

## UZAREA DE OBOSEALĂ A SUPRAFEȚELOR ORGANELOR DE MAȘINI DURIFICATE CU ACOPERIRI ELECTROLITICE CU PROPRIETĂȚI DE AUTOLUBRIFIERE ÎN BAZA CAPROLACTAMEI

*Stoicev P., Ceban AL, Moraru V., Nistiriuc I., Radu R., Bunescu M.*

*Universitatea Tehnică a Moldovei*

Este cunoscut că tribologia se ocupă nu numai cu interacțiunea suprafețelor aflate în mișcare relativă dar și cu studiul fenomenelor fizice, mecanice, metalurgice și chimice ce au loc pe ele datorită interacțiunilor elementelor în mișcarea lor relativă [1].

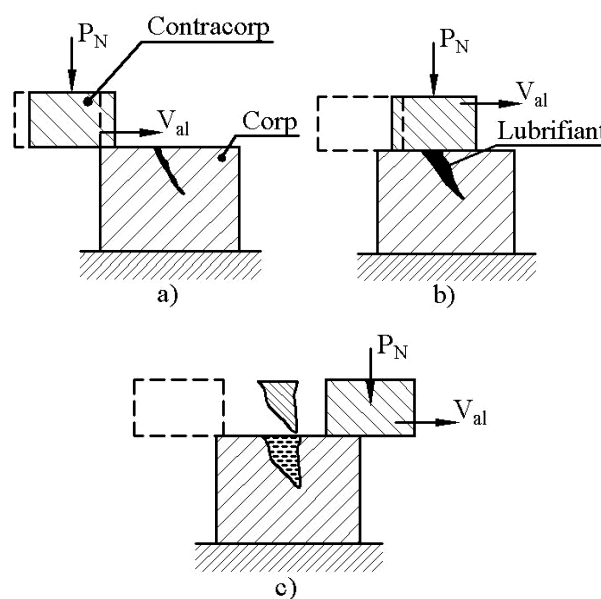
Conform cercetărilor efectuate s-a constatat că în contactele sistemelor tribologice ale mașinilor și mecanismelor contemporane cea mai răspândită este uzarea de oboseală a straturilor superficiale ale pieselor în mișcare [2, 3].

Uzarea de oboseală a stratului superficial apare ca urmare a solicitărilor ciclice asupra lui, apariției deformațiilor plastice și ale fisurilor. Însă uzarea de oboseală în stare ideală nu poate avea loc, deoarece ea este însoțită, ca de obicei, de uzarea de adeziune, coroziune, abraziune și alte forme ale ei.

E de menționat faptul că uzarea de oboseală cel mai des se manifestă prin ciupituri (pitting) și cojire (peeling). După natura sa uzarea de oboseală a materialului stratului superficial este foarte apropiată de procesul „fretting”, la care intensitatea de uzare se determină de viteza de acumulare (concentrare) a defectelor, care conduc la deteriorarea locală a materialului în limitele unei unități volumice nominale ale lui pe o unitate de lungime a suprafeței de frecare [4].

Pentru tribosistemele cu contact hertzian (cum ar fi cazul angrenajelor, camelor, rulmenților, bandajelor etc.) pittingul (uzura de ciupire) constituie un tip specific de uzare la oboseală. Apariția acestui tip se explică prin oboseala stratului superficial și apariția fisurilor în care pătrunde lubrifianțul utilizat (fig.1,a). La trecerea contracorpului în lubrifianțul pătruns în fisură se creează presiuni mari care conduc la dezvoltarea ei de mai departe fisura (fig. 1, b). Întâlnirea a câtorva fisuri conduce la desprinderea materialului (de dimensiuni foarte mici) de pe suprafața pieselor (fig. 1, c) și care, dacă nu se iau măsurile corespunzătoare, poate să progreseze ducând la exfoliere [5]. S-a constatat experimental [5] că acest fenomen apare, în special, la oțelurile netratate și îmbunătățite ( $HB \leq 3550$  MPa). Pentru micșorarea riscului de apariție a acestui fenomen se recomandă de a durifica

suprafețele din contact, sau de a utiliza lubrifianți cu vâscozitate mare [5].



**Figura 1.** Modelul fizic de formare a fisurii (a, b) și desprinderea de material (c)

Actualmente, peste 80 % de piese pentru automobile și tractoare se rebutează la uzarea lor de până la 0,2...0,3, totodată peste 60 % dintre ele se referă la piesele de tipul arborilor, axelor și altora de tip cilindru. Cele mai perspective procedee de recondiționare și durificare a organelor de mașini uzate se consideră acelea, care permit de a se obține piesele sub formă mai bine pregătită pentru prelucrarea lor ulterioară. Din acest motiv în industria constructoare de mașini, inclusiv și în cea de reparații, o largă utilizare și-au găsit acoperirile electrolitice rezistente la uzură, care permit de a recondiționa concomitent un număr mare de piese cu structurile și proprietățile necesare ale straturilor superficiale, evitând nemijlocit influența termică asupra metalului de bază și să se obțină adaosuri minime pentru prelucrarea mecanică a pieselor recondiționate [6, 7, 8, 9, ș.a.].

