

Universitatea „**POLITEHNICA**” Timișoara
Facultatea de Mecanică
Catedra Tehnologia Construcțiilor de Mașini

Ing. Ionel IANCU

***CONTRIBUȚII PRIVIND PRELUCRAREA CU
ULTRASUNETE A
DISCURILOR OPTICE DIN STICLĂ
ȘI A LENTILELOR DE SAFIR***

- Teză de doctorat -

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC

Prof. Dr. Ing. Tudor ICLĂNZAN

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

Timișoara
1999

625.352
181 D

CUPRINS

ABREVIERI.....	pag.3
INTRODUCERE.....	pag.4
CAPITOLUL	
PRELUCRAREA CU ULTRASUNETE.....	pag.6
1.1. Aplicarea ultrasunetelor în tehnologie.....	pag.6
1.2. Prelucrarea dimensională cu ultrasunete.	
Elemente de bază ale procesului prelucrării.....	pag.12
1.3. Metode de prelucrare cu ultrasunete.....	pag.17
1.4. Evoluții, realizări și limite ale procesului.....	pag.22
1.4.1. Evoluții și realizări.....	pag.22
1.4.2. Limite ale procesului.....	pag.33
CONCLUZII.....	pag.35
CAPITOLUL 2	
OBIECTIVELE CERCETĂRII.....	pag. 36
CAPITOLUL 3	
STUDIUL DE SINTEZĂ PRIVIND TEHNOLOGIILE DE PRELUCRARE CU ULTRASUNETE.....	pag.40
3.1. Considerații generale.....	pag.41
3.2. Analiza corelației proces-tehnologie-echipament de prelucrare cu ultrasunete.....	pag.52
CONCLUZII.....	pag.61
CAPITOLUL 4	
STUDII DE SINTEZĂ PRIVIND CONSTRUCȚIA ȘI FUNCȚIONALITATEA MAȘINILOR DE PRELUCRAT CU ULTRASUNETE.....	pag.62
4.1. Generatoare cu ultrasunete.....	pag.63
4.2. Convertoare cu ultrasunete.....	pag.67
4.2.1. Transductoare cu ultrasunete.....	pag.70
4.2.1.1. Transductoare magnetostrictive metalice.....	pag.72
4.2.1.2. Ferite magnetostrictive.....	pag.73
4.2.1.3. Transductoare electrostrictive (piezoceramice).....	pag.74
4.2.2. Concentratoare adaptoare de undă.....	pag.76
4.2.3. Scule.....	pag.79
4.3. Sisteme de alimentare cu suspensie abrazivă.....	pag.84
4.4. Sisteme de avans.....	pag.85
4.4.1. Mecanismul de avans cu greutate echilibrată.....	pag.85
4.4.2. Mecanismul de avans cu resort echilibrat.....	pag.86
4.4.3. Mecanismul de avans acționat pneumatic sau hidraulic.....	pag.86
4.4.4. Mecanismul de avans cu solenoid.....	pag.86
4.4.5. Mecanismul de avans acționat de un motor electric care lucrează în regim frânat.....	pag. 87
4.4.6. Mecanismul de avans electromecanic.....	pag.87
4.4.7. Mecanismul de avans cu contragreutate cu plunjer.....	pag.87
4.5. Studiu comparativ al unor mașini de prelucrat cu ultrasunete.....	pag.89
4.5.1. Mașina de prelucrat cu ultrasunete Brevet SUA.....	pag.89
4.5.2. Mașina de prelucrat cu ultrasunete tip MPU-03.....	pag.91
4.5.3. Mașina de prelucrat cu ultrasunete tip MPU-01.....	pag.94
4.5.4. Mașinile de prelucrat cu ultrasunete tip Exeron.....	pag.96
CONCLUZII.....	pag.101

