

# Laser texturing to improve the tribologic behavior of polymeric surfaces

## Texturare laser pentru îmbunătățirea comportamentului tribologic al suprafețelor polimerice

A. Han<sup>1</sup>, A. Nichici<sup>1</sup>, G. Pillon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>„Politehnica” University of Timisoara, Mechanical Engineering Faculty, Romania,

<sup>2</sup>LTm Laboratory – EA 2976, Burgundy University – Chalon sur Saône, France

e-mail: adealina@yahoo.com

### Keywords

Laser engraving, texturing, polymers, fretting, tribologic behavior.

### 1. Introduction

Tribology is the science of interacting surfaces in relative motion. It includes the study and application of the principles of friction, lubrication and wear. Tribology is presently a research field with both opportunities for fundamental investigations as well as industrial applications, requiring a multidisciplinary approach [1], [2].

The last years have brought intense preoccupations in using laser for the purpose of improving the tribologic behavior of metallic materials contact couple: alloying [3], deposition [4], texturing [5]. The laser systems are an alternative to the conventional surface treatments, due to its high energy density and precise positioning. Depending on the amount of transmitted energy and the exposure time, there can be achieved a wide range of surface treatments (in solid/liquid state, with/without material removal), applied to all material categories: metals, ceramics, polymers, composites, etc.

The present work focuses on the application of lasers for improving the tribologic characteristics of polymer surfaces. A texturing treatment was applied (parallel engravings, characterised by the width  $l$ , depth  $h$  and step  $p$ ) by material removal with a CO<sub>2</sub> laser on the surface of polycarbonate samples. The influence of the realised texture on the tribologic behaviour was shown using fretting tests, with a cylinder (steel) – plane (polycarbonate) couple geometry.

Both in the study of the laser engraving as well as of the behaviour at fretting tests, a statistical approach was chosen. This approach is recommended for the characterisation of complex processes, where numerous influence factors are present. In the case of fretting tests, the statistical approach has permitted a quick drawing of the running condition fretting maps RCFM, giving the boundary between partial slip and gross slip conditions, using the energy criterion defined by Fouvry [6].

### 2. Material behaviour at fretting test

The realized researches in this field in the last 20 years have succeeded in elaborating original concepts about the phenomena and the mechanisms that are taken place during

### Cuvinte cheie

Gravare cu laser, texturare, materiale polimerice, fretare, tribologie

### 1. Introducere

Tribologia, știința ce se ocupă cu studiul proceselor de frecare, lubrifiere și uzare, oferă o problematică de cercetare de actualitate atât pentru domeniul investigațiilor fundamentale, cât și pentru cel al aplicațiilor industriale. Tribologia necesită o abordare multidisciplinară, ce face apel la cunoștințe de mecanică teoretică și aplicată, de știința materialelor, de fizică și chimia suprafețelor [1], [2].

În ultimii ani se observă preocupări de utilizare a laserului în scopul îmbunătățirii comportamentului tribologic al cuplurilor de frecare din materiale metalice, prin tratamente de tip aliene [3], depunere [4], texturare [5]. Sistemele laser reprezintă o alternativă la tratamentele de suprafață convenționale datorită densităților mari de energie realizabile și posibilități de localizare precisă, punctuală a acțiunii fasciculelor laser. Astfel, în funcție de cantitatea de energie transmisă și de durata de interacțiune dintre fasciculul laser și materialul iradiat, se poate realiza o gamă largă de tratamente de suprafață (în stare solidă/lichidă, cu/fără prelevare de material), aplicabile tuturor categoriilor de materiale: metalice, ceramice, polimerice, compozite, lemn.

Lucrarea prezintă o extindere a aplicării tratamentelor laser în scopul îmbunătățirii caracteristicilor tribologice ale suprafețelor polimerice. Pentru aceasta, s-a recurs la aplicarea unui tratament de texturare (realizare de gravuri paralele, caracterizate prin lățimea  $l$ , adâncimea  $h$  și pasul  $p$ ) prin prelevare de material, cu ajutorul unui laser CO<sub>2</sub>, pe suprafața unor eșantioane din policarbonat. Influența texturii generate cu laser asupra comportamentului tribologic a fost pusă în evidență în cadrul unor încercări de fretting, utilizând o geometrie a cuplei de frecare de tip cilindru (oțel) - plan (policarbonat).

Atât pentru studiul procesului de gravare, cât și pentru cel al comportamentului la solicitări de fretting s-a optat pentru o abordare statistică, recomandată pentru caracterizarea proceselor complexe, în care intervin numeroși factori de influență. În cazul testelor de fretting, abordarea statistică permite trasarea rapidă a hărților de solicitării locale CSL, ce arată delimitarea dintre condițiile de alunecare parțială și alunecare totală, utilizând criteriul de energie definit de Fouvry [6].

fretting tests [6], [7], [8]. The defining of the loading conditions is accomplished by representing the variation of the tangential force  $F_t$  with respect to the displacement amplitude  $\delta$ . The resulting diagrams are named  $F_t - \delta$  cycles. In order to emphasize the contact evolution depending on the number of cycles  $N$ , Colombie [8] introduced a three-dimensional diagram  $F_t - \delta - N$ , named fretting loop. Having the purpose of defining fretting regimes by representing  $F_t - \delta$  cycles on  $F_n - \delta$  diagrams, Vingsbo [9] introduced the fretting map concept.

