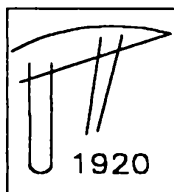


MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA  
FACULTATEA DE MECANICĂ



ing. Delia ZSIVANOV

CONTRIBUȚII LA EVALUAREA  
CARACTERISTICILOR SUPRAFETEȚELOR  
DE CONTACT CU RUGOZITATE IZOTROPĂ

Teză de doctorat

Conducător științific  
prof. dr. ing. Marcu BALEKICS

1998

BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
TIMIȘOARA

*Motto:*

*"New methods of describing and characterizing surface topography have emerged and there is an urgent need to relate these methods to the tribological behaviour of surfaces."*

*J.F. Archard*

622.199  
366 H.

## CUPRINS

Cap. 1 INTRODUCERE.....	6
Cap. 2 STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII CARACTERISTICILOR SUPRAFEȚELOR DE CONTACT.....	11
2.1 Tribo-sisteme.....	11
2.2 Principii și tehnici de evaluare a rugozității suprafețelor de contact.....	17
2.2.1 Rugozitatea suprafețelor - definiții, modalități de abordare, parametri de evaluare, criterii de discriminare.....	17
2.2.1.1 Definiții și modalități de abordare.....	17
2.2.1.2 Parametri de evaluare a rugozității suprafețelor de contact.....	19
2.2.1.3 Criterii de discriminare a rugozității suprafețelor de contact.....	26
2.2.2 Estimarea teoretică a parametrilor de rugozitate a suprafețelor de contact.....	30
2.2.2.1 Aplicații ale teoriei funcțiilor aleatoare.....	30
2.2.2.1.1 Analiza distribuției înălțimii neregularităților profilului.....	31
2.2.2.1.2 Analiza distribuției spațiale a neregularităților profilului.....	36
2.2.2.2 Aplicații ale geometriei fractale.....	38
2.2.3 Evaluarea experimentală a parametrilor de rugozitate a suprafețelor de contact.....	47
2.3 Comportamentul tribologic și topografia suprafețelor de contact.....	53
2.3.1 Procese de uzare.....	53
2.3.2 Fenomenologia și caracteristicile uzării de fretting.....	56
2.3.2.1 Condiții de încercare la fretting.....	56
2.3.2.2 Descrierea fenomenului de uzare de fretting.....	58
2.3.2.3 Caracterizarea proceselor de uzare de fretting.....	64
2.3.3 Corelații semnificative între comportamentul tribologic și rugozitatea suprafețelor de contact.....	67
2.4 Concluzii.....	76

Cap. 3 INVESTIGAREA EXPERIMENTALĂ A CARACTERISTICILOR SUPRAFETELOR DE CONTACT CU RUGOZITATE IZOTROPĂ.....	79
3.1 Obiectivele generale ale cercetării experimentale .....	79
3.2 Investigarea optică a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă.....	81
3.2.1 Concepția și organizarea programului experimental .....	81
3.2.2 Standul experimental-principii, structură, funcționalitate.....	82
3.2.2.1 Principiul metodei.....	82
3.2.2.2 Achiziționarea, distribuirea și prelucrarea datelor de măsurare .....	85
3.2.2.3 Specificații și domenii de aplicație .....	88
3.2.3 Rezultate experimentale și interpretări referitoare la parametri de înălțime, spațiere, înclinare și curbura a suprafețelor cu rugozitate izotropă.....	89
3.2.3.1 Verificarea normalității repartiției înălțimilor microgeometriei suprafețelor cu rugozitate izotropă .....	89
3.2.3.1.1 Condiții inițiale și metode de verificare a normalității repartiției .....	89
3.2.3.1.2 Rezultatele obținute și interpretarea lor.....	90
3.2.3.2 Caracteristicile de profil ale suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă în evaluare optică interferometrică .....	93
3.2.3.3 Înclinarea și curbura profilului de rugozitate a suprafețelor cu rugozitate izotropă .....	100
3.2.3.3.1 Definiții preliminare .....	100
3.2.3.3.2 Cercetări experimentale, rezultate obținute și interpretarea lor .....	102
3.3 Investigarea la fretting a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă.....	109
3.3.1 Concepția și organizarea programului experimental .....	109
3.3.1.1 Principii și obiective ale experimentării.....	109
3.3.1.2 Condiții de experimentare .....	111
3.3.1.3 Programul experimental .....	114
3.3.2 Standul experimental-principii, structură, funcționalitate.....	116



---

3.3.3. Rezultate experimentale și interpretări referitoare la caracteristicile de uzare, frecare și disipare de energie în procesele de uzare de fretting a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă .....	120
3.3.3.1 Baza de date și informații complementare privind procesul de uzare de fretting... ..	120
3.3.3.2 Factori determinanți ai tranziției alunecare parțială-alunecare totală în condițiile uzării de fretting.....	123
3.3.3.3 Modele empirice ale criteriilor de tranziție dintre regimurile de alunecare parțială-alunecare totală în condițiile uzării de fretting.....	132
3.3.3.4 Hărțile solicitărilor locale în condițiile uzării de fretting.....	137
3.3.3.5 Cinetica și morfologia proceselor de uzare de fretting.....	141
3.3.3.6 Aspecte energetice ale proceselor de uzare de fretting.....	168
3.4 Concluzii .....	174
3.4.1 Investigarea optică interferometrică.....	174
3.4.2 Încercarea de uzare de fretting.....	175
 Cap. 4 CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE.....	179
4.1 Concluzii generale .....	179
4.2 Contribuții originale.....	183
4.3 Perspective.....	185
 BIBLIOGRAFIE.....	186

# Capitolul 1

## INTRODUCERE

În lumea contemporană, interesul față de fizica și tehnologia suprafețelor este în continuă creștere. Explicația acestei evoluții este legată de:

- intervenția pe care suprafețele cu rol de interfață o exercită asupra proceselor de transfer de energie, masă și informație dintre corpurile/sistemele în interacțiune și respectiv de

- rolul determinant pe care suprafețele cu rol de limită de separație îl au în asigurarea stabilității corpurilor/sistemelor supuse acțiunii și solicitărilor mediului fizico-chimic ambiant.

Starea de mai sus se reflectă complex și multiplu în ingineria suprafețelor, înainte de toate, prin preocupările care vizează definirea și evaluarea corelațiilor dintre calitatea suprafețelor, considerată substanțial și geometric și funcționalitatea suprafețelor din punct de vedere mecanic, chimic, termic, electric, optic, etc. Obiectivul final al acestor preocupări constă în specificarea calității suprafețelor sistemelor tehnice, individuale sau agregate, corespunzător cerințelor funcționale impuse acestora.

În aceeași măsură, starea descrisă generează exigențe particulare pentru sistemele de fabricație, în cadrul cărora se asigură efectiv calitatea normată a suprafețelor. Suprafețele ingineresti sunt generate printr-o mulțime de metode și procedee tehnologice, cu acțiune volumică (turnare, deformare plastică, așchiere, etc) sau/și superficială (acoperiri, tratamente termice de suprafață, etc.), care se reflectă de o manieră specifică asupra calității și implicit a topografiei acestora.

Instabilitatea sistemelor tehnologice de fabricație și evoluția, cel puțin în parte, stohastică a indicatorilor de funcționalitate, fac imposibilă o relație de tip determinist între fabricația și comportarea funcțională a suprafețelor și produselor ingineresti. Devine obligatorie introducerea unei funcții de măsurare a performanțelor fabricației și funcționării, care să asigure monitorizarea și comanda optimală a proceselor de fabricație și respectiv predicția și evaluarea indicatorilor funcționali corespunzători (figura 1.1).

Numeroase caracteristici funcționale ale suprafețelor de interes ingineresc sunt determinate, în condiții date, de topografia și în particular de rugozitatea acestora.

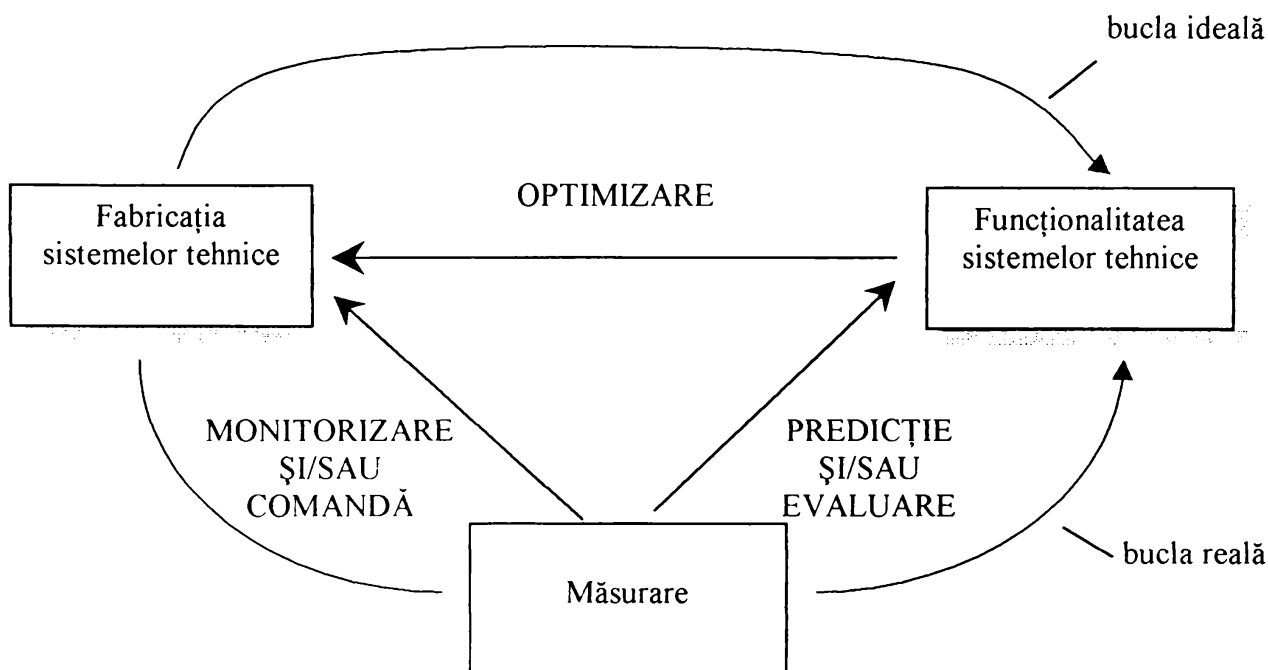


Fig. 1.1 Rolul funcției de măsurare în optimizarea performanțelor fabricației și funcționalității sistemelor tehnice

Unul din domeniile cele mai reprezentative, din acest punct de vedere, este tribologia, definită ca știința care are ca obiect studiul și valorificarea tehnologică a legităților și informației factice specifice proceselor de frecare, uzare și ungere a suprafețelor în contact și mișcare relativă.

Toate suprafețele reale sunt rugoase. Rolul rugozității suprafețelor în tribologie este extrem de important, dar din păcate, insuficient cunoscut. Dificultățile cele mai mari în definirea și evaluarea rugozității derivă din natura nestaționară și multiscalară a acesteia, precum și din dependența rezultatelor măsurătorilor de metoda de măsurare și de aparatura folosită. În aceeași măsură, evaluarea caracteristicilor suprafețelor de contact este grevată, în continuare, de complexitatea fenomenologică a proceselor de frecare-ungere-uzare, care limitează posibilitățile de modelare matematică, precum și de similitudinea incompletă a condițiilor de încercare cu realitatea fizică.

Deși ultima jumătate de secol a marcat progrese importante în acest domeniu, cerințele impuse topografiei și respectiv rugozității suprafețelor pentru aplicații tribologice nu au fost încă identificate de o manieră indubitabilă, explicită și logică.

Este important de remarcat că ultimele decenii ale secolului XX au pus în evidență tendințe de evoluție favorabile, deosebit de importante, atât pentru evaluarea rugozității (tabelul 1.1), cât și pentru evaluarea caracteristicilor suprafețelor de contact (tabelul 1.2).

TABELUL 1.1 Tendințe de evoluție în evaluarea rugozității suprafețelor

CLASIC	AVANSAT
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Abordare empirică</li> <li>-Măsurare mecanică prin contact</li> <li>-Rugozitate bidimensională</li> <li>-Indicatori structurali (geometrici) individuali și locali</li> <li>-Număr excesiv și redondant de parametri de rugozitate</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Abordare analitică</li> <li>-Măsurare optică fără contact</li> <li>-Rugozitate tridimensională</li> <li>-Indicatori structurali (geometrici) și funcționali statistici și globali</li> <li>-Număr minim necesar și suficient de parametri de rugozitate</li> </ul>

TABELUL 1.2 Tendințe de evoluție în evaluarea caracteristicilor suprafețelor de contact

CLASIC	AVANSAT
Abordare macroscopică deterministă mecanică	Abordare microscopică probabilistă pluridisciplinară
Transfer de masă și energie	Transfer de masă, energie și informație
Măsurare mărimi mecanice, prin încercări simple și rapide, pe aparate specializate, cu reproductibilitate limitată	Măsurare mărimi mecanice și nemecanice, prin încercări complexe și de durată, pe aparate universale, cu reproductibilitate ridicată, asistate de calculator
Prelucrarea datelor de măsurare orientată către obiecte individuale	Prelucrarea datelor de măsurare orientată către tribo-sistem

În noul context creat, cea mai importantă problemă care trebuie rezolvată este legarea noilor metode de definire, evaluare și modelare a rugozității suprafețelor cu comportarea tribologică a acestora și în special cu stările limită de tranziție de la funcționarea nominală la avarie.

Toate elementele enunțate anterior constituie rațiunea de a fi a prezentei teze de doctorat.

Teza își propune ca obiectiv fundamental reconsiderarea și definirea pe baze noi a legăturilor de cauzalitate dintre rugozitatea și comportamentul tribologic al suprafețelor de contact prin valorificarea oportunităților de excepție oferite prin tehnologii avansate de:

- 1) investigare optică interferometrică a rugozității suprafețelor și respectiv de
- 2) evaluare a caracteristicilor tribologice esențiale ale acestora în condițiile încercării de fretting (uzare indusă de micile deplasări),

ambele susținute de o logistică informațională modernă pentru achiziționarea, prelucrarea, modelarea și reprezentarea grafică a datelor de măsurare.

Un al treilea element definitoriu al prezentei teze de doctorat este alegerea ca obiect principal al cercetărilor a suprafețelor cu rugozitate izotropă, a căror funcționalitate aparte, inclusiv în aplicații tribologice, a fost multă vreme puțin valorificată și chiar ignorată. Este semnificativ faptul că noile standarde europene de rugozitate 3-D, în curs de elaborare, introduc orientarea texturii suprafețelor în rândul celor 13 indicatori necesari și suficienți pentru caracterizarea univocă și completă a rugozității.

Este important de remarcat că atingerea obiectivului fundamental al tezei de doctorat se realizează prin caracterizarea suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă (prelucrate prin eroziune electrică) din punct de vedere intrinsec, geometric, dar mai ales extrinsec, tribologic. Această caracterizare are o componentă absolută, ea reflectând o stare de fapt, dar și o componentă relativă, prin raportare la suprafețe similare cu textură anizotropă (prelucrate prin rectificarea mecanică).

Pornind de la premisele de mai sus, conținutul propriu-zis al tezei de doctorat este structurat în două părți principale.

Prima parte “Stadiul actual al cercetării caracteristicilor suprafețelor de contact” reprezintă o sinteză bibliografică la zi asupra definirii, evaluării și corelării caracteristicilor suprafețelor de contact, cu o deschidere specifică către problematica suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă.

Abordarea sistemică precum și analiza critică a literaturii de specialitate conferă sintezei efectuate o notă de originalitate din punctul de vedere al structurării și prezentării materialului faptic existent și acțiunilor de cercetare viitoare.

Cea de a doua parte intitulată “Investigarea experimentală a caracteristicilor suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă” reprezintă partea fundamentală a tezei de doctorat și este în întregime originală în privința concepției, obiectivelor și rezultatelor cercetării experimentale efectuate.

Capitolul 1 “Introducere” și capitolul 4 “Concluzii generale și contribuții originale” definesc, primul - importanța, actualitatea, obiectivele și conținutul tezei de doctorat, iar ultimul rezultatele principale ale cercetărilor efectuate, precum și cele mai substanțiale contribuții originale ale autorului tezei în problematica abordată.

La finalizarea tezei de față autorul dorește să mulțumească domnului prof. dr. ing. Marcu Balekics, conducătorul său științific, pentru îndrumarea competentă și exigentă și pentru sprijinul deschis, creativ și stimulat manifestat pe tot parcursul elaborării lucrării.

Autorul mulțumește, de asemenea, domnului ș.l. dr.ing. Eugen Cicală, pentru sprijinul nemijlocit și colaborarea în realizarea efectivă a cercetărilor experimentale privind uzarea de fretting. Mulțumiri deosebite sunt adresate domnilor Arthur Wojt, director al firmei ATOS GmbH, din Pfungstadt (Germania), dipl. phys. Wilfried Helle, specialist al firmei L.O.T.-Oriol GmbH, din Darmstadt (Germania), precum și domnului prof. dr. Leo Vincent de la Ecole Centrale de Lyon (Franța), pentru bunăvoința de a fi permis accesul și utilizarea de către autorul tezei a aparaturii moderne de investigație optică și respectiv tribologică a suprafețelor cu rugozitate izotropă.

În sfârșit, autorul ține să mulțumească tuturor colegilor din cadrul Universității “Politehnica” din Timișoara, care, de o manieră sau alta, direct sau indirect, au contribuit la elaborarea și finalizarea prezentei teze de doctorat.

## Capitolul 2

# STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII CARACTERISTICILOR SUPRAFEȚELOR DE CONTACT

### 2.1. Tribo-sisteme

Schema de principiu a unui tribo-sistem definitiv pentru mișcarea relativă a suprafețelor unor corpuri solide în contact și implicit pentru fenomenele de frecare-ungere-uzare asociate, [C1] [C6] [Z1] [R1] [V1], este reprezentată în figura 2.1.

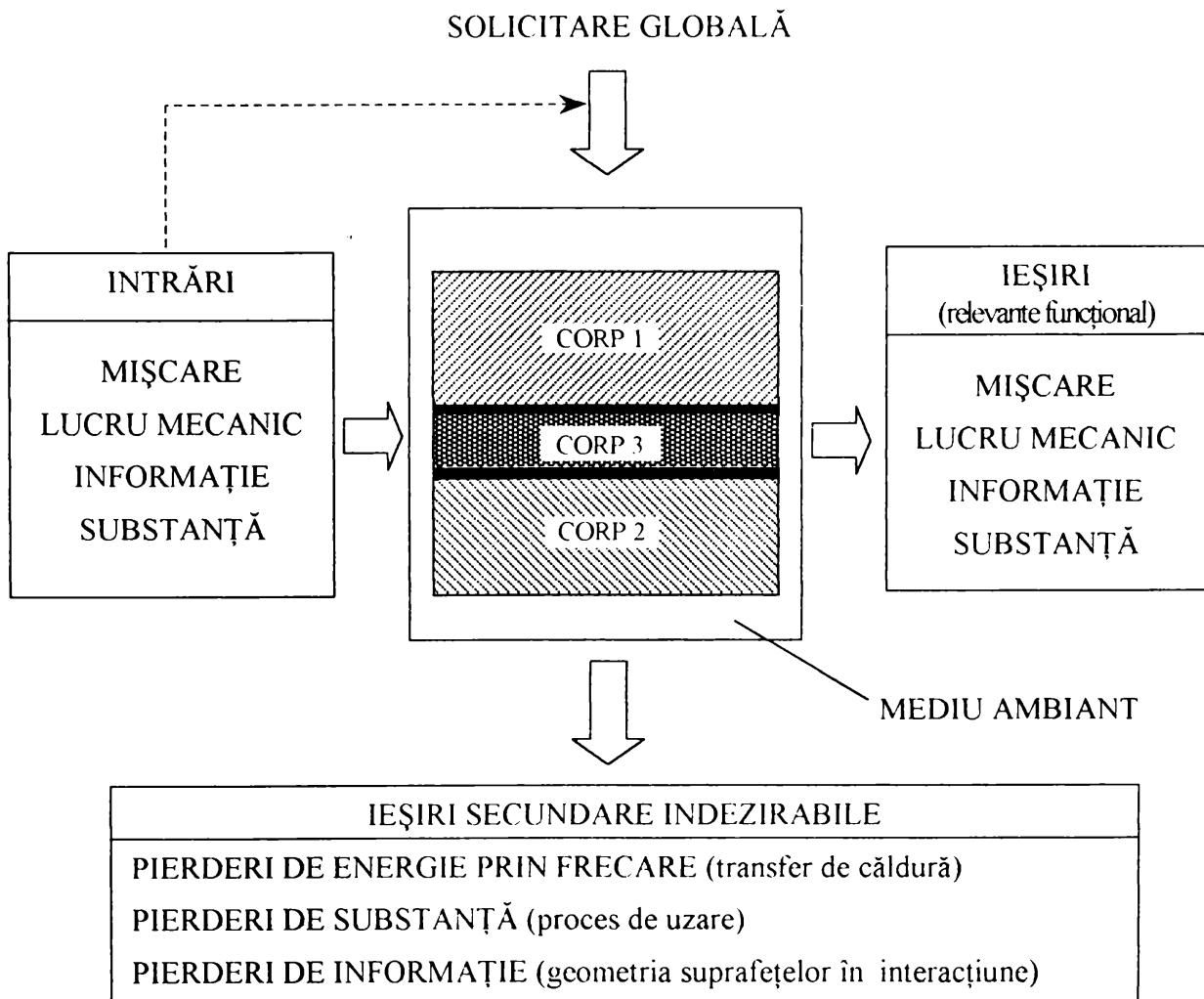


Fig. 2.1 Schema de principiu a unui tribo-sistem

Structura unui tribo-sistem poate fi caracterizată prin mulțimea:

$$S = \{A, P, R\} \quad (2.1)$$

în care A, P, R sunt mulțimi disjuncte, referitoare la:

A - elementele tribo-sistemului:

- corp 1 - corp de bază
- corp 2 - contracorp
- corp 3 - material interpus (lubrifiant și/sau produse ale uzării suprafețelor de contact ale primelor corpuri)

- 4 - mediu ambiant

P - proprietățile elementelor tribo-sistemului:

- specifice substanței elementelor
- specifice geometriei/stării elementelor

R - interacțiunile între elementele tribo-sistemului:

- fenomene de frecare
- fenomene de uzare prin adeziune, abraziune, oboseală de contact, coroziune

În contextul descris este important de remarcat că [B2] [P2]:

- din punct de vedere constructiv, ansamblul de două sau mai multe corpuri în contact, supuse unei mișcări relative sau între care există tendință de mișcare relativă, în cadrul unui tribo-sistem se definește drept cuplă de frecare;

- din punct de vedere funcțional, o cuplă de frecare integrată unui tribo-sistem este reprezentată prin mulțimea corpurilor constitutive (de tip 1, 2 și 3) și a interacțiunilor cinematice, dinamice și tribologice dintre acestea;

- cel de-al treilea corp transmite solicitarea și implicit mișcarea între corpurile constitutive ale cuplei de frecare (1 și 2), acomodând, într-un mod disipativ, diferența de viteză a acestora; elementele constitutive ale corpului 3 pot fi lubrifianți și/sau produse de uzare.

Rezultă evident că orice tribo-sistem are ca element structural fundamental una sau mai multe cuple de frecare, cărora li se atribuie o funcționalitate specifică, realizabilă prin procese determinate de transfer/transformare a energiei, informației și substanței.

Interacțiunea componentelor structurale ale tribo-sistemului este extrem de complexă, are un caracter dinamic și poate fi definită exclusiv probabilistic (statistic).



Pe parcursul interacțiunii, elementele structurale ale tribo-sistemelor pot suferi modificări semnificative, aspect care trebuie avut în vedere în acțiunile de modelare sau evaluare a caracteristicilor acestora.

Prin funcționalitatea structurii sale orice tribo-sistem realizează o transformare necesară a unui set determinat de intrări într-un set specific de ieșiri.

Funcțiile fundamentale care pot fi atribuite tribo-sistemelor sunt [C1] :

1. Controlul mișcării relative a suprafețelor în contact;
2. Transferul de lucru mecanic/energie;
3. Transmiterea informației;
4. Formarea tehnologică a substanței.

Solicitarea globală aplicată tribo-sistemului generează, în condiții date, și efecte secundare, indezirabile, printre care [C1]:

- 1) pierderi de energie prin frecare (cca. 30% din energia produsă în lume);
- 2) pierderi de substanță prin uzarea suprafețelor în interacțiune;
- 3) pierderi de informație corespunzătoare degradării geometriei suprafețelor în interacțiune.

Principalele fenomene de interacțiune ale elementelor constitutive ale tribo-sistemului sunt prezentate în figura 2.2. [Z1]

În ingineria mecanică prezintă o importanță prioritară fenomenele de frecare și uzare ale suprafețelor în interacțiune, care condiționează calitatea și fiabilitatea componentelor și tribo-sistemului, în ansamblu.

La modul general, tribo-sistemele sunt:

- complexe (număr foarte mare de factori de influență, de natură fizico-chimică eterogenă);
- difuze (interacțiuni puternice, de natură condițională și manifestare dinamică între factori);
- slab organizate (evoluție controlată de funcții predominant probabiliste).

În consecință, evoluția și finalitatea tribo-sistemelor sunt determinate, cu o anumită probabilitate, de acțiunea simultană, complexă a unui număr mare de factori și respectiv parametri definatorii pentru condițiile de lucru, structura și funcționalitatea specifică acestor sisteme.

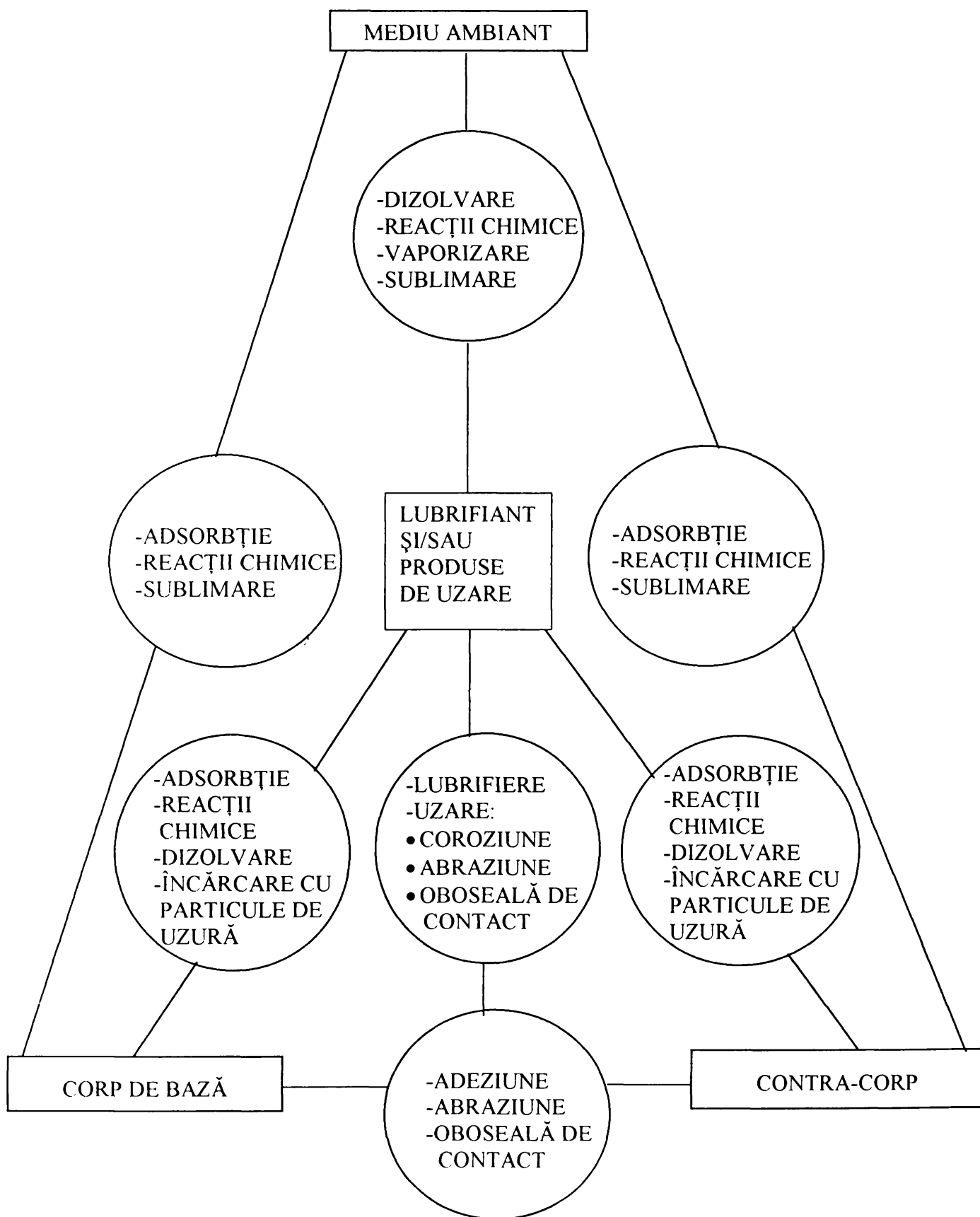


Fig. 2.2 Fenomene de interacțiune ale elementelor tribo-sistemului

Legitățile de cauzalitate, care guvernează funcționarea tribo-sistemelor, pot fi cel mai bine puse în evidență prin particularizarea modelului principal al unui tribo-sistem (figura 2.1), într-o formă adecvată cercetării teoretice și experimentale (figura 2.3) [R1] [C1].

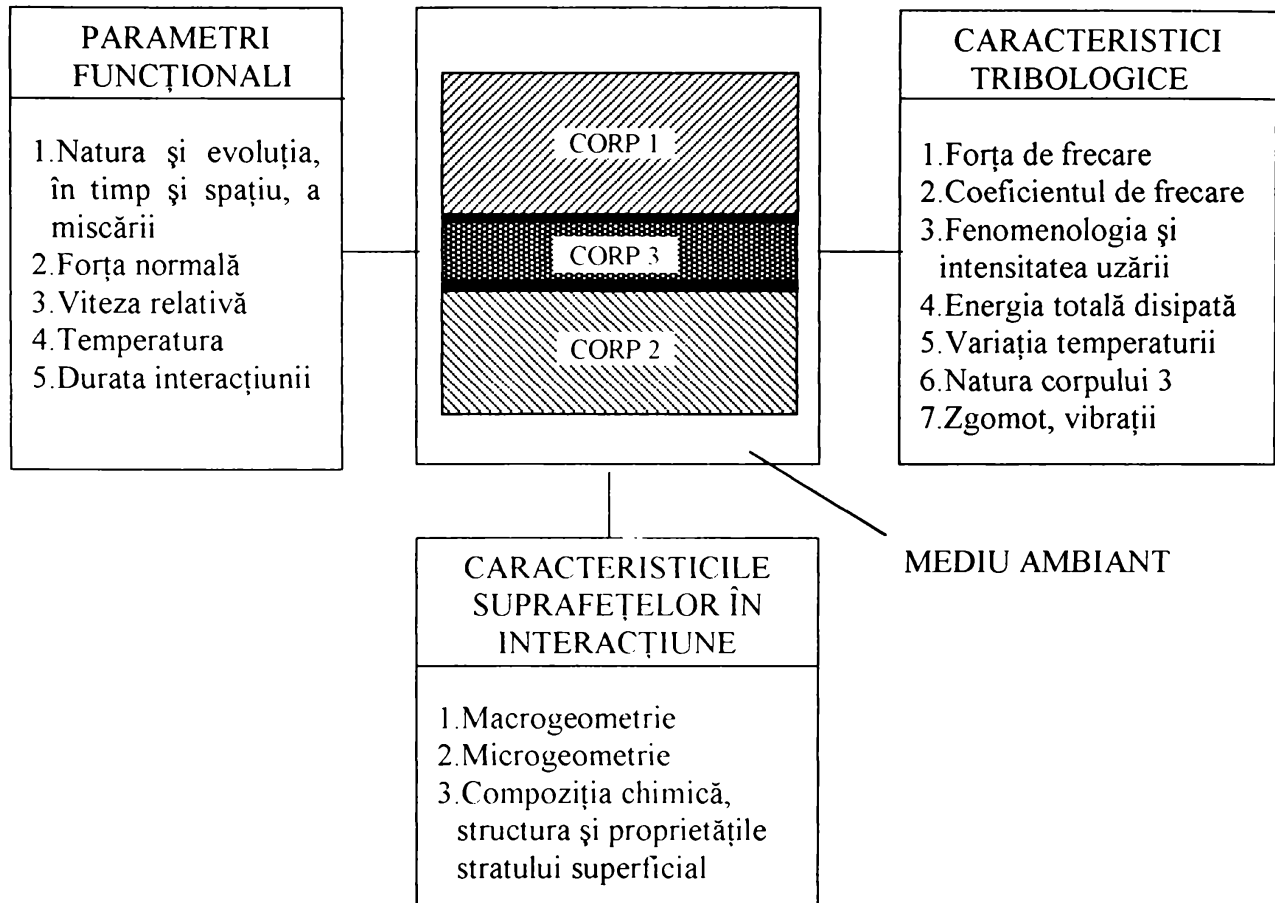


Fig. 2.3 Parametri și caracteristici relevanți într-o cercetare tribologică

Justificarea unei asemenea abordări are ca bază informațiile conținute de tabelul 2.1, [B1], care sintetizează, de o manieră generală, evident simplificată, corelația semnificativă care se manifestă între parametrii determinanți ai condițiilor de lucru (parametri funcționali, intrări), parametrii structurali (stări) și caracteristicile tribologice (ieșiri) ale unui tribo-sistem dat.

Dată fiind complexitatea fenomenologică a proceselor tribologice, în cazuri particulare, interacțiunile relevate în tabelul 2.1 pot avea manifestări diferite de cele menționate, fără ca prin aceasta să fie afectată valabilitatea la nivel de principiu a acestora.

Este important de remarcat că microgeometria suprafețelor în interacțiune are o influență puternică asupra condițiilor de lubrifiere și stării de tensiune din zona contactului și respectiv asupra caracteristicilor tribologice ale sistemului legate de frecare, uzare și încălzire.

Microgeometria suprafețelor exercită, de asemenea, o influență de al doilea ordin de importanță asupra proceselor de coroziune a suprafețelor de contact.

TABELUL 2.1 Corelații posibile între parametri determinanți ai tribo-sistemului [B1]

Nr. crt.	Parametri tribo-sistemului	Corelația dintre parametri		
		Puternică	Mijlocie	Slabă
<i>Condiții de lucru:</i>				
1.	Solicitare	10, 11, 15	5, 8, 12, 13, 14	
2.	Mișcare relativă	1, 10, 15	8	
3.	Viteza mișcării relative	10, 11, 13, 14, 1, 5	8, 11	
4.	Durata interacțiunii	7, 14, 15	8, 13	7
<i>Structură:</i>				
5.	Materialul elementelor	10, 11, 12, 13, 1, 4, 15		
6.	Macrogeometria suprafețelor	10, 11	13, 14, 15	12
7.	Microgeometria suprafețelor	10, 11, 13, 14, 1, 5	12	
8.	Lubrifiant	10, 12, 15	13, 14	11
9.	Mediu ambiant	12, 15	13, 14	11
10.	Condiții de ungere	12, 13, 15	14	5
11.	Stare de tensiune	13, 14, 15	5, 8	1, 7, 13
12.	Coroziune	13, 14	11, 15	
<i>Caracteristici tribologice:</i>				
13.	Parametrii frecării	11, 12, 14, 15	5, 7, 8	10
14.	Parametrii uzării	7	5, 7, 8	10
15.	Temperatura suprafețelor	5, 8, 10, 11, 12	5, 11, 12	10, 13

## 2.2 Principii și tehnici de evaluare a rugozității suprafețelor de contact

### 2.2.1 Rugozitatea suprafețelor - definiții, modalități de abordare, parametri de evaluare, criterii de discriminare

#### 2.2.1.1 Definiții și modalități de abordare

Dintr-un punct de vedere foarte general, topografia suprafețelor de contact este definită uzual [D1] prin mulțimea abaterilor unice sau repetitive, periodice sau aleatoare, anizotrope sau izotrope ale unei suprafețe reale în raport cu suprafața ideală corespunzătoare.

Discriminarea principalelor componente topografice ale suprafețelor reale: erori de formă (1), undulații (2) și rugozități (3), are un caracter convențional, întrucât este dependentă de funcția și gabaritul suprafeței analizate, de tehnologia de prelucrare aplicată și de caracteristicile filtrelor utilizate la evaluarea profilului suprafeței (figura 2.4 [S4]).

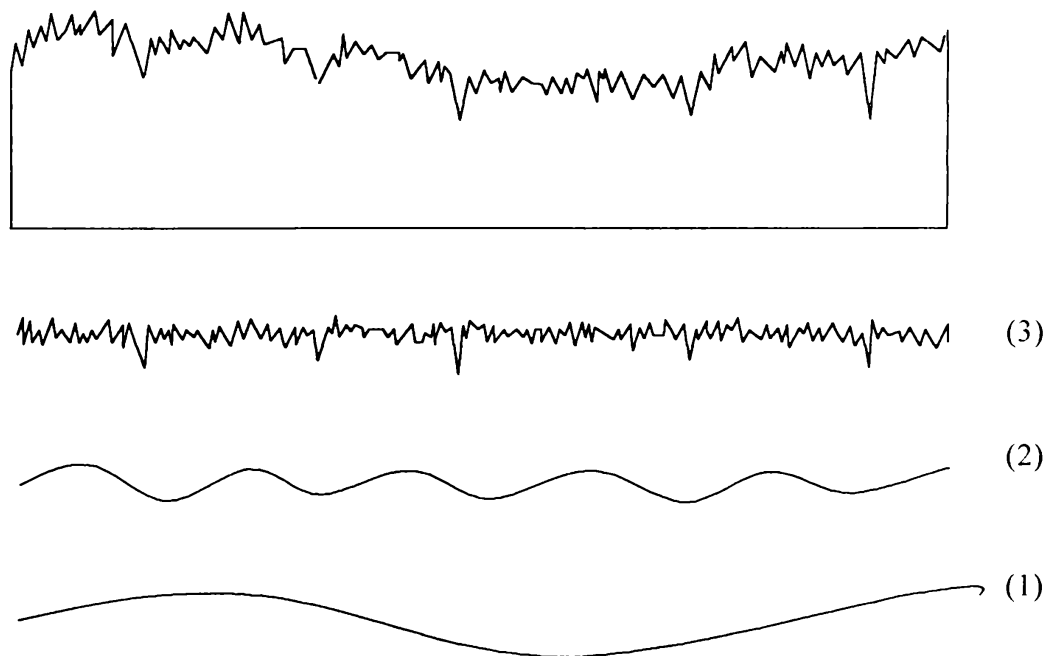
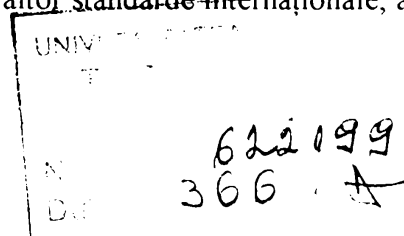


Fig. 2.4 Structura topografiei suprafețelor reale

Din punct de vedere tehnologic, topografia și implicit calitatea geometrică a suprafețelor sunt caracterizate prin abaterile suprafeței reale în raport cu cea definită prin documentația tehnică. Conform STAS 5730/85 [S1], dar și altor standarde internaționale, aceste abateri pot fi:



- abateri geometrice de ordinul 1 (de formă), care reprezintă abateri de la forma ideală a profilului suprafeței (dreaptă, cerc, cilindru, sferă);
- abateri geometrice de ordinul 2 (ondulații), neregularități periodice a căror lungime de undă este mult mai mare (de 50...1000 ori) decât amplitudinea lor;
- abateri geometrice de ordinul 3 (rugozități), care reprezintă succesiuni de proeminențe și goluri relativ fine, având normal raportul pas/înălțime de 1...50;
- abateri geometrice de ordinul 4, în principal, smulgeri de material, fisuri sau pori cu ieșire la suprafață.

În literatura de specialitate [A1], mulțimea abaterilor geometrice de ordinul 2, 3 și 4, inclusiv matricea/motivul rezultat din orientarea specifică a reliefului suprafeței pe o arie relativ restrânsă (pe care abaterile de ordinul 1 să fie neglijabile) se definește drept textura suprafeței considerate.

În principiu, rugozitatea suprafețelor este determinată de tehnologia utilizată pentru generarea și prelucrarea efectivă a acestora și, în mai mică măsură, de mașina unealtă folosită în acest scop. Cel mai des, rugozitatea suprafețelor este rezultatul integrării, mai mult sau mai puțin complexe, a urmelor provocate de depunerea, presarea, ruperea, smulgerea sau expulzarea de material la/de la suprafața supusă prelucrării, sub acțiunea dinamică a elementelor active specifice sistemului tehnologic folosit (de exemplu, scule de presare, ștanțare sau așchiere, granule abrazive, agenți erozivi, etc.).

În prezent, se poate considera că există două modalități principale de abordare a problemei evaluării rugozității suprafețelor [Z6]:

- abordarea clasică, bidimensională, caracterizată prin utilizarea ca principală sursă de informație asupra rugozității a profilului suprafeței, obținut prin palparea acesteia cu instrumente adecvate, în lungul unei direcții date și într-un plan perpendicular pe suprafața ideală corespunzătoare;
- abordarea avansată, tridimensională, având ca principală sursă de informație asupra rugozității, profilul spațial (relieful) suprafeței analizate, pe o arie suficient de mare a acesteia, profil obținut fie prin baleierea secvențială a suprafeței respective pe principiul abordării clasice, fie prin planimetrarea simultană a întregii arii investigate a suprafeței, de exemplu, pe principiul interferometriei optice.

În ambele abordări, semnalul primar corespunzător profilului bi/tri-dimensional al suprafeței supuse prelucrării este convertit prin mijloace informaționale într-un model matematic numeric al rugozității suprafeței, pe baza căruia poate fi extrasă mulțimea parametrilor definatorii ai rugozității respective.

Abordarea clasică este aplicată pe scară industrială, în tehnologiile mecanice sau predominant mecanice tradiționale.

Abordarea avansată constituie atributul cercetării științifice moderne și tinde să fie aplicată pe o scară tot mai largă în evaluarea suprafețelor de rugozitate fină, realizate prin tehnologii optice, electronice și biotehnologii. Această abordare se corelează cu preocupările tot mai intense privind definirea și evaluarea globală a calității pe principiile enunțate de sistemul de standarde DIN-ISO 9000.

### 2.2.1.2 Parametri de evaluare a rugozității suprafețelor de contact

În abordarea clasică, de departe cea mai răspândită în practica industrială actuală, în România sunt standardizați [S1] 22 parametri de rugozitate, parametri direct măsurabili pe înregistrările de profil a suprafețelor, obținute cu instrumente de măsură cu palpator și respectiv parametri statistici, obținuți prin prelucrare matematică.

Din mulțimea parametrilor standardizați, cei mai utilizați în industrie sunt [C3] [Z6]:

- abaterea medie aritmetică a profilului,  $R_a$ :

$$R_a = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |y(x)| \cdot dx \quad (2.2)$$

unde  $y(x)$  este ecuația profilului de rugozitate, iar  $\ell$ -lungimea de referință normată

- abaterea medie pătratică a profilului,  $R_q$ :

$$R_q = \left[ \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} y^2(x) \cdot dx \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

- înălțimea maximă a profilului,  $R_y$ :

$$R_y = y_{P_{\max}} + y_{V_{\max}} \quad (2.4)$$

unde:

-  $y_{P_{\max}}$  este cota celei mai înalte proeminențe, care apare într-un interval de măsurare egal cu lungimea de referință;

-  $y_{V_{\max}}$  este cota celui mai adânc gol, care apare într-un interval de măsurare egal cu lungimea de referință.

- înălțimea neregularităților profilului în zece puncte,  $R_z$  (conform ISO):

$$R_z = \left( \sum_{i=1}^5 y_{Pi} + \sum_{i=1}^5 y_{Vi} \right) / 5 \quad (2.5)$$

unde:

-  $y_{pi}$  sunt cotele celor mai înalte cinci proeminente care apar pe lungimea de referință;

-  $y_{vi}$  sunt cotele celor mai adânci cinci goluri care apar pe lungimea de referință.

- adâncimea de nivelare,  $R_p$ :

$$R_p = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} y(x) \cdot dx \quad (2.6)$$

În raport cu prevederile STAS, pe plan mondial se utilizează, la nivel de standarde și alți parametri, prezentați sintetic în tabelul 2.2, [A1]. Subliniem faptul că acești parametri corespund aceleiași abordări clasice, bazate pe analiza profilurilor de rugozitate obținute cu instrumente de măsură cu palpator.

TABELUL 2.2 Parametri de rugozitate adoptați în diferite țări ale lumii [A1]

Nr. crt.	Parametri de rugozitate	ISO	România	Franța	Germania	Marea Britanie	Rusia	S.U.A.
1	Abaterea medie aritmetică	$R_a$	$R_a$	$R_a$	$R_a$	$R_a$	$R_a$	$R_a$
2	Abaterea medie pătratică		$R_q$		$R_{aq}$			
3	Înălțimea maximă a profilului	$R_y$	$R_y$	$R_t$ $R_{max}$	$R_t$		$R_{max}$	
4	Înălțimea neregularităților profilului în zece puncte	$R_z$	$R_z$		$R_z^*$	$R_z$	$R_z$	
5	Înălțimea medie a profilului			R				
6	Pasul mediu al neregularităților profilului		$S_m$	$A_R$	$A_r$		S $S_m$	
7	Procentajul lungimii portante a profilului		$t_p$	$(T_r)_c$	$t_p$		$t_p$	
8	Adâncimea de nivelare		$R_p$	$R_p$	$R_p$			
9	Înălțimea ondulației		W	W	W			

\* valoarea medie a înălțimii maxime a profilului măsurată pentru cinci intervale consecutive, egale fiecare cu o cincime din lungimea de referință considerată (conform DIN 4776)

Analizând tabelul prezentat, se constată că singurul parametru al profilului adoptat de către toate țările luate în considerare, este abaterea medie aritmetică  $R_a$ . Acest parametru este



încă cel mai utilizat astăzi în evaluarea microgeometriei suprafețelor tehnologice datorită simplității determinării sale pe cale grafică, de pe înregistrarea unui profil de rugozitate. Totuși, faptul că  $R_a$  nu transmite informații asupra configurației neregularităților sau profilului suprafeței cercetate, este un dezavantaj ce nu poate fi neglijat, în condițiile exigențelor tot mai mari impuse măsurării. Astfel, profile de forme diferite pot avea același  $R_a$ , confuziile posibile impunând precizarea naturii procedurii de prelucrare [B4] [K5].

Diversificarea continuă a aplicațiilor tehnologice cu exigențe particulare de rugozitate și dificultățile mari de corelare a parametrilor de rugozitate evaluați pe baza abordării clasice cu comportamentul funcțional al suprafețelor de contact, au determinat apariția și utilizarea de noi și noi parametri de rugozitate (peste 100 la ora actuală [S4]), majoritatea având o aplicabilitate limitată.

Un exemplu reprezentativ pentru situația descrisă este cel al “familiei” de parametri de rugozitate  $R_k$  [K1] [B4]:

$$R_K = \{R_K, R_{PK}, R_{VK}, M_{r1}, M_{r2}\} \quad (2.7)$$

ilustrați, corespunzător DIN 4776, în figura 2.5.

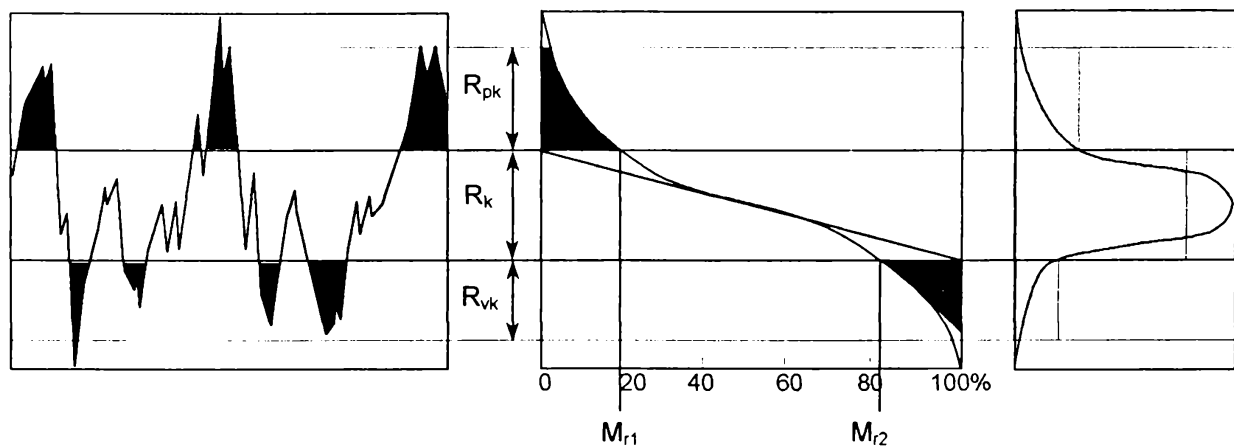


Fig. 2.5 Parametri de rugozitate din familia  $R_k$

Acești parametri sunt adecvați descrierii suprafețelor cu rugozitate multistrat, obținute prin netezirea fină (pentru capacitate portantă ridicată), a unei suprafețe cu rugozitate primară relativ grosieră (pentru capacitate mărită de retenție a lubrifianului).

În aceeași măsură, introducerea tehnicilor de calcul automat și mai ales a microprocesoarelor, au avut ca efect completarea standardelor de rugozitate existente, corespunzător unor funcții matematice aplicate anterior în analiza statistică a semnalului. Astfel, Norman S. Eiss și Jeffrey H. Warren [C2] au propus introducerea unei funcții densitate de repartiție, notată cu  $p(z)$ , definită prin probabilitatea ca ordonata profilului de rugozitate

(pe axa  $z$ ), să fie cuprinsă între două valori  $z_1$  și  $z_2$ , foarte apropiate una de cealaltă. De aici, s-au obținut cu ușurință momentele de ordin crescător ale acestei funcții, care se pot identifica cu parametrii statistici ai rugozității, cum ar fi abaterea medie aritmetică sau procentajul portant a profilului.

Analiza statistică a distribuției spațiale a neregularităților profilului a permis definirea de noi parametri bazați pe funcția de autocorelație. Astfel, s-a comparat forma profilului cu ea însăși decalată cu o anumită distanță: cu cât coincidența între cele două forme de profil este mai bună cu atât funcția de autocorelație normată este mai apropiată de 1. O configurație oscilatorie a curbei reprezentative a funcției de autocorelație normată se echivalează cu prezența unei rugozități periodice (rizuri, striuri). Mai mult chiar, transformata Fourier a funcției de autocorelație, numită funcția densitate spectrală de putere, furnizează o valoare medie pătratică a lungimii de undă a profilului de rugozitate.

Unii cercetători [C2] [D1] [R3] [T2] au utilizat și alți parametri de rugozitate, cum ar fi panta profilului și raza de curbură a neregularităților profilului, prin evaluarea derivatelor de ordinul 1 și 2 a curbei profilului sau prin numărul de intersecții a liniei medii cu profilul suprafeței. Distanța între punctele de intersecție a profilului cu linia medie poate fi mediată, obținându-se o valoare medie a lungimii de undă a profilului.

Proliferarea necoordonată a numărului parametrilor de rugozitate, stimulată și de progresele în domeniul tehnicilor de măsurare a rugozității, a generat numeroase discuții privind oportunitatea și eficiența unora sau altora dintre parametrii adoptați [C3] [D1] [K5] [N3] [Z12], în diferite situații concrete. În situația creată, reacții tipice [C3] [M1] și-au propus ca obiective conjuncturale, fie eliminarea parametrilor redondanți într-o aplicație dată (prin punerea în evidență a corelațiilor existente între parametri), fie introducerea de noi parametri, globalizați, adecvați unor suprafețe cu funcționalitate specifică.

Astfel, de exemplu, în [M1] se demonstrează că profilul de rugozitate al suprafeței cilindrilor motoarelor cu ardere internă, poate fi descris utilizând exclusiv patru parametri ( $R_p$ ,  $R_t$ ,  $R_k$ ,  $R_m$  și pasul mediu al golurilor adânci), parametri independenți, ușor de determinat și cu o interpretare geometrică clară.

În lipsa unei soluții de fond pentru situația creată prin abordarea clasică 2-D a evaluării rugozității suprafețelor, mulțimea parametrilor de rugozitate fundamentali, capabili să asigure o definiție completă a microgeometriei suprafețelor și, pe această bază, generarea tehnologică a unor suprafețe cu parametri prestabiliți, este prezentată, într-o viziune modernă, în figura 2.6 [K3].

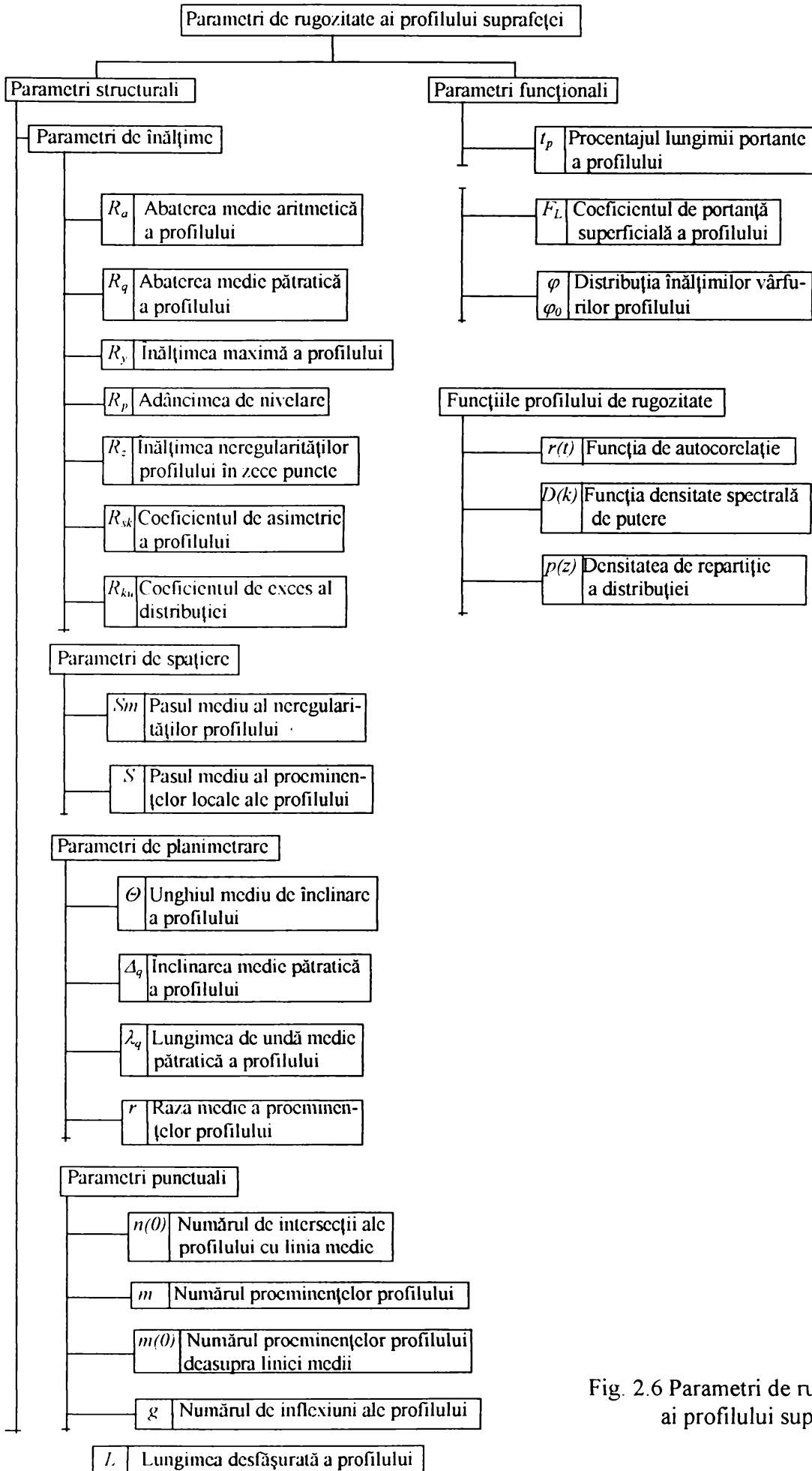


Fig. 2.6 Parametri de rugozitate ai profilului suprafeței [K3]

Devine tot mai evident că rezolvarea problemei evaluării rugozității suprafețelor poate fi obținută exclusiv prin abordare avansată 3-D [M1] [S4], singura capabilă să ofere o imagine completă a topografiei suprafețelor reale.

Pentru aceasta, în paralel cu dezvoltarea noilor tehnici de măsurare 3-D, este în curs de elaborare o nouă gamă de parametri cantitativi și implicit un nou standard internațional pentru definirea și evaluarea rugozității. De pe acum este însă clar [M1] că valorile numerice ale parametrilor 3-D vor diferi de valorile parametrilor 2-D corespunzători, diferențele fiind mai mici pentru parametrii obținuți prin mediere și semnificativ mai mari pentru ceilalți parametri.

Un document preliminar, elaborat sub egida Uniunii Europene, care cuprinde 13 parametri fundamentali, necesari și suficienți pentru evaluarea numerică 3-D a rugozității suprafețelor a fost dată publicității și este reprodus în tabelul 2.3 [S4].

TABELUL 2.3 Parametri de rugozitate în abordare 3-dimensională

Parametri de amplitudine	
$S_a$	Abaterea medie pătratică a profilului
$S_z$	Înălțimea neregularităților profilului în zece puncte
$S_{Sk}$	Coefficientul de asimetrie a profilului suprafeței
$S_{ku}$	Coefficientul de exces al distribuției
Parametri de spațiere	
$S_{ds}$	Densitatea vârfurilor suprafeței
$S_{tr}$	Raportul aspectului texturii suprafeței
$S_{td}$	Orientarea texturii suprafeței
Parametri hibridi	
$S_{Ne}$	Panta medie pătratică a suprafeței
$S_{sc}$	Media aritmetică a vârfurilor suprafeței
$S_{dr}$	Raportul ariei desfășurate a suprafeței
$S_{al}$	Lungimea de autocorelație minimă
Parametri funcționali de portanță și lubrifiere	
$S_{bi}$	Indicele portanței suprafeței
$S_{ci}$	Indicele de retenție a lubrifiantului la nivelul miezului rugozității
$S_{vi}$	Indicele de retenție a lubrifiantului la nivelul golurilor rugozității

Operațiile de filtrare necesare separării rugozității, undulațiilor și abaterilor de formă, se aplică în acest caz modelului numeric al suprafeței reale și nu semnalului primar al măsurării, așa cum se face la măsurarea 2-D.

Măsurarea cantitativă 3-D reală a suprafețelor a determinat o dezvoltare explozivă a aplicațiilor, de la tradiționala monitorizare 2-D a calității suprafețelor uzinate, la tehnici avansate de măsurare a suprafețelor componentelor optice și microelectronice. O dezvoltare relativ recentă a analizei 3-D a suprafețelor s-a făcut în domeniul bioingineriei, unde topografia suprafețelor de contact este de extremă importanță, de exemplu, pentru asamblarea elementelor protezelor ortopedice, pentru etanșarea valvelor cardiace, pentru controlul calității lentilelor de contact și în studiul patologiei cancerului de piele [S4]. În toate aceste aplicații, este semnificativă capacitatea abordării 3-D avansate de a anula practic orice alterare sau contaminare a suprafețelor investigate. În acest context trebuie subliniat și faptul, demonstrat cu pregnanță de toate exemplele citate mai sus, că principiile și tehnicile specifice abordării 3-D, probează o maximă eficiență la evaluarea rugozității suprafețelor fine și eventual moi, caracterizate printr-o distribuție aleatoare și izotropă a microneregularităților.

În concluzie, se remarcă faptul că tendințele de evoluție descrise ale evaluării parametrilor de rugozitate sunt marcate de:

- necesitatea trecerii de la indicatori de înălțime și de spațiere a neregularităților suprafeței la indicatori ce definesc forma concretă a neregularităților;

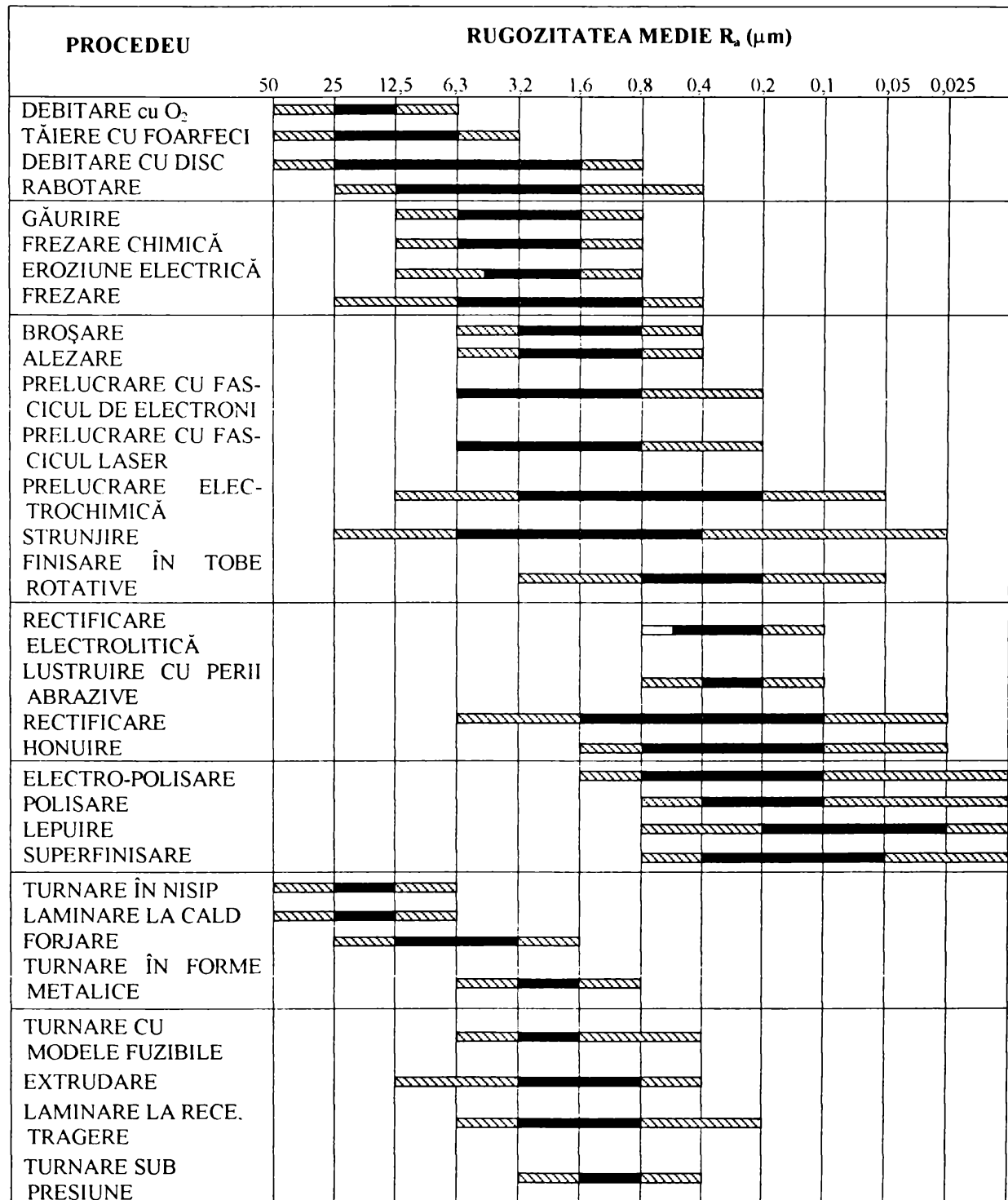
- necesitatea trecerii de la indicatori singulari, individuali ai microgeometriei la indicatori globali;

- necesitatea trecerii de la indicatori locali la indicatori integrali, definiți și raportați pe arii tot mai mari ale suprafețelor cercetate [Z2].

Privite în ansamblu, tendințele enumerate reflectă în fapt, tranziția treptată de la abordarea clasică, 2-D, la abordarea avansată, 3-D și respectiv de la parametri de rugozitate intrinseci (derivați din necesitatea descrierii microgeometriei ca atare, independent de funcționalitatea suprafețelor), la parametri extrinseci (capabili să descrie microgeometria ca structură funcțională, aparținând unui sistem constructiv-tehnologic dat), singurii capabili să definească comportamentul funcțional al suprafețelor de contact.

### 2.2.1.3 Criterii de discriminare a rugozității suprafețelor de contact

O imagine orientativă a posibilităților oferite de tehnologiile de prelucrare actuale din punctul de vedere al rugozității suprafețelor generate, caracterizată prin parametrul  $R_a$ , este redată în figura 2.7. [A1]



Legendă: [Hatched] aplicații mai puțin frecvente; [Solid black] aplicații uzuale (medii)

Fig. 2.7 Rugozitatea suprafețelor obținute prin cele mai uzuale procedee tehnologice [A1]

Tendința existentă pe plan mondial de realizare a unor suprafețe de contact cu comportament superior la frecare și uzare are la bază [T2] [N1] procedee tehnologice de netezire fină a suprafețelor (honiuire, lepuire, rodare cu abrazivi fini etc.), precum și, mai nou, procedee erozive, care concurează competitiv cu primele, mai ales la materiale greu prelucrabile, pentru suprafețe complexe din punct de vedere geometric, în producția de unicate și serie mică. În aceste condiții, generarea unor suprafețe cu rugozitate omogenă și izotropă, având caracteristici optime din punct de vedere al frecării și uzării, este posibilă fie prin procedee mecanice de rectificare, cu particule abrazive legate sau libere, susținute de o cinematică complexă a mișcărilor relative sculă - obiect de prelucrat, fie prin procedee de prelucrare prin eroziune, (ex. eroziune electrică, electro-chimică, laser etc.), cu o cinematică incomparabil mai simplă. Pentru referință, în figura 2.8 se prezintă principalele tipuri de microgeometrii ale suprafețelor în funcție de caracterul distribuției spațiale a neregularităților. [T1]

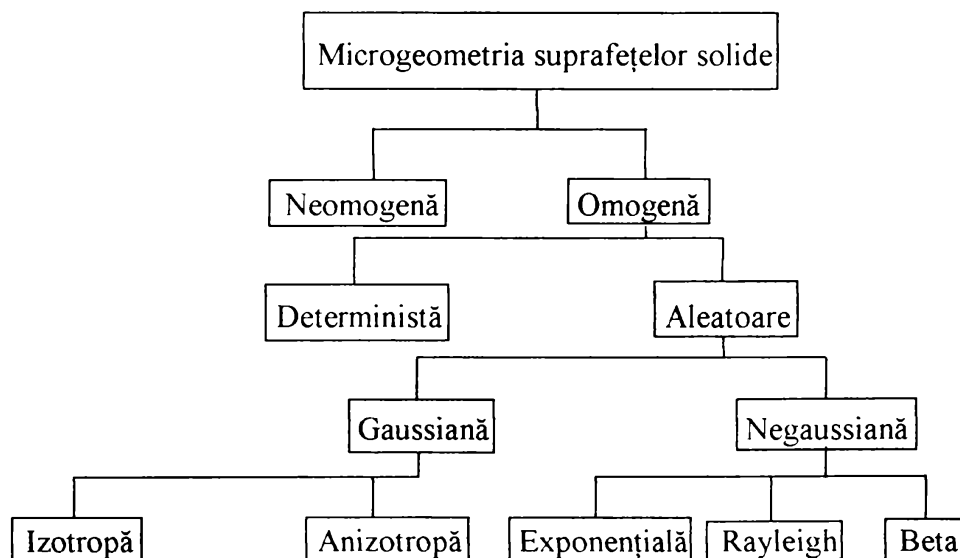


Fig.2.8 Caracterizarea microgeometriei suprafețelor solide destinate cuplelor de frecare


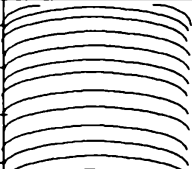
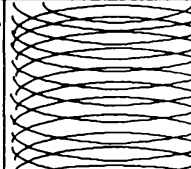
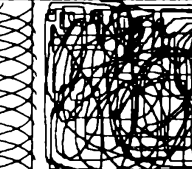

În mulțimea suprafețelor de contact care intervin în cuplele de frecare, un caz aparte, deosebit de actual, îl reprezintă suprafețele generate prin eroziune electrică. Dintr-un punct de vedere foarte general, microgeometria acestor suprafețe poate fi caracterizată prin omogenitate macroscopică, prin predominanța caracterului aleator al distribuției spațiale a microneregularităților (ponderea componentei aleatoare este de circa  $0,85 \div 0,97$  față de  $0,6 \div 0,92$  specifică suprafețelor rectificate, cu atât mai mare cu cât suprafețele sunt mai fine), prin caracterul normal (gaussian) al distribuției ordonatelor profilului de rugozitate și prin distribuția izotropă a profilelor și respectiv parametrilor de rugozitate [N1] [N2].



O imagine intuitivă a locului texturii suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică în mulțimea suprafețelor uzuale este prezentată în tabelul 2.4.[C2]

Cercetări de detaliu asupra cărora se va reveni mai târziu relevă și particularități de formă ale profilului de rugozitate și implicit ale curbei de portanță a suprafețelor generate prin eroziune electrică. Dincolo de aspectele pur geometrice, suprafețele prelucrate prin eroziune electrică prezintă și o microstructură specifică a stratului superficial caracterizată, în general, printr-o creștere a durtății în raport cu substratul-material de bază, consecință a unor procese “on line” de aliere și călire greu controlabile.[A2]

TABELUL 2.4 Corelația procedeu de prelucrare-textura suprafeței

Tipul micro-geometriei	striuri rectilinii	striuri sub formă de arc	striuri sub formă de arc, încrucișate	striuri multi-direcționate	microgeometrie aleatoare
<b>Procedeu de prelucrare</b>	rabotare; strunjire; alezare; frezare cilindrică; rectificare plană; polisare.	strunjire frontală; frezare frontală.	frezare frontală; rectificare frontală;	polisare	electroeroziune, alicare, polisare.
<b>Forma probei</b>	plană, cilindrică, convexă, concavă.	plană	plană	plană, cilindrică, convexă.	plană, cilindrică, convexă.
<b>Reprezentarea stilizată a texturii suprafeței</b>					

Pe măsura dezvoltării industriale a procedeelor de prelucrare prin eroziune și în particular prin eroziune electrică, au apărut preocupări privind discriminarea suprafețelor cu rugozitate izotropă, în raport cu suprafețele cu rugozitate anizotropă, specifică așchierii.

O primă abordare a acestei probleme, prezentată în [K4], a introdus drept criterii de discriminare lungimea de autocorelație  $\lambda_{0,5}$ ,  $f(\varphi)$  și funcția de intercorelație  $R(\lambda) = f(\varphi)$ , determinate pentru două profile de rugozitate radiale, deplasate cu unghiul  $\varphi$ , ales corespunzător, ale unei suprafețe considerate izotrope. Pe această cale, a fost probată experimental izotropia texturii suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică, mai accentuată la suprafețe cu rugozitate fină și la unghiuri de deplasare  $\varphi$  relativ mici.



O analiză mai completă [H1] a introdus nu mai puțin de 6 criterii de discriminare, printre care:

- raportul lungimilor de autocorelație  $\lambda_{0,5}$ , minimă și maximă, ale profilelor de rugozitate, estimate după două direcții rectangulare, alese adecvat, ale suprafeței investigate; pentru suprafețe ideal izotrope, acest raport are valoarea numerică 1;

- legea de variație a parametrului de rugozitate  $R_a$ , determinat după o mulțime de profile radiale arbitrare ale suprafeței; în coordonate polare, pentru suprafețe ideal izotrope, legea considerată se reprezintă printr-un cerc;

- corelația valorilor numerice ale coeficienților de asimetrie  $R_{sk}$  și de exces  $R_{ku}$ , calculați pe baza momentelor specifice de ordinul 3 și 4 ale profilelor suprafețelor investigate.

Câteva din rezultatele obținute în discriminarea suprafețelor realizate prin diferite tehnologii de prelucrare cu ajutorul criteriilor de mai sus, sunt prezentate în figurile 2.9, 2.10 și 2.11 [H1].