CĂPITOLUL 5	
CERCETĂRI PRIVIND OPTIMIZAREA PROCESULUI PENTRU	
PRELUCRAREA DISCURILOR OPTICE ȘI LENTILELOR DE SAFIR.....	
	pag.102
5.1. Generalități.....	pag.102
5.2. Plan de experimentări.....	pag.103
5.3. Structura programelor experimentale.....	pag.105
5.3.1. Experimentul factorial.....	pag.106
5.3.2. Analiza unifactorială „ANOVA”.....	pag.108
5.3.3. Metoda suprafețelor de răspuns (RMS).....	pag.110
5.3.4. Dimensionarea și execuția sculelor.....	pag.116
5.4. Rezultatele experimentale obținute la carotarea discurilor optice.....	pag.118
5.4.1. Studiul influenței variației timpului asupra adâncimii de prelucrare.....	pag.120
5.4.2. Studiul influenței variației presiunii asupra adâncimii de prelucrare.....	pag.126
5.4.3. Studiul influenței variației frecvenței asupra adâncimii de prelucrare.....	pag.130
5.4.4. Studiul influenței variației amplitudinii asupra adâncimii de prelucrare..	pag.134
5.4.5. Studiul influenței variației concentrației suspensiei abrazive	
asupra adâncimii de prelucrare.....	pag.138
5.4.6. Studiul influenței variației puterii asupra timpului de prelucrare.....	pag.142
5.4.7. Studiul influenței variației presiunii asupra timpului de prelucrare.....	pag.142
5.5. Analiza interacțiunilor principalilor factori de influență a prelucrării	
dimensionale a discurilor optice în câmp ultrasonic.....	pag.149
5.5.1. Experimentul factorial cu două variabile.....	pag.149
5.5.2. Experimentul factorial cu două variabile.....	pag.154
5.5.3. Influența profilului sculei asupra calității suprafețelor de prelucrat.....	pag.163
5.6. Valorile rezultate în urma prelucrării lentilelor de safir.....	pag.164
5.7. Rezultatele experimentale obținute la prelucrarea lentilelor din safir.....	pag.166
5.7.1. Studiul influenței variației timpului asupra adâncimii de prelucrare.....	pag.166
5.7.2. Studiul influenței variației presiunii asupra adâncimii de prelucrare.....	pag.171
5.7.3. Studiul influenței variației frecvenței asupra adâncimii de prelucrare.....	pag.177
5.7.4. Studiul influenței variației puterii asupra adâncimii de prelucrare.....	pag.183
5.7.5. Studiul influenței variației concentrației suspensiei	
abrazive asupra adâncimii de prelucrare.....	pag.188
CONCLUZII.....	pag.195
CĂPITOLUL 6	
6. CERCETĂRI PRIVIND SOLUȚIILE CONSTRUCTIVE ALE MAȘINII	
DE PRELUCRAT CU ULTRASUNETE.....	
	pag.196
6.1. Mașina de prelucrat cu ultrasunete MPU-05.....	pag.196
6.2. Mașina de prelucrat cu ultrasunete-propunere de brevet.....	pag.201
CĂPITOLUL 7	
7 CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE.....	
	pag.205
7.1. Concluzii.....	pag.205
7.2. Contribuții originale.....	pag.207
BIBLIOGRAFIE.....	pag.209

ABREVIERI FOLOSITE

- A – amplitudinea oscilațiilor ultrasonice [μm];
f – frecvența oscilațiilor ultrasonice [kHz];
 f_0 – frecvența de rezonanță a sistemului ultrasonic [kHz];
 ω - pulsația undei acustice [s^{-1}];
T – perioada undei acustice [s];
v – viteza undei acustice [m/s];
 Δ - diferența a două mărimi;
t – timpul de prelucrare [s];
 P_e – puterea la intrarea în transductor [W];
P – puterea la ieșirea din transductor [W];
 η - factor de conversie electroacustic;
Q – productivitatea prelucrării [mm^3/min];
 p_{ap} - presiunea dintre sculă și piesă în procesul prelucrării [daN/cm^2];
Z – dimensiunea particulei abrazive [μm];
z – media aritmetică a dimensiunilor particulelor abrazive [μm];
 Z_m - dimensiunea maximă a particulei abrazive [μm];
 ρ_a – densitatea volumică a granulelor de abraziv [buc/cm^3];
- capacitatea de ecruisare;
K – raportul între duritatea piesei și a sculei;
 Φ_z – funcția de distribuție a abrazivului în zona de lucru;
OP – obiectul de prelucrat;
OT – obiectul de transfer;
G – sursa de energie primară-generatorul de ultrasunete
 C_{us} – convertorul de energie ultrasonică-transductorul de ultrasunete;
ET – elementul de transfer-concentratorul;
MCC – modul de comandă și control;
RAP – reglaj automat al puterii; " "
RAF – reglaj automat al frecvenței;
SMa – structură automată de adaptare;
S – suprafața de contact între sculă și piesă [mm];
PTZ – transductor electrostrictiv-piezoceramic din titanat zirconat de plumb.

INTRODUCERE

Prezenta lucrare de doctorat reprezintă o contribuție la activitatea de cercetare teoretică și experimentală desfășurată în domeniul prelucrării materialelor dure și fragile cu ajutorul energiei ultrasunetelor. Cu mulți ani în urmă acestui procedeu de prelucrare i se asociau disponibilități deosebit de promițătoare în aplicare, iar interesul cercetătorilor era captat atât de problemele proceselor fundamentale, cât și de acelea legate de tehnologiile optime și construcția echipamentului asociat. Evoluțiile ulterioare, impuse de pragmatismul celor care au aplicat procedeu, au determinat redefiniri impuse de criteriile de performanță tehnică și economică.

Prelucrarea cu ultrasunete nu mai este percepută nici ca o aplicație de largă utilizare, dar nici ca o aplicație exotică. Pur și simplu este o aplicație specială, oportună pentru cazuri particulare, bine definite.

În acest context se înscrie și tema prezentei tezei de doctorat care și-a propus realizarea unei tehnologii optimizate și a unui echipament specializat pentru prelucrarea unor produse cu destinație specială, discuri optice din sticlă și lentile din safir.

Teza de doctorat care este expusă pe parcursul a 7 capitole și 2 anexe, are 218 pagini, 135 figuri, 83 tabele, 149 referințe bibliografice, a fost realizată în contextul deosebit de favorabil de a putea lucra fără restricții și ajutat de o echipă de înaltă competență în domeniu.

