

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA

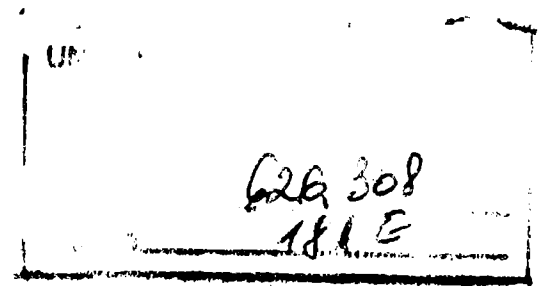
Facultatea de Mecanică

Catedra de Tehnologie Mecanică

Ing. Liliana Georgeta TULCAN

ACTIVAREA ULTRASONICĂ A PROCESELOR  
DE NETEZIRE FINĂ ABRAZIVĂ

BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
TIMIȘOARA



Conducător științific:

Prof.Dr.Ing. Alexandru NICHICI

Timișoara

-2000-

## CUPRINS

Introducere .....	4
<b>A. STADIUL ACTUAL AL CUNOȘTINȚELOR ÎN DOMENIILE PROCESELOR DE NETEZIRE FINĂ ȘI AL ACTIVĂRII ULTRASONICE A PROCESELOR DE AȘCHIERE</b>	
<b>1. PROCEDEE ȘI PROCESE DE NETEZIRE FINĂ ABRAZIVĂ</b>	
1.1 Caracteristici generale .....	7
1.2 Procese de interacțiune abraziv-material de prelucrat la PNFA .....	9
1.2.1 Mecanismul prelevării de material la PNFA cu abraziv legat .....	9
1.2.2 Fenomene particulare în spațiul de lucru la lepuire .....	19
1.3 Analiza critică a procesului de lepuire .....	24
1.3.1 Noțiuni de bază .....	24
1.3.2 Caracteristici tehnologice ale procesului de lepuire .....	25
1.3.2.1 Scula pentru lepuire .....	25
1.3.2.2 Mediul abraziv .....	25
1.3.2.3 Piesa de prelucrat .....	29
1.3.2.4 Parametrii regimului de lucru în procesul de lepuire .....	29
1.3.3 Clasificarea proceselor de lepuire .....	30
1.3.4 Avantaje/dezavantaje ale procesului de lepuire .....	34
1.4 Factori de influență și funcții obiectiv ale PNFA .....	34
<b>2 ACTIVAREA ULTRASONICĂ A PROCESELOR DE AȘCHIERE</b>	
2.1 Caracteristici generale ale undelor ultrasonice .....	39
2.2 Activarea ultrasonică a proceselor tehnologice .....	43
2.2.1 Aplicații active ale undelor ultrasonice .....	43
2.2.2 Efecte de bază ale ultrasunetelor în medii solide și lichide .....	46
2.2.2.1 Efectele ultrasunetelor în medii solide .....	46
2.2.2.2 Efectele ultrasunetelor în medii lichide .....	49
2.3 Sisteme ultrasonice .....	50
2.3.1 Structura sistemului ultrasonic .....	50
2.3.2 Clasificarea sistemelor ultrasonice .....	51
2.4 Variante principial constructive de sisteme tehnologice activate ultrasonic .....	53
2.4.1 Schema de sistem pentru activarea ultrasonică a proceselor tehnologice ..	53
2.4.2 Procedee de așchiere activate ultrasonic .....	53
2.4.3 Sisteme de activare ultrasonică a lepuirii .....	55
2.5 Aspecte ale fenomenologiei așchierii activate ultrasonic .....	56
2.5.1 Vibrații în procesul de prelucrare prin așchiere .....	56
2.5.2 Fenomenologia așchierii activate ultrasonic .....	58

2.5.3 Mecanismul aşchierii activate ultrasonic cu comportamentul dinamic al piesei de prelucrat .....	59
2.5.4 Influenţa ultrasunetelor asupra parametrilor procesului de aşchiere .....	62
2.5.4.1 Influenţa ultrasunetelor asupra vitezei de aşchiere .....	62
2.5.4.2 Influenţa ultrasunetelor asupra unghiurilor funcţionale ale sculei ...	65
2.5.4.3 Influenţa ultrasunetelor asupra grosimii aşchiei .....	67
2.5.4.4 Influenţa ultrasunetelor asupra durabilităţii sculelor .....	68
2.5.4.5 Influenţa ultrasunetelor asupra puterii medii efective de aşchiere ...	68
2.5.5 Particularităţi ale rectificării şi netezirii fine activate ultrasonic .....	69
2.6 Cercetări experimentale asupra proceselor de aşchiere activate ultrasonic.....	72
2.6.1 Rezultate ale cercetărilor experimentale la utilizarea ultrasunetelor în procesele de aşchiere .....	72
2.6.2. Cercetări experimentale asupra PNFA activate ultrasonic .....	75
2.7 Concluzii .....	82

## ***B. CERCETĂRI TEORETICE ŞI EXPERIMENTALE PRIVIND ACTIVAREA ULTRASONICĂ A PROCESELOR DE LEPUIRE***

### **3. MODELAREA ANALITICĂ A PROCESULUI DE LEPUIRE ACTIVATĂ ULTRASONIC**

3.1 Funcţii obiectiv şi factori de influenţă la activarea ultrasonică a lepuirii .....	83
3.2 Modelarea analitică a procesului de lepuire activată ultrasonic .....	86
3.2.1 Model analitic general de stabilire a volumului de material prelevat la lepuire plană activată ultrasonic .....	86
3.2.2 Model analitic de stabilire a presiunii critice de contact .....	94
3.2.3 Model analitic al volumului de material netezit .....	96
3.3 Concluzii .....	98

### **4. MODELAREA EXPERIMENTALĂ A PROCESULUI DE LEPUIRE ACTIVATĂ ULTRASONIC**

4.1 Obiectivele şi resursele cercetării experimentale.....	100
4.1.1 Obiectivele cercetării experimentale.....	100
4.1.2 Structura standului experimental.....	101
4.1.3 Mod de funcţionare al standului experimental.....	109
4.2 Organizarea cercetării experimentale .....	110
4.3 Ierarhizarea factorilor de influenţă prin bilanţ aleator .....	113
4.4 Modelarea experimentală prin experiment factorial .....	121
4.4.1 Proiectarea şi realizarea experimentului .....	121
4.4.2 Determinarea modelului matematic pentru funcţiile obiectiv analizate .....	123
4.4.3 Analiza profilului de rugozitate prin aplicarea teoriei funcţiilor aleatoare .....	127
4.4.4 Interpretarea rezultatelor şi concluzii .....	165

4.5 Experimente unifactoriale .....	168
4.5.1 Programul de experimentare .....	168
4.5.2 Influența granulației abrazivului .....	168
4.5.3 Influența concentrației abrazivului .....	178
4.5.4 Concluzii .....	180
4.6 Alte aspecte ale cercetării experimentale evidențiate prin microscopie optică și electronică .....	181
4.6.1 Studiul microgeometriei suprafețelor inițiale și finale ale pieselor .....	181
4.6.2 Analiza uzurii granulelor abrazive .....	181
4.7 Concluzii generale.....	186

## **C. CONCLUZII**

### **5. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE**

5.1 Concluzii generale .....	188
5.2 Contribuții originale .....	189
5.3 Perspective .....	191
<b>BIBLIOGRAFIE</b> .....	192



Tendențele actuale de miniaturizare pe de o parte, de gigantizare pe de alta, cer agregate și instalații, utilaje și aparate capabile de performanțe înalte care să lucreze în regimuri speciale, în condiții foarte diferite, dificile, cu o productivitate din ce în ce mai ridicată și cu eficiență sporită. Pentru a putea fi îndeplinite aceste deziderate ale dezvoltării sunt necesare materiale cu proprietăți specifice, care necesită tehnologii de obținere și prelucrare cu totul deosebite. Pe de altă parte, în tehnica zilelor noastre rolul funcțional al unor piese pretinde tot mai des precizii de prelucrare ridicate, calități foarte bune ale suprafețelor. În aceste cazuri se recurge, ca operație finală, la procedeele de netezire fină. Se asigură astfel o mai bună comportare la uzură, prin creșterea suprafeței portante, o mai bună rezistență la solicitări variabile, la coroziune. Se preconizează că și aici, ca și în alte domenii ale construcțiilor de mașini, introducerea tehnologiilor neconvenționale, în care un loc bine definit îl ocupă aplicarea oscilațiilor ultrasonice, conduce la îmbunătățirea indicilor tehnico-economici, la reducerea și chiar eliminarea efectelor negative existente.

Pe această linie se înscrie și prezenta teză de doctorat, prin tema sa "*Activarea ultrasonică a proceselor de netezire fină abrazivă*". Tema abordată reprezintă o continuare a preocupărilor unor colective de cadre didactice din Facultatea de Mecanică din Timișoara, dar și din alte centre universitare din țară, în domeniul aplicațiilor active ale ultrasunetelor.

În contextul celor de mai sus, se definesc următoarele direcții de cercetare:

- studiul documentar privind procesele clasice de netezire fină abrazivă, și în special cele cu abraziv liber, și efectul aplicării oscilațiilor ultrasonice la aceste prelucrări;
- studiul sistemelor de activare ultrasonică a proceselor de lepuire și realizarea unui stand experimental de lepuire activată ultrasonic;
- modelarea analitică și experimentală a procesului de lepuire activată ultrasonic, prin determinarea legăturilor cantitative și calitative existente între funcțiile obiectiv specifice acestui procedeu și factorii de influență ai acestora.

Teza de doctorat este structurată în două părți principale.

*Prima parte*, fiind rezultatul sintetizării cunoștințelor acumulate în etapa inițială de studiu, reprezintă abordarea sistemică și analiza critică a literaturii de specialitate, conținând elemente de originalitate în structurarea și prezentarea informațiilor. Această parte cuprinde:

- un capitol referitor la procesele de netezire fină abrazivă cu accent pe mecanismele de interacțiune abraziv-material de prelucrat la abrazare cu abraziv legat și liber, evaluarea principalelor caracteristici ale procesului de lepuire, o clasificare a acestora, principalele avantaje și dezavantaje ale procedeuului, urmată de o identificare a factorilor de influență și a funcțiilor obiectiv la PNFA;
- un capitol ce prezintă în principal noțiuni generale despre ultrasunete și sisteme ultrasonice, aplicațiile active ale ultrasunetelor și efectele activării cu ultrasunete, variante principale constructive de sisteme de activare cu ultrasunete și în special de lepuire ultrasonică, aspecte ale mecanismului aşchierii în câmp ultrasonic cu

particularitățile ce apar la prelucrarea cu abraziv liber și legat, modele fizice ale lepuirii în câmp ultrasonic, stadiul actual al cercetărilor experimentale în domeniul abordat cu relevarea principalelor avantaje și limitări create de suprapunerea oscilațiilor ultrasonice peste procedeele clasice de netezire fină abrazivă.

În urma studiului bibliografic s-au sinterizat majoritatea aspectelor teoretice și a rezultatelor experimentale publicate în legătură cu tema studiată, s-au formulat aprecieri critice asupra acestora. Pe baza celor observate s-a definit obiectivul major al tezei de doctorat, constând în studiul teoretic și experimental al procesului de lepuire plană activată ultrasonic, vizând în principal optimizarea după criterii de calitate și productivitate a procesului.

*Partea a doua* reprezintă partea fundamentală a tezei de doctorat și conține în două capitole dezvoltarea originală a unor probleme rămase deschise de cercetările anterioare și soluțiile alese în vederea atingerii obiectivului formulat, după cum urmează:

- un capitol dedicat inventarierii funcțiilor obiectiv, a factorilor de influență și a parametrilor prelucrării, precum și modelării analitice a procesului de lepuire plană activată ultrasonic. Se stabilește un model general pentru volumul de material prelevat la lepuire plană activată ultrasonic, având în vedere desfășurarea în timp a procesului de prelucrare, apoi, pentru un domeniu dat, un model de determinare a presiunii critice de contact și un model analitic al volumului de material netezit.
- un capitol care conține prezentarea standului experimental, a metodologiei de lucru, ierarhizarea factorilor de influență prin bilanț aleator, programul, rezultatele și concluziile experimentelor factoriale și unifactoriale pentru un număr de 15 funcții obiectiv, din care trei au fost considerate de interes practic deosebit: rugozitatea suprafeței la nivelul indicatorului  $R_a$ , productivitatea prelucrării și procentajul lungimii portante la un nivel de secționare de 50 %. S-a efectuat analiza statistică a profilului de rugozitate cu ajutorul teoriei funcțiilor aleatoare, studiul microscopic al suprafețelor rezultate și analiza calitativă a uzurii granulelor abrazive.

*Partea a treia* cuprinde capitolul final în care sunt concentrate principalele rezultate ale activităților desfășurate, enumerându-se contribuțiile personale și acțiunile de cercetare viitoare, care să completeze și să dezvolte tema abordată.

Lucrarea este organizată pe cinci capitole, cuprinde 197 pagini cu 192 figuri, 27 tabele, 111 relații și 119 referințe bibliografice, din care 46 sunt din ultimii 10 ani, 7 sunt lucrări ale autorului, una în colaborare, celelalte fiind elaborate singur.

Activitatea de cercetare experimentală s-a desfășurat în laboratorul de Bazele Cercetării Experimentale al catedrei de Tehnologia Construcțiilor de Mașini din cadrul Facultății de Mecanică din Timișoara, utilizând și adaptând baza materială existentă. Profilogramele suprafețelor pieselor s-au determinat utilizând un echipament de înaltă performanță, aflat în dotarea catedrei de Organe de Mașini și Mecanisme.

Toate considerațiile teoretice și rezultatele experimentelor cuprinse în lucrare conduc, pentru spațiul experimental investigat, la evidențierea condițiilor în care aplicarea acestui procedeu este avantajoasă și poate constitui o parte a unei baze de date privind procesele de lepuire. Având convingerea că lucrarea constituie un pas înainte în lărgirea domeniului de utilizare a ultrasunetelor în sistemele tehnologice clasice de prelucrare mecanică, se poate spera în implementarea industrială a acestor procedee, în vederea realizării cerințelor tot mai ridicate impuse de standardele internaționale.

La final, recunoștința autorului se îndreaptă către conducătorul științific, prof.dr.ing. Alexandru Nichici, a cărui competență, rigoare și profesionalism manifestate cu generozitate pas cu pas au stimulat posibilitatea finalizării acestei lucrări. Mulțumiri deosebite sunt adresate prof.dr.ing. Mihai Nica pentru sprijinul acordat în realizarea cercetărilor experimentale, prof.dr.ing. Tudor Iclănzan pentru recomandările competente pe parcursul pregătirii și finalizării tezei, prof.dr.ing. Octavian Gligor pentru bunăvoința de a fi permis accesul și utilizarea de către autor a sistemului de măsurare cu achiziție de date. Totodată autorul ține să mulțumească colegilor din catedrele de Tehnologie Mecanică și de Tehnologia Construcțiilor de Mașini, precum și tuturor colegilor din Facultatea de Mecanică care, într-o formă sau alta, au contribuit în diferite faze la elaborarea și finalizarea prezentei teze de doctorat.

# A. STADIUL ACTUAL AL CUNOȘTIINȚELOR ÎN DOMENIILE PROCESELOR DE NETEZIRE FINĂ ȘI AL ACTIVĂRII ULTRASONICE A PROCESELOR DE AȘCHIERE

## CAPITOLUL 1

### PROCEDEE ȘI PROCESE DE NETEZIRE FINĂ ABRAZIVĂ

#### 1.1 Caracteristici generale

Procedeele tehnologice de netezire fină pot fi fără îndepărtare de material (deformare plastică) sau cu îndepărtare de material (prelucrare abrazivă) [C8]. Procedeele de netezire fină fără îndepărtare de material se recomandă a fi utilizate pentru prelucrarea suprafețelor care lucrează în condiții grele de uzură sau oboseală, întrucât prelucrarea este însoțită de durificarea suprafețelor ca urmare a ecruisării ce are loc.

Procedeele de netezire fină cu îndepărtare de material se încadrează în procesele tehnologice de abrazare, a căror caracteristică este aceea că, în timpul procesului de prelucrare, îndepărtarea stratului de material care constituie adaosul de prelucrare este realizată de o mulțime de granule abrazive a căror muchii și vârfuri ascuțite au orientări și forme aleatoare [D5],[\*1].

Granulele abrazive pot fi antrenate într-o mișcare relativă față de piesa prelucrată prin [D5],[S1],[C2]:

- încorporarea granulelor în corpuri solide rigide, menținute cu ajutorul unor lianți (discuri, bare, segmenti);
- înglobarea granulelor într-un strat superficial fixat (lipit) pe un suport (hârtie, pânză, fetru);
- realizarea unei suspensii de granule abrazive într-un fluid (aer, lichid, pastă);

Din cele trei moduri de utilizare, primul este cel mai curent. Există trei categorii mari de prelucrări la care se utilizează corpurile abrazive, în funcție de cantitatea de material prelevat și calitatea suprafeței prelucrate:

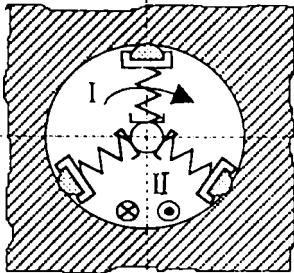
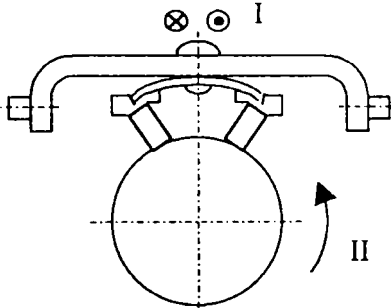
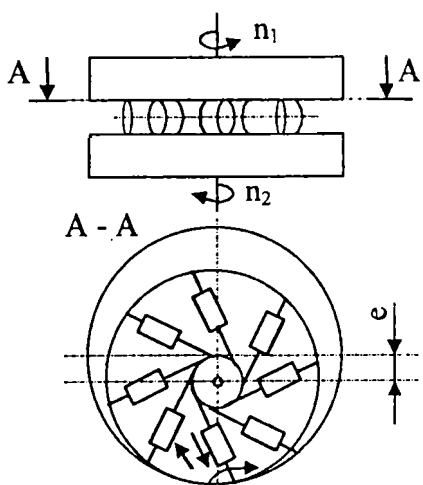
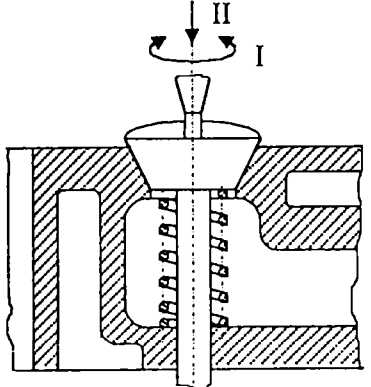
- ⇒ prelucrări grosiere ca debitarea, debavurarea efectuate pe semifabricate, lingouri, piese de turnătorie;
- ⇒ rectificarea, ascuțirea, pilirea - operații de precizie, cu adaosuri de prelucrare bine determinate, de o manieră analogă strunjirii sau frezării;
- ⇒ honuire, supranetezire, lepuire, prelucrări care vizează obținerea unor calități foarte bune ale suprafeței și a unor precizii ridicate.

Procedeele de netezire fină cu îndepărtare de material cuprind ultima categorie și vor fi denumite **procedee de netezire fină abrazivă (PNFA)**. În funcție de natura abrazivului PNFA se pot clasifica în două grupe:

- *PNFA cu abraziv legat* (honuire, supranetezire),
- *PNFA cu abraziv liber* (lepuire, rodare).

Principalele caracteristici ale acestor procedee sunt prezentate în tabelul 1.1, iar în tabelul 1.2, pentru a oferi o imagine de ansamblu asupra utilizării PNFA, se prezintă din STAS 5730/2-85 rugozitatea suprafeței la nivelul parametrului  $R_a$  obținută prin diferite procedee



Tabelul 1.1 Caracteristici principale ale procedeelelor de netezire fină abrazivă

Procedeu de prelucrare	Natura abrazivului	Cinematica	Factori de influență	Indici de performanță	
				$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Precizie
Honuire	legat		$t = 0.005-0.025 \text{ mm}$ $v_I = 70-75 \text{ m/min}$ $v_{II} = 5-24 \text{ m/min}$ $p = 3.5-14 \text{ MPa}$ granulație Nr.8-M14	0.32-0.025	IT 4...7
Supra-netezire (super-finisare)	legat		$t = 0.01-0.2 \text{ mm}$ $v_I = 2-6 \text{ m/min}$ $v_{II} = 3-40 \text{ m/min}$ amplitudine $\approx 2.5 \text{ mm}$ $p = 0.5-3 \text{ MPa}$ granulație M14-M5	0.25-0.01	în funcție de prelucrările anterioare
Lepuire	liber (legat)		$t = 0.005-0.025 \text{ mm}$ $v = 10-200 \text{ m/min}$ $p = 0.1-3.5 \text{ MPa}$ granulație Nr.8-M1	0.012-0.008	IT 4...7
Rodare	liber		$v_I = 5-30 \text{ m/min}$ $p \leq 2.5 \text{ MPa}$ granulație M7-M1	0.02-0.008	IT 4...7
Lustruire (polizare)	legat (liber)		$v_{\text{disc}} = 20-60 \text{ m/s}$ granulație M40-M5	-	în funcție de prelucrările anterioare

tehnologice. Se observă că PNFA conduc la rugozități fine ale suprafeței rar obținute prin alte procedee clasice sau neconvenționale.

Tabelul 1.2 Rugozitatea suprafeței obținută prin diferite procedee tehnologice (informativ)

Denumirea procedeei tehnologice	Rugozitatea suprafeței $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]													
	50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05	0.025	0.012	
Rabotare														
Strunjire, alezare cu cuțitul														
Frezare														
Găurire														
Electrochimie														
Electroeroziune														
Broșare														
Alezare														
Finisare în tobă														
Lustruire electrolică														
Roluire														
Rectificare														
Honuire														
Polizare														
Lepuire														
Superfinisare														

-  Valori frecvent obținute prin procedeul respectiv
-  Valori mai puțin frecvent obținute prin procedeul respectiv

## 1.2 Procese de interacțiune abraziv-material de prelucrat la PNFA

Studierea mecanismului abrazării presupune urmărirea mai multor aspecte ale procesului analizat:

⇒ *Aspecte mecanice* legate de:

- cinematica procesului: moduri de deplasare a granulelor abrazive; traiectorii și viteze de deplasare;
- dinamica procesului: forțe; tensiuni.

⇒ *Aspecte tribologice* privitoare la: coeficienți de frecare la abrazare; moduri de uzare; volumul de material prelevat și/sau uzat.

⇒ *Aspecte structurale* vizând: deformarea stratului superficial al piesei;

⇒ *Aspecte termice* urmărind: temperaturile locale dezvoltate în proces.

⇒ *Aspecte energetice*: energia consumată în proces.

### 1.2.1 Mecanismul prelevării de material la PNFA cu abraziv legat

Orice proces de abrazare este influențat de acțiunea concertată a patru categorii de intrări legate de corpul abraziv sau mediul abraziv cu suportul acestuia, de mașina unealtă implicată, de piesa de prelucrat și de factorii operaționali. Procesul apare astfel ca fiind



foarte complex și greu de descris, de aceea în fig.1.1 [S3] se vizualizează într-o manieră simplificată interacțiunile din zona activă de prelucrare. Discuțiile sunt limitate în general la prima dintre interacțiuni și cea mai importantă, și anume abraziv-material de prelucrat, neglijându-se celelalte.

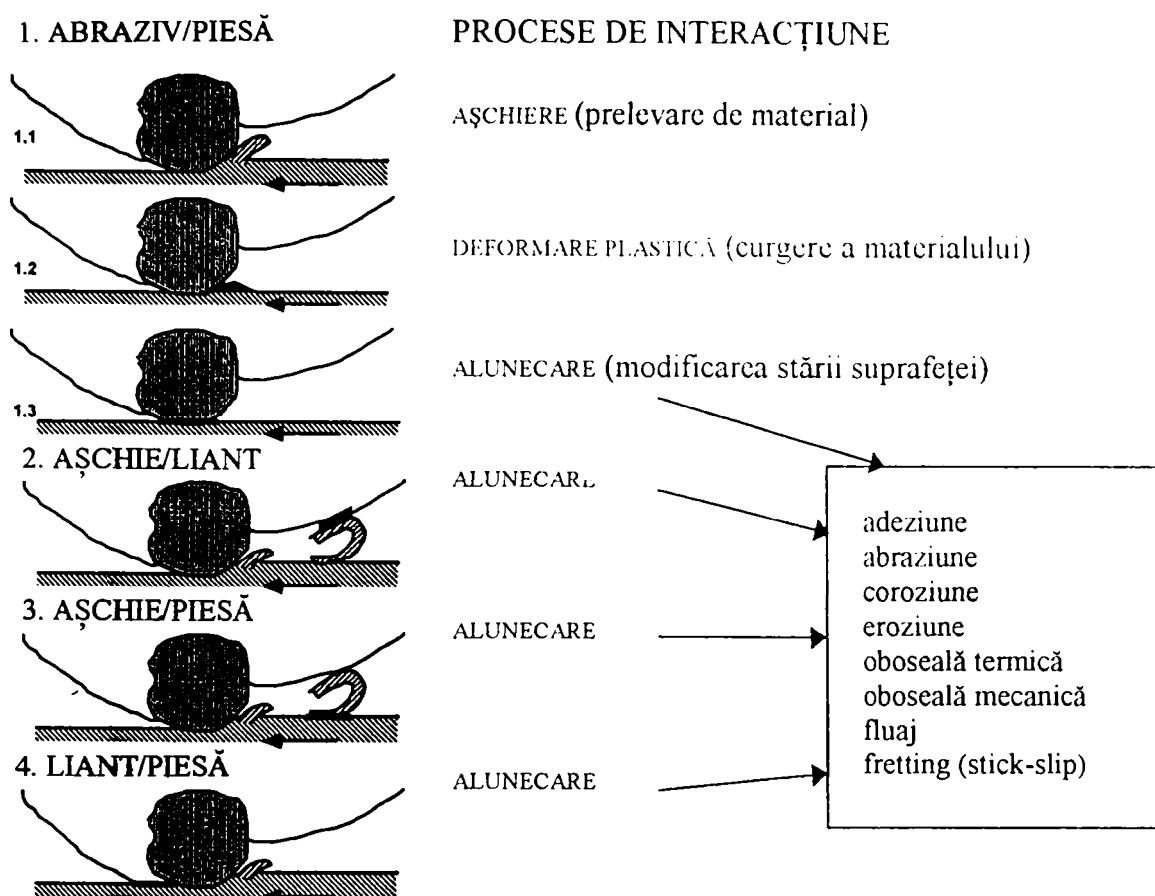


Fig.1.1 Interacțiuni în procesul de abrazare

La procedeele de netezire fină abrazivă netezirea suprafeței se realizează prin două forme elementare de prelucrare a materialului: *așchiere* și *deformare plastică* (brăzdare, zgâriere) [B1],[C1],[H2],[S1],[S3]. În procesul așchierii se realizează îndepărtarea adaosului de prelucrare necesar pentru corectarea erorilor dimensionale și de formă ale piesei de prelucrat, o anumită calitate a suprafeței și înlăturarea straturilor defecte determinate de prelucrările anterioare. Desfășurarea procesului de așchiere determină într-o măsură importantă productivitatea și precizia prelucrărilor de netezire fină abrazivă.

Considerându-se cazul unei granule singulare, în fig.1.2a [B1],[C1] se dă schema pătrunderii muchiei granulei și forțele care acționează pe suprafața de prelucrat. Microașchiera se produce sub acțiunea forței tangențiale  $F_t$  și începe la un anumit raport între adâncimea de pătrundere a granulei abrazive  $h$  și raza  $\rho$  de racordare a vârfului granulei, raport  $h/\rho$  numit adâncime de pătrundere relativă și care depinde de plasticitatea materialului și de forța normală  $F_n$  [B1].

În momentul inițial al pătrunderii vârfului granulei abrazive în material se produce o deformare elastică, urmată de o deformare plastică prin extrudarea materialului, împingerea acestuia din microcanalul rezultat și formarea unei depuneri (creste) laterale.

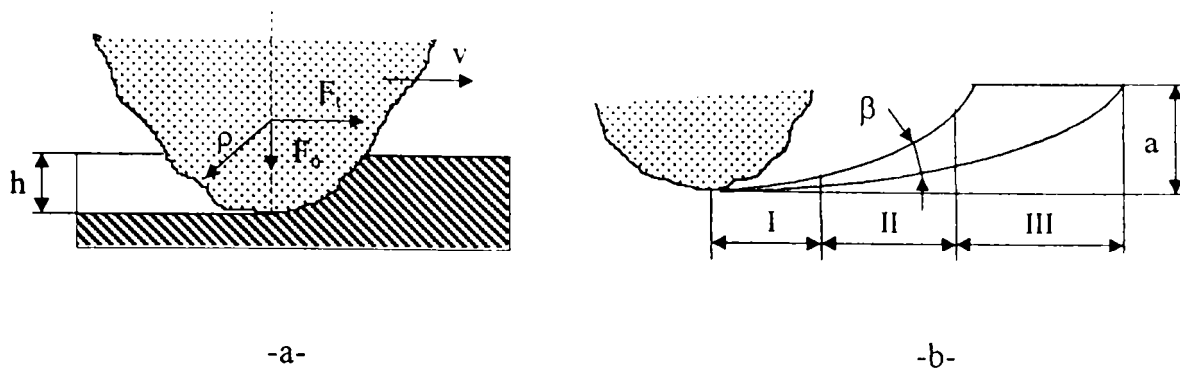


Fig. 1.2 Generarea așchiei

La  $0.01 \leq \frac{h}{\rho} \leq 0.1$  are loc deformarea elastică a materialului, adică o frecare a granulei abrazive de suprafața de prelucrat fără îndepărtare de așchii. Adâncimea de pătrundere relativă la care se produce trecerea de la deformații elastice la deformații plastice se poate calcula cu formula:

$$\frac{h}{\rho} \approx 200 \left( \frac{\sigma_c}{E} \right)^2 \quad (1.1)$$

unde:  $\sigma_c$  - limita de curgere a materialului prelucrat;  
 $E$  - modulul de elasticitate al materialului.

La  $0.1 \leq \frac{h}{\rho} \leq 1.1$  se produce *deformarea plastică* a materialului fără distrugerea sa.

La  $0,2 \leq \frac{h}{\rho} \leq 2$  are loc *microașchiera*, *zgârierea* materialului și *deformarea plastică* însoțitoare. La creșterea plasticității materialului de prelucrat, mărimea  $h/\rho$  la care se produce microașchiera crește. În funcție de forma muchiei așchietoare, de adâncimea de pătrundere, de poziția relativă a muchiei așchietoare în raport cu suprafața de prelucrat se poate obține un microcanal (o zgârietură) prin deformare plastică sau prin așchiere. La un microcanal deformat plastic (extrudat) materialul este împins plastic lateral, dar nu se separă formând creste pe margine. La un microcanal așchiat o mare parte din material se îndepărtează sub formă de așchie, ceea ce nu exclude formarea pe marginea microcanalului a unor creste rezultate din deformare plastică. S-a constatat experimental că apariția uneia sau alteia din cele două posibilități de abrazare depinde și de unghiul de atac format de fața activă a granulei abrazive cu direcția de înaintare a acesteia. Valoarea unghiului de atac critic  $\chi_{rc}$  peste care apare așchiera depinde de materialul granulei și piesei și de cinematica procesului.

În fig.1.2b  $\beta$  este denumit unghi de interferență, adică unghiul de îngroșare a așchiei nedeformate. În cursul deformării așchia va avea trei zone distincte: *I alunecare*, *II deformare plastică*, *III așchiere*. Lungimea primei zone depinde de unghiul  $\beta$ . În [O1] s-a detaliat pe larg calculul lui  $\beta$ , respectiv geometria așchiei nedetașate pentru diferite tipuri de așchii.

Ținând cont că numai o parte din materialul scos din microcanalul abrazat este îndepărtat, restul fiind împins lateral, se definește un coeficient de scoatere  $f_{ab}$  ca fiind



raportul dintre volumul crestei depusă pe suprafața inițială și volumul total deplasat, care în cazul materialelor ductile poate lua valori între 0 (brăzdare ideală) și 1 (așchiere ideală), iar în cazul materialelor

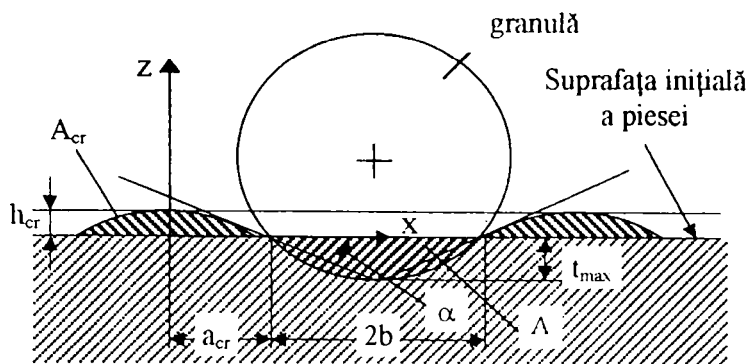


Fig.1.3 Formarea crestelor laterale prin deformarea plastică a materialului piesei

fractile pot să atingă valori supraunitare. Se consideră că o granulă abrazivă prelevează doar o parte din așchia nedeformată. materialul rămas sub formă de creste dispuse de o parte și de ... ..u.ei ca în fig.1.3 [C1] fiind deformat plastic de granulele următoare. Volumul crestei va avea o pondere de  $(1-f_{ab})$  din volumul așchii

nedeformate. Forma crestei poate fi aproximată cu o parabolă cu expresia următoare:

$$x^2 = \frac{a_{cr}^2}{h_{cr}}(h_{cr} - z) \quad (1.2)$$

Aria crestei depuse pe o parte a granulei va fi:

$$A_{cr} = \frac{(1-f_{ab})A}{2} = \frac{4}{3}a_{cr}h_{cr} \quad (1.3)$$

unde: A - aria canalului rezultat. Se poate deduce:

$$a_{cr} = \sqrt{\frac{3A_{cr}}{2tg\alpha}} \quad (1.4)$$

$$h_{cr} = \sqrt{\frac{3A_{cr}tg\alpha}{8}} \quad (1.5)$$

În procesul deformării plastice superficiale se produce o netezire a microneregularităților și o umplere a golurilor cu materialul crestelor. Pe de altă parte pot exista situații când, în urma trecerilor succesive ale mai multor granule abrazive, crestele de material sunt solicitate în sensuri alternante urmând a se desprinde de suprafața piesei datorită solicitării la oboseală. Acest proces încheie formarea rugozității suprafețelor prelucrate și starea fizico-mecanică a stratului superficial de material, gradul de ecruisare și mărimea tensiunilor remanente. În funcție de condițiile și regimurile de prelucrare, netezirea fină se poate reduce doar la unul din procesele elementare descrise.

Trecerea de la procesul de așchiere la procesul de deformare plastică superficială în cazul prelucrării cu abraziv legat se realizează prin modificarea regimului de prelucrare, în particular a presiunii de apăsare, prin modificarea traiectoriei granulelor abrazive, prin schimbarea barelor abrazive cu altele cu o granulație mai fină.

În ceea ce privește aspectul tribologic, o nouă disciplină -triboașchiera- tratează caracteristicile contactului între suprafețele în interacțiune la abrazare [M2],[Ș1]. Se acceptă diferite ipoteze simplificatoare referitoare la forma microneregularităților în contact stabilindu-se ariile de contact real între două suprafețe rugoase. Modelele

dezvoltate pentru deducerea expresiilor coeficientului de frecare și ale volumului de material dizlocat presupun că forma echivalentă a granulei abrazive este sferică, conică, piramidală sau tetraedrică [C1],[S1],[S3],[Ș1].

Diametrul echivalent al granulei abrazive  $d_{ge}$  (fig.1.4 [C1]) depinde de forma granulei și de înălțimea muchiei acesteia (fig.1.5 [C1]). Calculul lui  $d_{ge}$  se face ținându-se

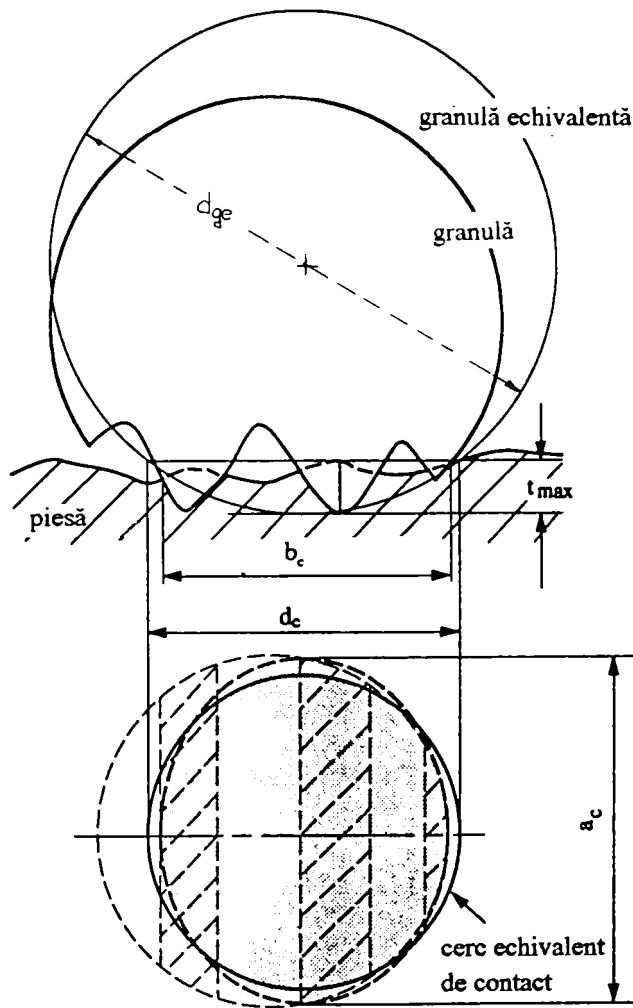


Fig.1.4 Granula echivalentă

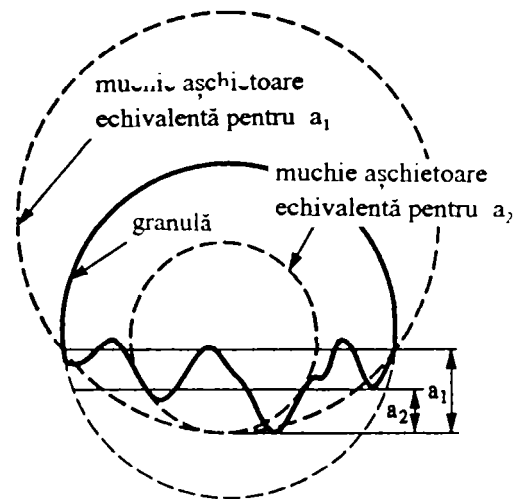


Fig.1.5 Echivalența muchiilor tăietoare în funcție de adâncimea de așchiere

cont de adâncimea de așchiere maximă și de diametrul ariei de contact granulă-piesă de prelucrat care are forma unei elipse.

$$d_{ge} = \frac{t_{max}^2 - (d_c/2)}{t_{max}} \quad (1.6)$$

unde:  $d_c = \sqrt{a_c b_c}$ ;  $a_c$  este lungimea maximă a contact în direcția de așchiere și  $b_c$  lățimea de așchiere.

Ulterior modelele pentru determinarea volumului de material îndepărtat au fost îmbunătățite renunțând la ipoteza durității constante a materialului piesei ținând cont de situațiile când materialul este format din mai multe faze de durități diferite. Alte modele elaborate pe baza efectelor elasto-plastice ale contactului granulă-piesă au în vedere deplasarea în mișcare relativă dintre sculă și piesă pe o anumită distanță sau cazul în care granulele trec în mișcare de alunecare peste asperități ale materialului mai moale al piesei.

Relațiile deduse neglijează în general rolul liantului în mecanismul de formare a așchiilor. Se are în vedere opinia unor cercetători care afirmă că adâncimea reală de așchiere este redusă datorită unei încovoieri elastice locale dată ca sumă a patru componente, redate și în fig.1.6 [C1], o deformare locală a piesei, deviația centrului granulei, deformarea granulei, și rotația acesteia, ultimele două fiind relativ mici.

Deformarea locală a piesei poate fi considerată ca parte din deformația totală a piesei. Deviația centrului granulei  $\delta_c$  are forma unei distribuții herziene:

$$\delta_c = C F_n^{2/3} \quad (1.7)$$

unde:  $C = 0.8 \dots 0.25$  - constantă;  $F_n$  - forța normală pe granulă.

Unele modele consideră puntea de liant rigidă, elastică sau semielastică și compară dependențele procentajului adâncimii portante de rugozitatea  $R_z$  a suprafeței [S4].

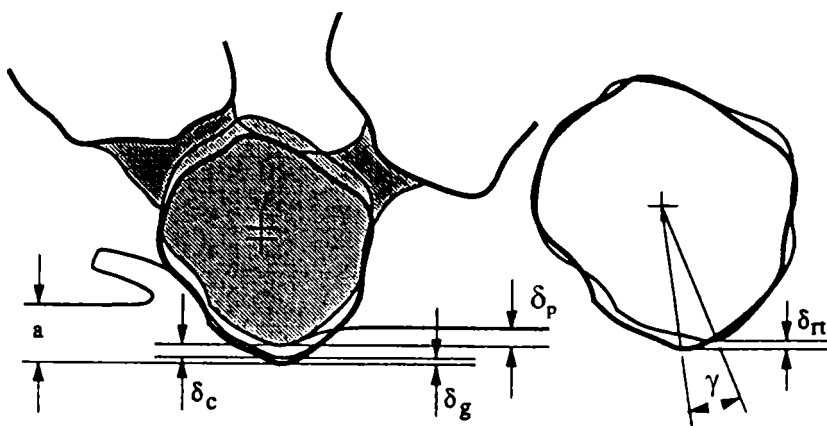


Fig. 1.6 Încovoierea elastică a granulei abrazive

prelucrării și topografia corpului abraziv. Natura interacțiunii între corp și piesă se bazează pe forma și distribuția spațială a muchiiilor tăietoare efective și aria transversală a

Se constată influența favorabilă a unui material mai elastic asupra randamentului prelucrării, asupra calității suprafeței prelucrate, chiar și la adâncimi de așchiere mai mari.

În descrierea unui model al procesului de abrazare, generarea profilului piesei este ilustrată și investigată în relație cu parametrii fundamentali ai

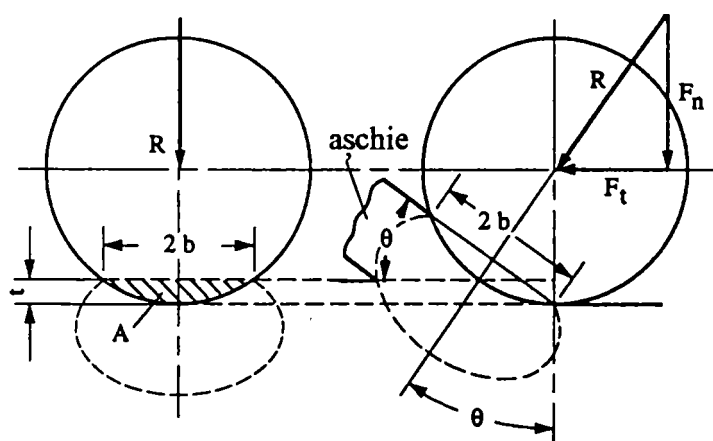


Fig. 1.7 Acțiunea granulei singulare

formată din energia specifică necesară așchierii și energia specifică de frecare, are expresia:

$$e_g = \frac{3\pi b}{4t} H \left( \frac{C'}{3} \right) (\sin \theta + \mu \cos \theta) \quad (1.8)$$

unde:  $H$  - duritatea materialului prelucrat;  $C'$  - factor restrictiv definit ca raport între presiunea medie pe aria de contact și tensiunea uniaxială de deformare plastică, în general  $C'=3$ ;  $\theta$  - unghiul sub care acționează forța de indentare,  $\mu$  - coeficient de frecare.

$$\theta = \arcsin \frac{2b}{d_g} = \arcsin 2 \frac{\sqrt{t(d_g - t)}}{d_g} \quad (1.9)$$

Considerându-se ambele faze: așchiere și deformare plastică, pentru un diametru mediu al granulelor abrazive  $\bar{d}_g$  mult mai mare decât media adâncimii de așchiere a granulelor  $\bar{t}$  ecuația anterioară devine:

$$e_g = \frac{3\pi}{2} \left( 1 + \frac{\mu}{2} \sqrt{\frac{\bar{d}_g}{\bar{t}}} \right) \frac{H}{f_{ab}} \left( \frac{C'}{3} \right) \quad (1.10)$$

Având în vedere modelul cinematic al abrazării din fig.1.8 [C1] și faptul că forța totală este o însumare a forțelor pe fiecare granulă din zona activă de prelucrare, energia consumată în proces pentru prelucrarea unei arii ABCD reprezintă o însumare a energiei necesare detașării unei arii elementare  $AC \cdot \Delta x$  de către granula  $i$  (fig.1.9 [C1]).

$$E = \sum_{k=1}^k \Delta E = \sum_{k=1}^k \left( \frac{1}{A} \sum_i^n e_{g^i} \frac{v_{as}}{v_{av}} \Delta x \right) = \frac{1}{A} \sum_i^n e_{g^i} \frac{v_{as}}{v_{av}} l_c \quad (1.11)$$

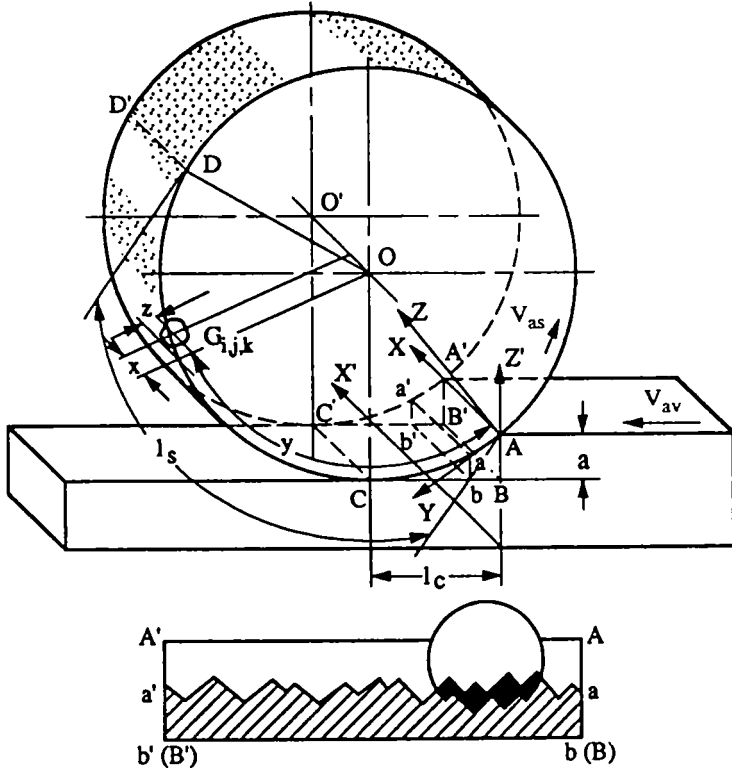


Fig. 1.8 Model cinematic pentru abrazare

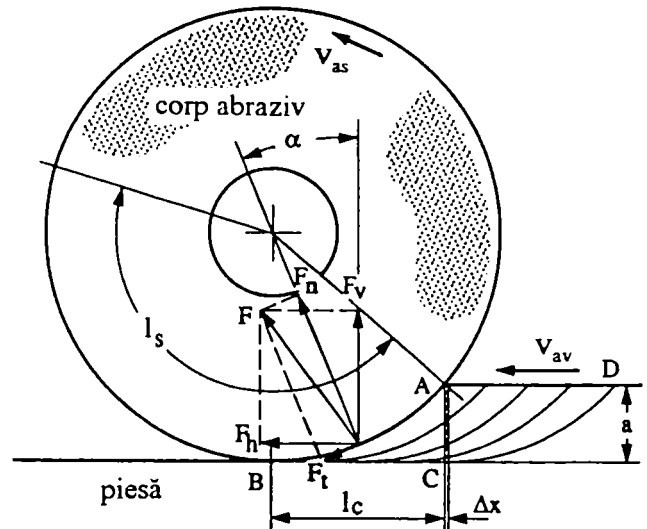


Fig. 1.9 Componentele forței de așchiere

S-a realizat o simulare a mecanismului de abrazare pornind de la o granulă singulară urmărind apoi generarea suprafeței piesei prelucrate considerând acțiunea cumulată a granulelor abrazive (fig.1.10) [C1]. Procesul de așchiere a fost simulat prin compararea suprafeței de așchiere a granulei cu punctele relevante ale piesei. Când granula  $G_{i,j,k}$  trece prin zona de prelucrat, punctele de pe suprafața piesei aflate în aria  $[x_{G_{i,j,k}} - d_g/2, x_{G_{i,j,k}} + d_g/2]$  vor fi implicate în așchiere. Cota centrului granulei deplasate pe distanța  $\Delta_{i,j,k}$  în sistemul de coordonate al piesei va fi:

$$z' = z_{G_{i,j,k}} + \Delta_{i,j,k} + \Delta_{z'z} \quad (1.12)$$

unde:  $z_{G_{i,j,k}}$  - poziția centrului granulei în sistemul de coordonate al corpului abraziv;

$$\Delta_{i,j,k} = d_g - \sqrt{d_g^2 - \left( l_c - \frac{l_c}{l_s} y_{G_{i,j,k}} \right)^2} \quad (1.13)$$

$\Delta_{z'z}$  - distanța între cele două sisteme de coordonate.

S-a ținut cont de formarea creștelor laterale și de încovoierea elastică. După trecerea tuturor granulelor angajate prin zona activă se obține topografia finală a piesei prelucrate. S-au realizat și modele de simulare a procesului de abrazare care urmăresc variația înălțimii profilului piesei în funcție de numărul de treceri ale sculei [S1].

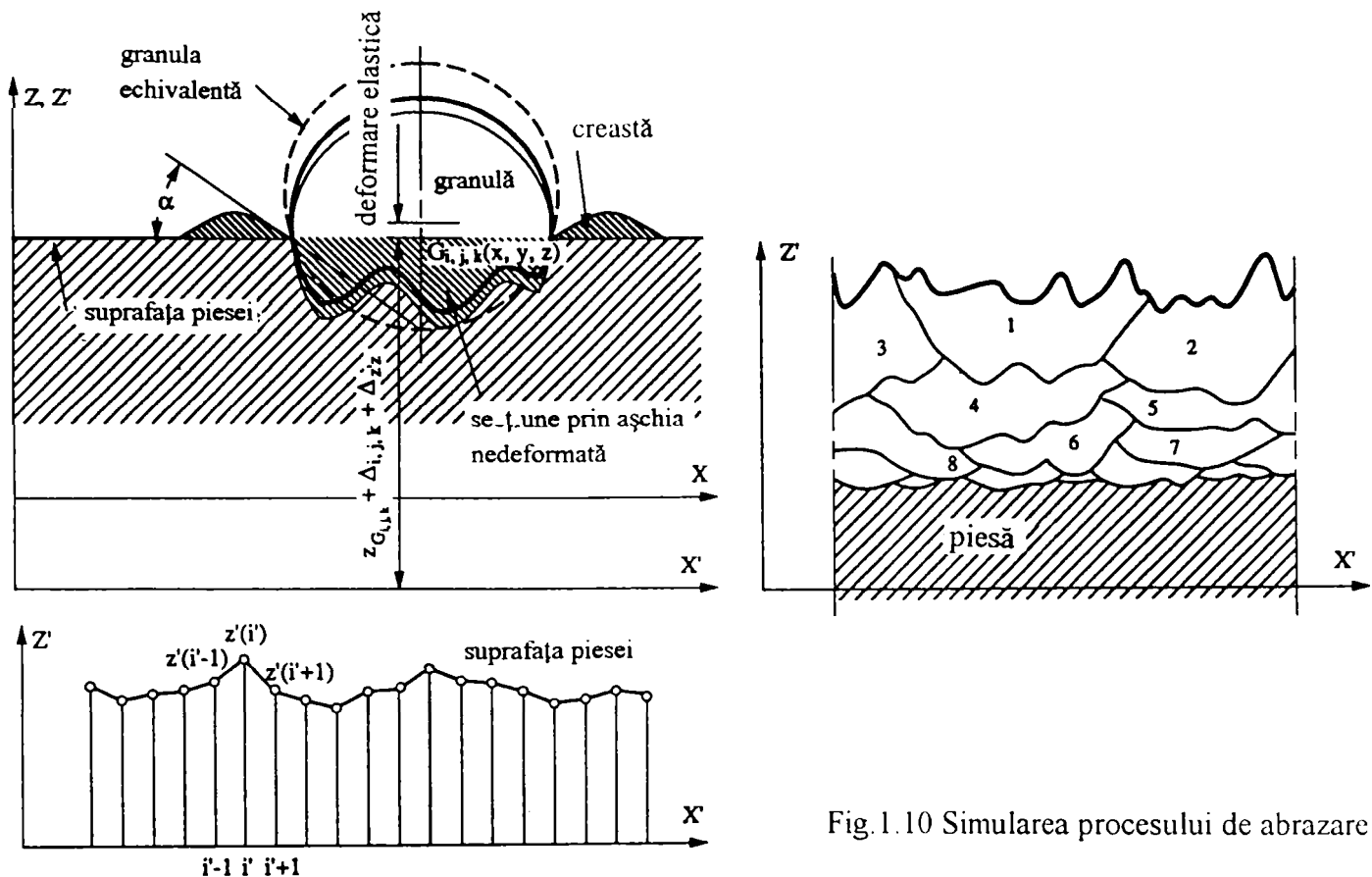


Fig. 1.10 Simularea procesului de abrazare

Alte cercetări au în vedere topografia reală a suprafeței active a corpului abraziv, tratând-o ca pe o entitate tridimensională. Partea activă a unui corp abraziv are o configurație stohastică, tăișurile fiind orientate întâmplător și situate la diferite adâncimi  $z$  față de o suprafață de referință. Tăișurile devin active pentru granulele care depășesc liantul. Măsurători cu caracter topografic și de densitate pentru mai multe tipuri de corpuri abrazive au determinat că: variațiile înălțimii, pantei și ascuțirii sunt mai mari pentru granule mai mari, numărul de muchii tăietoare active pe unitatea de arie este mai mare pentru granulații mai mici, corpurile abrazive de duritate mai mare au o varianță mai mică a înălțimii asperităților, cu creșterea porozității crește varianța înălțimii asperităților, descrește densitatea vârfurilor și numărul muchiilor tăietoare active. Numărul de muchii active tăietoare depinde de elementele regimului de prelucrare, de materialul piesei, de lichidul de lucru, de reacțiile chimice care însoțesc procesul [O1],[Ş1]. Numărul granulelor abrazive sesizate static pe unitatea de suprafață este estimat a fi [O1],[S3]:

$$C_{\text{stat}} = f(d_g) = (N_g)^{2/3} \quad (1.14)$$

unde:  $N_g$  - nr. de granule abrazive pe unitatea de volum,  $N_g = N_{gc} \cdot W_g$ ;

$N_{gc}$  - nr. de granule abrazive pe carat sau pe unitatea de masă;

$W_g$  - masa granulelor abrazive pe unitatea de volum a corpului abraziv.

Numărul de granule dinamice poate fi considerat:

$$C_{\text{din}} = f(z, v_{as}, v_{av}, D) \quad (1.15)$$

unde  $D$  este diametrul corpului abraziv.

Comportamentul la prelucrarea prin procedee de netezire fină abrazivă diferă în funcție de tenacitatea materialului de prelucrat. Prelucrarea materialelor fragile este esențial diferită de prelucrarea materialelor ductile, în aceleași condiții de lucru. Aici

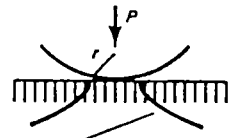
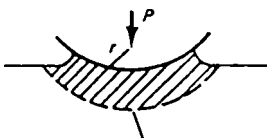
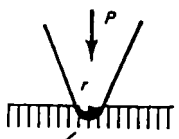
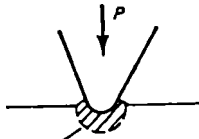
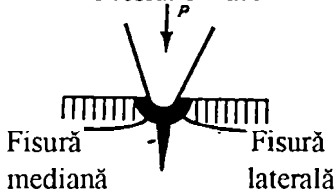
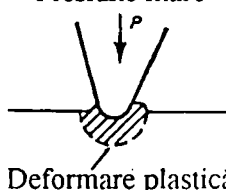


apare fenomenul de îndepărtare a materialului prin spargere sau fisurare, suprafața prezentând regiuni sau fisuri laterale propagate din microcanalele aşchiate și zone zdrobite sau sparte în urma indentării. Tabelul 1.3 [S3] sintetizează comportarea materialelor fragile și a celor ductile la impactul cu granule abrazive cu diferite raze de racordare a vârfului granulei și la diferite presiuni de contact. Pentru cazul materialelor dure și fragile se demonstrează că raportul energiilor necesare prelevării de material este dat de relația [S3]:

$$\frac{E_p}{E_f} = \frac{\sigma_y \cdot f(t^3)}{G \cdot f(t^2)} \approx \frac{f(h^3, d_g, F_g)}{f(h^2, d_g, F_g)} \approx f(h, d_g, F_g) \quad (1.16)$$

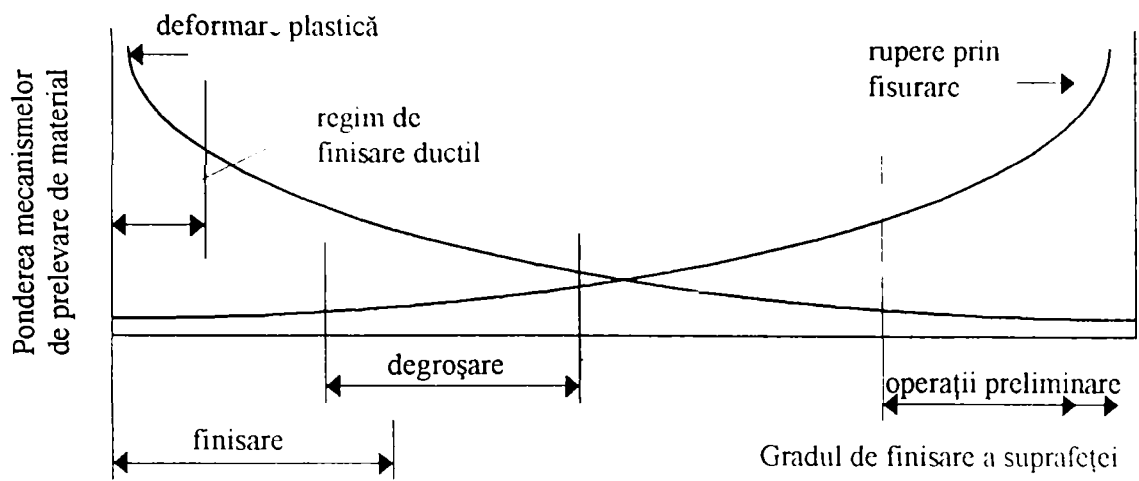
unde:  $E_p$  - energia necesară deformării plastice;  $E_f$  - energia necesară generării fisurilor;  $\sigma_c$  - rezistența la curgere;  $G$  - parametru ce caracterizează propagarea fisurii;  $F_g$  - forța de indentare a granulei.

Tabelul 1.3 Generarea deformațiilor locale și a fisurilor la abrazarea materialelor fragile și ductile

	Materiale fragile	Materiale ductile
Rază de racordare mare	 <p>Fisură</p>	 <p>Deformare plastică</p>
Rază de racordare mică	<p>Presiune mică</p>  <p>Deformare plastică</p>	<p>Presiune mică</p>  <p>Deformare plastică</p>
	<p>Presiune mare</p>  <p>Fisură mediană      Fisură laterală</p>	<p>Presiune mare</p>  <p>Deformare plastică</p>

În fig.1.11 [S3] se urmărește ponderea în procesul de prelevare de material a mecanismului detașării materialului prin fisurare față de componenta de deformare plastică și mărimile care guvernează interacțiunile abraziv - material de prelucrat pentru cazul materialelor dure și fragile. În sistemul real trebuie stimulată interacțiunea abraziv-piesă și minimizeze interacțiunile tribologice liant-piesă, aşchie-liant, aşchie-piesă.

În studiul mecanismului prelevării de material la abrazare s-a pornit în general de la cazul particular al rectificării. Trebuie specificat că la PNFA datorită necesității de a se asigura o calitate oglindă a suprafeței prelucrate, traiectoria granulei abrazive nu trebuie să se repete. Astfel apar particularități ale PNFA față de rectificare în ceea ce privește cinematica proceselor și regimul de aşchiere. Unul din elementele principale care influențează aşchiera în PNFA îl constituie gradul de acoperire și modul de dispersie a traiectoriilor granulelor abrazive pe suprafața prelucrată [C5],[M10],[N4],[\*19].



INTRĂRI ↓	joase	MAȘINĂ UNEALTĂ vibrații	înalte
	mică	ABRAZIV mărimea granulei	mare
	mică	PIESĂ raza de rotunjire a granulei	mare
	mare	PIESĂ rezistență la rupere	mică
VARIABLE DE PROCES	mare	FACTORI OPERAȚIONALI viteză de așchiere	mică
	mică	adâncime de așchiere	mare
	mică	grosimea așchiei	mare
IEȘIRI ↓	mică	forța pe granulă	mare
	mare	forța de abrazare	mică
	mare	energia specifică	mică
	mică	energia specifică	mică
IEȘIRI ↓	mari	tensiuni remanente	mici
	bun	grad de finisare a suprafeței	slab
	mare	grad de uzură a granulelor	mic
	joasă	intensitatea prelevării de material	înaltă

Fig.1.11 Schema interacțiunilor abraziv-piesă și mecanismele de guvernare la prelucrarea materialelor dure și fragile

Gradul de acoperire reprezintă lungimea traiectoriei parcursă de o granulă abrazivă pe toată suprafața piesei. La honuire, traiectoria unei granule abrazive pe suprafața prelucrată reprezintă o elice spre dreapta la mișcarea honului într-un sens și o elice spre stânga la deplasarea honului în sens invers, dând o rețea densă de linii care se intersectează reciproc, caracteristică procedurii de generare prin honuire. La honuire, față de rectificare, apar deosebiri legate de regimul de așchiere: presiunea de apăsare a barei abrazive pe suprafața care se generează este de 6...10 ori mai mică, viteza de așchiere este de 50...120 ori mai mică, iar la prelucrare iau parte de 100...1000 ori mai multe granule abrazive decât la rectificare. Supernetezirea este o dezvoltare a honuirii, deosebindu-se de aceasta prin presiunea mică a barelor abrazive, viteza redusă de așchiere și existența mișcărilor oscilatorii.

## 1.2.2 Fenomene particulare în spațiul de lucru la lepuire

În fig.1.12 se prezintă parametrii determinanți în studiul fenomenologiei procesului de lepuire. La lepuire, granulele abrazive care se găsesc între suprafețele piesei și sculei de lepuit, având forme diverse se orientează în mod diferit cu muchiile lor ascuțite în raport cu cele două suprafețe. Astfel ele pot fi în stare fixată, semifixată sau liberă. Fixarea granulei se face când aceasta are două sau mai multe suprafețe de contact cu suprafața pe care ea aderă. Posibilitatea încastrării depinde de duritatea relativă a

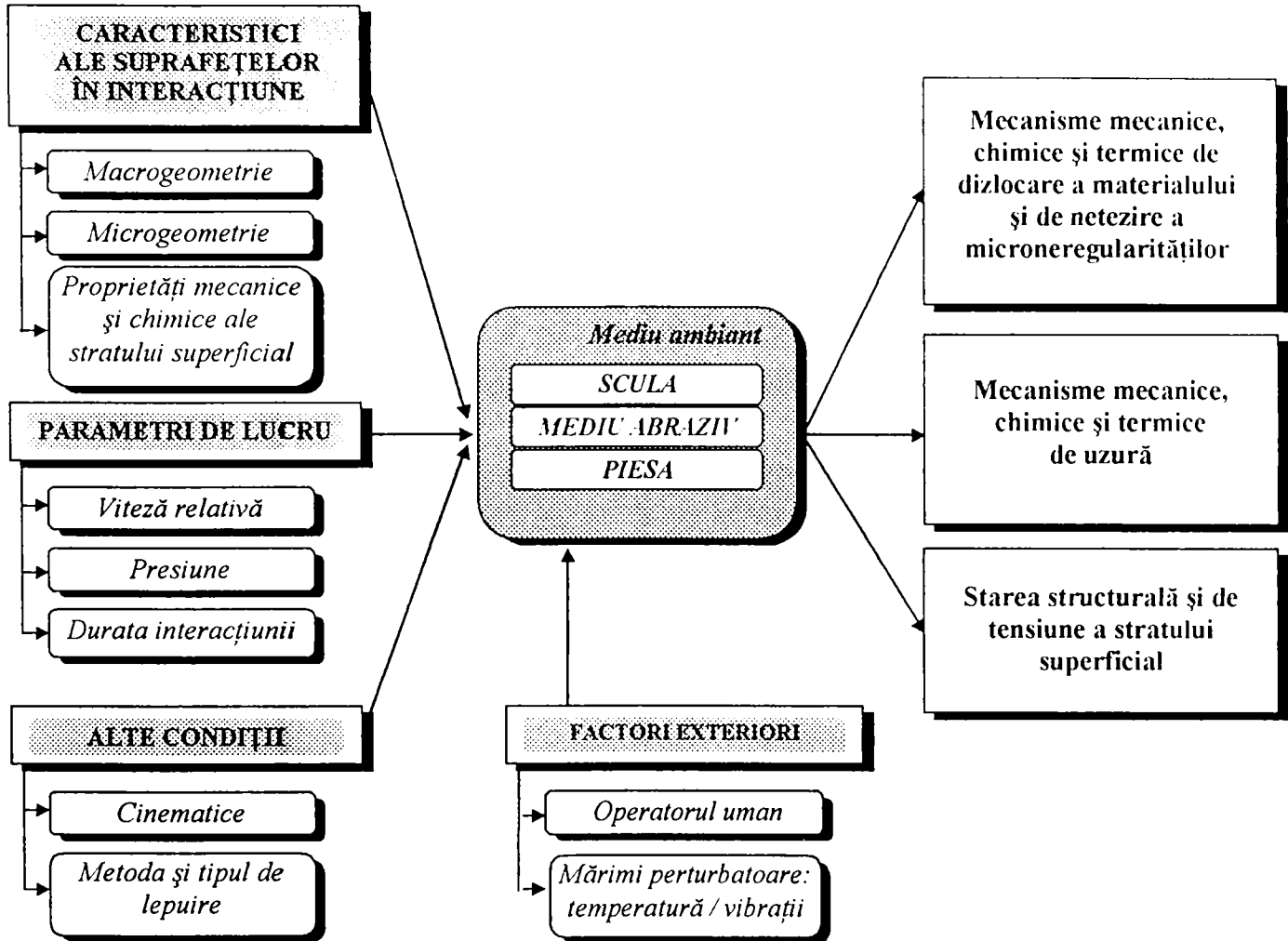


Fig.1.12 Parametri determinanți în studiul fenomenologiei procesului de lepuire

suprafețelor celor două corpuri, de mărimea suprafeței de contact cu granula abrazivă, de gradul de umectare a suprafețelor sculei și piesei și de gradul de pregătire preliminară a suprafețelor acestora, întrucât probabilitatea aderării unei granule este cu atât mai mică cu cât suprafața este mai fin prelucrată. Astfel probabilitatea de încărcare a unei granule singulare pe sculă este dată de relația [H2]:

$$B = \frac{H_P \cdot S_{G-P}}{H_S \cdot S_{G-S}} \cdot K_U \cdot K_{PP} \quad (1.17)$$

unde:  $H_P$  - duritatea sculei;  $H_S$  - duritatea piesei;  $S_{G-S}$  - aria suprafeței de contact a granulei cu scula;  $S_{G-P}$  - aria suprafeței de contact a granulei cu piesa;  $K_U$  - coeficient de umectare relativă de către lubrifianț a suprafețelor piesei și sculei;  $K_{PP}$  - coeficient de pregătire preliminară a suprafeței înaintea lepuirii.

Fixarea granulei abrazive  $B > 1$  este probabilă la  $H_S < H_P$ ,  $S_{G-S} \leq S_{G-P}$ ,  $K_U \geq 1$ ,  $K_{PP} \geq 1$  și dacă sunt satisfăcute următoarele condiții:



- asigurarea unei presiuni suficiente pe granula unitară pentru un material dat al sculei;
- rezistență la compresiune a granulelor abrazive necesară pentru a suporta această presiune.

La prelucrările de netezire fină cu abraziv legat, traiectoriile și vitezele granulelor în raport cu piesa sunt dictate strict de cinematica mașinii-unelte, evident atât timp cât o granulă nu este smulsă din liant. Procesul prelevării de material la lepuirea cu granule fixate prin "încărcarea" sculei înainte sau în timpul prelucrării decurge în același mod ca și la rectificare, honuire, superfinisare, așa cum s-a arătat anterior.

La prelucrarea prin lepuire deplasarea liberă a granulelor abrazive prezintă avantaje atât din punct de vedere al solicitării granulelor cât și din cel al distribuției microasperităților suprafeței prelucrate. Deplasarea relativă dintre granulele abrazive

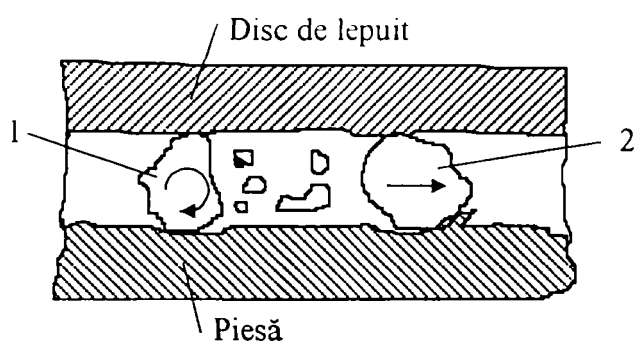


Fig. 1.13 Model al procesului de lepuire

rămase libere în piesă se poate produce în două moduri: prin alunecarea granulei față de piesă sau prin rostogolirea acesteia pe suprafața piesei. În fig. 1.13 se consideră un model generalizat și simplificat al procesului de lepuire în care sunt prezentate cele două mișcări ale granulelor abrazive. În timp ce granula 1 se răsucește și creștează piesa de prelucrat, granula 2 alunecă pe ea, prima granulă producând

deformare plastică și ecrusare iar a doua așchiere.

La creșterea forței de apăsare, crește probabilitatea ca granulele abrazive să alunece în raport cu piesa, în loc de a se rostogoli. Ponderea granulelor abrazive care alunecă față de piesă crește odată cu creșterea raportului dintre duritatea materialului piesei și cea a materialului sculei de lepuit. Prelevarea de material depinde în principal și de raportul dintre duritatea granulelor abrazive și duritatea piesei de prelucrat, crescând pe măsură ce crește diferența de duritate. La un anumit raport al acestora prelevarea de material atinge un maxim care se păstrează independent de mărirea în continuare a durității abrazivului. Din date experimentale rezultă mărimea limită a raportului  $H_p/H_{abr} = 0.5...0.75$ .

Caracterul prelevării de material în cazul prelucrării cu granule libere diferă de caracterul prelevării la prelucrarea cu abraziv legat. Trecerea de la procesul de așchiere la procesul de deformare plastică superficială în cazul prelucrării cu abraziv liber se realizează prin schimbarea pulberii abrazive cu o alta mai fină și mai puțin dură, prin aplicarea unor lichide purtătoare mai puțin vâscoase, precum și prin micșorarea parametrilor regimului de prelucrare. Uneori această trecere se produce în mod autonom, fără modificarea regimurilor, datorită fărâmițării treptate a granulelor abrazive.

Ca și la celelalte PNFA, cinematica operațiilor de lepuire este foarte importantă și trebuie să rezolve următoarele :

- asigurarea mișcării de rostogolire a granulelor abrazive și deplasarea lor în toate direcțiile, pe drumuri cât mai diferite;

- asigurarea contactului între piesă și discurile de lepuit astfel încât piesa să vină în contact cu o porțiune cât mai mare din suprafața sculei, pentru ca uzura să fie mai uniformă;
- suprafața de contact piesă-sculă să rămână egală în toate pozițiile, pentru ca presiunea să se repartizeze uniform în tot timpul prelucrării.

Calitatea procesului de lepuire este analizată pe un model grafic al lepuirii plane clasice cu două discuri, pornind de la mișcarea ciclică a unui punct al piesei care se poate deplasa după o hipocicloidă scurtată, epicycloidă prelungită, normală sau scurtată. Pornind de la faptul că fiecare punct de pe piesă și de pe discurile de lepuit descriu anumite traiectorii, s-a constatat că, cu cât gradul de suprapunere al acestor traiectorii este mai mare, cu atât mai netedă și mai precisă va fi suprafața prelucrată. Pentru asigurarea unei calități foarte bune a suprafeței unghiul câmpului de suprapunere ar trebui să fie de  $360^\circ$ . Pe baza fig.1.14 [C8] se urmărește aflarea suprapunerii în cazul când punctele de pe piesă sau de pe discurile de lepuit se deplasează după curbe ciclice, prin desfășurarea pe o dreaptă.

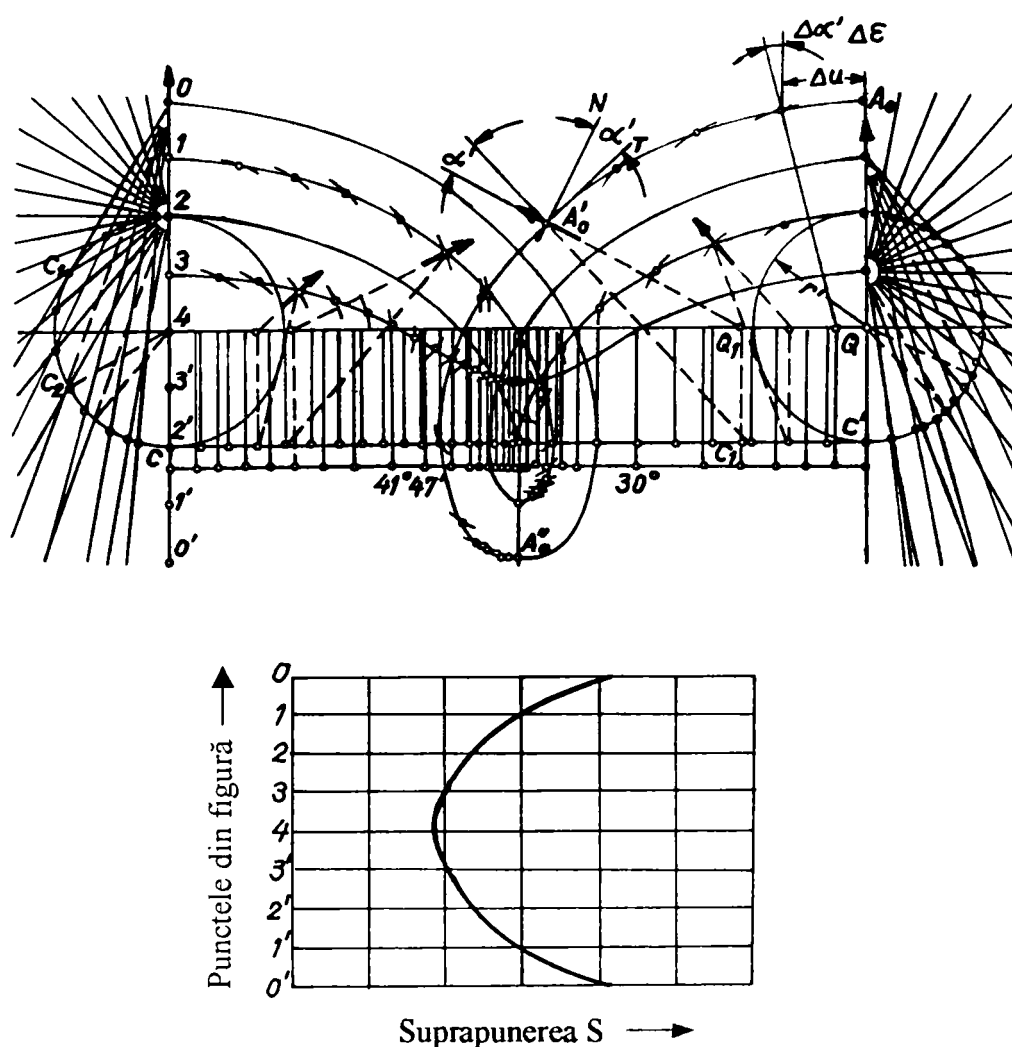


Fig.1.14 Determinarea grafică a suprapunerii trajectoriilor unor puncte de pe piesă cu puncte de pe discul de lepuit

Aceste curbe s-au trasat presupunând că discul intermediar (care susține și deplasează piesele) se deplasează pe dreapta  $CC'$ . Centrul acestui disc (4) va descrie o linie dreaptă, pe când punctele aflate către exterior (3,2,1,0) vor descrie curbe cu lungime din ce în ce mai mare. Cu cât piesele sunt dispuse mai către exteriorul discului

intermediar, cu atât suprapunerea este mai mare, cu probabilitate mare de prelucrare uniformă. În situația reală fig.1.15 [C8] se ține seama de faptul că centrul discului intermediar nu se deplasează după o dreaptă, ci are o mișcare de rotație. Piesa 4 rulează între inelul exterior 2 și interior 1. Dacă discul de lepuit 3 ar fi numai un inel îngust, cu poziția în afară, atunci raportul razelor  $OD$  și  $OC$  ar fi  $\cong 1$ . Cu creșterea suprafeței discului de lepuit, raza  $OC$  devine din ce în ce mai mică, iar raportul razelor din ce în ce mai mare. Din fig.1.14, care ajută la stabilirea suprapunerii și la repartizarea acesteia, se

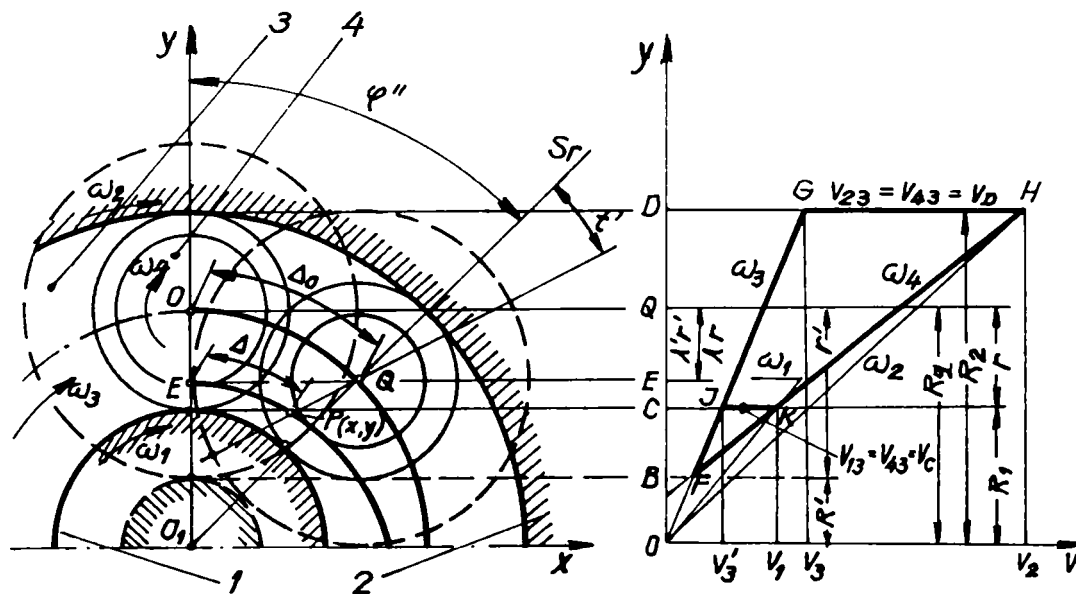


Fig.1.15 Determinarea suprapunerii ținând cont de situația reală pe mașina de lepuit

poate deduce mărimea câmpului de suprapunere, care se poate transforma într-o cifră a câmpului de suprapunere, prin raportul între grosimea câmpului de suprapunere existentă

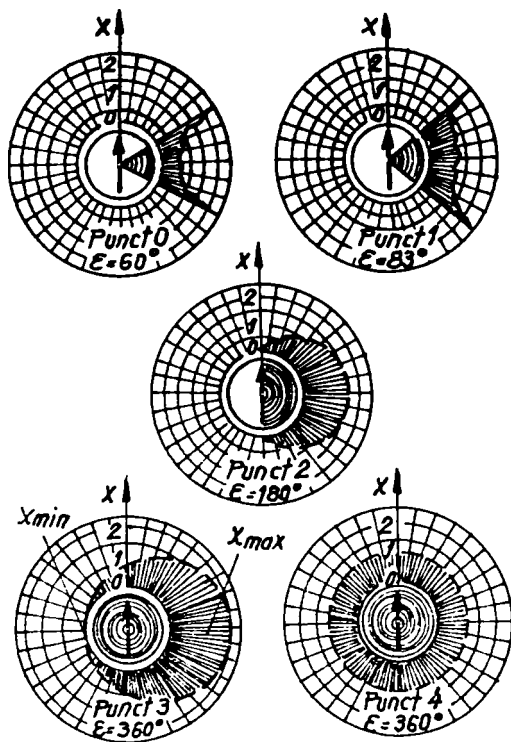


Fig.1.16 Reprezentarea cifrei câmpului de suprapunere

într-un anumit loc și grosimea medie a acestuia. În fig.1.16 [C8] se face reprezentarea grafică în coordonate polare a cifrei câmpului de suprapunere, pentru punctele 0 - 4 din fig.1.14. Se constată că odată cu creșterea unghiurilor câmpurilor de suprapunere  $\epsilon$ , cifra de suprapunere se îmbunătățește, ajungând pentru punctul (4), care se deplasează după o dreaptă, la valoarea optimă de  $360^\circ$  și o cifră constantă de suprapunere a câmpurilor (concentricitatea câmpului de suprapunere). Pe baza acestor considerente se poate face optimizarea procesului de lepuire prin stabilirea parametrilor regimului de așchiere, astfel încât să se obțină rezultate mai bune privind calitatea și precizia suprafețelor prelucrate.

Alte modele analitice ale procesului de lepuire sunt realizate pe baza ecuației profilului mediu a piesei și urmăresc descrierea deplasării

punctelor de pe piesă sau sunt determinate pe baza densității de probabilitate a înălțimilor profilului sculei și piesei stabilind coeficientul de frecare în cazul mișcării relative după o anumită direcție. Alte modelări folosesc teoria sistemelor, deduc ecuații de mișcare considerând starea macroscopică a sistemului drept un sistem termodinamic deschis.

S-au dezvoltat modele de simulare a abrazării cu granule libere în ipoteza modelului sferic al granulei și a unei așchieri perfect plastice [S1]. Algoritmul realizat simulează spargerea granulelor cele mai solicitate, în cazul unor diferite granulații și la diverse valori ale forței normale, la un anumit număr de treceri urmărindu-se modificarea repartiției dimensiunilor granulelor, a înălțimilor piesei și variația momentului de frecare. Se constată pe parcursul simulării că la primele treceri repartiția dimensiunilor granulelor se modifică puternic, granulele mari se sparg, proporția de granule active crește apărând apoi o tendință de uniformizare a dimensiunilor din cadrul eșantionului. În intervalele de timp în care nu există spargeri de granule, uniformizarea punctelor de pe profilul piesei face să crească probabilitatea ca procesul să aibă un caracter plastic. După câteva mii de treceri procesul se stabilizează.

În condiții determinate, prelucrarea prin lepuire este însoțită de procese chimico-mecanice legate de formarea periodică pe suprafața piesei a unei pelicule oxidice ce va fi

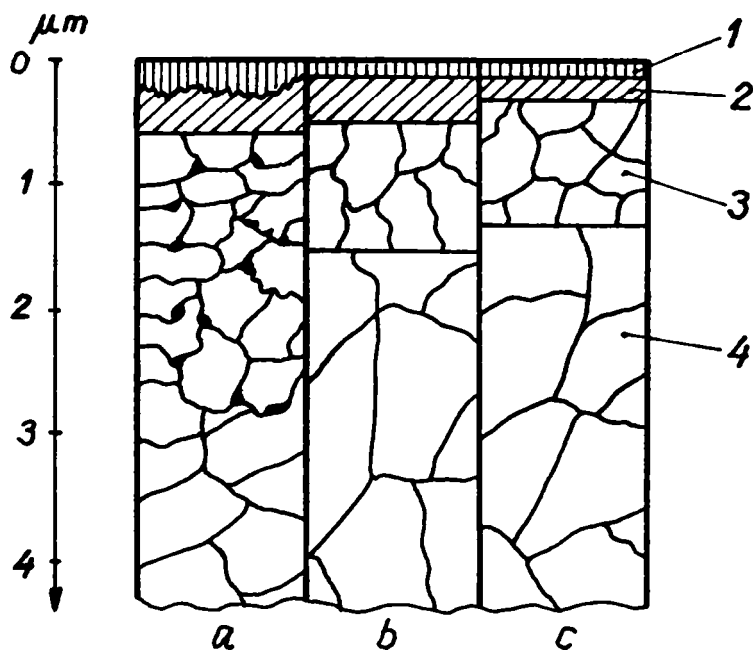


Fig. 1.17 Starea structurală a stratului superficial al piesei după PNFA

îndepărtată de granulele abrazive. Acest proces se derulează periodic. În ceea ce privește starea structurală a stratului superficial a pieselor prelucrate prin PNFA în fig. 1.17 [B1] este reprezentat un semifabricat din oțel supus la diferite tipuri de prelucrare fină: rectificare fină (a), lepuire (b), superfinisare (c). După prelucrare pe suprafața piesei se găsește un strat 1 (0.2-0.3nm) cu molecule din gaze adsorbite din atmosferă; stratul 2 de oxizi și nitruți (la rectificare și sup finisare) sau o peliculă moleculară de adsorbție în care se află încorporate particule abrazive fine (la lepuire), peliculă datorată acțiunii oxigenului, azotului și a unor acizi grași multimoleculari care intră în compoziția amestecului de lepuire; stratul deformat 3 și materialul de bază 4. La toate PNFA deformarea plastică și ecruisarea stratului superficial al piesei determină apariția în materialul acestuia a unor tensiuni remanente de compresiune importante ca valoare. După necesități, adâncimea stratului durificat poate fi micșorată până la 2-5  $\mu\text{m}$ , gradul de ecruisare până la 10 % și modificările structurii stratului superficial la adâncimi până la 1 $\mu\text{m}$ , în raport cu 8 $\mu\text{m}$  la rectificare. Trecerea de la regimul de așchiere la regimul de deformare plastică conduce la creșterea tensiunilor remanente de compresiune, acestea fiind determinate în cea mai mare măsură de presiunea de contact dintre suprafețe [B1],[M8].

## 1.3 Analiza critică a procesului de lepuire

### 1.3.1 Noțiuni de bază

Lepuirea este procesul tehnologic de prelucrare prin aşchiere cu granule sau pulberi abrazive aflate în suspensie între suprafața prelucrată și suprafețele active ale sculei care se află în mișcare relativă. Datorită presiunii de apăsare o parte din abraziv se poate imprima pe suprafața sculei de lepuire, iar prin mișcări libere de tip bucle elicoidale se obține piesa de o calitate foarte bună a suprafeței (oglină) [D5].

Particularitățile lepuirii față de alte procedee de netezire fină abrazivă constau în faptul că [B1]:

- suprafața de prelucrat este supusă în același timp la acțiuni mecanice dar și chimice cu scopul îndepărtării de particule de material ;
- prelucrarea se realizează la interacțiunea piesei de prelucrat cu o sculă rigidă astfel încât precizia formei geometrice a suprafeței prelucrate este determinată de precizia sculei rigide, scula pentru lepuire constituind deci suportul mediului abraziv de lepuire și, în același timp, este purtătoarea formei geometrice ce trebuie imprimată piesei;
- pe suprafața prelucrată există adâncituri, zgârieturi fără o direcție preferențială;
- prelevarea de material de pe suprafața de prelucrat se realizează în principal prin elementele aşchietoare ale granulelor abrazive fixate temporar pe suprafața sculei sau aflate în stare liberă în zona de prelucrat;
- în contact cu suprafețele de lucru ale sculei se găsește toată suprafața de prelucrat a piesei și prin urmare prelevarea de material se produce continuu pe întreaga suprafață de prelucrat, ceea ce duce la înrăutățirea condițiilor de evacuare din zona de aşchiere a produselor prelucrării, uzurii, o parte rămân în amestecul de lepuire, iar o parte - particule mici de aşchii- aderă, se fixează pe suprafața activă a sculei, ceea ce conduce la necesitatea reînnoirii amestecului de lepuire și respectiv a suprafeței de lucru a sculei;
- procesul se realizează la regimuri de aşchiere slabe, de exemplu presiunea de contact între suprafețe este de circa 10-1000 de ori mai mică decât cea corespunzătoare honuirii și rectificării, astfel încât temperatura medie în zona de prelucrare să nu depășească temperatura admisibilă de circa 80 °C și amestecul de lepuire să nu se disperseze de pe suprafața sculei.

Domeniile de aplicare pentru lepuire sunt diverse: hidraulică, pneumatică, electrotehnică, mecanică fină și optică, construcții de mașini, autovehicule, aeronautică, dar sunt și piese la care lepuirea este consacrată, cum ar fi: suprafețe de etanșare pentru lichide și gaze, suprafețe active ale aparatelor de măsură și control, căi și elemente de rulare la rulmenți, fețe de degajare și aşezare a sculelor aşchietoare, probe metalografice, suprafețe de referință, de ghidare, de aşezare, arbori, axe, alezaje, bușe, ș.a.



## 1.3.2 Caracteristici tehnologice ale procesului de lepuire

### 1.3.2.1 Scula pentru lepuire

Scula pentru lepuire constituie suportul mediului abraziv de lepuire și este purtătoarea formei geometrice ce trebuie imprimată piesei de prelucrat. În general sculele pentru lepuire se mai numesc suporturi sau accesorii-suport și se găsesc într-o gamă variată de forme: disc (placă, platou, pastilă), dorn (bară, tijă, con). La lepuire sculele se execută din materiale mai moi decât piesa. Pentru pastele din pulberi micrometrice se recomandă a se utiliza suporturi dure, iar pentru pastele din granule submicrometrice suporturi moi. Suporturi dure antrenează mai bine granulele abrazive în mișcarea de rotație, iar suporturi moi ajută în mișcarea de abrazare. La alegerea suporturilor trebuie să se țină seama de [G1],[M3]:

- natura materialului piesei de prelucrat;
- configurația piesei de prelucrat;
- felul prelucrării (semifinisare, finisare, superfinisare);
- gradul de mecanizare al prelucrării;
- calitatea prescrisă a suprafeței.

În funcție de necesitățile dictate de prelucrări, se utilizează o diversitate mare de materiale: metalice - cea mai uzuală este fonta cenușie cu duritatea 140-260 HB, oțel moale, cupru, bronz, alamă, aluminiu, plumb, zinc - materiale plastice, ceramică spongioasă, fibre sintetice, lemn de diferite esențe, materiale textile (fetu, postav, pâslă) [M13],[D2],[D5],[P8],[G1],[K6],[M1]. O mare importanță se acordă uzurii suportului pentru abraziv, iar, dacă este cazul, să se asigure un sistem de răcire a acestuia, recomandarea este să nu se depășească cu mai mult de 50°C temperatura mediului ambiant, iar lucrările pretențioase să se efectueze în încăperi climatizate.

### 1.3.2.2 Mediul abraziv

Mediul abraziv (mediu de lepuire, amestec de lepuire, pastă abrazivă) este compus din granule abrazive (abraziv, particule abrazive, material abraziv) și lichid de lepuire (lichid purtător, fluid suport, liant, mediu purtător) determinând în mod esențial prelevarea de material în procesul de lepuire. În continuare se dau referințe legate de principalii parametri ai mediului abraziv.

#### *a) Natura materialului abraziv*

Granulele abrazive sunt particule dure cristaline sub formă de poliedri neregulați care prin muchiile și vârfurile lor ascuțite au proprietăți așchietoare. Se utilizează abrazivi naturali și sintetici. Abrazivii naturali ca: diamantul tehnic natural, corindonul ( $Al_2O_3$ ), cuarțul ( $SiO_2$ ), argila, gresia, piatra ponce, șmirghelul au o utilizare limitată deoarece în stare pură se găsesc în cantități mici. Abrazivii sintetici sunt cei mai utilizați: diamantul sintetic, nitrura cubică de bor (NCB), carbura de bor ( $B_4C$ ), carbura de siliciu (SiC), electrocorindonul ( $Al_2O_3$ ), aceștia făcând parte din grupa abrazivilor cu duritate mare.

între 9 și 10 pe scara Mohs. Alți abrazivi mai puțin uzuali cum ar fi oxidul de ceriu, de fier, de crom, poliritul se folosesc la polisarea sticlelor tehnice, ei fiind din grupa abrazivilor mai moi cu duritatea în jur de 7, iar oxidul de titan și alte materiale sunt necesare doar la aplicații speciale [D5],[D1],[P9],[\*13]. Principalele caracteristici ale abrazivilor duri sunt prezentate în tabelul 1.4 [G1],[P8],[M3].

Tabelul 1.4 Proprietăți fizico-mecanice ale principalilor abrazivi utilizați la lepuire

Proprietăți	Unitate de măsură	Diamant	Carbură de bor	Carbură de siliciu	Electrocorindon
Proprietate de eroziune relativă*	-	1	0.5-0.6	0.25-0.45	0.14-0.16
Uzura relativă	-	1	4	4.9	10.5
Densitate	g/cm <sup>3</sup>	3.48-3.56	2.48-2.5	3.12-3.22	2.00-2.10
Microduritate	daN/mm <sup>2</sup>	10000	3700-4300	3000-3300	2000-2400
Duritate Mohs	-	10	9.6	9.4	9
Duritate Knoop	-	8000-8500	2250	2050-2150	1620-1680
Modul de elasticitate	daN/mm <sup>2</sup>	90000	29600	36500	-
Rezistență la compresiune	daN/cm <sup>2</sup>	0.350	180	150	76
Rezistență la încovoiere	daN/mm <sup>2</sup>	21-49	21-28	5-15	8-9
Coefficient de dilatare liniară	1/°C.10 <sup>-6</sup>	0.9-1.45	4.5	6.5	7.5

\* Proprietățile de eroziune se determină prin volumul de material îndepărtat în unitatea de timp, când între două discuri de sticlă care se rotesc în sens invers și sunt apăstate cu o anumită forță s-a interpus o anumită cantitate de abraziv.

Abrazivul utilizat depinde de materialul din care sunt confecționate piesele de prelucrat, recomandându-se [K6],[P9]:

- ⇒ electrocorindon: pentru oțel moale, fontă, metale ușoare, polimetale neferoase, cărbune, semiconductori;
- ⇒ carbură de siliciu: oțeluri de îmbunătățire și aliate;
- ⇒ carbură de bor: carburi metalice, ceramică;
- ⇒ diamant: carburi metalice și pentru lustruire.

#### b) Granulația abrazivului

Granulațiile de materiale abrazive se împart, după dimensiuni (în micrometri), în trei grupe: granule, pulberi și micropulberi (STAS 1753-90). Grupa granule cuprinde 12 sorturi de granulații între 2500 și 160 μm. Pulberile abrazive cuprind 6 sorturi de granulații între 160 și 40 μm, iar micropulberile cuprind 7 sorturi de granulații între 40 și 3 μm [\*7]. Având în vedere că la prelucrările de netezire fină abrazivă se utilizează ultimele două categorii în tabelul 1.5 se dă notația standardizată pentru pulberi și micropulberi și corespondența între cele două moduri de indicare a granulației [D1],[G1].

Tabelul 1.5 Pulberi și micropulberi abrazive

Denumire	Notație STAS 1753-90	Caracteristici		
		Număr de ochiuri/țol	dimensiuni [ $\mu\text{m}$ ]	
			max	min
Pulberi	12	100	160	125
	10	120	125	100
	8	150	100	80
	6	180	80	63
	5	230	63	50
	4	280	50	40
Micropulberi	M 40	320	40	28
	M 28	400	28	20
	M 20	500	20	14
	M 14	600	14	10
	M 10	700	10	7
	M 7	800	7	5
	M 5	900	5	3
	M 3*	1000	3	1
	M 1*	1200	1	0

\* Granulații de finețe microscopică, în prezent necuprinse în STAS 1753-90, simbolizate prin extinderea celor standardizate.

Fiecare sort se caracterizează printr-o compoziție granulometrică (STAS 1753-90) exprimată în procente, în cinci fracțiuni: fracțiunea limită, mare, principală, complexă, mărunță. Nu se recomandă abateri mai mari de 20% ale dimensiunilor granulelor abrazive în cadrul aceleași clase de mărimi. Uniformitatea dimensiunilor granulelor abrazive, duritatea, felul și numărul de muchii tăietoare ale acestora sunt caracteristici esențiale pentru calitatea amestecului pentru lepuire. Granulele prea mari compromit calitatea suprafeței, iar granulele prea mici au o putere de erodare prea mică, deci un randament scăzut al prelucrării.

În manualele de proiectare [P8],[P9] sunt date recomandări pentru alegerea granulației abrazivului în corespondență cu rugozitatea impusă suprafeței de prelucrat.

### c) Natura lichidului purtător

Lichidul purtător trebuie [K6],[M1],[\*12],[\*18] să:

- ⇒ asigure un amestec mecanic omogen cu materialul abraziv (deci miscibilitatea celor două componente ale mediului abraziv și dispersie egală a granulelor abrazive în liant);
- ⇒ asigure transportul și îndepărtarea materialului erodat din zona de lucru;
- ⇒ aibă o anumită consistență, se referă la gradul de vâscozitate la temperatura ambiantă (de exemplu la granulații mari se recomandă medii purtătoare cu vâscozitate ridicată);
- ⇒ fie rezistent la temperaturi mai ridicate (în cazul creșterii temperaturii apar modificări de vâscozitate a mediului de lucru și de evaporare a componentei lichide a acestuia);
- ⇒ nu depășească un anumit procent de impurități, evitându-se îmbăcsirea acestuia;



- ⇒ nu permită aglomerări, sedimentări imediate;
- ⇒ fie solubil în apă, alcool, ulei sau universal solubil.

Pentru a răspunde acestor cerințe lichidul purtător trebuie să conțină substanțe lubrifiante, dispersanți, agenți de diluție și anticorozivi. În același timp are rol de ungere și răcire.

Ca mediu purtător se utilizează : apă, alcool, ulei (ulei de măsline, ulei mineral), emulsie de ulei în apă, petrol, benzină, motorină, soluție de glicerină cu metanol. Alte substanțe de adaos sunt acidul stearic, oleic, terebentină, parafină, seu, vaselină, ș.a. [K6],[\*14],[D5],[D2],[D4],[M13],[M3],[T1].

#### *d) Concentrație abraziv/lichid purtător*

În corelație cu mărimea granulației și natura suportului, cel de-al treilea factor determinant în obținerea unei calități impuse a suprafeței prelucrate, este concentrația abraziv-lichid purtător. Aceasta se poate exprima procentual volumic (20...50%) sau masic (1/4,1/2...1/1). Există o concentrație optimă de granule abrazive în lichid, peste care cantitatea de material prelevat nu mai crește, putând apărea chiar o deteriorare a calității suprafeței prelucrate. La creșterea concentrației peste nivelul optim, o dată cu mărirea numărului de granule abrazive, scade încărcarea specifică pe fiecare granulă în parte, având ca efect creșterea vitezei de translație și rostogolire, diminuându-se efectul lor de abrazare. La concentrații mai mici de granule abrazive prin creșterea încărcării specifice pe fiecare granulă, acestea se vor sparge mai des, cu scăderea corespunzătoare a dimensiunilor granulelor, rezultând microcanale mai dese, dar mai puțin adânci, deci o creștere a calității suprafeței prin micșorarea adâncimii rugozităților.

Se recomandă concentrații normale sau ridicate atunci când se urmărește obținerea unei productivități ridicate și a unor calități de suprafață în limita obișnuită a finisărilor și concentrații joase sau medii când se urmărește o calitate foarte bună a suprafeței [G1],[M3],[K6].

#### *e) Mod de alimentare*

Aducerea abrazivului în zona de prelucrare se poate face în mai multe moduri:

- ⇒ alimentare o dată la început de proces;
- ⇒ prin alimentare periodică (picurare, stropire);
- ⇒ prin alimentare continuă.

Alimentarea doar la începutul procesului de lepuire se aplică în cazul pudrelor și pastelor abrazive, adăugarea unui nou strat de amestec de lepuire se face numai după utilizarea completă a stratului depus anterior. Alimentarea periodică poate fi manuală sau mecanică. La mașinile de lepuire mai noi există sisteme de alimentare continuă constituite din bazine, pompe, sisteme de amestecare, de reglare și dozare a amestecului de lepuire permițând o alimentare optimă pentru fiecare caz în parte [K6],[\*11],[\*15],[\*16],[\*17].

Modul de introducere a amestecului de lepuire este influențat de menținerea acestuia în zona de lucru, dar și de forma suprafețelor în contact, acționându-se asupra formei constructive a sculei. În acest scop se practică degajări de diferite forme, cu rol de “buzunar” pentru amestecul de lepuire: de exemplu discurile de lepuit pot avea rizuri concentrice pe suprafața activă.

Consumul de amestec de lepuire depinde de mai mulți factori: numărul de piese prelucrate, presiunea de contact între suprafețe, mărimea suprafeței de prelucrat, etc. Amestecul odată folosit, nu mai este utilizabil, întrucât granulele abrazive sunt uzate, dar amestecul se poate colecta, decanta, filtra și să se refolesească lichidul purtător, adăugându-i-se o nouă cantitate de granule abrazive [K6].

Pentru obținerea calității dorite a suprafeței prelucrate se impune respectarea următoarelor indicații tehnologice [M3],[G1],[K6]:

- ⇒ pelicula (filmul, stratul) de lepuire formată nu trebuie să fie aibe grosime mare, scăzând astfel capacitatea de prelevare de material, dar trebuie să se țină cont că și ruperea peliculei este periculoasă, compromițând prelucrarea prin posibilitatea apariției de suduri reci a pieselor cu scula de lepuit;
- ⇒ trecerea la o nouă fază de prelucrare se face numai după spălarea corespunzătoare a suprafeței rezultate în urma operației anterioare, recomandându-se și schimbarea accesoriului-suport, corespunzător granulației care urmează să fie utilizată.

### 1.3.2.3 Piesa de prelucrat

Prin lepuire se pot prelucra aproape toate materialele care au o structură omogenă și nu se deformează plastic sub propria greutate sau în timpul prelucrării: metale, materiale izolatoare, sticlă, marmură, granit, bazalt, pietre prețioase, materiale sintetice din domeniul tehnicii semiconductorilor și materiale precum cărbunele sau grafitul [K6]. Se pretează cel mai bine lepuirii:

- oțelurile de cementare, de construcție și aliate, tratate termic, cu o duritate de 55...62 HRC;
- neferoasele, mai ales bronzurile de Sn și Al, care au o duritate mai ridicată;
- fontele, însă fără lustru, cu inconvenientul că în material pot rămâne granule abrazive greu de îndepărtat prin spălare.

Se lepuiesc mai greu oțelurile nitrurate și piesele cromate dur [P8],[P9].

### 1.3.2.4 Parametrii regimului de lucru în procesul de lepuire

Caracterul prelevării de material la lepuire depinde de alegerea corespunzătoare a parametrilor regimului de lucru [D5],[K6],[\*18],[P9],[\*2]. Se recomandă ca lepuirea să se facă în cel puțin două faze: *lepuire preliminară* și *lepuire definitivă*, cu micșorarea succesivă a granulației materialului abraziv.

☞ Adaosul de prelucrare la lepuire are valori cuprinse între limitele 0.004-0.050 mm.

- ☞ Vitezele de aşchiere la lepuire manuală sunt de 10-30 m/min, iar la cea mecanică 100-200 m/min. Prelevarea de material creşte cu creşterea vitezei (turaţiei), dar este limitată de forţa centrifugă care îndepărtează granulele abrazive spre periferia zonei active dintre sculă şi piesa de prelucrat.
- ☞ Presiunea de contact între scula de lepuit şi piesă este în medie 0.1-3.5 MPa şi are influenţa cea mai mare asupra prelevării de material. Ea trebuie riguros aleasă pentru a nu deforma sau tensiona piesa şi pentru a nu întrerupe pelicula de amestec de lepuit.