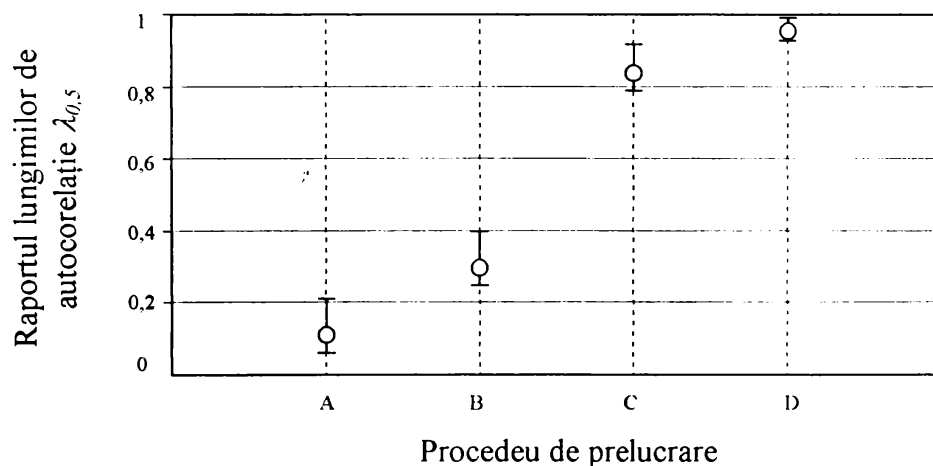


Fig. 2.9 Influența procedurii de prelucrare a suprafețelor asupra raportului lungimilor de autocorelație  $\lambda_{0,5}$

A – rectificare; B – șlefuire cu bandă abrazivă; C – sablare; D – eroziune electrică [H1]

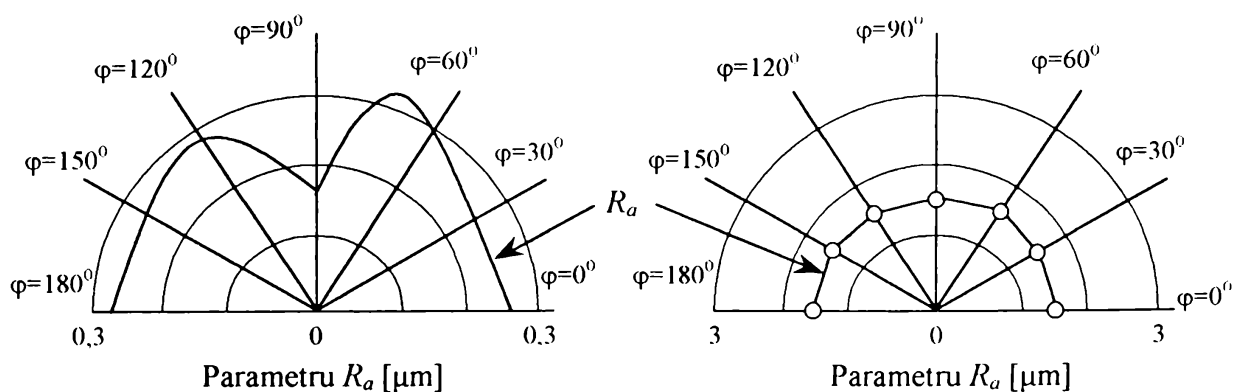


Fig. 2.10 Dependența parametrului de rugozitate  $R_a$  de direcția radială de evaluare [H1]

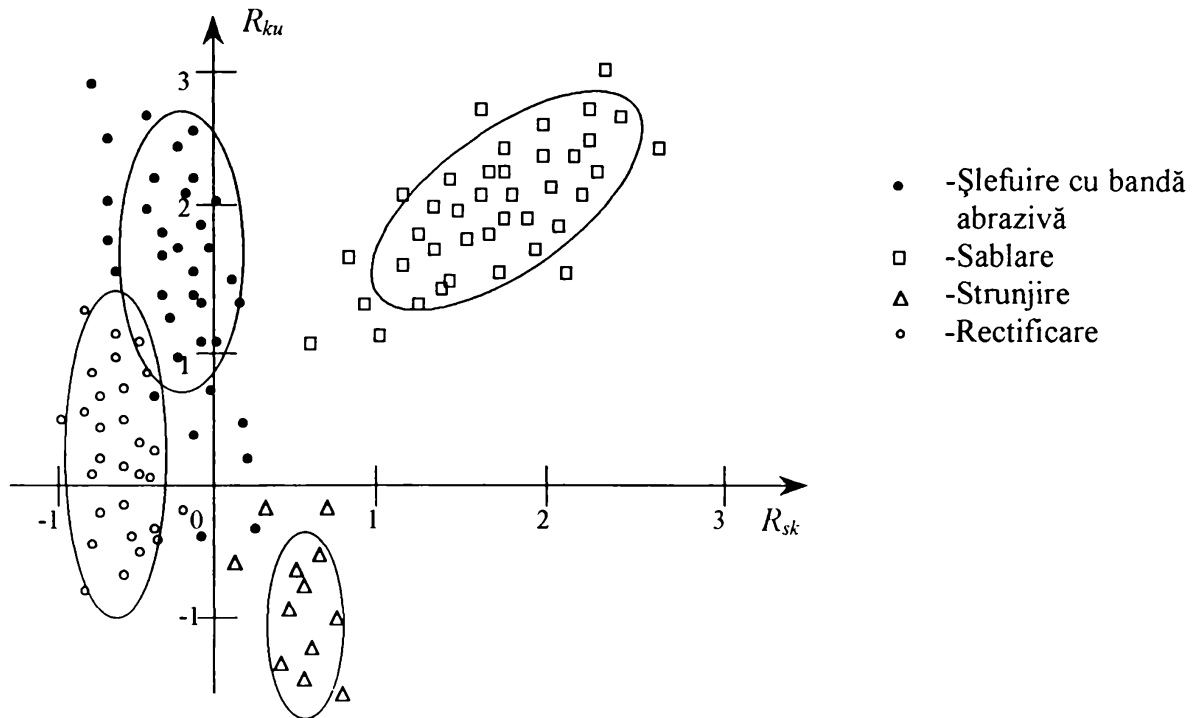


Fig. 2.11 Discriminarea procedeelor de prelucrare a suprafețelor pe baza corelației coeficienților  $R_{ku}$  și  $R_{sk}$  [H1]

Toate rezultatele reproduse confirmă eficacitatea criteriilor de discriminare propuse pentru suprafețe obținute prin diferite tehnologii de prelucrare. În aceeași măsură, este confirmată și natura izotropă a texturii suprafețelor prelucrate prin eroziune, în particular prin sablare și prin eroziune electrică.

## 2.2.2. Estimarea teoretică a parametrilor de rugozitate a suprafețelor de contact

### 2.2.2.1 Aplicații ale teoriei funcțiilor aleatoare

În procesul de generare a microgeometriei suprafețelor de contact, așa cum s-a arătat la 2.2.1.3, în funcție de tehnologia aplicată, intervin influențe fizico-chimice și cinematice, care fac ca rugozitatea, în ansamblu și la nivelul mulțimii parametrilor de înălțime, lățime, curbura și periodicitate, să fie, în cele mai multe cazuri, de natură aleatoare [T2].

În funcție de condițiile concrete, profilul de rugozitate ale suprafețelor de contact poate fi caracterizat prin geometria sa plană (bidimensională) sau geometria sa spațială (tridimensională).

Cel mai răspândit punct de vedere actual, în acest domeniu, are ca bază considerarea punctelor unei suprafețe de contact ca una sau mai multe populații statistice, ceea ce permite evaluarea parametrilor de rugozitate prin aplicarea teoriei funcțiilor aleatoare.

Această aplicație, dezvoltată în ultimii douăzeci de ani, tratează în principal înălțimea profilului de rugozitate și abordează tangențial caracterizarea distribuției spațiale a neregularităților acestuia (lungime de undă/frecvență, etc.).

Tehnicile de prelucrare a semnalelor informaționale, folosind metode cum ar fi analiza Fourier sau metoda autocorelației, au permis și abordarea noțiunii de distribuție spațială a caracteristicilor microgeometrice și deci evaluarea mai fină a acestora.

Pentru a se putea realiza prelucrarea statistică a datelor experimentale, se presupune că a fost posibilă obținerea unui semnal corespunzător microgeometriei suprafeței studiate și deci a unei imagini cuantificate a rugozității [D1] [D2].

#### 2.2.2.1.1. Analiza distribuției înălțimii neregularităților profilului

Fie  $z(x)$  înălțimea profilului de rugozitate în raport cu linia medie a profilului, o variabilă aleatoare cu o lege de distribuție normală (Gauss), pentru cele mai multe procedee tehnologice, cu o lege de distribuție exponențială sau Rayleigh pentru câteva procedee tehnologice speciale. Această mărime este cuprinsă într-un interval de extreme notat  $[a, b]$ , măsurate în raport cu linia medie a profilului. Se presupune  $a < b$  [D2].

Mulțimea punctelor  $z(x)$  ale unui profil constituie o populație ale cărei caracteristici urmează a fi prelucrate prin calculul statistic (figura 2.12).

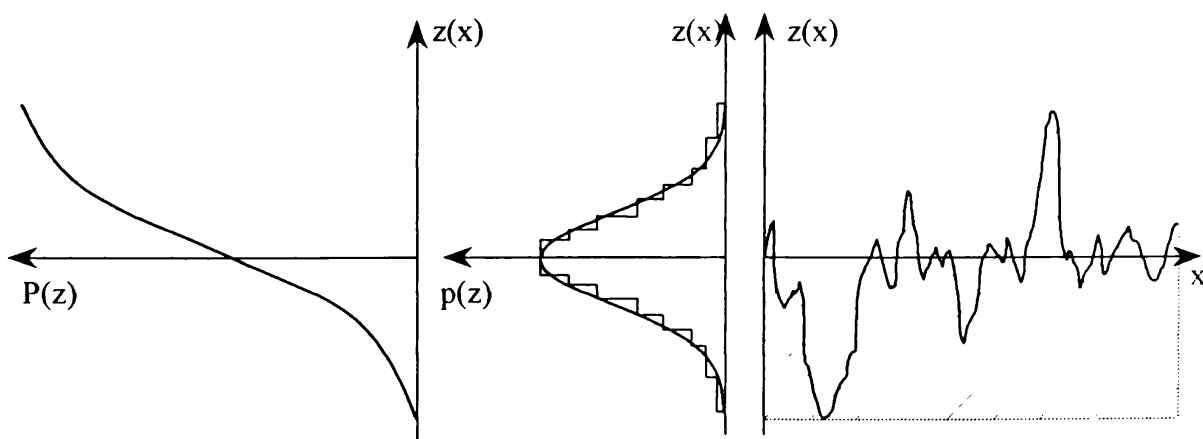


Fig.2.12 Funcția de repartiție  $P(z)$  și densitatea de repartiție  $p(z)$  corespunzătoare profilului de rugozitate  $z(x)$  [D2]

Fie:

$$\text{prob} (Z < z (x) < Z+dz)$$

probabilitatea ca un punct al profilului să fie cuprins între două valori,  $Z$  și  $Z+dz$ . Se definește [D2]:

$$\text{prob} (Z < z (x) < Z +dz) = p(z) \cdot dx \quad (2.8)$$

unde:  $p(z)$  este densitatea de repartiție a punctelor profilului de rugozitate.

Funcția de repartiție a punctelor profilului de rugozitate, notată cu  $P(z)$ , este probabilitatea ca un punct al profilului să fie situat deasupra unei anumite înălțimi considerate și se definește astfel [D2]:

$$P(z) = \text{prob} (z (x) < Z) = \int_a^b p(z) \cdot dz \quad (2.9)$$

Derivata funcției de repartiție  $P(z)$  este densitatea de repartiție  $p(z)$ .

Analiza caracteristicilor statistice ale înălțimii profilului de rugozitate se realizează cu ajutorul momentelor  $m_q$ , de ordinul  $q$ , definite astfel [D2]:

$$m_q = \int_a^b z^q \cdot p(z) \cdot dz \quad (2.10)$$

Aceste momente oferă numeroase informații asupra microgeometriei suprafeței studiate (centrului de grupare, împrăștierii, simetriei și aplatizării variabilei aleatoare). Astfel, pentru diferite valori ale lui  $q$ , se obține:

$$* q = 0 \Rightarrow m_0 = \int_a^b p(z) \cdot dz = \text{prob} (z (x) < b) = 1; \quad (2.11)$$

$$* q = 1 \Rightarrow m_1 = \int_a^b |z| \cdot p(z) \cdot dz; \quad (2.12)$$

unde  $m_1$  reprezintă media aritmetică absolută a populației considerate, în cazul analizat, a înălțimii rugozității,  $R_a$ . Dacă variabila  $z$  este centrată,  $m_1=0$ .

$$* q = 2 \Rightarrow m_2 = \int_a^b z^2 \cdot p(z) \cdot d(z); \quad (2.13)$$

unde  $m_2$  este o măsură a împrăștierii sau concentrării populației și este cunoscut sub denumirea de dispersie ( $D$ ).

Cunoscând valoarea lui  $D$ , se poate deduce abaterea medie pătratică:

$$R_q = \sqrt{D} \quad (2.14)$$

$$* q = 3 \Rightarrow m_3 = \int_a^b z^3 \cdot p(z) \cdot dz; \quad (2.15)$$

Presupunându-se omogene mărimile  $m_3$  și  $R_q^3$ , se poate defini coeficientul de asimetrie al profilului în raport cu linia medie,  $R_{sk}$  (skewness), astfel [D2]:

$$R_{sk} = m_3 / R_q^3 \quad (2.16)$$

La nivel de principiu pot fi considerate trei cazuri tipice, și anume, (figura 2.13):

$R_{sk} < 0$  : profilul conține mai multe proeminente decât goluri;

$R_{sk} = 0$  : profilul este simetric în raport cu linia medie;

$R_{sk} > 0$  : profilul conține mai multe goluri decât proeminente.

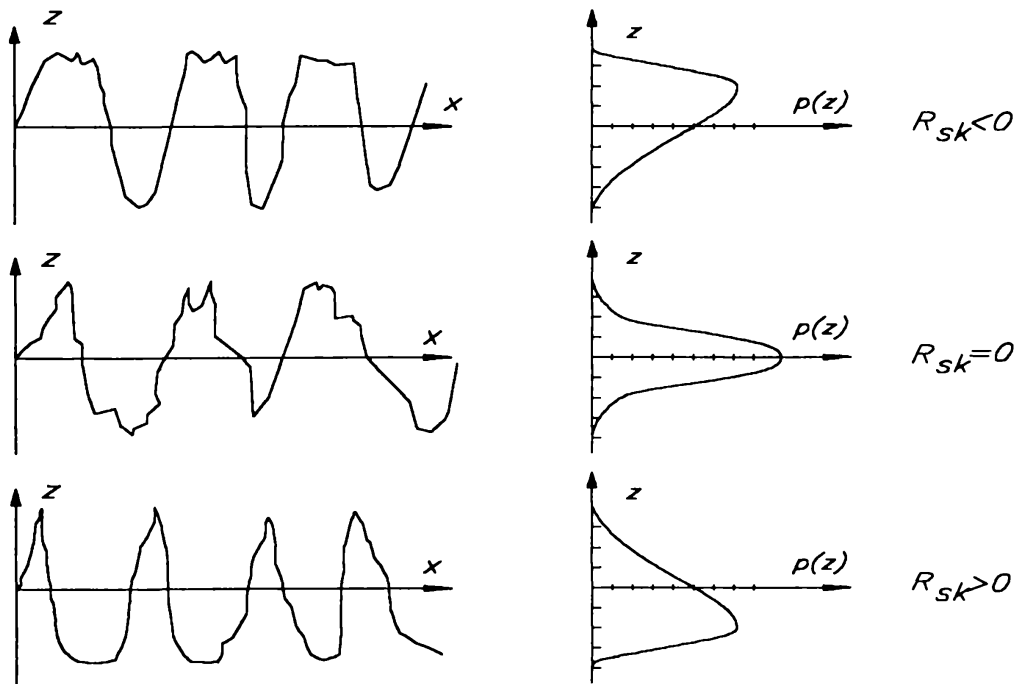


Fig.2.13 Influența asimetriei profilului asupra alurii densității de repartiție [D2]

$$* q = 4 \Rightarrow m_4 = \int_a^b z^4 \cdot p(z) \cdot dz; \quad (2.17)$$

Prin analogie cu cazul precedent, se poate defini coeficientul de exces al distribuției considerate în raport cu o distribuție luată ca bază,  $R_{ku}$  (kurtosis):

$$R_{ku} = m_4 / R_q^4 \quad (2.18)$$

De regulă, se ia ca bază distribuția gaussiană, caz în care  $R_{ku} = 3$ . Astfel, dacă:

$R_{ku} > 3$  : distribuția este extinsă;

$R_{ku} = 3$  : distribuția este gaussiană;

$R_{ku} < 3$  : distribuția este restrânsă (figura 2.14).

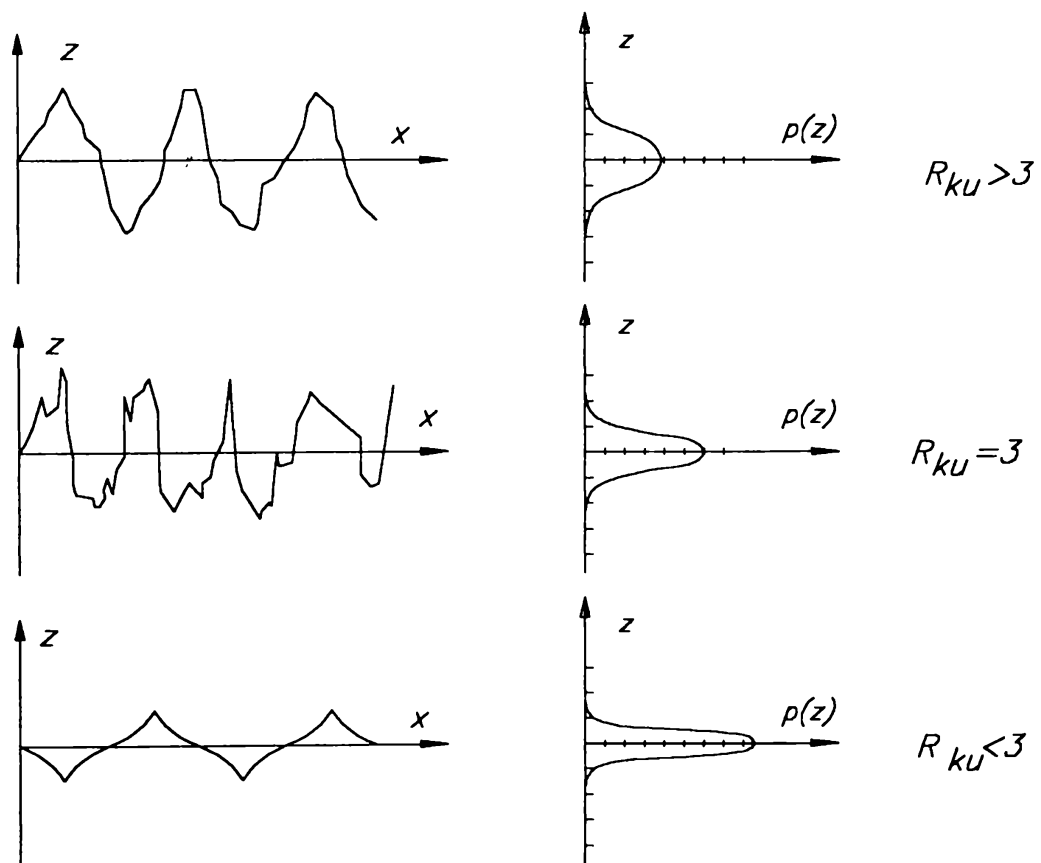


Fig.2.14 Influența valorii lui  $R_{ku}$  asupra alurii densității de repartiție [D2]

În afara parametrilor de rugozitate deduși mai sus prin prelucrarea statistică a măsurătorilor, aplicând același principiu se pot redefini parametrii geometrici uzuali, standardizați [D2].

Astfel :

-abaterea medie aritmetică a profilului:

$$R_a = \int_a^b |z| \cdot p(z) \cdot dz \quad (2.19)$$

-înălțimea maximă a profilului:

$$R_y = b - a \quad (2.20)$$

-adâncimea de nivelare:

$$R_p = b \quad (2.21)$$

-procentajul lungimii portante a profilului la înălțimea  $z$  (figura 2.15):

$$(t_p)_z = 1 - P(z) = 1 - \int_a^z p(z) \cdot dz \quad (2.22)$$

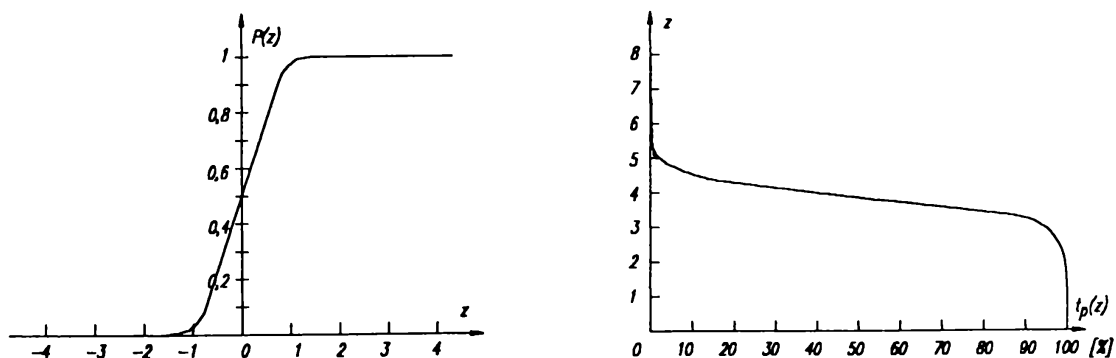


Fig.2.15 Funcția de repartiție și curba de portanță [D2]

Totuși și această prelucrare statistică este insuficientă pentru o caracterizare completă a microgeometriei suprafețelor, deoarece nu ține cont de caracteristicile neregularităților în direcția longitudinală a profilului. Este necesară o analiză adecvată a lungimilor de undă ale profilului [D2].

### 2.2.2.1.2 Analiza distribuției spațiale a neregularităților profilului

Această analiză utilizează, în general, două tipuri de funcții și anume funcția de autocovarianță/autocorelație și respectiv funcția densitate spectrală de putere [D2].

Primul tip de funcție are rolul de a determina gradul de corelație ce există între două puncte ale profilului, situate la o distanță  $t$  unul față de celălalt.

Autocovarianța  $R(t)$ , se definește prin estimarea matematică a produsului  $z(x) \cdot z(x+t)$  [D2]:

$$R(t) = E[z(x) \cdot z(x+t)] \quad (2.23)$$

sau:

$$R(t) = [1/(\ell - t)] \cdot \int_0^{\ell-t} z(x) \cdot z(x+t) \cdot dx \quad (2.24)$$

unde:  $l$  - lungimea de referință normalată

Dacă  $t = 0$ ,  $R(0) = R_q^2$ .

Se poate defini funcția de autocorelație  $r(t)$ , ca funcția normalată a autocovarianței [D2] și anume :

$$r(t) = R(t)/R_q^2; r(0) = 1 \quad (2.25)$$

O imagine intuitivă a corespondenței dintre profilul de rugozitate și funcția de autocorelație este reprezentată în figura 2.16.

Funcția densitate spectrală de putere permite o apreciere a periodicității neregularităților profilului și în același timp, o reprezentare a profilului printr-o sumă de curbe sinusoidale.

Fie  $Z(k)$  transformata Fourier spațială a lui  $z(x)$ . Se poate scrie [D2]:

$$[z(x)] = Z(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} z(x) \cdot \exp(ikx) \cdot dx \quad (2.26)$$



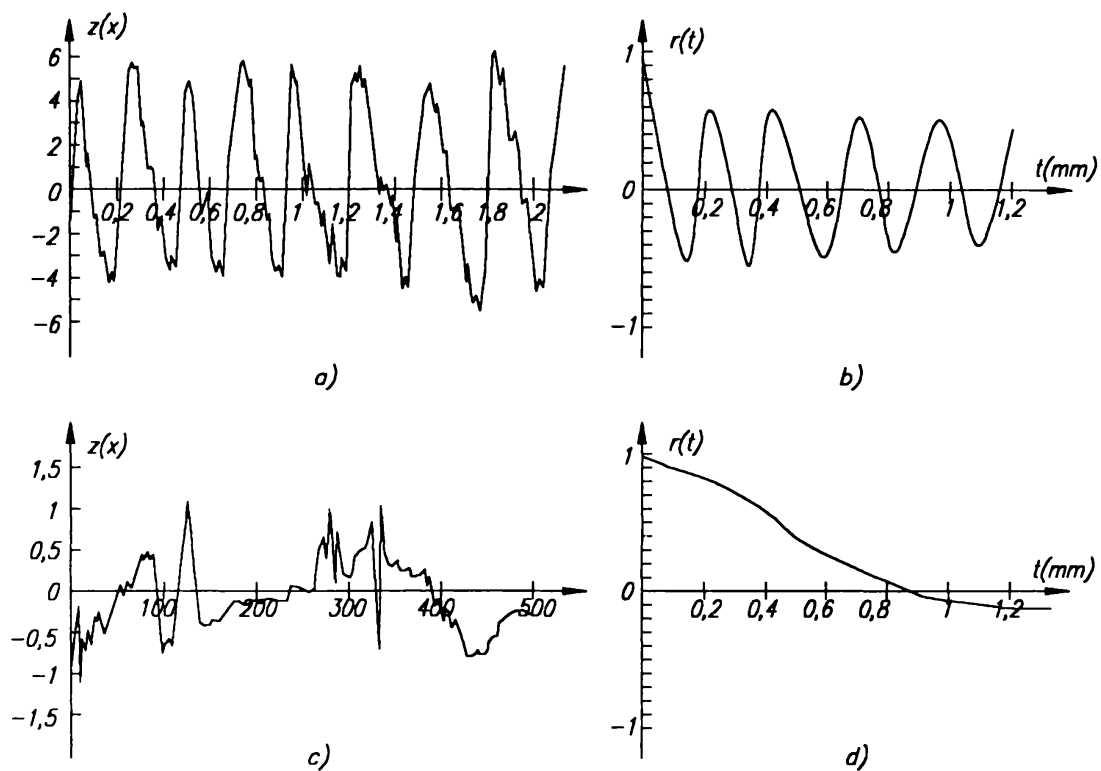


Fig.2.16 Corespondența profil de rugozitate-funcție de autocorelație [D2]:

- a) profil periodic; b) funcția de autocorelație pentru (a);  
c) profil aperiodic; d) funcția de autocorelație pentru (c).

Cu ajutorul expresiei lui  $Z(k)$  se calculează funcția densitate spectrală de putere  $D(k)$  [D2]:

$$D(k) = (1/2\pi) \cdot |Z(k)|^2 \quad (2.27)$$

Această transformare permite evidențierea, în cazul în care există, a periodicității semnalului analizat, și inclusiv a profilului microgeometric al unei suprafețe de contact (figura 2.17).

Există o relație simplă între funcția densitate spectrală de putere și autocovarianță [D2]:

$$F[R(t)] = |Z(k)|^2 = 2\pi \cdot D(k) \quad (2.28)$$

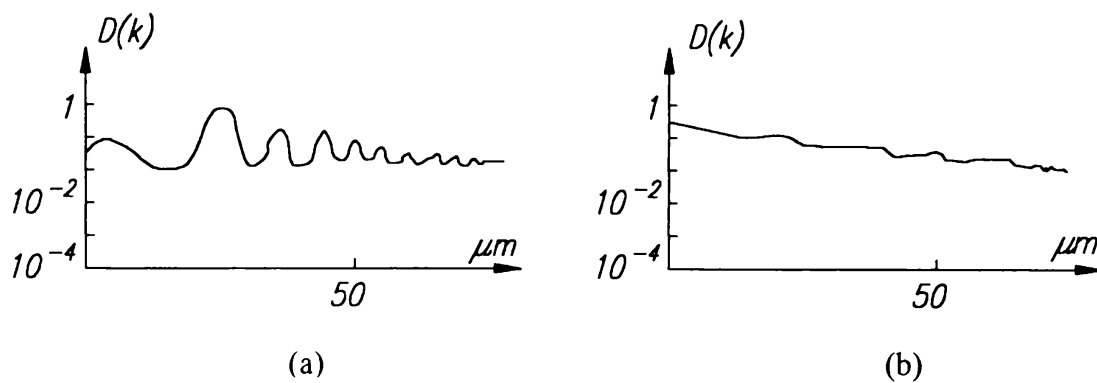


Fig. 2.17 Corespondența funcției densitate spectrală de putere-profil de rugozitate [D2]:  
a) profil periodic; b) profil aperiodic.

Funcțiile de autocovarianță și de densitate spectrală de putere sunt deci echivalente [D2].

### 2.2.2.2 Aplicații ale geometriei fractale

În ultima perioadă devine tot mai evident [C3] [Z12] [Z13] că dificultățile întâmpinate la evaluarea clasică a rugozității suprafețelor de contact derivă din natura multiscalară și caracterul nestaționar al topografiei acestora, precum și din dependența rezultatelor măsurării de aparatura utilizată.

Aplicarea pe scară tot mai largă a metodelor statisticii matematice, teoriei funcțiilor aleatoare și analizei spectrale a stimulat interesul pentru noi abordări teoretice în descrierea, simularea și caracterizarea topografiei suprafețelor. În acest context, introducerea geometriei fractale [D4] [P3] în studiul fenomenologiei suprafețelor de contact, deși foarte recentă [A4] [D2] [G1] [H2] [L1] [P4] [P5] [S5] [Z12] [Z13], a avut un impact important și semnificativ în domenii ca: mecanica contactului suprafețelor, tribologia, conductanța termică, dispersia luminii pe suprafețe rugoase, reactivitatea chimică a suprafețelor, etc.

Posibilitatea aplicării geometriei fractale în asemenea situații derivă din apartenența suprafețelor rugoase cu structură aleatoare, staționară și izotropă (în particular, a suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică, sablare, cu jet de apă, respectiv acoperite prin nitrurare ionică sau depunere electrochimică) la clasa suprafețelor fractale, ce posedă proprietatea de autosimilaritate geometrică și pot fi caracterizate printr-o dimensiune (de similaritate) fractală [D2] [Z12].

Proprietatea de autosimilaritate specifică fractalilor se manifestă prin păstrarea similarității geometrice dintre parte și întreg, independent de nivelul de scalare. În cazul suprafețelor reale, deci și al suprafețelor de contact, se poate considera exclusiv o autosimilaritate statistică - simetrie haotică, de obicei, într-un spectru larg de scalare, în care fragmentele scalate (copii) se găsesc într-o relație geometrică neliniară cu întregul [D4] [Z13].

Numărul de parametri necesar și suficient, pentru simularea și implicit evaluarea numerică computerizată a suprafețelor fractale, este mult mai redus decât la metodele cunoscute până în prezent și se reduce, de regulă, la dimensiunea fractală  $D$  (exprimată printr-un număr fracționar cuprins între 1 și 2 (pentru rugozitate bidimensională), respectiv 2 și 3 (pentru rugozitatea tridimensională), care definește capacitatea unui fractal dat de a umple un spațiu limitrof și la distanța de referință  $L$ , care precizează extensia spațiului considerat limitrof (de exemplu, perioada cea mai mare din structura spectrală a unui profil de rugozitate) [D2].

O imagine intuitivă asupra definiției dimensiunii fractale Hausdorff-Besicovitch  $D$  (cea mai uzuală din mulțimea dimensiunilor fractale) este oferită de figura 2.18 [P3].

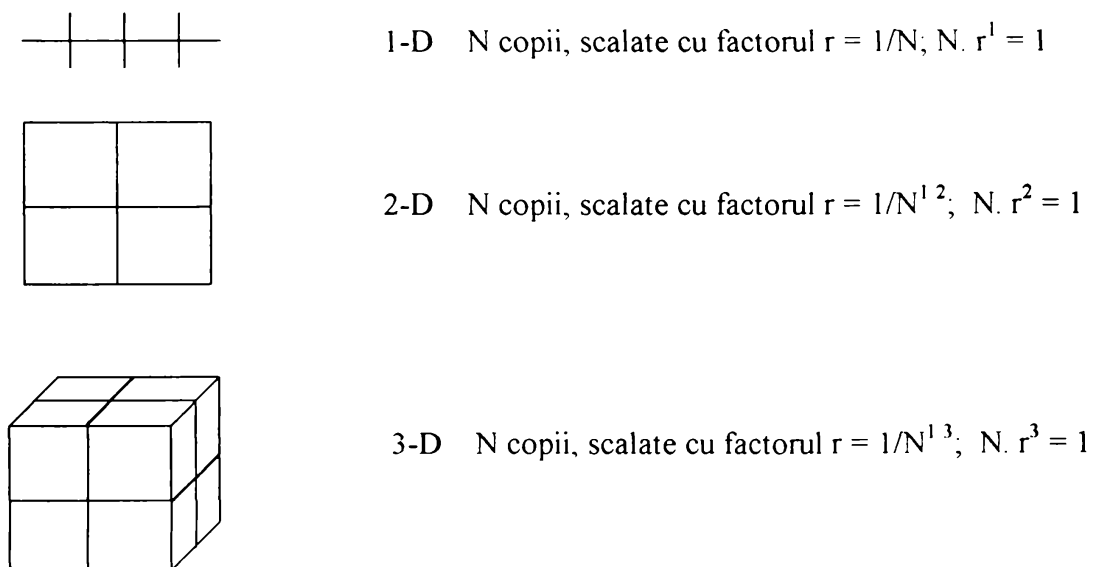


Fig. 2.18 Relații de autosimilaritate în structuri fractale

Prin generalizare [D4][P3], un obiect autosimilar  $D$ -dimensional poate fi divizat în  $N$  copii mai mici decât el, oricare din aceste copii fiind scalată cu un factor  $r < 1$ , unde

$$N = \frac{1}{r^D} \quad \text{respectiv} \quad r = \frac{1}{\sqrt[D]{N}} \quad (2.29)$$

Reciproc, dându-se un obiect autosimilar de  $N$  părți, scalate printr-un factor  $r$  din întreg, dimensiunea fractală  $D$  va fi:

$$D = \frac{\log N}{\log\left(\frac{1}{r}\right)} \quad (2.30)$$

Un exemplu concret, care ilustrează modul în care dimensiunea fractală  $D$  este o măsură a “umplerii” spațiului limitrof de către un profil de rugozitate fractal, este reprodus în figura 2.19 [Z13].

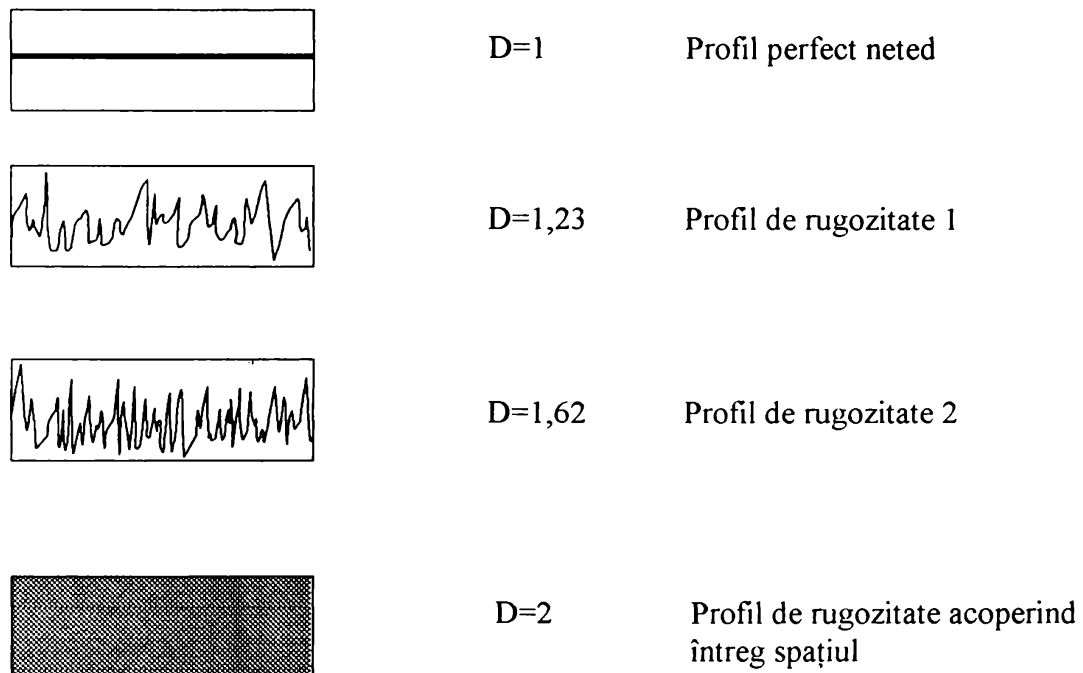


Fig. 2.19 Aplicarea geometriei fractale în evaluarea rugozității suprafeței

Conceptul de dimensiune fractală poate fi aplicat și suprafețelor cu similaritate statistică cu precizarea că, în asemenea cazuri, lungimea (desfășurată) a profilului suprafeței

$$\text{LUNGIME} \propto \frac{1}{r^{(D-1)}} \quad (2.31)$$

va fi cu atât mai mare cu cât factorul  $r$  va fi mai mic. Aceasta înseamnă că reprezentarea profilului respectiv la o anumită scară este insuficientă pentru predicția detaliilor exacte ale acestuia la o scară modificată.

Evaluarea cantitativă a dimensiunii fractale  $D$  este posibilă pe diferite căi, printre care [D4][H2][L1][S5][Z13], metoda divizării convenționale, metoda numărării casetelor rectangulare, metoda puterii spectrale și metoda variației, aplicate profilului suprafeței analizate la diferite nivele de scalare.

În cazul metodei numărării casetelor (figura 2.20), dimensiunea fractală  $D$  se determină grafic ca tangenta la curba  $\log(N) - f[\log(1/s)]$  în porțiunea medie, liniară a acesteia,  $N$  este numărul casetelor care conțin profilul analizat, iar  $s$  este mărimea caracteristică a casetei.

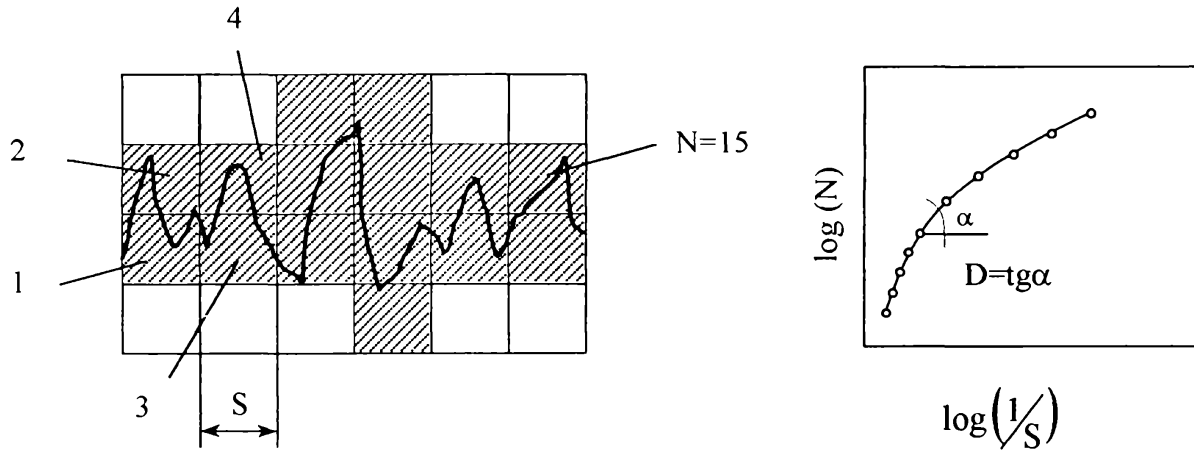


Fig. 2.20 Determinarea dimensiunii fractale  $D$  prin metoda numărării casetelor

Este important de remarcat că pentru suprafețe nefractale, graficul obținut în reprezentarea dublu logaritmică de mai sus fie că nu prezintă o pantă unică, fie că determină valori ale lui  $D$  în afara intervalului  $[1,2]$  [Z12].

Pentru simularea computerizată a profilului de rugozitate al suprafețelor de contact se folosește, cel mai des, funcția fractală Weierstrass-Mandelbrot (W-M), continuă, dar nediferențiabilă, în forma [H2]:

$$z(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} B^{-n(2-D)} \cdot [1 - \cos B^n(x)] \quad (2.32)$$

sau în forma [Z13]

$$z(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A^{-n(2-D)} [1 - \exp(2\pi \cdot j \cdot A^n \cdot x) + \Phi_n] \quad (2.33)$$

unde  $z(x)$  este înălțimea profilului de rugozitate;  $A, B$  - constante și  $\Phi_n$  - faze arbitrare.

În cazul funcției W-M factorul de scalare pentru  $z(x)$  este:

$$z(g \cdot x) = g^{(2-D)} \cdot z(x) \quad (2.34)$$

unde  $g$  este factorul de scalare pentru variabila  $x$ .

Simularea profilului de rugozitate al suprafețelor de contact, la nivel bi și tri-dimensional, este realizabilă și pe baza altor funcții fractale, cum ar fi de exemplu, modelul fractal gaussian modificat [Z12], ecuația mișcării browniene fracționale (fBm) sau funcția Weierstrass (Wf), recomandate de [L1].

Aplicarea geometriei fractale pentru modelarea unei suprafețe date nu implică în mod obligatoriu ca această suprafață să fie fractală la orice scală dimensională. Cu alte cuvinte, abordarea fractală se poate aplica suprafețelor reale într-un interval de frecvență limitat, corelat cu distanța de referință  $L$  [A4].

Dincolo de posibilitatea simulării profilului de rugozitate, abordarea fractală a suprafețelor de contact permite și simularea numerică computerizată a proceselor de agregare și structurare a unor elemente fractale specifice (atomi, molecule, de exemplu), capabile să conducă la formarea unor suprafețe cu textură aleatoare izotropă, similare celor obținute, în urma unor acțiuni de prelucrare prin eroziune electrică sau depunere electrochimică.

Reprezentarea schematică a unui astfel de proces de formare a suprafețelor de contact, simulat cu ajutorul unui algoritm bazat pe modelul DLA (agregare limitată de difuzie) este redată în figura 2.21 [A4].

Structura suprafeței rezultată dintr-un astfel de proces nu este fixată aprioric, ci evoluează în contul unei autoorganizări a corpului în formare.

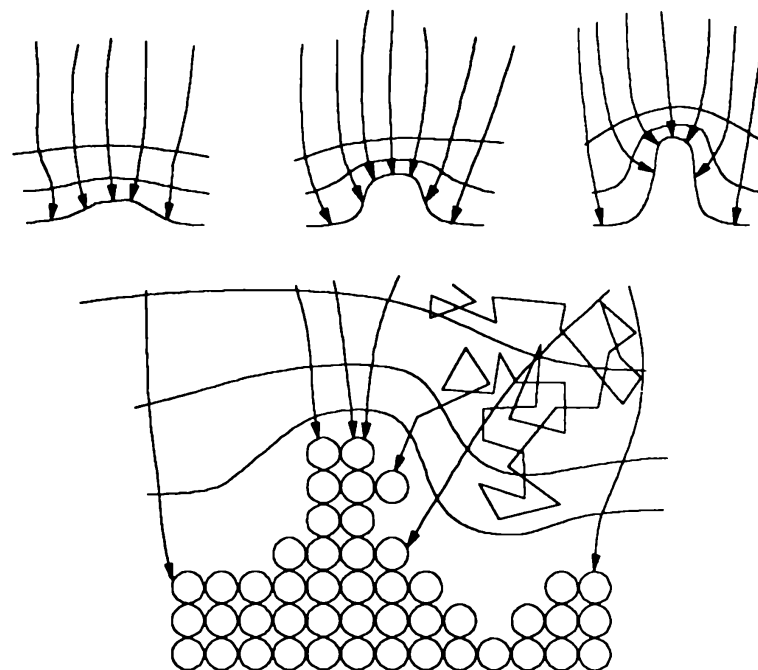


Fig. 2.21 Modelul fractal DLA de formare a suprafețelor rugoase izotrope

Datorită statisticii aleatoare a procesului (evidențiată prin traiectoria frântă de tip brownian a “particulei” mobile), existența sau dezvoltarea unor trepte elementare (vârf-gol) pe suprafață favorizează, prin gradientii stabiliți, o atașare preferențială a elementelor fractale pe vârfuri și pe pantele acestora cu formarea unui relief (profil) similar celui generat tehnologic.

Deși se află într-o fază incipientă [Z3], utilizarea efectivă a geometriei fractale pentru caracterizarea rugozității suprafețelor de contact pare foarte promițătoare, inclusiv prin posibilitățile de realizare a analizei 3-D, pe care le deschide.

Principalele tendințe care se manifestă, din acest punct de vedere, în literatura de specialitate [G1][H2][L1][Z12][Z13] sunt următoarele:

- stabilirea de corelații între dimensiunea fractală  $D$  și parametri de rugozitate standardizați;

- evidențierea sensibilității dimensiunii fractale  $D$  la condițiile concrete de generare a suprafețelor de contact (material, procedee de prelucrare, regimuri de lucru) și compararea, pe această bază, a diferitelor tipuri de suprafețe;

- utilizarea simulării fractale pentru studiul capacității portante și comportamentului la uzare a suprafețelor de contact, cu determinarea unor valori optime ale  $D$  și  $L$  din punct de vedere al ariei reale de contact și ratei uzării.

Astfel, de exemplu, în [Z13] este prezentată corelația dintre dimensiunea fractală  $D$ , determinată prin calcul și parametrul  $R_a$ , evaluat prin măsurare, pentru suprafețe prelucrate prin așchiere (figura 2.22).

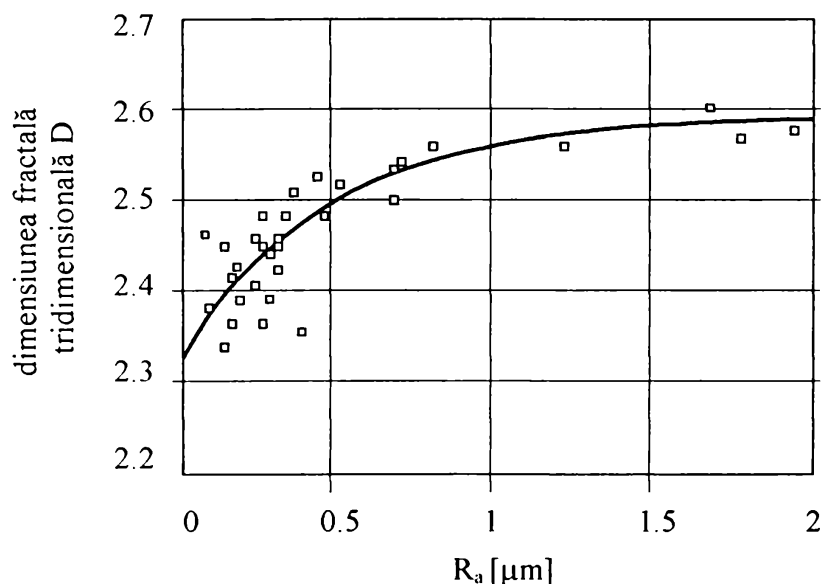


Fig. 2.22 Corelația  $D - R_a$  pentru suprafețe prelucrate prin așchiere [Z13]

Corelația reprezentată poate fi aproximată empiric printr-un polinom de gradul 3 [Z13]:

$$D = 2.228 + 0.131 \cdot R_a + 0.0263 \cdot R_a^2 - 0.0184 \cdot R_a^3 \quad (2.35)$$

ceea ce probează că  $D$  este o măsură suficient de sensibilă a rugozității suprafețelor.

Cercetări descrise în [G1] având ca obiect studiul influenței materialului, operației de prelucrare și vitezei de așchiere asupra dimensiunii fractale a suprafeței prelucrate, confirmă capacitatea lui  $D$  de a reflecta neregularitățile profilului la scară mică, dar demonstrează că  $D$  și  $R_a$  poartă informații diferite asupra rugozității, informații care pot fi considerate drept complementare (figura 2.23).

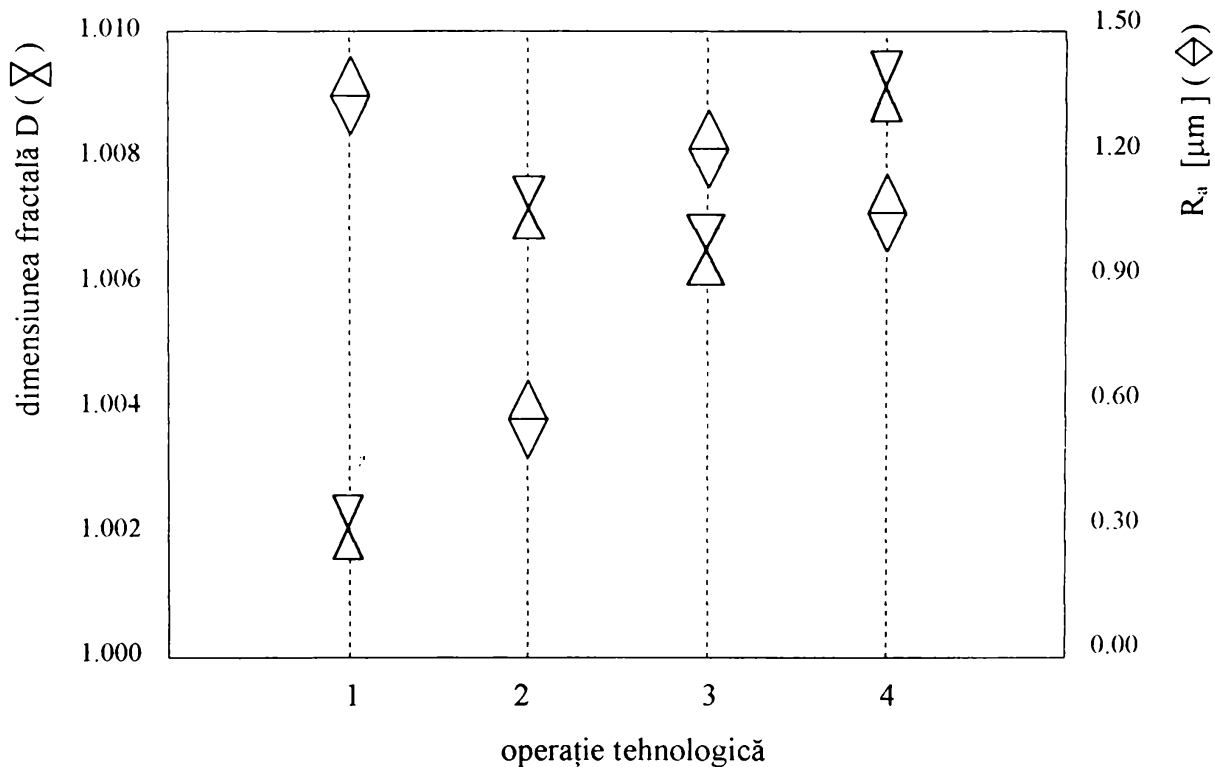


Fig. 2.23 Dependența  $D$  și  $R_a$  de tipul operației de prelucrare prin așchiere (1-strunjire; 2-rectificare cilindrică; 3-frezare; 4-alezare) [G1]

Cercetări similare, prezentate în [H2], arată corelațiile existente între dimensiunea fractală  $D$ , pe de-o parte și avansul și viteza de așchiere la prelucrarea unor piese din fontă și oțel carbon prin strunjire (figura 2.24) respectiv amplitudinea curentului de lucru și durata impulsurilor la prelucrarea prin eroziune electrică a unor piese din oțel de scule și aliaje de titan (figura 2.25), pe de altă parte.

Diversitatea situațiilor care pot interveni în practică este evidentă. Este nevoie de noi date experimentale, capabile să conducă la deducerea unor legități generale în descrierea fractală a rugozității suprafețelor de contact.



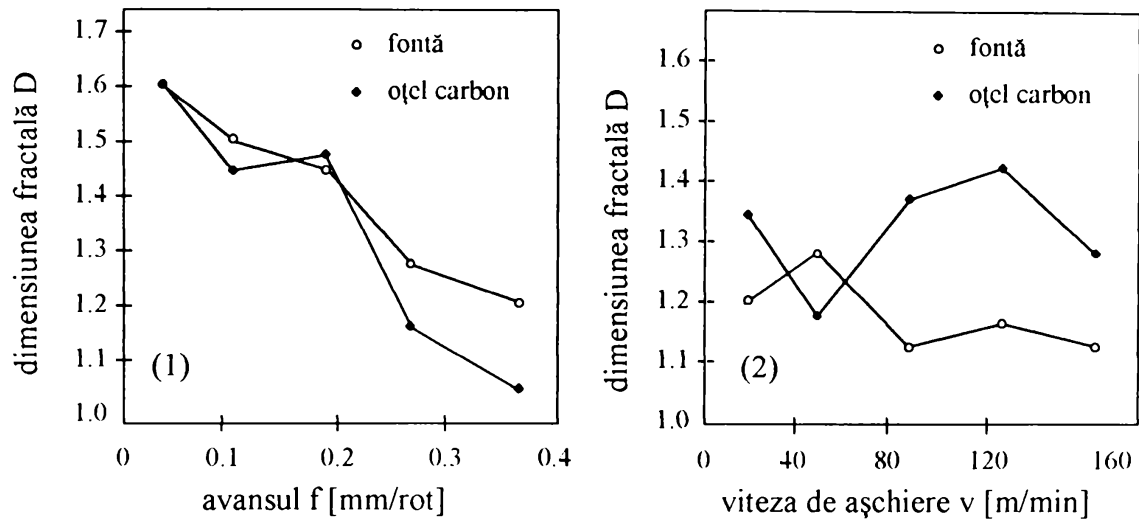


Fig. 2.24 Dependența dimensiunii fractale  $D$  de avansul (1) și viteza de așchiere (2) la prelucrarea prin așchiere [H2]

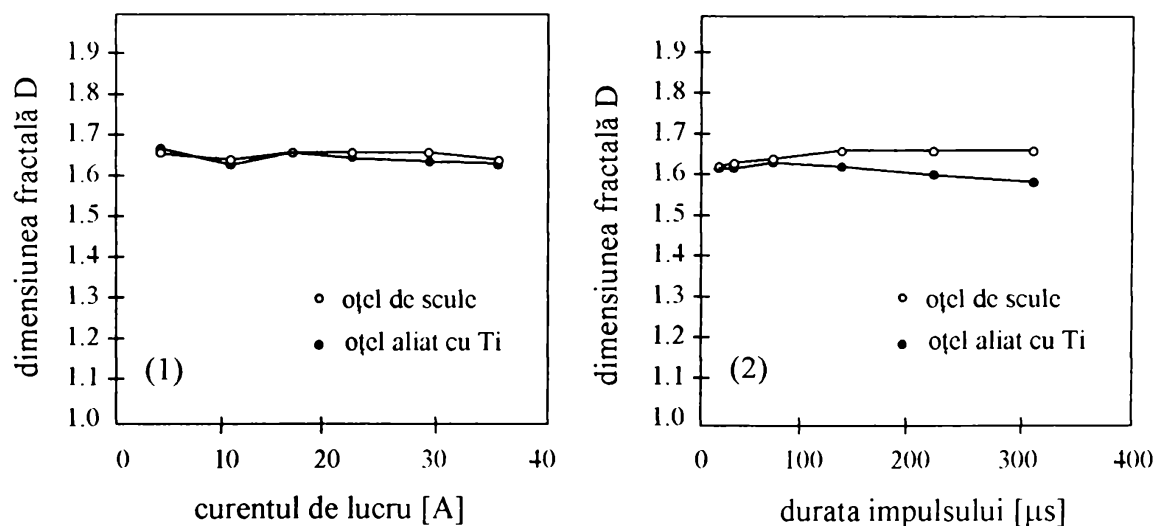


Fig. 2.25 Dependența dimensiunii fractale  $D$  de curentul de lucru (1) și durata impulsurilor (2) la prelucrarea prin eroziune electrică [H2]

Perspective deosebit de interesante în valorificarea potențialului științific și tehnologic al analizei fractale se întrevăd în studiul comportamentului funcțional al suprafețelor de contact.

Astfel, în [Z12], pe baza unui model fractal gaussian modificat, se demonstrează corelații semnificative între dimensiunea fractală  $D$  și curba de portanță Abbott-Firestone, fapt confirmat experimental pentru suprafețe omogene izotrope prelucrate cu jet de apă și prin eroziune electrică, având parametrii  $R_a$ ,  $R_q$  și  $R_{max}$  practic identici (figura 2.26).

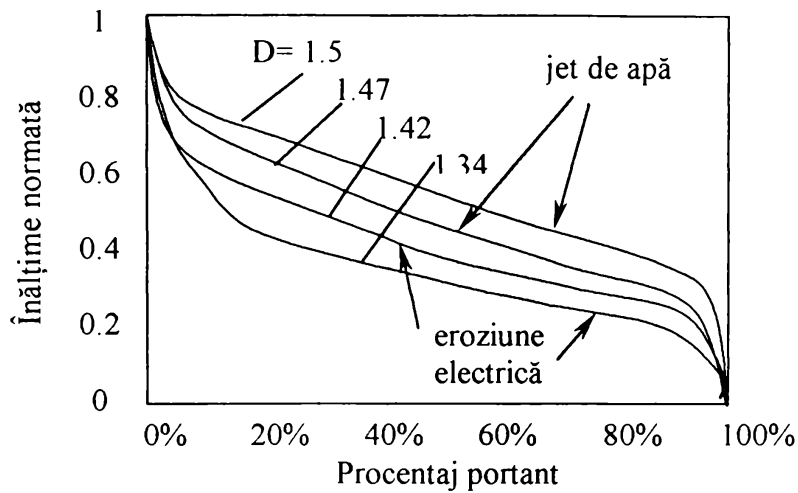


Fig. 2.26 Corelația dimensiune fractală  $D$  - alura curbei de portanță, pentru suprafețe prelucrate prin eroziune [Z12]

În aceeași lucrare [Z12] se elaborează și un model fractal al procesului de uzare a suprafețelor de contact, verificat experimental, care exprimă dependența uzării de  $D$  și  $L$ . Pe baza acestui model se demonstrează că între rata uzării  $V_r$  și aria reală de contact  $A_r$  există relația:

$$V_r \propto (A_r)^{m(D)} \quad (2.36)$$

unde  $m(D)$  este o funcție de  $D$ , luând valori cuprinse în intervalul  $[0.5;1]$ .

Astfel, este pusă în evidență existența unor valori optime ale dimensiunii fractale  $D$  cărora le corespunde, cel puțin teoretic, o valoare minimă a ratei normale a uzării  $V_r^*$ , dependentă de aria reală normalată de contact  $A_r^*$ , natura materialului și amplitudinea scalării (figura 2.27).

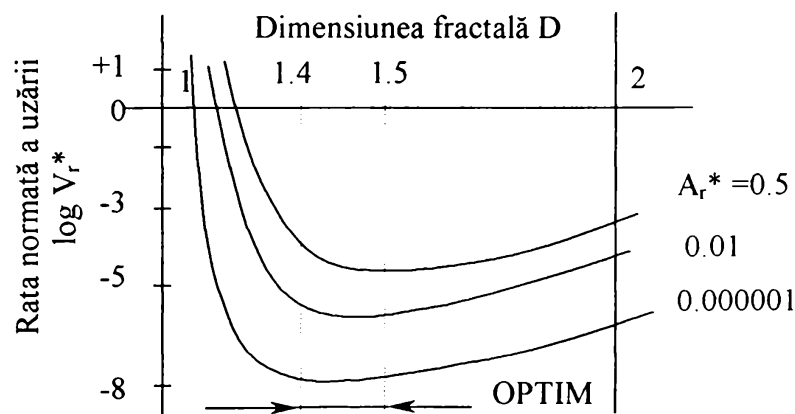


Fig. 2.27 Domeniile optime ale dimensiunii fractale  $D$  în raport cu rata normalată a uzării [Z12]

Este clar că rezultatele aplicării analizei fractale în studiul proceselor de uzare sunt deosebit de promițătoare. În aceeași măsură însă ele trebuie tratate cu prudență, cu atât mai mult cu cât, așa cum se demonstrează pertinent în [P4] [P5], rezultatele obținute prin analiză statistică și respectiv fractală a unor suprafețe de contact date, sunt încă, cel puțin în parte, diferite.

### **2.2.3 Evaluarea experimentală a parametrilor de rugozitate a suprafețelor de contact**

Diversificarea continuă a tribo-sistemelor aplicate în știință și tehnologie a impus dezvoltarea și perfecționarea unei mulțimi de metode și tehnici de evaluare experimentală a topografiei și în particular a rugozității suprafețelor de contact implicate.

Clasificarea cea mai rațională a acestor metode și tehnici are în vedere [S4], pe de o parte, mecanismul tactil/non tactil al colectării informațiilor primare asupra rugozității suprafețelor și, pe de altă parte, domeniul de măsurare și rezoluția, pe verticală și orizontală, a parametrilor de rugozitate investigați.

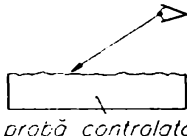
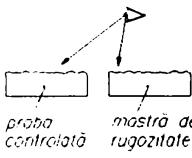
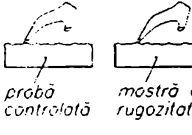
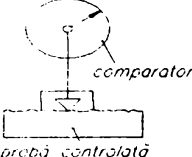
Principial, evaluarea rugozității suprafețelor de contact este realizabilă într-un punct, într-o secțiune bidimensională sau pe o arie determinată a suprafeței supuse măsurării.

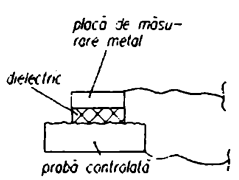
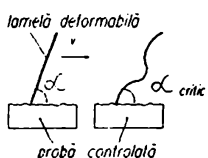
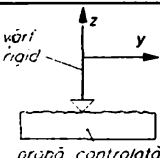
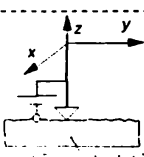
Principalele modalități de evaluare experimentală a rugozității sunt prezentate sintetic, împreună cu o scurtă caracterizare și cu indicarea domeniilor de aplicabilitate, în tabelul 2.5. [A1] [D1] [D2] [D3] [D6] [G2] [G3] [M2] [M4] [S3] [T1] [V3] [W2] [Z2] [Z3]

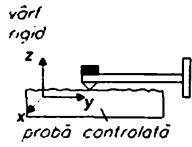
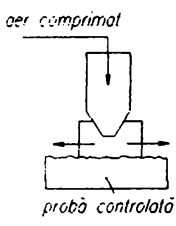
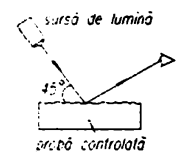
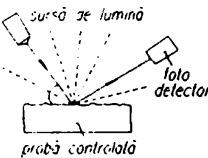
Pentru caracterizarea funcționalității și posibilitatea comparării diferitelor metode și tehnici de evaluare experimentală a rugozității suprafețelor se recurge [M4] [S4] la raportul domeniu de măsurare/limite de rezoluție a parametrilor de rugozitate.

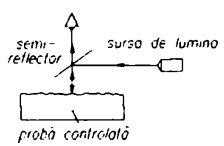
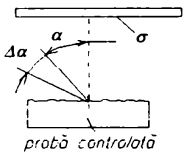
Raportul enunțat are ca referință răspunsul unui sistem dat de evaluare a rugozității la o perturbație sinusoidală a suprafeței și se exprimă prin spațiul de disponibilitate amplitudine  $A$ -lungime de undă  $\lambda$ , reprezentat în coordonate logaritmice, caracteristic acestuia.

TABELUL 2.5 Modalități de evaluare experimentală a rugozității suprafețelor de contact

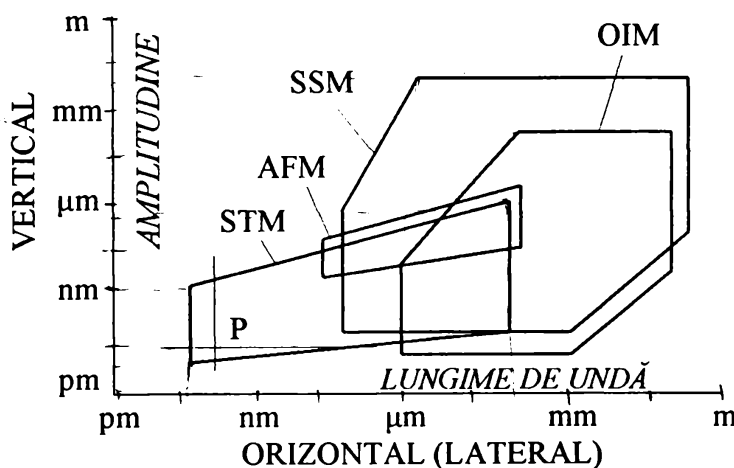
Nr. crt.	Modul de evaluare a rugozității	Principiul evaluării	Avantaje	Dezavantaje	Domeniu de aplicație
0	1	2	3	4	5
1. 1.1 1.2	<b>Examinare vizuală</b> <i>directă</i> <i>mijlocită de un aparat optic</i>	 Vizualizarea naturii și caracteristicilor geometrice ale neregularităților suprafeței.	Simplitate Operativitate	Caracter subiectiv, calitativ. Rezultat condiționat de experiența operatorului. Risc de eroare în acțiuni repetitive.	Control preliminar, suprafețe nepretențioase la un procedeu de prelucrare dat. Producție de serie.
2. 2.1	<b>Comparare cu mostre de rugozitate vizuală:</b> -directă -mijlocită de un aparat optic	 Verificarea similitudinii rugozității probei controlate și a mostrei de rugozitate.	Simplitate. Posibilitatea evaluării rugozității în diferite etape de prelucrare tehnologică.	Subiectivism Limite de aplicabilitate condiționate de identitatea materialului, macrogeometriei și tehnologiei de prelucrare a probelor.	Suprafețe cu textură neregulată și profile aperiodice. Producție de serie.
2.2	<i>tactilă</i>	 Verificarea similitudinii rugozității probei controlate și a mostrei de rugozitate.			
3. 3.1	<b>Măsurare</b> <i>tactilă(cu contact)</i> 1) imobil cu comparator	 Evaluarea prin măsurări succesive, a adâncimii golurilor profilului de rugozitate în raport cu linia proeminențelor profilului.	Simplitate Operativitate	Caracter informativ, referitor în exclusivitate, la înălțimea maximă a neregularităților.	Suprafețe rugoase, neregulate, izotrope.

0	1	2	3	4	5
	2) imobil electric	 <p>Evaluarea capacității interstițiului de aer cuprins între proba de controlat și o placă de măsurare aplicată pe suprafața probei.</p>	Caracterizarea rugozității pe o arie determinată a suprafeței.	Măsurarea exclusivă a înălțimii maxime a neregularităților. Sensibilitate la impuritățile suprafeței.	Suprafețe izotrope de rugozitate grosieră, la care se impun valori limită ale rugozității.
	3) mobil cu lamelă deformabilă	 <p>Palparea suprafeței controlate cu o lamelă deformabilă înclinată la diferite unghiuri până la flambare.</p>	Simplitate	Corelare dificilă a rezultatului cu parametrii standardizați de rugozitate. Verificare laborioasă.	Profile neregulate aperiode, la care se impune valoarea limită a rugozității.
	4) mobil, cu vârf rigid - în contact mecanic	 <p>Palparea suprafeței controlate cu un vârf rigid, capabil să urmărească profilul real al neregularităților.</p>	Înregistrare profil 2-D și 3-D. Determinare parametri standardizați de rugozitate.	Durata excesiv de mare a evaluării. Insensibilitate și erori sistematice introduse de geometria vârfului. Risc de alterare a suprafeței măsurate.	Aplicabilitate la suprafețe cu neregularități direcționate, în domeniul de măsurare largi ale parametrilor de rugozitate.
	- în contact electric (efect tunel)	 <p>Palparea suprafeței controlate cu un vârf electroconductor, cu menținerea constantă a curentului generat prin efect tunel, sensibil la distanța vârf-suprafață.</p>	Înregistrare profil 3-D. Rezoluție excepțională pe verticală (0.001 nm) și orizontală (0.1 nm).	Risc de alterare a suprafeței măsurate. Histereză în poziționare. Erori la pante mari ale profilului suprafeței.	Suprafețe superfine din materiale electroconductoare.

0	1	2	3	4	5
	- în contact fizic (forțe interatomice)	 <p>Vârful rigid, supus acțiunii forțelor atomice de repulsie și forțelor moleculare de atracție, "plutește" corespunzător profilului suprafeței.</p>	Înregistrare profil suprafață la scară atomică. Rezoluție la nivel de angstromi. Influență minimă asupra suprafeței examinate.	Histerează în poziționare. Arie examinată foarte mică ( $\sim 1 \mu\text{m}^2$ ). Erori introduse de poluarea suprafeței.	Suprafețe superfine din materiale organice și biologice neconductoare electric.
3.2	non tactilă (fără contact) - pneumatică	 <p>Introducerea unui curent de aer comprimat în spațiul dintre planul proeminențelor și golurilor profilului de rugozitate.</p>	Caracterizarea rugozității pe o arie determinată a suprafeței.	Erori mari la abateri de formă și ondulații ale suprafeței cercetate.	Suprafețe izotrope de rugozitate relativ mare, la care se impun valori limită ale rugozității.
3.3	non tactilă (fără contact) - optică 1) reflectivă - prin secționare optică	 <p>Iluminarea suprafeței cu o bandă îngustă de lumină în vederea evidențierii profilului de rugozitate local.</p>	Caracterizarea rugozității pe o arie determinată a suprafeței.	Dificultatea explorării suprafețelor neregulate, izotrope. Aplicabilitate condiționată de reflectivitatea suprafeței. Erori de identificare a profilelor cu pante mari.	Suprafețe cu neregularități direcționate, relativ periodice. Aplicabilitate la o gamă largă de valori a parametrilor de rugozitate.
	- fotometrică	 <p>Iluminarea suprafeței cu un fascicul luminos și evaluarea componentelor reflectate specular și difuz.</p>	Caracterizarea rugozității pe o arie determinată a suprafeței. Posibilitatea evaluării rugozității în procesul de prelucrare.	Sensibilitate la impuritățile suprafeței. Aplicabilitate condiționată de reflectivitatea suprafeței. Erori de identificare a profilelor cu pante mari.	Suprafețe cu neregularități direcționate și aleatoare, de rugozitate predominant fină, staționare sau mobile.

0	1	2	3	4	5
	2) interferențială	 <p>Generarea unor fenomene de interferență a luminii cu participarea suprafeței de controlat.</p>	<p>Caracterizarea rugozității pe o arie determinată a suprafeței. Punerea în evidență a erorilor de formă a suprafețelor. Rezoluție foarte fină (nm). Posibilitatea reconstituirii profilului 2-D sau 3-D al suprafețelor măsurate.</p>	<p>Domeniu de măsurare limitat de lungimea de undă a luminii utilizate. Examinare laborioasă a franjelor de interferență.</p>	<p>Suprafețe fine cu rugozitate izotropă și anizotropă, cu reflectivitate rezonabilă, izolate de vibrații.</p>
	3) difractivă (speckle)	 <p>Proiectarea unui fascicul de lumină coerentă pe suprafața examinată și înregistrarea fotografică/holografică a imaginilor de difracție obținute.</p>	<p>Posibilitatea măsurării unor rugozități relativ mari. Corelarea contrastului imaginilor de difracție cu <math>R_q</math>.</p>	<p>Necesitatea unor etaloane de rugozitate bine determinate. Erori semnificative la pante mari ale profilului de rugozitate.</p>	<p>Evaluarea suprafețelor cu rugozități în domeniu larg de măsurare (nm... <math>\mu</math>m), independent de prelucrarea aplicată.</p>

O imagine de ansamblu a domeniilor de măsurare și limitelor de rezoluție a câtorva dintre cele mai importante sisteme actuale de evaluare a rugozității este reprezentată în figura 2.28 [M4] [S4] [W2].



AFM-măsurare tactilă prin contact controlat de forțe atomice;  
 STM-măsurare tactilă prin contact controlat de efect tunel;  
 SSM-măsurare tactilă prin contact mecanic;  
 OIM-măsurare non tactilă optică interferențială

Fig. 2.28 Domenii de măsurare și limite de rezoluție ale unor sisteme de evaluare experimentală a rugozității suprafețelor

În figură sunt indicate domeniile de măsurare (estimate dinspre originea sistemului de coordonate) și respectiv rezoluțiile realizabile (înspre originea sistemului de coordonate), pe orizontală (în lungul suprafeței) și pe verticală (după normala la suprafața ideală asociată suprafeței supuse evaluării).

Fiecare dintre sistemele prezentate în fig. 2.28 are câte o “fereastră” de disponibilitate proprie definită în coordonate amplitudine-lungime de undă.

Raportul lungimilor a două drepte ortogonale duse dintr-un punct P din interiorul unei “ferestre” este un indicator numeric al raportului domeniu de măsurare/limite de rezoluție, caracteristic sistemului considerat de evaluare a rugozității.

Aria extinsă a spațiului de disponibilitate corespunzător SSM explică și justifică aplicabilitatea pe scară foarte largă a acestui sistem de evaluare. Sistemele STM și AFM au cea mai înaltă rezoluție, dar prezintă un domeniu de măsurare restrâns. În fine, sistemele optice interferențiale (OIM), au o rezoluție înaltă, dar și un domeniu de măsurare semnificativ mai mare decât sistemele tactile AFM și STM.

În pofida faptului că evaluarea rugozității suprafețelor de contact, în condiții industriale și de laborator, este dominată, în continuare, de metode și tehnici bazate pe palparea mecanică cu vârf rigid, evaluarea optică a suprafețelor tehnologice și-a câștigat un loc bine definit (suprafețe ”moi”, superfinisate sau cu macrogeometrie de înaltă precizie) și se dezvoltă în permanență.

În acest context, anii din urmă au înregistrat un salt remarcabil, în domeniul aplicării principiilor interferometrice în evaluarea suprafețelor. Argumentele pentru o atare evoluție țin, în primul rând, de capacitatea metodelor interferometrice de a favoriza obținerea directă a informațiilor referitoare la topografia tridimensională a suprafețelor, pe arii relativ extinse, în contul substituirii profilometriei specifice palpării mecanice prin tehnici cartografice.

Dificultățile caracteristice metodelor optice, legate de interpretarea dificilă și de corelarea greoaie a rezultatelor măsurărilor cu parametrii standardizați, au putut fi depășite prin integrarea microscopelor interferențiale cu sisteme avansate de calcul și de procesare a imaginilor. Pe această cale, au putut fi deplasate și limitele de aplicație specifice interferometriei, asigurându-se extinderea semnificativă a domeniului de măsurare din punctul de vedere al înălțimii neregularităților și creșterea nivelului de încredere al rezultatelor obținute.



## 2.3 Comportamentul tribologic și topografia suprafețelor de contact

### 2.3.1 Procese de uzare

Procesele de uzare pot fi definite [B2] [P2] [O1] [R1] :

- în sens larg, ca procese de degradare ireversibilă a suprafețelor cuplelor de frecare pe parcursul funcționării, manifestate prin prelevare și transfer de material, pierderea locală a integrității substanțiale, modificării, mai mult sau mai puțin profunde, a topografiei, structurii, stării și proprietăților inițiale ale stratului de suprafață etc.

- în sens îngust, ca pierdere discontinuă, progresivă și cumulativă de material de la suprafețele în interacțiune ale corpurilor aflate în contact și mișcare relativă.

Diversitatea fenomenologică a proceselor de uzare este extrem de largă, punându-se în evidență variante fundamentale de uzare și anume [B2] [P2]:

- uzare adezivă
- uzare abrazivă
- oboseală de contact
- uzare de coroziune

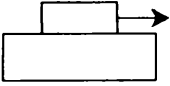
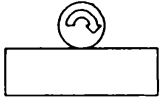
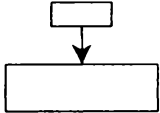
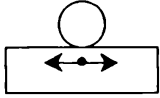
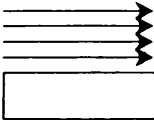
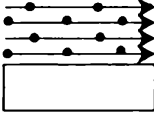
alături de o mulțime de variante derivate sau particulare ca, de exemplu, tribocoroziune, cavitație, uzare de impact, uzare de fretting, ciupire electrică etc.

O caracterizare generală a implicării, cel mai adesea complexe, a fenomenelor fundamentale de uzare în funcționarea celor mai reprezentative cuple de frecare este prezentată în tabelul 2.6. [R1]

În perioada actuală, o atenție deosebită este acordată cercetării proceselor de uzare de fretting [D5] [F1] [F2] [K6] [T3] [V2]. Cauzele acestui interes sunt multiple și includ, înainte de toate:

- diversitatea extremă a manifestărilor fenomenologice fizico-chimice, termice și metalurgice, la materiale metalice, polimerice și compozite, inclusiv în gaze inerte și vid;
- spectrul foarte larg de incidență în aplicații tehnice și tehnologice, de la centrale nucleare și eoliene, la vehicule de transport (rachete, elicoptere, trenuri, automobile, nave maritime), mașini agricole și mașini de construcții, până la implanturi ortopedice în corpul uman.