Laboratorul de ultrasunete de pe lângă Catedra de Tehnologie a Construcțiilor de Mașini a Universității „POLITEHNICA” din Timișoara, este singura unitate din țară cu experiența realizării și implementării în industrie a acestui procedeu și cu capacități operaționale la nivelul cerințelor actuale. Am avut șansa de a mă racorda la preocupările colectivului din Timișoara încă din ultimii ani ai studenției mele, având ca temă de diplomă realizarea unui prototip de mașină de prelucrat cu ultrasunete și participând direct la finalizarea părții ei mecanice. La puțin timp, solicitarea industriei pentru realizarea unor piese optice cu destinație specială ne-a deschis posibilitatea armonizării mediului meu profesional cu cel creat prin acceptarea mea ca doctorand în colectivul Prof. Dr. Ing. Tudor Iclănzan.

Domnului Profesor țin să-i adresez profunda mea recunoștință pentru competența, exigența și înțelegerea cu care m-a îndrumat și sprijinit pe parcursul întregii mele activități. Alături de mulți alții, dumnealui îi datorez acest moment de înaltă împlinire profesională.

Cu respect și considerație doresc să aduc mulțumirile mele Domnului Prof. Dr. Ing. Mihai Nica și Domnului Prof. Dr. Ing. Valentin Seiculescu, pentru asistența de înaltă competență pe care au binevoit să mi-o acorde în diferitele etape ale cercetării.

Mulțumesc pentru sprijinul tehnic și atitudinea colegială oferite cu generozitate de personalul de specialitate al laboratorului de ultrasunete. Un gând de stimă și considerație pentru întregul colectiv al Catedrei Tehnologia Construcțiilor de Mașini, care m-a adoptat și mi-a creat un cadru prietenesc și competent pentru susținerea examenelor și referatelor.

În final, dar nu în ultimul rând, exprim dragostea și mulțumirile mele familiei, pentru susținerea morală și materială pe întreaga perioadă a acestui parcurs profesional pasionant și de multe ori foarte dificil, la care i-am asociat.

Capitolul 1

1. PRELUCRAREA CU ULTRASUNETE

1.1 Aplicarea ultrasunetelor în tehnologie

Utilizarea ultrasunetelor în tehnologie are în vedere două mari categorii de aplicații:

- cele denumite frecvent „**pasive**”, prin care se fac investigații și evaluări stării materialelor (obiectivelor), a caracteristicilor acestora (defectoscopie, măsurări) și care utilizează energia ultrasunetelor de mică putere dar frecvențe înalte și foarte înalte;
- cele denumite frecvent „**active**”, prin care se acționează în sensul transformării materialelor și care utilizează pentru aceasta energia ultrasunetelor de mare putere dar de frecvențe joase și foarte joase (**macrosunete**).

Principiul transformării materialelor, în aplicațiile active sau tehnologice, are la bază transferul energiei ultrasonice de la o sursă către obiectul transformării prelucrării, fie singură, fie asociată cu un altfel de energie (mecanică, termică, chimică). De aceea, aplicațiile tehnologice ale ultrasunetelor sunt în majoritatea cazurilor percepute ca „tehnologii cu ultrasunete” sau „tehnologii activate cu ultrasunete”. Transformarea materialelor este cauzată deci de efecte singulare sau cumulate, pe care ultrasunetele, singure sau asociate cu alte forme de energie, le produc asupra materialelor.

Datorită frecvenței foarte ridicate (10^8 - 10^{10} Hz.), ultrasunetele manifestă o serie de particularități specifice:

- transportă energii mult mai mari decât sunetele;
- absorbția și difuzia ultrasunetelor este mai pronunțată decât sunetele, raportate la același mediu;
- transmisia ultrasunetelor crește cu densitatea mediului;
- accelerația particulelor este mare, de aproximativ $10^5 \cdot g$;
- pot fi amplificate, focalizate și dirijate în direcția dorită;
- prezintă fenomenul de cavitație, care constă în ruperea unui lichid în anumite zone și refacerea imediată a acestuia sub acțiunea unor tensiuni ridicate ce apar ca urmare a destinderilor și comprimărilor mediului, determinate de propagarea undei. În locul în care lichidul se rupe, apar locuri (cavități), spre care se îndreaptă gazele și vaporii din lichid. Datorită comprimării, volumul cavității se micșorează, rezultând în interiorul acestora presiuni de ordinul miilor de atmosfere. Datorită acestor presiuni ridicate, cavitățile se distrug, provocând

șocuri hidraulice foarte puternice sau chiar unde de șoc. Cavitația produce o serie de efecte mecanice, optice, chimice, biologice, etc.

Energia ultrasonică concentrată local poate provoca în mediul elastic distrugerii locale prin eroziune, încălzire și reacții chimice. Ca urmare, intervin multiple aplicații în tehnică, dintre acestea, cele mai întâlnite fiind:

- prelucrarea dimensională;
- sudarea și lipirea materialelor;
- emulsionarea și omogenizarea lichidelor;
- accelerarea reacțiilor chimice;
- micșorarea frecărilor în procesele de deformare plastică și altele.

Schematic, aplicațiile active sau tehnologice ale ultrasunetelor presupun un montaj minimal (fig.1.1), care cuprinde sursa primară de energie-**generatorul de ultrasunete**, convertorul de energie ultrasonică-**transductorul** și **mediul sau obiectul transformării** către care energia ultrasunetelor este transferată, fie dispersată, fie concentrată (prin intermediul **concentratorului**), în funcție de natura aplicației. **Condiția de bază** pentru ca un asemenea ansamblu tehnologic să funcționeze eficient, este ca **ansamblul generator-transductor să funcționeze în regim de rezonanță**.