Two sets of friction and wear fretting maps have been proposed: the running condition fretting maps RCFM and the material response fretting maps MRFM (Figure 1). The first one is defined by the nature of contact conditions, by means of four fretting regimes: three simple and a mixed one [2], [9], [10]. By analogy with RCFM, the material response fretting maps MRFM define the main damage (cracking, particle detachment).

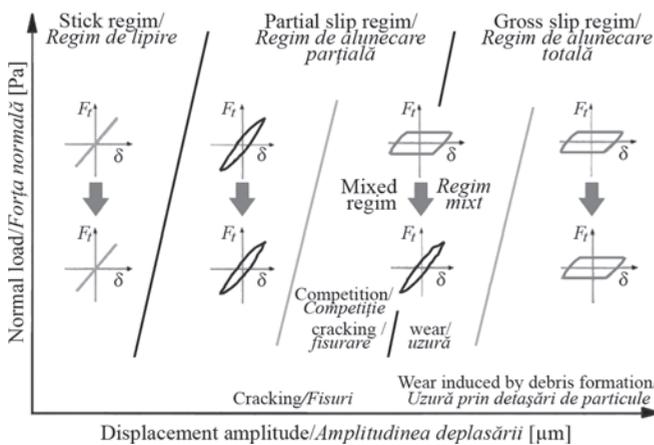


Figure 1. Fretting maps/  
Figura 1. Hartă de solicitare la fretting [10]

For the industrial unities confronted with frettings problems, RCFM and MRFM are furnishing valuable informations about both the origin and the nature of the degradation processes. By modifying the normal loadings or the displacement amplitude, the most dangerous working regimes for the existing systems can be avoided.

To delimitate the transition between the partial slip and the gross slip regimes, three quantitative criteria were proposed by Fouvry [6]. One of the most studied of them is the energy criterion  $A$  (Table 1).

Research has shown that the most important mechanisms governing the tribologic behaviour of polymer materials are: adhesion, abrasion and weariness/tiredness/fatigue. The surface degradation appears in the form of rips, cracks and particle detachment. A particular behaviour was put into evidence for polycarbonates and polyamides by the appearance of rolls.

Differently as for the tribologic behaviour of metallic materials, in the case of polymers a significant influence of the short displacements frequency on the cracks initiation [11], [12] was found. Taking this effect into account, the frequency was selected as an input variable for the study of the tribologic behaviour of the steel/polycarbonate couple in the present work.

## 2. Comportamentul materialelor la solicitări de fretting

Cercetările realizate în acest domeniu în ultimii 20 de ani au condus la elaborarea unor concepte originale despre fenomenele și mecanismele ce se dezvoltă în timpul încercărilor de fretting [6], [7], [8]. Definierea condițiilor de solicitare se realizează prin reprezentarea forței tangențiale  $F_t$  în funcție de amplitudinea deplasării  $\delta$ , diagrama obținută fiind cunoscută sub numele de ciclu  $F_t - \delta$ . Evoluția acestor cicluri a fost pusă în evidență de Colombie [9] prin introducerea diagramelor tridimensionale  $F_t - \delta - N$  ( $N$  – numărul de cicluri), numite trunchiuri de frecare. Vingsbo [9] introduce noțiunea de hărți de solicitare, definind regimurile de frecare prin reprezentarea ciclurilor  $F_t - \delta$  pe o diagramă de coordonate  $F_n - \delta$  ( $F_n$  – forța normală aplicată).

Pentru evidențierea comportamentului tribologic s-au conceput două tipuri de hărți: CSL harta de solicitare locală și HRM – harta răspuns de material (figura 1). Prima precizează condițiile mecanice de contact la un moment dat, existând 4 tipuri de regimuri de alunecare: 3 simple și unul mixt [2], [9], [10]. Al doilea tip de hartă precizează mecanismele de degradare a corpurilor în contact, pe parcursul întregii încercări la solicitări de fretting.

Pentru lumea industrială care se confruntă cu probleme de fretting cele două tipuri de hărți reprezintă un instrument important ce oferă informații asupra originii și a naturii proceselor de degradare a suprafețelor. Prin modificarea adecvată a forțelor din sistem sau a amplitudinii deplasărilor se poate evita solicitarea cea mai periculoasă pentru cupla de contact utilizată.

Pentru delimitarea tranziției între alunecarea parțială și alunecarea totală Fouvry [6] a definit 3 criterii, cel mai utilizat fiind criteriul energie  $A$  (tabelul 1).

Table 1. The energy criterion/  
Tabelul 1. Criteriul energie

Expression / Expresie	Critical value of transition / Valoare critică de tranziție	Representation/ Reprezentare
$A = \frac{E_d}{E_t}$	$A_t = 0.2$ $A < A_t \Rightarrow$ partial slip/ alunecare parțială $A > A_t \Rightarrow$ gross slip/ alunecare totală	

Cercetările au arătat că cele mai importante mecanisme ce guvernează comportamentul tribologic al materialelor polimerice sunt adeziunea, abraziunea și oboseala. În consecință, degradarea se manifestă prin apariția de rizuri, șisuri și detașări de particule. Un comportament particular a fost evidențiat pentru poliamide și polycarbonați prin apariția unor ondulații pe suprafață.