TABELUL 2.6 Caracterizarea generală a proceselor de uzare în cuple de frecare

Elementele contactului	Fenomene fundamentale de uzare Natura mișcării	Uzare adezivă	Uzare abrazivă	Oboseală de contact	Uzare de coroziune
corp solid/ corp solid, cu/fără lubrifiant	 Alunecare	+	+	+	+
	 Rostogolire	+	+	+	+
	 Cu șoc	+	+	+	+
	 Oscilatorie	+	+	+	+
corp solid/ fluid	 Gazo/hidro-dinamică	-	+	+	+
corp solid/ suspensie de particule solide în fluid	 Gazo/hidro-dinamică	-	+	+	+

Cunoașterea legităților de cauzalitate și mecanismelor fizico-chimice care controlează funcționarea tribo-sistemelor stau la baza estimării teoretice/evaluării experimentale a caracteristicilor tribologice ale cuplelor de frecare (vezi fig. 2.3).

Comportarea suprafețelor de contact în procese de uzare este descrisă obișnuit în termeni cantitativi liniari, volumici sau masici (tabelul 2.7), evaluați aproape exclusiv pe cale experimentală.

TABELUL 2.7 Caracteristici cantitative ale proceselor de uzare ( $t_f$  - durata frecării;  $L_f$  - lungimea de frecare)

Caracteristică de uzare		Liniară	Volumică	Masică
Denumire	Simbol			
Uzură	U	m	m <sup>3</sup>	Kg
Viteză de uzare	$V=U/t_f$	m/s	m <sup>3</sup> /s	Kg/s
Intensitatea uzării	$I_t=U/L_f$	m/m	m <sup>3</sup> /m	Kg/m

Evaluarea analitică, la modul general, a caracteristicilor de uzare este încă extrem de dificilă, datorită complexității fenomenologice, caracterului dinamic și evoluției stohastice a proceselor considerate.

Progrese deosebite în acest domeniu s-au realizat, în ultima perioadă, printr-o abordare mixtă, analitică și experimentală, a proceselor de uzare, utilizând metode analitice statistice și numerice avansate [K2] [O2] [Z12].

## 2.3.2 Fenomenologia și caracteristicile uzării de fretting

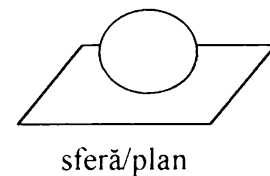
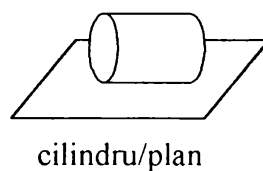
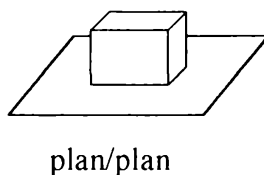
### 2.3.2.1 Condiții de încercare la fretting

Conceptul de fretting definește, la modul general, o mișcare oscilatorie de mică amplitudine, care induce o forță tangențială armonică între două suprafețe solide în contact [C1][D6][T3][F1][F2][K6][V1][V2].

Pentru studiul mecanismului de degradare a suprafețelor de contact prin fretting, au fost analizate până în prezent, următoarele trei configurații geometrice (fig. 2.29) [F1]:

- contactul de suprafață-plan/plan;
- contactul liniar-cilindru/plan;
- contactul punctiform-sferă/plan.

#### TIPURI DE CONTACTE



#### CONDIȚII DE SOLICITARE

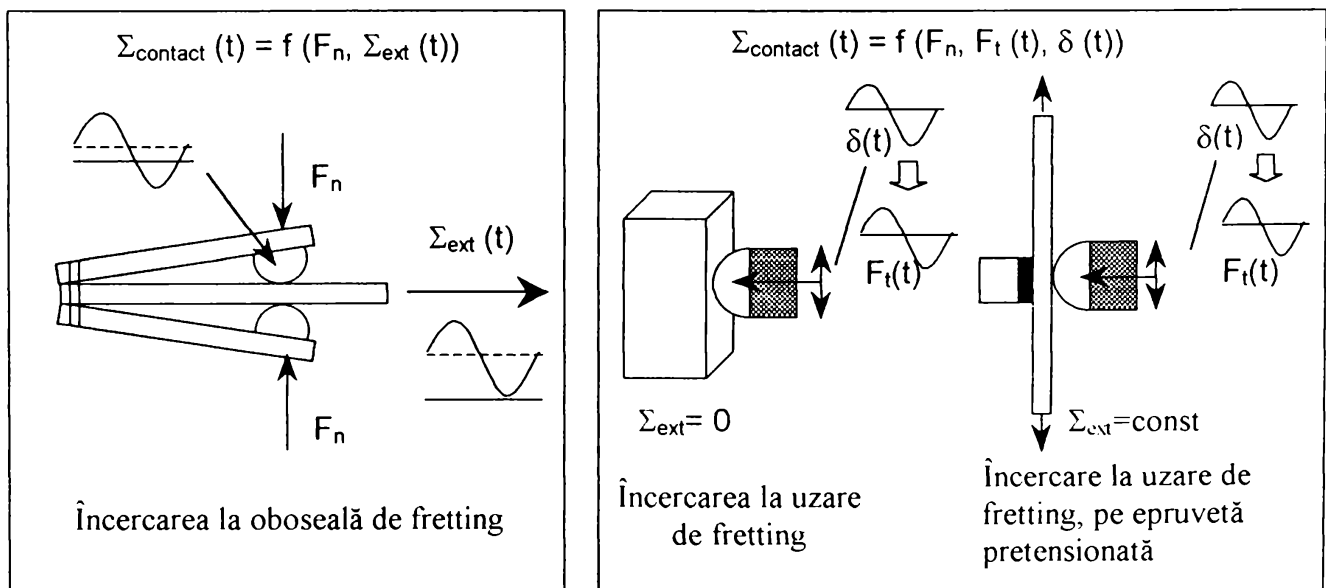


Fig. 2.29 Tipuri de contacte și condiții de solicitare [F1]

Configurația plan/plan permite menținerea constantă a ariei suprafețelor de contact independent de gradul de uzură al interfeței de contact. Totuși, analiza stării de tensiune arată că distribuția presiunilor și mai ales a tensiunilor de forfecare, este caracterizată printr-o discontinuitate la marginile contactului. Analiza este, în acest caz, deosebit de complexă și este dificil de apreciat valoarea încărcării impuse materialului analizat. În plus, alunecarea dintre cele două suprafețe determină nealinieri ce accentuează efectul de margine. Acestei configurații îi sunt preferate deci, cuplele superioare: linie-cilindru/plan respectiv punctiform-sferă/plan [F1].

Analiza fisurării este, de cele mai multe ori, studiată pe contactul de tip cilindru/plan, ușor de modelat cu ajutorul metodei elementului finit.

Studiul uzării, predominant experimental, utilizează cu preponderență contactul punctiform-sferă/plan, mai ușor de pus în practică decât celelalte două configurații.

La ora actuală, s-au stabilit trei variante de încercări pentru studierea fenomenului de fretting [T3], [F1], și anume (figura 2 29):

- încercarea la oboseală de fretting (“fretting-fatigue”) - o epruvetă de tracțiune este supusă solicitărilor repetate de tracțiune. Pe fețele sale sunt aplicate patinele (plane sau cilindro-sferice), cu o forță normală anterior aleasă. Deformația relativă între epruveta de tracțiune și sistemul de fixare al patinelor este cea care generează solicitarea de contact. Ciclul de solicitare impus materialului,  $\Sigma_{\text{contact}}(t)$  rezultă din suprapunerea solicitării normale locale a contactului  $F_n$  și solicitării exterioare, omogene impuse epruvetei,  $\Sigma_{\text{ext}}(t)$ . Fisurarea apare întotdeauna la nivelul suprafeței de contact, iar frettingul controlează condițiile de amorsare a fisurării. Acest tip de încercare permite evidențierea influenței frettingului asupra fisurării comparativ cu încercarea la oboseală clasică.

- încercarea la uzare de fretting (“fretting-wear”) - epruveta plană este fixă și este solicitată cu o forță normală  $F_n$ , de către suprafața de contact, supusă unei deplasări relative periodice  $\delta(t)$ , impuse din exterior prin forța tangențială  $F_t(t)$ . Deseori utilizat la studiul uzării, acest tip de contact poate genera implicit amorsarea și propagarea deosebit de profundă a fisurilor. Avantajul acestei încercări este de a caracteriza inițierea fisurării induse de însăși solicitarea de contact. Influența parametrilor de încărcare (forță normală, frecvență, coeficient de frecare) este mai ușor de determinat.

- încercarea la uzare de fretting, pe epruveta pretensionată (“fretting-wear under stress”)- este similară încercării la “fretting-wear” cu precizarea că epruveta plană a fost pretensionată cu o solicitare exterioară  $\Sigma_{\text{ext}}$  constantă. Acest tip de încercare a fost adoptat de

curând pentru evaluarea influenței unei tensiuni statice asupra amorsării și propagării fisurilor în condiții de fretting.

Din punctul de vedere al obiectivelor tezei de doctorat, au fost considerate ca importante condițiile corespunzătoare încercărilor la uzare de fretting, pentru contactul sferă/plan.

### 2.3.2.2. Descrierea fenomenului de uzare de fretting

Fenomenul de uzare de fretting apare sub acțiunea unor deplasări de foarte mică amplitudine, variind de la câțiva micrometri la câteva sute de micrometri, între suprafețele de contact.

În cazul aplicării unei forțe normale constante  $F_n$  asupra contactului dintre două suprafețe, procesul de fretting este caracterizat de o corelație specifică între amplitudinea deplasării  $D$  și amplitudinea forței tangențiale  $F_t$  (figura 2.30 [F1]).

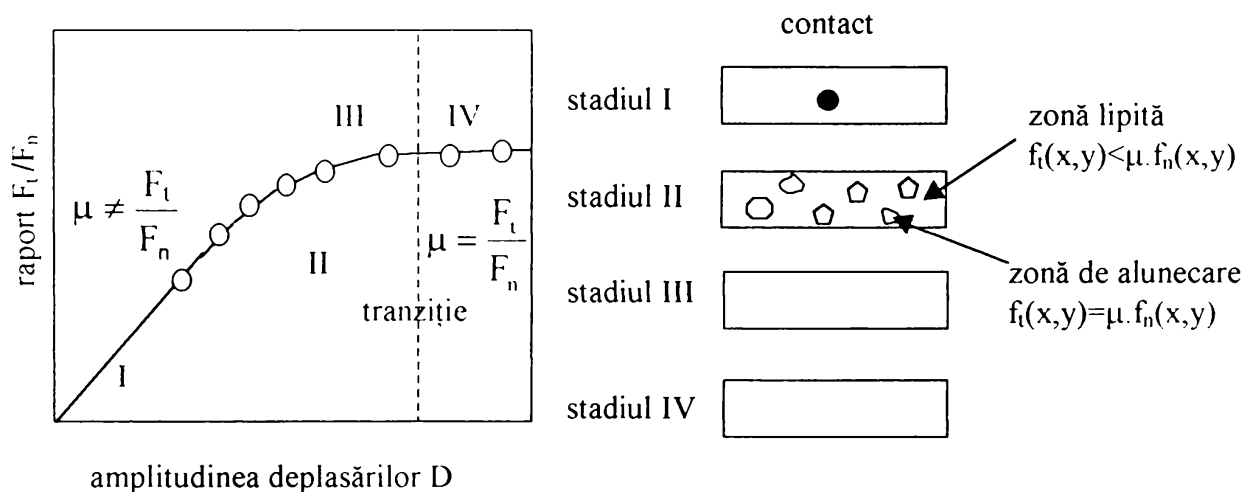


Fig. 2.30 Comportamentul tribologic a două suprafețe în contact, supuse solicitării de fretting

Celor două suprafețe le este aplicat un câmp de presiune ce le menține lipite. Atunci când se impune o deplasare relativă  $\delta$ , de foarte mică amplitudine, între suprafețe, acomodarea elastică a acestora determină o distribuție dată a tensiunilor de forfecare  $f_t(x,y)$ . Atâta timp cât local, amplitudinea tensiunilor de forfecare rămâne inferioară condiției de alunecare, astfel încât  $f_t(x,y) < \mu \cdot f_n(x,y)$ , răspunsul este liniar, iar tensiunea de forfecare locală este proporțională cu deformațiile specifice locale (stadiul I). Pe măsură ce are loc creșterea deplasării  $\delta$ , amplitudinea locală a tensiunilor de forfecare crește și ponderea porțiunilor

alunecătoare în contact se mărește (stadiul II). Răspunsul macroscopic  $F_t/F_n=f(\delta)$  devine neliniar, caracteristic pentru o comportare hibridă între contactele alunecătoare și cele lipite.

Mărind și mai mult amplitudinea deplasării  $D$ , ansamblul contactului trece în regim de alunecare (stadiul III). Pentru deplasări și mai mari, amplitudinea forței tangențiale  $F_t$  nu mai este dependentă de amplitudinea deplasării  $D$ , iar contactul trece în regim de alunecare totală (stadiul IV) [F1].

Corespunzător condițiilor de solicitare dezvoltate în zona de contact (sarcină normală, deplasare impusă, deplasare reală, etc.) pot fi obținute [C1][V1][V2][T1] diferite cicluri forță tangențială  $F_t$  – deplasare  $\delta$  (figura 2.31):

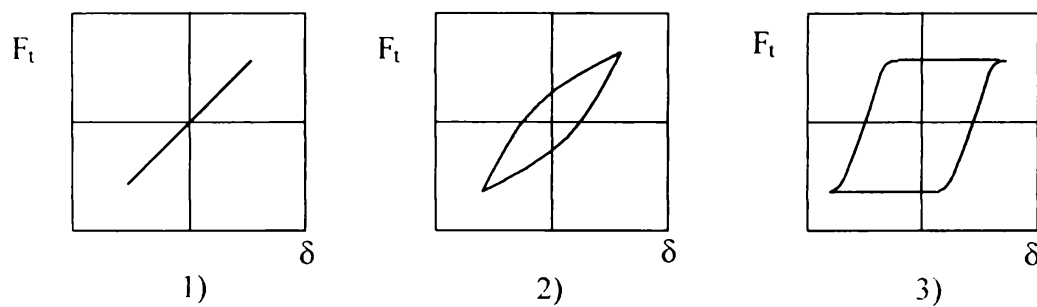


Fig. 2.31 Diverse cicluri forță tangențială  $F_t$  – deplasare  $\delta$

- 1) Ciclu cvasi-liniar: lipire;
- 2) Ciclu eliptic: alunecare parțială sau fisurare;
- 3) Ciclu cvasi-rectangular: alunecare totală

- un ciclu cvasi-liniar (figura 2.31.1), tensiunea tangențială crește liniar cu deplasarea, după care, la schimbarea sensului mișcării, scade cu aceleași valori; ciclul este închis, el corespunde unei condiții de solicitare de lipire a suprafețelor în contact și unei acomodări elastice a deplasărilor corpurilor în contact și dispozitivului de încercare; deplasarea relativă a suprafețelor în contact este neglijabilă;

- un ciclu eliptic (figura 2.31.2), ușor deschis, la care porțiunea neliniară corespunde unei diminuări a rigidității globale a sistemului; ireversibilitatea curbei  $F_t - \delta$  indică apariția alunecărilor în contact, ciclul corespunde unei condiții de solicitare de alunecare parțială;

- un ciclu cvasi-rectangular, larg deschis (figura 2.31.3), corespunzător unei condiții de alunecare totală; deplasarea reală rămâne inferioară deplasării impuse, iar pentru deplasări relativ mici, forța tangențială este practic constantă.

Pe parcursul încercării de fretting, forma ciclului forță tangențială - deplasare relativă poate evolua de o manieră specifică în funcție de procesele de degradare induse în materialul

contactului. Pentru caracterizarea acestei evoluții noțiunea de condiție de solicitare, care determină un anumit ciclu de fretting (fig. 2.31) a fost extrapolată la noțiunea de regim de solicitare, care are în vedere variația condiției de solicitare în funcție de timp [F1]. Pot fi definite astfel regimuri de solicitare de lipire, de alunecare parțială, de alunecare totală și mixte. În cazul regimurilor de solicitare mixte intervin tranziții de la alunecare totală spre alunecare parțială sau invers. O asemenea abordare permite reprezentări geometrice tridimensionale forță tangențială  $F_t$  - amplitudine deplasare  $D$  - număr de cicluri de solicitare  $N$  (ultimul introdus la scară logaritmică), pentru o frecvență  $f$  dată a solicitărilor, reprezentări numite intuitiv “trunchiuri de frecare” [T3][V2][F1].

Un exemplu caracteristic de configurație “trunchi de frecare” pentru cazul unor procese de uzare de fretting, în regim de alunecare totală, procese finalizate prin detașarea particulelor de uzură și formarea celui de-al treilea corp, este reprezentat în figura 2.32 [T3].

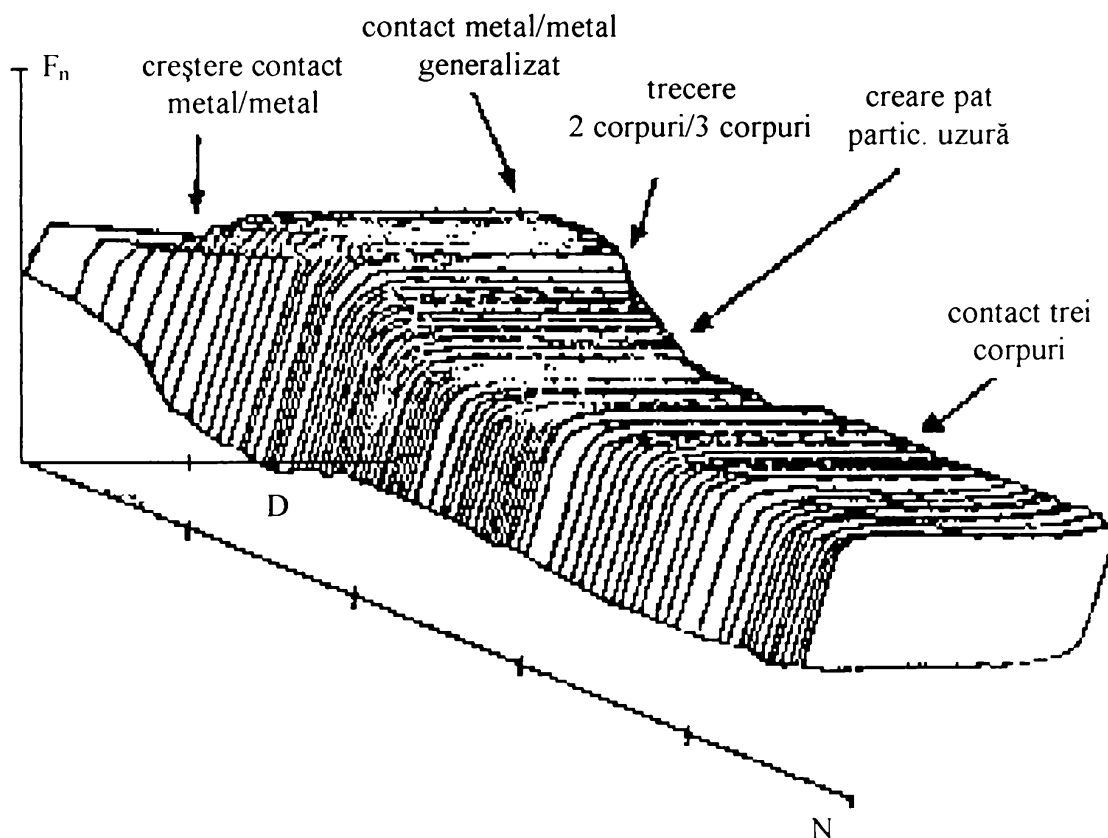


Fig. 2.32 Exemplu general de “trunchi de frecare”

Trei exemple intuitive de “trunchiuri de frecare” specifice unor regimuri de solicitare de lipire (1), mixt (2) și de alunecare totală (3) sunt redată în figura 2.33 [V2].



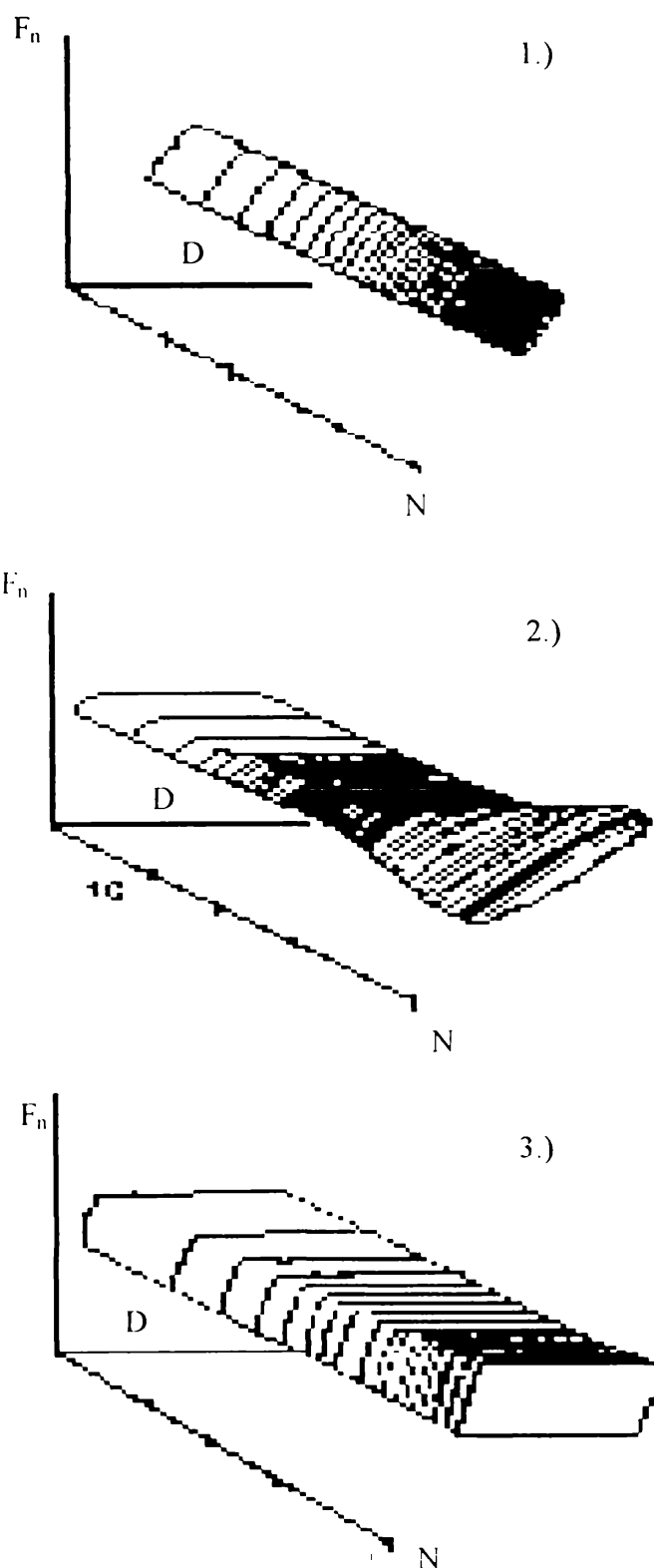


Fig. 2.33 Exemple specifice de “trunchiuri de frecare” [V2]

- 1) Regim de solicitare de lipire
- 2) Regim de solicitare mixt
- 3) Regim de solicitare de alunecare totală

Trebuie precizat că regimul de solicitare mixt este caracterizat de prezența simultană a unor procese de alunecare parțială și de deformare plastică a straturilor de material lipite ale contactului. Datorită acestui fapt, “trunchiul de frecare” corespunzător are o formă complexă, semnificativ variabilă în timp, cu cicluri cvasi-rectangulare și adeseori eliptice, relativ închise în cadrul aceleiași încercări. La “trunchiul de frecare” specific regimului de solicitare de alunecare totală pot interveni, de asemenea, variații ale formei rectangulare a ciclurilor  $F_n - D$ , determinate însă de modificarea coeficientului de frecare pe parcursul încercării.

Configurația geometrică a “trunchiurilor de frecare” poate fi corelată cu fenomenologia proceselor de degradare a suprafețelor de contact prin fisurare și uzare de fretting, pusă în evidență de Colombie [T3]. Practic, independent de natura materialelor supuse încercării, în condiții de frecare uscată, principalele etape ale degradării de fretting sunt următoarele (figura 2.34) [F1] [T3]:

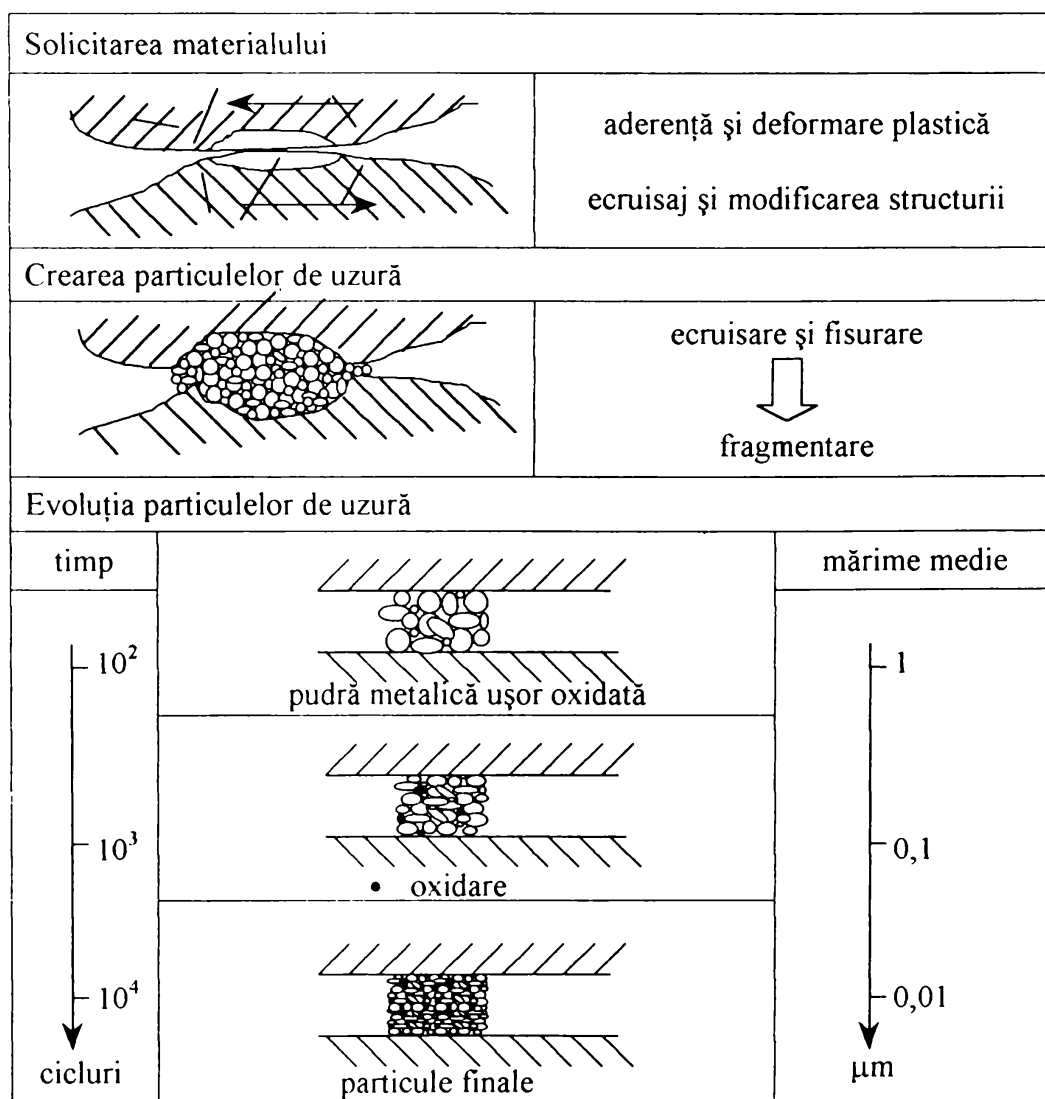


Fig. 2.34 Etapele degradării prin uzare de fretting [T3]

- distrugerea locală a ecranelor superficiale (predominant oxidice) și creșterea treptată a ariilor de contact dintre primele corpuri, deformare plastică și ecrusare intensă, însoțită de formarea unui strat de structură modificată tribologic, “albă” din punct de vedere metalografic, dură și fragilă;

- limitarea capacității materialului de a prelua deplasările impuse prin deformarea plastică locală ca urmare a fragilizării zonei de contact; se amorsează fisuri și se inițiază prelevarea primelor particule de uzură;

- fărâmițarea particulelor de mari dimensiuni în interiorul contactului, cu oxidarea tribochimică a produselor rezultate; constituirea, pe această cale, a unui strat de particule fine (pudră), reprezentând cel de-al treilea corp și stabilizarea relativă a contactului primelor două corpuri;

- degradarea, în continuare, a suprafețelor în contact, controlată de comportamentul reologic al celui de-al treilea corp și de fenomenul de captare-expulzare a particulelor de uzură în/din contactul existent; particulele detașate din primele corpuri devin particule de uzură doar după părăsirea definitivă a contactului.

Intensitatea, ponderea și evoluția spațial-temporară a etapelor descrise ale fenomenologiei degradării suprafețelor de contact prin fretting depind semnificativ de [T3][F2].

- macro și microgeometria contactului
- cuplul de materiale în contact
- condițiile de solicitare aplicate contactului
- starea tensiunilor reziduale din primele corpuri
- regimul de ungere
- natura mediului ambiant

În particular, complexitatea fenomenologică a proceselor de uzare de fretting este amplificată de modificarea semnificativă a naturii și geometriei interfețelor contactului datorită uzării, de cinematica particulelor de uzură în cadrul celui de-al treilea corp și de diversitatea și caracterul nestaționar al mecanismelor de transfer de energie și masă din sistemul tribologic constituit.

Din multitudinea de modele propuse, pe plan mondial, pentru caracterizarea uzării, se remarcă două tendințe importante, și anume [F1]: prima, preponderent cantitativă, inspirată din modelul propus de J.F. Archard, analizează degradarea materialului în termeni volumici, precum și corelarea acestora cu solicitarea impusă și caracteristicile fizico-chimice și mecanice ale materialului analizat. A doua tendință, introdusă de M. Godet, consideră că

uzura nu este o proprietate intrinsecă a materialului și că este deosebit de important să se țină cont de cel de-al treilea corp, format din particule de uzură și situat la interfața celor două corpuri în contact. Degradarea materialului nu mai este astfel asimilată volumului total de material degradat, ci cantității de particule de uzură expulzate din zona de contact. Particulele menținute în contact participă la transferul de forțe și protejează indirect degradarea celor două corpuri în contact. Analiza locală a celui de-al treilea corp este interesantă din punctul de vedere al analizei mecanismelor de degradare și a comportamentului tribologic a materialului, dar nu permite o definire a variabilelor capabile să ofere o bază de cuantificare pentru o comparație între diferite materiale.

### 2.3.2.3 Caracterizarea proceselor de uzare de fretting

Pentru un contact dat și pentru un număr determinat de cicluri de solicitare  $N$ , natura și configurația “trunchiului de frecare” și implicit a ciclurilor de fretting integrate depind semnificativ de forța normală aplicată contactului, de deplasarea relativă efectivă a suprafețelor de contact și de frecvența solicitărilor aplicate.

Pe această bază, pentru caracterizarea deplină și univocă a stării inițiale și evoluției proceselor de fretting au fost introduse și în prezent se aplică uzual așa numitele hărți de fretting [T3], care definesc domeniile de separație/tranziție dintre diferite stări de solicitare și respectiv diferite procese de degradare a suprafețelor în contact, asociate acestor solicitări.

Astfel, se disting [D6][F1][T3][V2]:

- harta solicitărilor locale (HSL), care identifică, pentru valori  $F_n$  -  $D$  date, domenii caracteristice regimurilor de solicitare de alunecare parțială (RAP), mixt (RM) și de alunecare totală (RAT). Un exemplu de HSL [F1] este reprezentat în figura 2.35;

- harta de răspuns a materialului (HRM) la solicitările definite prin HSL, care pune în evidență, pe baza examinării microscopice optice, domenii caracteristice de absență a degradării materialului, de fisurare și de uzare cu formare de particule de uzură. Un exemplu de HRM [F1] este prezentat în figura 2.36.

În pofida faptului că HSL corespunde solicitării inițiale, anterioare oricărei degradări, iar HRM reflectă procesele de degradare induse în materialul primelor corpuri sub acțiunea solicitărilor efective de pe parcursul încercării de fretting, cele două categorii de hărți sunt interdependente. Afirmatia este probată de mulțimea datelor experimentale care atestă corelația calitativă a domeniilor HRM în care se manifestă fenomene de fisurare și de uzare cu

formare de particule de uzură, cu domeniile HSL caracteristice regimurilor de solicitare de alunecare parțială, mixt și respectiv de alunecare totală.

O imagine intuitivă a corelației descrise este oferită de figura 2.37 [F1].

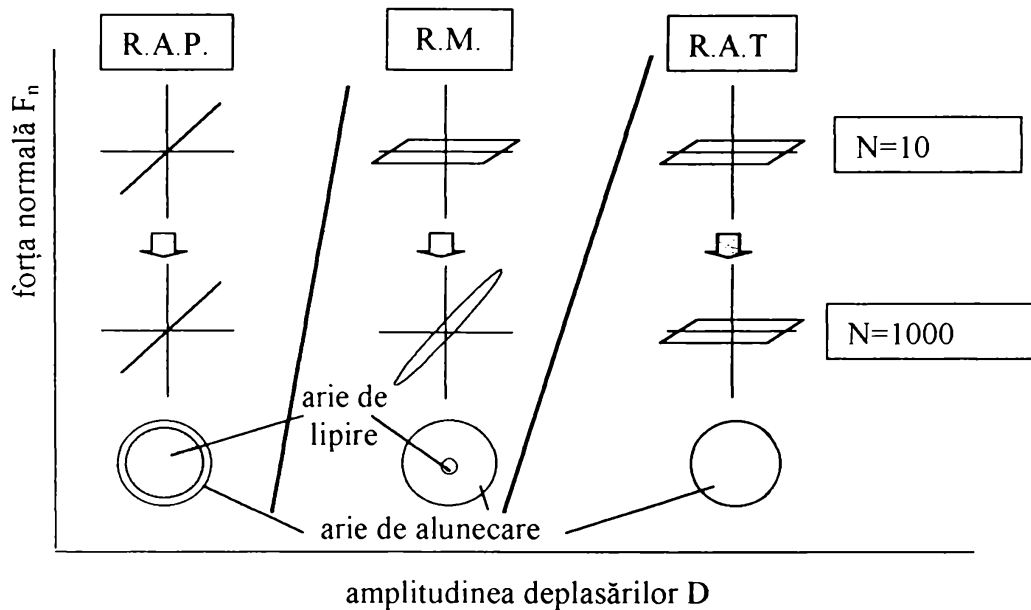


Fig. 2.35 Harta solicitărilor locale corespunzătoare regimurilor de solicitare de alunecare parțială (R.A.P.), mixt (R.M.) și de alunecare totală (R.A.T.) [F1]

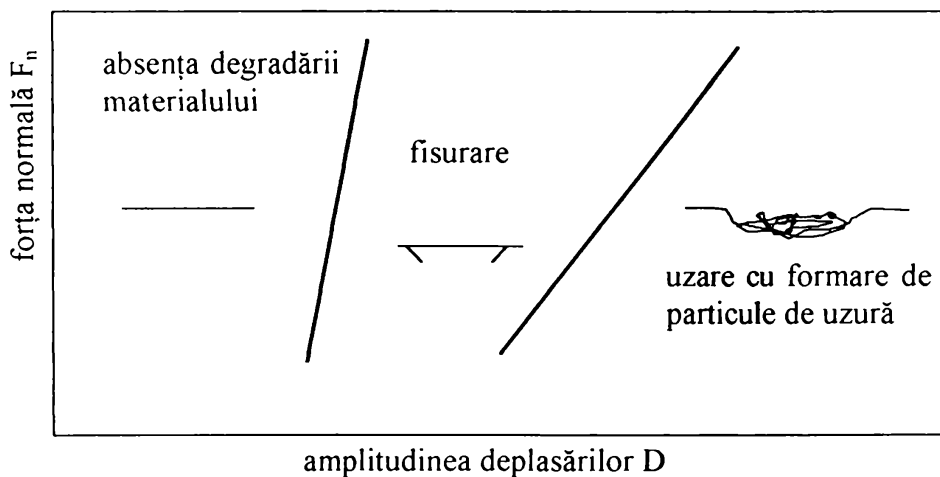


Fig. 2.36 Harta de răspuns a materialului (HRM) [F1]

Pe baza a numeroase încercări de fretting aplicate materialelor metalice, polimerilor și materialelor compozite [F2] s-a demonstrat că regimul de solicitare mixtă din HSL este cel mai periculos din punctul de vedere al probabilității de fisurare a materialului din contact. Faptul se explică prin aceea că la tranziția de la regimul de alunecare parțială la regimul de alunecare totală, trecând prin regimul de solicitare mixtă, tensiunile locale ating valori maxime, care amplifică semnificativ procesul de generare și propagare a fisurilor de oboseală.

Ținând cont de cele de mai sus, problema definirii unor criterii cantitative, suficient de precise și relativ ușor de determinat, pentru predicția domeniului de tranziție dintre regimurile de alunecare parțială și totală dobândește o importanță majoră pentru caracterizarea și evaluarea proceselor de degradare și în particular de uzare induse de fretting.

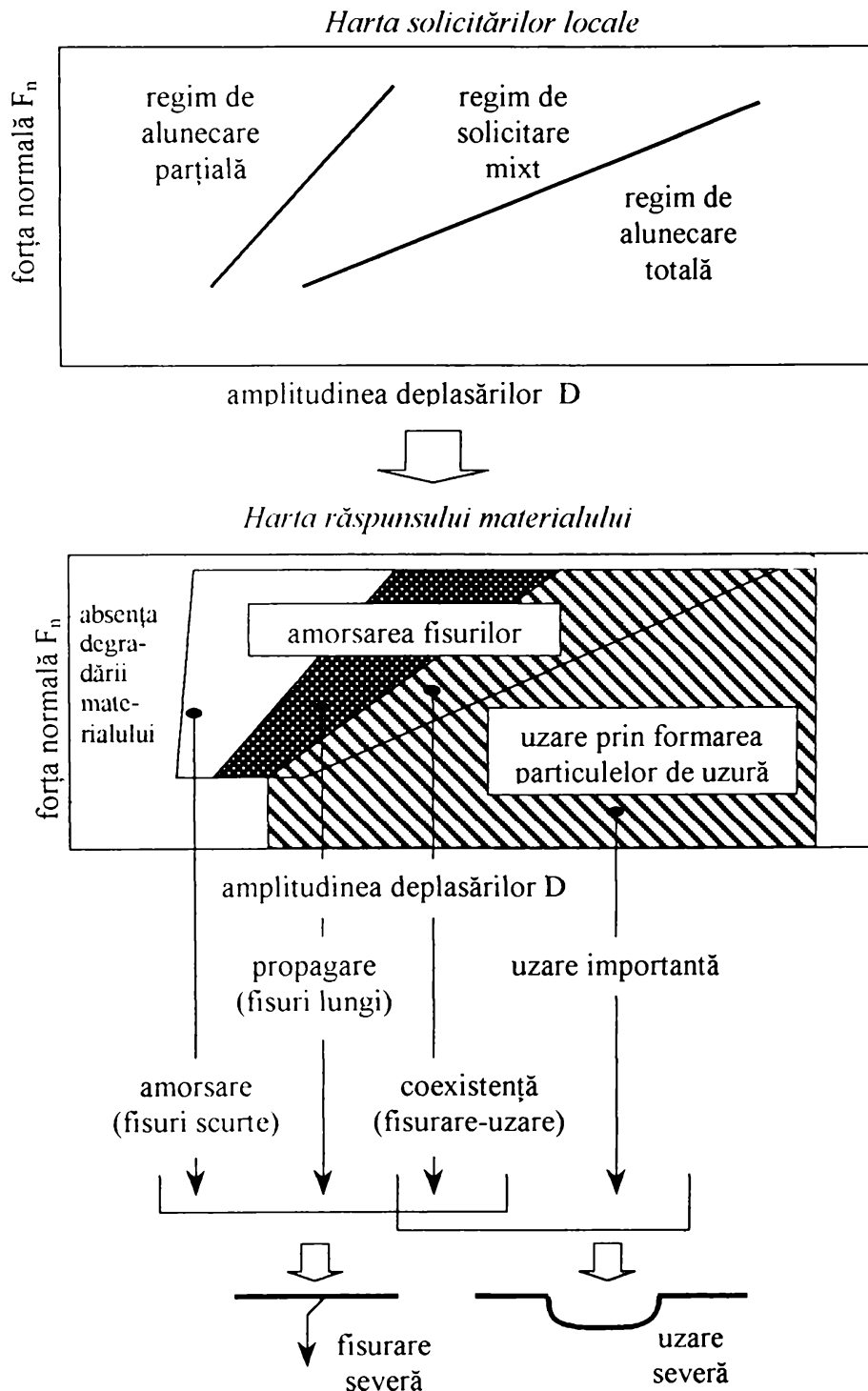


Fig. 2.37 Corelație dintre harta solicitărilor locale și harta răspunsului materialului [F1]

Un sistem de asemenea criterii, elaborat de [F1] [F2] este prezentat, cu titlu ilustrativ, în figura 2.38.

Denumire	Expresie de calcul	Determinare	Valori critice de tranziție	Rezoluție
Criteriul "energie"	$A = \frac{W_d}{W_f}$		$A_{cr} = 0.2$ $A < A_{cr}$ : alunecare parțială $A > A_{cr}$ : alunecare totală	foarte bună
Criteriul "deschidere"	$B = \frac{\delta_0}{D}$		$B_{cr} = 0.26$ $B < B_{cr}$ : alunecare parțială $B > B_{cr}$ : alunecare totală	bună
Criteriul independent de sistem	$C = \frac{W_d}{W_{d0}}$		$C_{cr} = 0.77$ $C < C_{cr}$ : alunecare parțială $C > C_{cr}$ : alunecare totală	medie

Fig. 2.38 Criterii pentru predicția tranziției dintre regimurile de alunecare parțială și totală, unde:

$W_d$  – energia mecanică disipată în ciclul de alunecare parțială;

$W_f$  – energia mecanică totală furnizată în cupla de frecare;

$W_{d0}$  – energia mecanică disipată în ciclul de alunecare totală.

Pentru o mai bună caracterizare a domeniului de tranziție se recomandă utilizarea concomitentă a cel puțin două din criteriile propuse.

### 2.3.3 Corelații semnificative între comportamentul tribologic și rugozitatea suprafețelor de contact

În toate tribo-sistemele interacțiunea suprafețelor de contact este condiționată de rugozitatea inițială a suprafețelor de contact și de modificarea acesteia pe parcursul funcționării sistemelor respective.

Dacă în urmă cu cca. 50 de ani rolul topografiei suprafețelor în comportamentul tribologic părea doar relativ neimportant, în prezent acest rol este considerat semnificativ și chiar crucial pentru multe din caracteristicile tribo-sistemului, inclusiv pentru condițiile de tranziție dintre diferite regimuri de funcționare a cuplelor de frecare sau de la regimul de funcționare nominal la regimul de avarie [A3].

Probabilitatea modificării topografiei și implicit a rugozității suprafețelor de contact pe parcursul funcționării tribo-sistemelor este reală, iar modificările propriu-zise pot fi provocate fie de deformarea plastică, fie de uzarea suprafețelor de contact [C1].

Procesele de deformare și uzare la nivelul microgeometriei suprafețelor de contact sunt interdependente și, așa cum se va vedea în continuare, stau sub incidența topografiei și, în particular, a formei neregularităților suprafețelor considerate.

Un studiu monografic pertinent realizat de J.F. Archard [A3], care își păstrează și în prezent actualitatea, relevă ca elemente esențiale ale rolului topografiei suprafețelor în procesele de contact, frecare și uzare din cuplele de frecare, următoarele:

1) ecuațiile fundamentale ale frecării și uzării suprafețelor de contact:

$$F_n = A_r \cdot D_H, \quad F = \tau \cdot A_r, \quad \mu = \tau / D_H \quad (2.37)$$

și respectiv

$$\frac{V}{L} = \frac{1}{3} \cdot K \cdot A_r = \frac{1}{3} \cdot K \cdot \frac{F_n}{D_H} \quad (2.38)$$

în care:  $F_n$  este încărcarea normală,  $A_r$  - aria reală de contact,  $D_H$  - duritatea materialului mai moale,  $\tau$  - tensiunea de forfecare a joncțiunilor din cadrul contactului,  $\mu$  - coeficientul de frecare,  $V$  - volumul de material uzat pe lungimea de frecare  $L$  și  $K = 10^{-3} \dots 10^{-6}$  - coeficientul de uzare, își păstrează valabilitatea independent de natura elastică, elasto-plastică sau plastică a deformației neregularităților suprafețelor de contact.

Faptul este consecința proporționalității ariei reale de contact  $A_r$ , condiționată de rugozitatea suprafețelor și, în particular, de raza de curbură a neregularităților acestora, cu încărcarea normală a contactului  $F_n$ :

$$A_r \propto F_n \quad (2.39)$$

Această proporționalitate este valabilă în ipoteza unei structuri aleatoare și multiscale a profilului de rugozitate, capabilă să asigure multiplicarea punctelor de contact și nu lărgirea ariei contactelor existente, atunci când încărcarea aplicată contactului crește.

2) modelarea matematică, pe scară largă, a suprafețelor de contact prin integrarea proprietăților aleatoare și multiscale ale acestora, furnizează informații directe și precise,



confirmate de conversia A/D a datelor experimentale, despre forma concretă a neregularităților suprafețelor reale de contact.

În acest fel a fost validată și teoretic valabilitatea relației 2.39 independent de natura elastică sau plastică a deformării neregularităților.

Pe baza noilor modele s-a demonstrat că aplicarea oricărei teorii privind comportamentul tribologic al suprafețelor de contact în rezolvarea problemelor practice impune stabilirea nivelului/nivelelor de scalare, cele mai importante pentru aplicația considerată. Pentru rodaj, de exemplu, este deosebit de important nivelul de scalare caracterizat prin lungimea de undă minimă, în timp ce, din punctul de vedere al fiabilității sistemului tribologic esențial este nivelul de scalare cu lungime de undă semnificativ superioară lungimii de autocorelație.

În fine, evidențierea, pe baza aceluiași modele, a unei repartiții statistice a razelor de curbură a neregularităților (vârfurile mai înalte tind să aibe o rază de curbură mai mică) a permis evaluarea unei probabilități mai mari a deformării plastice în raport cu deformarea elastică a neregularităților.

3) natura deformației neregularităților suprafețelor de contact poate fi estimată pe baza indicelui de plasticitate [B2] [P6]:

$$\Psi = \left( \frac{E^*}{D_H} \right) \cdot \left( \frac{R_q}{r} \right)^{0.5} \quad (2.40)$$

unde  $E^*$  este modulul de elasticitate echivalent a materialelor cuplei de frecare,  $R_q$  - abaterea medie pătratică a înălțimii neregularităților,  $D_H$  - duritatea materialului mai moale, iar  $r$  - raza medie de curbură a vârfurilor neregularităților.

Dacă  $\Psi < 0.6$  probabilitatea curgerii plastice în zona de contact este redusă, iar dacă  $\Psi > 1$  deformarea plastică a materialului din zona de contact este certă. Deoarece pentru majoritatea suprafețelor de interes ingineresc  $\Psi > 1$  se poate aprecia că deformarea plastică va fi prezentă în orice contact.

Deformarea plastică locală influențează și modifică în timp [C1] indicatorii de înălțime a neregularităților  $R_a$ ,  $R_z$ , densitatea de repartiție a înălțimilor  $p(z)$  și funcția de autocorelație  $r(t)$  a profilelor de rugozitate.

O imagine mai concretă a implicării caracteristicilor de rugozitate în comportamentul tribologic al suprafețelor de contact este prezentată în [O2], pe baza unui model matematic adecvat suprafețelor cu rugozitate gaussiană izotropă.

Pentru astfel de suprafețe, care pot fi caracterizate prin exclusiv doi parametri statistici și anume  $R_q$  și lungimea de autocorelație  $\lambda_0$ , determinarea razei de curbura medii a vârfurilor neregularităților  $\bar{r}_c$  este posibilă cu relația:

$$\bar{r}_c \cong \{0.17 \div 0.23\} \cdot \left( \frac{\lambda_0^2}{R_q} \right) [\text{mm}] \quad (2.41)$$

Modelul elaborat permite estimarea valorilor parametrilor de contact și coeficientului de frecare sugerând legități de variație specifice (figura 2.39).

În regimul de ungere elastohidrodinamic rugozitatea momentană a suprafețelor cu contact punctiform și liniar controlează, în condiții date, și grosimea relativă  $\lambda$  a peliculei de lubrifiant și implicit regimul de lubrifiere corespunzător [B2] [C1] [R1]:

$$\lambda = \frac{h}{R_{q \text{ echiv}}} \quad (2.42)$$

unde  $h$  este grosimea peliculei de lubrifiant, dependentă de natura lubrifiantului, proprietățile materialelor implicate și condițiile de lucru, iar  $R_{q \text{ echiv}}$  este abaterea medie pătratică a profilului de rugozitate, echivalentă suprafețelor în contact.

La modul general [B2] [R1], pentru  $\lambda < 1$  suprafețele sunt în contact direct (regim de lubrifiere limită), pentru  $\lambda \cong 1$  suprafețele de contact sunt parțial separate (regim de lubrifiere mixtă), iar pentru  $\lambda \gg 1$  suprafețele de contact sunt complet separate de pelicula de lubrifiant (regim de lubrifiere elastohidrodinamică).

Este interesant de remarcat că prin rodaj, ca proces de modificare controlată și dorită a rugozității inițiale a suprafețelor, se exercită o influență favorabilă, complexă și semnificativă, asupra unor caracteristici funcționale ale tribo-sistemului, și anume (figura 2.40 [C1] [P6] [Z1]):

- mărirea grosimii absolute și relative a peliculei de lubrifiant, prin reducerea înălțimii celor mai înalte neregularități și deci prin “acomodarea” mai bună a suprafețelor de contact;
- deplasarea maximului curbei de variație a coeficientului de frecare în funcție de viteza de alunecare a suprafețelor în contact spre stânga, cu extinderea regimului de lubrifiere elastohidrodinamic și creșterea fiabilității tribo-sistemului;
- scăderea și mai mult a minimului coeficientului de frecare, caracteristic suprafeței inițiale.

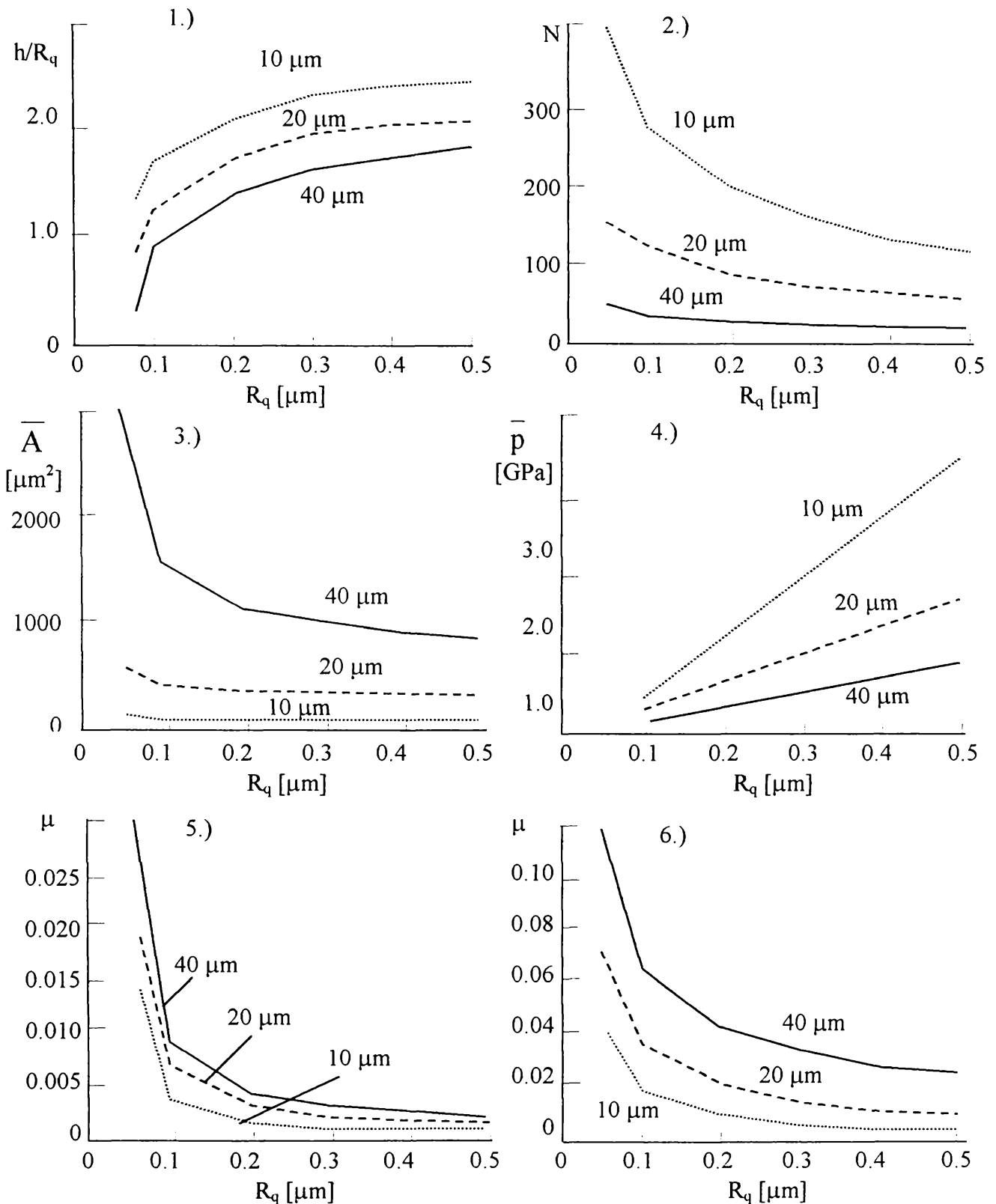


Fig.2.39 Variații estimate ale parametrilor de contact și coeficientului de frecare cu abaterea medie pătratică a înălțimii neregularităților  $R_q$  având ca parametru lungimea de autocorelație  $\lambda_0$

- |  |  |
|--|--|
| 1.) distanța normală de separație plană $h/R_q$          | 2.) numărul punctelor de contact $N$                     |
| 3.) aria medie de contact pe joncțiune $\bar{A}$         | 4.) presiunea medie de contact pe joncțiune $\bar{p}$    |
| 5.) coeficientul de frecare $\mu$<br>(model microscopic) | 6.) coeficientul de frecare $\mu$<br>(model macroscopic) |

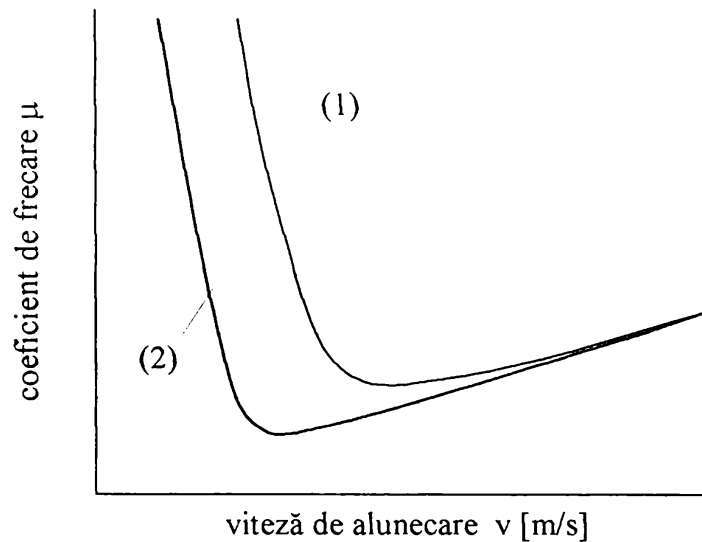


Fig 2.40 Variația coeficientului de frecare în funcție de viteza de alunecare a suprafețelor în contact înainte (1) și după rodaj (2)

Pentru cazul particular al suprafețelor cu rugozitate izotropă, în [S8] se furnizează informații suplimentare privind comportamentul tribologic specific acestora. Așa cum rezultă din figura 2.41 [S8], în condiții identice, deformația totală, elastică și plastică și respectiv deformația remanentă, ireversibilă a suprafețelor cu rugozitate izotropă (prelucrate prin eroziune electrică) sunt semnificativ mai reduse decât cele corespunzătoare suprafețelor cu rugozitate anizotropă (obținute prin strunjire).

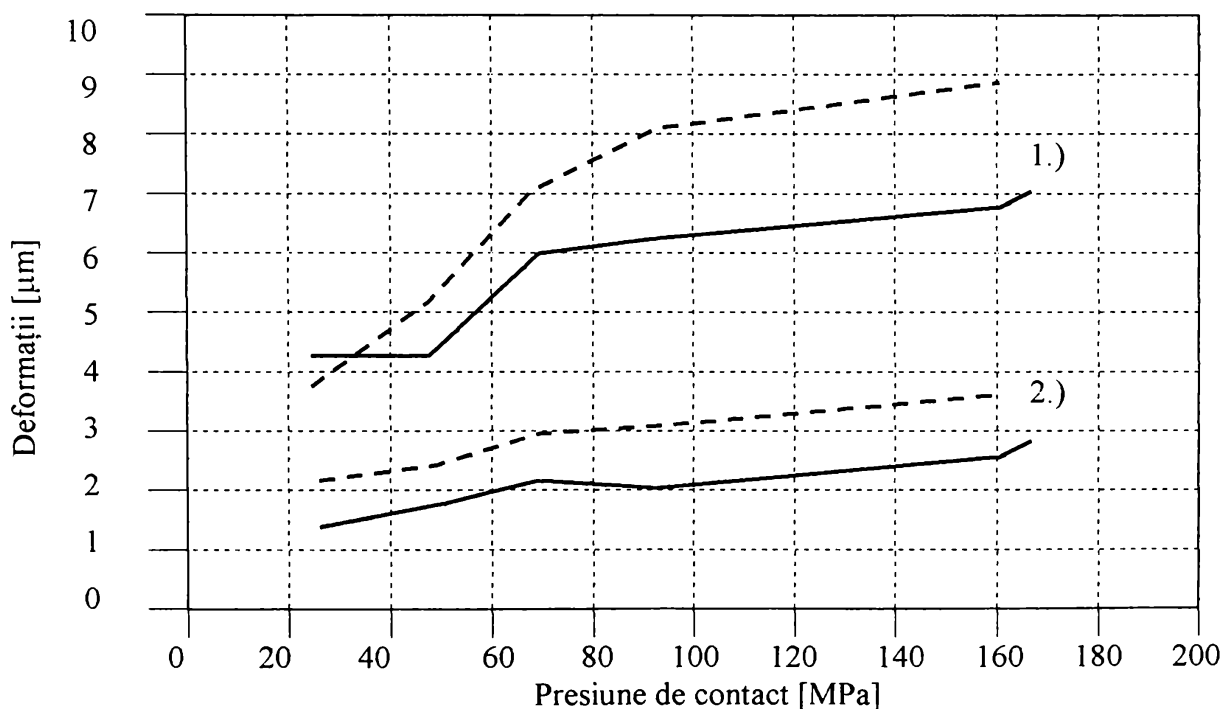


Fig. 2.41 Variația deformației totale (1) și remanente (2) a suprafețelor cu rugozitate izotropă (—) și anizotropă (- - - -) în funcție de presiunea de contact

În aceeași situație, pierderile prin neetanșitate sunt de cca. 2 ori mai reduse pentru contactul unei suprafețe etalon cu o suprafață erodată decât în cazul contactului cu o suprafață strunjită, de aceeași rugozitate.

Situația descrisă se explică prin faptul că [S8] în cazul suprafețelor cu rugozitate izotropă proeminențele și golurile sunt izolate între ele, ceea ce probează și o capacitate superioară de retenție a lubrifiantului de către suprafețele de contact cu rugozitate izotropă.

Dacă tehnologia prelucrării inițiale a suprafețelor de contact se bazează pe o mulțime de acțiuni și evenimente repetabile, generate aleator în lungul suprafețelor, topografia și implicit rugozitatea acestora vor putea fi caracterizate printr-o densitate de repartiție gaussiană. De fapt, cea mai mare parte a suprafețelor de contact au, în stare inițială, o repartiție gaussiană a înălțimii neregularităților. Orice modificare a rugozității inițiale, fie prin deformare plastică, fie prin uzare în timpul funcționării, alterează această lege de repartiție inițială.

Particularitățile modificării rugozității suprafețelor de contact prin acțiunea proceselor de deformare plastică a neregularităților sunt evidențiate în figura 2.42 [C1], în care funcția de repartiție  $P(Z)$  normată (cumulativă), definită în intervalul  $[0,1]$  a suprafeței inițiale (A) este comparată cu funcțiile de repartiție corespunzătoare unor suprafețe intermediare (B) și finale (C).

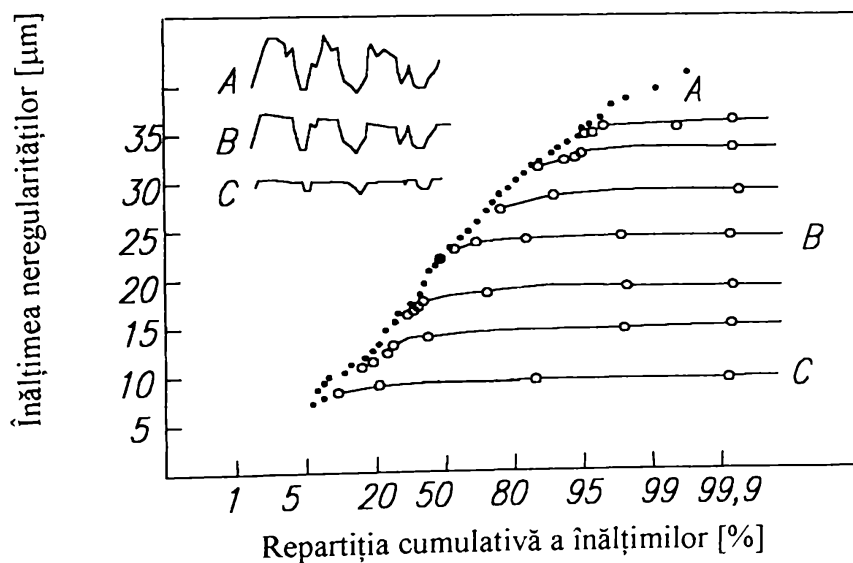


Fig. 2.42 Funcțiile de repartiție normale (cumulative) ale suprafeței inițiale (A) și suprafețelor modificate prin procesele de deformare plastică (B, C) pe parcursul funcționării tribosistemului

Reprezentarea s-a făcut pe hârtie normal-probabilistică, astfel încât, prin alegerea corespunzătoare a scării axei ordonatelor, funcția de repartiție asociată suprafeței inițiale, gaussiene să apară, în primă aproximație, liniară [T4].

Este evidentă alterarea treptată a legii de repartiție gaussiene, inițiale a înălțimii neregularităților pe măsura amplificării proceselor de deformare plastică a suprafețelor de contact.

O a doua categorie de modificări ale topografiei inițiale a suprafețelor de contact este indusă prin acțiunea proceselor de uzare.

Funcție de rugozitatea inițială, aceste modificări pot fi [C1] de două tipuri:

- procese de uzare care degradează suprafețele inițiale netede;
- procese de uzare care netezesc suprafețe inițiale mai rugoase.

În figura 2.43 [C1] sunt reprezentate (în aceleași condiții ca și la fig. 2.42) funcțiile de repartiție normate (cumulative) ale suprafeței inițiale, gaussiene (A) și ale unor suprafețe intermediare (B) și finale (C), rezultate în urma proceselor de uzare a suprafețelor de contact inițiale.

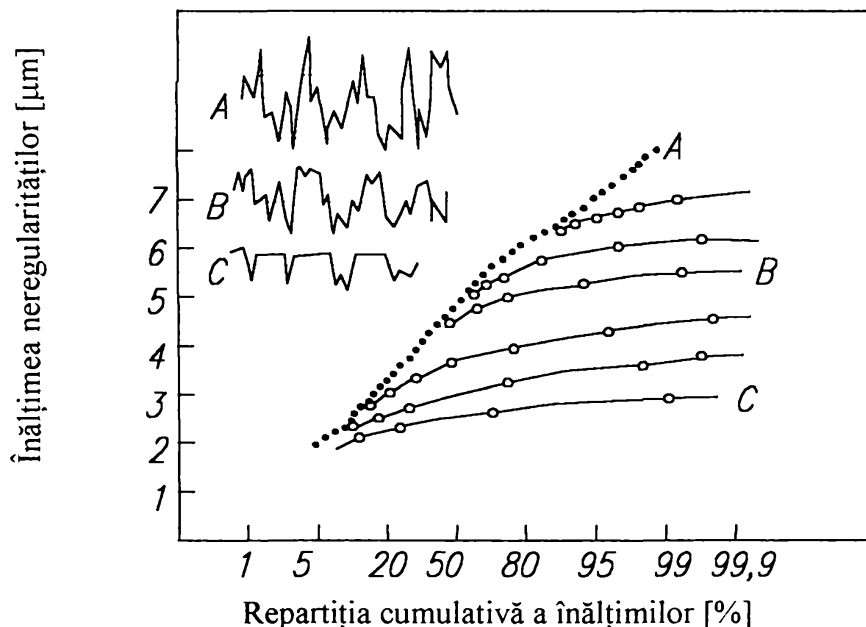


Fig. 2.43 Funcțiile de repartiție normate (cumulative) ale suprafeței inițiale (A) și suprafețelor modificate prin procesele de uzare (B, C), pe parcursul funcționării tribo-sistemului

Se poate observa că intensitatea uzurii liniare este maximă la începutul interacțiunii suprafețelor de contact (cca. 20% din partea superioară a neregularităților îndepărtate), după care scade treptat.

Repartiția alterată (în raport cu repartiția inițială, gaussiană) a înălțimii neregularităților și modificarea corespunzătoare a curbei de portanță sunt evident caracteristice unor suprafețe puțin uzate. Pe măsura avansării proceselor de uzare, curbele de tranziție de la topografia inițială la topografia rezultată în urma uzării se deplasează continuu spre înălțimi tot mai mici ale neregularităților, până la substituirea integrală a suprafeței inițiale printr-o suprafață nouă, generată în urma uzării.

## 2.4 Concluzii

Analiza critică și creativă a literaturii de specialitate disponibile, sintetizată în capitolul de față, a avut ca scop asigurarea unei baze informaționale pertinente și la zi, absolut necesare abordării problematicei ce reprezintă obiectivele prioritare ale tezei de doctorat:

- definirea și evaluarea caracteristicilor microgeometrice ale suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă, precum și

- evidențierea particularităților de comportament tribologic a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă prin prisma corelațiilor existente între caracteristicile tribologice și rugozitatea acestor suprafețe.

Bibliografia studiată arată că principalele dificultăți în abordarea problematicei enunțate sunt determinate de:

- natura nestaționară și multiscalară, greu modelabilă matematic, a rugozității suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă și de limitele tehnicilor actuale de măsurare a parametrilor de rugozitate;

- complexitatea extremă a fenomenelor tribologice din punct de vedere energetic, morfologic și cinetic, ceea ce exclude posibilitățile de modelare analitică la nivel global și generează dificultăți în evidențierea unor legități empirice, valabile pe scară largă și în corelarea acestora cu parametrii de rugozitate a suprafețelor de contact.

În rândul tendințelor și preocupărilor care se manifestă în ultimul timp, în domeniul analizat, sinteza bibliografică efectuată evidențiază:

1) extinderea continuă a modului de gândire sistemic în cercetările tribologice;

2) crearea unor premise favorabile pentru raționalizarea sistemului de parametri structurali și funcționali standardizați și nestandardizați, necesari și suficienți pentru definirea și evaluarea rugozității și pentru estimarea comportamentului tribologic al suprafețelor de contact;

3) afirmarea, în contextul de mai sus, a parametrilor care definesc forma concretă a neregularităților (înălțime, spațiere, înclinare și curbura) și respectiv a parametrilor statistici și globali, raportați la arii tot mai mari ale suprafețelor investigate;

4) creșterea interesului pentru introducerea și aplicarea unor criterii de discriminare obiectivă a suprafețelor de contact cu rugozitate anizotropă și izotropă, ceea ce probează mărirea importanței și disponibilității celor din urmă;



5) dezvoltarea concurentă a abordării bi și tridimensionale în definirea și evaluarea rugozității suprafețelor de contact, atât pe plan teoretic (aplicații ale teoriei funcțiilor aleatoare, statisticii matematice, analizei spectrale și geometriei fractale), cât și pe plan experimental (aparate de măsurare tactilă, cu palpator rigid și respectiv aparate de măsurare non-tactilă optică reflectivă, interferențială și difractivă); devine tot mai evident că, în raport cu evoluția actuală a exigențelor impuse tehnologiilor de fabricație și funcționalității sistemelor tehnice, abordarea tridimensională, geometria fractală și sistemele optice de evaluare a rugozității reprezintă domenii de vârf ale progresului științific și tehnologic;

6) deplasarea centrului de interes al cercetărilor tribologice din sfera corpurilor individuale constitutive ale cuplelor de frecare în sfera suprafețelor limită și interfețelor de contact ale acestora, care controlează transferul de energie, masă și informație, noul mod de abordare favorizează promovarea preocupărilor care vizează înțelegerea conexiunilor dintre topografia suprafețelor și performanțele funcționale ale sistemelor tehnice implicate;

7) investigarea prioritară a unor procese tribologice de mare complexitate fenomenologică, incidență largă și impact semnificativ asupra fiabilității cuplelor de frecare, cum ar fi de exemplu, în perioada actuală, procesele de oboseală, uzare și coroziune de fretting;

8) promovarea cercetărilor tribologice avansate, asistate de calculator, atât pe plan teoretic - dezvoltarea unor modele matematice adecvate, rezolvabile numeric, cât și pe plan experimental - instalații de încercare de mare performanță, precise și fiabile, capabile de achiziționarea, prelucrarea, modelarea și reprezentarea automată, în timp real, a datelor de măsurare.

Elementele prezentate mai sus au stat la baza stabilirii opțiunilor fundamentale necesare realizării efective a obiectivelor tezei de doctorat. Este clar că în adoptarea deciziilor finale a trebuit să se țină seama și de restricțiile impuse de contextul real în care urma să fie elaborată teza.

Până la urmă, cu prețul unor eforturi deosebite legate de asigurarea accesului la aparatură de investigație performantă, cea mai mare parte a dificultăților a fost depășită și s-a realizat un compromis (considerat acceptabil, în condițiile date) între necesar, disponibil și fezabil, compromis concretizat prin adoptarea următoarelor modalități concrete de atingere a obiectivelor asumate în teza de doctorat:

1) recurgerea la cercetarea experimentală, organizată pe principii de analiză factorială și regresională;

2) investigare optică interferometrică și respectiv investigare la uzare de fretting a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă și, pentru comparație, anizotropă;

3) prioritate acordată evaluării parametrilor și caracteristicilor capabile să pună în evidență legătura dintre rugozitatea suprafețelor de contact și comportamentul tribologic al acestora;

4) prioritate acordată legăturilor de cauzalitate și criteriilor de tranziție a tribo-sistemelor de la regimul nominal de funcționare la regimul de avarie în raport cu modificările cantitative ale suprafețelor de contact investigate;

5) utilizarea practic exclusivă a unor aparate de măsură și instalații de încercare avansate, integrate cu calculator și cu sisteme de prelucrare electronică a imaginilor, existente exclusiv în afara țării;

6) prelucrarea ulterioară și interpretarea bazei de date generate pe parcursul măsurărilor și încercărilor efectuate, în vederea valorificării cât mai complete a volumului de informații disponibil.

## Capitolul 3

# INVESTIGAREA EXPERIMENTALĂ A CARACTERISTICILOR SUPRAFETELOR DE CONTACT CU RUGOZITATE IZOTROPĂ

### 3.1 Obiectivele generale ale cercetării experimentale

Aceste obiective decurg, în mod firesc, din concluziile expuse la § 2.4 și se identifică, în mare măsură, cu obiectivele prioritare ale tezei de doctorat prezentate în Capitolul 1.

Se urmărește deci, cuplarea rezultatelor obținute prin utilizarea noilor metode de definire, evaluare și modelare a rugozității suprafețelor de contact cu posibilitățile de predicție și evaluare experimentală a caracteristicilor acestora, în general și cu stările de tranziție dintre diferitele regimuri de funcționare ale cuplelor cinematice constituite, în particular.

În consecință, pe plan conceptual, cercetarea experimentală a fost orientată pe două direcții convergente principale, și anume:

- investigarea optică interferometrică a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă în vederea definirii particularităților esențiale ale acestora, din punct de vedere structural și funcțional, prin verificarea normalității repartiției înălțimii neregularităților, prin măsurarea caracteristicilor referitoare la înălțimea, spațierea, înclinarea și curbura neregularităților și, în fine, prin determinarea și reprezentarea funcțiilor de autocorelație, densitate spectrală și de portanță specifice acestora;

- investigarea comportării la uzare de fretting a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă în vederea ierarhizării și modelării empirice a factorilor determinanți ai criteriului de tranziție alunecare parțială-alunecare totală în condițiile uzării de fretting și pentru evidențierea morfologiei și aspectelor energetice asociate proceselor de frecare și proceselor de uzare de fretting intervenite.

Toate investigațiile aplicate suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă urmează a fi replicate unor suprafețe similare cu rugozitate anizotropă, constituindu-se, în acest fel, un

sistem de referință obiectiv și adecvat. În toate cazurile descrise, aparatura de măsurare și încercare folosită asigură achiziționarea, prelucrarea, modelarea și reprezentarea automată, în timp real, a datelor de măsurare primare.

Pe plan metodic, s-a considerat oportună organizarea cercetărilor referitoare la procesele de uzare de fretting pe principiile planificării statistice, factoriale și regresionale, a experimentărilor.

Principalul avantaj al acestui mod de organizare a cercetărilor experimentale s-a considerat a fi posibilitatea modelării empirice polinomiale a corelațiilor de tip cauză-efect și ierarhizării importanței factorilor de influență existenți, în condițiile unui număr minim de încercări și cu un nivel de încredere ridicat.

Disponibilitatea în cadrul Universității "Politehnica" din Timișoara a unui program de calcul deosebit de performant pentru prelucrarea avansată și reprezentarea grafică a rezultatelor obținute, denumit STATGRAPHICS [S6], a fost de natură să favorizeze adoptarea deciziei de aplicare a acestei metode moderne de organizare a experimentărilor.