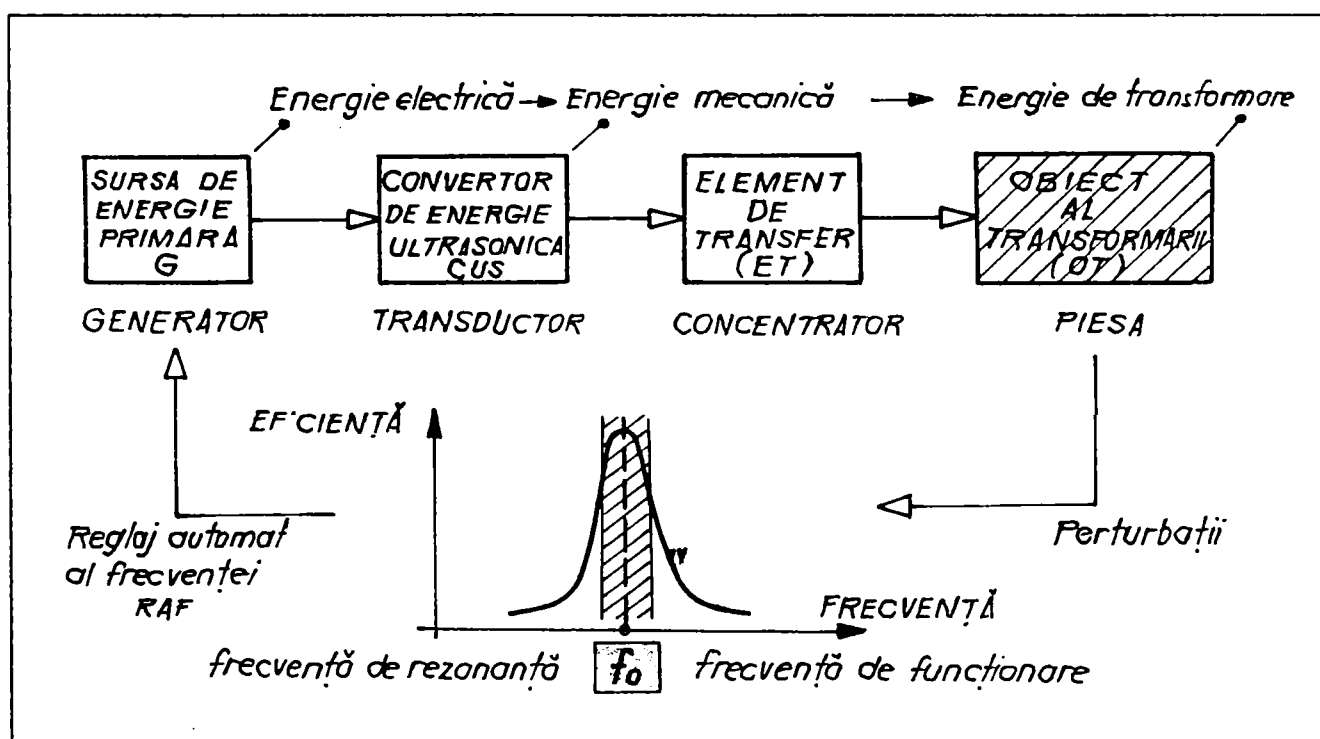


Fig.1.1 Schema de principiu a aplicațiilor tehnologice cu ultrasunete

Funcționarea în regim de rezonanță asigură transferul maxim posibil al energiei ultrasunetelor către obiectul transformării, materializându-se din plin efectele specifice ultrasunetelor, dar consecutiv acest regim determină o

dimensionare adecvată a elementelor de transfer (transductoare, concentratoare) **corespunzător unei frecvențe fixe de rezonanță**. În acest fel se elimină posibilitatea lucrului cu frecvențe variabile, tentație atât de des întâlnită mai ales în fazele de cercetare ale unei aplicații specifice.

Evident că în timpul transformării (prelucrării) obiectului, în componenta „excitată” a unui sistem oscilant (OT) se nasc perturbații cu tendința de a modifica frecvența de rezonanță „ f_0 ” (frecvența de lucru a sistemului). Aceste perturbații trebuie compensate prin adaptarea corespunzătoare a frecvenței, menținându-se sistemul în rezonanță (R A F- reglaj automat al frecvenței). Acest lucru se realizează cu dispozitive specifice incluse de obicei în construcția **generatorului de ultrasunete (G)**, care **împreună cu convertorul (C_{us})**, reprezintă **componenta „excitatoare”** a sistemului oscilant.

De la o aplicație tehnologică la alta pot să apară unele particularizări ale structurii constructiv-funcționale corespunzătoare schemei din figura 1.1, dar fără a fi în contradicție cu conceptul de bază enunțat. Astfel, în curățirea cu ultrasunete, concentratorul de ultrasunete se cuplează direct mediului de lucru, fără utilizarea propriuzisă a unui element de transfer (ET).