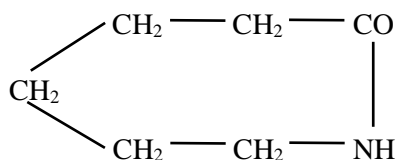
După cum se cunoaște [10], ori care n-ar fi procedeele de îmbunătățire a proprietăților de antifricțiune și antigripare ale suprafețelor

reconstrucționate practic, este imposibilă excluderea contactării lor mai cu seamă în perioada inițială de funcționare (la demarare) și în perioada finală de funcționare la (oprire). Din acest motiv, pentru a reduce la minimum pericolul de aderență a suprafețelor la contactări forțate se tinde de a alege materiale compatibile în funcționare, includerea în lubrifianți a unor componenți activi care pot forma pelicule absorbante și chemosorbante de protecție a suprafețelor în frecare ale tribosistemului.

Este de notorietate publică că prevederea principală, impusă tuturor materialelor de antifricțiune, este asigurarea valorii minime a coeficientului de frecare și rezistenței înalte la uzură. La general, acestor cerințe le corespund materialele compozite cu proprietăți de autolubrifiere [11] cărora li se impune o cerință suplimentară: aptitudinea de formare pe suprafețele de frecare a unor pelicule continue cu proprietăți înalte de lubrifiere și de adeziune față de suprafețele de frecare.

Despre perspectiva utilizării materialelor cu proprietăți de autolubrifiere la soluționarea unor probleme constructive (cuple de frecare) și tehnologice noi, se atrage atenția și în lucrările acad. I.V.Kragelski și colaboratorii săi [12]. Instalarea elementelor constructive cu proprietăți de autolubrifiere (sub formă de piese intermediare), a permis să se realizeze un proces de lubrifiere local, să se ușureze cu mult construcția în cauză, datorită excluderii sistemului de alimentare cu lubrifianți lichid și să se renunțe la utilizarea materialelor deficitare, precum și să se soluționeze un șir de probleme constructive netradiționale [12].

În rezultatul cercetărilor științifice efectuate anterior [9, 13, 14] au fost obținute acoperiri electrolitice de fier-nichel cu proprietăți de autolubrifiere în baza caprolactamei [14], a cărei formulă structurală este prezentată pe figura 2.



**Figura 2.** Formula structurală a caprolactamei

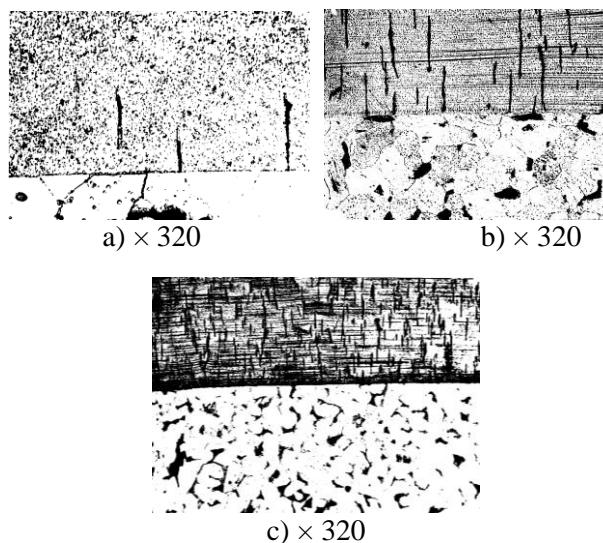
Cercetările efectuate anterior [9, 13] au demonstrat, că includerea caprolactamei în acoperirile electrolitice de Fe-Ni a permis de a îmbunătăți esențial rezistența la uzură și proprietățile antifricționale ale acoperirilor (mai cu seamă în condițiile frecării „uscate”) datorită proprietăților tixotropice ale ei. Însă electrolitul

elaborat [14] conține sulfat de nichel, și este relativ compus (policomponențial), ceea ce conduce la cheltuieli suplimentare pentru menținerea coraportului componențial al sărurilor corespunzătoare din el ( $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ –400...450 g/l,  $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  – 35...40 g/l,  $\text{Na}_2\text{C}_4\text{H}_4 \cdot \text{O}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ –2...3 g/l,  $\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NO}$ –3...5 g/l, hidroxilamin–0,3...0,5 g/l și HCL – 1 g/l).