### 1.3.3 Clasificarea proceselor de lepuire

Variantele constructiv-tehnologice de lepuire se pot clasifica după mai multe criterii: după *gradul de mecanizare*, după *modul de echipare cu scule*, după *tipul suprafeţei prelucrate*, etc.

În funcţie de gradul de mecanizare, lepuirea poate fi:

- ⇒ *manuală* - se aplică în producţia de unicate, prelucrându-se piese de configuraţie complexă, procesul este laborios, precizia şi calitatea prelucrării depinzând semnificativ de experienţa muncitorului;
- ⇒ *manual-mecanică* - se aplică la producţia unicală sau de serie mică. Se realizează pe maşini de găurit şi strunguri, pe vârfuri de finisare speciale, pe maşini electromecanice şi pneumatice specializate; în acest caz câteva mişcări ajutătoare pentru efectuarea lucrărilor, mişcarea rectilinie alternativă, realizarea unei sarcini suplimentare asupra sculei de lepuit se execută manual.
- ⇒ *mecanică* - se execută pe maşini de lepuit speciale sau universale, care lucrează în ciclu automat sau semiautomat. Este metoda cea mai productivă.

În funcţie de modul de echipare cu scule în fig.1.18 [B1] se prezintă diferite scheme principiale de lepuire.

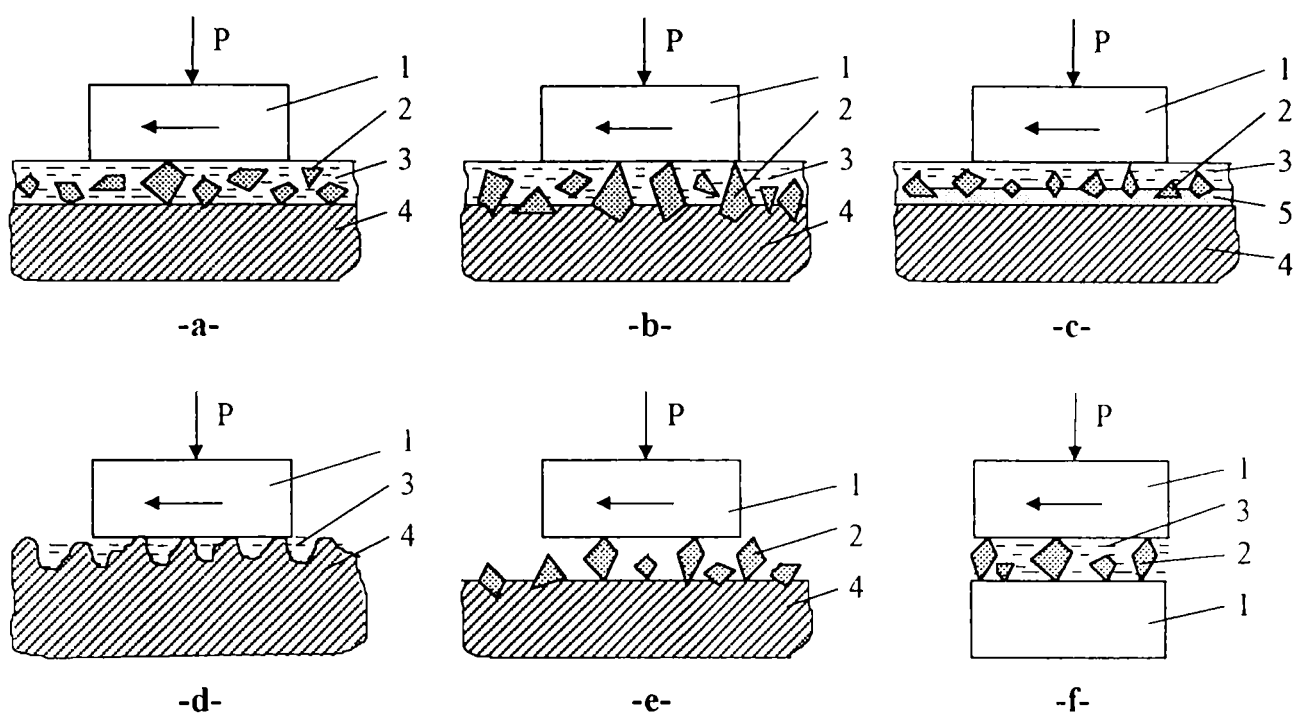
#### a) Lepuirea cu suspensie abrazivă sau cu pastă abrazivă.

Lepuirea cu suspensie abrazivă utilizează o concentraţie mică de granule aşchietoare care se introduce continuu în zona de prelucrare. Se caracterizează prin productivitate relativ mare, dar cu rezultate slabe din punct de vedere al preciziei şi rugozităţii obţinute, de aceea se foloseşte în general la lepuirea preliminară (de degroşare). Este eficientă la prelucrarea materialelor extradure şi fragile. Dezavantaje: consum sporit de material abraziv, necesitatea curăţirii frecvente a conductelor datorită îmbâcsirii lor, uzura accelerată a pieselor în frecare ale maşinii-unelte ca urmare a căderii granulelor abrazive.

Lepuirea cu paste abrazive se realizează cu o concentraţie mărită de granule abrazive. Este mai puţin productivă, dar asigură precizii şi netezimi superioare.

#### b) Lepuirea cu sculă încărcată cu granule abrazive

Este mai puţin productivă, dar asigură cea mai ridicată precizie de prelucrare şi cea mai mică rugozitate.



1- piesă de prelucrat; 2- granulă abrazivă; 3- fază lichidă; 4- sculă de lepuit; 5- liant

a- lepuire cu suspensie abrazivă sau cu pastă abrazivă; b- lepuire cu sculă încărcată cu granule abrazive;  
c- lepuire cu sculă diamantată; d- lepuire fără abraziv; e- lepuire uscată; f- lepuire reciprocă sau rodare

Fig. 1.18 Scheme de lepuire

### c) Lepuirea cu scule diamantate

Se utilizează o sculă monolitică pe suprafața activă a căreia este aplicat un strat de diamant. Este metoda cea mai progresistă ce asigură o productivitate ridicată, de 2-4 ori mai mare și o rugozitate a suprafeței cu 1-2 trepte mai bună în comparație cu corindonul sau carbura de siliciu [P9]. Principalul dezavantaj constă în utilizarea incompletă a stratului diamantat al sculei.

### d) Lepuirea fără abraziv

Se aplică la prelucrarea pieselor din materiale nemetalice, moi și poroase. Scula este din sticlă având practicate niște degajări, iar ca lubrifianți se folosesc pulberea din grafit, bisulfura de molibden și altele.

### e) Lepuirea uscată

Favorizează apariția unei frecări uscate și o strălucire caracteristică acesteia. Se aplică la obținerea suprafețelor oglindă, rugozitatea suprafeței este de 2-3 ori mai mică decât la lepuirea umedă. Dezavantajul lepuirii uscate constă în “arderea sculei”, determinată de frecarea și oxidarea porțiunilor supuse la temperaturi ridicate. Fenomenul este accelerat de creșterea vitezei, a forței de apăsare și a duratei de lepuire.

### f) Lepuirea reciprocă sau rodarea

Este un caz particular al lepuirii care se realizează fără utilizarea unei anumite

scule, rolul sculei de lepuie este îndeplinit de piesa conjugată celei prelucrate, caz în care lepuirea separată nu asigură precizie ridicată a îmbinării. Dezavantajul constă în lipsa interschimbabilității suprafețelor conjugate.

Suprafețele care se lepuiesc prezintă o multitudine de forme geometrice și dimensiuni, aplicându-se astfel diverse procedee de lepuire. Așadar, clasificarea schemelor constructiv-tehnologice de lepuire după tipul suprafeței prelucrate ține cont de faptul că forma sculelor și mișcarea acestora diferă în funcție de forma suprafeței prelucrate și a piesei pe care este aplicată, determinând schema de lucru și structura mașinii-unelte. Procedeele de lepuire se subclasifică în [K6],[M13]:

- lepuire plană;
- lepuire cilindrică;
- lepuire conică;
- lepuire suprafețe filetate;
- lepuire danturi;
- lepuirea unei forme (de exemplu forma sferică);
- lepuire de post formare (suprafețe oarecare obținute prin mișcări de avans după două direcții).

O altă clasificare a proceselor de lepuire se face după suprafața activă a sculei de lepuire:

- lepuire pe circumferință (când axa sculei și suprafața piesei sunt paralele);
- lepuire laterală (când axa sculei și suprafața piesei sunt perpendiculare).

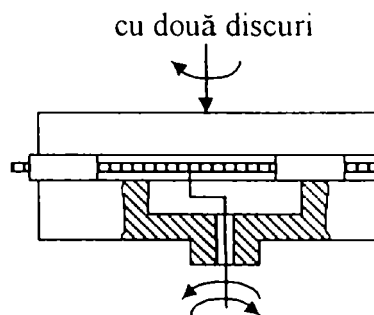
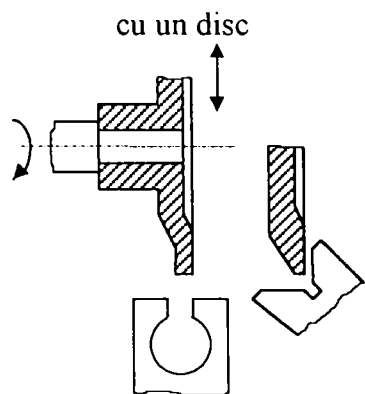
În fig.1.19 sunt redate schemele de lucru cele mai uzuale folosite în procesele de lepuire în funcție de tipul suprafeței prelucrate [M13],[H2],[L4].

Mașinile-unelte de lepuie se pot clasifica, după forma suprafețelor prelucrate, în [M13],[L4],[D5],[D2],[\*6],[\*11],[\*15]:

- mașini de lepuie plan:
  - orizontale cu un disc;
  - verticale cu un disc;
  - verticale cu două discuri plan-paralele;
- mașini de lepuie rotund:
  - cu ax orizontal (cu un arbore sau cu arbori multipli);
  - cu ax vertical;
- mașini de lepuie universale;
- mașini de lepuie speciale.

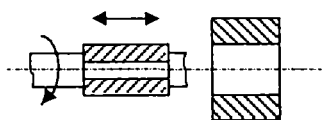
La acestea se adaugă dispozitivele de lepuie adaptate pe mașini-unelte universale de tipul strungurilor, mașinilor de găurit, rectificat. etc.

### SUPRAFEȚE PLANE

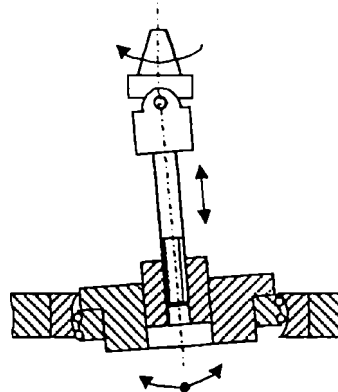


### SUPRAFEȚE CILINDRICE

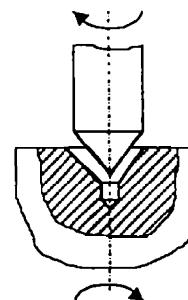
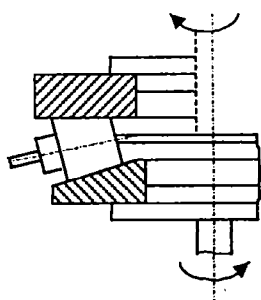
cu ax - orizontal  
- vertical



cu pendulare

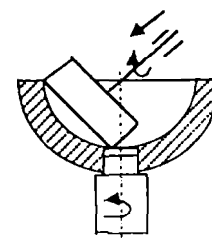
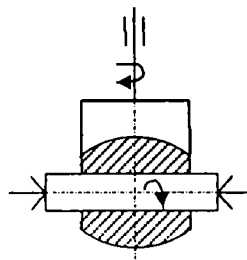
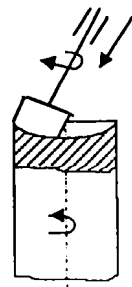
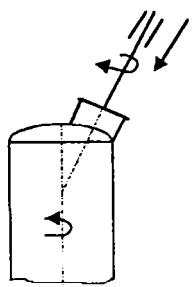


### SUPRAFEȚE CONICE



### SUPRAFEȚE SFERICE

- cu sculă rigidă -



- cu sculă pendulară -

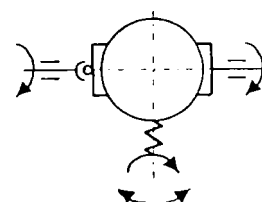
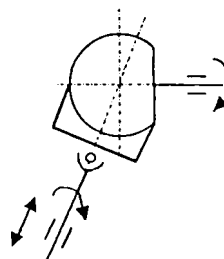
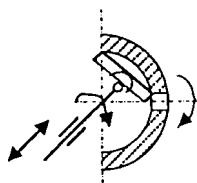
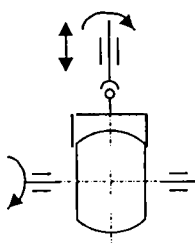


Fig.1.19 Scheme de prelucrare prin lepuire



### 1.3.4 Avantaje / dezavantaje ale procesului de lepuire

Pe lângă *avantajele* tuturor procedeelor de netzire fină, cele specifice lepuirii constă în primul rând din:

- posibilitatea de a lucra cu scule relativ simple, ieftine;
- marea diversitate de suprafețe care pot fi prelucrate prin acest procedeu.

*Dezavantajele* principale ale acestui procedeu sunt:

- necesitatea unor mașini-unelte cu mișcări complexe datorită condiției ca traiectoria granulei să nu se repete;
- necesitatea prelucrărilor prealabile precise cu obținerea unor adaosuri de prelucrare mici;
- dificultatea prelucrării pieselor de mare complexitate;
- productivitate scăzută
- pătrunderea granulelor abrazive libere în suprafața de prelucrat;
- posibilități reduse de evacuare a produselor prelucrării din zona de așchiere;
- reînnoirea amestecului de lepuire și chiar a sculei.

Pe baza studiului bibliografic se observă că rezultatele obținute pe un anumit material al piesei de prelucrat nu sunt valabile și pentru alte materiale, de unde necesitatea efectuării unor studii teoretice și experimentale în vederea îmbunătățirii teoriei elasto-plastice a lepuirii, ținând cont de caracterul divers al materialelor și abrazivilor utilizați, iar pe de altă parte necesitatea a cât mai multe încercări experimentale în vederea obținerii unor bănci de date referitoare la lepuire, care să permită în condiții practice concrete alegerea variantei optime din punct de vedere tehnologic și economic [T1].

### 1.4 Factori de influență și funcții obiectiv ale PNFA

PNFA sunt procese complexe, în cadrul cărora fenomenele fundamentale sunt dirijate și influențate de o gamă largă de factori care acționează simultan într-o strânsă și continuă interdependență. Mărimea și modul de variație al factorilor în timpul desfășurării procesului de prelucrare determină efectul global de așchiere și de deformare plastică, acționează și dirijează ponderea fenomenelor elementare în spațiul de lucru, contribuie la realizarea stabilității procesului de prelucrare, cât și la stabilirea caracteristicilor tehnologice finale.

Evidențierea principalelor categorii de factori de influență și funcții obiectiv se va face după criteriul de clasificare anterior, pe baza informațiilor culese și prelucrate din literatura de specialitate. În fig.1.20 [T4] se prezintă schematic acești factori pentru PNFA cu abraziv legat, considerându-se inclusiv rectificarea, pe baza asemănărilor existente între procedee. Schema propusă conține și factori specifici numai unor procedee din cele analizate și mai poate fi completată cu alți factori [K2],[K6],[D6],[M11],[T3]. În fig.1.21 [P4],[T5] se prezintă în același mod schema factorilor de influență și funcțiile obiectiv în cazul PNFA cu abraziv liber.

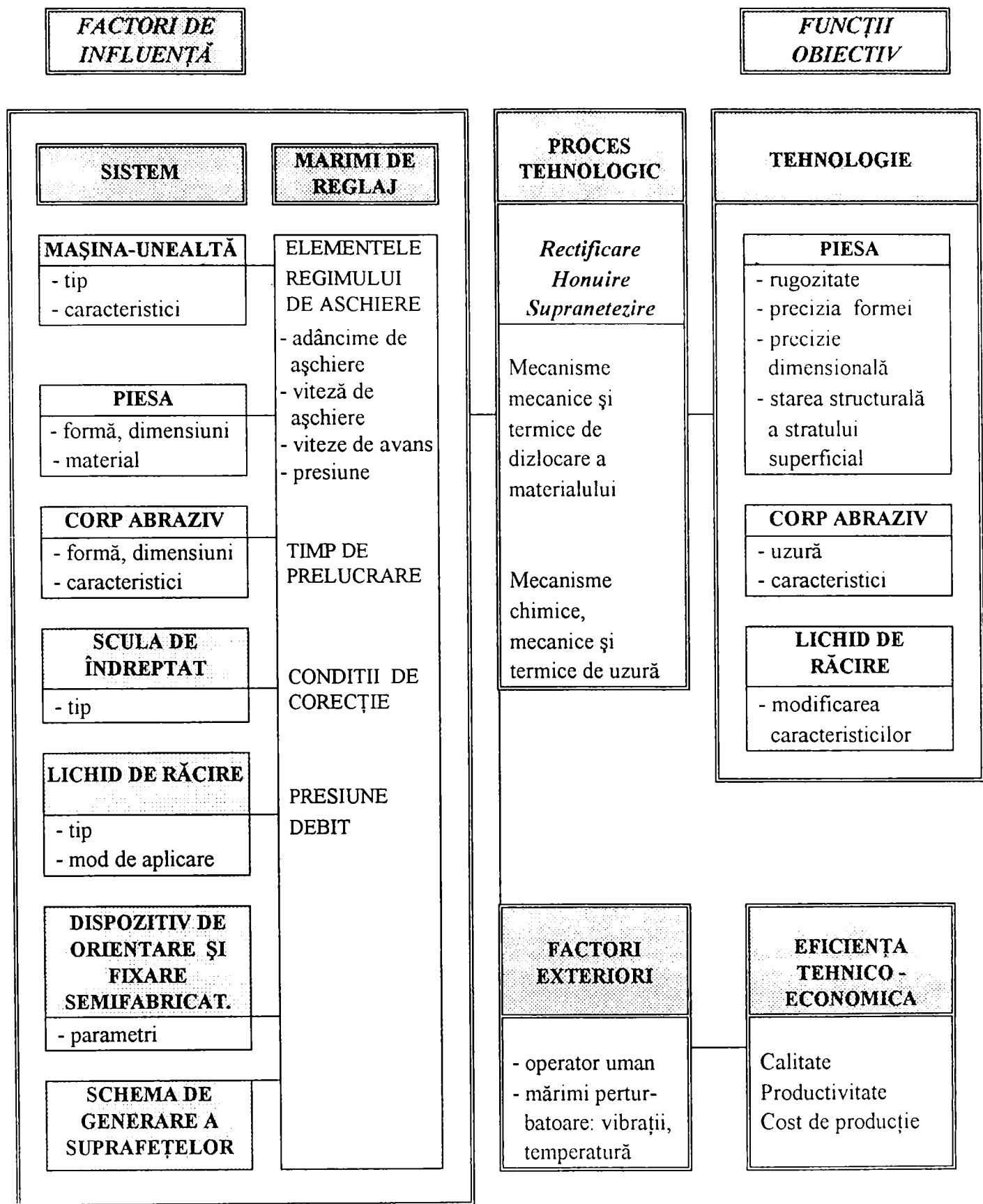


Fig.1.20 Factori de influență și funcțiile obiectiv în cazul PNFA cu abraziv legat

Din multitudinea factorilor de influență, este evident că unii au o importanță mai mare, alții mai mică, dar în timpul procesului de prelucrare se intercondiționează reciproc, fiind foarte dificilă punerea în evidență doar a unuia dintre ei. Factorii de influență, variabile independente, sunt în număr mare, numărul lor și regimul de variație al fiecăruia fiind dependent de finalitățile cercetării, cheltuieli, mijloace de material,



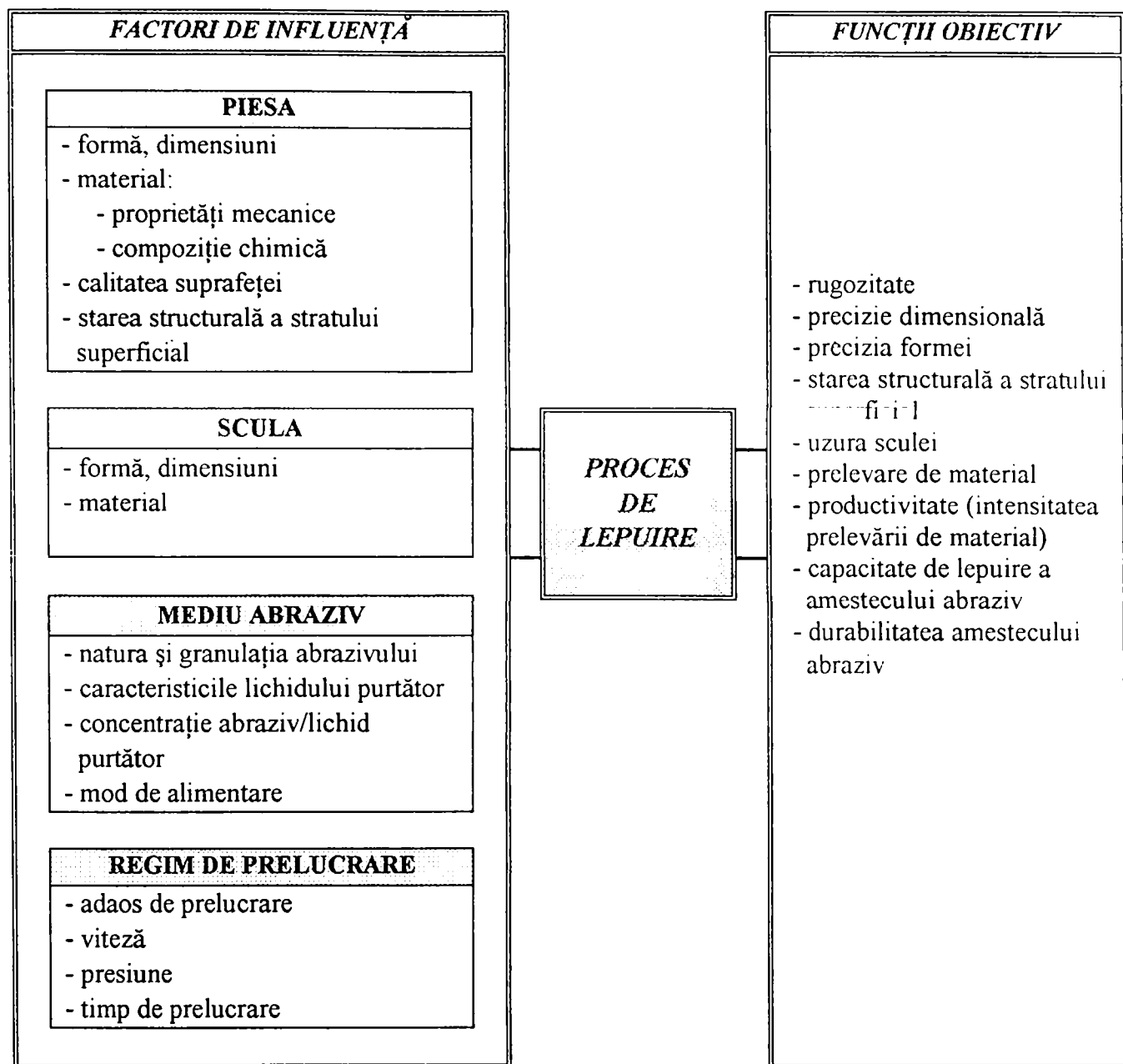


Fig.1.21 Factori de influență și funcțiile obiectiv în cazul PNFA cu abraziv liber

performanțele sistemului experimental.

Funcția de optimizat - *funcția obiectiv* - trebuie să evalueze cât mai global procesul dat și să fie, de preferat, o caracteristică cantitativă. Criteriile de optimizare pot fi de natură tehnică sau economică. În cazul PNFA criteriile de natură tehnică pot fi de exemplu asigurarea unei anumite rugozități sau a unei anumite clase de precizie. Criteriile de natură economică ar putea fi costul total minim, consumul de material sau de manoperă minim, productivitate maximă, fiabilitate maximă a sculelor, utilajelor, etc. Se pot alege și criterii combinate de natură tehnico-economică.

Deoarece numărul factorilor de influență și nivelele de reglare a lor determină volumul și costul experimentării, este util să se procedeze la o ordonare a factorilor în ordinea scăderii influenței exercitate asupra funcției obiectiv și, dacă este cazul, să se excludă din experiment factorii cu acțiune nesemnificativă [N8],[C4].

Principalii *indicatori tehnico-economici* ce caracterizează procesul de lepuire sunt:

- Productivitatea prelucrării, adică cantitatea de material prelevat în unitatea de timp;

- Capacitatea de lepuire totală a amestecului abraziv sau a sculei (cazul sculei încărcate cu granule abrazive) este cantitatea totală de material prelevat pe perioada durabilității amestecului (sculei);
- Durata de stabilitate (durabilitatea) a amestecului abraziv (sculei) dată de timpul până la oprirea prelevării de material sau până la înrăutățirea indicatorilor tehnici calitativi și cantitativi ai procesului.

*Indicatorii calitativi ai suprafețelor prelucrate au în vedere:*

- precizia dimensională și precizia formei geometrice;
- rugozitatea;
- procentajul lungimii portante;
- modificarea stării stratului superficial: adâncime și grad de durificare, tensiuni remanente, prezența granulelor abrazive pe suprafața piesei prelucrate.

*Funcțiile obiectiv ale procesului de lepuire depind deci de combinația diferiților factori care acționează în procesul de prelucrare. În literatură se întâlnesc dependențe factori de influență-funcții obiectiv sub formă analitică sau grafică. De exemplu, prelevarea de material  $q$  exprimată în [g/min] sau [ $\mu\text{m}/\text{min}$ ] și rugozitatea suprafeței la nivelul indicelui  $R_z$  [ $\mu\text{m}$ ], sunt definite de următoarele expresii [B1]:*

$$q = C_q \cdot v \cdot p^\gamma \cdot d^\delta \cdot W^\xi \cdot S^{-m} \quad (1.18)$$

$$R_z = C_{R_z} \sqrt{d} \quad (1.19)$$

unde:  $C_q$ ,  $C_{R_z}$  - coeficienți ce depind de proprietățile materialului prelucrat, de abraziv și de condițiile de prelucrare;  $v$  - viteza de lepuire;  $p$  - presiunea pe suprafața de prelucrat;  $d$  - dimensiunea mijlocie a fracțiunii principale a pulberii abrazive;  $W$  - concentrația pulberii abrazive în faza lichidă, considerată masic;  $S$  - suprafața de contact sculă-piesă;  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\xi$ ,  $m$  - coeficienți ( $\gamma = 0.7 \dots 1.0$ ;  $\delta = 0.5 \dots 0.7$ ;  $\xi = 0.7$ ;  $m = 0.3$ ).

Un model experimental în vederea optimizării procesului de lepuire cilindrică din punct de vedere al rugozității suprafeței este prezentat în [K3]. S-a realizat un experiment factorial fracționat la 1/2 cu un număr  $N = 2^{4-1} = 8$  încercări experimentale; factorii de influență luați în considerare fiecare pe două nivele de variație au fost: mărimea granulelor abrazive A (Nr.12, M20), presiunea de lepuire B (0.3 MPa, 0.15 MPa), numărul alimentărilor cu amestec de lepuire în timpul prelucrării C (6 și 3) și viteza de lepuire D (100 m/min, 50 m/min). Condițiile experimentale au fost: dispozitiv de lepuire adaptat pe strung, semifabricat  $\Phi 50$  din OLC 45, granule din CW, rugozitatea inițială a suprafeței  $R_a = 2,1 \dots 2,7 \mu\text{m}$ , rugozitatea s-a măsurat înainte și după lepuire în 30 de puncte, durata lepuirii este cea corespunzătoare a 20.000 rotații ale piesei fixată în universalul strungului.

Datele  $y_i$  ( $i=1,2,3$ ) reprezintă scăderea procentuală a rugozității:

$$y_i = \frac{\Delta R_a}{R_{a\text{inițial}}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.20)$$

unde:  $\Delta R_a = R_{a\text{inițial}} - R_{a\text{final}}$ ;  $R_{a\text{inițial}}$  - rugozitatea suprafeței înainte de lepuire;  $R_{a\text{final}}$  - rugozitatea suprafeței după lepuire.

$$y = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3} \quad (1.21)$$

Funcția obiectiv este eficiența scăderii procentuale a rugozității, exprimată de raportul S/N:

$$S / N = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1.22)$$

Se determină un model de regresie liniară pentru raportul S/N ca variabilă de răspuns, considerându-se efectele dovedite semnificative:

$$S/N = 27,575 - 0,719 \cdot A + 1,923 \cdot B + 0,943 \cdot BC \quad [\text{dB}] \quad (1.23)$$

Se concluzionează că:

- ☞ presiunea de lepuire are un efect semnificativ asupra eficienței lepuirii cilindrice și trebuie menținută la un nivel superior;
- ☞ modul de alimentare cu amestec de lepuire trebuie tratat ca o variabilă importantă, nefiind semnificativ prin el însuși, ci prin efectul interacțiunii cu presiunea de lepuire;
- ☞ mărimea granulelor trebuie să fie la un nivel inferior, deci granulații mici, la fel viteza de lepuire.

De remarcat că modelele existente se bazează pe relații empirice, care exprimă cu o largă aproximație dependența factori de influență - funcții obiectiv, iar cele determinate prin experiment factorial iau în considerare foarte puțini factori din multitudinea celor existenți. Se impune astfel *modelarea analitică și experimentală a proceselor de lepuire* având în vedere și alte scheme de lepuire uzuale industrial, de exemplu pentru cazul lepuirii plane, cu scopul optimizării acestor procese și creării unei bănci de date referitoare la procesul de lepuire în general.

### ACTIVAREA ULTRASONICĂ A PROCESELOR DE AȘCHIERE

#### 2.1 Caracteristici generale ale undelor ultrasonice

Ultrasunetele sunt oscilații mecanice ale mediului elastic, care au frecvența de oscilație  $f = 16 \cdot 10^3 \dots 10^{10}$  Hz. O perturbație produsă local în mediul elastic se propagă din aproape în aproape sub formă de undă acustică. Ultrasunetele sunt întâlnite și sub denumirea de unde, oscilații ultrasonice, ultrasonore, ultraacustice. Clasificarea undelor ultrasonice se poate face după diferite criterii [S2],[D3],[A1],[R2]:

A. După *forma frontului de undă*:

1. *unde sferice* - determinate de surse punctuale;
2. *unde cilindrice* - determinate de surse liniare (filiforme);
3. *unde plane* - unde considerate la distanță foarte mare de sursa de oscilație indiferent de forma acesteia.

B. După *traectoria particulelor mediului*:

1. *unde longitudinale* - direcția de oscilație a particulelor mediului este paralelă la direcția de propagare a undelor;
2. *unde transversale* - direcția de oscilație a particulelor mediului este perpendiculară pe direcția de propagare a undei;
3. *unde de suprafață (unde Rayleigh)* - traiectoria este un cerc sau o elipsă cu centrul în poziția de repaos a particulei, într-un plan paralel la direcția de propagare a undelor;
4. *unde de torsiune* - traiectoria particulelor este circulară, cu planul perpendicular pe direcția de propagare.

C. După *dimensiunile mediului în care se propagă*:

1. unde care se propagă în medii cu dimensiuni mari în comparație cu lungimea de undă (cele prezentate la punctul B);
2. unde care se propagă în medii cu dimensiuni comparabile cu lungimea de undă:
  - a. *unde cvasilongitudinale*;
  - b. *unde de încovoiere*;
  - c. *unde de placă (unde Lamb)* - direcția de propagare este paralelă cu suprafața mediului. Acestea se pot grupa în unde simetrice și unde asimetrice.

D. După *sensul de propagare a undelor* față de un sistem de referință ales:

1. *unde progresive (directe)* - se propagă în sens pozitiv în raport cu sistemul de referință ales;
2. *unde regresive (inverse)* - se propagă în sens negativ în raport cu sistemul de referință ales.

Principalele mărimi de câmp caracteristice undelor ultrasonice și aplicațiilor acestora sunt date în tabelul 2.1 [A1][D3],[S2].

Tabelul 2.1 Mărimi caracteristice undelor ultrasonice

Denumire	Simbol/ unitate de măsură	Formulă de calcul	Semnificația mărimilor ce intervin
perioada de oscilație	T [s]		
frecvența de oscilație	f [Hz]	$f = 1/T$	
viteza undei	c [m/s]		
lungimea de undă	$\lambda$ [m]	$\lambda = c / f = cT$	
amplitudinea deplasării particulei	A [m]		
presiunea acustică	p [Pa]	$p = p_t - p_0$ $p_{\max} = \rho c \omega A$	$p_t$ - presiunea totală din mediu; $p_0$ - presiunea statică $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] - densitatea mediului de propagare $\omega$ [rad]= $2\pi f$ frecvența unghiulară. pulsatia
impedanța acustică specifică	$Z_s$ [kg/s.m <sup>2</sup> ]	$Z_s = \rho \cdot c$	
energia acustică	E [J]	$E_{\text{med}} = (m \omega^2 A^2)/2$	m - masa mediului
densitatea fluxului de energie	$\epsilon$ [J/m <sup>3</sup> ]	$\epsilon_{\text{med}} = (\rho \omega^2 A^2)/2$	
puterea acustică	P [W]	$P = S p_e / c =$ $= S p_{\max}^2 / 2\rho \cdot c$	S[m <sup>2</sup> ] - aria suprafeței radiante; $p_e$ - presiunea acustică efectivă
intensitatea acustică	I [W/m <sup>2</sup> ]	$I = P / S$ $I_{\text{med}} = (\rho c \omega^2 A^2)/2$	
nivel de intensitate acustică	$\Delta L_i$ [-]	$\Delta L_i = 10 \lg (I/I_0)$	$I_0 = 10^{-12}$ W/m <sup>2</sup> intensitatea sunetului de referință
nivel de presiune acustică	$\Delta L_p$ [-]	$\Delta L_p = 20 \lg (p/p_0)$	$p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa presiunea acustică de referință

### Propagarea undelor ultrasonice

Ecuția de propagare a undelor reprezintă ecuația diferențială a unei unde plane, care se propagă pe direcția Ox cu viteza c într-un mediu liniar, izotrop, omogen, conservativ, fiind de următoarea formă [A1],[S2],[N1]:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

unde:  $\xi$  - deplasarea particulei în direcția de oscilație;

x - spațiul parcurs de undă în direcția de propagare.

Viteza de propagare a undelor ultrasonice c depinde de tipul de undă, de densitatea și de constantele elastice ale materialului prin care se propagă. În literatură se dau relațiile de calcul ale vitezelor de propagare în medii considerate izotrope și infinite, fără a se ține cont de fenomenele neliniare care se produc în mediile considerate.

La aplicarea unui câmp ultrasonic poate apare fenomenul de *interferență acustică*, care constă în suprapunerea a două sau mai multe trenuri de unde care se pot întâlni la propagarea prin același mediu, efectul fiind același ca și cum fiecare undă ar acționa

separat asupra mediului în acel punct. Dacă undele care interferă au aceeași frecvență și fază poate apare amplificarea undelor sau anularea reciprocă a acestora, dacă sunt în opoziție de fază.

O **undă staționară** se formează prin suprapunerea a două unde de aceeași frecvență care se propagă pe aceeași direcție în sensuri opuse. În figura 2.1 [L2], în

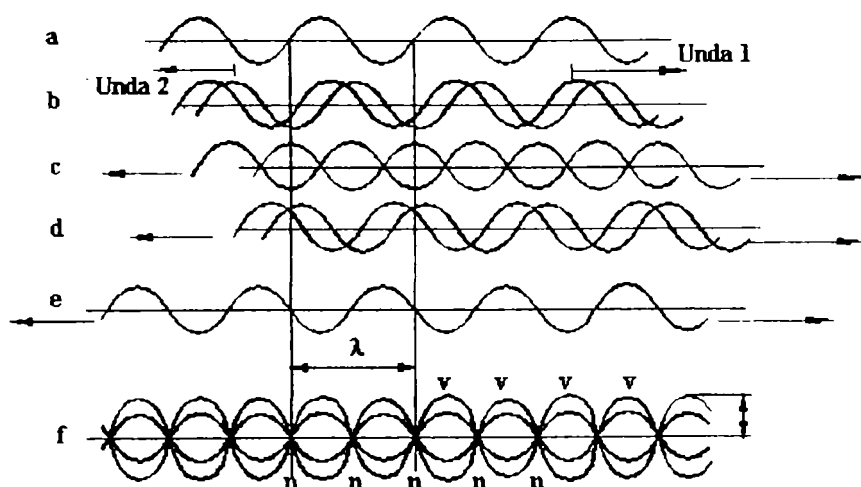


Fig.2.1 Formarea undelor staționare

cazurile particulare (a) și (e) cele două unde sunt în fază, în cazurile (b), (c) și (d) sunt defazate, generând o undă cu amplitudinea mai mică decât atunci când sunt în fază. În variația din figura (f) particulele din punctele nodale "n" nu se mișcă niciodată, iar cele din ventrele "v" oscilează cu amplitudine maximă.

### **Absorbția și atenuarea**

În câmpul ultrasonic există fenomene importante, caracterizate prin termeni neliniari, care influențează aplicațiile tehnice ale ultrasunetelor.

**Absorbția** apare la propagarea undelor ultrasonice într-un mediu real și constă în amortizarea, micșorarea treptată a energiei acustice, prin transformarea unei părți din energia acustică în energie termică a mediului de propagare. Absorbția este determinată de amplitudinea oscilațiilor, de frecvența și distribuția spațială a parametrilor de câmp, iar mecanismele prin care se produce acest fenomen sunt determinate de frecarea internă (vâscozitatea), conductibilitatea termică, radiația termică, fenomenul de relaxare, variația de densitate, diferența de presiune, variația energiei cinetice a moleculelor, ș.a. Pe de altă parte orice proces care preia energie dintr-o undă ultrasonică dar nu o disipă sub formă de căldură conduce la **atenuarea** undei printr-un proces diferit de absorbția mediului. Atenuarea este determinată de împrăștierea energiei acustice pe structura discretă a mediului fiind influențată de structura cristalină a acestuia și de neomogenitățile existente: incluziuni, sufluri, pori, fisuri, diverse defecte.

Trebuie menționate și alte fenomene caracteristice care însoțesc propagarea ultrasunetelor, luând cazul particular al undelor staționare longitudinale, fenomene care pot apărea la interfețele elementelor componente ale lanțului acustic sau la interfața lanțului acustic cu semifabricatul.

### **Reflexia și refracția undelor plane**

Se consideră că acestea se manifestă analog cu undele electromagnetice. La suprafața de separare a două medii o undă acustică aflată sub incidență normală sau oblică suferă o reflexie, o parte din energia acustică incidentă este redată primului mediu.



și o refracție prin care restul de energie acustică este transmisă în cel de-al doilea mediu. Cunoașterea acestor fenomene este necesară în calculul valorilor vitezei ultrasunetelor în diferite medii, a mărimii energiei acustice reflectate de transductorii ultrasonici, a amplitudinii undelor reflectate la suprafața semifabricatului, la amplasarea focarului fascicului de ultrasunete în zona de lucru.

### *Difracția și difuzia undelor ultrasonice*

Undele ultrasonice prezintă proprietatea de a ocoli obstacole ale căror dimensiuni sunt comparabile cu lungimea de undă  $\lambda$ . În anumite condiții, conform principiului lui Huygens, fiecare punct situat pe suprafața de separare a două medii poate fi considerat o nouă sursă de excitație acustică. Apariția difracției facilitează difuzia undelor acustice la întâlnirea cu un obstacol, o parte din ele interferând cu undele incidente ceea ce poate duce la fenomene nefavorabile desfășurării aplicațiilor tehnologice.

### *Fenomenul de rezonanță*

La aplicarea undelor ultrasonice în procesele tehnologice pentru obținerea unor efecte maxime sistemul oscilator trebuie să funcționeze în regim de rezonanță [D3],[C9]. Amplitudinea oscilațiilor variază în timp după o lege exponențială de forma:

$$A = A_0 \cdot e^{-\delta \cdot t} \quad (2.2)$$

$\delta$  = coeficient de amortizare, definește viteza descreșterii amplitudinii oscilațiilor în timp, fiind dat de proprietățile elasto-plastice ale mediului.

Amplitudinea vibrațiilor forțate atinge un maxim la o frecvență a forței aplicate sistemului, denumită frecvență de rezonanță, care satisface relația:

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2} \quad (2.3)$$

unde:  $\omega_0$  = frecvența proprie a sistemului.

Amplitudinea maximă la rezonanță a oscilațiilor este:

$$A_r = \frac{F_0}{m} \cdot \left( 2\delta \cdot \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \right) \quad (2.4)$$

$F_0$  - amplitudinea forței aplicate sistemului;

$m$  - masa volumului infinitezimal supus oscilației.

Modul de comportare la rezonanță a unui sistem oscilatoriu poate fi caracterizat de

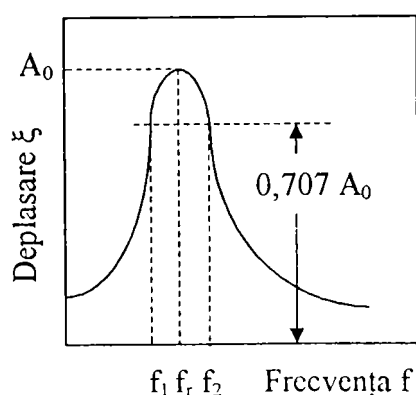


Fig.2.2 Determinarea factorului de calitate din curba de rezonanță

factorului de calitate  $Q$  definit astfel:

$$Q = \omega_r \cdot m / r = \pi \cdot f_r / \delta \quad (2.5)$$

$r$  = factor de proporționalitate pentru rezistența mecanică a mediului;

$f_r$  = frecvența de oscilație la rezonanță.

Marcând pe curba de rezonanță punctele de semiputere corespunzătoare frecvențelor  $f_1$  și  $f_2$  pentru care amplitudinea oscilațiilor devine egală cu  $\sqrt{2}/2 = 0.707$  din amplitudinea oscilațiilor de rezonanță (fig.2.2) [D3]),  $Q$  se mai poate exprima:

$$Q = f_r / (f_1 - f_2) = \omega_r / (\omega_1 - \omega_2) \quad (2.6)$$

Cu cât valoarea lui  $r$  este mai mică, deci și coeficientul de amortizare este mai mic, cu atât mai ridicată este valoarea factorului de calitate și curba de rezonanță are o formă mai ascuțită.

Cunoașterea proprietăților undelor ultrasonice este necesară la stabilirea efectelor acestora la interacțiunea cu diferite medii de propagare, la dimensionarea elementelor sistemului acustic, la selecția materialelor utilizate în aplicațiile tehnice ale ultrasunetelor.

## 2.2 Activarea ultrasonică a proceselor tehnologice

### 2.2.1 Aplicații active ale undelor ultrasonice

Dinamica ramurilor de vârf ale tehnologiei (industria aeronautică, microelectronica, mecanica fină) este condiționată de dezvoltarea sistemelor de prelucrare în câmpuri de energie concentrată: electrică, magnetică, electromagnetică, termică, acustică, etc. Între acestea un loc important îl ocupă și energia acustică, cu o largă aplicabilitate în domeniul prelucrărilor mecanice, datorită particularităților pe care le posedă undele ultraacustice [A1],[L2]:

- au lungime de undă relativ mică;
- accelerațiile particulelor mediului vibrat pot ajunge până la  $10^5 g$  ( $g$  accelerația gravitațională);
- permit dirijarea fasciculului ultrasonic în locuri greu accesibile altor procedee de prelucrare mecanică prin focalizarea energiei acustice cu ajutorul dispozitivelor concentratoare și a ghidurilor de undă;
- permit prelucrarea materialelor obișnuite, dar mai ales a celor greu sau de neprelucrat prin procedee mecanice clasice.

În literatura de specialitate se arată că dacă printr-un corp se propagă oscilații ultrasonice de diferite frecvențe și amplitudini se ajunge la fenomene de interacțiune cu rețeaua și cu defectele de rețea, ceea ce conduce la o absorbție mai mult sau mai puțin puternică a energiei acustice. Conform fig.2.3 [A1], în care se prezintă amortizarea oscilațiilor ultrasonice în funcție de amplitudinea acestora, apar mai multe intervale:

- *domeniul I* - caracteristic amplitudinilor foarte mici, în care nu se produce nici o deformare permanentă a mediului prin care se propagă ultrasunetele, au loc doar pierderi reduse prin absorbție;

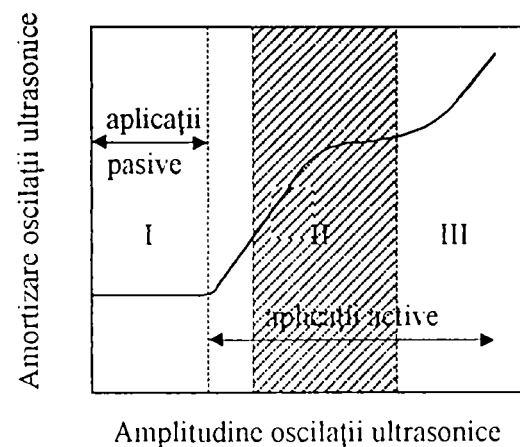


Fig.2.3 Domeniul aplicativ al ultrasunetelor în funcție de amortizarea acestora

- *domeniul II* - există o dependență liniară a amortizării ultrasunetelor în raport cu amplitudinea;

- *domeniul III* - amortizarea este dependentă de timp și este însoțită de deformații ireversibile ale mediului.

Ținând cont de aceste caracteristici ale ultrasunetelor și de modul în care energia ultrasonică intervine în diferitele procese tehnologice în care este folosită, aplicațiile ultrasunetelor pot fi grupate în două mari categorii:

⇒ *aplicații active* sau tehnologice - în care energia ultrasonică utilizată este suficient de mare pentru a produce modificări în structura mediului în care se propagă, ultrasunetul având un rol activ prin efectuarea de lucru mecanic sau ca agent catalizator al proceselor clasice de prelucrare.

⇒ *aplicații pasive* - în care ultrasunetele de o intensitate relativ scăzută, nu pot să producă modificări structurale, ci doar dau informații referitoare la proprietățile, calitatea sau dimensiunile obiectului examinat.

În fig.2.4 [A1],[M4],[A2] se prezintă principalele domenii ale aplicațiilor tehnologice active ale ultrasunetelor. Cercetările efectuate până în prezent, mai mult la nivel de laborator, vizează, în cazul solidelor, mai ales domeniul prelucrării dimensionale cu ultrasunete, introducerea undelor ultrasonice în procesele clasice de prelucrare prin aşchiere, deformare plastică și sudare, combinarea cu alte procedee neconvenționale ca electroeroziunea. În cazul aplicațiilor pasive defectoscopia nedistructivă este deja un teren bătătorit. Rezultatele cercetărilor întreprinse în domeniul procedeelelor de prelucrare mecanică în câmp ultrasonic evidențiază următoarele avantaje ale aplicării acestora în producție [L2], [A1], [D3], [M4], [E1], [I3], [V2], [B3],[G2],[B2],[B6],[N5],[N10], [N2], [U1],[Z1],[\*3],[\*4]:

- ◆ permit prelucrarea economică a unor materiale dure, greu prelucrabile prin procedee clasice;
- ◆ determină mărirea considerabilă a durabilității sculelor aşchietoare;
- ◆ reduc forțele și momentele de prelucrare, conducând la reducerea energiei specifice consumate în proces;
- ◆ conduc la obținerea unei foarte bune rugozități a suprafeței prelucrate, la mărirea preciziei de formă a suprafețelor, la obținerea unor proprietăți fizico-mecanice superioare ale suprafeței prelucrate;
- ◆ determină reducerea frecărilor dintre sculă și piesa de prelucrat, reducerea câmpului termic și a tensiunilor remanente.

Cu toate avantajele determinate în regim de laborator, ce justifică extinderea aplicării industriale a undelor ultrasonice, mai ales din considerente de rentabilitate economică, doar o parte au înregistrat o mai mare răspândire industrială și anume defectoscopia, curățirea pieselor, activarea unor procese fizico-chimice, trefilarea și unele procedee de netezire [L2],[I1].

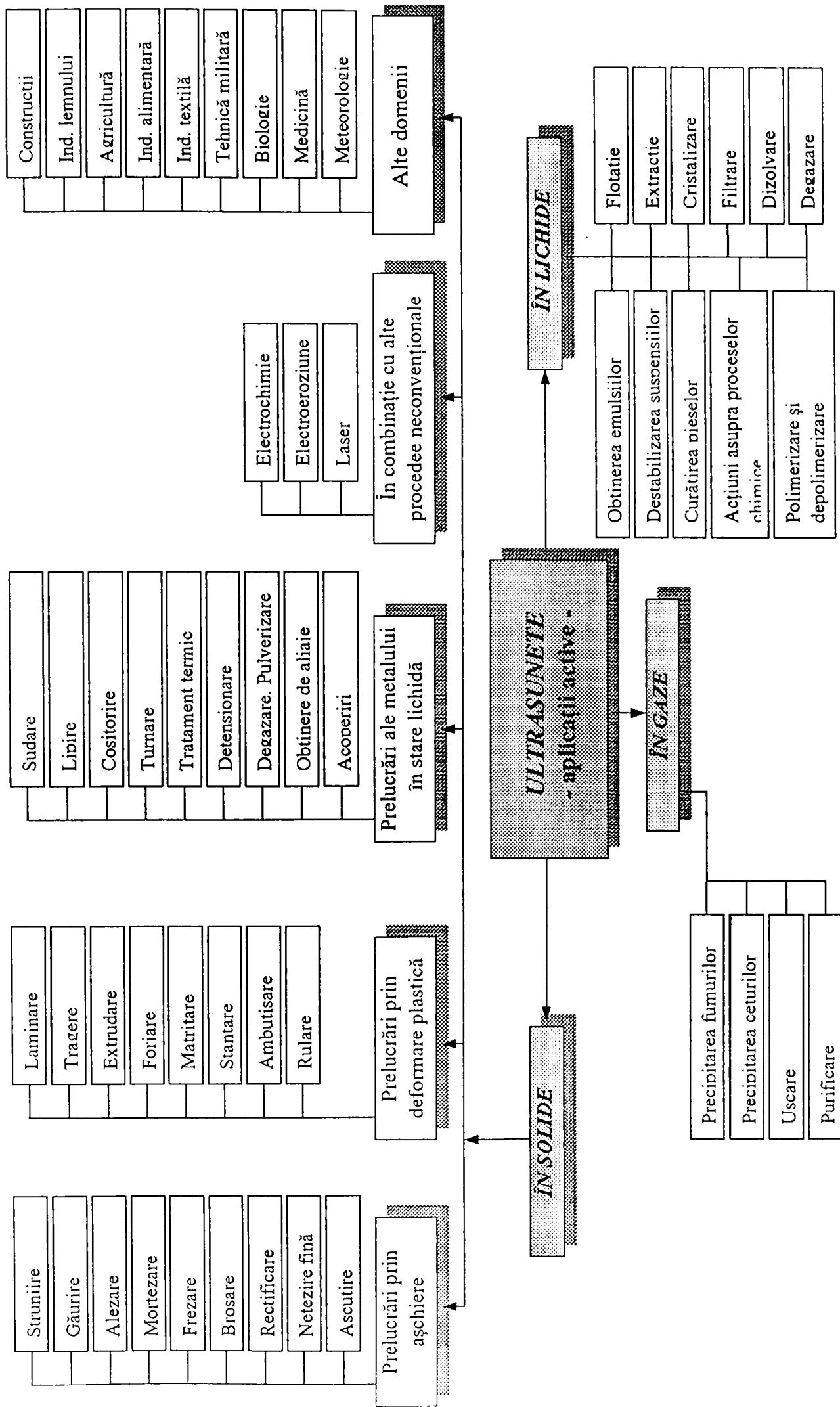


Fig. 2.4 Principalele domenii ale aplicațiilor tehnologice active ale ultrasunetelor

## 2.2.2 Efecte de bază ale ultrasunetelor în medii solide și lichide

### 2.2.2.1 Efectele ultrasunetelor în medii solide

Studiile efectuate până în prezent în acest domeniu s-au orientat mai ales asupra materialelor metalice, doar în ultima perioadă s-au analizat și alte medii solide: materiale plastice, lemnoase, roci, materiale biologice, etc.

Cercetările teoretice și experimentale relevă că undele ultrasonice de mari energii produc tensiuni acustice periodice și deformări elasto-plastice în mediile în care se propagă, influențând structura și proprietățile mecanice și fizico-chimice ale materialului supus prelucrării, dar și condițiile limită la suprafața de contact sculă-semifabricat [A2].

#### *Înmuierea acustică*

Fenomenul de *înmuiere acustică* constă în reducerea tensiunii statice necesare deformării plastice a materialului, odată cu creșterea densității de energie acustică, corespunzător amplitudinilor din zona II fig.2.3. Această comportare s-a remarcat în cazul primelor încercări asupra monocristalelor de zinc supuse încercării de întindere uniaxială în câmp ultrasonic fig.2.5 [A1][L2]. Ulterior s-au făcut încercări și cu alte materiale, aplicându-se ultrasunete în regim continuu sau în impulsuri, fig.2.6 [L2]. Rezultatele obținute au fost interpretate prin creșterea mobilității dizlocațiilor datorită tensiunilor acustice periodice.

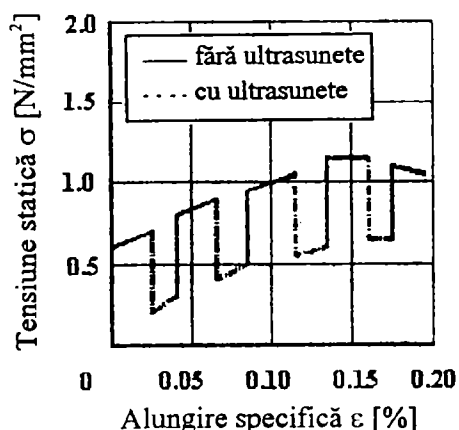


Fig.2.5 Diagrama de deformare a monocristalului de Zn cu aplicare periodică de oscilații ultrasonice

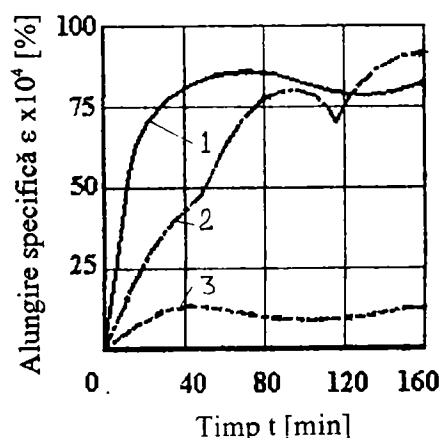


Fig.2.6 Diagrama de deformare a monocristalului de Cu la solicitarea de întindere  
1-activare continuă cu ultrasunete; 2-activare intermitentă cu ultrasunete; 3-fără ultrasunete

S-a formulat ipoteza unei similitudini între efectul de înmuiere acustică și efectul produs de acțiunea câmpului termic. Epruvete din același material au fost supuse separat câmpului ultrasonic și câmpului termic, rezultate comparabile obținându-se în cazul unei densități de energie de  $10^5 \dots 10^7$  ori mai mare în cazul câmpului termic. Diferența substanțială dintre valorile densităților de energie a fost determinată de absorbția preferențială a ultrasunetelor de către zonele rețelei cristaline prin care se realizează mecanismul deformării plastice - dislocații și limite dintre grăunți. Alte cercetări au analizat efectele combinate ale celor două câmpuri stabilind legături între amplitudinea

ultrasunetelor și temperatura de lucru (fig.2.7, fig.2.8) [L2]. S-a mai demonstrat că presiunea acustică a ultrasunetelor de mari energii reduce limita de curgere a materialelor metalice deformate în câmp ultrasonic, putând influența și modulul lui Young.

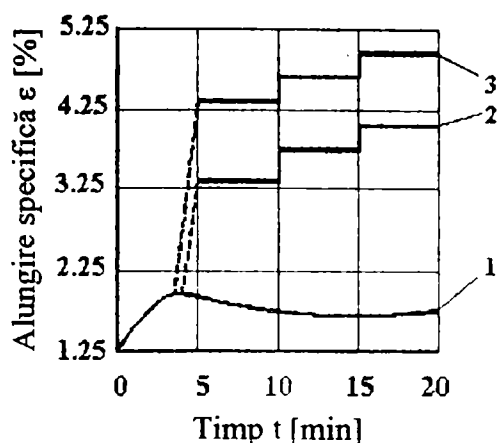


Fig.2.7 Alungirea epruvetelor de Cu maleabilizat la 200°C în prezența ultrasunetelor de diferite amplitudini:  
1 -0 mm (fără US) ; 2 -0.001 mm; 3 -0.004 mm

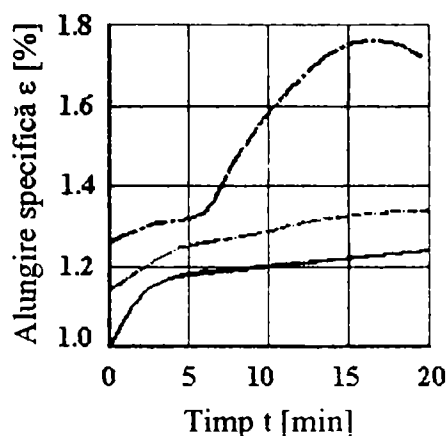


Fig.2.8 Alungirea epruvetelor de Cu supuse la răscuire la 300°C în prezența ultrasunetelor cu amplitudinile:  
1 -0 mm (fără US) ; 2 -0.001 mm; 3 -0.004 mm

### Durificarea acustică

În urma activării cu ultrasunete de intensități mari apare ca efect rezidual *durificarea acustică*, constând în mărirea durității pieselor, fig.2.9 [L2]. Aplicând energii

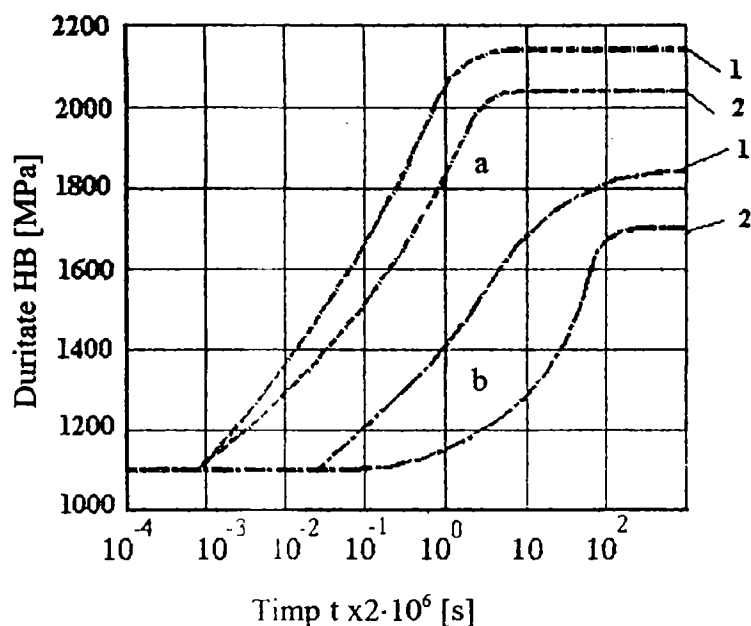


Fig.2.9 Durificarea unui aliaj de aluminiu la temperatura:  
a - 125°C;  
b - ambiantă  
1 - cu ultrasunete  
2 - fără ultrasunete

acustice ridicate, crește densitatea de dislocații, se formează un număr mare de obstacole datorită intersectării dislocațiilor mobile cu cele imobile și cu nodurile blocate de vacanțe, iar după încetarea activării ultrasonice se fixează în material o structură de dislocații specifice, numită structură durificată acustic. Pentru a deforma în continuare un astfel de material sunt necesare tensiuni statice mult mai mari decât pentru un material nesupus unei activări ultrasonice [A1],[L2],[D3].



### Reducerea frecării de contact

În toate prelucrările mecanice peste care s-a aplicat un câmp ultrasonic s-a remarcat o reducere semnificativă a frecării de contact la interfața sculă - semifabricat, fig.2.10 [L2]. Datorită faptului că fenomenul are o importanță practică deosebită s-au

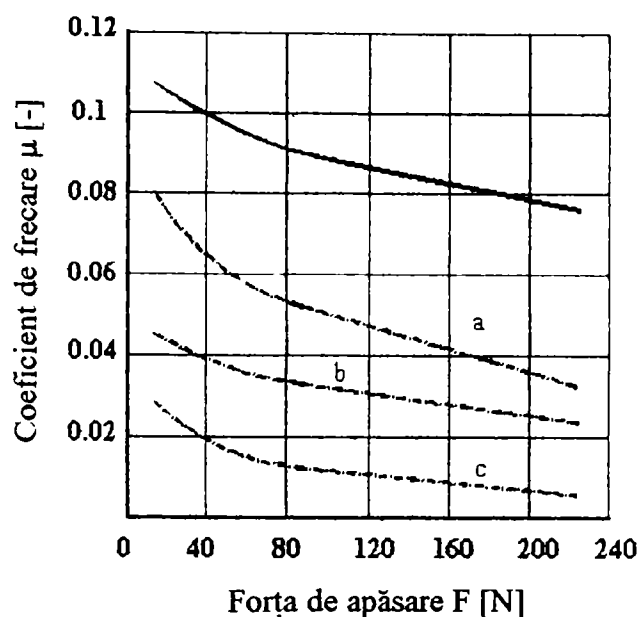


Fig.2.10 Variația coeficientului de frecare în raport cu forța de apăsare în prezența ultrasunetelor

- fără ultrasunete
- - - cu ultrasunete
- a) paralel cu direcția de deplasare;
- b) paralel cu direcția forței de apăsare;
- c) perpendicular pe direcția forței de apăsare

formulat cinci posibile mecanisme prin care ultrasunetele pot produce o reducere a frecării de contact [L2],[A1],[D3],[M6],[M4], deși până în prezent nu s-a putut stabili ponderea fiecărui mecanism în parte:

- 1) separarea suprafețelor de contact datorită mișcării relative dintre ele, facilitând restabilirea peliculei de lubrifiant și micșorând timpul de contact dintre suprafețe;
- 2) micșorarea forței de frecare când viteza de oscilație depășește viteza relativă de deplasare a suprafețelor aflate în contact;
- 3) încălzirea și aplatizarea microneregularităților suprafețelor în contact;
- 4) evacuarea lubrifiantului din microfisurile celor două suprafețe;
- 5) efectul de curățire locală.

### Efectul termic

În timpul cercetărilor experimentale a unor materiale metalice în câmp ultrasonic s-a observat încălzirea acestora în anumite zone (ventre), temperatura modificându-se în funcție de intensitatea câmpului energetic aplicat și de timpul de activare. Energia termică este localizată datorită absorbției preferențiale a energiei ultrasonice în anumite zone (dislocații, limite de separare a cristalelor). Se presupune că efectul se datorează fenomenului de histerezis provocat de tensiunile mecanice în mediul solid activat ultrasonic, când intensitatea ultrasonică depășește anumite valori limită [A1],[D3].

În afară de efectele menționate, s-au pus în evidență și alte efecte care apar la utilizarea energiei ultrasonice: creșterea energiei interne a materialului, spargerea peliculei de oxizi, apariția difuziei în fază solidă și chiar topirea locală a materialelor, efecte care nu sunt încă pe deplin explicate științific [M4].

## 2.2.2.2 Efectele ultrasunetelor în medii lichide

Conform teoriei hidrodinamice în lichide nu se pot propaga decât unde longitudinale și doar în anumite condiții legate de vâscozitatea lichidului și de prezența tensiunilor de compresiune sau de forfecare pot exista și unde transversale. S-a constatat că viteza de propagare a undelor ultrasonice în medii lichide, precum și absorbția acestora lor de către mediu depind de densitatea și vâscozitatea mediului, de frecvența undelor ultrasonice, de presiunea aplicată asupra lichidului, de temperatura lichidului.

### Dispersia ultrasonică

Se manifestă când asupra unui lichid, la suprafața de separație lichid-gaz, s-a focalizat un fascicul de unde ultrasonice de o anumită intensitate. Se constată împrăștierea foarte fină de particule de lichid în mediul gazos, adică dispersia ultrasonică. În condiții bine determinate se obține o ceață foarte fină și deasă deasupra suprafeței de separație.

### Cavitația acustică

Un lichid supus la întinderi și compresiuni ciclice, cum este un mediu activat ultrasonic, produce la faza de tracțiune rupere în masa lui, formându-se microbule cavitaționale care la faza de compresiune se distrug prin implozie producând șocuri

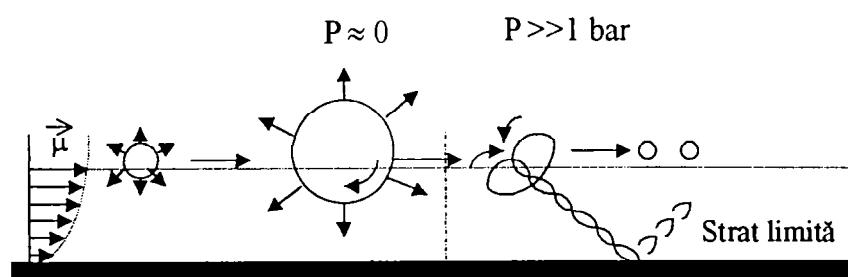


Fig.2.11 Efectul imploziei unei bule de gaz asupra unei suprafețe

hidraulice și presiuni locale ridicate. Dacă după implozie jetul lichid și unda de șoc rezultantă lovesc o suprafață se produce pe baza efectului de perete un jet direcțional (fig.2.11) [B5]. Acțiunea repetată și cu frecvență ridicată a jeturilor de lichid

conduce la deteriorarea suprafeței. Procesul de degradare a suprafeței expuse cavitației este cel indicat în fig.2.12 [B5] și începe cu crearea de microfisuri urmate de exfolierea particulelor metalice și formarea cavitațiilor mari. Formarea bulelor cavitaționale este favorizată de existența incluziunilor gazoase și solide, de fluctuațiile calorice din lichid, de existența radiațiilor ionizate, ș.a. Cavitația acustică stă la baza a numeroase aplicații tehnice mai ales la prelucrarea dimensională, curățirea, debavurarea, degresarea în

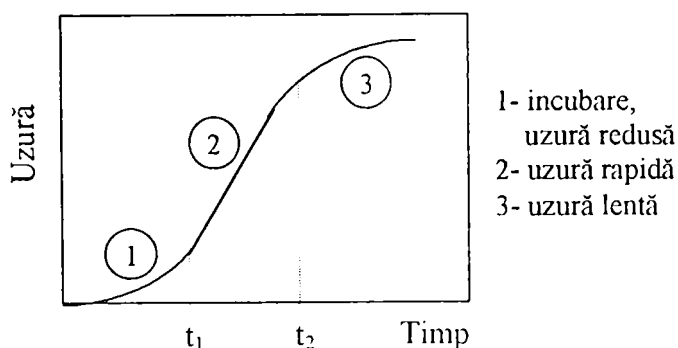


Fig.2.12 Uzura în funcție de timp în prezența cavitației în câmp ultrasonic [P2],[A1],[D3],[C9],[K9].

## 2.3 Sisteme ultrasonice

### 2.3.1 Structura sistemului ultrasonic

Sistemele ultrasonice sunt instalații în care se produc și se transmit oscilațiile ultrasonice. Schematizarea cea mai generală acceptată pentru un sistem tehnologic cu ultrasunete este redată în fig.2.13 [I1] și cuprinde:

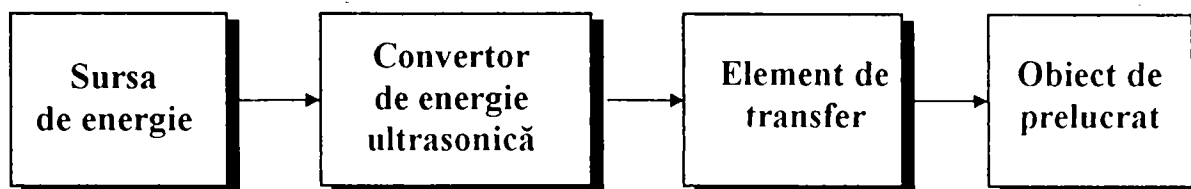


Fig.2.13 Schema de principiu a unui sistem ultrasonic

**Sursa de energie.** Ca sursă de energie primară se utilizează generatorul electronic de frecvență; acesta transformă curentul electric de frecvență industrială în curent de înaltă frecvență. Frecvența generatorului se stabilește în funcție de destinația instalației ultrasonice. În general pentru prelucrarea mecanică a materialelor solide, curățirea pieselor, sudare se folosesc ultrasunete cu frecvențe de 20÷40 kHz, pentru defectoscopia betoanelor 30÷100 kHz, pentru formarea emulsiilor 400÷800 kHz, pentru defectoscopia metalelor se utilizează frecvențe între 1.5÷6 MHz. Frecvența generatorului este acordată pe frecvența fundamentală sau a primei armonici a convertorului de energie ultrasonică, numită frecvență de rezonanță.

**Convertorul de energie ultrasonică** (bloc, ansamblu ultrasonic) are rolul de a transforma oscilațiile de frecvență ultrasonică în oscilații mecanice amplificate la o anumită valoare care se transmit apoi mai departe sculei de prelucrare sau mediului de activat. Se compune de regulă din:

1. *transductor*
2. *concentrator*.

- **Transductorul** este elementul care transformă cu randament impus energia primară (electrică) în energie acustică. După principiul de transformare a energiei se întâlnesc mai multe tipuri de transductoare, dintre care cele mai răspândite sunt cele magnetostrictive și piezoelectrice. Amintim efectele care stau la baza utilizării acestor tipuri de transductori:

*Efectul magnetostictiv* se manifestă în unele materiale feromagnetice și constă în apariția unei deformări mecanice la aplicarea unui câmp magnetic într-un astfel de material. Cuplajul între magnetizare și deformare mecanică este o consecință a structurii de domeniu a materialelor feromagnetice și a tensiunilor elastice generate, când vectorii magnetici se reorientează după câmpul magnetic aplicat. Efectul de sumare a acestor deformări microscopice induse este o modificare a dimensiunilor corpului pe direcția de aplicare a câmpului magnetic. Sensul deformării este independent de direcția câmpului magnetic, deformarea fiind proporțională cu pătratul câmpului.

*Efectul piezoelectric* constă în apariția unor sarcini electrice induse pe suprafața unui corp supus la presiuni mecanice. Mărimea sarcinii electrice este proporțională cu tensiunea mecanică aplicată iar semnul se schimbă în raport cu deformarea (dacă aceasta este de dilatare sau de comprimare). Fenomenul poate avea loc și invers: dacă asupra corpului cu proprietăți piezoelectrice se aplică un câmp electric, acesta suferă o deformare mecanică proporțională cu câmpul electric aplicat. Deformarea poate fi de dilatare sau de comprimare după semnul câmpului electric.

- **Concentratorul ultrasonic** permite ca energia acustică să fie concentrată într-un volum mai mic și să se obțină unde ultrasonice de intensități ridicate; face legătura între transductor și obiectul de transfer cu scopul de a mări amplitudinea de oscilație și de a asigura un acord de impedanță între transductor și sarcina din spațiul de lucru. Concentratorul are forma unei bare cu secțiune transversală variabilă iar generatoarea sa poate fi de formă conică, cilindrică în trepte sau poate fi descrisă de o funcție exponențială, catenoidală (cosinus hiperbolic), etc.

**Elementul (obiectul) de transfer** al energiei acustice formează legătura între concentrator și suprafețele de lucru, constituind de multe ori scula efectivă de lucru, furnizând deci amplitudinea utilă, în condițiile unor pierderi minime de energie și a unei rezistențe la uzură și oboseală cât mai bune.

Pentru a realiza unitatea și stabilitatea unui sistem ultrasonic în vederea îndeplinirii rolului lui funcțional mai sunt necesare:

- ⇒ *elemente de adaptare și cuplaj acustic* care realizează o legătură eficientă mecano-acustică pentru un transfer optim de energie între elementele instalației;
- ⇒ *sisteme de fixare mecanică și acustică* care se referă la modalitățile de fixare a diferitelor elemente ale sistemului ultrasonic și fixarea acestuia în structura de rezistență. Din considerente energetice și de stabilitate dinamică montarea lor se face într-un nod de oscilație al elementului de adaptare acustică.

Soluțiile constructive ale unui sistem ultrasonic eficient trebuie să determine micșorarea pierderilor de energie acustică în fiecare element, prevăzând o bună ajustare între componente, amplasamente de lucru și legături acustice care să reziste la sarcinile statice și dinamice impuse de condițiile de exploatare. Fiecare element trebuie dimensionat pe principiul frecvenței de rezonanță, lungimea acestuia să fie un multiplu de jumătăți de lungimi de undă  $\lambda/2$ . În orice proces trebuie mășurați parametrii energiei acustice pentru a opera corecții ce se impun în direcția optimizării tehnologiei aplicate [A1],[S2],[D3],[N7].

### 2.3.2 Clasificarea sistemelor ultrasonice

Clasificarea generală a sistemelor ultrasonice utilizate până în prezent este prezentată schematic în fig.2.14 [A1],[L2]. Problema cea mai importantă care se pune în cazul activării cu oscilații ultrasonice a proceselor de prelucrare este modalitatea de introducere a energiei ultrasonice în focarul de prelucrare. Se poate activa scula, piesa, lichidele de răcire-ungere separat sau combinat, metoda aleasă ținând cont de natura materialului prelucrat, de forma suprafeței și de complexitatea sistemului tehnologic de

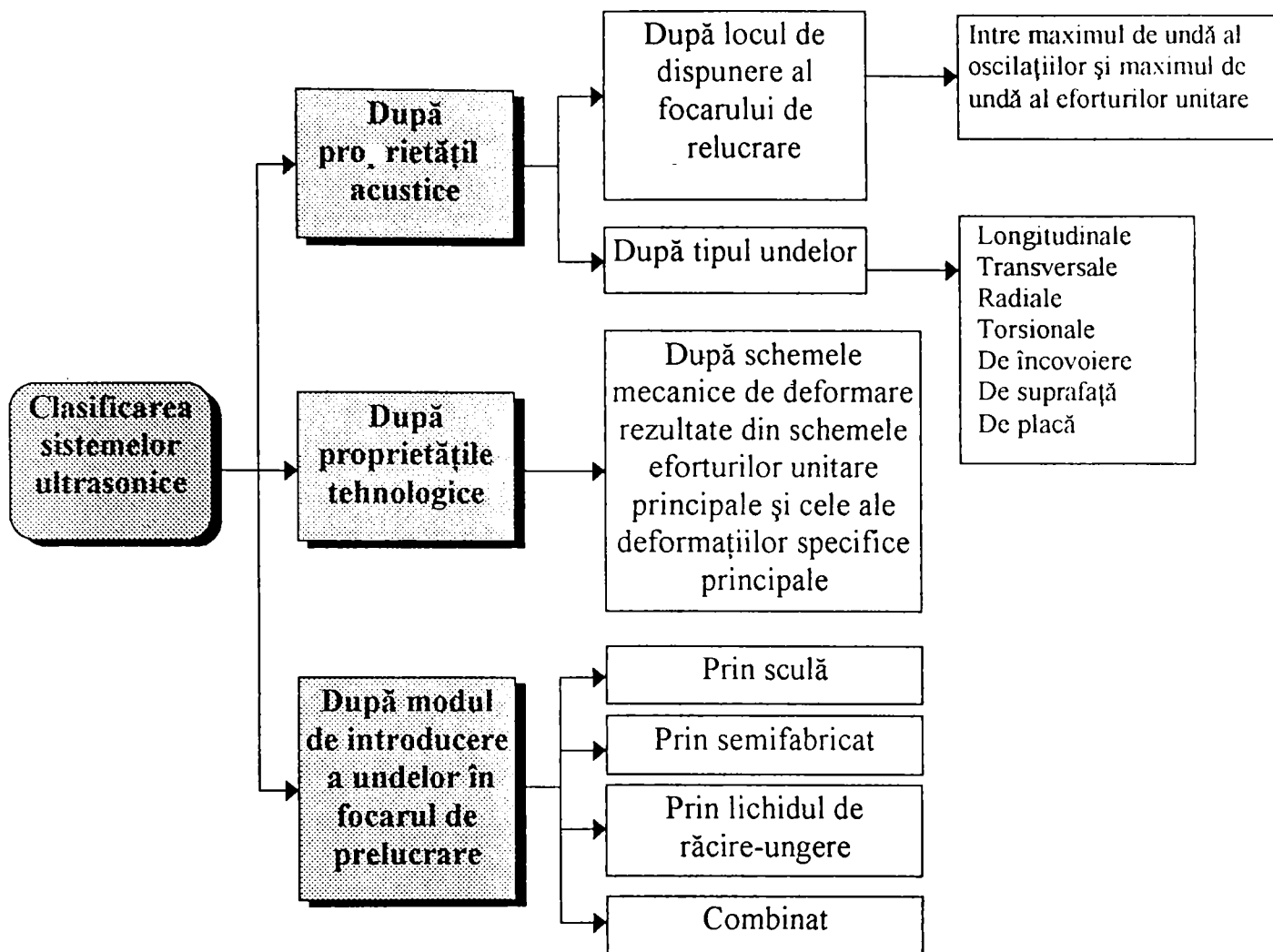


Fig.2.14 Clasificarea sistemelor ultrasonice

prelucrare. Activarea sculei este indicată în cazul prelucrării unor piese de dimensiuni relativ mari, când introducerea oscilațiilor ultrasonice în piesă ar fi dificil de realizat, dacă sistemul tehnologic oferă posibilitatea adaptării soluției constructive de activare a sculei. Atunci când piesa este de dimensiuni relativ mici iar scula efectuează mișcări complexe este mai eficient ca piesa să oscileze ultrasonic. În cazul utilizării unei alimentări continue cu lichid de răcire-ungere se poate încerca activarea diuzei de alimentare. O eficiență mai mare se poate obține prin activarea combinată, rentabilitatea economică dictând aplicarea sau nu a acestei variante.

În majoritatea cazurilor, sistemele ultrasonice se construiesc astfel încât să exercite un singur tip de oscilații, în caz contrar apar dificultăți în crearea regimului de rezonanță necesar funcționării sistemului și în izolarea acustică.



## 2.4 Variante principial constructive de sisteme tehnologice activate ultrasonic

### 2.4.1 Schema de sistem pentru activarea ultrasonică a proceselor tehnologice

În cadrul aplicațiilor active ale ultrasunetelor amintite la paragraful 2.2.1 se pot delimita două grupe mari [11], în funcție de ponderea majoritară în industrie în raport cu alte tehnici cu ultrasunete:

- *grupa I de aplicații* cuprinde tehnologii de prelucrare dimensională cu ultrasunete, de sudare, curățire și activări ale mediilor lichide; această grupă este materializată prin mașini și instalații individualizate și este prioritar tratată de firmele specializate.
- *grupa a II-a de aplicații* cuprinde tehnologiile de activare cu ultrasunete a diferitelor procese: de așchiere, de deformare plastică, metalurgice, cu aplicare individualizată în prezent, dar cu posibilități de dezvoltare în viitor. Materializarea acestora are în vedere cuplarea funcțională a dispozitivelor ultrasonice cu instalații tehnologice clasice fiind realizate în serie mică sau individual. Nu au o pondere însemnată în programele de fabricație a firmelor de specialitate. Pentru această grupă de aplicații în [11] se propune schema de sistem din fig.2.15.

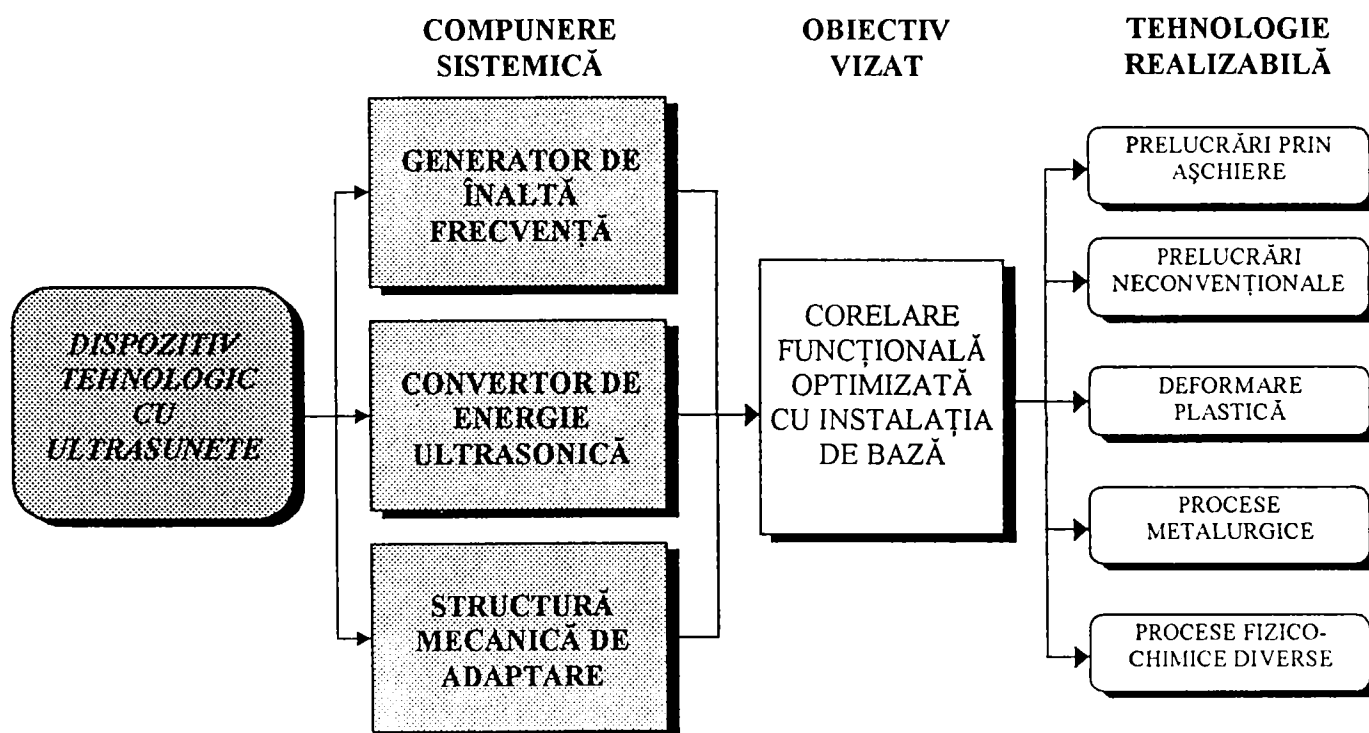


Fig.2.15 Schema de sistem pentru tehnologiile de activare cu ultrasunete

### 2.4.2 Procedee de așchiere activate ultrasonic

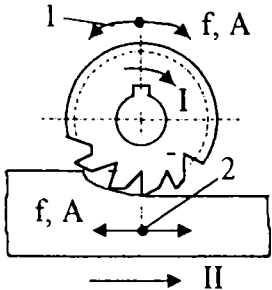
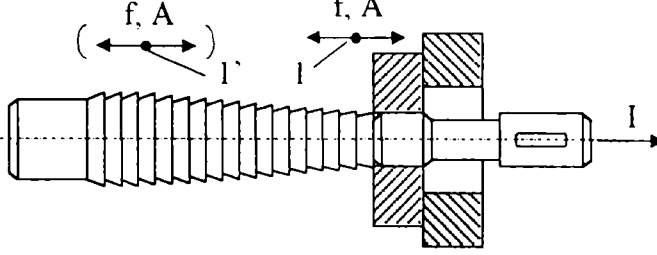
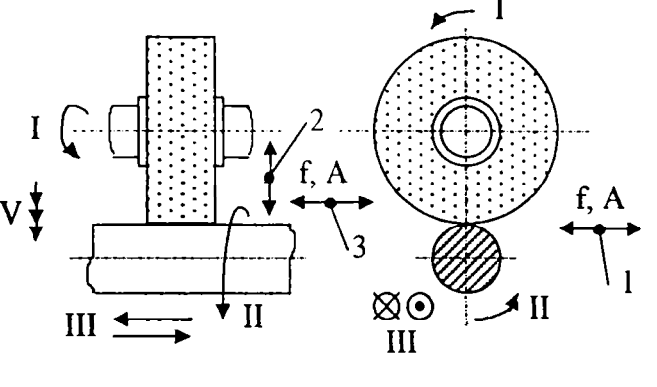
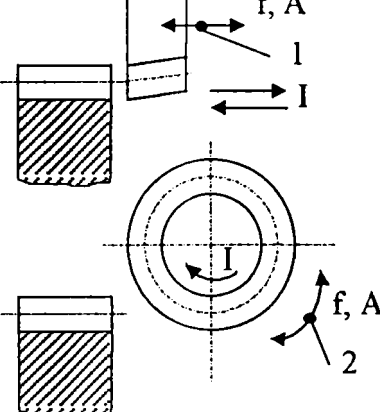
La prelucrările prin așchiere în câmp ultrasonic se folosesc de regulă unde staționare care conduc la obținerea unor condiții optime de lucru a aparaturii ultrasonice, la mărirea randamentului instalației, concentrarea energiei, izolare acustică și unele avantaje economice. Cele mai utilizate sunt sistemele ultrasonice cu unde longitudinale. Oscilațiile ultrasonice pot fi tangențiale, radiale, axiale sau complexe.



Schemele principale de activare ultrasonică a principalelor procedee de aşchiere sunt sistematizate în tabelul 2.2 [P3],[P5], întocmit pe baza bibliografiei parcurse [A1],[D3],[H1],[I3],[K7],[K4],[M7],[M4],[N3],[O2]. În afara celor menţionate în tabel sau mai făcut cercetări privind lărgirea, alezarea, filetarea, rectificarea filetelor şi danturilor în câmp ultrasonic. Pe schemele prezentate în tabele sunt indicate toate tipurile de oscilaţii ultrasonice posibil de aplicat, în realitate ele nu se folosesc combinat decât arareori.

Tabelul 2.2 Scheme de activare ultrasonică a proceselor de aşchiere

Procedeu de prelucrare	Schema de principiu	Observaţii
1	2	3
Rabotare		<p>Pentru toate cazurile:  <math>f</math> - frecvenţa oscilaţiilor ultrasonice  <math>A</math> - amplitudinea oscilaţiilor ultrasonice            I - mişcare de aşchiere rectilinie alternativă            II - mişcare intermitentă de avans</p>
Mortezare		<p>I - mişcare de aşchiere rectilinie alternativă            II - mişcare intermitentă de avans</p>
Strunjire		<p>I - mişcare de aşchiere de rotaţie            II - mişcare de avans            1 - oscilaţii ultrasonice tangenţiale ale cuţitului            2 - oscilaţii ultrasonice radiale ale cuţitului            3 (3') - oscilaţii ultrasonice axiale ale cuţitului (sau ale piesei, pinolei)</p>
Burghiere		<p>I - mişcare de aşchiere de rotaţie            II - mişcare de avans            1(1') - oscilaţii ultrasonice axiale ale sculei (piesei)            2(2') - oscilaţii ultrasonice radiale ale sculei (piesei)            3 - oscilaţii ultrasonice complexe - torsionale ale sculei</p>

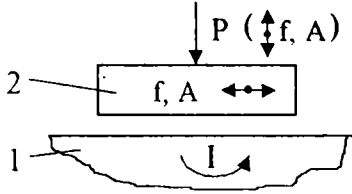
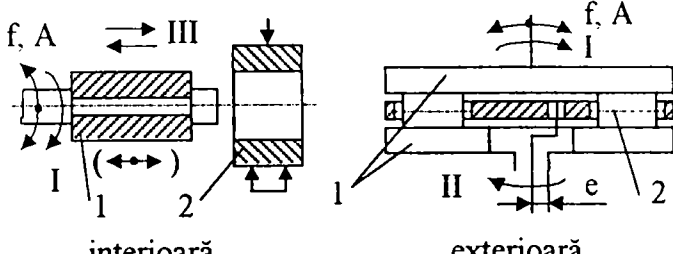
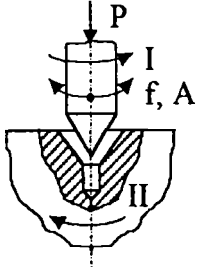
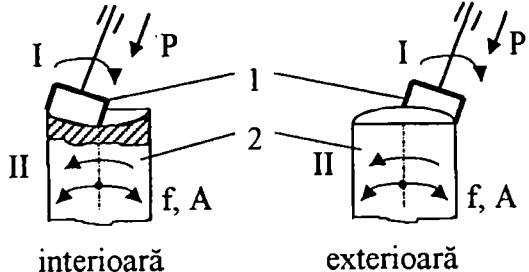
Frezare		<p>I - mișcare de așchiere de rotație  II - mișcare de avans  1 - oscilații ultrasonice complexe aplicate sculei  2 - oscilații ultrasonice tangențiale ale p.ese.</p>
Broșare		<p>I - mișcare de așchiere  1(1') - oscilații ultrasonice tangențiale aplicate piesei (mai rar broșei)</p>
Rectificare		<p>I - mișcare de așchiere  II, III, IV - mișcări de avans  1 - oscilații ultrasonice tangențiale ale discului abraziv (piesei)  2 - oscilații ultrasonice radiale  3 - oscilații ultrasonice axiale</p>
Danturare		<p>I - mișcare de așchiere  II - mișcare de avans (mișcările de avans și de divizare nu au fost reprezentate)  1 - oscilații ultrasonice tangențiale ale sculei (cuțit-pieptene, cuțit-roată)  2 - oscilații ultrasonice complexe ale sculei (freză-melc)</p>

### 2.4.3 Sisteme de activare ultrasonică a lepurii

Clasificarea acestor sisteme se poate face după modul de introducere a oscilațiilor ultrasonice în spațiul de lucru, după tipul oscilațiilor ultrasonice utilizate sau după tipul suprafeței prelucrate.

Ținând cont de schemele clasice de lepuire în tabelul 2.3 [P4],[T6] se prezintă schemele de principiu de activare ultrasonică a lepurii întâlnite în literatura de specialitate [K7],[K8],[C6],[D4],[P10].

Tabelul 2.3 Scheme de activare ultrasonică a lepuirii

Tipul suprafeței prelucrate	Schema de principiu	Observații
plană		<p>f - frecvența oscilațiilor ultrasonice                      A - amplitudinea oscilațiilor ultrasonice                      p - presiune de contact între suprafețe                      1 - piesa de prelucrat (sau disc de lepuir)                      2 - disc de lepuir (sau piesă)                      I - mișcare de rotație</p>
cilindrică		<p>1 - scula de lepuir                      2 - piesa de prelucrat                      I - mișcare de rotație a sculei                      II - mișcare de rotație a piesei                      III - mișcare rectilinie alternativă a sculei</p>
o		<p>1 - scula de lepuir                      2 - piesa de prelucrat                      I - mișcare de rotație a sculei                      II - mișcare de rotație a piesei                      III - mișcare rectilinie alternativă a sculei</p>
sferică		<p>1 - scula de lepuir                      2 - piesa de prelucrat                      I - mișcare de rotație a sculei                      II - mișcare de rotație a piesei                      III - mișcare rectilinie alternativă a sculei</p>

## 2.5 Aspecte ale fenomenologiei aşchierii activate ultrasonic

### 2.5.1 Vibrații în procesul de prelucrare prin aşchiere

În timpul procesului tehnologic, în sistemul tehnologic elastic, apariția vibrațiilor este inevitabilă, iar în situațiile în care amplitudinea lor depășește limitele impuse preciziei dimensionale și de formă a suprafețelor generate, fenomenul vibrator este dăunător. Vibrațiile care apar pot fi libere, forțate, autoîntreținute [M12].

- *Vibrațiile libere* caracterizează procesele tranzitorii care datorită amortizărilor mari în îmbinările sistemului tehnologic au o durată foarte scurtă. Procesele tranzitorii sunt

componentele procesului dinamic complex al prelucrării; apar astfel fenomene dinamice legate de: intrarea și ieșirea sculei în și din suprafața de așchiat, unele operații auxiliare ale procesului de prelucrare (pornirea motoarelor de acționare, accelerarea și frânarea mișcării meselor, săniilor și cărucioarelor, schimbarea turațiilor și avansurilor, ș.a.), inversarea sensului de mișcare, când mișcarea de așchiere sau de avans este rectilie alternativă, etc.

- **Vibrațiile forțate** pot fi :

⇒ *vibrații forțate care nu depind de procesul de așchiere*. Apariția lor este legată de acțiunea forțelor de inerție ca urmare a mișcărilor de rotație a maselor neechilibrate din lanțurile cinematice ale mașinilor-unelte, ca și vibrațiile transmise de la alte mașini și instalații vecine. Ele apar deci ca urmare a imperfecțiunilor tehnologiilor de prelucrare și asamblare ale organelor mașinilor-unelte, a fixării defectuoase a acestora în fundație, a unor particularități constructive ale mașinii (prezența penelor, camelor, excentricilor).

⇒ *vibrații forțate care depind de procesul de așchiere*. Acestea apar datorită variației adaosului de prelucrare, variației periodice a secțiunii așchiei, variației durității materialului prelucrat.

- **Autooscilațiile** sunt vibrații întreținute, datorate unor factori excitatori generați de însăși mișcarea vibratorie. Ele apar în procesul de așchiere ca urmare a interdependenței dintre mărimea forței de așchiere și deplasarea relativă dintre sculă și semifabricat, ca urmare a procesului de frecare și vitezei de alunecare din cuplurile cinematice sau datorate defazajului dintre variația forței și a deplasării dintre sculă și semifabricat, sanie și ghidaj, fus și lagăr.

Multe cercetări au stabilit că vibrațiile specifice așchierii, atât cele forțate cât și autooscilațiile, sunt dăunătoare: ele reduc cu mult durabilitatea sculei, precizia de prelucrare, înrăutățesc calitatea suprafețelor și provoacă uzura accentuată a mașinilor. S-a observat că, la viteze mici de așchiere, frecvența și amplitudinea oscilațiilor sculei au un caracter neregulat și, odată cu creșterea vitezei de așchiere, acești doi parametri tind să capete un caracter regulat, ceea ce conduce la îmbunătățirea condițiilor de așchiere și implicit la o creștere a calității suprafețelor prelucrate [V2]. Aplicând astfel oscilații de joasă sau înaltă frecvență dar având direcția și sensul bine determinate, cu amplitudini foarte mici, de la o sursă exterioară independentă de procesul de așchiere se pot obține efecte pozitive [P1],[L3],[T2].

Ideea utilizării oscilațiilor de înaltă frecvență având direcția și sensul bine determinate pentru îmbunătățirea procesului de așchiere (așchiera vibratorie) a apărut cu 70 de ani în urmă. Astăzi se consideră a fi una din metodele care pot contribui la creșterea eficienței procedeelelor de prelucrare prin așchiere. A fost cercetată influența ultrasunetelor asupra unor procedee ca strunjirea, frezarea, găurirea, filetarea, broșarea, rectificarea, honuirea, lepuirea, ascuțirea sculelor și altele. Suprapunerea oscilațiilor ultrasonice peste mișcările din sistemul clasic de așchiere conduce la obținerea de numeroase avantaje subliniate în paragraful anterior. Deoarece PNFA se încadrează în aceste prelucrări, pentru elucidarea fenomenelor în cazul suprapunerii unui câmp ultrasonic, este utilă prezentarea mecanismelor în cazul general al așchierii ultrasonice.

## 2.5.2 Fenomenologia aşchierii activate ultrasonic

Intensificarea procesului de aşchiere prin activare ultrasonică poate fi pusă pe seama oscilațiilor periodice ale sculei și compunerii acestora cu vibrațiile sistemului tehnologic elastic mașină-dispozitiv-sculă-piesă, valoarea maximă a forței exercitată dinamic depinzând de amplitudinea oscilațiilor, de sarcina statică și de frecvența oscilațiilor ultrasonice. Se poate da relația [D3]:

$$\sigma_d = 1.5 \sigma_s T/t \quad (2.7)$$

unde:  $\sigma_d$  - efortul unitar dinamic;  $\sigma_s$  - efortul unitar static;  $T$  - perioada oscilațiilor ultrasonice;  $t$  - timpul de contact al sculei cu semifabricatul.

În [K7] se face o analiză a mecanismului aşchierii cu vibrații prezentând o analogie între încercarea la reziliență a unei mulțimi de epruvete și aşchiera vibratorie. Modelul sugerează legătura dintre mișcarea piesei de prelucrat și oscilațiile muchiei aşchietoare a sculei (fig. 2.16). Ciocanul oscilează periodic cu frecvența  $f$  și amplitudinea  $A$ , într-o perioadă de oscilație se încheie încercarea unei probe. Acordându-se mișcarea ciocanului cu viteza de avans a probelor se pot realiza încercări regulate, se face în acest caz o generare continuă de impulsuri periodice. La aşchiera vibratorie asigurarea unei acțiuni de șoc periodice a suprafeței de prelucrat în direcția de aşchiere necesită înlocuirea ciocanului cu un cuțit. La încercarea de reziliență epruvetele sunt dispuse la

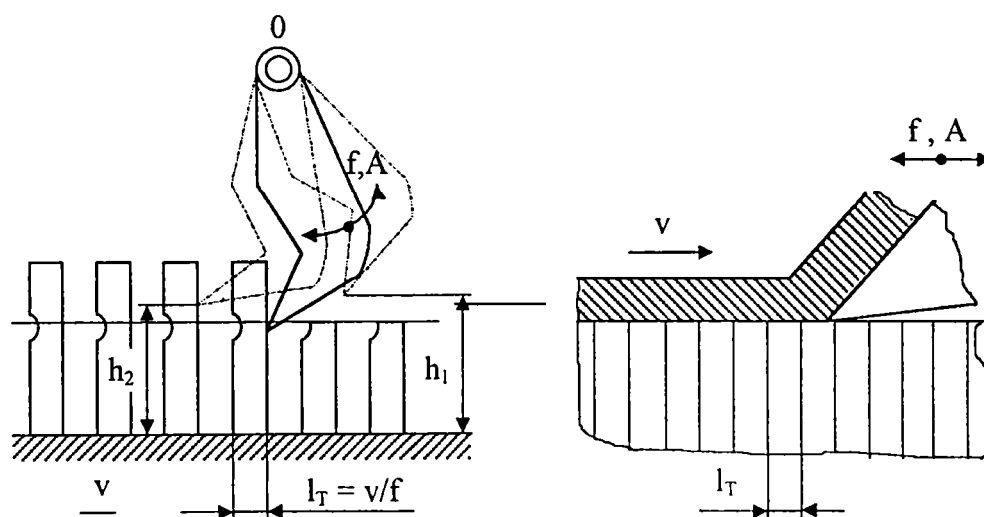


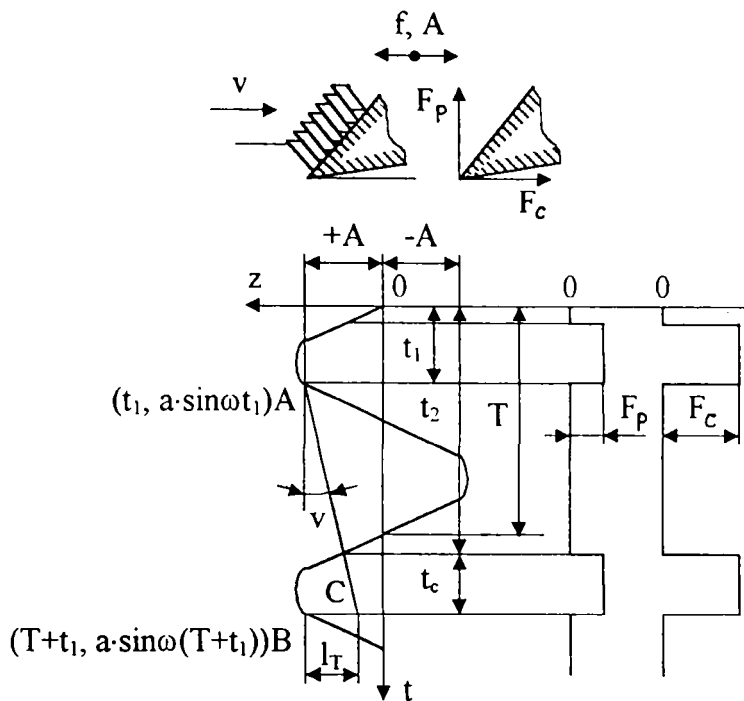
Fig.2.16 Model pentru aşchiera vibratorie creat în analogie cu încercarea la reziliență

distanțe egale  $l_T$ , la aşchiera vibratorie suprafața de prelucrat se poate împărți în intervale egale  $l_T$ . Deformarea aşchierii se va face cu atât mai ușor cu cât intervalul  $l_T$  este mai mic, valoarea  $l_T$  având o influență semnificativă în procesul aşchierii vibratorii.

Mecanismul aşchierii vibratorii este prezentat în fig.2.17 [K7]. Se consideră că în procesul aşchierii cuțitul execută oscilații în direcția componentei principale a forței de aşchiere  $F_c$ . Deplasarea (elongația)  $z$  a vârfului sculei aşchietoare, considerându-se faza inițială nulă, este descrisă de relația:

$$z(t) = A \sin \omega.t \quad (2.8)$$

Lungimea de aşchiere  $l_T$  într-un ciclu de oscilație al cuțitului se determină din fig.2.17 și este egală cu segmentul BC. Se demonstrează că:



Notatii:

- A - amplitudinea oscilației cuțitului;
- f - frecvența oscilațiilor cuțitului;
- $T = 1/f$  - perioada oscilațiilor;
- $\omega$  - frecvența unghiulară a oscilațiilor;
- z - deplasarea cuțitului;
- v - viteza de așchiere;
- $t_1$  - timpul în care cuțitul parcurge distanța de la punctul inițial 0 până în momentul în care s-a desprins de cuțit (momentul în care viteza de oscilație egalează viteza de așchiere);
- $t_c$  - timpul de așchiere într-un ciclu de oscilații a cuțitului;
- $l_T$  - lungimea așchiată în direcția de așchiere pe durata unui ciclu de oscilații a cuțitului.

Fig.2.17 Mecanismul așchierii vibratorii

$$l_T = v/f \quad (2.9)$$

Analizând deplasarea vârfului cuțitului în punctele A și B se deduce timpul real de așchiere:

$$t_c/T = 1 + t_1/T - t_2/T \quad (2.10)$$

Fracțiunea perioadei  $t_c/T$  este un parametru important pentru cercetarea și verificarea așchierii vibratorii. Efectele optime se obțin pentru rapoarte  $t_c/T = 1/7 \dots 1/3$ .

Viteza cu care oscilează muchia cuțitului se deduce din diferențierea deplasării (elongației) din relația (2.9):

$$v(t) = dz(t)/dt = A\omega \cos\omega t \quad (2.11)$$

Valoarea maximă a vitezei de oscilație, adică amplitudinea vitezei are expresia:

$$v(t)_{\max} = A\omega = 2\pi Af \quad (2.12)$$

Dacă viteza de așchiere egalează valoarea maximă a vitezei de oscilație a sculei așchietoare, atunci cuțitul și piesa de prelucrat nu se separă în timpul procesului de prelucrare, deci mecanismul prelucrării este același ca și la așchiera obișnuită. De aceea această viteză se numește *viteză critică de așchiere*, fiind o expresie brevetată. S-a demonstrat că, pentru a fi avantajoasă așchiera vibratorie, viteza de așchiere trebuie să fie mai mică decât viteza critică de așchiere  $v_{cr} = 2\pi Af$ . Se poate considera că până la viteze  $v \approx v_{cr}/3$  avem  $t_c/T \approx v/v_{cr}$ .

### 2.5.3 Mecanismul așchierii activate ultrasonice cu comportamentul dinamic al piesei de prelucrat

Dacă până nu demult s-a făcut o tratare statică a așchierii ultrasonice, neținându-se cont de elementele sistemului tehnologic elastic și considerându-se o valoare medie a



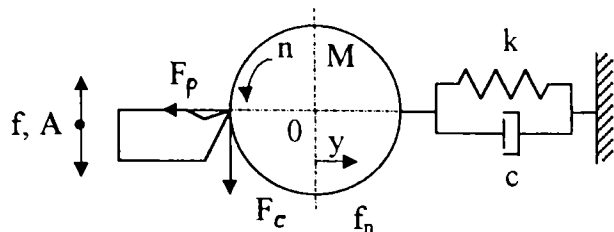


Fig.2.18 Model pentru sistemul oscilatoriu  
cuțit-piesă de prelucrat

forței de așchiere variabile, noile teorii au în vedere caracterul variabil al forței de așchiere, în ideea creșterii preciziei de prelucrare, păstrându-se aceeași rigiditate a sistemului tehnologic elastic. În fig.2.18 [K7],[P6] se prezintă modelul sistemului de oscilații a cuțitului și a piesei de prelucrat în cazul aplicării oscilațiilor ultrasonice tangențiale.