Aplicațiile tehnologice ale ultrasunetelor, deci cele care utilizează macrosunetele, sunt diverse și dinamica dezvoltării lor a cunoscut evoluții și realizări notabile, dar și limitări sau restrângeri. Perioada 1970-1975, este cunoscută ca cea mai fertilă perioadă în cercetarea și promovarea tehnologiilor cu ultrasunete.

Neppiras descrie sfera lor de aplicabilitate în tabelul 1.1 [NEP-1], fără să comenteze prea mult tendințele evolutive sau limitările posibile. La acea dată (1972), se imaginau încă importante resurse de dezvoltare legate în special de posibilele perfecționări a generatoarelor de ultrasunete (puteri mai mari și reglaj automat al frecvenței).

Aplicațiile mai sus amintite ale ultrasunetelor sunt în general cunoscute și au la bază efecte specifice ale macrosunetelor transferate în solide sau lichide și anume efectele mecanice, chimice, termice și cavitaționale.

Dezvoltările din anii 1970-1985 au condus la analiza mai nuanțată a diverselor aplicații, încercându-se definiții mai riguroase într-un cadru tehnologic sistemic, evaluându-se aria răspândirii, perspectivele de dezvoltare, raporturile costuri/structuri și chiar încercându-se prefigurarea unor limite [ICL-3].

Tabelul 1.1 [NEP-1]

Aplicațiile industriale ale macrosunetelor: arii majore stabilite	
Curățirea cu ultrasunete	<ul style="list-style-type: none"> - Dispersia particulelor nesolubile din învelișuri - Dizolvarea particulelor solidificate - Degresarea - Decojire
Sudarea materialelor plastice cu ultrasunete	<ul style="list-style-type: none"> - Sudarea în câmp apropiat și în câmp îndepărtat a termoplasticelor - Inserția și nituirea - Sudarea continuă a foliilor
Sudarea metalelor cu ultrasunete	<ul style="list-style-type: none"> - Microsudarea contactelor - Sudarea în puncte și continuă a metalelor
Procesarea chimică cu ultrasunete	<ul style="list-style-type: none"> - Extracția parfumurilor din flori - Emulsionarea uleiurilor - Extracția sucurilor din fructe - Extracția componentelor chimice din plante - Extracția biomacromoleculilor din celule
Deformarea plastică a metalelor cu ultrasunete	<ul style="list-style-type: none"> - Trefilarea sârmelor - Tragerea țevelor - Deformarea plastică a tablelor
Prelucrarea materialelor cu ultrasunete	<ul style="list-style-type: none"> - Prelucrarea dimensională cu suspensie abrazivă - Activarea ultrasonică a proceselor electrochimice - Activarea ultrasonică a găuririi, strunjirii, frezării, rectificării, finisării - Detartrarea

Astfel, aplicațiile sunt grupate în două mari categorii determinate în special de particularitățile constructive și funcționale ale echipamentelor ultrasonice folosite.

Situația comparativă a acestor aplicații este redată în tabelul 1.2 [ICL-3].

Grupa I de aplicații, cuprinde **tehnologiile de prelucrare, sudare, curățire și activare** a mediilor lichide. Ele au pondere majoritară în industrie în raport cu alte tehnici care folosesc ultrasunetele și sunt materializate în mașini sau instalații individualizate, constituite din generator (G), convertor (C_{us}), modul de execuție (ME) și un modul de comandă și control (MCC). Reprezintă grupa „*purtătoare de progres*”, fiind prioritar tratată de firmele specializate. În cadrul acestei analize, care are în vedere realizările pe o perioadă de 20 de ani, precum și evoluția și tendințele manifestate în industrie, ne-au condus la unele aprecieri comparative interesante. Una dintre acestea este aceea că „*atenția deosebită acordată cu ani în urmă proceselor de prelucrare prin eroziune ultrasonică nu*

s-a materializat în proliferarea lor, rămânând substanțial în urmă ca arie de aplicare și grad de interes, în raport cu curățirea și sudarea cu ultrasunete” [ICL-3].

Grupa II de aplicații, cuprinde **tehnologiile de activare cu ultrasunete a diferitelor procese** (prelucrarea metalelor, deformarea plastică, procesele metalurgice, procesele fizico-chimice), cu aplicare individualizată în general, dar cu posibilități de dezvoltare în perspectivă. Ele sunt materializate prin **dispozitive ultrasonice** cuplate funcțional unor instalații tehnologice clasice. Sunt alcătuite din generator (G) și convertor (C_{us}), care activează ultrasonic procesele din instalația tehnologică, având ajutorul unei simple structuri mecanice de adaptare (SMA). În general sunt realizate ca unități în serie mică sau individuale și nu constituie o pondere importantă în programele de fabricație ale firmelor de specialitate.

Dezvoltarea acestei grupe de aplicații depinde în mare măsură de progresele obținute în construcția generatoarelor și convertoarelor ultrasonice din prima grupă de aplicații. Cu toate aceste limite, posibilitățile oferite de activarea ultrasonică a diferitelor procese este departe de a fi epuizate. Dacă previziunile optimiste din anii 1970-1975 în privința prelucrării dimensionale cu ultrasunete și activării proceselor de deformare plastică au fost mai târziu infirmate mai ales de considerentele de rentabilitate economică, activarea unor procese fizico-chimice rămâne de actualitate, mai ales în raport cu progresele obținute în dezvoltarea unor elemente specifice (componente electronice, materiale pentru transductoare și concentratoare) și a unor evoluții în cunoașterea fenomenelor de propagare și concentrare a energiei ultrasonice în structuri mecanice complexe, similare celor ale instalațiilor tehnologice vizate pentru activare.

