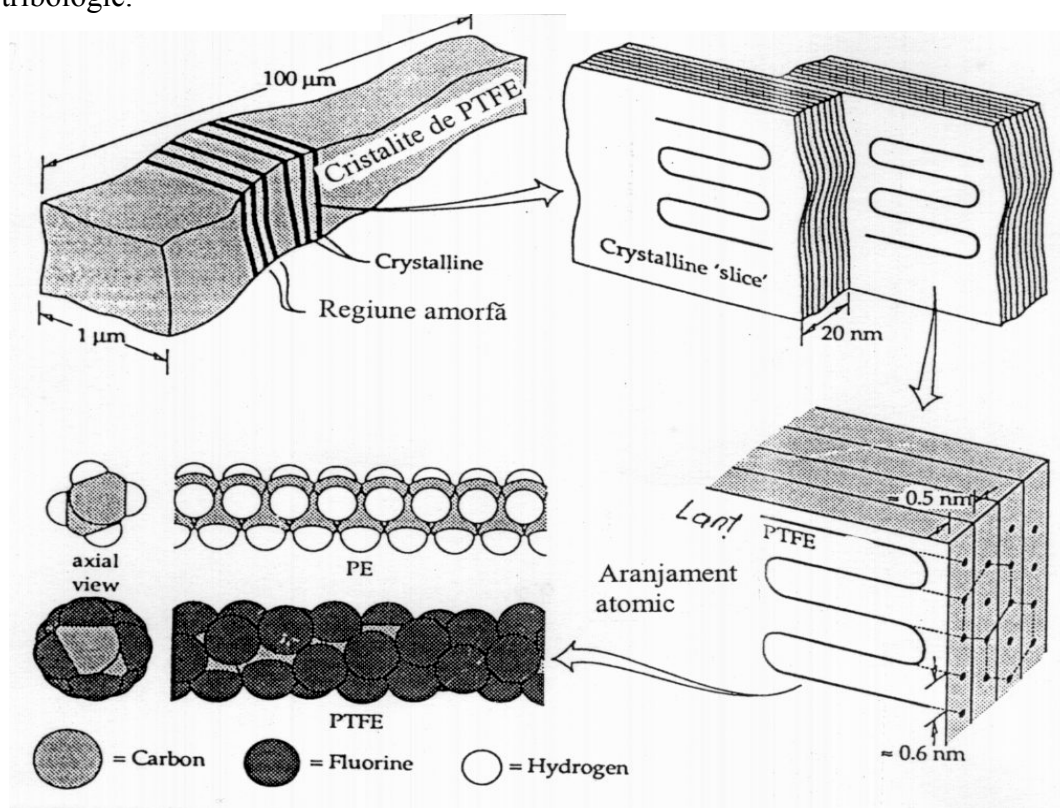


Fig.9.3 Structura moleculară și cristalină a PTFE : a) structura moleculară, b) structura cristalină

Câteva polietilene (polietilena înalt densificată, HDPE, și polietilena cu greutatea moleculară foarte ridicată, UHMWPE) fac excepție de la acest mecanism de uzare prin “bulgări” de adeziune. La aceste polietilene, structura moleculară fină sau absența grupurilor laterale conduce, similar cu PTFE, la un transfer lamelar. De remarcat că polietilenele PTFE, UHMWPE și HDPE au coeficientul de frecare static cu circa 50% mai mare decât cel cinetic.