Spre deosebire de comportamentul tribologic al materialelor metalice în cazul polimerilor s-a observat o influență semnificativă a frecvenței micilor deplasări asupra inițierii

### 3. Laser engraving

Research focused on the surface quality and engraving dimensions, ignoring the form of the cross-section profile. The goal was in minimising the degradation effects of the superficial layers due to the laser beam. In respect to the geometric dimensions of the engraving as main objective was to obtain a length  $l$  and depth  $h$  smaller than 0.5 mm, in order to remain in the field of small displacements, specific to fretting tests.

#### 3.1. Experimental conditions

The implementation of surface texture was achieved with a CO<sub>2</sub> laser, type ROFIN SCx20 because the polycarbonate is opaque to its radiation ( $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ), thus the transmission losses being minimal. The laser beam was focused on the sample's surface, the relative displacement was realised on a linear trajectory, 10 mm. in length. The measurement of the width and depth of the engraving cross-sections was done by optical microscopy, in the middle of the engraving channels length.

Due to the necessity of obtaining precise geometric characteristics, a statistical approach was selected (dispersional analysis method) for defining the operational conditions of laser processing. Each experimental trial being repeated 4 times, the graphic representations being traced with the average of the four replicas data. This method has permitted to find the statistical significance of the influence factors on the width and depth of the engraving.

#### 3.2. Experimental results

In order to achieve the objective, the engraving speed  $v$  and the average power  $P_m$  were taken into consideration as influence factors [13]. It was found that the effect of the two factors is stronger on the depth than on the width, obtaining an increase of (Figure 2a, b):

~ 2.25 times for length ( $l_{min} = 0.222 \text{ mm}$ ;  $l_{max} = 0.502 \text{ mm}$ );

~ 12 times for depth ( $h_{min} = 0.042 \text{ mm}$ ;  $h_{max} = 0.512 \text{ mm}$ ).

So, choosing this range of the influence factors it was obtained the depth and the width of engraving smaller than 0.5 mm.

An interesting phenomenon was the appearance of cave micro-particles on the walls and bottom of the grooves (Figure 3.a) respectively on their upper edges (Figure 3.b). The micro-droplets have shapes close to spherical, with diameters between 25 and 50  $\mu\text{m}$  and are oriented preferentially perpendicular to the groove direction. The existence of these can be a consequence of the vapourisation phenomena, followed by a quick material cooling, similar results being also obtained by other researchers when applying CO<sub>2</sub> laser beam on polycarbonate [14].

### 4. Fretting tests

#### 4.1. Experimental conditions

The investigated contact was the cylinder/plane one. The cylinder, made of bearing steel (100Cr6 steel), with hardness HRC 60, has a 20 mm diameter and a 3 mm height. The theoretical sample, made of amorphous polycarbonate has the dimensions 20 x 30 x 10 mm<sup>3</sup>.

fisurilor [11], [12]. Astfel, frecvența deplasărilor a fost selectată ca variabilă de intrare pentru studiul comportamentului tribologic al cuplei oțel/polycarbonat studiată în această lucrare.

### 3. Gravarea cu laser

Cercetarea s-a focalizat asupra calității suprafețelor și a dimensiunilor gravurilor, ignorând forma profilului transversal al acestora. S-a urmărit minimizarea efectelor de degradare a straturilor superficiale induse de acțiunea fascicului laser. În ceea ce privește dimensiunile geometrice ale gravurii s-a urmărit în principal obținerea unor lățimi  $l$  și adâncimi  $h$  mai mici de 0,5 mm pentru a rămâne în domeniul micilor deplasări, specifice încercărilor de fretting.

#### 3.1. Condiții experimentale

Pentru realizarea texturii de suprafață s-a ales un laser cu CO<sub>2</sub> de tip ROFIN SCx20 deoarece polycarbonatul este opac la radiația emisă de acesta ( $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ ), pierderile prin transmisie fiind astfel minime. Fascicula laser a fost focalizat pe suprafața piesei, deplasarea relativă fiind executată pe o traiectorie liniară, pe o lungime de 10 mm. Măsurarea

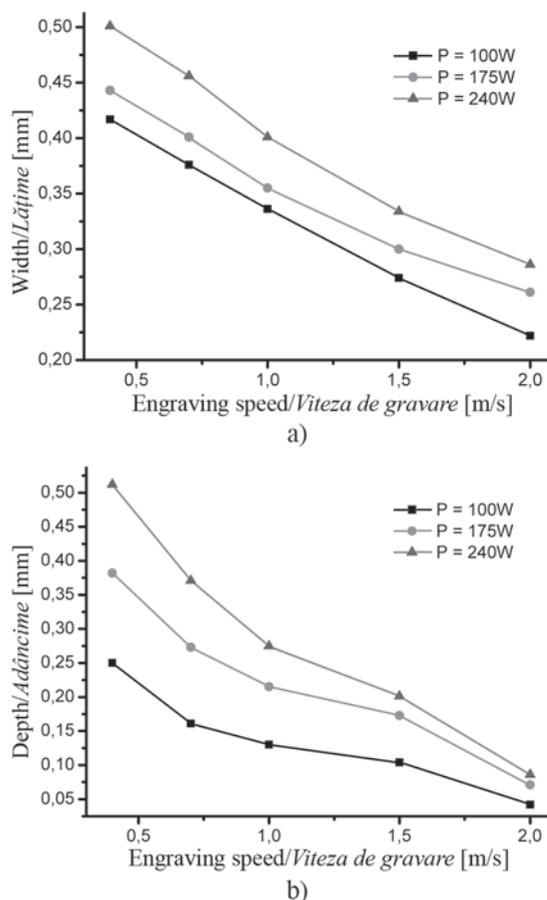


Figure 2. Groove dimensions in dependence on the engraving speed: a) Width  $l$  [mm]; b) Depth  $h$  [mm]/  
Figura 2. Dimensiunea gravurilor în funcție de viteza de gravare: a) Lungime  $l$  [mm]; b) Adâncime  $h$  [mm]

valorilor lățimii și adâncimii secțiunilor transversale ale gravurilor s-a efectuat prin microscopie optică, la mijlocul lungimii canalelor gravate.