SITUAȚIA COMPARATIVĂ A APLICAȚIILOR TEHNOLOGICE CU ULTRASUNETE

Tabel 1.2 [ICL-3]

Grupa de aplicații	Denumirea aplicației	Aria de cuprindere aplicării (1)	Perspectiva dezvoltării (2)	Cost echipament (3)	Complexitatea construcției și funcțională (3)	Limite previzibile
I. Aplicații definind <u>Mașini</u> sau echipamente tehnologice cu ultrasunete individualizate 	Prelucrare dimensională	1	↗	***	***	$P_{max}=500w$; $R_{min}=0,5$; $R_{max}=50$ ($P/S>5w/mm^2$)
	Sudare mase plastice	10	↗	**	**	$P_{max}=3000w$; ($P/S>10w/mm^2$) RAF
	Sudare metale	5	↗	**	*	$P_{min}=500w$; ($P/S>25w/mm^2$)RAF; RAP
	Curățire	10	↗	*	*	($P/S>1w/mm^2$);
II. Aplicații definind <u>Dispozitive</u> ultrasonice Integrate în instalații tehnologice cu ultrasunete 	Procese mecanice de prelucrare (găurire, rectificare, strunjire, EE/ECM)	1; 0,1; 0,1; 0,5	=; ↗	*	**	RAF, RAP, amortizări, η dezacord impedanțe $P_{min} > 800w$
	Procese metalurgice (turnare, sudare, tratamente termice)	0,5; 0,1; 0,2	=; ↗	*	*	RAF, RAP, amortizări, temp., dezacord impedanțe $P_{min} > 800w$
	Deformare plastică (ambuisare, tragere, treflare)	0,1; 0,5; 1	=; ↗	*	**	RAF, RAP, amortizări, dezacord impedanțe; $P_{min} > 1500w$
	Procese fizico- mecanice	?	↗	*	**	dezacord impedanțe ?

(1) 10; nota maximă de referință (aplicativitate);

(2) ↗ tendință de dezvoltare; = stagnare;

↘ tendință de regres

(3) cost/complexitate constructiv-funcțională;

*** mare; ** mediu; * redus

G - generator de ultrasunete;

Cus - convertor ultrasonic

ME - modul de execuție

MCC - modul de comandă și control

SMa - structură mecanică de adaptor

P - putere

S - suprafață

RAF - reglaj automat al frecvenței

RAP - reglaj automat al puterii

1.2 Prelucrarea dimensională cu ultrasunete.

Elemente de bază ale procesului prelucrării

Prelucrarea cu ultrasunete este un procedeu de configurare la dimensiune și formă a materialelor dure și fragile folosindu-se concentrarea energiei ultrasunetelor la locul prelucrării. Pentru ca să aibă loc detașarea materialului printr-un mecanism de eroziune, este indispensabil ca la locul prelucrării să existe un agent eroziv sub forma unor particule abrazive și un lichid pentru asigurarea cuplajului acustic și a suspensiei abrazivului, între piesă și sculă.

În esență sunt necesare trei condiții:

- energie ultrasonică concentrată;
- agent eroziv (granule de abraziv);
- lichid (suspensie și cuplaj acustic).

În tabelul 1.3 este redată clasificarea materialelor din punct de vedere al prelucrabilității cu ultrasunete:

Tabel 1.3

Prelucrabilitatea materialului	Denumirea materialului	Caracterul ruperii materialului	Domeniul de aplicare a prelucrării
Ușor prelucrabile	Sticlă, cuarț, ferită, ceramică, materiale semiconductoare (Ge, Si), carburi metalice, pietre semiprețioase	Casantă	Prelucrarea pieselor din materiale semiconductoare Prelucrarea ceramicelor speciale Prelucrarea pieselor din sticlă pentru aparate optice și bijuterii Prelucrarea feritelor Prelucrarea safirelor Etc...
Mediu prelucrabile	Aliaje dure, oțeluri dure, diamante	Casantă după întărire (ecrușare) prin deformări plastice mari	Prelucrarea de finisare a pieselor cu profil complex din aliaje dure ale ștanțelor decupat și perforat Finisarea și recondiționarea filierelor din oțel călit Ascuțirea sculelor din aliaje dure Finisarea filierelor de diamant
Greu prelucrabile	Pb, oțel moale, Al, etc...	Plastică (ruperea nu are loc)	Folosirea metodei de prelucrare prin eroziune ultrasonică nu este rațională

Prelucrarea dimensională cu ultrasunete a materialelor dure și fragile, se bazează pe transmiterea energiei cinetice a sculei ce vibrează cu frecvență ultrasonică, unor particule de abraziv aflate în suspensie lichidă, la locul prelucrării.

Aceste particule acționează prin șoc asupra materialului de prelucrat, prelevând așchii. Acest proces este accentuat datorită fenomenelor de cavitație ultrasonică produse în mediul lichid purtător.