Din acest motiv autorii lucrării [15] au elaborat un nou electrolit, analogic celui de Fe-Ni [14], care nu conține sulfat de nichel (care-i deficitar și scump) și hidroxilamină, de următoarea componență, g/l:

|   |           |                   |
|---|-----------|-------------------|
| $\text{Fe}_2\text{Cl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ .....                    | 450...500 | (clorură de fier) |
| $\text{Na}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ..... | 2...5     | (sare de sodiu)   |
| $\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NO}$ .....                                    | 3...5     | (caprolactamă)    |
| HCl.....  | 1,0       | (acid clorhidric) |

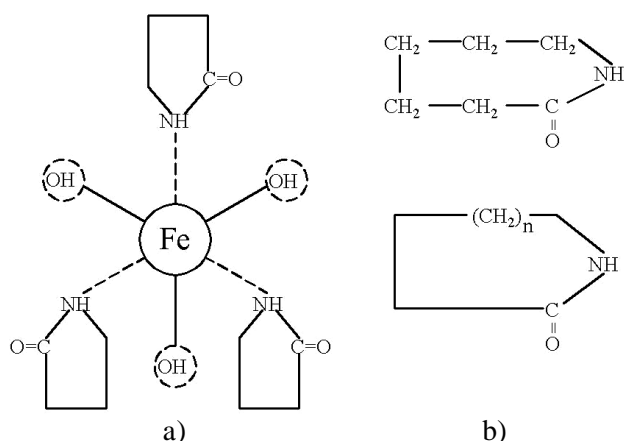
Cercetările efectuate au demonstrat că acoperirile de fier, obținute din electrolitul menționat mai sus ( $j_c = 20 \text{ A/dm}^2$ ,  $\text{pH} = 0,8$  și  $T = 313 \text{ K}$ ), posedă de o structură stratificată și destul de bine fisurată în secțiunea transversală (fig. 3). În lipsa caprolactamei (fig. 3, a) acoperirilor de fier sunt stratificate și posedă de un număr minimal de



**Figura 3.** Microstructura acoperirilor de fier pentru concentrația caprolactamei în electrolit; g/l: a – 0; b – 5 și c – 20.

microfisuri, amplasate foarte rar și sunt lungi, iar unele dintre ele străpung zona de trecere (metal de bază – acoperire) ajungând până la suprafața de bază. Adăugarea caprolactamei de până la 20 g/l în electrolit a provocat sporirea densității fisurilor în depuneri (fig. 3 b, c), iar dimensiunile lor longitudinale s-au micșorat de 5-6 ori (fig. 3, c).

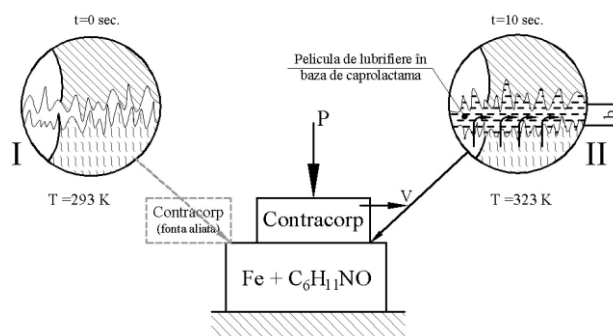
Luând în considerație rezultatele obținute în lucrările [9, 13,14] se poate presupune că caprolactama, sub acțiunea temperaturii de frecare, se va termodestructa și datorită proprietăților tixotropice ale ei va trece într-o fază semilichidă și va ieși pe suprafețele de frecare a cuplului, unde întotdeauna vor fi prezenți hidroxizii metalelor în contactare (în cazul nostru  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ). Specific pentru topitura de caprolactamă este faptul că ea intră în reacție cu hidroxidul de fier [16] și, probabil că va forma o fază nouă – un sistem coloidal (fig. 4), a cărei structură prezintă o rezistență scăzută la deplasarea reciprocă a suprafețelor de frecare. Această circumstanță a fost confirmată de analiza spectrală în infraroșu [16], care a demonstrat că benzile  $\text{Y}_{(\text{NH})}$  dispar, iar  $\text{Y}_{(\text{C}=\text{O})}$  se deplasează în zona frecvențelor joase, ceea ce ilustrează în mod evident interacțiunea hidroxidului de fier cu caprolactama. Mai mult decât atât, este cunoscut [16], că caprolactama este și o substanță superficial activă, iar proprietățile ei (ca și a hidroxidului de fier) contribuie la chemosorbție. Catena nepolară de hidrocarbură a caprolactamei



**Figura 4.** Structura de coordonare a hidroxidului de fier cu caprolactama (a) și formula de structură a acesteia din urmă (b)