Notății:

$f_n, \omega_n$  - frecvența, respectiv frecvența unghiulară a oscilațiilor proprii ale piesei de prelucrat în direcție radială  $\omega_n = \sqrt{k / M}$  ;

$\varphi_n$  - unghiul fazic dintre componenta radială a forței de așchiere și deplasarea  $y$ ;

$M$  - masa echivalentă a piesei de prelucrat fixată în arborele principal al mașinii-unelte;

$k$  - coeficient de rigiditate a piesei în direcția  $y$  la fixarea în arborele principal al mașinii-unelte;

$c$  - coeficientul amortizării vâscoase a oscilațiilor piesei  $c = 2M\omega_n v = 2k/\omega_n$ ;

$c_{cr}$  - coeficientul critic al amortizării vâscoase a oscilațiilor piesei;  $v = c/c_{cr}$  .

Precizia de prelucrare fiind determinată de deplasările dinamice ale piesei de prelucrat în direcția de acțiune a componentei radiale a forței de așchiere, interesează ecuația deplasării dinamice a piesei în această direcție:

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + k \cdot y = F_p(t) \quad (2.13)$$

iar  $F_y(t)$  poate fi descrisă de un șir Fourier:

$$F_p(t) = \frac{t_c}{T} F_p + \frac{2}{\pi} F_p \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(n \frac{t_c}{T} \pi\right) \cos n\omega \cdot t \quad (2.14)$$

Rezolvând ecuația obținută din egalarea relațiilor (2.13) și (2.14) pentru un regim de așchiere stabilizat vom avea:

$$y = \frac{t_c}{T} \frac{F_p}{k} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\frac{F_p}{k} \frac{2}{n\pi} \sin\left(n \frac{t_c}{T} \pi\right)}{\sqrt{\left(1 - n^2 \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4n^2 v^2 \frac{\omega^2}{\omega_n^2}}} \sin(n\omega \cdot t + \varphi_n) \quad (2.15)$$

în care: 
$$\varphi_n = \arctg \frac{1 - n^2 (\omega^2 / \omega_n^2)}{2n v (\omega / \omega_n)} \quad (2.16)$$

Pe baza acestui model se poate stabili că piesa de prelucrat oscilează în timp, în direcția adâncimii de așchiere, când asupra ei acționează oscilații în direcție radială. Se urmărește comportamentul piesei de prelucrat sub acțiunea unor forțe de așchiere de diferite forme.

Legile de variație a forțelor de așchiere la activarea cu ultrasunete pot fi clasificate primar în trei grupe:

1. forța de așchiere are o componentă staționară și o componentă variabilă:

$$F(t) = F_{st} + F_{inst} \cdot \sin \omega t \quad (2.17)$$

În fig.2.19 [K7] se prezintă schema de așchiere cu oscilații în direcție radială cu viteze mai mici (a) sau mai mari (b) decât viteza critică când datorită modificării adâncimii de

așchiere apare componenta periodică. În zonele pozitive față de degajare a cuțitului apasă piesa de prelucrat, iar în zonele negative apar deformații de forfecare condiționate de acțiunea de tracțiune a fețelor de așezare.

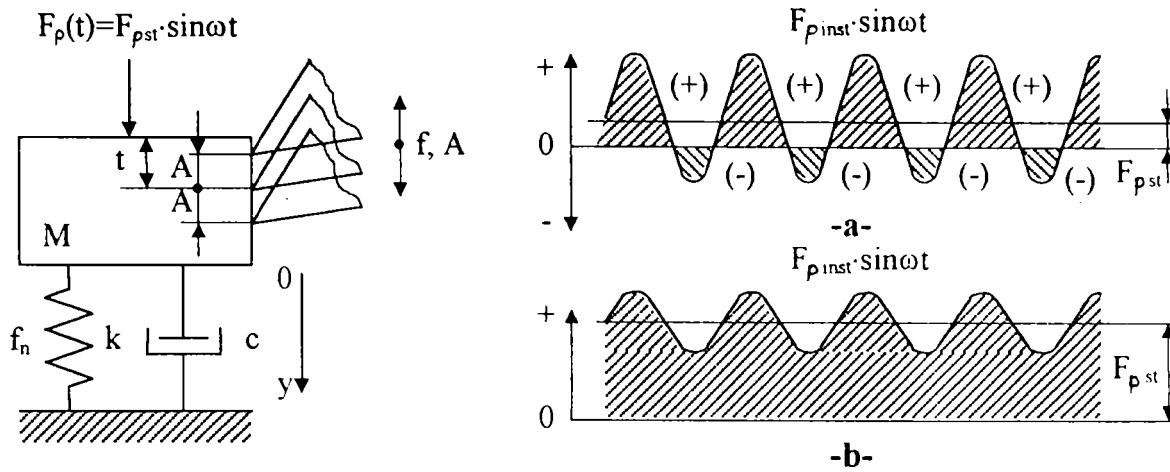


Fig.2.19 Așchiere vibratorie cu viteză: a) mai mică decât viteza critică de așchiere  
b) mai mare decât viteza critică de așchiere

Deplasarea piesei este reprezentată de suma a doi termeni, primul caracterizează static deplasarea iar al doilea descrie variația în timp a deplasării:

$$y = \frac{F_p}{k} + \frac{F_{p\ inst}}{k} \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 / \omega_n^2)^2 + 4v^2 (\omega^2 / \omega_n^2)}} \sin(\omega \cdot t - \varphi) \quad (2.18)$$

unde:  $\varphi = \arctg \frac{2v\omega / \omega_n}{1 - \omega^2 / \omega_n^2}$  (2.19)

În funcție de raportul frecvențelor se pot distinge trei cazuri posibile de oscilație:

a) La  $\omega/\omega_n \gg 1$  se poate considera că  $y \approx F_p/k$ , deci lipsește variația în timp a deplasării și procesul este staționar.

La  $\omega/\omega_n > 1$  frecvența unghiulară a oscilațiilor cuțitului nu se deosebesc semnificativ de frecvența unghiulară a oscilațiilor proprii ale piesei, deci și aceasta se deplasează în timp.

b) Dacă  $\omega/\omega_n \ll 1$  deplasarea piesei va fi variabilă în timp:

$$y = F_p / k + (F_{p\ inst} / k) \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.20)$$

c) La  $\omega/\omega_n = 1$  deplasarea piesei va fi de forma:

$$y = \frac{F_p}{k} + \frac{1}{2v} \frac{F_p}{k} \sin(\omega \cdot t - \varphi) \quad (2.21)$$

se produc modificări importante în timp, în condiții determinate componenta periodică poate depăși componenta staționară a forței de așchiere, ceea ce indică o stare instabilă a sistemului.

2. *forța de așchiere acționează sub forma unor impulsuri unipolare.* În acest caz sunt posibile două mecanisme de așchiere în funcție de raportul dintre frecvența de oscilație a sculei așchietoare  $f$  și frecvența oscilațiilor proprii ale piesei  $f_n$ :

– la  $f/f_n \gg 1$  are loc mecanismul așchierii vibratorii cu insensibilitate la vibrații, când are loc o creștere fictivă a rigidității sistemului oscilant în procesul de așchiere, apar

amortizări ale bătăilor piesei de prelucrat (fig.2.20 a [K7]).

- la  $f/f_n \ll 1$  are loc mecanismul aşchierii de scurtă durată cu vibraţii la punctul neutru, adică aşchiera are loc în timpul unei perioade foarte scurte, când piesa de prelucrat se găseşte în apropiere de punctul de zero (fig.2.20 b [K7]).

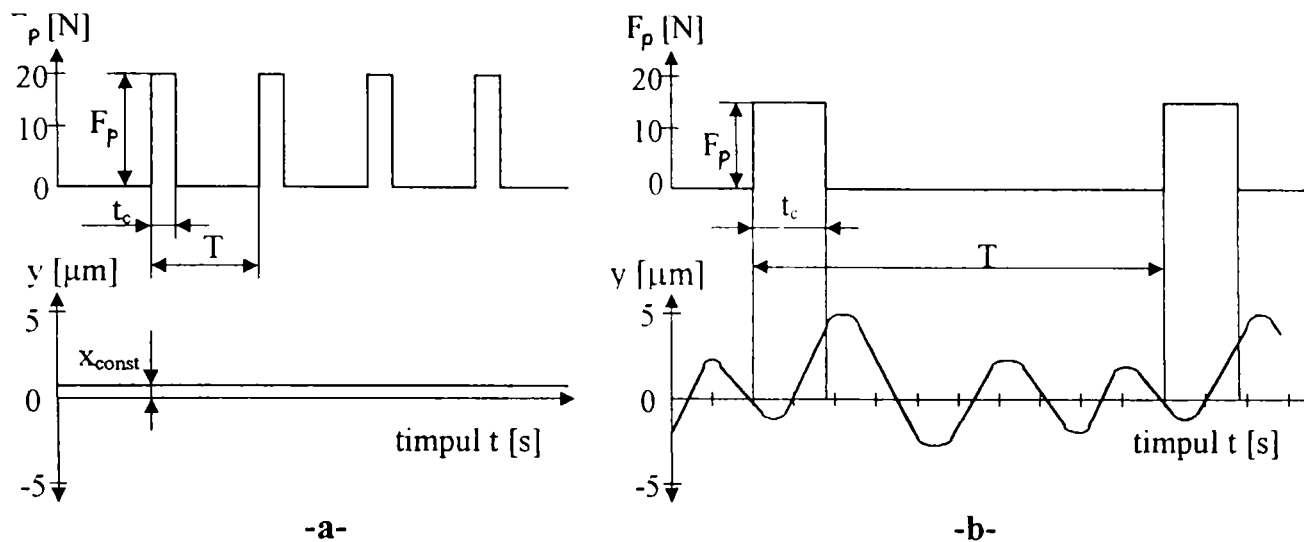


Fig.2.20 Dependența componentei radiale a forței de aşchiere  $F_p$  și a deplasării  $y$  în funcție de timp în cazul: a) aşchierii cu insensibilitate la vibrații; b) aşchierii de scurtă durată cu vibrare la punctul neutru

3. *forțe pulsatorii alternante*, la care deplasarea rezultă mai mică decât în cazul anterior.

## 2.5.4 Influența ultrasunetelor asupra procesului de aşchiere

Studiul acțiunii undelor ultrasonice asupra procesului de aşchiere a vizat următoarele aspecte principale [K7],[M5],[M7]:

- variația periodică a mărimii și direcției vitezei de aşchiere;
- variația periodică a unghiurilor funcționale (efective) ale sculei (unghiul de degajare, de aşezare, de înclinare a tăişului);
- variația periodică a grosimii aşchiei;
- variația sarcinii dinamice în zona formării aşchiei;
- modificarea schemei de generare a suprafețelor;
- schimbarea condițiilor de formare a structurii superficiale a suprafeței piesei de prelucrat;
- modificarea condițiilor de precizie a formei și de calitate a suprafeței prelucrate;
- schimbarea modului de introducere a lichidelor de răcire-ungere în zona de aşchiere;
- facilitarea condițiilor de contact ale suprafețelor active ale sculei cu piesa;
- variația sensibilității dinamice a sistemului tehnologic elastic;
- variația puterii consumate în procesul de aşchiere și bilanțul energetic.

### 2.5.4.1 Influența ultrasunetelor asupra vitezei de aşchiere

La aşchiera clasică, vectorul viteză de aşchiere se determină ca fiind vectorul tangențial la mișcarea circulară a semifabricatului sau a sculei, vectorul vitezei de avans

este mult mai mic decât cel al vitezei de aşchiere  $s/\pi d < 0.01$ . În condiţiile oscilaţiilor forţate vectorul viteză de aşchiere  $\bar{V}$  va fi o mărime variabilă ca sumă geometrică a doi vectori, unul constant  $\bar{v}$  de la aşchiera fără vibraţii şi unul variabil  $\bar{v}(t)$  de la suprapunerea vibraţiilor forţate:

$$\bar{V} = \bar{v} + \bar{v}(t) = \bar{v} + \bar{A}\omega \cos\omega t \quad (2.22)$$

Gradul de acţiune al oscilaţiilor ultrasonice asupra cinematicii procesului de aşchiere depinde nu numai de frecvenţa şi amplitudinea oscilaţiilor, ci şi de direcţia lor. În fig.2.21 [M5] sunt prezentate scheme ale influenţei oscilaţiilor ultrasonice asupra mărimii şi direcţiei vectorului viteză de aşchiere la strunjire cu oscilaţii tangenţiale, radiale şi axiale. La oscilaţii forţate tangenţiale ambii vectori  $\bar{v}, \bar{v}(t)$  prin urmare şi  $\bar{V}$  vor avea aceeaşi direcţie,  $V_{\max} = v + A\omega$ ;  $V_{\min} = v - A\omega$ . Se observă că prima semiperioadă  $V > v$ , iar în a doua semiperioadă  $-V > v$ , deci în anumite condiţii ( $v \leq A\omega$ ) viteza efectivă de aşchiere poate avea valoarea zero în decursul unei perioade de oscilaţie. Va fi  $V=0$  la timpi:

$$t_1 = (1/\omega) \arccos v/A\omega; t_2 = (1/\omega) (\pi - \arccos v/A\omega) \quad (2.23)$$

La timpi  $t_3 = \pi/2, t_4 = 3\pi/2, V$  va fi egal cu viteza mişcării circulare  $v$ .

La oscilaţii forţate în direcţie radială şi axială vectorul  $\bar{V}$  variază periodic nu numai în mărime ci şi în direcţie:

$$V_{\max} = \sqrt{v^2 + A^2\omega^2}; V_{\min} = v \quad (2.24)$$

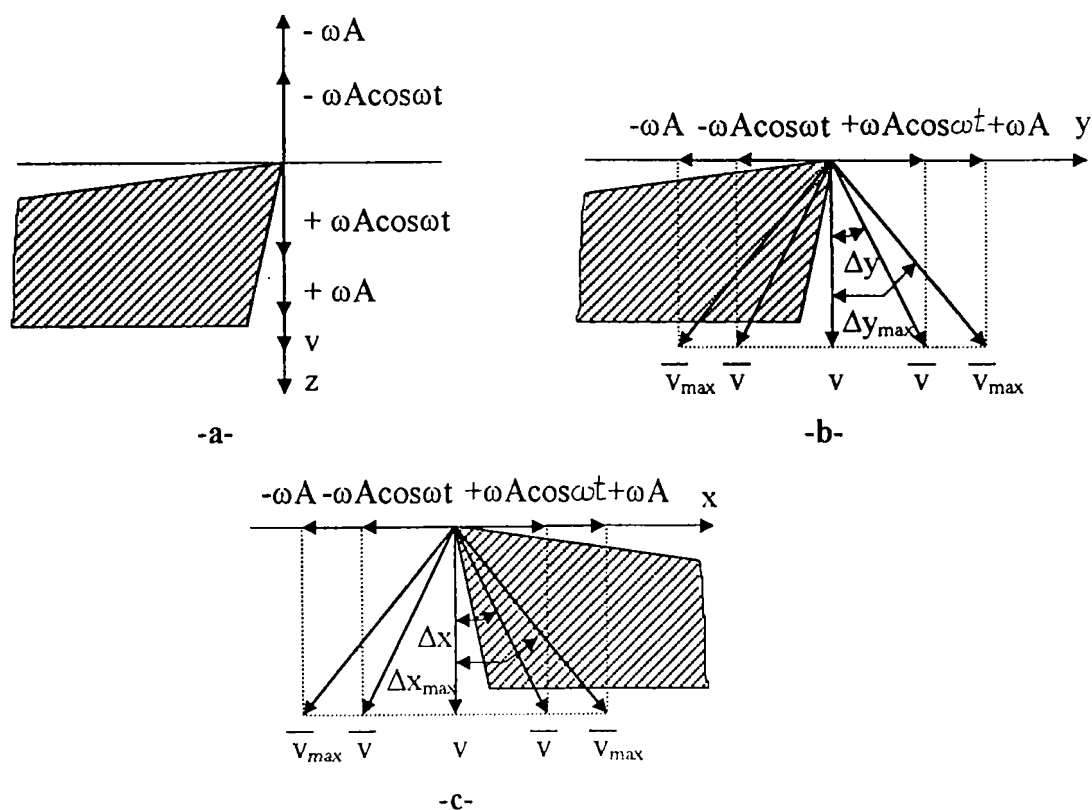


Fig.2.21 Variaţia vitezei de aşchiere în funcţie de oscilaţiile ultrasonice aplicate: a) oscilaţii tangenţiale, b) oscilaţii radiale, c) oscilaţii axiale

În fig.2.22 [M5] este reprezentată grafic dependenţa  $V_{\max} = f(A)$  pentru diferite viteze periferice ale semifabricatului, frecvenţa oscilaţiilor radiale şi axiale  $f = 15$  kHz. Se remarcă că cea mai mare creştere a lui  $V_{\max}$  cu amplitudinea se produce la valori mici ale

vitezei  $v$ . Pentru a aprecia influența ultrasunetelor asupra procesului de așchiere este mult mai comod să se introducă mărimi adimensionale. Criteriul vitezei  $v$  este raportul dintre componenta variabilă și cea constantă a vitezei de așchiere:

$$v = v(t) / v = (A\omega / v) \cos\omega t \quad (2.25)$$

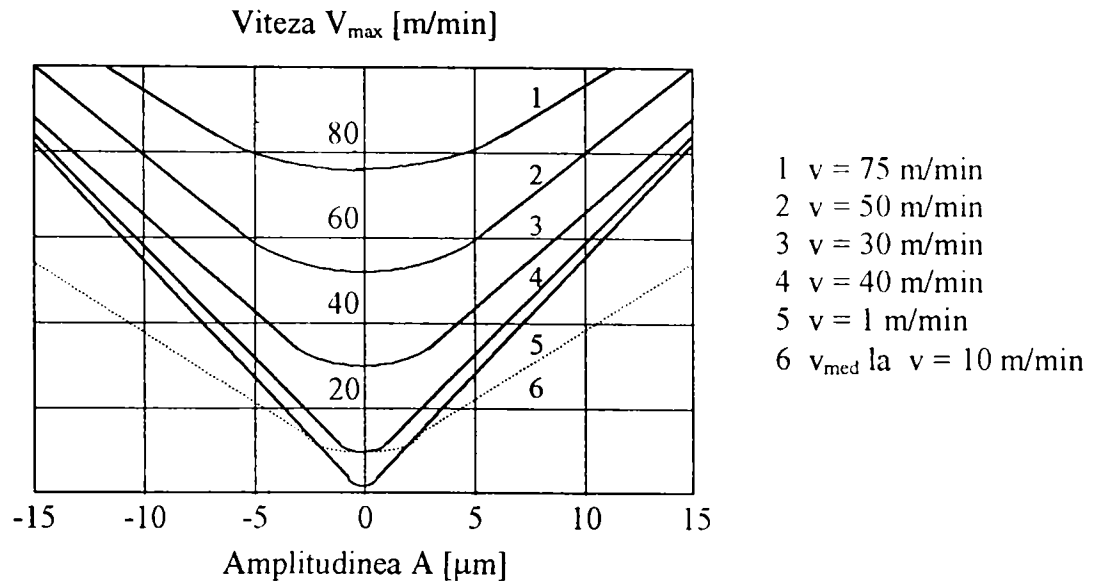


Fig.2.22 Influența amplitudinii oscilațiilor ultrasonice asupra vitezei maxime la strunjire

Corespunzător valorii maxime  $v(t)_{\max} = v_{cr}$  și valorii medii a vitezei de oscilație, vom avea criteriul  $v$  respectiv:

$$v_{\max} = A\omega/v; v_{\text{med}} = (2/\pi) v_{\max} \quad (2.26)$$

În tabelul 2.4 [M5] se dau valorile vitezei reale de așchiere  $V$ , valorile  $V_{\max}$ ,  $V_{\min}$  și  $V_{\text{med}}$  pentru cazul introducerii de oscilații forțate după toate cele trei direcții. Astfel aplicând oscilații ultrasonice tangențiale efectul variației vitezei efective de așchiere  $V$  este proporțional cu factorul  $1 \pm v$ , iar la oscilații ultrasonice radiale și axiale este proporțional cu factorul  $\sqrt{1 + v^2}$ .

Tabelul 2.4 Valoarea vitezei reale în funcție de parametrul  $v$  și direcția oscilației.

Viteza reală de așchiere	Direcția oscilațiilor		
	tangențială (după axa z)	radială (după axa y)	axială (după axa x)
$V$	$v(1 \pm v)$	$v\sqrt{1 + v^2}$	$v\sqrt{1 + v^2}$
$V_{\max}$	$v(1 + v_{\max})$	$v\sqrt{1 + v_{\max}^2}$	$v\sqrt{1 + v_{\max}^2}$
$V_{\min}$	$v(1 - v_{\max})$	$v$	$v$
$V_{\text{med}}$	$v\left(1 + \frac{2}{\pi} v_{\max}\right)$	$v\sqrt{1 + \frac{4}{\pi^2} v_{\max}^2}$	$v\sqrt{1 + \frac{4}{\pi^2} v_{\max}^2}$

### 2.5.4.2 Influența ultrasunetelor asupra unghiurilor funcționale ale sculei

Transmiterea oscilațiilor ultrasonice unei scule așchietoare conduce la modificarea cinematicii și a geometriei așchierii, în mod deosebit este interesant cum se modifică unghiul de degajare efectiv  $\gamma_e$ , de așezare  $\alpha_e$  și de înclinare a tăișului principal  $\lambda_{Te}$ . La aplicarea oscilațiilor forțate de frecvență ultrasonică în direcție radială sau axială variază periodic poziția planului de lucru și poziția planului tăișului principal efectiv, deci se modifică și valoarea unghiurilor efective corespunzătoare.

$$\gamma_e = \gamma \pm \Delta\gamma; \alpha_e = \alpha \pm \Delta\alpha \quad (2.27)$$

unde  $\Delta\gamma$ ,  $\Delta\alpha$  sunt variațiile unghiurilor de degajare și de așezare datorită variației planului de lucru,  $\gamma$  și  $\alpha$  sunt unghiurile de degajare și de așezare constructive ale sculei așchietoare. La așchiera clasică de obicei  $\Delta\gamma$ ,  $\Delta\alpha$  au valori mici și la avansuri obișnuite  $\gamma_e \cong \gamma$ ,  $\alpha_e \cong \alpha$ . La aplicarea oscilațiilor ultrasonice unghiurile efective se pot modifica substanțial. În tabelul 2.5 se dau formulele de calcul pentru  $\Delta\alpha$  și  $\Delta\gamma$  în cazul strunjirii cu oscilații tangențiale, radiale sau axiale. Efectul acestora asupra mărimilor  $\Delta\alpha$  și  $\Delta\gamma$  crește odată cu mărirea amplitudinilor vibrațiilor ultrasonice și cu micșorarea vitezei de rotație a semifabricatului. La amplitudini mici  $A=1\mu\text{m}$ , frecvența  $f=20\text{ kHz}$ , viteza de așchiere  $v=15\text{ m/min}$  ( $v_{\max}=0.5$ ) pentru un cuțit cu  $\kappa_r=45^\circ$ ,  $\lambda_T=0^\circ$ , mărirea  $\Delta\alpha$  variază în decursul fiecărei perioade de la  $+20^\circ$  la  $-20^\circ$ , iar  $\Delta\gamma$  de la  $+30^\circ$  la  $-30^\circ$ . În cazul aplicării oscilațiilor radiale valoarea cosinusului director dintre vectorii  $\bar{V}$  și  $\bar{v}$  are expresia:

$$\cos(\bar{V}, \bar{v}) = \cos\Delta\gamma = \frac{1}{\sqrt{1+v^2}} \quad (2.28)$$

$$\cos\Delta\gamma_{\max} = \frac{1}{\sqrt{1+v_{\max}^2}} \quad (2.29)$$

Tabelul 2.5 Variația unghiurilor de degajare și de așezare ale sculei la activarea cu oscilații tangențiale, radiale și axiale.

Variația unghiurilor sculei așchietoare	Direcția oscilațiilor		
	tangențiale după axa oz	radiale după axa oy	axiale după axa ox
$\Delta\gamma$	0	$\arctg\left(\frac{v}{\cos\kappa_r} \pm \text{tg}\lambda_T\right)$	$\arctg\left(\frac{v}{\sin\kappa_r} \mp \text{tg}\lambda_T\right)$
$\Delta\alpha$	0	$\arctg(v \cdot \cos\kappa_r)$	$\arctg(v \cdot \sin\kappa_r)$

În fig.2.23 [M5] se arată dependența  $\Delta\gamma_{\max}$ ,  $\Delta\alpha_{y\max}$ ,  $\Delta\gamma_{y\max}$  în funcție de criteriul vitezei  $v_{\max}$ , pentru un cuțit cu  $\lambda_T=0^\circ$ ,  $\kappa_r=45^\circ$ ,  $f=15\text{ kHz}$ .

În literatură se arată că la excitarea sculei cu oscilații de înaltă frecvență în direcție radială suprafața așchiată are un aspect mat tocmai datorită modificării periodice a unghiului efectiv de așezare. Pe de altă parte la așchiera vibratorie a materialelor cu plasticitate ridicată și cu viteze mici de așchiere  $v=1\dots 5\text{ m/min}$  suprafețele generate devin



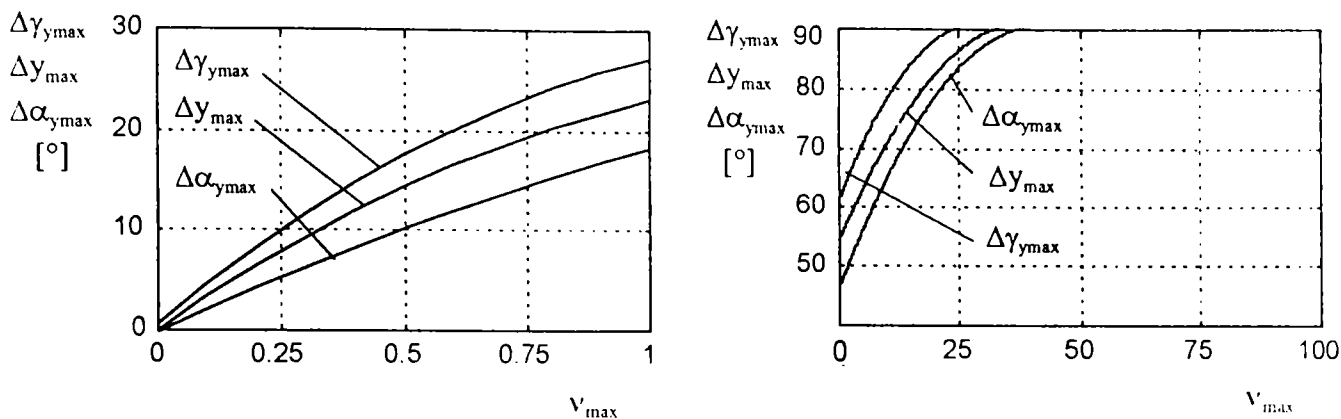


Fig.2.23 Influența criteriului vitezei  $v_{max}$  asupra variației unghiului director  $\Delta y$ , a unghiurilor de așezare  $\Delta \alpha$  și de degajare  $\Delta \gamma$

lucioase din cauza modificării procesului de formare a așchii, sub acțiunea ultrasunetelor formându-se așchii de curgere.

Un alt unghi care se modifică la activarea cu oscilații ultrasonice a procesului de așchiere este unghiul efectiv de înclinare a tăișului principal  $\lambda_{Te}$ , unghi care se determină cu o relație de următoarea formă:

$$\operatorname{tg} \lambda_{Te} = \frac{v \cdot \cos \lambda_T}{1 + \sin \lambda_T} \quad (2.30)$$

În fig.2.24 [M5] se prezintă dependența unghiului efectiv mediu de înclinare a tăișului principal  $\lambda_{Te \text{ med}}$  (determinat pentru  $v = v_{med}$ ) în funcție de amplitudinea oscilațiilor ultrasonice pentru diferite valori ale unghiului constructiv  $\lambda_T$ , pentru  $f = 15 \text{ kHz}$ , viteza de așchiere  $v = 10 \text{ m/min}$ . Cercetările arată că mărirea unghiului  $\lambda_{Te}$  duce la scăderea lucrului mecanic de deformare plastică și creșterea lucrului mecanic specific de frecare pe fețele de degajare și de așezare ale sculei deoarece la așchiera activată ultrasonic alunecările și forfecările în zona formării așchii se produc nu numai într-un plan normal pe muchia așchietoare, ci și pe direcții laterale.

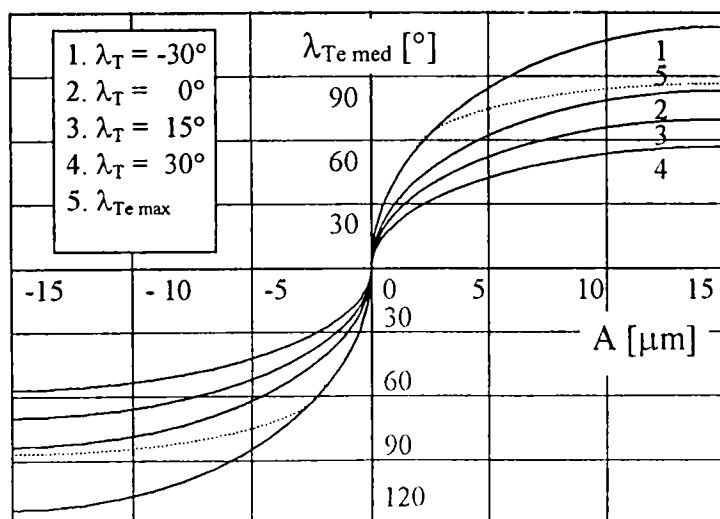


Fig.2.24 Influența amplitudinii oscilațiilor radiale asupra unghiului efectiv de înclinare a tăișului principal

### 2.5.4.3 Influența ultrasunetelor asupra grosimii așchii

Grosimea așchii  $a$  se determină într-un plan perpendicular pe vectorul vitezei efective de așchiere și trece prin punctul de aplicație al vectorului  $\vec{V}$ . Deviația periodică a acestui vector produce în mod periodic și variația cu  $\Delta a$  a grosimii stratului așchiat, respectiv a așchii. La așchiera cu oscilații ultrasonice în direcție radială sau axială grosimea așchii se modifică astfel:

$$a_g = a \pm \Delta a \quad (2.31)$$

La strunjire exterioară și interioară cu avans longitudinal și oscilații radiale, grosimea reală a așchii este dată de relația:

$$a_g = \frac{s(\sin \kappa_r \cdot \cos \varepsilon - \operatorname{tg} \lambda_T \cdot \sin \varepsilon)}{\sqrt{(\cos \kappa_r - \nu \cdot \operatorname{tg} \lambda_T)^2 + (1 + \nu)^2 (\sin \kappa_r \cdot \cos \varepsilon - \operatorname{tg} \lambda_T \cdot \sin \varepsilon)^2}} \quad (2.32)$$

unde:  $s$  este avansul longitudinal,  $\varepsilon$  unghiul de așezare al sculei în raport cu axa semifabricatului,  $\sin \varepsilon = 2h/d$ ;  $h$  fiind supraînălțarea vârfului sculei în raport cu axa semifabricatului iar  $d$  diametrul semifabricatului.

Se observă că pentru  $\lambda_T=0^\circ$ ,  $\varepsilon=0$ ,  $\nu=0$  (așchiere obișnuită fără dezaxarea sculei în raport cu semifabricatul) se revine la cunoscuta relație  $a = s \sin \kappa_r$ . În fig.2.25 [M5] se reprezintă grafic grosimea relativă maximă a așchii  $(a_g/a)_{\max}$  în funcție de amplitudinea oscilațiilor radiale pentru un cuțit cu  $\kappa_r=90^\circ$ ,  $f = 15 \text{ kHz}$ . Se remarcă că efectul acțiunii ultrasunetelor asupra variației periodice a grosimii așchii crește cu mărirea amplitudinii și scade cu micșorarea vitezei. Când criteriul vitezei  $v_{\max} > 1.5 \dots 2$  adâncimea stratului îndepărtat se modifică proporțional cu variația lui  $a_g$ .

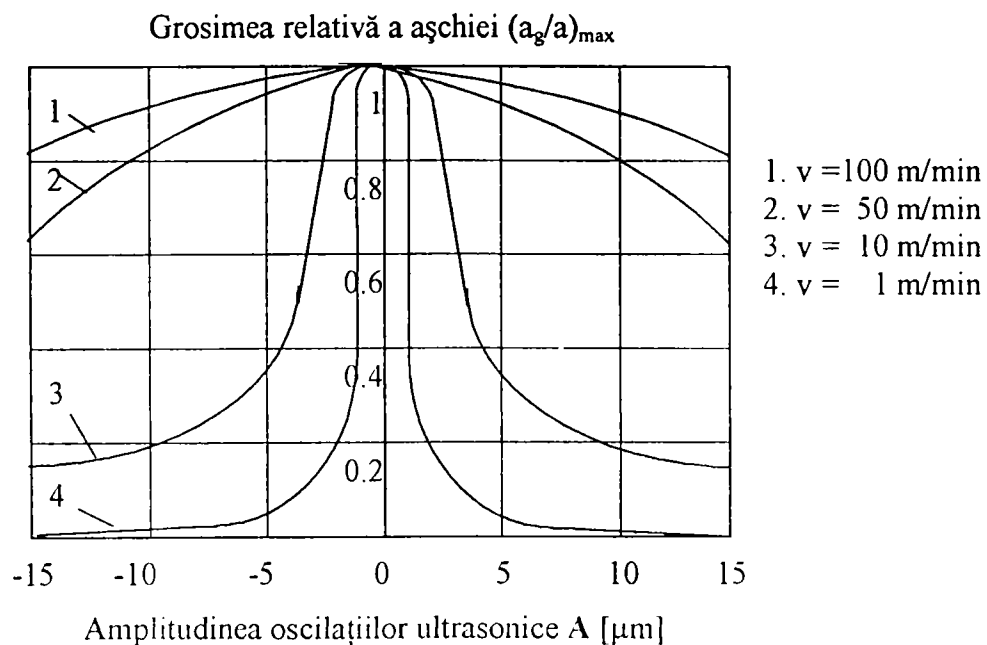


Fig.2.25 Influența amplitudinii oscilațiilor radiale asupra raportului  $(a_g/a)_{\max}$  la diferite viteze periferice ale piesei

#### 2.5.4.4 Influența ultrasunetelor asupra durabilității sculelor

Acțiunea sarcinii variabile cu frecvență ultrasonică asupra sculei așchietoare poate provoca uzura la oboseală, fiind cunoscut și faptul că aliajele dure și materialele metalo-ceramice au o rezistență destul de scăzută la oboseală. În cazul carburilor metalice, la strunjirea cu oscilații ultrasonice radiale, pe fața de așezare apar desprinderi de particule, fisuri ale grăunților. Se consideră că la o amplitudine dată a oscilațiilor aplicate sculelor din carburi metalice valoarea limită a numărului ciclurilor sarcinilor variabile este egal cu  $(1.2...1.5) \times 10^7$  [M5].

Se remarcă faptul că durabilitatea sculelor din oțel rapid se poate mări de circa trei ori sau din contră poate scădea. Cuțitele care au dat durabilități scăzute au avut în structură o cantitate importantă de structuri neomogene, grăunții cristalini de carbură având dimensiuni mai mici decât cei din microstructura cuțitelor cu rezultate favorabile. S-a stabilit că, la activarea cu oscilații ultrasonice radiale a cuțitelor din oțel rapid, proprietățile așchietoare normale ale cuțitelor se păstrează până la valori mari ale uzurii sculei pe fața de așezare  $VB=1...1.2$  mm, fără înrăutățirea sensibilă a calității suprafeței generate. Pe de altă parte activarea ultrasonică duce la micșorarea intensității depunerii pe tăiș, ceea ce conduce la îmbunătățirea calității suprafeței.

Alte cercetări [K7] evidențiază că prin aplicarea oscilațiilor ultrasonice se mărește semnificativ stabilitatea sculei la prelucrarea oțelurilor rezistente la coroziune.

#### 2.5.4.5 Influența ultrasunetelor asupra puterii medii efective de așchiere

La așchiera cu oscilații ultrasonice se aplică sculei o sarcină dinamică de semn variabil, procesul de formare a așchiei decurge mai ușor, forțele de așchiere se micșorează scăzând deci și puterea efectivă. Se notează cu  $K_{Fi}$  raportul dintre mărimea forței de așchiere fără activare ultrasonică și  $F_{i\ us}$  pentru cazul activării ultrasonice ( $i=f, p, c$ ):

$$K_{Fi} = F_i / F_{i\ us} \quad (2.33)$$

Experimental, acesta are o variație de forma:

$$K_{Fi} = C_{Fi} v_{\max}^k \quad (2.34)$$

unde  $C_{Fi}$ ,  $k$  sunt constante date tabelar.

Datorită variației mărimii forței de așchiere și a vitezei efective de așchiere se va schimba și puterea medie de așchiere consumate în proces. Ținând cont că la așchiera clasică puterea efectivă este  $P = F_z v$ , la activarea cu oscilații ultrasonice tangențiale va fi:

$$P_{us} = F_{c\ us} \cdot V \cdot \cos(F_c, V) + F_{p\ us} \cdot V \cdot \sin(F_c, V) = F_{c\ us} \cdot v + F_{p\ us} \cdot v(t) \quad (2.35)$$

Pentru a aprecia valoarea mărimilor medii ale puterii consumate se introduce coeficientul de putere:

$$K_p = P / P_{us} \quad (2.36)$$

Pentru diferite valori ale vitezei medii efective de așchiere acest coeficient are diverse expresii în funcție de tipul oscilațiilor ultrasonice aplicate:

- pentru oscilații tangențiale:

$$K_{Plg} = \frac{K_{Fe}}{1 + v_{med}} = C_1 \frac{v_{med}^{\kappa_1}}{1 + v_{med}}; \quad v_{med} = \frac{\kappa_1}{1 - \kappa_1} \quad (2.37)$$

- pentru oscilații radiale:

$$K_{Prad} = \frac{K_{Fc}}{1 + \frac{F_{pus}}{F_{cus}} - v_{med}} \cong \frac{K_{Fe}}{1 + 0.5v_{med}} = C_2 \frac{v_{med}^{\kappa_2}}{1 + 0.5v_{med}}; \quad \gamma_{med} = \frac{\kappa_2}{0.5(1 - \kappa_2)} \quad (2.38)$$

Rezultatele experimentale evidențiază o importantă scădere a puterii medii efective consumate la activarea cu oscilații ultrasonice a aşchierii materialelor cu plasticitate ridicată, cu secțiune mică a aşchiei, pentru criteriul vitezei  $v_{med} \geq 1$  [M5].

Considerațiile prezentate pentru aşchiera ultrasonică cu scule de tipul cuțitelor rămân valabile și în cazul activării ultrasonice a sculelor de tipul burghiilor, alezoarelor, frezelor, broșelor, ș.a.

### 2.5.5 Particularități ale rectificării și netezirii fine abrazive activate ultrasonic

În cadrul acestor procedee clasice de prelucrare fină a suprafețelor, în mod obișnuit, microcroneregularitățile suprafeței se modifică în mod continuu ca rezultat al schimbării succesive a direcțiilor de mișcare a granulelor abrazive, traiectoriile lor devenind imprevizibile, aleatoare. Se poate spune că există un mecanism de formare a microcanalelor pe suprafața de prelucrat.

La aplicarea oscilațiilor de joasă sau de înaltă frecvență (ultrasonice) se asigură o calitate mai bună a suprafețelor și se reduce de câteva ori consumul de energie pentru aşchiere și pentru frecarea din lagărele arborelui principal. Acest lucru se explică prin faptul că suprapunerea unui câmp ultrasonic modifică cinematica aşchierii cu particule abrazive, deci se activează mecanismul de formare a microneregularităților suprafeței, ușurându-se prelevarea de material și formarea aşchiilor, îmbunătățindu-se autoascuțirea și curățirea discului de rectificat sau a barelor abrazive de produsele prelucrării, se micșorează forțele de frecare și degajarea de căldură în zona de contact sculă-semifabricat [K7],[N9].

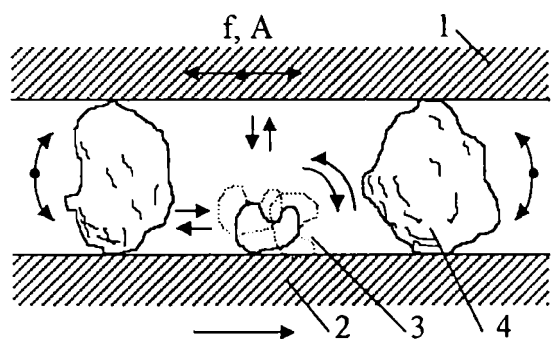
În unele cazuri particulare, de exemplu la rectificarea vibratorie, se observă autooscilații în direcție tangențială sau normală, ceea ce conduce la înrăutățirea calității suprafeței prelucrate și la micșorarea stabilității discului abraziv. De aici rezultă că factorul determinant al utilizării oscilațiilor ultrasonice este posibilitatea amortizării sau înlăturării autooscilațiilor. În acest sens nu este rațional să se aplice oscilații ultrasonice normale iar utilizarea celor axiale are un domeniu limitat de aplicare. Cea mai bună amortizare a autooscilațiilor și îmbunătățire a calității suprafețelor se asigură la transmiterea oscilațiilor tangențiale de mică amplitudine circa  $1\mu m$  precum și a oscilațiilor de torsiune rezonante (adică frecvența oscilațiilor proprii de torsiune să depășească frecvența oscilațiilor proprii de încovoire ale arborelui sau semifabricatului, iar dublul pătratului amplitudinii vitezei oscilațiilor purtate să fie mai mare decât pătratul amplitudinii vitezei autooscilațiilor). O influență favorabilă o au și oscilațiile torsional-axiale sau tangențial-axiale, când se obține o mișcare încrucișată a granulelor abrazive în

raport cu vectorul vitezei de avans și forțele alternante se redistribuie activ în planul de așchiere, anulând aproape complet autooscilațiile, iar forța de frecare se reduce de până la patru ori.

Procedeele analizate se pot realiza pe mașini mici și mijlocii de rigiditate scăzută, înlocuind rectificarea de mare viteză. Cel mai rațional este să se utilizeze rectificarea cu suprapunere de oscilații ultrasonice sau de joasă frecvență la prelucrarea semifabricatelor cu rigiditate scăzută, din materiale greu prelucrabile, pe mașini-unelte mici, în locul procedeele tradiționale de rectificare la care se dezvoltă autooscilații intense.

### Modele fizice ale PNFA cu abraziv liber

La PNFA cu abraziv liber cum este cazul lepuirii, rodării, activarea ultrasonică intensifică mișcarea granulelor ca rezultat al acțiunii oscilațiilor ultrasonice, fig.2.26



- 1 - piesa de prelucrat (scula de lepuire)
- 2 - scula de lepuire (piesă)
- 3, 4 - granulă abrazivă de dimensiune mică, respectiv mare

Fig.2.26 Model simplificat al acțiunii granulelor abrazive la lepuirea ultrasonică

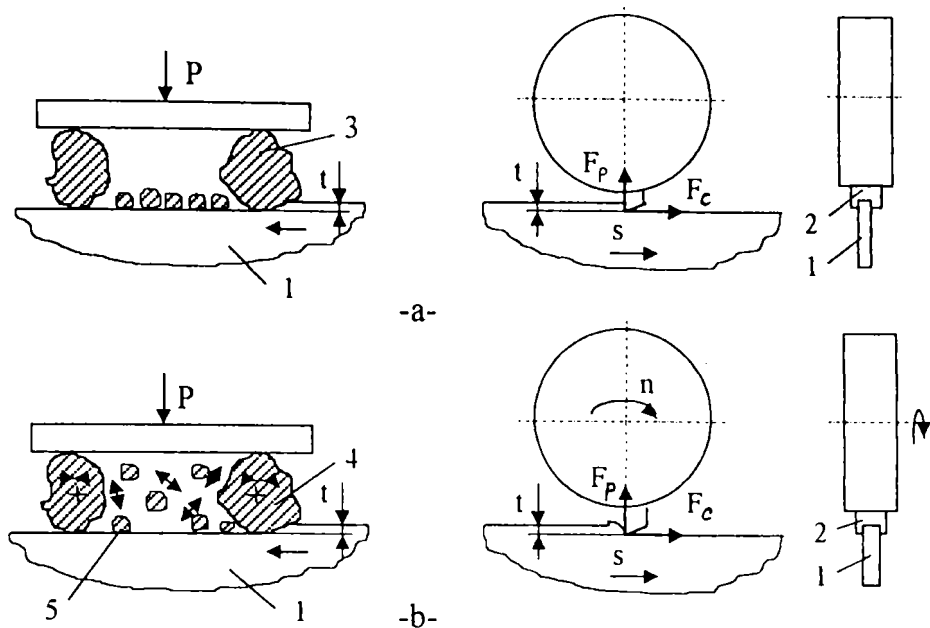
[K7]. În procesul prelucrării granulele abrazive mari execută mișcări active de rotație, iar cele mici de oscilație. Pe granulele mari existente între scula de lepuire și suprafața de prelucrat se aplică o sarcină mai mare decât pe restul abrazivului, ceea ce conduce la spargerea și fărâmițarea lor, diametrul granulelor devine rapid uniform, efectul de profilare a muchiilor tăietoare apare foarte rapid. Datorită suprapunerii, aglomerării și distrugerii granulelor abrazive, sarcina exterioară va fi uniform distribuită peste grupul de granule cu diametrul uniform, ceea ce permite creșterea preciziei prelucrării, netezimii suprafeței și

omogenității sale, evitarea formării zgârieturilor profunde pe suprafața de prelucrat. În paralel se produce oscilația particulelor mici, apărând fenomene analoage prelucrării prin sablare. Se activează astfel procesele legate de formarea de microcanale, îmbunătățirea rugozității suprafeței, dar și apariția unor tensiuni remanente de compresiune.

Se poate face o analogie între lepuirea clasică și rabotare și lepuirea ultrasonică și frezare, prezentată în fig.2.27 [K7]. Sunt valabile dependențele existente între forțele de așchiere și turația piesei. Comparativ cu frezarea, rabotării îi sunt caracteristice valori mai mari ale componentelor principale și radiale a forței de așchiere. La frezare odată cu creșterea turației forța radială scade, la rabotare rămânând evident constantă. Datorită mișcării de rotație a frezei fiecare dinte așchiază cu intermitență, adaosul de prelucrare fiind divizat pe numărul total de dinți, tăișurile sculei se încălzesc mult mai puțin decât în cazul așchierii continue. Astfel și în cazul activării ultrasonice a lepuirii, datorită rotației granulelor mari, muchiile așchietoare ale acestora se succed într-un ritm mai rapid, crescând capacitatea așchietoare a abrazivului.

Prelucrarea trebuie orientată astfel încât la aplicarea oscilațiilor ultrasonice să se activeze comportarea dinamică a granulelor abrazive, deplasarea lor, efectul de profilare





a) lepuire clasică; b) lepuire ultrasonică  
 1 - piesa de prelucrat; 2 - scula aşchiitoare; 3 - granulă abrazivă mare la lepuirea clasică; 4 - granulă abrazivă mare la lepuirea activată; 5 - granule mici

Fig.2.27 Model al lepuirii ultrasonice în analogie cu frezarea

a muchiilor tăietoare. Se accelerează formarea microcanalelor, se îmbunătățește procesul de prelevare de material, putându-se mări productivitatea prelucrării. Se obține o recirculație mai bună a materialului abraziv, facilitarea alimentării cu acesta, scăderea dimensiunii granulelor în paralel cu apariția noilor muchii tăietoare, migrația particulelor poate duce la scăderea consumului de abraziv, iar pentru micșorarea rugozității și creșterea calității suprafeței prelucrate nu va mai fi necesară schimbarea abrazivului cu unul mai fin.

Un alt model redat în fig.2.28 [C7] propune un posibil mecanism al prelucrării pentru lepuirea în câmp ultrasonic. Oscilațiile ultrasonice axiale ale discului de prelucrat sunt transmise prin suspensia abrazivă piesei care se prelucrează. Se întâlnesc zone în care are loc compresia mediului de lucru, când granulele abrazive se tasează și astfel muchiile lor aşchiitoare pătrund în materialul de prelucrat, în stratul înmuiat datorită acțiunii chimice a elementelor active din suspensia abrazivă. Datorită mișcării relative dintre piesă și disc și forței de apăsare are loc fenomenul de aşchiere. În zonele de dilatare preponderent este fenomenul de cavitație. Bulele de cavitație dislocă material din craterele aflate în zona de contact formate prin impactul granulei abrazive cu piesa de prelucrat, rezultând un alt tip de interacțiune. Se presupune că datorită loviturilor repetate pe suprafața piesei apare fenomenul de ecruisare, proces anulat parțial de temperaturile locale mari care duc la un proces de recristalizare.

În concluzie, prelevarea de material la lepuirea activată ultrasonic are loc datorită următoarelor fenomene:

- ciocnirea și deplasarea granulelor abrazive pe suprafața de prelucrat;
- ciocnirea granulelor abrazive în spațiul dintre sculă și piesă;
- cavitația acustică;
- coroziunea chimică.



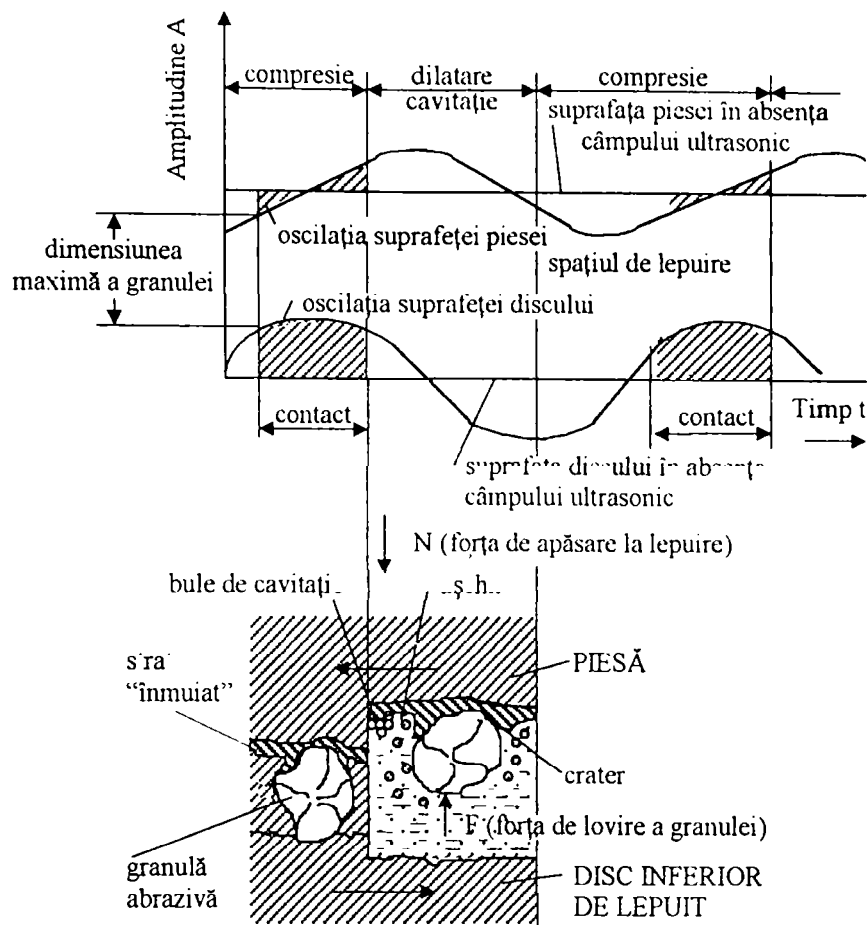


Fig.2.28 Model pentru lepuirea în câmp ultrasonic

Fenomenul cavitațional are o pondere relativ mică în procesul analizat, mai ales la lepuirea cu paste abrazive, datorită vâscozității mai mari a lichidului purtător (la prelucrarea dimensională cu ultrasunete, unde lichidul purtător este de regulă apa, prelevarea de material datorită cavitației acustice este de maxim 2% [N3]). Coroziunea chimică poate avea o pondere însemnată în cazul în care în componența pastei de lepuire se introduc și elemente chimic active.

În literatura parcursă nu au fost întâlnite modele analitice pentru cazul activării ultrasonice a PNFA cu abraziv liber sau legat.

## 2.6 Cercetări experimentale asupra proceselor de așchiere activate ultrasonic

### 2.6.1 Rezultate ale cercetărilor experimentale la utilizarea ultrasunetelor în procesele de așchiere

Efectuarea unor studii experimentale comparate: “cu” și “fără” activare ultrasonică asupra variației unor indici de performanță stabilește răspunsul sistemului tehnologic la aplicarea unui câmp ultrasonic. Cercetările experimentale vizează influența oscilațiilor ultrasonice asupra forțelor de așchiere, a calității suprafeței prelucrate și a deformației stratului supus așchierii în scopul determinării cazurilor în care prelucrările prin așchiere activate ultrasonic pot înlocui prelucrările clasice.

Încercările efectuate la strunjire cu ultrasunete s-au efectuat pe o gamă diversă de materiale ale piesei de prelucrat, dar și cu scule așchietoare de diferite tipuri și materiale. În continuare se prezintă din literatura parcursă câteva rezultate obținute în anumite condiții de prelucrare la strunjire activată ultrasonic. Se remarcă că cele mai bune rezultate din punct de vedere al forțelor și a rugozității finale se obțin la utilizarea oscilațiilor ultrasonice tangențiale aplicate în direcția componentei principale a forței de așchiere și la viteze mici de așchiere [V2]. La strunjirea oțelurilor aliate refractare pe lângă variația substanțială a deformației metalului în zona de așchiere, a dispărut depunerea pe tăiș și s-a stabilit și o scădere a microdurtății cu circa 90 daN/mm<sup>2</sup> față de așchiera clasică. Oportunitatea aplicării ultrasunetelor depinde și de materialul prelucrat, mai ales de proprietățile plastice ale semifabricatului. La strunjirea cuprului într-un anumit domeniu de avans s-au obținut scăderi ale forței  $F_c$  de 8-10 ori, iar ale forței  $F_p$  până la 50 de ori și îmbunătățirea calității suprafeței cu două clase de rugozitate [M5]. La viteze mici de așchiere  $v=1...5$  m/min a materialelor cu plasticitate ridicată aplicarea oscilațiilor ultrasonice tangențiale conduce la îmbunătățirea substanțială a condițiilor de formare a așchiei, a prelucrabilității materialului.

S-a studiat comportarea la așchiere vibratorie a aluminiului, duraluminiului, alamei, fontei și chiar a unor materiale mai deosebite cum ar fi titanul și aliaje ale acestuia [A1],[P1]. În fig.2.29 se redau cercetări recente [K4] asupra strunjirii materialelor compozite cu armătură de fibră de carbon utilizând un cuțit din policristale de diamant activat cu ultrasunete cu frecvența de 19.5 kHz și amplitudinea 15  $\mu$ m. Calitatea suprafeței prelucrate nu depinde atât de adâncimea de așchiere, cât de viteza de așchiere și de avans. Se remarcă și aici că la viteze mai mici decât viteza critică de așchiere așchiera cu unde ultrasonice conduce la obținerea unor calități mai bune ale suprafeței prelucrate. Se analizează la microscopul electronic suprafața așchiată cu ultrasunete și se observă că fibrele de carbon sunt tăiate mai neted indiferent de materialul cuțitului de strunjit.

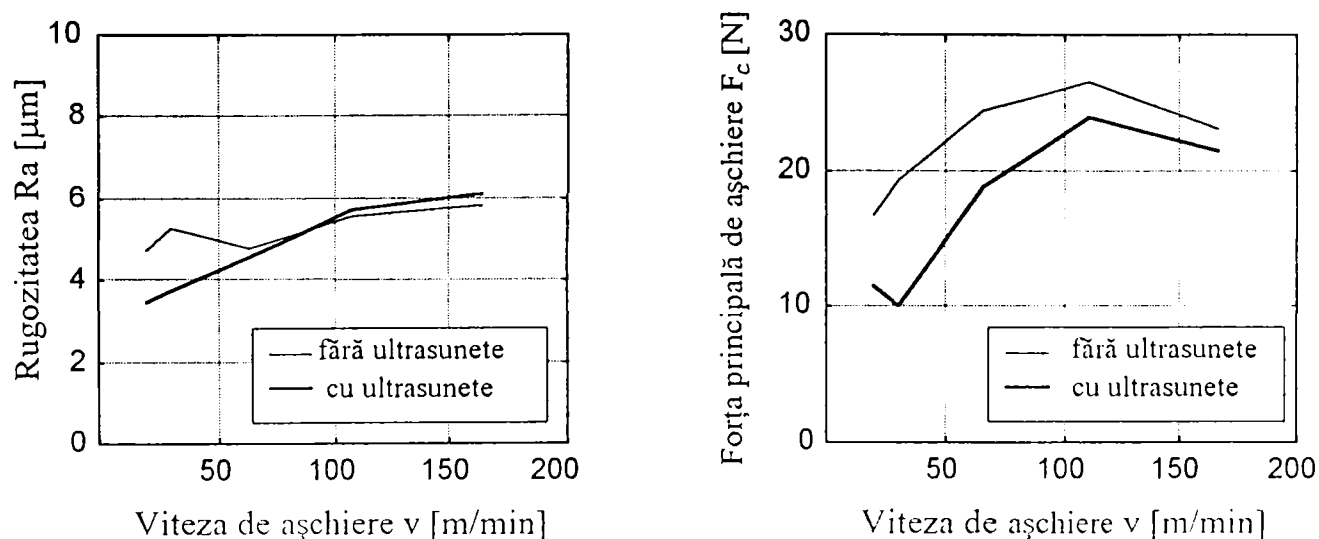


Fig.2.29 Rugozitatea suprafeței și forța principală de așchiere la strunjirea clasică și cu ultrasunete a materialelor compozite armate cu fibră de carbon

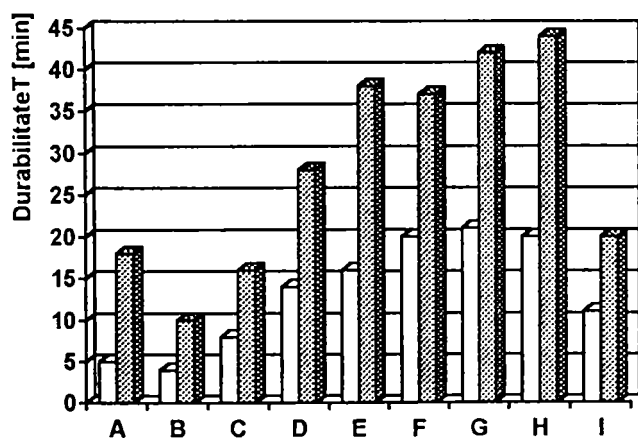
La găurire și alezare se recomandă pentru materiale cu rezistență mecanică ridicată și medie activarea sculei cu vibrații torsionale și aplicarea vibrațiilor în direcția avansului

pentru materiale cu plasticitate ridicată [I3]. În cazul prelucrării prin burghiere a unor materiale ca oțel carbon, oțeluri aliate, inoxidabile, alamă, bronz cu scule din Rp3, în condiții diferite de așchiere, s-a demonstrat o reducere cu 59-90% a efortului axial și a momentului de torsiune odată cu creșterea vitezei de așchiere [M5],[A1]. Analiza comparativă a lărgirii și alezării aplicând sau nu oscilații ultrasonice a pus în evidență o reducere a forței axiale de așchiere cu circa 28-65% și o micșorare de circa patru ori a momentului de torsiune [M4].

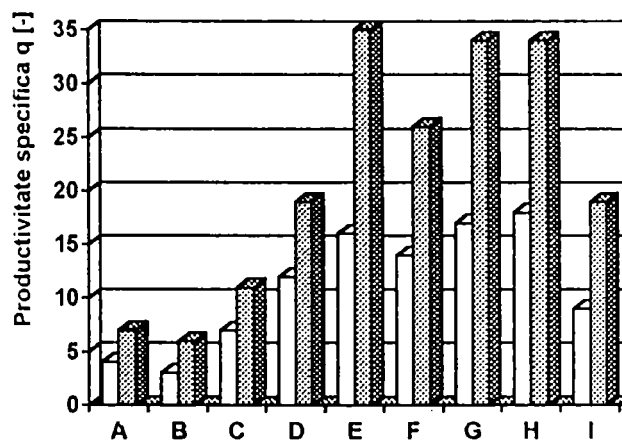
Rezultate similare au fost obținute și la frezare și broșare s-au înregistrat creșteri ale durabilității sculei de trei-patru ori, a productivității prelucrării cu 40-60% simultan cu reducerea forțelor de așchiere și a înălțimii microneregularităților suprafeței. Reducerea vibrațiilor sistemului tehnologic face posibilă prelucrarea cu precizie ridicată a canalelor și orificiilor de dimensiuni mici [A1],[M4].

În cazul utilizării energiei ultrasonice la rectificare sunt cunoscute trei variante:

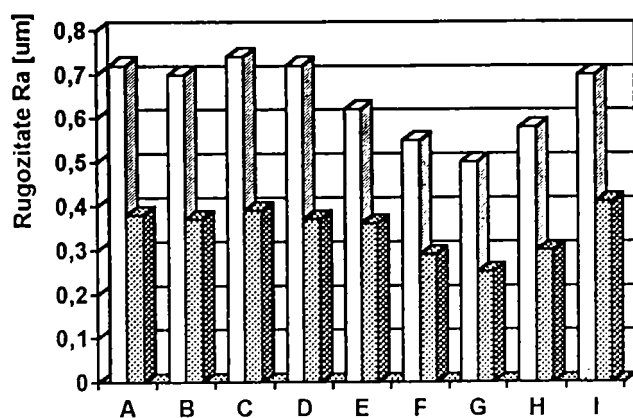
- generarea ultrasunetelor în sistemul sculă-semifabricat;
- activarea ultrasonică a lichidelor de răcire-ungere;
- corecția și, mai rar, prelucrarea profilelor discurilor abrazive asistată de ultrasunete.



-a-



-b-



-c-

### LEGENDĂ

- Fără ultrasunete
- ▨ Cu ultrasunete

A - 10 TiAlCrNi 320	F - 40 Cr 10
B - Rp 3	G - Rul 1
C - 28 TiMnCr 12	H - OLC 45
D - 45 WNiCr 180	I - Fc 15
E - OSC 10	

Fig. 2.30 Durabilitatea discului abraziv, productivitatea specifică și rugozitatea suprafeței la rectificarea diferitelor materiale

S-a constatat reducerea degajărilor de căldură și a forțelor din proces, o așchiere mai rapidă, productivitatea specifică crescând de două ori, îmbunătățirea calității suprafeței în medie cu o clasă, cu facilități mai ales la prelucrările interioare adânci, stabilitatea discului crește de 2-3.5 ori, reducerea tensiunilor remanente și creșterea

rezistenței la oboseală a pieselor rectificată [A1],[M7],[M6]. În fig.2.30 [M6] sunt arătate rezultatele studiului eficacității utilizării ultrasunetelor urmărind durabilitatea discului abraziv, productivitatea specifică (definită în [\*2] ca raport între cantitatea de abraziv uzat și cantitatea de material prelevat prin rectificare) și rugozitatea suprafeței la rectificarea exterioară a unei grupe largi de materiale.

Oscilațiile ultrasonice provoacă o uzură mai accentuată, de circa 1.5 ori, la discurile din electrocorund cu liant ceramic. Pentru mărirea stabilității la uzură este rațional să se folosească discuri mai dure ca de exemplu discuri de diamant cu liant metalic. Rezultate bune s-au obținut la rectificarea ultrasonică a oțelurilor de scule, a carburilor metalice și a aliajelor de titan. Intensificarea procesului de prelucrare se poate face și prin activarea ultrasonică a lichidelor de răcire-ungere aplicate pe suprafața activă a discului abraziv, când se constată creșterea de două ori a stabilității discului de rectificat și cu 17% a productivității procesului [M7].

## 2.6.2 Cercetări experimentale asupra PNFA activate ultrasonic

Aplicarea oscilațiilor ultrasonice are perspective deosebite și la procesele de prelucrare prin netezire fină abrazivă, atât la cele cu abraziv legat cât și la cele cu abraziv liber. Chiar dacă literatura de specialitate menționează că se obțin rezultate bune și la acest tip de prelucrări, cercetări experimentale concrete sunt mai puțin publicate.

S-a studiat procesul honuirii aliajelor de titan, honuire obișnuită, electrochimică și electrochimică cu suprapunere de oscilații ultrasonice din punct de vedere al productivității relucrării (fig.2.31) [M7]. Prin activare ultrasonică se înlătură depunerile și adeziunile de pe suprafața activă a barelor abrazive, deci se evită îmbâcsirea prematură a acestora, se exclude fenomenul de pasivare anodică, crește numărul de granule abrazive active de circa două ori. Se constată micșorarea forțelor de așchiere, a înălțimii microneregularităților și creșterea preciziei prelucrării. Regimurile recomandate sunt date în tabelul 2.6.

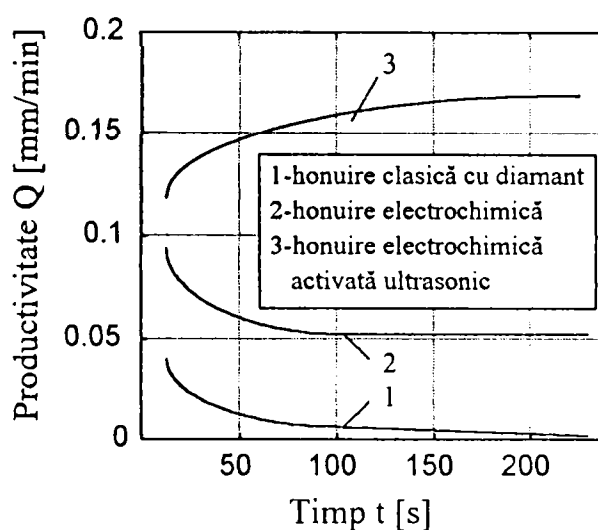


Fig.2.31 Dependența productivității de durata prelucrării la honuirea unor aliaje de titan

Tabelul 2.6 Regimuri de așchiere la honuirea ultrasonică

Tipul honuirii	Viteza		Amplitudinea oscilațiilor ultrasonice [μm]	Rugozitatea R <sub>v</sub> [μm]	
	periferică a honului [m/min]	mișcării rectilinii-alternative [cd./min]		Rugozitatea R <sub>v</sub> [μm]	
				inițială	finală
Preliminară	30	8	10	5.0	0.63
Finală	50	12	5	0.63	0.16 - 0.08

Aplicarea ultrasunetelor cu frecvențe de 18-20 kHz și amplitudini de 2-7  $\mu\text{m}$  la superfinisarea oțelurilor călite mărește productivitatea prelucrării de 1.5 -2 ori și permite obținerea unor rugozități  $R_a = 0.07 \div 0.02 \mu\text{m}$  la folosirea unor bare abrazive de duritate medie și granulație fină. În cazul rulmenților se mărește rezistența la contact și la oboseală, precum și durabilitatea lor cu 35% în raport cu superfinisarea obișnuită [M7].

Cercetările au arătat că oscilațiile ultrasonice pot să intensifice semnificativ procesele de lepuire și rodare, eliminând în mare parte fenomenele negative care apar și influențând satisfăcător condițiile de calitate impuse suprafeței piesei prelucrate. În literatură [M7] se prezintă date obținute în cazul prelucrării unor bucșe cementate din oțel înalt aliat cu crom, duritate HRC 62, cu pastă de lepuire pe bază de electrocorund alb. Cu creșterea amplitudinilor oscilațiilor ultrasonice uzura relativă a sculei de lepuire scade, uzura absolută rămâne aproape nemodificată, cantitatea de material prelavat crește. Aceeași sursă oferă un alt exemplu în care se aplică ultrasunete cu amplitudinea oscilațiilor axiale de 8  $\mu\text{m}$  la prelucrarea unei piese de alamă de formă conică. S-a redus forța axială cu 42%, rugozitatea  $R_a$  de la 0.8-0.9 la 0.5-0.55  $\mu\text{m}$  și a crescut intensitatea prelevării de material de până la două ori. Aplicarea ultrasunetelor cu amplitudini de 10-14  $\mu\text{m}$  la lepuirea bilelor de rulment cu diametrul de 2 mm a condus la creșterea productivității de 3-4 ori, iar a preciziei de prelucrare cu 60%.

Tot în [M7] se indică valorile medii ale uzurii sculelor de lepuire după prelucrarea a cinci piese, pentru diferite valori ale amplitudinii oscilațiilor (tabelul 2.7), prezentându-se și influența acestora asupra rugozității și a abaterii de la circularitate a alezajelor prelucrate. În tabelul 2.8 se redă influența interstițiului sculă-piesă și a amplitudinii

Tabelul 2.7 Rezultate experimentale la lepuire cilindrică interioară activată ultrasonic

Amplitudinea oscilațiilor ultrasonice [ $\mu\text{m}$ ]	Mărimea pe diametru a adâncimii ștratului de material îndepărtat [ $\mu\text{m}$ ]	Uzura absolută pe diametru a sculei [ $\mu\text{m}$ ]	Uzura relativă a sculei [-]	Rugozitatea $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]		Abaterea de la circularitate [ $\mu\text{m}$ ]	
				inițială	finală	inițială	finală
0	23	20	87	0.362	0.147	4.68	0.83
10	24	17	70.8	0.394	0.176	3.04	0.77
25	44.5	22	49.4	0.378	0.168	4.50	1.09

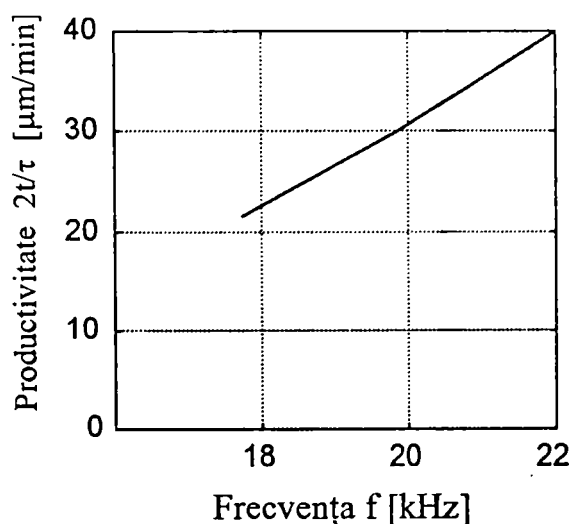
Tabelul 2.8 Influența interstițiului sculă-piesă asupra prelevării de material la lepuirea cilindrică interioară activată ultrasonic

Mărimea interstițiului [ $\mu\text{m}$ ]	Intensitatea prelevării [ $\mu\text{m} / \text{min}$ ] pentru amplitudinea oscilațiilor ultrasonice [ $\mu\text{m}$ ]		
	0	10	25
9-11	1.06	-	5.0
17-18	0.90	3.2	4.4
26-28	0.65	1.83	3.8
33-44	0.16	0.50	1.9
47-50	-	0.37	0.33

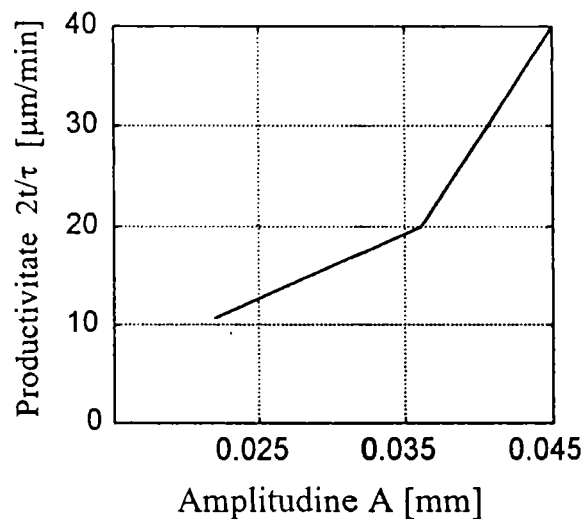


oscilațiilor ultrasonice asupra prelevării de material la leuire. Se deduce că prezența ultrasunetelor intensifică prelevarea de material proporțional cu amplitudinea acestora. La creșterea interstițiului sculă de leuire-piesă prelevarea scade, rămânând totuși de câteva ori mai mare decât la leuirea clasică, ceea ce permite utilizarea unei scule la mai multe piese decât în condiții obișnuite. La interstiții de ordinul 4-5 ori diametrul granulelor abrazive, procesul de leuire se blochează, în timp ce la leuirea ultrasonică el continuă încă mult timp cu intensitate mare, deci este influențată pozitiv și stabilitatea sculei de leuit. S-a determinat creșterea productivității de 3-4 ori la leuirea alezajelor cilindrice și de 1.5-3.5 ori în cazul prelucrării filierelor.

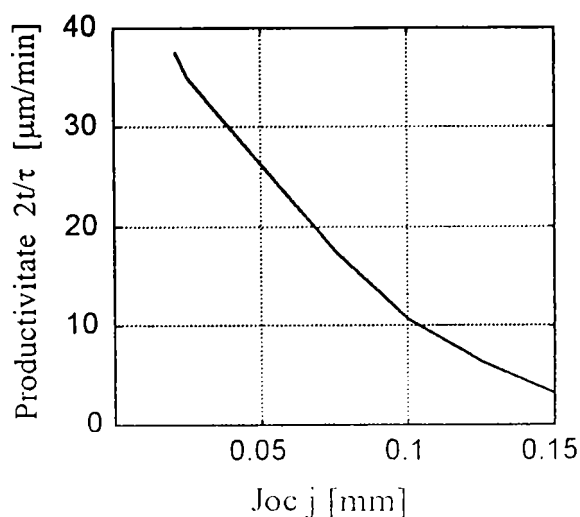
Preocupări privind leuirea ultrasonică a alezajelor bușelor întâlnim și la noi, în [D4] fiind recomandată ca un mijoc eficient de ridicare a productivității prelucrării. Experiențele au fost efectuate pe o piesă cu alezajul  $\phi 10 \times 50 \text{ mm}$ , confecționată din oțel 18MoCN13, cu suprafața interioară cementată și călită cu duritatea 58-63 HRC, interstițiul inițial dintre sculă și piesă fiind de 0.03-0.06 mm. Sculei de leuit i s-au aplicat oscilații ultrasonice în direcție axială cu frecvența de 18-22 kHz. Piesa execută o mișcare rectilinie alternativă de 60 c.d./min de-a lungul dornului pe o lungime de 10 mm.



a)



b)



c)

Fig.2.32 Variația productivității la leuire cilindrică interioară cu activare ultrasonică

în funcție de:

- a) frecvență
- b) amplitudine
- c) joc

Productivitatea prelucrării s-a exprimat prin mărimea pe diametru a adâncimii stratului de material  $2t$  exprimată în  $\mu\text{m}$  pe unitatea de timp determinată în funcție de frecvență, amplitudine și mărimea interstițiului dintre sculă și piesă (fig.2.32 [D4]).



S-a studiat aplicarea lepuirii vibratorii, deci cu frecvențe în domeniul 50-100 Hz, la prelucrarea suprafețelor plane, din punct de vedere al cantității de material prelevat și al rugozității suprafeței (Fig.2.33) [K7]. Se arată influența duratei prelucrării la lepuirea obișnuită și la cea vibratorie în condițiile din tabelul 2.9. La reprezentarea în coordonate

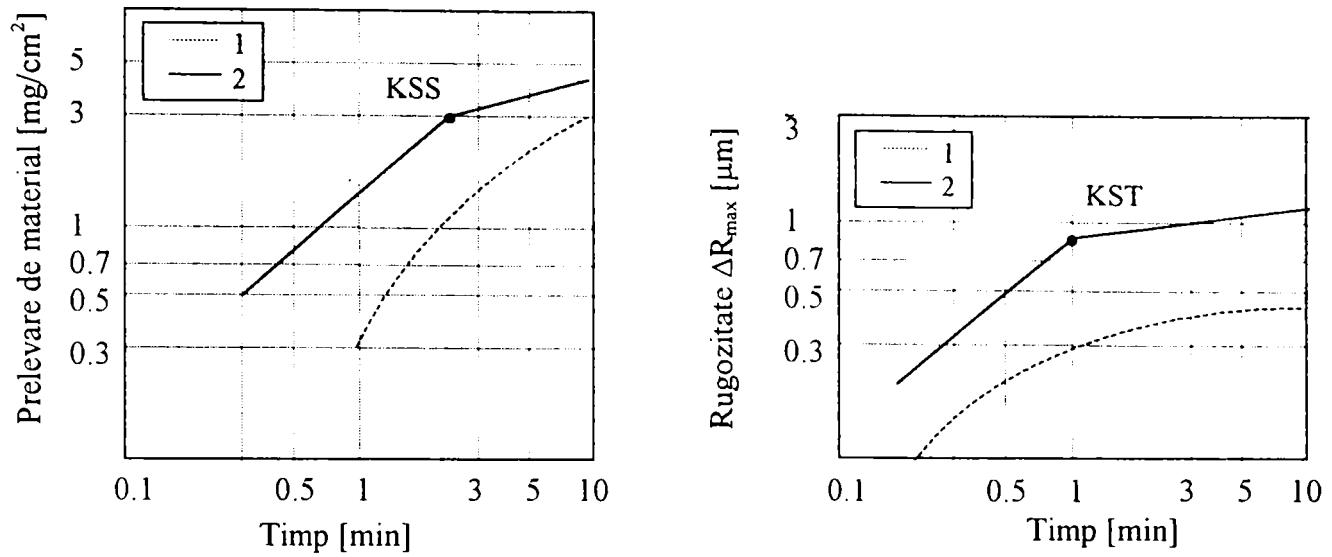


Fig.2.33 Efectele lepuirii clasice (1) și vibratorii (2)

Tabelul 2.9 Condiții experimentale la lepuire vibratorie

Disc de lepuire	
material	Fc 200
viteză	1.6 m/min
frecvența osilațiilor	100 Hz
amplitudine	0.5 mm
Piesa de prelucrat	
material	OLC 45
Regim de prelucrare	
granulație abraziv	M28
concentrație	50% masic
lichid de lepuire	ulei
mod de alimentare	o singură dată
presiune de apăsare	0.15 MPa

dublu logaritmice s-a observat existența unor puncte de inflexiune notate de autor KSS, respectiv KST, când fenomenul de distrugere a granulelor abrazive practic se oprește, diametrele lor se egalizează, forma granulelor este aproape sferică. Se demonstrează că prin modificarea regimului de prelucrare în aceste puncte se activează fragmentarea particulelor și se poate păstra mai departe caracterul liniar al dependențelor. Procedul denumit lepuire cu control după puncte critice

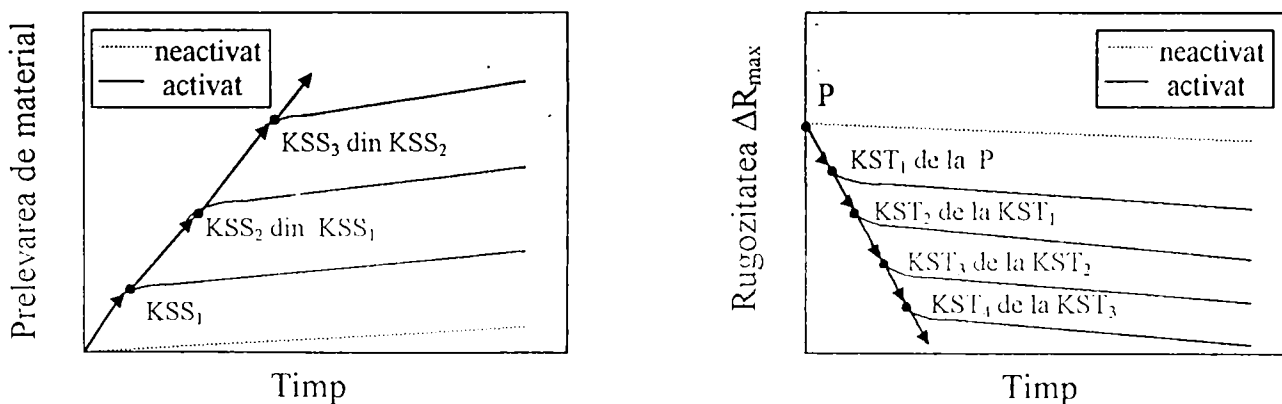


Fig.2.34 Controlul punctelor critice KSS și KST la lepuire vibratorie

presupune organizarea prelucrării astfel încât în punctele de inflexiune să se permită modificarea regimurilor adică mărirea presiunii de apăsare, a frecvenței sau a amplitudinii oscilațiilor (fig.2.34). Aplicarea unui astfel de procedeu cu modificarea multiplă a regimurilor de prelucrare conduce la utilizarea completă a cantității inițiale de material abraziv, economisindu-se în acest fel și material și energie.

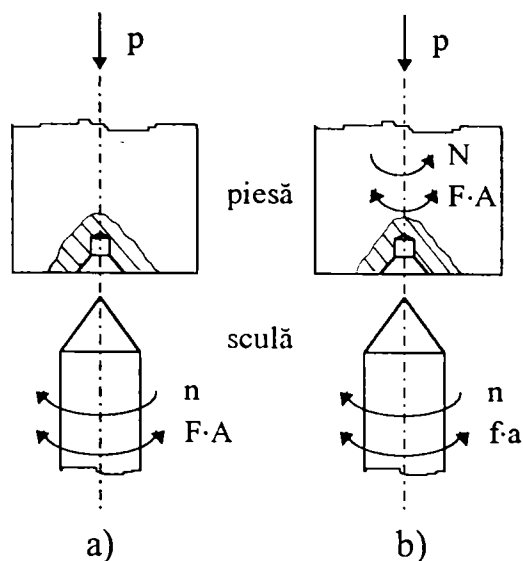


Fig.2.35 Schema de principiu pentru a)lepuirea vibratorie și b)lepuirea ultrasonică și vibratorie a găurilor de centrare

O altă aplicație deosebită o constituie lepuirea ultrasonică combinată cu lepuirea vibratorie a găurilor de centrare [K8]. Fig.2.35 prezintă schemele lepuirii vibratorii, respectiv lepuire ultrasonică și vibratorie în condițiile experimentale din tabelul 2.10 la prelucrarea găurilor de centrare pe strung. În fig.2.36 se compară rezultatele obținute la lepuirea clasică și cea în care sculei de lepuire i se imprimă o mișcare vibratorie. În celălalt caz (fig.2.37) se combină oscilarea ultrasonică a sculei de lepuire cu mișcarea vibratorie a piesei de prelucrat. Mișcarea vibratorie a sculei sau a piesei este dată de un motor electric pas cu pas. Cercetările s-au efectuat pe semifabricate din

oțel carbon de calitate și oțel de scule. Se observă că aplicarea ultrasunetelor conduce la obținerea unor găuri de centrare cu precizii de formă mai ridicate și rugozități mai fine chiar decât la lepuirea vibratorie. Strunjirea cilindrică exterioară a piesei tip bucă  $\phi 13 \times 40$  mm montată pe arborele cu găurile de centrare lepuite s-a executat pe aceeași

Tabelul 2.10 Condiții experimentale la prelucrarea găurilor de centrare prin lepuire vibratorie și lepuire combinată ultrasonică și vibratorie

Condiții experimentale	Lepuire vibratorie	Lepuire ultrasonică și vibratorie
<i>Scula de lepuire</i>		
material	Fc 200	Fc 200
turație	n = 21 rot/min	n = 60 rot/min
frecvența oscilațiilor	F = 100Hz	f = 30.2 kHz
amplitudine (putere de activare ultrasonică)	A = 0.045 mm	a = 3μm (P <sub>us</sub> = 85W)
<i>Piesa de prelucrat</i>		
material	OSC 10	OLC 45, OSC 10 călit (HRC 57)
turație	-	N = 21 rot/min
frecvență	-	F = 100 Hz
<i>Regim de prelucrare</i>		
granulație abraziv	Nr.4, M28, M7, M1	Nr.4, M7
concentrație	70% masic	70% masic
lichid de lepuire	ulei ușor	ulei ușor
mod de alimentare	intermitentă la intervale de 5s	continuu
presiune de apăsare	p = 0.2 MPa	p = 0.2 MPa

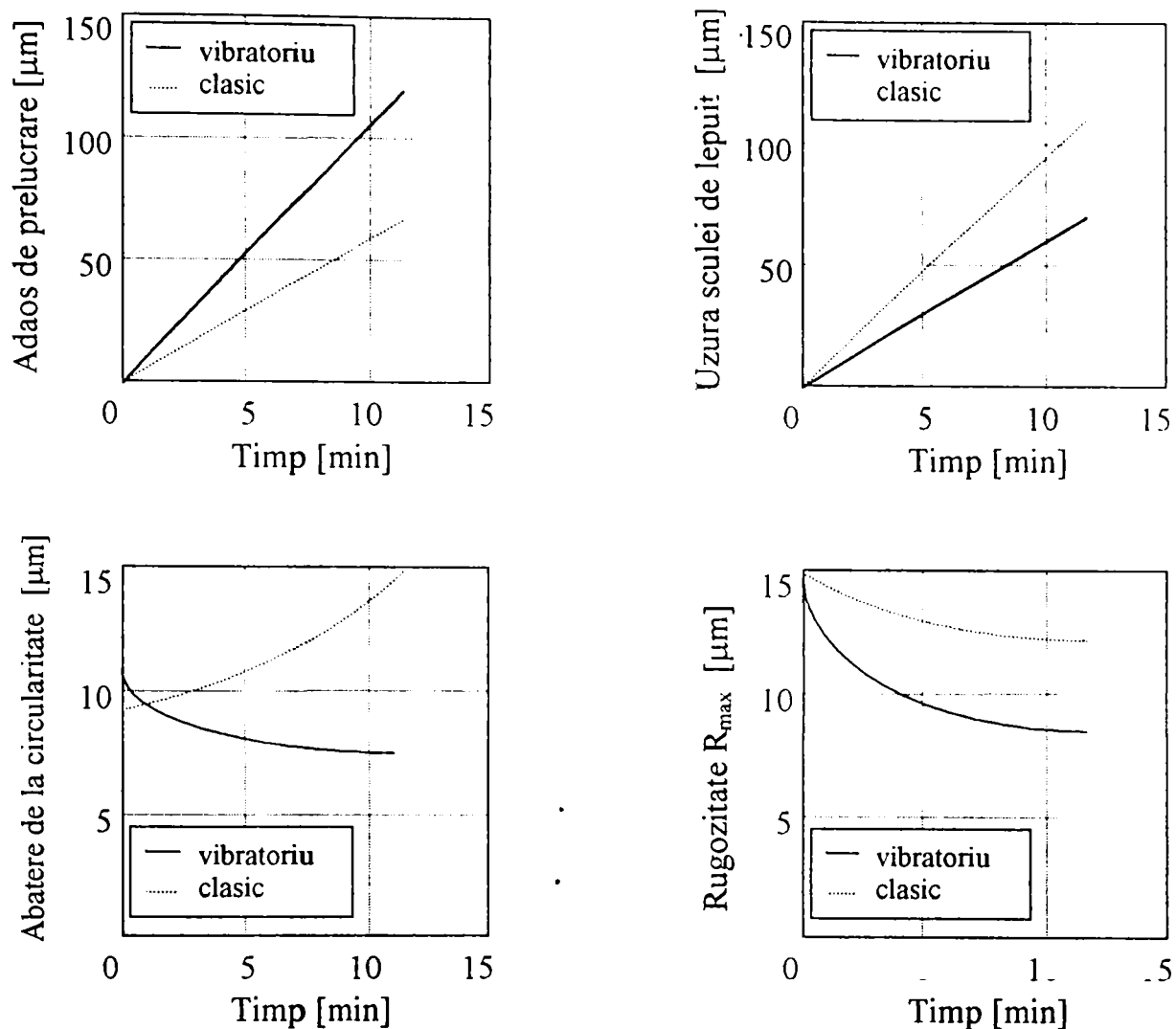


Fig.2.36 Efectele lepuirii vibratorii a găurilor de centrare

mașină-unealtă, tot cu activare ultrasonică. Această metodă face posibilă strunjirea foarte precisă a arborilor, cu abateri de la circularitate aproape nule.

Rodarea ultrasonică a fost utilizată în cazul suprafețelor conice ale robinetelor de gaz [9], miezul efectuând mișcarea de rotație și de avans față de corpul robinetului, presiunea de apăsare a fost variabilă, vectorul forței îndepărtându-se de axa de rotație a miezului cu unghiuri de  $5^{\circ}$ ... $14^{\circ}$  deplasându-se pe suprafața conică.

Sintetizând informațiile bibliografice disponibile se poate concluziona că activarea ultrasonică a PNFA în general, de lepuire în particular, determină o serie de aspecte pozitive:

- ◆ mărirea durabilității sculelor de 2...4.5 ori;
- ◆ obținerea unei calități mai bune a suprafeței piesei prelucrate, corectarea abaterilor de formă într-un timp mai scurt;
- ◆ alimentarea mai bună cu material abraziv, îmbunătățirea condițiilor de acces ale lichidului de lucru în zona activă a prelucrării;
- ◆ reducerea consumului de abraziv prin scăderea dimensiunii granulelor abrazive și creșterea numărului de granule active;
- ◆ posibilitatea prelucrării găurilor adânci, eliminându-se fenomenele de prindere prin gripare și de erodare a suprafeței.

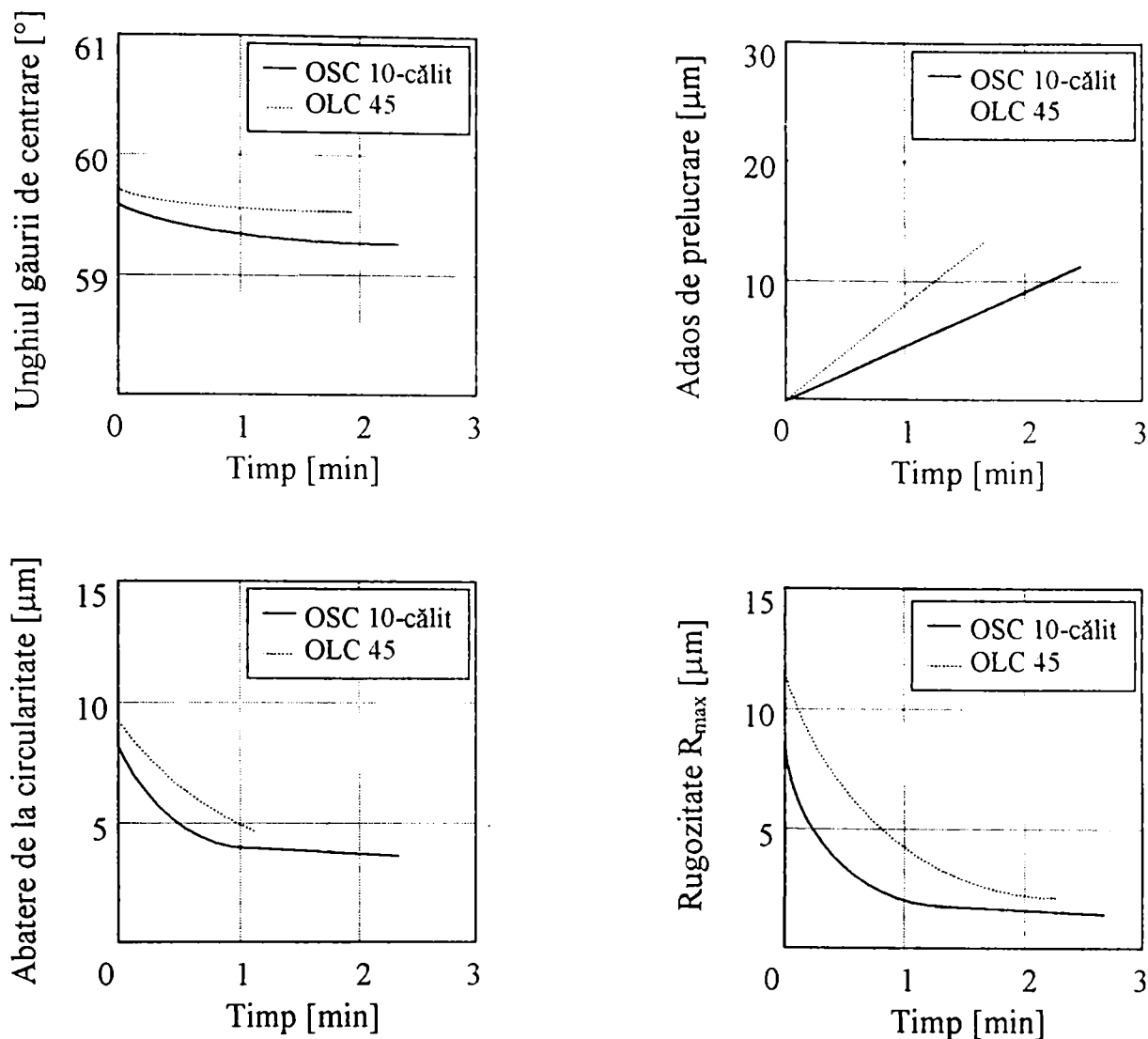


Fig.2.37 Efectele lepurii combinate: ultrasonică și vibratorie a găurilor de centrare

La PNFA activate ultrasonic trebuie precizate și principalele limitări:

- ◇ se pot aplica la piese de dimensiuni relativ mici, gabaritul sculei de lepuit sau a piesei de prelucrat fiind limitat de fixarea în concentratorul sistemului ultrasonic;
- ◇ nu pot fi prelucrate alezaje de profil complex, respectiv suprafețe profilate a căror profil nu se poate genera cinematic.

Deoarece PNFA asistate de ultrasunete sunt puțin studiate comparativ cu alte procedee de prelucrare, aplicațiile concrete fiind cazuri particulare dispartate, se impune evaluarea globală a performanțelor procedeeului, a limitelor de aplicare precum și perspectivele de aplicare industrială. Rămân deschise probleme legate în special de modul de introducere a oscilațiilor ultrasonice în focarul de prelucrare, de proiectarea și construcția sculelor și dispozitivării necesare, de perfecționarea și optimizarea procedeeelor și proceselor de netezire fină activate ultrasonic.

## 2.7 Concluzii

Analiza critică și creativă a materialului bibliografic disponibil, sintetizată în partea I a tezei, are ca obiectiv asigurarea unei baze informaționale pertinente și la zi, cu scopul conturării principalelor direcții de cercetare ale tezei de doctorat. Aria cercetărilor a fost restrânsă la procesele de lepuire plană activată ultrasonic. Cu toate că cercetările teoretice și experimentale nu lipsesc, dar nici nu abundă, în țara noastră procedeul este relativ puțin cunoscut și mai ales foarte puțin aplicat. Fără a se neglija contribuțiile aduse de diverși cercetători, se apreciază că există în continuare suficiente direcții de studiu în care se pot aduce îmbunătățiri. Aceasta se impune pornind de la următoarele considerente:

- ⇒ aplicațiile dezvoltate până în prezent sunt abordări limitate fie de interesul specific al autorilor, fie de limitele funcționale ale echipamentului utilizat, mai ales referitor la adaptarea optimă la proces a sistemului ultrasonic;
- ⇒ nu s-au determinat dependențele parametrilor de calitate ai suprafețelor lepuite ultrasonic de toți factorii de influență, studiindu-se de regulă influența exercitată de un singur factor de influență;
- ⇒ nu s-au realizat comparații între modelele matematice ale diferitelor funcții obiectiv stabilite analitic cu cele determinate pe cale experimentală;
- ⇒ nu există modele matematice care să explicitizeze funcțiile obiectiv în raport cu factorii de influență ai procesului și care să poată fi utilizate eventual în practica industrială ;
- ⇒ nu sunt efectuate studii asupra importanței fiecărui factor de influență, din punctul de vedere al funcțiilor obiectiv analizate;
- ⇒ rezolvarea problemelor legate de calculul analitic al parametrilor procesului.

În acest context s-a formulat obiectivul major al tezei de doctorat, constând în *studiul teoretic și experimental al procesului de lepuire plană activată ultrasonic*, vizând în principal optimizarea după criterii de calitate și productivitate a procesului. Principalele dificultăți în abordarea problematicii enunțate sunt determinate de:

- complexitatea fenomenelor din spațiul de lucru ce conduce la dificultăți majore în modelarea analitică globală a mecanismelor de interacțiune abraziv-material de prelucrat și în deducerea unor modele empirice cu valabilitate generalizată;
- dificultatea practică de adaptare a echipamentului de activare ultrasonică disponibil la unități de bază experimentală deja existente, ceea ce restrânge sfera studiilor experimentale asupra unor aplicații diverse.



### **CAPITOLUL 3**

#### **MODELAREA ANALITICĂ A PROCESULUI DE LEPUIRE ACTIVATĂ ULTRASONIC**

##### **3.1 Funcții obiectiv și factori de influență la activarea ultrasonică a lepuirii**

Procesul de activare ultrasonică a lepuirii reprezintă un caz particular al utilizării undelor ultrasonice în procesele clasice de așchiere. Multitudinea factorilor de influență la lepuire, evidențiată în paragraful 1.4, cumulate cu mărimile caracteristice câmpului ultrasonic conduc la apariția în spațiul de lucru a unor fenomene complexe și interconectate unde este dificilă modelarea analitică, dar la care se pretează modelarea experimentală. Într-o primă etapă se impune identificarea funcțiilor obiectiv și a factorilor de influență.

Mecanismele de interacțiune între factorii de influență ai procesului determină anumite **funcții obiectiv** care caracterizează procedeul de activare ultrasonică a lepuirii.

*Funcțiile obiectiv* pot fi următoarele:

⇒ **rugozitatea finală** a suprafeței prelucrate, care poate fi definită de următorii indicatori de rugozitate, conform STAS 5730/1- 85:

- **înălțimea maximă a profilului  $R_y$  [ $\mu\text{m}$ ]**
- **adâncimea de nivelare  $R_p$  [ $\mu\text{m}$ ]**
- **înălțimea neregularităților profilului în zece puncte  $R_z$  [ $\mu\text{m}$ ]**
- **abaterea medie aritmetică a profilului  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ]**
- **abaterea medie geometrică a profilului  $R_q$  [ $\mu\text{m}$ ]**
- **pasul mediu al microneregularităților profilului  $S_m$  [mm]**
- **densitatea proeminențelor profilului  $D$  [ $\text{mm}^{-1}$ ]**
- **procentajul lungimii portante  $t_p$  [%]**

Pe baza parametrilor de profil se pot defini, conform STAS 5730/1-75:

- **gradul de umplere a profilului  $k_{PR}$  [-] ca fiind raportul:**

$$k_{PR} = \frac{R_p}{R_z} \quad (3.1)$$

- **gradul de vălurire a profilului  $k_R$  [mm/ $\mu\text{m}$ ] dat de raportul:**

$$k_R = \frac{S_m}{R_z} \quad (3.2)$$

Alți indicatori de rugozitate nestandardizați pot fi:

- **coeficientul de asimetrie al profilului în raport cu linia medie  $k_{as}$  [-]**
- **coeficientul de exces al distribuției  $k_{ex}$  [-] considerat de regulă în raport cu distribuția gaussiană**



- numărul de intersecții cu linia medie a profilului  $n$  [ $\text{mm}^{-1}$ ]
- raza medie de rotunjire a vârfului proeminențelor  $r$  [ $\mu\text{m}$ ] calculată cu relația [R1]:

$$r = \frac{1}{2\pi^2 \cdot R_a \cdot n \cdot D} \quad (3.3)$$

- unghiul mediu de înclinare a profilului față de linia medie  $\theta$  [ $^\circ$ ] dat de relația [R1]:

$$\theta = \arctg(4 \cdot R_a \cdot n) \quad (3.4)$$

Utilizând teoria funcțiilor aleatoare se pot analiza funcțiile profilului de rugozitate [Z2],[N6],[P2],[I4].

- densitatea de repartiție a distribuției  $p(y)$
- funcția de autocorelație  $r(t)$
- funcția densitate de putere spectrală  $D(k)$ .

În fig.3.1 se reproduc profilogramele pentru suprafața unei piese strunjite și ulterior lepuite ultrasonic și abaterile medii aritmetice ale profilului în stare inițială  $R_{ai}$  și finală

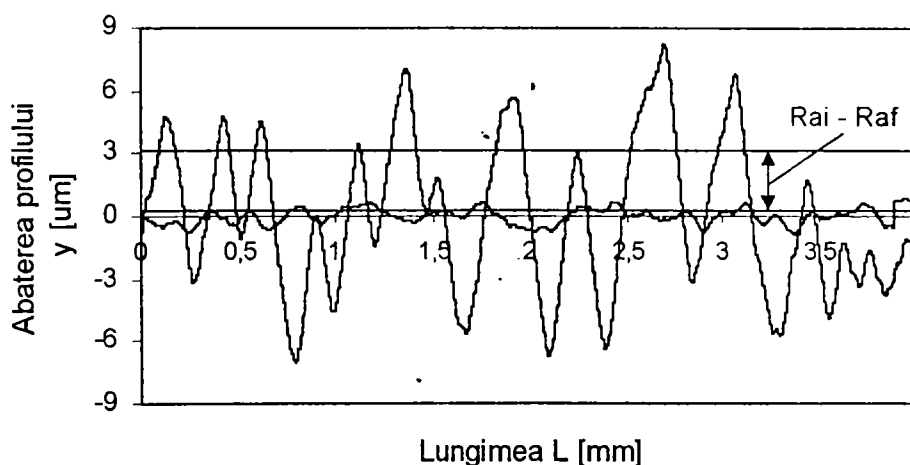


Fig.3.1 Profilograme reprezentând suprafața inițială și finală a unei piese lepuite ultrasonic

$R_{af}$ . Se poate observa ușor că diferența  $R_{ai} - R_{af}$  reflectă cantitativ eficiența procedurii de prelucrare. Se poate astfel defini:

⇒ **productivitatea prelucrării  $Q$  [ $\mu\text{m}/\text{min}$ ]** dată de intensitatea prelevării de material în unitatea de timp, exprimată prin cantitatea liniară de material prelevat în unitatea de timp, în condiții date (suprafață de interacțiune de arie  $S$ ):

$$Q = \frac{R_{ai} - R_{af}}{t} \quad (3.5)$$

unde  $t$  este timpul total de prelucrare.

⇒ **productivitatea specifică  $Q_s$  [%]** ce reprezintă scăderea procentuală a rugozității:

$$Q_s = \frac{R_{ai} - R_{af}}{R_{ai}} \times 100 \quad (3.6)$$

Mai pot fi analizate:

⇒ **uzura granulelor abrazive**  $U_{abr}$  [-] dată ca factor de formă;

⇒ **uzura liniară a discului de lepuit**  $U_r$  [ $\mu\text{m}$ ].

În cercetările experimentale nu este necesar să se folosească toate aceste mărimi deoarece între unele din ele există relații de interdependență, urmând a fi selectate preferențial acelea care se pot măsura mai ușor.

**Factorii de influență** în procesul de activare ultrasonică a lepuirii pot fi grupați în:

- **Factori de influență acustici**, aceiași pentru toate aplicațiile active ale ultrasunetelor, care se referă la [L2]:
  - ⇒ **puterea**  $P_{us}$  [W] ca fiind energia transportată în unitatea de timp, aleasă ca măsură a variației intensității unde prin aceeași suprafață de referință;
  - ⇒ **amplitudinea** oscilațiilor ultrasonice  $A$  [ $\mu\text{m}$ ];
  - ⇒ **frecvența** oscilațiilor ultrasonice  $f$  [kHz];
- **Factori de influență tehnologici**, care se stabilesc ținând seama de procedeul de prelucrare prin lepuire și se referă la [K6]:
  - ⇒ **mediul abraziv (pastă abrazivă)**:
    - natura abrazivului;
    - granulația abrazivului;
    - natura lichidului purtător;
    - concentrația abraziv/lichid purtător;
    - mod de alimentare;
  - ⇒ **piesa de prelucrat**:
    - natura materialului piesei;
    - duritatea HRC a materialului piesei de prelucrat (netratată sau tratată termic);
    - rugozitatea inițială  $R_{ai}$  [ $\mu\text{m}$ ] a suprafeței piesei de prelucrat;
  - ⇒ **discul de lepuit**:
    - natura materialului;
    - rugozitatea inițială  $R_{ai}$  [ $\mu\text{m}$ ] a suprafeței active;
  - ⇒ **parametrii cinematici**:
    - pentru mișcarea circulară – viteza mișcării circulare  $v$  [m/min] dată de turația  $n$  [rot/min], la un anumit diametru al discului de lepuit sau al piesei;
    - pentru mișcări rectilinii alternative – viteza mișcărilor rectilinii alternative dată de amplitudinea [mm] și numărul de curse duble  $n_{c-d}$  [c.d./min];
  - ⇒ **parametrii de lucru**:
    - presiunea statică de contact  $p_{sc}$  [MPa];
    - timpul de prelucrare  $t$  [s].