Asupra mecanismului intim al prelevării așchiilor la prelucrarea prin ultrasunete s-au făcut numeroase cercetări, existând diverse explicații, însă nici la ora actuală nu s-a ajuns încă la o definiție unitară și completă a tuturor fenomenelor care însoțesc prelucrarea. Majoritatea covârșitoare a lucrărilor acceptă principiul de prelucrare mai sus amintit, în care energia ultrasunetelor provoacă pe de o parte accelerația particulelor abrazive din suspensia lichidă, iar pe de altă parte un fenomen de cavitație ultrasonică a lichidului suspensiei [ICL-3], [KAZ-1], [SAV-2], [NIC-1]. Particulele de abraziv puternic accelerate sunt cele care prin lovirea suprafeței piesei de prelucrat produc un proces de eroziune cu prelevare de material. Acest mecanism este determinant, [ICL-3], [KAZ-1], [SAV-2], [NIC-1] și dependent de prezența aleatoare a granulelor abrazive în spațiul de lucru. Este nevoie să subliniem faptul că odată cu procesul de eroziune abrazivă, care produce prelucrarea materialului piesei, se produce și o fărâmițare însoțită de uzura rapidă a granulelor abrazive, prin urmare diminuarea capacității erozive a acestora. Ca atare, pentru a continua procesul de prelucrare, este necesară o permanentă reîmprospătare a spațiului de lucru cu abraziv. Acest lucru se realizează de obicei prin recircularea suspensiei abrazive cu ajutorul unor sisteme specifice de alimentare, sau ca urmare a unor mișcări de retragere periodică ale sculei, pentru a facilita reîmprospătarea în spațiul de lucru a suspensiei abrazive. Iată de ce termenul anterior folosit „prezență aleatoare a granulelor abrazive în spațiul de lucru” nu este hazardat.

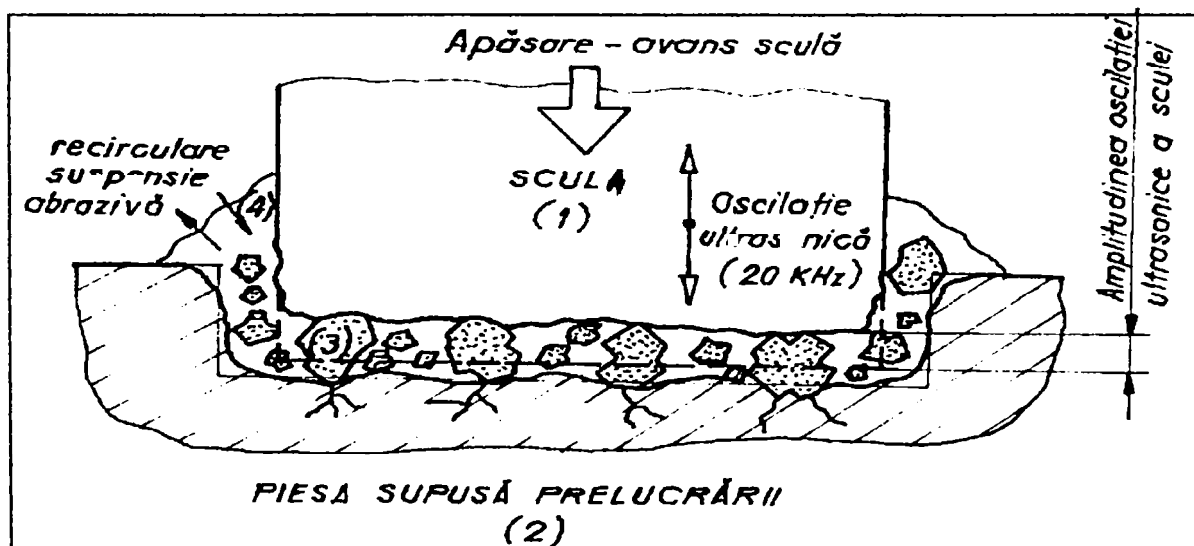


Fig. 1.2 Model figurativ simplificat al spațiului de lucru sculă-piesă, la prelucrarea cu ultrasunete

Așa după cum se observă din fig.1.2, eroziunea abrazivă se bazează pe transmiterea energiei cinematice a sculei (1) care vibrează cu frecvență ultrasonică, unor particule abrazive (3) aflate în suspensie în lichidul (4), amplasate între sculă și obiectul prelucrării (2) în spațiul de lucru.

Granulele abrazive, în număr mare ($300.000-100.000\text{buc./cm}^3$) sunt acționate de sculă prin șocuri repetate ceea ce determină deplasarea lor cu viteze ridicate în spațiul de lucru dinspre sculă înspre obiectul de lucru, provocând desprinderea de particule din obiectul prelucrării. Granulele abrazive cel mai des utilizate sunt carbura de siliciu (SiC) și carbura de bor (B_4C) în suspensie, iar la finisarea filierelor de diamant chiar pulberea de diamant, aceasta datorită faptului că **duritatea materialului abraziv trebuie să fie mai mare sau cel puțin egală cu duritatea materialului prelucrat.**

Lichidul purtător cel mai eficient este apa, întrucât are bune caracteristici de udare, densitate corespunzătoare pentru a menține în suspensie granulele, vâscozitatea mică, nu este toxic și este ieftin. Concentrația în greutate a suspensiei abrazive este de circa 50%, pentru a asigura numărul suficient de granule și pentru a nu împiedica circulația acestora.