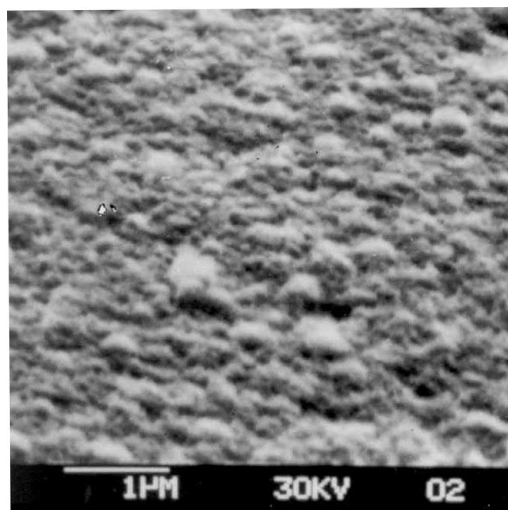
are predispoziție scăzută spre interacțiune moleculară. Din acest motiv moleculele de caprolactamă se vor concentra pe suprafețele de separație a fazelor și, probabil se vor orienta cu grupele lor amidice spre hidroxidul de fier cu radicali carbonici în aer, formând în felul acesta o „șubă”. Particulele cu dispersie fină ale produselor de uzură, învăluite în „șube” de molecule de caprolactamă (vezi fig. 4, a) vor umple spațiul dintre microasperitățile suprafețelor de frecare și vor crea o peliculă de lubrifiere (fig. 5), ceea ce va conduce la o reducere considerabilă a uzării acoperirilor de fier și valorilor coeficienților de

frecare. În baza acestei premise a fost elaborat modelul fizic de autolubrifiere a contactului cu acoperiri de fier în baza caprolactamei (fig. 5).



**Figura 5.** Modelul fizic de autolubrifiere a contactului de fricțiune „acoperiri de fier-fontă aliată”.

Particulele coloidale ale hidroxidului de fier, care absorb caprolactama, formează niște incluziuni sferice de rostogolire (fig. 6) amenajate în unul sau mai multe rânduri între suprafețele de frecare. Dimensiunile acestor particule se pot schimba la intrare și ieșire din zona de frecare, iar în afara ei, datorită agregării lor, așa particule pot fi cu mult mi mari, decât a celor din zona de frecare.



**Figura 6.** Incluziuni sferice pe suprafața de frecare ale acoperirilor de fier

Acoperirile electrolitice de fier cu conținut de caprolactamă sunt cu o structură inițial fisurată, iar aceasta din urmă reprezintă o sursă de concentratori de tensiuni în procesul de frecare superficială. Distribuția tensiunilor de contact și ale celor tangențiale sporesc tendința de alunecare a cristalelor și ca urmare – a reorientării acestora.

Gradientul de temperatură locală de pe suprafețele de frecare (care-i îndreptat în adâncimea

materialelor de contactare) poate influența esențial orientarea structurilor. Dacă această temperatură depășește temperatura de recristalizare a materialelor în frecare, atunci structura lor se poate reface și reorganiza.

Se cunoaște că rezistența la oboseală superficială depinde de mulți factori [2,4,5,7,10], cum ar fi: orientarea rețelei cristaline în raport cu direcția de solicitare, structura superficială, tratamente termo-chimice sau mecanice, de acoperirile depuse, condițiile de lucru și mediu, factorii chimici ai mediului și lubrifiantului.

Până la o anumită limită a încercărilor sub efectul solicitărilor exterioare, suprafețele se deformează elastic [2, 5], iar când această limită este depășită apar deformații plastice însoțite de deformații remanente cu alunecări și ruperi ale rețelelor cristaline și, ca urmare, în aceste zone apar microfisuri. Însă aceste microfisuri pot apărea și la încărcări inferioare deformațiilor plastice, datorate unor factori interni (cum ar fi [5]: incluziuni, goluri sau structuri neomogene, cu cristale dure într-o matrice metalică moale), sau unor factori externi, de pildă formarea pieselor cu concentratori inițiali. Către acestea din urmă se pot atașa și acoperirile electrolitice de fier în care fisurile sunt formate în procesul de depunere a lor pe suprafețele de frecare.

Dacă pentru piesele masive trebuie luate o serie de măsuri constructive (inele, canale, orificii sau dispozitive de ungere) pentru a asigura condițiile de funcționare optimă [2, 5], la piesele recondiționate și durificate cu acoperiri electrolitice de fier cu conținut de caprolactamă nu este nevoie de astfel de măsuri, deoarece datorită fisurilor superficiale deschise (obținute în procesul de depunere), distribuite destul de omogen în acoperiri, ele se umplu cu lubrifiantul termogenerat în baza caprolactamei și formează o peliculă cu capacitate portantă destul de înaltă (vezi fig. 5). Așadar într-un astfel de cuplu de frecare are loc autoorganizarea tribosistemului cu proprietăți de autolubrifiere.