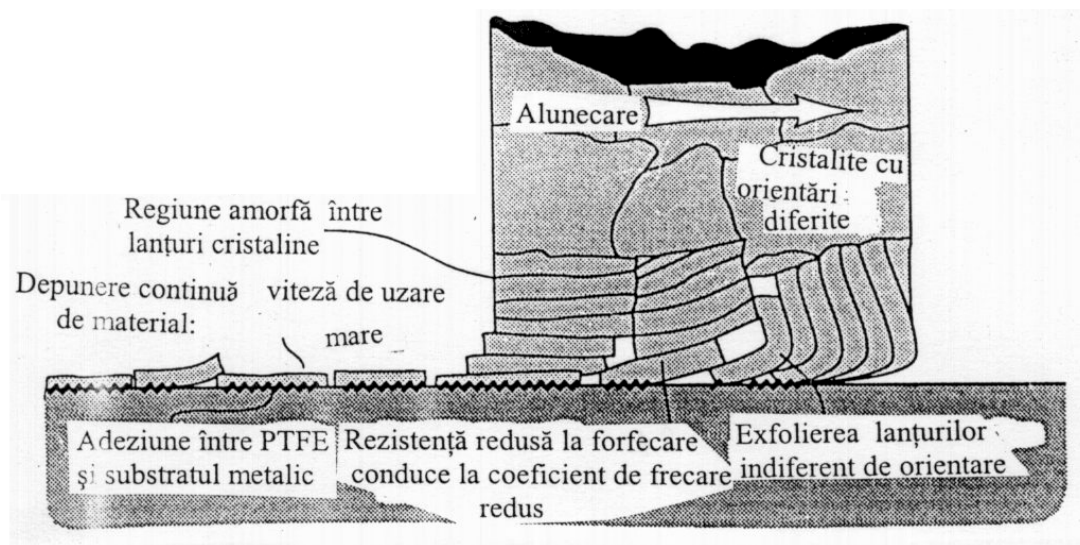


Fig.9.4 Mecanismul de transfer și de uzare al PTFE

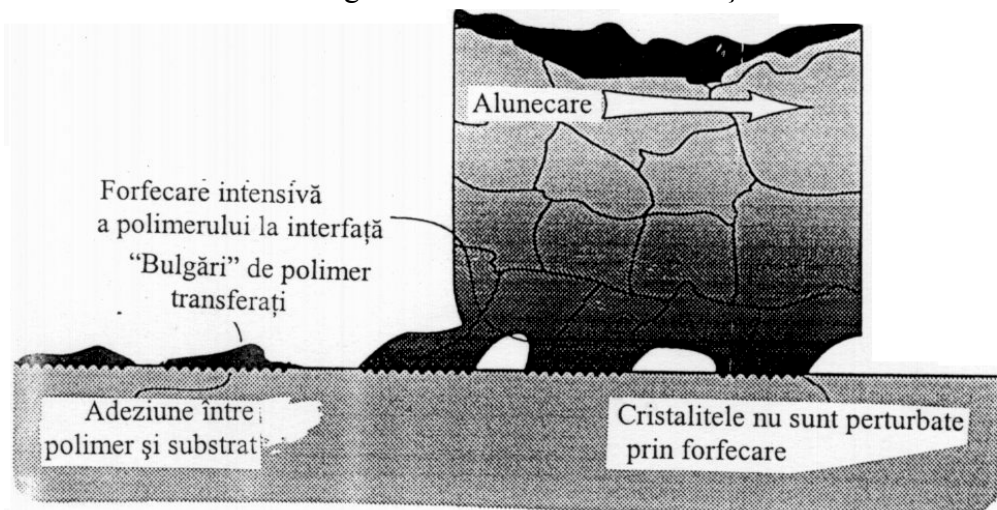


Fig.9.5 Mecanismul de transfer prin “bulgări” (role) a polimerilor

Adeziunea metal – ceramică

Adeziunile dintre metale și materialele ceramice se datoresc afinităților lor chimice. Este observat că numai metalele care nu formează oxizi stabili au coeficienți de frecare reduși cu ceramicile. Metale ca aluminiul, nichelul și cuprul au coeficienți de frecare ridicați cu ceramicile, în timp ce aurul și argintul (oxizi instabili) au coeficienți de frecare reduși.

Deși ionii de oxigen sunt prezenți pe suprafața oxidată a aluminiului și sunt ancorați pe aluminiu, totuși, formează și legături adiționale cu ceramica.

Metalele uzuale au rezistența de coeziune mai redusă decât a celor mai multe ceramice, astfel că ruperea adeziunilor are loc în metal și transferul se produce pe ceramică.

Adeziunea și frecarea dintre metal și ceramică depind de ductilitatea metalului. Astfel, metalele moi ca bronzul sau alama generează, prin transfer, filme groase continue, iar oțelul sau fonta se transferă sub forma unor filme fragmentate.

Mecanismul adeziunii metalului pe ceramică și formării stratului de metal transferat este ilustrat în fig. 9.6.

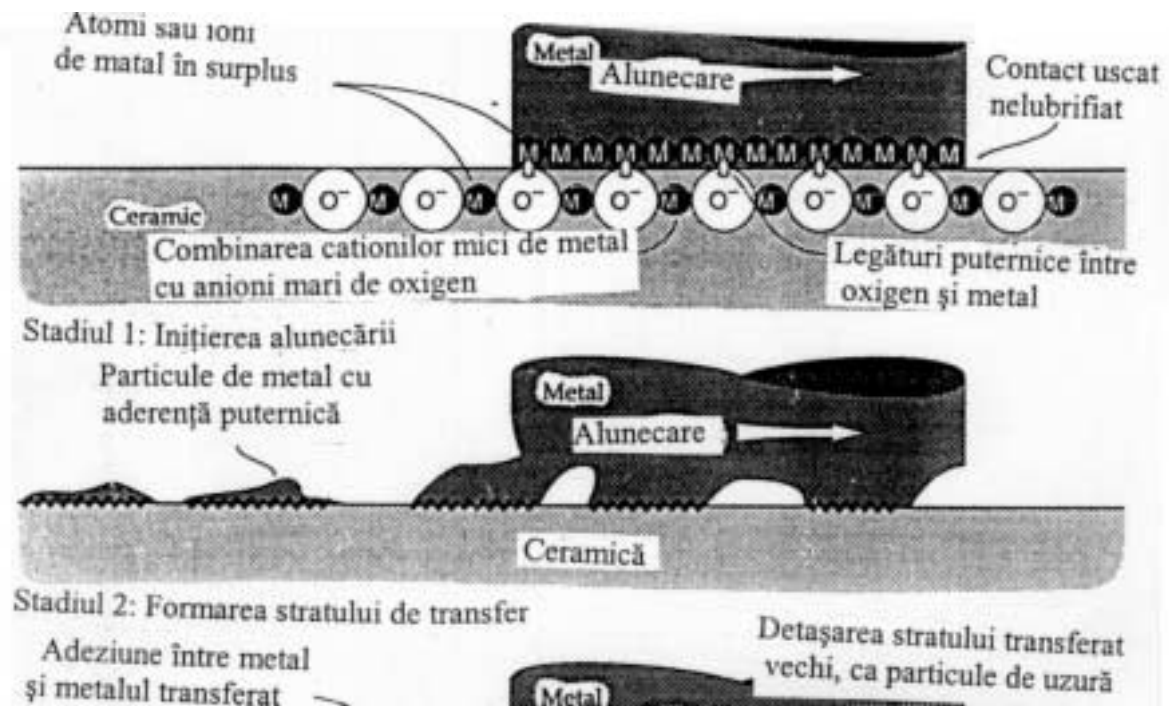


Fig.9.6 Mecanismul adeziunii metalului pe ceramică și formarea stratului metalic transferat.

Adeziunea ceramicelor pe metale este rapid redusă prin contaminarea suprafeței cu oxigen, apa, ulei, similar ca la contactul metal – metal.