## 3.2 Investigarea optică a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă

### 3.2.1 Concepția și organizarea programului experimental

În paralel cu preocupările privind principiile, soluțiile constructive și domeniile de aplicație ale sistemelor optice de evaluare a rugozității suprafețelor, la modul general (vezi § 2.2.3), în cadrul tezei de doctorat au fost efectuate cercetări experimentale sistematice având ca obiectiv evaluarea optică interferometrică a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă, prelucrate prin eroziune electrică, precum și compararea acestora cu suprafețe cu rugozitate anizotropă. S-a optat pentru metoda interferometrică de evaluare a caracteristicilor suprafețelor cu rugozitate izotropă, datorită următoarelor considerente:

- obținerea unor indicatori de rugozitate ce definesc forma concretă a neregularităților;
- obținerea unor indicatori de rugozitate integrali, definiți și raportați pe arii relativ extinse ale suprafețelor cercetate;
- obținerea unor indicatori de rugozitate funcționali capabili să caracterizeze comportamentul tribologic al suprafețelor analizate.

Cercetările experimentale au beneficiat, prin bunăvoința firmelor *L.O.T.-Oriel GmbH* și *ATOS GmbH*, din Germania, de sistemele de măsurare optică interferențială, cele mai avansate, în acest moment, pe plan mondial.

Aspectele urmărite cu prioritate sunt următoarele:

- verificarea normalității repartiției înălțimilor microgeometriei suprafețelor cu rugozitate izotropă;
- determinarea caracteristicilor de profil ale suprafețelor cu rugozitate izotropă și respectiv anizotropă;
- determinarea unor parametri de rugozitate hibridi, nestandardizați, referitori la înclinarea și curbura neregularităților suprafețelor cu rugozitate izotropă și respectiv anizotropă;
- compararea din punct de vedere geometric și tribologic a suprafețelor cu rugozitate izotropă și anizotropă.

În acest scop, un set de șase probe, confecționate din oțel 205 Cr 115 (STAS 3611/88) cu compoziția chimică prezentată în tabelul 3.1, au fost prelucrate la dimensiunile  $\varnothing 95 \times 10$  mm, și au fost supuse unui tratament de călire-revenire până la  $60 \pm 64$  HRC.

TABELUL 3.1 Compoziția chimică a oțelului 205 Cr 115 (STAS 3611-88)

	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>S</b>	<b>P</b>
<b>min.</b>	1.80	0.15	0.15	11	-	-	-
<b>max.</b>	2.20	0.45	0.45	13	0.35	0.25	0.03

Pe una din suprafețele frontale, cinci probe (notate în continuare cu E1÷ E5, în ordinea crescătoare a rugozității) au fost prelucrate prin electroeroziune pe mașina *ELER-01*, în regimuri de finisare, iar o probă (notată cu R), a fost rectificată pe o mașină de rectificat plan.

### 3.2.2 Standul experimental-principii, structură, funcționalitate

#### 3.2.2.1 Principiul metodei

Schema de principiu a sistemelor interferențiale de baleiere verticală, în lumină albă, pentru evaluarea 3-D a suprafețelor tehnologice, utilizate în cadrul cercetărilor experimentale (*ZYGO-New View 100* produs al firmei *ZYGO Corporation-U.S.A.*- figura 3.1.1 și *PROMAP-512* produs al firmei *Micromap-U.S.A.* - figura 3.1.2), este reprezentată în figura 3.1.3 [A5] [Z4] [Z15] [Z16] [W1].

Structura unui asemenea sistem include:

1. Sursă de lumină albă
2. Sistem optic de formare și divizare a fasciculului luminos
3. Microscop interferențial
4. Dispozitiv de baleiere acționat piezoelectric
5. Masa de poziționare a probei
6. Detector CCD integrat într-o cameră video
7. Calculator cu monitor

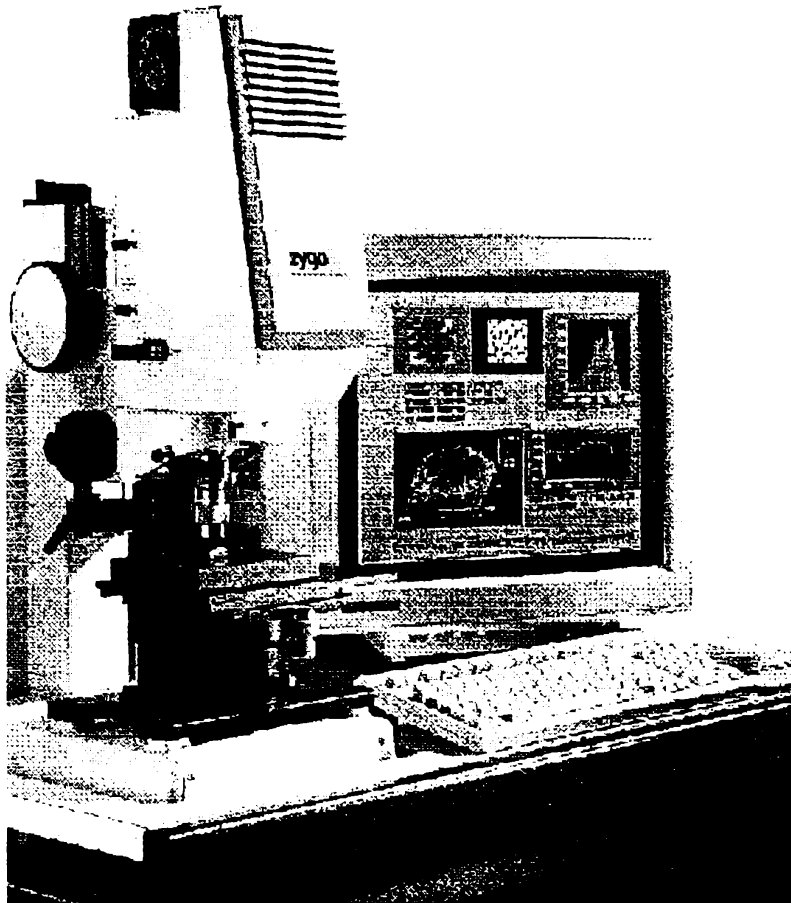


Fig. 3.1.1 Sistem interferențial ZYGO-New View 100

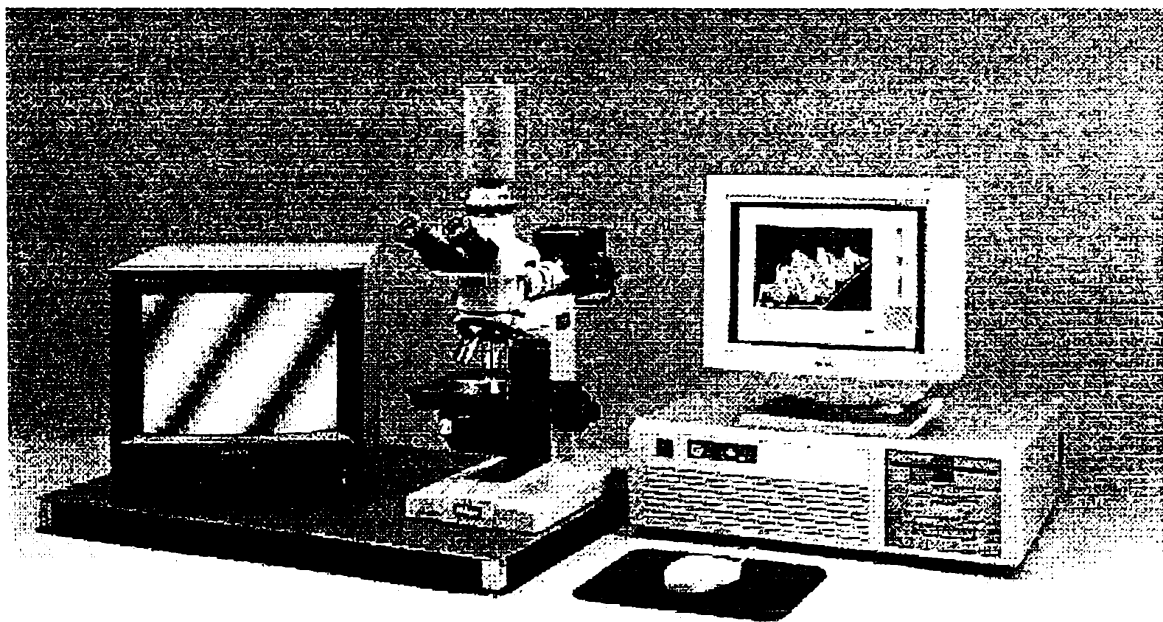


Fig. 3.1.2 Sistem interferențial PROMAP-512

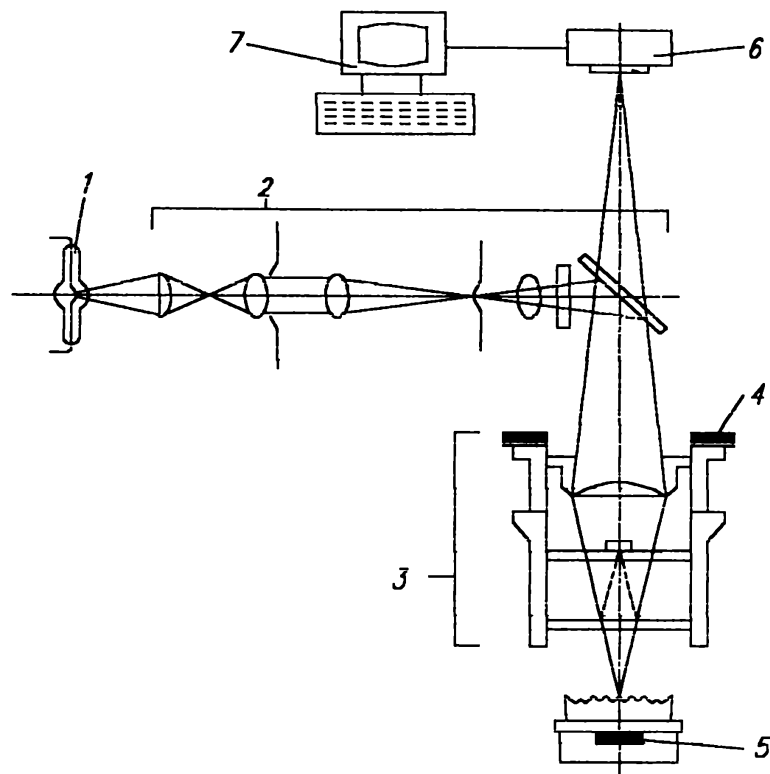


Fig. 3.1.3 Schema de principiu a unui sistem interferențial de baleiere verticală, în lumină albă, pentru evaluarea 3-D a suprafețelor tehnologice

Lumina emisă de sursă este divizată în două fascicule. Unul este transmis unei suprafețe de referință, de mare precizie, din interiorul microscopului interferențial, iar celălalt este transmis pe suprafața probei. Fasciculele reflectate de cele două suprafețe se suprapun, determinând formarea unor franje de interferență (interferograme). Forma și dimensiunile franjelor depind de lungimea de undă a luminii utilizate și diferența de drum optic între cele două fascicule.

Prin baleierea secvențială a probei într-o direcție aproximativ perpendiculară pe suprafața supusă evaluării, se generează o succesiune de interferograme, care sunt recepționate discretizat, în timp și spațiu, de un detector CCD și stocate în memoria calculatorului.

Procesarea cu software-uri specializate a informației conținute în interferogramele sincronizate secvențelor de baleiere, determină posibilitatea obținerii unui model tridimensional cantitativ complet al suprafeței analizate. Analiza globală sau locală a acestui model permite identificarea și evaluarea complexă, rapidă și precisă a structurii 2-D sau 3-D a suprafeței supusă explorării.



### 3.2.2.2 Achiziționarea, distribuirea și prelucrarea datelor de măsurare

În sistemele complexe de evaluare interferometrică a suprafețelor tehnologice, de genul celui descris anterior, sursa primară de informație asupra topografiei suprafețelor analizate este reprezentată de mulțimea interferogramelor succesive, generate în contul diferenței de drum și implicit diferenței de fază optică a fasciculelor de măsurare și de referință, pe parcursul mișcării secvențiale de baleiere a suprafeței, în cadrul unui ciclu complet de evaluare.

Informația conținută de interferograme, ca imagini ale intensității fenomenelor de interferență, se referă:

-pe de o parte, la înălțimea  $z$  a microneregularităților suprafeței (variația de fază interferometrică este direct proporțională cu diferența de drum optic), și

-pe de altă parte, la spațierea acestora (fiecare punct al suprafeței contribuie, de o manieră particulară, la constituirea interferogramei în ansamblu).

Pentru achiziționarea și distribuirea adecvată a acestei informații, se utilizează un sistem multicanal, cu multiplexare numerică cuplat, la intrare, cu un detector CCD de imagini interferențiale (rețea matricială de fotodiode) și, la ieșire, la o magistrală de date, deservită de un calculator specializat. Sistemul realizează acțiuni de condiționare a semnalelor de intrare, precum și operații de eșantionare, de memorare, de conversie analog-numerică și de transmitere a datelor rezultate spre interfața cu calculatorul.

Toate semnalele sunt achiziționate și procesate în timp real, durata afectată ciclului complet al unei secvențe de interferență fiind de ordinul secundelor.

Procesarea datelor de măsurare în vederea stabilirii unei corelații univoce între mulțimea interferogramelor secvențiale și structura geometrică 3-D a suprafeței analizate se realizează conform schemei de principiu din figura 3.2 [S7] [Z4] [Z17].

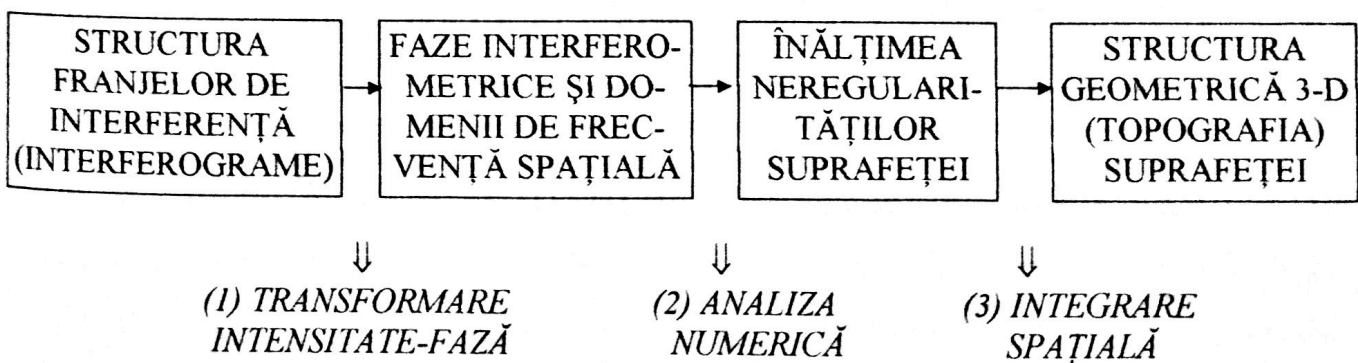


Fig. 3.2 Schema de principiu a procesării informației conținute în interferograme

Faza interferometrică este o mărime asociată diferenței de drum optic  $L$ , lungimii de undă  $\lambda$ , sau frecvenței spațiale  $\nu = 2\pi/\lambda$  a sursei de lumină utilizate și a unei constante  $\varphi_0$  (dependentă de construcția interferometrului dat), printr-o ecuație liniară de forma:

$$\varphi = L \cdot \nu + \varphi_0 \quad (3.1)$$

Această ecuație este reprezentată intuitiv sub forma unei drepte în figura 3.3 poz.1.[Z17]

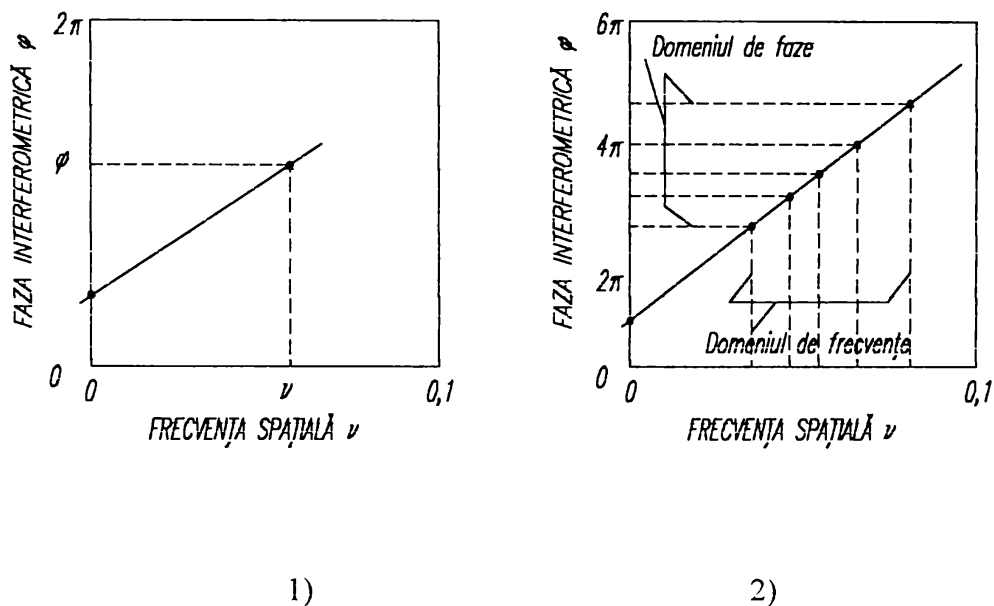


Fig. 3.3 Dependența fazei interferometrice de frecvența spațială a sursei de lumină utilizate

Utilizând această reprezentare, în care structura de interferență apare ca o dreaptă având ordonata la origine  $\varphi_0$  și panta  $L$ , se poate determina faza  $\varphi$  corespunzătoare unei frecvențe spațiale  $\nu$  date sau, reciproc, dacă se cunosc  $\varphi$  și  $\nu$  se poate deduce panta  $L$  a dreptei caracteristice unei anumite structuri de interferență.

Pe această bază, devine posibilă conversia datelor primare de intensitate a interferogramelor, măsurate punctual (la nivel de vârf) de către detectorul CCD, în informații referitoare la faza interferometrică, întrucât valoarea normală a intensității franjelor de interferență:

$$I = \frac{1}{2}(1 + \cos \varphi) \quad (3.2)$$

variază de o manieră sinusoidală cu faza  $\varphi$  și implicit cu diferența de drum  $L$ .

În noua generație de interferometre asistate pentru evaluarea suprafețelor tehnologice, se operează însă nu cu o sursă de lumină monocromatică, ci cu o sursă de lumină albă<sup>1</sup>, capabilă să genereze interferograme conținând o cantitate mai mare de informații asupra structurii suprafețelor.

În această situație, determinarea fazelor interferometrice corespunzătoare mulțimii frecvențelor spațiale individuale din spectrul sursei și deci din structura interferogramelor obținute, este posibilă prin aplicarea transformării Fourier, sub forma computerizată de Transformare Fourier Rapidă.

Reprezentarea informației de fază în domeniul de frecvență va avea, în noile condiții, forma indicată în figura 3.3 poz.2. Prin aceasta este determinată panta  $L$ , caracteristică dreptei corespunzătoare structurii de interferență date și poate fi definită univoc înălțimea neregularităților suprafeței.

Pentru o poziție de baleiere dată, interferogramele sunt generate simultan și omogen pentru toate punctele suprafeței caracterizate printr-o valoare comună a ordonatei. În acest fel, la nivelul rezoluției asigurate de rețeaua matricială detectoare, datele individuale referitoare la înălțimi, obținute în maniera descrisă mai sus, vor putea fi completate cu valorile numerice ale coordonatelor plane corespunzătoare mulțimii punctelor participante la formarea unei interferograme plane. [F3]

Structura geometrică 3-D a suprafeței explorate este deci complet reconstituită în modelare numerică, oferind, în contul programelor avansate de calcul și de prelucrare a imaginilor, posibilități practic nelimitate de eșantionare și evaluare.

Sistemul descris asigură conducerea completă a operațiilor de măsurare-procesare a datelor permițând reprezentarea grafică a imaginii izometrice 3-D a profilelor de rugozitate, cu determinarea parametrilor  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_p$ ,  $R_z$  etc. și a statisticilor 2-D și 3-D inclusiv a curbei de portanță pentru suprafața supusă investigării. Toate datele obținute pot fi stocate pentru statistică și aplicații de conducere de proces.

<sup>1</sup> orice sursă luminoasă, cu un spectru larg și continuu de lungimi de undă / frecvențe spațiale

### 3.2.2.3 Specificații și domenii de aplicație

#### *Sistem:*

-Tehnică de măsurare:	•microscop interferențial cu baleiere verticală
-Capacitate de măsurare:	•profilul cantitativ 3-D al suprafeței și înălțimea treptelor de denivelare
-Lentile obiectiv:	•2,5 x → 100 x
-Interferometru:	•Michelson → Mirau
-Câmp vizual:	•1,7 X 1,8 mm → 0,07 X 0,05 mm
-Distanță de operare:	•11,1 mm → - 0,6 mm
-Sursă luminoasă:	•bec halogen cu filament din W
-Lungimi de undă pentru lumina albă:	•450 nm → 650 nm
-Viteză de baleiere:	•0,5 μm/s → 2 μm/s
-Arie detector CCD:	•320 X 240 pixeli → 640 X 480 pixeli
-Calculator:	•compatibil IBM PC, 486, DOS, HD, monitor VGA, tastatură, imprimantă, mouse

#### *Performanțe:*

-Rezoluție verticală:	•0,1nm → 5 nm
-Rezoluție orizontală:	•dependentă de lentilele obiectiv
-Precizie medie:	•8 biți/pixel → 14 biți/pixel
-Domeniu de măsurare pe verticală:	•10 nm → 100 μm
-Durata de măsurare-evaluare:	• < 25 s pentru o scanare pe verticală de 10μm

#### *Domenii de aplicație:*

-Probe din materiale transparente, semitransparente și opace, având o reflectanță minimă de 1 → 4 %.

### 3.2.3 Rezultate experimentale și interpretări referitoare la parametrii de înălțime, spațiere, înclinare și curbură a suprafețelor cu rugozitate izotropă

#### 3.2.3.1 Verificarea normalității repartiției înălțimilor microgeometriei suprafețelor cu rugozitate izotropă [Z10]

##### 3.2.3.1.1 Condiții inițiale și metode de verificare a normalității repartiției

În abordare tribologică, rugozitatea suprafețelor de contact este tratată ca un vector multidimensional considerat, la nivelul mulțimii componentelor sale geometrice de înălțime, spațiere, înclinare și curbură, ca o variabilă aleatoare. [T2]

Caracteristicile unidimensionale ale rugozității, în particular cele de înălțime a neregularităților, sunt, de asemenea, variabile aleatoare cu o lege de repartiție normală (gaussiană) pentru cele mai multe din procedeele tehnologice disponibile de generare a suprafețelor și numai în mod excepțional cu alte legi de repartiție (exponențială, Rayleigh, etc.).

Semnificația reală a valorilor parametrilor de rugozitate standardizați ( $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_v$ ,  $R_p$ ,  $R_z$ ), a căror determinare se face pe baza profilogramei suprafeței, considerată ca realizare fizică a variabilei aleatoare asociate înălțimilor profilului de rugozitate, este deci condiționată de legea de repartiție a înălțimii rugozității suprafeței analizate.

În consecință, dacă repartițiile empirice, calculate pe baza datelor experimentale se abat de la cea normală, metodele uzuale de prelucrare a datelor de măsurare, în vederea determinării parametrilor acestor repartiții, trebuie adaptate sau modificate corespunzător.

Pentru evaluarea caracteristicilor microgeometrice ale suprafețelor erodate (pregătite conform §3.2.1 și notate în ordinea creșterii rugozității cu E1, E2 și E3), a fost folosit un sistem optic interferențial de analiză 3-D asistată a structurii suprafețelor, model *PROMAP-512*, produs de firma *Micromap-U.S.A.* Sistemul funcționează pe principiul interferometriei de baleiaj în lumină albă [Z4] și beneficiază de un suport informațional avansat. [A5]

Verificarea normalității repartiției s-a realizat prin comparația repartițiilor empirice cu cele teoretice corespunzătoare, presupuse normale, în cadrul a două metode expeditiv, dar suficient de eficiente și anume [M3] [T4]:

1. Comparația funcțiilor densității de repartiție  $p(Z)$ , numită metoda lui *Pearson*, cu determinarea asimetriei și excesului repartiției empirice în raport cu cea teoretică;

2. Comparația funcțiilor de repartiție normate  $P(Z)$ , definite în intervalul  $[0,1]$ , numită metoda lui *Henry*, în urma reprezentării pe hârtie normal-probabilistică a funcțiilor empirice

împreună cu cea teoretică, ultima liniarizată prin alegerea adecvată a scării axei ordonatelor. Gradul de apropiere/coincidență al celor două repartiții este apreciat vizual, semnificativă fiind poziția porțiunii centrale a ”drepte” empirice.

### 3.2.3.1.2 Rezultatele obținute și interpretarea lor

Principalii parametri de înălțime ai profilului de rugozitate al probelor analizate, determinați în cadrul cercetării efectuate, sunt prezentați în tabelul 3.2.

TABELUL 3.2 Parametrii de înălțime ai profilului de rugozitate

Proba	Număr de puncte evaluate	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	Asimetrie $R_{sk}$	Exces $R_{ku}$
E1	67249	0.83	1.05	8.92	-0.843	3.990
E2	67058	1.68	2.12	16.31	-0.558	3.013
E3	62420	2.69	3.38	21.46	0.304	2.710

Reprezentarea grafică a verificării normalității repartiției înălțimilor profilului de rugozitate al probelor E1, E2 și E3 este redată în figura 3.4, pentru metoda *Pearson* și în figura 3.5, pentru metoda *Henry*.

Corelarea datelor tabelului 3.2 cu cele reprezentate în figurile 3.4 și 3.5, pune în evidență, în afara oricărui dubiu, concordanța funcțiilor densitate de repartiție și respectiv funcțiilor de repartiție normate, teoretice și empirice, ale înălțimii profilului de rugozitate, ceea ce probează caracterul de variabilă aleatoare de repartiție normală (gaussiană) a acestora.

Astfel, valorile coeficientului de exces  $R_{ku}$ , corespunzătoare celor trei probe, au valori extrem de apropiate și includ valoarea  $R_{ku} = 3$ , specifică repartiției normale. În același timp, valorile coeficientului de asimetrie  $R_{sk}$ , foarte mici în valoare absolută, sunt concentrate în jurul valorii  $R_{sk} = 0$ , definatorii pentru repartiția profilelor de rugozitate simetrice.

Este interesant de remarcat că la reducerea nivelului de rugozitate al suprafețelor analizate se accentuează robustețea (preponderența proeminențelor în raport cu golurile) profilului de rugozitate,  $R_{sk}$  devine negativ, în timp ce variația coeficientului de exces al repartiției empirice,  $R_{ku}$ , marchează trecerea de la o repartiție restrânsă ( $R_{ku} < 3$ ) la o repartiție extinsă ( $R_{ku} > 3$ ). [T2] [Z6]



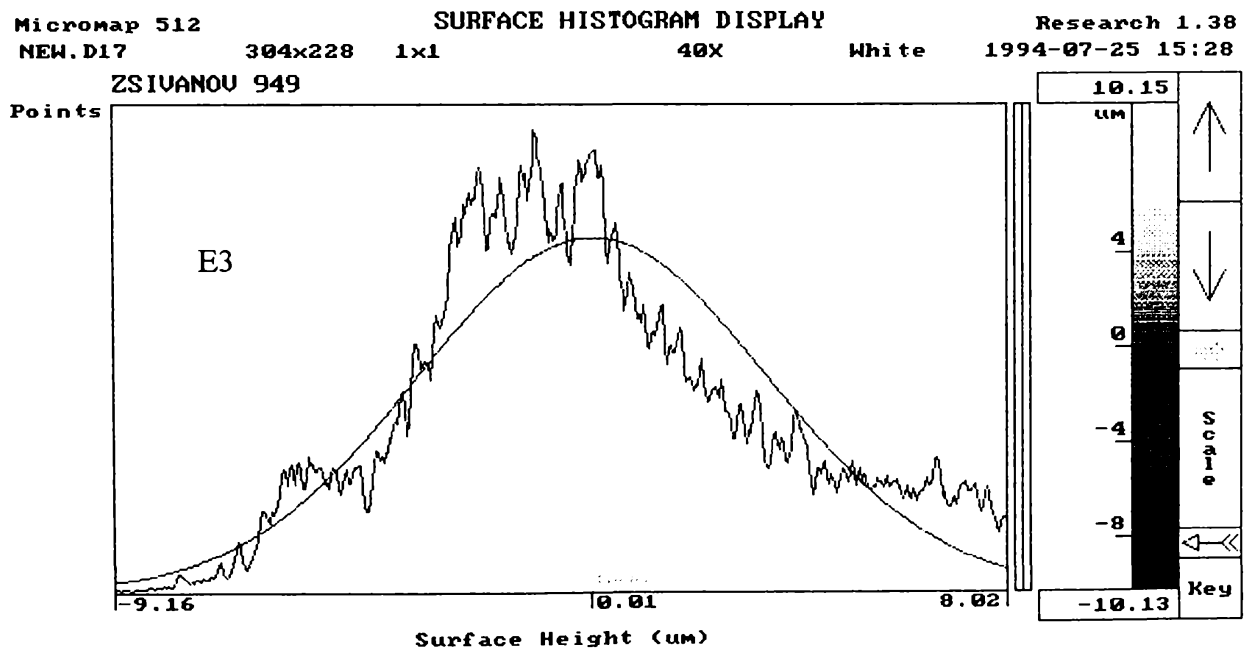
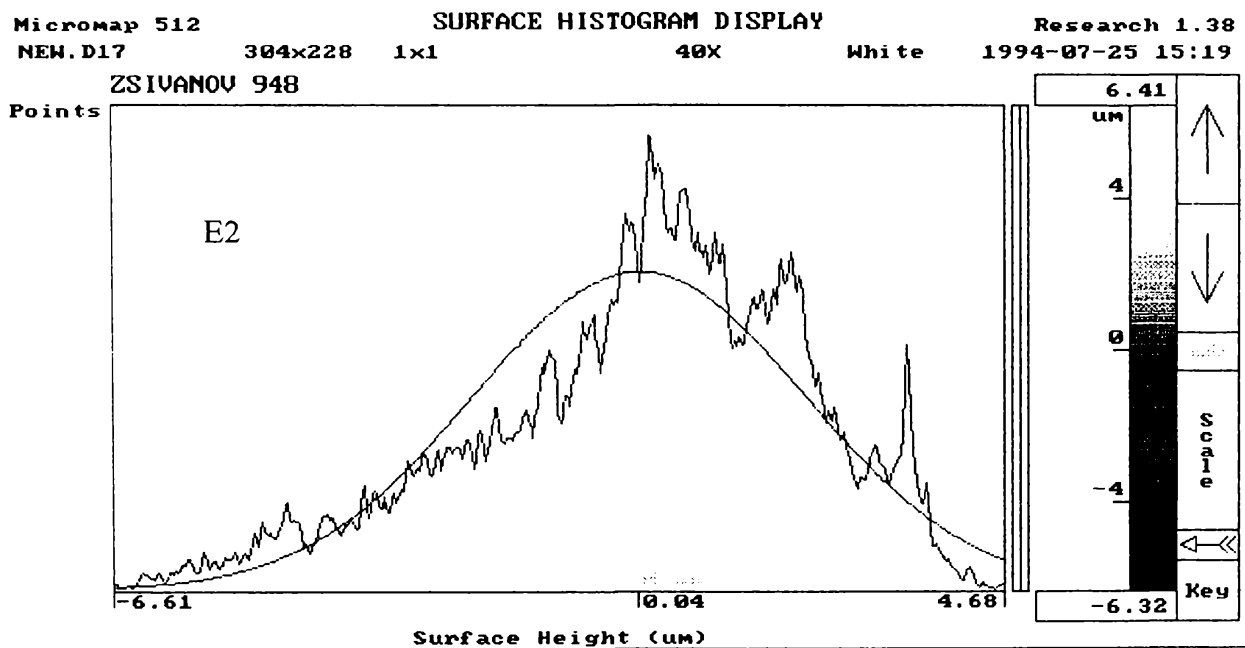
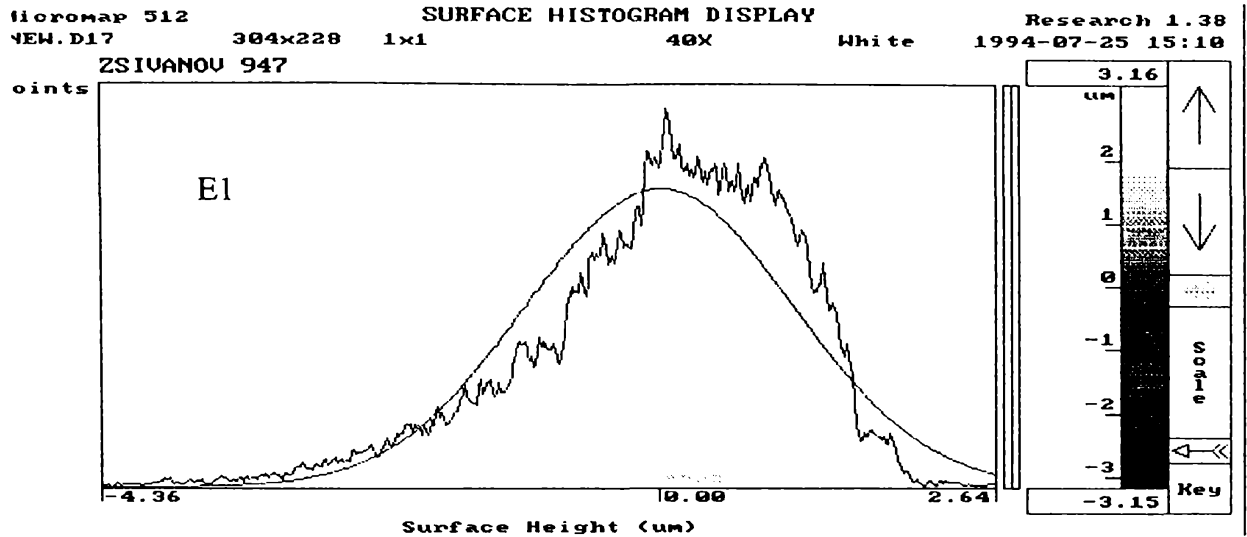


Fig. 3.4 Verificarea normalității prin metoda Pearson

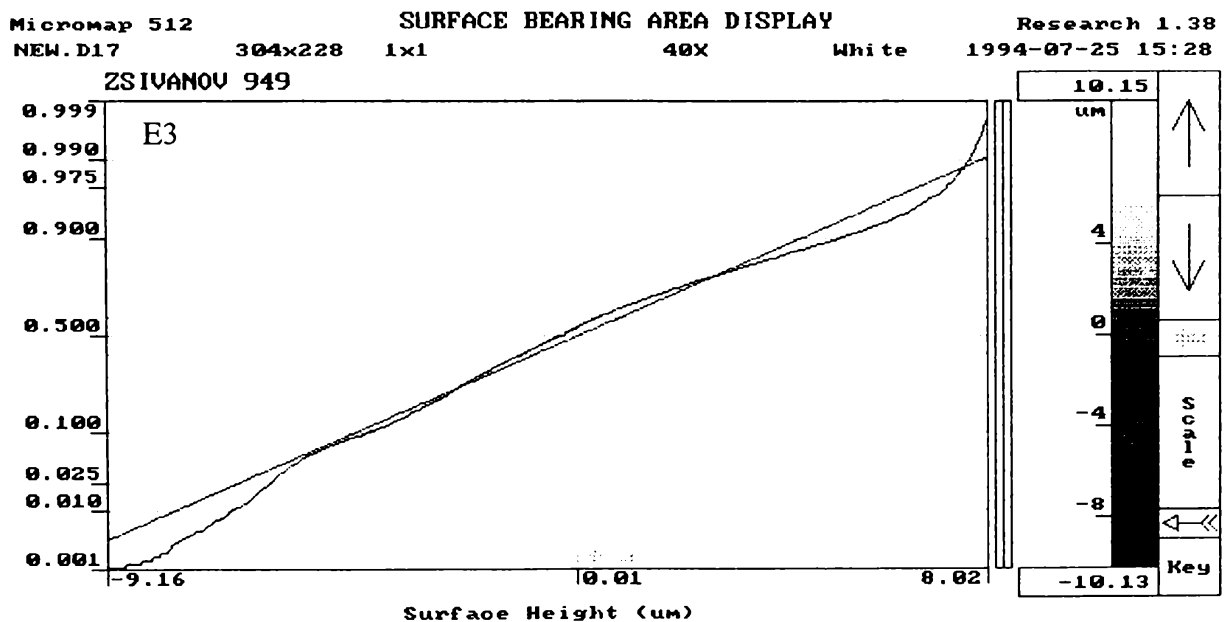
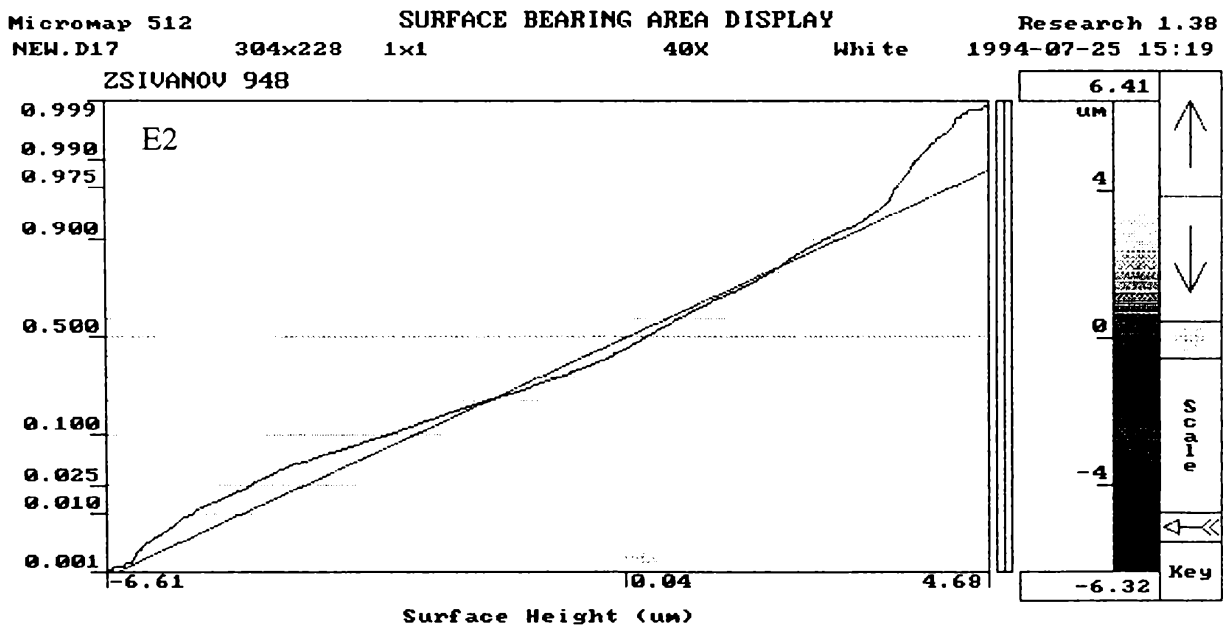
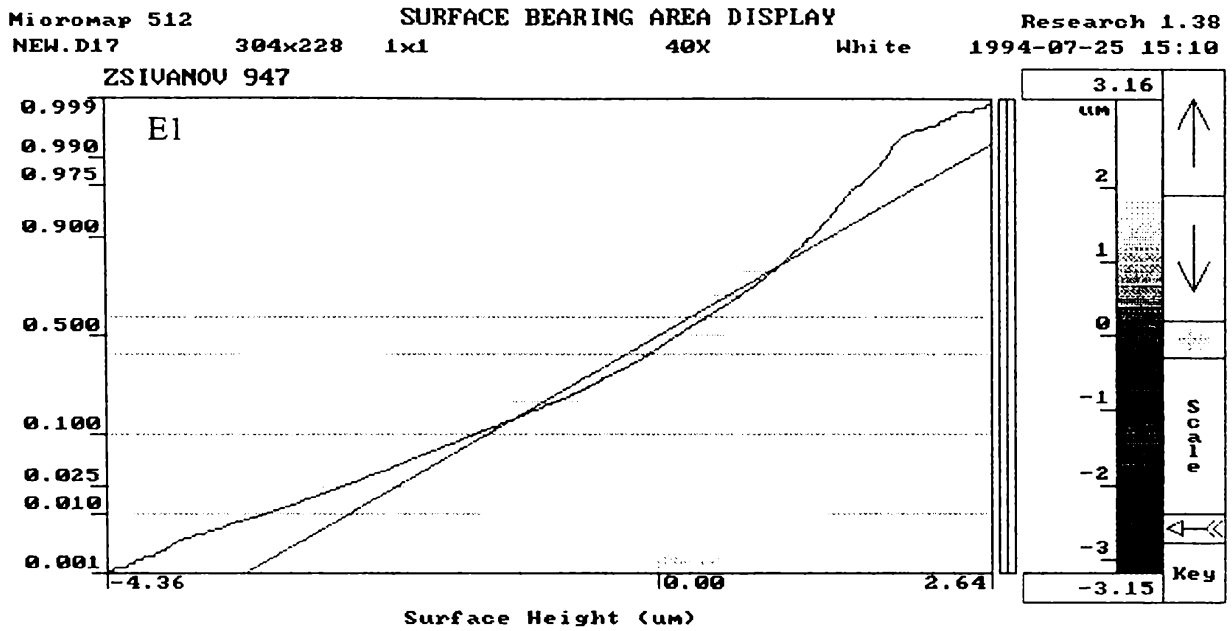


Fig. 3.5 Verificarea normalității prin metoda Henry



Dincolo de informațiile referitoare la normalitatea repartiției înălțimilor neregularităților suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică, valorile repartiției empirice a funcției de repartiție normate  $P(Z)$ , reprodusă în figura 3.5, sunt o măsură a procentajului lungimii portante a profilului  $t_p$ , indicator de primă importanță al comportamentului tribologic al suprafețelor rugoase. [B2] [T2]

Într-adevăr, dacă se consideră rugozitatea ca vector aleator unidimensional cu înălțimea  $Z(x)$ , poate fi calculat procentajul lungimii portante a profilului [T2], [Z4]:

$$(t_p)_z = 1 - P(Z) = 1 - \int_a^z p(Z) \cdot dZ \quad (3.3)$$

### 3.2.3.2 Caracteristicile de profil ale suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă în evaluare optică interferometrică [Z5]

Investigația primară a microgeometriei suprafețelor cu rugozitate izotropă s-a realizat utilizând un analizor al imaginii reprezentării 3-D a structurii suprafeței, model *ZYGO-New View 100*, produs al firmei *ZYGO-U.S.A.*, care funcționează pe principiul interferometriei de baleiaj în lumină albă și beneficiază de un suport informațional avansat [Z14] [Z15] [Z16].

Au fost supuse analizei suprafețele a 5 probe cu rugozitate izotropă (notate cu E1÷E5, în ordinea creșterii rugozității) și a unei probe cu rugozitate anizotropă (notată cu R), probe pregătite conform precizărilor date în § 3.2.1.

Rezultatele obținute sunt prezentate ca atare, având ca parametru creșterea succesivă a nivelului de rugozitate și respectiv comparativ, în raport cu o suprafață prelucrată prin rectificare mecanică.

Din mulțimea rezultatelor obținute, se prezintă, în continuare, rezultatele cele mai reprezentative pentru caracterizarea geometrică și tribologică a suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică, cu diferite regimuri de lucru, și pentru exemplificarea posibilităților sistemului de măsurare interferometrică asistată de calculator, utilizat.

Astfel, în figura 3.6 se relevă, prin imaginile tridimensionale corespunzătoare unor probe cu suprafață rectificată (R) și erodată (E), structura geometrică orientată, conținând striuri rectilinii, specifică prelucrării prin rectificare plană și respectiv structura microgeometrică aleatoare, izotropă, caracteristică prelucrării prin electroeroziune. Trebuie

precizat că, dincolo de diferențele microgeometrice prezentate, în ambele cazuri, distribuția înălțimii neregularităților este integral sau predominant aleatoare. De asemenea, există o probabilitate reală ca în ambele cazuri, dar din rațiuni diferite (dinamica sistemului mecanic sculă-semifabricat și respectiv, instabilitatea curgerii lichidului de lucru prin interstițiul electrod-obiect de prelucrat), în topografia suprafețelor analizate să intervină și undulații.

La prelucrarea prin eroziune electrică a unor suprafețe relativ mari, din motive ce țin de dinamica proceselor electroerozive, pot să apară porțiuni distincte, cu caracter local, având diferențe relativ mari ale valorilor caracteristicilor de rugozitate în raport cu zonele învecinate.

Dincolo de aspectele pur geometrice, suprafețele prelucrate prin electroeroziune prezintă și o microstructură specifică a stratului superficial caracterizată, în general, printr-o creștere a durității în raport cu substratul-material de bază, consecință a unor procese de aliere și călire greu controlabile. [N1]

În tabelul 3.3 sunt sintetizate principalele caracteristici de înălțime [A1] [S1] ale rugozității suprafețelor erodate. Pentru comparație, sunt prezentate și rezultatele obținute pe o probă rectificată.

TABELUL 3.3 Parametri de înălțime ai neregularităților suprafețelor

PROBA	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{tm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	H [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$
R	0,359	0,481	20,270	11,11	7,57	1,27	0,333	32,097
E1	0,544	0,740	18,040	15,52	12,43	1,88	-0,772	12,520
E2	1,000	1,312	19,719	18,08	16,62	3,59	-0,293	5,380
E3	2,296	2,850	40,033	31,14	26,05	8,14	-0,319	3,124
E4	2,319	2,970	34,707	30,08	27,71	8,84	0,044	3,479
E5	3,115	3,857	31,503	29,48	25,15	10,99	-0,188	2,879

Este important de remarcat diferența semnificativă între probele rectificată (R) și erodate (E1÷E5), din punctul de vedere al densității de repartiție a înălțimilor profilului de rugozitate, exprimată prin valorile coeficientului de asimetrie a profilului, în raport cu linia medie,  $R_{sk}$  (skewness) și coeficientului de exces al repartiției considerate, în raport cu repartiția gaussiană,  $R_{ku}$  (kurtosis).

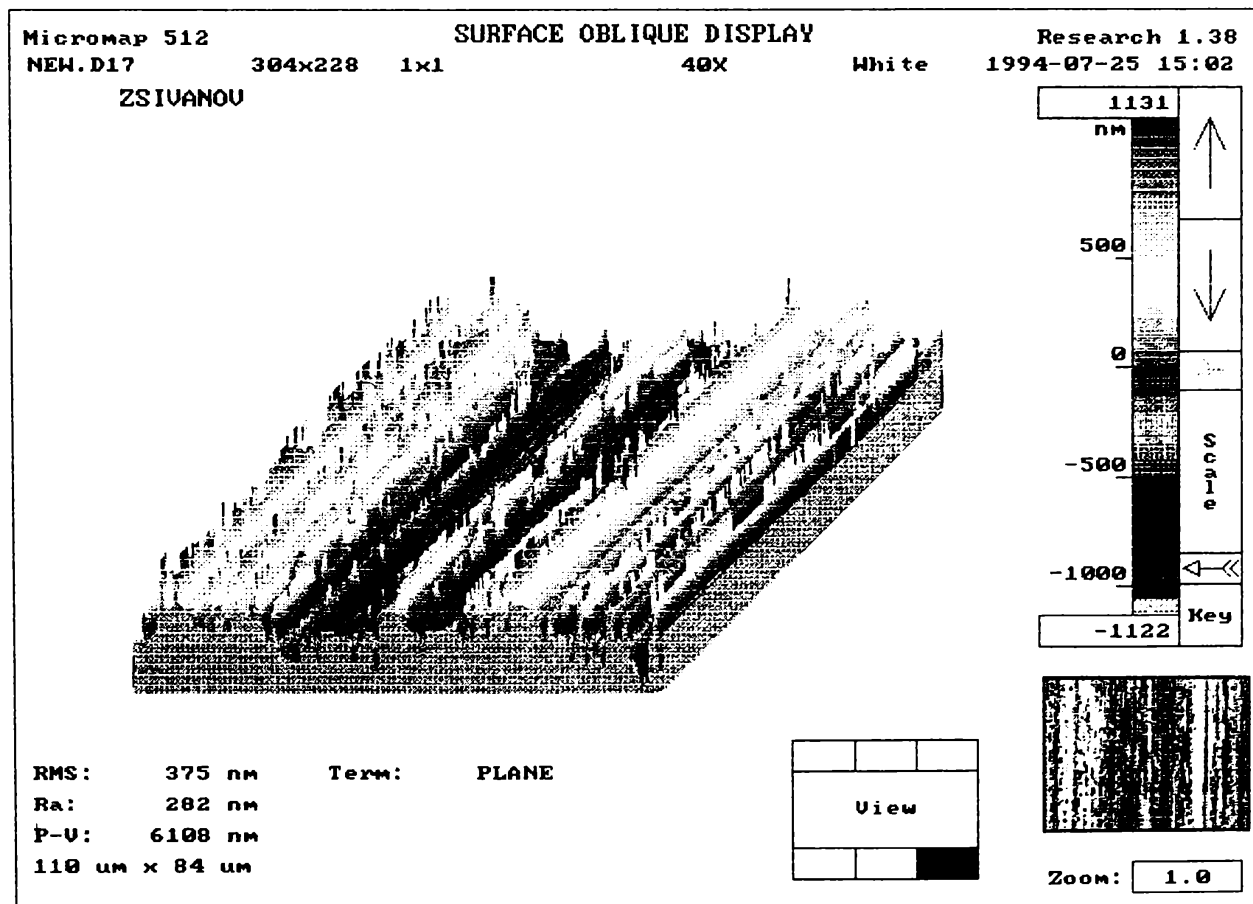
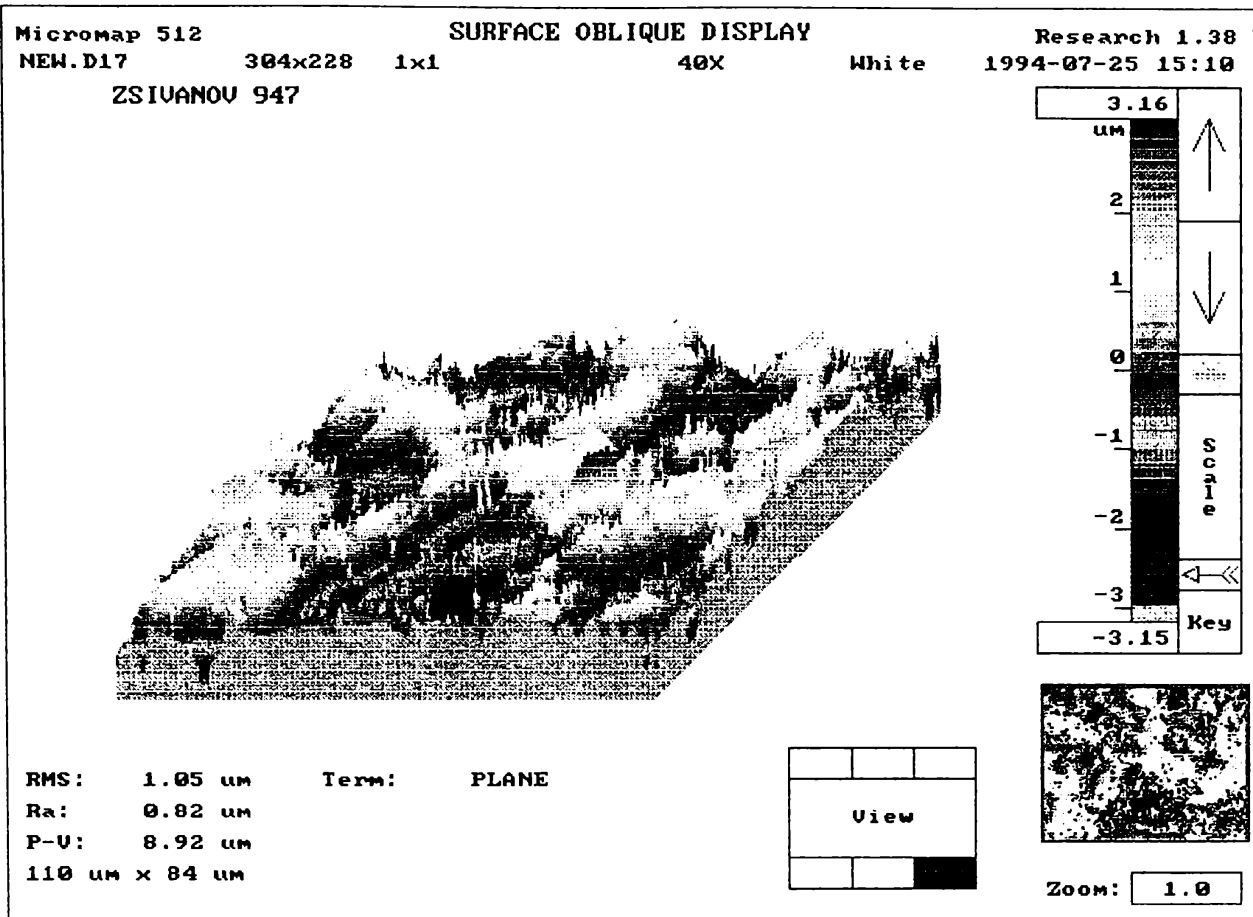


Fig. 3.6 Imaginile tridimensionale corespunzătoare probelor erodată și rectificată

Astfel:

$$(R_{sk})_E < 0 \quad (R_{sk})_R > 0 \quad (3.4)$$

ceea ce probează că profilul suprafeței erodate are o configurație robustă, caracterizată prin proeminente largi și goluri înguste, favorabilă unei capacități portante superioare, în timp ce profilul suprafeței rectificate are o configurație fragilă.

Pe de altă parte:

$$(R_{ku})_E \geq 3 \quad (R_{ku})_R \gg 3 \quad (3.5)$$

ceea ce arată că, din punct de vedere cantitativ, forma profilului suprafețelor erodate este semnificativ mai apropiată de suprafața perfect aleatoare, de repartiție gaussiană, decât suprafețele prelucrate prin rectificare plană. Această constatare este confirmată și de [N2], care evaluează ponderea componentei aleatoare în microgeometria suprafețelor erodate la  $0.85 \div 0.97$  față de  $0.6 \div 0.92$  la suprafețele rectificate.

Informațiile referitoare la distribuția spațială a neregularităților suprafețelor analizate sunt prezentate în figura 3.7 (funcțiile de autocovarianță/autocorelație) și respectiv în figura 3.8 (funcția densitate spectrală de putere).

Se remarcă similitudinea alurii curbelor funcțiilor de autocorelație ale probelor R și E, apropiate atât prin valorile indicatorilor de înălțime ale rugozității, cât și prin valoarea lungimii de autocorelație.

Odată cu creșterea înălțimii neregularităților (probele E1÷E5) prezența componentei periodice în structura aleatoare a microgeometriei suprafeței se accentuează, fapt confirmat prin forma specifică-amortizată periodic-a funcțiilor de autocorelație (fig.3.7) și de densitate spectrală de putere (fig.3.8). Se observă, de asemenea, tendința de variație cu caracter extremal a lungimii de autocorelație.

Reprezentarea curbelor de portanță ale suprafețelor analizate (fig.3.9) este fără îndoială, cel mai puternic argument care probează superioritatea, din acest punct de vedere, a suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică față de cele rectificate, superioritate sesizată anterior și în [N2].

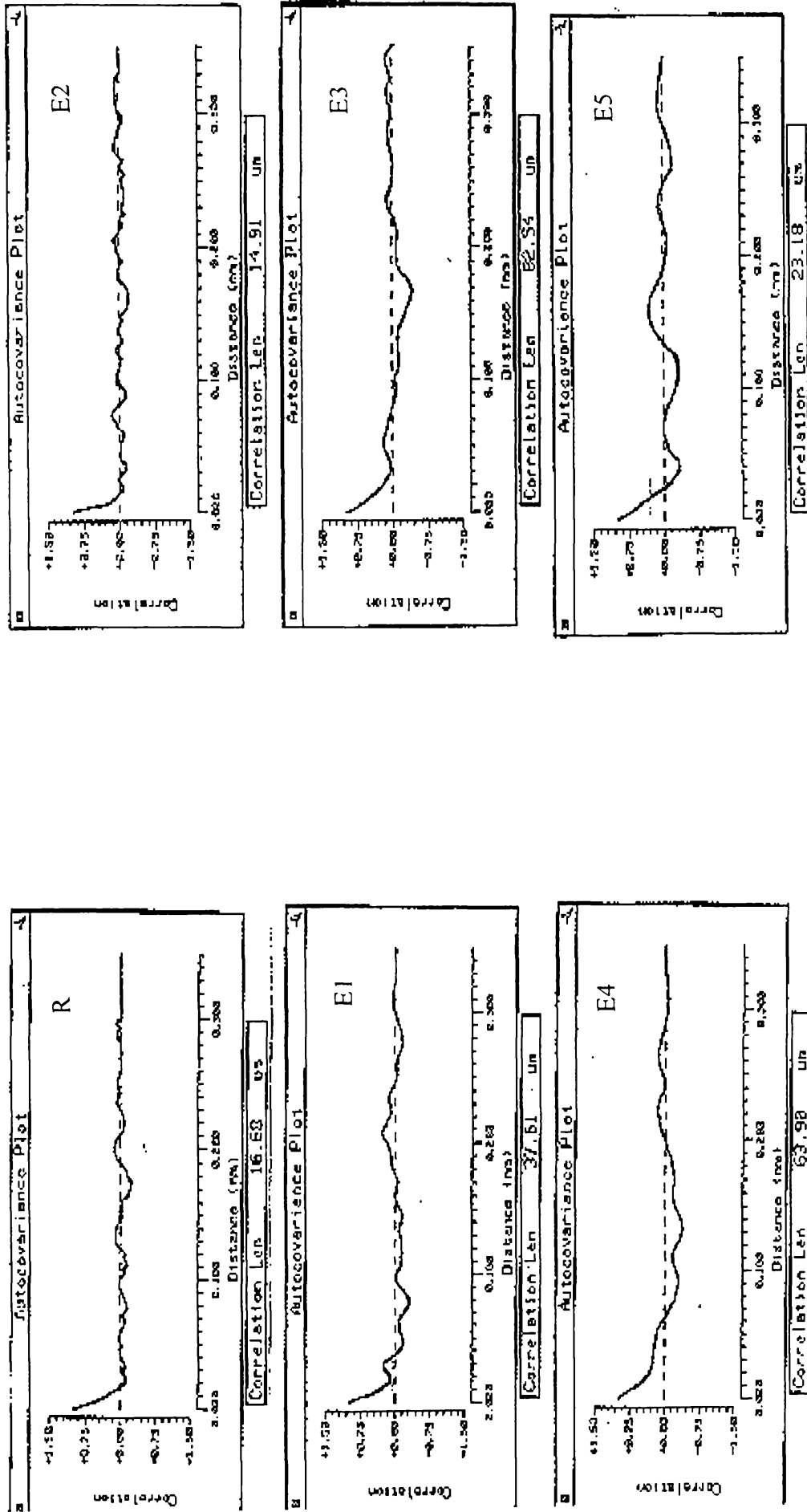


Fig. 3.7 Funcțiile autocovarianță/autocorelație ale suprafețelor analizate

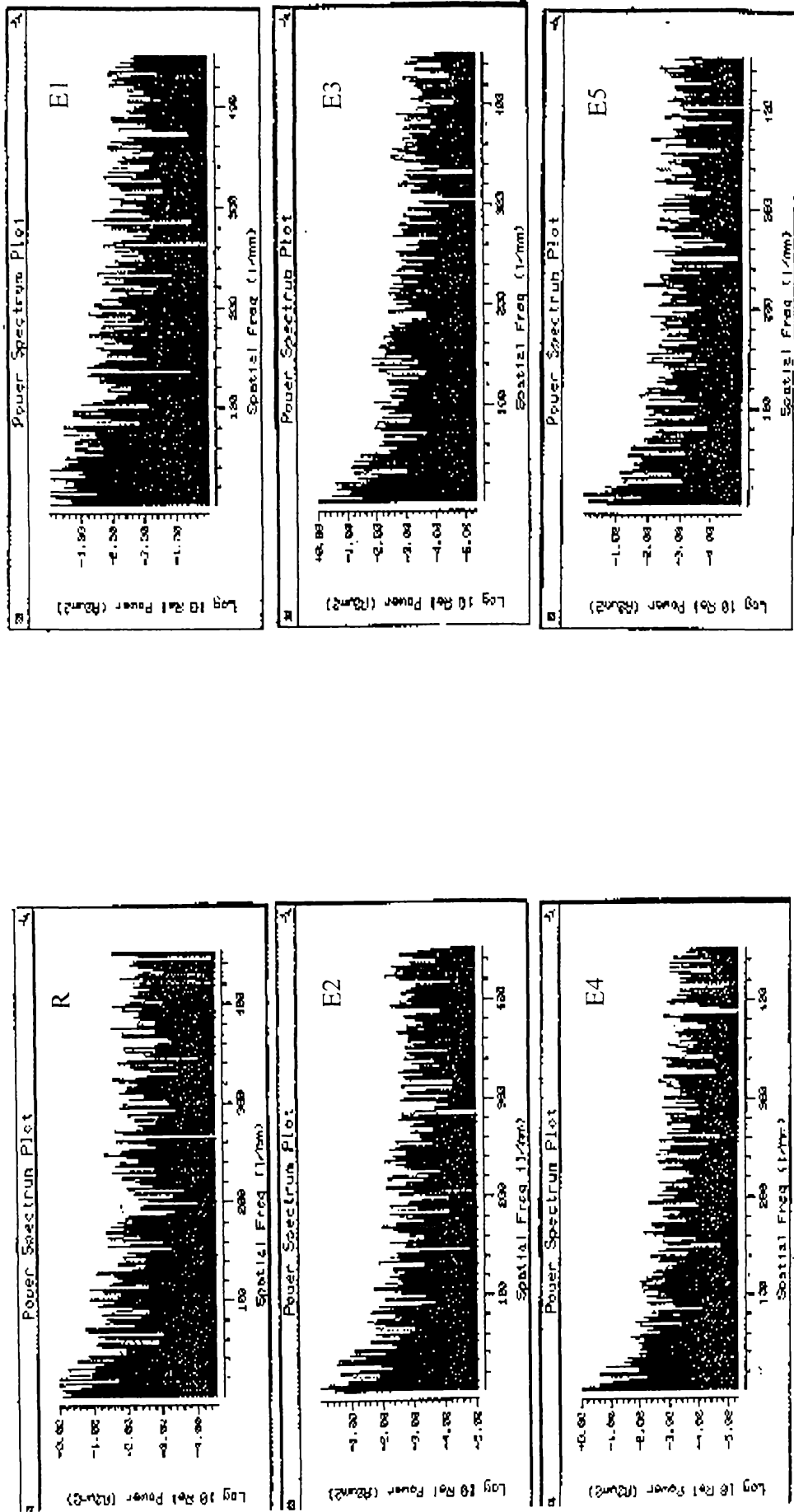


Fig. 3.8 Funcțiile densitate spectrală de putere ale suprafețelor analizate

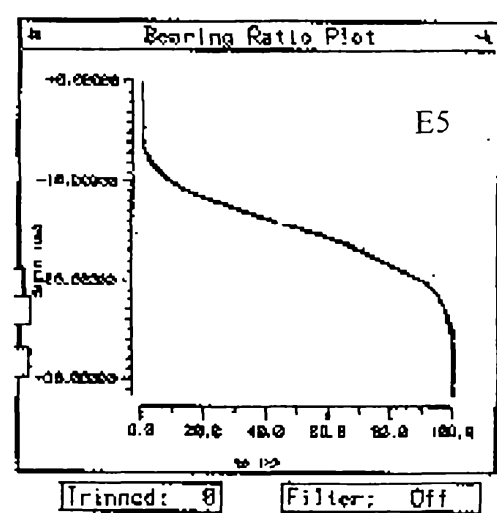
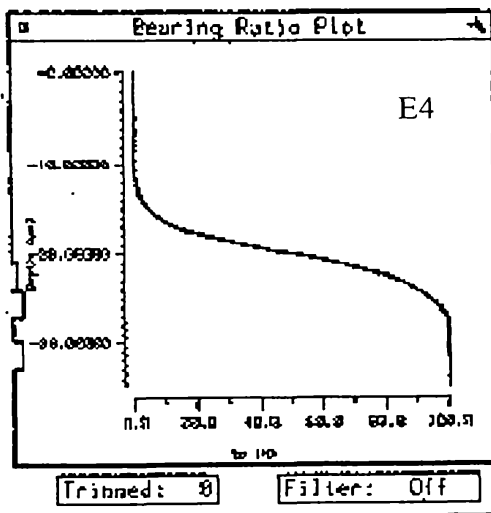
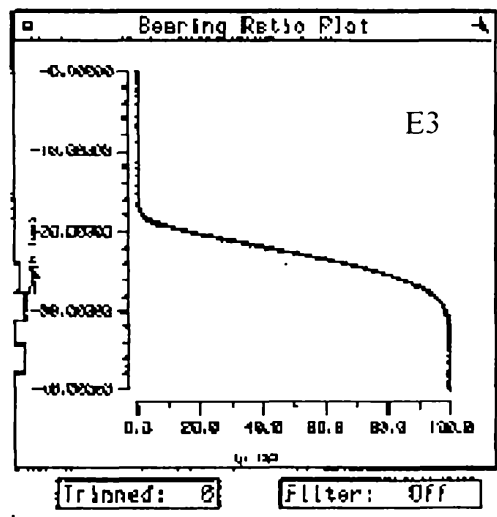
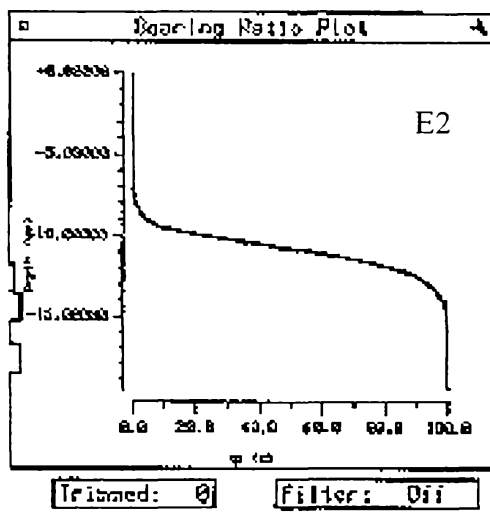
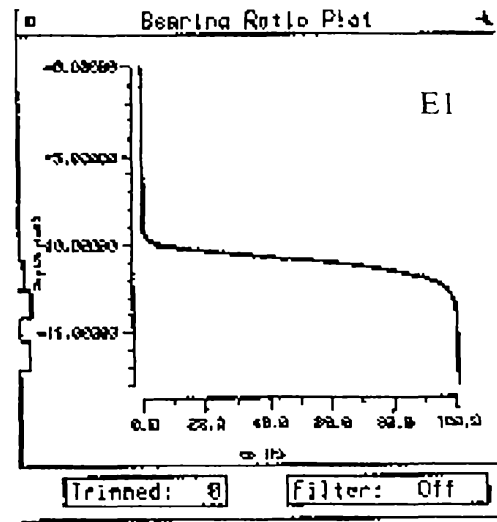
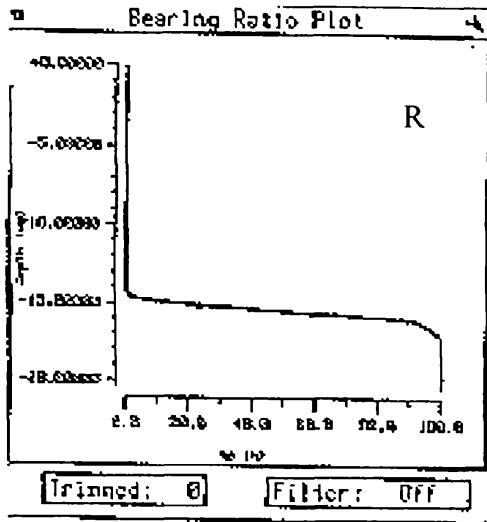


Fig. 3.9 Curbele de portanță ale suprafețelor analizate

În situația prezentată, capacitatea portantă a suprafețelor cu rugozitate izotropă (erodate) este semnificativ mai mare decât a suprafeței cu rugozitate anizotropă (rectificate plan), în condițiile în care (acest lucru trebuie subliniat, întrucât este insuficient cunoscut) rugozitatea tuturor probelor erodate este superioară rugozității probei rectificate, adoptată ca referință (vezi tabelul 3.3).

Altfel spus, generarea unor suprafețe de contact cu portanță dată, impusă de condițiile de funcționare, poate fi realizată mai economic (costurile tehnologice cresc exponențial cu finețea suprafețelor) dacă se recurge la suprafețe cu rugozitate izotropă în locul suprafeței cu rugozitate anizotropă.

Rezultatele obținute permit o cunoaștere mai bună a suprafețelor cu rugozitate izotropă și preliminarea pe această bază a unei comportări tribologice superioare suprafețelor cu rugozitate anizotropă prin acțiunea favorabilă exercitată asupra stării de tensiune din zona contactului și condițiilor de lubrifiere ale cuplei de frecare [B1].

### **3.2.3.3 Înclinarea și curbura profilului de rugozitate a suprafețelor cu rugozitate izotropă [Z11]**

#### **3.2.3.3.1 Definiții preliminare**

Pentru o mai bună caracterizare a suprafețelor cu rugozitate izotropă s-au inclus în investigație o serie de parametri de rugozitate hibridi, nestandardizați, importanți din punct de vedere tribologic, referitori la înclinarea și curbura neregularităților suprafeței. Parametrii de rugozitate luați în considerare în cadrul cercetării experimentale sunt definiți în continuare.

*Înclinarea* (panta) profilului de rugozitate este definită de unghiul respectiv tangenta unghiului pe care acesta îl face cu o linie paralelă cu linia medie a profilului (figura 3.10). [D1][R3][T2]

Ca parametru de rugozitate se folosește *panta medie a profilului* determinată prin medierea pantelor neregularităților suprafeței în intervalul lungimii de referință.

Medierea valorilor individuale ale pantei profilului poate fi realizată ca medie aritmetică sau medie pătratică a valorilor individuale locale. [D1] [O1] [R3] [Z14]



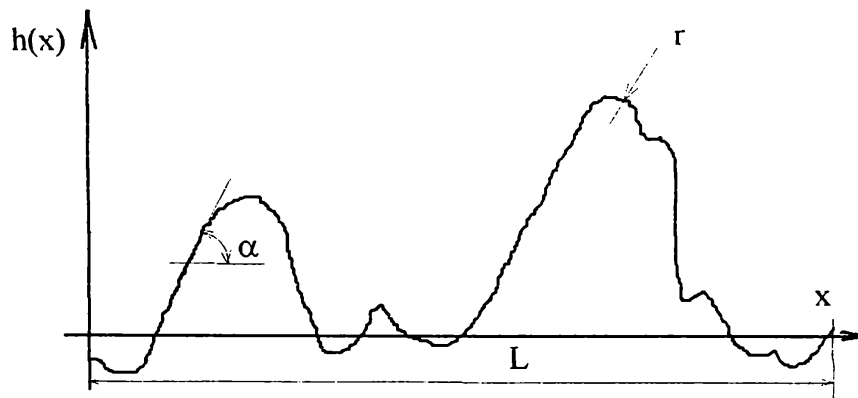


Fig. 3.10 Înclinarea și raza de curbură a profilului de rugozitate

În sistemele avansate de evaluare a rugozității, asistate de calculator [Z4] [Z14] [Z15], panta medie a profilului neregularităților poate fi evaluată prin componente după axele  $x$  și  $y$  sau ca valoare globală. Panta medie se raportează, cel mai des, la pantele proeminențelor (peaks), golurilor (valleys) sau neregularităților, în ansamblu (proeminență și gol) și, în mod excepțional, în studii tribologice avansate, la pantele unor proeminențe locale reprezentative (summits), mai mari decât cele mai apropiate patru proeminențe învecinate, selecționate prin programul de calcul utilizat.

Panta medie a profilului neregularităților suprafeței tehnologice este un parametru important pentru caracterizarea comportamentului funcțional al acestora. Ea se corelează nemijlocit cu proprietățile de contact (rezistență la strivire, de exemplu), proprietățile fricționale (regimurile de frecare uscată, de exemplu) și cu proprietățile optice (reflectivitatea și aspectul cosmetic, de exemplu) al suprafețelor. [B2] [D1] [T2] [Z14]

Este important de remarcat că în pofida aparențelor create de profilogramele curente (realizate cu amplificări pe verticală mult superioare amplificărilor pe orizontală), proeminențele și golurile profilelor de rugozitate sunt predominant plate, întinse, cu pante medii sub  $5^\circ$  la suprafețe superfinisate și de ordinul  $10^\circ \div 20^\circ$  la suprafețe cu rugozități mai mari. [D1] [O1] [T2] Astfel, lungimea relativă a profilului este de regulă, sub 1.01. [D1]

*Curbura* neregularităților profilului de rugozitate este o mărime asociată pantei profilului sau, mai precis, ratei de variație a acesteia.

Ca parametru de rugozitate se folosește *raza de curbură medie* a proeminențelor (fig.3.10) și în particular, a celor mai reprezentative proeminențe ale profilului de rugozitate, selectate adecvat în limitele lungimii de evaluare.

Raza de curbură medie a prominențelor are o influență semnificativă asupra proprietăților tribologice ale suprafeței (indicele de plasticitate  $\psi$  și rezistența la uzare în perioada de rodaj, de exemplu). [B2] [O1] [T2] Alături de panta medie a profilului, raza de curbură medie este, de altfel, parametrul de rugozitate cel mai sensibil la acțiunea proceselor de uzare.[T2] Valorile curente ale razei medii pentru suprafețe rectificatice sunt de ordinul de mărime al zecilor de  $\mu\text{m}$ , cu atât mai mari cu cât suprafața este mai rugoasă. [R3] [T2]

### 3.2.3.3.2 Cercetări experimentale, rezultate obținute și interpretarea lor

Evaluarea pantei medii și razei de curbură medii a rugozității suprafețelor a două probe, una prelucrată prin eroziune electrică, iar cealaltă prin rectificare, s-a realizat cu ajutorul unui sistem interferometric 3-D asistat, model *ZYGO New View 100*. [Z4] [Z7]

Măsurătorile s-au finalizat prin medierea rezultatelor definite pe zece arii distincte, având dimensiuni medii de  $1.5 \times 1.1\text{mm}$  (suprafață erodată) și de  $1 \times 0.75\text{mm}$  (suprafață rectificată) ale suprafețelor unor probe din oțel 205 Cr 115, tratate termic (vezi § 3.2.1), pe baza metodicii prezentate în [Z14] și [Z15].

Rezultatele obținute sunt sintetizate în tabelul 3.4, pentru panta globală și raza de curbură a vârfurilor reprezentative și respectiv în tabelul 3.5, pentru panta proeminențelor și golurilor rugozității bidimensionale a suprafețelor erodată și rectificată.