Descrierea fenomenologică a rezistenței la uzarea de oboseală a stratului superficial al pieselor restabilite cu acoperiri electrolitice de fier (cu conținut de caprolactamă) poate fi bazată pe includerea unei mărimi de deteriorare  $D$  [17], care reprezintă o funcție în timp egală cu zero – pentru starea inițială a materialului stratului superficial al pieselor din tribosistem și, egală cu unu – pentru starea de deteriorare completă a lui. Conform acestei ipoteze, deteriorarea materialului din stratul superficial al piesei la uzarea de oboseală va avea loc atunci când:

$$\int_{n_d} \frac{dn_i}{n(\sigma_i)} = 1 \quad (1)$$

unde:  $n_d$  este numărul de cicluri de solicitare până la deteriorare în regim de solicitări nestaționare;

$n(\sigma_i)$  - numărul de cicluri până la deteriorare în regim omogen (continuu) de încercare (solitare) cu amplitudinea de solicitare  $\sigma_i$ ;

$dn_i$  - numărul de acționări cu valorile amplitudice a tensiunilor cuprinse în intervalul de la  $\sigma_i$  până la  $\sigma_i + d\sigma_i$ .

În calitate de caracteristică a regimurilor nestaționare de solicitare a materialului superficial al tribosistemului, ca de obicei se ia funcția de distribuție a tensiunilor, calculate după relația [2, 17]:

$$\varnothing(\sigma) = P\{\sigma_x < \sigma_i\} = \frac{n_i}{n_c} \quad (2)$$

unde:  $\sigma_x$  este tensiunea la nivelul  $X$  de la linia vârfulor asperităților profilului suprafeței;

$n_i$  - numărul de acționări în punctul dat a materialului cu tensiunea nu mai mare de  $\sigma_i$ .

Atunci numărul de acționări cu valorile de amplitudine a tensiunilor de la  $\sigma_i$  până la  $\sigma_i + d\sigma_i$  va fi egală cu

$$dn_i = n_d \phi(\sigma_i) d\sigma_i,$$

iar condiția de deteriorare a materialului din stratul superficial al piesei (acoperiri de fier electrolitic) la uzarea de oboseală va obține următoarea formă

$$n_d \int_{\sigma_{min}}^{\sigma_{max}} \frac{\varphi(\sigma_i) d\sigma_i}{\left[ \frac{\sigma_{vr}}{\sigma_i} \right]^{D_i}} = 1, \quad (3)$$

unde  $\sigma_{vr}$  - limita rezistenței la oboseală a materialului din stratul superficial al piesei restabilite cu acoperiri electrolitice de fier;

$D_i$  - parametrul universal al uzării de oboseală a materialelor [2].

Luând în considerație, că distribuția amplitudinilor tensiunilor este la fel ca și distribuția la înălțime a vârfulor asperităților stratului superficial [17], care provoacă efecte fluctuaționale în procesul de frecare, se poate de

apreciat numărul de cicluri până la deteriorarea materialului stratului superficial (acoperirilor) al tribosistemului, adică rezistența lui la uzură

$$n_d = \left[ \frac{3\pi\xi\sigma_o}{4Kf} \sqrt{\frac{r}{R_{\max}\varepsilon}} \right]^{\Delta_i} \quad (4)$$

unde  $\xi$  este constanta de elasticitate a lui Kirhgof pentru materialul suprafeței în frecare [19];

$K$  – coeficientul de proporționalitate, care depinde de ipoteza rezistenței materialului piesei și este în funcție de coeficientul lui Poisson [2];

$f$  – coeficientul de frecare în tribosistem;

$\sigma_o$  – tensiunea interioară a materialului deformat din stratul superficial al piesei (acoperire);

$r$  – raza de rotunjire a vârfurilor neregularităților a stratului superficial (acoperire);

$R_{\max}$  – înălțimea maximală a neregularităților suprafeței de frecare (acoperiri);

$\varepsilon$  – deformarea elastică relativă a materialului stratului superficial al piesei (acoperire).

Utilizând relația principală a teoriei adezional-deformațională pentru contactul elastic al suprafețelor de frecare și, luând în considerație componența deformațională a coeficientului de frecare se poate de apreciat valoarea acestuia, cu unele admiteri, după relația propusă [2]:

$$f_c = \frac{\tau_{pl} \cdot S_a}{P} + 0,9\beta \quad (5)$$

unde  $P = p \cdot S_a$  este forța normală ce acționează pe suprafața de frecare;

$p$  – presiunea raportată la suprafața conturată (vizibilă) a contactului;