Adeziunea polimer – polimer și ceramică – ceramică

Este cunoscut un nivel moderat al adeziunii ca urmare a forțelor de tip Van der Waals. Forțe de atracție au fost semnalate pentru suprafețele de cuarț și cele de mică. Cauciucul aderă de sticle și de polimeri.

Proprietățile mecanice ale polimerilor și ceramicelor sunt explicabile prin diferența dintre atracția interatomică și adeziunea volumică. Polimerii au cel mai redus modul de elasticitate dintre materialele frecvent utilizate în inginerie, iar ceramicile au cel mai ridicat modul de elasticitate.

Prezența rugozităților pe suprafața de contact modifică adeziunea dintre suprafețele solide elastice. O relație de deducere a adeziunii pentru suprafețe elastice cu rugozități a fost evidențiată de Fuller și Tabor:

$$K = E\sigma^{3/2} / (r^{1/2}\Delta\gamma)$$

în care: K este coeficientul de reducere a adeziunii prin forțele de deformație a asperităților;

E – modulul de elasticitate (Pa);

σ - abaterea medie pătratică a înălțimii rugozității (m);

r – raza medie de curbura a vârfurilor rugozităților (m);

$\Delta\gamma$ - energia superficială schimbată pe contactul dintre cele două suprafețe (J/m^2).

Se consideră că pentru $K < 10$ apar adeziuni puternice, iar pentru $K > 10$ adeziunile sunt reduse.

Din această expresie se constată că adeziunea este mult mai sensibilă cu rugozitatea pentru materiale cu modul de elasticitate ridicat decât pentru cele moi. Astfel, adeziunea între elastomeri apare când media pătratică a înălțimii R_q este peste $1\mu m$, iar la ceramică, când R_q este mai mare de 5 nm. Pentru rugozități sub aceste valori, apar adeziuni puternice. Dacă apar deformații plastice între asperitățile de contact, adeziunea se intensifică.

Uzarea de adeziune este denumită, uneori, ca uzare de "**aderență**", de "**contact**" sau "**termică**" și se manifestă, îndeosebi în două forme principale:

- *Transferul de material* de pe o suprafață pe alta, ca urmare a adeziunii moleculare (interacțiunii atomice). această formă este îndeosebi proprie adeziunii normale sau moderate ("blânde") și conduce de fapt la frecarea dintre materiale de aceeași natură; consecințele sunt uneori nefavorabile datorită unor microjoncțiuni, gripaje incipiente, ecruisări și abraziune etc.

- *Formarea și ruperea microsudurilor* (sau a punților de sudură) se manifestă în două moduri, și anume; suduri reci (microjoncțiuni datorită adeziunilor de temperaturi relativ reduse) și suduri calde (microjoncțiuni sau joncțiuni metalurgice, însoțite de o interacțiune și o recristalizare a materialelor). **Uzarea poate fi moderată**, când se produc forfecări fără smulgeri (fig. 9.7 a, cazul III; $\tau_{fs} < \min(\tau_{f1}, \tau_{f2})$).

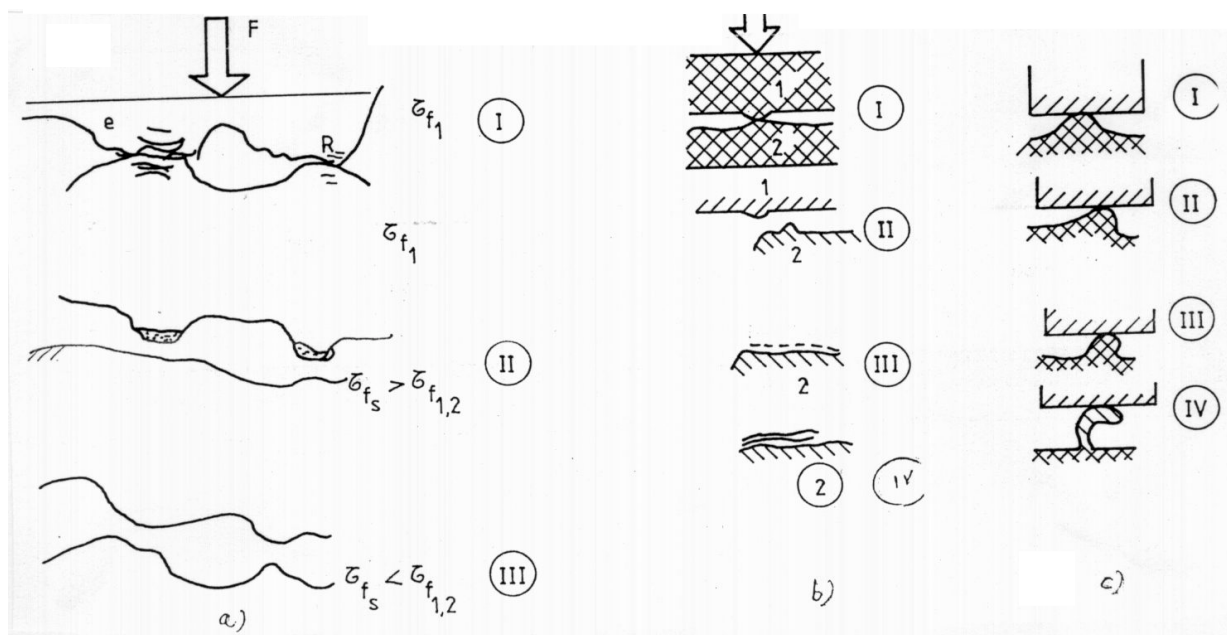


Fig. 9.7 Forme de uzare de adeziune

a - suprafețe metalice (I - formarea microjoncțiunilor; II - smulgerea unei particule; III - forfecarea microjoncțiunilor); **b** - cuplu de polimeri (I-II - adeziunea polimerului; III - transfer ușor, IV - transfer abundent); **c** - cuplu metal-elastomer (I - adeziunea elastomerului; II - deformarea; III - formarea unei joncțiunii "rolă"; IV - deformarea și ruperea "rolei").