Comparând valorile funcțiilor obiectiv la prelucrările în câmp ultrasonic cu cele rezultate la prelucrările convenționale se pot analiza caracteristicile principale ale fiecărui procedeu și oportunitatea alegerii variantei potrivite cazului concret de prelucrare.

În vederea realizării cercetării experimentale și ținând cont de informațiile preliminare corelate cu posibilitățile concrete oferite de standul experimental realizat se selectează *funcțiile obiectiv*, *factorii de influență*, și *parametrii* procesului de lepuire ultrasonică ce vor fi analizați. Procesul de lepuire fiind realizat cu scopul obținerii unui grad ridicat de finisare a suprafeței prelucrate se stabilește ca funcție obiectiv prioritară *rugozitatea finală* a suprafeței prelucrate urmată de *productivitatea* prelucrării. La proiectarea programului de cercetare experimentală, datorită multitudinii factorilor de influență, în funcție de posibilitățile de reglare ale acestora se stabilește numărul și valorile nivelelor de reglare, o parte din factori rămânând pe un nivel constant, ca parametri ai procesului.

### 3.2 Modelarea analitică a procesului de lepuire activată ultrasonic

#### 3.2.1 Model analitic general de stabilire a volumului de material prelevat la lepuire plană activată ultrasonic

Se consideră cazul unei lepuiri plane cu oscilații ultrasonice longitudinale aplicate după o direcție paralelă cu axa de simetrie a piesei (fig.3.2). Modelarea analitică pentru lepuirea activată ultrasonic se face pe baza unor modele analitice ale procesului de prelucrare dimensională cu ultrasunete [L1],[K1]. Față de aceasta la lepuire apar următoarele deosebiri:

- deoarece procedeul nu presupune prelucrarea unor cavități de o anumită adâncime, ci netezirea fină abrazivă a unei suprafețe plane, nu există un avans intermitent, forța statică nu este necesară pentru avans, ci numai pentru realizarea presiunii de contact între iese și sculă (disc de lepuir);
- deplasarea granulelor în spațiul de lucru se face după traiectorii diferite, cu o viteză relativă dată de compunerea mișcărilor de translație ale piesei și de rotație a discului de lepuir;
- materialul discului de lepuir are proprietăți fizico-mecanice diferite de cele ale obiectului de transfer (scula) de la prelucrarea cu ultrasunete;
- datorită vâscozității mari a pastelor abrazive, efectul cavitațional este practic inexistent.

Se urmărește determinarea volumului de material prelevat pornind de la o granulă

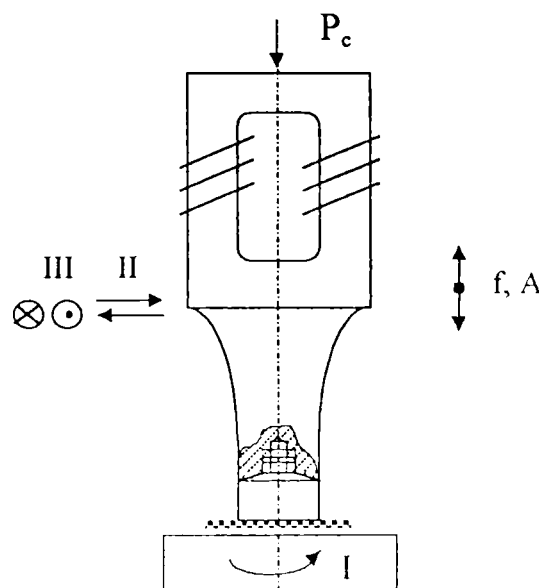


Fig.3.2 Schema de principiu a lepuirii plane cu activare ultrasonică a piesei

abrazivă și apoi, în funcție de numărul total de particule active, volumul total de material prelevat, productivitatea prelucrării și rugozitatea finală.

Se fac următoarele ipoteze simplificatoare [P7],[L1],[V1]:

- granulele abrazive sunt incompresibile;
- prelevarea de material are loc datorită ciocnirii granulelor abrazive activate ultrasonic cu suprafața prelucrată.

### *Cazul static*

Datorită caracterului aleatoriu al traiectoriilor granulelor abrazive, se analizează un model static al prelucrării, ținând cont numai de oscilațiile ultrasonice ale piesei. Modelarea analitică se realizează considerând că procesul de prelucrare are trei etape:

- ◆ *Etapa I* - în etapa inițială se consideră că granulele abrazive noi au o formă cubică și există o anumită distribuție statistică a dimensiunii acestora;
- ◆ *Etapa II* - pe parcursul prelucrării are loc uzarea muchiilor active ale granulelor abrazive, rotunjirea pronunțată a acestora, granulele se presupun a fi de formă sferică, apare faza deformării plastice locale;
- ◆ *Etapa III* - în ultima etapă are loc netezirea creștelor rezultate în etapa anterioară și umplerea microcavităților prelevate în piesa de prelucrat.

### *Cazul dinamic*

În acest caz se ține cont de viteza efectivă medie a granulelor abrazive în funcție de deplasarea relativă dintre piesă și discul de lepuit.

### *Cazul static*

*Etapa I.* La eroziunea ultrasonică se consideră că granulele abrazive ce tind spre forma cubică sunt cele mai avantajoase din punct de vedere al capacității productive. Prin turbioanele create în lichidul purtător, o mare parte din granule sunt deplasate cu muchiile așchietoare în poziții favorabile prelevării de material. Pentru ca muchiile granulelor abrazive să poată așchia se pornește de la premiza că granulele abrazive de formă cubică sunt toate orientate cu diagonala cubului în direcția de oscilație a piesei.

În fig.3.3 se arată mecanismul prelevării de material la lepuire activată ultrasonic în analogie cu mecanismul prelevării materialului la prelucrarea dimensională cu ultrasunete prezentat în [L1], unde s-a presupus că granulele abrazive au formă sferică. Mișcarea piesei este sinusoidală cu amplitudinea  $A$ :

$$z = A \sin \theta \quad (3.7)$$

Pentru o perioadă de oscilație, faza activă de prelucrare este corespunzătoare deplasării (coborârii) piesei de la poziția medie până la amplitudinea  $+A$ . În poziția I piesa atinge cea mai mare granulă existentă și începe apăsarea acesteia între piesă și discul de lepuit, cu o presiune de contact  $p_c$ . La sfârșitul fazei active piesa se află în poziția E, la o distanță  $z_0$  de suprafața discului.

Adâncimea totală de penetrare a unei granule abrazive cu diagonala cubului  $d$  este:

$$h_p + h_s = d - z_0 \quad (3.8)$$

unde:  $h_p$  - adâncimea de pătrundere în piesă,  $h_s$  - adâncimea de pătrundere în disc.

Adâncimea totală de pătrundere este:

$$h_p + h_s = A - z_1 \quad (3.9)$$

unde:  $z_1$  - distanța pe care piesa se deplasează de la poziția medie până în poziția I.

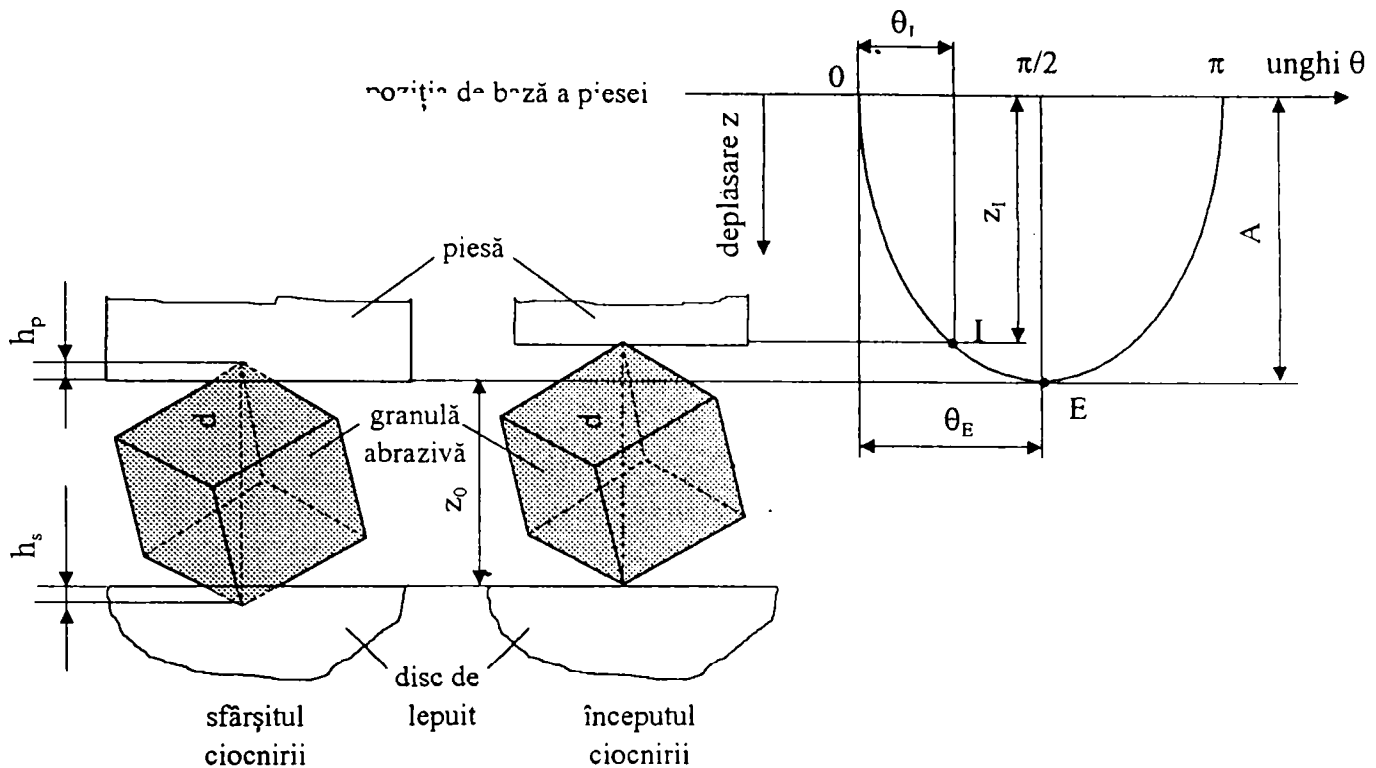


Fig.3.3 Mecanismul prelevării de material la lepuirea activată ultrasonic

Mărimile  $h_p$  și  $h_s$  sunt determinate pe baza principiului de stabilire a tălburii unui material prin măsurarea pătrunderii penetratorului durimetrului în acel material. Volumul de material dizlocat de o granulă abrazivă  $V_1$  este volumul unei piramide trigonale (fig.3.4)

$$V_1 = \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot a^2 \cdot h_p \quad (3.10)$$

unde:  $a$  - latura bazei piramidei,  
 $a \cong 2 \cdot h_p \quad (3.11)$

$$V_1 = \frac{\sqrt{3}}{3} h_p^3 \quad (3.12)$$

Duritatea materialului piesei, pentru un unghi la vârf al penetratorului de  $90^\circ$ , este dată de relația:

$$H_p = \frac{F}{A_1} \cong 0.3 \frac{F}{h_p^2} \quad (3.13)$$

unde:  $A_1$  - aria laterală a amprentei după indentare;  $F$  - forța de apăsare statică la contactul piesei cu granula abrazivă.

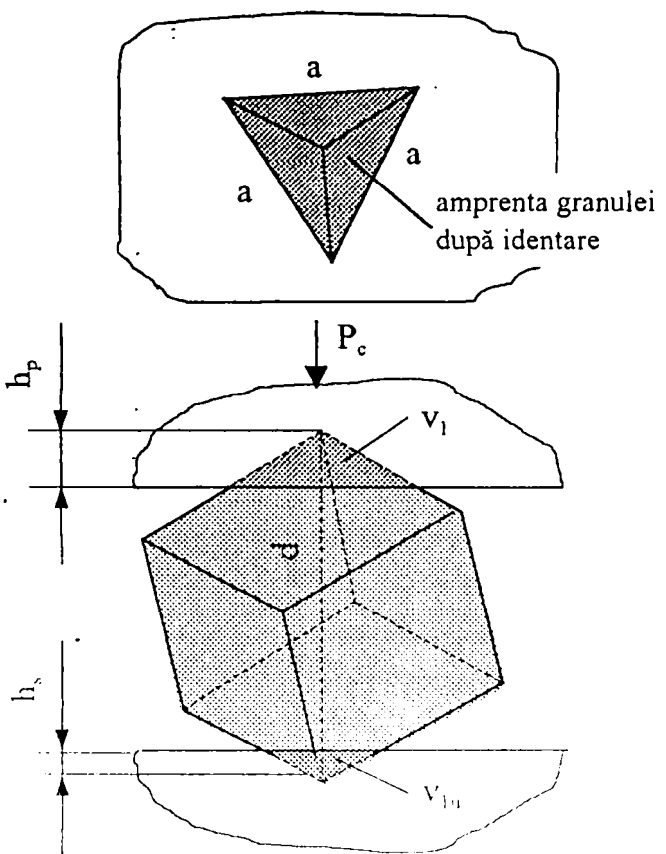


Fig.3.4 Volumul de material dizlocat de o granulă abrazivă cubică

La aceeași forță de apăsare se determină duritatea discului de lepuit:

$$H_s \cong 0.3 \frac{F}{h_s^2} \quad (3.14)$$

Din relațiile (3.13) și (3.14) se obține:

$$\frac{h_p}{h_s} = \sqrt{\frac{H_s}{H_p}} = \sqrt{q} \quad (3.15)$$

q fiind raportul durităților piesei și discului.

În continuare din relațiile (3.8) și (3.15) se deduce:

$$h_p = \frac{\sqrt{q}}{1 + \sqrt{q}} (d - z_0) \quad (3.16)$$

$$h_s = \frac{1}{1 + \sqrt{q}} (d - z_0) \quad (3.17)$$

Volumul de material prelevat de o granulă abrazivă devine:

$$V_1 = \frac{\sqrt{3}}{3} \left( \frac{\sqrt{q}}{1 + \sqrt{q}} \right)^3 \cdot (d - z_0)^3 = k \cdot (d - z_0)^3 \quad (3.18)$$

În același mod se determină volumul uzurii locale a discului de lepuit:

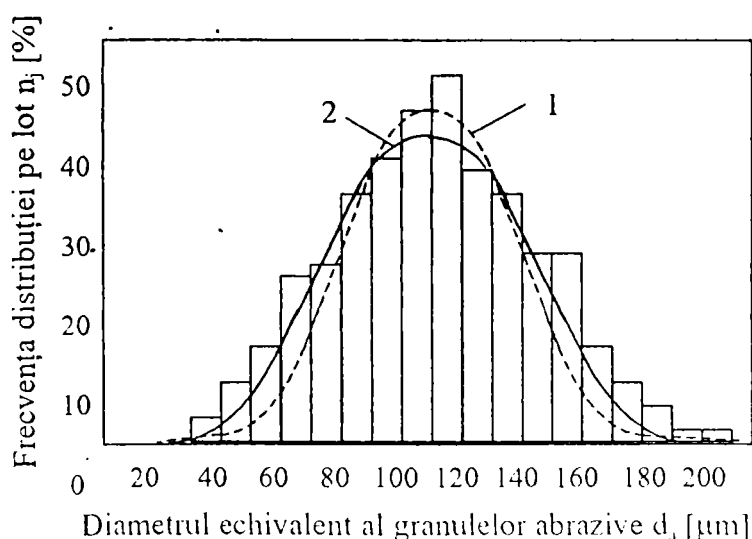
$$V_{U1} = \frac{\sqrt{3}}{3(1 + \sqrt{q})^3} (d - z_0)^3 = k_U (d - z_0)^3 \quad (3.19)$$

Pentru modelul analizat se consideră că între piesă și disc există un număr mediu de granule abrazive N iar distribuția statistică a acestora, după dimensiunea caracteristică d, este dată de legea F(d) [K1], apropiată de o distribuție gaussiană (fig.3.5 [K1]).

$$F(d) = 1.095 \frac{N}{d} \left[ 1 - \left( \frac{d}{d} - 1 \right)^2 \right]^3 \quad (3.20)$$

unde:  $\bar{d}$  - valoarea medie a dimensiunii caracteristice a granulelor abrazive (în cazul dat este diagonala cubului) din spațiul de lucru.

Prelevarea de material în unitatea de timp este dată de produsul volumelor de material îndepărtate de granulele abrazive în fază activă de prelucrare, pe diagonala d cuprinsă între  $z_0$  și diagonala maximă  $d_{max}$ , numărul de granule de dimensiune dată din spațiul de lucru și frecvența f a oscilațiilor ultrasonice aplicate [L1],[P7]:



1 - curba distribuției normale; 2 - curba dependenței F(d).

Fig.3.5 Distribuția după dimensiune a abrazivului de granulație Nr.10



$$V_{1tot} = V_1 \cdot F(d) \cdot f \quad (3.21)$$

$$V_{1tot} = \frac{1.095 \cdot k \cdot f}{\bar{d}} \int_{z_0}^{d_{max}} (d - z_0)^3 N \left[ 1 - \left( \frac{d}{\bar{d}} - 1 \right)^2 \right]^3 dd \quad (3.22)$$

Numărul de granule abrazive din spațiul de lucru la un moment dat este dat de raportul greutății medii a granulelor abrazive și greutatea unei particule abrazive. Se demonstrează, utilizând relația din [L1] că:

$$N = \frac{C}{\frac{1}{\rho_l} + \frac{C}{\rho_a}} \frac{\pi \cdot D^2}{4} \frac{\bar{d}}{1.095 \rho_a} \cdot \frac{\bar{z}}{\int_{d_{min}}^{d_{max}} d^3 \left[ 1 - \left( \frac{d}{\bar{d}} - 1 \right)^2 \right]^3 dd} \quad (3.23)$$

în care:

C - concentrația masică a granulelor abrazive în lichidul purtător;

$\rho_l, \rho_a$  - densitatea lichidului purtător; respectiv a abrazivului;

D - diametrul piesei de prelucrat.

Valoarea medie a distanței  $\bar{z}$  dintre piesă și disc în faza activă (în intervalul dintre momentul în care scula atinge granula cu dimensiunea cea mai mare și momentul în care se oprește la distanța  $z_0$  de piesă) se deduce conform [L1]:

$$\bar{z} = \int_{\theta_l}^{\pi/2} \frac{(z_0 + A) - A \sin \theta}{\frac{\pi}{2} - \theta} d\theta = \frac{(z_0 + A) - A \cos \theta_l}{\frac{\pi}{2} - \theta_l} \quad (3.24)$$

unde:  $\theta_l = \arcsin(z_l / A)$  (3.25)

$$z_l = A - d_{max} + z_0$$

Se înlocuiesc relațiile (3.23), (3.24) și (3.25) în (3.22) și se obține pentru  $V_{1tot}$  o relație de forma:

$$V_{1tot} = k_l \cdot f \cdot \psi_l(k, C, \rho_l, \rho_a, D, A, z_0, z_l, \theta_l, d_{max}, d_{min}, \bar{d}) \quad (3.26)$$

unde  $k_l$  este o constantă de proporționalitate.

În același mod se poate determina și viteza de uzare volumică a discului de lepuit.

Datorită micșorării distanței între piesă și disc în fazele de alternanță pozitivă, crește forța exercitată pe granula abrazivă, care are o anumită fragilitate, ceea ce poate conduce la spargerea acestuia. Pe de altă parte lepuirea pretinde ca materialul discului de lepuit să aibe o duritate mai mică decât a piesei și o structură mai poroasă. Din această cauză, în anumite condiții, prezentate în paragraful 1.1, o parte din granulele abrazive se pot încadra în discul de lepuit, comportându-se ca și la abrazarea cu abraziv legat.

De fapt o granulă abrazivă sub acțiunea presiunii dintre piesă și discul de lepuit și în funcție de duritatea și fragilitatea acestuia se poate afla în una din următoarele trei situații:

- se încastrează în materialul discului de lepuit și în funcție de adâncimea de încastrare poate sau nu așchia comportându-se ca o granulă fixată;
- are o poziție orientată a muchiilor așchietoare corespunzătoare așchierii;
- se fărâmițează în mai multe granule de diferite dimensiuni.

Modelul analitic prezentat corespunde cazului când se face o alimentare continuă cu mediu abraziv, deci există o circulație continuă a granulelor abrazive în spațiul de lucru. Chiar dacă în timp granulele mai mari se fărâmițează, prin aceasta se profilează noi muchii tăietoare. În cazul lepuirii cu paste abrazive, dacă nu se mai introduce pastă în timpul prelucrării, după fărâmițarea granulelor abrazive până la un anumit punct, muchiile așchietoare încep să se uzeze, să se tocească, razele de rotunjire a tăișurilor cresc, granulele își pierd capacitatea așchietoare.

În realitate, în primele zeci de secunde ale prelucrării, abrazivul se fărâmițează de câteva ori, nu se mai păstrează dependența  $F(d)$  considerată. În aranjamentul inițial granulele cele mai mari sunt primele lovite, se fărâmițează și tot mai multe granule intră în acțiune. Cu creșterea timpului de prelucrare, numărul de granule lovite simultan crește, compoziția granulometrică a abrazivului se află în continuă schimbare. Acest fapt cât și rotunjirea muchiilor granulelor abrazive în cazul activării ultrasonice este demonstrat și de fotografiile realizate unui abraziv nou, neuzat, și aceluiași abraziv după diferiți timpi de prelucrare ([K5],[K1], precum și prin experimentele realizate de autor–paragraful 4.6).

Modificarea distribuției mărimii de lot a abrazivului determină și variația intensității prelevării de material. Scăderea volumului de material prelevat în unitatea de timp se datorează pe de o parte descompunerii forței totale de apăsare pe un număr tot mai mare de granule datorită strivirii lor și pe de altă parte granulele mai mici, mai fărâmițate, au o rezistență mai mare decât granulele mai mari aflate într-un stadiu anterior de sfărâmare (fenomen cunoscut sub numele de efect de scară [K5]). După un anumit timp de prelucrare apare tendința de uniformizare a dimensiunii granulelor abrazive, modelul considerat nu mai este adecvat.

*Etapa II.* În acest stadiu se poate aprecia că forma granulelor abrazive se apropie de forma sferică și se determină prelevarea de material pentru un diametru echivalent al granulelor abrazive  $d_e$  (relații de calcul pentru prelevarea de material în unitatea de timp la prelucrarea dimensională cu ultrasunete, considerându-se granula de formă sferică, se întâlnesc în mai multe surse bibliografice:[D3],[L1],[P2],[N3],[M9]). În fig.3.6 este dată geometria la suprafața de separare granulă abrazivă – piesă la impact. Raza  $r_p$  a calotei sferice obținute în piesă, pentru valori mici ale lui  $h_p$  și  $d_e$  este:

$$r_p = \sqrt{h_p \cdot d_e} \quad (3.27)$$

Volumul prelevat de o granulă abrazivă, determinat în [L1] este:

$$V_2 = \frac{2}{3} \pi \cdot (h_p \cdot d_e)^{3/2} = \frac{2}{3} \pi \cdot \left( \frac{d_e - z_0}{1+q} \cdot d_e \right)^{3/2} \quad (3.28)$$

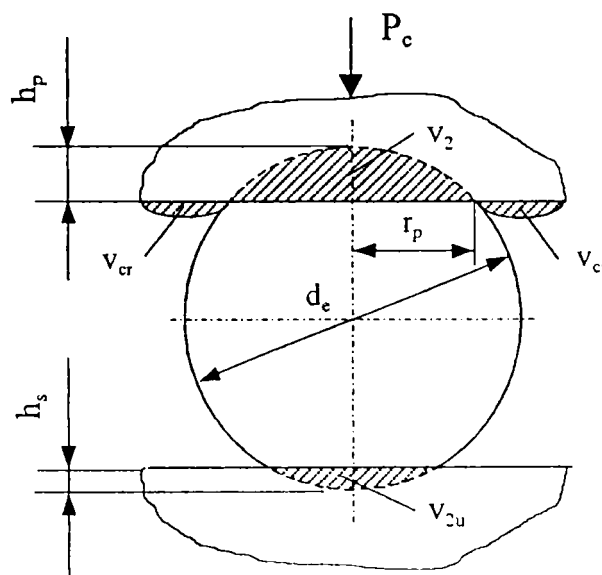


Fig.3.6 Volumul de material dizlocat de o granulă abrazivă sferică

Numărul mediu de granule  $N'$  ce participă la prelucrare este:

$$N' = \frac{3}{2} \frac{C}{\frac{\rho_a}{\rho_l} + C} \frac{D^2 \cdot \bar{z}}{d_e^3} \quad (3.29)$$

Calculul valorii medii a distanței între piesă și disc este același ca și la etapa anterioară, se modifică doar dimensiunea caracteristică a granulelor abrazive ( $d_e$  în loc de  $d$ ).

Astfel, prelevarea de material în unitatea de timp este:

$$V_{2tot} = V_2 \cdot N' \cdot f \quad (3.30)$$

Făcând înlocuirile corespunzătoare se obține:

$$V_{2tot} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot C \cdot f}{\frac{\rho_a}{\rho_l} + C} \left[ \frac{d_e - z_0}{(1+q)d_e} \right]^{3/2} \cdot \frac{(z_0 + A) - A \cos \theta_l}{\frac{\pi}{2} - \theta_l} \quad (3.31)$$

unde  $q$  - raportul duriților  $H_p/H_s$ .

În această etapă începe să aibe pondere însemnată deformarea plastică a stratului superficial. O parte din volumul aşchii nedetaşate se înlătură sub formă de aşchie sau este depus sub formă de creste pe suprafața inițială a piesei. Volumul crestei este:

$$V_{cr} = (1-f_{ab}) V_2 \quad (3.32)$$

unde  $f_{ab}$  este coeficient de scoatere a materialului piesei din cavitățile prelucrate (definit la paragraful 1.2.1).

*Etapa III.* În această etapă se produce netezirea microneregularităților și umplerea golurilor cu materialul crestelor. Volumul de material deplasat de o granulă abrazivă pentru umplerea unui gol este:

$$V_3 = f_{ab} \cdot V_2' \quad (3.33)$$

$V_2'$  fiind volumul cavității rămase după finalizarea etapei II și reprezintă un procent  $p$  din  $V_2$ .

iar volumul total prelevat în unitatea de timp de cele  $N''$  granule abrazive:

$$V_{3tot} = f_{ab} \cdot p \cdot V_2 \cdot N'' \cdot f \quad (3.34)$$

Procesul de fărâmițare a granulelor abrazive fiind practic încheiat, diametrul echivalent al granulelor abrazive se stabilizează la o valoare minimă  $d_{e \min}$ . Se deduce numărul de granule participante:

$$N'' = \frac{3}{2} \frac{C}{\frac{\rho_a}{\rho_f} + C} \left( \frac{D}{d_{e \min}} \right)^2 \quad (3.35)$$

Cumulând rezultatele determinate pentru cele trei etape și ținând cont de ponderea acestora în timpul total de prelucrare până la obținerea rugozității prescrise, volumul total de material prelevat în unitatea de timp este dat de relația:

$$V_{tot} = \frac{t_1}{t_{tot}} V_{1tot} + \frac{t_2}{t_{tot}} V_{2tot} + \frac{t_3}{t_{tot}} V_{3tot} \quad (3.36)$$

Înlocuind relațiile (3.26), (3.31) și (3.34) în (3.36) și notând cu  $\tau_i = t_i / t_{tot}$ ,  $i=1,2,3$ , ponderea fiecărei etape în timpul total de prelucrare, se obține:

$$V_{tot} = [\tau_1 \cdot V_1 \cdot F(d) + \tau_2 \cdot V_2 \cdot N' - \tau_3 \cdot f_{ab} \cdot p \cdot V_2 \cdot N''] \cdot f \quad (3.37)$$

În cazul unei tratări statice a procesului, prelevarea de material are forma:

$$V_{stat} = P_1 \cdot P_2 \cdot V_{tot} \quad (3.38)$$

$P_1$  - factor de probabilitate în funcție de durabilitatea abrazivului

$P_2$  - factor de probabilitate ce ține cont de fenomenele chimice din proces [D3],[N3].

### Cazul dinamic

În cazul real, granulele abrazive se deplasează pe diferite traiectorii cu o viteză relativă determinată de mișcările pe care le efectuează piesa, respectiv discul de lepuit. Se poate aprecia că prelevarea totală de material în unitatea de timp, având în vedere dinamica procesului studiat, depinde de volumul total de material prelevat în unitatea de timp determinat static și viteza relativă medie cu care se deplasează granulele abrazive:

$$V_{din} = V_{stat} \cdot f(v_{Emed}) \quad (3.39)$$

Viteza efectivă a granulelor abrazive este dată de compunerea vitezei rezultante de translație  $v_T$  după direcție longitudinală și transversală a piesei și viteza circulară  $v_R$  a discului de lepuit (fig.3.7).

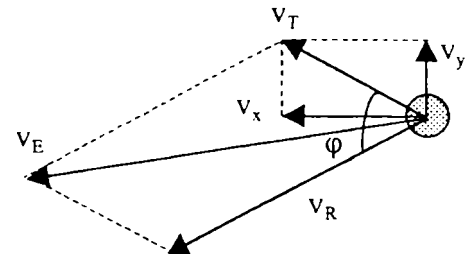


Fig.3.7 Compunerea vitezelor de așchiere pentru o granulă abrazivă aflată în mișcare relativă față de piesa de prelucrat și discul de lepuit

$$\bar{v}_T = \bar{v}_x + \bar{v}_y \quad (3.40)$$

$$v_T = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

$$\bar{v}_E = \bar{v}_T + \bar{v}_R \quad (3.41)$$

$$v_E = \sqrt{v_T^2 + v_R^2 + 2v_T \cdot v_R \cdot \cos \varphi}$$

Deoarece unghiul  $\varphi$  variază pe tot parcursul prelucrării datorită variației vectorilor vitezelor mișcărilor de translație și de rotație se consideră valoarea medie a vitezei efective  $v_{Emed}$ .

Astfel volumul total prelevat în unitatea de timp va fi o funcție de:

$$V_{din} = K \cdot \psi(\tau_i, f, A, C, \rho_l, \rho_a, D, p_c, q, d_{max}, d_{min}, d_e, d_{emin}, \bar{d}, f_{ab}, v_{Emed}, P_1, P_2) \quad (3.42)$$

În general funcția obiectiv principală la procesele de lepuire fiind rugozitatea finală a suprafeței prelucrate  $R_{af}$  se impune determinarea unei dependențe între aceasta și volumul de material prelevat. Pornind de la relația (3.5) pentru definirea productivității prelucrării, pentru o suprafață de arie  $S$ , productivitatea se poate exprima cantitativ prin volumul de material prelevat în unitatea de timp:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{S(R_{in} - R_{af})}{t_{tot}} \quad [\text{mm}^3/\text{min}] \quad (3.43)$$

unde  $R_{in}$  este rugozitatea inițială a piesei de prelucrat iar  $Q$  este volumul dinamic prelevat în unitatea de timp  $V_{din}$ . Se poate deduce ca:

$$R_{af} = R_{in} - t_{tot} \cdot Q / S = R_{in} - t_{tot} \cdot V_{din} / S \quad [\mu\text{m}] \quad (3.44)$$

### 3.2.2 Model analitic de stabilire a presiunii critice de contact

Se stabilește o forță critică, peste care o granulă abrazivă se fărâmițează, în funcție de dimensiunea caracteristică medie  $\bar{d}$  [ $\mu\text{m}$ ] [K1]:

$$F_{cr} = 10^{-3} A_1 \bar{d} + 10^{-7} A_2 \bar{d}^2 \quad [\text{daN}] \quad (3.45)$$

$A_1$ ,  $A_2$  - coeficienți de rezistență la compresiune a materialului abraziv (de exemplu pentru carbura de siliciu  $A_1 = 0.67 \text{ daN}/\mu\text{m}^2$ ,  $A_2 = (A_1/H_{abr})10^4 = 2.23$ ,  $H_{abr} = 3000 \text{ daN}/\text{mm}^2$  microduritatea abrazivului). O altă expresie pentru forța critică este [K1]:

$$F_{cr} = c_0 \cdot H_{abr} \cdot \bar{d} \quad [\text{daN}] \quad (3.46)$$

unde  $c_0 = 1.8 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ .

Plecând de la aceste relații cunoscute de la prelucrarea dimensională cu ultrasunete, se poate determina presiunea de contact critică, pentru o suprafață de contact între piesă și discul de lepuit de arie  $S$ , pentru un număr  $N$  de granule existente în spațiul de lucru:

$$p_{cr} = \frac{N \cdot F_{cr}}{S} \quad (3.47)$$

Pentru cazul particular când suprafața  $S$  este circulară  $D = 9 \text{ mm}$ , abrazivul carbură de siliciu  $\rho_a = 3200 \text{ kg}/\text{m}^3$ , lichidul purtător ulei industrial  $\rho_l = 930 \text{ kg}/\text{m}^3$  și în ipoteza că:  $\bar{z} = 0.1 \cdot d_{\max}$ ,  $d_{\max} = 1.2 \cdot \bar{d}$  se obține expresia presiunii de contact critică  $p_{cr}$  [MPa]:

$$p_{cr} = 38.88 \cdot \frac{C}{3.44 + C} \cdot \frac{1}{\bar{d}} \quad (3.48)$$

În fig.3.8 se prezintă forma suprafeței de răspuns  $p_{cr} = f(C, \bar{d})$ , pentru valorile constantelor precizate anterior și pentru valori ale lui  $C$  și  $\bar{d}$  în domeniul de interes tehnologic, precizat în paragraful 1.3.2.2. Curbele de nivel constant, rezultate prin secționarea suprafețelor de răspuns cu plane orizontale sunt redate grafic în fig.3.9 și permit stabilirea presiunii critice de contact în funcție de concentrația și dimensiunea medie a granulelor abrazive.

Se constată că la creșterea concentrației de abraziv, presiunea critică crește foarte mult, datorită numărului mare de granule din spațiul de lucru, scade încărcarea pe fiecare granulă, procesul de fărâmițare se inițiază la presiuni critice mai mari. Din punct de vedere al granulației abrazivului, respectiv al dimensiunii medii a acestora, se poate concluziona că odată cu reducerea dimensiunilor granulelor, presiunea critică crește. Deci alegerea unor granulații mai mici necesită presiuni de contact mai mari, iar la granulații mai mari, presiunea critică de contact este mai mică. Desigur că, pe parcursul prelucrării, prin modificarea compoziției granulometrice a pastei abrazive, se schimbă și valoarea presiunii de contact critice iar pentru ca acțiunea de prelevare de material să se desfășoare în continuare ar fi necesară creșterea presiunii.

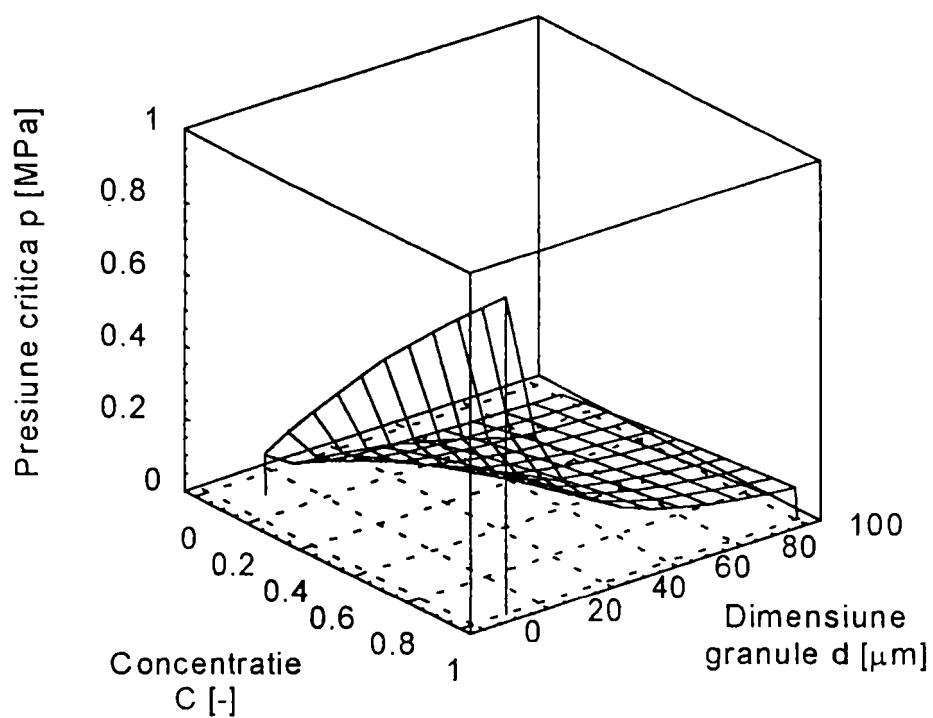


Fig.3.8 Suprafața de răspuns a presiunii critice în funcție de concentrația și dimensiunea granulelor abrazive

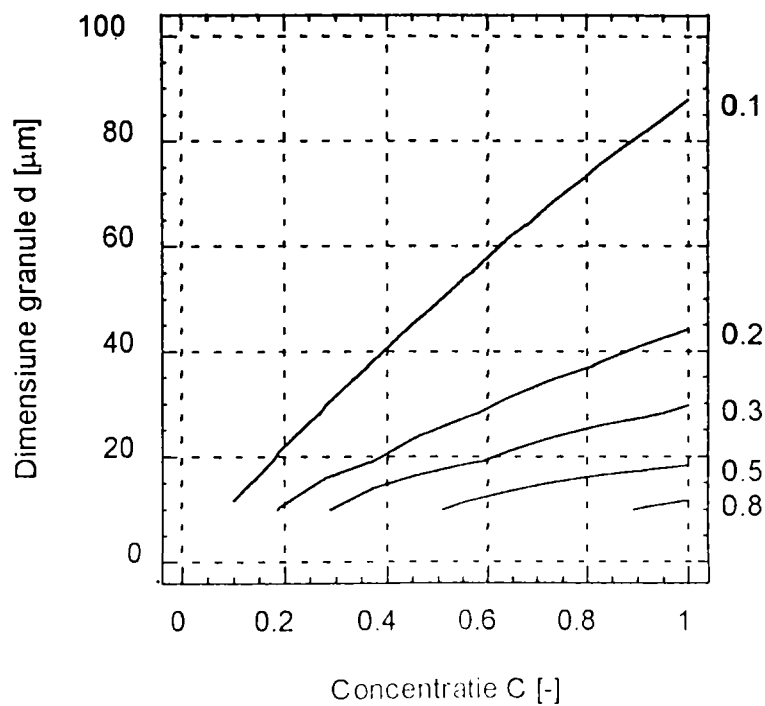


Fig.3.9 Dependenta dimensiunii granulelor abrazive de concentrația acestora la diferite nivele ale presiunii critice



### 3.2.3 Model analitic al volumului de material netezit

Pe baza modelului determinat și din cunoștințele apriorice se remarcă faptul că profilul de rugozitate al suprafeței prelucrate este semnificativ influențat de gradul în care granulele abrazive reușesc să netezească neregularitățile suprafeței. Astfel, ponderea celei de-a treia etape este hotărâtoare pentru satisfacerea condițiilor impuse unei suprafețe lepuite. De aceea, volumul de material angajat în umplerea microcavităților rezultate din prelucrările anterioare și din etapele I și II poate fi considerat ca o măsură a rugozității finale.

Se stabilesc constantele:  $f = 20$  kHz,  $D = 9$  mm,  $\rho_a = 3.2$  g/cm<sup>3</sup>,  $\rho_l = 0.93$  g/cm<sup>3</sup>,  $q = 1.5$ ,  $f_{ab} = 0.5$ ,  $p = 0.5$ . Pentru a simplifica calculele, se introduce  $i$  – gradul de fărâmițare a granulelor abrazive ca raport între dimensiunea medie inițială și cea rezultată după un anumit timp de prelucrare. Se apreciază că  $\bar{z}_0 = 0.9 \cdot \bar{d} / i$ ,  $d_e = \bar{d} / i$ ,  $d_{\max} = 1.2 \cdot \bar{d} / i$ ,  $d_{\min} = \bar{d} / i_{\max}$  și se alege orientativ  $i = 5$  corespunzător etapei II și  $i_{\min} = 20$  corespunzător etapei III. Operând înlocuirile pentru cazul dat, se exprimă volumul prelevat în unitatea de timp în etapa III  $V_{3\text{tot}}$  [mm<sup>3</sup>/min] ca fiind o dependență de concentrația și granulația abrazivului și de amplitudinea oscilațiilor ultrasonice aplicate:

$$V_{3\text{tot}} = K_v \cdot \left( \frac{C}{3.44 + C} \right)^2 \cdot \frac{0.018 \cdot \bar{d} + A \left[ 1 - \cos(\arcsin(1 - 0.06 \cdot \bar{d} / A)) \right]}{\bar{d}^2 \cdot \arccos(1 - 0.06 \cdot \bar{d} / A)} \quad (3.49)$$

unde  $\bar{d}$  [ $\mu\text{m}$ ] și  $A$  [ $\mu\text{m}$ ] iar  $K_v$  este o constantă de proporționalitate (pentru cazul dat  $K_v = 302,33088$  mm<sup>4</sup>/min).

În fig.3.10, fig.3.11, fig.3.12 se prezintă grafic modul de variație a funcției obiectiv  $V_{3\text{tot}}$  în raport cu câte un factor de influență, ceilalți menținându-se constanți. Din analiza dependențelor obținute se constată că, la concentrații mici ale abrazivului în lichidul purtător, nu este semnificativă influența dimensiunii granulelor, deci a granulației abrazivului și nici a activării ultrasonice. La creșterea concentrației devine semnificativă însă amplitudinea oscilațiilor ultrasonice, dar numai la granulații mici. Deci cu cât dimensiunea granulelor este mai mică, și numărul lor mai mare, cu atât efectul indus de oscilațiile ultrasonice devine mai important. Abrazivul mai fin este mai sensibil la solicitările alternante introduse de ultrasunete, ceea ce conduce la intensificarea fenomenului de sablare în spațiul dintre piesă și discul de lepuit. Acest fapt conduce la antrenarea unui volum mai mare de material al creștelor depuse anterior în microcavitățile existente, ceea ce duce la micșorarea neregularităților și la creșterea portanței suprafeței. Se pare că în cazul lepurii activate ultrasonic nu mai este valabilă recomandarea de la prelucrarea dimensională cu ultrasunete, ca raportul dintre dublul amplitudinii și dimensiunea granulei abrazive să se încadreze între 0.5...1 [P2],[N7] la același raport obținându-se rezultate diferite.

Optimizarea prelucrării din punct de vedere al calității suprafeței prelucrate ar presupune maximizarea funcției  $V_{3\text{tot}}$ , adică alegerea unor granulații mici și concentrații mari, acționând cu oscilații ultrasonice cu amplitudini mai ridicate, dar și cu frecvențe mai mari, având în vedere că volumul netezit este direct proporțional cu frecvența oscilațiilor ultrasonice.

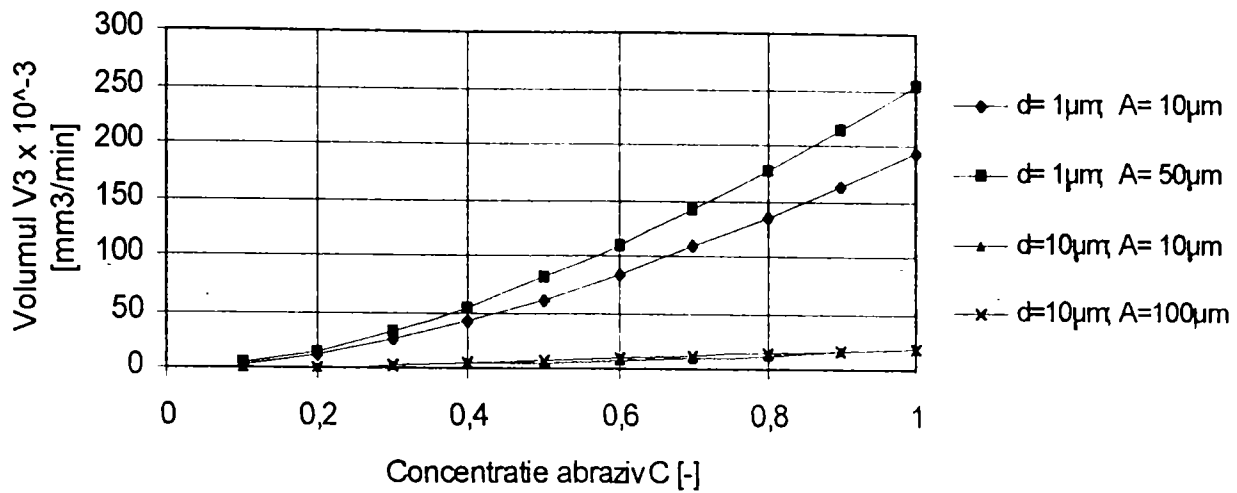


Fig.3.10 Influența concentrației abrazivului asupra volumului de material netezit

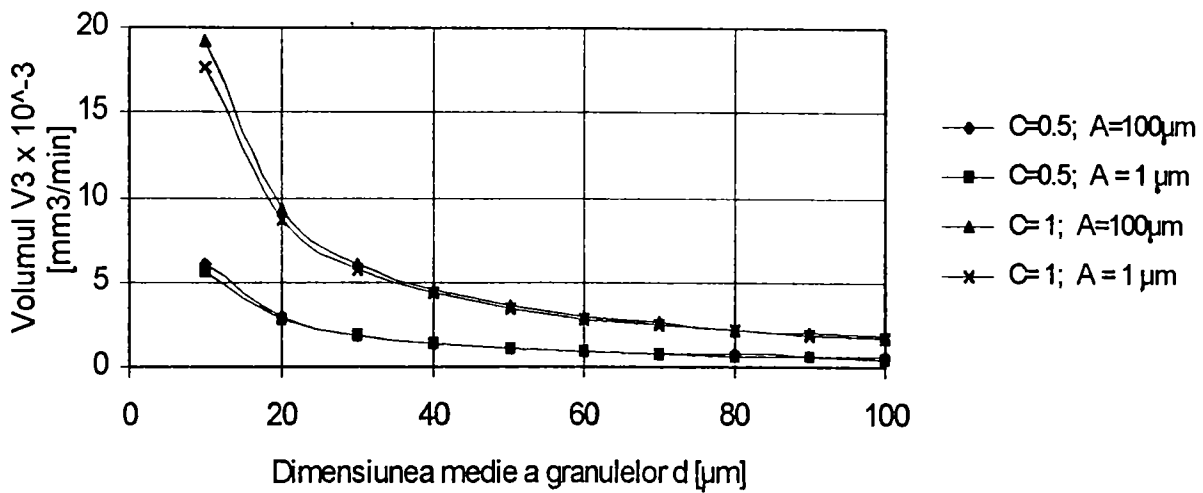


Fig.3.11 Influența dimensiunii medii a granulelor abrazive asupra volumului de material netezit

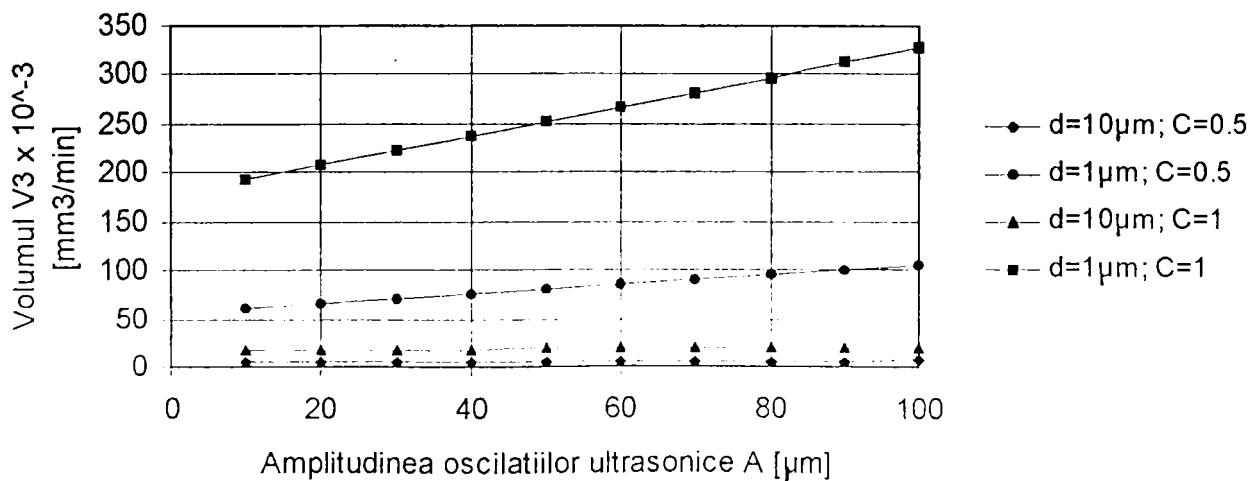


Fig.3.12 Influența amplitudinii oscilațiilor ultrasonice asupra volumului de material netezit

### 3.3 Concluzii

Modelul analitic prezentat vizează o apreciere cantitativă a prelevării de material în cazul procesului de lepuire plană activată ultrasonic în funcție de factorii de influență și parametrii identificați la paragraful 3.2. Modelul studiat are *avantajul* că:

- include neomogenitatea dimensională a granulelor abrazive;
- ține cont de modificarea în timp a formei granulelor abrazive;
- are în vedere componenta de deformare plastică a procesului de lepuire.

Utilizarea unui astfel de model are *dezavantajul* că:

- este destul de dificil de verificat practic datorită necunoașterii exacte a unora din termenii ce intervin în relație (de exemplu ponderea timpilor corespunzători fiecărei etape în parte);
- necesită un calcul laborios cu multe date ce trebuie stabilite inițial.

Analiza teoretică efectuată prezintă importanță deoarece oferă informații asupra ponderii unor factori de influență în proces și asigură o imagine orientativă a mecanismului dizlocării și netezirii materialului în procesul de lepuire ultrasonică. Se stabilește astfel că există o interacțiune importantă între trei din factorii de influență ai procesului: presiune de contact, granulația și concentrația abrazivului. Pe de altă parte s-a identificat modul în care trebuie orientată prelucrarea, astfel încât să fie justificată aplicarea oscilațiilor ultrasonice și domeniul de interes tehnologic pentru alegerea granulației și a concentrației abrazivului, precum și a amplitudinii oscilațiilor ultrasonice. Astfel se impune alegerea unor granulații mici și concentrații mari ale abrazivului, precum și aplicarea oscilațiilor ultrasonice cu amplitudini mai mari.

Modelarea analitică a procesului de lepuire ultrasonică sub forma prezentată aduce un element de *noutate* față de cele cunoscute din bibliografia disponibilă, prin:

- ⇒ prezentarea secvențială a derulării procesului de prelucrare;
- ⇒ aproximarea formei granulelor în faza incipientă a prelucrării ca fiind cubică;
- ⇒ stabilirea presiunii critice de contact în funcție de concentrația și dimensiunea medie a granulelor abrazive pentru un caz dat, pornind de la relația cunoscută din [K1] pentru forța critică pentru care o granulă se fărâmițează;
- ⇒ dezvoltarea, pe baza unor relații din literatură determinate pentru prelucrarea dimensională cu ultrasunete și pentru lepuirea clasică, unui model analitic general pentru volumul de material prelevat în unitatea de timp la lepuire plană activată ultrasonic;
- ⇒ determinarea relației pentru volumul de material netezit în unitatea de timp, corespunzător etapei finale a prelucrării, și explicitarea acesteia, pentru condiții concrete, în funcție de concentrația, de dimensiunea medie a granulelor abrazive și de amplitudinea oscilațiilor ultrasonice aplicate.

Datorită caracterului aleatoriu al acestui proces și al numeroaselor ipoteze simplificatoare modelarea analitică are anumite limite și neajunsuri, fiind dificil de determinat analitic o relație relativ simplă pentru funcțiile obiectiv, care să fie valabilă în orice condiții de prelucrare. Pe de altă parte, modelarea analitică nu oferă posibilitatea unei ierarhizări a factorilor de influență cu scopul eliminării celor ne semnificativi, nu stabilește importanța interacțiunilor dintre factorii de influență, nu permite o apreciere reală a topografiei suprafețelor prelucrate. Din aceste motive este necesară și utilă modelarea experimentală a procesului de lepuire ultrasonică pentru condiții concrete de lucru.

### MODELAREA EXPERIMENTALĂ A PROCESULUI DE LEPUIRE ACTIVATĂ ULTRASONIC

#### 4.1 Obiectivele și resursele cercetării experimentale

##### 4.1.1 Obiectivele cercetării experimentale

Pe baza informațiilor obținute din sinteza bibliografică și din modelarea analitică a procesului de lepuire activată ultrasonic se stabilesc obiectivele cercetării experimentale și etapele acesteia. Cercetarea experimentală creează premisele necesare optimizării procesului din punct de vedere al parametrilor de calitate a suprafeței și de productivitate a prelucrării, urmărindu-se, pentru domeniul experimental investigat:

- ierarhizarea factorilor de influență în ordinea importanței lor asupra funcțiilor obiectiv;
- stabilirea condițiilor necesare optimizării procesului, având în vedere mai ales influența introducerii oscilațiilor ultrasonice în proces;
- determinarea modelelor matematice empirice a funcțiilor obiectiv;
- analiza statistică a profilelor de rugozitate a suprafețelor prelucrate prin lepuire ultrasonică;
- verificarea rezultatelor modelării analitice.

În vederea realizării acestor obiective se parcurg următoarele etape:

- selectarea din mulțimea factorilor de influență inventariați, pe baza informațiilor apriorice și a experimentelor preliminare, unui număr de factori de influență; aplicarea experimentului de tip bilanț aleator va permite ierarhizarea acestora prin prisma funcțiilor obiectiv (rugozitatea suprafeței și productivitatea prelucrării) și efectuarea unor observații utile desfășurării în continuare a cercetărilor;
- realizarea unui program de experimentare factorială, menținând factorii de influență determinați ca semnificativi, pentru modelarea empirică factorială a mai multor indicatori de rugozitate și a productivității prelucrării;
- aplicarea teoriei funcțiilor aleatoare la analiza statistică a profilelor de rugozitate.

Pentru completarea rezultatelor obținute în urma experimentului factorial și ale modelării analitice urmează:

- efectuarea unor experimente unifactoriale;
- realizarea și analiza imaginilor suprafețelor prelucrate;
- studiul modificării geometriei granulelor abrazive după diferite durate de prelucrare.

Interpretarea rezultatelor cercetării experimentale efectuate va conduce la obținerea unor concluzii cu valabilitate în spațiul multifactorial abordat, dar corelarea acestora cu datele existente în literatura de specialitate și cu rezultatele modelării analitice vor permite formularea unor concluzii globale asupra activării ultrasonice a proceselor de lepuire plană.

#### 4.1.2 Structura standului experimental

Efectuarea încercărilor experimentale s-a realizat prin adaptarea unei mașini de prelucrat dimensional cu ultrasunete, model experimental existent în laboratorul de Bazele Cercetării Experimentale al catedrei de T.C.M., ca mașină de lepuit plan cu activare ultrasonică a piesei de prelucrat. Construcția standului permite generarea unei

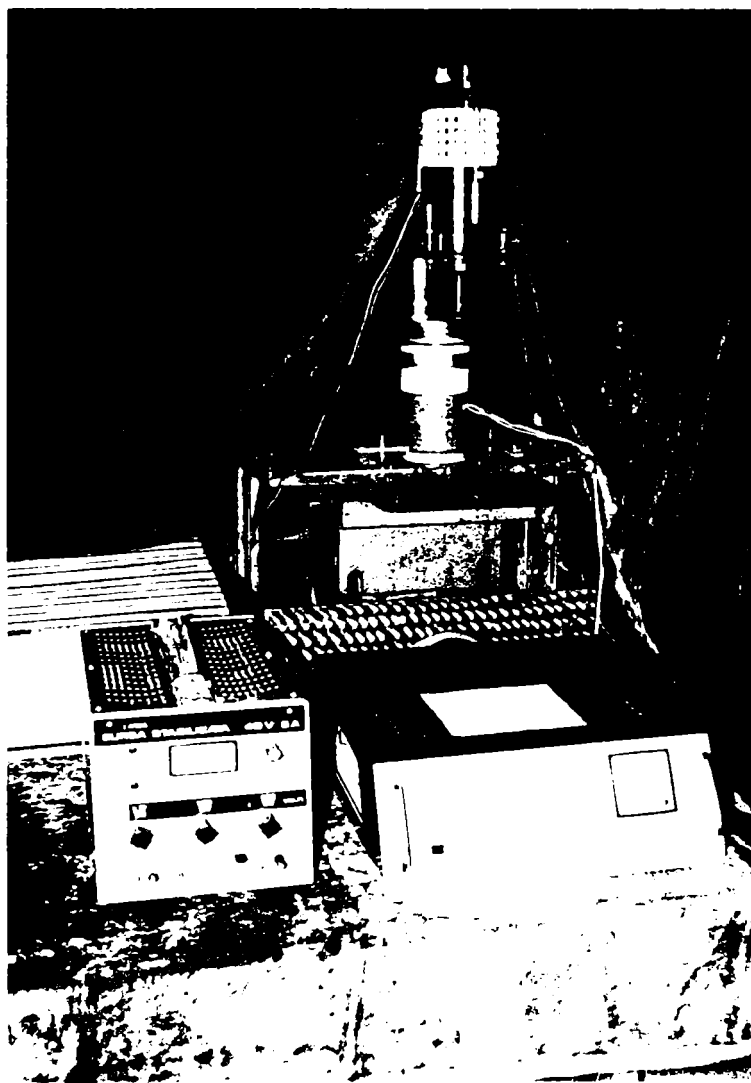


Fig.4.1 Vedere de ansamblu a standului experimental

cinematice. Piesițele procesului de lepuire fiind necesară proiectarea și realizarea câtorva elemente suplimentare integrate sistemului tehnologic de bază.

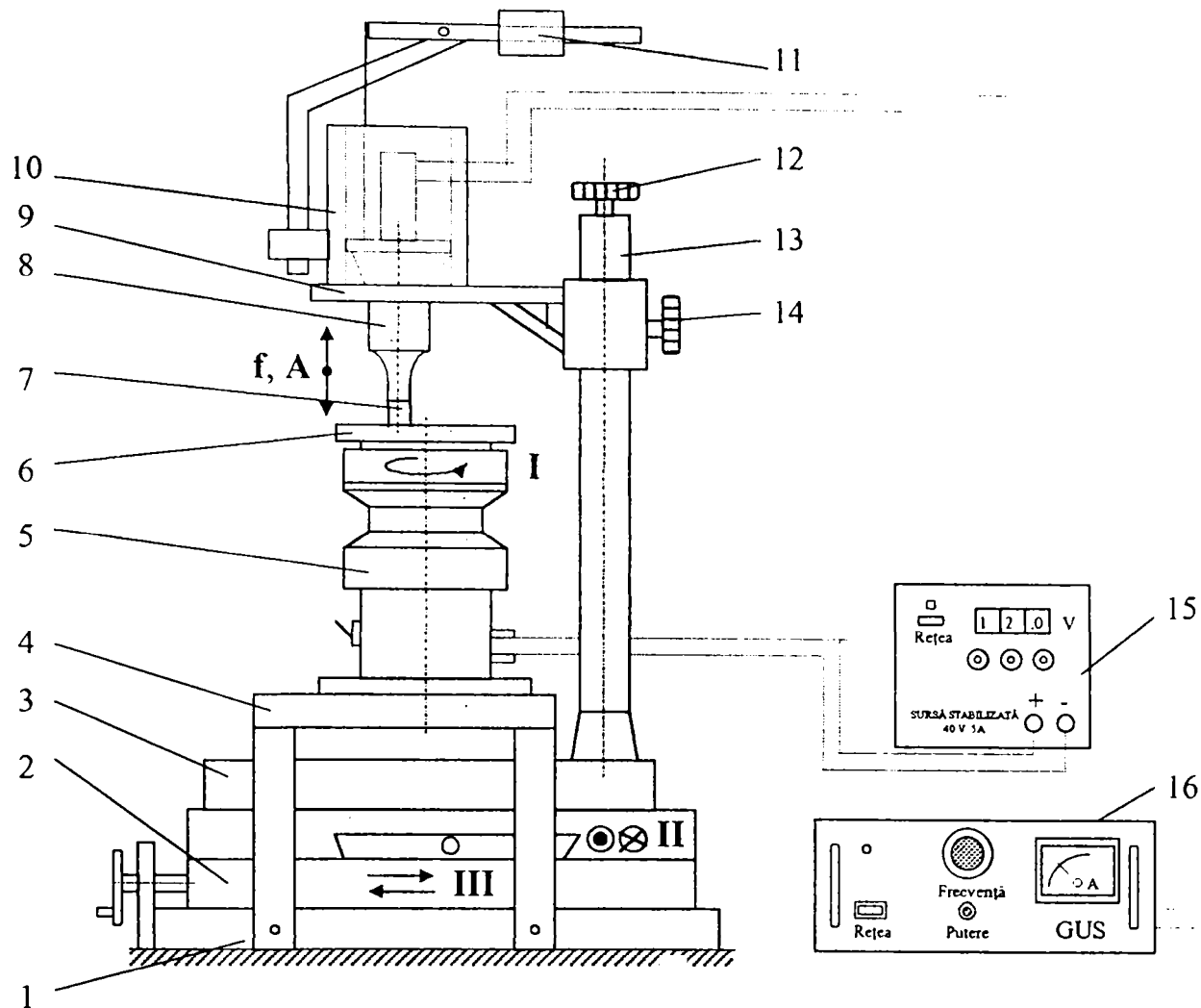
Standul experimental din fig.4.1, a cărui schemă este prezentată în fig.4.2 este compus din următoarele subansambluri:

- generator de înaltă frecvență;
- convertor ultrasonic;
- sistem de reglare a presiunii de contact;
- masă rotativă;
- sursă stabilizată de alimentare în curent continuu;
- batiu cu săni.

Pe batiu se află un sistem de două săni orizontale perpendiculare pe care se așează placa de bază cu o coloană cu suport pentru capul de lucru. Acesta este constituit din convertorul ultrasonic conectat la generatorul de înaltă frecvență necesar

pentru activarea ultrasonică a piesei de prelucrat și sistemul de reglare a presiunii de contact între piesa de prelucrat și discul de lepuit. Solidar cu batiul s-a realizat o masă suport pe care se amplasează masa rotativă cu discul de lepuit, masa rotativă fiind alimentată de la o sursă stabilizată de curent continuu.





1 - batiu; 2 - sistem de sănii; 3 - placă de bază; 4 - masă suport; 5 - masă rotativă; 6 - disc de lepuit; 7 - piesa; 8 - convertor ultrasonic; 9 - suport; 10 - cap de lucru; 11 - sistem de reglare a presiunii de contact; 12 - șurub de reglaj; 13 - coloană; 14 - șurub de blocare; 15 - sursă stabilizată de curent continuu; 16 - generator de înaltă frecvență

Fig.4.2 Schema standului experimental

- **Generatorul de înaltă frecvență GUS 100** este un generator tranzistorizat, care funcționează în regim de semiundă, cu frecvența de lucru de 20 kHz și permite reglarea puterii de activare până la 100 W. Variația puterii de activare este dată de variația intensității curentului la generator afișată la ampermetrul existent pe panoul generatorului. Diagrama de etalonare a puterii electrice debitate pe transductor în funcție de intensitatea curentului la generator este dată în fig.4.3.

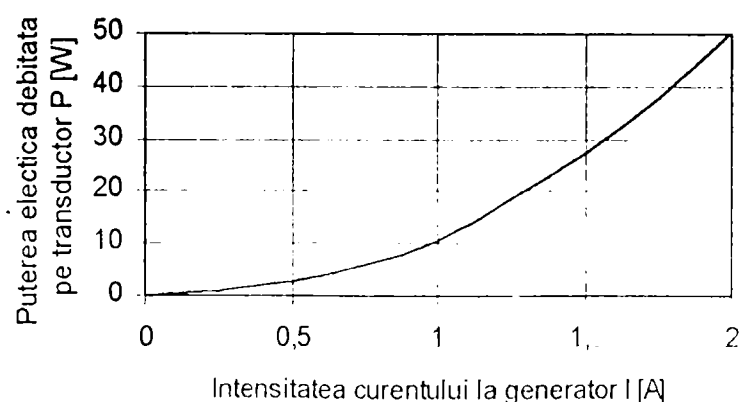


Fig.4.3 Diagrama de etalonare a puterii debitate pe transductor

- **Convertorul ultrasonic** are în componența sa *transductorul ultrasonic*, *concentratorul ultrasonic* și *piesa de prelucrat*.

Ansablul transductor-concentrator utilizat la experimentări este prezentat în fig.4.4, principiile de proiectare aplicate sunt definite în [C9]. Transductorul este rigidizat direct cu partea superioară a concentratorului în ipoc cu adeziv epoxidic de tip Araldit. Piesa de prelucrat se fixează în alezajul filetat din partea inferioară a concentratorului. Convertorul ultrasonic se deplasează pe verticală în vederea poziționării piesei față de masa rotativă și pentru realizarea în timpul prelucrării a contactului cu discul de lepuit. Cursa de lucru a capului cu convertorul ultrasonic este de 30mm.

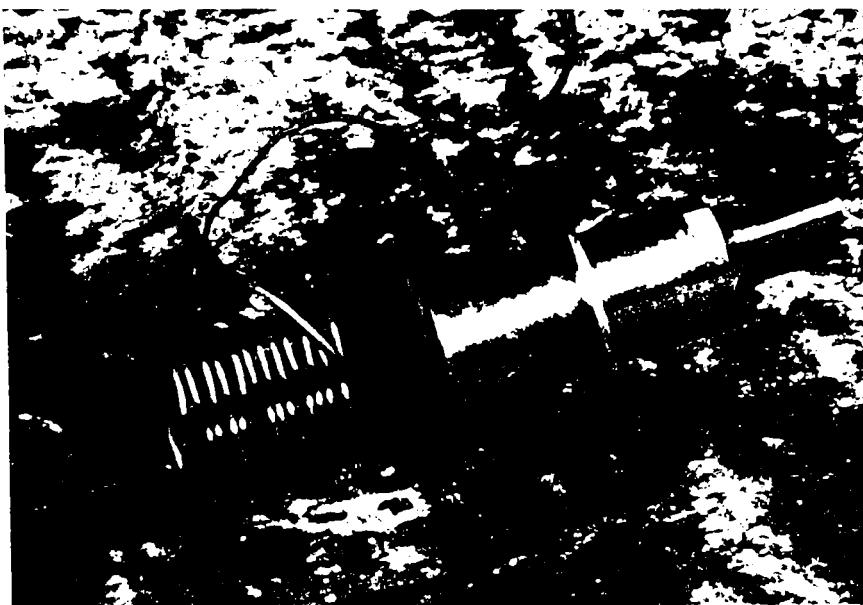


Fig 4.4 Ansablul transductor-concentrator

⇒ *Transductorul ultrasonic* utilizat este confecționat din ferită magnetostrictivă I 20 și are dimensiunile din fig.4.5.

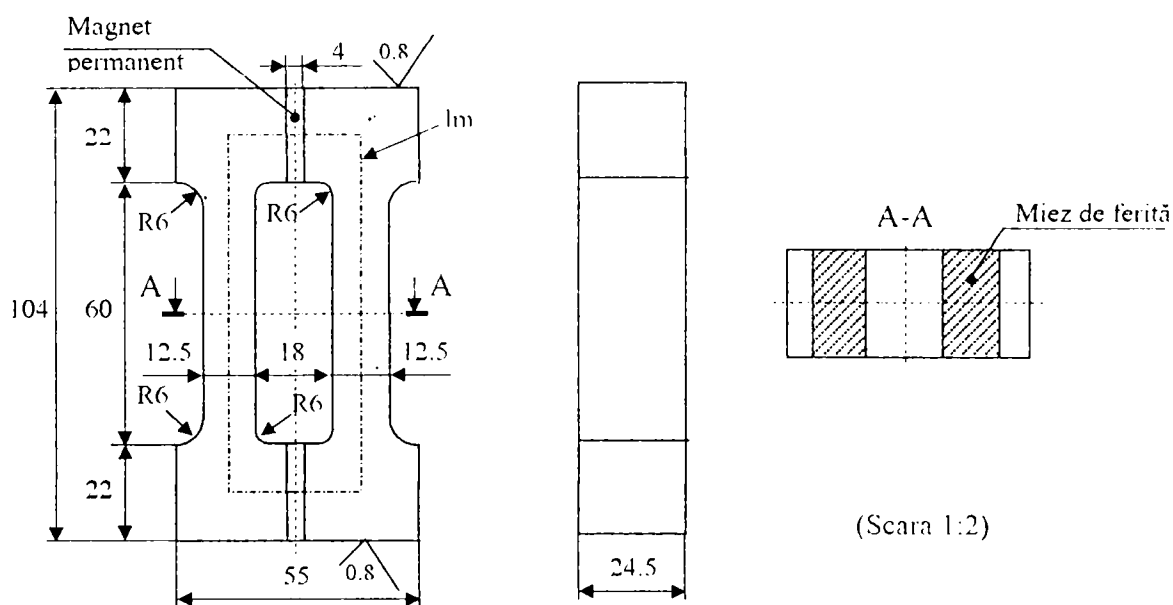


Fig.4.5 Transductor magnetostrictiv din ferită

⇒ *Concentratorul ultrasonic* prezentat în fig.4.6 este executat în trepte de formă conică, cilindrică și cu flanșă în nodul de oscilație, fiind realizat din material OLC 45 STAS 880-88.

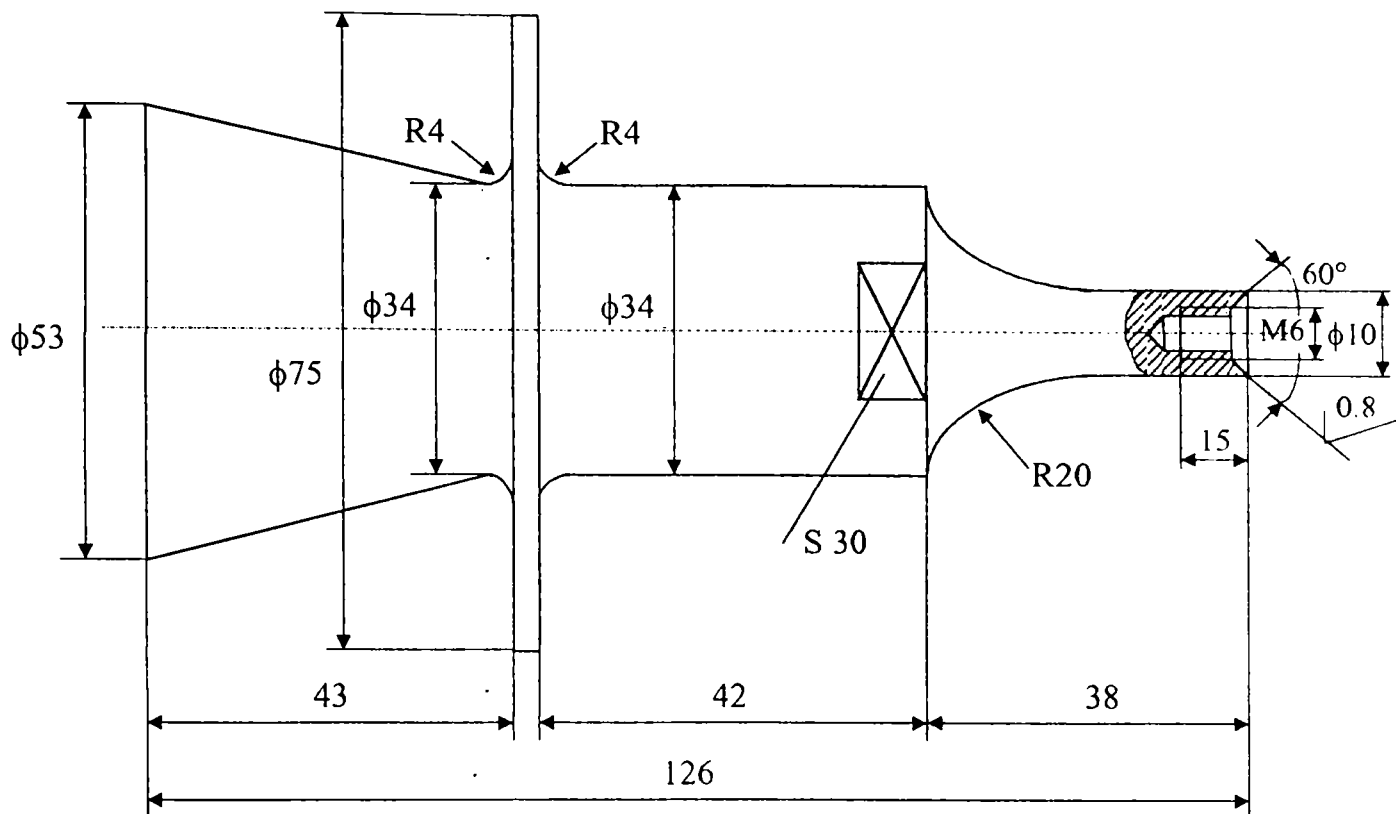


Fig.4.6 Concentrator ultrasonic utilizat la experimentări

⇒ *Piesa de prelucrat* de formă cilindrică și cu filet la unul din capete pentru prinderea în concentrator conform fig.4.7, este introdusă în locul obiectului de transfer existent la prelucrarea dimensională cu ultrasunete. Materialul folosit a fost OSC 8 STAS 1700-86.

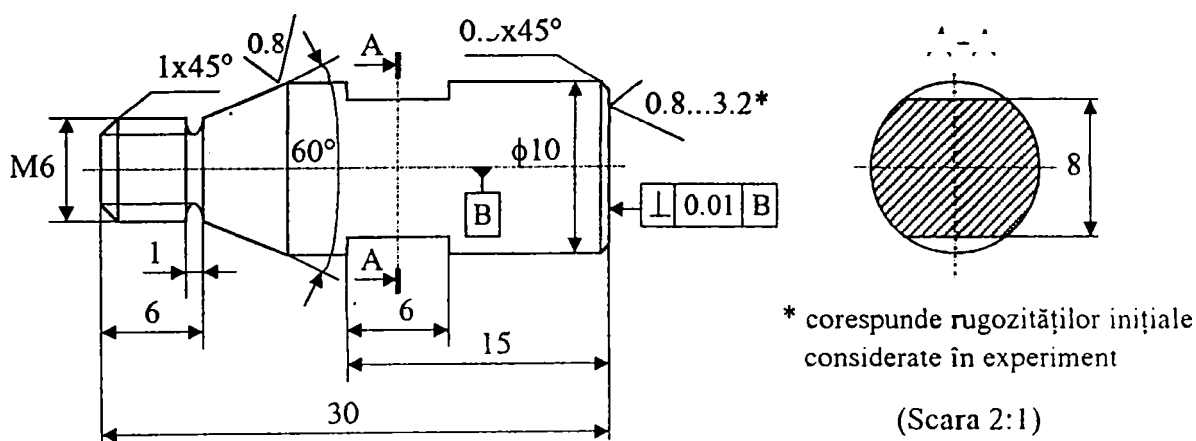


Fig.4.7 Forma și dimensiunile pieselor de prelucrat

La realizarea sistemului oscilator s-au avut în vedere o serie de cerințe funcționale de natură acustică, mecanică și tehnologică pe care trebuie să le satisfacă blocul ultrasonic pentru a putea fi utilizat în mod corespunzător. Continuitatea mediului material elastic prin care se propagă undele ultrasonice în lungul sistemului oscilator este esențială pentru transmiterea energiei mecanice de vibrație din locul de formare, în coloanele active ale transductorului până în spațiul de lucru tehnologic. Orice discontinuitate la locurile de îmbinare sau în interiorul materialului unui element component conduce la

pierderi suplimentare de energie. Astfel, ferita a fost selectată și verificată înainte de lipire pentru a nu avea fisuri sau alte defecte, suprafața frontală radiantă a fost netezită fin. La fel suprafețele frontale ale concentratorului la locul de îmbinare cu transductorul și la îmbinarea prin înșurubare cu piesa de prelucrat au fost rectificat și netezite fin prin lustruire pentru ca la asamblare contactul să se facă cât mai etanș, iar pierderile prin reflexia undelor ultrasonice să fie minime. În locul de îmbinare amovibilă prin înfiletare strângerea trebuie făcută bine, uneori se pot interpune rondele de oțel moale cu grosime mică 0.3...0.5 mm pentru un contact metalic cât mai intim.

Flanșa plasată în nodul de oscilație al concentratorului este solicitată destul de intens, de aceea suprafețele ei trebuie bine finisate, o execuție de slabă calitate va da o durabilitate mică în funcționare datorită solicitărilor la oboseală, ea fiind plasată în ventrul tensiunilor mecanice. Pe lângă calitatea foarte bună care se impune suprafețelor elementelor de fixare se cer și raze de racordare corespunzătoare.

Realizarea coaxialității elementelor componente ale convertorului ultrasonic este importantă pentru a evita oscilațiile laterale nedorite. De asemenea rezistențele acustice specifice ale elementelor care se assemblează în sistemul oscilant trebuie să fie cât mai apropiate, ideal egale.

Suspendarea convertorului ultrasonic în suportul mașinii s-a făcut prin elemente izolante acustic, inele din stratitex, evitând rigidizarea suspendării. La bobinarea transductorului s-a respectat sensul de înfășurare pe coloanele active având grijă ca fluxul magnetic să se închidă pe același sens pe circuitul magnetic închis. La transductoarele din ferite pierderile prin curenți turbionari sunt reduse, astfel că lucrând la puteri mici până la 150W este suficientă răcirea cu aer.

Toate aceste prescripții au fost respectate la realizarea convertorului ultrasonic, în cadrul laboratorului amintit, unde există o bogată experiență în acest domeniu.

Pe baza datelor din bibliografie s-a stabilit, pentru tipul de ferită și pentru forma concentratorului ultrasonic utilizat, că amplitudinea reală a oscilațiilor ultrasonice, în gol, este de ordinul a 15-20  $\mu\text{m}$  [I2],[P2]. În acest context trebuie precizat că utilizarea amplitudinii de oscilație a capătului activ al concentratorului ca factor de influență tehnologic al procesului este foarte tentantă. Este evident că efectele ultrasunetelor în proces sunt proporționale cu mărimea amplitudinii de oscilație, care este și o măsură directă a energiei de activare (a se vedea tabelul 2.1). Obținerea amplitudinii maxime la frecvențe ultrasonice este legată de necesitatea asigurării unui transfer de energie maxim către obiectul prelucrării, realizându-se astfel efecte mecanice, calorice, chimice sau cavitaționale cât mai eficiente (nivelul de energie al undelor acustice este proporțional cu  $\omega^2 A^2$ ). Din motivele arătate mai sus în majoritatea instalațiilor tehnologice cu ultrasunete asigurarea unor amplitudini mari de oscilație (cca 80-120  $\mu\text{m}$ ) în condițiile evitării fenomenelor disipative de energie, cum sunt saturațiile și funcționarea în regim de neliniaritate, constituie o preocupare primordială. Pe de altă parte o instalație tehnologică (de prelucrare, de activare) trebuie să asigure valori ridicate ale amplitudinilor de oscilație ultrasonică, funcționând la puteri compatibile cu necesitățile procedurii și cu asigurarea fiabilității componentelor mecanice ale convertorului. În contextul de mai sus cunoașterea

și controlul parametrului “amplitudine de oscilație” ar putea deveni un element tehnologic esențial în corecta desfășurare a unui procedeu și în utilizarea eficientă a echipamentului ultrasonic [12].

Pe de altă parte, măsurarea amplitudinii de oscilație la frecvențe ultrasonice nu este o problemă de rutină. Măsurarea corectă a amplitudinilor de oscilație de peste câțiva microni la frecvența de 20 kHz necesită montaje de măsurare specializate în care esențial este traductorul folosit. Literatura de specialitate, deși face deseori trimiteri la valori

numerice nr. 15 al. amplitudinii unor scule activate ultrasonic, nu precizează și felul în care acestea au fost măsurate. Mai mult, specificarea unor valori numerice ale amplitudinilor unor scule activate ultrasonic în desfășurarea procesului devine discutabilă întrucât măsurările cu aparatul ad. v. a. se pot face la funcționarea în gol. Dar este știut că în condiții de lucru asupra sculei activate ultrasonic intervin diverși factori perturbatori, cel mai important fiind chiar presiunea de contact piesă-sculă, care induce un efect de amortizare a sistemului oscilant însoțit nu rareori de modificări ale frecvenței de lucru (fig.4.8). Ca atare, valorile amplitudinilor de oscilație în procesul de lucru sunt valori presupuse, apreciate mai degrabă prin extrapolări de la mersul în gol, decât ca urmare a unor măsurări. De altfel măsurarea amplitudinii în timpul lucrului, în proces, este în majoritatea cazurilor imposibilă.

În altă ordine de idei se pune problema corectitudinii de măsurare a amplitudinii de oscilație, știind faptul că pentru montarea echipamentelor de măsurare (traductor, montaje de măsurare) frecvențele ultrasonice sunt frecvențe “exotice”, aparatura existentă nefiind etalonată corespunzător. Cel mai ilustrativ exemplu este oferit de echipamentul de măsurare a amplitudinilor de oscilație al firmei Brüel&Kjaer [\*8], în care din 14 tipuri constructive de traductoare accelerometrice numai două au specificații corespunzătoare unor eventuale măsurări în spectrul de frecvențe superior lui 20 kHz. Astfel traductorul piezoelectric tip 8307 are domeniul de frecvență 1- 25000 Hz, cu o valoare limitată la 10000g (g-accelerația gravitațională) a accelerației maxime suportate, ceea ce echivalează la frecvențe de 20 kHz cu o amplitudine maximă măsurabilă de 6.66 μm. Mai mult, forma accelerometrului nu permite cuplarea cu obiectul de măsurat decât prin contact cu lipire. Aceste elemente îl fac practic inutilizabil. Un alt accelerometru tip Brüel&Kjaer, care ar putea eventual satisface condițiilor este tipul 8309 care are domeniul de frecvență

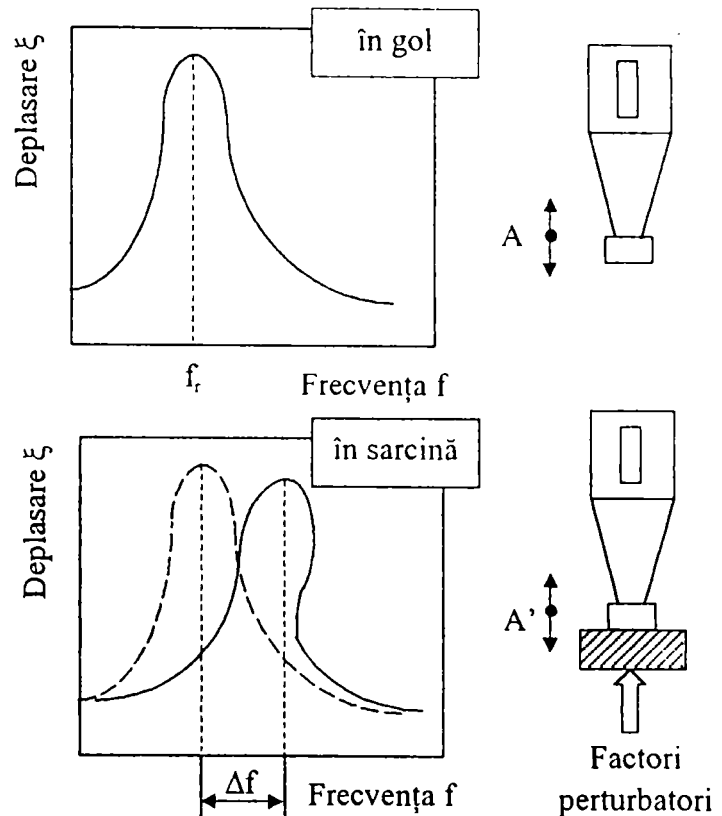


Fig.4.8 Modificarea amplitudinii și a frecvenței de rezonanță în sarcină

măsurabil până la 60000 Hz, cu accelerații maxime până la 100000g și posibilitate de prindere prin înfiletare. Totuși acest accelerometru se recomandă la măsurarea șocurilor. Utilizarea oricărui alt accelerometru ar conduce la obținerea unor semnale denaturate prin înscrierea pe porțiunea de caracteristică neliniară (fig.4.9) existând riscul măsurării unor valori amplificate, altele decât cele reale. Gama de frecvență la care accelerometrul furnizează un semnal de ieșire exact este limitată, limita superioară fiind determinată în funcție de frecvența de rezonanță a accelerometrului însuși (max. 12% din nivelul semnalului corespunzător frecvenței de rezonanță) [\*8].

Ținând cont de cele de mai sus, prin care se evidențiază:

- dificultatea măsurării amplitudinii în timpul procesului și nu în gol
- dificultatea utilizării unui echipament adecvat,

rezultă că măsurarea amplitudinii de oscilație și utilizarea ei ca factor de influență tehnologic devine prohibitivă și nerațională. În acest context este mai rezonabil ca în loc să se măsoare cu eforturi considerabile și rezultate îndoielnice amplitudinea de oscilație să se utilizeze ca factor de influență tehnologic al procesului puterea consumată pentru diferite procese, evaluarea cea mai pragmatică având în vedere raportul putere consumată generator / efecte tehnologice obținute, bineînțeles asociate unor condiții particularizate de exploatare. În cazul concret al utilizării montajului experimental descris mai sus, puterea consumată de generator va fi corectată prin valorile cunoscute ale randamentelor diferitelor componente [I2],[A1]:

- generator  $\eta = 70 \%$ ;
- factor de cuplaj electromecanic al feritelor magnetostrictive  $k = 13 \%$ .

Alte caracteristici importante ale feritelor magnetostrictive:

- factorul mecanic de pierderi  $Q_m = 150 [-]$
- factorul de conversie electroacustic  $\eta_{ca} = 70 \%$
- factor de variație a frecvenței cu temperatura  $-5 \cdot 10^{-5} [Hz/^\circ C]$ .

- Sistemul de reglare a presiunii de contact constă în reglarea greutateii cu care apasă capul de lucru asupra discului de lemn, cu ajutorul unui sistem cu contragreutate.

Pentru cunoașterea valorii forței de apăsare în orice poziție a contragreutății pe tijă, este necesară etalonarea sistemului cu ajutorul unei balanțe cu valoarea diviziunii de 10g. Este necesar ca în tot timpul etalonării tija pe care culisează contragreutatea să se mențină în

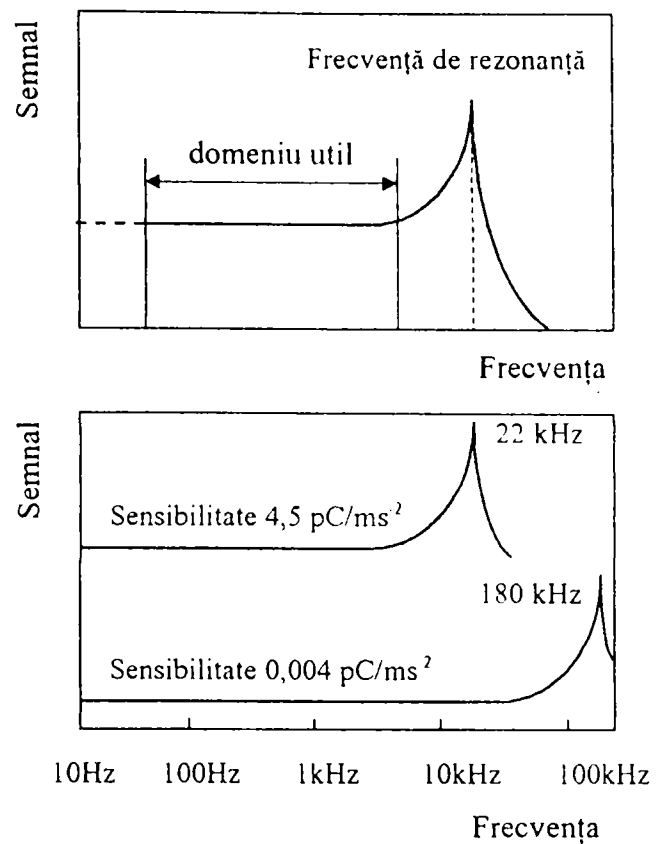


Fig.4.9 Caracteristica de funcționare a accelerometrelor



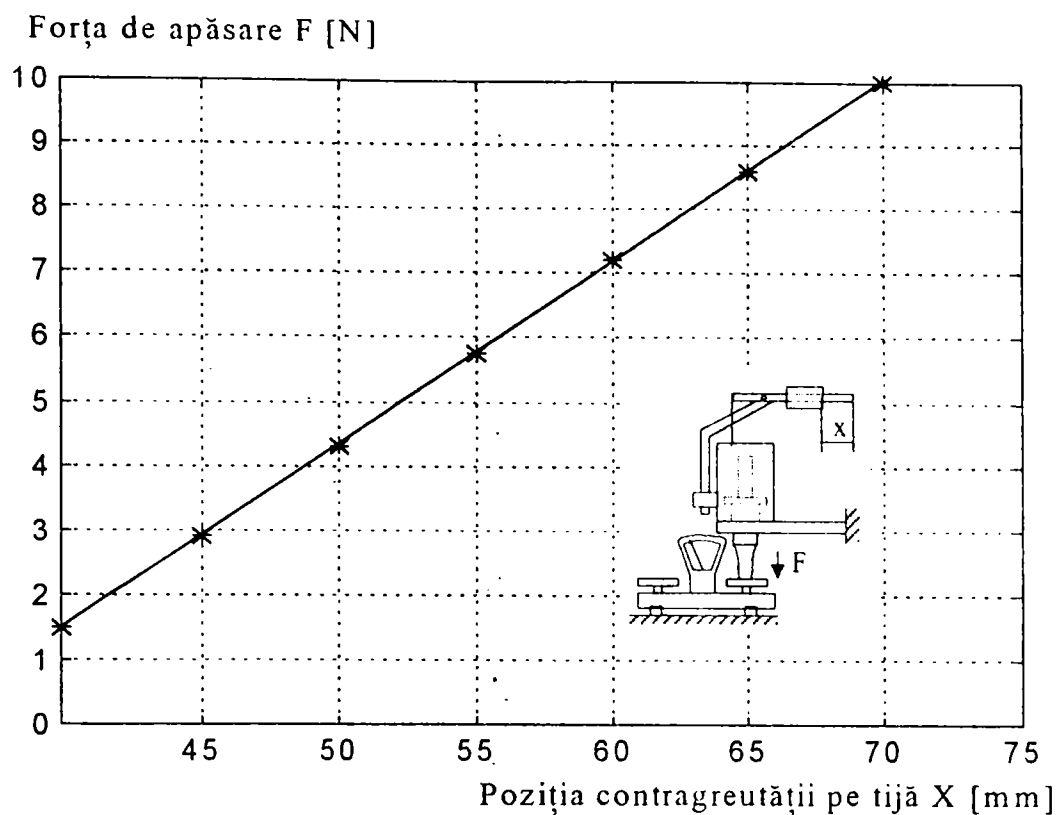


Fig.4.10 Diagramă pentru etalonarea forței de apăsare

poziție orizontală. Determinarea valorii forței de apăsare se poate face din diagrama din fig.4.10 corespunzătoare concentratorului ultrasonic utilizat, unde  $x$  este distanța măsurată de la capătul tijei până la contragreutate. Fixarea contragreutății în poziție se face cu ajutorul unui șurub cu cap striat care acționează asupra unei lamele aflate în interiorul contragreutății. În perioadele de repaus, menținerea în poziția superioară a capului de lucru se face prin blocarea articulației pârghiei cu ajutorul unui știft.

- **Masa rotativă** se compune dintr-un motor electric de curent continuu, fixat pe un suport, având montată la partea superioară a arborelui acestuia o șaibă cu un inel O care transmite mișcarea de rotație, prin fricțiune, la masa de lucru propriu-zisă. Poziționarea mesei în raport cu piesa de prelucrat se face prin intermediul a două bride pe masa suport. Pe masa rotativă s-a montat discul de lepuit confecționat din fontă Fc 200 STAS 568-82 (174 HB), executat conform fig.4.11. Domeniul de variație

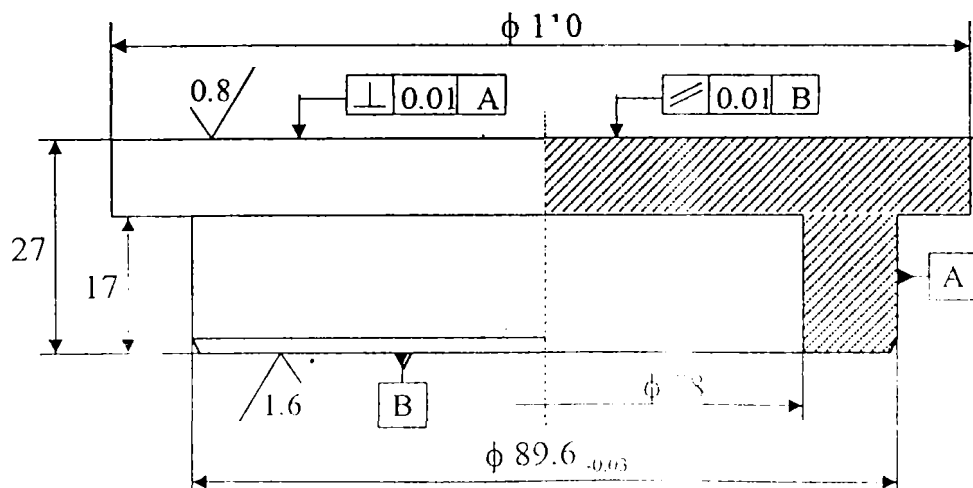


Fig.4.11 Disc-suport pentru lepuire plană

a turației mesei:  $30 \div 1500$  rot/min.

- Sursa stabilizată de alimentare în curent continuu (40V 5A) este necesară pentru alimentarea și variația turației mesei rotative.
- Batiul dispune de un sistem de sănii perpendiculare prevăzute cu ghidaje coadă de rândunică, iar acționarea se face manual prin sistem șurub-piuliță. Preluarea jocului din ghidaje este făcută cu pene paralele, poziționate cu șuruburi și contrapiulițe. Cursele de lucru maxime au fost reglate astfel: cursa longitudinală 52 mm, cursa transversală 38 mm.

#### 4.1.3 Mod de funcționare al standului experimental

Între piesa de prelucrat și discul de lepuit se introduce un mediu abraziv sub formă de pastă constituit din granule abrazive și lichid de lepuit. Sistemul tehnologic prezentat nu dispune de o instalație de alimentare cu mediu abraziv, datorită faptului că prelucrările se rezumă la suprafețe mici, asigurarea mediului abraziv în zona de lucru făcându-se manual. Presiunea de contact între suprafața frontală a piesei de prelucrat și suprafața frontală a discului de lepuit este asigurată de sistemul de reglare a forței de apăsare pe suprafața de contact. Paralelismul suprafețelor active ale piesei și discului de lepuit s-a asigurat la fiecare încercare cu ajutorul unor adaosuri tip lere. Fiind montată la partea inferioară a blocului ultrasonic, piesa poate fi sau nu activată ultrasonic la frecvența de 20 kHz dată de generator, la diverse puteri de activare date de variația intensității curentului la generator. Pentru a nu suprasolicita transductorul din ferită la un regim de durată, intensitatea maximă permisă este de 2.5 A.

În timp ce discul de lepuit efectuează mișcarea de rotație I (fig.4.2), piesa de prelucrat se deplasează după o direcție rezultată din combinarea unei mișcări rectilinii-alternative longitudinale II (axa x) și o mișcare rectilinie-alternativă transversală III (axa

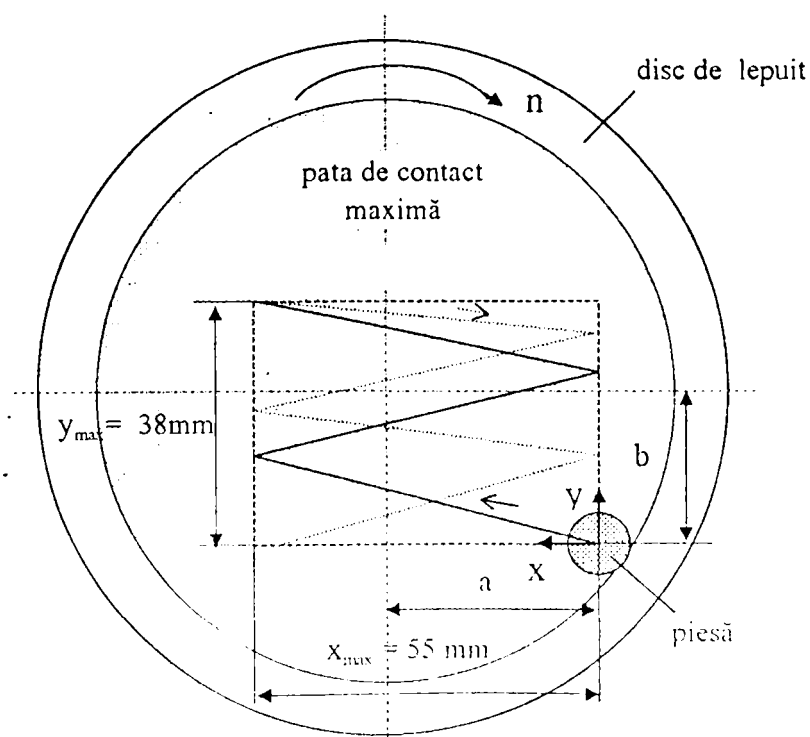


Fig. 4.12 Traiectoria centrului piesei de prelucrat pe suprafața discului de lepuit

y), conform traiectoriei descrise în fig.4.12. Piesa de prelucrat efectuează aproximativ 20 curse-duble/min în direcție longitudinală, respectiv 5 curse-duble/min în direcție transversală, baleind toată suprafața determinată de cursele maxime după direcțiile longitudinală ( $x_{max}$ ) și transversală ( $y_{max}$ ). Având în vedere că deplasarea în plan a piesei se face manual, mărimile celor două curse au fost măsurate la o solicitare medie din partea operatorului. Dimensiunea maximă a petei de contact dintre piesă și discul de lepuit depinde de poziția inițială a piesei în raport cu discul de lepuit dată prin coordonatele a x b. Viteza efectivă a granulelor abrazive, dată de relația 3.41, pentru coordonatele piesei  $x_{max}$ ,  $y_{max}$  este de  $\approx 15$  m/min.

## 4.2 Organizarea cercetării experimentale

La fiecare etapă a cercetării experimentale s-a stabilit volumul încercărilor și matricea program a experimentului, apoi pregătirea și efectuarea încercărilor s-a derulat după aceeași metodologie de lucru. S-au stabilit, în continuare, parametrii ce vor fi menținuți constanți pe parcursul experimentării.

Deoarece piesa de prelucrat face parte din blocul ultrasonic proiectat și dimensionat pentru frecvența de rezonanță de 20 kHz, frecvență uzuală în aplicațiile active ale ultrasunetelor, trecerea pe o altă frecvență presupunând un alt bloc ultrasonic, cu alte dimensiuni ale componentelor inclusiv ale piesei de prelucrat, un alt generator, ar conduce la alte condiții de lucru, diferite de cele ale standului realizat, deci se va menține frecvența de rezonanță a sistemului ultrasonic ca parametru al prelucrării:

→ frecvența oscilațiilor ultrasonice  $f = 20$  kHz.

Datorită mișcării combinate a piesei de prelucrat și rotirii în același timp a discului de lepuit, vitezele relative piesă-disc se modifică mereu și deci se mențin constante turația discului de lepuit și valorile medii obținute de operator pentru frecvența curselor longitudinală și transversală. La alegerea turației discului de lepuit se face un compromis între alegerea unei turații ridicate pentru o productivitate mare și limitarea acesteia datorită forțelor centrifuge care tind să îndepărteze granulele abrazive spre periferia discului [K6]:

→ turația discului de lepuit  $n_I = 60$  rot/min; s-a ales turația curentă a mașinilor de lepuit industrial [T1];

→ mișcări rectilinii-alternative  $n_{II} \cong 20$  c.d./min,  $n_{III} \cong 5$  c.d./min.

Construcția standului experimental permite doar utilizarea pastelor abrazive și având în vedere că pentru obținerea unor parametri de rugozitate mai mici la granulații mai mari sunt necesare lichide purtătoare cu vâscozitate mai mare s-a ales uleiul industrial, respectiv vaselina ca lichid suport pentru abrazivii utilizați [K6].

→ lichid purtător ulei de transmisie tip T90 EP<sub>2</sub>; vaselină Li-Ca-Pb-tip 2.

Alimentarea cu pastă abrazivă se face o singură dată la început de proces pe considerentul că prin introducerea continuă sau la anumite intervale de timp a pastei se obține o creștere a productivității prelucrării, dar prin întreruperea fenomenului de

fărămițare, de uzură a granulelor abrazive apare o scădere a calității suprafeței și un consum sporit de pastă abrazivă [K6].

→ mod de alimentare: o singură dată la început de proces.

Materialul și rugozitatea inițială a discului de lepuit rămân ca parametri ai procesului. Discul de lepuit s-a realizat din fontă deoarece este materialul cel mai utilizat ca suport pentru mediul abraziv, experiența și practica arătând că fonta este cea mai adecvată pentru confecționarea discurilor pentru lepuiți uzuale [P9],[C5]:

→ disc de lepuit  $\Phi 100$  din fontă Fc 200,  $R_a = 0.8 \mu\text{m}$ .

Lepuirea fiind un procedeu care se pretează cel mai bine oțelurilor tratate termic cu duritatea de 55...62 HRC [P9] se alege ca material oțelul de scule, care poate fi supus unui tratament termic:

→ piesă  $\Phi 10$  din OSC 8.

*Operații preliminare:*

- ⇒ se pregătește mediul abraziv: se cântărește o cantitate egală din fiecare abraziv pentru fiecare granulație și se amestecă cu o cantitate proporțională de ulei industrial realizând concentrațiile dorite de pastă abrazivă;
- ⇒ piesa de prelucrat cu rugozitatea inițială a suprafeței frontale și duritatea corespunzătoare numărului încercării se fixează în partea inferioară a concentratorului ultrasonic;
- ⇒ discul de lepuit se montează pe masa rotativă, pe suprafața laterală a discului se fixează o bandă de cauciuc pentru evitarea împrăștierei pastei abrazive;
- ⇒ se reglează turația discului la valoarea menținută constantă pe parcursul experimentului;
- ⇒ se reglează forța de apăsare pe suprafața de contact piesă-disc de lepuit, deplasând contragreutatea la distanța  $x$  măsurată cu șublerul față de articulația pârghiei sistemului de reglare a presiunii, conform diagramei din fig.4.10, dar menținând capul de lucru în poziția superioară;
- ⇒ se pune pe suprafața discului de lepuit în dreptul zonei de contact cu piesa, o singură dată la începutul prelucrării, o cantitate de pastă abrazivă de circa 2 g;
- ⇒ dacă prelucrarea urmează să se efectueze cu activare ultrasonică se cuplează generatorul de înaltă frecvență și se reglează treapta de putere dorită, prin reglarea intensității curentului la generator;
- ⇒ se cuplează sursa stabilizată de alimentare în curent continuu și întrerupătorul mesei rotative.

*Derularea experimentului:*

- ⇒ se deblochează capul de lucru stabilindu-se contactul între piesă și discul de lepuit;
- ⇒ în același timp se pornește cronometrul;
- ⇒ pentru cazul activării ultrasonice un alt operator realizează acordul în sarcină al generatorului cu frecvența de rezonanță a sistemului ultrasonic de la butonul de reglare a frecvenței aflat pe panoul generatorului; la timpuri de prelucrare mai mari se fac pauze pentru a nu suprasolicita transductorul din ferită.

- ⇒ se efectuează manual, cu o viteză medie, mișcările combinate după direcțiile longitudinală și transversală, după cursele maxime, urmărind pe cât posibil ca traiectoriile să nu se suprapună;
- ⇒ la expirarea timpului de prelucrare se întrerupe contactul între piesă și disc, se blochează capul de lucru, se oprește masa rotativă și se aduce la zero intensitatea curentului la generator.