For a more complete investigation of the contact couple, two series of experimental runs have been accomplished:

- using a sample with a smooth contact surface;
- using a sample having a textured contact surface (parallel grooves obtained by the laser processing, Figure 4).

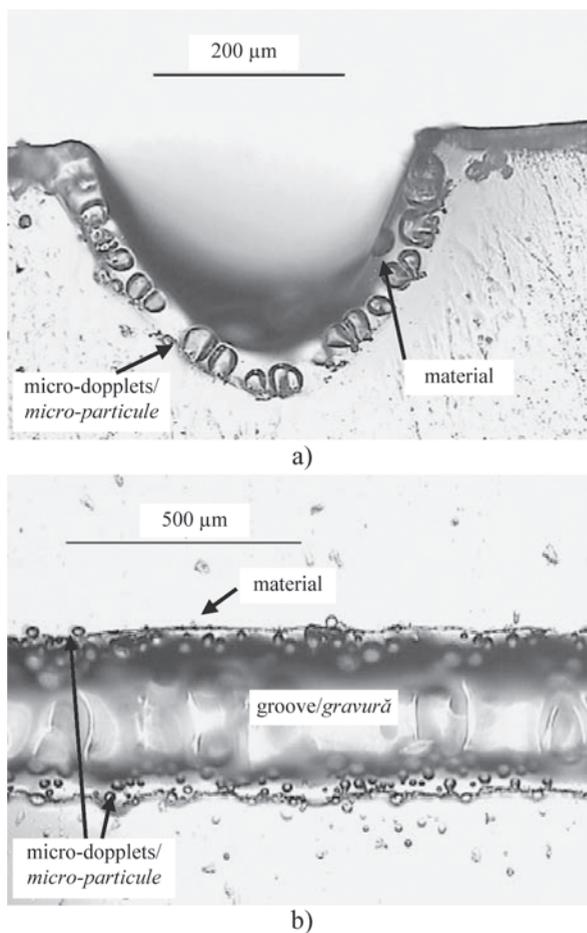


Figure 3. Groove ( $l = 0.330$  mm;  $h = 0.250$  mm):

a) Cross-section view; b) Top view

Figura 3. Gravuri ( $l = 0,330$  mm;  $h = 0,250$  mm):

a) Vedere în plan transversal; b) Vedere de sus

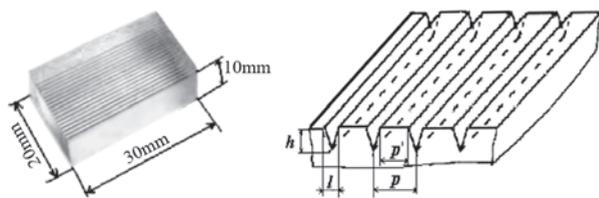


Figure 4. Textured polycarbonate samples/

Figura 4. Eşantioane din policarbonat cu suprafețe texturate

The grooves dimensions are: width  $l = 0.4$  mm, depth  $h = 0.4$  mm and the distance between grooves is  $p = 0.8$  mm.

The used tribometer is based on an electromagnetic exciter. The cylindrical sample is subjected to an alternative movement, having amplitudes  $\delta$  between  $\pm 3$  and  $\pm 500$   $\mu\text{m}$  and frequencies  $f$  between 10 and 30 Hz. The normal force  $F_n$  can be modified between 10 and 200N. Fretting tests were realized without lubrication.

Figure 5 represents the relative position of the two samples during the fretting tests. For the textured surface the alternative

Datorită necesității obținerii unor caracteristici geometrice precise ale gravurilor s-a optat pentru o abordare statistică (metoda analizei dispersionale) pentru definirea condițiilor operaționale ale procesării laser, fiecare încercare experimentală fiind replicată de 4 ori. Aplicarea metodei a permis stabilirea semnificației statistice a influenței factorilor de reglare asupra lățimii și adâncimii gravurilor.

### 3.2. Rezultate experimentale

Pentru realizarea primului obiectiv s-au considerat ca factori de influență viteza de gravare  $v$  și puterea medie  $P_m$  [16]. Se constată că efectul produs de cei doi factori este mai intens pentru adâncime decât pentru lățime, obținându-se o creștere de (figura 2):

~ 2,25 ori pentru lățime ( $l_{min} = 0,222$  mm;  $l_{max} = 0,502$  mm) ;

~ 12 ori pentru adâncime ( $h_{min} = 0,042$  mm;  $h_{max} = 0,512$  mm).