Adeziunea moderată este de preferat și se obține prin utilizarea unor aditivi de antigripaj care, fie creează joncțiuni friabile, fie netezesc (corodează) asperitățile. Particulele de uzură sunt mai mici (100\AA).

Un al doilea tip este acela al **adeziunii severe**, când, fie că microjoncțiunile sau punțile de sudură create nu se pot forfeca și cupla se blochează (fig. 9.7 a, cazul I), realizându-se gripajul total, fie $\tau_{fs} > \max(\tau_{f1}, \tau_{f2})$ și se produc smulgeri (fig. 9.7a, cazul II), apărând gripajul incipient sau o suprafață cu ciupituri, urmată de abraziunea datorată particulelor ce se desprind. Acestea sunt în medie de 50 ori mai mare ca la uzura moderată, iar viteza de uzare crește repede, uzarea devenind intensivă. Acest tip de uzare poate să precedă griparea totală sau uzarea distructivă.

În cazul frecării unor polimeri (fig. 9.7,b) evoluează în general o uzare de adeziune normală, deși pot apărea ambele forme principale arătate pentru suprafețe metalice (transfer și microsuduri).

În cazul frecării unor elastomeri cu metale (fig. 9.7,c), se formează prin adeziune, deformare și rupere particule cu forma unor role.

9.2 Elemente de calcul. Evaluare cantitativă

Pentru calculul intensității uzării adezive se acceptă ipoteza lui Kraghelski privind contactul real al suprafețelor și faptul că apariția particulei de uzură are la bază oboseala de frecare, oboseală dependentă de starea și natura tensiunilor din zona de contact.

În aceste ipoteze, volumul de material uzat ΔV este proporțional cu aria reală de contact A_r ,

$$\Delta V = \Delta h A_r \quad (9.1)$$

Δh caracterizând grosimea stratului uzat pentru "punctele" reale de contact ce se găsesc în acest strat. Se apreciază că "punctele" reale de contact au diametrul mediu d_r , astfel că intensitatea specifică de uzare la nivel microgeometric se definește cu raportul

$$i_h = \Delta h / d_r = \Delta V / (A_r d_r) \quad (9.2)$$

Acceptând că "punctele" de contact au aceleași dimensiuni în toate direcțiile, rezultă legătura dintre intensitatea de uzare, liniară, adimensională și intensitatea specifică,

$$I_{uh} = dU_h / dL_f = \frac{\Delta U_h}{\Delta L_f} = \frac{\Delta h \cdot n_r}{d_{r2} \frac{A_n}{d_{r1} d_{r2}}} \approx \frac{\Delta h}{d_r} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{A_r}{A_n} \approx \frac{4}{\pi} \cdot i_h \cdot \frac{A_r}{A_n} \quad (9.3)$$

în care: n_r este numărul "punctelor" de contact; d_{r1} - diametrul "punctului" în direcție perpendiculară pe direcția de alunecare; d_{r2} - diametrul "punctului" pe direcția de alunecare ($d_{r1} \approx d_{r2} = d_r$); A_n - aria nominală de contact.

Calculul intensității de uzare presupune, așa cum se observă din (9.3), cunoașterea intensității specifice i_h și ariei reale A_r , dependente de proprietățile fizico-mecanice ale materialelor suprafețelor de frecare, de condițiile de încărcare și de microgeometria suprafețelor.

Se presupune că în procesul de uzare, intensitatea desprinderii particulelor (Δv_u) este dependentă de numărul ciclurilor de solicitare (n_k),

$$\Delta v_u = \frac{\Delta V_1}{n_1} = \frac{\Delta V_2}{n_2} = \dots = \frac{\Delta V_k}{n_k} = \text{constant} \quad (9.4)$$

$\Delta V_1, \Delta V_2, \dots, \Delta V_k$ fiind volumul materialului uzat ca urmare a solicitării repetate de un număr n_1, n_2, \dots, n_k cicluri.

Se apreciază că volumul de material uzat V_1, V_2, \dots, V_k provine numai din volumul de material solicitat și antrenat și care se găsește în zona de contact.

Se consideră inițial că o suprafață de frecare este perfect plană și deformabilă, iar cea de-a doua are rugozități și este perfect rigidă. Calitatea microgeometriei se apreciază prin caracteristicile curbei de portanță (Abbott-Firstone - parametrii ν, b - și parametrul complex $\Delta = R_{\max} / (rb^{1/\nu})$ (R_{\max} - înălțimea maximă a rugozităților, r - raza de curbură a vârfurilor rugozităților).

Acceptând curba de portanță de forma (3.41) ($\eta_1 = bx^\nu$, $x = \delta / R_{\max}$ și variază de la 0 până la valoarea ϵ , δ fiind deformația suprafeței), volumul deformat (V_d) va avea expresia

$$V_d = \alpha A_c R_{\max}^b \int_0^\epsilon x^\nu dx = \alpha A_c b \epsilon^{\nu+1} R_{\max} / (\nu+1) = \alpha \epsilon R_{\max} A_r / (\nu+1), \quad (9.5)$$

$$V = d \int A_r d\delta = \int_0^\epsilon A_r R_{\max} dx = R_{\max} \alpha \int_0^\epsilon \eta_1 A_c dx = R_{\max} \alpha A_c b \int_0^\epsilon x^\nu dx$$

unde: ε - apropierea suprafețelor sub sarcina exterioară; A_c - aria de contact delimitată de undulații și abateri de formă; α - coeficient ce depinde de forma și de starea de deformație a rugozităților; pentru rugozități sferice și deformații elastice $\alpha = 0,5$ iar pentru deformații plastice $\alpha = 1$.