Două observații preliminare sunt absolut necesare:

1. Valorile parametrilor de înălțime ai rugozității suprafețelor erodată și rectificată sunt foarte apropiate (tabelul 3.4), ceea ce crează premise favorabile comparării parametrilor de înclinare și curbură.

Fac excepție valorile diferite ale coeficientului de asimetrie  $R_{sk}$ , care confirmă caracterul specific al microgeometriei suprafețelor erodate (neregularități robuste, cu predominanța golurilor), favorabil unei comportări superioare din punct de vedere tribologic. [D1] [Z5]

2. La un număr relativ apropiat de vârfuri reprezentative (summits) supuse evaluării (tabelul 3.5), densitatea vârfurilor pe suprafața erodată este semnificativ mai mare decât pe suprafața rectificată. Aceasta are drept urmare spațierea sensibil mai restrânsă a acestor vârfuri pe suprafața erodată comparativ cu suprafața rectificată. O situație similară este caracteristică și mărimilor corespunzătoare referitoare la proeminențele și golurile suprafețelor investigate (tabelul 3.5).

TABELUL 3.4 Rezultate obținute pentru panta globală și raza de curbură a vârfurilor reprezentative

Suprafață erodată	Indicatori și parametri de rugozitate	Suprafață rectificată
0.288	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0.310
0.368	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	0.394
2.60	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	2.94
3.081	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	3.898
2.60	$R_{tm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	2.90
-0.579	$R_{sk}$	-0.035
3.674	$R_{ku}$	3.472
8716	Număr de vârfuri reprezentative (summits) supuse evaluării	7726
3049.944	Densitatea de suprafață a vârfurilor reprezentative [ $1/\text{mm}^2$ ]	1215.435
0.018	Spațierea vârfurilor reprezentative [mm]	0.029
622.47	Panta medie maximă a vârfurilor [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ]	381.05
9.09	Panta medie minimă a vârfurilor [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ]	2.69
147.90	Panta medie generală a vârfurilor [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ]	93.98
71.10	Abaterea standard experimentală [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ]	47.99
$\pm 1.962$	Intervalul de încredere al pantei medii generale a vârfurilor reprezentative, pentru $P=0.99$ [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ]	$\pm 1.406$
568.93	Raza medie maximă a vârfurilor [ $\mu\text{m}$ ]	3177.62
7.71	Raza medie minimă a vârfurilor [ $\mu\text{m}$ ]	17.92
47.22	Raza medie generală a vârfurilor [ $\mu\text{m}$ ]	120.91
35.64	Abaterea standard experimentală [ $\mu\text{m}$ ]	109.96
$\pm 0.983$	Intervalul de încredere al razei medii generale a vârfurilor reprezentative, pentru $P=0.99$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\pm 3.223$

Este interesant de remarcat, în acest din urmă caz, că în condiții date, conform așteptărilor, pe suprafața erodată numărul și densitatea golurilor sunt superioare numărului și densității proeminențelor. Pe suprafața rectificată raportul respectiv este inversat, deși apropiat de unitate.

TABELUL 3.5 Rezultate obținute pentru panta proeminențelor și golurilor rugozității bidimensionale a suprafețelor erodată și rectificată

Suprafață erodată	Indicatori și parametri de rugozitate	Suprafață rectificată
1162	Numărul proeminențelor supuse evaluării	1182
406.613	Densitatea de suprafață a proeminențelor [ $1/\text{mm}^2$ ]	185.949
49.592	Spațierea proeminențelor locale [ $\mu\text{m}$ ]	73.334
125.7	Panta medie maximă a proeminențelor [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ]	81.8
6.3	Panta medie minimă a proeminențelor [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ]	3.0
42.0	Panta medie generală a proeminențelor [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ]	25.9
19.5	Abaterea standard experimentală [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ]	14.1
$\pm 1.474$	Intervalul de încredere al pantei medii generale a proeminențelor, pentru $P=0.99$ [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ]	$\pm 1.056$
2136	Numărul golurilor supuse evaluării	1136
747.439	Densitatea de suprafață a golurilor [ $1/\text{mm}^2$ ]	178.713
36.577	Spațierea golurilor locale [ $\mu\text{m}$ ]	74.804
241.7	Panta medie maximă a golurilor [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ]	71.9
1.9	Panta medie minimă a golurilor [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ]	2.1
54.6	Panta medie generală a golurilor [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ]	22.0
29.3	Abaterea standard experimentală [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ]	12.5
$\pm 2.214$	Intervalul de încredere al pantei medii generale a golurilor, pentru $P=0.99$ [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ]	$\pm 0.937$

O imagine locală tridimensională a suprafețelor analizate, erodată și rectificată, este prezentată în figura 3.11.

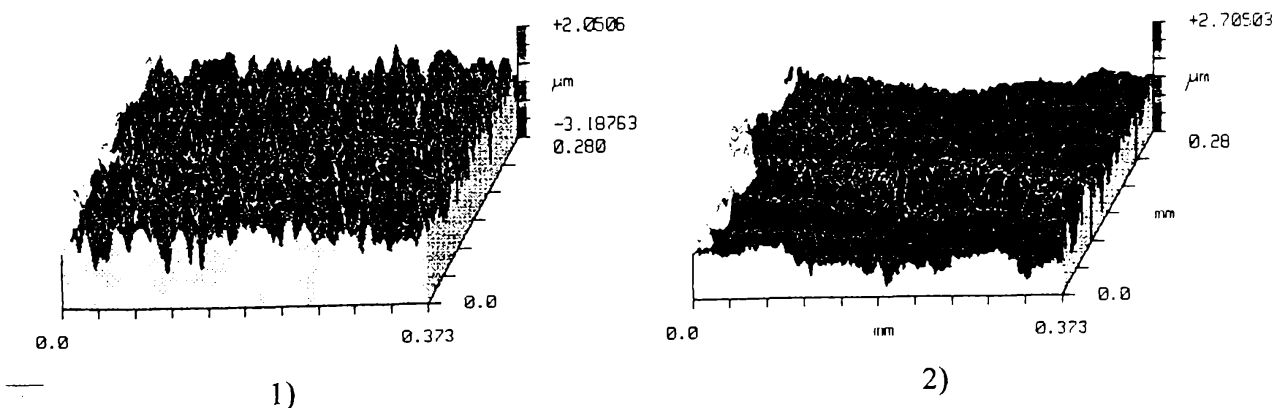


Fig. 3.11 Imaginea locală tridimensională a suprafețelor:

1) erodată; 2) rectificată

Pentru a caracteriza condițiile de evaluare a parametrilor de rugozitate analizați, este important de remarcat repartiția normală (gaussiană) a amplitudinilor vârfurilor reprezentative considerate (figura 3.12), cât și distribuția spațială izotropă (a suprafeței erodate) și orientată (a suprafeței rectificată) a aceluiași vârfuri (figura 3.13).

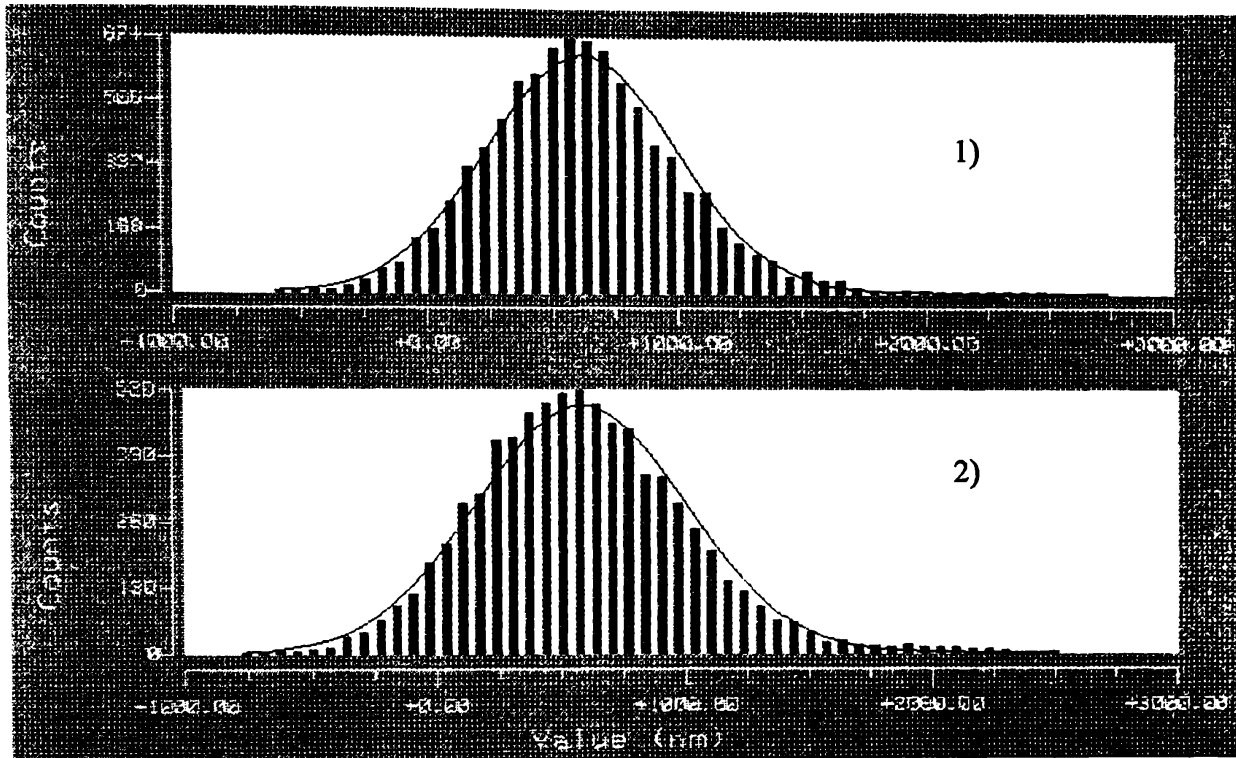


Fig. 3.12 Repartiția normală (gaussiană) a amplitudinilor vârfurilor reprezentative:  
1) pentru suprafața erodată 2) pentru suprafața rectificată

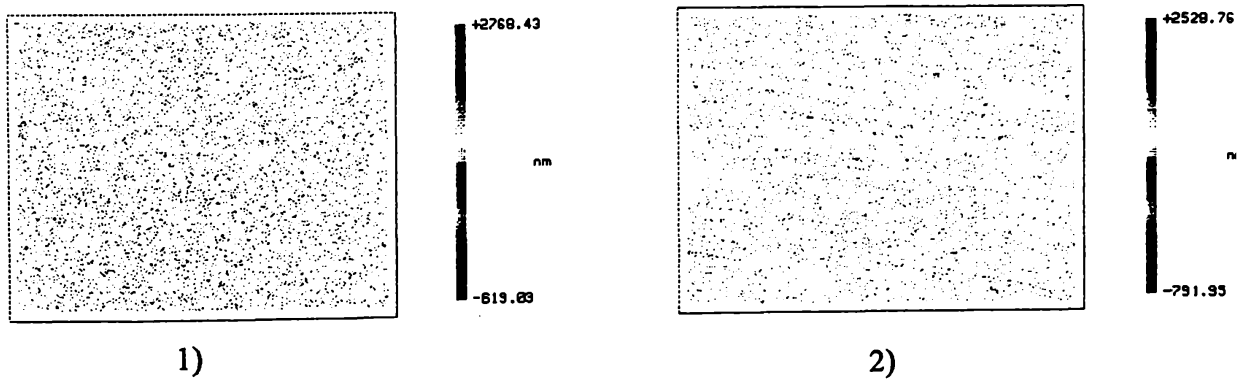


Fig. 3.13 Distribuția spațială izotropă (1) și orientată (2) a vârfurilor reprezentative a suprafețelor erodată și rectificată

Un element care confirmă încă o dată, caracterul aleator și izotrop al suprafețelor erodate este determinat de spectrul de frecvență spațială obținut prin aplicarea transformatei Fourier rapide, bidimensionale (figura 3.14.1).

Pentru suprafețele cu rugozitate anizotropă (de exemplu, suprafețele rectificade) imaginea corespunzătoare spectrului de frecvență conține structuri repetitive, corespunzătoare urmelor de prelucrare mecanică (figura 3.14.2).

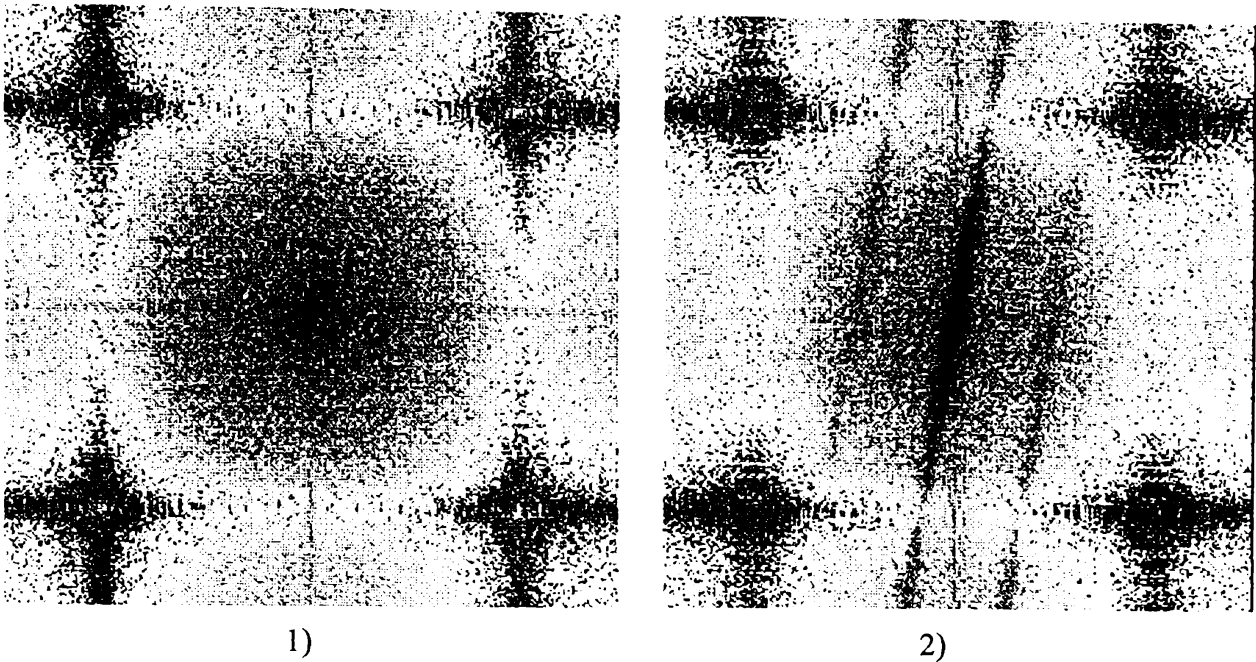


Fig. 3.14 Spectrul frecvențelor spațiale a suprafețelor cu rugozitate izotropă (1) și anizotropă (2)

Valorile măsurate ale pantelor medii și razelor medii de curbura (tabelul 3.4) sunt supuse unei dispersii mari. Acest fapt era previzibil dacă se are în vedere caracterul aleator al microgeometriei suprafețelor analizate. În aceeași măsură, se remarcă intervalele de încredere extrem de strânse ale valorilor medii generale și implicit nivelul ridicat de încredere al acestora, urmare a numărului foarte mare de măsurări efectuate.

Rezultatele numerice obținute corespund, în primă analiză, cel puțin pentru domeniul suprafețelor rectificade, cu rezultate existente în literatura de specialitate. [R3][T2]

Diferențele esențiale dintre suprafețele erodate și rectificade sunt puse în evidență prin valorile semnificativ mai mari ale pantei medii generale la nivelul vârfurilor reprezentative (tabelul 3.4) și respectiv al proeminențelor și golurilor rugozității generate prin eroziune electrică în raport cu cea obținută prin rectificare (tabelul 3.5).

Consecință a selecției efectuate, pantele medii ale vârfurilor reprezentative sunt superioare pantelor medii ale proeminențelor curente ale rugozității, atât pentru suprafețele erodate, cât și pentru cele rectificade.



În fine, pantele medii ale proeminențelor sunt apropiate de cele ale golurilor (tabelul 3.5), cu un ușor ascendent pentru goluri (la suprafețele erodate), respectiv pentru proeminențe (la suprafețele rectificate).

În același timp, valorile medii generale ale razei de curbură a vârfurilor reprezentative ale suprafețelor erodate sunt semnificativ inferioare, în condițiile date, valorilor corespunzătoare ale suprafețelor rectificate (tabelul 3.4).

Situația descrisă, valabilă la nivelul rugozității suprafețelor cercetate, a fost confirmată și pe plan strict local, pentru cele două probe de rugozitate reprezentate în figura 3.15.

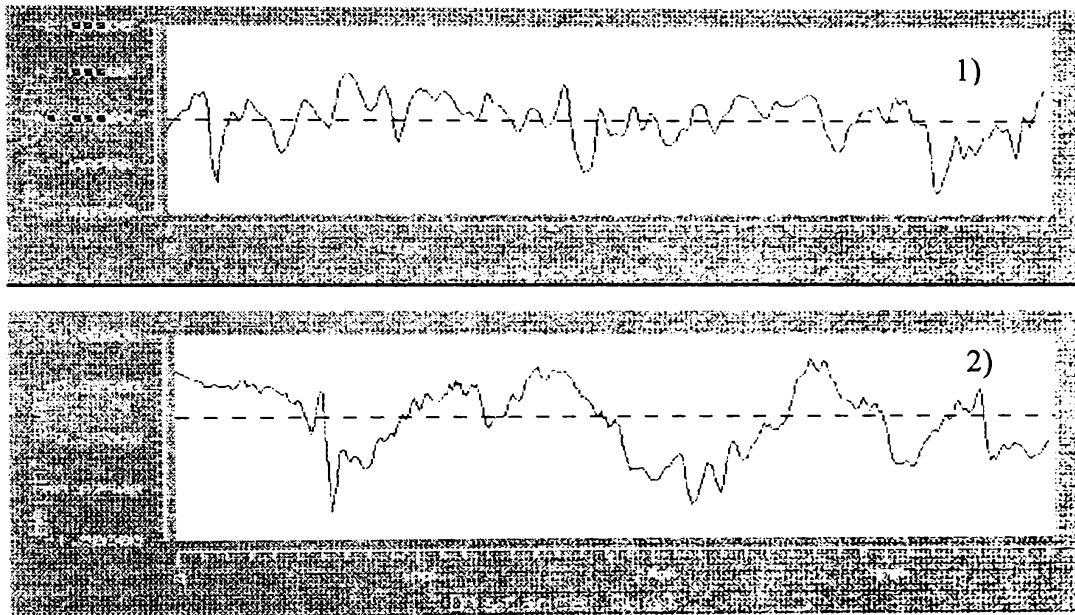


Fig. 3.15 Profilele de rugozitate ale suprafețelor erodată (1) și rectificată (2)

Prin aplicarea metodei punctelor particulare ale profilului de rugozitate, care operează cu densitatea medie a profilului, densitatea punctelor de extrem și densitatea punctelor de inflexiune [R3][T2] au fost determinate prin calcul:

-pentru suprafața erodată

-panta medie a neregularităților	127,368 $\mu\text{m}/\text{mm}$
-raza medie de curbură a proeminențelor	29 $\mu\text{m}$

-pentru suprafața rectificată

-panta medie a neregularităților	39,785 $\mu\text{m}/\text{mm}$
-raza medie de curbură a proeminențelor	80 $\mu\text{m}$ ,

rezultate în deplină concordanță cu cele prezentate și analizate anterior.

Cercetarea efectuată a avut un caracter de prioritate, iar rezultatele obținute, în întregime originale, completează literatura de specialitate cu noi informații referitoare la structura și proprietățile microgeometriei suprafețelor cu rugozitate izotropă, prelucrate prin eroziune electrică.



### 3.3 Investigarea la fretting a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă

#### 3.3.1 Concepția și organizarea programului experimental

##### 3.3.1.1 Principii și obiective ale experimentării

Programul experimental a avut ca obiectiv prioritar evidențierea comportamentului suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă și anizotropă, realizate din același material, dar generate prin tehnologii diferite, în procese de uzare de fretting, caracterizate prin condiții de încercare identice.

În cadrul acestui program, accentul și preocupările au fost deplasate de la evaluarea cantitativă tradițională a caracteristicilor de uzare, în condiții date (abordare pasivă), către studiul legilor de cauzalitate ale uzării și în particular către factorii capabili să controleze tranziția proceselor de uzare de fretting de la regimul de solicitare de alunecare parțială (fisurarea materialului) la regimul de solicitare de alunecare totală (uzare cu detașare de particule de material). Acest mod de abordare activă a problematicii uzării de fretting crează premise favorabile stabilirii condițiilor de prevenire, respectiv de întârziere a dezvoltării fenomenelor de uzare catastrofale.

Programul experimental a fost organizat pe principiile planificării factoriale a experimentărilor [M3] [N4]. S-au creat, în acest fel, posibilități de investigare a mai multor mărimi de interes tribologic, în domenii relativ largi ale spațiului factorilor de influență și în condițiile unui număr redus de încercări, ceea ce asigură o eficiență ridicată a experimentării.

Prelucrarea datelor experimentale obținute pe această cale cu ajutorul programului STATGRAPHICS [S6] permite obținerea unor modele empirice regresionale sub formă de polinoame algebrice de ordinul I, având forma generală [N4]:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{u,i=1}^k b_{i,u} \cdot x_i \cdot x_u; u \neq i \quad (3.6)$$

în care  $Y$  este funcția de răspuns analizată,  $k$ -numărul factorilor de influență  $x_i$  considerați,  $b_0$ - termenul liber al ecuației de regresie, asociat unei variabile de calcul  $x_0$ , determinat ca valoare medie a funcției de răspuns la nivelul experimentului factorial, iar  $b_i$ ,  $b_{i,u}$ -coeficienți de regresie a factorilor de influență existenți  $x_i$  asupra funcției de răspuns  $Y$ , toți rezultați din prelucrarea rezultatelor experimentale.

Prin valoare numerică și semn, coeficienții de regresie sunt purtători de informație asupra influenței exercitate de factori asupra funcției de răspuns.

Metodologia de explicitare a modelelor empirice este relativ laborioasă și include ca etape principale [N4]:

- stabilirea domeniului de experimentare (nivel de bază și interval de variație pentru fiecare factor);

- construcția matricii-program a experimentării și realizarea încercărilor;

- determinarea coeficienților modelului matematic al funcției de răspuns investigate și analiza statistică (inclusiv verificarea adecvantei) modelului obținut.

Este pentru prima oară (cel puțin după literatura de specialitate și informațiile disponibile) când un program de experimentare factorial este aplicat în studiul proceselor de uzare de fretting.

Principalele probleme care au fost urmărite și soluționate în cadrul programului experimental au fost următoarele:

- monitorizarea asistată și achiziția asistată a datelor de măsurare corespunzătoare încercărilor la uzare de fretting;

- prelucrarea asistată a datelor de măsurare în vederea determinării valorilor factorilor determinanți ai criteriilor de tranziție A-“energie” și B-“deschidere” (vezi p.2.2.6.3, fig. 2.10), a coeficientului de frecare și energiei disipate în ciclurile de fretting;

- ierarhizarea factorilor de influență, care determină valorile criteriilor de tranziție A-“energie” și B-“deschidere”;

- determinarea ecuațiilor de regresie ale factorilor de influență și reprezentarea grafică a funcțiilor de răspuns corespunzătoare criteriilor de tranziție A - “energie” și B - “deschidere”;

- reprezentarea “trunchiurilor de frecare” pentru toate epruvetele încercate la uzare de fretting;

- construcția hărților de solicitare locale (HSL) în domeniile investigate ale spațiului factorial;

- construcția graficelor de variație a coeficientului de frecare și energiei disipate pe parcursul încercării la uzare de fretting;

- examinarea suprafețelor degradate prin uzare de fretting folosind microscopia optică și electronică;

- analiza comparativă a comportamentului tribologic al suprafețelor cu rugozitate izotropă și anizotropă, în condițiile uzării de fretting.

### 3.3.1.2 Condiții de experimentare

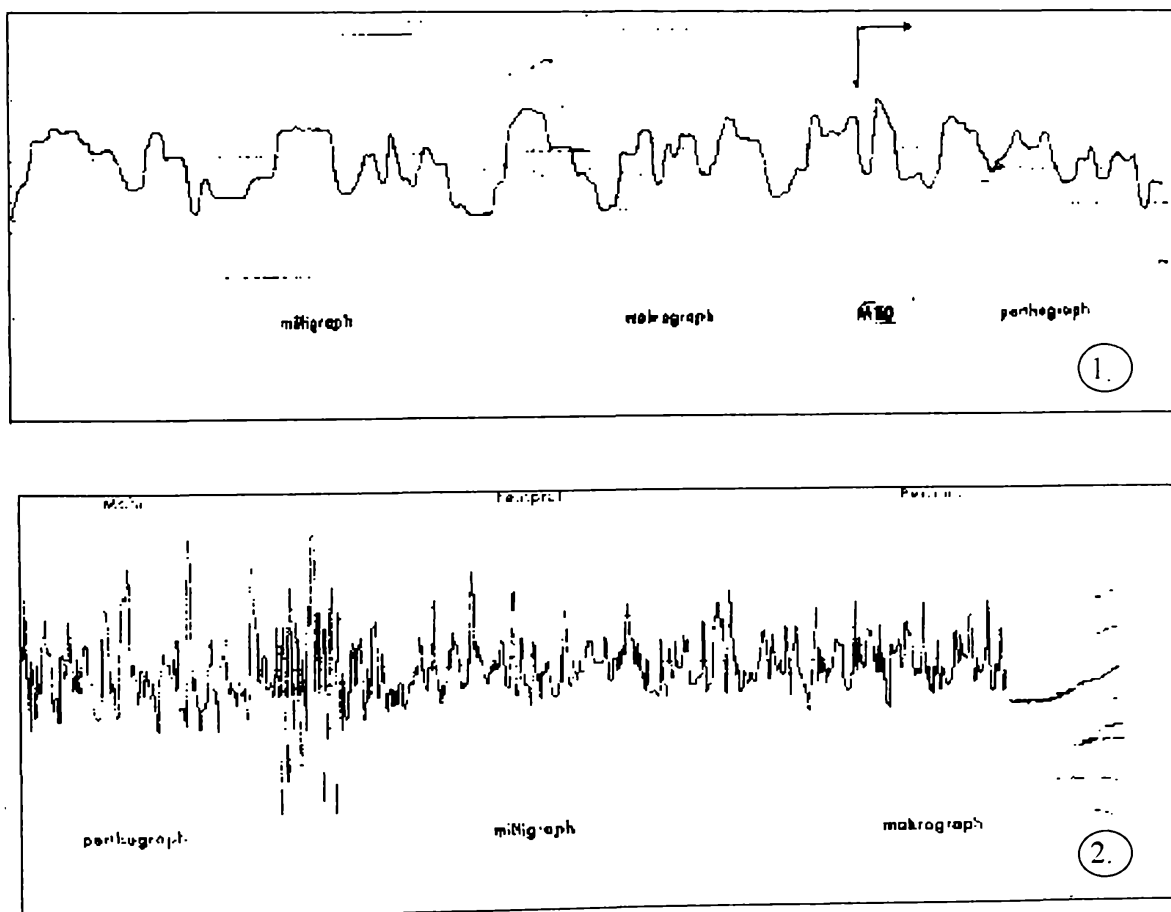
Din considerentele prezentate la 2.2.6.1, pentru efectuarea cercetărilor s-a optat pentru o cuplă de frecare de configurația sferă-plan, cu corpul sferă staționar și corpul plan mobil.

Epruvetele supuse încercărilor, având dimensiunile 10x10x10 mm au fost confecționate din oțel 205 Cr 115 (STAS 3611-88) tratat termic, având compoziția chimică indicată în tabelul 3.1, și duritatea  $52 \pm 0.5$  HRC.

Suprafețele frontale ale acestor epruvete au fost prelucrate prin eroziune electrică cu electrod filiform (suprafețe cu rugozitate izotropă, marcate cu E) și respectiv pe o mașină de rectificat plan (suprafețe cu rugozitate anizotropă, marcate cu R).

Rugozitatea suprafețelor erodate și rectificate a fost măsurată cu ajutorul unui rugozimetru "Perthometer C5D" (produs al firmei PERTHEN GmbH), iar valorile rezultate ale indicatorilor  $R_a$ ,  $R_z$  și  $R_{max}$  sunt reproduse în tabelul 3.6.

Cu titlu ilustrativ, în figura 3.16 sunt redată profilograme ale suprafețelor erodate (E5/1) și rectificate (R1/3).



3.16 Exemple de profilograme ale suprafețelor erodate (1) și respectiv rectificate (2)

TABELUL 3.6 Indicatori ai rugozității epruvetelor erodate (E) și respectiv rectificate(R)

Nr. crt.	Nr.epruvetă/suprafață	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1.	R 1/1	0.36	2.89	3.01
2.	R 1/2	0.32	1.88	2.07
3.	R 1/3	0.38	3.23	3.83
4.	R 1/4	0.36	2.82	3.56
5.	R 2/2	0.35	2.58	3.10
6.	R 2/3	0.39	3.23	4.18
7.	R 3/1	0.35	2.73	3.16
8.	R 3/2	0.33	2.45	2.53
9.	R 3/3	0.37	3.01	3.68
10.	R 3/4	0.33	2.42	2.52
11.	E 1/1	3.7	20.5	22.8
12.	E 1/2	2.3	12.8	13.9
13.	E 2/1	3.5	19.0	21.5
14.	E 2/2	3.3	18.6	21.9
15.	E 3/1	3.2	18.2	21.5
16.	E 3/2	2.8	17.4	20.5
17.	E 4/1	3.4	19.0	24.4
18.	E 4/2	3.8	21.8	24.9
19.	E 5/1	3.6	20.7	21.5
20.	E 5/2	3.7	21.4	24.1

Alegerea materialului pentru epruvetele supuse încercării la uzare de fretting este justificată de faptul că oțelul 205 Cr 115 este un oțel de scule înalt aliat, care se utilizează în mod curent pentru construcția sculelor de deformare plastică la rece și a sculelor de ștanțare. Condițiile particulare în care lucrează aceste scule pun probleme deosebite de comportament de frecare și uzare, inclusiv în condiții de fretting, ca urmare a solicitărilor periodice și vibrațiilor inerente tehnologiilor aplicate.

Imagini reprezentative ale structurilor metalografice obținute la un microscop optic, cu o mărire de 500:1, ale straturilor de suprafață ale epruvetelor prelucrate prin eroziune electrică (1) și rectificate (2), sunt prezentate în figura 3.17.

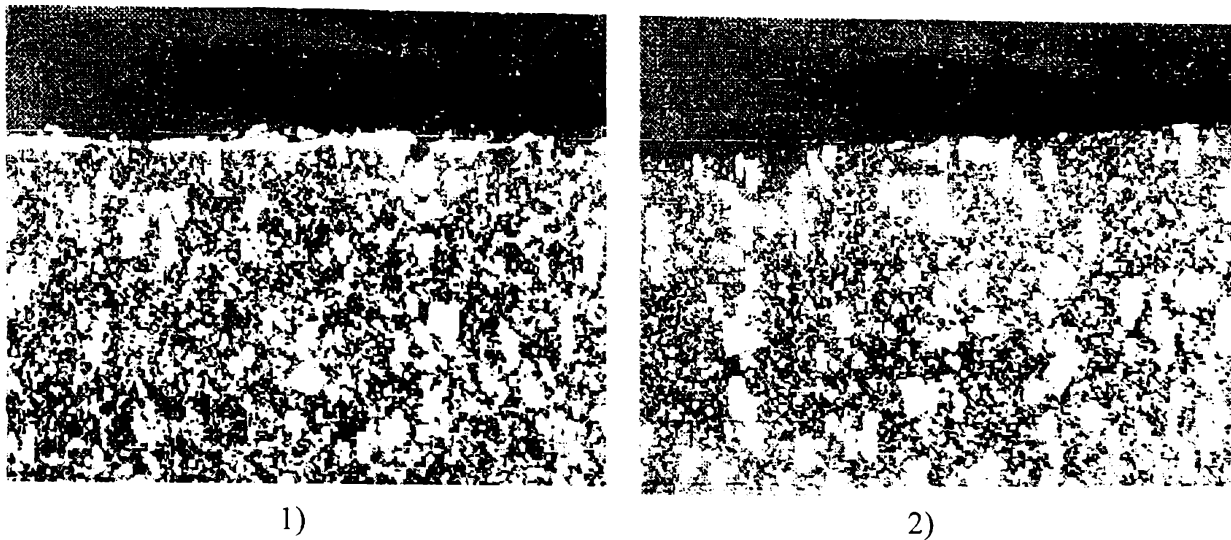


Fig. 3.17 Structura metalografică a suprafețelor erodate (1) și rectificate (2) ale epruvetelor de fretting

Se observă că structura metalografică a ambelor epruvete prezintă un miez format din carburi primare și secundare în șiruri pe fond de sorbită. Epruveta rectificată are un strat marginal uniform, fără fisuri. La epruveta erodată se remarcă stratul marginal neuniform, cu exfolieri, dar fără fisuri, și prezența stratului alb de dimensiuni reduse, neuniform (ușor ondulat) și cu mici discontinuități.

Din considerații de compatibilitate tribologică, pentru cel de-al doilea corp al cuplei de frecare supusă încercărilor de uzare la fretting s-a ales o bilă de oțel RUL 1 (STAS 1456-88), de rază 50 mm, tratată termic, având compoziția chimică în tabelul 3.7, duritatea 61.5 HRC și rugozitatea suprafeței  $R_a = 0.1 \mu\text{m}$ .

TABELUL3.7 Compoziția chimică a oțelului RUL 1 (STAS 1456-88)

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>S</b>	<b>P</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>
<b>min</b>	0.95	0.17	0.2	<	<	1.3	<
<b>max</b>	1.1	0.37	0.45	0.02	0.027	1.65	0.3

Din mulțimea elementelor definitorii ale încercărilor la uzare de fretting (vezi §2.2.6.2), au fost reținute, ca factori de influență independenți și controlabili, următoarele:

- amplitudinea micilor deplasări  $D$  [ $\mu\text{m}$ ];
- forța de apăsare normală  $F_n$  [daN];

- frecvența ciclurilor  $f$  [Hz];
- numărul de cicluri de solicitare aplicate  $N$  [-];

reglabile pe standul experimental utilizat în limitele  $D \in [5; 100] \mu\text{m}$ ,  $F_n \in [10; 100] \text{ daN}$ ,  $f \in [1; 10] \text{ Hz}$ .

Încercările au fost efectuate în atmosfera și la temperatura ambiantă. Solicitarea epruvetelor s-a realizat fără lubrifierea suprafețelor de contact.

### 3.3.1.3 Programul experimental

Proiectarea programului experimental a avut ca bază proprie de pornire matricea program a unui experiment factorial complet EFC  $2^3$  cu  $n = 8$  încercări [N4], având ca factori de influență  $D \equiv x_1$ ,  $F_n \equiv x_2$  și  $f \equiv x_3$ . Această matrice program este reprodusă în tabelul 3.8, corespunzător valorilor codate ( $-1$  pentru nivelul superior și  $-1$  pentru nivelul inferior) ale tuturor combinațiilor factorilor de influență considerați.

Matricea-program a fost aplicată succesiv la încercarea suprafețelor prelucrate prin rectificare (R) și respectiv prelucrate prin eroziune (E). În fiecare caz, celor 8 încercări standard li s-au adăugat alte două încercări suplimentare necesare determinării erorii medii globale a experimentării și anume prima (nr. 9) în punctul central al experimentului pentru  $f = 5 \text{ Hz}$  și  $N = 50000$  cicluri și a doua (nr. 10) în punctul de coordonate  $D = 40 \mu\text{m}$ ,  $F_n = 70 \text{ daN}$  și  $f = 5 \text{ Hz}$  pentru  $N = 260000$  cicluri.

TABELUL 3.8 Matricea program a unui experiment factorial complet EFC  $2^3$

Număr încercare	Factori de influență			Funcții de răspuns
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	
1	-1	-1	-1	$Y_1$
2	+1	-1	-1	$Y_2$
3	-1	+1	-1	$Y_3$
4	+1	+1	-1	$Y_4$
5	-1	-1	+1	$Y_5$
6	+1	-1	+1	$Y_6$
7	-1	+1	+1	$Y_7$
8	+1	+1	+1	$Y_8$

Domeniul investigat al spațiului multifactorial, exprimat prin valorile naturale ale factorilor de influență considerați, este definit prin datele tabelului 3.9.

TABELUL 3.9 Punctul central, nivelele și intervalul de variație a factorilor în experimentarea de uzare de fretting

Parametru	Valori codate	Factori de influență (valori naturale)		
		$x_1 \equiv D$ [ $\mu\text{m}$ ]	$x_2 \equiv F_n$ [daN]	$x_3 \equiv f$ [Hz]
Punct central	0	30	50	7.5
Interval de variație	$\Delta I$	20	30	2.5
Nivel superior	+1	50	80	10
Nivel inferior	-1	10	20	5

Programul complet al experimentării, cu indicarea valorilor naturale ale factorilor pe nivele de variație superior și inferior este reprodus în tabelul 3.10.

TABELUL 3.10 Programul complet al experimentării de uzare de fretting

Nr. crt.	Nr.epruvetă suprafață rectificată	Nr.epruvetă suprafață erodată	$x_1 \equiv D$ [ $\mu\text{m}$ ]	$x_2 \equiv F_n$ [daN]	$x_3 \equiv f$ [Hz]	N [nr.cicluri]	$p_H$ [MPa]
1.	R 1/2	E 1/2	10	20	5	10000	590.69
2.	R 1/4	E 2/2	50	20	5	10000	590.69
3.	R 2/2	E 1/1	10	80	5	10000	937.67
4.	R 2/3	E 2/1	50	80	5	10000	937.67
5.	R 3/2	E 3/2	10	20	10	10000	590.69
6.	R 3/4	E 4/2	50	20	10	10000	590.69
7.	R 3/1	E 3/1	10	80	10	10000	937.67
8.	R 3/3	E 5/2	50	80	10	10000	937.67
9.	R 1/3	E 4/1	30	50	5	50000	801.69
10.	R 1/1	E 5/1	40	70	5	260000	896.85

Relația dintre valorile codate  $x_j$  și valorile fizice, naturale  $\tilde{x}_j$ , ale nivelelor factorilor de influență este dată de relația [N4]:

$$x_j = \frac{\tilde{x}_j - \tilde{x}_{j0}}{\Delta I_j} \quad (3.7)$$

în care  $\tilde{x}_{j0}$  este valoarea naturală a nivelului de bază al factorului  $j$ , iar  $\Delta I_j$  - intervalul de variație natural al factorului  $j$ .

Pentru a oferi o imagine mai palpabilă a condițiilor de solicitare dezvoltate în zona de contact a corpurilor constitutive ale cuplei de frecare sferă-plan supusă investigării la uzare de fretting, în ultima coloană a tabelului 3.10 s-au indicat valorile presiunii pe aria locală de contact  $p_H$  [MPa], determinată în ipoteza unui contact hertzian (solide omogene și izotrope, perfect elastice) cu relația [B2]:

$$p_H = \left( \frac{6 \cdot F_n \cdot E^*}{\pi^3 \cdot r^2} \right)^{1/3} \quad (3.8)$$

unde:  $F_n$  este forța normală aplicată;

$E^*$  este modulul de elasticitate echivalent;  $\frac{1}{E^*} = \frac{1}{2} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)$ ,

cu  $E_1, E_2$  -modulele de elasticitate pentru plan și sferă iar  $\nu_1, \nu_2$  -coeficienții lui Poisson pentru plan și sferă;

$r = 50$  mm este raza de curbură a bilei.

Valorile presiunii  $p_H$ , asociate cu experiența acumulată de cercetătorii laboratorului de fretting de la Ecole Centrale de Lyon, au permis localizarea câmpului investigat al factorilor de influență în domeniul de tranziție dintre solicitările de alunecare parțială și alunecare totală și respectiv în domeniul regimului de solicitare de alunecare totală, cele mai importante din punctul de vedere al uzării de fretting.

### 3.3.2 Standul experimental-principii, structură, funcționalitate

Încercările de fretting au fost realizate în laboratorul de fretting al departamentului Materiaux-Mecanique-Physique din cadrul Ecole Centrale din Lyon, Franța. Standul experimental (figura 3.18) are ca element principal o mașină de încercare la tracțiune M.T.S. 312.21 adaptată în vederea încercării la fretting.



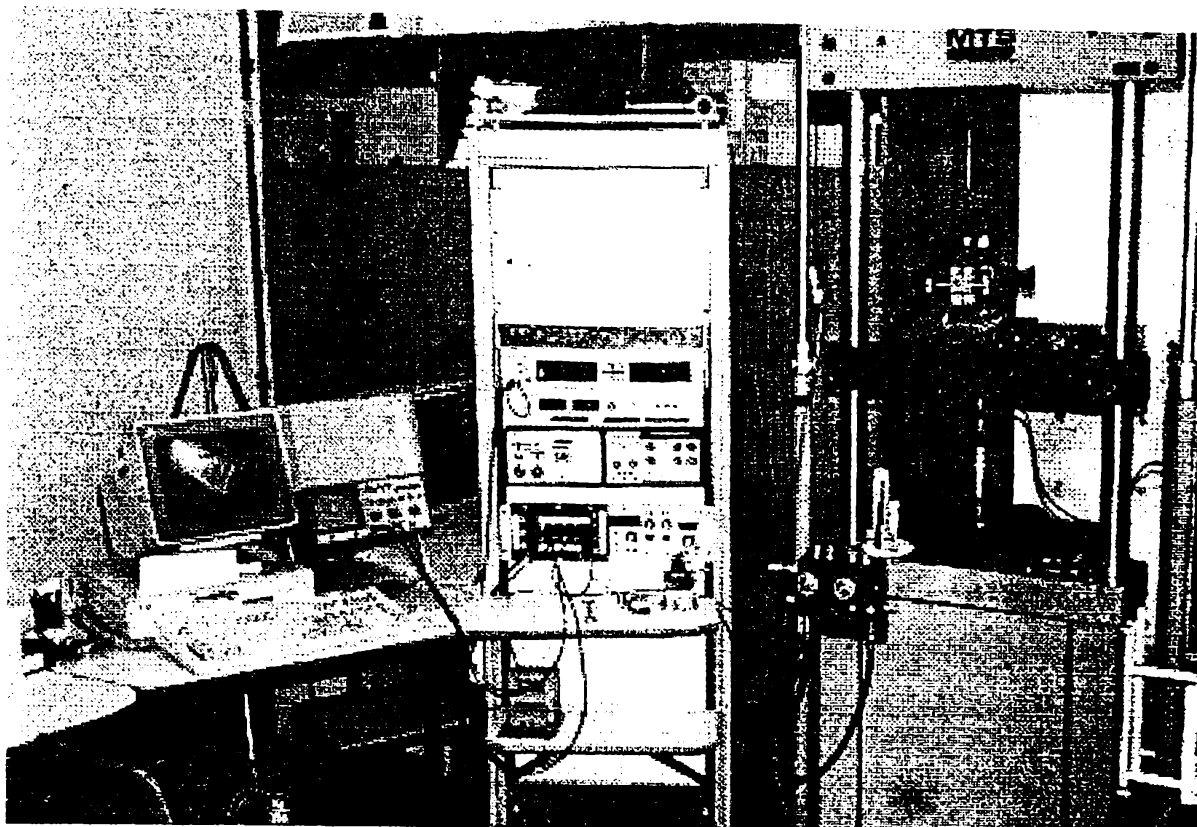


Fig. 3.18 Vedere de ansamblu a standului experimental

Principalele părți componente ale standului experimental sunt:

- cadru de rezistență
- cilindru hidraulic
- unitate de comandă și control
- generator
- indicator digital
- osciloscop
- calculator interfațat cu instalația experimentală.

Dispozitivul utilizat pentru încercările la fretting (figura 3.19), montat pe stand are alcătuirea schematică din figura 3.20.

Semnalele recepționate de traductoarele de forță și de deplasare sunt înregistrate și analizate de către un calculator interfațat cu instalația experimentală (fig. 3.18), înregistrându-se sau calculându-se în permanență, parametrii  $F_n$ ,  $D$ ,  $F_t$ .

De asemenea, pe monitor poate fi urmărită trasarea “trunchiului de fretting”, corespunzător încercării (fig. 3.18).

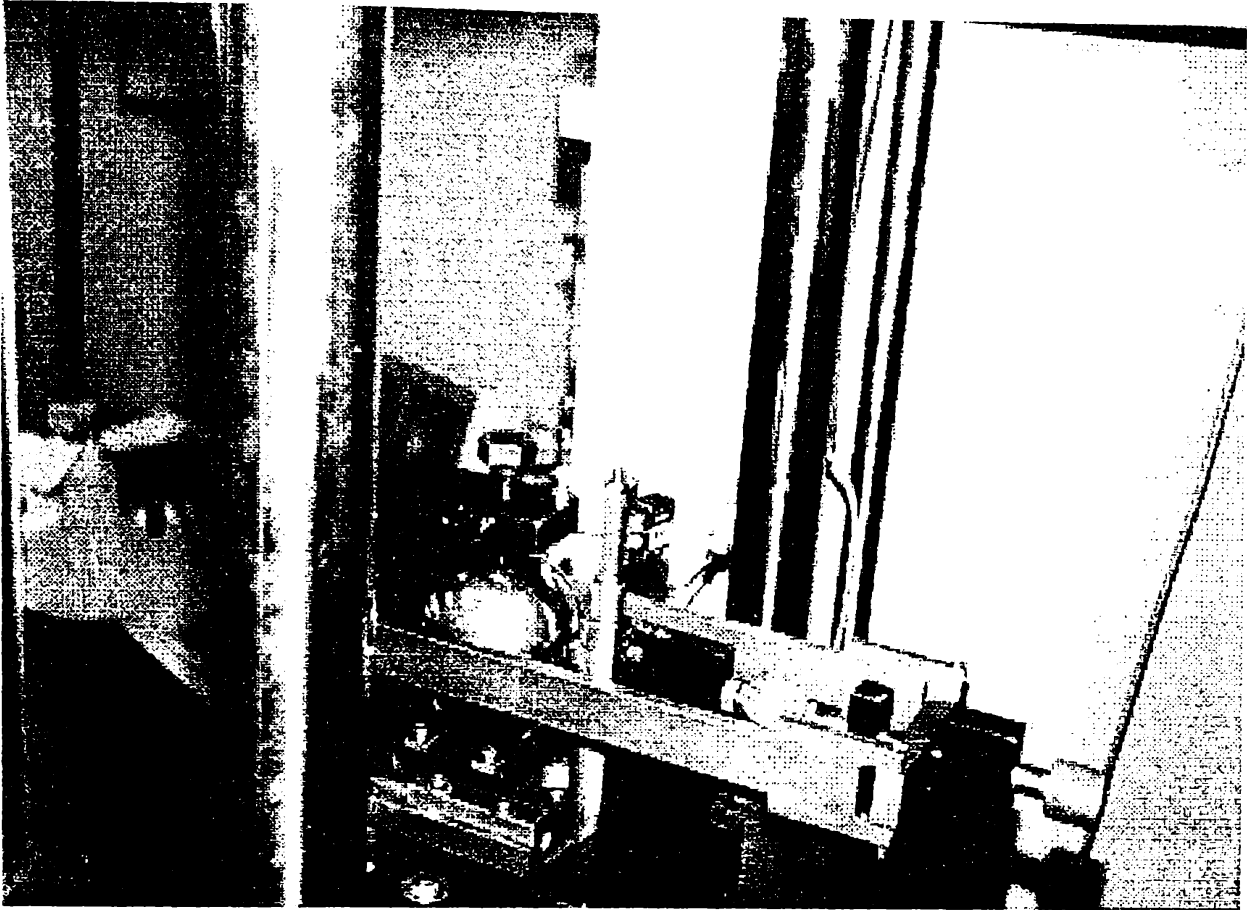


Fig. 3.19 Dispozitivul utilizat pentru încercările la fretting

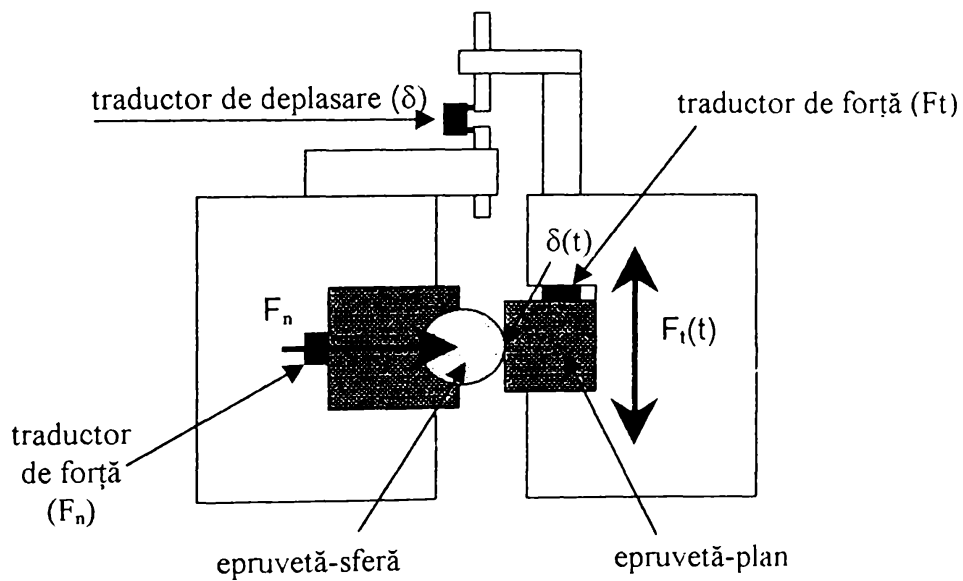


Fig. 3.20 Reprezentarea schematică a dispozitivului utilizat la încercările de uzare de fretting

Pentru fiecare încercare de fretting pe standul experimental prezentat anterior, s-au parcurs următoarele etape:

- fixarea bilei de rulment pe suportul fix;
- fixarea suportului captor pe suportul fix;
- curățarea bilei cu alcool etilic;
- montarea suportului cu bila pe mașină (ghidaje coadă de rândunică+pană de blocare);
- montarea epruvetei în suportul mobil;
- calibrarea poziționării relative sferă-plan (punerea epruvetei în axul bilei);
- reglarea frecvenței ciclurilor;
- achiziția datelor cu programe de achiziție: MTS 5H sau MTS 10H;
- fixarea epruvetei prin strângere cu șuruburi;
- fixarea suportului superior al captorului pe suportul epruvetei;
- reglarea numărului de cicluri de solicitare;
- reglarea amplitudinii micilor deplasări;
- aplicarea forței normale;
- înregistrarea numărului epruvetei și a caracteristicilor încercării;
- montarea captorului pe cei doi suporti (bilă+epruvetă);
- demararea încercării;
- oprirea încercării;
- scoaterea captorului
- descărcarea epruvetei;
- îndepărtarea bilei;
- scoaterea suportului captorului;
- înlocuirea epruvetei.

### 3.3.3. Rezultate experimentale și interpretări referitoare la caracteristicile de uzare, frecare și disipare de energie în procesele de uzare de fretting a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă

#### 3.3.3.1 Baza de date și informații complementare privind procesul de uzare de fretting

În urma realizării programului experimental precum și ca urmare a prelucrării rezultatelor experimentale primare, în concordanță cu cele prezentate în §3.3.1., a putut fi creată baza de date și informații necesară interpretării rezultatelor și formulării concluziilor cercetării, bază ce cuprinde:

-tabelele cu valorile numerice ale următoarelor mărimi: numărul de cicluri ( $N$  [-]), forța de frecare ( $T_{max}$  [N]), forța normală ( $F_n$  [N]), coeficientul de frecare ( $Mu$  [-]), deschiderea maximă a ciclului ( $2D_{max}$  [ $\mu\text{m}$ ]), distanța între ramurile ciclului la mijlocul acestuia ( $ouv$  [ $\mu\text{m}$ ]), al doilea criteriu B-“deschidere”, pentru aprecierea tipului de ciclu ( $ouv / 2D_{max}$  [-]), energia disipată ( $W_d$  [ $\mu\text{m}\times\text{N}$ ]), energia furnizată ( $W_f$  [ $\mu\text{m}\times\text{N}$ ]), primul criteriu A-“energie” pentru aprecierea tipului de ciclu ( $W_d / W_f$  [-]), energia disipată în ciclurile anterioare ciclului curent ( $W_{cumul}$  [ $\mu\text{m}\times\text{N}$ ]), coeficientul de frecare corectat ( $Mu_{corr}$  [-]). Cu titlu ilustrativ, în tabelul 3.11 este reprodus integral conținutul informațional al încercării E5/1 (tabelul 3.10):

-coeficienții ecuațiilor polinomiale de regresie a modelelor experimentale ale criteriilor de tranziție A și B (tabelul 3.12), calculați pe baza rezultatelor experimentului factorial, precum și precizia de estimare a acestor modele;

-histograme ale ierarhiei factorilor de influență  $D$ ,  $F_n$  și  $f$  asupra criteriilor de tranziție B și respectiv A pentru suprafețele prelucrate prin eroziune și rectificate, pentru  $N = 100$ , respectiv  $N = 10000$  (fig. 3.21...fig. 3.28);

-suprafețele de răspuns în funcție de factorii  $D$  și  $F_n$  pentru criteriile A și B pentru suprafețe prelucrate prin eroziune și rectificate, pentru  $N = 100$  și  $N = 10000$  (fig. 3.35...fig. 3.42);

TABELUL 3.11 Model al bazei de date asociate unei încercări de uzare de fretting

Noacq	Nocyc	Tmax	Fn	Mu	2Dmax	ouv	ouv/2Dm	Wd	Wf	Wd/Wf	Wcumul	Mu corr
1	1	155	699	221	81836	0	0	22276	25334	879	22276	0
2	4	164	696	235	81738	0	0	23981	26741	897	94220	0
3	7	166	695	239	81641	0	0	24400	27107	900	167421	0
4	10	166	695	239	81543	76713	941	24754	27075	914	241684	232
5	13	167	694	240	81738	76661	938	24796	27219	911	316071	233
6	16	167	694	241	81641	0	0	24620	27267	903	389931	0
7	19	167	694	241	81934	76557	934	24991	27365	913	464903	235
8	22	169	693	244	81934	76584	935	25127	27685	908	540285	237
9	25	170	693	246	81836	76484	935	25386	27891	910	616442	239
10	28	172	693	249	81641	76419	936	25470	28144	905	692850	240
11	35	177	693	255	81836	0	0	25742	28930	890	873042	0
12	40	180	692	260	81738	75918	929	26411	29375	899	1005098	251
13	45	184	692	266	81641	75893	930	26925	30057	896	1139725	256
14	54	190	691	275	81445	75712	930	27809	31019	897	1390007	266
15	59	194	691	280	81934	75631	923	28400	31765	894	1532007	272
16	64	198	690	287	81445	75518	927	28839	32292	893	1676202	277
17	69	200	690	290	81641	0	0	28809	32688	881	1820247	0
18	74	203	690	293	81641	75332	923	29570	33087	894	1968095	284
19	79	206	689	299	81641	75147	920	29967	33645	891	2117933	289
20	84	209	689	304	81641	75110	920	30339	34203	887	2269627	293
21	89	210	689	305	81641	75125	920	30606	34362	891	2422654	295
22	94	213	689	309	81641	75055	919	30785	34841	884	2576580	297
23	99	214	689	311	81738	74977	917	31001	35042	885	2731584	300
24	104	216	688	314	81934	74876	914	31339	35446	884	2888277	304
25	109	220	688	320	81641	74794	916	31573	35957	878	3046140	307
26	114	222	688	322	82031	74714	911	31907	36369	877	3205673	310
27	119	224	688	326	81738	74667	913	32208	36639	879	3366713	314
28	124	226	688	328	81543	74502	914	32423	36790	881	3528827	317
29	129	229	688	333	81641	74433	912	32813	37392	878	3692892	321
30	134	230	688	335	81543	74356	912	33065	37586	880	3858215	323
31	139	233	688	339	81836	74282	908	33260	38201	871	4024513	326
32	144	234	688	341	81934	74321	907	33501	38406	872	4192018	328
33	149	236	687	344	81641	74185	909	33576	38508	872	4359896	330
34	154	236	687	344	81641	74254	910	33806	38588	876	4528926	332
35	159	239	687	349	81738	74046	906	34209	39113	875	4699971	336
36	164	242	687	352	81738	74145	907	34639	39512	877	4873165	340
37	169	244	687	356	81836	73940	904	34973	39959	875	5048032	344
38	174	248	687	361	81934	73749	900	35366	40647	870	5224860	349
39	179	249	686	363	81641	73789	904	35552	40661	874	5402622	351
40	184	251	686	367	81934	73762	900	35813	41207	869	5581686	354
41	189	255	686	372	82227	73550	894	36203	41916	864	5762703	359
42	194	255	686	372	81934	73494	897	36118	41767	865	5943294	358
43	199	258	686	377	81641	0	0	36353	42176	862	6125059	0
44	224	267	685	389	81543	73065	896	37658	43479	866	7066509	376
45	249	272	685	397	81738	73032	893	38298	44461	861	8023950	383
46	274	280	684	409	81836	0	0	38728	45793	846	8992146	0
47	299	285	684	417	82227	0	0	39825	46895	849	9987771	0
48	350	296	684	433	81934	72390	884	41560	48488	857	12107350	420
49	399	311	683	455	81836	71936	879	43649	50828	859	14246135	444
50	450	327	683	479	81836	71394	872	45468	53545	849	16565027	466
51	499	345	682	506	82031	70909	864	47539	56557	841	18894433	492
52	550	362	682	532	82129	0	0	49366	59511	830	21412106	0
53	599	377	681	554	82324	70175	852	51474	62065	829	23934325	539
54	650	395	681	580	82324	69678	846	53366	64959	822	26655979	563



TABELUL 3.11 (continuare)

55	699	405	681	595	82227	0	0	54285	66648	814	29315951	0
56	750	420	680	619	82324	68718	835	56023	69220	809	32173101	600
57	799	423	680	622	82422	68688	833	56439	69704	810	34938601	604
58	900	444	680	654	82227	67841	825	58329	73072	798	40829845	632
59	999	458	679	674	82129	67718	825	59667	75151	794	46736842	649
60	1050	458	680	675	82324	67483	820	59703	75491	791	49781679	651
61	1099	462	679	681	82227	67530	821	59769	75963	787	52710379	652
62	1500	460	679	678	82227	67573	822	59130	75722	781	76421510	645
63	1999	458	679	674	82031	67900	828	57841	75062	771	1.05E+08	628
64	2500	463	680	681	82031	67587	824	57023	75943	751	1.34E+08	621
65	2999	477	681	701	81738	66946	819	57445	77987	737	1.63E+08	630
66	3500	479	682	702	81641	0	0	56749	78133	726	1.91E+08	0
67	3999	488	682	716	81543	0	0	57116	79632	717	2.19E+08	0
68	4500	495	681	727	81934	66271	809	57509	81053	710	2.48E+08	637
69	4999	490	681	720	81934	66426	811	57083	80333	711	2.77E+08	631
70	6000	487	681	716	81641	66286	812	56050	79568	704	3.33E+08	621
71	6999	466	679	687	81836	66826	817	54317	76322	712	3.87E+08	599
72	8000	459	680	676	81836	0	0	53128	75203	706	4.4E+08	0
73	8999	445	679	655	82031	67484	823	52493	72979	719	4.93E+08	573
74	10000	440	678	649	82520	67686	820	52397	72608	722	5.45E+08	571
75	12499	438	677	646	82324	68216	829	52577	72034	727	6.76E+08	567
76	15000	436	676	645	82715	68456	828	52987	72133	735	8.09E+08	573
77	17499	453	675	671	82617	67748	820	55389	74791	741	9.47E+08	606
78	20000	470	673	698	82520	67538	818	56997	77523	735	1.09E+09	627
79	22499	486	672	724	82422	66708	809	59038	80168	736	1.24E+09	659
80	25000	498	671	742	82227	66063	803	59874	81825	732	1.39E+09	675
81	27499	510	669	763	82129	66059	804	61519	83813	734	1.54E+09	696
82	30000	509	668	762	81934	0	0	60756	83374	729	1.69E+09	0
83	32499	506	665	761	81934	66295	809	62016	82974	747	1.85E+09	703
84	35000	528	664	796	81836	0	0	64039	86471	741	2.01E+09	0
85	37499	529	662	799	81934	66000	806	65066	86654	751	2.17E+09	744
86	40000	546	659	829	82031	65489	798	66950	89642	747	2.34E+09	775
87	42499	560	659	850	81934	65247	796	67593	91775	737	2.51E+09	786
88	45000	551	657	838	81836	0	0	66387	90147	736	2.67E+09	0
89	47499	555	655	846	81836	0	0	65774	90787	724	2.84E+09	0
90	50000	577	654	881	81738	64715	792	67431	94270	715	3.01E+09	796
91	54999	611	650	939	81836	63478	776	67934	99977	679	3.35E+09	823
92	60000	627	649	966	81738	62655	767	68102	1E+05	664	3.69E+09	837
93	64999	621	647	959	81934	62914	768	67395	1E+05	663	4.02E+09	827
94	70000	632	646	980	81836	0	0	67097	1E+05	648	4.36E+09	0
95	74999	624	644	970	81836	62755	767	66550	1E+05	652	4.69E+09	824
96	80000	620	641	968	81641	63768	781	68680	1E+05	678	5.03E+09	841
97	84999	624	640	975	81934	64180	783	71648	1E+05	701	5.39E+09	873
98	90000	619	639	969	81934	64224	784	71045	1E+05	701	5.75E+09	866
99	99999	618	635	974	81738	64166	785	71696	1E+05	709	6.46E+09	880
100	1E+05	618	632	978	81738	64799	793	73401	1E+05	727	7.2E+09	896
101	1E+05	609	628	970	81543	65103	798	72829	99380	733	7.93E+09	891
102	1E+05	603	626	963	81738	65568	802	73161	98581	742	8.66E+09	891
103	1E+05	594	623	953	81836	65404	799	69910	97180	719	9.36E+09	858
104	2E+05	591	624	947	81738	63487	777	64790	96585	671	1E+10	818
105	2E+05	572	620	923	81543	66419	815	70219	93328	752	1.18E+10	852
106	2E+05	573	618	927	81543	66721	818	71885	93408	770	1.36E+10	871
107	2E+05	567	607	934	81836	67052	819	71779	92865	773	1.71E+10	881

- hărțile solicitărilor locale (HSL) în zona corespunzătoare domeniului investigat obținute prin secționarea suprafețelor de răspuns mai sus amintite cu plane orizontale corespunzătoare valorilor  $Y = 0.26$ , pentru criteriul B-“deschidere” și respectiv  $Y = 0.2$ , pentru criteriul A-“energie” au fost reprezentate în fig. 3.43... 3.46; a fost reprezentată informativ și o hartă a solicitărilor locale prin efectuarea unei încercări suplimentare în punctul de coordonate  $D = 6 \mu\text{m}$ ,  $F_n = 90 \text{ daN}$ ,  $f = 5\text{Hz}$ , în vederea obținerii unui ciclu de “lipire” (fig. 3.47);

- reprezentările tridimensionale (în coordonate  $D$ ,  $F_n$ ,  $M$ ) ale “trunchiului de frecare”, pentru toate epruvetele considerate, conform programului experimental sunt reproduse în fig. 3.48... 3.67;

- evoluția coeficienților de frecare și respectiv a energiei disipate (considerate ca mărimi de interes tribologic) de-a lungul unei încercări, pentru diferite valori ale lui  $F_n$ ,  $D$  sau  $f$ , respectiv pentru suprafețe erodate sau rectificite este reprezentată în fig. 3.89... 3.97). Pentru prelucrarea rezultatelor a fost utilizat programul de calculator STATGRAPHICS;

- fotografii realizate cu microscopul optic ale tuturor suprafețelor supuse încercărilor de fretting; în cadrul tezei au fost incluse numai fotografiile epruvetelor: E3/1, E2/2, E1/2, E2/1, E1/1, R1/3, R1/2, R2/2, R2/3 și R3/1;

- fotografii realizate cu microscopul electronic cu baleiaj, pentru câteva suprafețe considerate mai deosebite, dintre care în teză au fost incluse cele ale epruvetelor E2/1, E2/2 și R1/4, R1/1.

### **3.3.3.2 Factori determinanți ai tranziției alunecare parțială-alunecare totală în condițiile uzării de fretting**

Problema definirii și estimării matematice a unor criterii cantitative pentru predicția domeniului de tranziție dintre regimurile de alunecare parțială și alunecare totală are o importanță determinantă în caracterizarea și evaluarea proceselor de degradare și, în particular, de uzare, induse de fretting în materialul cuplei de frecare.

Dintre cele trei criterii de tranziție introduse și prezentate în figura 2.10 [F1] [F2], în experimentul factorial conceput și realizat conform §3.3.1 s-a optat pentru criteriile cu cea mai înaltă rezoluție și anume:

- criteriul “energie”:

$$A = \frac{W_d}{W_f} \quad (3.9)$$

respectiv

- criteriul “deschidere”:

$$B = \frac{\delta_0}{D} \quad (3.10)$$

ultimul determinabil și prin relația (vezi p. 3.3.3.1):

$$B = \frac{ouv.}{2 \cdot D_{max}} \quad (3.11)$$

unde *ouv.* este distanța dintre ramurile ciclului de fretting la mijlocul acestuia, iar  $2 \cdot D_{max}$  - deschiderea maximă a ciclului.

Prin aplicarea, în premieră, a metodologiei de modelare empirică regresională (vezi 3.3.1.1 și [N4]) au fost calculate și validate statistic valorile numerice și precizia de estimare a coeficienților de regresie din modelele polinomiale ale criteriilor de tranziție A-“energie” și B-“deschidere”, determinate corespunzător valorilor codate ale factorilor de influență, în forma:

$$A, B = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (3.12)$$

Valorile numerice ale acestor coeficienți, determinate pentru procese de uzare de fretting a unor suprafețe cu rugozitate izotropă (erodate) și respectiv, pentru comparație, a unor suprafețe cu rugozitate anizotropă (rectificate plan), pentru un număr de cicluri de solicitare  $N = 100$  și  $N = 10000$ , sunt reproduse în tabelul 3.12.

Pe baza datelor conținute în tabelul 3.12 și cu ajutorul programului STATGRAPHICS au putut fi construite și reprezentate grafic histograme ale efectului factorilor de influență considerați ( $x_1 \equiv D$ ,  $x_2 \equiv F_n$  și  $x_3 \equiv f$ ) asupra criteriului de tranziție A-“energie”, pentru suprafețe cu rugozitate izotropă (figurile 3.21, pentru  $N = 100$  cicluri și 3.22 pentru  $N = 10000$  cicluri) și respectiv, pentru comparație, pentru suprafețe cu rugozitate anizotropă (figurile 3.23 pentru  $N = 100$  cicluri și 3.24 pentru  $N = 10000$  cicluri) și asupra criteriului B-“deschidere”, pentru suprafețe cu rugozitate izotropă (figurile 3.25, pentru  $N = 100$  cicluri și 3.26 pentru  $N = 10000$  cicluri) și respectiv, pentru comparație, pentru suprafețe cu rugozitate anizotropă (figurile 3.27 pentru  $N = 100$  cicluri și 3.28 pentru  $N = 10000$  cicluri).