Un fenomen interesant a fost apariția unor micro-particule cave pe pereții și în partea inferioară a gravurilor (figura 3.a) respectiv pe muchiile superioare ale acestora (figura 3.b). Micro-particulele au forme apropiate de cea sferică, cu diametrul cuprins între 25 și 50  $\mu\text{m}$  și sunt orientate preferențial după o direcție perpendiculară pe direcția de gravare. Apariția acestor micro-particule poate fi consecința fenomenului de vaporizare, urmat de o răcire rapidă a materialului, rezultate similare fiind obținute și de alți cercetători în cazul iradierii cu laser cu  $\text{CO}_2$  a unor eşantioane policarbonat [14].

## 4. Încercări la solicitări de fretting

### 4.1. Condiții experimentale

Pentru realizarea încercărilor de fretting s-a folosit o geometrie de contact de tip cilindru/plan. Corpul cilindric a fost executat din oțel de rulment 100 Cr 6 cu duritatea HRC > 60, având diametrul  $d_c = 20$  mm și lățimea  $l_c = 2,7$  mm. Corpul plan, executat din policarbonat, a avut dimensiunile  $20 \times 30 \times 10$  mm<sup>3</sup> (figura 4). Încercările au fost efectuate pentru două tipuri de suprafețe polimerice:

- de referință, ce corespunde suprafeței inițiale, lise a eşantionului;
- texturată, ce corespunde unei suprafețe gravate cu fascicul laser.

Eşantioanele cu suprafața texturată (figura 4) prezintă o rețea de gravuri paralele, caracterizată prin lățimea gravurilor  $l$  [mm], adâncimea gravurilor  $h$  [mm], pasul gravurilor  $p$  [mm] și spațierea dintre gravurile succesive  $p'$  [mm]. Caracteristicile dimensionale ale gravurilor suprafețelor texturate au fost: lățime  $l = 0,4$  mm, adâncime  $h = 0,15$  mm, pas  $p = 0,8$  mm.

Pentru experimentări s-a utilizat un tribometru a cărei mișcare rectilinie alternativă necesară generării micilor deplasări este asigurată de un excitator electromagnetic. Principalele caracteristici sunt:

- forța normală  $F_n$  [N]:  $10 \div 200$
- amplitudinea micilor deplasări  $\delta$  [ $\mu\text{m}$ ]:  $\pm 3 \div \pm 500$
- frecvența  $f$  [Hz]:  $10 \div 30$

Figura 5 prezintă poziția relativă a celor două corpuri ale cuplei de frecare în timpul încercărilor de fretting. În cazul eşantioanelor cu suprafețe texturate, mișcarea rectilinie alternativă se realizează perpendicular pe axa longitudinală a gravurilor (figura 5.b).

Aplicarea forței normale pe cupla de contact este asigurată prin intermediul unui mecanism șurub-piuliță, la nivelul

movement is accomplished on the perpendicular direction on the longitudinal axis of the grooves (Figure 5b).

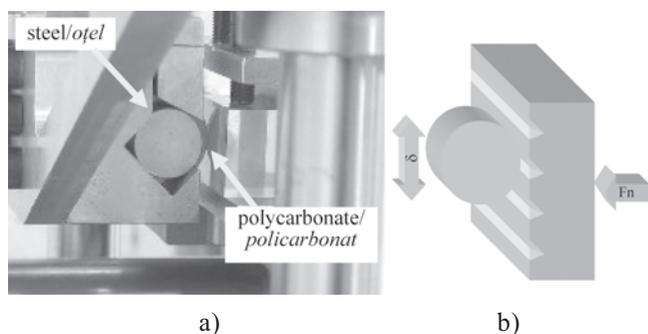


Figure 5. Relative position of the two samples during the fretting tests: a) Photo; b) Schema of the contact/  
 Figura 5. Poziția corpurilor cuplei de contact în timpul încercărilor: a) Fotografie; b) Schema de principiu

The measured values of the normal force  $F_n$ , the tangential force  $F_t$  as well as the displacement amplitude  $d$  were acquired and processed by Labview dedicated software. The software permits to trace the evolutions of the friction pseudo-coefficient ( $\mu = F_t/F_n$ ), of the energy criterion  $A$  (Table 1) as well as the fretting loops.

4.2. The comparative study of influence factor effects

For the both type of surface, the empirical mathematical modelling of the bearing steel/polymer couple fretting process was achieved by designing and performing a two-level complete factorial experiment EFC 2<sup>3</sup> [15]. The choice of an active experimental program with respect to a classical one, lead to several advantages, such as: the decreasing of number of runs, the important reducing of the calculus procedure, the increasing of the estimation precision of the regression coefficients.

The coordinates of the central point, the variation range and the levels of the influence factors in the experiment were chosen taking into account the previous studies (Table 2).

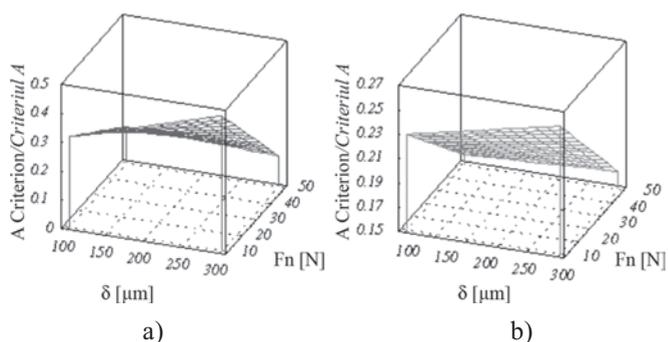


Figure 6. Reponse surface ( $f = 15$  Hz,  $N = 7000$  cycles):  
 a) Smooth surface; b) Textured surface/  
 Figura 6. Suprafețe de răspuns ( $f = 15$  Hz,  $N = 7000$  cicluri):  
 a) Suprafețe de referință; b) Suprafețe texturate

For practical considerations, regarding the interpretation and the utilization of the expected model, a polynomial mathematical function was selected as follows:

$$\tilde{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (1)$$

corpului prismatic, coliniar cu punctul de contact. Încercările de fretting se realizează fără lubrifierea suprafețelor în contact. Valorile forței normale  $F_n$ , a celei tangențiale  $F_t$ , precum și a amplitudinii micilor deplasări  $\delta$  sunt înregistrate și prelucrate în timp real cu ajutorul unui program dedicat, realizat în LabView.