Diametrul mediu \bar{d}_r al "punctului" de contact se determină considerând rugozitățile cu vârfurile sferice de rază r ,

$$\bar{d}_r^2 / 4 = (\alpha / \nu) \left[r^2 - (r - \varepsilon R_{\max})^2 \right] \approx (\alpha / \nu) 2\varepsilon r R_{\max}$$

și deci
$$\bar{d}_r = 2(2\alpha\varepsilon R_{\max} / \nu)^{1/2} \quad (9.6)$$

Observații

$$\text{- Din } \varphi(x) = \frac{n_r}{n_c} = cx^\chi \Rightarrow n_r = n_c cx^\chi \Rightarrow dn_r = cn_c x^{\chi-1} dx$$

$$\text{- } A_s^0 = \pi a^2 = \pi \left[r^2 - (r - \delta)^2 \right] = 2\pi r \delta = 2\pi r (\varepsilon R_{\max} - x R_{\max})$$

În stratul dx se găsesc dn_r rugozități fiecare d_s arie $A_s^0 \Rightarrow$
 $\Rightarrow dA_s = 2\pi r R_{\max} n_c \chi (\varepsilon - x) x^{\chi-1} dx$ și

$$A_s = 2\pi r R_{\max} n_c \chi \int_0^\varepsilon (\varepsilon - x) x^{\chi-1} dx = 2\pi r R_{\max} n_c \chi \frac{\varepsilon^{\chi+1}}{x(x+1)}$$

$$\text{dar } t_p = \frac{A_\Delta}{A_c} = b \cdot \varepsilon^\nu \Rightarrow A_c b \varepsilon^\nu = 2\pi r R_{\max} n_c x \cdot \frac{\varepsilon}{x(x+1)}$$

$$\Rightarrow \nu = \chi + 1 \quad \text{și} \quad Cn_c = \frac{A_c b \nu}{2\pi r R_{\max}}$$

$$\Rightarrow n_r = \varphi(x) n_c = Cn_c x^{\nu-1} = \frac{A_c b \nu}{2\pi r R_{\max}} \varepsilon^{\nu-1}$$

$$\text{dar } \eta = \frac{A_r}{A_c} = \frac{p_n}{p_r} = \frac{p_n}{c\sigma_c} \quad \text{și} \quad \eta = \frac{1}{2} b \varepsilon \quad \text{pentru contact elastic} \Rightarrow \varepsilon = \left(\frac{2p_n}{c\sigma_c b} \right)^{1/\nu} = \left(\frac{2A_r}{A_c \cdot b} \right)^{1/\nu}$$

$$\text{și} \quad n_r = \frac{A_c b \nu}{2\pi r R_{\max}} \cdot \frac{\varepsilon^\nu}{\varepsilon} = \frac{A_c b \nu}{2\pi r R_{\max}} \cdot \left(\frac{2A_r}{A_c b} \right) \frac{1}{\varepsilon}$$

$$\text{și} \quad \Delta \bar{A}_r = \frac{A_r}{n_r} = \frac{A_r \varepsilon}{A_c b \nu \cdot \frac{2A_r}{A_c b}} \cdot 2\pi r R_{\max} = \frac{\pi r R_{\max} \varepsilon}{\nu}$$

$$\text{și} \quad \Delta \bar{A}_r = \frac{\pi d_r^2}{\nu} \Rightarrow \frac{d_r^2}{\nu} = \frac{r R_{\max} \varepsilon}{\nu} = \frac{r R_{\max}}{\nu} \cdot \frac{\delta}{R_{\max}} = \frac{r}{\nu} \delta$$

$$\text{Pentru rugozități de formă oarecare } \frac{d_r^2}{\nu} = \alpha \frac{2r R_{\max} \varepsilon}{\nu}$$

α - dependent de formă și starea de deformație

$$a^2 = r^2 - (r - \delta) = 2r\delta \quad a^2 = 2r\delta$$

a) Cazul deformațiilor elastice

Corespunzător teoriei fisurilor cauzate de oboseală, particula de uzură apare ca urmare a deformării repetate a volumului de material de pe suprafața perfect plană de către rugozitățile rigide ale celeilalte suprafețe. Pe baza acestei teorii se deduce volumul de material uzat (ΔV)

$$\Delta V = V_d / n \quad (9.7)$$

n fiind numărul ciclurilor de deformare locală a suprafeței și care conduc la uzarea unui volum ΔV . Pentru aprecierea numărului n se consideră că desprinderea unei particule de uzură are la bază fenomenul de oboseală, determinat de tensiunea tangențială de frecare τ_f . Curba de oboseală este de tip Wöhler, astfel că:

$$n_1 \tau_{f1}^t = n_2 \tau_{f2}^t = \dots = n \tau_f^t = \text{constant} \quad (9.8)$$

t fiind coeficientul caracteristic fiecărui material (tabelul 9.3). Acest coeficient se determină pentru tensiuni normale de tracțiune

$$n_1 \sigma_{t1}^t = n_2 \sigma_{t2}^t = \dots = n \sigma_t^t = 1 \cdot \sigma_0^t \quad (9.9)$$

ruperea având loc după n_1, n_2, \dots, n cicluri corespunzător tensiunilor normale $\sigma_{t1}, \sigma_{t2}, \dots, \sigma_t$ sau după un singur ciclu de solicitare când tensiunea normală este chiar tensiunea de rupere la tracțiune a materialului respectiv (σ_0), caracteristică fiecărui material.