TABELUL 3.12 Valorile coeficienților de regresie ai criteriilor de tranziție A - “energie” și B - “deschidere”

Factori de influență	Simbol	Valorile coeficienților de regresie											
		suprafețe erodate						suprafețe rectificcate					
		A			B			A			B		
		N=100	N=10000	N=100	N=10000	N=100	N=10000	N=100	N=10000	N=100	N=10000	N=100	N=10000
$x_0$	$b_0$	1.05698	0.93933	1.03044	0.997667	0.903729	0.770938	0.929938	0.779188				
$x_1$	$b_1$	$3.10417 \cdot 10^{-4}$	$1.86667 \cdot 10^{-3}$	$5.6875 \cdot 10^{-4}$	$3.36667 \cdot 10^{-3}$	$1.89792 \cdot 10^{-3}$	$6.1875 \cdot 10^{-4}$	$1.18542 \cdot 10^{-3}$	$3.46042 \cdot 10^{-3}$				
$x_2$	$b_2$	$-3.77708 \cdot 10^{-3}$	$-0.0128042$	$-2.49375 \cdot 10^{-3}$	$-0.0126083$	$-0.0102521$	$-9.53125 \cdot 10^{-3}$	$-0.0101313$	$-9.41875 \cdot 10^{-3}$				
$x_3$	$b_3$	$-0.0357583$	$-0.0305$	$-0.028925$	$-0.0285$	$-0.0192083$	$7.84167 \cdot 10^{-3}$	$-0.015175$	$0.0112917$				
$x_1 \cdot x_2$	$b_{12}$	$1.39583 \cdot 10^{-5}$	$1.45417 \cdot 10^{-4}$	$-1.875 \cdot 10^{-6}$	$1.44167 \cdot 10^{-4}$	$1.09792 \cdot 10^{-4}$	$1.66875 \cdot 10^{-4}$	$1.48542 \cdot 10^{-4}$	$1.47292 \cdot 10^{-4}$				
$x_1 \cdot x_3$	$b_{13}$	$2.975 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$3.975 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2.825 \cdot 10^{-4}$	$-7.25 \cdot 10^{-5}$	$2.425 \cdot 10^{-4}$	$-2.375 \cdot 10^{-4}$				
$x_2 \cdot x_3$	$b_{23}$	$4.11667 \cdot 10^{-4}$	$6.5 \cdot 10^{-4}$	$2.55 \cdot 10^{-4}$	$5.7 \cdot 10^{-4}$	$1.11667 \cdot 10^{-4}$	$1.66667 \cdot 10^{-6}$	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$2.16667 \cdot 10^{-4}$				
Precizia de estimare		0.9867	0.9815	0.9622	0.9715	0.9997	0.9990	0.9998	0.9991				

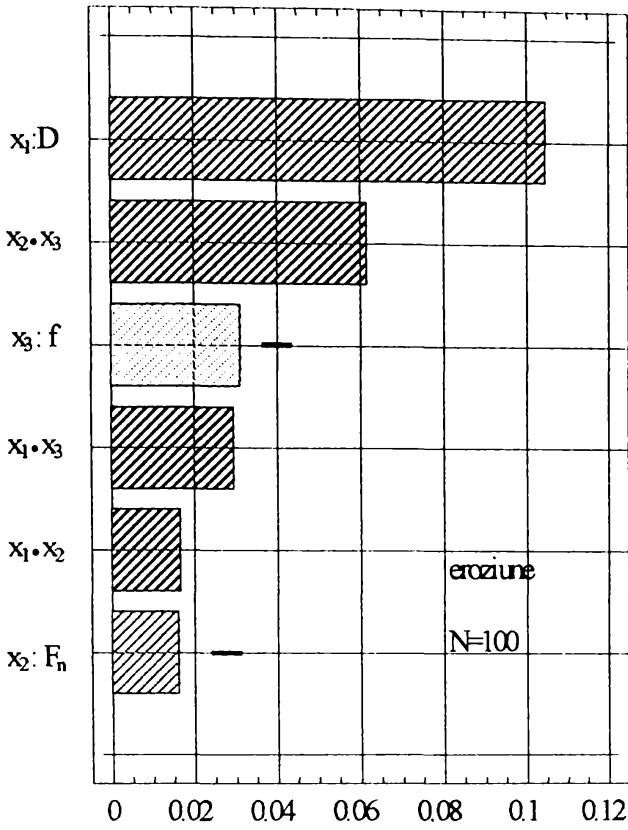


Fig. 3.21 Efectul factorilor de influență asupra criteriului A – “energie”

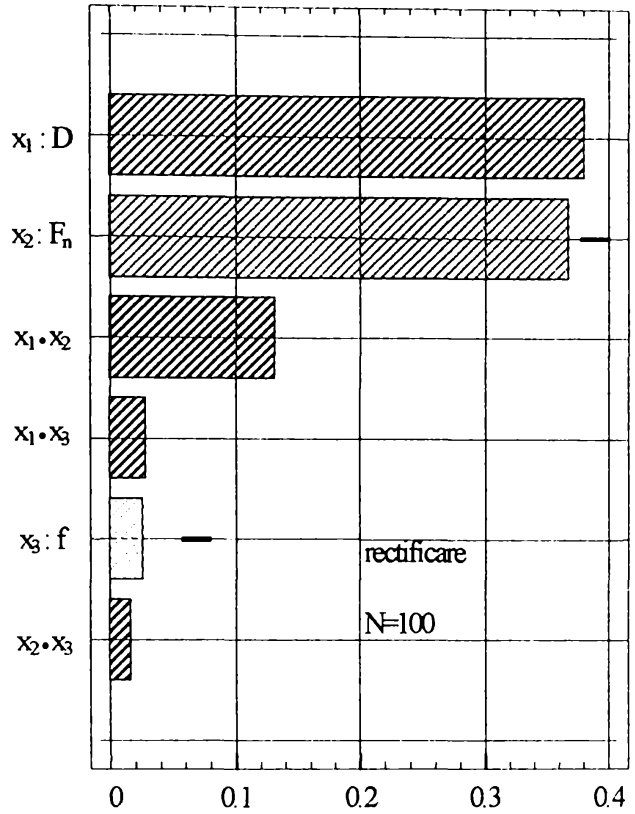


Fig. 3.23 Efectul factorilor de influență asupra criteriului A – “energie”

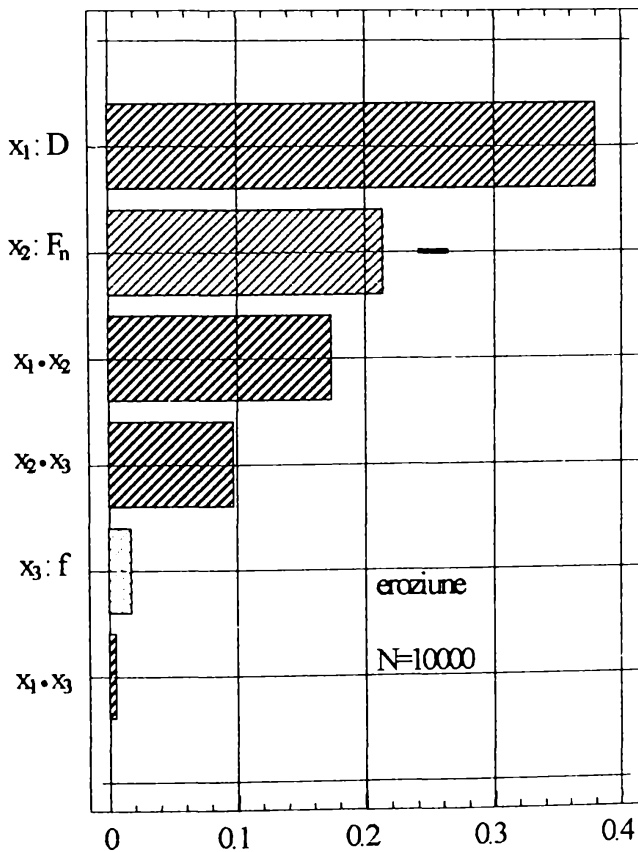


Fig. 3.22 Efectul factorilor de influență asupra criteriului A – “energie”

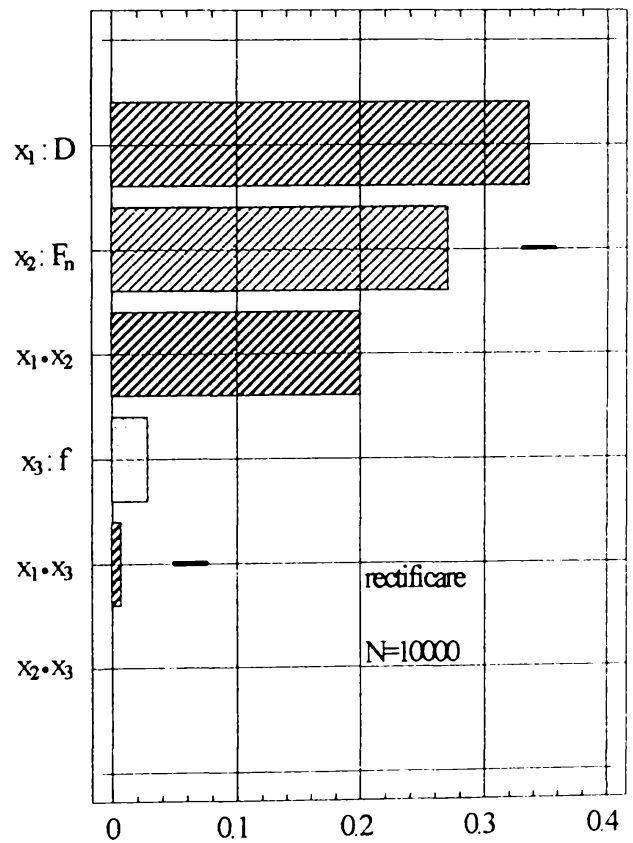


Fig. 3.24 Efectul factorilor de influență asupra criteriului A – “energie”

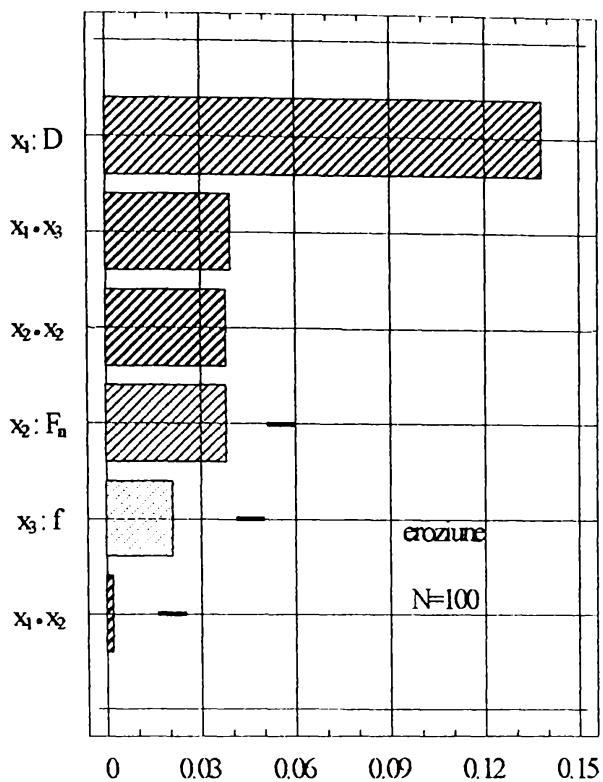


Fig. 3.25 Efectul factorilor de influență asupra criteriului B – “deschidere”

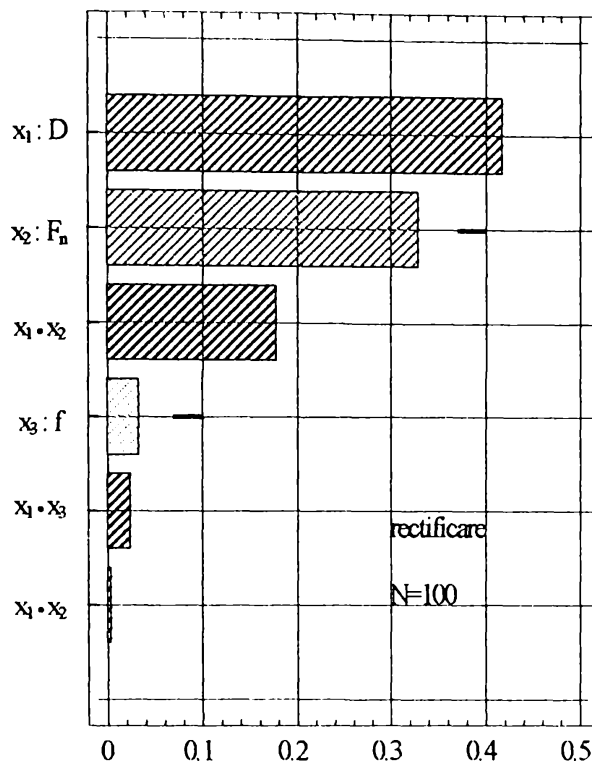


Fig. 3.27 Efectul factorilor de influență asupra criteriului B – “deschidere”

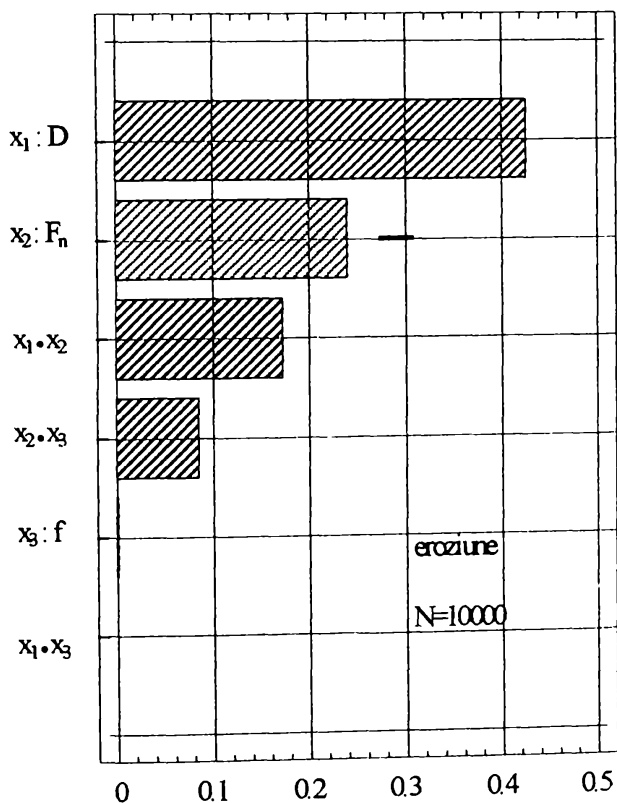


Fig. 3.26 Efectul factorilor de influență asupra criteriului B – “deschidere”

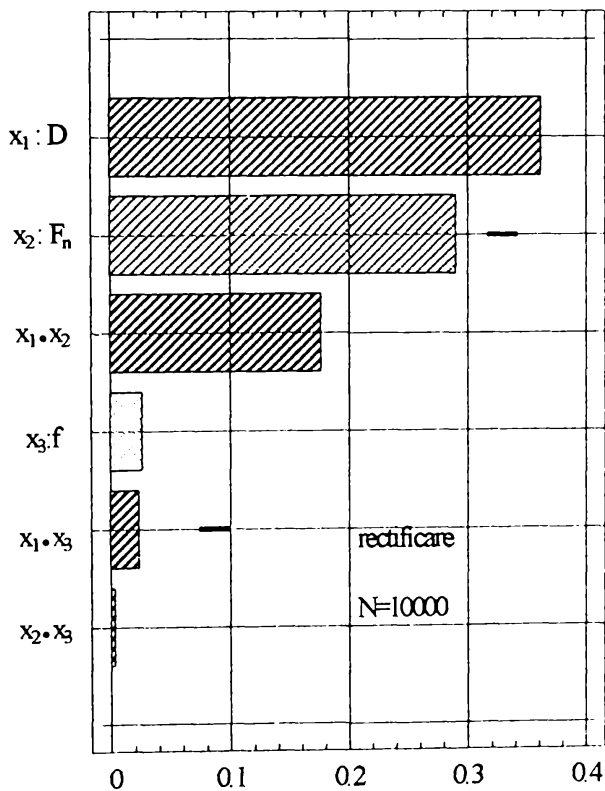


Fig. 3.28 Efectul factorilor de influență asupra criteriului B – “deschidere”

Examinarea histogramelor reprezentate în figurile 3.21...3.28 relevă că, în condițiile de experimentare date și la nivel global, factorul cu cea mai mare influență asupra valorilor criteriilor de tranziție A-“energie” și B-“deschidere” este amplitudinea deplasărilor  $x_1 \equiv D$ . Valorile criteriilor A și B cresc odată cu mărirea lui D, confirmând deplasarea proceselor de uzare de fretting către regimuri de solicitare de alunecare totală.

În cazul suprafețelor cu rugozitate izotropă, pentru ambele criterii analizate și pentru  $N = 10000$  cicluri (fig. 3.22 și 3.26) ordinea de importanță a factorilor de influență este  $D \rightarrow F_n \rightarrow f$ , cu precizarea că aportul lui  $f$  este neglijabil; influența lui  $F_n$  este însă semnificativă, fapt confirmat și de interacțiunile importante dintre  $x_2 \equiv F_n$ , pe de-o parte și  $D$  ( $x_1 \cdot x_2$ ) respectiv  $f$  ( $x_2 \cdot x_3$ ), pe de altă parte.

La un număr redus de cicluri de solicitare ( $N = 100$ , fig. 3.21 și 3.25), influența lui  $D$  asupra valorilor criteriilor A și B este, în mod relativ, și mai puternică, acțiunea factorilor  $F_n$  și  $f$  fiind de importanță secundară. La  $N$  redus, interacțiunile lui  $f$  cu  $D$  ( $x_1 \cdot x_3$ ) și cu  $F_n$  ( $x_2 \cdot x_3$ ) rămân însă semnificative.

Este important de observat că în toate situațiile analizate (inclusiv pentru suprafețe cu rugozitate anizotropă) creșterea forței de apăsare normală  $F_n$  determină micșorarea valorilor criteriilor de tranziție A și B (semnul “-” al efectelor acestui factor). Observația este perfect logică întrucât mărirea lui  $F_n$  favorizează menținerea în stare de “lipire” sau “alunecare parțială” a suprafețelor cuplei de frecare solicitate în condiții de fretting.

În sprijinul concluziilor enunțate vin și imaginile de microscopie optică ale suprafețelor epruvetelor supuse la uzare de fretting.

La o forță  $F_n$  constantă ( $F_n = 80$  daN), creșterea amplitudinii deplasărilor  $D$  de la  $10 \mu\text{m}$  (epruveta E1/1, figura 3.29) la  $50 \mu\text{m}$  (epruveta E2/1, figura 3.30) produce efecte semnificativ mai intense asupra stării suprafețelor decât modificarea forței de apăsare  $F_n$  de la  $20$  daN (epruveta E1/2, figura 3.31) la  $80$  daN (epruveta E1/1, figura 3.29), pentru o amplitudine a deplasărilor  $D$  constantă și egală cu  $10 \mu\text{m}$ .

Pentru comparație, în cazul suprafețelor cu rugozitate anizotropă (fig. 3.23, 3.24, 3.27, 3.28) ierarhiile factorilor de influență, evidențiate anterior, se păstrează, cu particularitatea că influența forței  $F_n$  este mult mai apropiată valoric de influența lui  $D$ , ceea ce explică valorile semnificative ale interacțiunii factorilor respectivi  $x_1 \cdot x_2$ .

Este confirmată, de asemenea, și în acest caz, preponderența influenței amplitudinii deplasărilor  $D$ , în raport cu influența forței de apăsare  $F_n$ , judecată prin prisma stării suprafețelor supuse la încercarea de uzare de fretting (figurile 3.32, 3.33, 3.34).

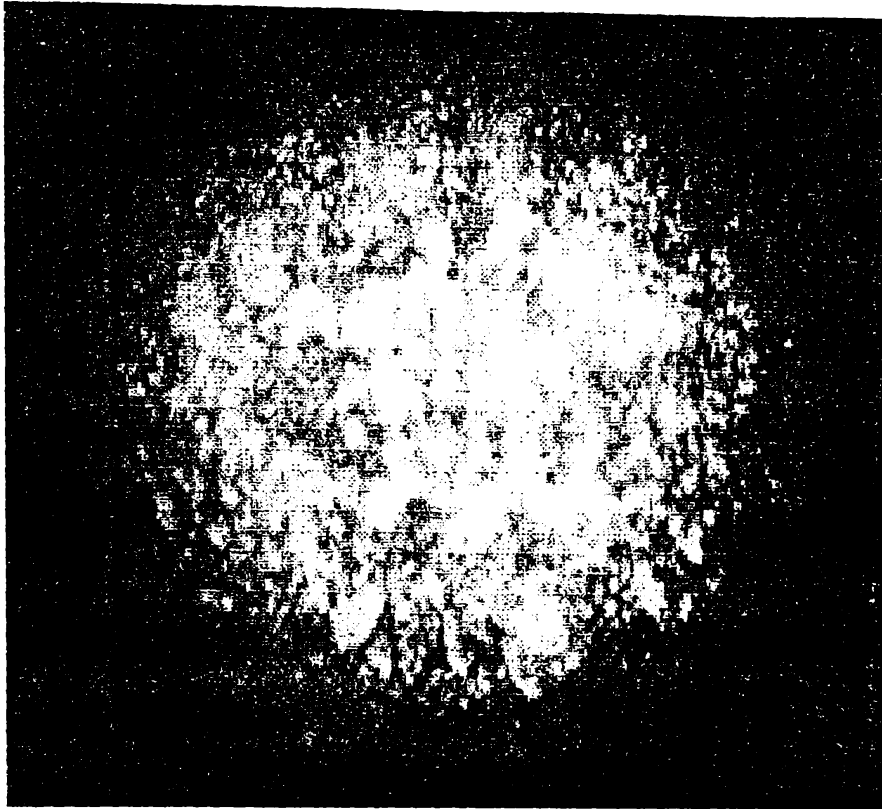


Fig. 3.29 Imagine de microscopie optică (x 25) a suprafeței supuse la uzare de fretting: epruvetă erodată E1/1,  $D = 10 \mu\text{m}$ ,  $F_n = 80 \text{ daN}$ ,  $f = 5 \text{ Hz}$

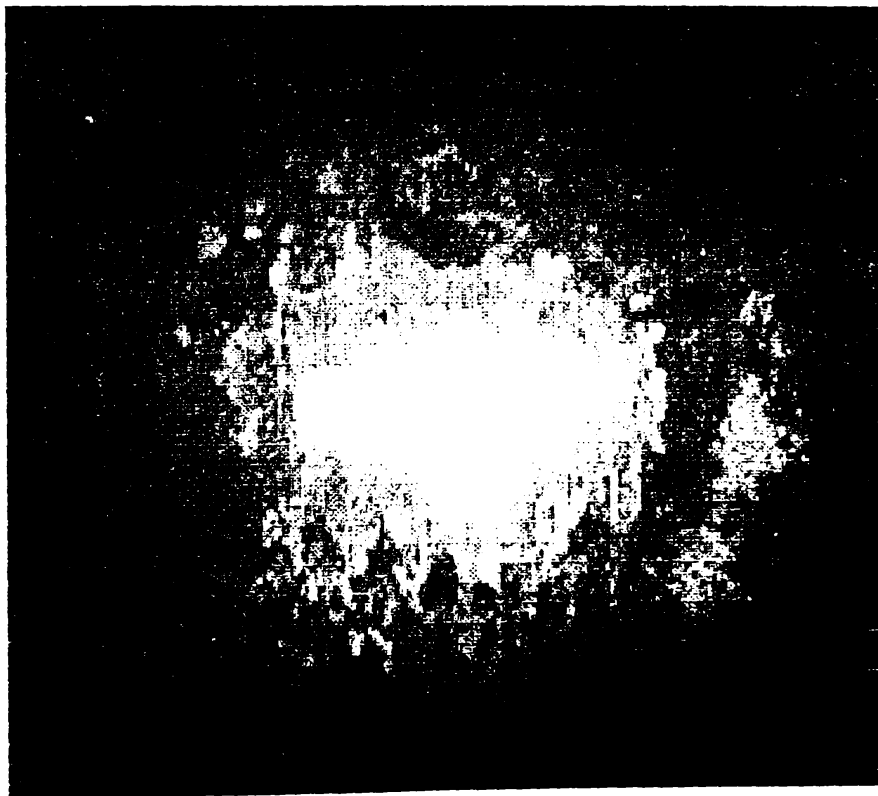


Fig. 3.30 Imagine de microscopie optică (x 25) a suprafeței supuse la uzare de fretting: epruvetă erodată E2/1,  $D = 50 \mu\text{m}$ ,  $F_n = 80 \text{ daN}$ ,  $f = 5 \text{ Hz}$

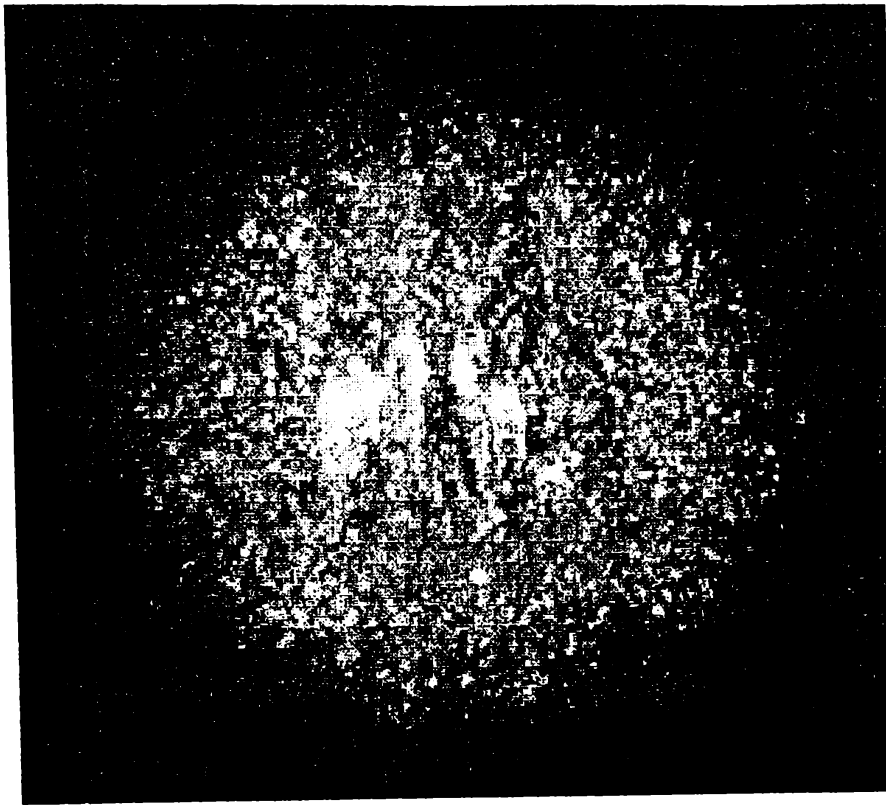


Fig. 3.31 Imagine de microscopie optică (x 25) a suprafeței supuse la uzare de fretting: epruvetă erodată E1/2,  $D = 10 \mu\text{m}$ ,  $F_n = 20 \text{ daN}$ ,  $f = 5 \text{ Hz}$

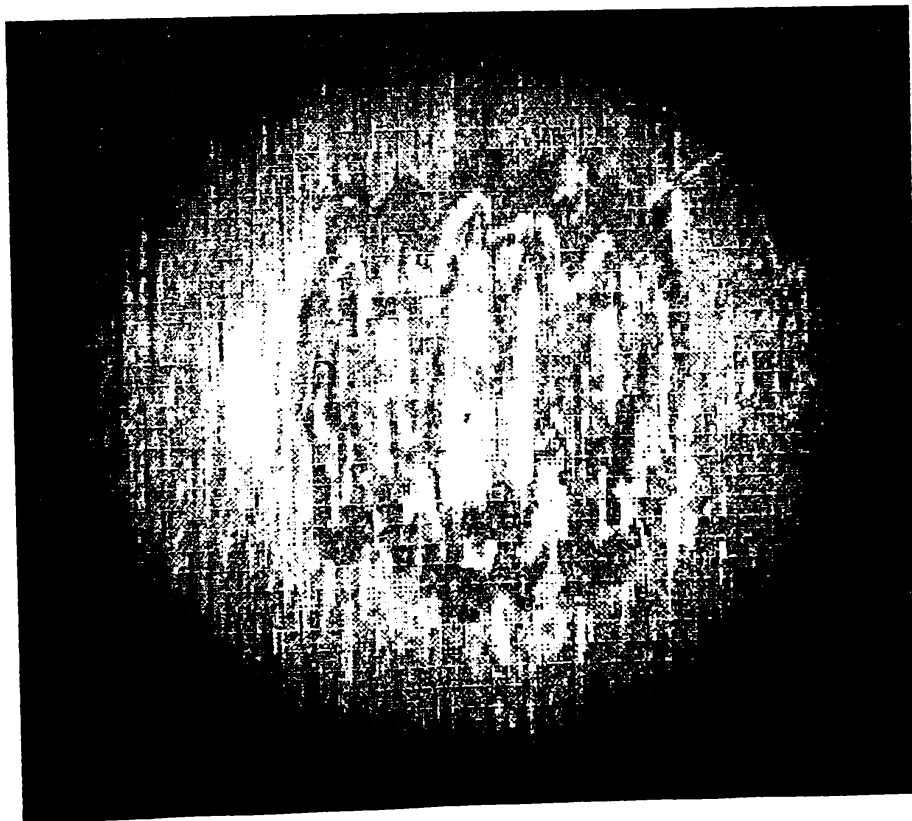


Fig. 3.32 Imagine de microscopie optică (x 25) a suprafeței supuse la uzare de fretting: epruvetă rectificată R2/2,  $D = 10 \mu\text{m}$ ,  $F_n = 80 \text{ daN}$ ,  $f = 5 \text{ Hz}$



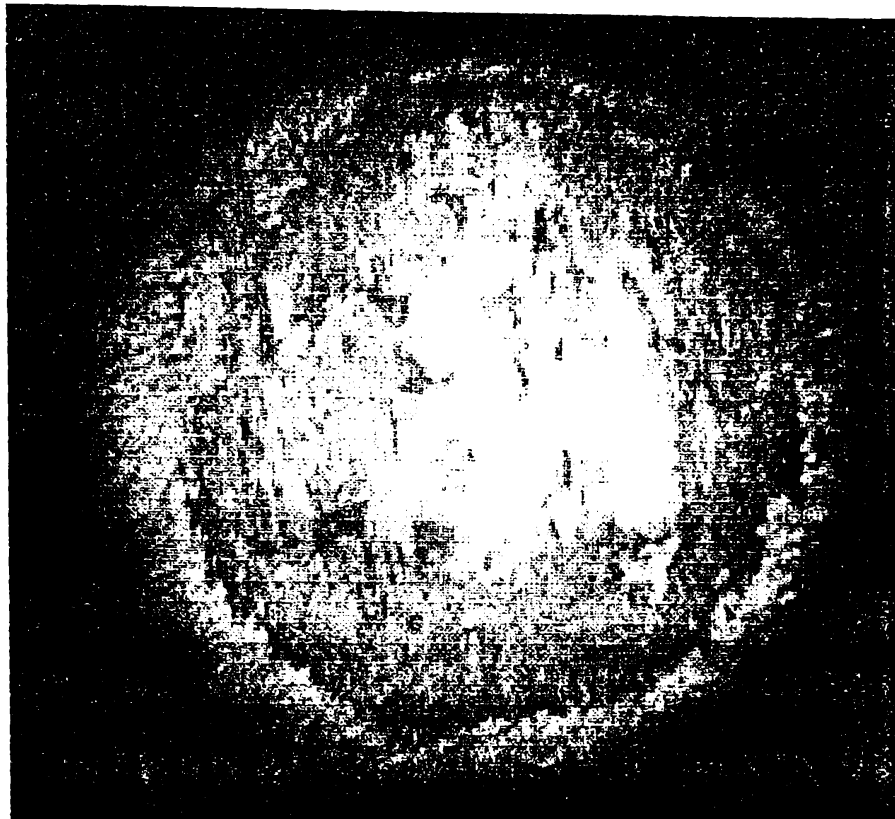


Fig. 3.33 Imagine de microscopie optică (x 25) a suprafeței supuse la uzare de fretting: epruvetă rectificată R2/3,  $D = 50 \mu\text{m}$ ,  $F_n = 80 \text{ daN}$ ,  $f = 5 \text{ Hz}$

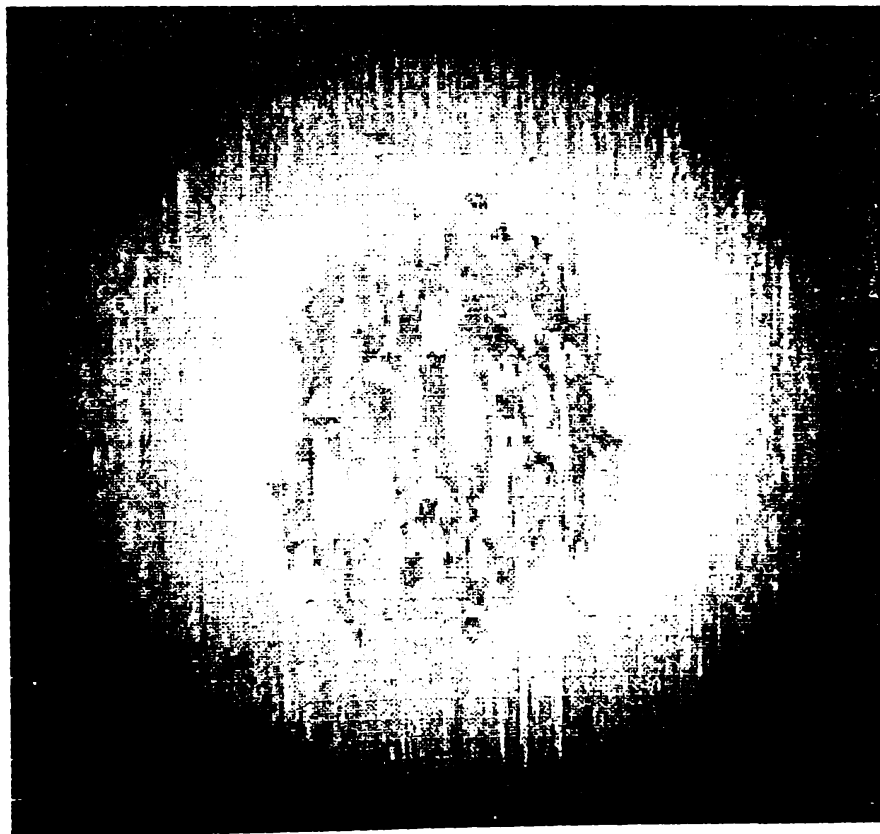


Fig. 3.34 Imagine de microscopie optică (x 25) a suprafeței supuse la uzare de fretting: epruvetă rectificată R1/2,  $D = 10 \mu\text{m}$ ,  $F_n = 20 \text{ daN}$ ,  $f = 5 \text{ Hz}$

### 3.3.3.3 Modele empirice ale criteriilor de tranziție dintre regimurile de alunecare parțială-alunecare totală în condițiile uzării de fretting

Metodologia modelării empirice regresionale, prezentată în §3.3.1 și aplicată în §3.3.3.2 s-a finalizat într-o primă etapă, prin determinarea și validarea statistică a coeficienților de regresie din modelele polinomiale ale criteriilor de tranziție A-“energie” și B-“deschidere”.

Pe această bază, cu ajutorul aceluiași program STATGRAPHICS, a devenit posibilă construirea și reprezentarea grafică a suprafețelor de răspuns corespunzătoare acestor modele pentru cei mai importanți factori de influență  $D$  și  $F_n$ , în valori naturale, după cum urmează: în figurile 3.21, 3.22, 3.23 și 3.24, pentru criteriul de tranziție A-“energie” și respectiv, în figurile 3.25, 3.26, 3.27, 3.28 pentru criteriul de tranziție B-“deschidere”.

Din examinarea suprafețelor de răspuns asociate încercării de uzare de fretting a suprafețelor cu rugozitate izotropă (fig. 3.35, 3.36, 3.39, 3.40) se observă că valorile minime ale ambelor criterii de tranziție se obțin, în condiții date, pentru amplitudini  $D$  mici și forțe  $F_n$  mari. În același timp, valorile cele mai ridicate ale acestor criterii se realizează pentru amplitudini  $D$  maxime și forțe  $F_n$  minime, influența acestui de-al doilea factor fiind tot mai scăzută pe măsura creșterii lui  $D$ . La creșterea numărului de cicluri  $N$  de la 100 la 10000 curbura suprafețelor de răspuns se amplifică.

Analiza suprafețelor de răspuns asociate încercărilor de uzare de fretting a unor suprafețe cu rugozitate anizotropă (fig. 3.37, 3.38, 3.41, 3.42) confirmă, și pentru acest caz, valabilitatea principială a legăților enunțate anterior. Cu toate acestea, forma și poziția spațială a suprafețelor de răspuns, în condiții date, sunt semnificativ diferite pentru suprafețe cu rugozitate izotropă și anizotropă, mai ales la  $N = 100$  cicluri de solicitare.



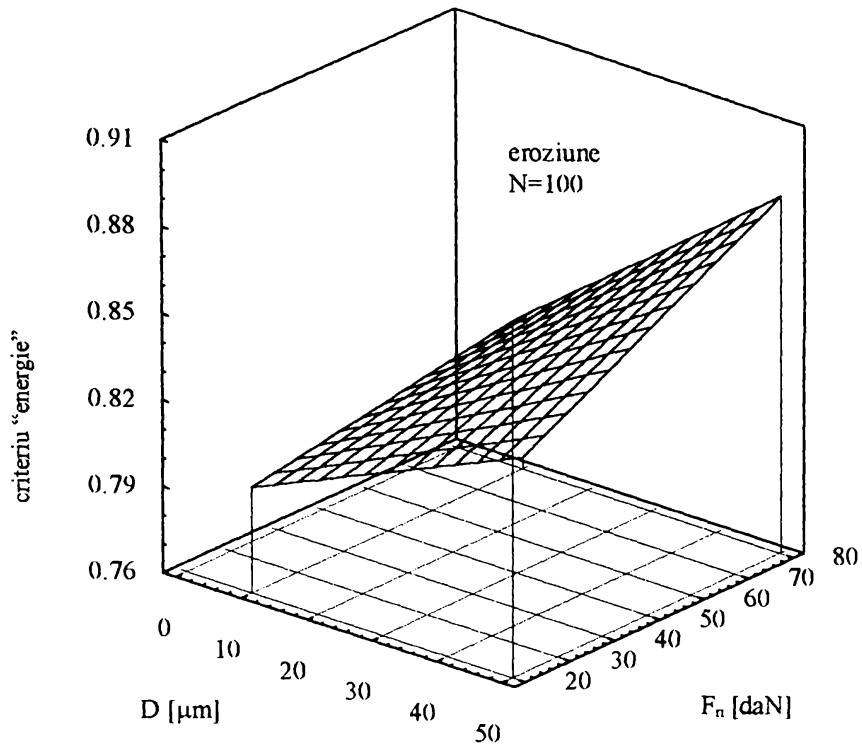


Fig. 3.35 Suprafață de răspuns corespunzătoare modelului empiric al criteriului A – “energie”

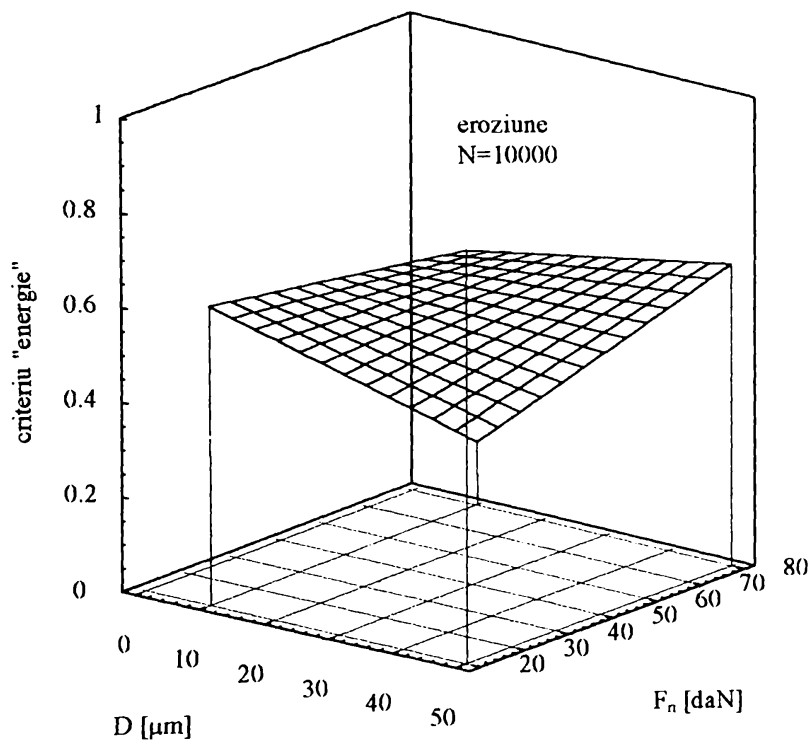


Fig. 3.36 Suprafață de răspuns corespunzătoare modelului empiric al criteriului A – “energie”

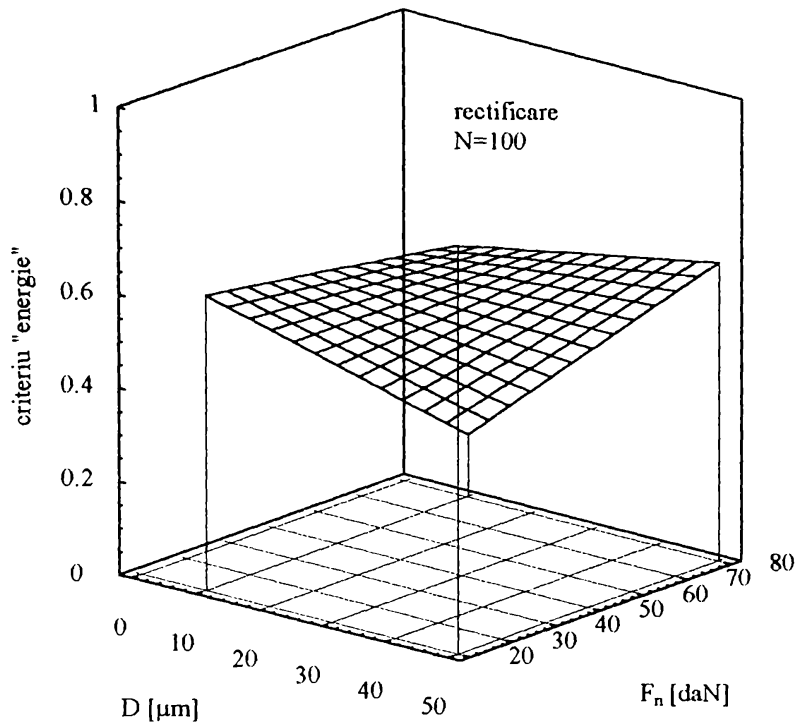


Fig. 3.37 Suprafață de răspuns corespunzătoare modelului empiric al criteriului A – "energie"

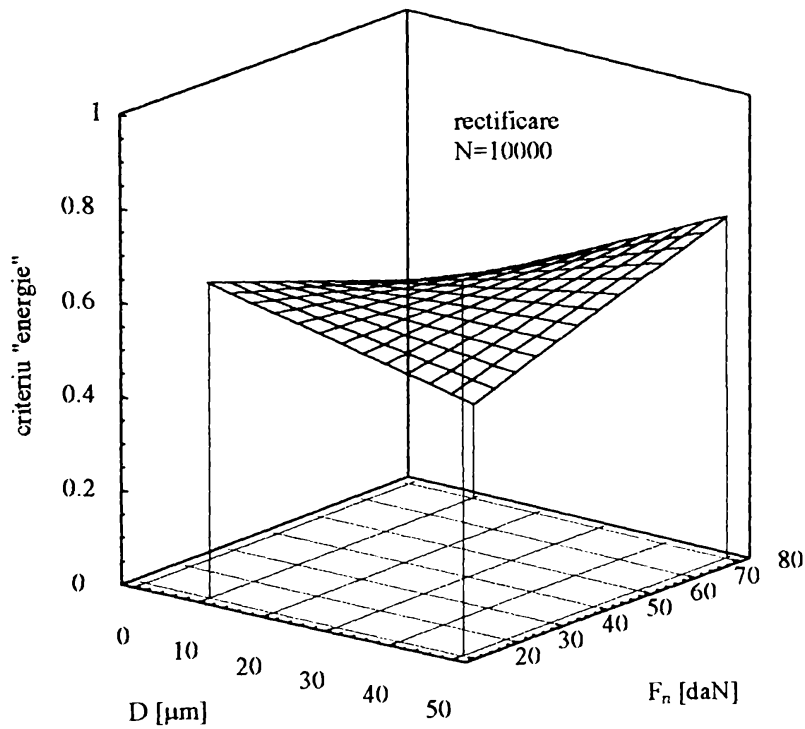


Fig. 3.38 Suprafață de răspuns corespunzătoare modelului empiric al criteriului A – "energie"

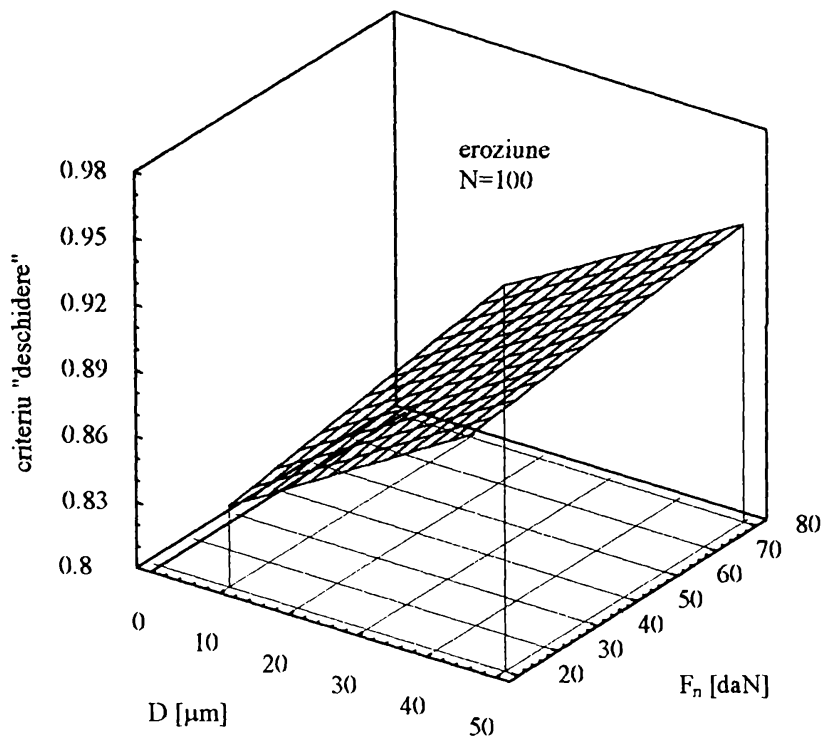


Fig. 3.39 Suprafață de răspuns corespunzătoare modelului empiric al criteriului B – "deschidere"

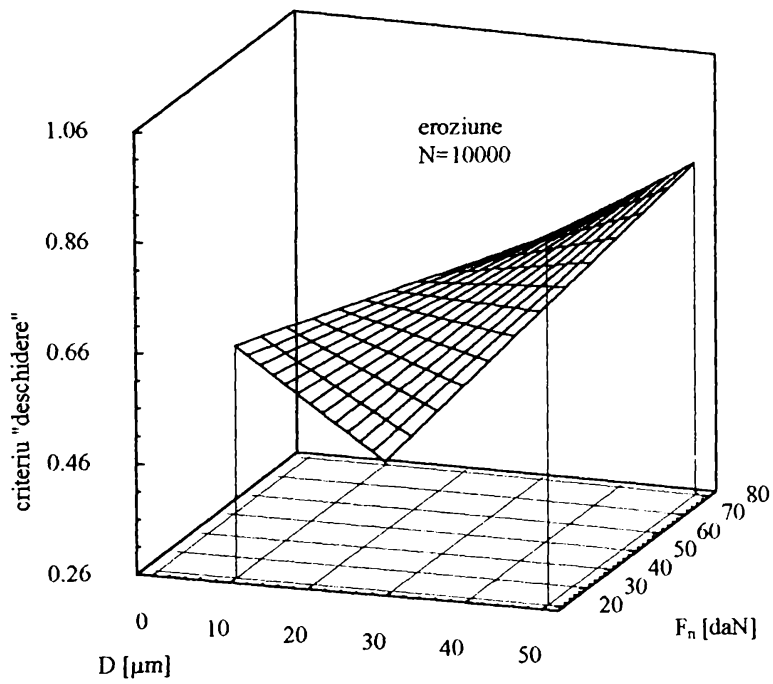


Fig. 3.40 Suprafață de răspuns corespunzătoare modelului empiric al criteriului B – "deschidere"

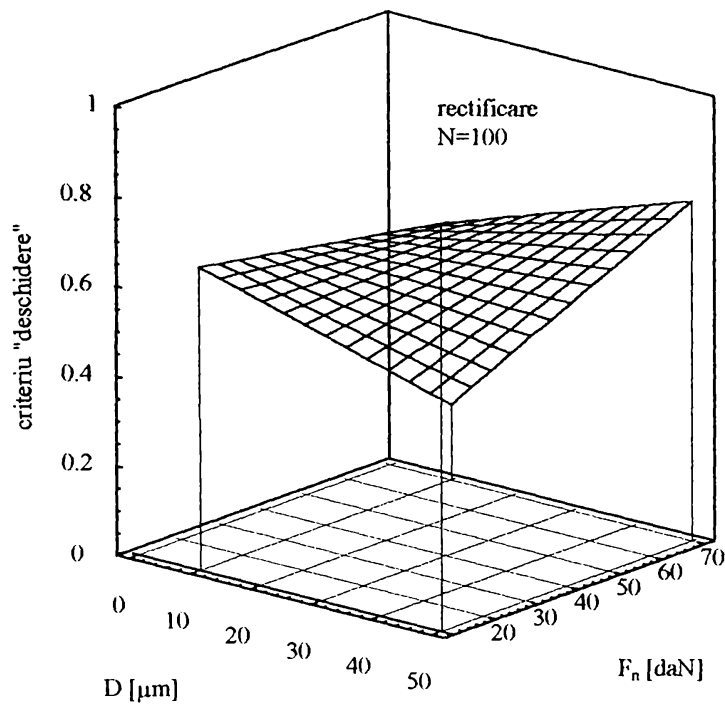


Fig.3.41 Suprafață de răspuns corespunzătoare modelului empiric al criteriului B – "deschidere"

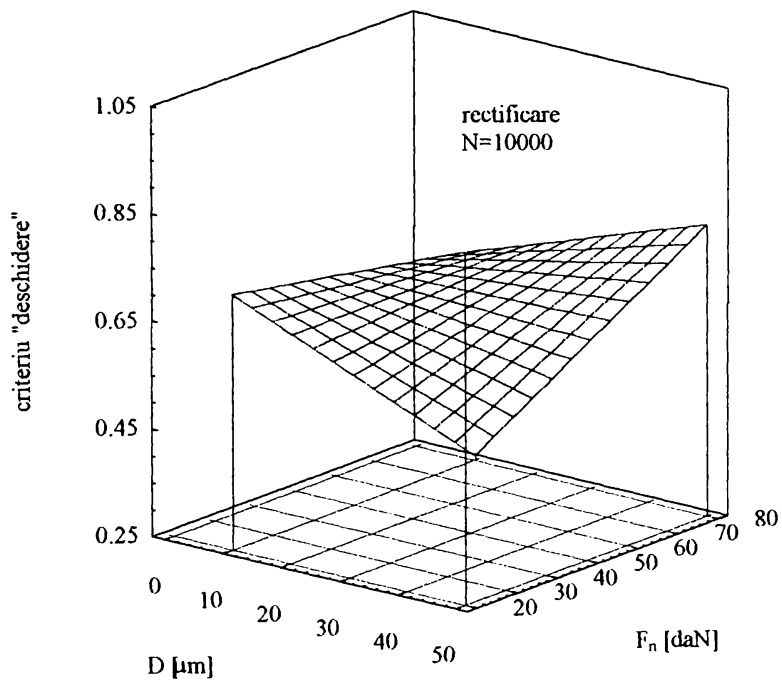


Fig. 3.42 Suprafață de răspuns corespunzătoare modelului empiric al criteriului B – "deschidere"

### 3.3.3.4 Hărțile solicitărilor locale în condițiile uzării de fretting

La modul general (vezi §2.2.6.3), hărțile solicitărilor locale (HSL) definesc domeniile de separație/tranziție dintre regimurile de solicitare de alunecare parțială, mixt și alunecare totală asociate proceselor de fretting.

În condițiile de încercare investigate, aplicarea metodei experimentului factorial și reprezentarea, pe această bază, a suprafețelor de răspuns corespunzătoare criteriilor de tranziție A – “energie” și B – “deschidere”, oferă o posibilitate inedită de construcție a acestor hărți. Aceasta constă în secționarea suprafețelor de răspuns sus-amintite cu plane orizontale de  $Y = 0,2$  pentru criteriul A și respectiv  $Y = 0,26$  pentru criteriul B.

Întrucât condițiile de experimentare au fost dirijate către regimul de alunecare totală, cel mai important din punct de vedere tribologic, au putut fi construite pe această cale exclusiv hărțile solicitărilor locale reprezentate în figura 3.43 (pentru criteriul A) și figura 3.44 (pentru criteriul B), ambele reflectând proximitatea încercărilor pe epruvetele E1/1 și E3/1 și respectiv în figura 3.45 (criteriul A) și figura 3.46 (criteriul B), în condiții apropiate de încercarea epruvetelor R 2/2 și R 3/1.

Posibilitatea evaluării rapide a perechii de valori  $D - F_n$ , care definesc în condiții date, un anumit regim de solicitare locală la fretting, a fost probată prin construirea unei hărți “complete” a solicitărilor locale (figura 3.47, poz. 1), care include domenii caracteristice de lipire, alunecarea parțială și alunecare totală. Pentru aceasta a fost necesară și suficientă efectuarea unei încercări de uzare la fretting suplimentare, în punctul de coordonate  $D = 6 \mu\text{m}$  și  $F_n = 90 \text{ daN}$ , pentru  $f = 5 \text{ Hz}$ , stabilit pe baza rezultatelor prezentate anterior. În aceeași figură (3.47, poz. 2), a fost reprezentat și “trunchiul de frecare”, de configurație particulară, asociat acestei hărți.

Câteva observații finale sunt absolut necesare:

- utilizarea metodei experimentului factorial a permis construcția hărților solicitărilor locale cu un număr semnificativ mai redus de încercări decât uzual;
- hărțile corespunzătoare celor două criterii de tranziție: A (fig. 3.43 și 3.45), respectiv (fig. 3.44 și 3.46) sunt practic identice, ceea ce confirmă, în domeniul analizat, echivalența celor două criterii cantitative;
- în fine, în condițiile date, tranziția de la regimul de alunecare parțială la regimul de alunecare totală are loc, pentru probele erodate, la valori relativ mai mari ale amplitudinii deplasărilor  $D$  decât la probele rectificate.

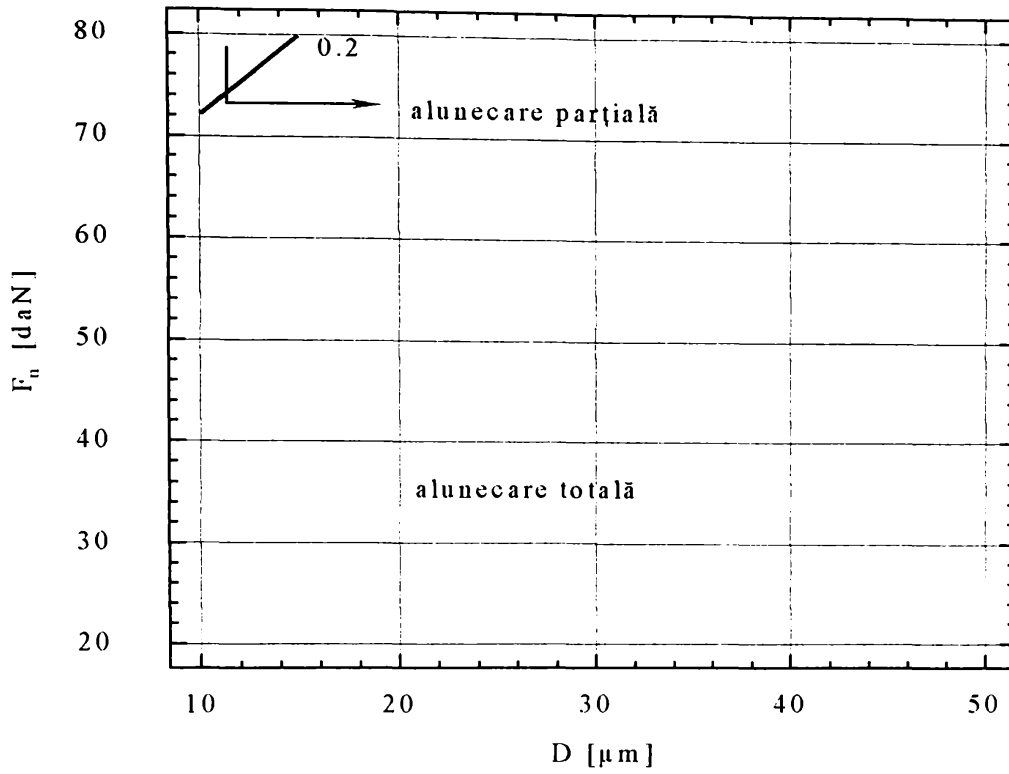


Fig. 3.43 Harta solicitărilor locale - criteriul A, epruveta erodată

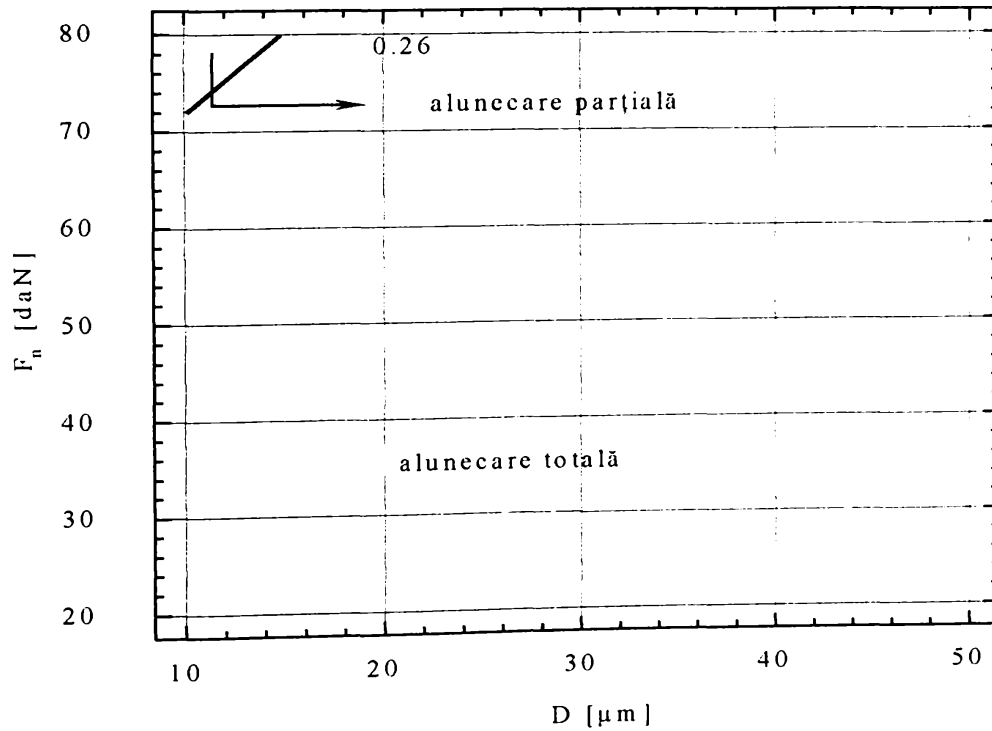


Fig. 3.44 Harta solicitărilor locale - criteriul B, epruveta erodată

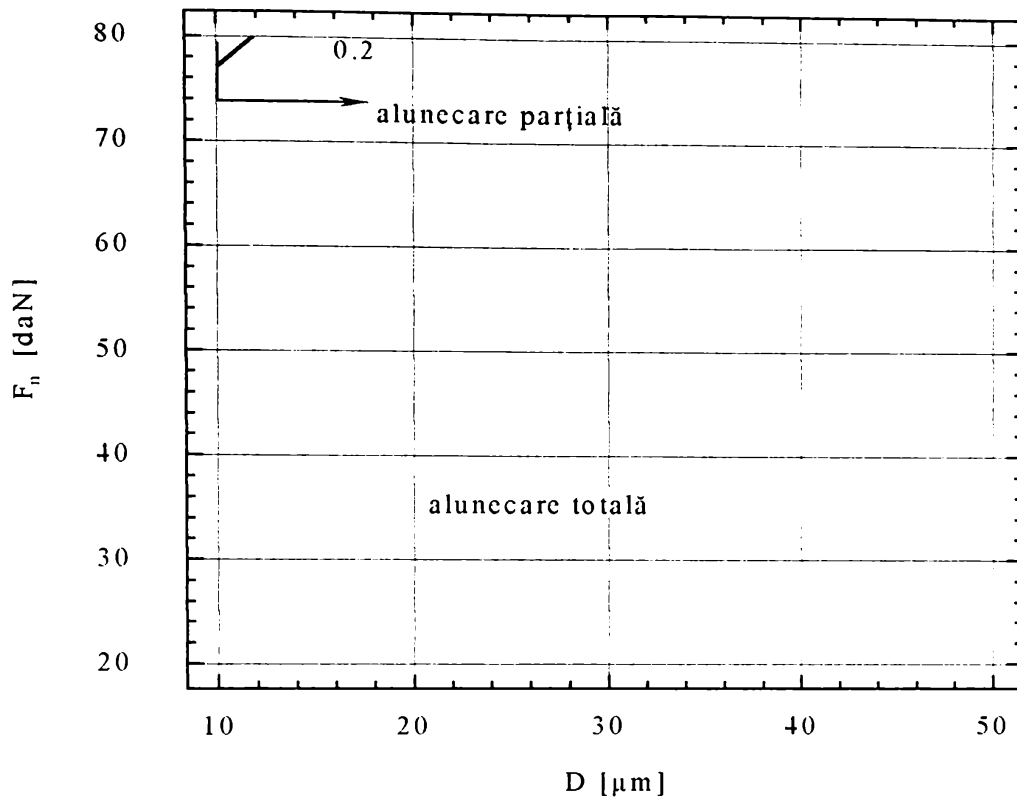


Fig. 3.45 Harta solicitărilor locale - criteriul A, epruveta rectificată

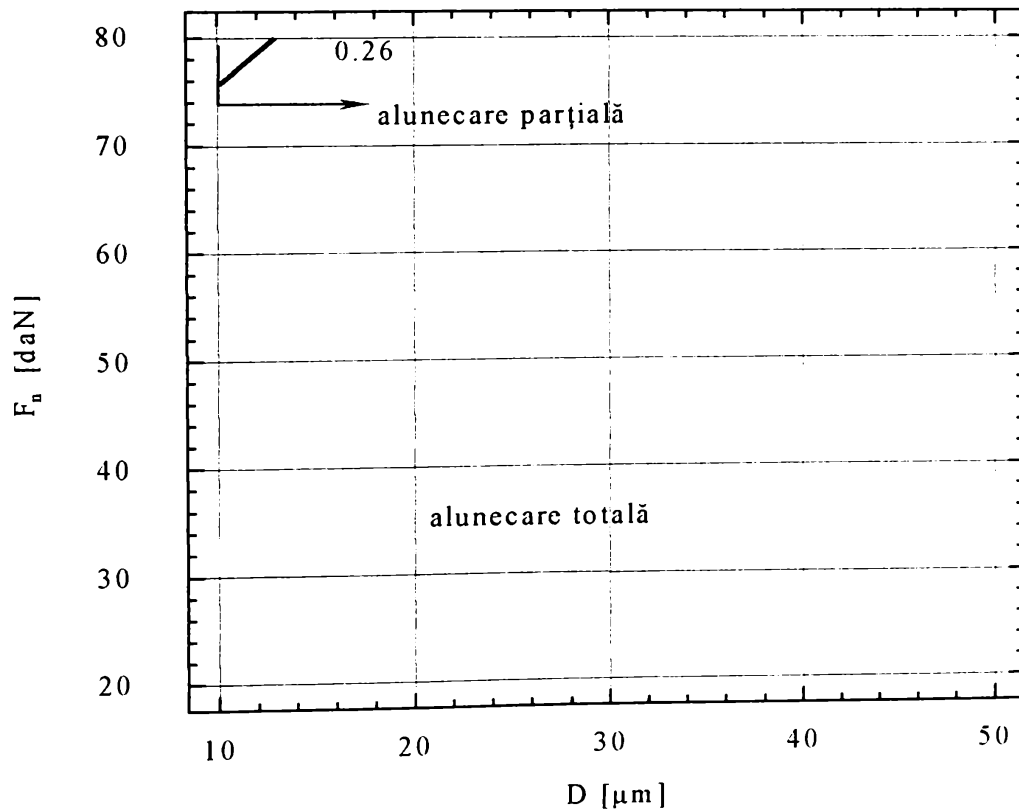
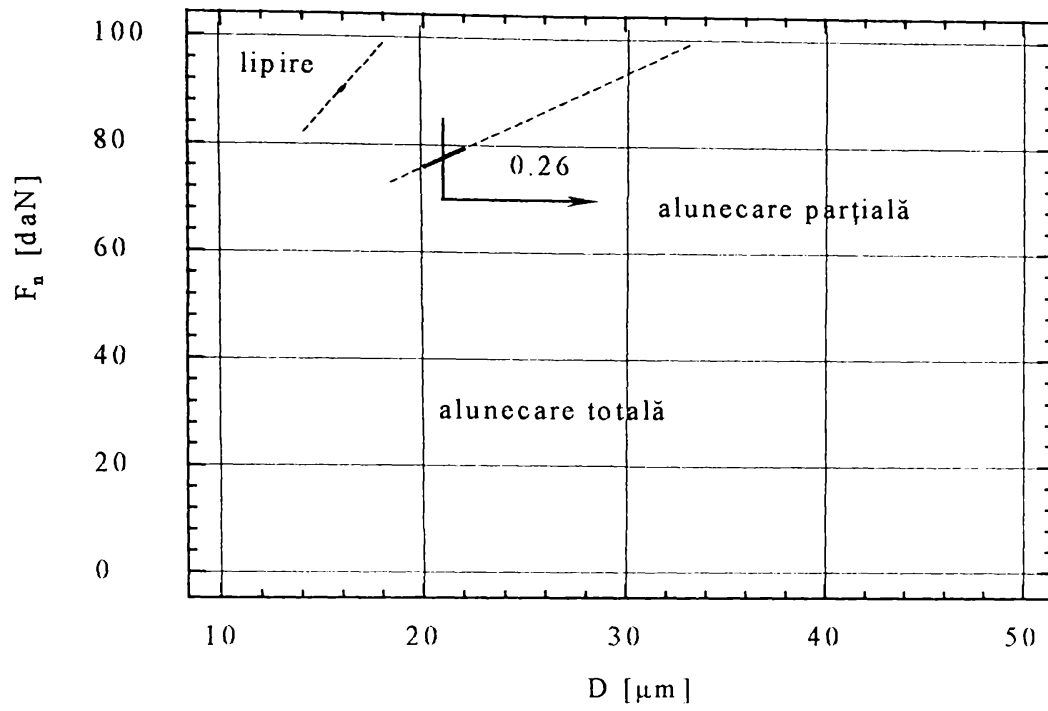
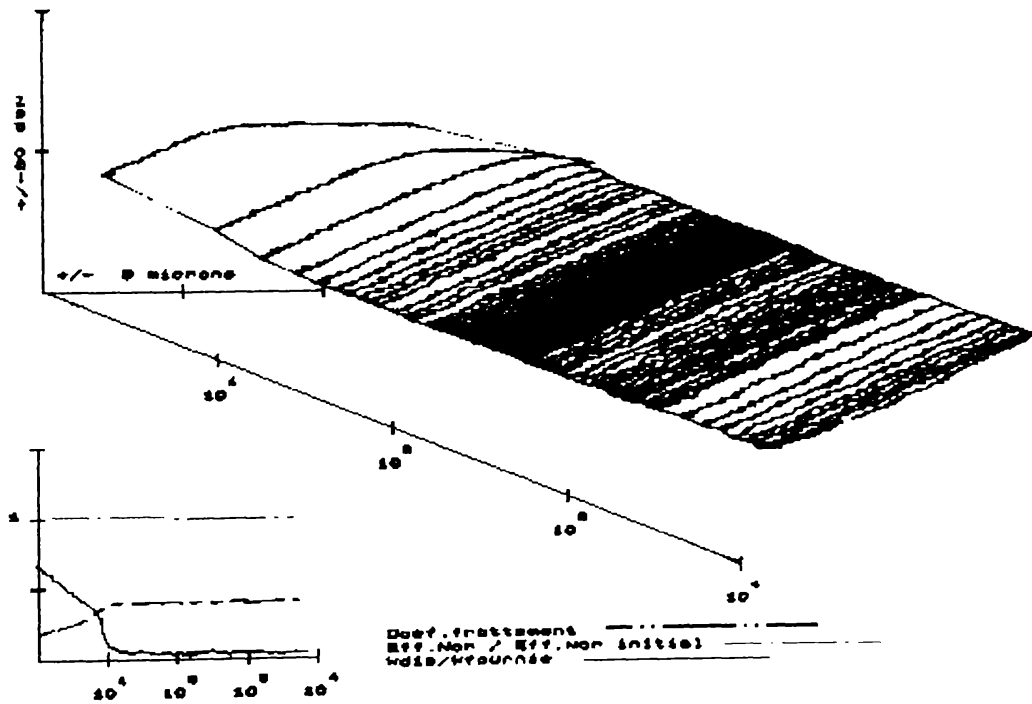


Fig. 3.46 Harta solicitărilor locale - criteriul B, epruveta rectificată



1)



2)

Fig. 3.47 Harta "completă" a solicitărilor locale – criteriul B - (1) și "trunchiul de frecare" asociat (2)



### 3.3.3.5 Cinetica și morfologia proceselor de uzare de fretting

Evoluția în timp a proceselor de uzare de fretting poate fi cel mai bine pusă în evidență cu ajutorul “trunchiurilor de frecare”, reprezentări tridimensionale integrate ale mulțimii ciclurilor succesive de solicitare forță – deplasare dezvoltate pe parcursul unei încercări de fretting (vezi §2.2.6.2).

Ținând seama de aceasta, pentru toate încercările de uzare de fretting, efectuate conform programului experimental prezentat în tabelul 3.10, au fost reprezentate și înregistrate în timp real “trunchiurile de frecare” aferente, iar pentru un număr dat de cicluri ( $N = 100; 10000; 50000$  și  $260000$ ) și ciclurile individuale corespunzătoare.

O imagine sintetică, definitorie și reprezentativă pentru mulțimea încercărilor de uzare de fretting efectuate este oferită în tabelele 3.13 (eprovete cu suprafețe erodate – rugozitate izotropă) și respectiv 3.14 (eprovete cu suprafețe rectificatice – rugozitate anizotropă).

În continuare sunt reprezentate toate “trunchiurile de frecare” rezultate din programul experimental realizat și anume în figurile 3.48...3.57 pentru epruvetele erodate și în figurile 3.58...3.67 pentru epruvetele rectificatice.

În partea stângă jos a figurilor conținând “trunchiurile de frecare” sunt înregistrate diagramele de variație ale criteriului de tranziție  $A$  și coeficientul de frecare  $\mu$  cu numărul de cicluri de solicitare  $N$ , diagrame reproduse informativ și în tabelele 3.13 și respectiv 3.14.

Este important de observat că, în toate încercările efectuate, condițiile inițiale de solicitare au corespuns regimului de solicitare locală de alunecare totală. Acest fapt este indicat de valorile criteriului  $A > 0.2$  corespunzătoare.

Pe parcursul încercărilor, în majoritatea cazurilor (cu excepția experimentelor având numărul curent 3 și 7 și epruvetele E1/1, E3/1, R2/2, R3/1, tabelul 3.10) regimul de alunecare totală a fost conservat până la sfârșitul încercărilor respective. În consecință, trunchiurile de frecare asociate au prezentat configurația specifică acestui regim de solicitare (vezi fig. 2.4, respectiv 2.5 poz.3), determinată de condițiile  $D$  și  $F_n$  ale încercării și de numărul de cicluri de solicitare considerat.