4.2. Studiul comparativ al efectelor factorilor de influență

Pentru cele două tipuri de suprafețe studiate (de referință și texturată) s-au efectuat două experimente factoriale EFC2<sup>3</sup> [15] în aceleași condiții experimentale. S-a adoptat un program experimental activ datorită avantajelor oferite de acesta: reducerea numărului de încercări, simplificarea procedurii de calcul, creșterea precizie de estimare a coeficienților de regresie.

Factorii de influență considerați au fost forța normală  $F_n$  [N], amplitudinea micilor deplasări  $\delta$  [μm], frecvența [Hz]. Coordonatele punctului central, intervalele de variație, precum și nivelele factorilor de influență sunt prezentate în tabelul 2.

Table 2. Levels of the influence factors/  
 Tabelul 2. Nivelele factorilor de influență

Influence factors/ Factori de influență	Coded values/ Valori codificate	Physical values/ Valori fizice		
		$x_1 = F_n$ [N]	$x_2 = \delta$ [μm]	$x_3 = f$ [Hz]
Central point/ Punct central	0	30	200 (±100)	15
Range/ Interval de variație	$\Delta_j$	20	100 (±50)	5
Lower level/ Nivel inferior	-1	10	100 (±50)	10
Upper level/ Nivel superior	+1	50	300 (±150)	20

Pentru modelarea experimentală a criteriului de energie  $A$  s-a ales un model matematic de formă polinomială, ecuația (1).

Prin trasarea diagramei Pareto standardizate s-a observat că factorii cu influență semnificativă asupra criteriului  $A$  au fost forța normală și frecvența amplitudinilor.

Pornind de la modelele empirice obținute în urma prelucrării datelor experimentale s-au reprezentat grafic suprafețele de răspuns pentru criteriul  $A$  (figura 6). Se observă că, pe măsura măririi amplitudinii micilor deplasări  $\delta$  se produce o creștere a valorii criteriului  $A$ . În schimb, mărirea forței normale  $F_n$  conduce la scăderea valorii criteriului  $A$ . Rezultate similare au fost obținute și de alți cercetători [1], [12], [16] pentru cuplele de materiale: oțel/polycarbonat și oțel/oțel.

Prin secționarea suprafețelor de răspuns cu plane paralele la planul factorilor de influență considerați se obțin curbe de izorăspuns. Alegând ca factori de influență forța  $F_n$ , respectiv amplitudinea  $\delta$  și realizând secționarea suprafeței de răspuns corespunzătoare pentru valoarea  $A = 0,2$  (valoare critică ce delimitează zona de alunecare totală de cea parțială), se obțin hărți de solicitări locale a cuplei de contact studiată (figura 7). Astfel de hărți pot fi trasate cu ușurință pentru orice valoare a

Sudarea și Încercarea Materialelor

By drawing the standardized Pareto diagram it was noticed that the factors with significant influence on criterion  $A$  were the normal force and the amplitude frequency.

Using the founded models, the response surfaces of the studied objective functions can be represented, considering two influence factors. In figure 6 are represented the response surface for the energy criterion  $A$  with respect to the normal force  $F_n$  and the displacement amplitude  $\delta$ . It can be seen that by increasing the small displacement amplitude  $d$  an increase of the criterion  $A$  value took place.

On the other hand, an increase of the normal force  $F_n$  leads to a reduction of the criterion  $A$  value. Similar results were obtained also by other researchers [1], [12], [16] for the material couples: steel/polycarbonate and steel/steel.

By sectioning the response surfaces using horizontal planes, parallel with the independent variables plane, the contour plots for the energy criterion  $A$  were obtained. By choosing the section plane level at 0.2 (the transition value of the partial slip/gross slip regimes), the diagram can be used like a running condition fretting map  $RCFM$ . We can see that the gross slip domain  $GS$  for the textured surface is smaller than the one for the smooth surface. Also, the treatment of the polymer surface is conducive to degradation preponderance mechanisms by cracking, which are specific to the mixed regime  $MR$  (Figure 7).

The significant influence of frequency  $f$ , from a statistical point of view, which resulted from the experimental data processing, justifies a more profound investigation of this influence factor.