Deoarece în volumul de material deformat acționează tensiuni normale (presiunea reală de contact, p_r) și tangențiale (tensiunea de frecare, τ_f), este necesar să se ia în considerație o tensiune echivalentă, determinată pe baza unei teorii de rezistență (ipoteze de rupere), astfel că

$$n = [\sigma_0 / (k \tau_f)]^t = [\sigma_0 / (k \mu p_r)]^t \quad (9.10)$$

μ fiind componenta moleculară a coeficientului de frecare, iar constanta k depinde de teoria de rezistență (ipoteza de rupere):

- $k = 3$, pentru ipoteza tensiunii normale maxime sau a tensiunii tangențiale maxime;
- $k = 3\sqrt{1 + \nu_p^2} - \nu_p$, pentru ipoteza energiei de variație a formei, ν_p fiind coeficientul lui Poisson;
- $k = 3\sqrt{1 - \nu_p^2}$, pentru ipoteza energiei potențiale;
- $k = 3(1 - \nu_p^2)$, pentru ipoteza deformației specifice maxime.

Presiunea reală de contact se determină cu relația

$$p_r = (4/3\pi\theta)\sqrt{h/r}$$

θ fiind parametrul de elasticitate al materialului suprafeței considerată perfect netedă, dar deformabilă $\theta = (1 - \nu_p^2)/E$, E - modulul de elasticitate longitudinal, h - deformația sub sarcina exterioară și r - raza de curbură a vârfurilor rugozităților.

Înlocuind presiunea reală în (9.9), rezultă numărul ciclurilor, după care apare particula de uzură, atunci când regimul de încărcare este staționar:

$$n = \left[(3\pi\sigma_0\theta / 4k\mu) \sqrt{r/h} \right]^t \quad (9.11)$$

În procesul de alunecare a suprafeței cu rugozități rigide pe suprafața perfect plană, deformabilă, apare un regim nestaționar, ca urmare a existenței unor rugozități cu înălțimi diferite. Se consideră ipoteza deteriorării liniare cumulate, potrivit căreia apariția particulei de uzură nu depinde de starea inițială și de "istoria" solicitării, ci de starea de tensiuni ce corespunde momentului respectiv, astfel că

$$\int_0^{n_c} \frac{dn_i}{n(\sigma_i)} = 1 \quad (9.12)$$

unde $n(\sigma_i)$ reprezintă numărul ciclurilor la care apare particula de uzură, materialul fiind supus tensiunii σ_i ; n_c - numărul ciclurilor la care apare particula în regim nestaționar.

Tabelul 9.3

Valorile exponentului t , deformației relative de rupere ε_0 și a tensiunii σ_0

Material	Deformații elastice		Deformații plastice	
	σ_0 MPa	t	ε_0	t
Cupru	-	-	0,39	2,0
Aluminiu	-	-	0,34	2,0
Fier	-	-	0,32	2,0
Zinc	-	-	0,17	2,0
OLC 45	700	7,90	0,095	1,3
OLC 55	700	10 - 11	0,095	1,3
40 C 10	3200	3 - 4	0,14	1,3
Fontă	647	4,15	-	-
Cauciuc (E = 2,16 MPa)	207	3	-	-
Cauciuc (E = 2,75 MPa)	143	3,4	-	-
Cauciuc (E = 3,19 MPa)	834	3,6	-	-
Cauciuc pentru anvelope	157	3,4	-	-
Cauciuc pentru garnituri	21	4,85	-	-
Poliformaldehidă	144	1,30	-	-
PTFE-4	67	5,00	0,80	5,0
Poliamidă	177	2,00	-	-
Caprolam	618	2,60	2,07	2,34

Acceptând $n_i = \phi(\sigma_i)n_c$, $\phi(\sigma_i)$ fiind probabilitatea ca o tensiune oarecare de funcționare $\sigma_x < \sigma_i$, rezultă

$$dn_i = n_c \phi'(\sigma_i)d\sigma_i,$$

iar (9.11) devine

$$\int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \frac{\phi'(\sigma_i)d\sigma_i}{(\sigma_0/\sigma_i)} = 1 \quad (9.13)$$

Funcția $\phi(\sigma_i)$ se apreciază ca fiind funcția de dispunere în înălțime a rugozităților,

$$\phi(x) = (x/\varepsilon)^{\nu-1} \quad \text{și}$$

$$\phi'(\sigma_i)d\sigma_i = \frac{\nu-1}{\varepsilon^{\nu-1}} x^{\nu-2} dx$$

Înlocuind în (9.13), rezultă

$$n_c = n_\varepsilon k_{t,\nu}, \quad (9.14)$$

unde

$$n_\varepsilon = \left(\frac{3\pi\theta\sigma_0}{4k\mu} \sqrt{\frac{r}{\varepsilon R_{\max}}} \right)^t; \quad k_{t,\nu} = \frac{\Gamma(\nu+t/2)}{\Gamma(\nu)\Gamma(1+t/2)}.$$

Deformația relativă ε se determină, așa cum s-a arătat în capitolul 3, pe baza forței exterioare și a caracteristicilor de material și geometrice ale microgeometriei

$$\varepsilon = \left\{ \frac{2\sqrt{\pi r} p_c \left(\frac{r}{b^2 R_{\max}} \right)^{1/2}}{k_v} \right\}^{2/(2\nu+1)},$$

unde $k_v = \Gamma(\nu+1)/\Gamma(\nu+3/2)$, p_c - presiunea aparentă de contact și care, în lipsa undulațiilor și abaterilor de formă, este egală cu presiunea nominală.