TABELUL 3.13 Caracteristici ale "trunchiurilor de frecare" – epruvete erodate

Nr.crt.	Simbol epruvetă	D [ $\mu\text{m}$ ]	$F_n$ [daN]	f [ $\text{Hz}$ ]	N	Figura	$A, \mu = f(N)$	Regim de solicitare
1.	E1/2	10	20	5	10000	3.33		alunecare totală
2.	E2/2	50	20	5	10000	3.34		alunecare totală
3.	E1/1	10	80	5	10000	3.35		mixt
4.	E2/1	50	80	5	10000	3.36		alunecare totală
5.	E3/2	10	20	10	10000	3.37		alunecare totală
6.	E4/2	50	20	10	10000	3.38		alunecare totală
7.	E3/1	10	80	10	10000	3.39		mixt
8.	E5/2	50	80	10	10000	3.40		alunecare totală

TABELUL. 3.14 Caracteristici ale "trunchiurilor de frecare" – epruvete rectificat

Nr.crt.	Simbol epruvetă	D [μm]	F <sub>n</sub> [daN]	f [Hz]	N	Figura	A, μ = f(N)	Regim de solicitare
1.	R1/2	10	20	5	10000	3.43		alunecare totală
2.	R1/4	50	20	5	10000	3.44		alunecare totală
3.	R2/2	10	80	5	10000	3.45		mixt
4.	R2/3	50	80	5	10000	3.46		alunecare totală
5.	R3/2	10	20	10	10000	3.47		alunecare totală
6.	R3/4	50	20	10	10000	3.48		alunecare totală
7.	R3/1	10	80	10	10000	3.49		mixt
8.	R3/3	50	80	10	10000	3.50		alunecare totală

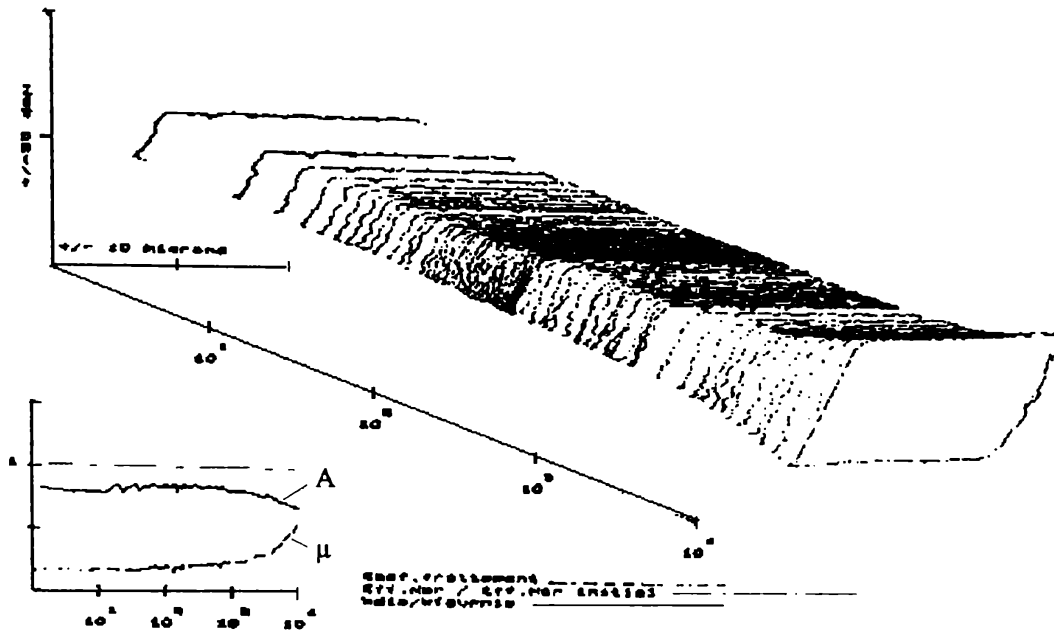


Fig. 3.48 “Trunchi de frecare” pentru regim de solicitare de alunecare totală, suprafață cu rugozitate izotropă, epruvetă E1/2

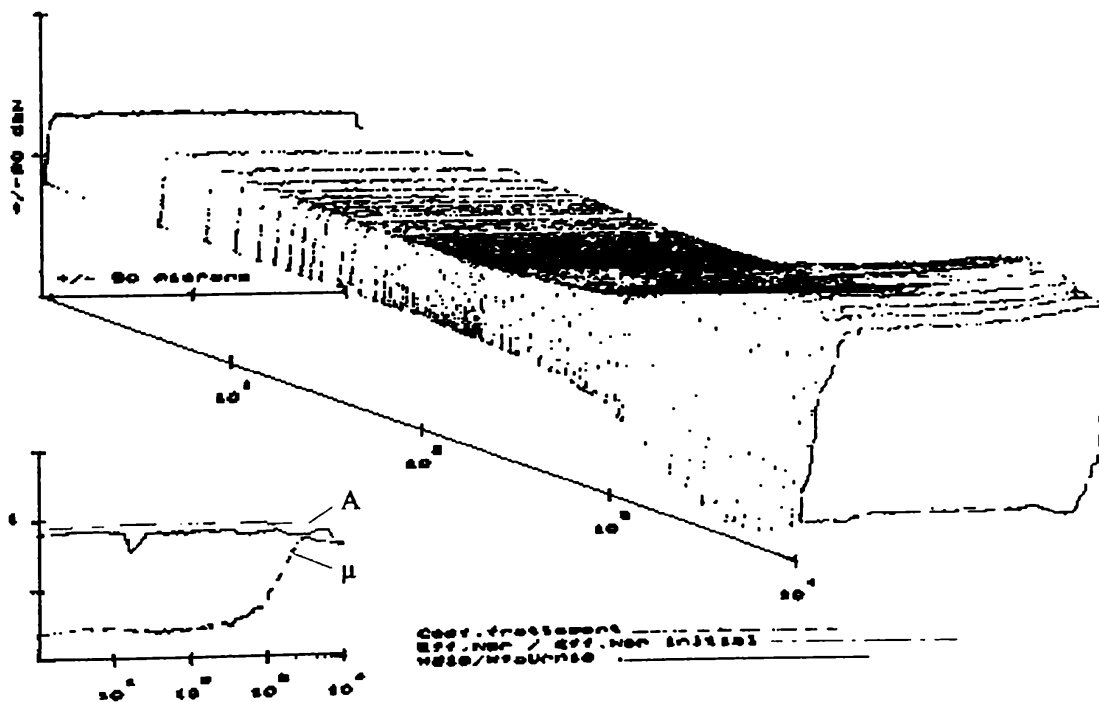


Fig. 3.49 “Trunchi de frecare” pentru regim de solicitare de alunecare totală, suprafață cu rugozitate izotropă, epruvetă E2/2

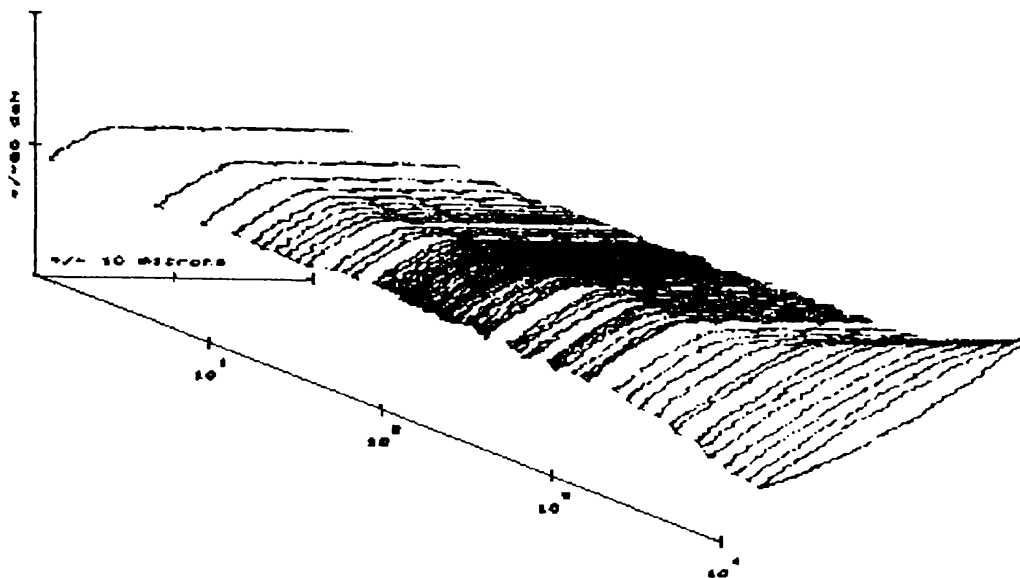


Fig. 3.50 “Trunchi de frecare” pentru regim de sollicitare mixt, suprafață cu rugozitate izotropă, epruvetă E1/1

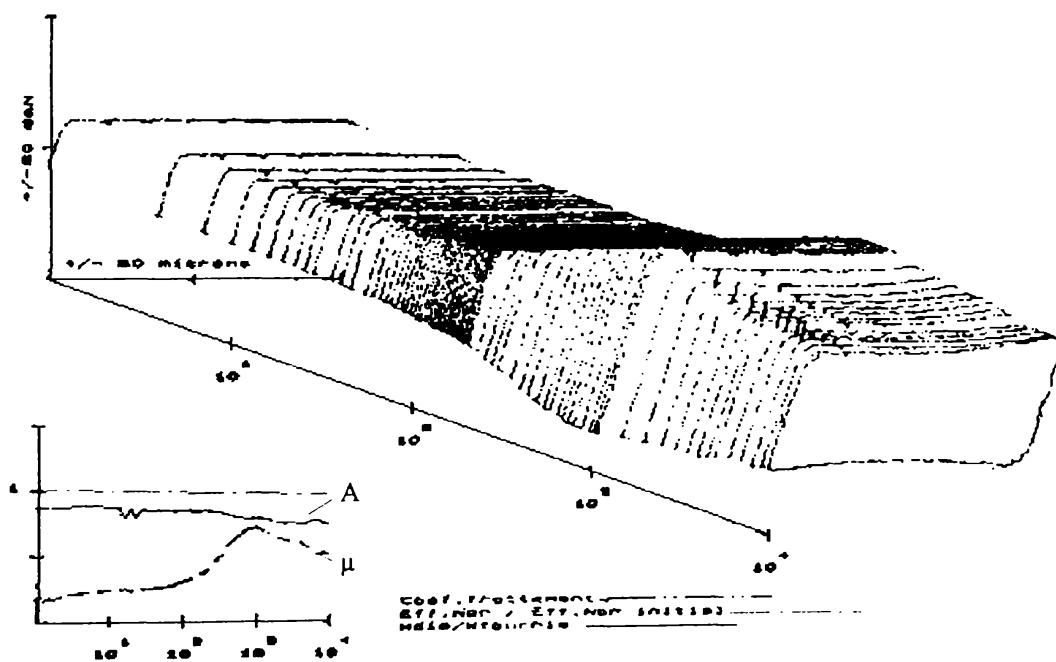


Fig. 3.51 “Trunchi de frecare” pentru regim de sollicitare de alunecare totală, suprafață cu rugozitate izotropă, epruvetă E2/1

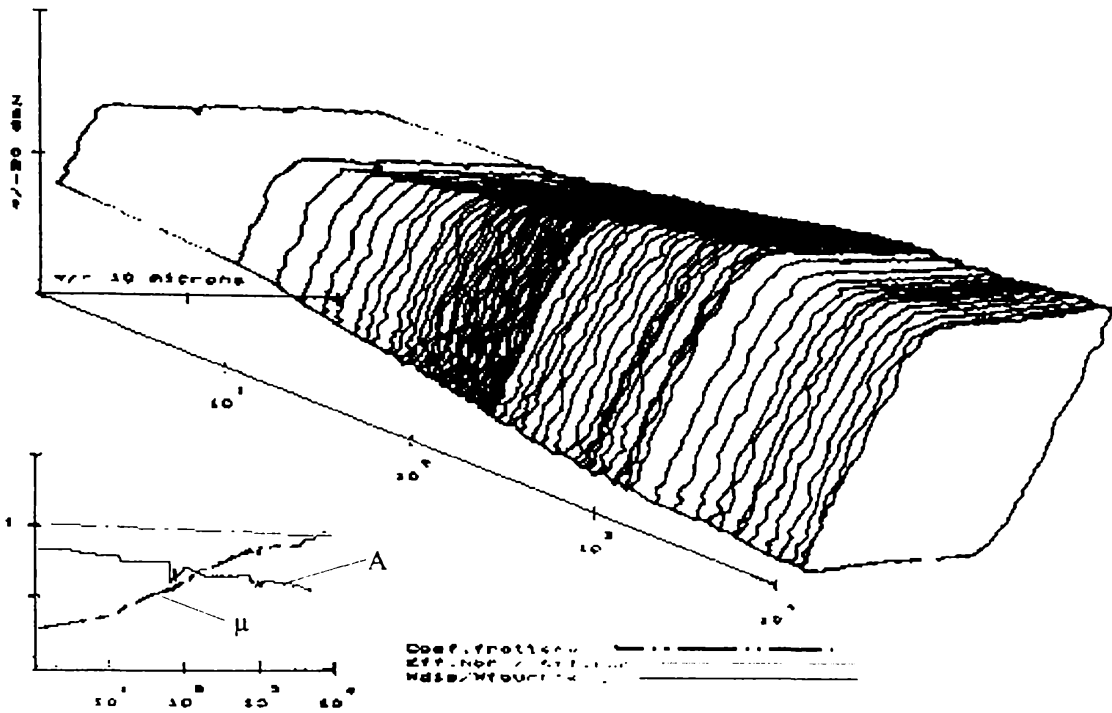


Fig. 3.52 “Trunchi de frecare” pentru regim de solicitare de alunecare totală, suprafață cu rugozitate izotropă, epruvetă E3/2

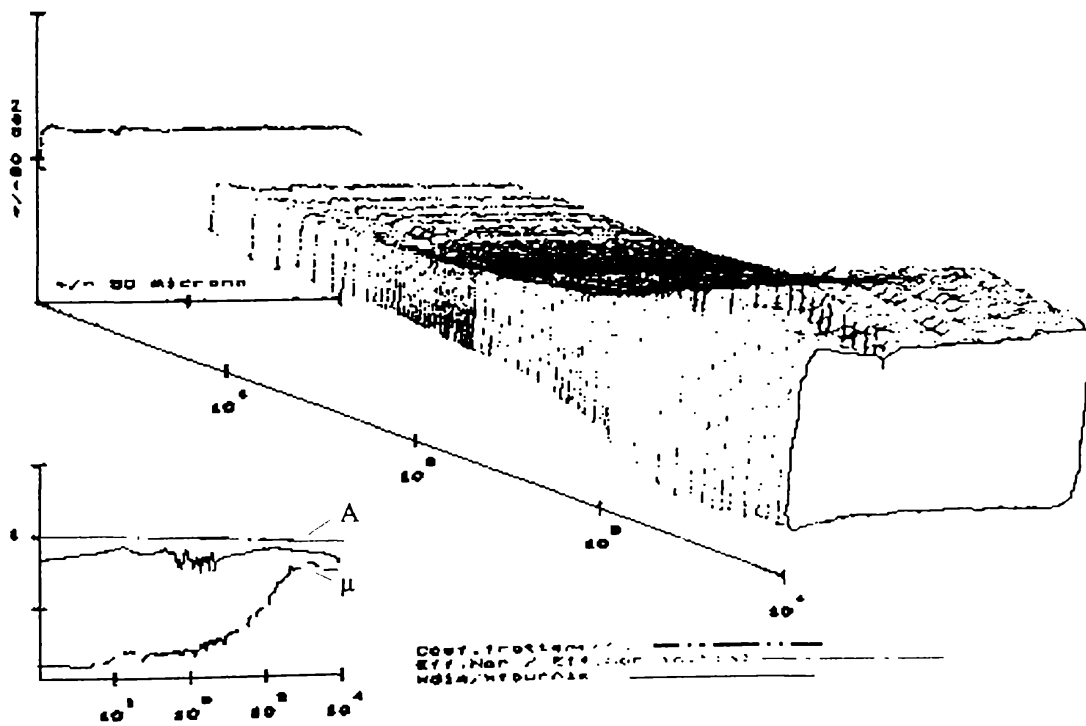


Fig. 3.53 “Trunchi de frecare” pentru regim de solicitare de alunecare totală, suprafață cu rugozitate izotropă, epruvetă E4/2

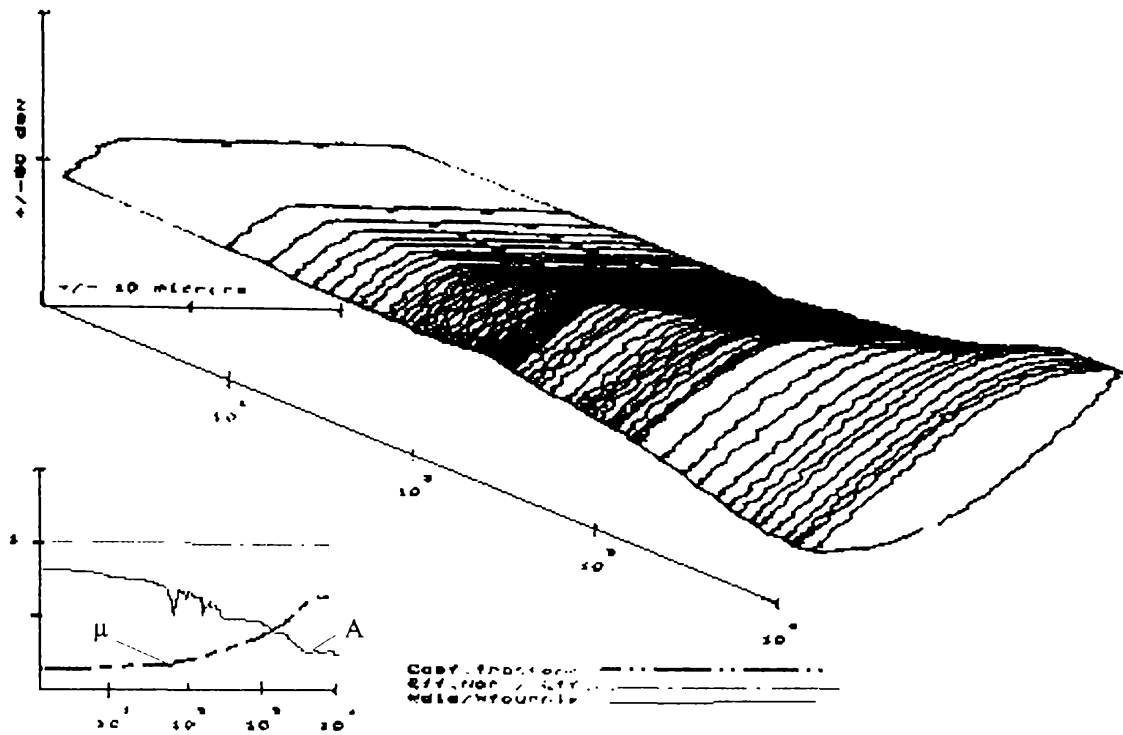


Fig. 3.54 "Trunchi de frecare" pentru regim de solicitare mixt, suprafață cu rugozitate izotropă, epruvetă E3/1

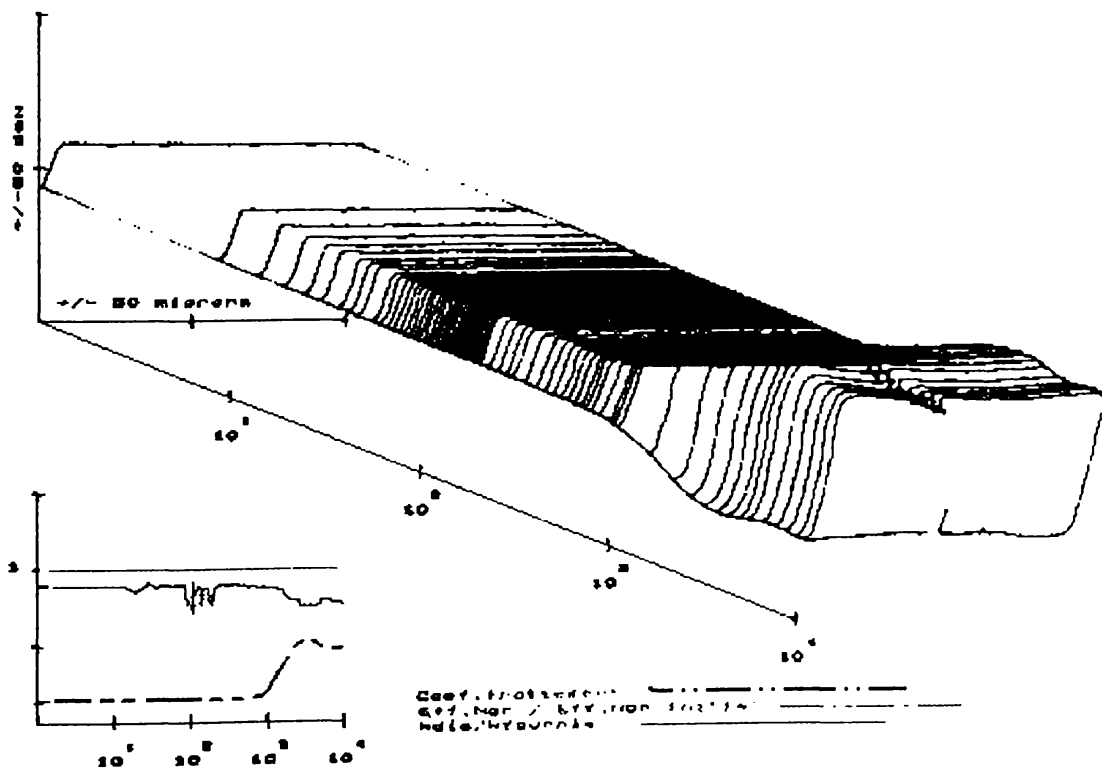


Fig. 3.55 "Trunchi de frecare" pentru regim de solicitare de alunecare totală, suprafață cu rugozitate izotropă, epruvetă E5/2

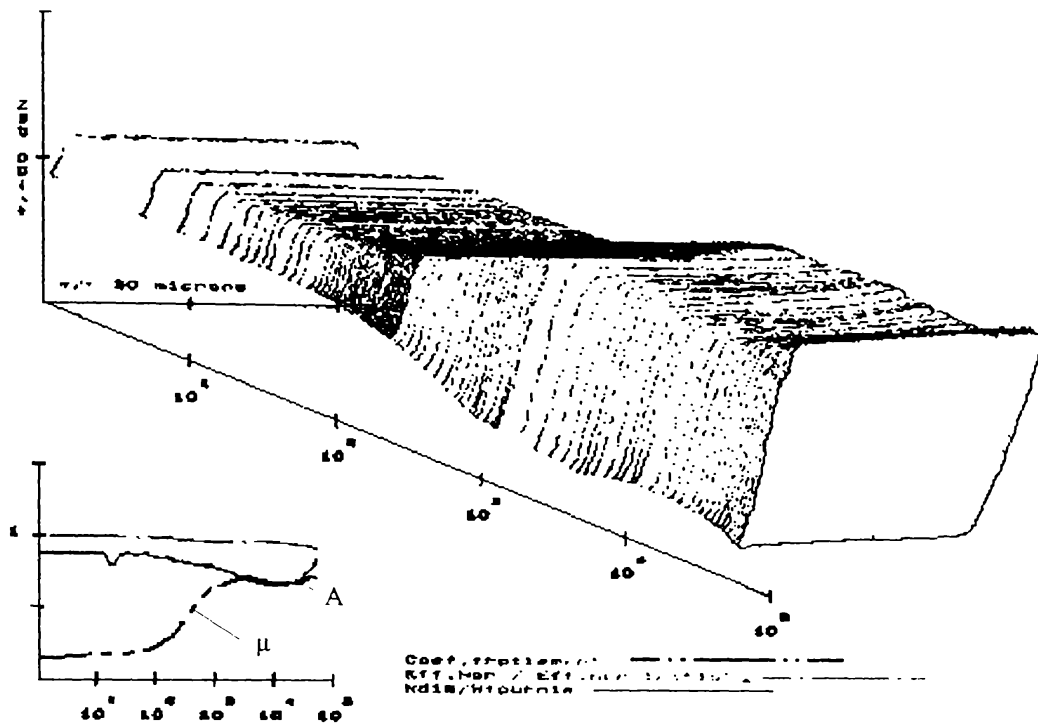


Fig. 3.56 "Trunchi de frecare" pentru regim de solicitare de alunecare totală, suprafață cu rugozitate izotropă, epruvetă E4/1

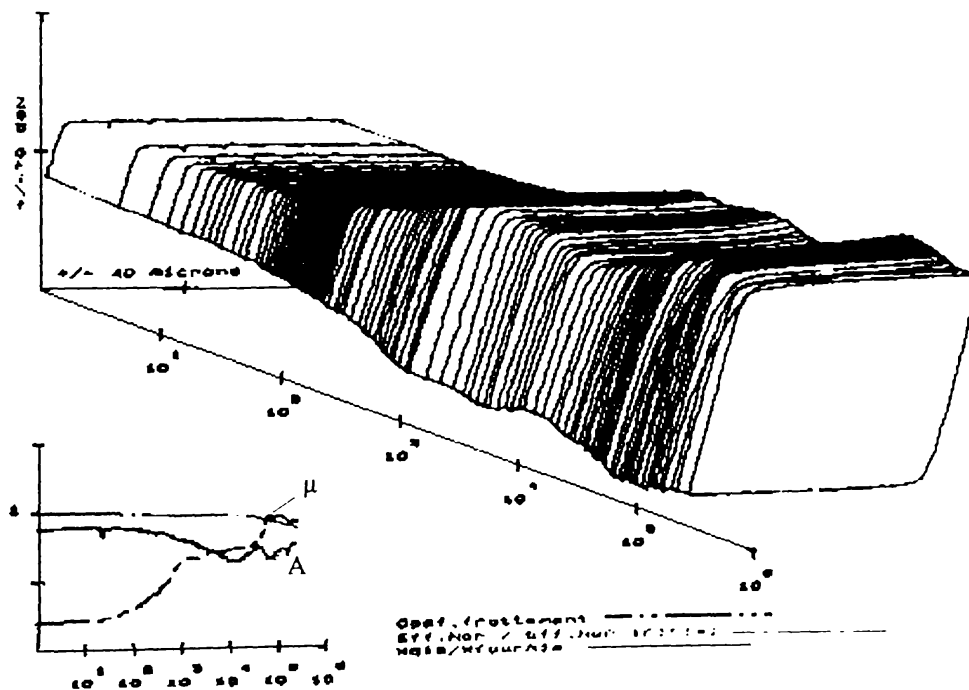


Fig. 3.57 "Trunchi de frecare" pentru regim de solicitare de alunecare totală, suprafață cu rugozitate izotropă, epruvetă E1/2



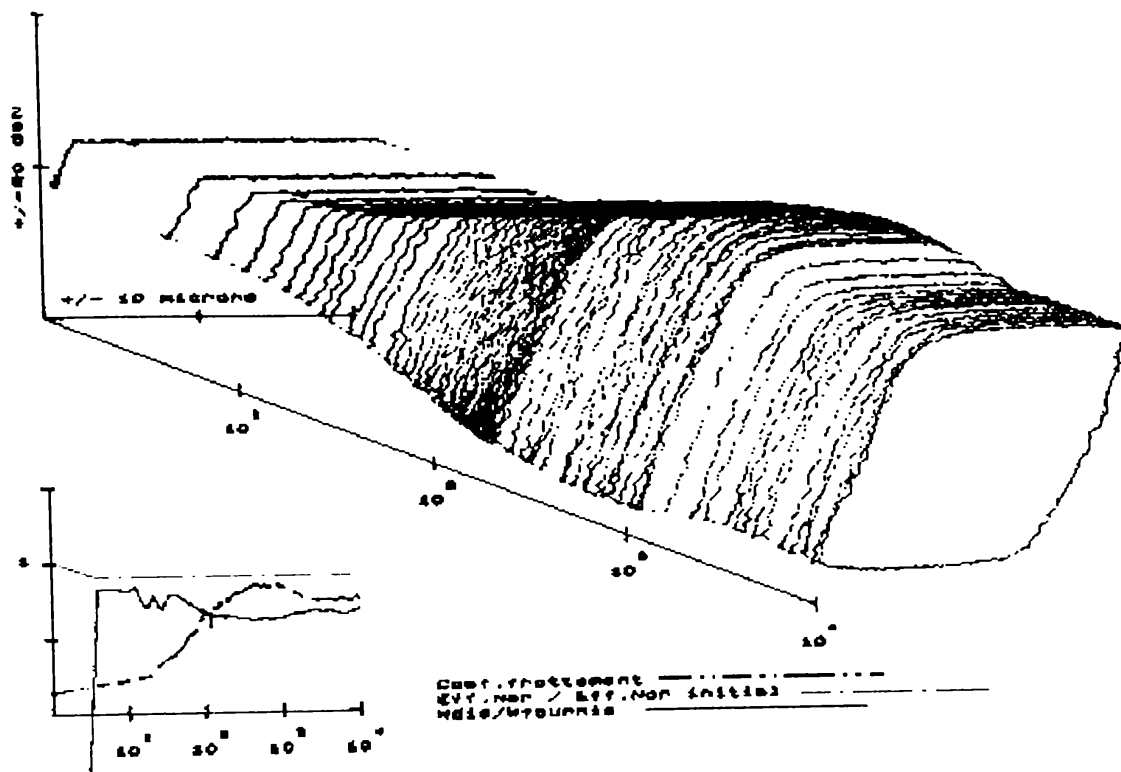


Fig. 3.58 “Trunchi de frecare” pentru regim de solicitare de alunecare totală, suprafață cu rugozitate anizotropă, epruvetă R1/2

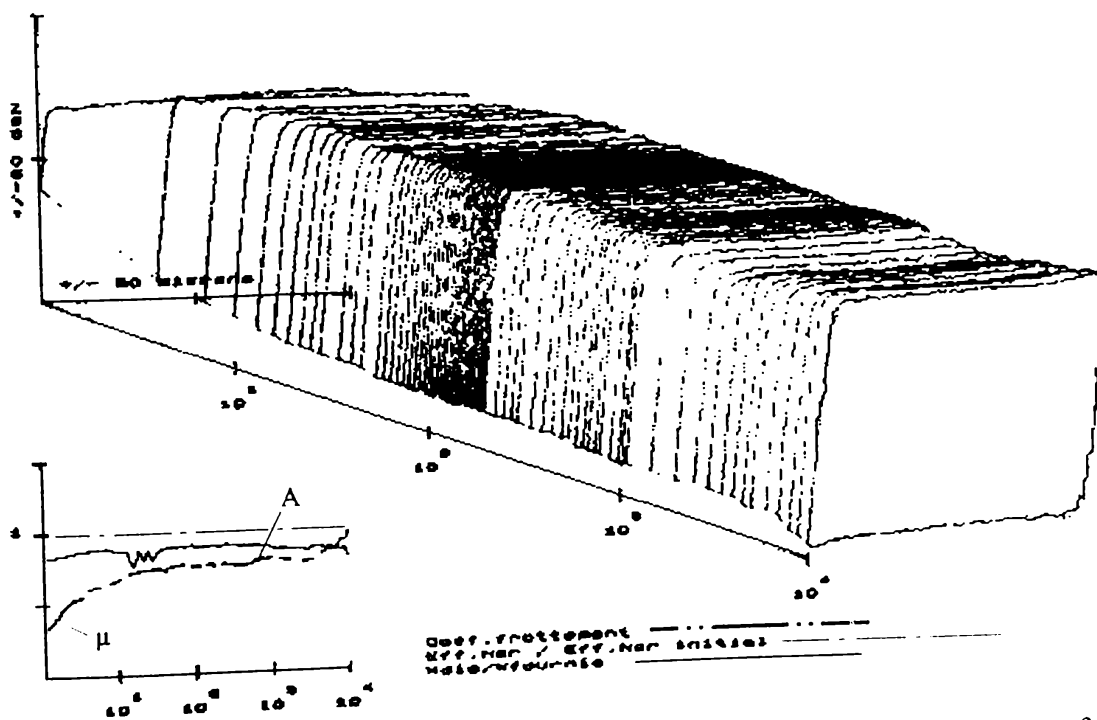


Fig. 3.59 “Trunchi de frecare” pentru regim de solicitare de alunecare totală, suprafață cu rugozitate anizotropă, epruvetă R1/4

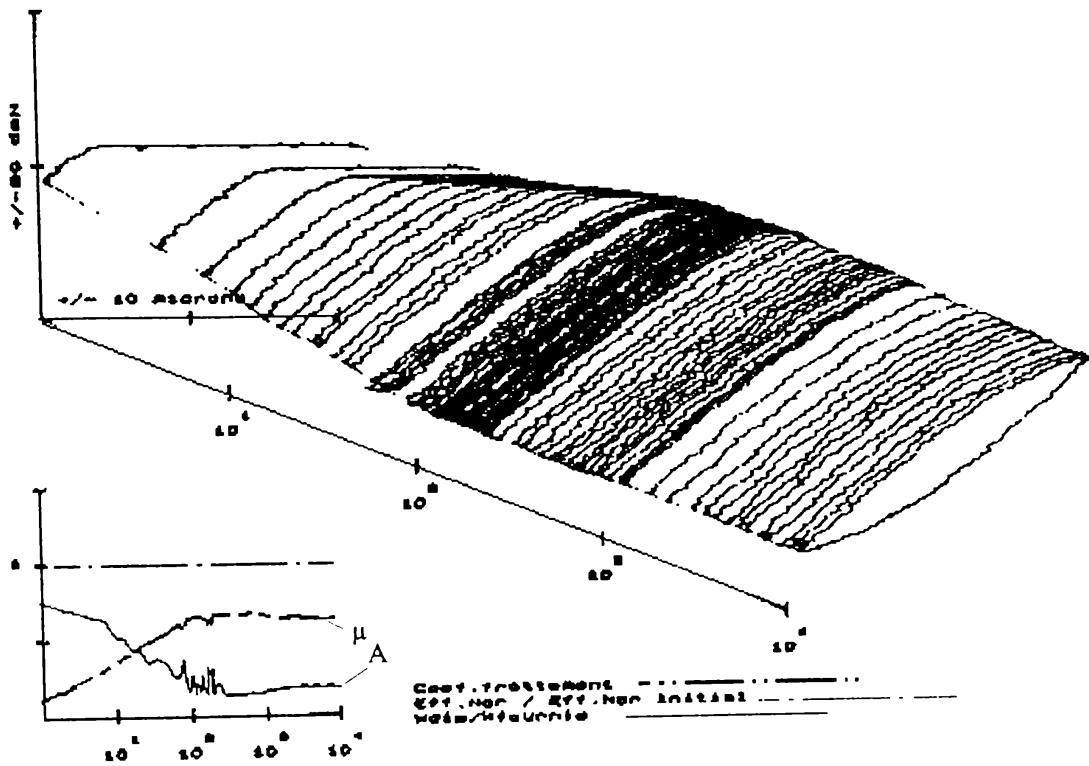


Fig. 3.60 “Trunchi de frecare” pentru regim de solicitare mixt, suprafață cu rugozitate anizotropă, epruvetă R2/2

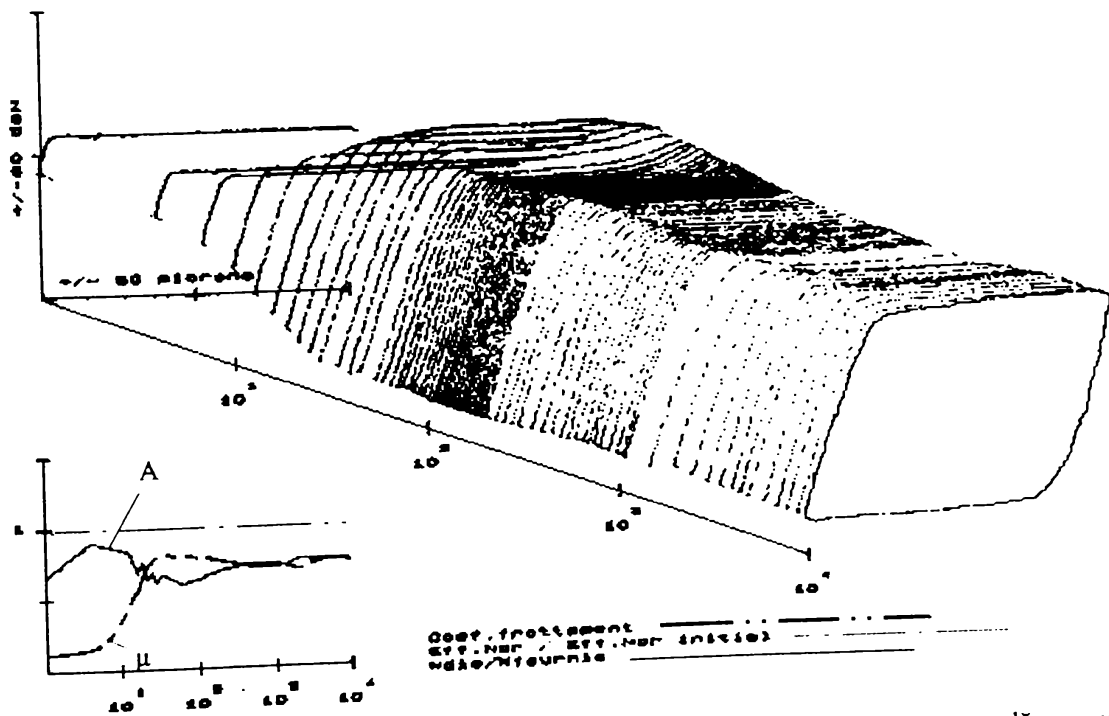


Fig. 3.61 “Trunchi de frecare” pentru regim de solicitare de alunecare totală, suprafață cu rugozitate anizotropă, epruvetă R2/3

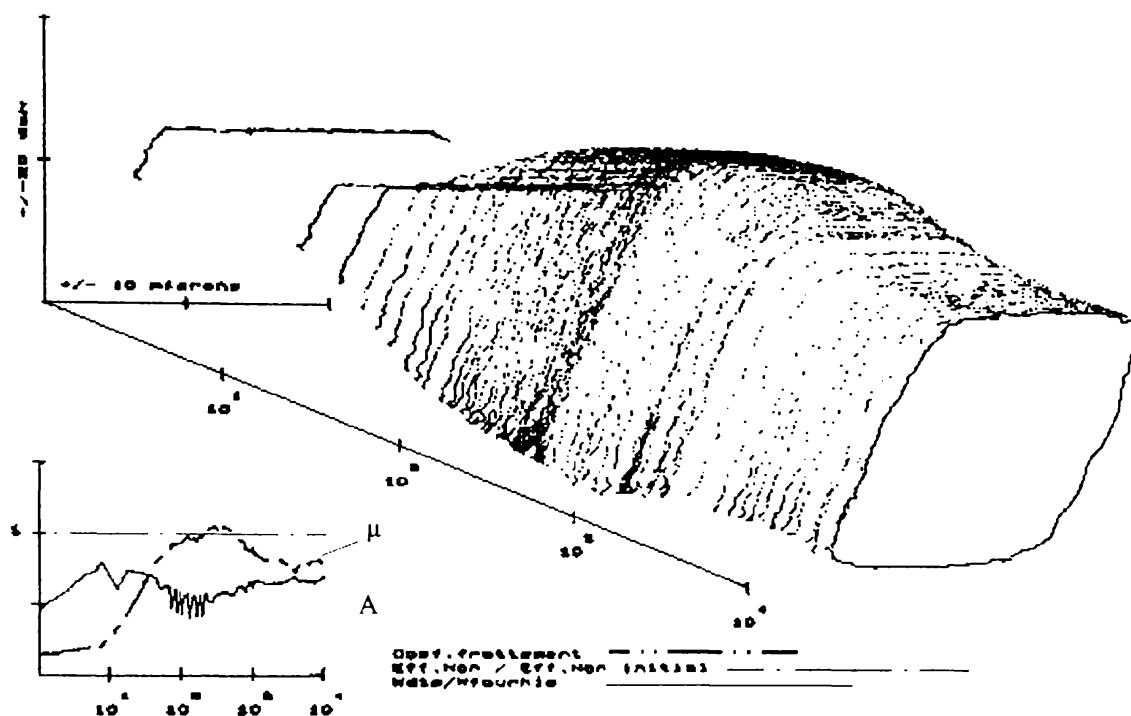


Fig. 3.62 "Trunchi de frecare" pentru regim de solicitare de alunecare totală, suprafață cu rugozitate anizotropă, epruvetă R3/2

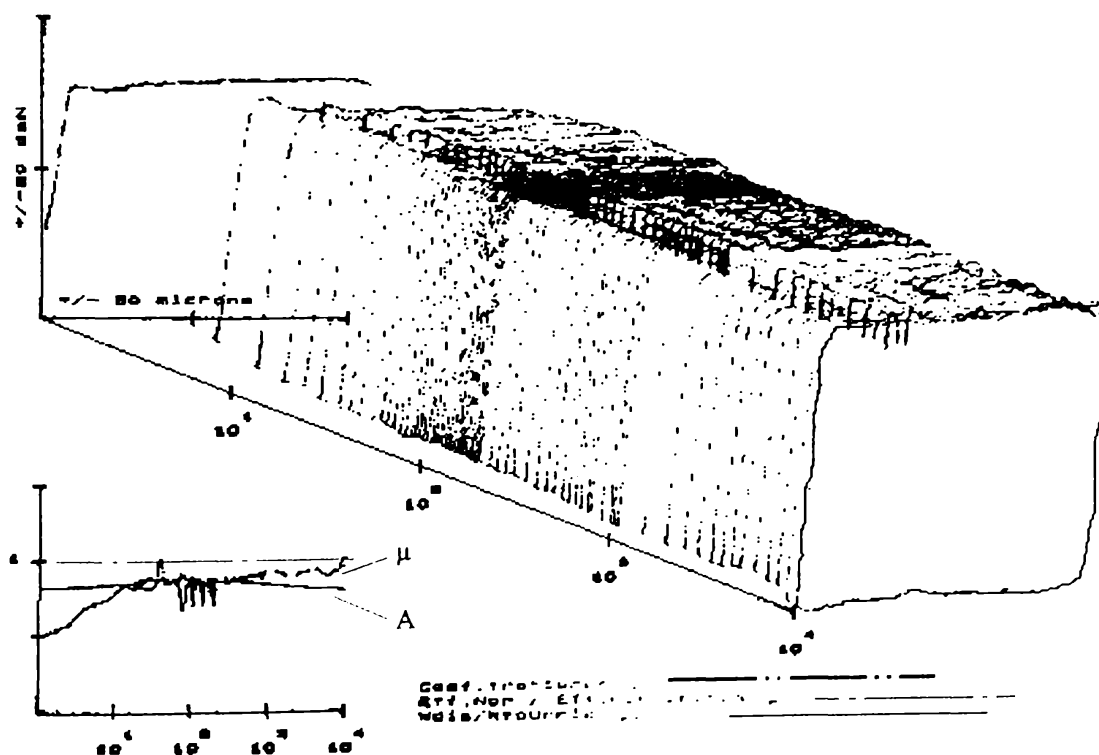


Fig. 3.63 "Trunchi de frecare" pentru regim de solicitare de alunecare totală, suprafață cu rugozitate anizotropă, epruvetă R3/4

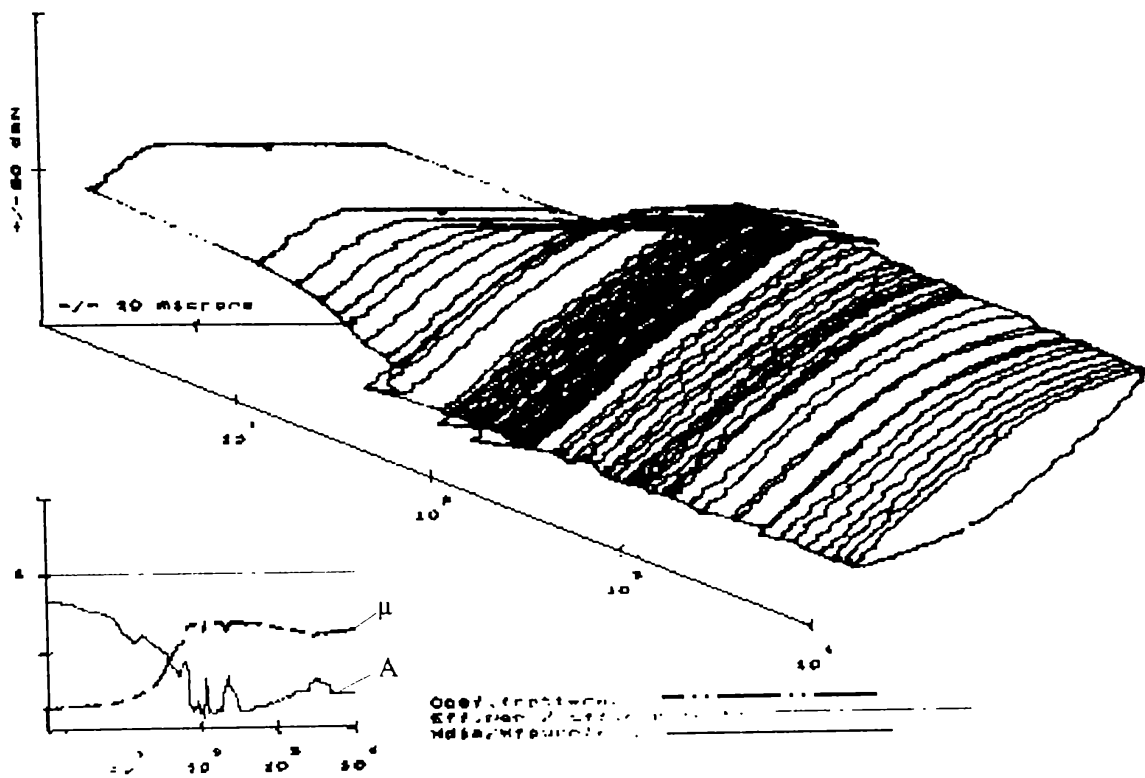


Fig. 3.64 "Trunchi de frecare" pentru regim de solicitare mixt, suprafață cu rugozitate anizotropă, epruvetă R3/1

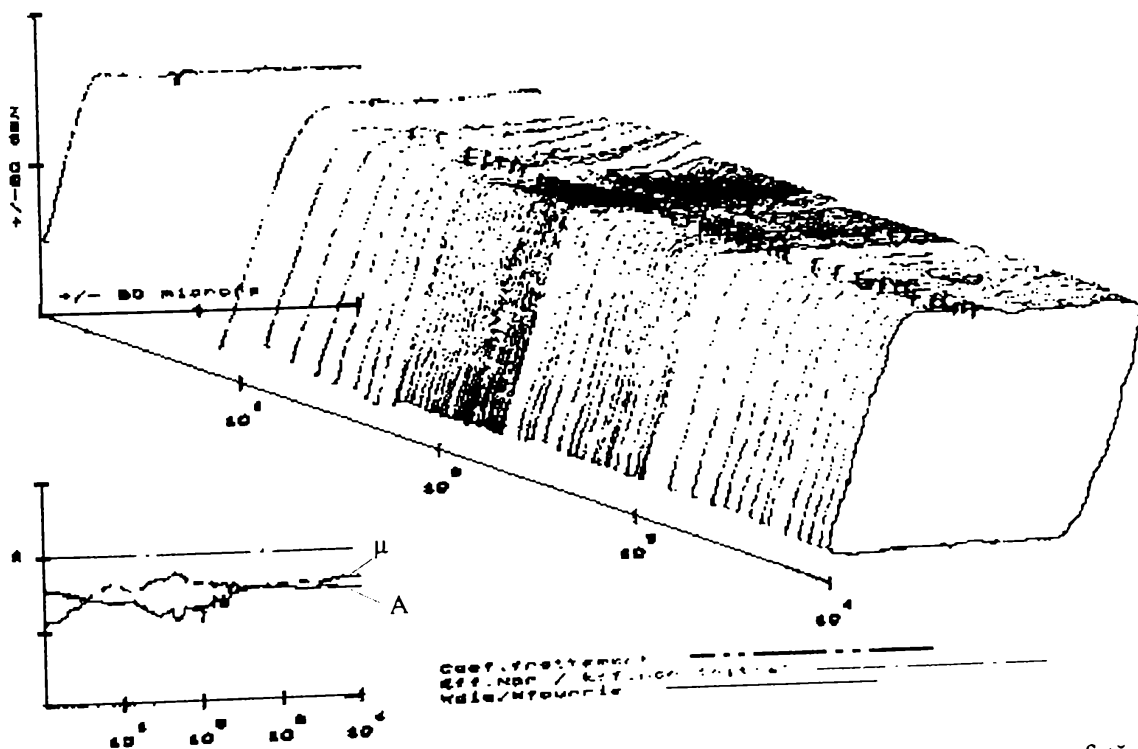


Fig. 3.65 "Trunchi de frecare" pentru regim de solicitare de alunecare totală, suprafață cu rugozitate anizotropă, epruvetă R3/3

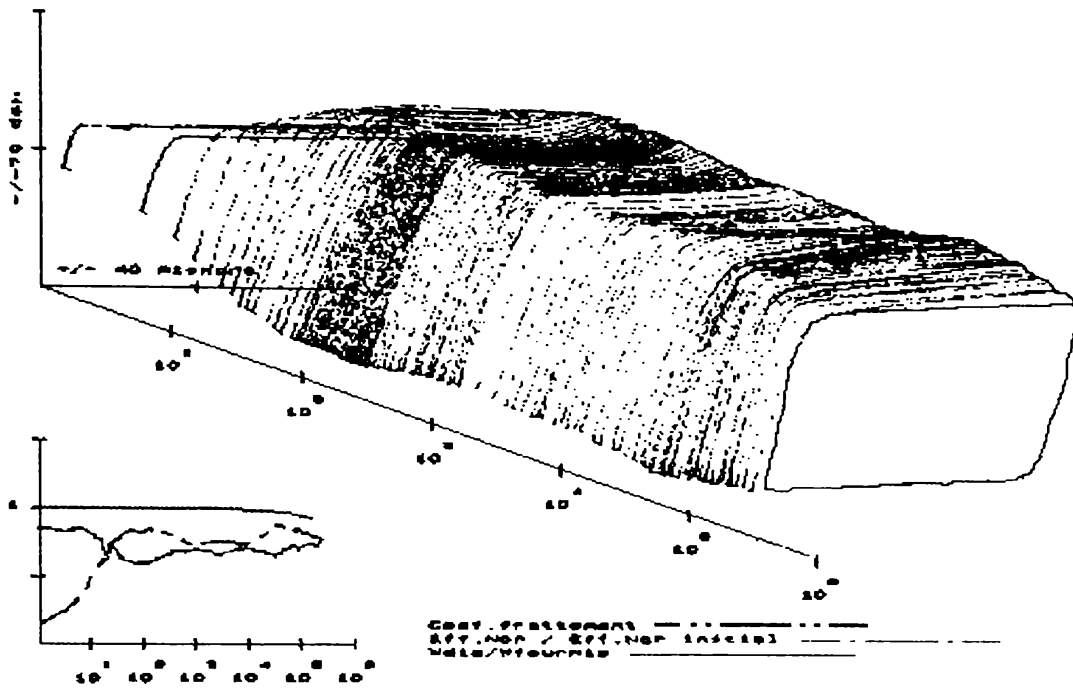


Fig. 3.66 “Trunchi de frecare” pentru regim de solicitare de alunecare totală, suprafață cu rugozitate anizotropă, epruvetă R1/3

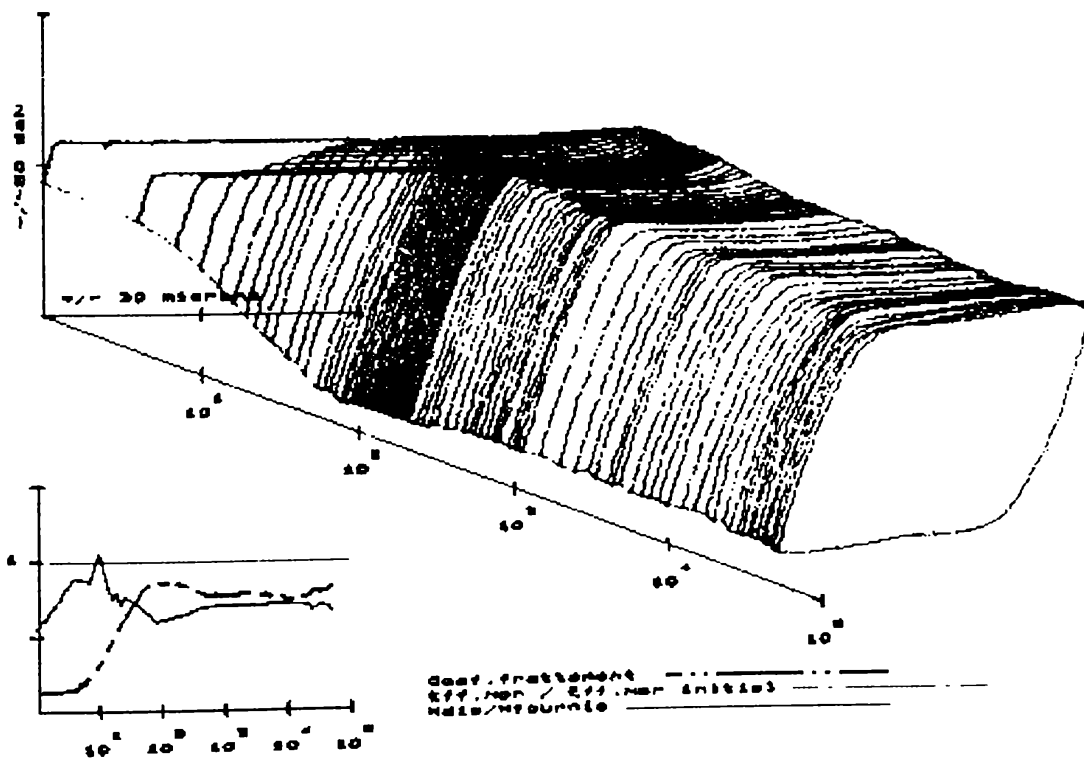


Fig. 3.67 “Trunchi de frecare” pentru regim de solicitare de alunecare totală, suprafață cu rugozitate anizotropă, epruvetă R1/1

Pentru interpretarea corectă a evoluției în timp a “trunchiurilor de frecare” este utilă corelarea acestora cu legile de variație ale criteriului de tranziție  $A$  și coeficientului de frecare  $\mu$  în raport cu  $N$  și cu morfologia uzării în condițiile date, reprezentate intuitiv în figura 3.68 [F1].

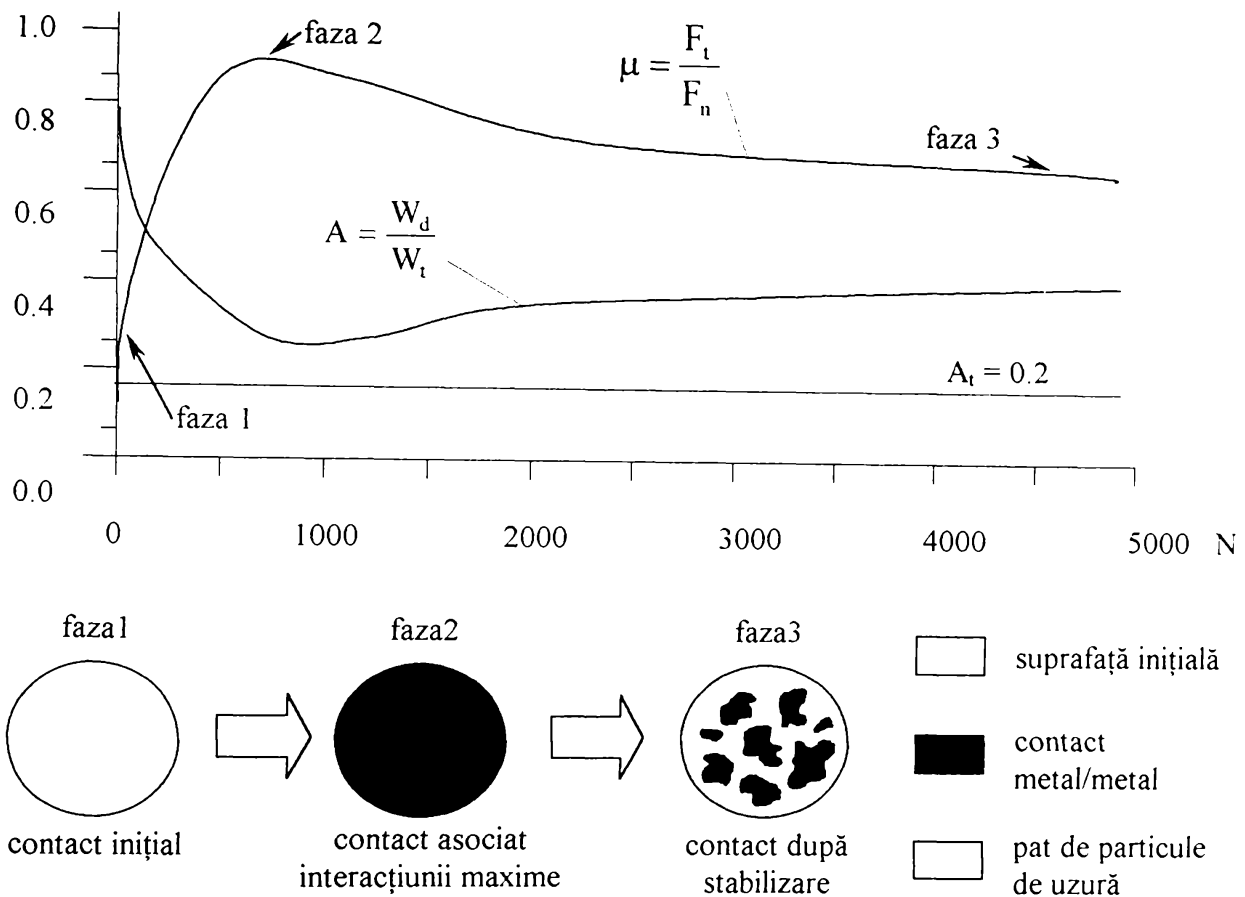


Fig. 3.68 Elemente caracteristice ale uzării de fretting în regim de alunecare totală

Se observă că  $A$  și  $\mu$  prezintă comportamente simetrice inverse. Inițial (faza 1), coeficientul de frecare este minim (suprafețe de contact cu pelicule de impurități – oxizi și grăsimi), iar energia disipată este foarte mare ( $A$  maxim). În continuare, coeficientul de frecare crește, atingând o valoare maximă (faza 2), corespunzător creșterii interacțiunii suprafețelor de contact, urmare a multiplicării contactelor metal – metal și transferului de material prin contact. În același timp,  $A$  și energia disipată scad, tribo-sistemul tinde să se deplaseze către regimul de alunecare parțială (mai stabil datorită nivelului energetic minim), dar valorile prea mari ale lui  $D$  împiedică acest lucru. În fine, în faza 3, ariile de contact intens ale suprafețelor în interacțiune se transformă treptat și succesiv în particule de uzură, care acomodează mai bine mișcarea

celor două suprafețe. Coeficientul de frecare  $\mu$  scade, criteriul  $A$  crește relativ, contactul tinde să se stabilizeze.

Diferențele care pot fi remarcate în mulțimea “trunchiurilor de frecare” corespunzătoare regimului de alunecare totală sunt determinate de cinetica evoluției proceselor de uzare de fretting, în condiții date și implicit de fazele de transformare tribologică atinse pentru un număr de cicluri de solicitare dat.

Ca regulă generală, pentru suprafețele cu rugozitate izotropă, atunci când amplitudinile  $D$  sunt mari, iar forțele  $F_n$  relativ mici, creșterea semnificativă a coeficientului de frecare  $\mu$  se realizează după aproximativ  $10^2$  cicluri, iar trecerea de la 2 la 3 corpuri, cu formarea “patului de pulbere” se produce la peste  $10^3$  cicluri. În cazul amplitudinilor mici și forțelor normale relativ mari, creșterea coeficientului de frecare se realizează abia la  $N > 10^3$  cicluri. Îndepărtarea de material rămâne suficient de mică, astfel încât formarea celui de-al treilea corp nu are loc înainte de  $10^4$  cicluri.

În principiu, cea mai puternică uzare a suprafețelor de contact se manifestă la creșterea amplitudinii  $D$  și la diminuarea forței normale  $F_n$ , ceea ce este în deplină concordanță cu datele din literatura de specialitate [D6] [F1] [K6] [V2].

Procesele de uzare a suprafețelor de contact cu formarea celui de-al treilea corp și expulzarea produselor de uzură (regim de alunecare totală) se produc mai rapid, respectiv la valori  $N$  mai reduse, în cazul suprafețelor rectificate în raport cu suprafețele erodate. După un număr determinat de cicluri, cu atât mai mare cu cât  $D$  este mai redus și  $F_n$  mai ridicat, cele două categorii de suprafețe tind să se comporte identic (figurile 3.41 și 3.42 comparativ cu figurile 3.51 și 3.52).

Toate amprente de uzare obținute în urma încercărilor efectuate prezintă ca element caracteristic al proceselor de fretting un inel marginal de particule oxidate, a cărui mărime este dependentă de tendințele descrise anterior.

Cu titlu ilustrativ, pentru punerea în evidență a diversității modalităților și etapelor de modificare morfologică a suprafețelor supuse uzării de fretting în regim de alunecare totală, în figurile 3.69...3.84 sunt prezentate imagini de microscopie optică și electronică ale suprafețelor finale ale epruvetelor E2/1, E2/2 (tabelul 3.13) și R1/4, R1/1 (tabelul 3.14).

Se observă ca elemente specifice:

-prezența paralelă a ariilor de contact metal – metal, cu rizuri pronunțate și a ariilor corespunzătoare “patului” de particule de uzură (fig. 3.74, 3.75, 3.79, 3.80);

-zone de trecere de la suprafețe în alunecare relativă și suprafețe temporar lipite (fig. 3.84);

-existența unor trepte și cavități de uzură în porțiunile de prelevare de material (fig. 3.71, 3.72, 3.81);

-limite de separație a suprafețelor inițiale (erodate sau rectificat) și suprafețele baleiate și uzate prin deplasarea relativă a primelor corpuri ale tribo-sistemului considerat (fig. 3.77, 3.81).

În ceea ce privește încercările epruvetelor cu rugozitate izotropă E1/1 (fig. 3.50) și E3/1 (fig. 3.54) și respectiv epruvetelor cu rugozitate anizotropă R2/2 (fig. 3.60) și R3/1 (fig. 3.64), se constată că regiunile inițiale de alunecare totală (tabelele 3.13 și 3.14) sunt convertite pe parcursul încercării în regiuni de alunecare parțială ( $A < 0.2$ ), situație ce caracterizează regiunile de solicitare mixte.

Este interesant de remarcat că bascularea regim de alunecare totală – regim de alunecare parțială se produce după cca.  $70 \div 90$  cicluri la epruvetele rectificat și după cca. 9000 cicluri la epruvetele erodate. Faptul este confirmat și de forma particulară a ciclurilor de fretting corespunzătoare pentru  $N=100$  și  $N=10000$ , reprezentate în figura 3.85.

Pentru ca o asemenea basculare să fie posibilă este necesar, așa cum se sugerează în figura 3.86 [F1], ca în perioada de alunecare totală, la amplitudini  $D$  suficient de mici, creșterea coeficientului de frecare  $\mu$  să fie suficient de puternică încât să determine nucleația unei prime arii centrale de contact și implicit “blocarea” relativă a contactului. După trecerea în regim de alunecare parțială, frontiera ariei centrale de “lipire” se deplasează treptat în direcția radială până la atingerea unei valori stabilizate către marginea suprafeței de interacțiune.



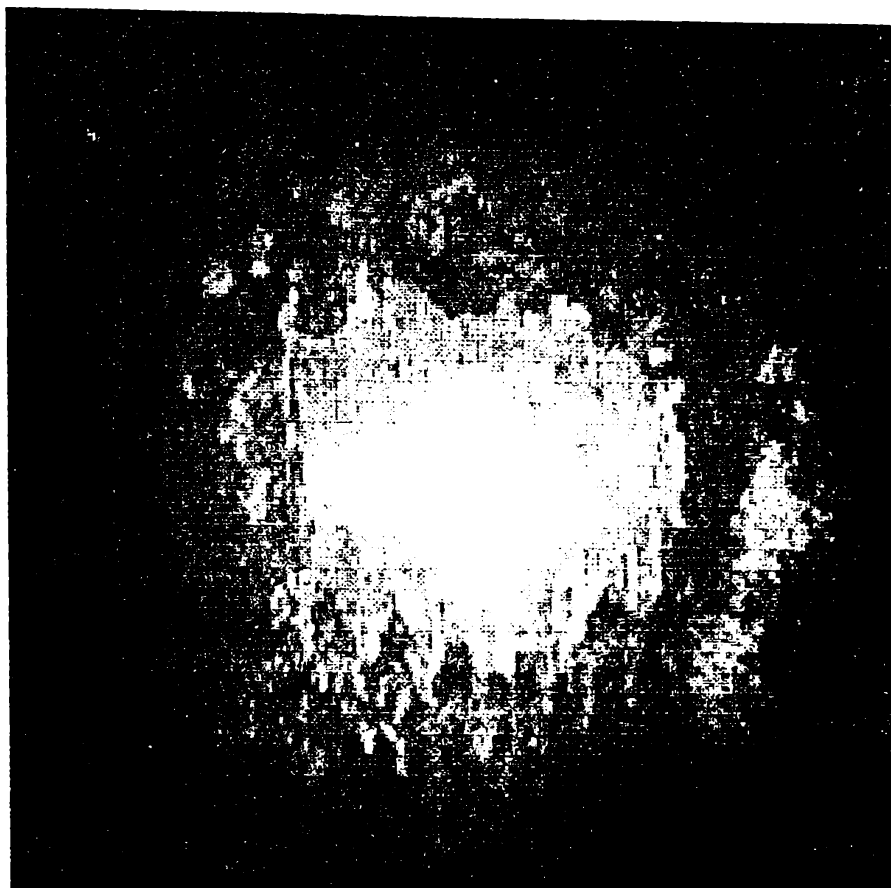


Fig. 3.69 Imagine de microscopie optică (x 25) a suprafeței supuse la uzare de fretting - epruvetă erodată E2/1



Fig. 3.70 Imagine de microscopie electronică (x 103) a suprafeței supuse la uzare de fretting - epruvetă erodată



Fig. 3.71 Imagine de microscopie electronică (x 105) a suprafeței supuse la uzare de fretting - epruvetă erodată E2/1

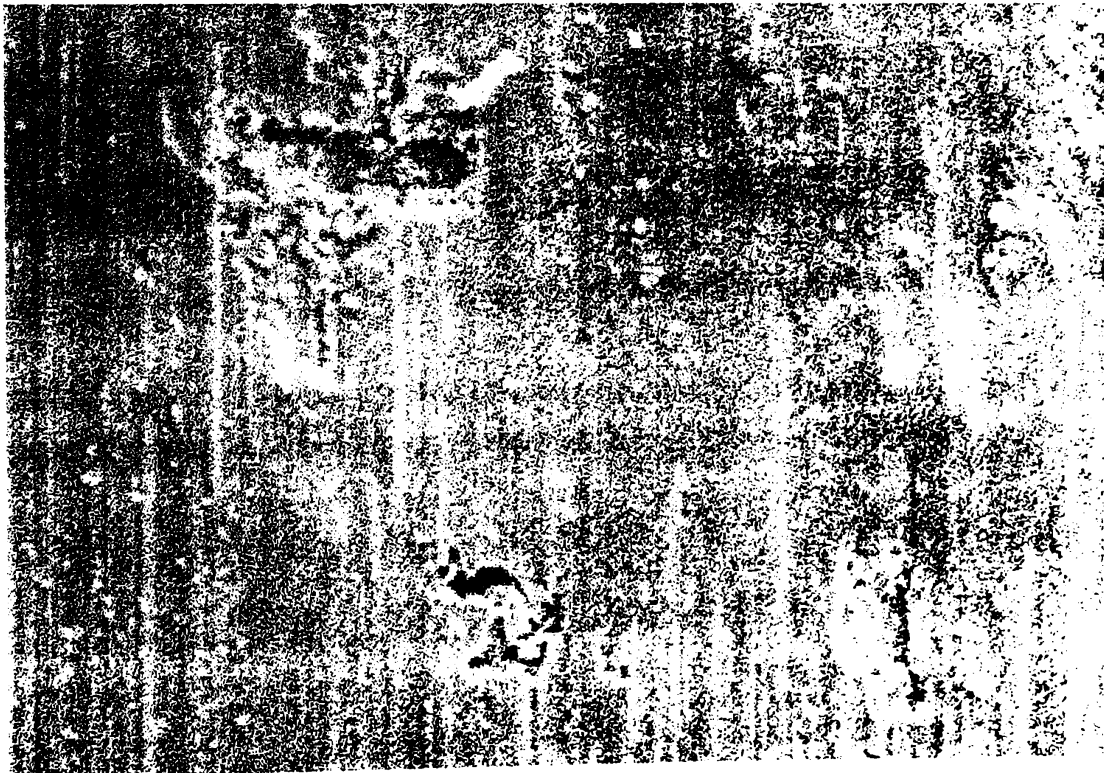


Fig. 3.72 Imagine de microscopie electronică (x 499) a suprafeței supuse la uzare de fretting - epruvetă erodată E2/1

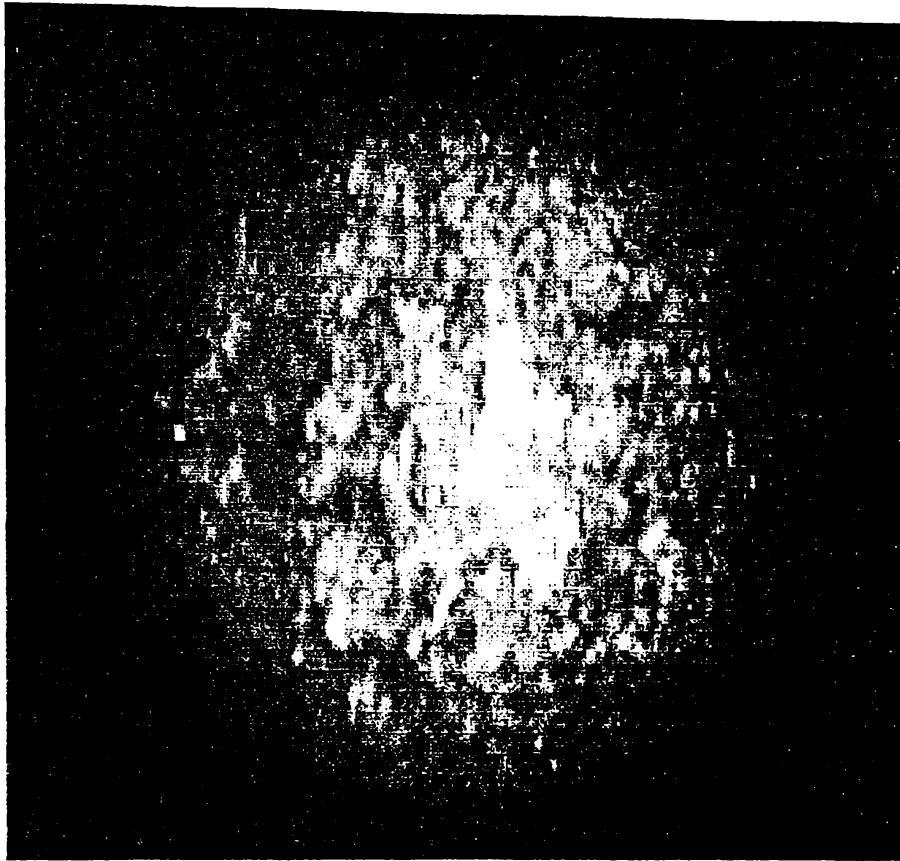


Fig. 3.73 Imagine de microscopie optică (x 25) a suprafeței supuse la uzare de fretting - epruvetă erodată E2/2



Fig. 3.74 Imagine de microscopie optică (x 50) a suprafeței supuse la uzare de fretting - epruvetă erodată E2/2





Fig. 3.75 Imagine de microscopie optică (x 100) a suprafeței supuse la uzare de fretting - epruvetă erodată E2/2



Fig. 3.76 Imagine de microscopie optică (x 200) a suprafeței supuse la uzare de fretting - epruvetă erodată E2/2

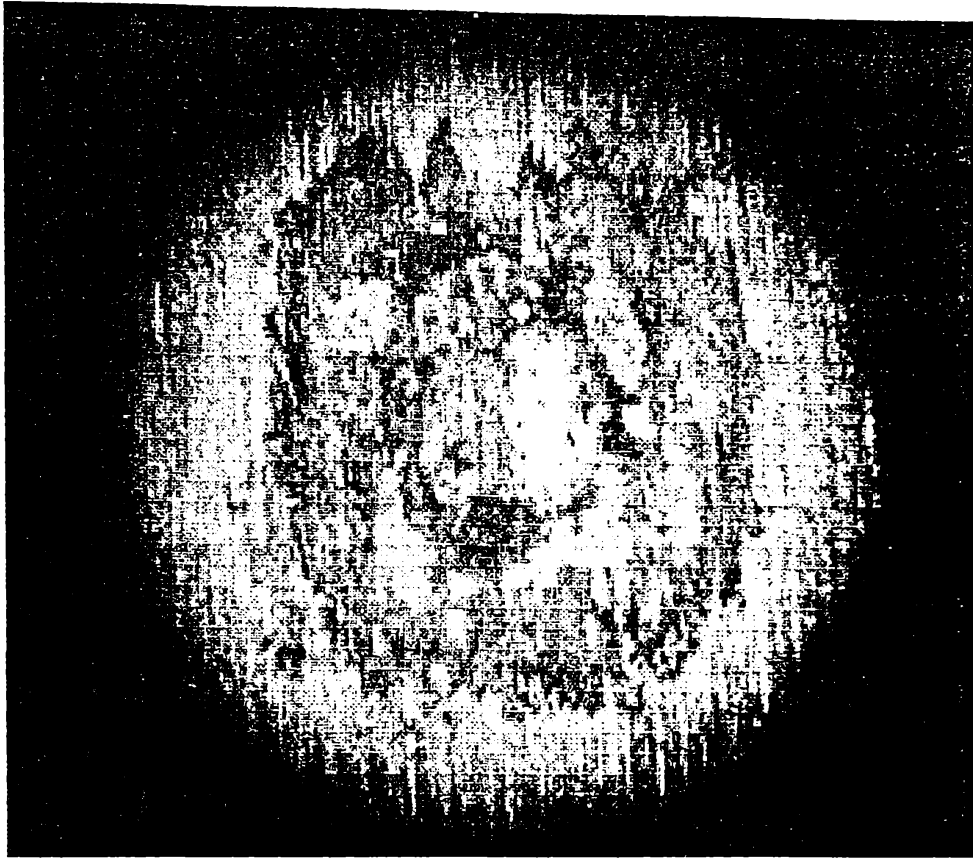


Fig. 3.77 Imagine de microscopie optică ( $\times 25$ ) a suprafeței supuse la uzare de fretting - epruvetă rectificată R1/4



Fig. 3.78 Imagine de microscopie optică ( $\times 50$ ) a suprafeței supuse la uzare de fretting - epruvetă rectificată R1/4



Fig. 3.79 Imagine de microscopie optică ( $\times 100$ ) a suprafeței supuse la uzare de fretting - epruvetă rectificată R1/4



Fig. 3.80 Imagine de microscopie optică ( $\times 200$ ) a suprafeței supuse la uzare de fretting - epruvetă rectificată R1/4

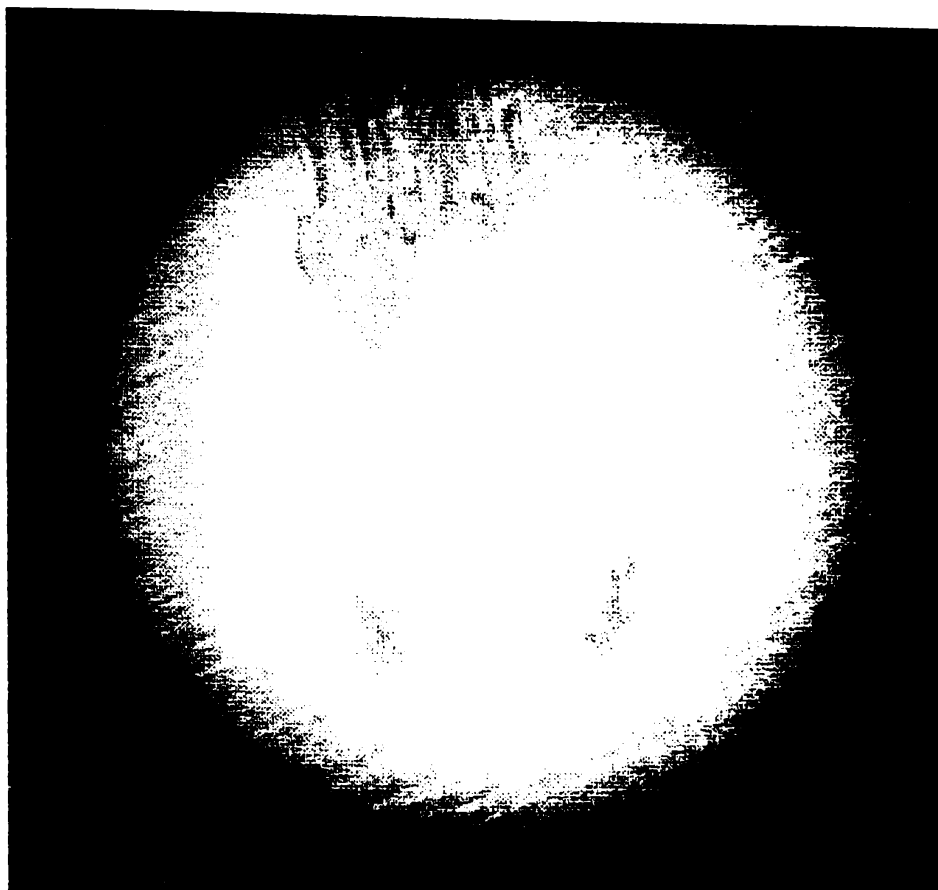


Fig. 3.81 Imagine de microscopie optică (x 16) a suprafeței supuse la uzare de fretting - epruvetă rectificată R1/1



Fig. 3.82 Imagine de microscopie electronică (x 103) a suprafeței supuse la uzare de fretting - epruvetă rectificată R1/1



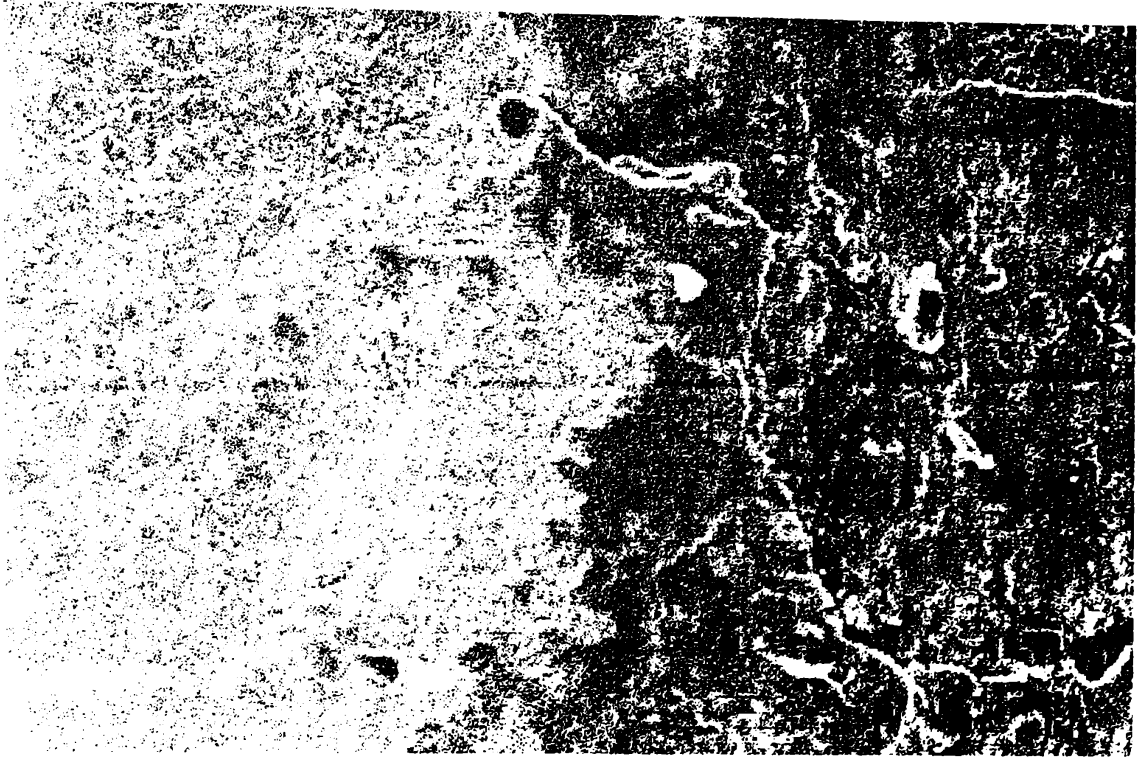


Fig. 3.83 Imagine de microscopie electronică (x 199) a suprafeței supuse la uzare de fretting - epruvetă rectificată R1/1



Fig. 3.84 Imagine de microscopie electronică (x 199) a suprafeței supuse la uzare de fretting - epruvetă rectificată R1/1



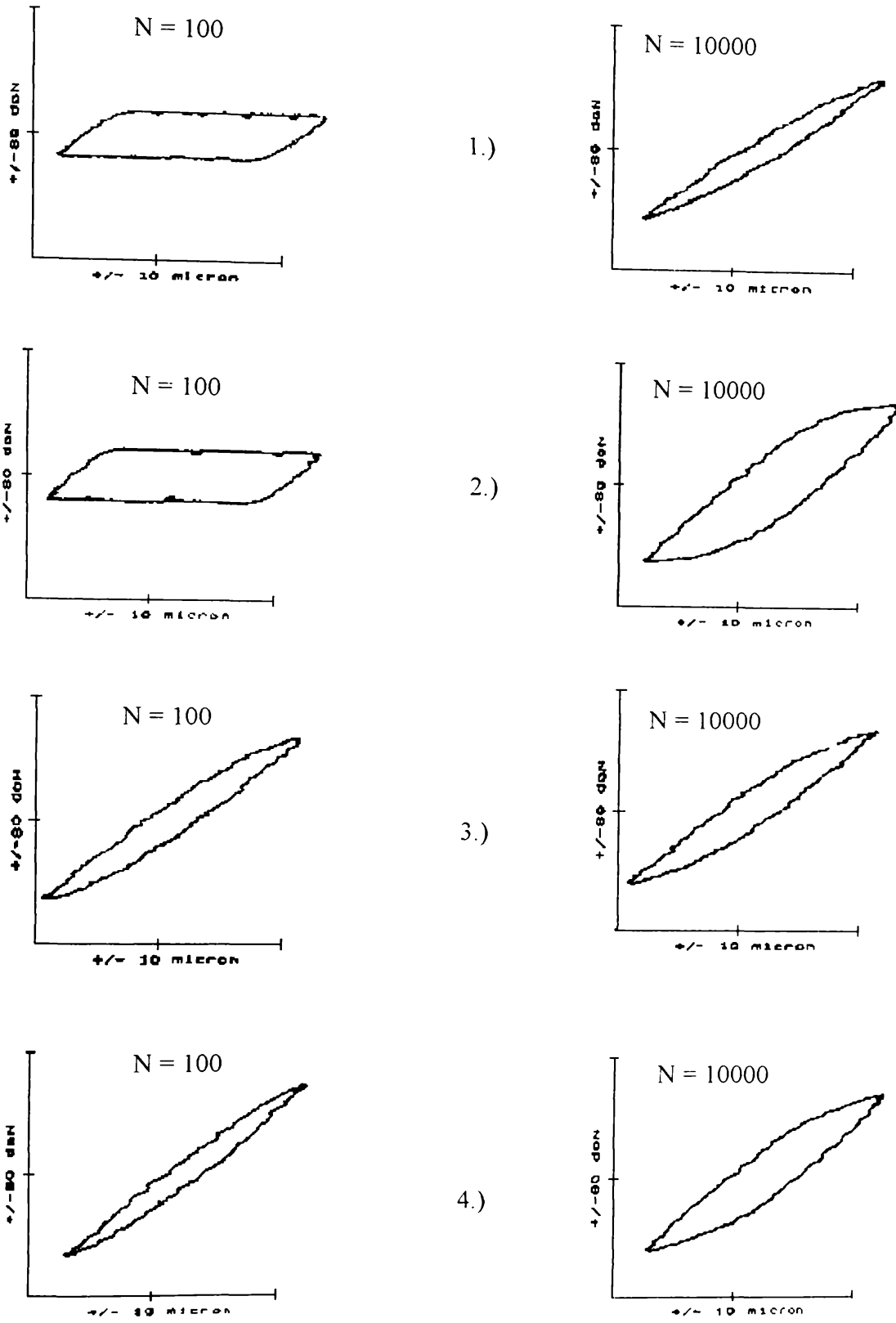


Fig. 3.85 Cicluri de solicitare singulare specifice regimului mixt

1-eproveta erodată E1/1    2-eproveta erodată E3/1

3-eproveta rectificată R2/2    4-eproveta rectificată R3/1

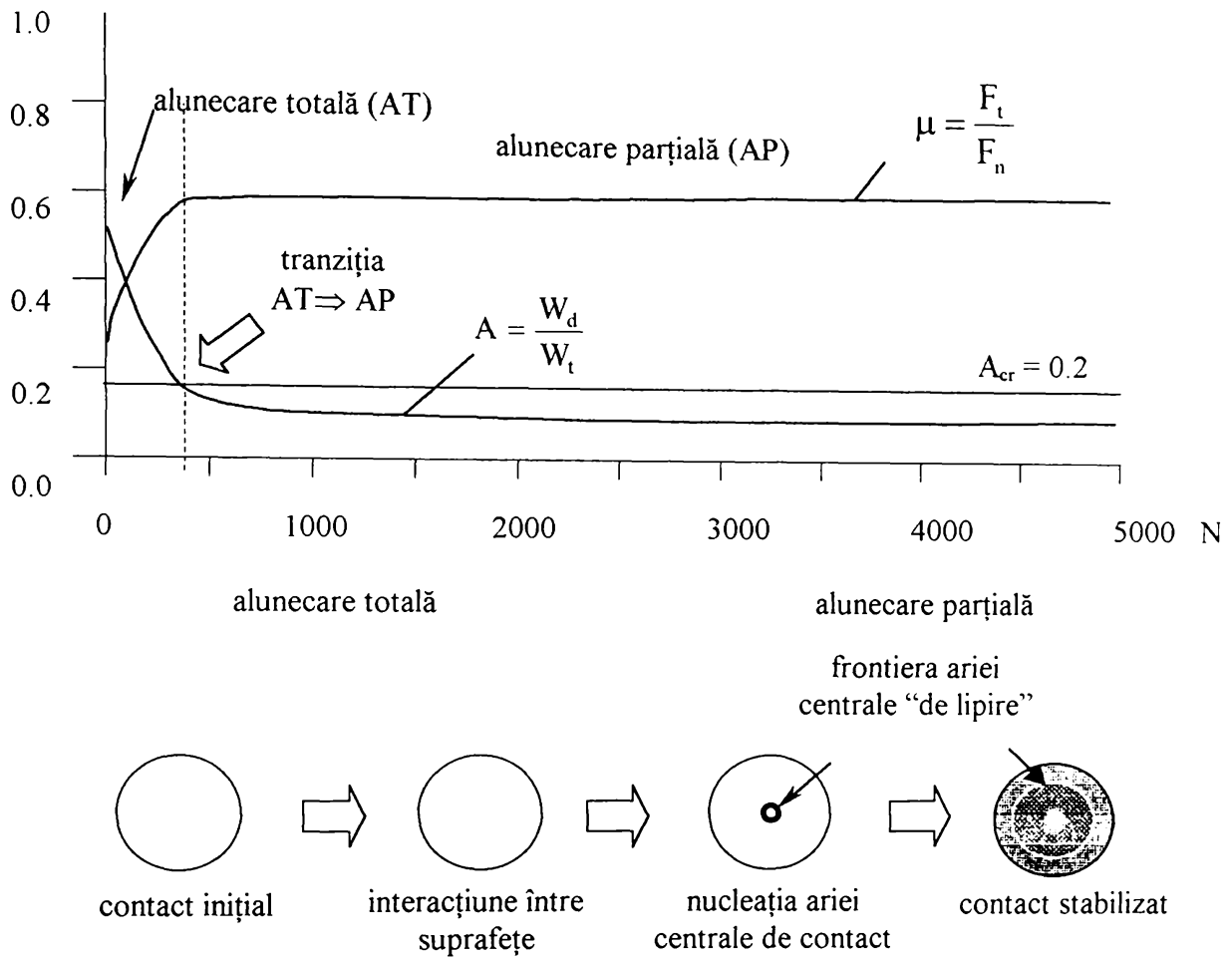


Fig. 3.86 Elementele caracteristice ale uzării de fretting în regim de solicitare mixt

Imagini microscopice optice ( $\times 25$ ) ale suprafețelor finale ale epruvetelor E3/1 (fig. 3.87) și R3/1 (fig. 3.73) supuse uzării de fretting în regim de solicitare mixt probează evident poziția stabilizată a frontierei dintre aria centrală de "lipire" și inelul marginal de deplasare relativă a suprafețelor de contact.