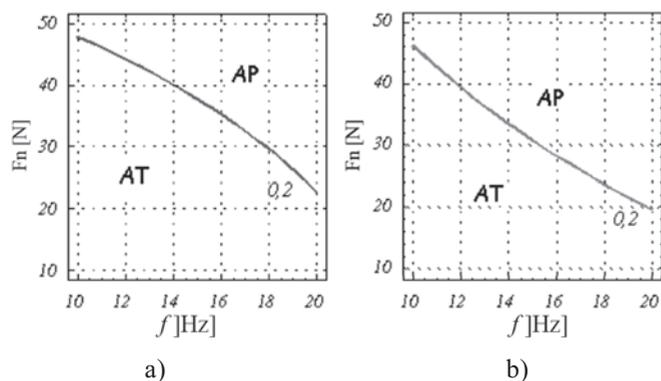


Figure 8. Fretting maps ( $d = 200 \mu\text{m}$ ,  $N = 7000$  cycles):

a) Smooth surface; b) Textured surface/

Figura 8. Hărți de solicitare ( $\delta = 200 \mu\text{m}$ ,  $N = 7000$  cicluri): a) Suprafețe de referință; b) Suprafețe texturate

The response surface of criterion  $A$  in dependence on the force  $F_n$  and frequency  $f$  has shown that an increase in the frequency leads to a reduction of the criterion  $A$  value. Therefore, by increasing the frequency the transition line moves in the direction on partial slip domain. By cross-sectioning the response surface with a plane corresponding to  $A = 0,2$  there are obtained frequency stress maps. It can be seen that the texture presence changes the position of the separation limit between gross slip  $GS$  and partial slip  $PS$  domains, by reducing the total slip zone, result which is obvious by drawing the local stress maps  $RCFM$  (Figure 8).

Following the optical microscope analysis of the surfaces submitted to fretting tests, it was noticed that the degradation is more pronounced for textured surfaces.

frecvenței cuprinsă în intervalul de variație ales la începutul cercetării.

Se remarcă faptul că existența texturii pe suprafața eșantioanelor din policarbonat diminuează zona de alunecare totală  $AT$  comparativ cu cea obținută pentru suprafețele de referință, în aceleași condiții experimentale. Se poate afirma deci că prin texturarea suprafețelor tribologice devine posibilă modificarea poziției relative a zonelor de alunecare parțială  $AP$  și alunecare totală  $AT$ .

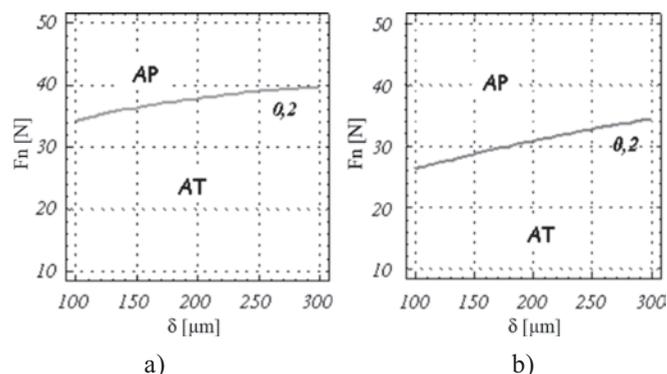


Figure 7. Running condition fretting maps ( $f = 15 \text{ Hz}$ ,  $N = 7000$  cycles): a) Smooth surface;

b) Textured surface/

Figura 7. Hărți de solicitări locale ( $f = 15 \text{ Hz}$ ,  $N = 7000$  cicluri): a) Suprafețe de referință; b) Suprafețe texturate

Influența semnificativă din punct de vedere statistic a frecvenței  $f$ , evidențiată prin prelucrarea statistică a datelor experimentale, justifică investigarea aprofundată a acestui factor.

Suprafața de răspuns a criteriului  $A$  în funcție de forța  $F_n$  și frecvența  $f$  a arătat că mărirea frecvenței conduce la scăderea valorii criteriului  $A$ . Deci, la creșterea frecvenței linia de tranziție evoluează spre domeniul alunecării parțiale. Prin secționarea suprafeței de răspuns respective cu un plan corespunzător valorii  $A = 0,2$  se pot obține hărți de solicitare în frecvență. Se poate observa că prezența texturii schimbă poziția limitei de separație dintre  $AP$  și  $AT$ , prin reducerea zonei de alunecare totală, rezultat evident în urma trasării hărților de solicitări locale CSL (figura 8).

În urma analizei prin microscopie optică a suprafețelor supuse încercărilor de fretting s-a observat că degradarea este mai pronunțată pentru suprafețele texturate.

Degradarea suprafeței apărute în regimul mixt este prezentată în figura 9. Se observă prezența urmelor de frecare pe toată suprafața de contact (figura 9a), pe marginea interliniei formându-se rulouri de mari dimensiuni (figura 9b). Trecerea de la alunecare totală la cea parțială poate fi datorată nucleelor de suprafețe în stare lipită, poziționate în zona centrală a contactului (figura 9c).

## 5. Concluzii

Rezultatele experimentale au confirmat posibilitatea utilizării unui sistem laser pentru realizarea unor texturi pe suprafața eșantioanelor din policarbonat destinate încercărilor de fretting.

Alegerea condițiilor de solicitare (forța normală  $F_n$ ; amplitudinea deplasărilor  $\delta$ ; frecvența  $f$ ) permite dirijarea regimurilor de alunecare a cuplei oțel/polycarbonat studiate.

The surface degradations in mixed regime are illustrated in Figure 9. The traces of friction are observed on the whole contact surface of the polycarbonate samples (Figure 9a). A lot of rolls are formed on the upper edge of the groove (Figure 9b). The pass of the gross slip GS on partial slip PS can be the consequence of the nucleation of the stick zones in the middle of the contact between the two samples (Figure 9c).