*Operații ulterioare:*

- ☞ după fiecare prelucrare se reține o parte din pasta abrazivă uzată;
- ☞ se acordă o grijă deosebită curățirii piesei de prelucrat și a discului de lepuț prin spălare cu diluant;
- ☞ pentru corecția discului uzat și îndepărtarea stratului de material impregnat cu granule abrazive, după fiecare prelucrare acesta a fost rectificat;
- ☞ se măsoară rugozitatea finală a suprafeței prelucrate după două direcții perpendiculare și se face media măsurătorilor.

*Aparatura de măsură utilizată la efectuarea încercărilor:*

În cadrul desfășurării experimentărilor au fost utilizate:

- a) Rugozimetru Bruel&Kjaer, care permite măsurarea parametrului de rugozitate  $R_a$  pentru valori cuprinse între 0.01 și 30  $\mu\text{m}$ .

Măsurarea profilului de rugozitate s-a efectuat cu profilmetrul electronic IEMI N 2801, prevăzut cu mecanismul de antrenare al palpatorului N 2801M. Rugozimetrul generează o

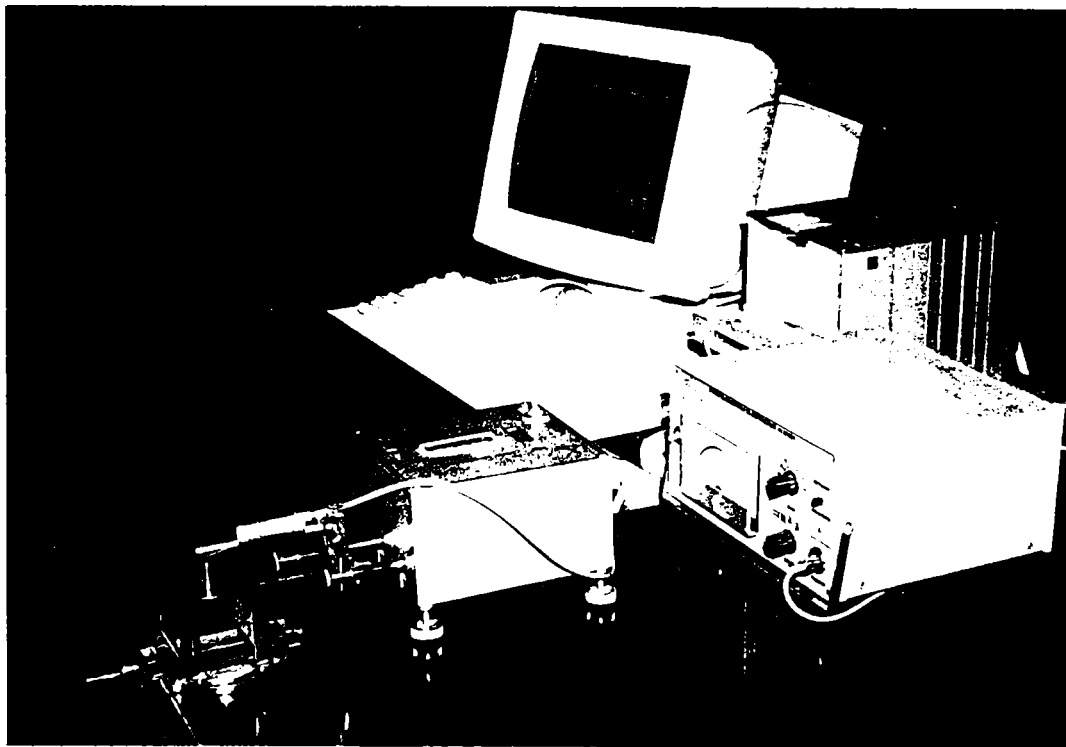


Fig.4.13 Sistem de măsurare pentru determinarea profilogramelor suprafețelor prelucrate

tensiune electrică proporțională cu înălțimea profilului suprafeței piesei măsurate. Semnalul analogic furnizat la ieșirea aparatului s-a cuplat la un canal de intrare al înregistratorului sistemului de achiziție de date NI DAQ (National Instruments Data Acquisition), utilizând programul software Virtual Bench Logger. Fig.4.13 prezintă

standul sistemului de măsurare cu achiziție de date, detalii privind modulele componente se găsesc în [P11]. În cadrul tuturor măsurărilor efectuate a fost utilizată o rată de eșantionare a semnalului de 1000 de citiri pe secundă. Nivelul zgomotului electric de fond a fost redus. Datele din sistemul de achiziții au fost importate și prelucrate în programul EXCEL. Pentru analiză s-au reținut lungimi de bază, conform STAS 5730/1-85, din porțiuni ale profilogramei care să nu cuprindă zone de întoarcere a palpatorului, pentru ca modificările de viteză ale acestuia la capetele cursei să nu influențeze rezultatele măsurătorilor. S-a efectuat măsurarea unei probe etalon cu rugozitatea  $R_a = 0.45 \mu\text{m}$ . Constanta de etalonare a sistemului de măsurare este:

$$k = R_a [\mu\text{m}] / R_a [\text{V}] = 448.4694 \mu\text{m} / \text{V} \quad (4.1)$$

- b) Aparat pentru determinarea durtății HRC;
- c) Balanță analitică care oferă posibilitatea cântării unor mase cu o precizie de 10 mg.

### 4.3 Ierarhizarea factorilor de influență prin bilanț aleator

În vederea evaluării semnificației statistice a factorilor de influență existenți și ierarhizarea acestora în ordine descrescătoare a influenței exercitate asupra funcțiilor obiectiv și respectiv excluderea din experiment a factorilor cu acțiune nesemnificativă s-a recurs la prelucrarea statistică a datelor de măsurare aplicându-se metoda bilanțului aleator. În condițiile date ale cercetării experimentale, acesta are o capacitate de rezoluție mare, la un volum minim de experimentări [N8]. Ținându-se cont de informațiile apriorice din literatura de specialitate, de experimentările preliminare și de condițiile concrete de experimentare s-au explicitat la paragraful 3.1 funcțiile obiectiv ce pot fi analizate și factorii de influență ai procesului, iar la paragraful 4.2 s-au stabilit parametrii procesului pentru modelarea experimentală.

Drept criterii de performanță s-au ales două funcții obiectiv de interes tehnologic:

⇒  $y_1$  - rugozitatea finală a piesei de prelucrat  $R_a [\mu\text{m}]$ ;

⇒  $y_2$  - productivitatea prelucrării  $Q [\mu\text{m}/\text{min}]$

Se stabilesc apoi factorii de influență principali, numărul de nivele de variație pentru fiecare factor de influență și valoarea fiecărui nivel de variație (fig.4.14, tabelul 4.1):

Obiectivul tezei fiind legat de studiul influenței ultrasunetelor în procesul de lepuire în mod evident trebuie considerat cel puțin un factor de influență acustic. Având în vedere că generatorul ultrasonic permite variația puterii de activare măsurată prin variația intensității curentului la generator se va reține puterea de activare ca factor de influență:

⇒ puterea de activare ultrasonică se alege pe trei nivele de variație, nivelul zero corespunde lepuirii clasice.

Se observă că presiunea statică de contact și timpul de prelucrare, respectiv timpul de activare în cazul unui regim continuu de activare cu ultrasunete, fac parte din factorii de influență și au un domeniu de reglare continuu și destul de larg:



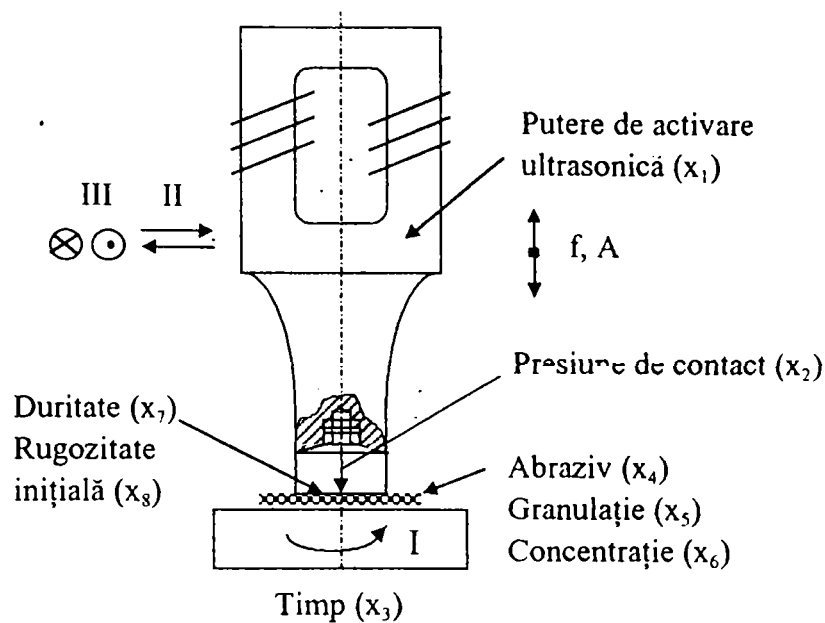


Fig.4.14 Schema de principiu a instalației experimentale cu indicarea factorilor de influență selectați pentru bilanțul aleator

Tabelul 4.1 Nivelele factorilor de influență pentru aplicarea bilanțului aleator

Notăție	Factor de influență	simbol u.m.	Codificare nivel de variație	Valoare nivel de variație
$x_1$	puterea de activare ultrasonică (dată de intensitatea curentului la generator)	P [W] ( $I_g$ [A])	1	0 (0)
			2	25 (1)
			3	50 (2)
$x_2$	presiunea de contact (dată de forța de apăsare pe aria suprafeței de contact piesă- disc de lepuț )	p [MPa] (F [N])	1	0.628 (4)
			2	0.943 (6)
			3	1.179 (7.5)
			4	1.415 (9)
$x_3$	timpul de prelucrare	t [min]	1	5
			2	10
			3	15
			4	20
$x_4$	natura abrazivului	Abr. [duritate Mohs]	1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 9.0
			2	SiC - 9.4
			3	B <sub>4</sub> C - 9.6
$x_5$	granulația abrazivului	-	1	Nr. 5
			2	Nr. 8
$x_6$	concentrație abraziv/lichid purtător	-	1	1:1
			2	1:3
$x_7$	duritate piesă de prelucrat	HRC	1	28-31
			2	60-63
$x_8$	rughozitate inițială piesă de prelucrat	$R_{a1}$ [ $\mu$ m]	1	3.2
			2	2.0

- ⇒ după etalonarea forței de apăsare se iau patru trepte de valori între valorile extreme care se pot regla, presiunile de contact se calculează ca raport între forța de apăsare a piesei pe discul de lepuit și aria suprafeței de contact care este un cerc cu diametrul de 9 mm. Aria suprafeței active este:  $S_c = \pi d^2/4 = 63.61 \text{mm}^2$ . Presiunile de contact corespunzătoare celor patru nivele de variație  $p = F/S_c$  se încadrează în intervalul recomandat 0.1...3.5 MPa [M13],[D5];
- ⇒ din experiențele preliminare rezultă timpul minim de prelucrare de 5 minute pentru evidențierea primelor rezultate, iar timpul maxim s-a redus din motive economice la 20 de minute, în practica industrială acesta fiind de ordinul zecilor de minute, dar suficient pentru asigurarea unei anumite calități a suprafeței prelucrate. Fiind un factor considerat important se iau patru nivele de variație a duratei de prelucrare, la intervale egale.

Pentru mediul abraziv se vor menține ca factori de influență natura abrazivului, granulația acestuia și concentrația lui în pasta de lepuit:

- ⇒ legat de natura abrazivului, pentru materialul piesei oțel, se analizează trei abrazivi cu duritate mare, dintre cei mai utilizați la PNFA [K6],[P9]: electrocorindonul, carbura de siliciu și carbura de bor a căror proprietăți au fost date în tabelul 1.4;
- ⇒ lepuirea executându-se de regulă în mai multe faze s-a stabilit granulația Nr.8 corespunzător unei lepuiri de degroșare (fiind recomandate granulații cu Nr.10...6) și Nr. 5 unei lepuiri de semifinisare (recomandate Nr.5...4) [P9];
- ⇒ s-a mers pe două concentrații ale abrazivului în lichidul purtător 1:1, respectiv 1:3, alese și în alte cercetări experimentale [T1], ținând cont și de faptul că alimentarea cu pastă abrazivă s-a făcut o singură dată la început de proces.

Factorii de influență ce țin de piesa de prelucrat sunt duritatea materialului piesei și rugozitatea inițială a suprafeței piesei [B1],[K6].

- ⇒ piesele de prelucrat au fost executate din oțel de scule OSC 8, material care poate fi studiat în stare netratată sau tratată termic (călire cu autorevenire);
- ⇒ pentru rugozitatea inițială a suprafeței piesei s-au luat valori corespunzătoare unei strunjiri de semifinisare ( $3.2 \mu\text{m}$ ) și unei strunjiri de finisare ( $2.0 \mu\text{m}$ ).

Volumul experimentării este un multiplu al c.m.m.m.c. al numărului nivelelor de variație a factorilor  $N = 24$  de încercări. Cercetarea experimentală a decurs conform metodologiei prezentate la paragraful 4.2.

Matricea-program a experimentării s-a realizat prin distribuția aleatoare a nivelelor factorilor de influență și a ordinii de efectuare a încercărilor fiind prezentată în tabelul 4.2, împreună cu valorile primare măsurate ale lui  $R_{af}$ , respectiv calculate ale lui  $Q$ . Pentru o imagine intuitivă a influenței factorilor și pentru selectarea vizuală a factorilor semnificativi se realizează o ierarhie primară, înainte de eliminarea, respectiv corecția interacțiunilor din sistem în fig.4.15 prin trasarea diagramelor de distribuție pentru cele două funcții obiectiv. Aplicându-se programul scris în limbaj Pascal pentru prelucrarea statistică a datelor experimentale prin metoda bilanțului aleator, descris în [T7], s-au întocmit tabelele centralizatoare (tabelul 4.3 și tabelul 4.4) pentru fiecare din funcțiile

Tabelul 4.2 Matrice program pentru bilanț aleator

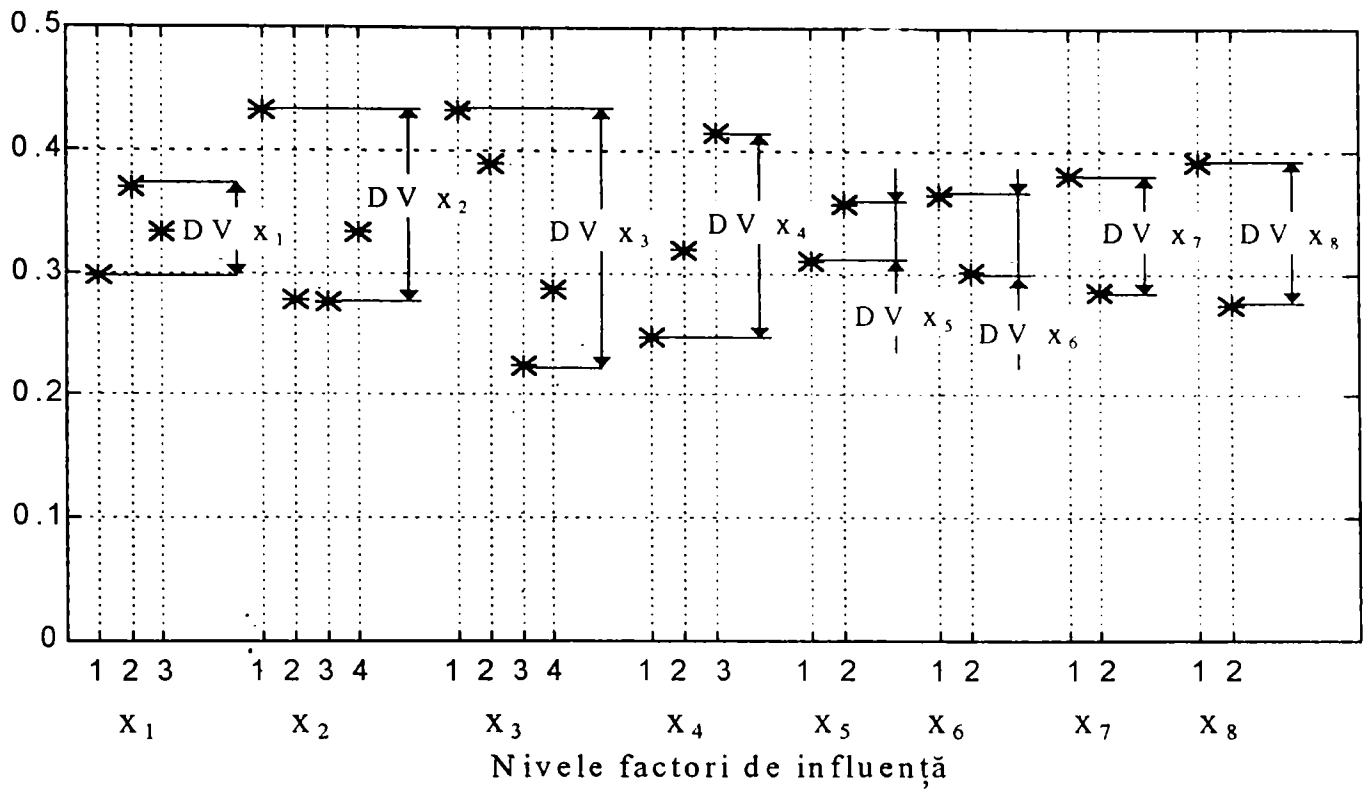
Numărul încercării	Nivele factori de influență								Valori funcție obiectiv	
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>	x <sub>7</sub>	x <sub>8</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>
1	2	2	4	3	2	1	1	1	0.3275	0.1436
2	3	1	2	3	1	2	2	2	0.2675	0.1732
3	1	3	4	2	1	2	2	1	0.4875	0.1356
4	1	1	2	2	2	1	2	2	0.2725	0.1727
5	3	1	1	3	2	2	2	1	0.6800	0.5040
6	3	4	1	3	2	1	1	2	0.5000	0.3000
7	1	3	3	1	2	2	2	2	0.1400	0.1240
8	3	1	1	1	2	1	1	1	0.5100	0.5380
9	2	2	4	2	1	2	2	1	0.2175	0.1492
10	3	3	3	2	2	2	1	1	0.1800	0.2013
11	3	3	3	1	2	1	2	2	0.1250	0.1250
12	3	4	3	3	1	2	2	2	0.2075	0.1195
13	3	4	1	2	1	1	2	2	0.1975	0.3005
14	2	2	1	2	2	1	2	1	0.2475	0.5905
15	2	4	2	1	1	1	2	1	0.2475	0.2952
16	1	1	2	1	2	2	2	2	0.3400	0.1660
17	2	1	2	3	1	1	1	2	0.6025	0.1397
18	2	4	4	1	1	1	1	1	0.2425	0.1479
19	2	4	2	3	1	1	1	1	0.6050	0.2595
20	1	2	3	2	2	1	1	1	0.4925	0.1805
21	2	3	1	2	2	2	1	1	0.4600	0.5480
22	1	3	4	3	1	2	1	2	0.2650	0.0967
23	1	2	4	1	1	2	1	2	0.1825	0.0909
24	1	2	3	1	1	2	1	2	0.1950	0.1203

obiectiv urmărite evidențiindu-se domeniul de variație (DV) al fiecărui factor și ierarhizarea acestora. Concluziile finale privind cei doi indicatori sunt prezentate în tabelul 4.5.

#### Concluzii în urma aplicării bilanțului aleator:

- rezultatele obținute sunt valabile exclusiv în condițiile date de prelucrare;
- comparând rezultatele obținute pentru cei doi indicatori se remarcă că timpul de prelucrare este factorul de influență principal în ambele cazuri;
- granulația influențează în cea mai mică măsură deoarece în timpul procesului de lepuire granulele mari se fărâmițează rapid, micșorându-și dimensiunile la nivel de micropulberi [B1],[K6];
- ponderea abrazivului în componența pastei de lepuire nu rezultă a fi un factor important pentru că pe parcursul prelucrării suprafața de contact între piesă și disc este destul de mică, cantitatea de abraziv din zona activă nu este cu mult mai mare cu creșterea

Rugozitate Ra [ $\mu\text{m}$ ]



Productivitate Q [ $\mu\text{m}/\text{min}$ ]

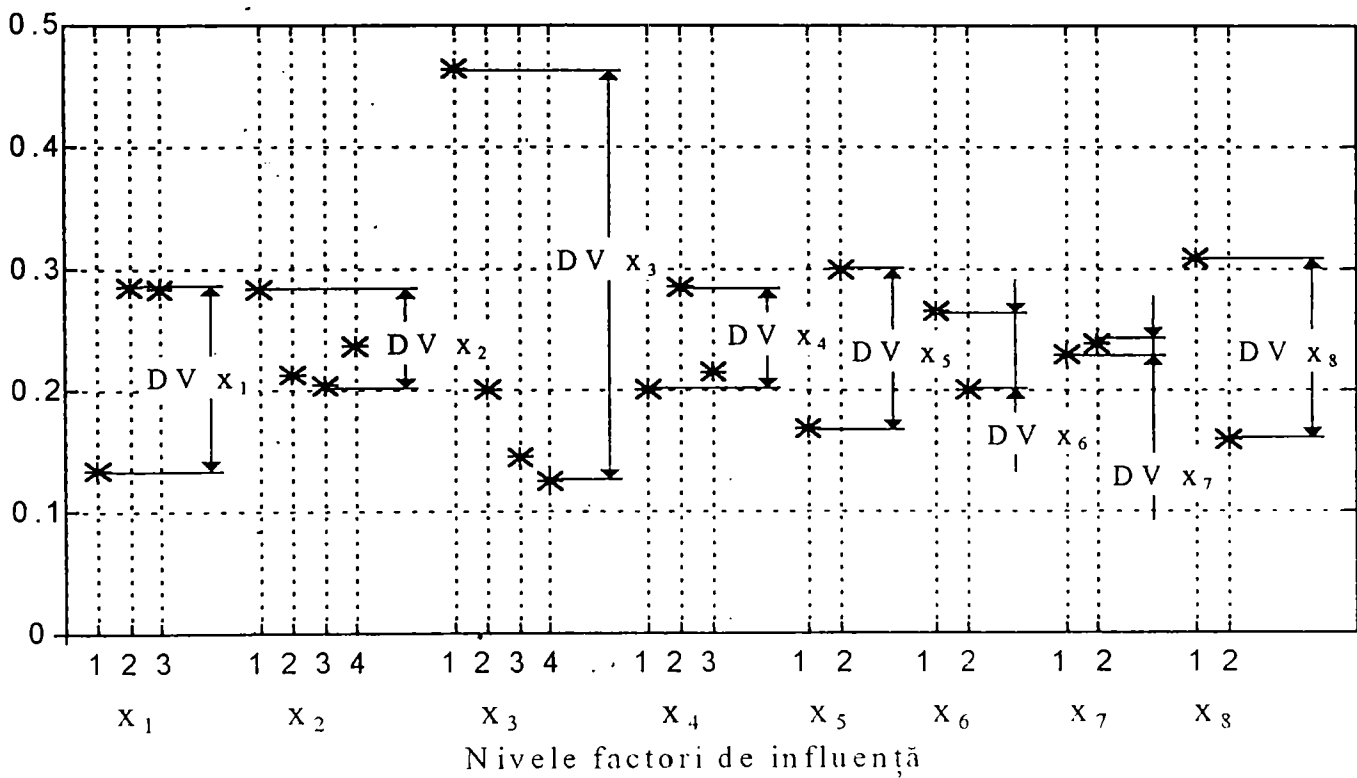


Fig.4.15 Diagrame de distribuție a rugozității suprafeței și a productivității prelucrării în funcție de nivelul factorilor de influență

Tabelul 4.3 Valorile funcțiilor de ierarhizare pentru indicatorul  $y_1$

Etapa	Nivel factori de influență	Valori medii funcție obiectiv $y_1$							
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$
I	1	0.2969	0.4454	0.4325	0.2478	0.3098	0.3642	0.3802	0.3915
	2	0.3688	0.2771	0.3892	0.3194	0.3563	0.3019	0.2853	0.2746
	3	0.3334	0.2763	0.2233	0.4319	-	-	-	-
	4	-	0.3333	0.2871	-	-	-	-	-
	DV	0.0719	0.1692	0.2092	0.1841	0.0465	0.0623	0.0944	0.1169
II	1	0.3412	0.3748	-	0.2740	0.3202	0.3382	0.3887	0.3825
	2	0.3401	0.3200	-	0.3140	0.3458	0.3278	0.2773	0.2835
	3	0.3178	0.3298	-	0.4111	-	-	-	-
	4	-	0.3074	-	-	-	-	-	-
	DV	0.0234	0.0674	-	0.1372	0.0256	0.0104	0.1114	0.0990
III	1	0.3681	0.3686	-	-	0.3121	0.3382	0.3806	0.3873
	2	0.3327	0.3362	-	-	0.3539	0.3278	0.2854	0.2787
	3	0.2983	0.3460	-	-	-	-	-	-
	4	-	0.2912	-	-	-	-	-	-
	DV	0.0698	0.0674	-	-	0.0418	0.0104	0.0952	0.1086
IV	1	0.3953	0.3767	-	-	0.3212	0.3392	0.3716	-
	2	0.2920	0.3181	-	-	0.3449	0.3369	0.2945	-
	3	0.3119	0.3460	-	-	-	-	-	-
	4	-	0.2912	-	-	-	-	-	-
	DV	0.1033	0.0855	-	-	0.0237	0.0077	0.0771	-
V	1	-	0.3734	-	-	0.3228	0.3464	0.3732	-
	2	-	0.3086	-	-	0.3432	0.3196	0.2928	-
	3	-	0.3288	-	-	-	-	-	-
	4	-	0.3223	-	-	-	-	-	-
	DV	-	0.0659	-	-	0.0204	0.0268	0.0804	-
VI	1	-	0.3868	-	-	0.3228	0.3397	-	-
	2	-	0.2942	-	-	0.3432	0.3263	-	-
	3	-	0.3288	-	-	-	-	-	-
	4	-	0.3223	-	-	-	-	-	-
	DV	-	0.0927	-	-	0.0204	0.0134	-	-
VII	1	-	-	-	-	0.3287	0.3408	-	-
	2	-	-	-	-	0.3373	0.3253	-	-
	DV	-	-	-	-	0.0086	0.0155	-	-
Ierarhizare		4	6	1	2	8	7	5	3

Tabelul 4.4 Valorile funcției de ierarhizare pentru indicatorul  $y_2$

Etapa	Nivel factori de influență	Valori medii funcție obiectiv $y_2$							
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$
I	1	0.1346	0.2823	0.4635	0.2009	0.1682	0.2661	0.2297	0.3078
	2	0.2842	0.2125	0.2011	0.2848	0.2995	0.2016	0.2380	0.1599
	3	0.2827	0.2035	0.1451	0.2158	-	-	-	-
	4	-	0.2371	0.1256	-	-	-	-	-
	DV	0.1496	0.0788	0.3379	0.0839	0.1313	0.0645	0.0082	0.1479
II	1	0.2166	0.2276	-	0.2407	0.2198	0.2344	0.2360	0.2875
	2	0.2796	0.2579	-	0.2520	0.2478	0.2333	0.2317	0.1801
	3	0.2052	0.2456	-	0.2088	-	-	-	-
	4	-	0.2043	-	-	-	-	-	-
	DV	0.0744	0.0536	-	0.0432	0.0280	0.0011	0.0043	0.1074
III	1	0.2435	0.2455	-	0.2541	0.2288	0.2243	0.2406	-
	2	0.2394	0.2400	-	0.2251	0.2389	0.2433	0.2270	-
	3	0.2187	0.2456	-	0.2222	-	-	-	-
	4	-	0.2043	-	-	-	-	-	-
	DV	0.0248	0.0413	-	0.0319	0.0101	0.0190	0.0136	-
IV	1	0.2339	-	-	0.2541	0.2357	0.2312	0.2275	-
	2	0.2452	-	-	0.2207	0.2320	0.2364	0.2402	-
	3	0.2224	-	-	0.2267	-	-	-	-
	DV	0.0228	-	-	0.0335	0.0037	0.0052	0.0127	-
V	1	0.2295	-	-	-	0.2352	0.2312	0.2270	-
	2	0.2478	-	-	-	0.2325	0.2364	0.2407	-
	3	0.2242	-	-	-	-	-	-	-
	DV	0.0235	-	-	-	0.0026	0.0052	0.0137	-
VI	1	-	-	-	-	0.2332	0.2282	0.2476	-
	2	-	-	-	-	0.2345	0.2395	0.2250	-
	DV	-	-	-	-	0.0013	0.0113	0.0176	-
VII	1	-	-	-	-	0.2232	0.2297	-	-
	2	-	-	-	-	0.2345	0.2380	-	-
	DV	-	-	-	-	0.0013	0.0084	-	-
Ierarhizare		5	3	1	4	8	7	6	2

Ierarhizare	Funcție obiectiv	
	$y_1$	$y_2$
1	$x_3 \Leftrightarrow t$	$x_3 \Leftrightarrow t$
2	$x_4 \Leftrightarrow Abr.$	$x_8 \Leftrightarrow R_{ai}$
3	$x_8 \Leftrightarrow R_{ai}$	$x_2 \Leftrightarrow p$
4	$x_1 \Leftrightarrow P$	$x_4 \Leftrightarrow Abr.$
5	$x_7 \Leftrightarrow HRC$	$x_1 \Leftrightarrow P$
6	$x_2 \Leftrightarrow p$	$x_7 \Leftrightarrow HRC$
7	$x_6 \Leftrightarrow Conc.$	$x_6 \Leftrightarrow Conc.$
8	$x_5 \Leftrightarrow Gran.$	$x_5 \Leftrightarrow Gran.$

Concluzii privind indicatorii  $y_1$  și  $y_2$

Tabelul 4.5 Ordinea în care factorii de influență  $x_i$ ,  $i = 1 \dots 8$ , au importanță asupra funcției  $y_1$  și  $y_2$ .



concentrației în abraziv a pastei, dar și datorită faptului că sub acțiunea forțelor centrifuge o parte din pastă tinde să fie expulzată spre exterior [K6];

- presiunea statică de contact are o pondere mult mai mare asupra productivității, decât asupra rugozității finale, deoarece cu creșterea forței de apăsare se intensifică prelevarea de material, dar și procesul de micșorare a diametrului echivalent al granulelor abrazive [H2];
- natura abrazivului determină într-o mare măsură calitatea finală a suprafeței prelucrate, și ceva mai puțin productivitatea prelucrării, abrazivii se comportă diferit nu numai datorită durităților diferite (pe scara Mohs) dar și a caracteristicilor de fragilitate diferite ale acestora [P9],[Ş1];
- rugozitatea inițială influențează hotărâtor prelevarea de material și aproape la fel rugozitatea finală;
- starea tratată sau nu a materialului piesei nu intervine preponderent în analiza indicatorilor vizați deoarece lepuierea se pretează diferitelor durități ale materialului prelucrat [P9];
- aplicarea unui câmp ultrasonor, caracterizat de puterea ultrasonică introdusă în proces, are efecte pozitive din punct de vedere al ambilor indicatori, prin intensificarea fenomenelor din spațiul de lucru [K7],[K8],[C7].

Factorii de influență *considerați semnificativi* pentru ambele funcții obiectiv vor fi incluși într-un experiment factorial care să conducă la obținerea modelului funcțiilor de răspuns analizate. Pentru un volum al experimentărilor rezonabil se vor lua ca semnificativi primii cinci factori, dar se poate observa că nu sunt toți aceiași pentru ambii indicatori și nu au toți același ordin de influență. *Timpul de prelucrare, natura abrazivului, rugozitatea inițială* se regăsesc la fiecare, diferă *puterea ultrasonică* găsită la rugozitate pe locul patru, dar aflată pe locul cinci la productivitate și *presiunea de contact* aflată pe locul trei la productivitate, dar pe locul șase la rugozitate. Rugozitatea este indicator prioritar deoarece productivitatea este dependentă de rugozitate fiind calculată în funcție de aceasta. Analizând ordinea factorilor de influență asupra rugozității, al cincilea factor semnificativ ar trebui să fie duritatea piesei, dar având în vedere importanța presiunii de contact în ierarhia pentru productivitate, va fi luat în studiu acest factor.

Observațiile din timpul prelucrărilor și după rezultatele obținute prin bilanțul aleator efectuat duc la concluzia că ar trebui modificate anumite nivele de variație a factorilor de influență:

- ⇒ pentru puterea de activare să se aleagă un interval de variație mai mare;
- ⇒ pentru apropierea de condițiile specifice lepuirii, treapta inferioară pentru rugozitatea inițială ar trebui micșorată;
- ⇒ datorită împrăștierii mediului abraziv, ar trebui să se aleagă un fluid purtător cu vâscozitate mai mare.

## 4.4 Modelarea experimentală prin experiment factorial

### 4.4.1 Proiectarea și realizarea experimentului

Obiectivul principal al cercetării experimentale efectuate constă în investigarea mai multor funcții obiectiv ce caracterizează calitatea suprafețelor prelucrate prin leuire activată ultrasonic din punct de vedere al indicatorilor de rugozitate și de formă a neregularităților profilului suprafeței. Programul experimental, organizat pe principiile planificării factoriale a experimentelor, oferă posibilitatea obținerii unor modele empirice pentru domeniul factorilor de influență analizați, în condițiile unui număr redus de încercări, asigurându-se o eficiență ridicată a experimentării [N8],[C3],[C4].

Modelarea experimentală prin experiment factorial de ordinul I conduce la determinarea unor modele empirice regresionale sub forma unor polinoame algebrice de ordinul I cu următoarea formă:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{u,i=1}^k b_{ui} \cdot x_u \cdot x_i; u \neq i \quad (4.2)$$

în care  $y$  este funcția obiectiv analizată,  $k$  - numărul factorilor de influență  $x_i$  considerați,  $b_0$  - termenul liber al ecuației de regresie, asociat unei variabile de calcul  $x_0$ ,  $b_i, b_{i,u}$  - coeficienți de regresie a factorilor de influență  $x_i$  asupra funcției de răspuns  $y$ . Valoarea numerică și semnul coeficienților de regresie oferă informații asupra influenței exercitate de factori asupra funcției obiectiv.

Experimentul urmărește analiza mai multor funcții obiectiv, funcții care au fost definite la paragraful 3.1:  $y_1 \Leftrightarrow R_a$ ,  $y_2 \Leftrightarrow Q_s$ ,  $y_3 \Leftrightarrow R_q$ ,  $y_4 \Leftrightarrow R_z$ ,  $y_5 \Leftrightarrow R_p$ ,  $y_6 \Leftrightarrow R_y$ ,  $y_7 \Leftrightarrow S_m$ ,  $y_8 \Leftrightarrow k_{PR}$ ,  $y_9 \Leftrightarrow k_R$ ,  $y_{10} \Leftrightarrow k_{as}$ ,  $y_{11} \Leftrightarrow k_{ex}$ ,  $y_{12} \Leftrightarrow t_{p0,5}$ ,  $y_{13} \Leftrightarrow n$ ,  $y_{14} \Leftrightarrow r$ ,  $y_{15} \Leftrightarrow \theta$ . Funcțiile obiectiv investigate pot fi grupate pe următoarele categorii:

- indicatori de înălțime a microneregularităților profilului:*  $y_1 \Leftrightarrow R_a$ ,  $y_3 \Leftrightarrow R_q$ ,  $y_4 \Leftrightarrow R_z$ ,  $y_6 \Leftrightarrow R_y$ .
- indicatori de formă a profilului suprafeței:*  $y_8 \Leftrightarrow k_{PR}$ ,  $y_9 \Leftrightarrow k_R$ ,  $y_{10} \Leftrightarrow k_{as}$ ,  $y_{11} \Leftrightarrow k_{ex}$ ,  $y_{14} \Leftrightarrow r$ ,  $y_{15} \Leftrightarrow \theta$ .
- indicatori funcționali:*  $y_{12} \Leftrightarrow t_{p0,5}$ . S-a ales procentajul lungimii portante la un nivel de secționare de 50%, ce corespunde zonei uzurilor normale.
- indicatori tehnologici și funcționali:*  $y_2 \Leftrightarrow Q_s$ .

Pe baza rezultatelor obținute în urma aplicării bilanțului aleator și a observațiilor făcute în timpul experimentărilor s-au selectat factorii de influență ce urmează a fi luați în considerare în modelarea prin experiment factorial (fig.4.16). Noile notații sunt:

- $\Rightarrow x_1$  - timp de prelucrare  $t$  [min]
- $\Rightarrow x_2$  - natura abrazivului [duritate Mohs]
- $\Rightarrow x_3$  - rugozitate inițială  $R_{ai}$  [ $\mu\text{m}$ ]
- $\Rightarrow x_4$  - putere de activare ultrasonică  $P$  [W]
- $\Rightarrow x_5$  - presiune de contact  $p$  [MPa].

Stabilirea domeniului de experimentare definit prin nivelul de bază și intervalul de variație pentru fiecare factor este prezentată în tabelul 4.6. Nivelele extreme se încadrează în intervalele considerate la bilanțul aleator, criteriul de alegere fiind obținerea unor rugozități minime cu productivități mai mari conform diagramei primare din fig.4.15. Doar pentru rugozitatea inițială s-a micșorat nivelul minim corespunzător suprafețelor rectificate.

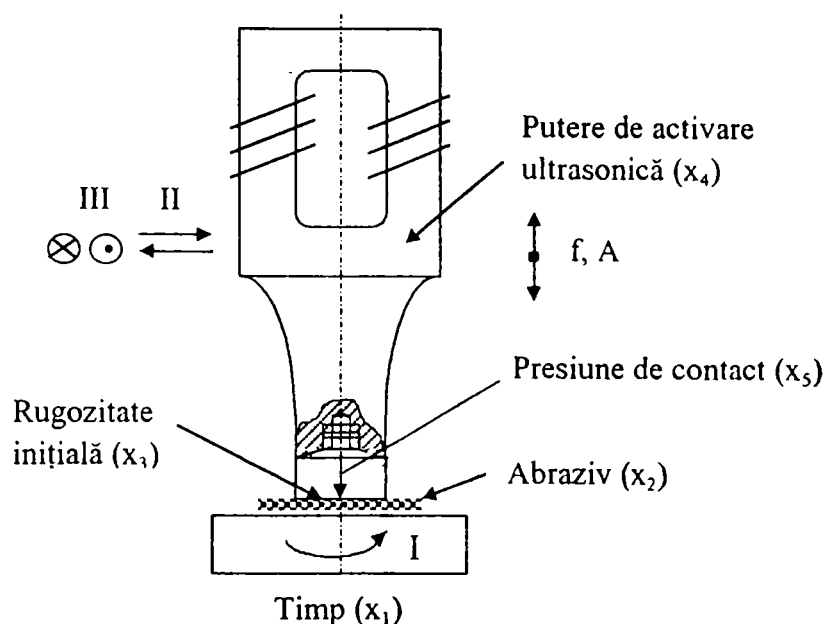


Fig.4.16 Schema de principiu a instalației experimentale cu indicarea factorilor de influență selectați pentru experimentul factorial

Tabelul 4.6 Factorii de influență, intervalele de variație ale acestora și coordonatele punctului central

Parametru	Valoare codificată	Valoare fizică				
		$x_1$ t [min]	$x_2$ Abr [duritate Mohs]	$x_3$ $R_{ai}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$x_4$ P [W]	$x_5$ p [MPa]
Punct central	0	12	9.3	2.0	25	0.0865
Interval de variație	$\Delta$	4	0.3	1.2	25	0.0235
Nivel superior	+1	16	B <sub>4</sub> C-9.6	3.2	50	0.110
Nivel inferior	-1	8	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -9.0	0.8	0	0.063

Ceilalți factori stabiliți ca nesemnificativi rămân ca parametri: se alege granulația abrazivului Nr.5, care a condus la rugozități mai mici, concentrația 1:2, în intervalul considerat în bilanțul aleator și semifabricate din același material OSC 8, netratate termic. S-a ales varianta semifabricatelor în stare netratată, deci cu duritate mai mică, datorită faptului că la fixarea piesei în concentratorul ultrasonic trebuie realizat un contact acustic cât mai bun, dar apare următorul neajuns: în urma tratamentului termic, partea filetată a piesei este un concentrator de tensiune și după strângerea piesei și activarea cu ultrasunete există riscul apariției fisurilor în această zonă. O altă modificare este schimbarea lichidului suport al pastei abrazive: de la ulei industrial s-a trecut la vaselină,

datorită comportării mai bune a acesteia în ceea ce privește omogenitatea pastei și menținerii acesteia în zona de lucru.

Deoarece se iau în considerare primii patru factori semnificativi pentru  $R_a$  și încă un factor dedus ca semnificativ din punct de vedere a productivității prelucrării fără a suplimenta numărul de încercări, datorită timpilor mari de pregătire-încheiere, se proiectează un experiment factorial fracționat  $2^{5-1}$ , având un volum  $N = 16$  încercări plus trei replici în punctul central al experimentului. Ca raport generator se alege cel corespunzător lui  $x_5$ , rezultând generatorul de contraste  $I = 1234$ . Experimentul realizat are rezoluția IV și ordinea de efectuare a încercărilor se randomizează. Matricea-program a experimentului și valorile funcțiilor obiectiv  $y_1, y_2$  apar în tabelul 4.7 și în continuare restul funcțiilor obiectiv în tabelul 4.8.

Tabelul 4.7 Matricea program a experimentului factorial  $2^{5-1}$

Numărul încercării	Nivele codificate ale factorilor de influență					Valori funcție obiectiv	
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$y_1 \Leftrightarrow R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$y_2 \Leftrightarrow Q_s$ [%]
1	0	0	0	0	0	0.540	70.0
2	+1	-1	-1	-1	-1	0.260	47.5
3	+1	+1	-1	+1	-1	0.225	71.9
4	-1	-1	+1	-1	-1	0.665	79.2
5	-1	+1	+1	+1	-1	0.710	77.8
6	-1	-1	-1	+1	-1	0.485	39.3
7	+1	-1	-1	+1	+1	0.160	80.0
8	+1	+1	-1	-1	+1	0.625	21.9
9	+1	+1	+1	+1	+1	0.545	82.9
10	0	0	0	0	0	0.541	70.4
11	-1	+1	-1	-1	+1	0.395	50.6
12	+1	-1	+1	+1	-1	0.470	85.3
13	-1	+1	-1	-1	-1	0.780	2.5
14	-1	+1	+1	-1	+1	0.675	78.9
15	-1	-1	-1	-1	+1	0.490	38.7
16	-1	-1	+1	+1	+1	0.365	88.6
17	+1	-1	+1	-1	+1	0.310	90.3
18	+1	+1	+1	-1	-1	0.790	75.3
19	0	0	0	0	0	0.542	70.8

#### 4.4.2 Determinarea modelului matematic pentru funcțiile obiectiv analizate

Prelucrarea datelor experimentale obținute s-a realizat utilizând programul STATGRAPHICS [\*10], pe baza metodologiei din literatura de specialitate [N8],[C4]. Pentru fiecare funcție obiectiv s-au determinat următoarele (tabelele 4.9, 4.10):

- factorii de influență și interacțiunile de ordinul I semnificative, pentru pragul de semnificație  $\alpha = 0.05$ ;
- coeficienții polinomului de regresie;

Tabelul 4.8 Valori ale funcțiilor obiectiv determinate pentru experimentul factorial

Nr. crt.	Funcții obiectiv														
	$y_3 \leftrightarrow R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$y_4 \leftrightarrow R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$y_5 \leftrightarrow R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$y_6 \leftrightarrow R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$y_7 \leftrightarrow S_m$ [mm]	$y_8 \leftrightarrow k_{PR}$ [-]	$y_9 \leftrightarrow k_R$ [mm/ $\mu\text{m}$ ]	$y_{10} \leftrightarrow k_{AS}$ [-]	$y_{11} \leftrightarrow k_{ex}$ [-]	$y_{12} \leftrightarrow t_{p0.5}$ [%]	$y_{13} \leftrightarrow n$ [mm <sup>-1</sup> ]	$y_{14} \leftrightarrow r$ [mm]	$y_{15} \leftrightarrow \theta$ [°]		
1	0.648	2.137	1.262	2.755	0.398	0.672	0.191	-0.075	-0.804	43.92	5.62	4.56	0.695		
2	0.316	1.022	0.716	1.425	0.443	0.699	0.434	0.041	-0.556	50.50	4.75	9.94	0.283		
3	0.267	0.936	0.612	1.252	0.417	0.654	0.446	-0.117	-0.807	51.90	5.00	10.92	0.258		
4	0.823	2.989	1.981	3.810	0.269	0.663	0.090	0.004	-0.507	44.40	6.75	3.11	1.029		
5	0.903	3.474	2.368	5.030	0.327	0.682	0.094	0.076	0.197	56.80	7.00	3.14	1.139		
6	0.611	1.885	1.506	2.912	0.496	0.799	0.263	-0.153	-0.174	47.55	4.25	6.34	0.472		
7	0.197	0.696	0.577	1.035	0.372	0.829	0.535	0.210	-0.123	37.60	4.75	16.66	0.174		
8	0.778	2.872	1.642	4.055	0.315	0.572	0.110	-0.391	0.120	70.20	6.5	3.84	0.931		
9	0.667	2.143	1.852	3.318	0.273	0.864	0.128	0.256	-0.318	39.00	6.75	4.08	0.843		
10	0.654	2.244	1.312	3.080	0.361	0.706	0.171	-0.040	-0.437	46.12	5.81	4.18	0.72		
11	0.494	1.757	1.475	2.673	0.328	0.839	0.187	0.567	0.394	32.50	6.00	4.78	0.543		
12	0.610	2.222	1.446	3.504	0.247	0.651	0.111	-0.488	0.784	71.70	8.00	2.76	0.862		
13	0.896	3.012	2.001	3.772	0.526	0.664	0.175	0.089	-1.091	45.35	4.25	4.37	0.760		
14	0.726	2.607	1.654	3.775	0.435	0.634	0.167	-0.558	-0.390	62.85	5.00	4.45	0.773		
15	0.641	2.292	1.401	3.304	0.229	0.611	0.100	-0.444	0.367	71.05	7.25	3.57	0.898		
16	0.451	1.573	0.906	2.027	0.286	0.576	0.182	0.054	-0.608	58.25	8.00	5.14	0.565		
17	0.377	1.465	0.879	1.727	0.241	0.599	0.164	-0.055	-0.663	50.70	7.00	3.33	0.497		
18	0.932	2.922	1.839	3.757	0.354	0.629	0.121	-0.168	-0.964	53.10	6.00	3.29	1.086		
19	0.659	2.351	1.460	3.405	0.323	0.740	0.150	-0.012	-0.237	48.32	6.00	3.81	0.745		

Tabelul 4.9 Valorile coeficienților de regresie și precizia de estimare a modelelor experimentale

Coeficient	Funcții obiectiv									
	$y_1 \leftrightarrow R_q$ [μm]	$y_2 \leftrightarrow Q_s$ [%]	$y_3 \leftrightarrow R_q$ [μm]	$y_4 \leftrightarrow R_z$ [μm]	$y_5 \leftrightarrow R_p$ [μm]	$y_6 \leftrightarrow R_y$ [μm]	$y_7 \leftrightarrow S_m$ [mm]			
$b_0$	0.50384	64.3158	0.61324	2.13679	1.20268	2.97979	0.35005			
$b_1$	-0.07375	6.2125	-0.08763	-0.33194	0.01088	-0.45188	-0.15375			
$b_2$	0.09625	-5.4500	0.10225	0.34869	0.30013	0.49300	0.03000			
$b_3$	0.06937	19.2500	0.08050	0.30769	0.05963	0.40750	-0.04888			
$b_4$	-0.07750	8.8750	-0.08050	-0.28094	-0.16513	-0.24213	-0.00613			
$b_5$	-0.05125	3.3125	-0.06425	-0.19106	0.11400	-0.22175	-0.03950			
$b_{12}$	0.02687	-0.9375	0.04075	0.08481	0.00225	0.09313	-0.02300			
$b_{13}$	0.03625	-5.0650	0.04800	0.09556	0.23800	0.15988	-0.00501			
$b_{14}$	0.00044	1.7625	-0.00225	-0.00456	0.10300	0.01025	0.00051			
$b_{15}$	0.03812	-3.9250	0.05100	0.20031	-0.08288	0.24638	0.00700			
$b_{23}$	0.01750	1.8750	0.01863	0.01344	-0.01900	0.10850	0.0180			
$b_{24}$	-0.04688	4.2000	-0.04463	-0.10694	-0.14575	-0.14363	-0.03575			
$b_{25}$	0.01813	-2.4625	0.02263	0.07044	0.06863	0.22300	-0.00088			
$b_{34}$	0.03375	-7.5250	0.05215	0.20956	0.16100	0.34338	-0.01238			
$b_{35}$	-0.04125	-0.4375	-0.06663	-0.28631	-0.04638	-0.43500	0.04650			
$b_{45}$	0.00188	0.1625	-0.00863	-0.10244	0.08063	-0.23388	0.09750			
Precizia de estimare	95.10	92.50	95.41	96.35	85.20	92.74	87.97			



Tabelul 4.10 Valorile coeficienților de regresie și precizia de estimare a modelelor experimentale. Continuare

Coeficient	Funcții obiectiv														
	$y_8 \Leftrightarrow k_{PR}$ [-]	$y_9 \Leftrightarrow k_R$ [mm/ $\mu\text{m}$ ]	$y_{10} \Leftrightarrow k_{as}$ [-]	$y_{11} \Leftrightarrow k_{ex}$ [-]	$y_{12} \Leftrightarrow t_{p0,5}$ [%]	$y_{13} \Leftrightarrow n$ [ $\text{mm}^{-1}$ ]	$y_{14} \Leftrightarrow r$ [mm]	$y_{15} \Leftrightarrow \theta$ [ $^\circ$ ]							
$b_0$	0.68858	0.20100	-0.06337	-0.29742	52.2532	5.95684	5.38263	0.69879							
$b_1$	0.001813	0.04944	-0.02168	-0.04475	0.37188	0.10938	1.24500	-0.07781							
$b_2$	0.00694	-0.02819	0.03656	-0.08613	-1.25313	-0.32813	-0.74875	0.09706							
$b_3$	-0.02306	-0.07456	-0.04256	-0.03750	1.88438	0.54688	-1.94500	0.15469							
$b_4$	0.05144	0.03656	0.11794	0.18925	-3.30313	0.04688	1.12000	-0.08756							
$b_5$	0.05188	-0.01063	0.02219	0.11863	0.05313	0.23438	0.12375	-0.04156							
$b_{12}$	-0.01433	-0.02669	-0.05256	-0.09013	1.71563	0.23438	-0.57125	0.06569							
$b_{13}$	0.02169	-0.05056	0.01781	0.06200	-1.34688	0.29688	1.54250	0.05056							
$b_{14}$	0.01094	0.01231	-0.06369	0.0105	0.26563	-0.07813	0.63250	0.00506							
$b_{15}$	0.02369	-0.01181	0.07181	-0.04863	-3.76563	-0.07813	0.00125	0.03606							
$b_{23}$	0.03396	0.02356	-0.02519	0.02613	-0.40938	-0.26563	0.82625	0.04394							
$b_{24}$	0.01606	-0.00131	0.10831	0.03463	-3.10935	0.42188	-0.24875	-0.00831							
$b_{25}$	0.02981	-0.20434	-0.02294	0.10025	-0.37813	-0.07813	-0.69500	0.02244							
$b_{34}$	-0.02044	-0.03994	-0.03356	0.13300	5.14065	0.54688	-1.00250	0.09056							
$b_{35}$	0.00081	0.03819	0.01194	-0.30463	-1.95313	-0.64063	0.46375	-0.13819							
$b_{45}$	0.03506	0.02481	0.19894	-0.20038	7.6281	-0.20313	0.81375	-0.03619							
Precizia de estimare	85.39	91.74	98.41	82.73	93.00	96.60	85.22	98.75							

- precizia de estimare a modelelor regresionale, dată de valoarea coeficientului de concordanță între valorile măsurate și cele estimate  $R^2$ .

Pentru completarea informațiilor și interpretarea rezultatelor obținute se dau următoarele reprezentări grafice (în care s-au utilizat notațiile FO – funcție obiectiv, FI – factori de influență):

- histograma efectelor factorilor de influență și a interacțiunilor de ordinul I, remarcându-se amplitudinea variației valorilor funcției obiectiv atunci când factorii de influență baleiază domeniul de experimentare între nivelul inferior și cel superior (fig.4.17...fig.4.31);
- diagrama efectelor factorilor de influență, ce evidențiază sensul variației valorilor funcției obiectiv atunci când factorii de influență parcurg domeniul între nivelul inferior și cel superior (fig.4.32...fig.4.46);
- diagrama concordanței între valorile măsurate și cele estimate cu ajutorul modelului calculat, ceea ce permite în plus o verificare a adecvantei modelului obținut (fig.4.47).

Dintre funcțiile obiectiv investigate se consideră de interes tehnologic deosebit: rugozitatea suprafeței  $R_a$ , productivitatea specifică  $Q_s$  și procentajul portant al suprafeței la un nivel de secționare de 50%  $t_{p0,5}$ .

- Pentru aceste funcții obiectiv au fost trasate suprafețele de răspuns pentru factorul de influență  $x_4 \Leftrightarrow P [W]$  și restul factorilor determinați ca semnificativi, grupați doi câte doi, restul factorilor aflându-se pe nivelul de bază și, în același mod, suprafețele de răspuns pentru interacțiunile stabilite ca semnificative iar pentru factorii sau interacțiunile mai importante se prezintă și curbele de nivel constant (fig.4.48...fig.4.67).

Profilogramele suprafețelor probelor rezultate în urma experimentului factorial pe baza cărora s-au măsurat și calculat funcțiile obiectiv sunt prezentate în fig.4.68a...fig.4.89 a. Procentajul lungimii portante în funcție de nivelul de secționare al profilului este dat în fig.4.68 b...fig.4.89 b .

Pentru o apreciere globală a rugozității suprafeței în paragraful următor se realizează un studiu statistic pe baza teoriei funcțiilor aleatoare, urmând a prezenta ulterior concluziile în urma modelării experimentale.

#### 4.4.3 Analiza profilului de rugozitate prin aplicarea teoriei funcțiilor aleatoare

Aplicarea teoriei funcțiilor aleatoare în studiul indicatorilor de rugozitate este o abordare curentă în prezent, permițând o apreciere mai sensibilă și mai completă a parametrilor de înălțime a profilului de rugozitate și a distribuției spațiale a neregularităților acestuia. Ea tratează profilul de rugozitate ca o serie temporală.

Studiul neregularităților profilului cu ajutorul funcțiilor aleatoare presupune [Z2]:

- ◆ *analiza distribuției înălțimii neregularităților profilului.* Verificarea normalității repartiției ordonatelor profilului suprafeței analizate se realizează prin comparația repartițiilor empirice cu cea teoretică - normală - și determinarea coeficienților de asimetrie și de exces a distribuției empirice în raport cu cea teoretică .

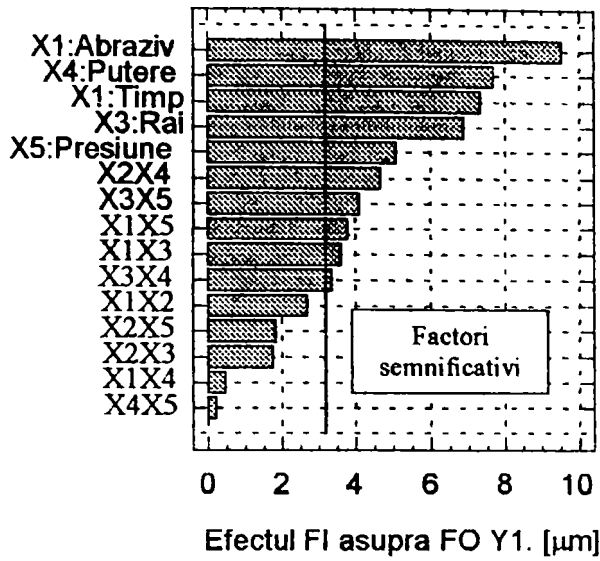


Fig.4.17 Histograma efectelor pentru  $y_1$

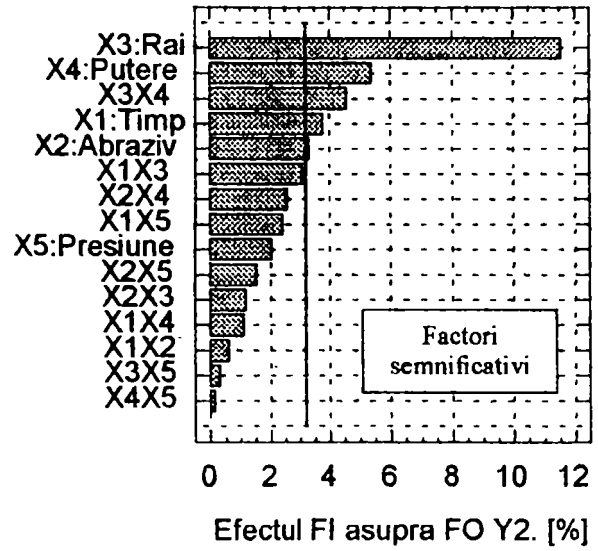


Fig.4.18 Histograma efectelor pentru  $y_2$

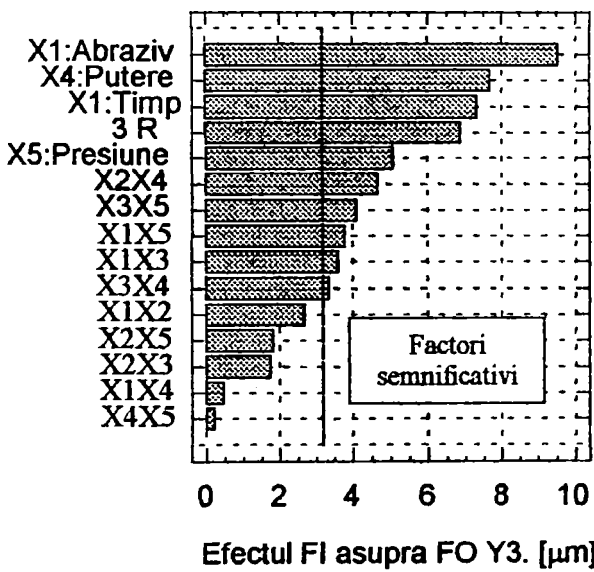


Fig.4.19 Histograma efectelor pentru  $y_3$

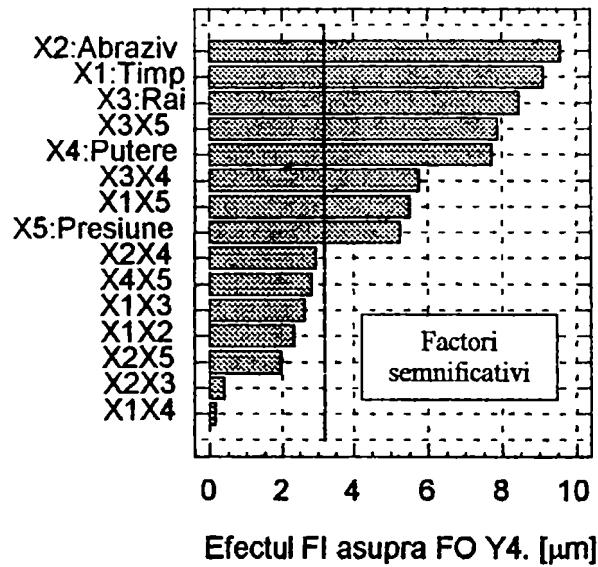


Fig.4.20 Histograma efectelor pentru  $y_4$

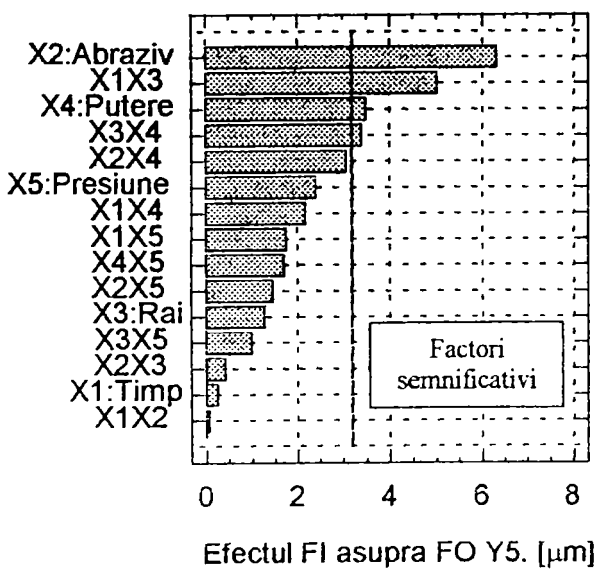


Fig.4.21 Histograma efectelor pentru  $y_5$

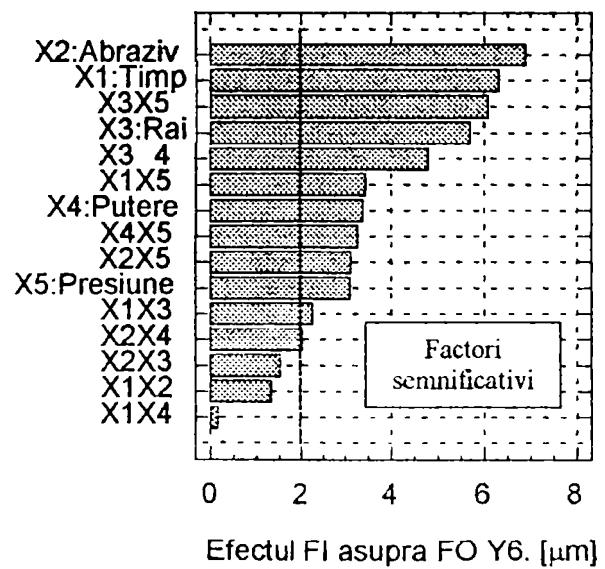


Fig.4.22 Histograma efectelor pentru  $y_6$

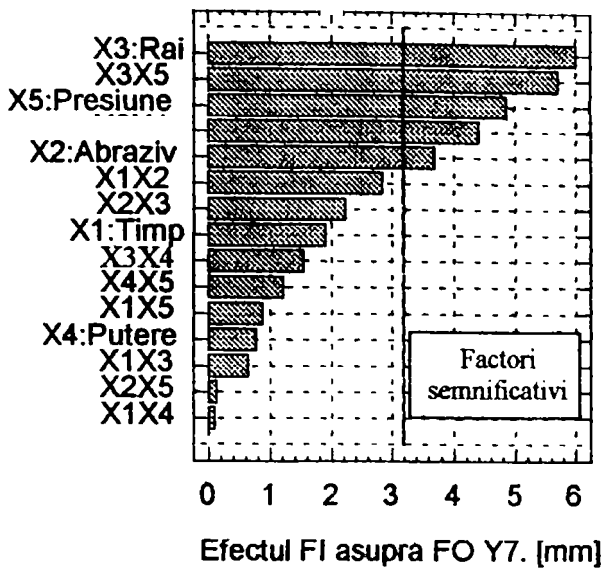


Fig.4.23 Histograma efectelor pentru  $y_7$

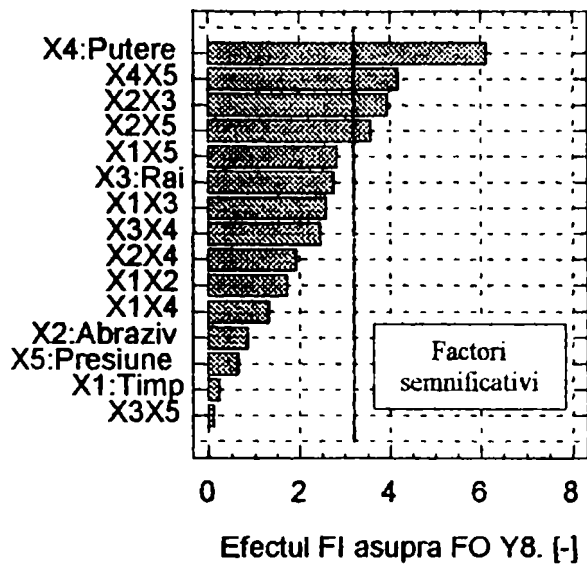


Fig.4.24 Histograma efectelor pentru  $y_8$

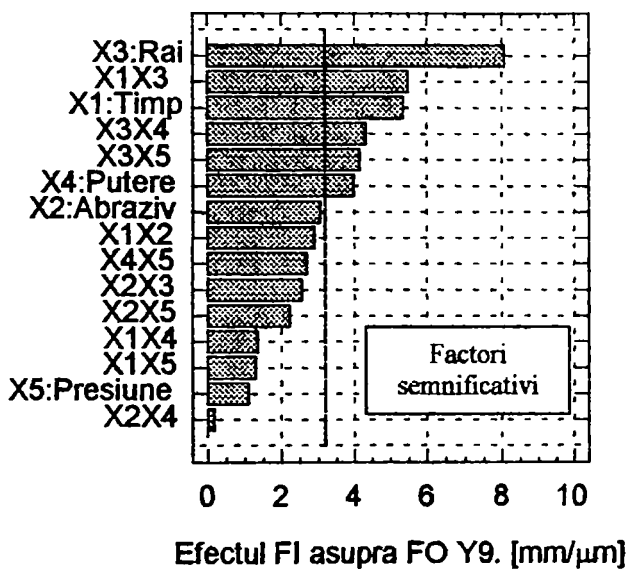


Fig.4.25 Histograma efectelor pentru  $y_9$

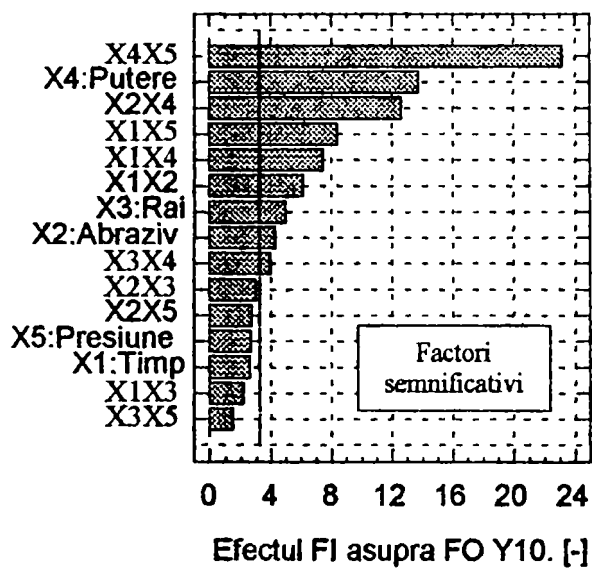


Fig.4.26 Histograma efectelor pentru  $y_{10}$

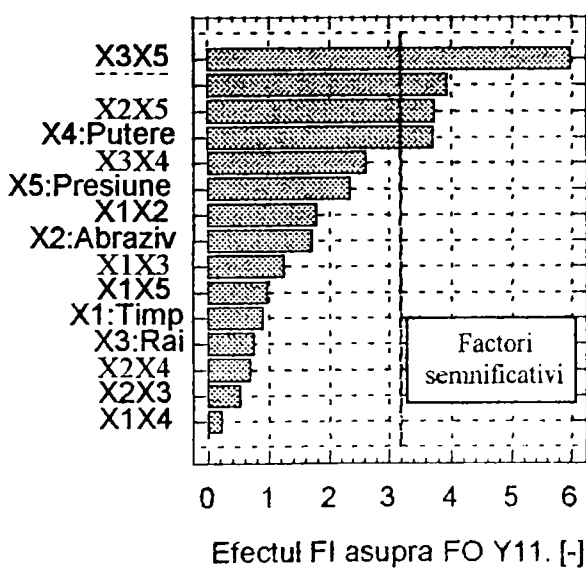


Fig.4.27 Histograma efectelor pentru  $y_{11}$

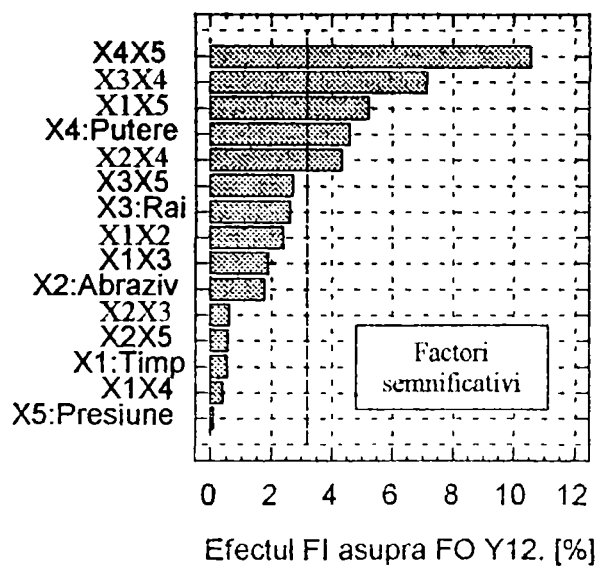


Fig.4.28 Histograma efectelor pentru  $y_{12}$

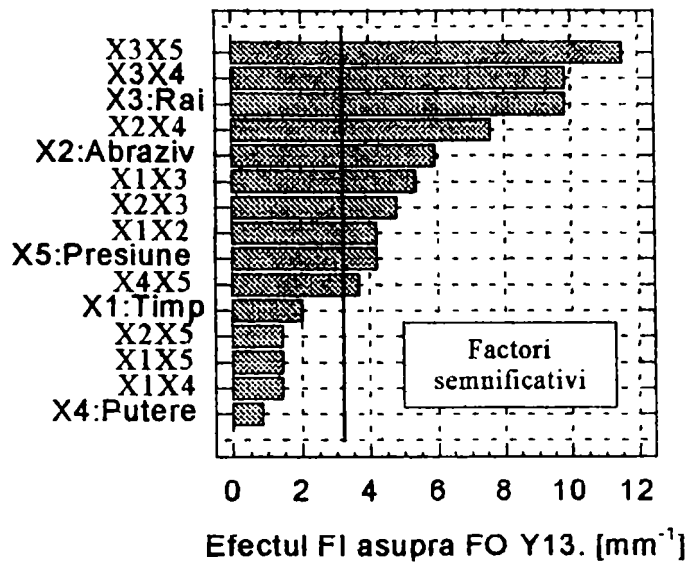


Fig.4.29 Histograma efectelor pentru y<sub>13</sub>

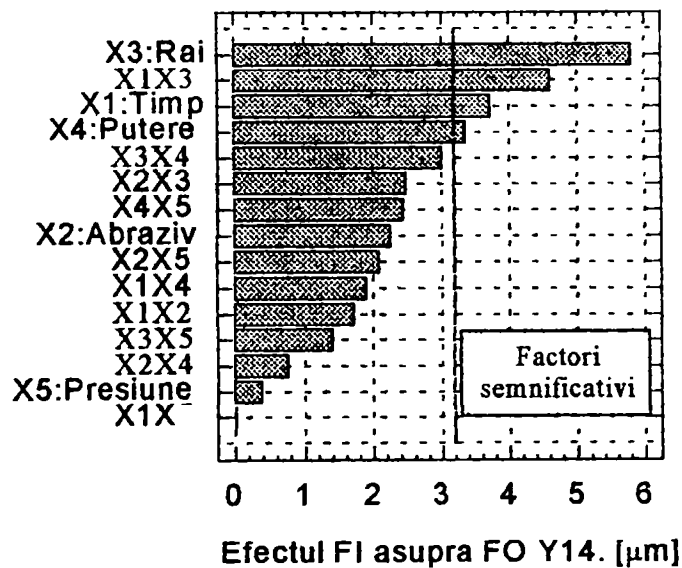


Fig.4.30 Histograma efectelor pentru y<sub>14</sub>

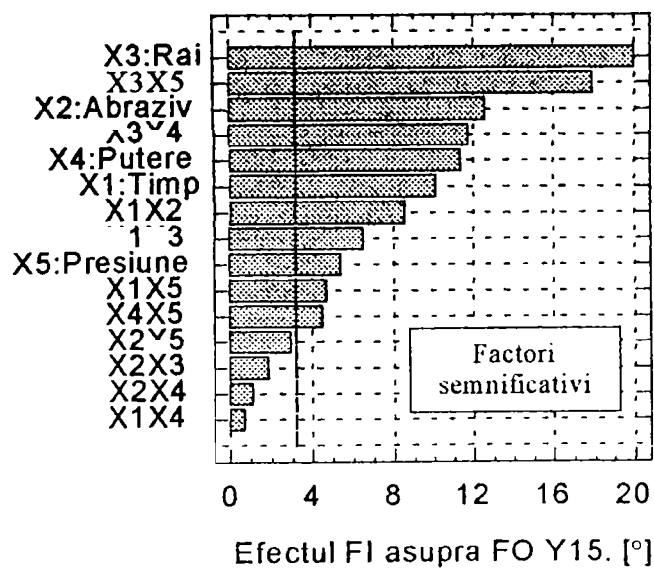


Fig.4.31 Histograma efectelor pentru y<sub>15</sub>



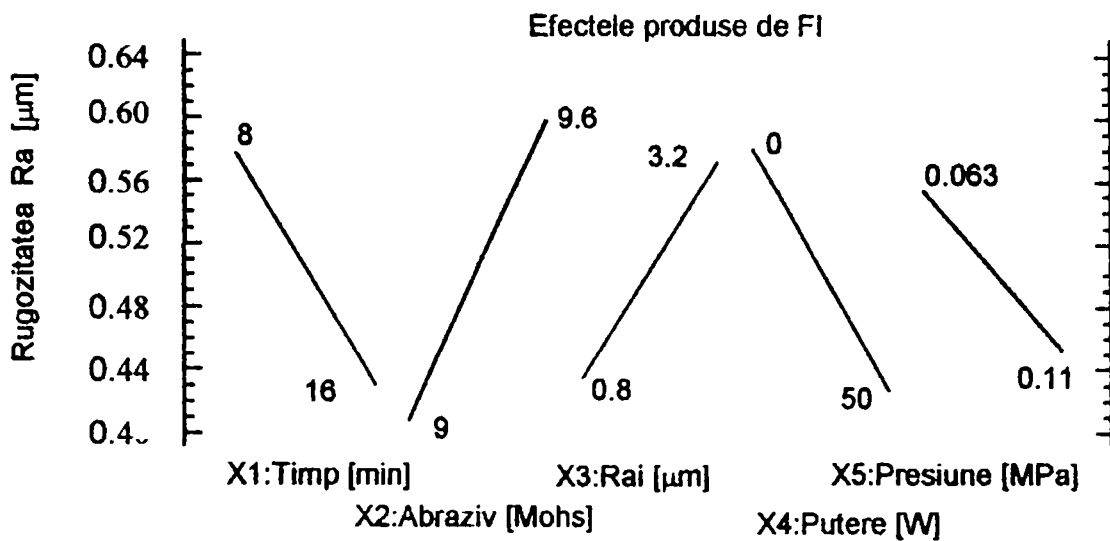


Fig.4.32 Variația efectelor principale pentru  $y_1$

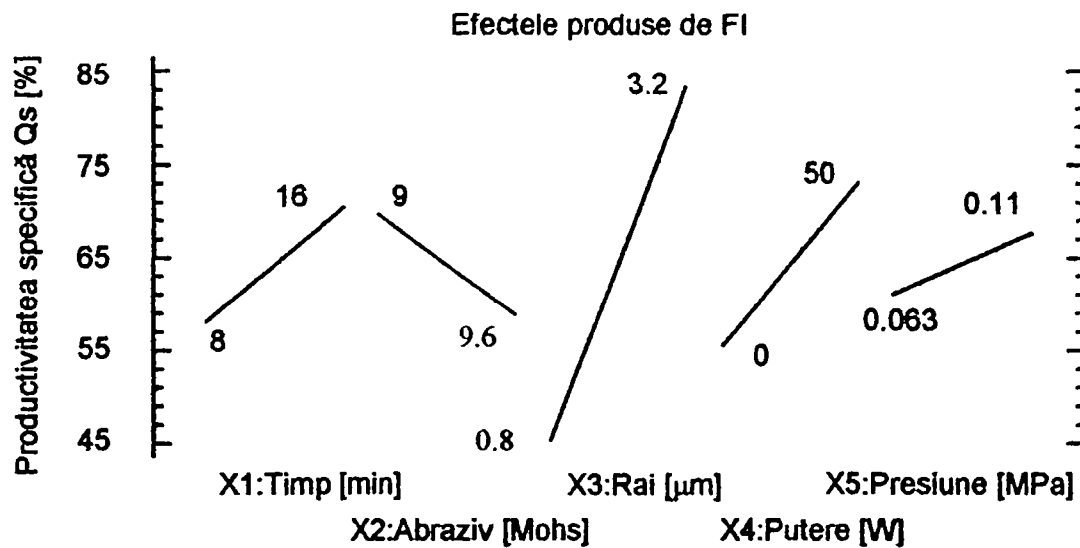


Fig.4.33 Variația efectelor principale pentru  $y_2$

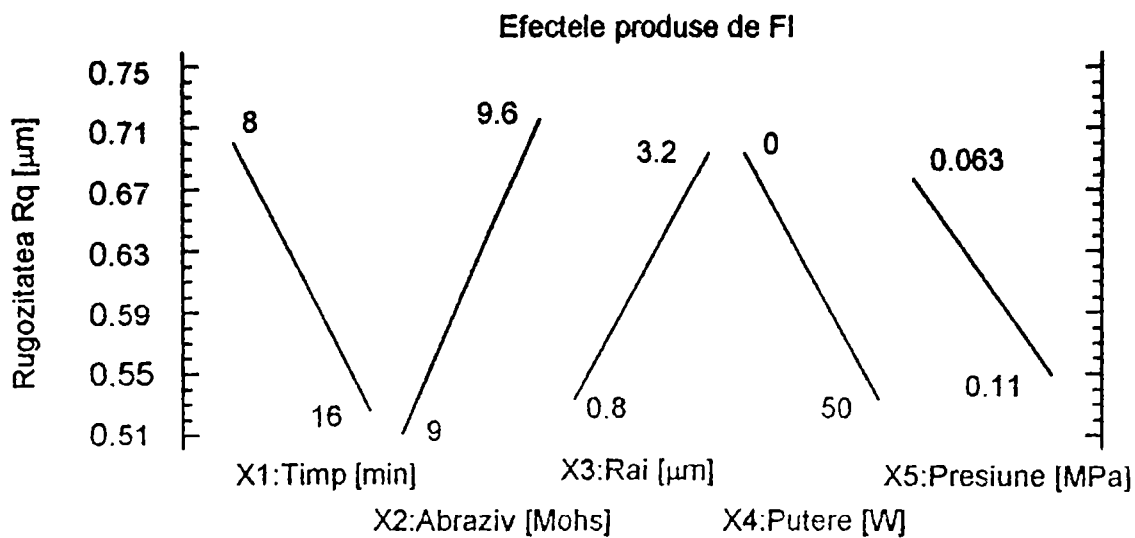


Fig.4.34 Variația efectelor principale pentru  $y_3$



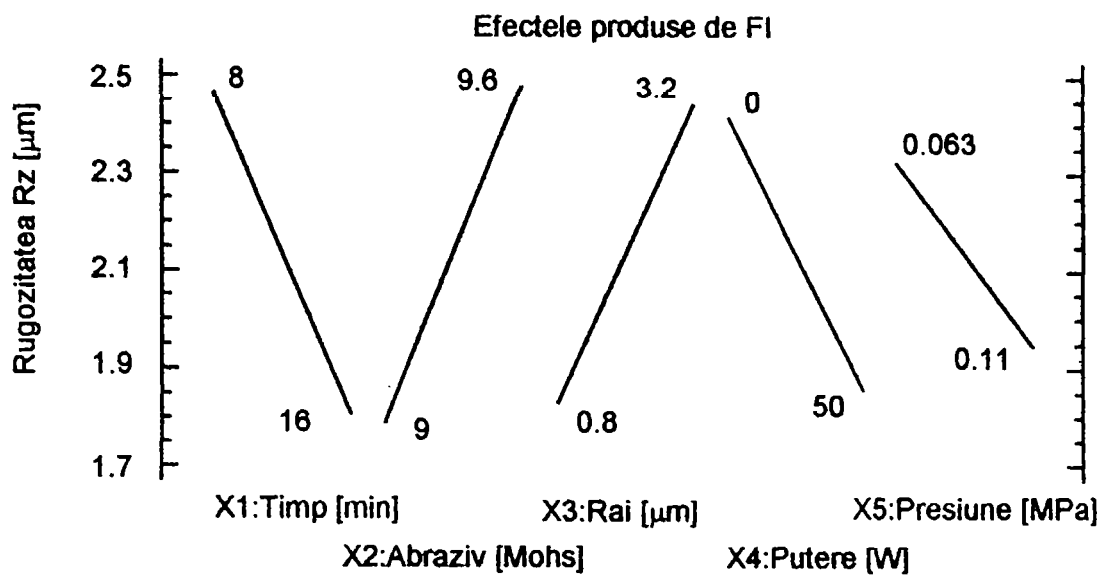


Fig.4.35 Variația efectelor principale pentru  $y_4$

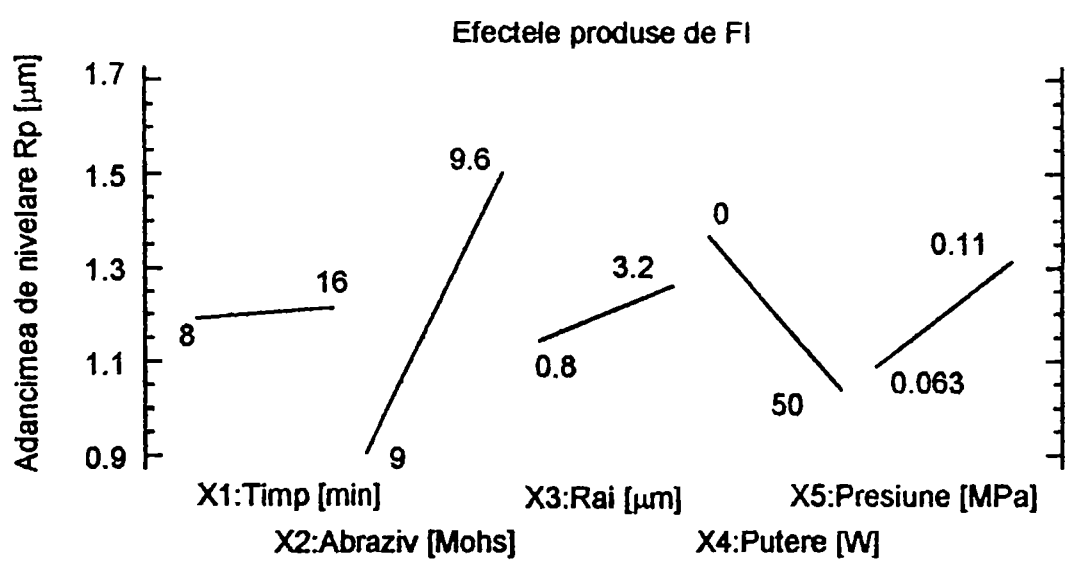


Fig.4.36 Variația efectelor principale pentru  $y_5$

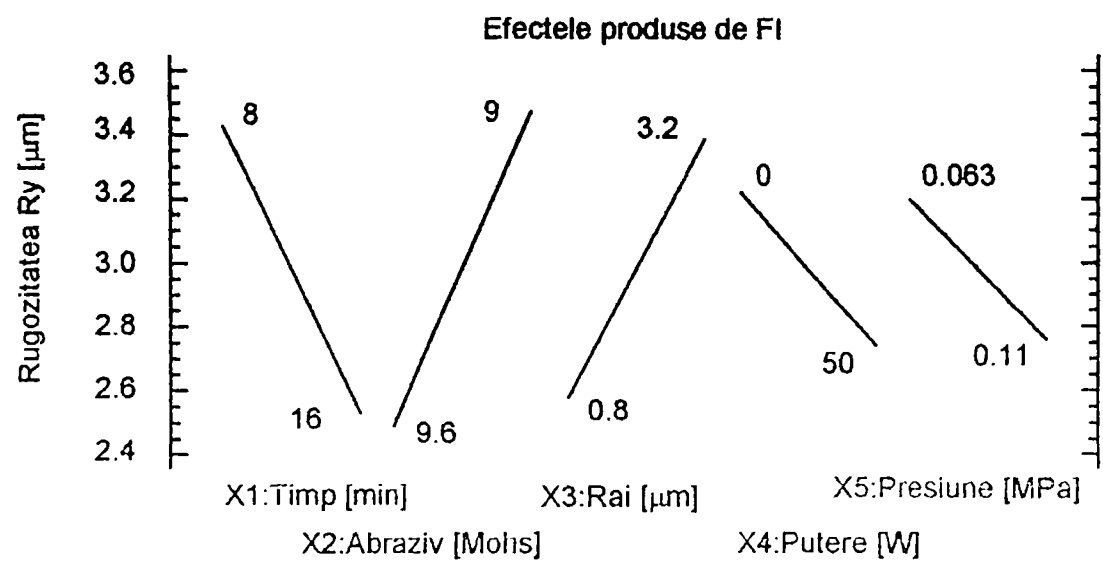


Fig.4.37 Variația efectelor principale pentru  $y_6$

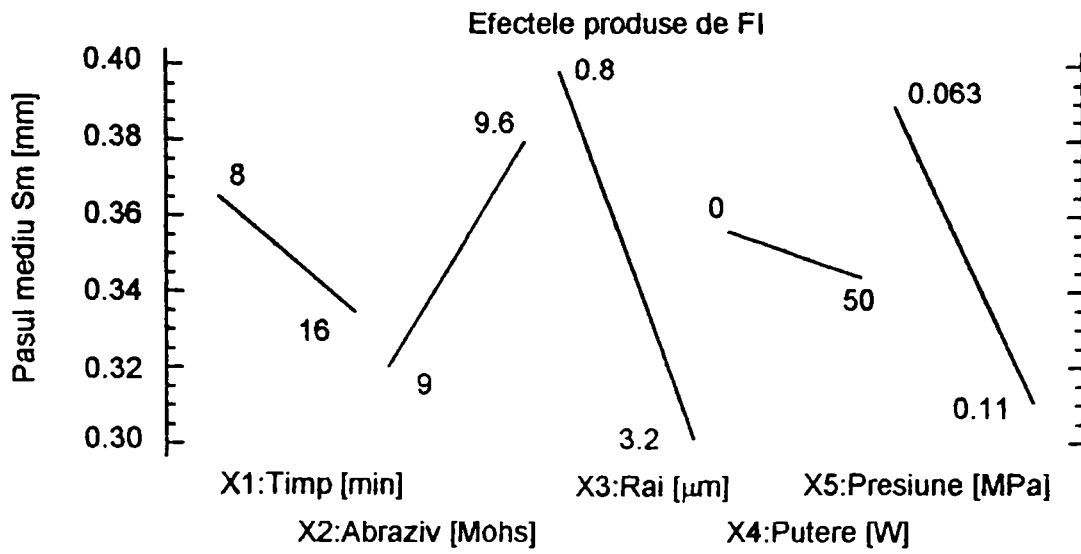


Fig.4.38 Variația efectelor principale pentru  $y_7$

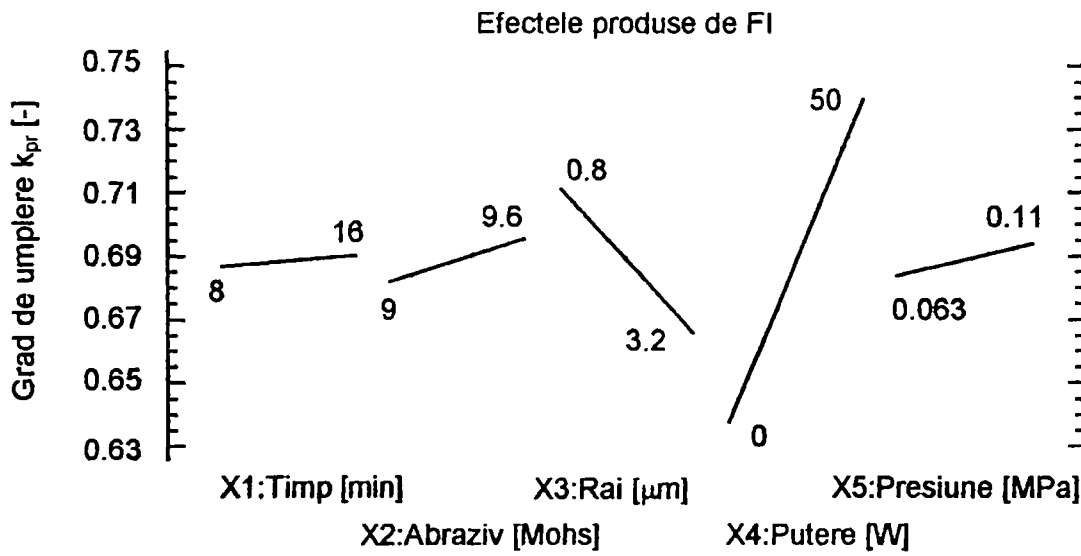


Fig.4.39 Variația efectelor principale pentru  $y_8$

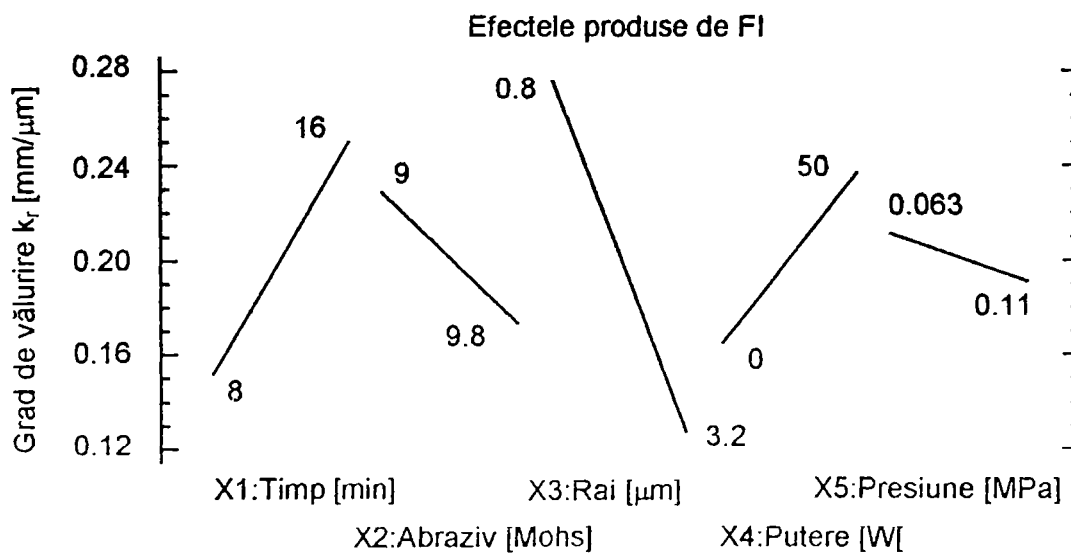


Fig.4.40 Variația efectelor principale pentru  $y_9$

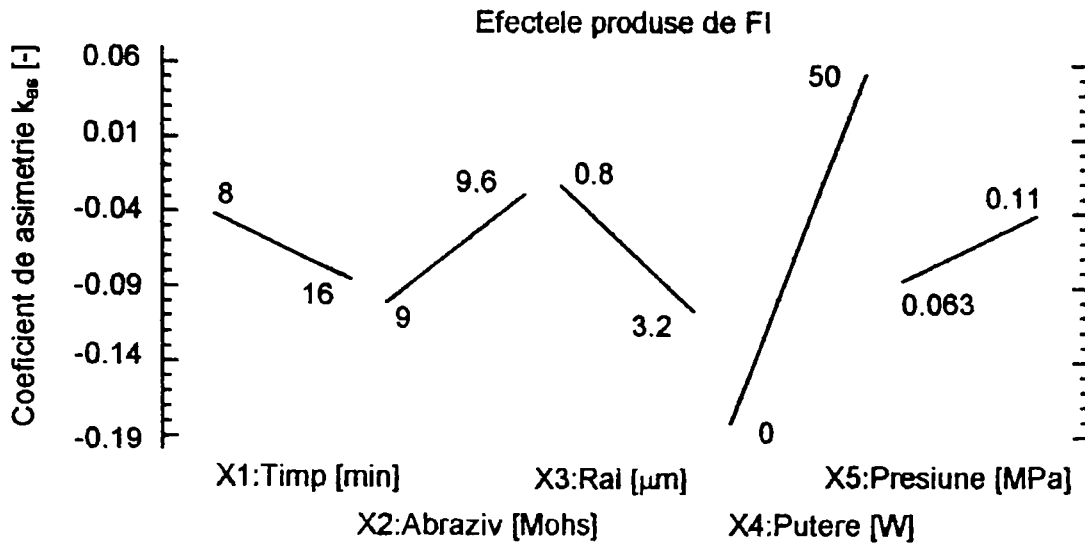


Fig.4.41 Variația efectelor principale pentru  $y_{10}$

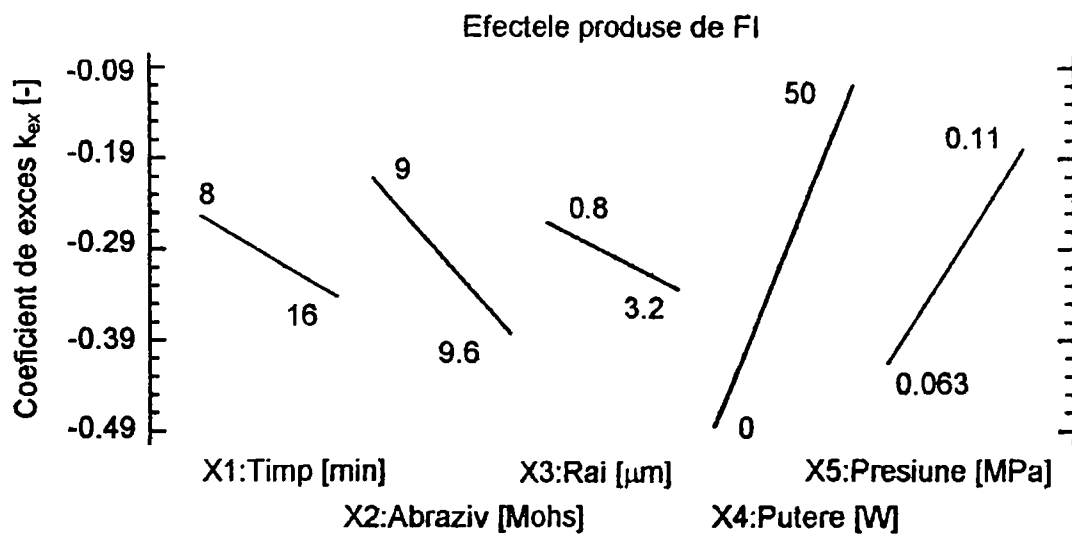


Fig.4.42 Variația efectelor principale pentru  $y_{11}$

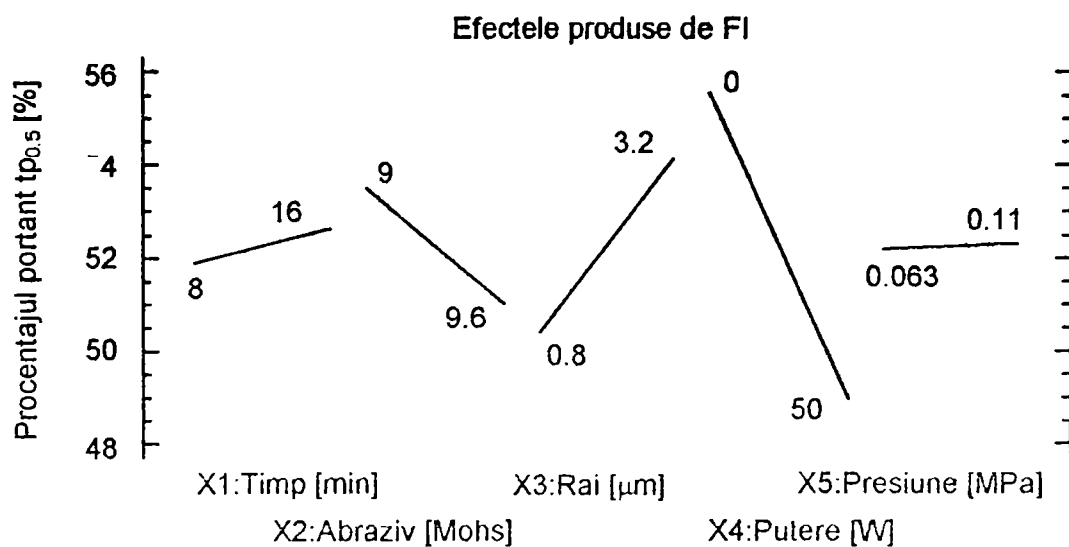


Fig.4.43 Variația efectelor principale pentru  $y_{12}$

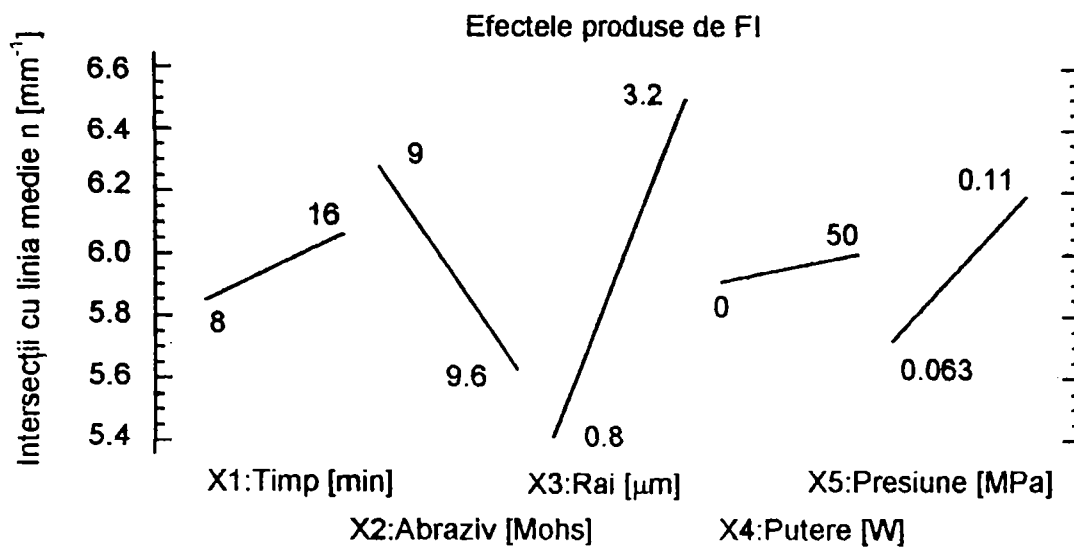


Fig.4.44 Variația efectelor principale pentru  $y_{13}$

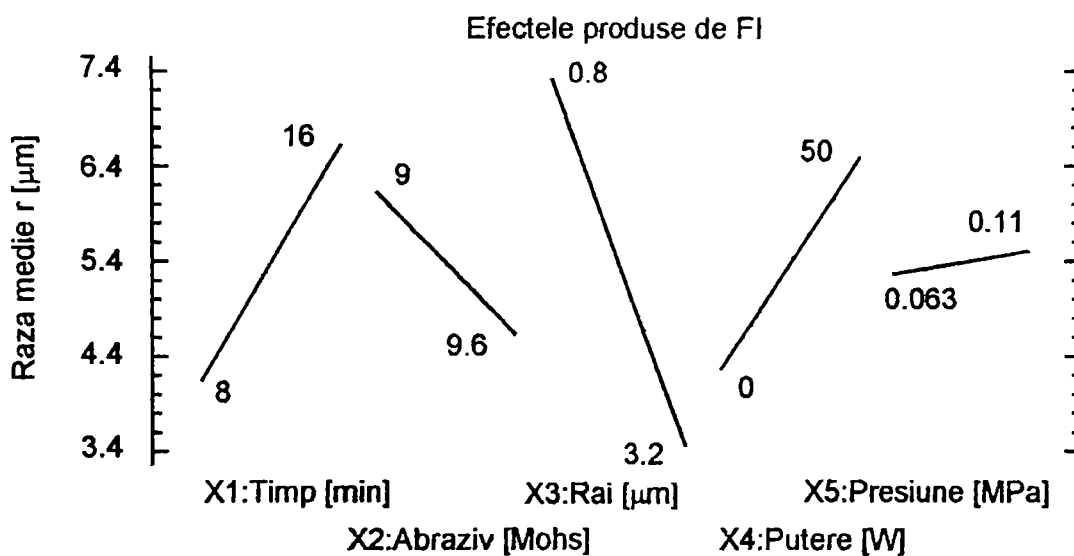


Fig.4.45 Variația efectelor principale pentru  $y_{14}$

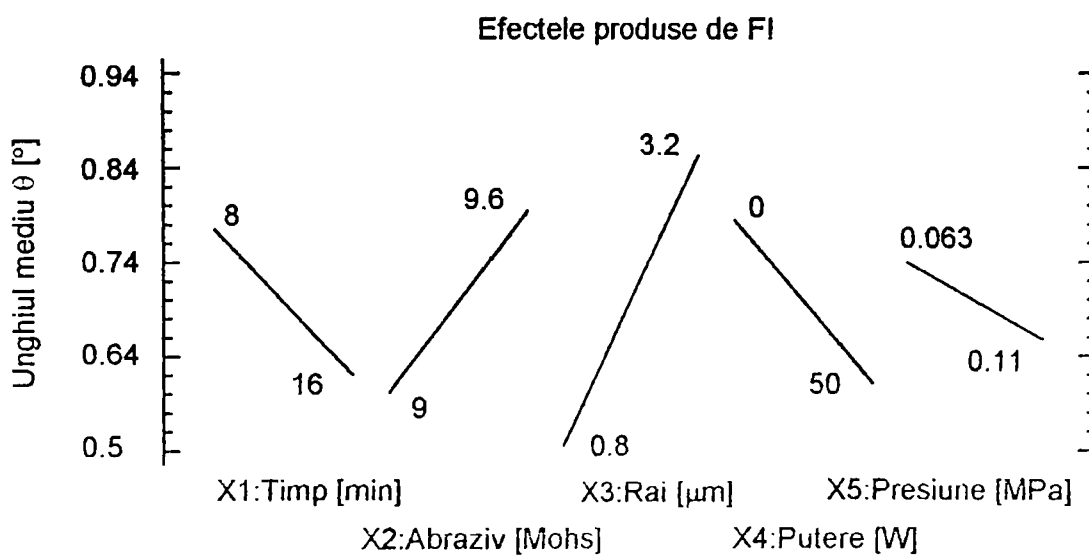


Fig.4.46 Variația efectelor principale pentru  $y_{15}$

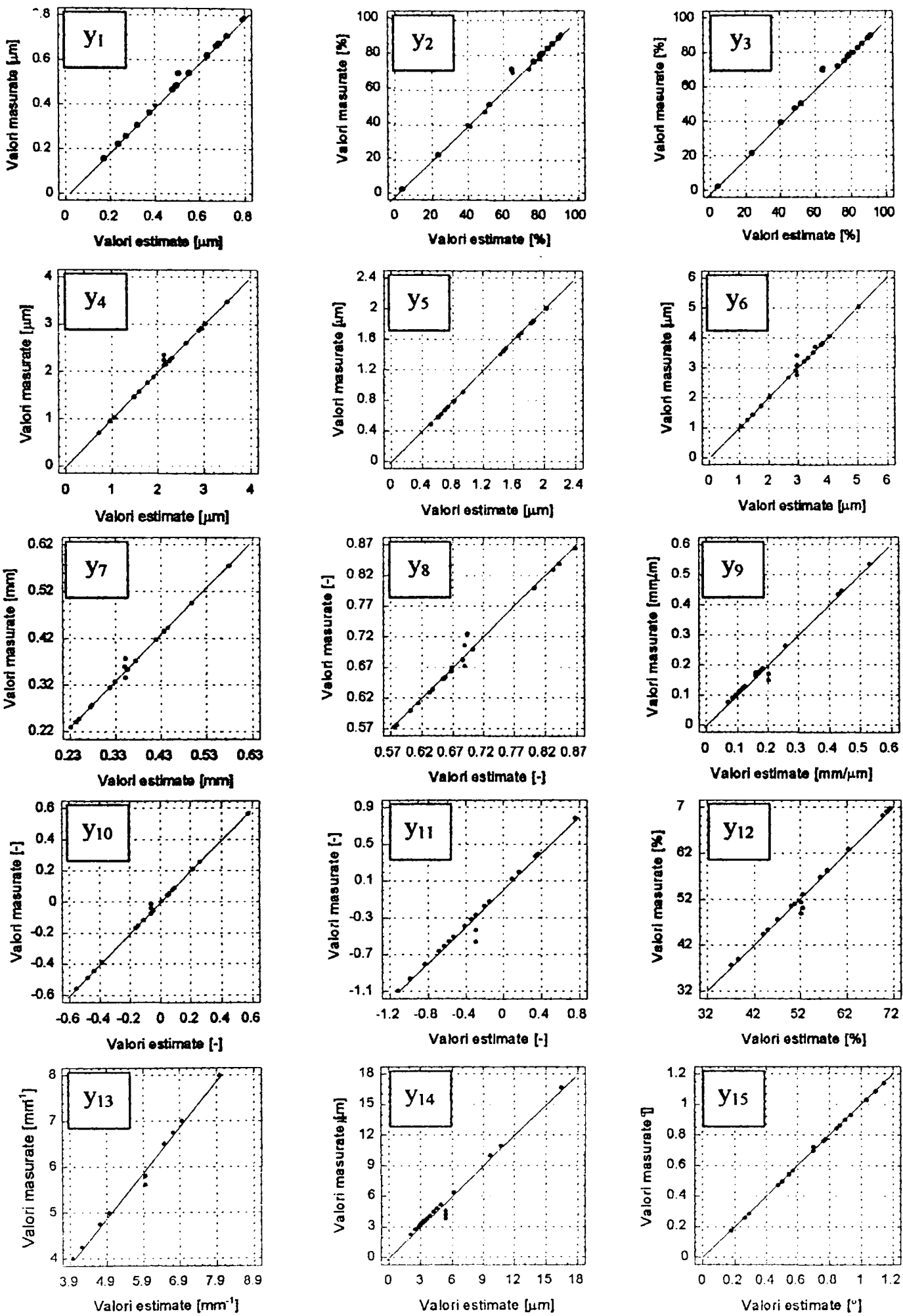


Fig.4.47 Diagrama de estimare a modelului pentru  $y_1 - y_{15}$

- ◆ analiza distribuției spațiale a înălțimii neregularităților profilului. Se determină funcția de autocorelație normată  $r(t)$  și funcția densitate de putere spectrală a rugozității  $D(k)$ .