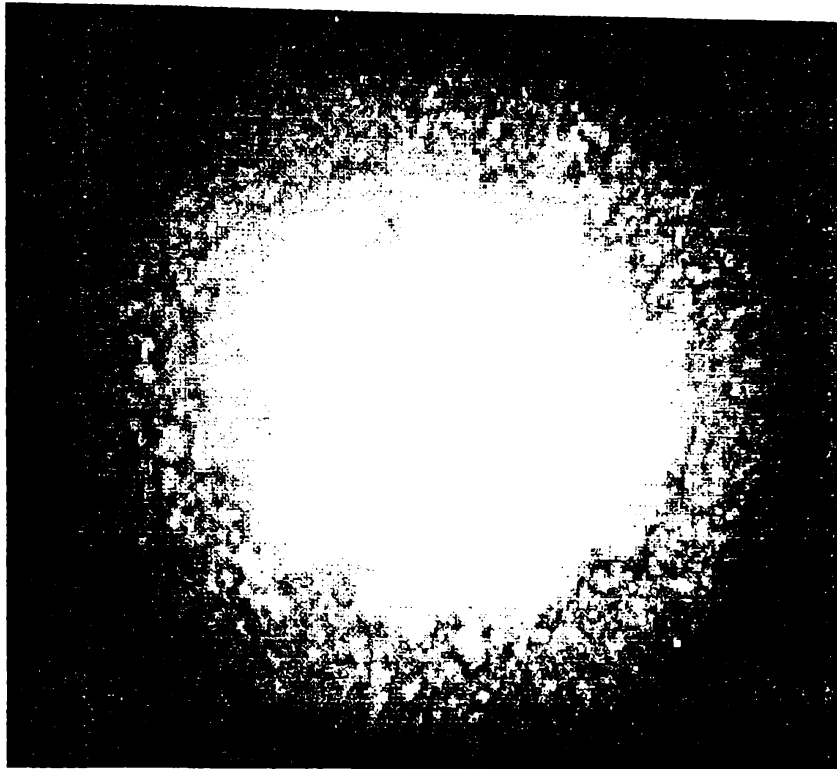


Fig. 3.87 Imagine de microscopie optică (x 25) a suprafeței supuse la uzare de fretting în regim de solicitare mixt - epruvetă erodată E3/1

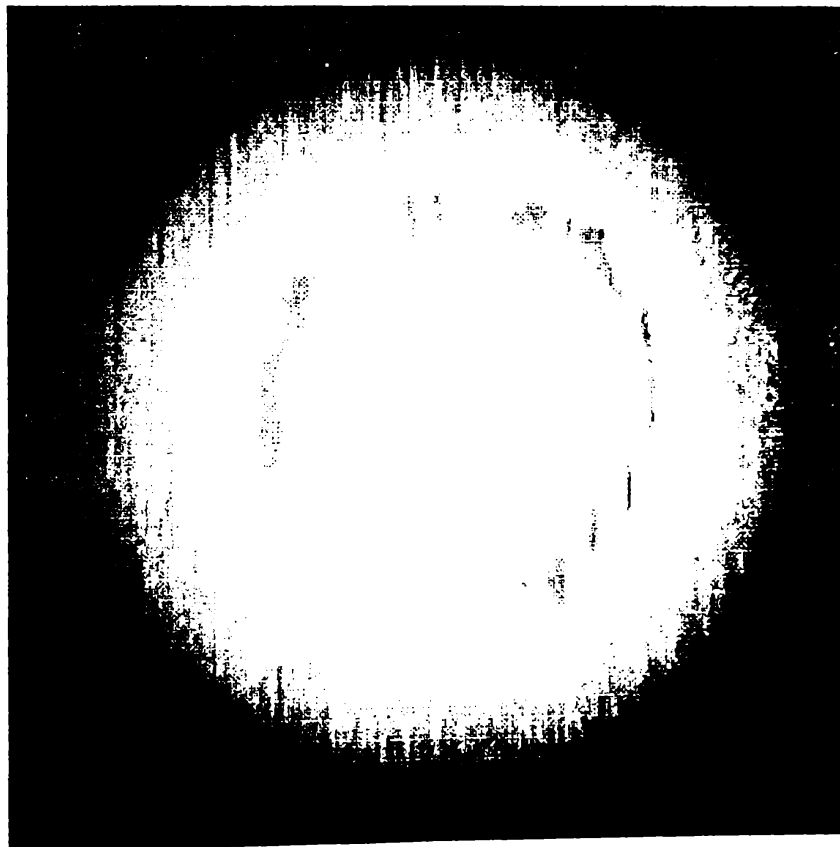


Fig. 3.88 Imagine de microscopie optică (x 25) a suprafeței supuse la uzare de fretting în regim de solicitare mixt - epruveta R3/1

### 3.3.3.6 Aspecte energetice ale proceselor de uzare de fretting

Baza de date prezentată la §3.3.3.1 (vezi anexele 3 și 4) conține și informații referitoare la evoluția coeficientului de frecare  $\mu$  și a energiei disipate prin fenomene de frecare pe parcursul tuturor încercărilor de uzare de fretting efectuate conform programului experimental. Valorile energiei disipate sunt indicate atât la nivelul unui ciclu de solicitare individual  $W_d$ , cât și cumulativ pentru ciclurile de solicitare anterioare unui ciclu considerat  $W_{dcum}$ .

Evoluția coeficientului de frecare  $\mu$  pe parcursul încercărilor de fretting a fost, de altfel, prezentată anterior și în figurile 3.48...3.67, alături de “trunchiurile de frecare” corespunzătoare.

Data fiind importanța excepțională a fenomenelor de frecare și disipare de energie în tribo-sisteme, este utilă evidențierea unor legități de cauzalitate existente în acest domeniu.

Astfel, pentru suprafețele erodate, coeficientul de frecare are, în condiții date, valori cu atât mai mari, cu cât amplitudinea deplasărilor este mai mare, iar atingerea valorii maxime se realizează cu atât mai repede, cu cât forța normală  $F_n$  și amplitudinea  $D$  sunt mai mari (figurile 3.89 și 3.90).

Influența frecvenței ciclurilor de solicitare  $f$ , deși vizibilă, este mai puțin semnificativă: la frecvență mărită, maximum coeficientului de frecare este atins mai repede (figura 3.91).

Deosebit de relevantă este compararea evoluției coeficientului de frecare  $\mu$  pentru epruvetele cu suprafețe erodate și respectiv rectificat, solicitate în aceleași condiții de uzare de fretting (figura 3.92).

În cazul suprafețelor cu rugozitate anizotropă (rectificate) creșterea coeficientului de frecare se produce foarte rapid ( $N < 10$  cicluri), iar valoarea maximă dobândită rămâne staționară.

La suprafețele cu rugozitate izotropă (erodate), creșterea coeficientului de frecare se produce mai lent, astfel încât atingerea valorii maxime se realizează pentru  $N > 10^4$  cicluri.

După dobândirea valorilor maxime ale coeficientului de frecare, în regim staționar, comportamentul suprafețelor erodate și rectificat devine similar. Aceasta arată că în urma proceselor de uzare induse de fretting, rugozitatea inițială a fost îndepărtată, iar influența sa anulată.

Evoluția energiei disipate în procesele de uzare de fretting urmează, în linii mari, legitățile evidențiate pentru coeficientul de frecare, în condiții identice (figurile 3.93...3.96).

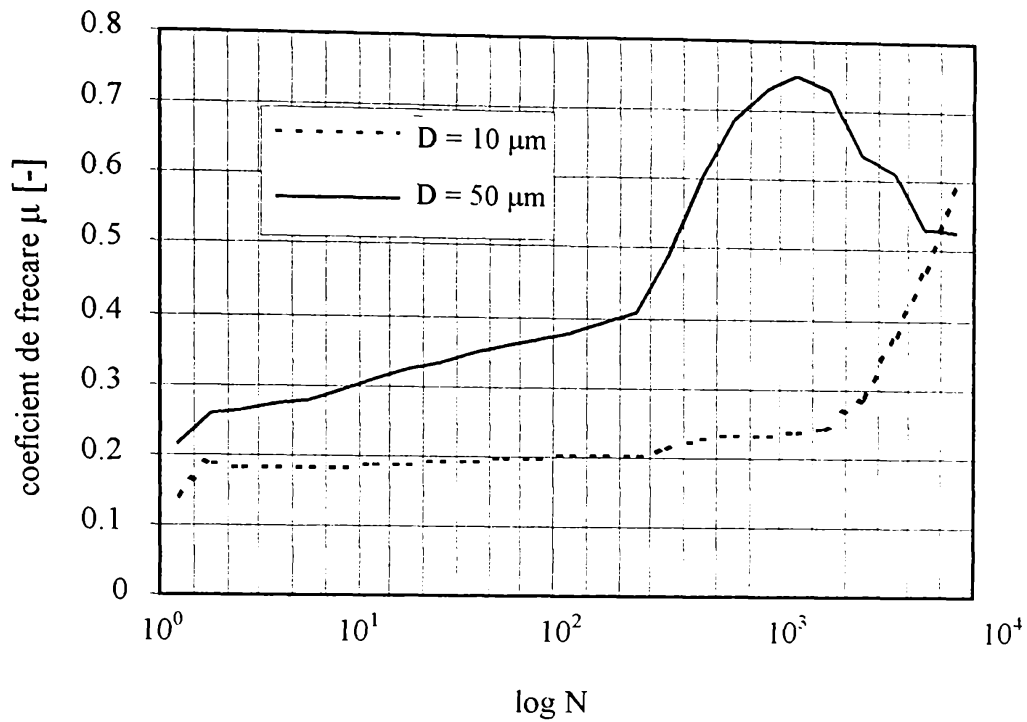


Fig. 3.89 Variația coeficientului de frecare  $\mu$  cu numărul ciclurilor de solicitare  $N$ , pentru  $F_n = 800 \text{ N}$  și  $f = 5 \text{ Hz}$ :

----- epruveta erodată E1/1  
 ————— epruveta erodată E2/1

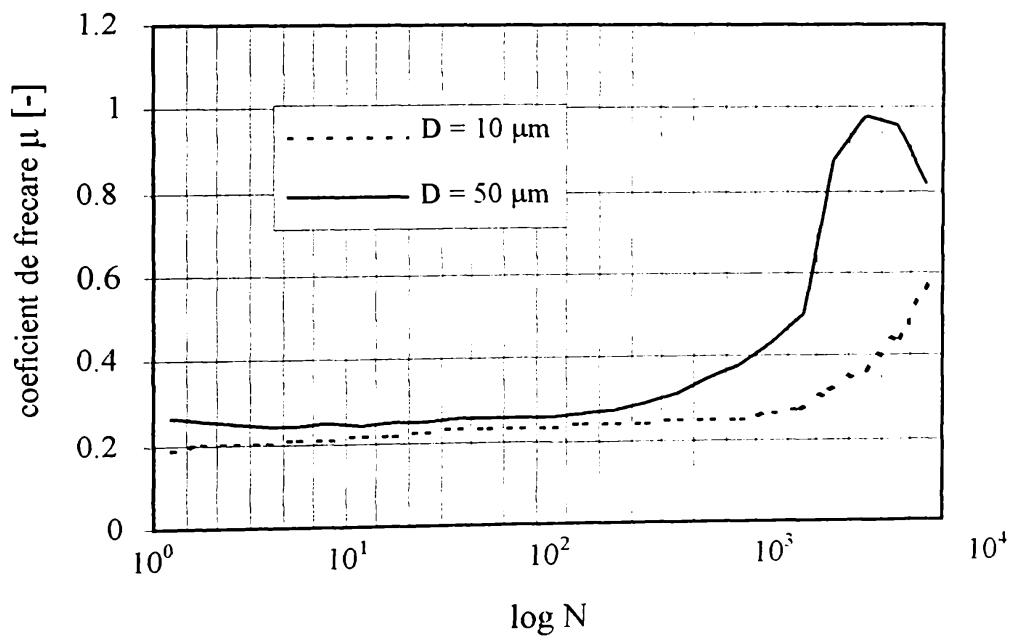


Fig. 3.90 Variația coeficientului de frecare  $\mu$  cu numărul ciclurilor de solicitare  $N$ , pentru  $F_n = 200 \text{ N}$  și  $f = 5 \text{ Hz}$ :

----- epruveta erodată E1/2  
 ————— epruveta erodată E2/2

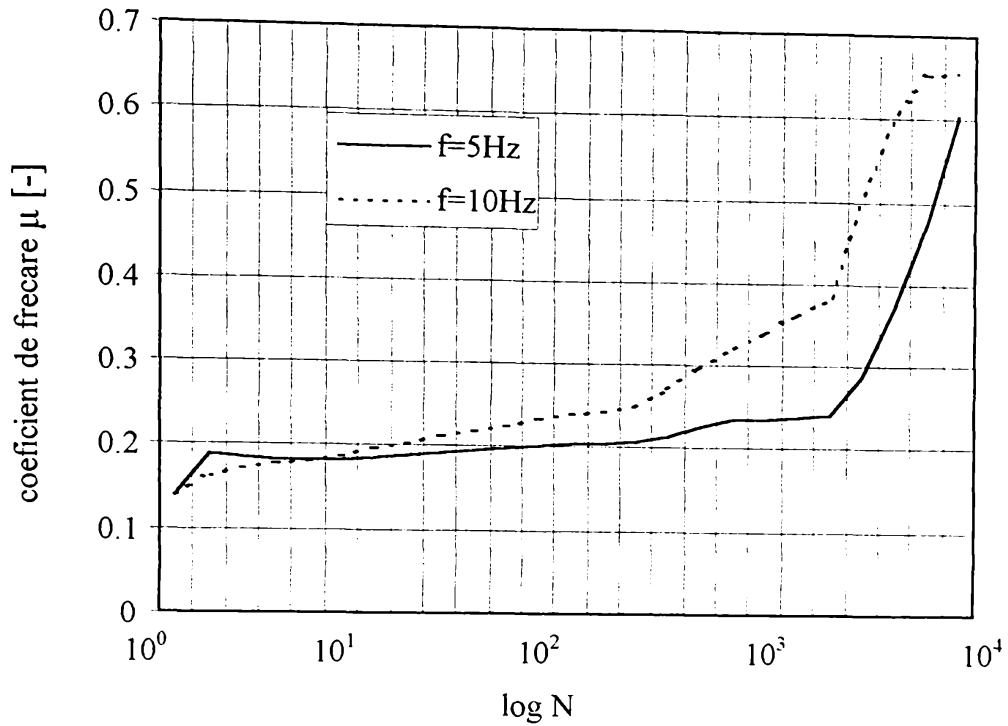


Fig. 3.91 Variația coeficientului de frecare  $\mu$  cu numărul ciclurilor de solicitare  $N$ , pentru

$F_n = 800\text{ N}$  și  $D = 10\ \mu\text{m}$ :

----- epruveta erodată E1/1

———— epruveta erodată E3/1

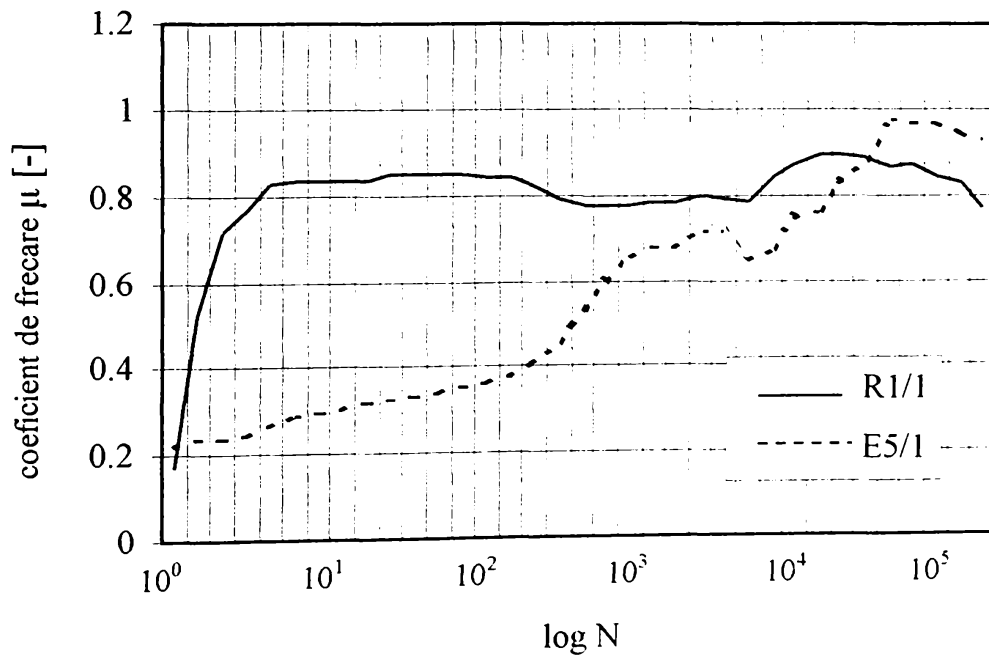


Fig. 3.92 Variația coeficientului de frecare  $\mu$  cu numărul ciclurilor de solicitare  $N$ , pentru

$D = 40\ \mu\text{m}$ ,  $F_n = 700\text{ N}$  și  $f = 5\text{ Hz}$ :

----- epruveta erodată E5/1

———— epruveta rectificată R1/1

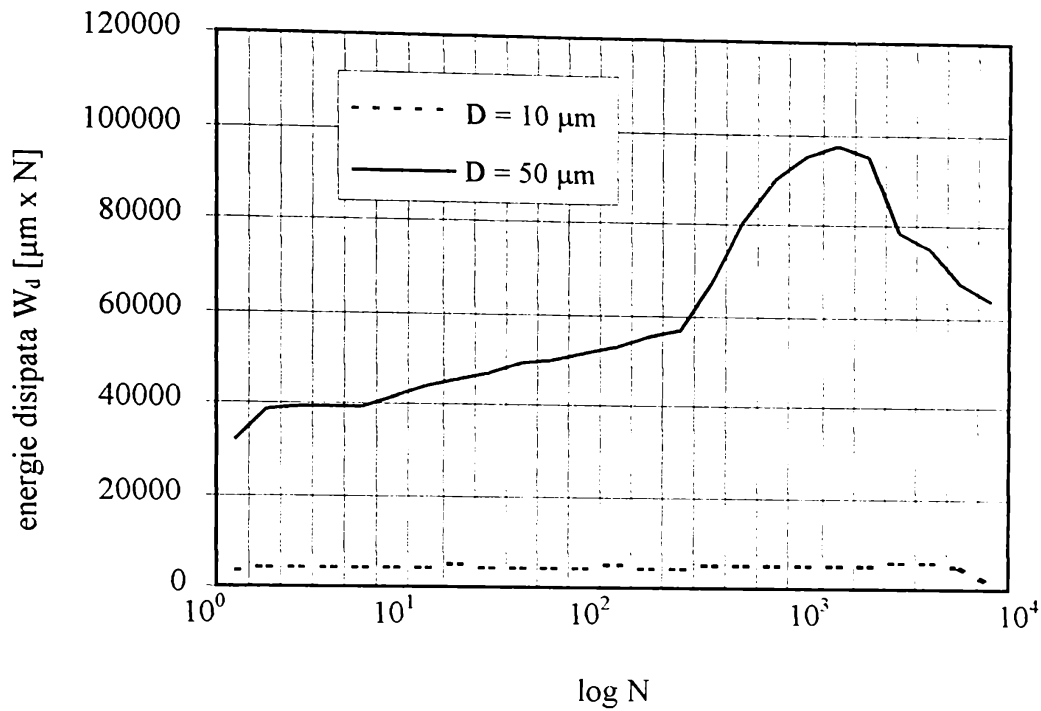


Fig. 3.93 Variația energiei disipate  $W_d$  cu numărul ciclurilor de solicitare  $N$ , pentru  $F_n = 800$  N și  $f = 5$  Hz:  
 - - - - - epruveta erodată E1/1  
 ————— epruveta erodată E2/1

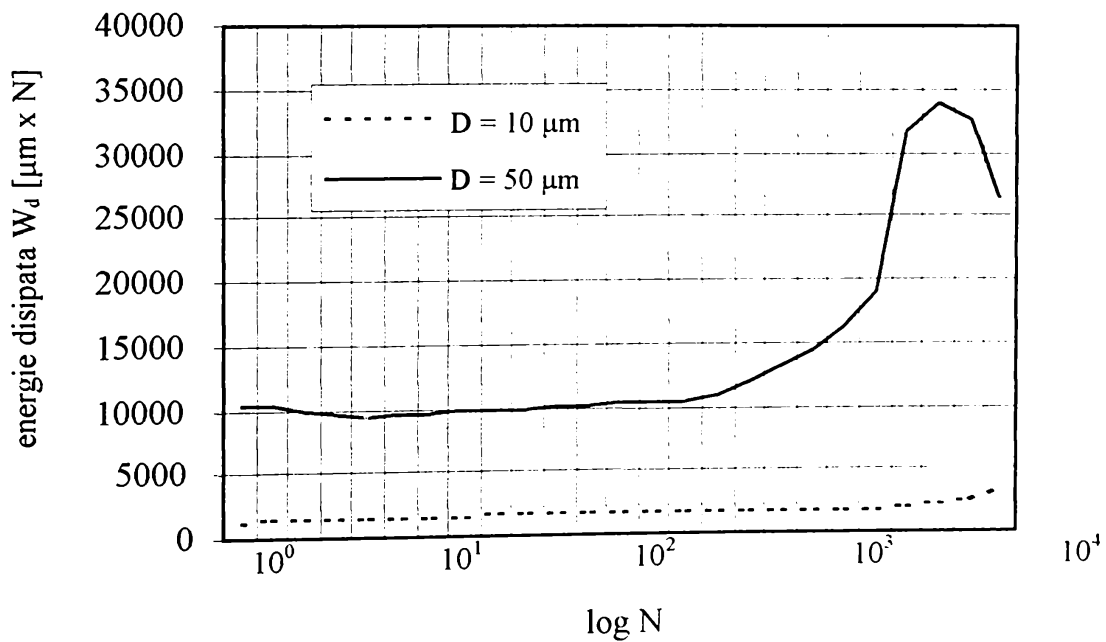


Fig. 3.94 Variația energiei disipate  $W_d$  cu numărul ciclurilor de solicitare  $N$ , pentru  $F_n = 200$  N și  $f = 5$  Hz:  
 - - - - - epruveta erodată E1/2  
 ————— epruveta erodată E2/2

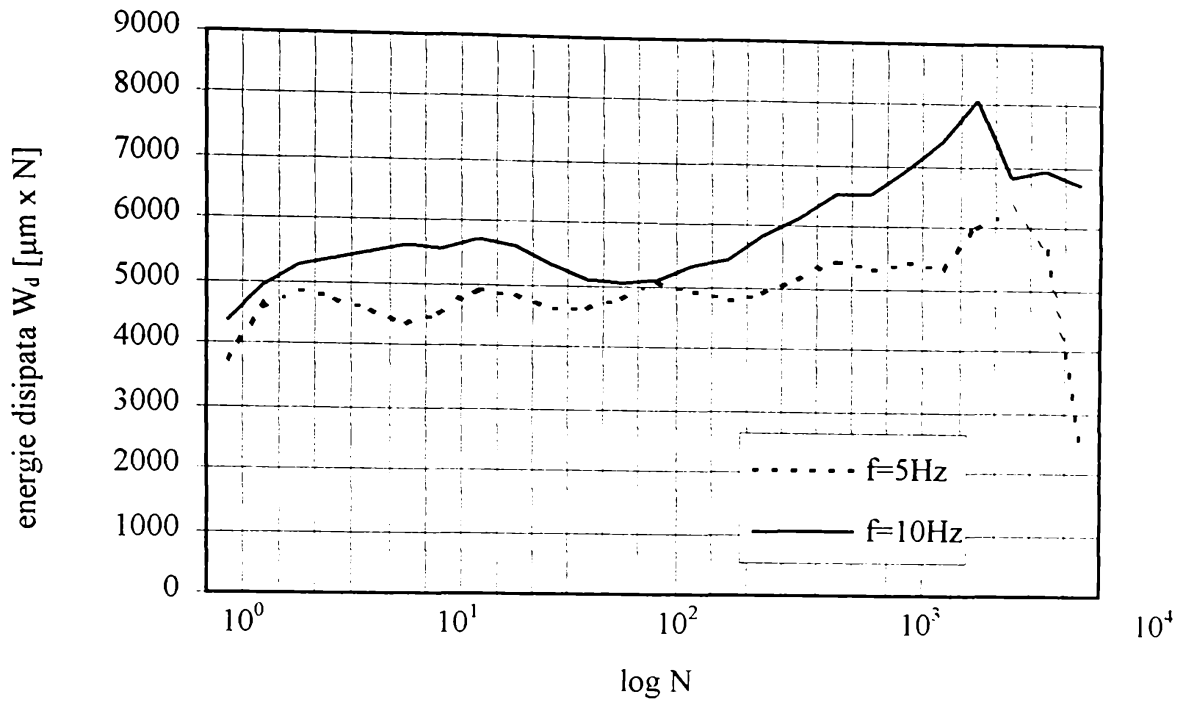


Fig. 3.95 Variația energiei disipate  $W_d$  cu numărul ciclurilor de solicitare  $N$ , pentru  $F_n = 800$  N și  $D = 10$   $\mu\text{m}$ :  
 - - - - - epruveta erodată E1/1  
 — epruveta erodată E3/1

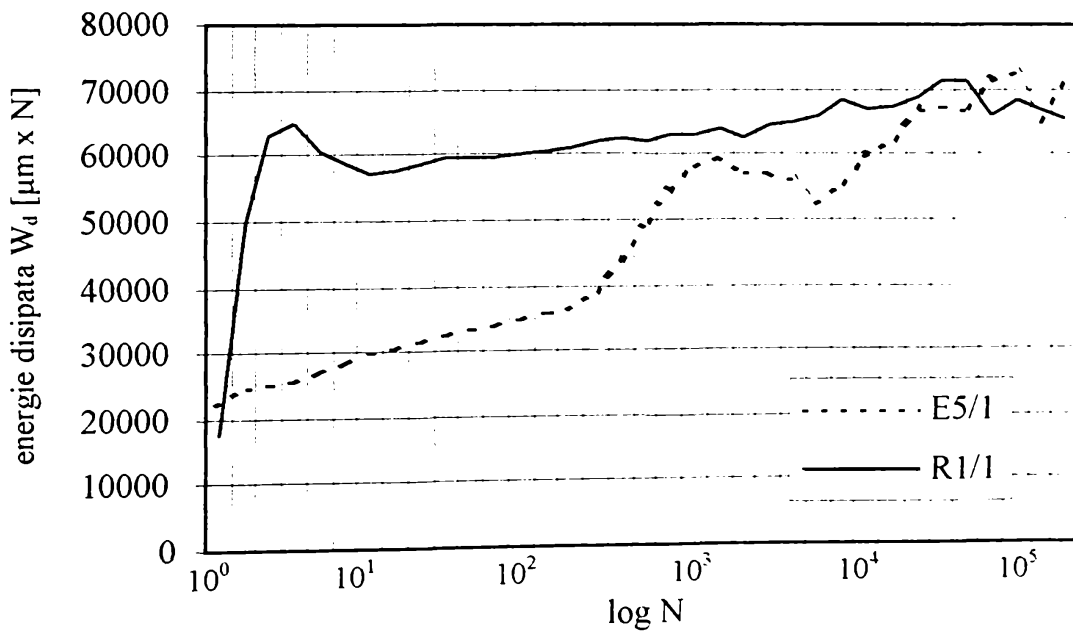


Fig. 3.96 Variația energiei disipate  $W_d$  cu numărul ciclurilor de solicitare  $N$ , pentru  $D = 40$   $\mu\text{m}$ ,  $F_n = 700$  N și  $f = 5$  Hz  
 - - - - - epruveta erodată E5/1  
 — epruveta erodată R1/1



Trebuie remarcat însă că influența exercitată de modificarea amplitudinii deplasărilor  $D$  asupra energiei disipate  $W_d$  este mult mai puternică decât cea exercitată asupra coeficientului de frecare  $\mu$  (vezi, comparativ, figurile 3.93 și 3.90, respectiv 3.94 și 3.91).

Evoluția energiei disipate cumulativ  $W_{dcum}$  cu numărul de cicluri de solicitare  $N$  (figura 3.97), în cazul încercării de uzare de fretting cu durata cea mai mare (tabelul 3.10, număr curent 10,  $N = 260000$  cicluri) arată că pe termen lung energia disipată în procesele de frecare a suprafețelor anizotrope (epruveta R1/1) depășește cu numai câteva procente energia disipată corespunzătoare suprafețelor izotrope (epruveta E5/1).

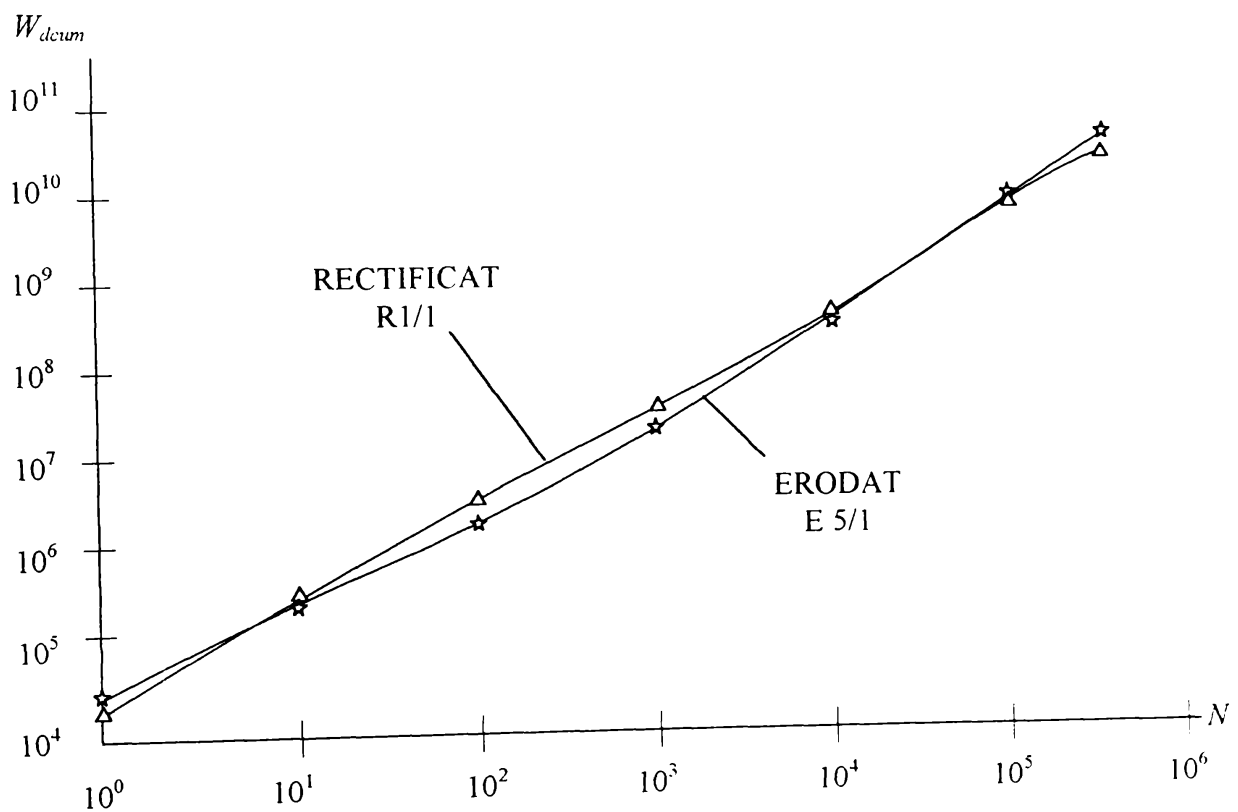


Fig 3.97 Variația energiei disipate  $W_{dcum}$  cu numărul de cicluri de solicitare  $N$

## 3.4 Concluzii

### 3.4.1 Investigarea optică interferometrică

Analizând rezultatele experimentale obținute în urma investigării optice interferometrice a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă se pot formula următoarele concluzii sintetice:

1) funcțiile densitate de repartiție și respectiv funcțiile de repartiție normate, teoretice și empirice, ale înălțimii profilului de rugozitate, sunt în deplină concordanță, ceea ce probează caracterul de variabilă aleatoare de repartiție normală (gaussiană) al acesteia;

2) valorile coeficientului de exces  $R_{ku}$  au valori extrem de apropiate și includ valoarea  $R_{ku} = 3$ , specifică repartiției normale a înălțimii neregularităților profilului de rugozitate;

3) valorile coeficientului de asimetrie  $R_{sk}$ , foarte mici în valoare absolută, sunt concentrate în jurul valorii  $R_{sk} = 0$ , definatorii pentru repartiția profilelor de rugozitate simetrice;

4) se remarcă, de asemenea, că la reducerea nivelului de rugozitate a suprafețelor analizate se accentuează robustețea profilului de rugozitate,  $R_{sk}$  devine negativ, iar variația coeficientului  $R_{ku}$  marchează trecerea de la o repartiție restrânsă ( $R_{ku} < 3$ ) la o repartiție extinsă ( $R_{ku} > 3$ );

5) odată cu creșterea înălțimii neregularităților, prezența unei componente periodice în structura aleatoare a microgeometriei suprafeței se accentuează, fapt confirmat prin forma specifică-amortizată periodică a funcțiilor de autocorelație și de densitate spectrală de putere.

6) imaginile tridimensionale ale microgeometriei suprafețelor relevă structura microgeometrică aleatoare, izotropă, caracteristică prelucrării prin eroziune electrică;

7) se evidențiază caracterul multiscalar al structurii microgeometriei suprafețelor cu rugozitate izotropă determinat de spectrul larg al lungimilor de undă/frecvențelor integrate.

Analiza comparativă a rezultatelor obținute în urma investigării optice interferometrice a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă (erodate) și a celor cu rugozitate anizotropă (rectificate) a permis evidențierea următoarelor concluzii:

1) ambele tipuri de suprafețe prezintă, dincolo de diferențele microgeometrice evidențiate de imaginile tridimensionale corespunzătoare (suprafața erodată-structură microgeometrică aleatoare, izotropă, iar suprafața rectificată-structură geometrică orientată, conținând striuri rectilinii), o distribuție a înălțimii neregularităților predominant aleatoare;

2) din punct de vedere al densității de repartiție a înălțimilor profilului de rugozitate, exprimată prin valorile coeficienților  $R_{sk}$  și  $R_{ku}$ , profilul suprafeței rectificată are o configurație mai fragilă;

3) se remarcă similitudinea alurii curbelor funcțiilor de autocorelație ale celor două tipuri de suprafețe, apropiate atât prin valorile indicatorilor de înălțime a rugozității, cât și prin valorile lungimii de autocorelație;

4) capacitatea portantă a suprafețelor erodate este semnificativ mai mare decât a suprafețelor rectificată, chiar în condițiile în care rugozitatea suprafețelor erodate a fost superioară rugozității suprafețelor rectificată;

5) pe suprafața erodată numărul și densitatea golurilor sunt superioare numărului și densității proeminențelor, în timp ce pe suprafețele rectificată raportul respectiv este inversat, deși apropiat de unitate;

6) diferențe esențiale între suprafețele erodate și rectificată sunt puse în evidență prin valorile semnificativ mai mari ale pantei medii generale la nivelul vârfurilor reprezentative și respectiv al proeminențelor și golurilor rugozității suprafețelor erodate în raport cu cele rectificată; pantele medii ale proeminențelor sunt apropiate de cele ale golurilor, cu un ușor ascendent pentru goluri (la suprafețele erodate), respectiv pentru proeminențe (la suprafețele rectificată); valorile medii ale razei de curbura a vârfurilor reprezentative ale suprafețelor erodate sunt semnificativ inferioare, în condițiile date, valorilor corespunzătoare ale suprafețelor rectificată.

### 3.4.2 Încercarea de uzare de fretting

Analiza bazei de date rezultată în urma prelucrării rezultatelor experimentale permite formularea următoarelor concluzii sintetice privind încercarea la uzare de fretting a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă:

a) între factorii de influență analizați, amplitudinea deplasărilor  $D$ , are cea mai mare influență atât asupra criteriului de tranziție A-“energie” cât și asupra criteriului de tranziție B-“deschidere”, valorile acestor criterii crescând odată cu creșterea amplitudinii deplasărilor. Forța normală  $F_n$ , este un factor de influență de importanță secundară, atât pentru criteriul B-“deschidere”, cât și pentru criteriul A-“energie”,  $F_n$  variind invers proporțional cu valorile celor două criterii. Frecvența,  $f$ , este un factor de importanță neglijabilă pentru ambele criterii considerate. Ierarhizarea factorilor de influență stabilită pe baza modelării experimentale este

confirmată și de imaginile amprentelor suprafețelor încercate la uzare de fretting; se observă că modificarea amplitudinii deplasărilor la forță constantă, produce un efect semnificativ mai puternic asupra stării suprafețelor analizate, decât modificarea forței normale;

b) modelele experimentale obținute pe baza experimentului factorial, permit, pentru ambele criterii de tranziție, o estimare a valorilor acestora cu o probabilitate de încredere de peste 95%, ceea ce garantează valabilitatea lor practică; suprafețele de răspuns trasate pe baza acestor modele, pentru factorii de influență mai importanți ( $D$  și  $F_n$ ) au practic aceeași formă pentru ambele criterii, pentru un număr dat de cicluri;

c) hărțile solicitărilor locale dezvoltate în cadrul încercării de uzare la fretting cuprind zonele de alunecare totală și de tranziție alunecare totală-alunecare parțială pentru ambele criterii, pe baza valorilor acestora putându-se face o apreciere rapidă a perechii ( $D$ ,  $F_n$ ), în condiții date, care definesc un anumit regim de solicitare a materialului; este de remarcat faptul că utilizarea metodei experimentului factorial a permis trasarea pentru prima dată a acestor hărți în zone de interes tribologic, apelându-se la un număr redus de încercări; se observă, de asemenea, că hărțile corespunzătoare celor două criterii de tranziție, A și B, sunt practic identice, fapt ce confirmă, în domeniul analizat, echivalența celor două criterii cantitative.

d) în condițiile date, coeficientul de frecare  $\mu$  al suprafețelor erodate are valori mai mari, pentru amplitudini  $D$  mai mari ale deplasărilor, evoluția sa în timp fiind rapidă; pentru o valoare dată a amplitudinii, evoluția coeficientului de frecare are aceeași alură, la forțe  $F_n$ , diferite, dar creșterea lui se produce mai repede la forțe de valori mai mari; modificarea frecvenței ciclurilor,  $f$ , nu influențează semnificativ evoluția coeficientului de frecare;

e) evoluția în timp a energiei disipate  $Wd$  este similară cu cea a coeficientului de frecare; pentru aceleași condiții analizate, se poate aprecia că influența amplitudinii deplasărilor este semnificativ mai mare decât în cazul coeficientului de frecare;

f) creșterea semnificativă a coeficientului de frecare metal-metal se realizează după aproximativ 100 cicluri, trecerea de la două la trei corpuri, cu crearea "patului de pulbere", având loc la peste  $10^3$  cicluri, în condițiile unor amplitudini mari și forțe normale mici; în cazul amplitudinilor mici și forțelor normale mari, creșterea coeficientului de frecare se realizează abia la  $N > 10^3$  cicluri, îndepărtarea de material fiind suficient de mică, încât până la  $10^4$  cicluri nu se realizează formarea celui de-al treilea corp; în cazul forțelor  $F_n$  de valoare ridicată și a amplitudinilor  $D$  mici, trecerea de la regim de alunecare totală la alunecare parțială se realizează la peste  $5 \cdot 10^3$  cicluri, fără formarea, în prealabil, a celui de al treilea corp; deci cea

mai puternică uzare a suprafeței se constată la creșterea amplitudinii  $D$  și diminuarea forței  $F_n$ ; modificarea frecvenței ciclurilor  $f$  nu modifică semnificativ această evoluție;

g) toate amprente obținute în urma realizării încercărilor sunt însoțite de inelul de particule oxidate specific fenomenului de fretting, mărimea inelului variind în funcție de tendințele constatate anterior; astfel sunt puse în evidență particule oxidate desprinse, denumite “rulouri” și microfisuri ale stratului superficial, care evidențiază modul de uzare al suprafețelor, sub influența factorilor amplitudine (direct proporțională) și forță normală (invers proporțională), confirmându-se astfel fenomenologia prezentată în §2.3.2.2.

Realizând o analiza comparativă a caracteristicilor de uzare, frecare și disipare de energie ale suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă și anizotropă, s-au constatat următoarele:

a) creșterea valorii coeficientului de frecare  $\mu$ , în cazul suprafețelor cu rugozitate anizotropă (rectificate), are loc foarte rapid, pentru  $N \leq 10$  cicluri, după care valoarea acestuia rămâne practic constantă, în timp ce suprafețele cu rugozitate izotropă (erodate) ating aceste valori ale coeficientului de frecare la  $N > 10^3$  cicluri, după care, practic, ambele tipuri de suprafețe se comportă similar, semn că influența rugozității inițiale a dispărut, și, în urma procesului de uzare de fretting, suprafețele au devenit echivalente;

b) tendința energiei disipate  $Wd$  în timpul ciclurilor de fretting este similară cu cea a coeficientului de frecare;

c) mecanismul de uzare a suprafețelor cu formarea celui de-al treilea corp și expulzarea pulberii are loc mai rapid în cazul suprafețelor cu rugozitate anizotropă decât a celor cu rugozitate izotropă, dar ambele tipuri de suprafețe manifestă aceleași tendințe de evoluție; după un anumit număr de cicluri, care este cu atât mai mare cu cât amplitudinea oscilațiilor este mai mică și forța normală mai mare, ce corespunde unei uzări mai reduse a suprafețelor, cele două suprafețe se comportă identic;

d) tendința de tranziție de la regimul de solicitare de alunecare parțială la regimul de solicitare de alunecare totală, în cazul suprafețelor cu rugozitate izotropă, apare la un număr de cicluri mai mare decât în cazul suprafețelor cu rugozitate anizotropă;

e) în cazul suprafețelor cu rugozitate anizotropă ierarhiile factorilor de influență, evidențiate anterior, se păstrează, cu particularitatea că influența forței  $F_n$  este mult mai apropiată valoric de influența lui  $D$ , atât pentru criteriul B-“deschidere” cât și pentru criteriul A-“energie”;

f) suprafețele de răspuns ale criteriilor de tranziție B-“deschidere” și A-“energie” în funcție de factorii de influență  $D$  și  $F_n$ , precum și hărțile de solicitare locală a materialului.

obținute prin secționarea suprafețelor de răspuns cu plane orizontale, în cazul suprafețelor cu rugozitate anizotropă prezintă aceleași caracteristici cu cele întâlnite la suprafețele cu rugozitate izotropă;

g) în concluzie, se poate afirma că ambele tipuri de suprafețe de contact, cu rugozitate izotropă și cu rugozitate anizotropă, supuse fenomenului de uzare de fretting, au aceleași tendințe generale de evoluție, în cazul suprafețelor cu rugozitate izotropă evoluția fiind mai lentă (la  $N > 10^3$  cicluri), decât în cazul celor cu rugozitate anizotropă (la  $N \approx 10^1-10^2$  cicluri).

## Capitolul 4

# CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

### 4.1 Concluzii generale

Analiza de ansamblu a tezei de doctorat elaborate arată că principalele obiective ale acesteia, și anume: definirea și evaluarea caracteristicilor microgeometrice, precum și evidențierea particularităților de comportament tribologic a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă, prin prisma corelațiilor existente între caracteristicile tribologice și rugozitatea suprafețelor, au fost îndeplinite.

Lucrarea se bazează pe o vastă și profundă documentare bibliografică care a permis definirea clară a stadiului actual al cercetării corelațiilor dintre microgeometria și comportamentul tribologic al suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă.

Principalele preocupări și tendințe actuale în domeniul conținutului tezei de doctorat sunt următoarele:

- 1) extinderea continuă a modului de gândire sistemic în cercetările tribologice;
- 2) crearea unor premise favorabile pentru raționalizarea sistemului de parametri structurali și funcționali standardizați și nestandardizați, necesari și suficienți pentru definirea și evaluarea rugozității și pentru estimarea comportamentului tribologic al suprafețelor de contact, prin afirmarea și folosirea pe scară tot mai largă a parametrilor care definesc forma concretă a neregularităților (înălțime, spațiere, înclinare și curbură) și respectiv a parametrilor statistici și globali, raportați la arii tot mai mari ale suprafețelor investigate;
- 3) creșterea interesului pentru introducerea și aplicarea unor criterii de discriminare obiectivă a suprafețelor de contact cu rugozitate anizotropă și izotropă, ceea ce probează mărirea importanței și disponibilității celor din urmă;
- 4) dezvoltarea concurrentă a abordării bi și tridimensionale în definirea și evaluarea rugozității suprafețelor de contact, atât pe plan teoretic, cât și pe plan experimental; devine tot mai evident că, în raport cu evoluția actuală a exigențelor impuse tehnologiilor de fabricație și funcționalității sistemelor tehnice, abordarea tridimensională, geometria fractală și sistemele

optice de evaluare a rugozității reprezintă domenii de vârf ale progresului științific și tehnologic;

5) deplasarea centrului de interes al cercetărilor tribologice din sfera corpurilor individuale constitutive ale cuplelor de frecare în sfera suprafețelor limită și interfețelor de contact ale acestora, care controlează transferul de energie, masă și informație, cu promovarea preocupărilor care vizează înțelegerea conexiunilor dintre topografia suprafețelor și performanțele funcționale ale sistemelor tehnice implicate;

6) investigarea prioritara a unor procese tribologice de mare complexitate fenomenologică, incidență largă și impact semnificativ asupra fiabilității cuplelor de frecare, cum ar fi de exemplu, în perioada actuală, procesele de oboseală, uzare și coroziune de fretting;

7) promovarea cercetărilor tribologice avansate, asistate de calculator, atât pe plan teoretic - dezvoltarea unor modele matematice adecvate, rezolvabile numeric, cât și pe plan experimental - instalații de încercare de mare performanță, precise și fiabile, capabile de achiziționarea, prelucrarea, modelarea și reprezentarea automată, în timp real, a datelor de măsurare.

În ceea ce privește partea fundamentală a tezei de doctorat, constituită în Capitolul 3, cu titlul "Investigarea experimentală a caracteristicilor suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă", din considerentele expuse la §2.4, s-a optat pe plan conceptual pentru recurgerea la cercetarea experimentală, organizată pe principii de analiză factorială și regresională, cercetare bazată pe investigarea optică interferometrică și respectiv pe investigarea la uzare de fretting a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă și, pentru comparație, anizotropă.

S-a acordat prioritate evaluării parametrilor și caracteristicilor capabile să pună în evidență legătura dintre rugozitatea suprafețelor de contact și comportamentul tribologic al acestora și respectiv legităților de cauzalitate și criteriilor de tranziție a tribo-sistemelor de la regimul nominal de funcționare la regimul de avarie.

Au fost utilizate, practic exclusiv, aparate de măsură și instalații de încercare avansate, integrate cu calculator și cu sisteme de prelucrare electronică a imaginilor, existente și accesibile în afara țării.

A fost prelucrată și interpretată baza de date obținute pe parcursul măsurărilor și încercărilor efectuate, în vederea valorificării cât mai complete a volumului de informații disponibil.



Corespunzător obiectivelor tezei de doctorat s-a urmărit cuplarea rezultatelor obținute prin utilizarea noilor metode de definire, evaluare și modelare a rugozității suprafețelor de contact cu posibilitățile de predicție și evaluare experimentală a caracteristicilor tribologice ale acestora, în general și cu criteriile de tranziție dintre diferitele regimuri funcționale ale cuplelor cinematice constituite, în particular. Pe această bază, cercetarea experimentală a fost orientată conceptual pe două direcții principale, și anume:

- investigarea optică interferometrică a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă în vederea definirii particularităților esențiale ale acestora, din punct de vedere structural și funcțional, prin verificarea normalității repartiției înălțimii neregularităților, prin măsurarea caracteristicilor referitoare la înălțimea, spațierea, înclinarea și curbura neregularităților și, în fine, prin determinarea și reprezentarea funcțiilor de autocorelație, densitate spectrală și de portanță specifice acestora;

- investigarea comportării la uzare de fretting a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă în vederea ierarhizării și modelării empirice a factorilor determinanți ai criteriului de tranziție alunecare parțială-alunecare totală în condițiile uzării de fretting și pentru evidențierea morfologiei și aspectelor energetice asociate proceselor de frecare și proceselor de uzare de fretting intervenite.

În toate cazurile descrise aparatura de măsurare și încercare folosită a asigurat achiziționarea, prelucrarea, modelarea și reprezentarea automată, în timp real, a datelor de măsurare primare.

Din punct de vedere metodic, cercetările au fost organizate pe principiile planificării statistice factoriale și regresionale a experimentării.

Analiza bazei de date creată în urma prelucrării rezultatelor experimentale a permis evidențierea următoarelor concluzii generale:

- s-a confirmat natura gaussiană a repartiției înălțimilor neregularităților și natura multiscalară a structurii microgeometriei suprafețelor cu rugozitate izotropă, prelucrate prin eroziune electrică;

- s-a caracterizat microgeometria suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă și pentru comparație, anizotropă, prin mulțimea parametrilor de înălțime, spațiere, înclinare și curbură;

- s-a demonstrat superioritatea suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă în raport cu cele cu rugozitate anizotropă din punctul de vedere al capacității portante, retenției de lubrifiant și comportării la uzare de fretting;

- s-a stabilit ierarhia factorilor de influență ai criteriilor de tranziție alunecare parțială-alunecare totală la uzare de fretting a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă în succesiunea: amplitudinea deplasărilor, forța normală și frecvența ciclurilor de solicitare;

- s-a determinat modelul matematic polinomial de ordinul I al criteriilor de tranziție alunecare parțială-alunecare totală în condițiile uzării de fretting a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă;

- s-au construit hărțile solicitărilor locale și “trunchiurile de frecare” și s-au pus în evidență principalele transformări morfologice ale suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă în condițiile uzării de fretting;

- s-au evidențiat legile de variație ale coeficientului de frecare și energiei disipate în condițiile uzării de fretting a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă.

## 4.2 Contribuții originale

Contribuțiile originale cu caracter general principial sunt:

1.1) investigarea optică interferometrică a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă, prelucrate prin eroziune electrică și pentru comparație a suprafețelor de contact cu rugozitate anizotropă, prelucrate prin rectificare plană;

1.2) investigarea la uzare de fretting a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă, prelucrate prin eroziune electrică și pentru comparație a suprafețelor de contact cu rugozitate anizotropă, prelucrate prin rectificare plană;

1.3) aplicarea metodei de planificare statistică a experimentărilor (analiză factorială și regresională) la:

- ierarhizarea factorilor determinanți ai criteriilor A și B de tranziție alunecare parțială-alunecare totală, în condițiile uzării de fretting;
- modelarea empirică polinomială a criteriilor A și B de tranziție alunecare parțială-alunecare totală.

Contribuțiile originale cu caracter particular aplicativ sunt:

2.1) definirea stadiului actual al cercetării caracteristicilor microgeometrice și tribologice ale suprafețelor de contact, prin analiza critică și creativă a unui material bibliografic actual, vast și la obiect, cu elemente de originalitate în structurarea informațiilor, referitoare la:

- aplicarea geometriei fractale în evaluarea caracteristicilor microgeometrice ale suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă;
- sinteza tehnicilor de evaluare a parametrilor de rugozitate a suprafețelor de contact;
- corelarea comportamentului tribologic cu rugozitatea suprafețelor de contact.

2.2) confirmarea naturii gaussiene a repartiției înălțimilor neregularităților și naturii multiscalare a structurii microgeometriei suprafețelor cu rugozitate izotropă, prelucrate prin eroziune electrică;

2.3) caracterizarea microgeometriei suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă și prin comparație, anizotropă, prin mulțimea parametrilor de înălțime, spațiere, înclinare și curbură;

2.4) demonstrarea superiorității suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă în raport cu cele cu rugozitate anizotropă din punctul de vedere al capacității portante, chiar în condițiile unor parametri de înălțime a neregularităților superiori ai suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă;

2.5) stabilirea ierarhiei factorilor de influență ai criteriilor de tranziție dintre regimurile de solicitare de alunecare parțială - alunecare totală la uzarea de fretting a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă în succesiunea amplitudinea deplasărilor, forța normală și frecvența ciclurilor de solicitare;

2.6) determinarea modelului matematic polinomial de ordinul I al criteriilor de tranziție dintre regimurile de solicitare de alunecare parțială - alunecare totală în condițiile uzării de fretting a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă și reprezentarea grafică a acestuia în funcție de principalii factori de influență;

2.7) construcția hărților solicitărilor locale și “trunchiurilor de frecare” în condițiile uzării de fretting a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă;

2.8) punerea în evidență a principalelor transformări morfologice ale suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă în condițiile uzării de fretting;

2.9) evidențierea legilor de variație ale coeficientului de frecare și energiei disipate în condițiile uzării de fretting a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă.

### 4.3 Perspective

Toate contribuțiile originale cu caracter principial și majoritatea covârșitoare a contribuțiilor originale cu caracter aplicativ (excepție 2.1) reprezintă priorități ale literaturii de specialitate, priorități determinate de aplicarea în premieră a unor metode, tehnici sau tehnologii avansate, ca de exemplu analiză factorială și regresională, interferometrie optică, uzare de fretting, integrate cu calculator, în evaluarea și studiul comportamentului tribologic al suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă.

Departa de a epuiza multitudinea aspectelor și detaliilor problematicei abordate, prezenta teză de doctorat se dorește și reprezintă de fapt exclusiv o deschidere către aprofundarea valențelor excepționale ale suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă.

O asemenea aprofundare este pe deplin justificată de rezultatele pozitive obținute în teza de doctorat. Ea va trebui să ofere potențialilor beneficiari din știință și tehnologie recomandări de utilizare și criterii de selecție a suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă realizate prin diferite tehnologii de fabricație.

## BIBLIOGRAFIE

- [A1] The American Society of Mechanical Engineers, *An American National Standard-Surface Texture (Surface Roughness, Waviness and Lay)*, ANSI/ASME B46.1-1985.
- [A2] Aspinwall, D.K., ș.a., *Electrical discharge texturing*, Int. J. Mach. Tools Manufact., vol.32, nr. 1/2, pag. 183-193, 1992.
- [A3] Archard, J.F., *Surface topography and tribology*, Tribology International, pag. 213-220, october 1974.
- [A4] Assenova, E., Danev, K., *Fractal-information approach in tribology*, Tribologija u industriji, godina XV, pag. 7-12, 1993.
- [A5] ATOS GmbH, *Promap-512 Optical Profilers*, prospect publicitar, 1991.
- [B1] Babić, M., Jeremić, B., *Specifičnosti ispitivanja trenja i habanja na tribometrima*, Tribologija u industriji, godina XIV, pag. 77-83, 1992.
- [B2] Balekics, M., *Tribologie (frecare, uzare, ungere)*, curs, Lito. Universitatea tehnică, Timișoara, 1991.
- [B3] Brodman, R., *An optical Surface Roughness Instrument for use in production*, "Feinwerktechnik & Messtechnik", vol. 91, nr.2, pag.63-66, 1983.
- [B4] Böhm, H-J., *Parameters for evaluating the wearing behaviour of surfaces*, Int. J. Mach. Tools Manufact., vol.32, nr. 1/2, pag. 109-113, 1992.
- [C1] Czichos, H., *Sistemnyi analiz v tribonike*, Moskva, "Mir", 1982.
- [C2] Cros, J-F., *La mesure de rugosité*, Dossier Mesures, pag.7-19, 1984.
- [C3] Conway-Jones, J.M., Eastham, D.R., *Parameters for control of roughness of surfaces operating with thin oil films*, Int. J. Mach. Tools Manufact., vol.35, nr. 2, pag. 253-257, 1995.
- [C4] Chen, X., Raja, J., Simanapelli, S., *Multi-scale analysis of engineering surfaces*, Int. J. Mach. Tools Manufact., vol.35, nr. 2, pag. 231-238, 1995.
- [C5] Carton, J.-F., Vannes, A.-B., Vincent, L., *Basis of a coating choice methodology in fretting*, Wear, vol. 185, pag. 47-57, 1995.
- [C6] Crudu, I., *On the concept of tribo-system and a tribo-modelling criterion*, Proc. of the 4<sup>th</sup> European Tribology Congress, Eurotrib'85, Lyon, vol. IV, 1985.
- [D1] Dagnall, H., *Exploring surface texture*, Rank Taylor Hobson, Leicester, England, 1980.
- [D2] Daniel, D.,Caplain, R., *Methodes usuelles de caracterisation des surfaces*, Societé française de métallurgie, Eyrolles, France, 1988.
- [D3] Dodoc, P., *Teoria și construcția aparatelor optice*, vol.II, Editura Tehnică, București, 1989.
- [D4] Dick, O., *Fractali*, Ed. Teora, București, 1996.
- [D5] Daoud, M., *Comportement tribologique de composites unidirectionnels verre epoxy sous sollicitation de fretting*, these presentee devant l'Ecole centrale de Lyon pour obtenir le titre de docteur, specialite: Materiaux, soutenue le 21 novembre 1996.

- [D6] Deck, de Groot P., *High-speed noncontact profiler based on scanning white light interferometry*, Int. J. Mach. Tools Manufact., vol.35, nr. 2, pag. 147-150, 1995.
- [F1] Fouvry, S., *Etude quantitative des dégradations en fretting*, these presentee devant l'Ecole centrale de Lyon pour obtenir le titre de docteur, specialite: Materiaux, soutenue le 9 janvier 1997.
- [F2] Fouvry, S., Kapsa, Ph., Vincent, L., *Analysis of sliding behaviour for fretting loadings: determination of transition criteria*, Wear, vol. 185, pag. 35-46, 1995.
- [F3] Foster, B., *Scanning white light interferometry-a powerfull approach to surface structure analysis*, American Laboratory, 1994.
- [G1] Galante, G., Lombardo, A., Piacentini, M., *Fractal dimension:a useful tool to describe the microgeometry of machined surfaces*, Int. J. Mach. Tools Manufact., vol.33, nr. 4, pag. 525-530, 1993.
- [G2] Gao, H., Xue, S.F., Li, Q.X., Yan, P.Q., *Noncontact surface roughness measurement*, SPIE, vol. 2101, Measurement Technology and Intelligent Instruments, pag. 959-962, 1993.
- [G3] Griffiths, B., Middleton, R., Wilkie, B, *Three- dimensional surface measurement using light scattering*, , Int. J. Mach. Tools Manufact., vol.35, nr. 2, pag. 141-145, 1995.
- [H1] Hasegawa, M., ş.a., *Statistical consideration on the caracterization of Engineering Surface*, Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., vol. 17, nr. 3, pag. 207-208, 1983.
- [H2] Hasegawa, M., ş.a., *Calculation of the fractal dimensions of machined surface profiles*, Wear, vol. 192, nr. 1-2, pag. 40-45, 1996.
- [K1] King, T.G., Houghton, N.E., *Describing distribution shape:  $R_k$  and central moment approaches compared*, Int. J. Mach. Tools Manufact., vol.35, nr. 2, pag. 247-252, 1995.
- [K2] Kragelsky, I.V., *Friction Wear Lubrification (Tribology Handbook)*, Mir Publishers Moscow (vol.1-1981).
- [K3] Kuzinovski, M., *Istraživanje visinskih parametara profila hrapavosti obradene površine pri struganju*, Tribologija u industriji, godina XIV, 1992.
- [K4] Kubo, M., Peklenik, J., *An analysis of micro-geometrical isotropy for random surface structure*, Annals of the CIRP, vol. XVI, pag. 235-242, 1968.
- [K5] Kjeldsteen, P., *Korrelation der Oberflächen-topographie mit tribologischen Eigenschaften*, Tribologie&Schmierungstechnik, vol. 43, nr. 6, pag. 333-336, 1996.
- [K6] Kharrat, M., *Caracterisation micro-mecanique de l' interface fibre matrice dans les composites verre/epoxy*, these presentee devant l'Ecole centrale de Lyon pour obtenir le titre de docteur, specialite: Materiaux, soutenue le 21 novembre 1996.
- [L1] Lopez, J., ş.a., *3-D fractal-based characterization for engineered surface topography*, Int. J. Mach. Tools Manufact., vol.35, nr. 2, pag. 211-217, 1995.
- [M1] Michalski, J., Pawlus, P., *Description of honed cylinders surface topography*, Int. J. Mach. Tools Manufact., vol.34, nr. 2, pag. 199-210, 1994.
- [M2] Moisil, G., Curatu, E., *Optică-Teorie și aplicații*, Editura Tehnică, București, 1986.
- [M3] Montgomery D.C., *Design and analysis of experiments*, John Willey & Sons, New York, 1991.

- [M4] Mathia, T., Zahouani, H., Rousseau, J., Le Bosse, J.C., *Functional significance of different techniques for surface morphology measurements*, Int. J. Mach. Tools Manufact., vol.35, nr. 2, pag. 195-202, 1995.
- [N1] Nichici, A., Popovici, V., ș.a., *Prelucrarea prin eroziune în construcția de mașini*, Ed. Facla, Timișoara, 1983.
- [N2] Nichici, A., ș.a., *Contribuții la studiul rugozității suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică*, Conferința Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, pag. 257-264, 1983.
- [N3] Nowicki, B., *Investigations on the surface roughness range*, Annals of the CIRP, vol. 30, nr. 1, pag. 493-497, 1981.
- [N4] Nichici, A., Cicală, E., Mee, R., *Prelucrarea datelor experimentale*, Curs și aplicații, Centrul de multiplicare, Univ. "Politehnica" Timișoara, 1996.
- [O1] Olaru, D., *Tribologie-elemente de bază asupra frecării, uzării și ungerii*, Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" Iași, Facultatea de mecanică, 1995.
- [O2] Ogilvy, J.A., *Numerical simulation of friction between contacting rough surfaces*, Journal of Physics, D: Appl. Phys., vol. 24, fasc. 11, pag. 2098-2109, 1991.
- [P1] Pavelescu, D., *Concepții noi, calcul și aplicații în frecarea și uzarea solidelor deformabile*, Editura Academiei R.S.R., 1971.
- [P2] Pavelescu, D., Mușat, M., Tudor, A., *Tribologie*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1977.
- [P3] Peitgen, H.O., Saupe, D., (editors), *The science of fractal images*, Springer Verlag, New York, 1988.
- [P4] Pavelescu, D., Tudor, A., *On the study of some engineering surfaces with fractal and statistical methods*, Romanian Academy, The Annual Symposium of the Institute of solid mechanics, pag. 13-20, Bucharest, 1992.
- [P5] Pavelescu, D., Tudor, A., *On the fractal and statistical calculus concerning a curved and rough engineering surface contacting a smooth plane*, Rev. Roum. Sci. Techn. Mec. Appl., Tome 39, nr. 4, pag. 431-439, 1994.
- [P6] Pavelescu, D., *Tribotehnica-principii noi și aplicații privind frecarea, uzarea și ungeria mașinilor*, Editura tehnică, București, 1983.
- [R1] Rac, A., *Osnovi tribologije*, Mašinski Fakultet Univerziteta u Beogradu, 1991.
- [R2] Rac, A., *Prediction of tribological behaviour of surface treated materials using a pin/disk device*, Tribologija u industriji, godina XIV, nr.3, 1992.
- [R3] Rudzit, I.,A., *Mikrogeometria i kontaknoje vzaimodejstvije poverchnostej*, Izd. Zinatne, Riga, 1975.
- [S1] Institutul Român de Standardizare, *STAS 5730-85*.
- [S2] Shiraishi, M., *A consideration of surface roughness measurement by optical method*, Journal of Engineering for Industry, vol. 109, pag. 100-105, mai 1987.
- [S3] Scherer, L., *La détermination des états de surface*, Société de Publications Mécaniques, pag. 77-108, 1990.
- [S4] Stout, K. J., Blunt, L.A., *Application of 3-D topography to bio-engineering*, Int. J. Tools Manufact. Vol. 35, No.2, pag. 219-229, 1995.



- [S5] Sasajima, K., Tsukada, T., *Measurement of fractal dimension from surface asperity profile*, Int. J. Mach. Tools Manufact., vol.32, nr. 1/2, pag. 125-127, 1992.
- [S6] STATGRAPHICS, *Reference Manual*, Manugistic, 1992.
- [S7] Salisbury, E.I., Moon, K.S., Sutherland, J.W., *Development of a microscopic laser interferometry system for precision surface measurement*, Trans. ASME-Journal of Engineering for Industry, vol. 117, november, pag. 619-624, 1995.
- [S8] Sullivan, P., Poroskin, V., Hooke, C., *Application of a three-dimensional surface analysis system to the prediction of asperity interaction in metallic contacts*, Int. J. Mach. Tools Manufact., vol.32, nr. 1-2, pag. 157-169, 1992.
- [T1] Toporec, A.S., *Optika šerohovatoj poverhnosti*, Izd. Mašinstroenie, Leningrad, 1988.
- [T2] Tudor, A., *Contactul real al suprafețelor de frecare*, Editura Academiei Române, București, 1990.
- [T3] Tânjală, L.C., Vincent, L., Tudor, A., *Sinteza privind mecanismele fenomenului de fretting*, Revista "Construcția de mașini", nr. 7-9, pag. 39-45, 1996.
- [T4] Tiron, M., *Prelucrarea statistică și informațională a datelor de măsurare*, Editura Tehnică, București, 1976.
- [T5] Teague, E.C., Vorburger, T.V., Maystre, D., *Light scattering from manufactured surfaces*, Annals of the CIRP, vol. 30/2, pag. 563-569, 1981.
- [V1] Vannes, A.B., Vincent, L., *Lasers de puissance et traitements des matériaux*, Presses polytechniques et universitaires Romandes, Laussane, pag. 277-303, 1991.
- [V2] Vincent, L., *Materials and fretting*, Fretting Fatigue ESIS 18 (Editing by R.B. Waterhouse and T.C. Lindley), Mechanical Engineering Publications, London, pag. 323-337, 1994.
- [V3] Vorburger, T.V., *Measurements of roughness of very smooth surfaces*, Annals of the CIRP, vol. 36/2, pag. 503-509, 1987.
- [W1] WYKO Corporation, *Rough Surface Tester-Model RST*, prospect publicitar, 1994.
- [W2] Whitehouse, D.I., *Comparison between stylus and optical methods for measuring surfaces*, Annals of the CIRP, vol. 37/2, p. 649-653, 1988.
- [Z1] Zachel, R., *Introduction à la technique de la lubrification*, Molykote (division de DOW CORNING S.A.), Lyon, France, pag.22-38, 1991.
- [Z2] Zsivanov, D., *Tendințe în evaluarea rugozității suprafețelor tehnologice*, Lucrările simpozionului TEHNOMUS VI, Suceava, pag.36-43, 1991.
- [Z3] Zsivanov, D., Gruescu, C., *Metode optice de evaluare a rugozității suprafețelor*, Analele Universității din Oradea, pag. 21-28, 1994.
- [Z4] Zsivanov, D., *O nouă generație de interferometre asistate pentru evaluarea 3D a suprafețelor tehnologice*, Sesiunea de comunicări științifice, Universitatea "Aurel Vlaicu", Arad, pag. F23-F28, 1996.
- [Z5] Zsivanov, D., *Caracteristicile de profil ale suprafețelor tribologice cu rugozitate izotropă. în evaluare optică interferometrică*, Rotrib'96, 7th International Tribology Conference, București, pag. 75-82, 1996; Construcția de mașini (48), nr. 7-9, pag. 51-55, 1996.

- [Z6] Zsivanov, D., *Stadiul actual al evaluării caracteristicilor microgeometrice și tribologice ale suprafețelor cu rugozitate izotropă*, Referat de doctorat, Catedra de organe de mașini și mecanisme, Facultatea de mecanică, Timișoara, 48 pagini, 1992.
- [Z7] Zsivanov, D., *Metode și aparate optice pentru cercetarea topografiei suprafețelor*, Referat de doctorat, Catedra de organe de mașini și mecanisme, Facultatea de mecanică, Timișoara, 77 pagini, 1994.
- [Z8] Zsivanov, D., *Noi principii de evaluare teoretică a caracteristicilor microgeometrice ale suprafețelor tehnologice*, Simpozion M.T.M., Reșița VII, pag. 273-282, 1996.
- [Z9] Zsivanov, D., *Sinteza metodelor experimentale de evaluare a sistemelor tribologice în condiții de laborator*, Simpozion M.T.M., Reșița VII, pag. 283-290, 1996.
- [Z10] Zsivanov, D., *About the roughness height distribution normality of isotropic surfaces, produced by electrical discharge machining*, Bul. Șt. și Tehn., UPT, Tom 41 (55), Mecanică, pag. 148-153, 1996.
- [Z11] Zsivanov, D., Cicală, E., *Considerations concernant l'inclinaison et la courbure de la rugosité des surfaces usinées par électroérosion et par rectification*, Bul. Șt. și Tehn., UPT, Tom 42 (56), Mecanică, pag. 239-246, 1997.
- [Z12] Zhou, G., Len, M., Blackmore, D., *Fractal geometry modeling with applications in surface characterisation and wear prediction*, Int. J. Mach. Tools Manufact., vol.35, nr. 2, pag. 203-209, 1992.
- [Z13] Zhang, G., Gopalakrishnan, *Fractal geometry applied to on-line monitoring of surface finish*, Int. J. Mach. Tools Manufact., vol.36, nr. 10, pag. 1137-1150, 1996.
- [Z14] ZYGO Corporation, *MetroPro<sup>TM</sup>-Surface texture parameters*, Middlefield (U.S.A.), 1994.
- [Z15] ZYGO Corporation, *Product manuals-Zygo New View 100*, Middlefield (U.S.A.), 1994.
- [Z16] ZYGO Corporation, *New View 100-3D Imaging Surface Structure Analyser*, prospect publicitar, 1994.
- [Z17] ZYGO R&D Technical Bulletin, *What is frequency domain analysis*, PdG 9/23/1993.