## 5. Conclusions

The experimental results have confirmed the possibility of using the laser for controlled texturing of the surface of polycarbonate samples, necessary for fretting tests. The selection of the test conditions (normal force  $F_n$ ; displacement  $\delta$ ; frequency  $f$ ) allows controlling the slipping regimes of the studied steel/polycarbonate couples.

Taking into account that the laser processing can be applied to all kinds of materials (metals, polymers, ceramics, composites, etc.) the obtained results are a base for further research and development. The employment of new laser types (Nd:YAG, excimers, femtoseconds etc.) may allow a more precise control of the form and dimensions of texture grooves on the surfaces.

## References/Bibliografie

- [1]. Benrabah, A., Langlade, C., Vannes, A.B.: Residual stresses and fretting fatigue. *Wear*, vol. 224, issue 2, February 1999, p. 267-273.
- [2]. Zambelli, G., Vincent, L.: *Matériau et contact. Une approche tribologique*. Presse polytechniques et universitaires Romandes, 1998, 337 p, ISBN 2-88074-338-9.
- [3]. Zhong, M., Liu, W., Zhan, H.: Corrosion and wear resistance characteristics of NiCr coating by laser alloying with powder feeding on grey iron liner. *Wear*, vol. 260, issues 11-12, 30 June 2006, p. 1349-1355.
- [4]. Chen, H., Xu, C., Chen, J., Zhao, H., Zhang, L., Wan, Z.: Microstructure and phase transformation of WC/Ni60B laser cladding coatings during dry sliding wear. *Wear*, vol. 264, issues 7-8, 15 March 2008, p. 487-493.
- [5]. Rapoport, L., Moshkovich, A., Perfilyev, V., al.: Wear life and adhesion of solid lubricant films on laser-textured steel surfaces *Wear*, vol. 267, issues 5-8, 15 June 2009, p. 1203-1207
- [6]. Fouvry, S.: Analysis of sliding behaviour for fretting loadings: determination of transition criteria, Elsevier Sequoia, 1994.
- [7]. Berthier, Y., Vincent, L., Godet, M.: Velocity accommodation in fretting. *Wear*, vol. 125, issues 1-2, July 1988, p. 25-38.
- [8]. Colombie, C.: *Usure induite sous petits débattements, identification des phénomènes*. Thèse doctorale ECL 86-11, Ecole Centrale de Lyon, 1986.
- [9]. Vingsbo, O., Soderberg, S.: On fretting maps, *Wear*, 1998, 126, p. 137-147.

Ținând cont de faptul că procesarea laser poate fi aplicată tuturor tipurilor de materiale (metalice, polimerice, ceramice, compozite etc.), rezultatele obținute pot constitui un punct de plecare pentru cercetări și dezvoltări viitoare. Pe de altă

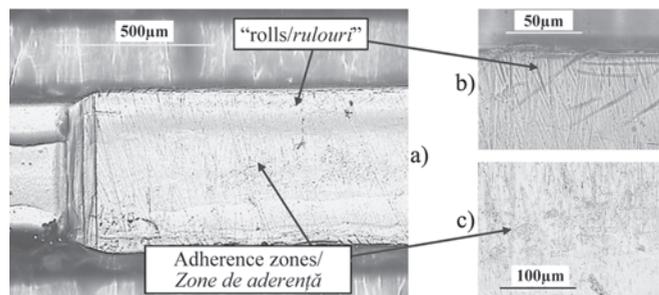


Figure 9. Partial slip regime PSR (textured sample)/  
Figure 9. Regim de alunecare mixtă (eșantioane texturate)

parte, poate fi luată în considerare și folosirea noilor tipuri de surse laser (Nd:YAG, excimeri, femtosecunde etc.) ce permit un control mai precis al formei și dimensiunilor gravurilor de texturare a suprafețelor.

- [10]. Han, A., Pillon, G., Nichici, A., Vannes, B., Grevey, D.: Study and evaluation of fretting critical slip conditions by applying the design of experiments method *Wear*, 2006, p. 215-2313.
- [11]. Marcellan, A., Bondil, O., Boué, C., Chateauminois, A.: Third body effects in the wear of polyamide: Micro-mechanisms and wear particles analysis. *Wear*, vol. 266, issues 9-10, 24 April 2009, p. 1013-1020.
- [12]. Teng, J., Sato, K.: In situ observations of fretting wear behavior in PMMA/steel model. *Materials and Design*, 2004, vol. 25, no. 6, p.471-478.
- [13]. Han, A., Gubencu, D., Pillon, G.: A generalized structure based on systemic principles of the characteristic variables of materials laser processing, *Laser & Optics Technology*, vol. 37, 2005, p. 577-581.
- [14]. F. Caiazza, F. Curcio, G. Daurelio, et al.: Laser Cutting of different polymeric plastics (PE, PP and PC) by a CO2 Laser beam. *Journal of materials processing technology*, 2005, Vol. 159, p. 279-285.
- [15]. Cicala, E.: *Metoda experimentelor factoriale*. Editura „Politehnica” Timisoara, ISBN: 937-625-263-9, 230 pag., 2005.
- [16]. Martin, B., Vincent, L., Wright, C.S., Eagles, A.M., Wronsk, A.S.: Fretting wear and cracking in sintered metal matrix composites. *Wear*, vol. 248, issues 1-2, March 2001, p. 65-74.



**ISIM**  
TIMIȘOARA

*Excellence through competence*

[www.isim.ro](http://www.isim.ro)