Verificarea normalității repartiției fig.4.68 d...fig.4.89 d pentru 2000 de ordonate pe o lungime de evaluare de 4 mm și reprezentarea grafică a coeficienților de autocorelație fig.4.68 c...fig.4.89 c determinați pentru 1000 de intervale au fost rezolvate cu ajutorul programului STATGRAPHICS. Coeficienții de asimetrie și de exces au fost cuprinși și analizați în cadrul experimentului factorial.

Pentru determinarea grafo-analitică a funcțiilor de autocorelație normată și de densitate de putere spectrală, s-a aplicat metoda punctelor particulare ale profilului de rugozitate, care operează cu indicatori punctuali ai profilului suprafeței: numărul de intersecții ale profilului cu linia medie, numărul proeminențelor profilului, numărul de inflexiuni ale profilului [R1]. Funcțiile  $r(t)$  și  $D(k)$  sunt prezentate grafic în fig.4.68e...fig.4.89 e și respectiv în fig.4.68 f...fig.4.89 f. S-au obținut funcții cu un singur parametru, de tip parabolic și exponențial, expresiile acestora fiind date în legenda reprezentărilor grafice.

Analiza statistică a distribuției spațiale a neregularităților profilului are la bază compararea formei profilului cu ea însăși decalată cu un anumit pas, prin stabilirea gradului de corelare ce există între două puncte ale profilului, situate la o distanță  $t$  unul față de celălalt. Deci cu cât este mai bună suprapunerea celor două forme de profil, cu atât funcția de autocorelație normată este mai apropiată de 1. Prezența unei componente oscilatorii pe curba acestei funcții indică prezența unei periodicități a rugozității. Transformata Fourier a funcției de autocorelație -funcția densitate de putere spectrală- permite și ea o apreciere a periodicității profilului echivalentă cu cea a funcției de autocorelație normată [Z2].

În fig.4.90 și fig.4.91 se dau aceleași reprezentări grafice pentru suprafața inițială strunjită, respectiv rectificată.

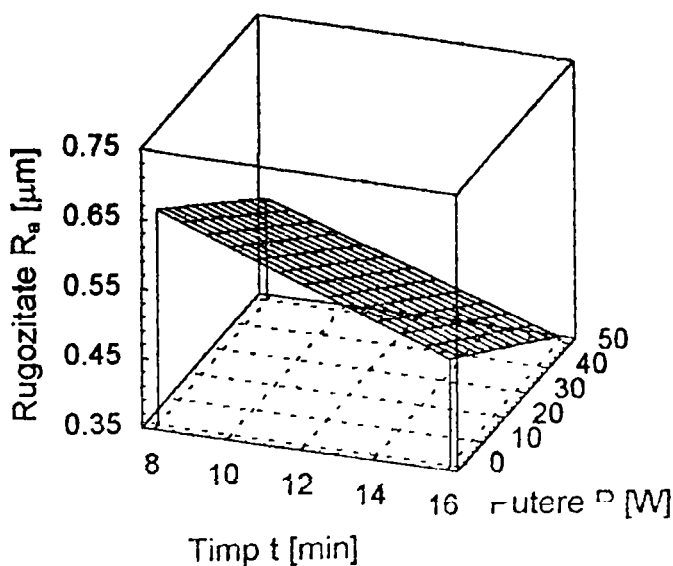


Fig.4.48 Suprafața de răspuns  $y_1$  pentru  $x_1$  și  $x_4$

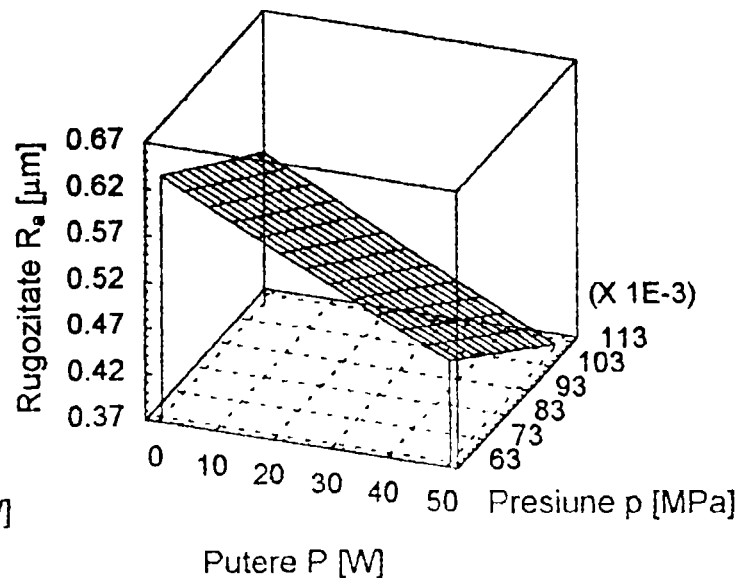


Fig.4.49 Suprafața de răspuns  $y_1$  pentru  $x_4$  și  $x_5$



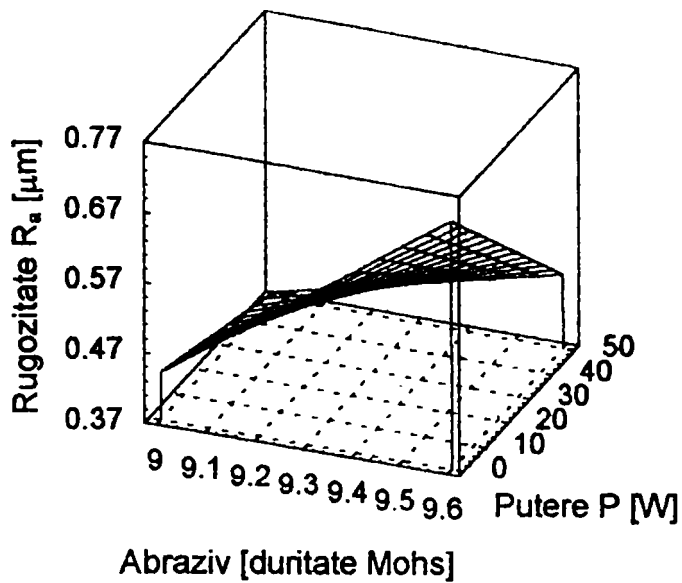


Fig.4.50 Suprafața de răspuns  $y_1$  pentru  $x_2$  și  $x_4$

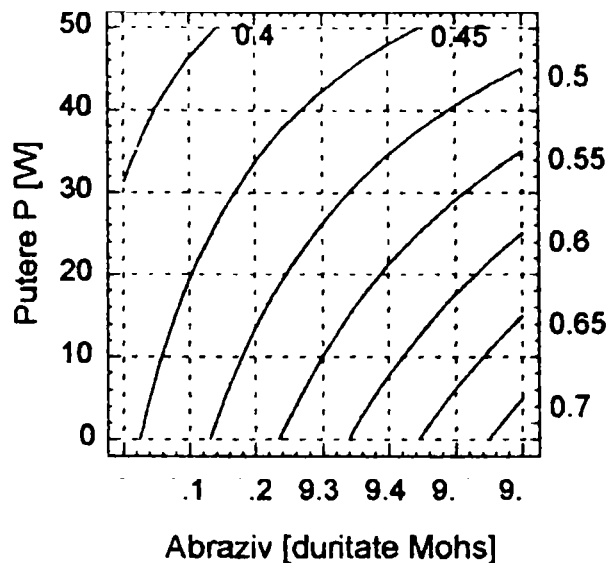


Fig.4.51 Curbele de nivel constant  $y_1$  funcție de  $x_2$  și  $x_4$

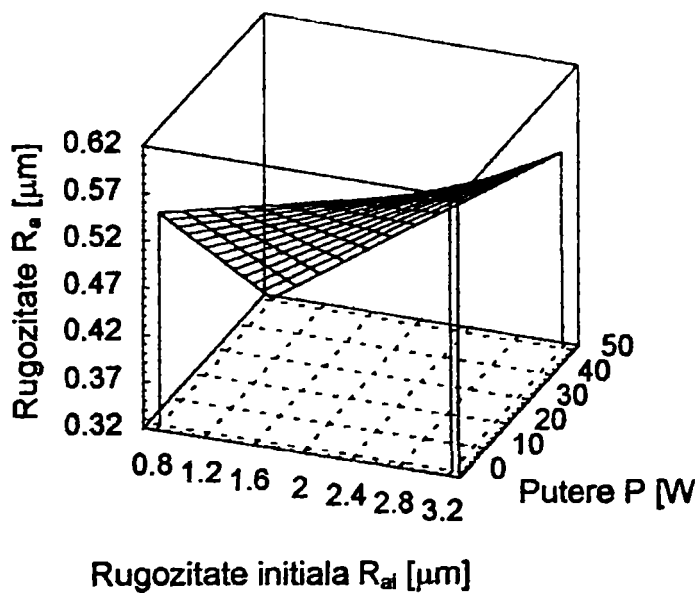


Fig.4.52 Suprafața de răspuns  $y_1$  pentru  $x_3$  și  $x_4$

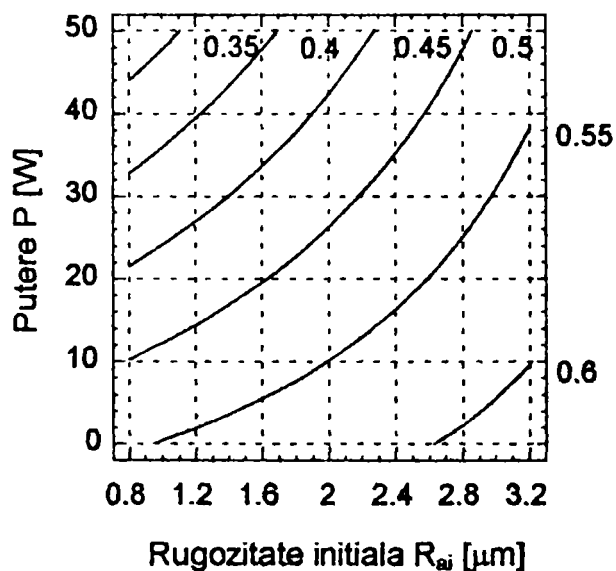


Fig.4.53 Curbele de nivel constant  $y_1$  funcție de  $x_3$  și  $x_4$

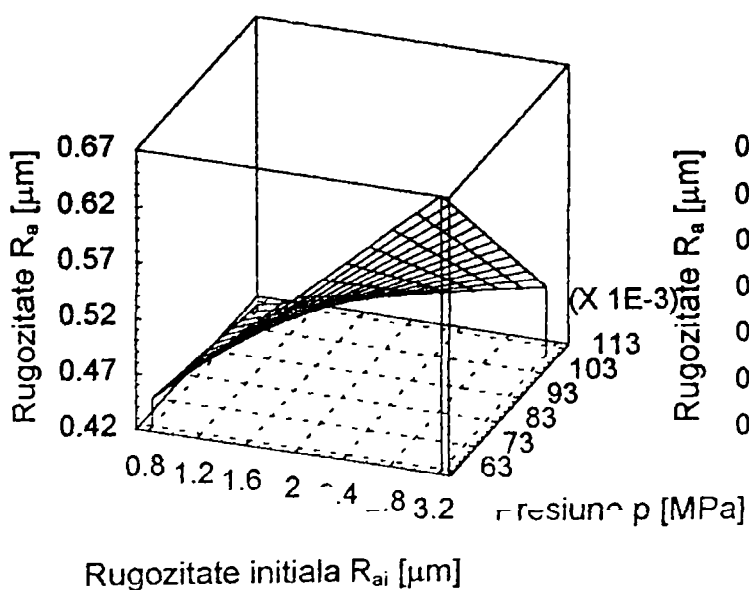


Fig.4.54 Suprafața de răspuns  $y_1$  pentru  $x_3$  și  $x_5$

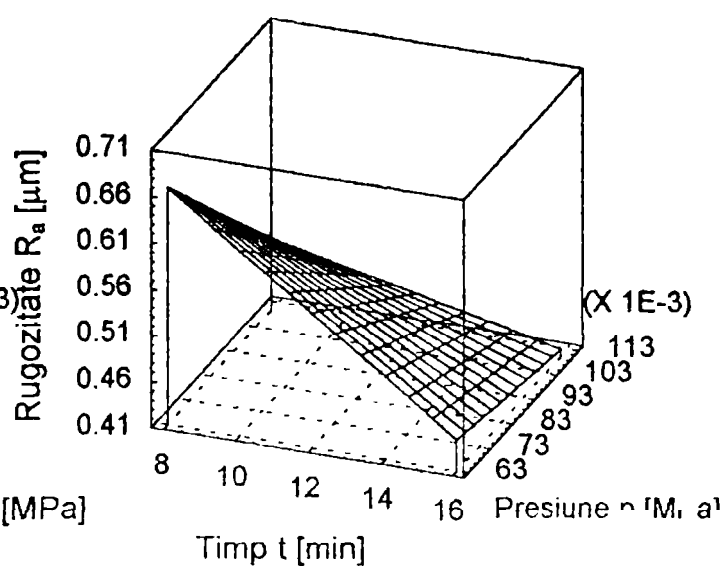


Fig.4.55 Suprafața de răspuns  $y_1$  pentru  $x_1$  și  $x_5$

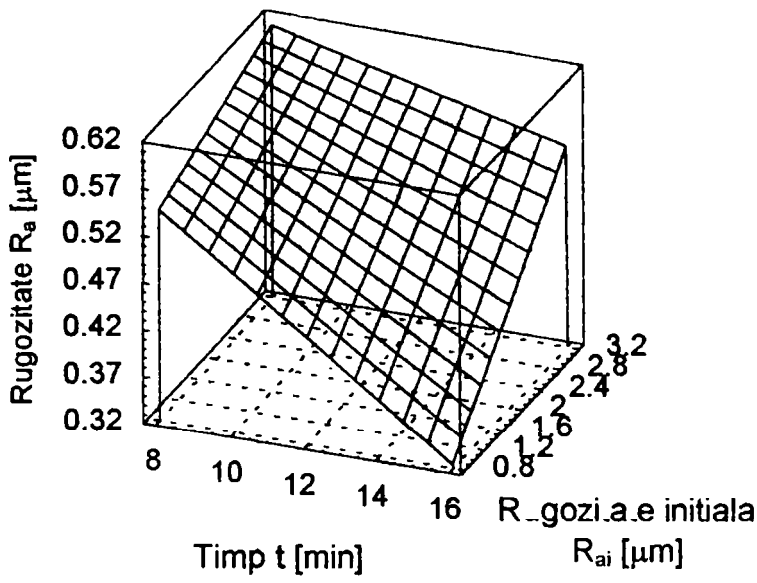


Fig.4.56 Suprafața de răspuns  $y_1$  pentru  $x_1$  și  $x_3$

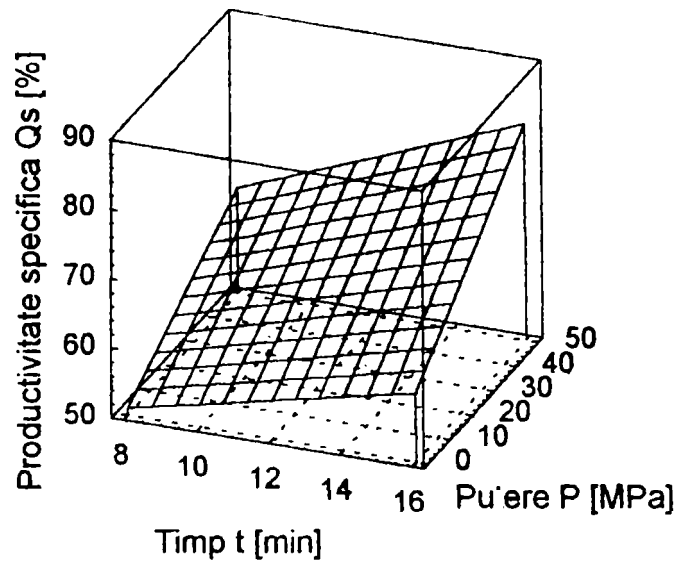


Fig.4.57 Suprafața de răspuns  $y_2$  pentru  $x_1$  și  $x_4$

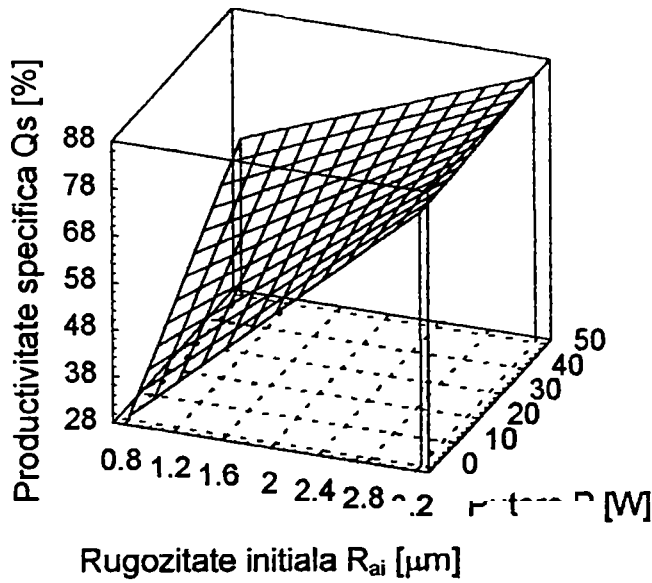


Fig.4.58 Suprafața de răspuns  $y_2$  pentru  $x_3$  și  $x_4$

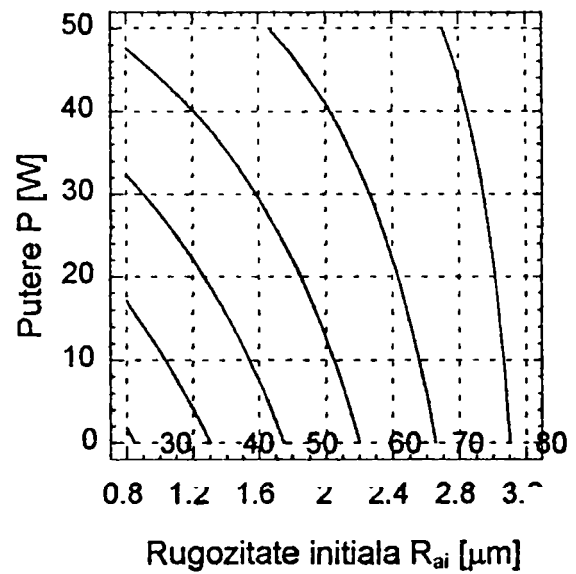


Fig.4.59 Curbele de nivel constant  $y_2$  funcție de  $x_3$  și  $x_4$

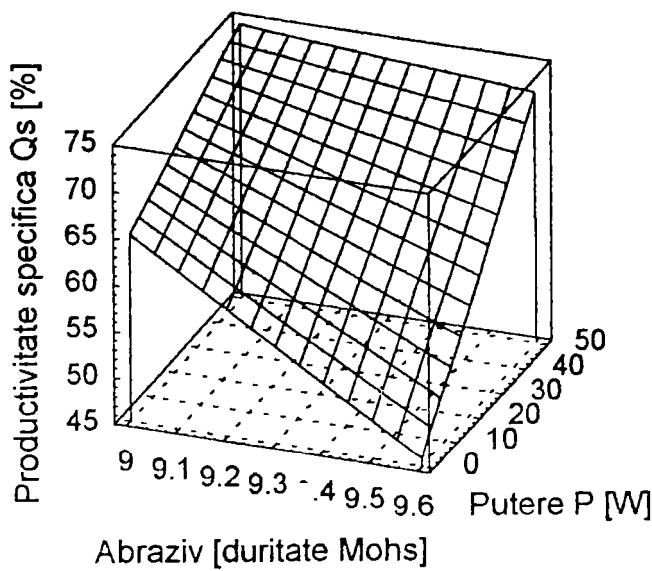


Fig.4.60 Suprafața de răspuns  $y_2$  pentru  $x_2$  și  $x_4$

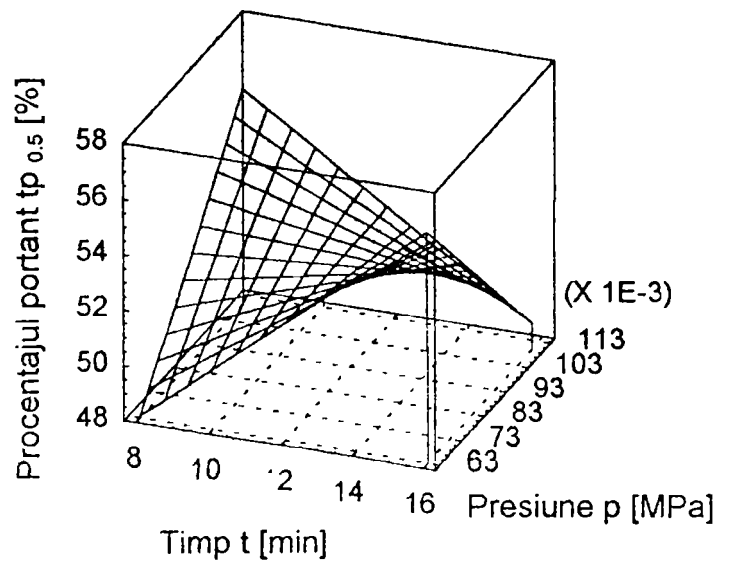


Fig.4.61 Suprafața de răspuns  $y_3$  pentru  $x_1$  și  $x_5$

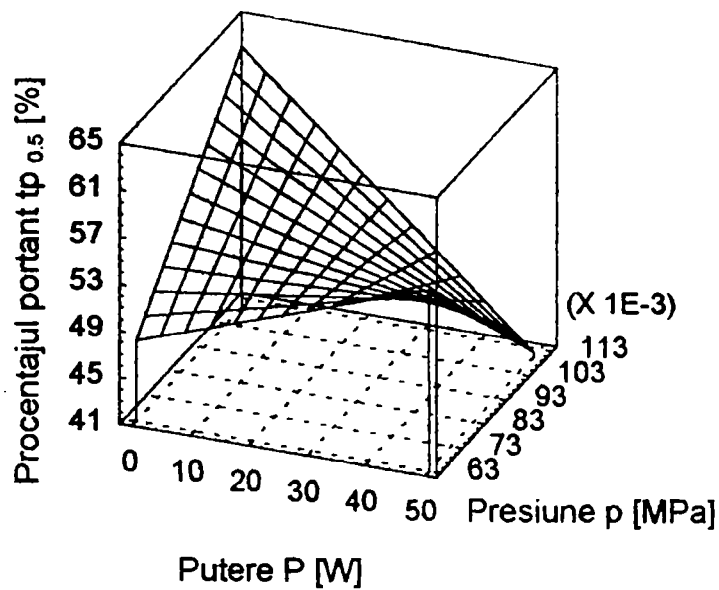


Fig.4.62 Suprafața de răspuns  $y_{12}$  pentru  $x_4$  și  $x_5$

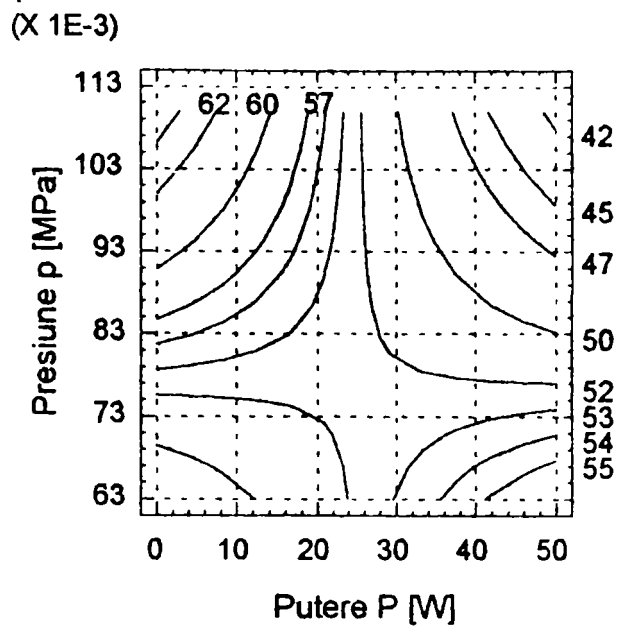


Fig.4.63 Suprafața de răspuns  $y_{12}$  pentru  $x_4$  și  $x_5$

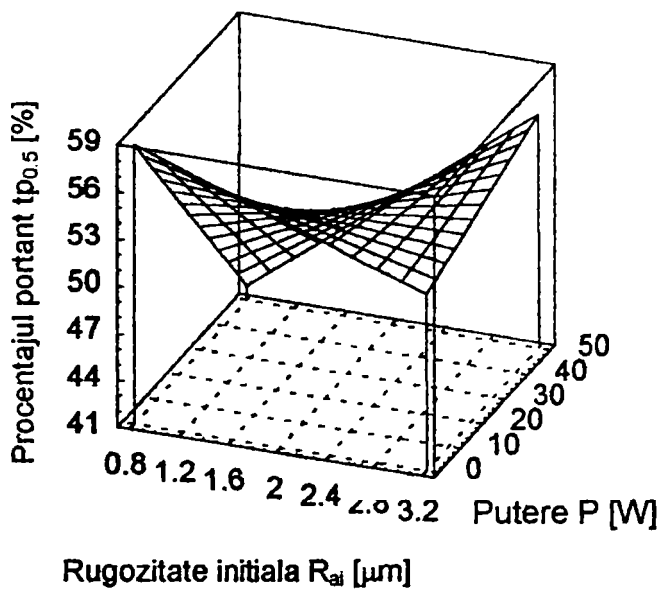


Fig.4.64 Suprafața de răspuns  $y_{12}$  pentru  $x_3$  și  $x_4$

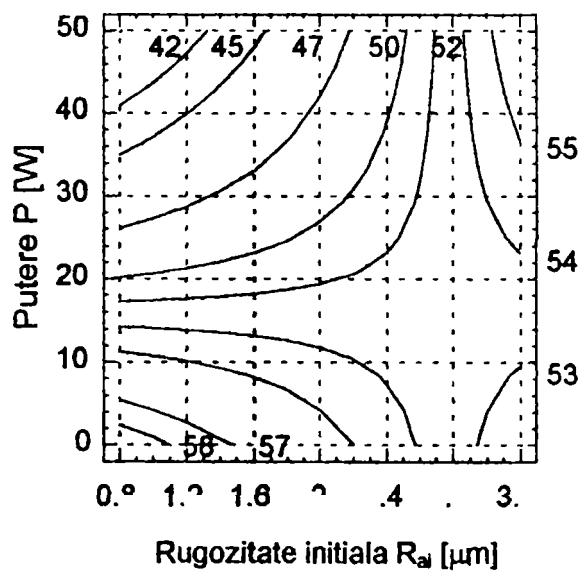


Fig.4.65 Suprafața de răspuns  $y_{12}$  pentru  $x_3$  și  $x_4$

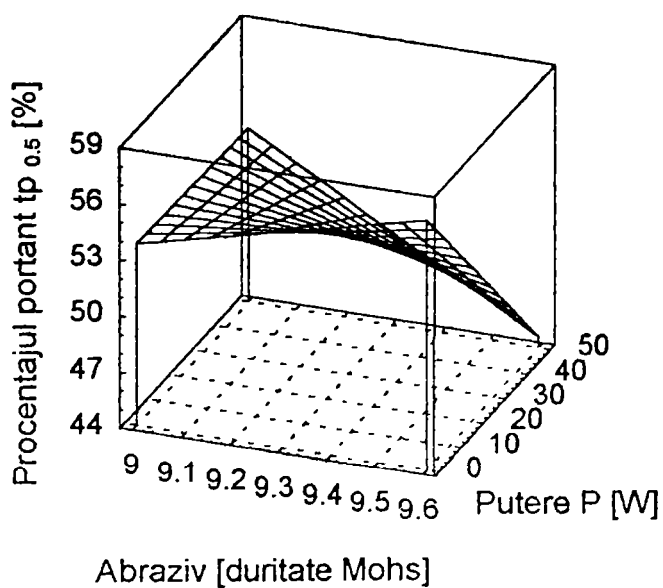


Fig.4.66 Suprafața de răspuns  $y_{12}$  pentru  $x_2$  și  $x_4$

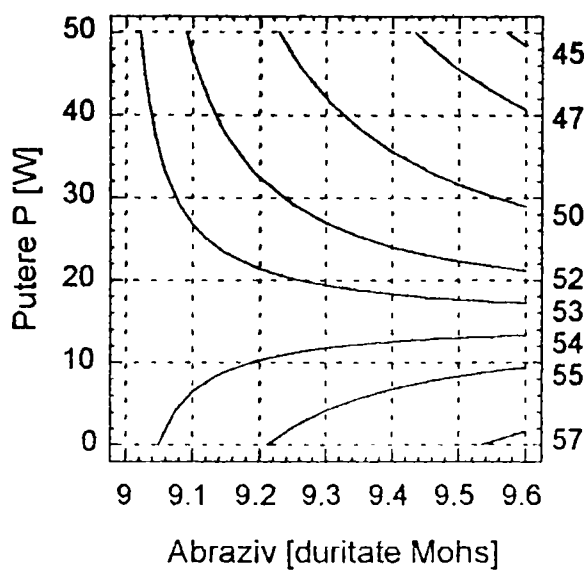
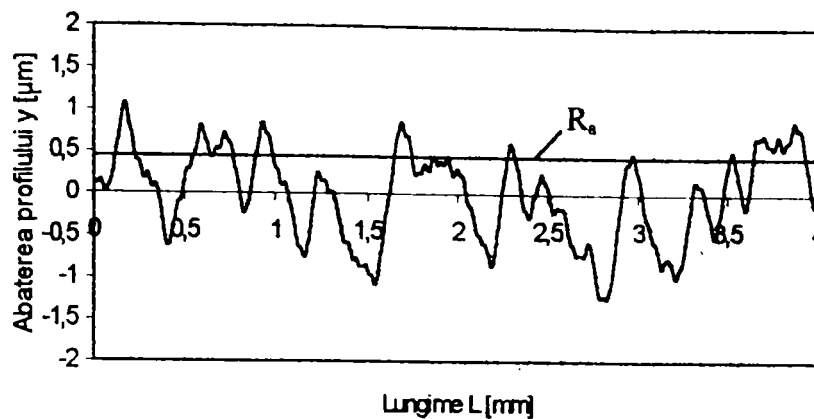
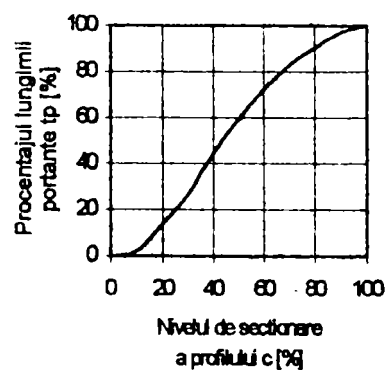


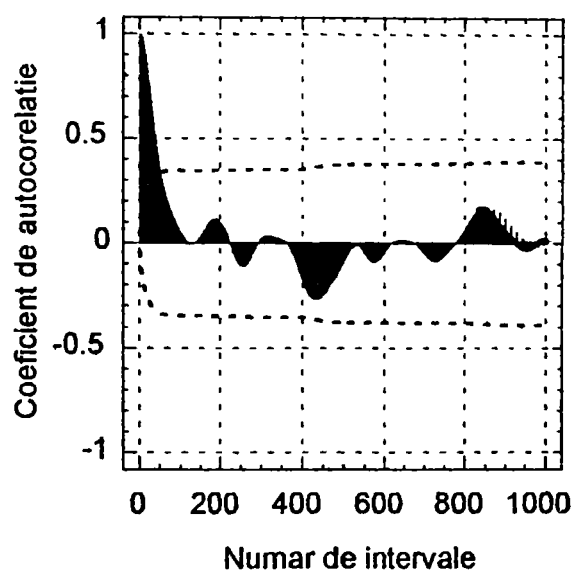
Fig.4.67 Suprafața de răspuns  $y_{12}$  pentru  $x_2$  și  $x_4$



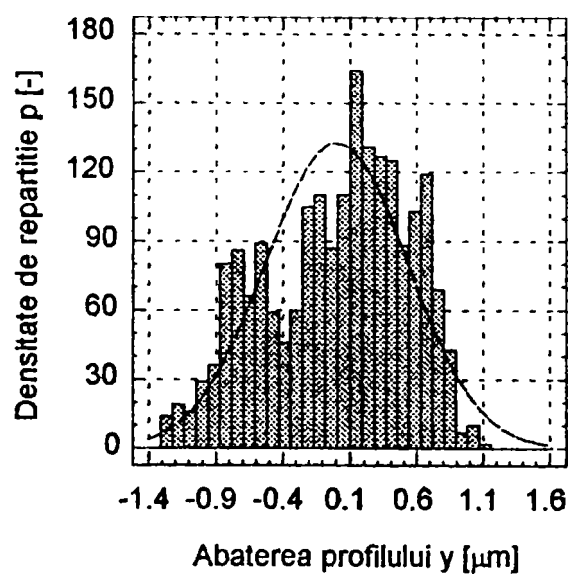
a) Profilul de rugozitate



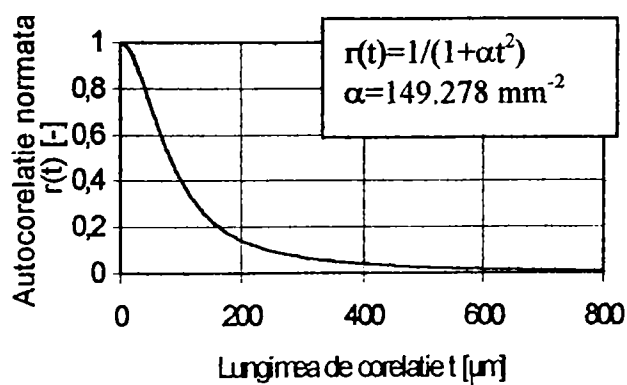
b) Procentajul portant al profilului



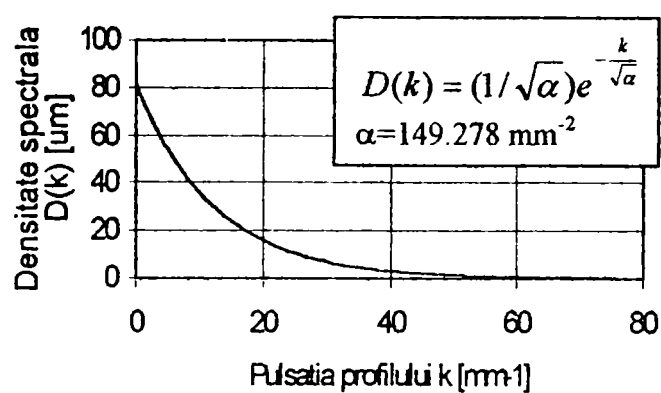
c) Functia de autocorelatie



d) Distributia abaterilor profilului

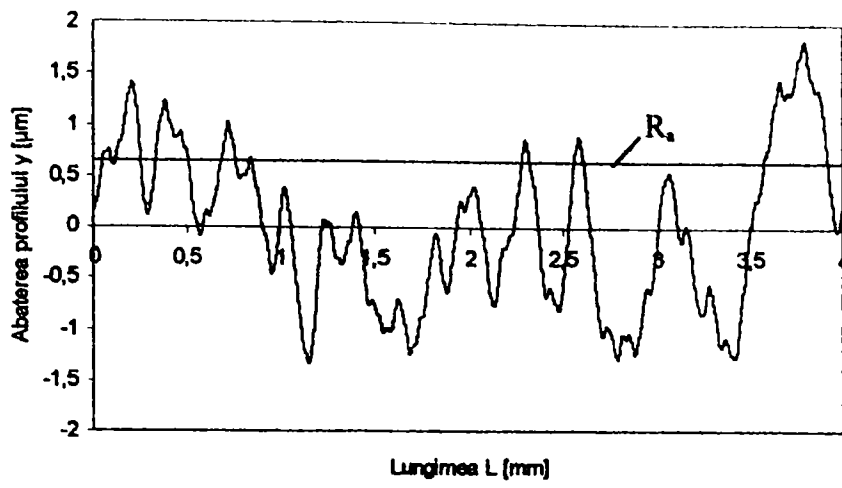


e) Funcția de autocorelație normată

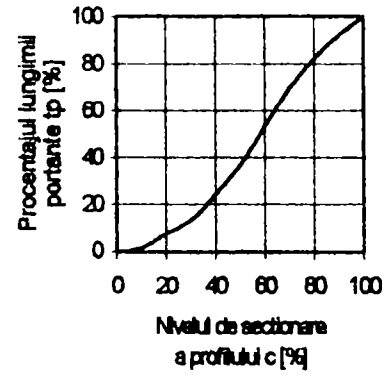


f) Funcția densitate de putere spectrală

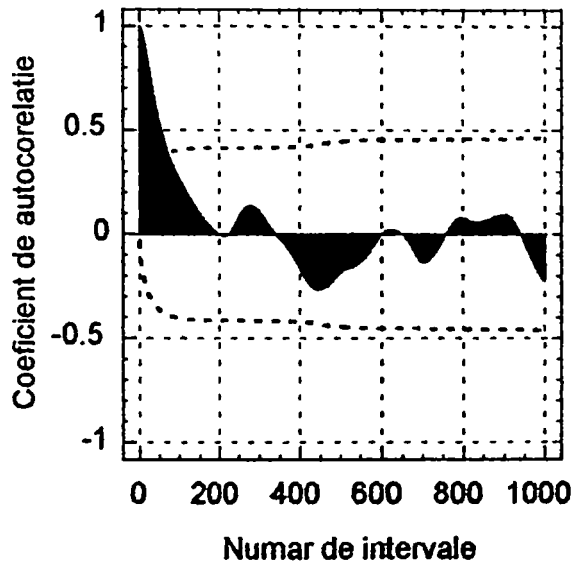
Fig.4.68 PROBA 1.1 din experimentul factorial



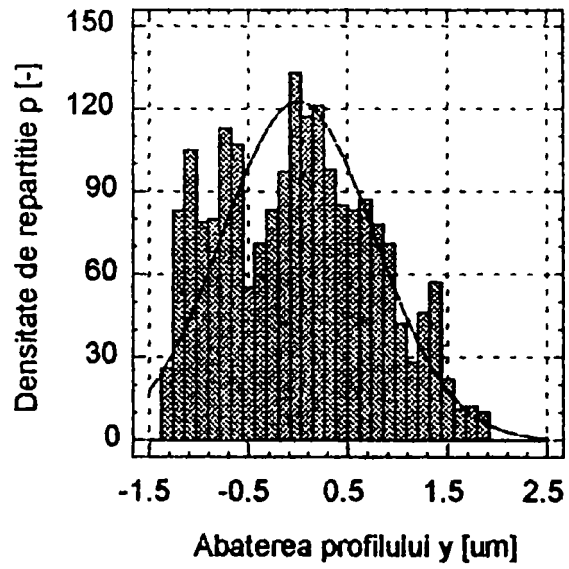
a) Profilul de rugozitate



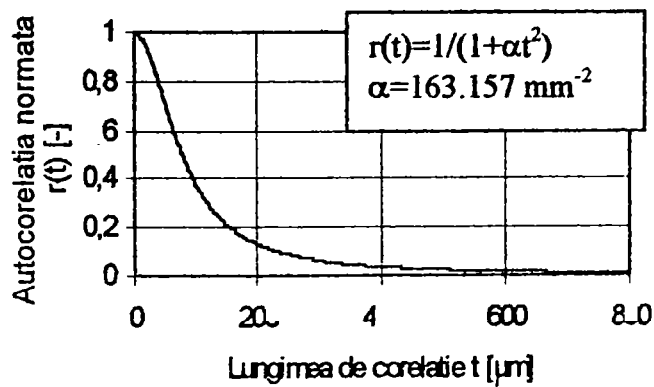
b) Procentajul portant al profilului



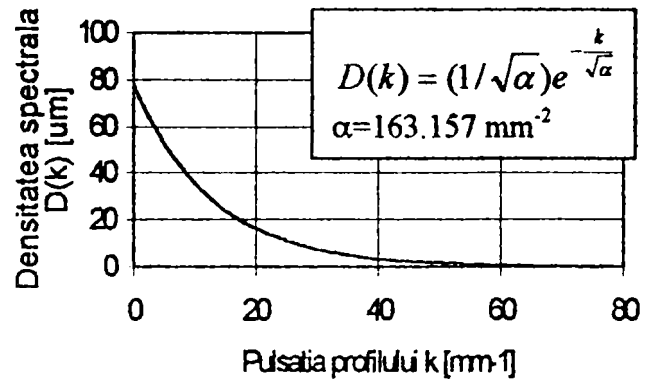
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

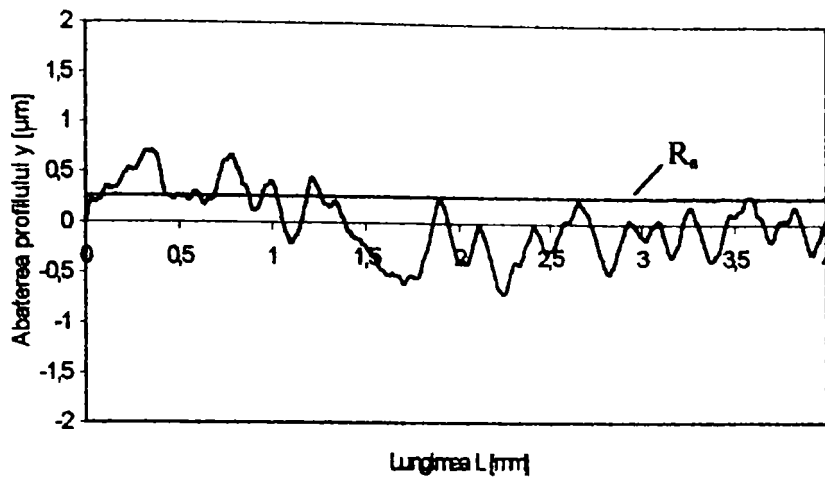


e) Funcția de autocorelație normalată

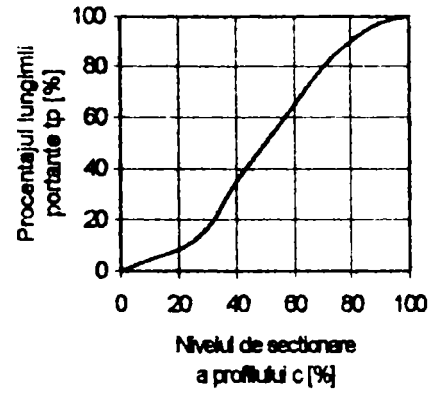


f) Funcția densitate de putere spectrală

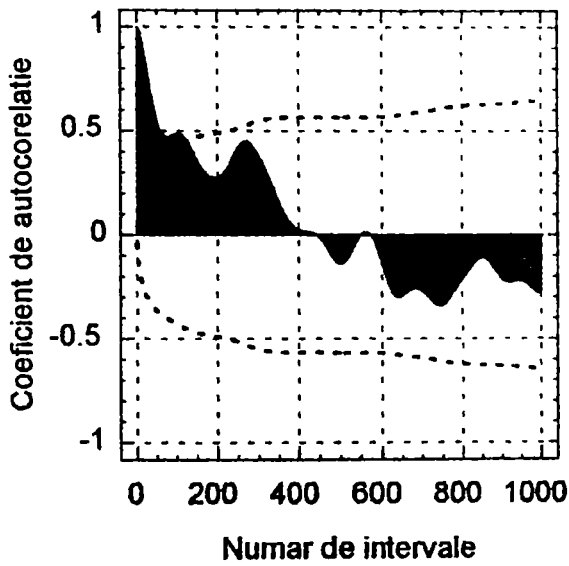
Fig.4.69 PROBA 1.2 din experimentul factorial



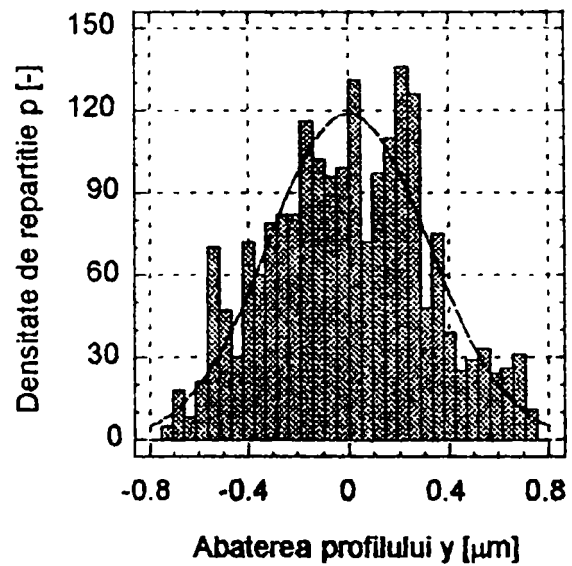
a) Profilul de rugozitate



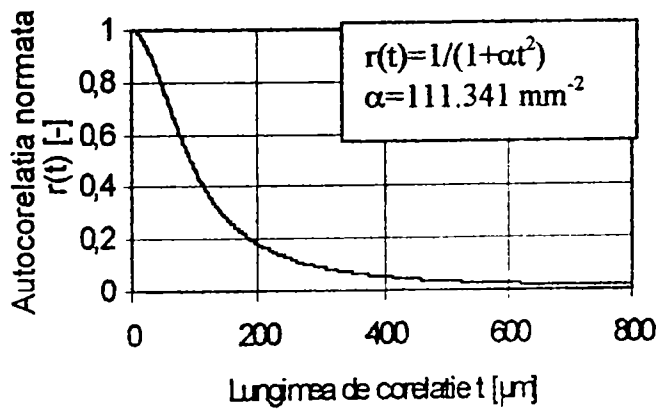
b) Procentajul portant al profilului



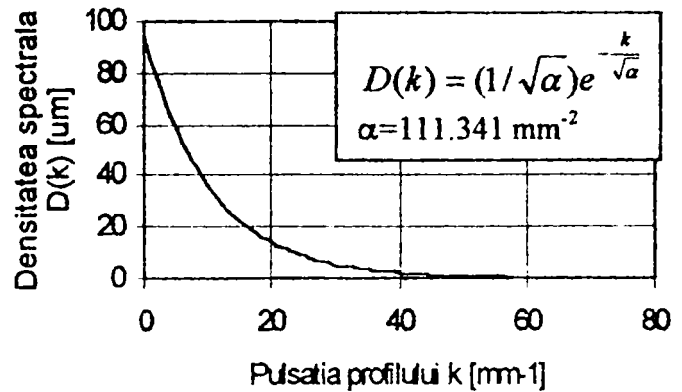
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului



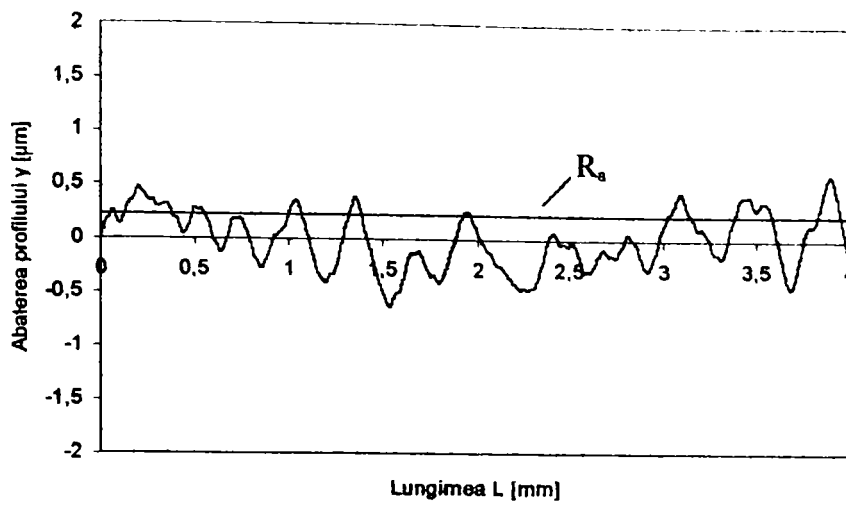
e) Funcția de autocorelație normată



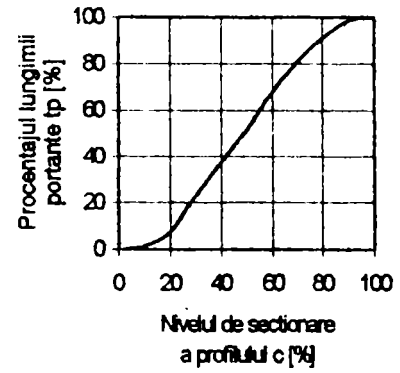
f) Funcția densitate de putere spectrală

Fig.4.70 PROBA 2 din experimentul factorial

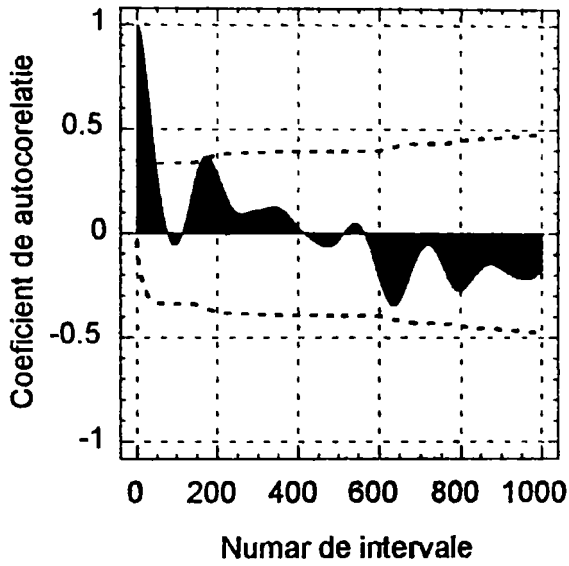




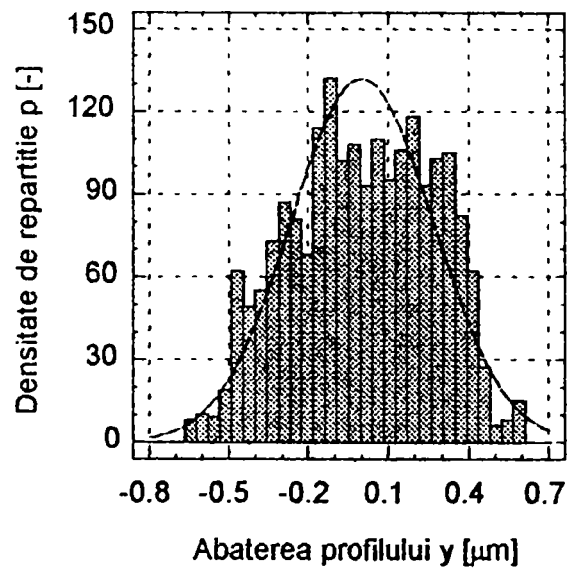
a) Profilul de rugozitate



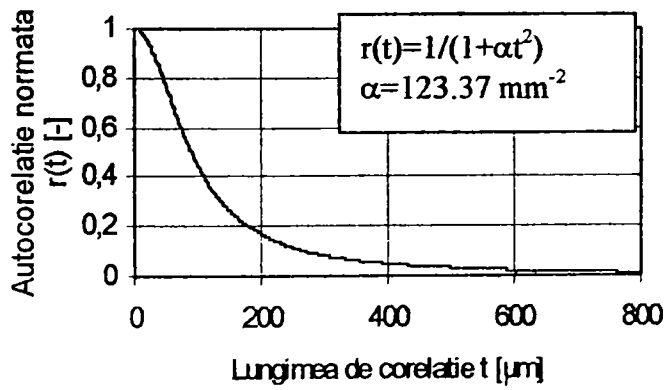
b) Procentajul portant al profilului



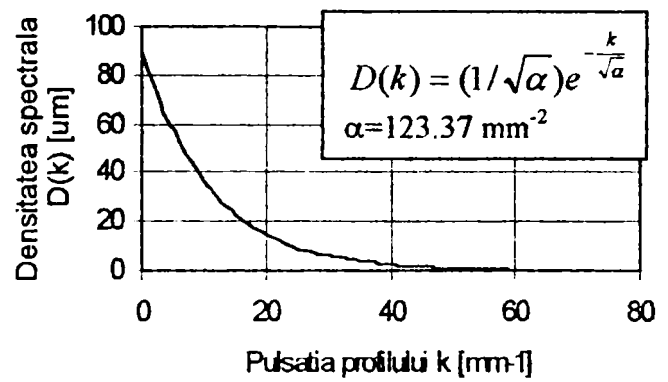
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

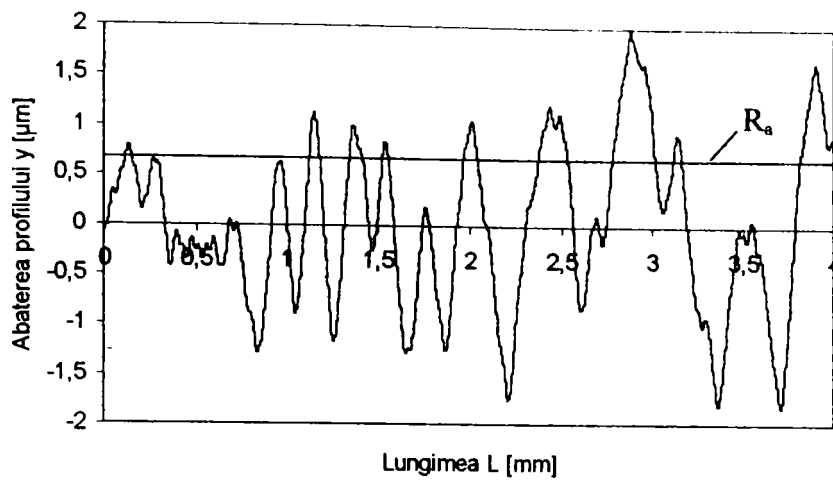


e) Funcția de autocorelație normalată

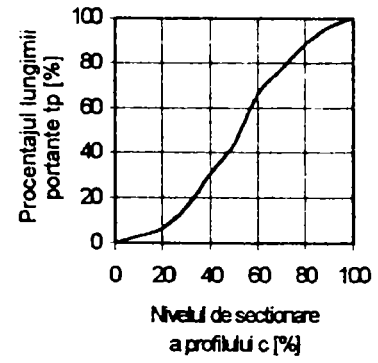


f) Funcția densitate de putere spectrală

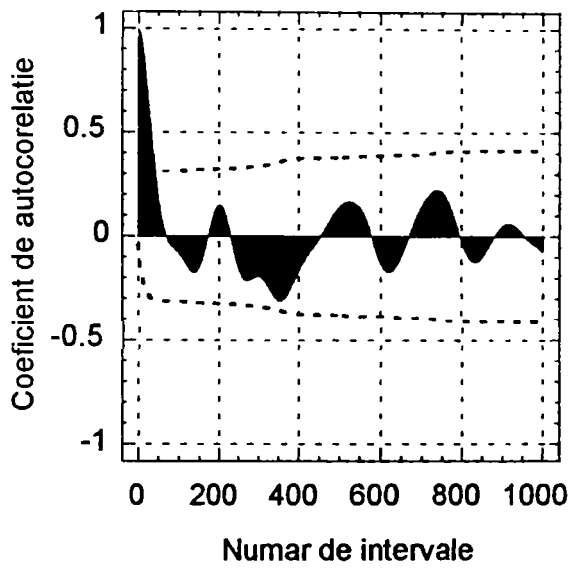
Fig.4.71 PROBA 3 din experimentul factorial



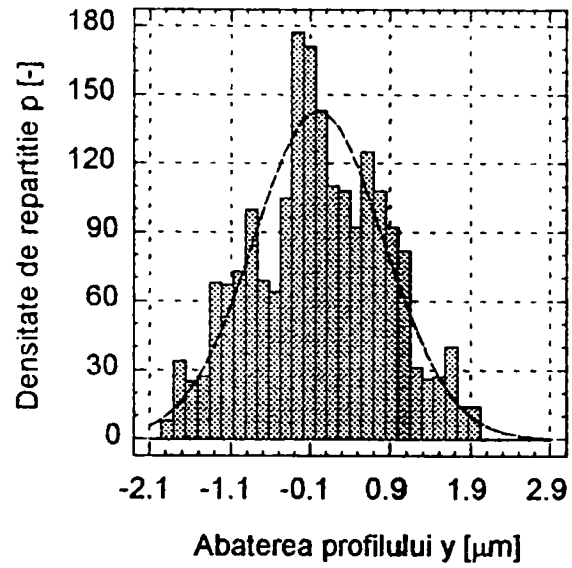
a) Profilul de rugozitate



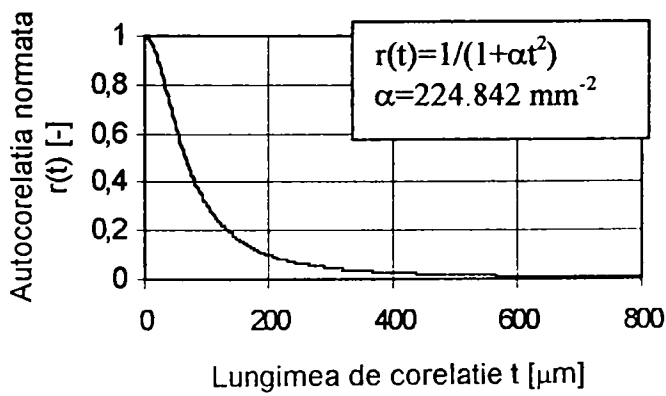
b) Procentajul portant al profilului



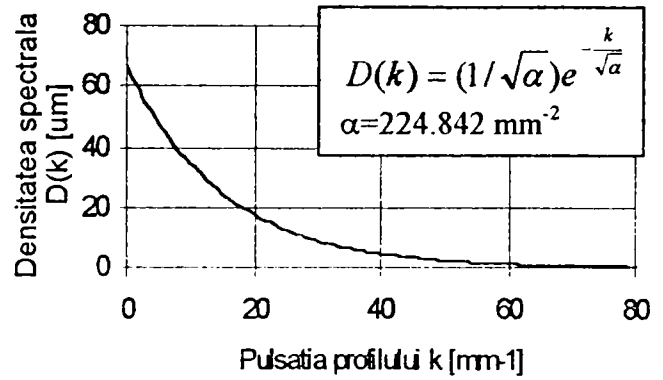
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

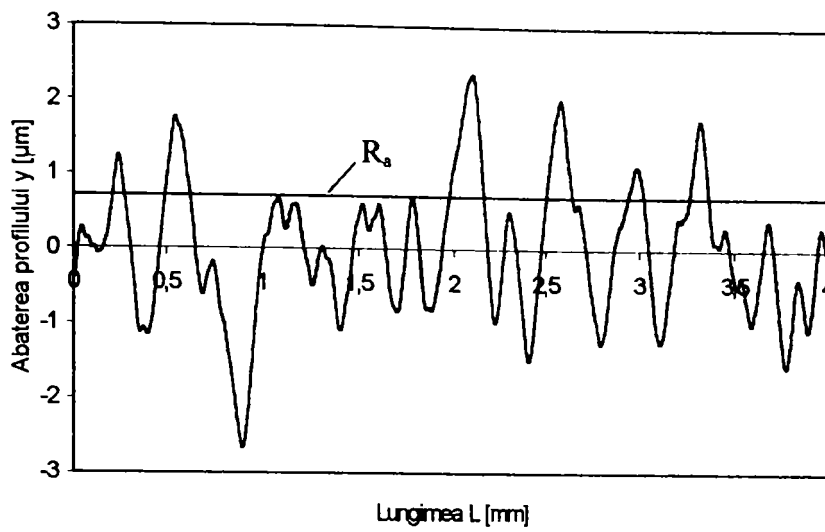


e) Funcția de autocorelație normată

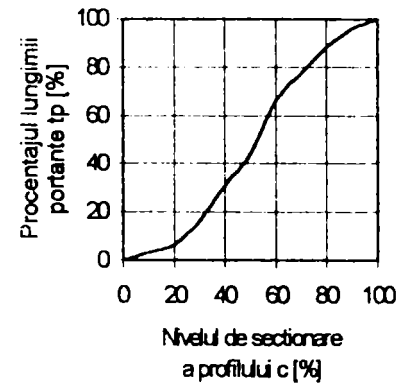


f) Funcția densitate de putere spectrală

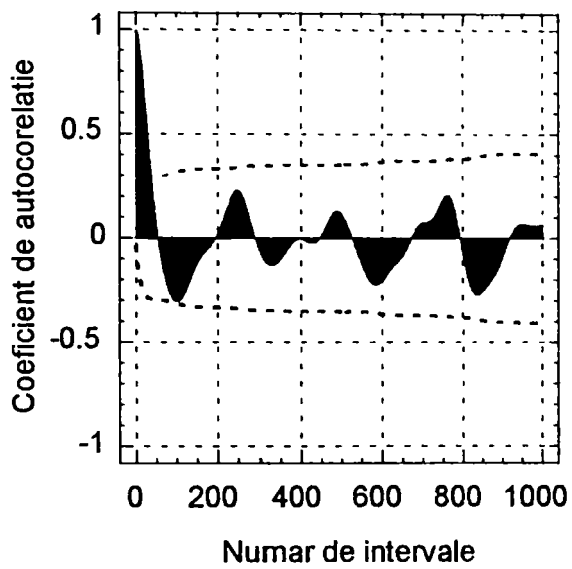
Fig.4.72 PROBA 4 din experimental factorial



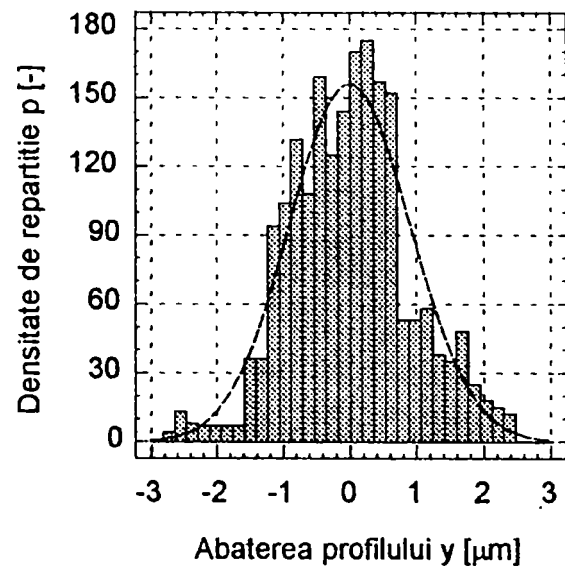
a) Profilul de rugozitate



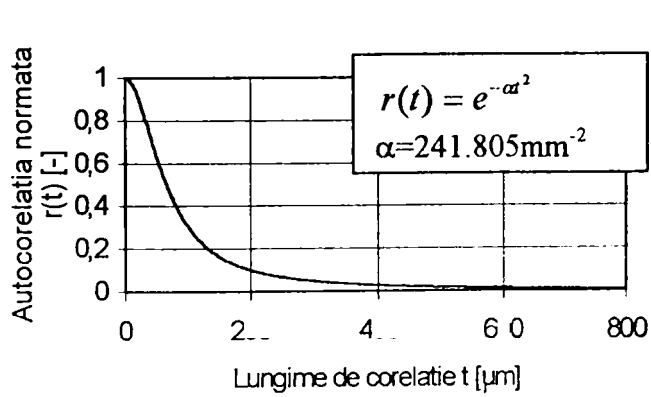
b) Procentajul portant al profilului



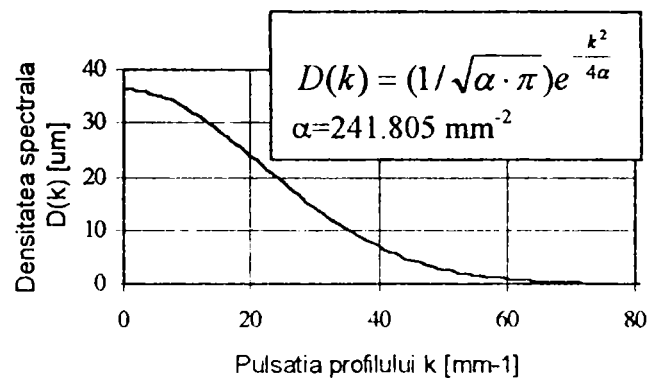
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

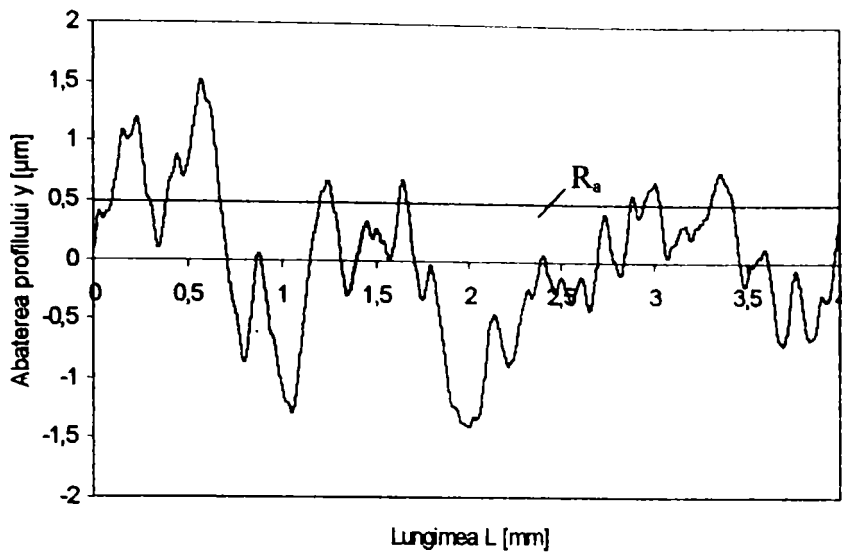


e) Funcția de autocorelație normată

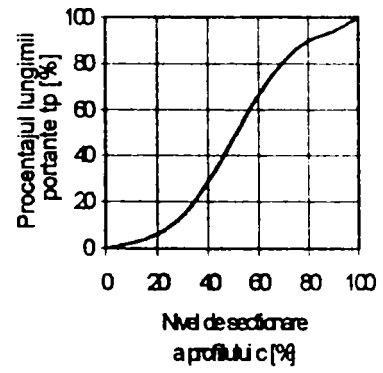


f) Funcția densitate de putere spectrală

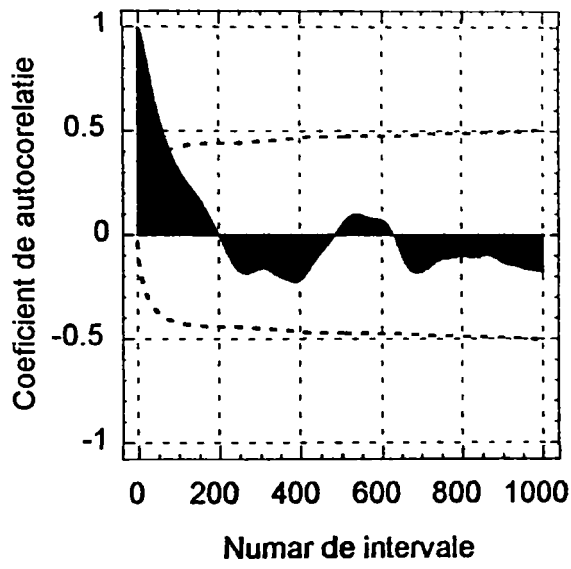
Fig.4.73 PROBA 5 din experimentul factorial



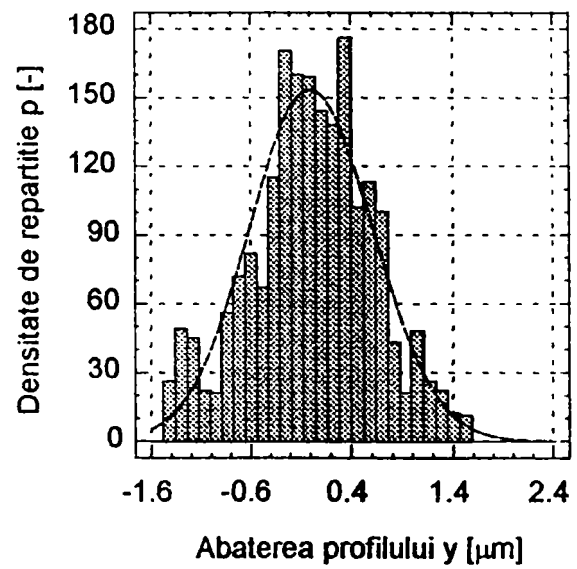
a) Profilul de rugozitate



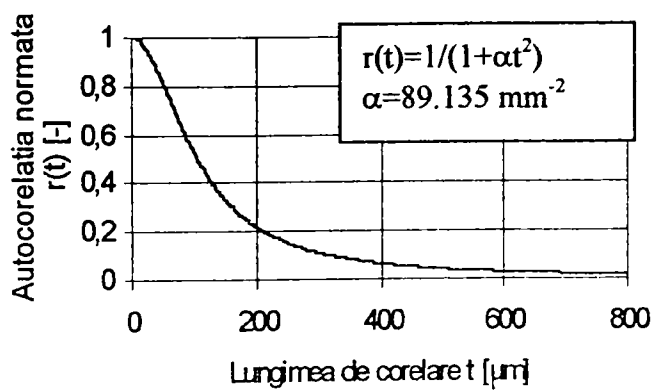
b) Procentajul portant al profilului



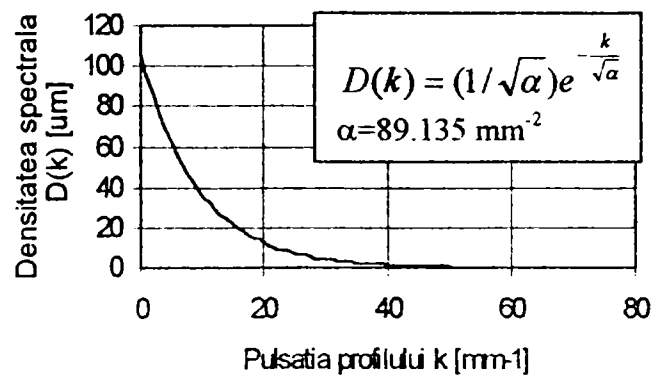
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

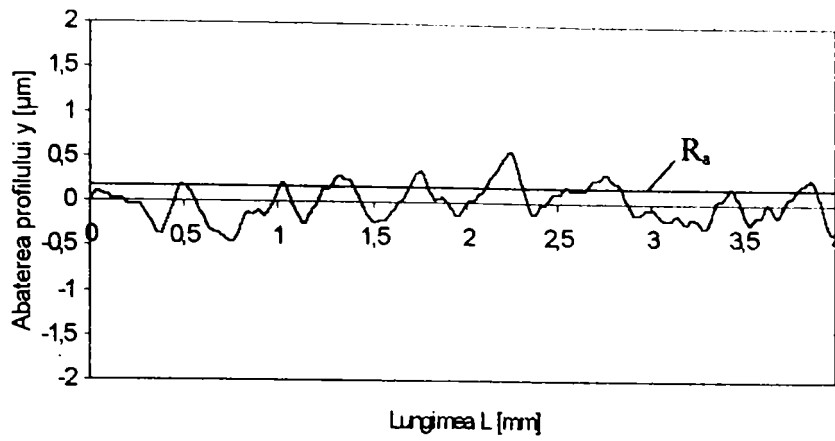


e) Funcția de autocorelație normalată

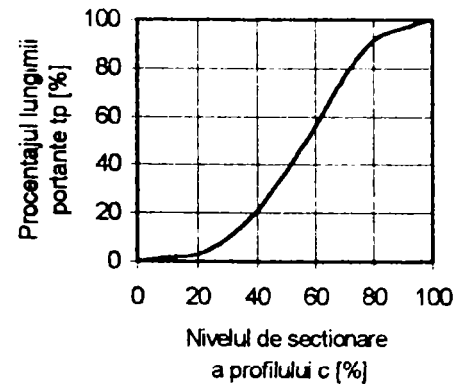


f) Funcția densitate de putere spectrală

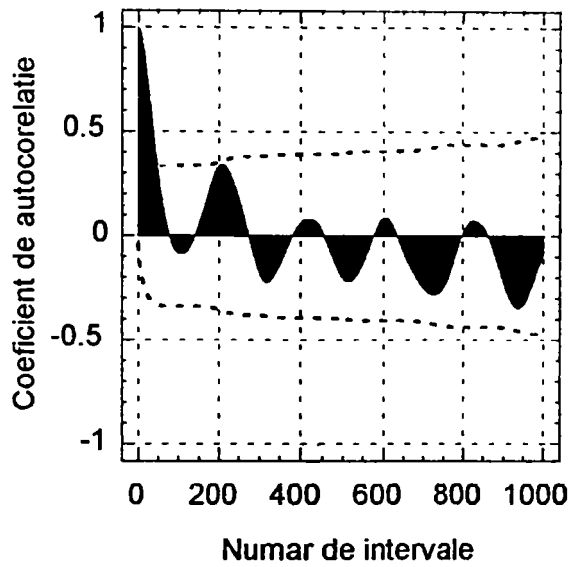
Fig.4.74 PROBA 6 din experimentul factorial



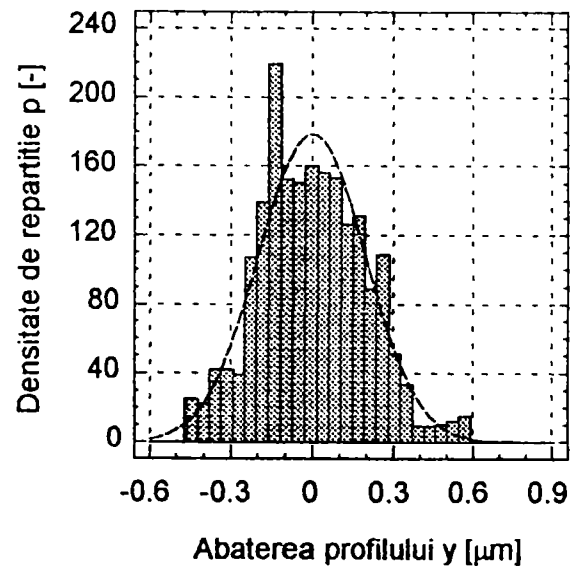
a) Profilul de rugozitate



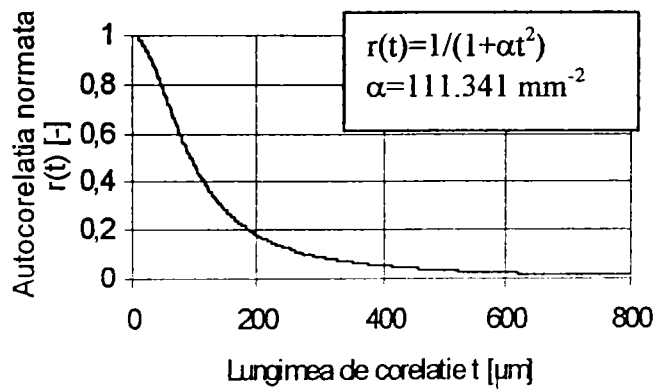
b) Procentajul portant al profilului



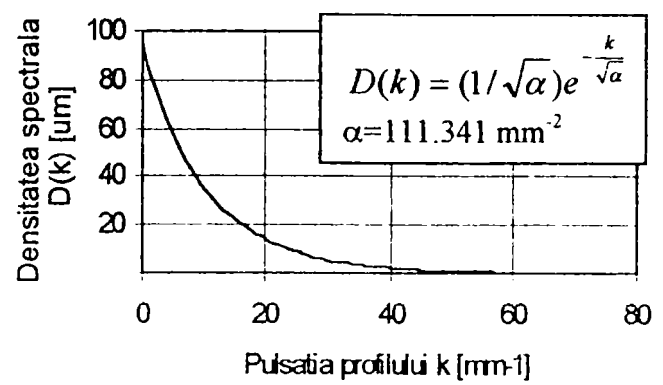
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

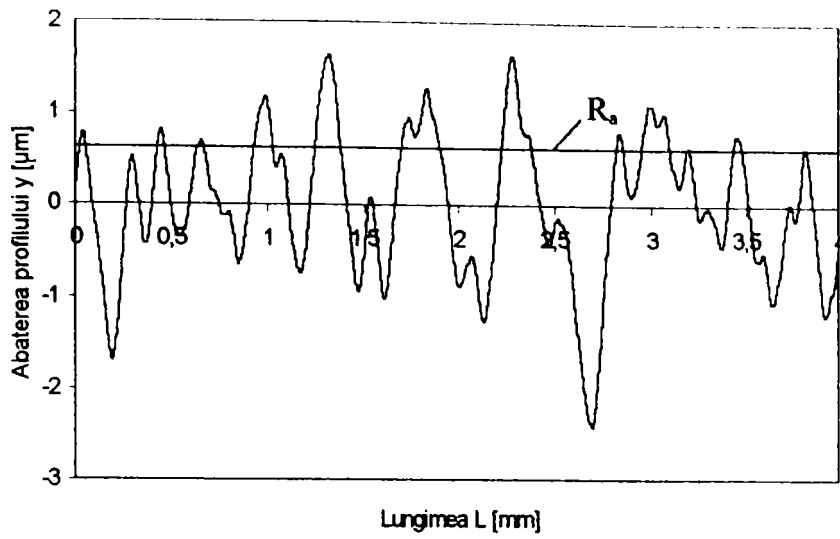


e) Funcția de autocorelație normată

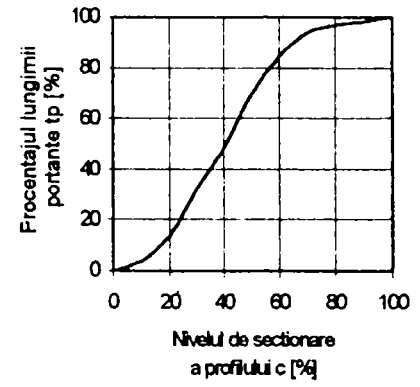


f) Funcția densitate de putere spectrală

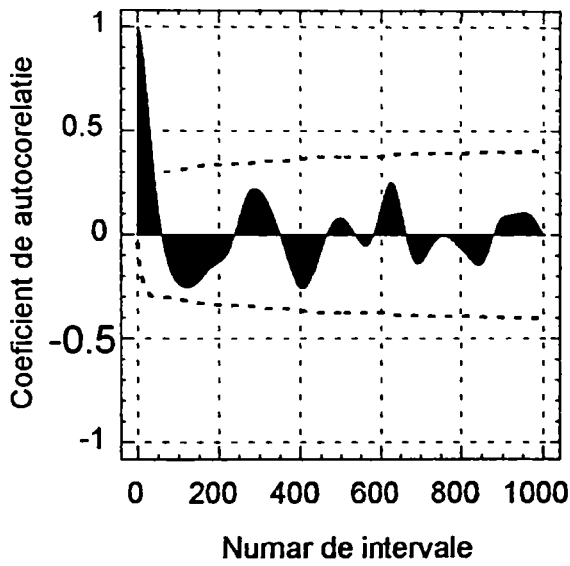
Fig.4.75 PROBA 7 din experimentul factorial



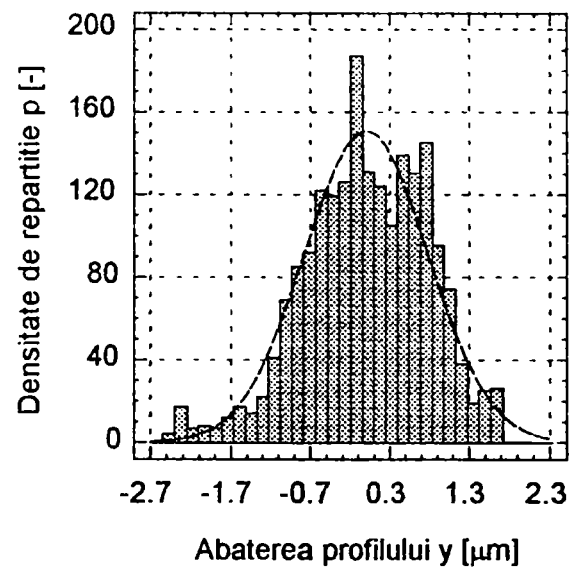
a) Profilul de rugozitate



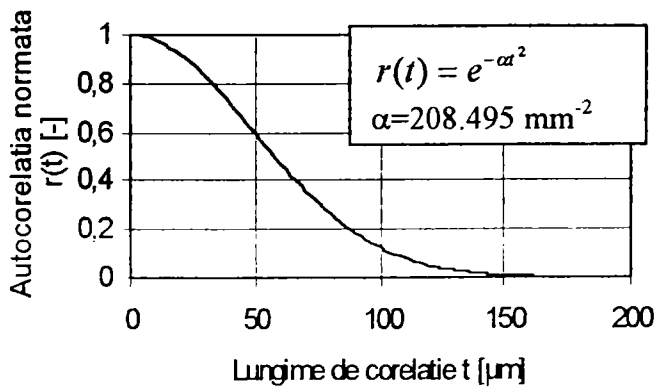
b) Procentajul portant al profilului



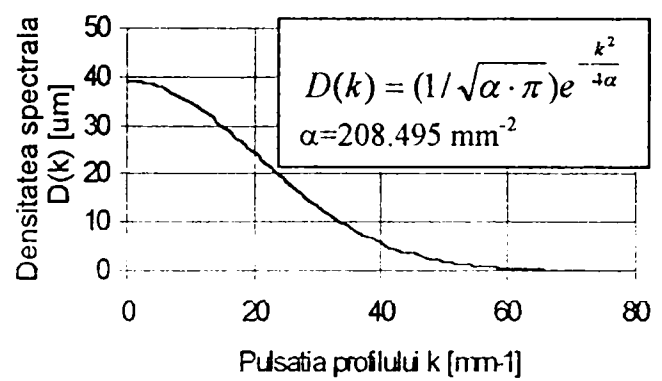
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului



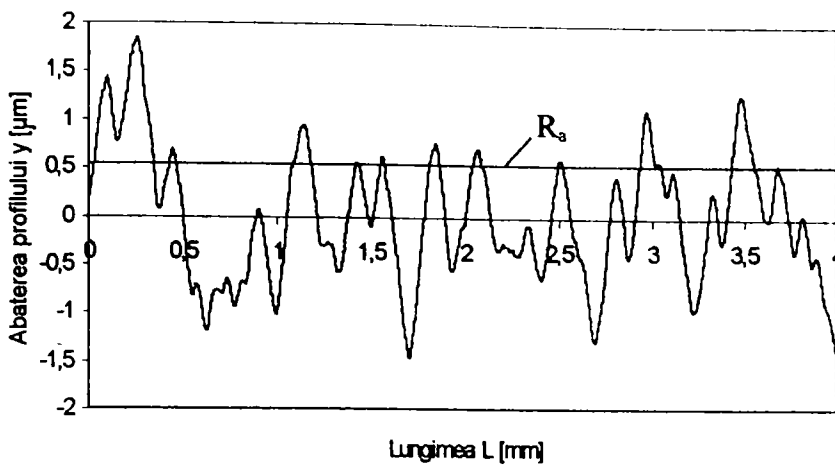
e) Funcția de autocorelație normată



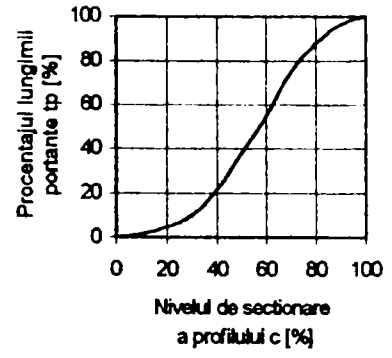
f) Funcția densitate de putere spectrală

Fig.4.76 PROBA 8 din experimentul factorial

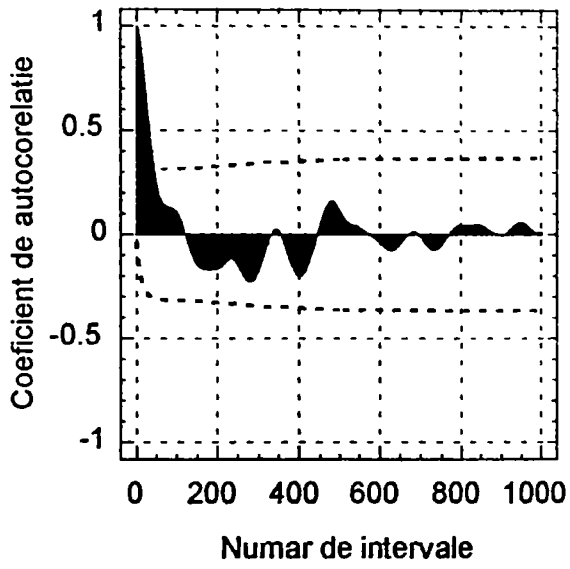




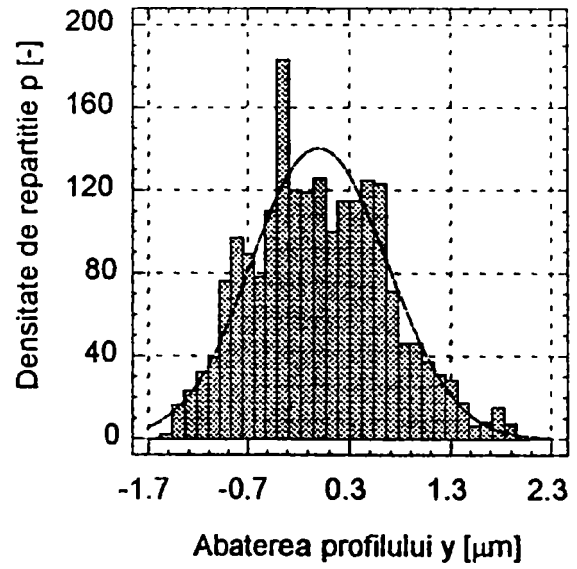
a) Profilul de rugozitate



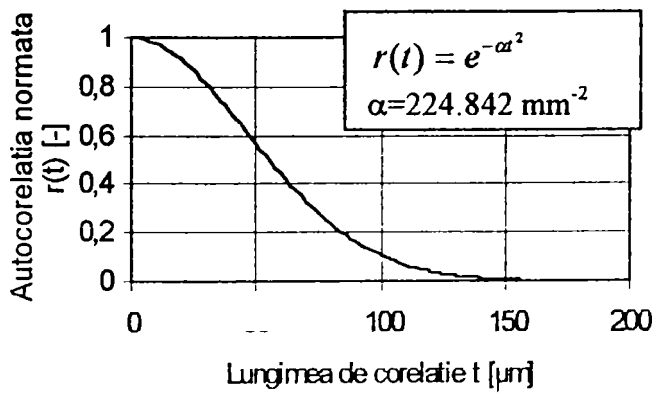
b) Procentajul portant al profilului



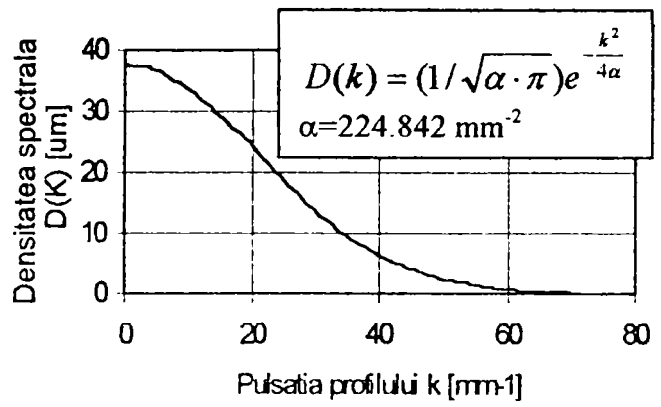
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

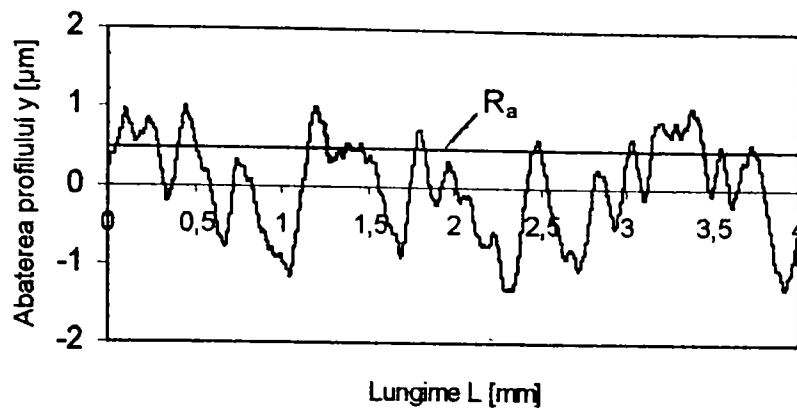


e) Funcția de autocorelație normată

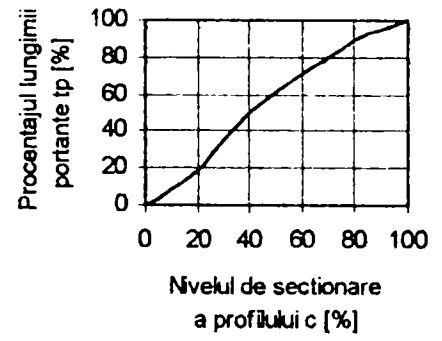


f) Funcția densitate de putere spectrală

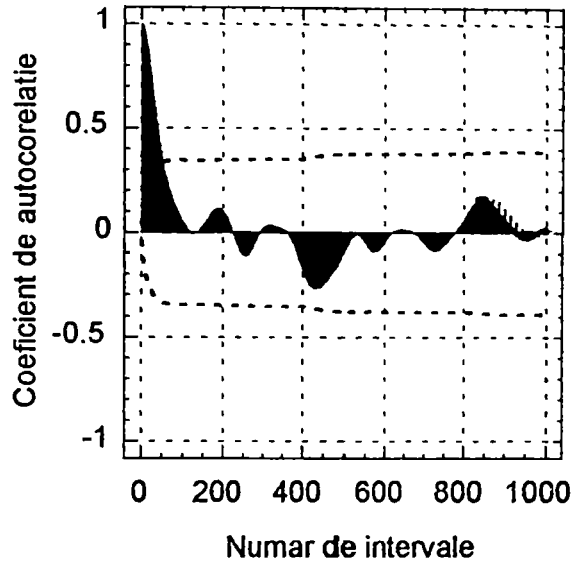
Fig.4.77 PROBA 9 din experimentul factorial



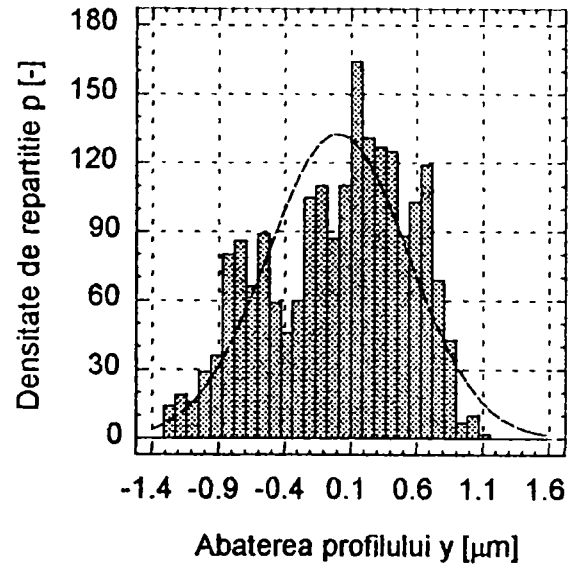
a) Profilul de rugozitate



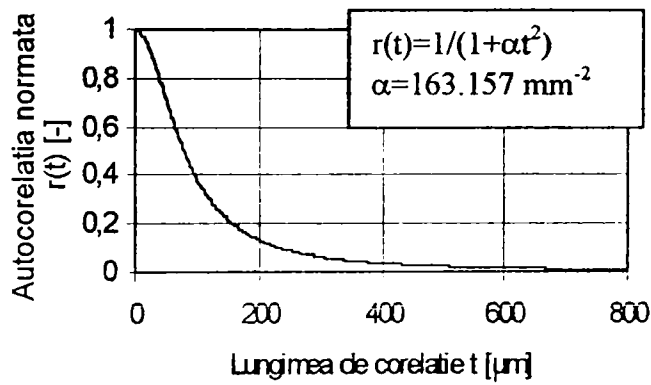
b) Procentajul portant al profilului



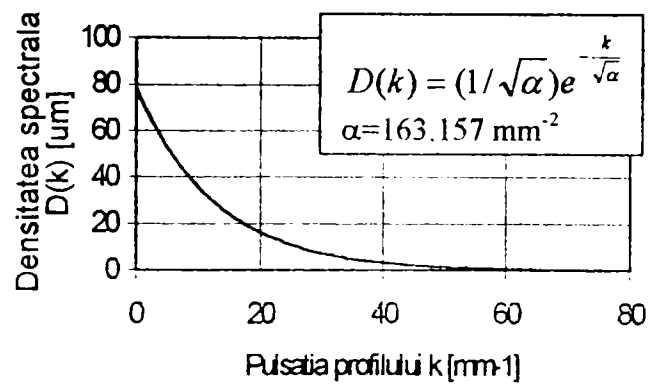
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

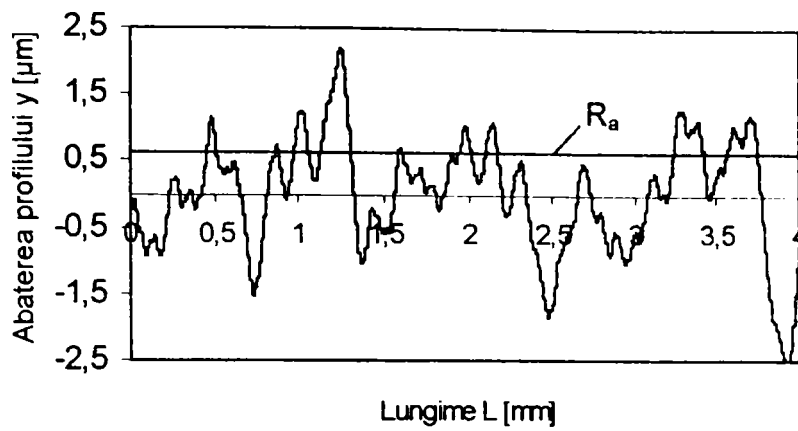


e) Funcția de autocorelație normată

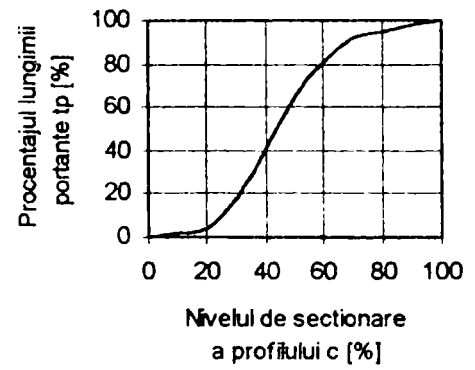


f) Funcția densitate de putere spectrală

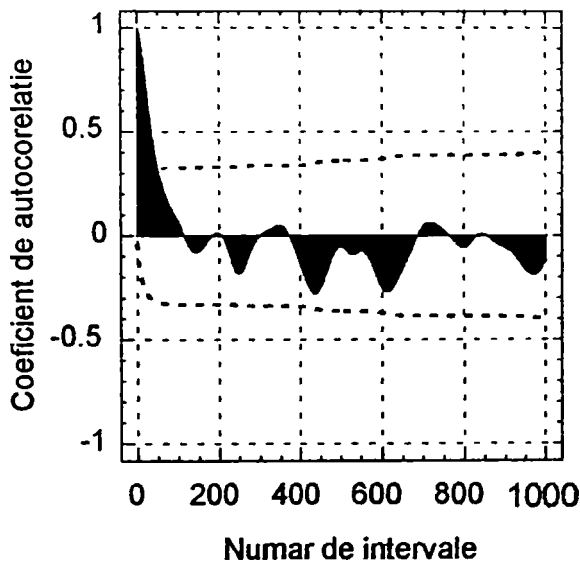
Fig.4.78 PROBA 10.1 din experimentul factorial



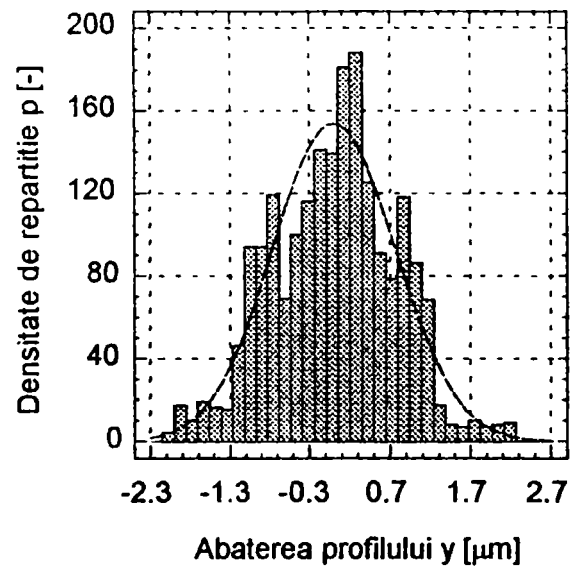
a) Profilul de rugozitate



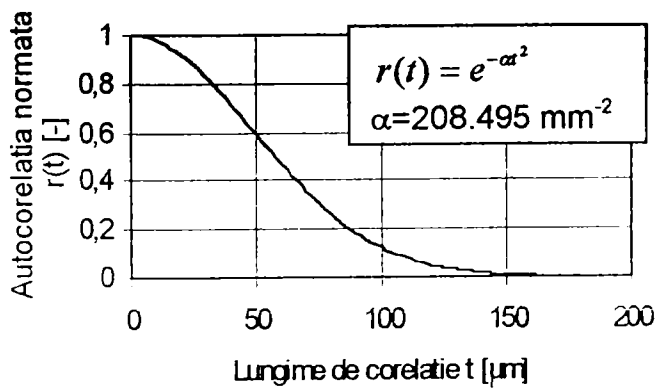
b) Procentajul portant al profilului



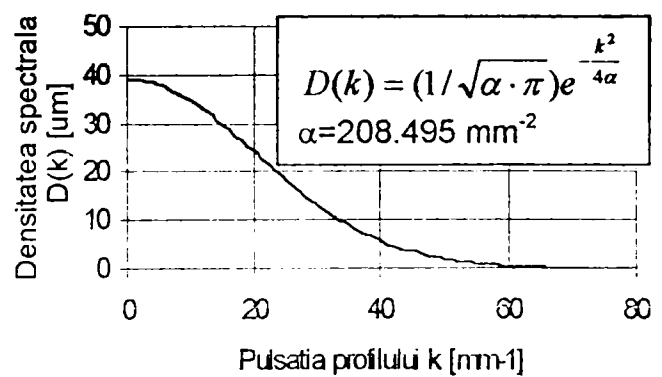
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

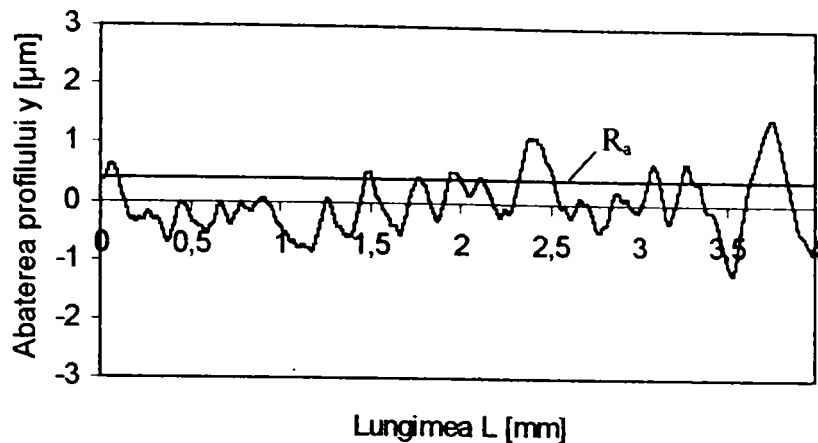


e) Funcția de autocorelație normalată

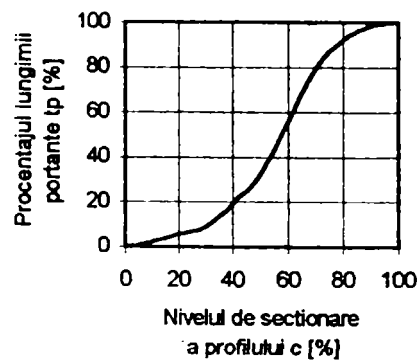


f) Funcția densitate de putere spectrală

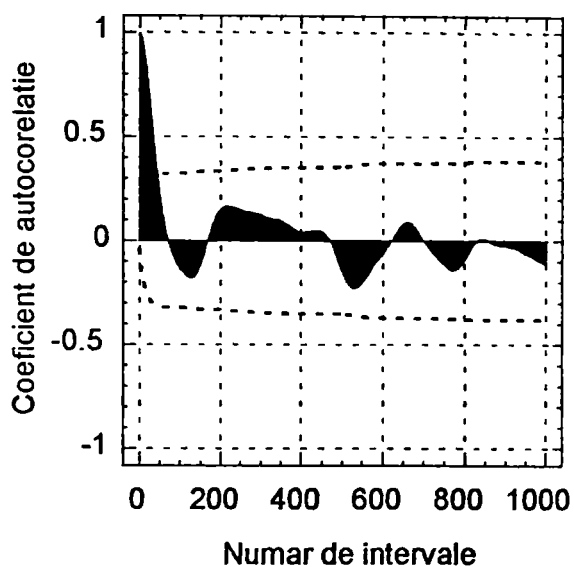
Fig.4.79 PROBA 10.2 din experimentul factorial



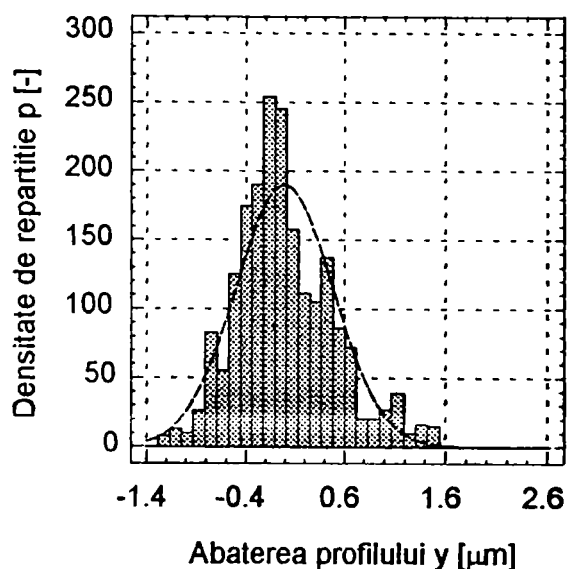
a) Profilul de rugozitate



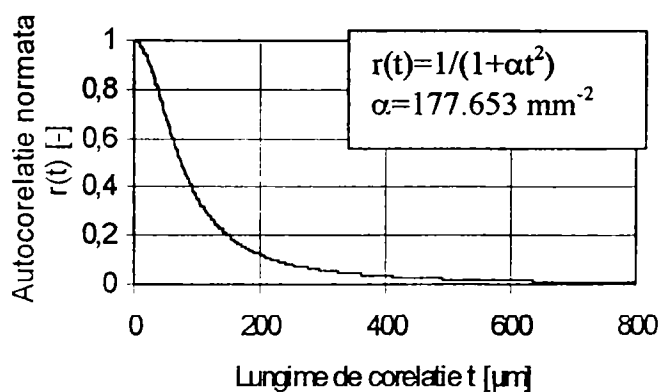
b) Procentajul portant al profilului



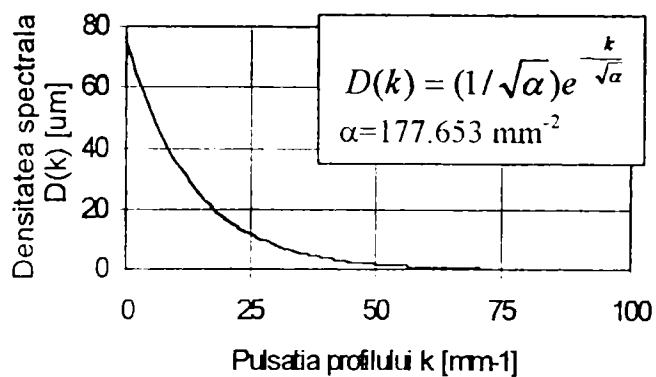
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