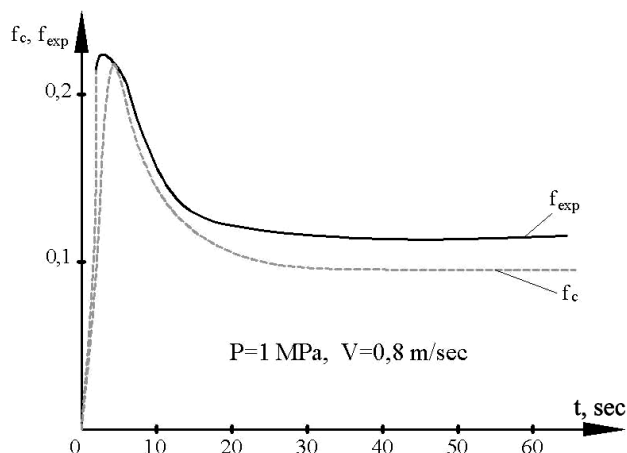
$\beta$  – coeficientul de durificare a peliculei superficiale a materialului din cuplul tribologic;

$\tau_{pl}$  – rezistența la forfecare a peliculei superficiale a materialului mai slab din cele două, ce participă la frecare, raportată la suprafața conturată a contactului tribologic.

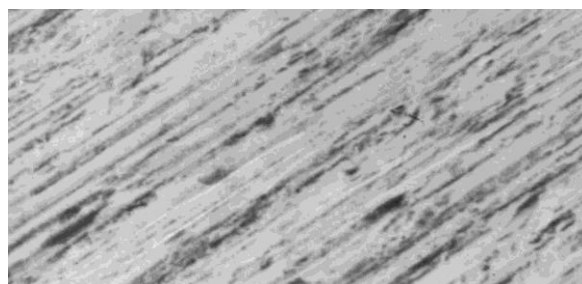
Pentru verificarea comparativă a coeficienților de frecare calculat ( $f_c$ ) după relația (5) și apreciat experimental ( $f_{exp}$ ) încercărilor experimentale au fost supuse acoperirile de fier electrolic obținute din electrolitul cu conținut de caprolactamă [15]. Coeficientul de frecare și rezistența la uzură a acestor acoperiri au fost determinate pe mașina SMT-2 în condiții de autolubrifiere a lor.

Experimentările au demonstrat (vezi fig. 7) că în aceleași condiții stabile de exploatare ( $P$ ,  $V$ )

coeficienții de frecare calculați ( $f_c$ ) după relația (5) diferă neesențial ( $\approx 3\%$ ) de cel apreciat experimental ( $f_{exp}$ ) și poartă același caracter de derulare în funcție de timp.



**Figura 7.** Coeficienții de frecare calculat ( $f_c$ ) și apreciat experimental ( $f_{exp}$ ) în tribosistemul „acoperire de fier cu conținut de caprolactamă-fontă aliată” pentru condițiile de electroliză:  $j_c = 40\text{ A/dm}^2$ ,  $t = 313\text{ K}$ ,  $pH=0,8$ , și  $4,5\%$  „Kl” în acoperire.



**Figura 8.** Deformarea și degradarea stratului superficial al fierului electrolic cu conținut de caprolactamă ( $P=1\text{ MPa}$ ,  $V=0,8\text{ m/sec}$ ), x 500

Coeficientul de frecare în condiții experimentale a fost calculat cu relația [9]:

$$f_{exp} = \frac{M_{fr}}{P_n \cdot R}$$

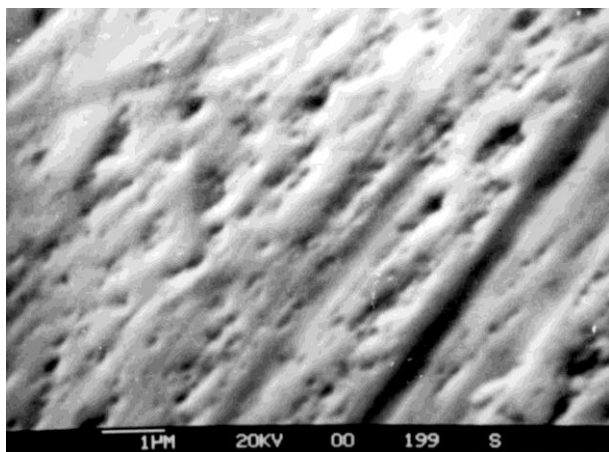
unde:  $M_{fr}$  este momentul de frecare (N·m) înregistrat pe mașina SMT-2;

$P_n$  – forța normală în contactul tribocuplului, N;

$R$  – raza rolei cu acoperiri de fier, m.