Înlocuind (9.14) și (9.5) în (9.7), iar apoi (9.7) și (9.6) în (9.2), se deduce intensitatea specifică de uzare i_h și intensitatea de uzare, liniară, adimensională I_{uh} :

$$I_{uh} = C \left(\frac{p_n \theta}{k'_v} \right)^{1+\beta t} \cdot \Delta^{t(1-\beta)/2} \left(\frac{k_{fe}}{\sigma_0 \theta} \right) \cdot \eta_c^{-\beta t}, \quad (9.15)$$

$$\text{unde} \quad \Delta = R_{\max} / (rb^{1/\nu}); \quad C = \frac{\nu^{1/2} \Gamma(\nu) \Gamma(1+t/2)}{4(\nu+1) \Gamma(\nu+t/2)},$$

$$k'_v = (k_v) / (2\sqrt{\pi}); \quad \beta = 1/(2\nu+1); \quad K_{fe} = 4k\mu/(3\pi);$$

$\eta_c = A_c/A_n$, A_c - aria aparentă de contact delimitată de undulații și abateri de formă, A_n - aria nominală.

Se precizează din nou că intensitatea de uzare (9.15) este intensitatea elementului cuplei considerat fără rugozități, materialul acestui element este caracterizat prin parametrii θ , σ_0 , t , n și care se găsește în contact cu o suprafață cu rugozități rigide, caracterizate prin parametrii R_{\max} , r , b , ν . De exemplu, I_{uh} este intensitatea de uzare a buzei unei manșete de etanșare din cauciuc cu arborele din oțel al unei transmisii mecanice. cercetările experimentale au dovedit că se uzează, de fapt, ambele suprafețe, astfel că pentru suprafața rugoasă

$$I'_{uh} = I_{uh} \alpha_e^{t(1+\beta)/2}, \quad (9.16)$$

unde $\alpha_e = \theta_2 / (\theta_1 + \theta_2)$, θ_1, θ_2 fiind parametrii de elasticitate ai suprafeței ideale cu modul de elasticitate mic și suprafeței rugoase cu modul de elasticitate mare.

În cazul în care ambele suprafețe prezintă rugozități și proprietățile mecanice sunt apropiate, se determină o rugozitate "echivalentă", caracterizată prin :

$$R_{\max} = R_{\max 1} + R_{\max 2};$$

$$v = v_1 + v_2; \quad b = \frac{k_{v1,2} b_1 b_2 (R_{\max 1} + R_{\max 2})^{v_1+v_2}}{R_{\max 1}^{v_1} R_{\max 2}^{v_2}},$$

$$k_{v1,2} = \frac{\Gamma(v_1+1)\Gamma(v_2+1)}{\Gamma(v_1+v_2+1)}; \quad r = r_1 r_2 / (r_1 + r_2), \text{ așa cum s-a arătat în capitolul 3.}$$

Apoi se aplică relația (9.15) pentru fiecare suprafață, considerând proprietățile mecanice specifice ale materialelor respective (σ_0 , θ , t , k).

b) Cazul deformațiilor plastice

În cazul existenței deformațiilor plastice, particulele de uzură apar după un număr (n) redus de cicluri de oboseală,

$$n = (e_0 / e)^t \quad (9.17)$$

în care e_0 este deformația relativă la ruperea prin întindere, pentru un singur ciclu (tabelul 9.2);

e - deformația relativă plastică; t - coeficient caracteristic curbei de oboseală și are valori cuprinse între 2 și 3 (tabelul 9.2).

Corelația deformației zonei de contact cu proprietățile mecanice, geometrice și de frecare se face pe baza plasticității, astfel că (9.17) devine:

$$n = K_{iv} \left(\frac{r e_0}{d_r} \sqrt{\frac{\sigma_c - 2\mu HB}{\sigma_c + 2\mu HB}} \right)^2, \quad (9.18)$$

în care $K_{iv} = \frac{\Gamma(v+t/2)}{\Gamma(v)\Gamma(1+t/2)}$; v - parametrul curbei de portanță; \bar{d}_r - diametrul mediu al

"punctului" de contact (9.6); r - raza de curbură a vârfurilor rugozităților; σ_c - tensiunea de curgere a materialului; HB - duritatea suprafeței de frecare (în unități Brinell); μ - coeficientul de frecare.

Înlocuind expresia (9.18) în (9.7) și apoi în (9.2) și (9.3), se deduce intensitatea de uzare liniară, adimensională în regim plastic de deformare a rugozităților:

$$I_{uh} = \sqrt{2}C \left(\frac{P_n}{HB} \right)^{(1+\beta t)/(1-\beta t)} \Delta^{(1+t)/2} (k_{fp}/e_0)^t \eta_c^{-(1+\beta t)/(1-\beta t)} \quad (9.19)$$

în care C , β , Δ , η_c au semnificațiile din (9.15), iar:

$$k_{fp} = \left[(1 - 2\mu HB/\sigma_c) / (1 + 2\mu HB/\sigma_c) \right]^{1/2}.$$

Analiza dependenței intensității de uzare (9.15) sau (9.19) de principalii parametri de exploatare (presiunea nominală de contact p_n , coeficientul de frecare μ), precum și de caracteristicile microgeometriei (v , b , r , R_{max}) și materialului (θ , σ_0 , t sau HB , e_0) permite luarea măsurilor tehnice, tehnologice și de exploatare pentru a oferi cuplei de frecare respective o intensitatea de uzare minimă și, deci, o durabilitate maximă.

Uzarea de adeziune, așa cum se observă și din (9.15) sau (9.19), este dependentă de coeficientul de frecare, astfel că orice măsură de reducere a coeficientului de frecare este utilă pentru creșterea durabilității.