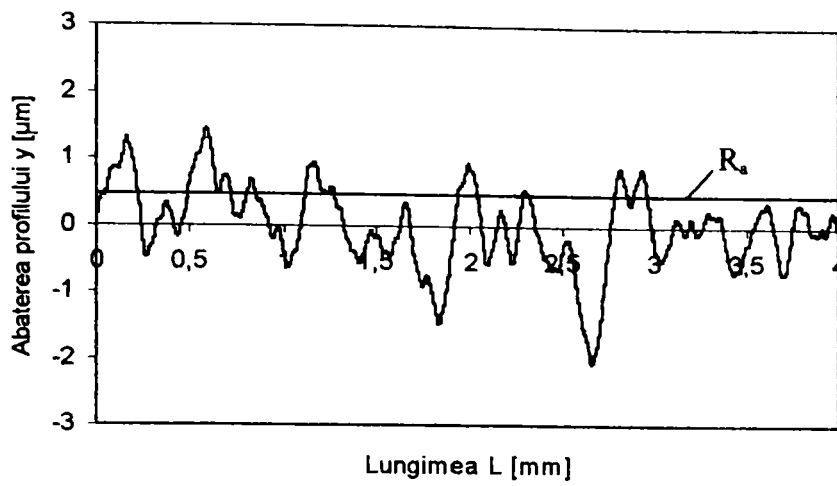


e) Funcția de autocorelație normalată

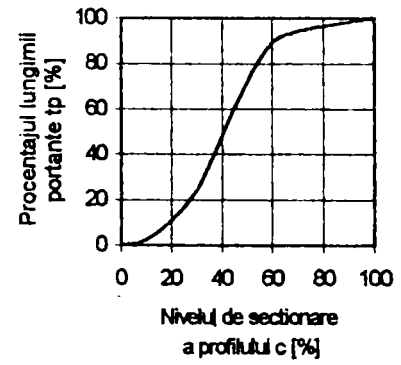


f) Funcția densitate de putere spectrală

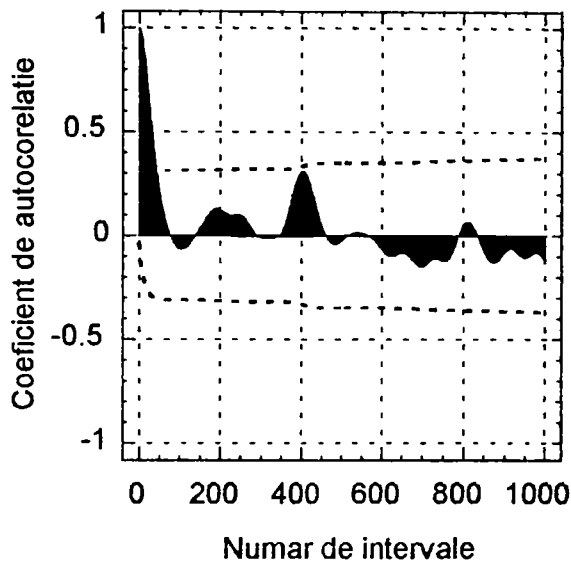
Fig.4.80 PROBA11 din experimentul factorial



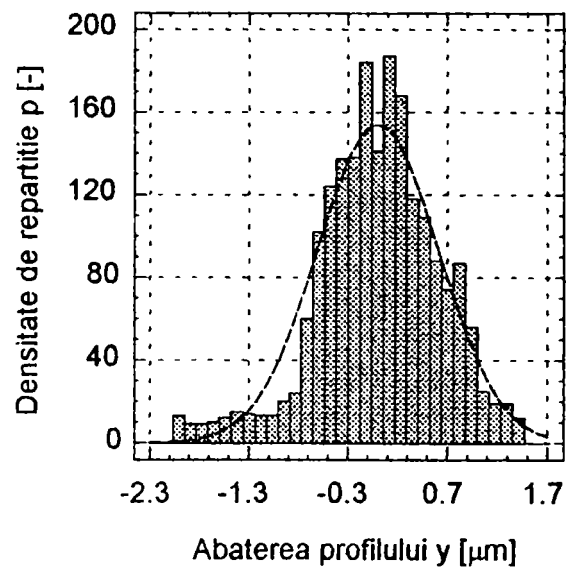
a) Profilul de rugozitate



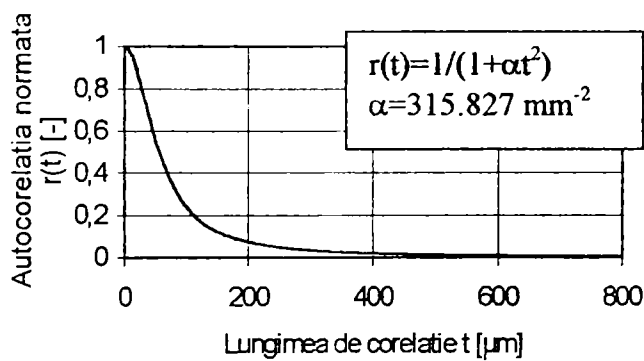
b) Procentajul portant al profilului



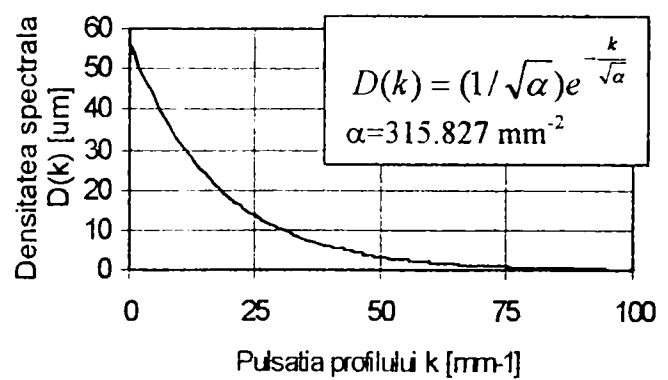
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

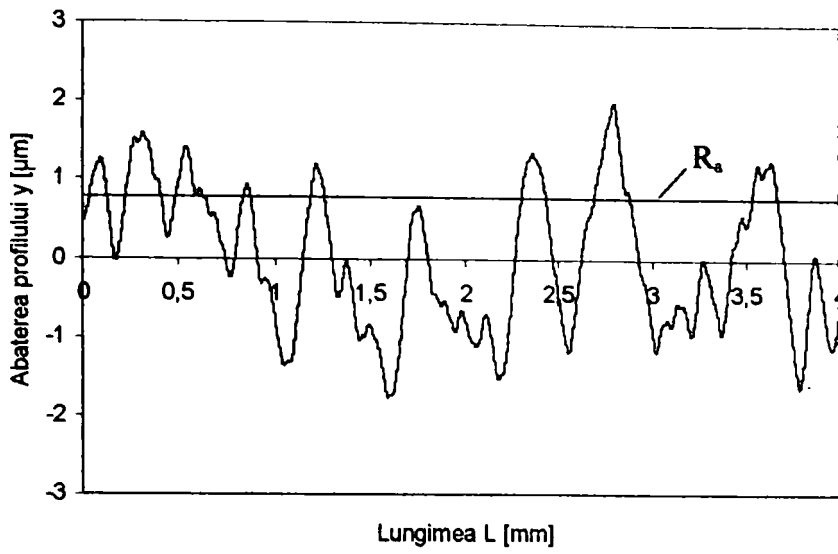


e) Funcția de autocorelație normată

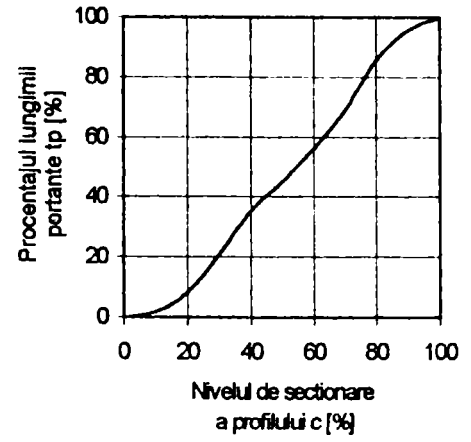


f) Funcția densitate de putere spectrală

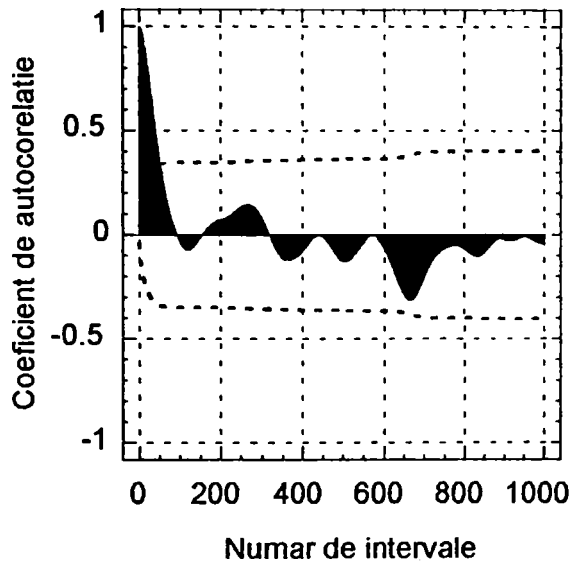
Fig.4.81 PROBA 12 din experimentul factorial



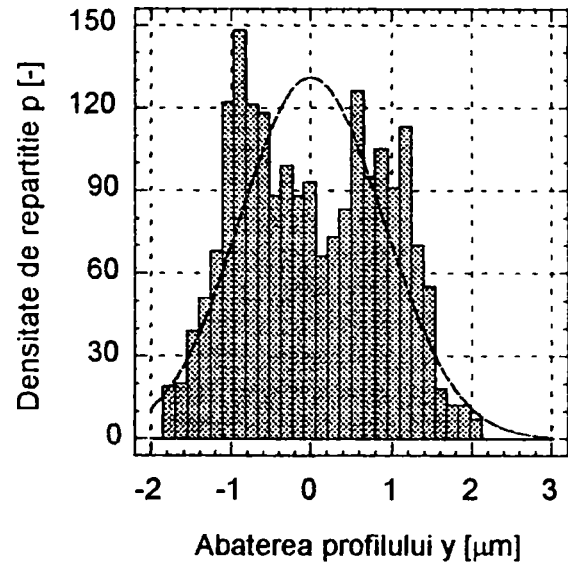
a) Profilul de rugozitate



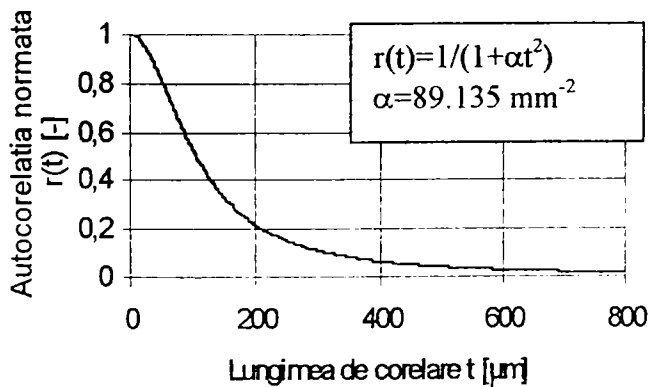
b) Procentajul portant al profilului



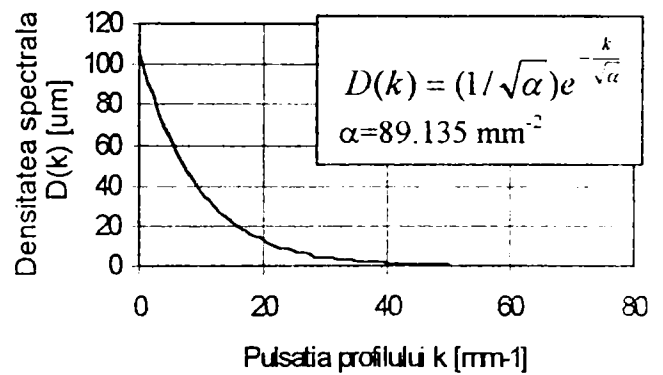
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului



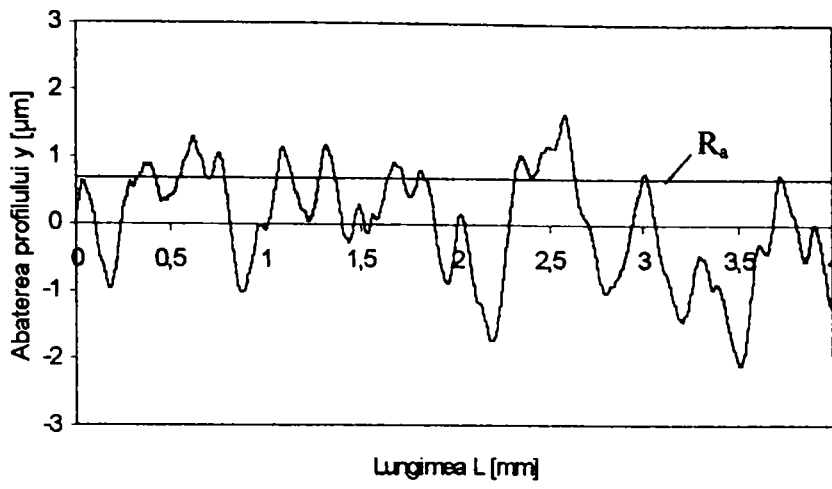
e) Funcția de autocorelație normalizată



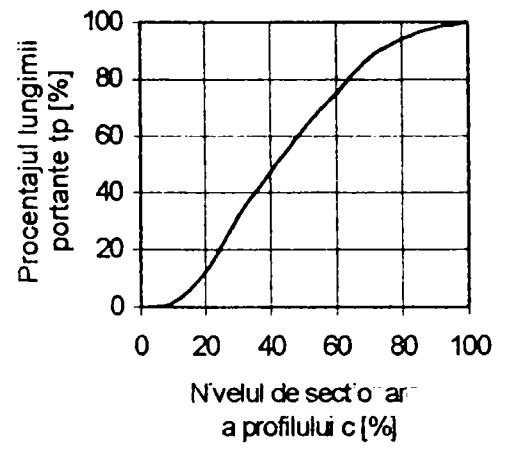
f) Funcția densitate de putere spectrală

Fig.4.82 PROBA 13 din experimentul factorial

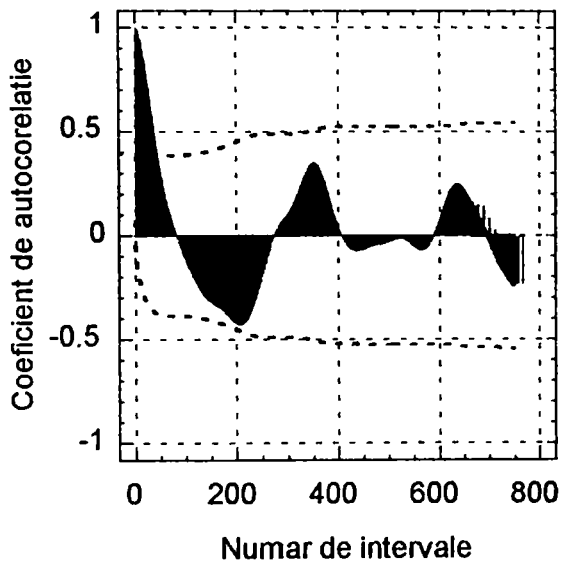




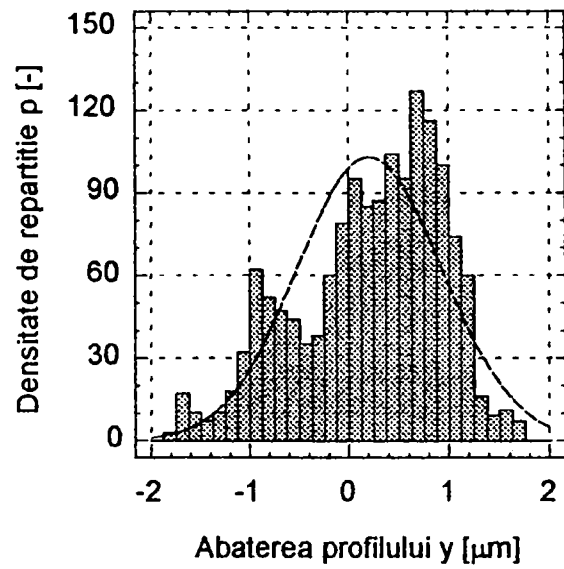
a) Profilul de rugozitate



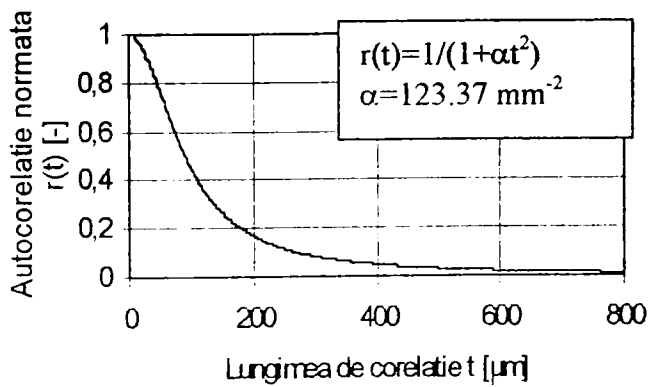
b) Procentajul portant al profilului



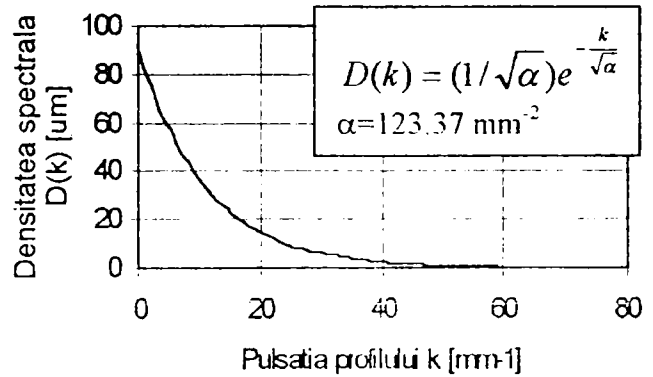
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

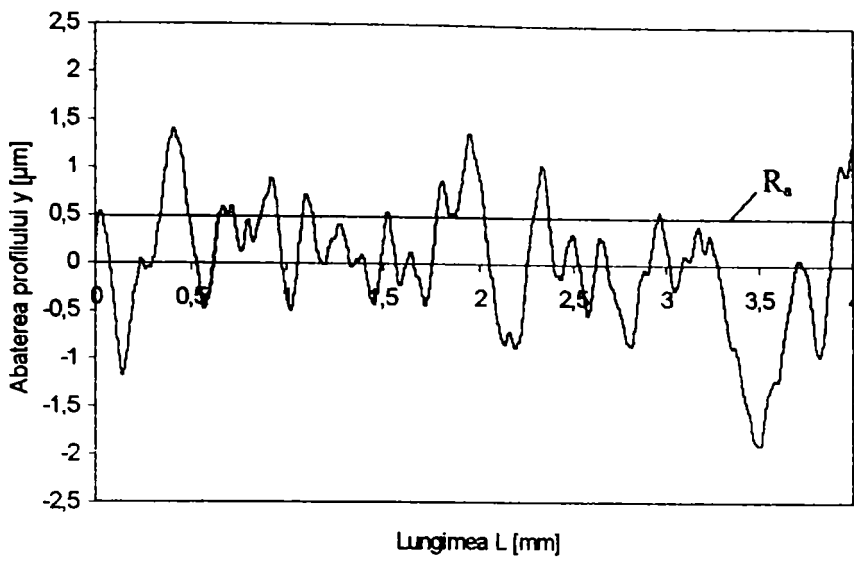


e) Funcția de autocorelație normalată

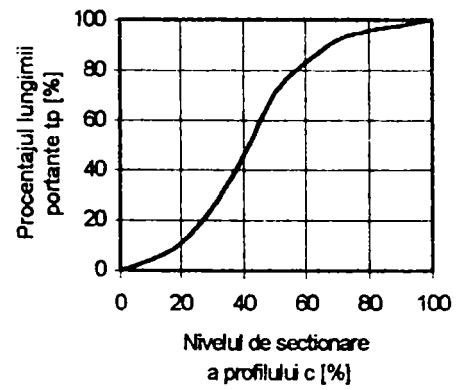


f) Funcția densitate de putere spectrală

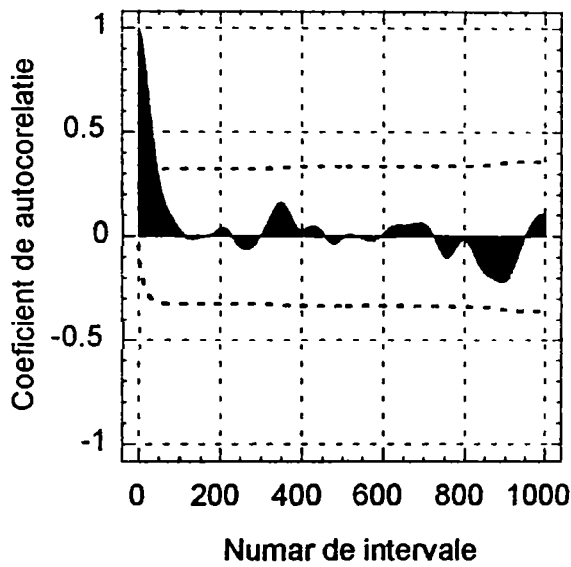
Fig.4.83 PROBA 14 din experimentul factorial



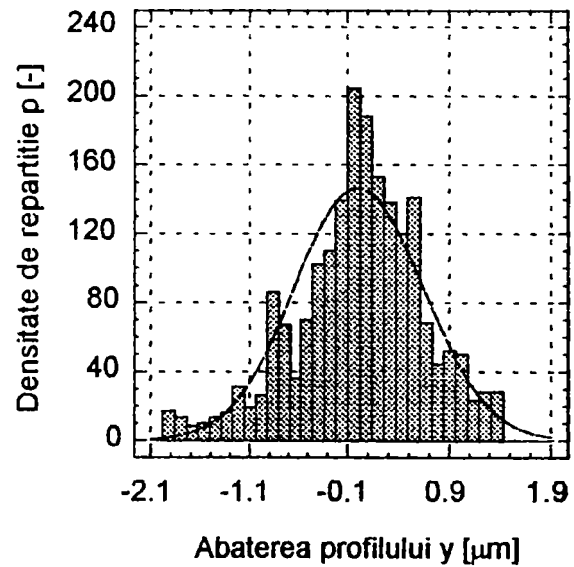
a) Profilul de rugozitate



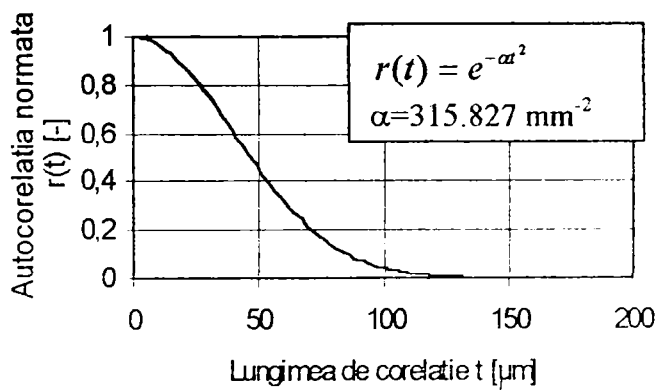
b) Procentajul portant al profilului



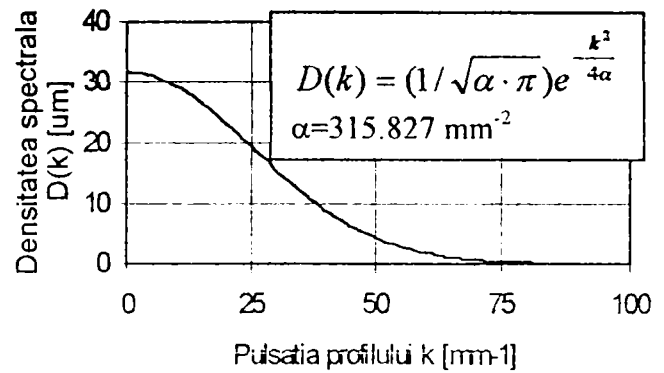
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

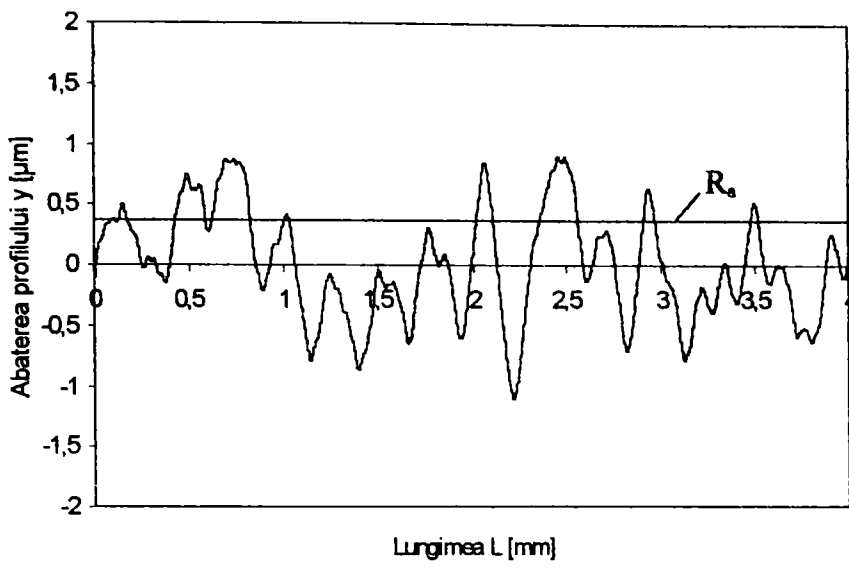


e) Funcția de autocorelație normalată

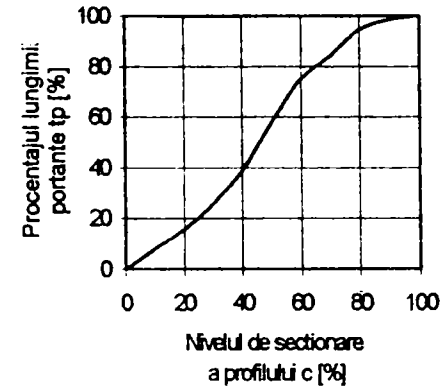


f) Funcția densitate de putere spectrală

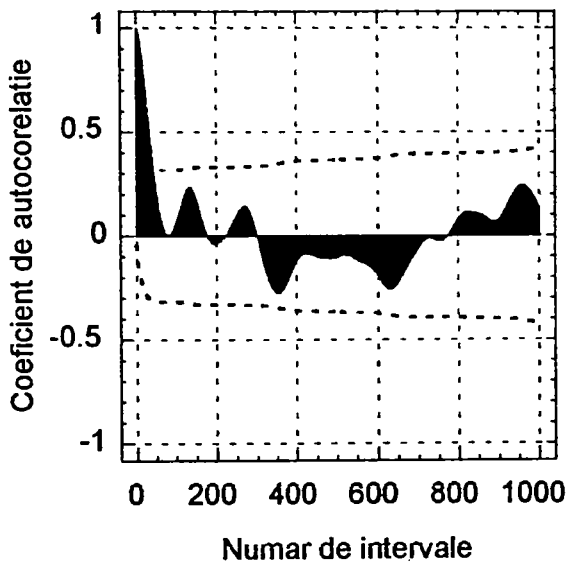
Fig.4.84 PROBA 15 din experimentul factorial



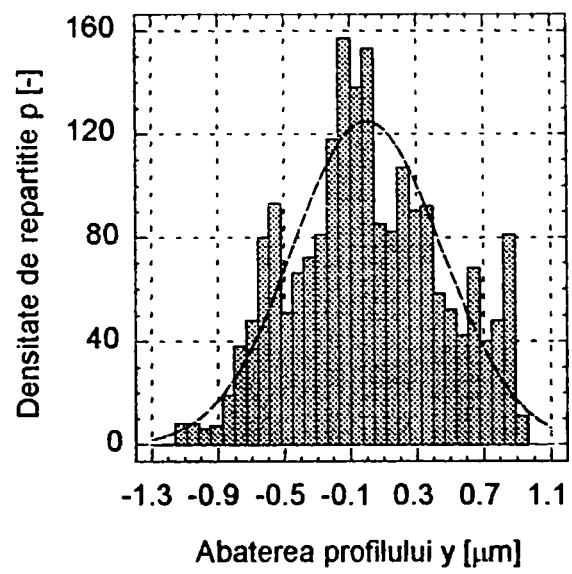
a) Profilul de rugozitate



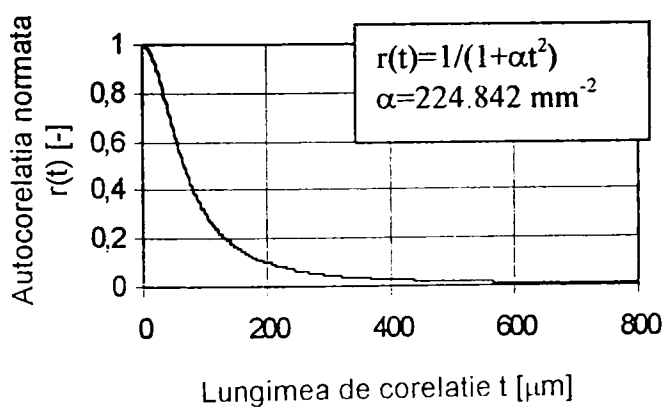
b) Procentajul portant al profilului



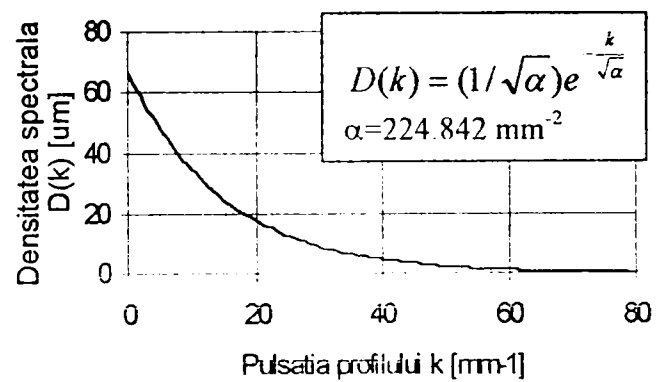
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

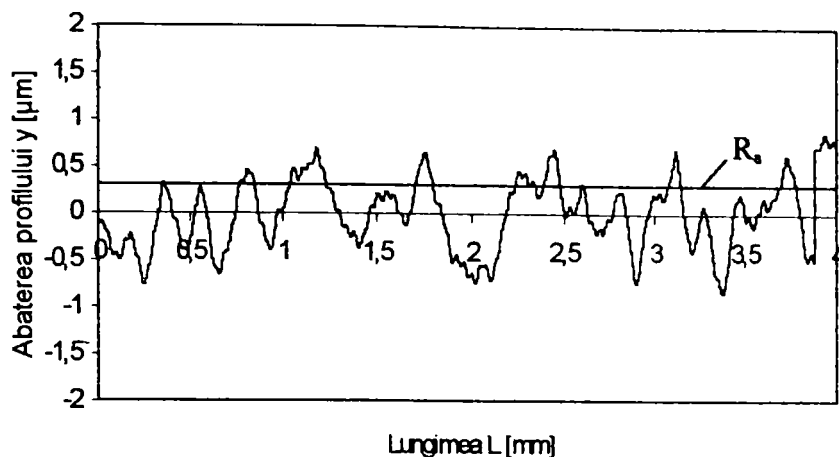


e) Funcția de autocorelație normată

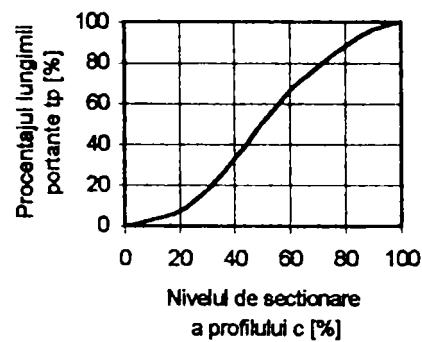


f) Funcția densitate de putere spectrală

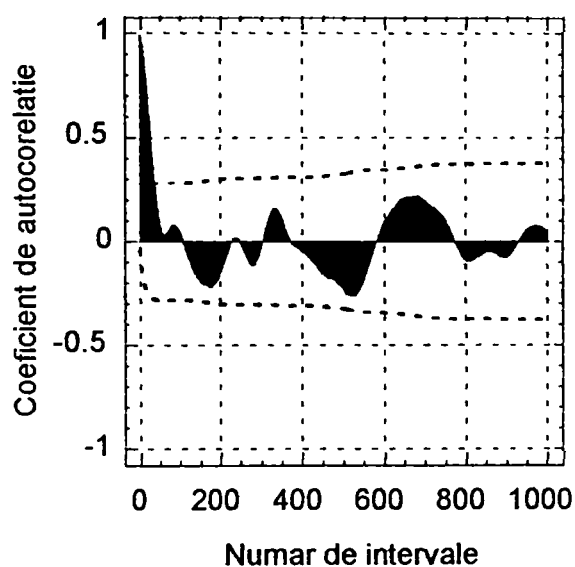
Fig.4.85 PROBA 16 din experimentul factorial



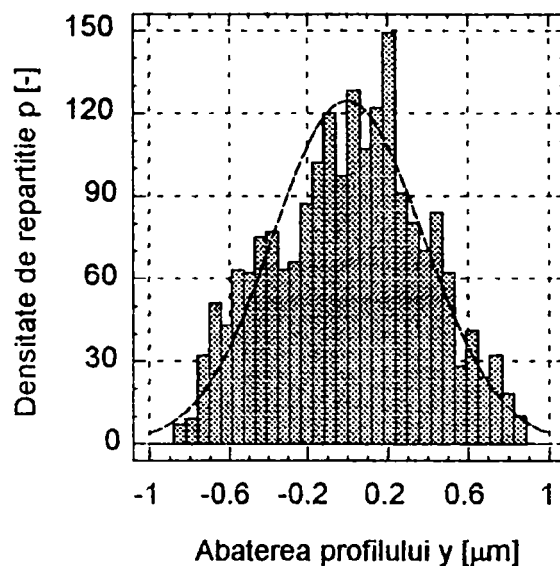
a) Profilul de rugozitate



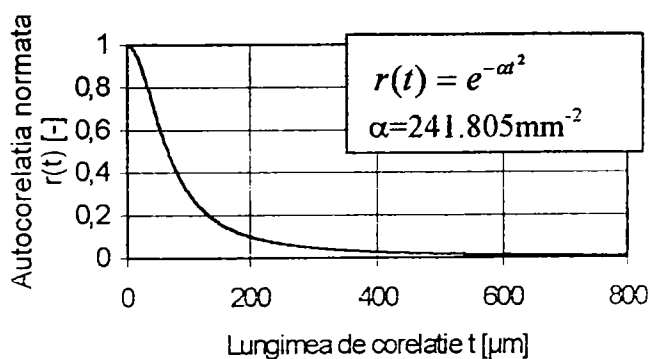
b) Procentajul portant al profilului



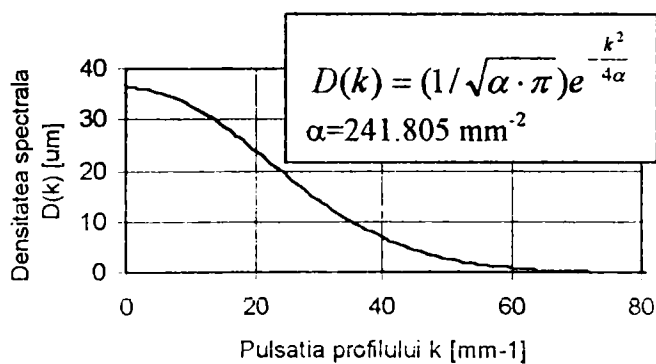
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

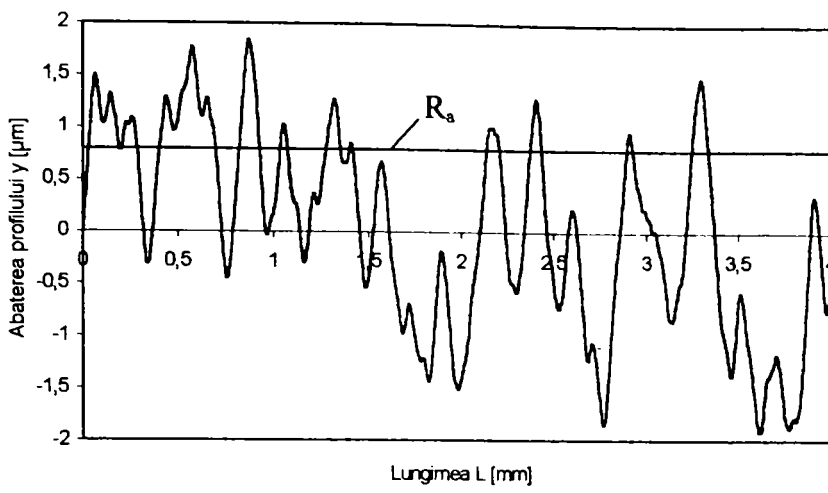


e) Funcția de autocorelație normată

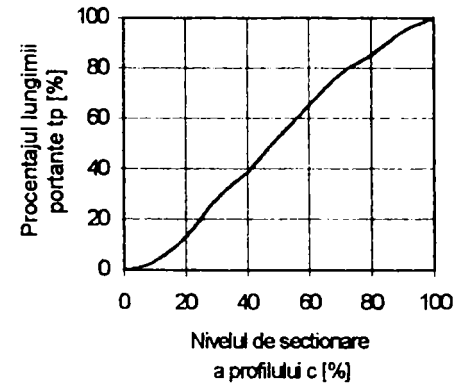


f) Funcția densitate de putere spectrală

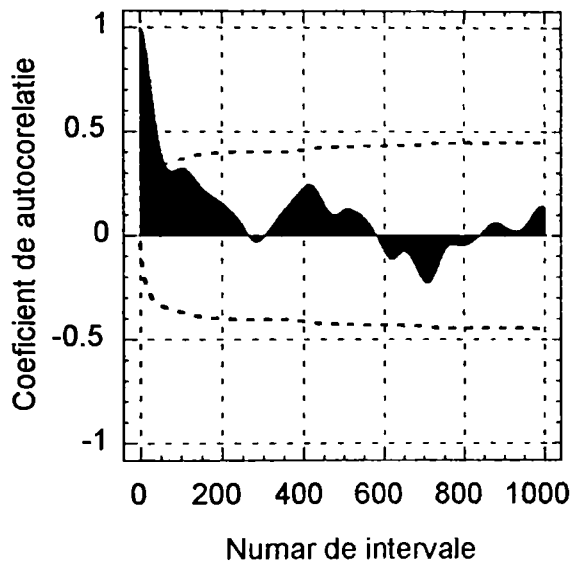
Fig.4.86 PROBA 17 din experimentul factorial



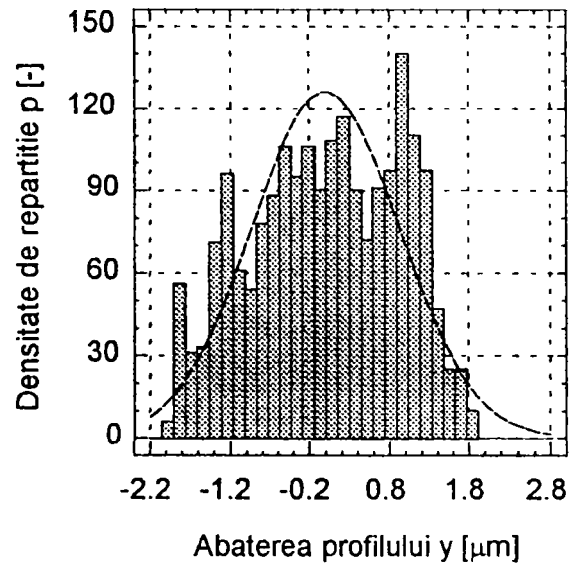
a) Profilul de rugozitate



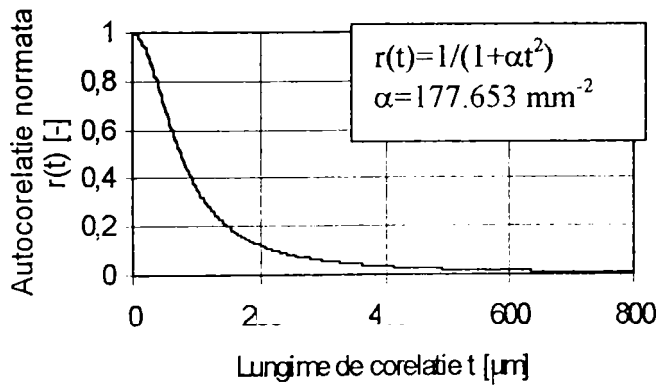
b) Procentajul portant al profilului



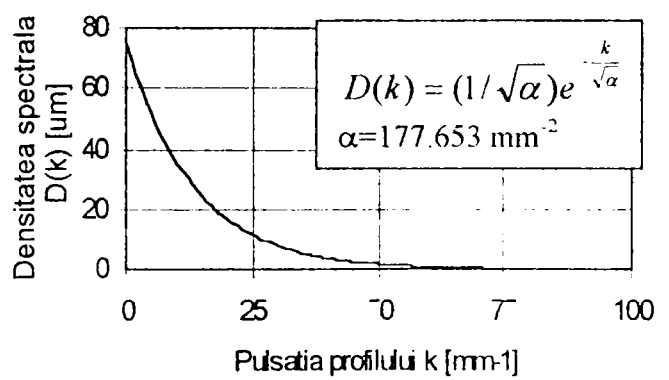
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

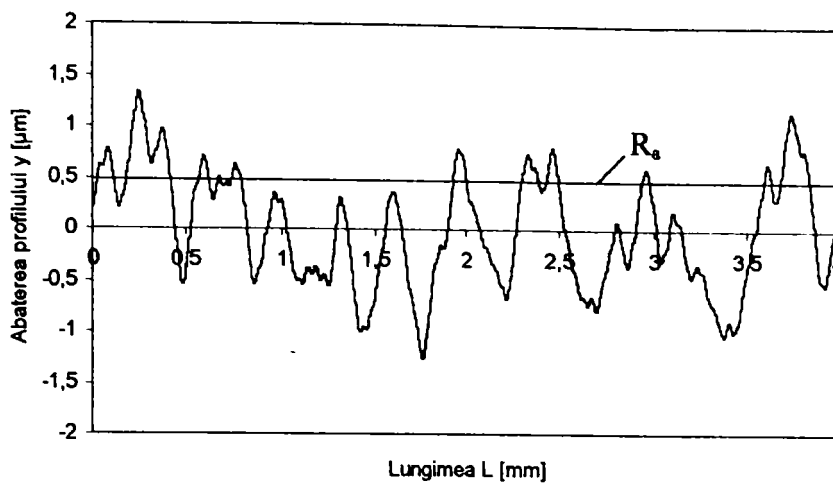


e) Funcția de autocorelație normată

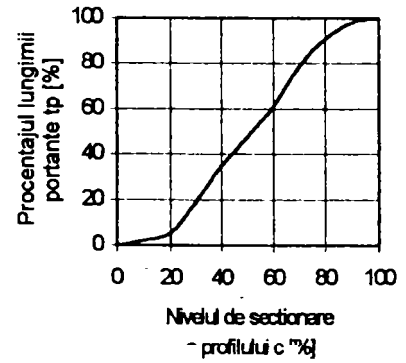


f) Funcția densitate de putere spectrală

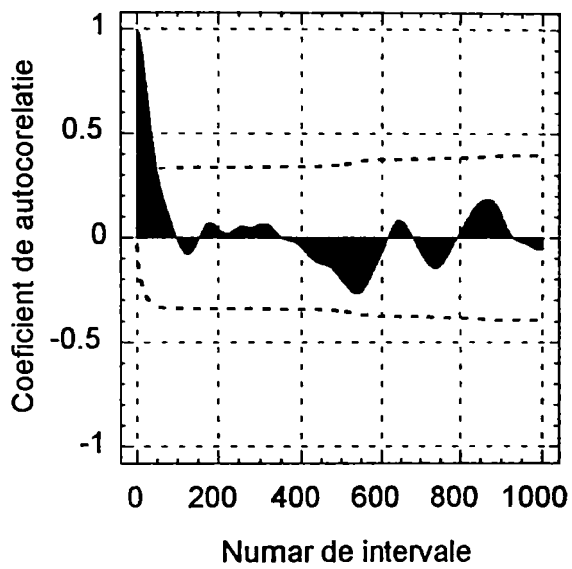
Fig.4.87 PROBA 18 din experimentul factorial



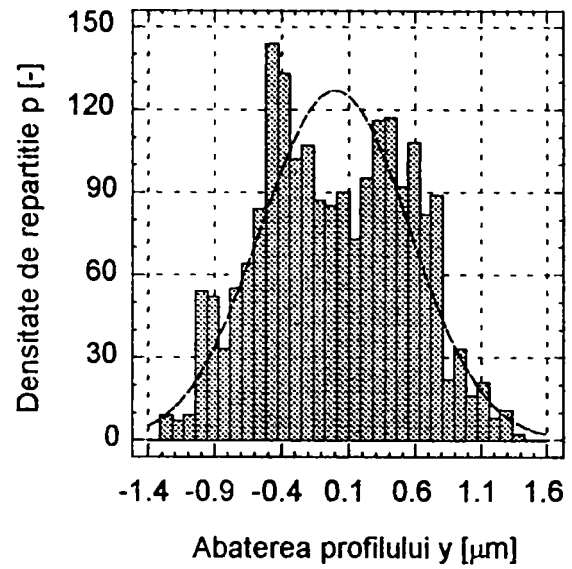
a) Profilul de rugozitate



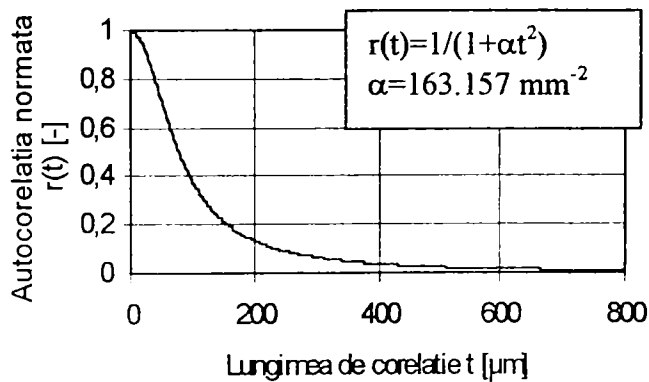
b) Procentajul portant al profilului



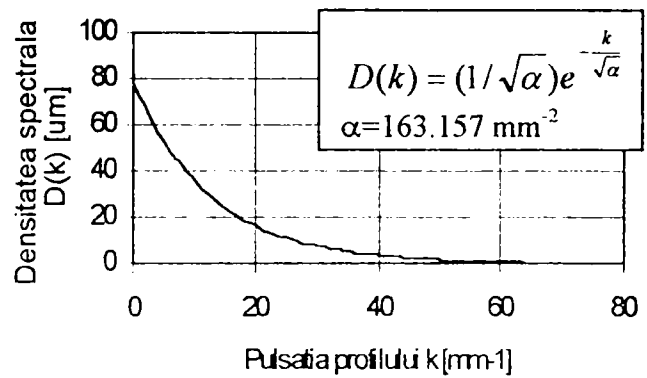
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului



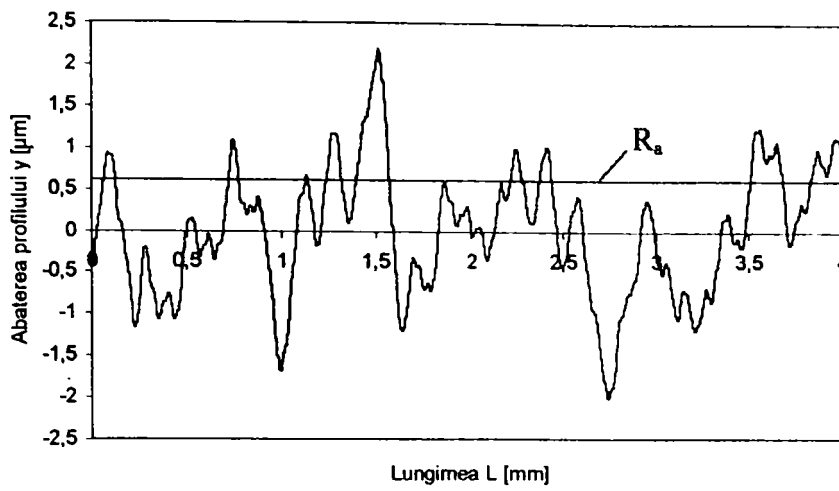
e) Funcția de autocorelație normalată



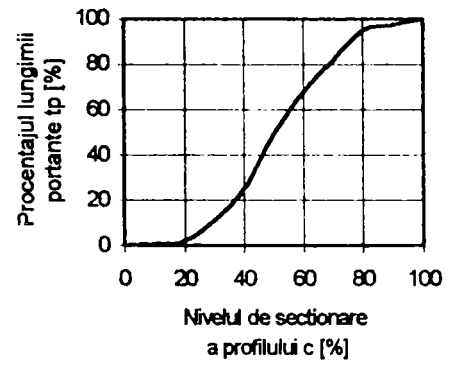
f) Funcția densitate de putere spectrală

Fig.4.88 PROBA 19.1 din experimentul factorial

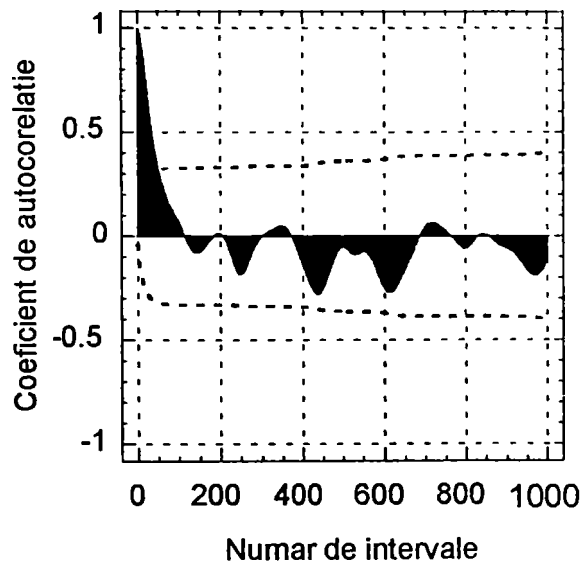




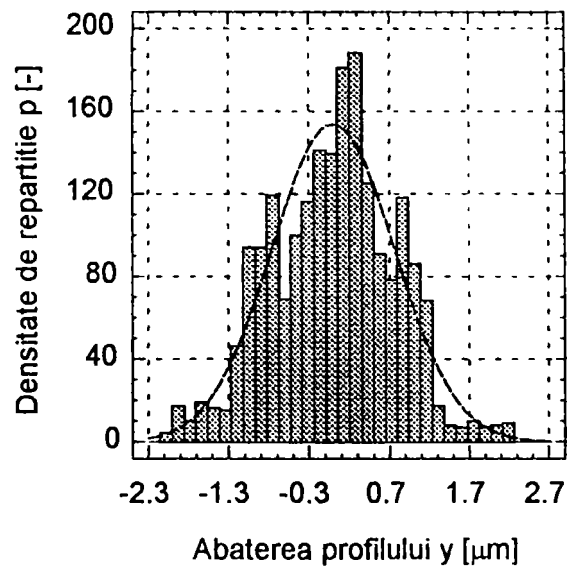
a) Profilul de rugozitate



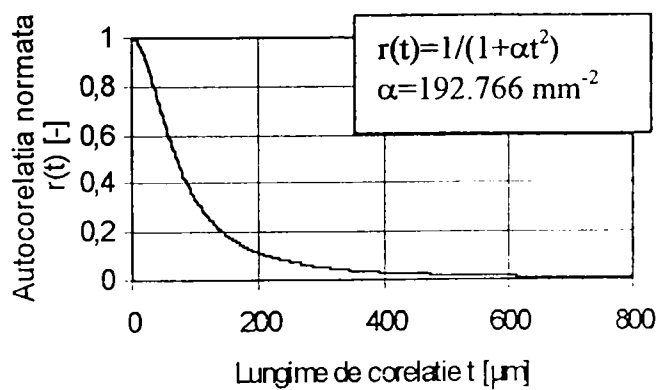
b) Procentajul portant al profilului



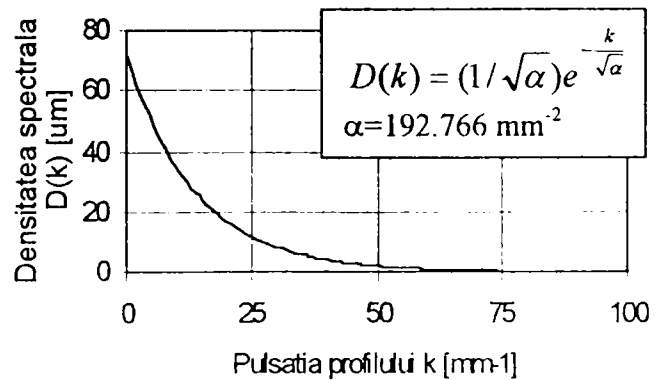
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

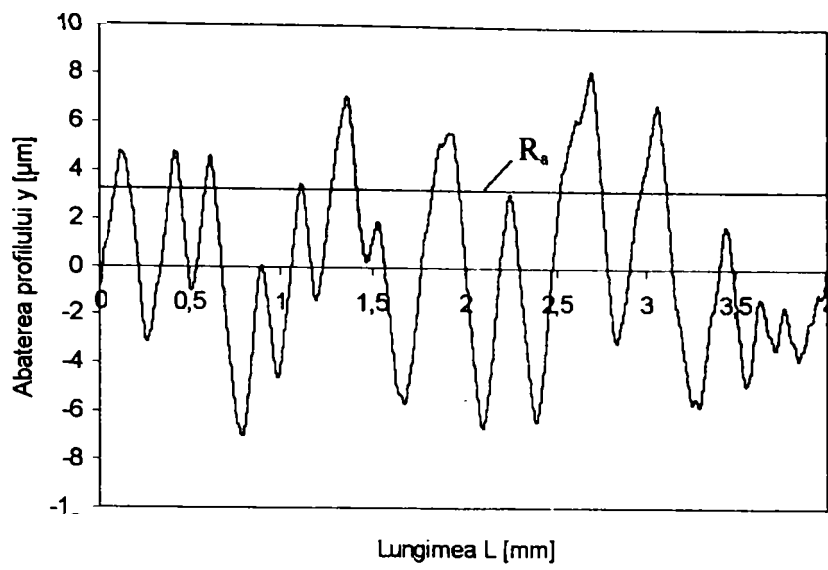


e) Funcția de autocorelație normată

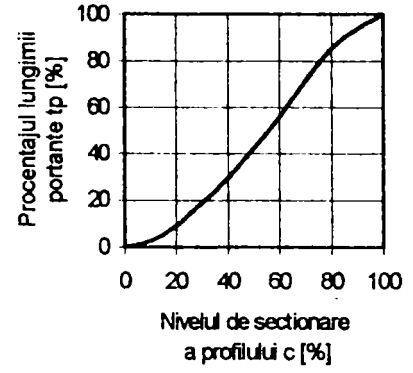


f) Funcția densitate de putere spectrală

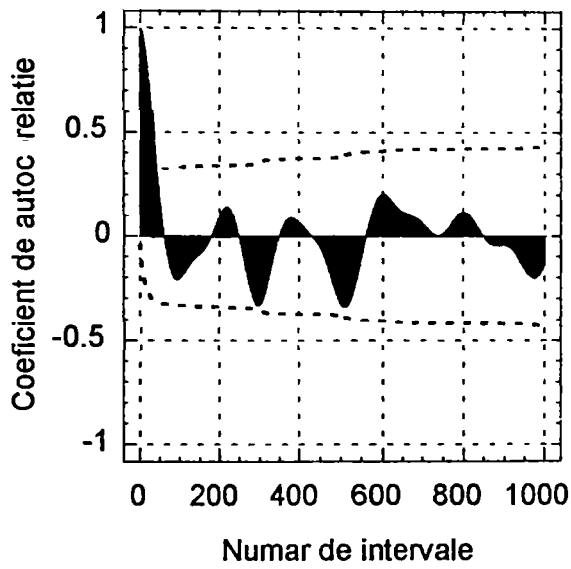
Fig.4.89 PROBA 19.2 din experimentul factorial



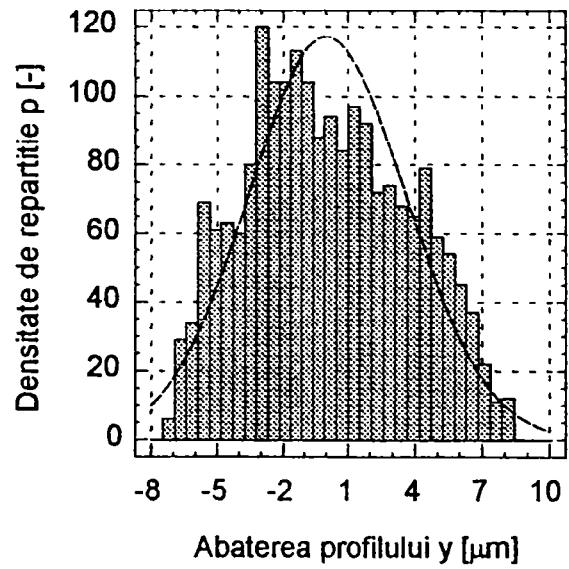
a) Profilul de rugozitate



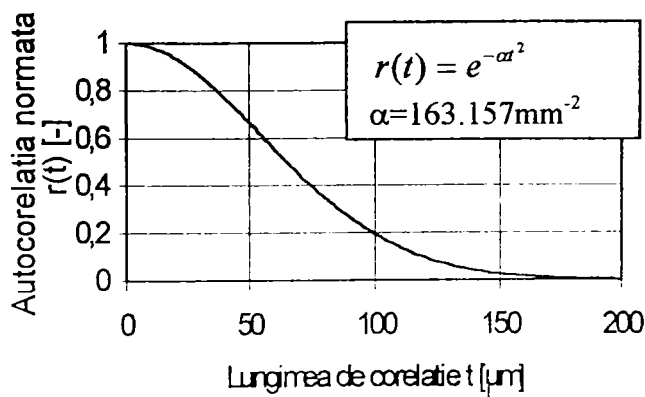
b) Procentajul portant al profilului



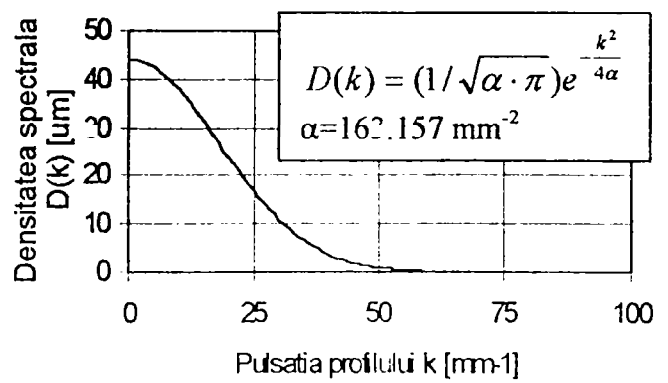
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

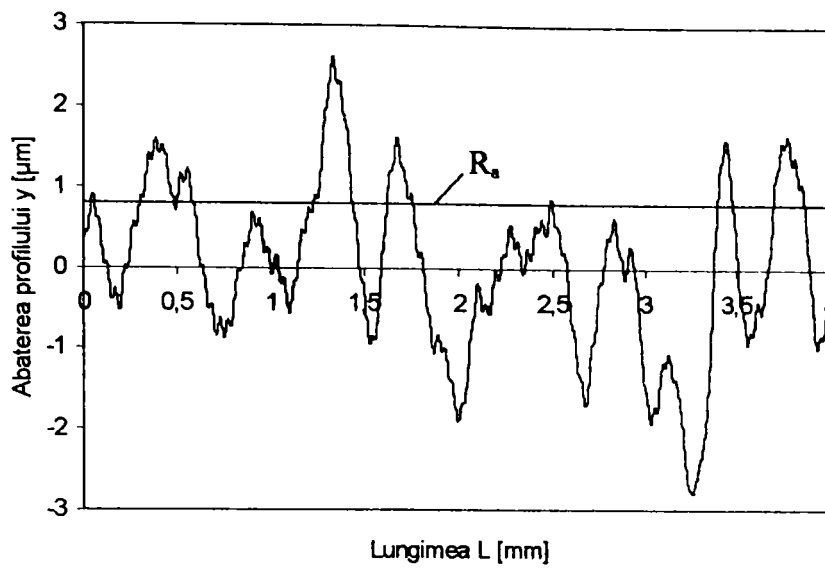


e) Funcția de autocorelație normată

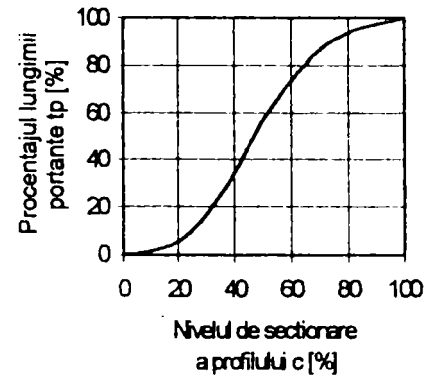


f) Funcția densitate de putere spectrală

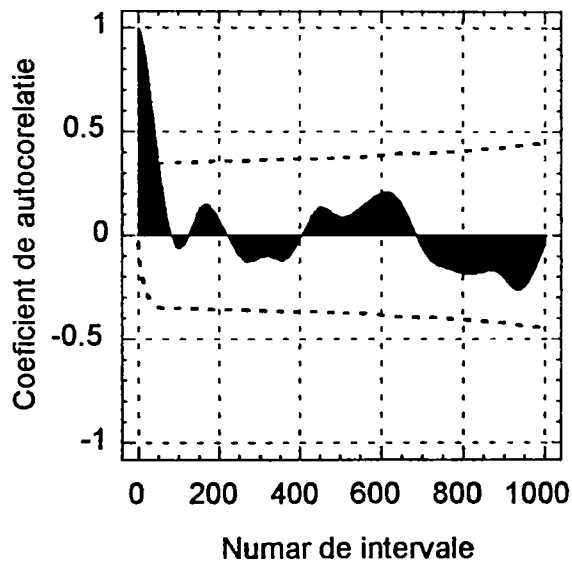
Fig.4.90 *PROBĂ STRUNJITĂ*



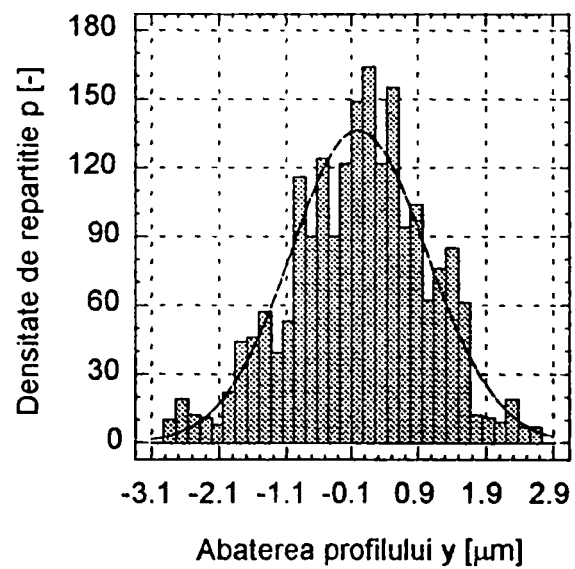
a) Profilul de rugozitate



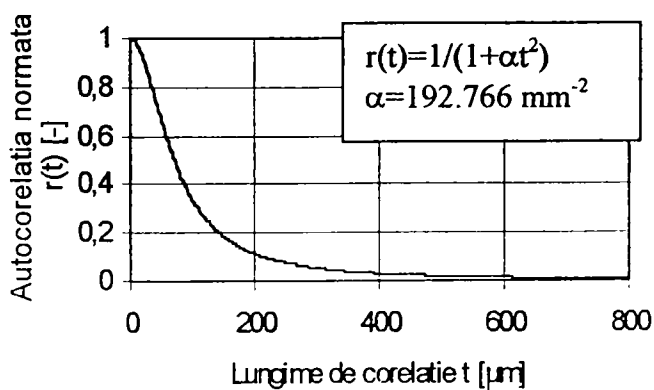
b) Procentajul portant al profilului



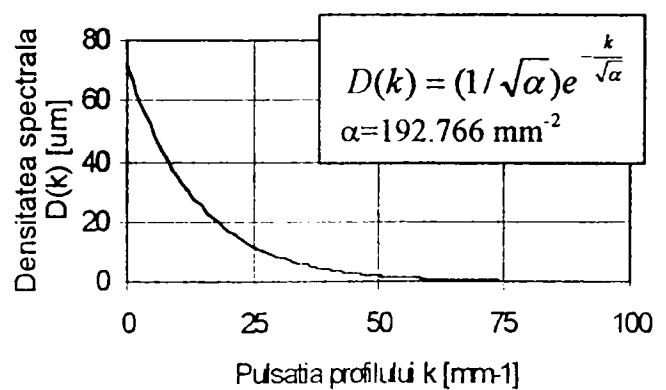
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului



e) Funcția de autocorelație normată



f) Funcția densitate de putere spectrală

Fig.4.91 *PROBĂ RECTIFICATĂ*

#### 4.4.4 Interpretarea rezultatelor și concluzii

În urma prelucrării rezultatelor experimentale, se poate formula concluzia că modelarea experimentală prin experiment factorial fracționat dă rezultate bune din punct de vedere al fidelității modelelor, rezultând precizii ale estimației între 82,73 % și 98,75%. Astfel modelele determinate pot fi utilizate pentru aprecierea funcțiilor obiectiv în domeniul multifactorial explorat, furnizând informații utile din punct de vedere tehnologic.

În domeniul experimental cercetat, analizând factorii de influență rezultați ca semnificativi și urmărind efectele acestora asupra funcțiilor obiectiv grupate pe patru categorii, conform paragrafului 4.1, se observă că:

a) Pentru toți indicatorii de înălțime natura abrazivului are influența cea mai mare, urmată de timp și/sau putere de activare ultrasonică și rugozitate inițială. Se remarcă că activarea ultrasonică conduce în toate cazurile la micșorarea microneregularităților suprafeței prelucrate. Acest fapt poate fi explicat prin intensificarea acțiunii de netezire a microneregularităților de către granulele ultrasonate. Presiunea de contact este semnificativă mai ales prin efectele date de interacțiunea cu rugozitatea inițială.

În vederea obținerii unor parametri de înălțime cât mai mici, deci minimizarea funcțiilor obiectiv  $y_1, y_3, y_4$  și  $y_6$ , trebuie ca  $x_1 \Leftrightarrow t \uparrow$ ,  $x_2 \Leftrightarrow Abr \downarrow$ ,  $x_3 \Leftrightarrow R_{ai} \downarrow$ ,  $x_4 \Leftrightarrow P_{us} \uparrow$ ,  $x_5 \Leftrightarrow p \uparrow$ .

b) În vederea interpretării geometrice a valorilor indicatorilor de formă trebuie specificat că [\*5],[Z2]:

- dacă  $k_{PR} \rightarrow 1$  profilul are o configurație fragilă, cu proeminente înguste și goluri largi;
- dacă  $k_{PR} \rightarrow 0$  profilul are o configurație robustă, cu proeminente largi și goluri înguste;
- dacă  $k_R \rightarrow 1$  profilul are puține proeminente și goluri raportat la linia medie;
- dacă  $k_R \rightarrow 0$  profilul are multe proeminente și goluri în raport cu linia medie;
- dacă  $k_{as} < 0$  profilul conține mai multe proeminente decât goluri;
- dacă  $k_{as} = 0$  profilul este simetric în raport cu linia medie;
- dacă  $k_{as} > 0$  profilul conține mai multe goluri decât proeminente;
- dacă  $k_{ex} < 0$  distribuția este restrânsă, profilul este plat cu proeminente scurte;
- dacă  $k_{ex} = 0$  distribuția este gaussiană;
- dacă  $k_{ex} > 0$  distribuția este extinsă, profilul este abrupt cu proeminente lungi.

În funcție de rolul funcțional al piesei prelucrate funcțiile obiectiv legate de forma profilului de rugozitate pot fi minimizate sau maximizate: de regulă la acest tip de prelucrări se dorește obținerea unui profil robust, care conferă o rezistență mai mare la uzare și coroziune, deci se urmărește ca:  $y_8 \Leftrightarrow k_{PR} \downarrow$ ,  $y_9 \Leftrightarrow k_R \uparrow$ ,  $y_{10} \Leftrightarrow k_{as} \downarrow$ ,  $y_{11} \Leftrightarrow k_{ex} \downarrow$ . Există însă și cazuri când este necesar un profil cu proeminente mai multe și mai lungi, de exemplu în cazul unui regim de frecare cu ungere, un rol important revine microcanalelor prin comportarea lor ca niște “buzunare de ungere”, în care lubrifiantul este menținut și/sau transportat în zona de frecare. În cazul frecării uscate rolul microcanalelor este de a asigura o formă aerodinamică a suprafeței prelucrate și de a

servi ca depozit al produselor rezultate din frecarea celor două elemente ale cuplei și, apoi, pentru îndepărtarea acestor produse. Un astfel de profil împiedică apariția fenomenelor de aderență între suprafețe și creșterea coeficientului de frecare. Pe de altă parte se asigură cuplelor de frecare din componența diferitelor mecanisme o perioadă scurtă de rodaj și trecerea mai rapidă la parametrii de funcționare proiectați [N2],[B4]. În această situație se impune ca:  $y_8 \Leftrightarrow k_{PR} \uparrow$ ,  $y_9 \Leftrightarrow k_R \downarrow$ ,  $y_{10} \Leftrightarrow k_{as} \uparrow$ ,  $y_{11} \Leftrightarrow k_{ex} \uparrow$ .

Se remarcă faptul că activarea ultrasonică are o influență semnificativă mai ales asupra lui  $y_8 \Leftrightarrow k_{PR}$  și  $y_{10} \Leftrightarrow k_{as}$ , prin ea însăși și prin interacțiunea cu presiunea de contact  $x_4 \cdot x_5$ , dar și asupra lui  $y_{11} \Leftrightarrow k_{ex}$  și mult mai puțin asupra lui  $y_9 \Leftrightarrow k_R$ . Când  $x_4 \Leftrightarrow P_{us} \uparrow$  atunci  $y_8 \Leftrightarrow k_{PR} \uparrow$ ,  $y_9 \Leftrightarrow k_R \uparrow$ ,  $y_{10} \Leftrightarrow k_{as} \uparrow$ ,  $y_{11} \Leftrightarrow k_{ex} \uparrow$  și când interacțiunea  $x_4 \cdot x_5 \Leftrightarrow P_{us} \cdot p \uparrow$  atunci  $y_8 \Leftrightarrow k_{PR} \uparrow$ ,  $y_{10} \Leftrightarrow k_{as} \uparrow$ ,  $y_{11} \Leftrightarrow k_{ex} \downarrow$ . Creșterea fragilității profilului suprafeței la aplicarea de oscilații ultrasonice este explicabilă datorită activării în direcție axială a piesei, respectiv a granulelor din spațiul de lucru. Cu creșterea presiunii se realizează un contact acustic mai bun, intensificându-se efectul ultrasunetelor.

Funcțiile obiectiv  $y_{14} \Leftrightarrow r$  și  $y_{15} \Leftrightarrow \theta$  sunt indicatori de planimetrare, dar sunt cei mai sensibili, depinzând la profilometrele cu palpator de raza de rotunjire a vârfului palpatorului. Rezultatele obținute arată că asupra lui  $y_{14} \Leftrightarrow r$  au influență semnificativă rugozitatea inițială  $x_3$ , interacțiunea acesteia cu timpul de prelucrare  $x_1 \cdot x_3$  și timpul  $x_1$ , la fel ca și pentru  $y_9 \Leftrightarrow k_R$ . În ceea ce privește  $y_{15} \Leftrightarrow \theta$ , rugozitatea inițială este cea mai semnificativă, urmată de interacțiunea acesteia cu presiunea de contact  $x_3 \cdot x_5$  și natura abrazivului. Puterea de activare ultrasonică influențează destul de semnificativ și pozitiv  $y_{14} \Leftrightarrow r$  și  $y_{15} \Leftrightarrow \theta$ , creșterea acesteia conducând la creșterea razei medii de rotunjire a vârfului microneregularităților și la scăderea unghiului mediu de înclinare a profilului față de linia medie.

c) La fel ca și funcțiile obiectiv ce caracterizează forma profilului de rugozitate a suprafeței, capacitatea portantă a profilului trebuie să satisfacă cerințele funcționale impuse suprafețelor pieselor. S-a analizat portanța la un nivel de secționare al profilului de 50% din adâncimea de nivelare. Activarea ultrasonică modifică funcția obiectiv  $y_{12} \Leftrightarrow t_{p0,5}$ , fiind importantă mai ales interacțiunea acesteia cu presiunea de contact  $x_4 \cdot x_5$  și cu rugozitatea inițială  $x_3 \cdot x_4$ . Influențele semnificative imediat următoare sunt date de interacțiunea timpului cu presiunea de contact  $x_1 \cdot x_5$  și puterea de activare ultrasonică  $x_4$ . Toate acestea acționează însă în sensul scăderii capacității portante a profilului. Astfel, pentru maximizarea portanței  $y_{12} \Leftrightarrow t_{p0,5} \uparrow$ , trebuie ca:  $x_1 \Leftrightarrow t \uparrow$ ,  $x_2 \Leftrightarrow Abr \downarrow$ ,  $x_3 \Leftrightarrow R_{ai} \uparrow$  (deși creșterea acestui factor de influență pare nefirească, interpretarea este clară: pornind de la o rugozitate inițială mai mică, nu se obține o creștere importantă a portanței),  $x_4 \Leftrightarrow P_{us} \downarrow$ ,  $x_5 \Leftrightarrow p \uparrow$ . Se observă că ultrasunetele au o influență similară ca și în cazul funcțiilor  $y_8 \Leftrightarrow k_{PR}$ ,  $y_{10} \Leftrightarrow k_{as}$ ,  $y_{11} \Leftrightarrow k_{ex}$ .

d) Productivitatea specifică a prelucrării reprezintă de fapt eficiența prelucrării, sub raportul scăderii rugozității finale față de cea inițială. Factorii de influență care acționează semnificativ sunt:  $x_3 \Leftrightarrow R_{ai}$ ,  $x_4 \Leftrightarrow P_{us}$ ,  $x_1 \Leftrightarrow t$ ,  $x_3 \cdot x_4 \Leftrightarrow R_{ai} \cdot P_{us}$ ,  $x_2 \Leftrightarrow Abr$ . Prelucrarea trebuie orientată astfel încât această funcție să fie maximizată  $y_2 \Leftrightarrow Q_s \uparrow$ , deci se impune ca:  $x_1 \Leftrightarrow t \uparrow$ ,  $x_2 \Leftrightarrow Abr \downarrow$ ,  $x_3 \Leftrightarrow R_{ai} \uparrow$ ,  $x_4 \Leftrightarrow P_{us} \uparrow$ , dar  $x_3 \cdot x_4 \Leftrightarrow R_{ai} \cdot P_{us} \downarrow$ . Este



evident că factorul determinant este rugozitatea inițială, la o rugozitate inițială mai mare, productivitatea crește, aceasta va crește și cu mărirea puterii de activare ultrasonică. Astfel, pentru domeniul investigat s-ar putea alege  $R_{ai}$  mai mari decât la leuirea clasică. Cu toate acestea interacțiunea  $x_3 \cdot x_4 \Leftrightarrow R_{ai} \cdot P_{us}$  conduce la scăderea productivității, deci trebuie ales totuși  $x_3 \Leftrightarrow R_{ai} \downarrow$ .

Trebuie remarcat că introducerea oscilațiilor ultrasonice în procesul de leuire plană acționează în sensuri diferite asupra funcțiilor obiectiv studiate, iar rezultatele par contradictorii din acest punct de vedere. Se concluzionează că activarea ultrasonică produce efecte pozitive prin micșorarea parametrilor de înălțime ai profilului de rugozitate și creșterea productivității specifice a prelucrării și efecte negative din punct de vedere al capacității portante.

Ținând cont de efectele colaterale exercitate de ceilalți factori de influență, pentru optimizarea funcțiilor obiectiv considerate de interes tehnologic deosebit, adică minimizarea funcției  $y_1 \Leftrightarrow R_a$ , și maximizarea funcțiilor  $y_2 \Leftrightarrow Q$  și  $y_{12} \Leftrightarrow t_{p0,5}$  se recomandă ca procesul de prelucrare, în domeniul experimental analizat, să se realizeze în următoarele condiții:  $x_1 \Leftrightarrow t \uparrow$ ,  $x_2 \Leftrightarrow Abr \downarrow$ ,  $x_3 \Leftrightarrow R_{ai} \downarrow$ ,  $x_5 \Leftrightarrow p \uparrow$ .

Studiul suprafețelor de răspuns pentru funcțiile obiectiv de interes tehnologic deosebit reprezentate prioritar în funcție de puterea ultrasonică și de factorii de influență semnificativi sau a căror interacțiune este semnificativă susțin concluziile formulate mai sus.

Analiza distribuției spațiale a neregularităților suprafeței pe baza funcțiilor de autocorelație și densitate de putere spectrală pune în evidență o structură similară predominant aleatoare a profilelor de rugozitate. Faptul că profilul este aleator este caracterizat și de natura funcțiilor obținute, monoton scăzătoare. Cu cât profilul este mai aleator, cu atât aceste funcții sunt mai scăzătoare.

Caracterul aleator al procesului de leuire este demonstrat și de caracterul aleatoriu al profilelor de rugozitate, care se păstrează independent de regimul de prelucrare. Studiul curbei coeficienților de autocorelație și a pantelor funcțiilor amintite permite evaluarea caracterului mai mult sau mai puțin aleatoriu al suprafețelor prelucrate, în raport cu factorii de influență din domeniul experimental investigat.

Interesează mai ales influența introducerii oscilațiilor ultrasonice în procesul de leuire asupra structurii aleatoare a neregularităților suprafeței. Comparând diferite probe prelucrate sau nu cu activare ultrasonică, pentru diferite nivele ale celorlalți factori de influență, se remarcă faptul că ponderea componentei aleatoare este mai mare la probele activate ultrasonic. Acest lucru poate fi pus în legătură cu mișcările mai haotice ale granulelor abrazive sub acțiunea unui câmp ultrasonic. În fazele de dilatare-comprimare la care este supusă pasta abrazivă în interstițiul dintre piesă și discul de leuit, vitezele relative ale granulelor variază mai mult, pe traiectorii mai complexe, crește numărul de granule care se rostogolesc, în detrimentul celor care alunecă. Același lucru se constată și din comparația probelor ultrasonate cu probele în stare inițială, strunjită sau rectificată.

Analizând și modul în care ceilalți factori de influență modifică structura profilului de rugozitate, se constată că timpi de prelucrare mai mari determină de asemenea o structură spațială mai aleatoare, ceea ce este justificat practic căci cu creșterea timpului,



granulele abrazive devin tot mai mici, mai ușoare, cu muchii mai rotunjite și deci efectuează mai multe mișcări de rotație și de rostogolire. Pentru restul factorilor, în condițiile experimentale date, nu a fost evidențiată o corelație semnificativă în estimarea ponderii componente aleatoare sau periodice a profilului de rugozitate.

În legătură cu cele afirmate anterior se poate spune că rezultatele obținute în urma experimentului factorial reflectă sensibilitatea indicatorilor de rugozitate la acțiunea oscilațiilor ultrasonice introduse în spațiul de lucru.

## 4.5 Experimente unifactoriale

### 4.5.1 Programul de experimentare

Pentru a întregi informațiile referitoare la influența exercitată de factorii de influență considerați ca ne semnificativi în urma aplicării bilanțului aleator, se efectuează experimente unifactoriale urmărind factorii de influență legați de granulația abrazivului, respectiv de concentrația masică a acestuia în lichidul purtător, restul factorilor fiind în același domeniu de experimentare ca și cel ales pentru experimentul factorial. Acești factori, deși au o importanță mai mică, nu pot fi aleși într-un mod oarecare, ci se stabilesc pe un anumit nivel în funcție de condițiile impuse suprafeței prelucrate. Firmele producătoare de paste abrazive oferă de regulă recomandări în acest sens.

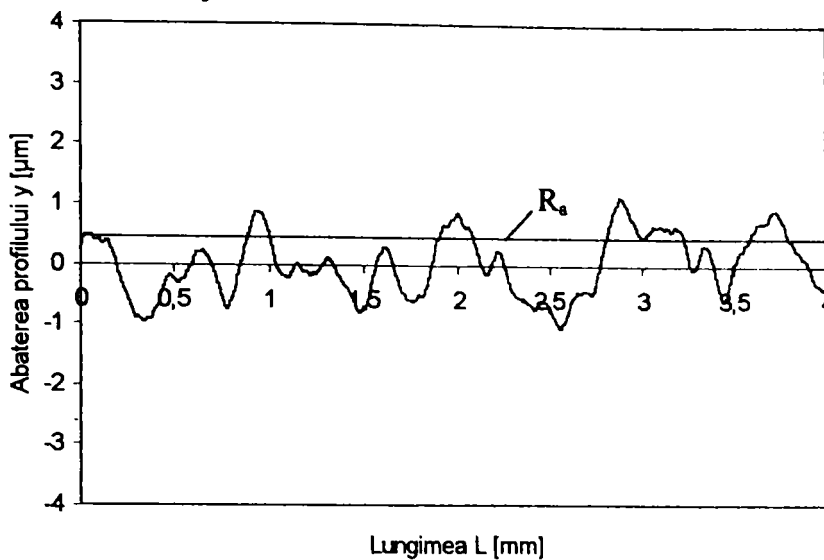
Încercările experimentale s-au efectuat pentru abraziv carbură de siliciu de diferite granulații: micropulberi M20, M40 și pulberi Nr.5, Nr.8, Nr.10, ceilalți factori de influență menținându-se constanți pe un nivel corespunzător punctului central al experimentului factorial: timpul de prelucrare  $t = 12$  min, concentrația abrazivului în lichidul purtător (vaselină) 1:2, rugozitatea inițială a suprafeței piesei  $R_{ai} = 2 \mu\text{m}$ , presiunea de contact  $p = 0.865$  MPa, puterea de activare ultrasonică (puterea debitată pe transductor) 25W. Utilizându-se carbură de siliciu de granulație Nr.5, s-a urmărit influența diferitelor concentrații ale abrazivului în lichidul purtător, în aceleași condiții prezentate anterior. Concentrațiile masice alese au fost: 1:10, 1:5, 1:3, 1:2 și 1:1.

Pe baza profilogramelor obținute, pentru fiecare probă se determină valoarea funcțiilor obiectiv (aceleași ca și în experimentul factorial) prin măsurare sau prin calcul și se trasează graficele pentru portanță, histograma densității de repartiție a abaterilor profilului, curba coeficienților de autocorelație, funcția de autocorelație normată și funcția densitate de putere spectrală (fig.4.92..fig.4.100).

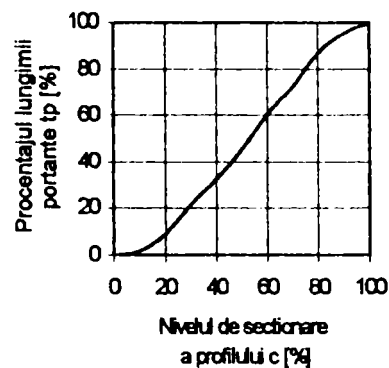
### 4.5.2 Influența granulației abrazivului

În tabelul 4.11 sunt prezentate funcțiile obiectiv pentru granulațiile precizate anterior. Funcțiile de interes tehnologic  $R_a$ ,  $Q_s$  și  $t_{p0.5}$  se reprezintă grafic în funcție de granulația utilizată în fig.4.101, fig.4.103, fig.4.105.

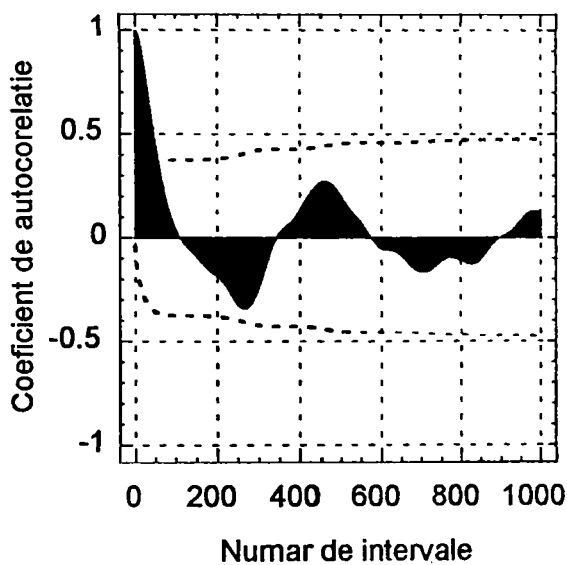
Așa cum era de așteptat, analizând dependențele obținute, se remarcă ușor faptul că rugozitatea suprafeței crește odată cu creșterea granulației, respectiv a diametrului



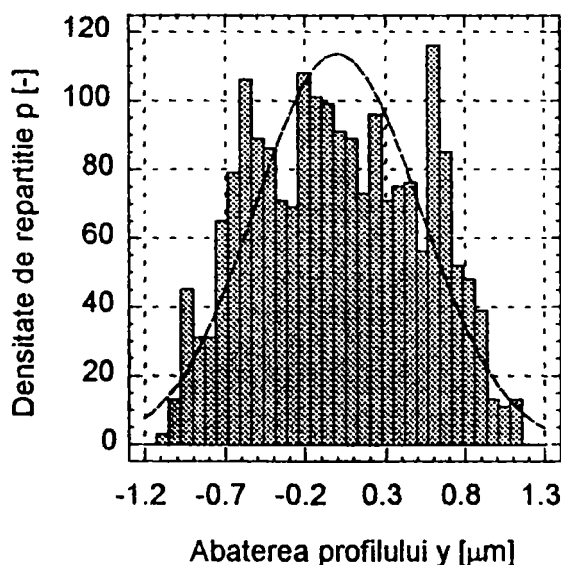
a) Profilul de rugozitate



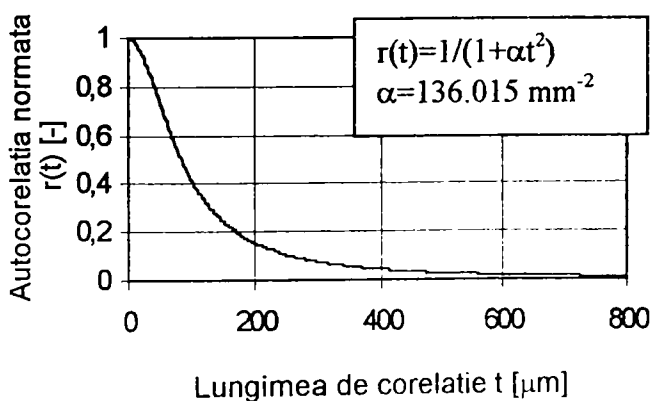
b) Procentajul portant al profilului



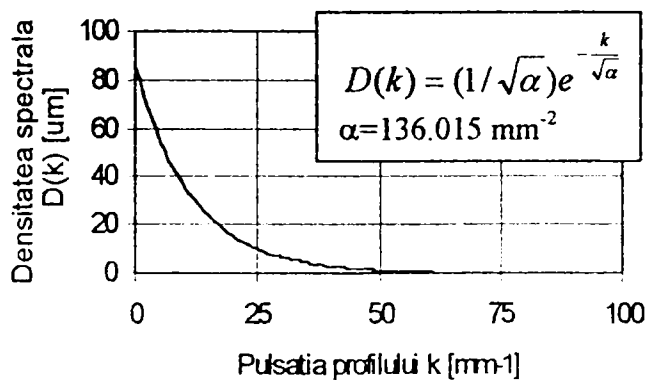
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

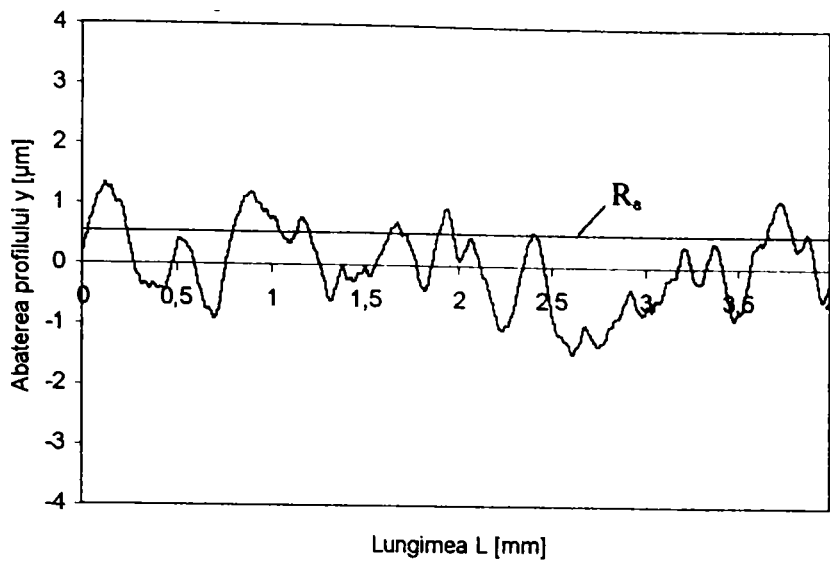


e) Funcția de autocorelație normalizată

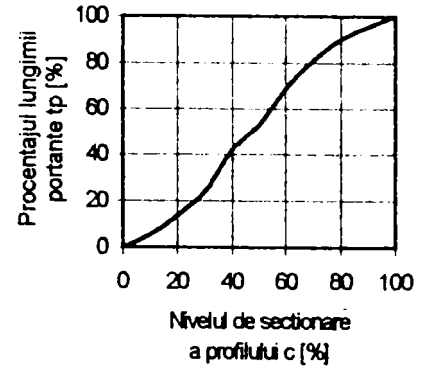


f) Funcția densitate de putere spectrală

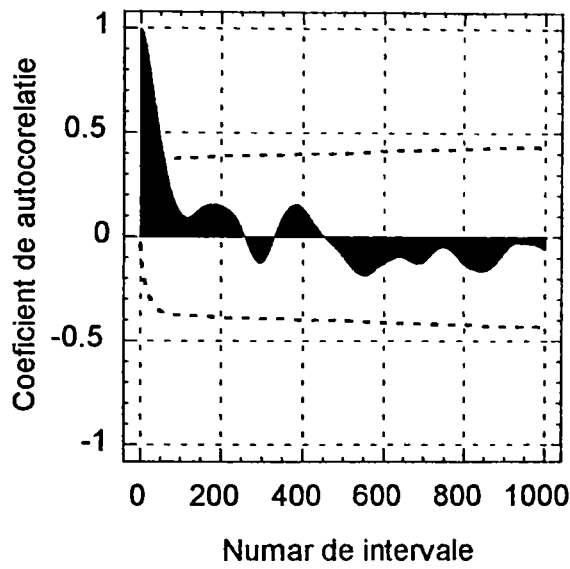
Fig.4.92 PROBA M 20 din experimentul unifactorial



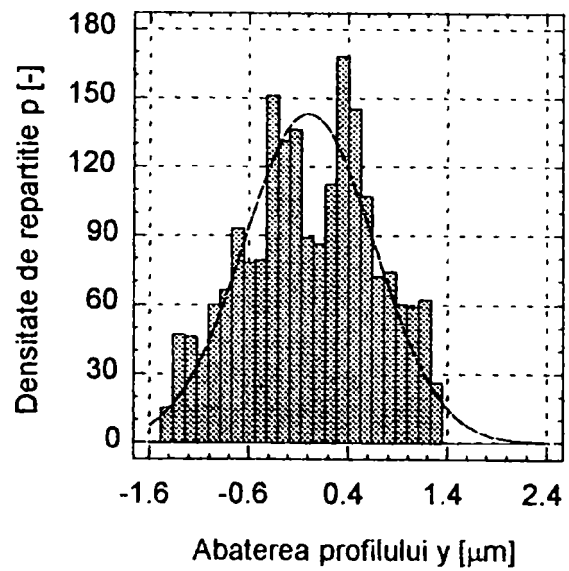
a) Profilul de rugozitate



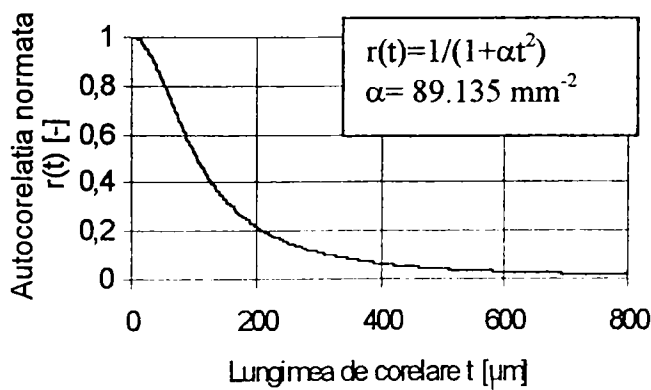
b) Procentajul portant al profilului



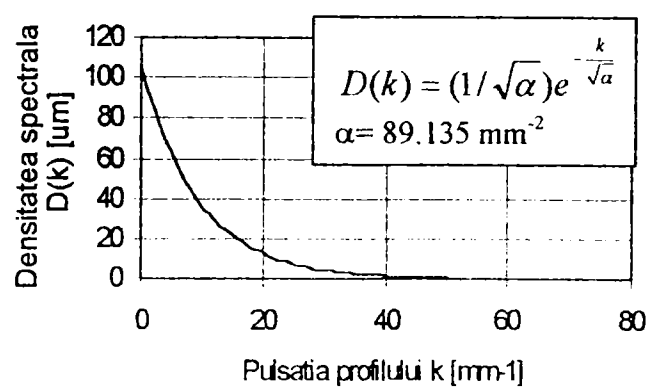
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

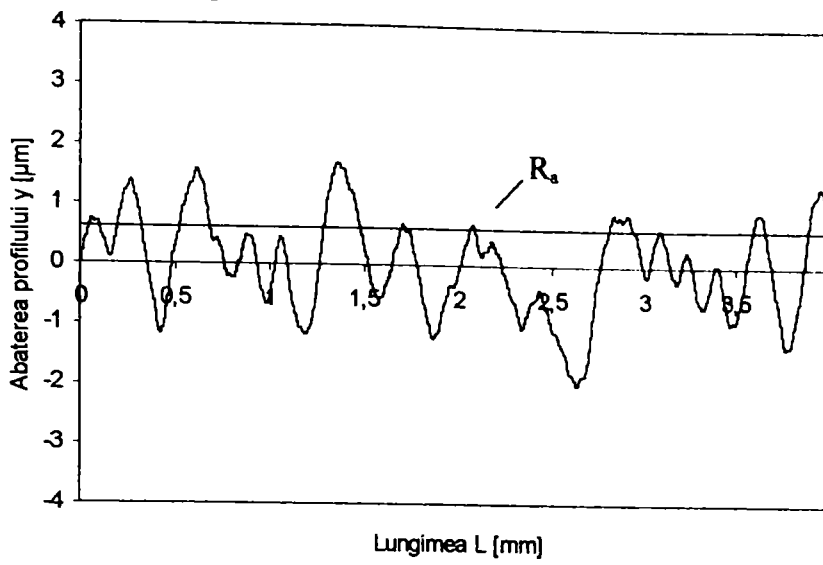


e) Funcția de autocorelație normată

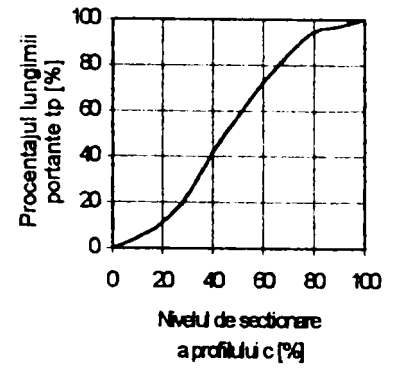


f) Funcția densitate de putere spectrală

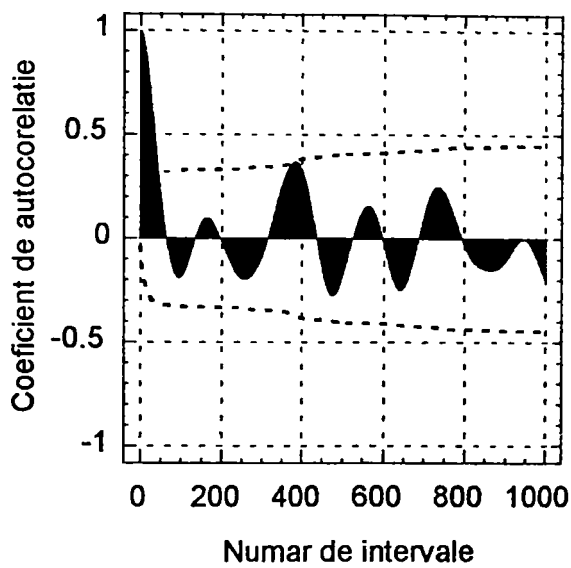
Fig.4.93 PROBA M 40 din experimentul unifactorial



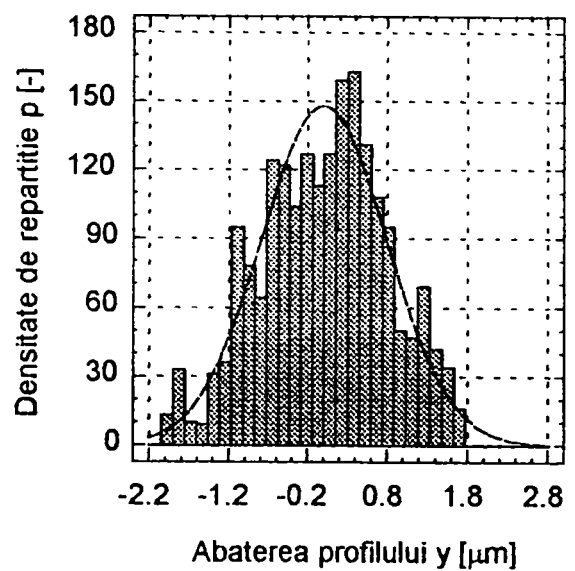
a) Profilul de rugozitate



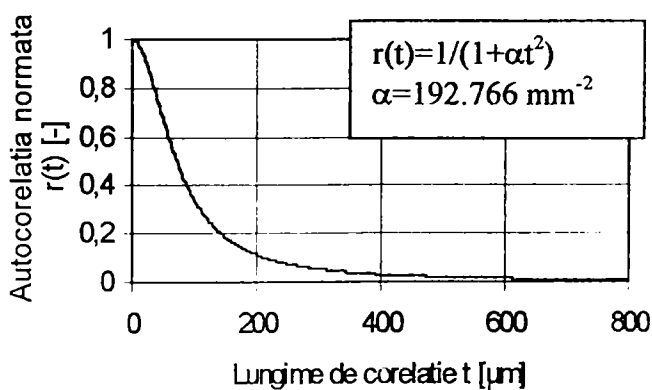
b) Procentajul portant al profilului



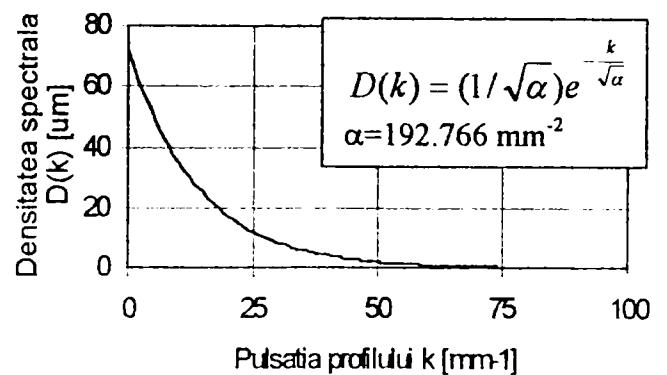
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

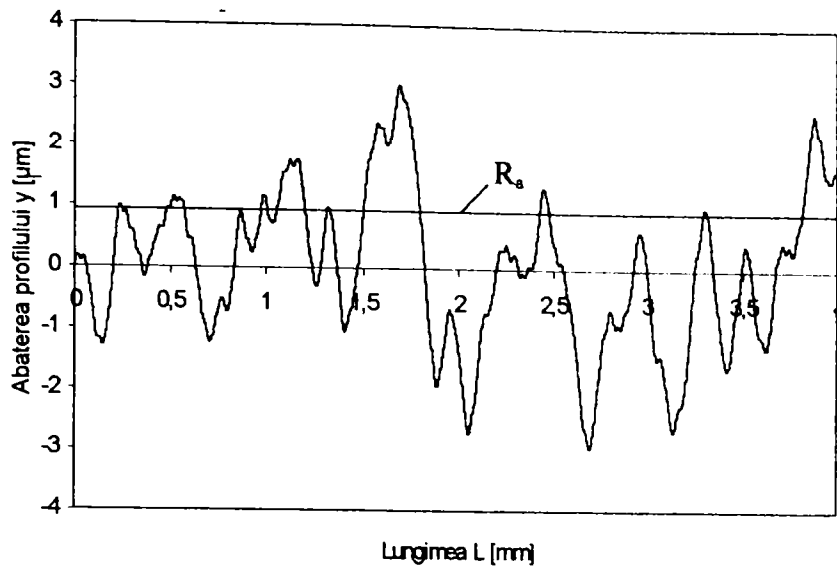


e) Funcția de autocorelație normalată

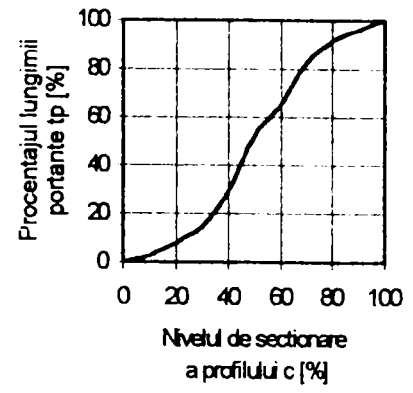


f) Funcția densitate de putere spectrală

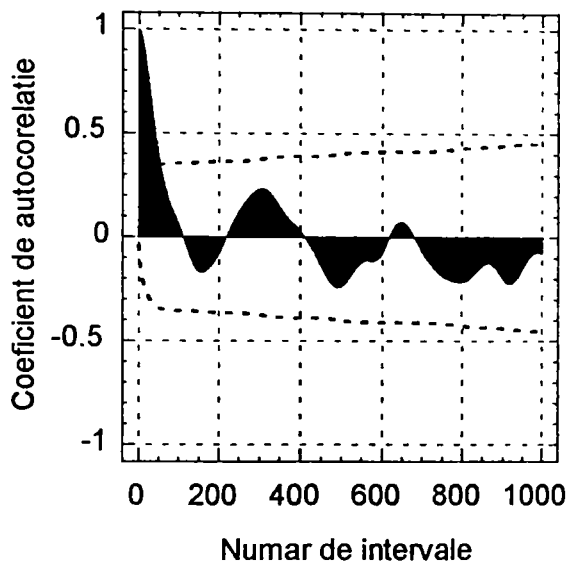
Fig 4.94 PROBA NR. 5 și C1:2 din experimentul unifactorial