Cercetările efectuate au demonstrat că adaosul în electrolit a 5 g/l de caprolactamă la presiunea în contact ( $P$ ) de 0,25 MPa, uzura acoperirilor de fier, practic, nu avea loc, iar la

presiunea de 1,0 MPa viteza de uzare a lor era de 4...5 ori mai mică, în comparație cu aceleași acoperiri în lipsa caprolactamei. Acest efect, după părerea noastră, se manifestă datorită generării peliculei de caprolactamă între suprafețele de contactare (vezi fig. 5), care protejează aceste suprafețe, evitând direct contractul metallic. Pentru confirmarea acestei ipoteze suprafețele de frecare a materialelor contactate (Fe cu caprolactamă – fonta aliată) au fost supuse analizei chimico-microscopice, care a demonstrat că pe măsura creșterii presiunii în contact până la 1 MPa produsele de uzură umplu microasperitățile suprafețelor de frecare și sub acțiunea sarcinilor normale și tangențiale provoacă netezirea suprafețelor. Creșterea în continuare a presiunii ( $P > 1,0$  MPa) provoacă lustruirea suprafețelor de frecare în prezența straturilor de lubrifiere în baza caprolactamei (fig. 9).



**Figura 9.** Starea suprafeței de frecare a acoperirilor de fier cu conținut de caprolactamă la frecarea pe „uscat” în regim de autolubrifiere:  $j_c = 40$  A/dm<sup>2</sup>,  $T = 313$  K,  $pH = 0,8$ , „ $K_I$ ” = 4,5 %; ( $p = 1,0$  MPa,  $V = 1$  m/sec; contracorp-fontă aliată).

Analiza chimică a stratului de frecare superficial a demonstrat că el prezintă un compus complex, format în rezultatul interacțiunii hidroxizilor de metale de pe suprafețele de frecare (ale acoperirilor de fier și fonta aliată). Pe suprafața de frecare a contracorpului a fost depistată la fel un compus complex format din incluziuni cu dispersie fină de Mg și Cu, care intra în componența structurală a fontei aliate (0,65 și respectiv-0,25%). În acest caz conform [12, 13, 16], are loc formarea unor compuși coordonativi de fier și cupru cu caprolactamă datorită proprietăților de donor de electroni ale azotului, care intră în componența caprolactamei.

Prezența acestor compuși coordonativi micșorează brusc probabilitatea contactării suprafețelor juvenile și poate mări esențial interstițiul dintre corpurile tribosistemului datorită umplerii zonei de frecare cu curgerea vâscoasă a particulelor coloidale, ceea ce a și provocat o reducere considerabilă a uzurii acoperirilor de fier (cu conținut de caprolactamă) și a valorilor coeficientului de frecare.

Activitatea superficială a caprolactamei asigură nu numai absorbție pe hidroxizii de metale, care-s prezente atât pe suprafața acoperirilor de fier cât și pe cea a fontei aliate, dar și adeziunea lor în întregime la suprafețele de frecare. Însă în procesul de frecare, probabil că are loc și dezintegrarea nucleelor din hidroxizii de metale și formarea lor ulterioară, datorită interacțiunii lor repetate cu caprolactama, adică se observă așa numita curgere chimică, analogică aceluia, care are loc la transformări mecanico-chimice ale polimerilor.

Deoarece caprolactama nu împiedică oxidarea [13, 16], suprafețele juvenile ale acoperirilor de fier și ale fontei aliate, acestea din urmă din nou se oxidează și procesul de scoatere a produselor de interacțiune se repetă din nou.

Conform teoriei energetico-structurale [21], în zona contactului de fricțiune se formează așa numitele structuri disipative (structuri secundare de protecție-SSP), care au o proprietate de producere minimală a entropiei. Formarea acestor SSP stabile și sistematizate reprezintă un proces de autoorganizare care normalizează frecarea. În realitate, formarea acestor pelicule nu este nimic altceva, decât un proces de autolubrifiere a suprafețelor din tribosistem.

Trebuie de menționat faptul, că eficacitatea acțiunii de ecranizare a acestor straturi nu dispune pe măsura creșterii presiunii în contact, ceea ce se poate lămurii prin aderența lor adezivă foarte înaltă cu acoperirile de fier, condiționată de energia interacțiunii catenelor formate din moleculele de hidrocarburi și grupele polare de caprolactamă.

Așa dar, mecanismul de autolubrifiere a tribosistemului se explică prin trei efecte care au loc în procesul de frecare a acoperirilor de fier (cu conținut de caprolactamă) pe fonta aliată: **mecanic, fizico-chimic și chimic.**

Astfel de acoperiri cu proprietăți de autolubrifiere în baza caprolactamei ar putea fi, probabil, utilizate și în construcția tribosistemelor ce funcționează în vid (spațiul cosmic), pentru care aducția lubrifiantului din exterior este inadmisibilă și practic nerealizabilă.