9.3 Posibilități și căi de reducere a uzării adezive

Uzarea prin adeziune este dependentă atât de caracteristicile materialelor și microgeometriei suprafețelor de frecare, cât și de condițiile de exploatare. Aceste dependențe indică și posibilitățile de reducere a intensității de uzare și anume: alegerea materialelor din punctul de vedere al proprietăților de rezistență și elasticitate, adoptarea unor măsuri de reducere a coeficientului de frecare, alegerea și respectarea anumitor caracteristici ale microgeometriei suprafețelor și stabilirea unei geometrii de frecare care, în corelație cu sarcina exterioară, trebuie să asigure o anumită presiune de contact.

a) Influența proprietăților de rezistență și elasticitate ale materialelor asupra intensității de uzare poate fi analizată pe baza expresiilor (9.15) și (9.19).

Pentru contactul elastic, intensitatea de uzare este proporțională cu factorul

$$I_{uh} \approx \theta^{1+\beta t-t} \sigma_0^{-t} \quad \text{sau} \quad I_{uh} \approx E^{t-1-\beta t} \sigma_0^{-t} = E^{-1-\beta t} \epsilon_0^{-t},$$

E fiind modulul de elasticitate longitudinal al materialului care se uzează și ϵ_0 - deformația relativă de rupere. Pentru calități obișnuite ale microgeometriei, $\beta < 1$, intensitatea de uzare scade cu creșterea modulului de elasticitate (E) și deformației relative de rupere. Însă, creșterea semnificativă a modulului de elasticitate atrage după sine creșterea intensității de uzare a contrapiesei (relația (9.16)).

De aceea, pentru cuplele de frecare tehnologice de prelucrare, în special a maselor plastice, se recomandă ca materialul utilajului să aibă modulul de elasticitate semnificativ mai ridicat decât al materialului prelucrat (extruderea maselor plastice, amestecarea diferitelor produse chimice, alimentare etc.).

Pentru uzarea adezivă, materialele suprafețelor de frecare trebuie să fie materiale tenace, să aibă deformația relativă de rupere ϵ_0 cât mai ridicată și modulul de elasticitate mare.

Pentru contactul plastic, intensitatea de uzare este proporțională cu factorul

$$HB^{(1+\beta t)/(\beta-1)} \left[(1 - 2\mu HB/\sigma_c) / (1 + 2\mu HB/\sigma_c) \right]^{t/2}.$$

Analiza acestei dependențe a intensității de uzare de raportul durtății și tensiunii de curgere arată o scădere a intensității cu creșterea raportului HB/σ_c , scădere care este cu atât mai pronunțată cu cât durtatea este mai mare. Influența semnificativă a durtății suprafeței asupra intensității de uzare a fost conformată experimental de multe cercetări, fapt pentru care măsurile tehnologice de durificare a suprafețelor sunt esențiale pentru creșterea durabilității.

b) Influența proprietăților de frecare ale materialelor asupra intensității de uzare dovedește că valoarea exponentului t din expresiile (9.15) și (9.16) are o pondere foarte mare, mai ales pentru materialele cu panta ridicată a dependenței tensiunii de oboseală de numărul ciclurilor de solicitare (panta curbei Wohler). Pentru contactul elastic, respectiv plastic, intensitatea de uzare este proporțională cu factorul

$$I_{uh} \approx \mu^t,$$

$$I_{uh} \approx \left(\frac{1 - 2\mu HB/\sigma_c}{1 + 2\mu HB/\sigma_c} \right)^{t/2}.$$

În cazul contactului elastic, o reducere a coeficientului de frecare numai de câteva ori atrage după sine o reducere a intensității de uzare a oțelurilor, de exemplu, de sute și mii de ori, exponentul t având valori ridicate (7...12). Această observație teoretică este confirmată integral de rezultatele experimentale, mai ales atunci când în procesul de frecare și uzare nu au loc schimbări esențiale ale caracteristicilor mecanice ale materialelor.

Pentru cazul contactului plastic, reducerea coeficientului de frecare are pondere mai mică asupra reducerii intensității de uzare decât în cazul contactului elastic. Reducerea coeficientului de frecare, μ , și creșterea raportului HB/σ_c conduc la reduceri substanțiale ale intensității de uzare.

c) Influența presiunii de contact asupra intensității de uzare constituie unul dintre parametrii importanți de care trebuie să se țină seama la proiectarea geometriei cuplelor de frecare în strânsă corelație cu materialul și calitatea suprafeței.

Pentru condițiile apariției deformațiilor elastice, intensitatea de uzare este proporțională cu presiunea nominală de contact,

$$I_{uh} \approx p_n^{1+\beta t}.$$

Pentru metale, valorile ridicate ale parametrului de oboseală t conduc la creșteri importante ale intensității de uzare cu creșterea presiunii nominale de contact. Prin tratamente termice și termochimice se pot obține proprietăți superioare la oboseală ale suprafețelor de frecare, rezultând valori reduse ale parametrului t . Totodată, prin depunerea unor straturi subțiri de materiale antifricțiune pe suport mai dur se obțin reduceri semnificative ale intensității de uzare. Având în vedere că și coeficientul de frecare depinde de presiunea nominală de contact, mai ales pentru regimul de frecare uscat și limită, se deduce că intensitatea de uzare, pentru regimul deformațiilor elastice, scade puțin cu creșterea presiunii nominale, însă crește foarte repede cu creșterea forței de frecare. Pentru regimul fluid de ungere, coeficientul de frecare se modifică foarte puțin cu presiunea nominală, presiuni care au valori reduse, astfel că intensitatea de uzare este foarte redusă în comparație cu regimul de frecare uscat.

În condițiile în care deformațiile locale sunt plastice, intensitatea de uzare este proporțională cu presiunea nominală de contact,

$$I_{uh} \approx p_n^{(1+\beta t)/(1-\beta)},$$

dependența fiind mult mai semnificativă decât în cazul deformațiilor elastice.

Metodele de ecrisare a suprafețelor de frecare conduc la scăderi ale intensității de uzare în condițiile aceleiași presiuni de contact.