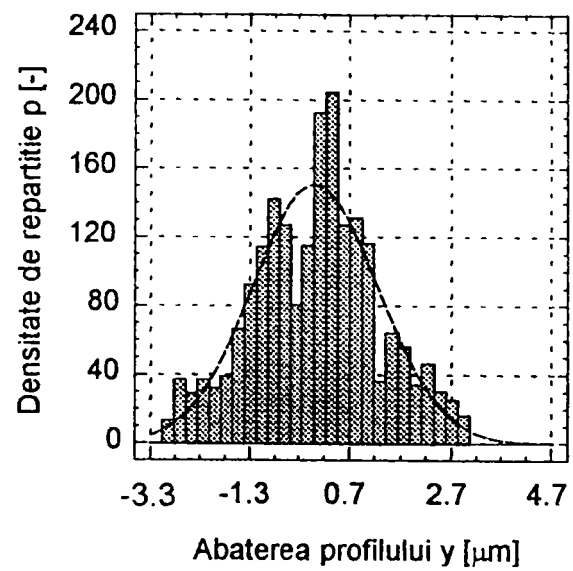
a) Profilul de rugozitate



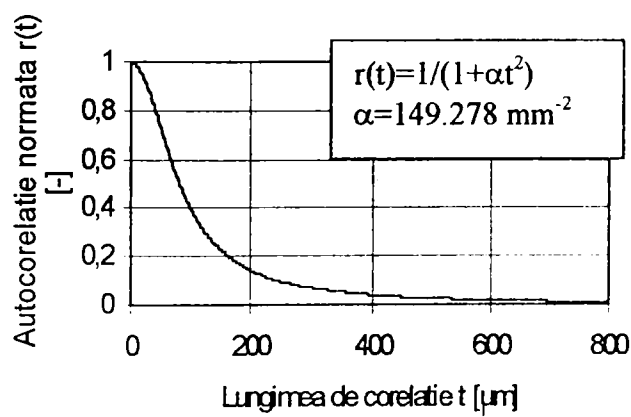
b) Procentajul portant al profilului



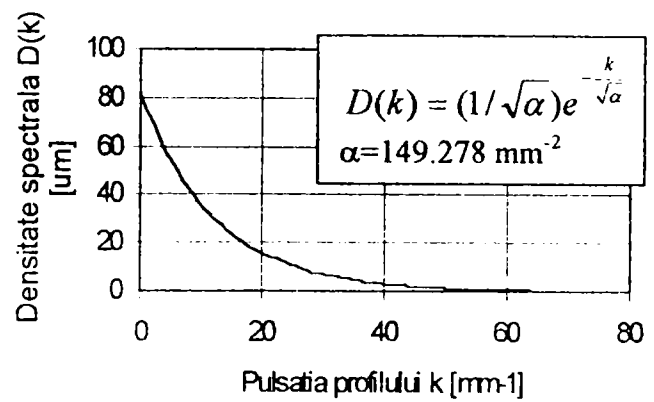
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

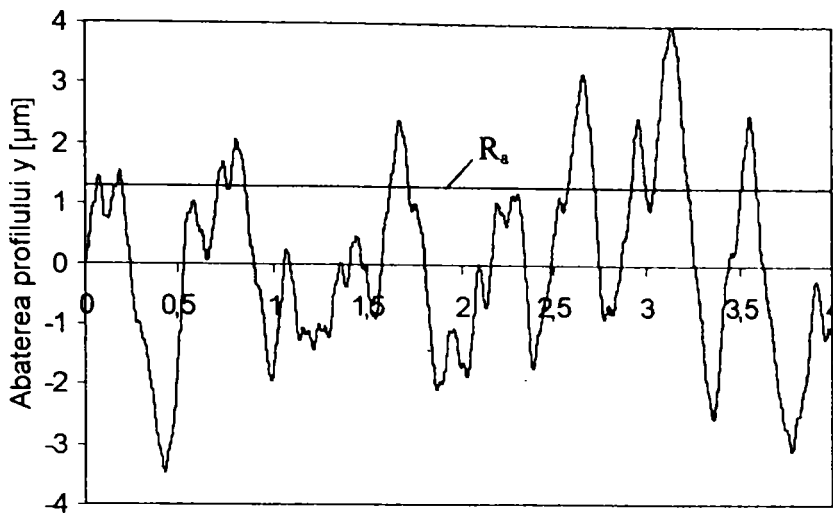


e) Funcția de autocorelație normată

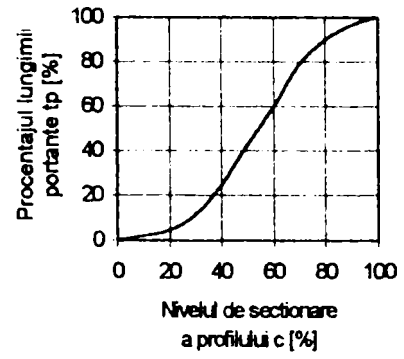


f) Funcția densitate de putere spectrală

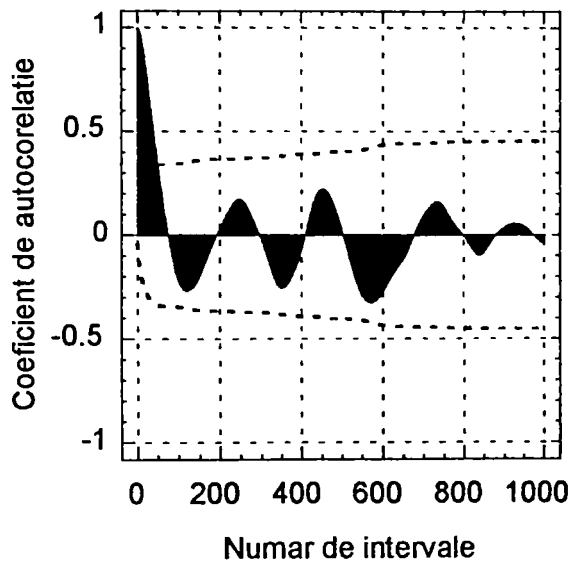
Fig.4.95 PROBA NR.8 din experimentul unifactorial



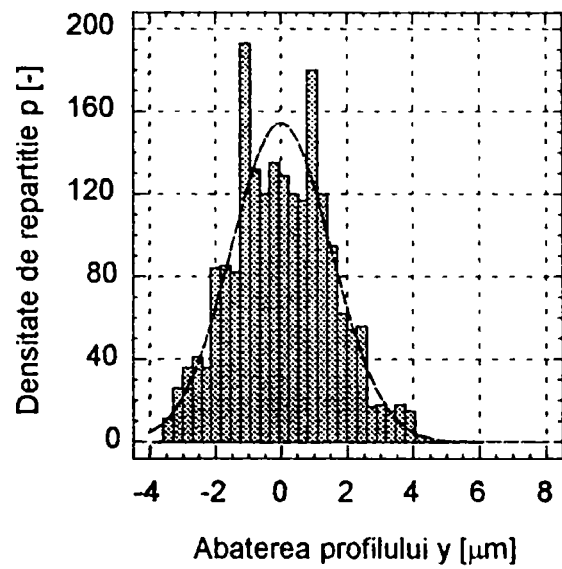
a) Profilul de rugozitate



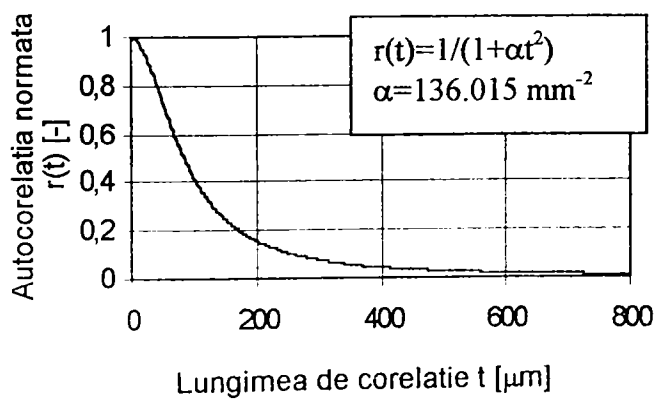
b) Procentajul portant al profilului



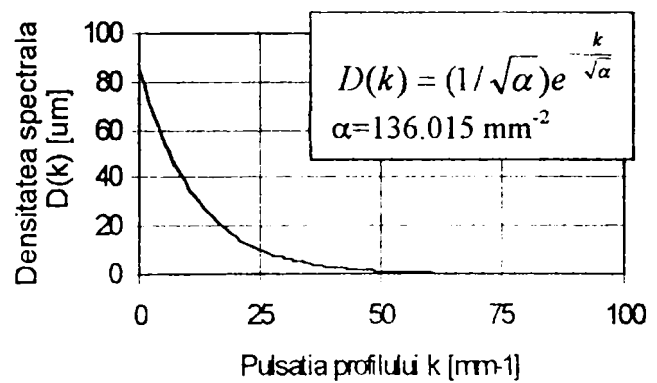
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului



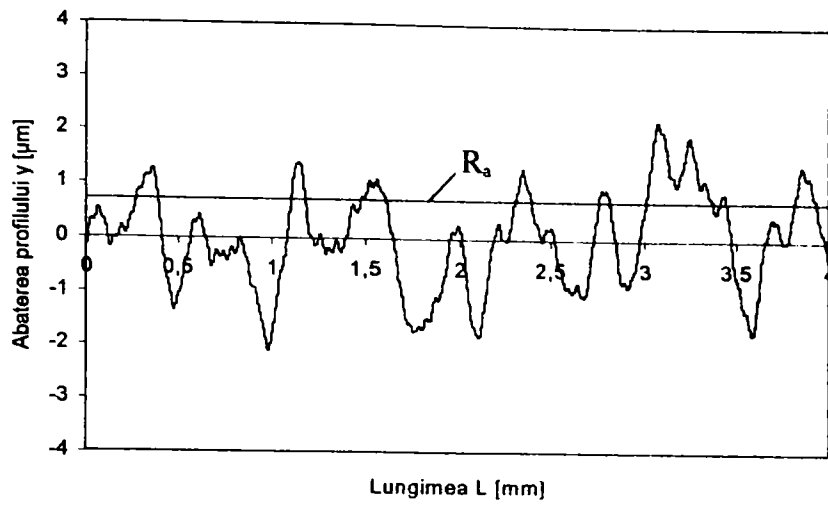
e) Funcția de autocorelație normată



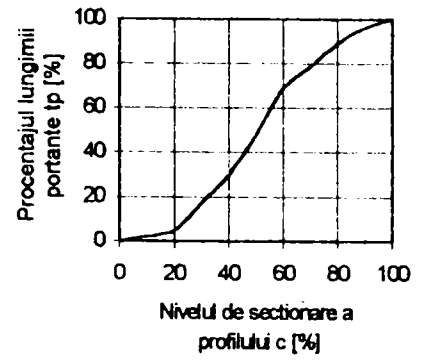
f) Funcția densitate de putere spectrală

Fig.4.96 PROBA NR.10 din experimentul unifactorial

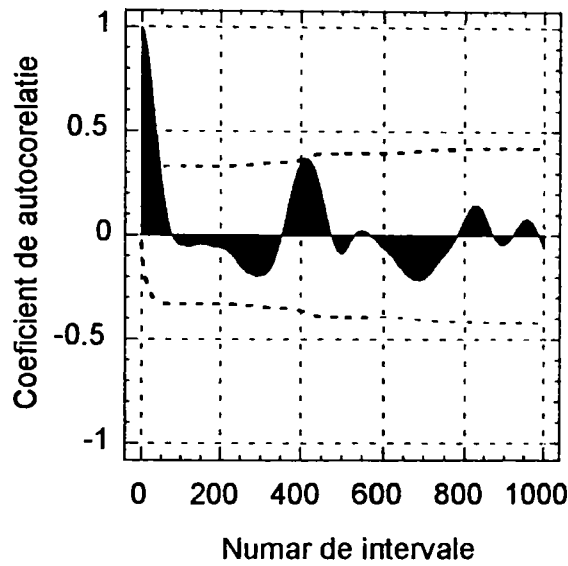




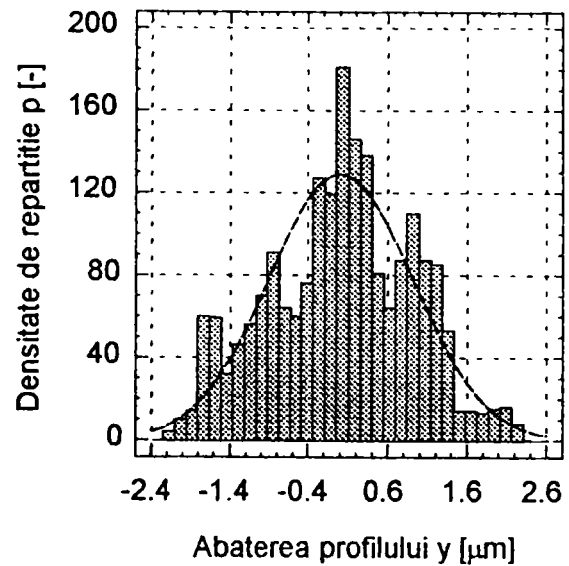
a) Profilul de rugozitate



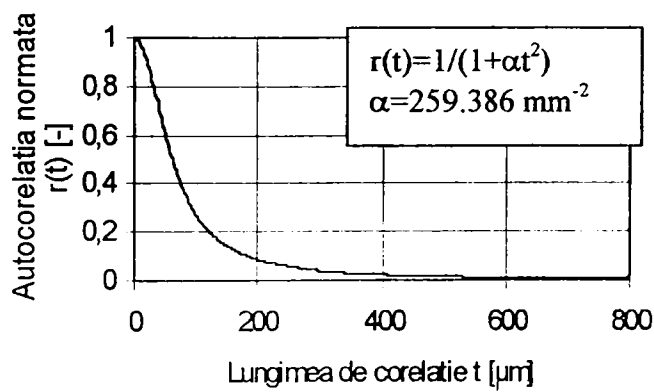
b) Procentajul portant al profilului



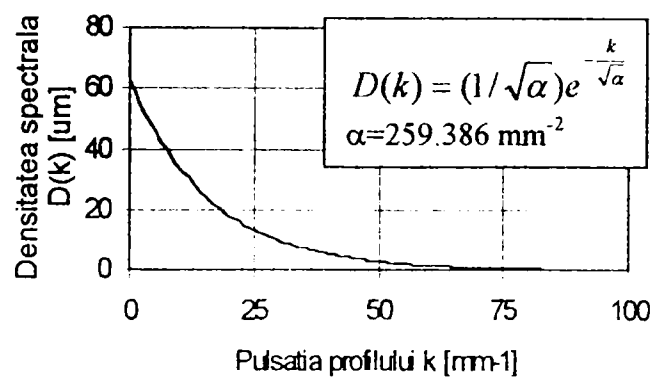
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

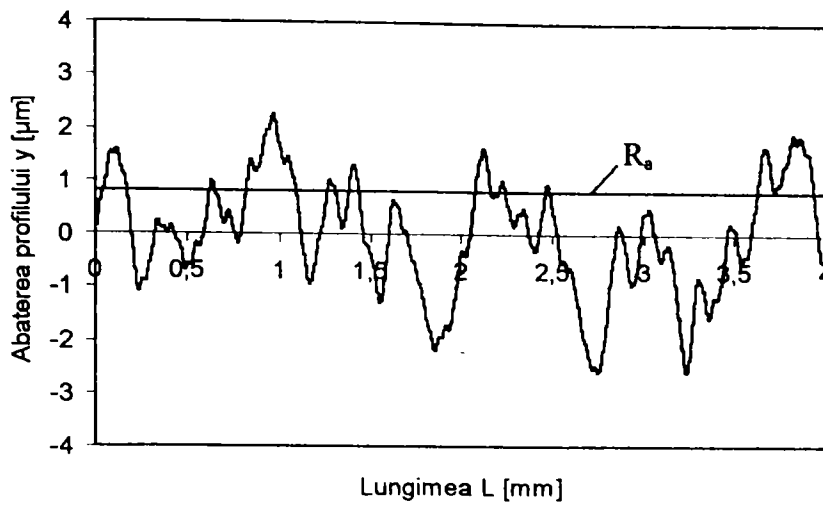


e) Funcția de autocorelație normată

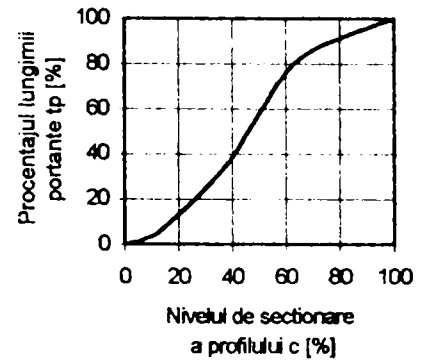


f) Funcția densitate de putere spectrală

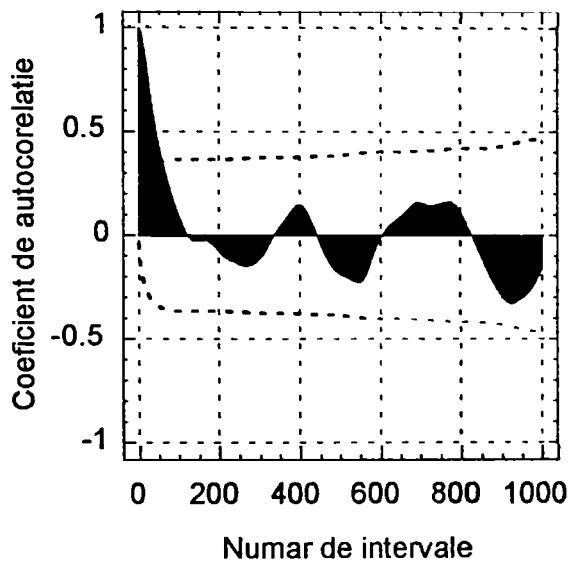
Fig.4.97 PROBA NR. 5 și CI:10 din experimentul unifactorial



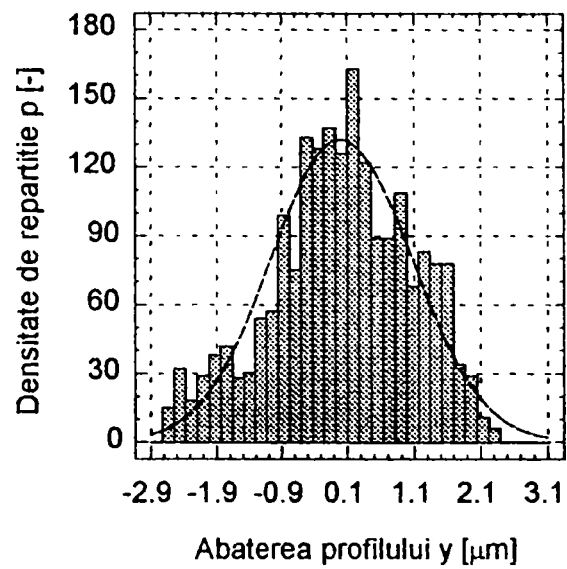
a) Profilul de rugozitate



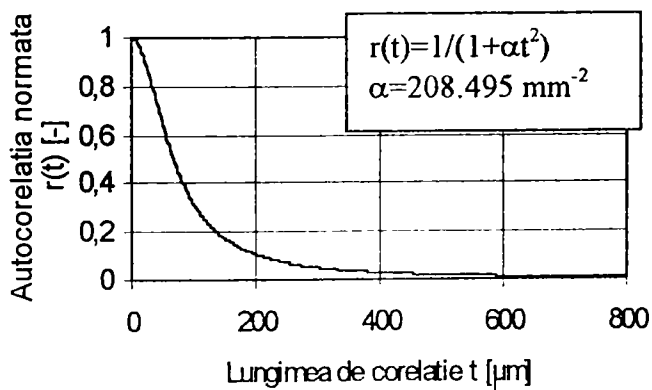
b) Procentajul portant al profilului



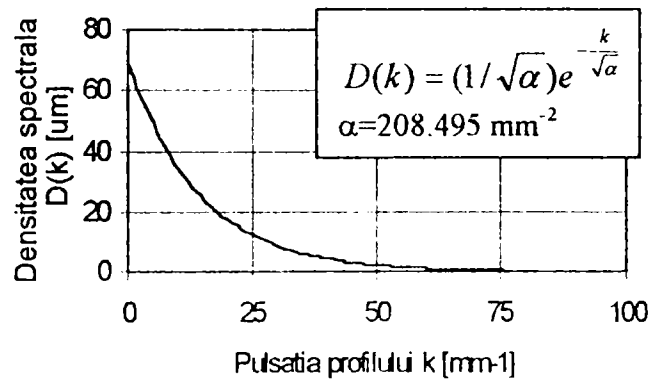
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

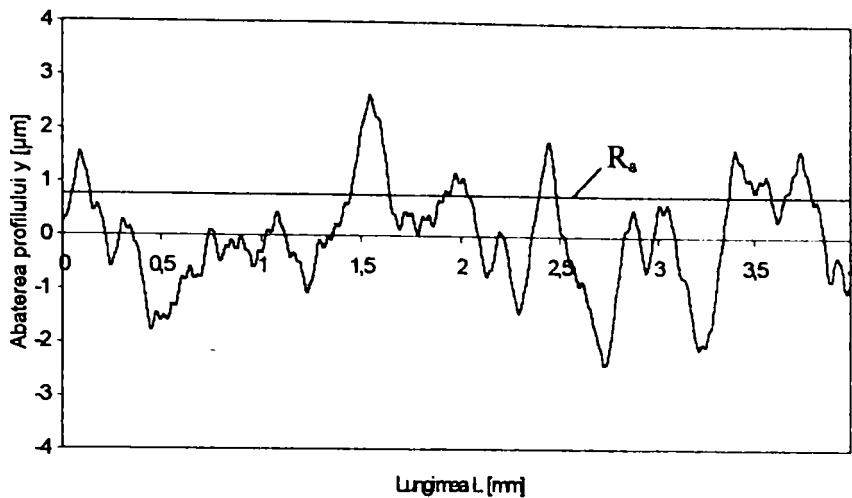


e) Funcția de autocorelație normată

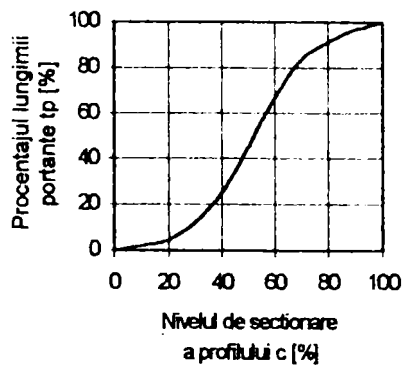


f) Funcția densitate de putere spectrală

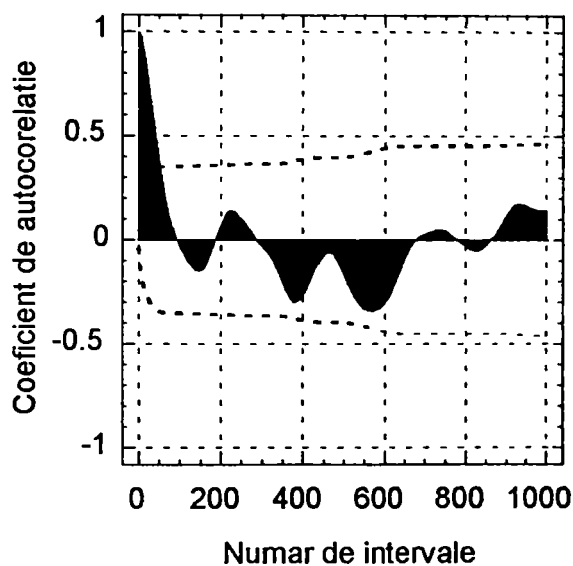
Fig 4.98 PROBA NR. 5 și CI:5 din experimentul unifactorial



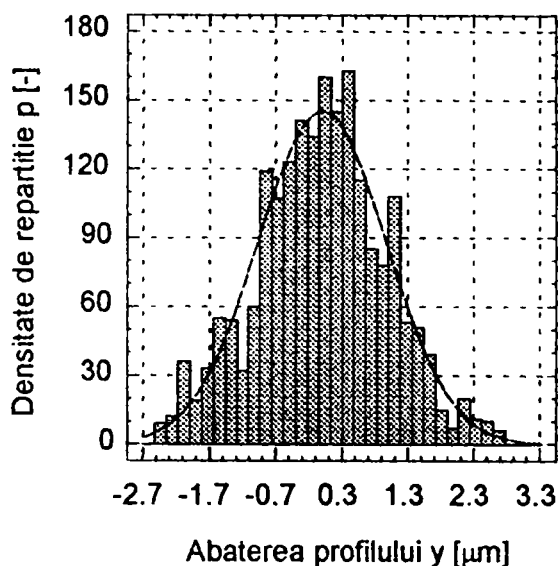
a) Profilul de rugozitate



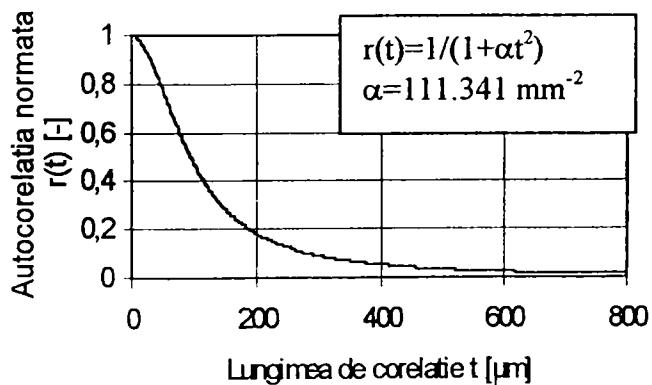
b) Procentajul portant al profilului



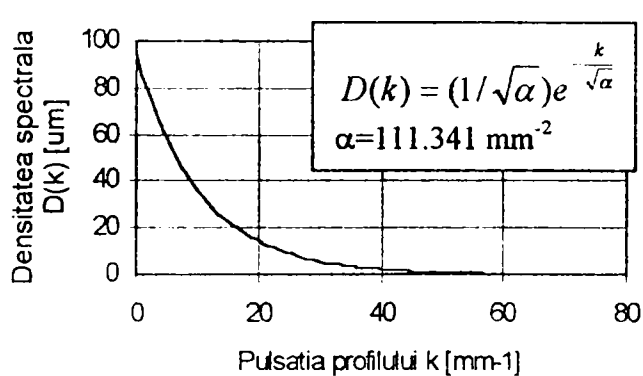
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului

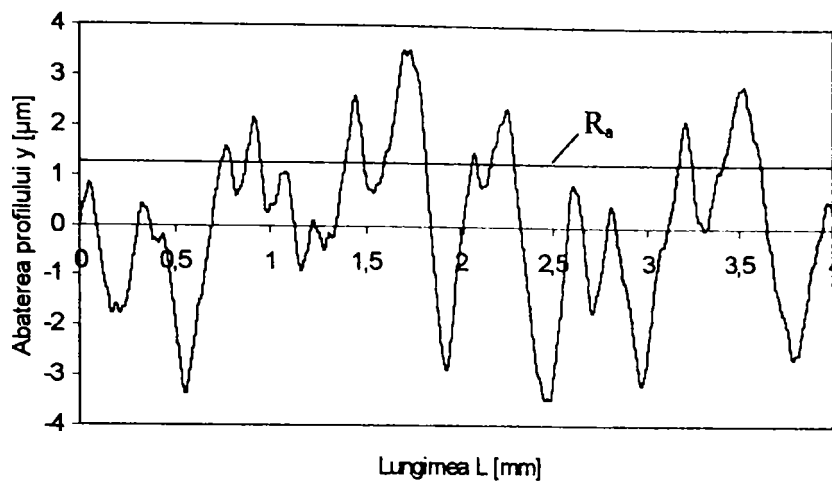


e) Funcția de autocorelație normată

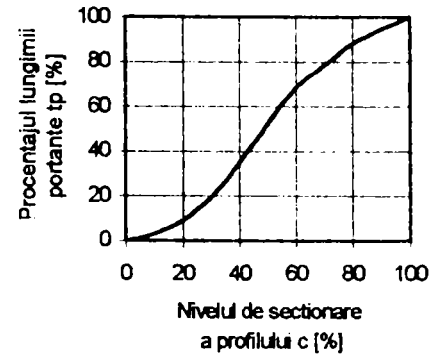


f) Funcția densitate de putere spectrală

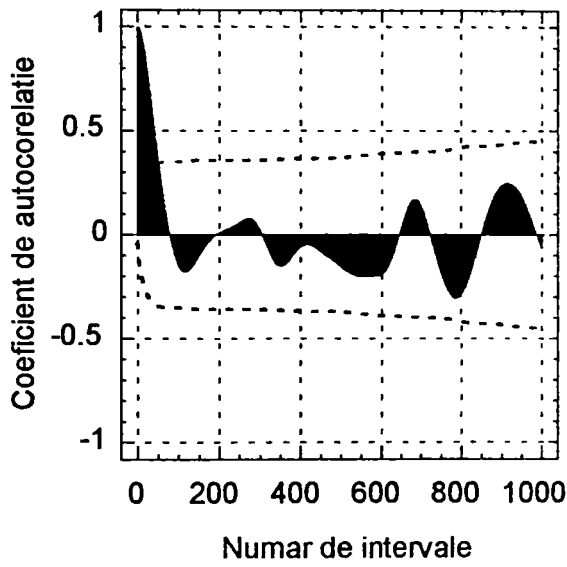
Fig.4.99 PROBA NR. 5 și CI:3 din experimentul unifactorial



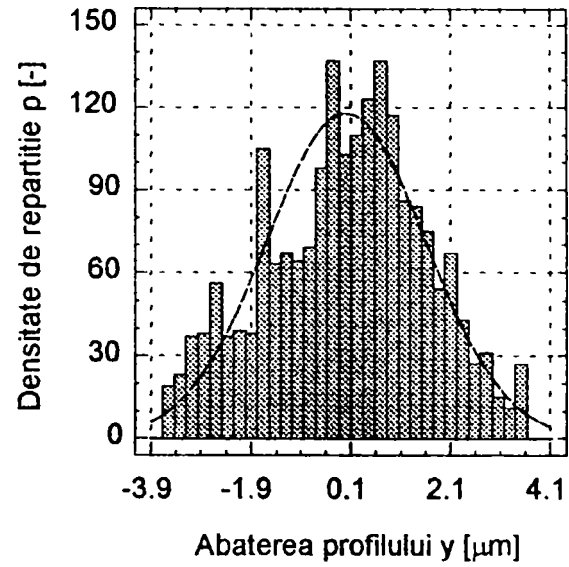
a) Profilul de rugozitate



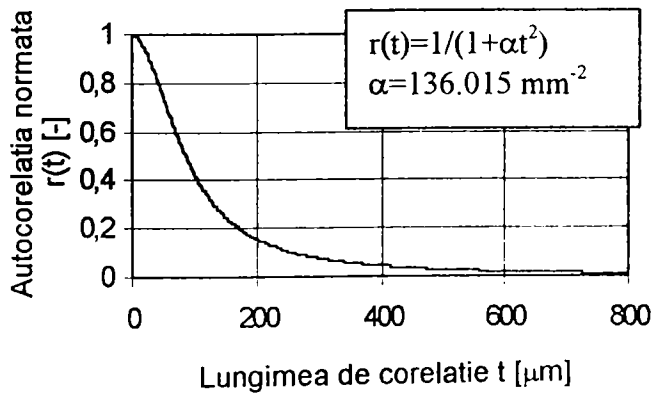
b) Procentajul portant al profilului



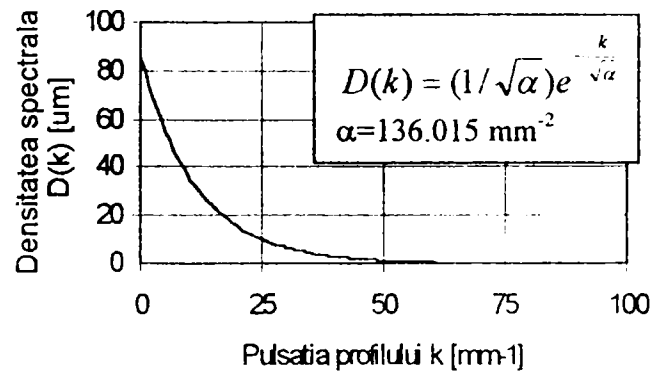
c) Funcția de autocorelație



d) Distribuția abaterilor profilului



e) Funcția de autocorelație normalizată



f) Funcția densitate de putere spectrală

Fig.4.100 PROBA NR. 5 și CI:1 din experimentul unifactorial

mediu al granulelor abrazive. Cu cât granulele sunt de dimensiuni mai mici, cu atât microcanalele aşchiate de acestea vor fi mai dese, dar și mai puțin adânci [K6]. Acest lucru demonstrează valabilitatea modelului analitic determinat pentru volumul de material antrenat la netezirea neregularităților suprafeței, care, fiind invers proporțional cu rugozitatea suprafeței, scade la creșterea granulației. Desigur, din punct de vedere al productivității specifice prelucrării, se obține o alură a curbei diferită de cea a rugozității. Procentajul lungimii portante la un nivel de secționare de 50%, prezintă valori mai mari în jurul granulației M40 și Nr.5, ceea ce arată că sunt granulațiile potrivite în raport cu rugozitatea inițială a piesei. Studiul coeficienților de asimetrie arată că la aceste granulații, profilul conține mai multe proeminente decât goluri, pe când la valorile extreme, profilul are mai multe goluri decât proeminente. Din punct de vedere al coeficientului de exces, la scăderea granulației, profilul devine mai plat, cu proeminente scurte. Deci, la utilizarea unor granulații prea mici sau prea mari față de rugozitatea inițială, forma profilului de rugozitate rezultată este mai puțin favorabilă din punct de vedere tribologic. Este evident că aceste rezultate se datorează faptului că, la granulații mai mici, granulele abrazive nu reușesc să acopere suficient microcanalele rezultate după prelucrarea anterioară, iar la granulații prea mari, microcanalele create sunt mai adânci decât este necesar.

Tabelul 4.11 Valorile funcțiilor obiectiv la modificarea granulației abrazivului

Nr. crt.	Granulație [-]	Funcții obiectiv						
		$y_1 \Leftrightarrow R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$y_2 \Leftrightarrow Q$ [%]	$y_3 \Leftrightarrow R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$y_4 \Leftrightarrow R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$y_5 \Leftrightarrow R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$y_6 \Leftrightarrow R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$y_7 \Leftrightarrow S_m$ [mm]
1	M20	0.45	77.5	0.517	1.699	1.145	2.195	0.381
2	M40	0.55	72.5	0.656	2.044	1.324	2.774	0.471
3	Nr.5	0.62	69	0.794	2.756	1.700	3.703	0.320
4	Nr.8	0.93	53.5	1.249	4.245	3.018	5.962	0.364
5	Nr.10	1.27	36.5	1.519	5.445	4.000	7.434	0.381

Tabelul 4.11 continuare

Nr. crt.	$y_8 \Leftrightarrow k_{PR}$ [-]	$y_9 \Leftrightarrow k_R$ [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ]	$y_{10} \Leftrightarrow R_{as}$ [-]	$y_{11} \Leftrightarrow R_{ex}$ [-]	$y_{12} \Leftrightarrow t_{p0,5}$ [%]	$y_{13} \Leftrightarrow n$ [ $\text{mm}^{-1}$ ]	$y_{14} \Leftrightarrow r$ [ $\mu\text{m}$ ]	$y_{15} \Leftrightarrow \theta$ [ $^\circ$ ]
1	0.634	0.224	0.048	-0.958	45.85	5.25	6.12	0.541
2	0.648	0.230	-0.117	-0.768	52.85	4.25	6.63	0.536
3	0.617	0.116	-0.141	-0.454	58.05	6.25	5.48	0.888
4	0.711	0.086	-0.016	-0.286	52.65	5.5	2.963	1.172
5	0.735	0.070	0.135	-0.361	43	5.25	2.387	1.528

### 4.5.3 Influența concentrației abrazivului

În tabelul 4.12 sunt date valorile numerice ale funcțiilor obiectiv obținute pentru diferite concentrații. În funcție de acestea se prezintă graficele pentru  $R_a$ ,  $Q_s$  și  $t_{p0,5}$  (fig.4.102, fig.4.104, fig.106). Se poate remarca că la concentrații mari, rugozitatea

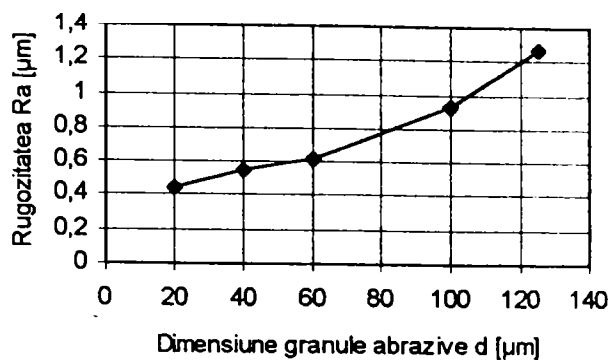


Fig.4.101 Dependența rugozității  $R_a$  în funcție de dimensiunea medie a granulelor abrazive

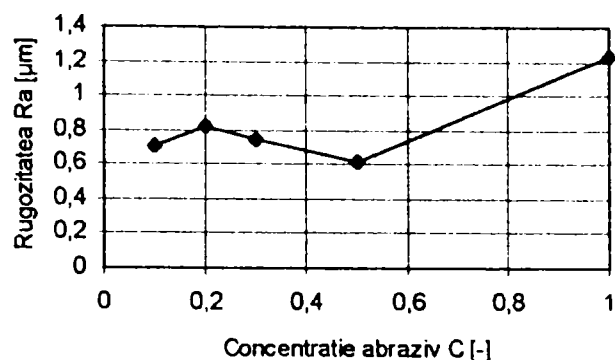


Fig.4.102 Dependența rugozității  $R_a$  în funcție de concentrația abrazivului

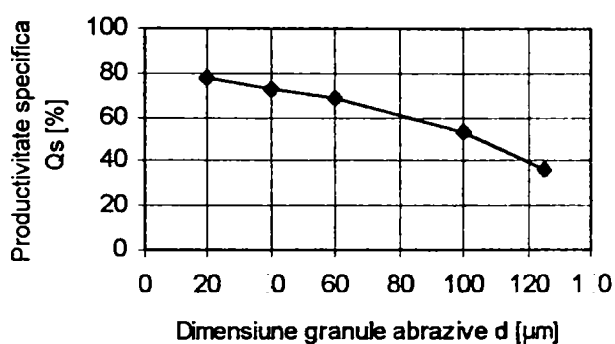


Fig.4.103 Dependența productivității specifice  $Q_s$  în funcție de dimensiunea medie a granulelor abrazive

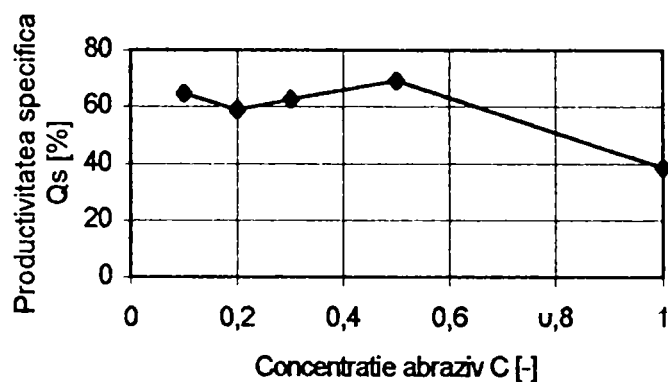


Fig.4.104 Dependența productivității specifice  $Q_s$  în funcție de concentrația abrazivului

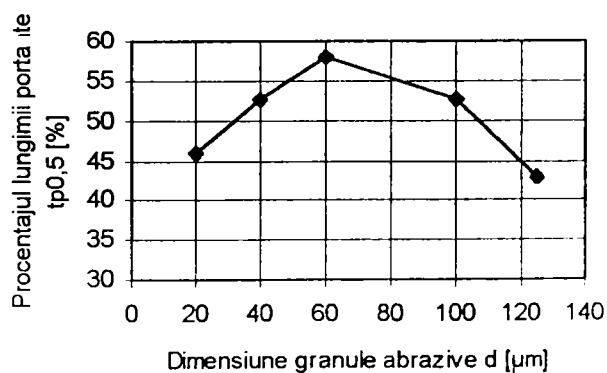


Fig.4.105 Dependența portanței  $t_{p0,5}$  în funcție de dimensiunea medie a granulelor abrazive

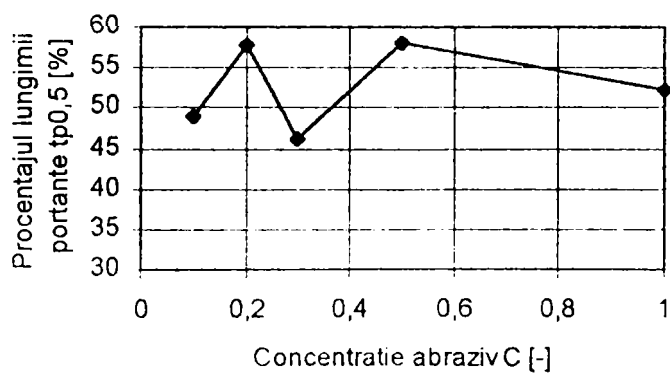


Fig.4.106 Dependența portanței  $t_{p0,5}$  în funcție de concentrația abrazivului



suprafeței crește foarte mult, aspect menționat în literatura de specialitate [K6]. Se pare că, datorită numărului mare de granule, scade încărcarea specifică pe fiecare granulă în parte, ceea ce are ca efect diminuarea capacității lor de abrazare și de netezire. Pe de altă parte, calitatea mai bună a suprafeței la concentrații mai mici se explică prin creșterea încărcării specifice pe fiecare granulă, este intensificat fenomenul de fărâmițare al granulelor, se reduc dimensiunile granulelor, micșorându-se corespunzător adâncimea neregularităților suprafeței prelucrate. Pentru cazul dat, se observă pentru o concentrație 1:2 un optim din punct de vedere al rugozității și capacității portante.

Comparând rezultatele obținute cu modelul analitic prezentat la paragraful 3.2, trebuie remarcat că modelul propus nu se justifică decât pe un anumit interval al concentrațiilor, în porțiunile extreme, datorită fenomenelor prezentate este necesară determinarea altor modele, în acord cu cercetările experimentale.

Tabelul 4.12 Valorile funcțiilor obiectiv la modificarea concentrației abrazivului

Nr. crt.	Concentrație	Funcții obiectiv						
		$y_1 \Leftrightarrow R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$y_2 \Leftrightarrow Q$ [%]	$y_3 \Leftrightarrow R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$y_4 \Leftrightarrow R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$y_5 \Leftrightarrow R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$y_6 \Leftrightarrow R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$y_7 \Leftrightarrow S_m$ [mm]
1	1:10 (0.1)	0.71	64.5	0.911	3.277	2.204	4.301	0.276
2	1:5 (0.2)	0.82	59.0	1.066	3.657	2.208	4.807	0.308
3	1:3 (0.3)	0.75	62.5	0.971	3.485	2.604	5.035	0.421
4	1:2 (0.5)	0.62	69.0	0.793	2.756	1.700	3.703	0.320
5	1:1 (1)	1.23	38.5	1.594	5.689	3.472	6.934	0.381

Tabelul 4.12 continuare

Nr. crt.	$y_8 \Leftrightarrow k_{PR}$ [-]	$y_9 \Leftrightarrow k_R$ [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ]	$y_{10} \Leftrightarrow R_{as}$ [-]	$y_{11} \Leftrightarrow R_{ex}$ [-]	$y_{12} \Leftrightarrow t_{p0,5}$ [%]	$y_{13} \Leftrightarrow n$ [ $\text{mm}^{-1}$ ]	$y_{14} \Leftrightarrow r$ [ $\mu\text{m}$ ]	$y_{15} \Leftrightarrow \theta$ [ $^\circ$ ]
1	0.673	0.084	-0.104	-0.408	48.9	7.25	2.378	1.180
2	0.604	0.084	-0.296	-0.356	57.75	6.5	2.778	1.221
3	0.747	0.121	-0.017	-0.122	46.25	4.75	3.249	0.816
4	0.617	0.116	-0.141	-0.454	58.05	6.25	5.476	0.888
5	0.609	0.067	-0.145	-0.544	52.25	5.25	3.65	1.480

#### 4.5.4 Concluzii

Analiza statistică a distribuției spațiale a neregularităților suprafețelor prelucrate arată faptul că cei doi factori de influență analizați mai sus nu exercită o influență semnificativă asupra caracterului aleator al structurii profilelor de rugozitate. Pe lângă structura similară a profilelor de rugozitate, se poate pune totuși în evidență că profilul de rugozitate este practic independent de granulația abrazivului și are o componentă periodică ușor mai pronunțată la creșterea concentrației.

Chiar dacă nu a fost evidențiată o corelație semnificativă între granulația, respectiv concentrația abrazivului și funcțiile obiectiv analizate prin bilanț aleator și prin experimente unifactoriale, granulația și concentrația abrazivului influențează într-o

anumită măsură procesul de lepuire. Analiza efectuată reflectă faptul că stabilirea granulației și a concentrației abrazivului, ca parametri ai procesului de lepuire, pe un anumit nivel, trebuie făcută cu discernământ, în funcție de condițiile impuse suprafeței prelucrate.

Cercetările teoretice conduc la ideea că acești factori nu au influență prin ei înșiși, ci prin interacțiunea cu alți parametri ai prelucrării, importantă fiind mai ales interacțiunea presiune de contact-granulație-concentrație. Concordanța sau neconcordanța modelului teoretic cu rezultatele experimentale poate fi evaluată și prin mărirea numărului de încercări în spațiul experimental abordat, dar și investigarea altor domenii de experimentare.

## **4.6 Alte aspecte ale cercetării experimentale evidențiate prin microscopie optică și electronică**

### **4.6.1 Studiul microgeometriei suprafețelor inițiale și finale ale pieselor**

Pentru a completa informațiile referitoare la interacțiunea abraziv-material de prelucrat la procesele de lepuire activată ultrasonic se prezintă imagini evidențiate cu microscopul electronic ale suprafețelor pieselor prelucrate prin strunjire (fig.4.107) și rectificare (fig.4.108), respectiv imagini ale pieselor ce au fost lepuite ultrasonic (fig.4.109, fig.4.110).

Studiul aspectului suprafețelor lepuite reflectă două mecanisme ale prelevării de material:

- ⇒ mecanismul de erodare a suprafeței, prin care particule mici de material sunt dislocate din piesă, mecanism determinat de granulele abrazive aflate în mișcare de alunecare, de acțiunea de suprapunere a amprentelor muchiilor granulelor, ceea ce conduce la obținerea unui aspect specific suprafețelor erodate;
- ⇒ deformarea continuă a suprafeței materialului și respectiv netezirea neregularităților cauzată de granulele aflate în mișcare de rostogolire, mecanism ce determină ecruisarea stratului superficial al piesei și un microrelief specific.

Din acest punct de vedere structura profilului de rugozitate confirmă modelul analitic corespunzător etapelor prezentate la paragraful 3.2.

Pe de altă parte, imaginile pun în evidență faptul că distribuția neregularităților suprafeței lepuite ultrasonic este predominant aleatoare, ceea ce a fost remarcat și la analiza funcțiilor de autocorelație și de densitate spectrală de putere.

### **4.6.2 Analiza uzurii granulelor abrazive**

Imaginile granulelor abrazive în stare inițială, neuzată au fost obținute prin microscopie optică, iar cele după anumiți timpi de prelucrare prin microscopie electronică, ceea ce permite o evaluare calitativă a acestora. Dimensiunea și forma granulelor pentru cele trei tipuri de abrazivi utilizați la experimentări, în diferite etape ale prelucrării, sunt prezentate în fig.4.111...fig.4.122. Pentru analiză au fost alese eșantioane cu granulația Nr.5.



Fig.4.107 Piesă strunjită ( $R_a = 3.2 \mu\text{m}$ )

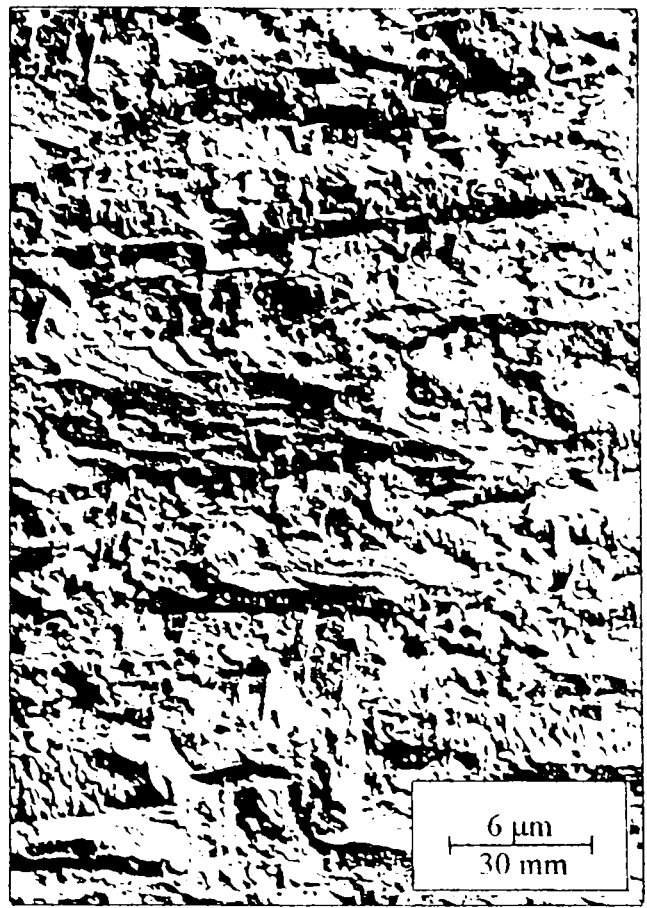


Fig.4.108 Piesă rectificată ( $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ )



Fig.4.109 Piesă lepuită ultrasonic ( $R_a = 0,16 \mu\text{m}$ )



Fig.4.110 Piesă lepuită ultrasonic ( $R_a = 0,22 \mu\text{m}$ )



Fig.4.111 Granule  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (t = 0 min)

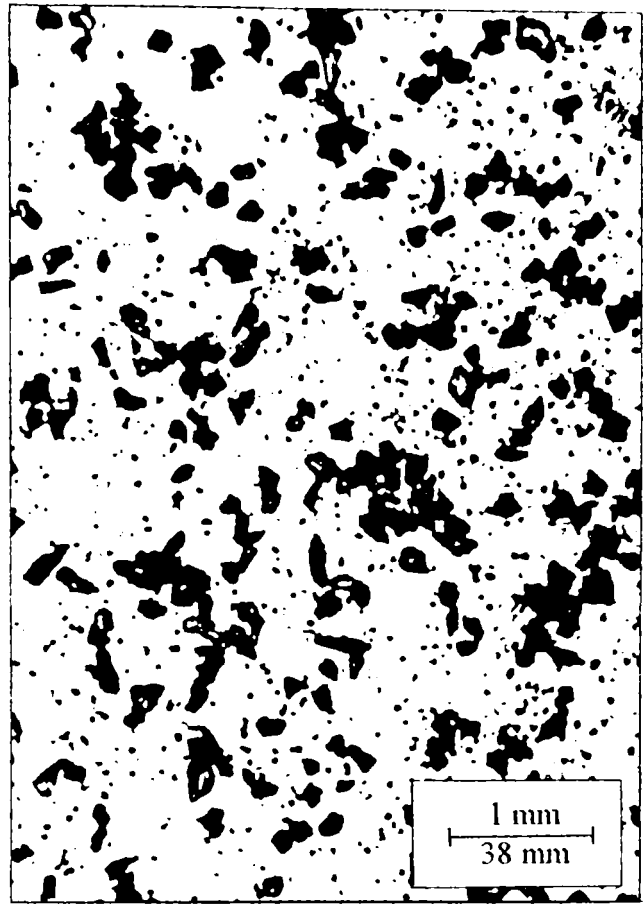


Fig.4.112 Granule  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (t = 1 min)

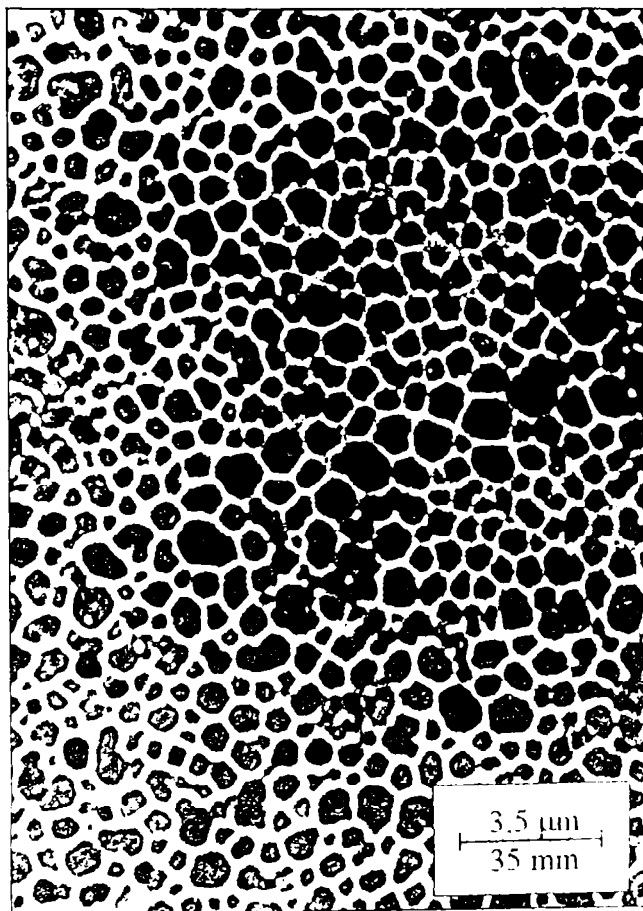


Fig.4.113 Granule  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (t = 10 min)

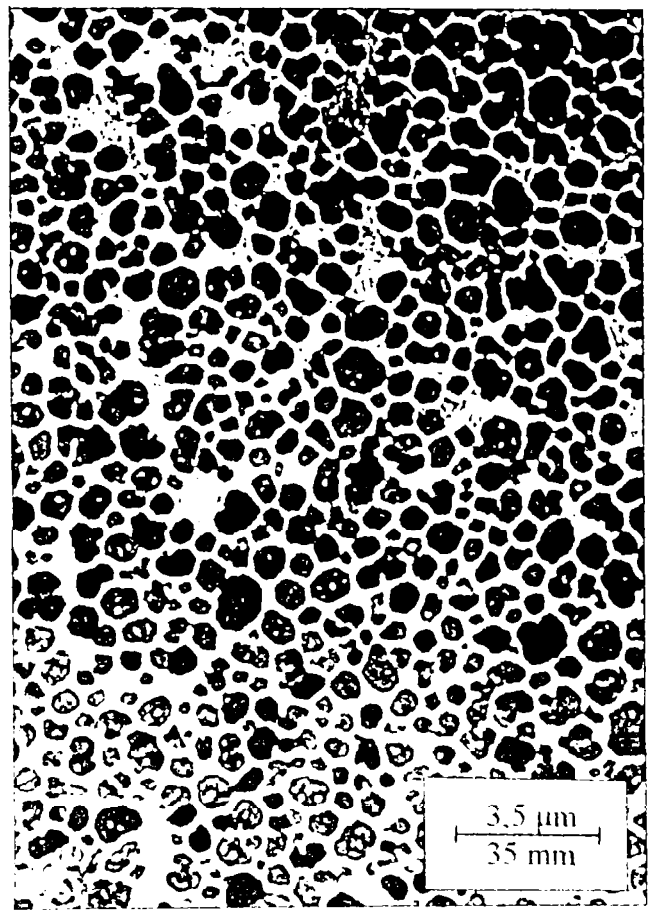


Fig.4.114 Granule  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (t = 20 min)



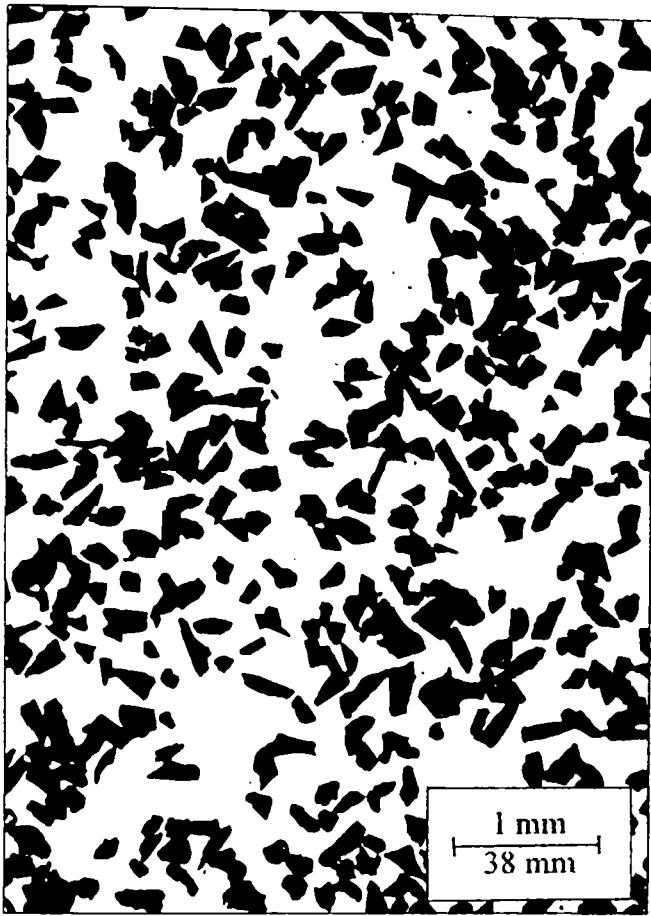


Fig.4.115 Granule SiC (t = 0 min)

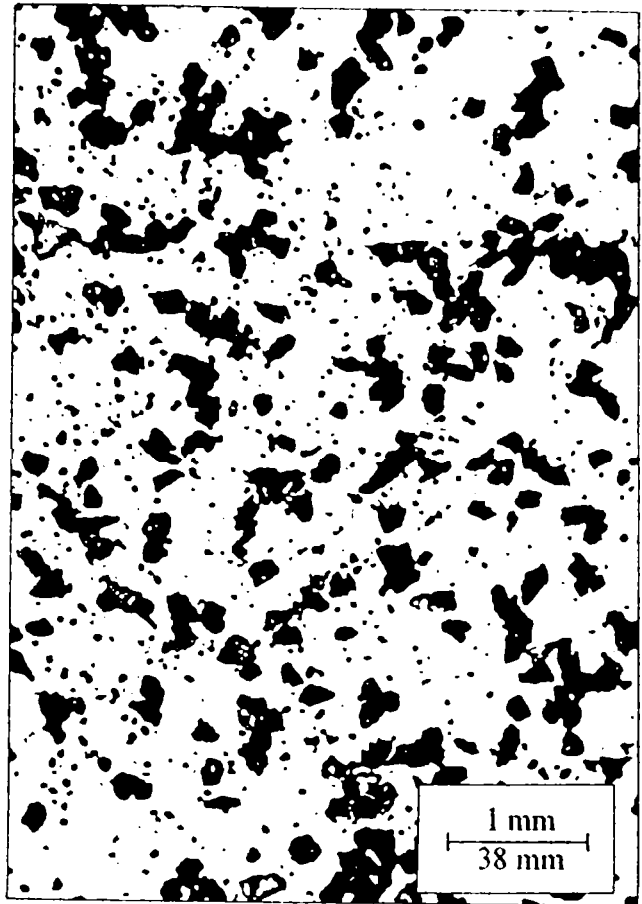


Fig.4.116 Granule SiC (t = 1 min)

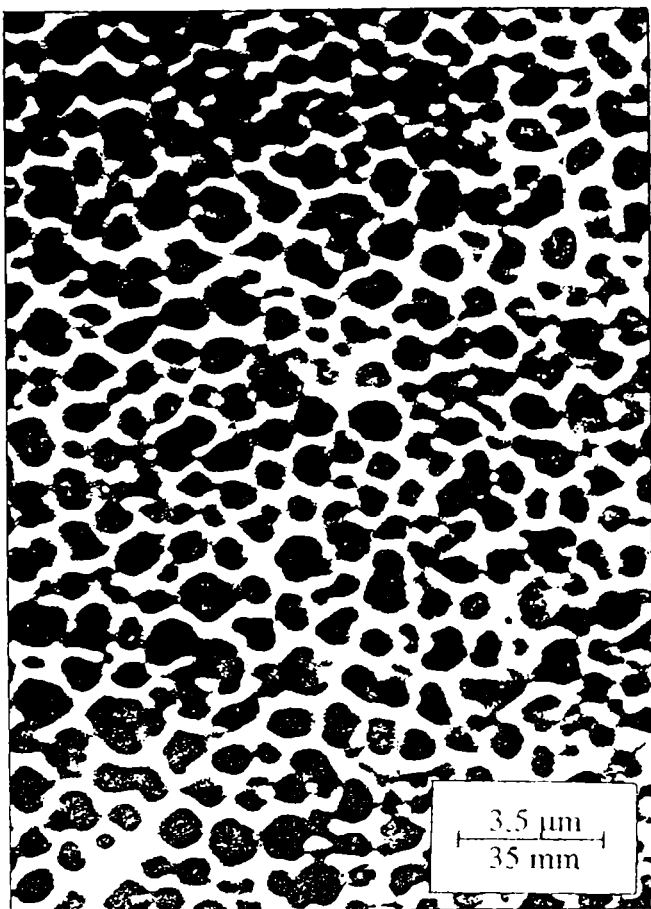


Fig.4.117 Granule SiC (t = 5 min)

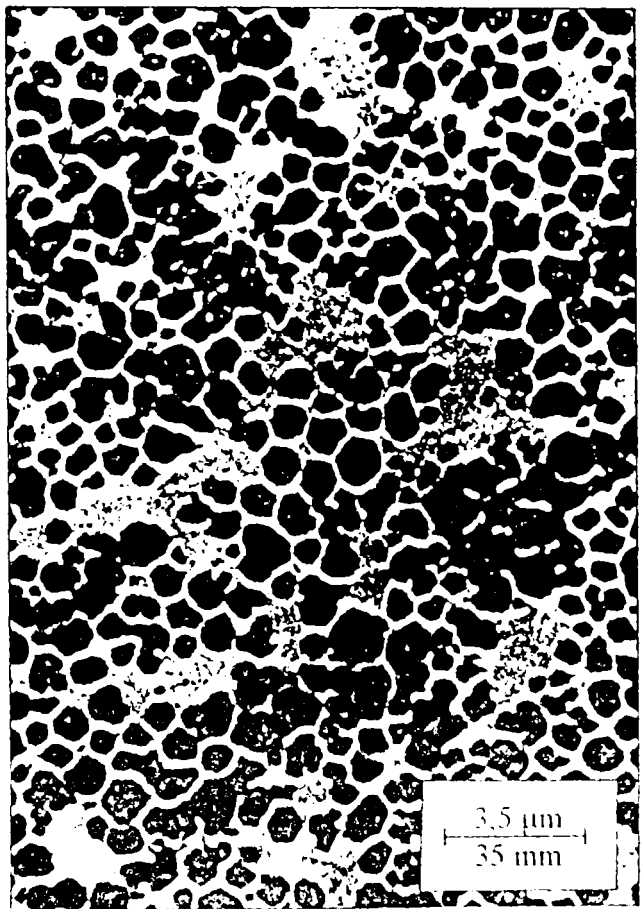


Fig.4.118 Granule SiC (t = 20 min)

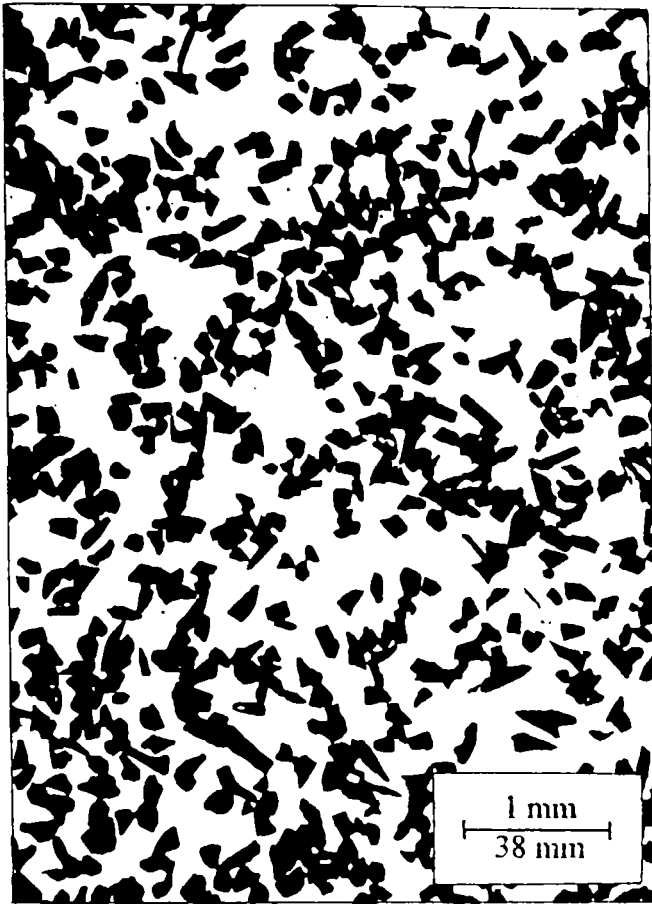


Fig.4.119 Granule  $B_4C$  ( $t = 0$  min)

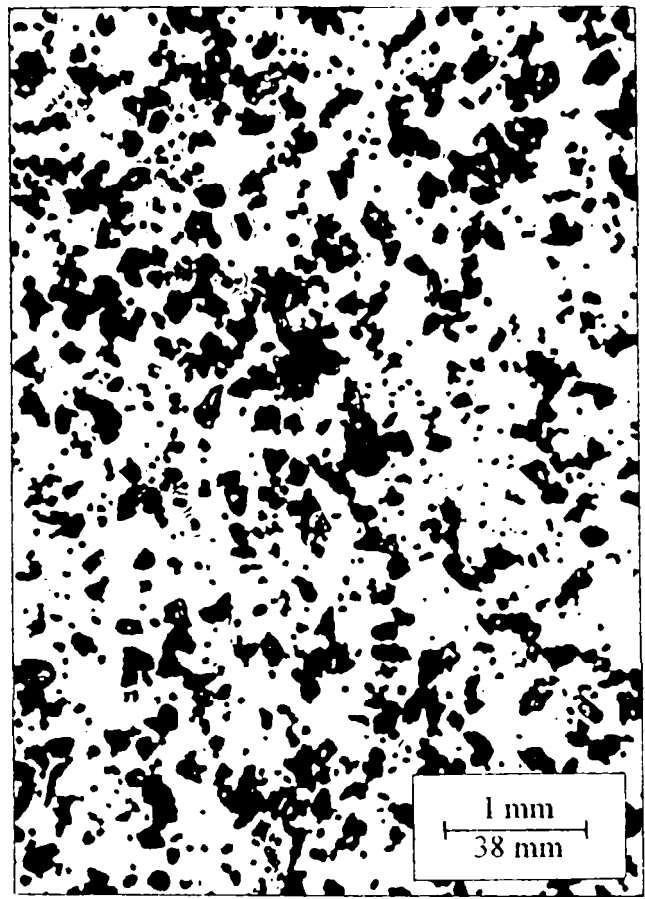


Fig.4.120 Granule  $B_4C$  ( $t = 1$  min)

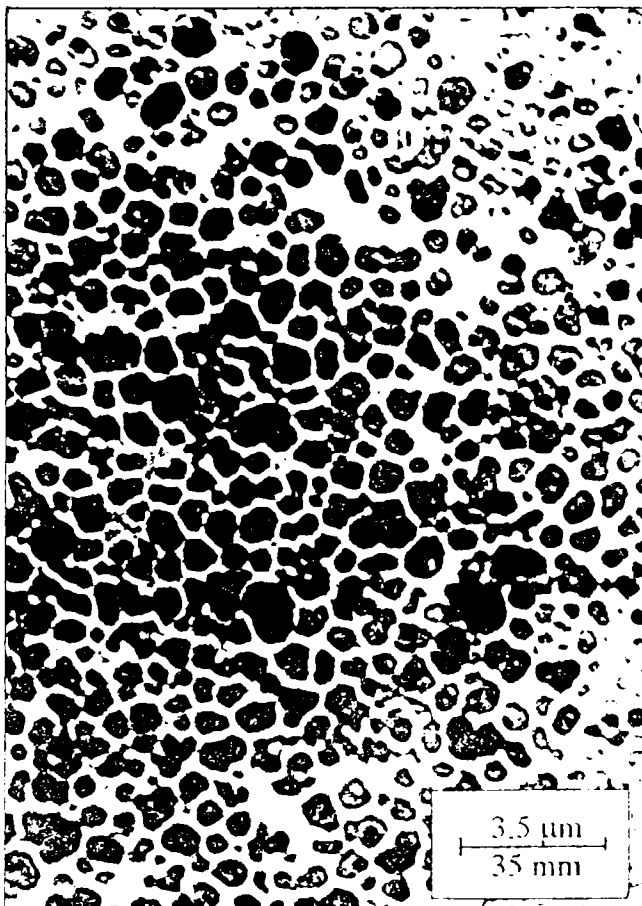


Fig.4.121 Granule  $B_4C$  ( $t = 10$  min)

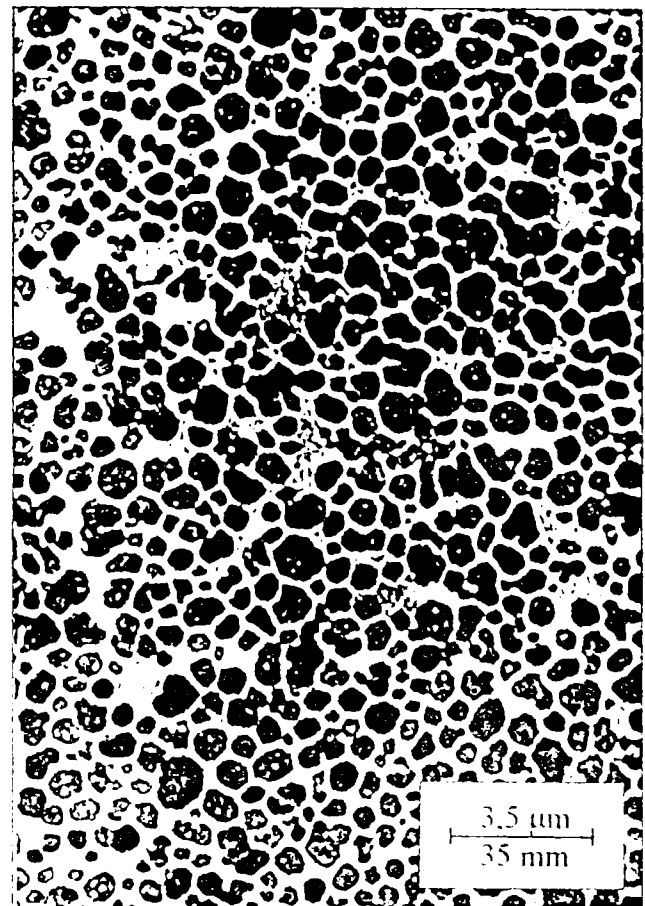


Fig.4.122 Granule  $B_4C$  ( $t = 20$  min)



Se observă că granulele abrazive noi au forma unor poliedri neregulați și foarte diferiți. Conform previziunilor, cu creșterea timpului de prelucrare se produce o fărâmițare a abrazivului, deci scade dimensiunea fracțiunii principale a acestuia, schimbându-se compoziția granulometrică a abrazivului, iar la durate mari de prelucrare se observă tendința de uniformizare a dimensiunii abrazivului. Pe lângă acțiunea de fărâmițare continuă a granulelor abrazive aflate între piesă și discul de lepuit are loc și modificarea formei granulelor: vârfurile și muchiile acestora se rotunjesc, se uzează, pierzându-și treptat capacitatea de așchiere. O analiză orientativă arată faptul că granulele abrazive se micșorează de circa 2...3 ori după un minut de prelucrare și de circa 20...25 ori după 10 minute de prelucrare. Nu se remarcă diferențe semnificative de la un tip de abraziv la altul. Se verifică astfel în mare parte ipotezele care au stat la baza determinării modelului fizic etapizat asimilat lepuirii plane ultrasonice prezentat în paragraful 3.2. Pe de altă parte este dificil de evaluat diferența care apare la uzura granulelor abrazive cu sau fără activare ultrasonică, fiind mai util și rațional să se facă o apreciere globală a uzurii acestora prin intermediul funcțiilor obiectiv de interes tehnologic analizate în programele experimentale aplicate.

Studiul stratului superficial al suprafeței discului de lepuit, fără a fi secționat, nu a relevat existența granulelor abrazive încastate în acesta, probabil datorită rugozității destul de mici granulele nu au aderat la suprafața discului, deci prelucrarea s-a desfășurat în totalitate cu granule abrazive libere.

#### 4.7 Concluzii generale

Pe baza experimentelor efectuate se conturează următoarele concluzii generale:

- ◆ rezultatele experimentale confirmă în mare parte concluziile obținute în urma modelării analitice;
- ◆ analiza statistică a profilului de rugozitate a suprafețelor prelucrate, utilizând teoria funcțiilor aleatoare, oferă informații suplimentare asupra influenței diferiților factori asupra indicatorilor de rugozitate și asupra desfășurării procesului studiat:
  - se poate stabili sensul în care diferiți factori de influență modifică raportul dintre componenta aleatoare și cea deterministă din structura neregularităților suprafeței: s-a demonstrat astfel că introducerea oscilațiilor ultrasonice în procesul de lepuire mărește ponderea componentei aleatoare din structura neregularităților suprafeței;
  - determinarea coeficienților de asimetrie și exces a distribuției empirice în raport cu cea teoretică furnizează date în legătură cu normalitatea repartițiilor empirice în raport cu cea normală, dar și date privind configurația profilului de rugozitate;
  - aplicarea metodei punctelor particulare la analiza profilogramelor, metodă bazată pe numărul de intersecții ale liniei medii cu profilul, numărul de maxime și numărul punctelor de inflexiune pe unitatea de lungime, relevă aspecte de finețe ale profilului: raza medie de rotunjire a vârfului proeminențelor, unghiul mediu de înclinare a profilului față de linia medie, pasul mediu, ș.a.; se pot stabili relativ repede indicatori de formă, de planimetrare, ce nu sunt dați direct de aparatele uzuale de măsură a rugozității și ar necesita aparatură complexă de investigație;

- ◆ la prelucrările cu abraziv liber intensificarea comportamentului dinamic al granulelor abrazive în câmp ultrasonic prin activarea deplasărilor acestora poate înlocui cinematica complexă a mișcărilor relative sculă-piesă de prelucrat, specifică PNFA, cu o cinematică mai simplă;
- ◆ activarea ultrasonică produce efecte pozitive prin micșorarea parametrilor de înălțime ai profilului de rugozitate și creșterea productivității specifice a prelucrării și efecte negative din punct de vedere al capacității portante;
- ◆ în funcție de cerințele funcționale impuse pieselor lepuite, pentru optimizarea funcțiilor obiectiv de interes tehnologic ce răspund favorabil activării cu ultrasunete, puterea de activare ultrasonică trebuie să aibă valori cât mai ridicate, evitându-se însă tendințele de supradozare cu energie ultrasonică;
- ◆ creșterea presiunii de contact, deci creșterea presiunii acustice, conduce la intensificarea efectului ultrasunetelor în spațiul de lucru, totuși presiuni prea mari introduc amortizări în sistem;
- ◆ nu a fost evidențiată o corelație semnificativă între granulația și concentrația abrazivului și funcțiile obiectiv analizate, cercetările teoretice și experimentale conduc la ideea că acești factori nu au influență prin ei înșiși, ci prin interacțiunea cu alți parametri ai prelucrării, importantă fiind mai ales interacțiunea presiune de contact-granulație-concentrație;
- ◆ studiul suprafețelor prelucrate și studiul uzurii granulelor abrazive verifică în mare parte modelul fizic propus pentru lepuire plană ultrasonică.

## CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

### 5.1 Concluzii finale

Pe baza cercetărilor efectuate în cadrul prezentei teze de doctorat, urmărind direcțiile de cercetare deschise de problematica tezei, se pot formula următoarele concluzii finale:

- ◆ documentarea bibliografică a permis definirea stadiului actual al cercetărilor în ceea ce privește PNFA activate ultrasonic; deși în toate sursele se subliniază avantajele deosebite conferite de aplicarea unui câmp ultrasonic peste procesul clasic, date privind aplicații concrete sunt puține și incomplete atât din punct de vedere al cercetării teoretice cât și experimentale;
- ◆ la nivelul actual de cunoaștere a mecanismelor de interacțiune sculă de lepuit-mediul abraziv-piesă de prelucrat în câmp ultrasonic, modelarea teoretică nu poate cuprinde întreaga complexitate a fenomenologiei activării ultrasonice a proceselor de lepuire; totuși, pe baza unor ipoteze simplificatoare, se pot dezvolta modele fizice și analitice care să definească corect și cât mai complet procesul, pe un domeniu de aplicabilitate relativ limitat;
- ◆ lepuirea în prezența oscilațiilor ultrasonice fiind un proces complex și aleator s-a considerat utilă și necesară inventarierea sistematică a funcțiilor obiectiv, a factorilor de influență și a parametrilor procesului;
- ◆ multitudinea factorilor de influență și interdependența acestora a făcut necesară ierarhizarea factorilor de influență din prisma unor funcții obiectiv de interes tehnologic (rugozitatea suprafeței și productivitatea prelucrării);
- ◆ modelarea experimentală, pe baza unor programe de volum redus, conduce la obținerea pentru funcțiile obiectiv impuse a unor modele regresionale cu precizie de estimare ridicată pentru domeniul multifactorial investigat, iar studiul efectelor factorilor de influență asupra funcțiilor obiectiv permite optimizarea acestora, ceea ce constituie o bază de date utilă aplicațiilor practice;
- ◆ analiza statistică a profilului de rugozitate a suprafețelor prelucrate, utilizând teoria funcțiilor aleatoare și aplicarea metodei punctelor particulare la analiza profilogramelor permit evaluarea distribuției și formei neregularităților suprafețelor lepuite ultrasonic și astfel o valorificare mai completă a încercărilor experimentale efectuate;
- ◆ rezultatele experimentale susțin concluziile obținute în urma modelării analitice;
- ◆ prelucrarea rezultatelor teoretice și experimentale a permis evidențierea următoarelor aspecte principale în ceea ce privește activarea ultrasonică a procesului de lepuire:
  - ⇒ la prelucrările cu abraziv liber intensificarea comportamentului dinamic al granulelor abrazive în câmp ultrasonic prin activarea deplasărilor acestora poate

- eventual înlocui cinematica complexă a mișcărilor relative sculă-piesă de prelucrat, cu o cinematică mai simplă;
- ⇒ introducerea oscilațiilor ultrasonice în procesul de lepuire mărește ponderea componentei aleatoare din structura neregularităților suprafeței;
  - ⇒ pentru spațiul experimental explorat, în condițiile unei activări ultrasonice destul de slabe și timpi mici de prelucrare, introducerea oscilațiilor ultrasonice produce efecte pozitive prin micșorarea parametrilor de înălțime ai profilului de rugozitate și creșterea productivității specifice a prelucrării și efecte negative prin scăderea relativă a capacității portante;
  - ⇒ configurația profilului de rugozitate este mai favorabilă condițiilor de exploatare a componentelor cuplelor cu frecare umedă sau uscată, aflate în mișcare relativă, micșorând durata de rodaj a acestora;
- ◆ deoarece lepuirea se aplică unei game foarte diverse de suprafețe, de materiale, adoptarea deciziei de a activa ultrasonic un proces de lepuire presupune pentru fiecare caz în parte o abordare specifică și rezultate particularizate;
  - ◆ pentru procesele ce răspund favorabil prelucrării și având în vedere costul relativ scăzut al echipamentelor ultrasonice, trecerea la aplicații industriale se poate face pe două căi: prin adaptarea echipamentului ultrasonic pe mașinile-unelte existente sau proiectarea și realizarea unor mașini-unelte de lepuire având implementate unul sau mai multe blocuri ultrasonice în vederea obținerii unei flexibilități sporite prin activarea simultană sau nu a diferitelor elemente ale sistemului tehnologic.

## 5.2 Contribuții originale

Prezenta teză de doctorat cuprinde o serie de contribuții, apreciate de autor ca originale, la cercetarea teoretică și experimentală a proceselor de netezire fină activate ultrasonic. Se pot rezuma următoarele contribuții:

- în domeniul cercetării teoretice:
  - definirea stadiului actual al cercetărilor privind procesele de netezire fină abrazivă activate ultrasonic, cu accent pe procesul de lepuire, prin realizarea unei analize critice și creative a materialului bibliografic disponibil, cu elemente de originalitate în structurarea informațiilor:
    - ✓ sinteza parametrilor determinanți în studiul fenomenologiei procesului de lepuire;
    - ✓ realizarea unui material documentar coerent privind caracteristicile tehnologice și clasificarea proceselor de lepuire;
    - ✓ identificarea factorilor de influență și a funcțiilor obiectiv la PNFA;
    - ✓ sinteza principial constructivă a principalelor variante de procedee de așchiere activate ultrasonic și de lepuire activată ultrasonic;
    - ✓ prezentarea limitelor și a principalelor direcții de cercetare ale PNFA activate ultrasonic.
  - elaborarea unei concepții noi privind modelarea analitică a procesului de lepuire plană activată ultrasonic prin conceperea:

- ✓ unui model analitic general de determinare a volumului de material prelevat în condiții statice și dinamice;
- ✓ unui model analitic de stabilire a presiunii critice de contact;
- ✓ unui model analitic al volumului de material netezit;

Modelul analitic prezentat ține cont de modificarea în timp a formei granulelor abrazive, de neomogenitatea dimensională a acestora, și are în vedere componenta de deformare plastică a procesului de lepuire.

- realizarea, pe baza profilogramelor suprafețelor pieselor lepuite ultrasonic, a unor acțiuni de:
  - ✓ verificare a naturii gaussiene a repartiției abaterilor profilului de rugozitate;
  - ✓ studiu a unor caracteristici microgeometrice ale profilului de rugozitate, aplicând metoda punctelor particulare ale profilului;
  - ✓ aplicare a teoriei funcțiilor aleatoare în analiza profilului de rugozitate a suprafețelor obținute, utilizând funcțiile de autocorelație normată și densitate de putere spectrală.

□ în domeniul cercetării experimentale:

- adaptarea unui stand pentru efectuarea încercărilor experimentale de lepuire plană activată ultrasonic;
- utilizarea unui sistem performant de achiziție a datelor pentru obținerea profilogramelor suprafețelor lepuite ultrasonic;
- elaborarea și executarea programelor de cercetare experimentală în vederea studiului procesului de lepuire plană activată ultrasonic;
- stabilirea ierarhiei factorilor de influență asupra funcțiilor obiectiv: rugozitatea  $R_a$  și productivitatea  $Q$ , utilizând metoda bilanțului aleator, prelucrarea datelor realizându-se cu procedură software; din mulțimea factorilor de influență au fost selectați un număr de opt factori de influență, pentru care s-a realizat evaluarea semnificației statistice și ierarhizarea în funcție de influența exercitată asupra funcțiilor obiectiv;
- analiza importanței factorilor de influență și a interacțiunilor dintre aceștia asupra funcțiilor obiectiv ce caracterizează calitatea suprafeței prelucrate și productivitatea specifică a procedurii; aceasta s-a realizat pe baza rezultatului programului de experimentare factorial în care au fost luați în considerare cinci factori de influență și cincisprezece funcții obiectiv;
- analiza amplitudinii și sensului în care factorii de influență modifică funcțiile obiectiv avându-se în vedere mai ales efectele produse de introducerea oscilațiilor ultrasonice în procesul de prelucrare;
- determinarea modelului polinomial de ordinul I a funcțiilor obiectiv analizate și reprezentarea grafică a acestora în funcție de factorii de influență semnificativi;
- studierea, utilizând metoda experimentului clasic, influenței concentrației și a granulației abrazivului asupra a trei funcții obiectiv considerate de interes tehnologic: rugozitatea  $R_a$ , productivitatea  $Q_s$  și capacitatea portantă și compararea rezultatelor cu concluziile rezultate din modelarea analitică;
- evidențierea unor aspecte specifice ale procesului de lepuire ultrasonică prin studiul microgeometriei suprafețelor inițiale și finale ale pieselor și prin analiza comparativă a imaginilor granulelor abrazive noi și cu diferite grade de uzură.



Cercetarea teoretică și experimentală efectuată a avut un caracter de prioritate în domeniul aplicării oscilațiilor ultrasonice la procesele de lepuire; prin rezultatele obținute se completează literatura de specialitate cu noi informații referitoare la acest tip de prelucrări.

### 5.3 Perspective

Întrucât nu s-a reușit abordarea tuturor problemelor legate de prelucrarea cu PNFA și în particular prin lepuire activată ultrasonic, se pot formula eventuale posibile direcții de cercetare în domeniu:

- o fundamentare științifică riguroasă a fenomenelor fizico-mecanice din stratul superficial al pieselor prelucrate;
- modelarea comportamentului dinamic al componentelor active ale sistemului tehnologic (scula pentru lepuire, mediu abraziv, piesă);
- elaborarea unor modele analitice relativ simple și fidele pentru mai multe funcții obiectiv de interes tehnologic;
- continuarea cercetărilor privind alte direcții de aplicare a oscilațiilor ultrasonice;
- lărgirea ariei de aplicabilitate a procedurii asupra altor tipuri de suprafețe: cilindrice, sferice, etc.;
- conceperea și realizarea de programe experimentale pentru o gamă diversă de materiale;
- aplicarea procedurii de lepuire ultrasonică cu controlul punctelor critice, ce presupun modificarea multiplă a regimurilor de prelucrare;
- studiul comportării în exploatare a pieselor lepuite ultrasonic;
- analiza tridimensională a topografiei suprafețelor prelucrate, prin acest procedeu, utilizând metode de măsurare avansate;
- analiza imaginilor granulelor abrazive prin prelucrare computerizată;
- proiectarea și realizarea unui echipament ultrasonic flexibil de activare a procesului de lepuire, care să acopere o gamă largă de aplicații;
- stabilirea bilanțului energetic al procesului de lepuire activată ultrasonic.

Posibilitățile de continuare și aprofundare a studiilor în acest domeniu sunt justificate de rezultatele pozitive obținute în teza de doctorat și confirmă faptul că tehnologiile de finisare și superfinisare neconvenționale reprezintă un domeniu de vârf al tehnologiilor neconvenționale prin asigurarea cu eficiență sporită a caracteristicilor tehnologice dorite.



## BIBLIOGRAFIE

- [A1] Amza G., ș.a. - *Sisteme ultraacustice*, Editura Tehnică, București, 1988
- [A2] Ausländer D. - *Fizica proceselor activate cu ultrasunete*, Ultraacustica '86, caietul 22, Timișoara, 1986
- [B1] Babaev S.G. - *Pritirka i dovodka povernostei detalei mașin*, Izd. Mašinostroenie, Moskva, 1976
- [B2] Balamuth L. - *Vibrațiile ultraacustice în ajutorul sculelor așchietoare*, Prelucrarea metalelor cu ultrasunete, ICDT, București, 1966
- [B3] Balcu I. - *Contribuții privind prelucrarea prin vibroașchiere*. Rezumatul tezei de doctorat, Brașov, 1988
- [B4] Bejan V., ș.a. - *Influența calității suprafeței prelucrate asupra comportării pieselor în exploatare*, Construcția de Mașini, nr.9, 1992
- [B5] Béranger G., ș.a. - *Le livre de l'acier*, Editeurs Scientifiques Lavoisier TEC&DOC, 1994
- [B6] Brown B. - *Progrese recente în aplicarea ultrasunetelor la procesele de prelucrare*, Prelucrarea metalelor cu ultrasunete, ICDT, București, 1966
- [C1] Chen X., ș.a. - *Analysis and simulation of the grinding process. Part II: Mechanics of grinding*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.36, Nr.8, 1996
- [C2] Chivu A., ș.a. - *Tehnologii speciale de fabricare și reparare a autovehiculelor*, Lito Universitatea Transilvania, Brașov, 1991
- [C3] Cicală E.F. - *Optimizarea proceselor de tăiere conturată cu laser a materialelor*. Teză de doctorat, Timișoara, 1997
- [C4] Cicală E.F. - *Metode de prelucrare statistică a datelor experimentale*, Editura "Politehnica", Timișoara, 1999
- [C5] Ciepovețkii I. H. - *Osnovî finișnoi almaznoi obrabotki*, Izd. Naukova Dumka, Kiev, 1980
- [C6] Cohal V. - *Considerații asupra unor principii de funcționare ale unei mașini de lepuit în câmp ultrasonic*, Construcția de mașini nr.10 (44), 1992
- [C7] Cohal V. - *Unele aspecte ale procesului de lepuire în câmp ultrasonic*, Construcția de mașini nr.10 (44), 1992
- [C8] Coman G., ș.a. - *Probleme actuale ale finisării și suprafinisării suprafețelor pieselor de mașini*, vol. 2, INID, 1973
- [C9] Crețu-Nica M. - *Activarea cu ultrasunete a mediilor lichide de lucru*. Teză de doctorat, Timișoara, 1999
- [D1] Diaconescu G., ș.a. - *Tehnologia mecanicii fine și micromecanicii*, Editura Tehnică, București, 1985
- [D2] Diaconescu I., ș.a. - *Mașini-unelte*, vol II, Editura Transporturilor și Telecomunicațiilor, București, 1962
- [D3] Drăgan O., ș.a. - *Ultrasunete de mari energii*, Editura Academiei, București, 1983
- [D4] Drăghici G. - *Tehnologia construcțiilor de mașini*, Editura Didactică și Pedagogică, București 1984

- [D5] Dreucean A., ș.a. - *Mașini-unelte și control dimensional*, partea I, vol 2, Lito Institutul Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1984
- [D6] Dubots D. - *Contribution à l'étude des paramètres de l'abrasion. Influence de la dureté*. Thèse pour l'obtention du titre de docteur-ingénieur. Université Louis Pasteur de Strasbourg, 1974
- [E1] Ensminger D. - *Ultrasonics. The low and high Intensity Application*, Ed. Marcel Dekker Inc., New York, 1978
- [G1] Gavrițaș I., ș.a. - *Tehnologii de prelucrare cu scule din materiale dure și extradure*, Editura Tehnică, București, 1977
- [G2] Ghiculescu L.D. - *Contribuții privind finisarea prin procedee neconvenționale a suprafețelor active ale matrițelor*. Rezumatul tezei de doctorat, București, 1999
- [H1] Horbenko I.G. - *Ultrazvuk v mašinostroenii*, Izd. Mašinostroenie, Moskva, 1974
- [H2] Hrulkov V.A., ș.a. - *Almaznii instrumenti v precizionnom pribostroenii*, Izd. Mašinostroenie, Moskva, 1977
- [I1] Iclănzan T. - *Probleme ale sistematizării tehnice în aplicațiile ultrasunetelor în tehnologie*, Ultraacustica'86, Caietul 22, Timișoara, 1986
- [I2] Iclănzan T. - *Cercetări asupra parametrilor constructivi și funcționali la mașinile de prelucrat cu ultrasunete*. Teză de doctorat, Timișoara, 1975
- [I3] Ionescu N., ș.a. - *Cercetări experimentale privind găurirea și alezarea asistate de vibrații ultrasonice*, Conferința Internațională de Tehnologii Neconvenționale CITN, Timișoara, 1999
- [I4] Iosifescu M., ș.a. - *Mică enciclopedie de statistică*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1985
- [K1] Kazantsev V.F. - *Ultrasonic Cutting, Physical Principles of Ultrasonic Technology*, vol 1, Ed. L.D. Rozenberg, Plenum Press, New York, 1973
- [K2] Kerekes L., ș.a. - *Considerații privind rolul unei bănci de date pentru regimurile de rectificare*, Buletinul științific al Institutului Politehnic Cluj-Napoca, nr.27, 1984
- [K3] Kim J.D., ș.a. - *Stochastic approach to experimental analysis of cylindrical lapping process*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.35, nr.1, 1995
- [K4] Kim J.D., ș.a. - *A study of ultrasonic vibration cutting of carbon fibre reinforced plastics*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, nr. 12, 1996
- [K5] Kops L. - *O cercetare asupra influenței uzurii pudrei abrazive asupra indicilor tehnologici ale prelucrării cu ultrasunete*, Prelucrarea metalelor cu ultrasunete, ICDT, București, 1966
- [K6] König W. - *Fertigungsverfahren, Band 2, Schleifen, Honen, Läppen*, Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1989
- [K7] Kumabe J. - *Vibrationnoe rezanie*, Izd. Mašinostroenie, Moskva, 1985
- [K8] Kumabe J., ș.a. - *Precision vibration lapping of center hole*, Bulletin Japan Society of Precision Engineering, Vol. 22, No.1, 1988

- [K9] Kuttruff H. - *Ultrasonics: fundamentals and applications*, Elsevier Applied Science, 1991
- [L1] Lăcătuș E., ș.a. - *Studiu asupra îndepărtării particulelor materiale la prelucrarea cu ultrasunete*, A VI-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale CNTN, vol.C+D, Timișoara, 1993
- [L2] Lăcătuș E. - *Cercetări privind deformarea plastică la rece în câmp ultrasonic*. Teză de doctorat, București, 1996
- [L3] Lin S.C., ș.a. - *A study on the effects of vibration on the surface finish using a surface topography simulation model for turning*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.38, No.7, 1998
- [L4] Lungu G., ș.a. - *Mașini-unelte pentru mecanică fină*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981
- [M1] Marinescu I.D., ș.a. - *Diamantul și aplicațiile lui*, Editura Tehnică, București, 1985
- [M2] Marinescu I.D. - *Aspecte tribotehnologice ale procesului de rectificare cu discuri diamantate*, TCMM, Editura Tehnică, 1988
- [M3] Marinescu N.I., ș.a. - *Tehnologii de prelucrare a sculelor din materiale dure și extradure*, Editura Tehnică, București, 1985
- [M4] Marinescu N.I. - *Prelucrări cu ultrasunete*, Editura Tehnică, București, 1986
- [M5] Markov A.I. - *Ultrazvukovoe rezanie trudnoobrabotivaemih materialov*, Izd. Mašinstroenie, Moskva, 1968
- [M6] Markov A.I. - *Primenenie ultrazvuka v promišlennosti*, Izd. Mašinstroenie, Moskva, 1975
- [M7] Markov A.I. - *Ultrazvukovaia obrabotka materialov*, Izd. Mašinstroenie, Moskva, 1980
- [M8] Matalin A.A. - *Novia napravlenia razvitia tehnologii čistovoi obrabotki*, Izd. Tehnika, Kiev, 1972
- [M9] Mălaimare G. - *Contribuții la prelucrarea materialelor fragile în câmp ultrasonic cu masă rotativă*. Teză de doctorat, Timișoara, 1998
- [M10] Michalski J. - *Description of honed cylinders surface topography*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, No. 2, 1994
- [M11] Morar L. - *Considerații privind modelul matematic al uzurii discului abraziv la rectificare*, Buletinul științific al Institutului Politehnic Cluj-Napoca, nr. 34, 1991
- [M12] Moraru V., ș.a. - *Vibrațiile și stabilitatea mașinilor-unelte*, Editura Tehnică, București, 1982
- [M13] Moraru V., ș.a. - *Mașini-unelte speciale*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982
- [N1] Nanu A. - *Tehnologia materialelor*, Editura Tehnică, București, 1983
- [N2] Nagiț G. - *Contribuții teoretice și experimentale cu privire la prelucrarea prin vibrorulare*. Teză de doctorat, Iași, 1997
- [N3] Nagiț G. - *Tehnologii neconvenționale*, Lito Universitatea Tehnică "Gh. Asachi" Iași, 1998

- [N4] Nedelcu D, ș.a. – *Aspecte ale influenței unor parametri ai regimului de lucru asupra gradului de acoperire la vibrohonuirea interioară*, Construcția de mașini, nr. 8-9, 1994
- [N5] Neppiras A.F. - *Prelucrarea și formarea prin ultrasunete*, Prelucrarea metalelor cu ultrasunete, ICDT, București, 1966
- [N6] Nichici A., ș.a. - *Contribuții la studiul rugozității suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică*, A IV-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, CNTN, Timișoara, 1983
- [N7] Nichici A., ș.a. - *Prelucrarea prin eroziune în construcția de mașini*, Editura Facla, Timișoara, 1983
- [N8] Nichici A., ș.a. - *Prelucrarea datelor experimentale*, Lito Universitatea “Politehnica” din Timișoara, 1996
- [N9] Nikulkin B.I. - *Izobretenia v oblasti vibrationnogo šlifovania i polirovania*, Stanki i instrument, Nr.7, 1989
- [N10] Nagy I. – *Ultrasunetele și utilizarea lor*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1982
- [O1] Oprean A., ș.a. - *Bazele așchierii și generării suprafețelor*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981
- [O2] Opreșor M.S. - *Tehnologii electrice speciale*, Lito Institutul Politehnic “Gh. Asachi” Iași, 1981
- [P1] Paulescu G., ș.a. - *Studiul influenței vibrării sculei în direcția avansului longitudinal asupra calității suprafețelor obținute la strunjirea aliajelor pe bază de aluminiu*, Buletinul Științific al Institutului Politehnic “Traian Vuia” Timișoara, Seria Mecanică, Tom 24(38), Fascicula 1/1979
- [P2] Paulescu G. - *Contribuții la optimizarea tehnologiei de prelucrare dimensională cu unde ultrasonice a materialelor fragile și dure*. Teză de doctorat, Timișoara, 1987
- [P3] **Paulescu Liliana** - *Activarea ultrasonică a proceselor de netezire fină abrazivă*, Lucrările simpozionului TEHNOMUS VI, Suceava, 1991
- [P4] **Paulescu Liliana** - *Starea actuală și perspectivele proceselor de lepuire*, Analele Universității din Oradea, 1991
- [P5] **Paulescu Liliana** – *Sisteme ultrasonice de activare a proceselor de așchiere și deformare plastică*, Analele Universității din Oradea, 1992
- [P6] **Paulescu Liliana** – *Mecanismul așchierii activate ultrasonic cu comportamentul dinamic al piesei de prelucrat*, A VI-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale CNTN, vol.C+D, Timișoara, 1993
- [P7] Pei Z.J., ș.a. -- *Modeling of ductile-mode material removal in rotary ultrasonic machining*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.38, No. 10-11, 1998
- [P8] Picoș C., ș.a. - *Normarea tehnică pentru prelucrări prin așchiere*, vol 2, Editura Tehnică, București, 1982
- [P9] Picoș C., ș.a. - *Proiectarea tehnologiilor de prelucrare mecanică prin așchiere. Manual de proiectare*. Vol. 2, Editura Universitas, Chișinău, 1992

- [P10] Pohlman R. - *Lepuire prin impact cu ultrasunete*, Prelucrarea metalelor cu ultrasunete, ICDT, București, 1966
- [P11] Popa A.S.- *Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare*. Teză de doctorat, Timișoara, 1999
- [R1] Rudzit, I.A. – *Mikrogeometria i kontaknoe vzaimodeistvie poverhnostei*, Izd. Zinatne, Riga, 1975
- [R2] Rusu O. - *Propagarea undelor elastice*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1985
- [S1] Savu T. - *Contribuții la studiul realizării de sisteme expert pentru monitorizarea încercărilor experimentale tribologice cu aplicații în procesul de aşchiere*. Rezumatul tezei de doctorat. București, 1998
- [S2] Scheffel H., ș.a. - *Dispozitive cu ultrasunete*, vol 1 și 2, Editura Tehnică, București, 1989
- [S3] Subramanian K., ș.a - *Mechanisms of material removal in the precision production grinding of ceramics*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol.119, Nr. 4(A), 1997
- [S4] Szabo O. - *Câteva caracteristici ale microaşchierii cu scule superdure*, Construcția de Mașini, nr.1-2, 1994
- [Ș1] Ștețiu M. - *Contribuții asupra triboaşchierii*. Teză de doctorat, Cluj-Napoca, 1993
- [T1] Tache V., ș.a. - *Studiul calității suprafețelor la prelucrarea prin lepuire a etanșărilor mecanice*, Tribotehnica'87, A V-a Conferință a specialiștilor în frecare, ungere, uzare, vol III, București, 1987
- [T2] Tarnig Y.S., ș.a. – *An analytical model of chatter vibration in metal cutting*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.34, No. 2, 1994
- [T3] Tăbăcaru L., ș.a. - *Considerații privind prelucrarea datelor experimentale la suprafinisarea cu bandă abrazivă a materialului 41CrNi12*, Construcția de Mașini, nr.8-9, 1994
- [T4] **Tulcan Liliana** - *Aspecte ale modelării matematice a proceselor de netezire fină abrazivă*, Conferința Internațională “Tehnologii moderne în construcția de mașini TMCM'96”, Iași, 1996
- [T5] **Tulcan Liliana** - *Aspecte ale modelării matematice a proceselor de lepuire*, Conferința Internațională “Tehnologii moderne în construcția de mașini TMCM'96”, Iași, 1996
- [T6] **Tulcan Liliana, ș.a.** – *Posibilități de activare ultrasonică la finisarea alezajelor lagărelor din safir*, Eficiența tehnologiilor neconvenționale, vol.1, Editura Augusta, Timișoara, 1998
- [T7] Turc C., ș.a. - *Prelucrarea datelor experimentale cu ajutorul calculatorului*, Al V-lea Simpozion de Geometrie Descriptivă, Desen, Design și Grafică asistată de calculator, vol II, Timișoara, 1996
- [U1] Ulitin M.N., ș.a. - *Prelucrarea cu ultrasunete la rectificarea plană*, Prelucrarea metalelor cu ultrasunete, ICDT, București, 1966
- [V1] Vetter T. - *Beitrag zur Frage der Haupt- und Fehlergeometrie beim Schwigkläppen mit Ultraschall*. Dissertation, Berlin, 1967



- [V2] Vișan A., ș.a. - *Cercetări actuale și tendințe privind așchiera asistată de vibrații ultrasonice*, Conferința Internațională de Tehnologii Neconvenționale CITN, Timișoara, 1999
- [Z1] Zhang D., ș.a. - *Investigation of chip in vibration drilling*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.38, Nr. 3, 1998
- [Z2] Zsivanov D. - *Contribuții la evaluarea caracteristicilor suprafețelor de contact cu rugozitate izotropă*. Teză de doctorat, Timișoara, 1998
- [\*1] *Abrasive Cutting - a Process with Scope for the Future*. Industrial & Production Engineering, Nr.1, 1982
- [\*2] *Abrazivnaia i almaznaia obrabotka materialov. Spravočnik*. Izd. Mašinstroenie Moskva, 1977
- [\*3] *Broșarea cu ajutorul ultrasunetelor*. Prelucrarea metalelor cu ultrasunete, ICDT, București, 1966
- [\*4] *Folosirea ultrasunetelor pentru a ameliora îndepărtarea metalului și a prelungi durabilitatea pietrelor de polizor la operațiile de polizare*. Prelucrarea metalelor cu ultrasunete, ICDT, București, 1966
- [\*5] Institutul Român de standardizare - STAS 5730-85, STAS 5730-75
- [\*6] *Lapping or face honing with ever increasing accuracy*. European Production Engineering, nr.4, 1993
- [\*7] *Manualul inginerului mecanic*. Editura Tehnică, București, 1973
- [\*8] *Mechanical Vibration and Shock Measurements*. Brüel & Kjaer, 1980
- [\*9] *Referativni Žurnal*. Tehnologia Mašinstroenie, 1985-1989
- [\*10] STATGRAPHICS. Examples Manual, Manugistic Inc., 1992
- [\*11] *Twin-disc Lapping Machines for Production Work*. Industrial & Production Engineering, Nr.2, 1982

### *Prospecte*

- [\*12] *Diamonds in industry. Lapping & Polishing*. De Beers Industrial Diamond Division, London, England
- [\*13] *Grinding and Lapping Compound*. UNITED STATES PRODUCTS CO., Pittsburgh, U.S.A.
- [\*14] *Lapping, Honing- Fine Grinding, Polishing*. Peter Wolters Maschinenfabrik GmbH & Co, Rendsburg, Germany
- [\*15] *Läpp- und Feinschleifmaschinen*. Bauart Hahn&Kolb, Stuttgart, Deutschland
- [\*16] *Machine Tool Works*. Fritz Studer LTD, Glockenthal-Thun, Switzerland
- [\*17] *Plane-Parallel Lapping Mashine*. Melchiorre srl Officina Meccanica, Milano, Italy
- [\*18] *Scule diamantate*. Întreprinderea de Mecanică Fină București.
- [\*19] *Superfinishing Units*. Supfina Maschinenfabrik Hentzen KG, Remscheid, Germany