**Bibliografie**

1. **Pavelescu D., Mușat M., Tudor A.** Tribologie. Edit. Didactică și Pedagogică, București, 1977.
2. **Kragely'kiy I.V., Doby'kin M. N., Komblanov V.S.** Osnovy' raschetov na trenie i iznos. M.: Mashinostroenie, 1977, 526 s.
3. **Butenko V. I.** Formirovanie i iznashivanie poverhnostnogo sloya detali. Taganrog: Izd-go TRTU, 1999, 192 s.
4. **Toporkov M.P.** Osobenost' rascheta iznashivaniya konstrukcionny'h materialov pri fretting-procesov//Problemy' povy'sheniya kachestva mashin - Tez.dokl. Mejdunarodnoy nauchno-tehniky konfer. Bryansk, 1994, s.166-168.
5. **Catrina Gh.** Introducerea în tribologie. Edit. UNIVERSITATEA, Craiova, 2002, 182 p.
6. **Melkov M.P.** Tverdoe ostalivanie avtotraktorny'h detaley. M., Izd. „Trasport”, 1971, 221 s.
7. **Petriv YU.N.** Povy'shenie iznosostoykost' e'lektroliticheskikh jelezny'h pokry'tiy. Sb. Nauk. Trudov «Vosstanovlenie detaley e'lektroliticheskim jelezom». Izd. «Shtiinca», Kishine`u, 1987, s. 2...13.
8. **Gologan V. F.** Tehnologicheskoe obespechenie optimal'ny'h e'kspluatacionny'h karakteristik vosstanovlenny'h avtotraktorny'h detaley e'lektroliticheskim jelezom. Dis... Dokt. tehn. nauk, Kishine`u, 1990, 267 s.
9. **P. Stoicev.** Durificarea și recondiționarea organelor de mașini cu acoperiri electrolitice rezistente la uzură. Teza de doct. hab. în tehnică, Chișinău, 2001, 381 p.
10. **Semenov A. P.** Shvaty'vanie metallov i metody' ego predotvrasch'eniya pri treniy//Trenie i iznos, tom.1, №. 2, 1980, s.236...246.
11. **Bely'y V. A.** Problema sozdaniya kompozicionny'h materialov i upravleniya ih frikcionny'mi svoystvami//Trenie i iznos, tom. 3, № 3, 1982, s. 389-395.
12. **Kragelskiy N.V., Troyanovskaya G. N., Zelenskaya M. N.** Samosmazy'vayusch'eysya materialy' i ih primeneniye pri resheniy novy'h tehnologicheskikh i konstruktorskih zadach. Tez. Dokl. 2-i Vsesoyuzn. Nauchn. Tehn. Konfer.: «Tehnologicheskoe upravlenie tribotekhnicheskimi karakteristikami uzlov mashin», Kishine`u, S.P.I. im. «S. Lazo», 1985, s.88-89.
13. **Roshkovan G.** Vosstanovlenie avtotraktorny'h detaley samosmazy'vayusch'msya jelezo-nikelevy'mi pokry'tiyami. Dis... kand. tehn. nauk. Kishine`u, 1992, 179 s.
14. **Patent №1790635 (SSSR).** E'letrolit dlya osajdeniya splava jelezo-nikel//Kalmuckiy V. S., Roshkovan G. V., Stoychev P. N. i Javguryanu V. N. BI №3 opubl. 23.01.93.
15. **A. Ceban, P. Stoicev, V. Moraru.** Premizele teoretice de utilizare a caprolactamei, privind obținerea acoperirilor electrolitice de fier cu proprietăți de autolubrifiere în baza caprolactamei. Conferința Științifică Internațională „Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare”, T.M.C.R.-2005, vol.2, Chișinău-2005, pp.359...372.
16. **Kre`chiun A. T., Moraru V. E.** Tverdy'e smazochny'e materialy' na osnove kaprolaktama. Izd. «Shtiinca», Kishine`u, 1988, 117 s.
17. **Butenko V. I.** Iznos detaley tribosistem. TGRTU, Taganrog, 2002, 235 s.
18. **Butenko V. I.** Iznosostoykost' kak funkciya relaksacionnoy stoykosti dislokacionnoy struktury' materiala//Trenie i iznos, 1998. T.19 №16.
19. **Blyumen A.V.** Uchet uprugih svoystv sherohovatogo kontrtela pri raschete intensivnosti iznashivaniya//Issledovaniya po tribotekhnike. M.: VINIIMASH, 1975, s. 179-186.
20. **Nazarenko P.V., Anistratenko L. A., Rodov V.I.** Opredelenie sily' vneshnego treniya na osnove dislokacionny'h predstavleniy s uchotov tipa svyazi i tipa reshetki metallov//Trenie i iznos, t. 2, N6, 1981, s. 987-995.
21. **Kosteckiy B. I.**//Tez. mejd. nauchn. tehn.konf. «Trenie, iznos i smazochny'e materialy'». Tashkent, 1985, t. 2, s. 287-296.