Valorile cele mai frecvente ale parametrilor de prelucrat sunt:

- frecvența oscilației ultrasonice a sculei: 18-30 KHz.;
- amplitudinea oscilațiilor ultrasonice ale sculei: 10-100 μm .;
- presiunea dintre sculă și piesă: 0,5- 4 daN/cm².

Unul din dezavantajele procesului este acela că în cursul prelucrării **granulele abrazive se uzează**, ceea ce determină scăderea efectului lor de concentrare și varierea locală a tensiunilor mecanice în obiectul de lucru. Uzura muchiilor granulelor abrazive și fărâmițarea lor conduce la scăderea productivității prelucrării.

Al doilea dezavantaj este acela că **eroziunea abrazivă acționează și asupra sculei** ceea ce determină denaturarea formei sale inițiale în partea activă și în speță în zona muchiilor.

Figura 1.3 [ICL-3] prezintă microfotografiile abrazivului înainte de prelucrare și apoi în stare degradată după prelucrare împreună cu particule prelevate din materialul supus prelucrării:

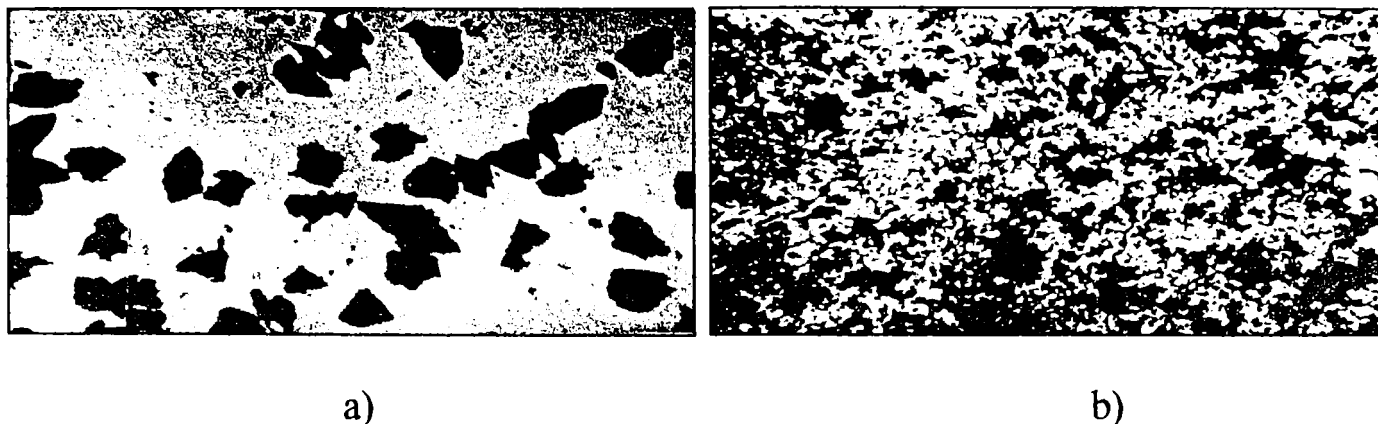


Fig. 1.3 Microfotografia abrazivului [ICL-3]

a) înainte de prelucrare;

b) după prelucrare.

Prelucrarea are la bază fenomenul de eroziune abrazivă asociat cu cel de cavitație ultrasonică. Fenomenul cavitației ultrasonice apare ca urmare a variației rapide a presiunii locale în lichid, care modifică distanța medie dintre moleculele lichidului, provocând ruperi microscopice în masa lichidului la ridicarea sculei, formând goluri sau bule cavitaționale. În faza de compresiune, la apropierea capului de lucru (sculei) de obiectul prelucrării, se produce implozia bulelor, rezultând unde de șoc locale, de presiuni ridicate, cât și fenomene termice, electrochimice, etc. Undele de șoc contribuie la accelerarea granulelor abrazive în spațiul de lucru, provocând o importantă turbulență a suspensiei abrazive, favorabilă prelucrării. **Cavitația în sine, ca fenomen asociat, favorizează prelucrarea, dar nu o determină.** Aplicația cea mai importantă a ultrasunetelor, curățirea, se bazează în principal pe fenomenul cavitației ultrasonice și produce înlăturarea eficace a peliculelor de impurități solubile, dar nu degradează materialul piesei și nici măcar nu detașează straturile solide compacte pe suprafața piesei (de exemplu calamina).

Deși au existat teorii contradictorii privind rolul cavitației în prelucrarea cu ultrasunete, cea mai cunoscută fiind disputa Ficher - Rostovțev, nu există nici o cercetare care să fundamenteze în plan teoretic și experimental cavitația ca factor participativ în procesul de eroziune. Definierea prelucrării cu ultrasunete ca „*prelucrare abraziv cavitațională în câmp ultrasonic*” fără a avea suportul unor modele adecvate confirmate teoretic și experimental [FIC-1], [ROS-1], este mai degrabă rezultatul unor ipoteze și ca atare „*prelucrarea cu ultrasunete*” a rămas denumirea majoritar receptată de cei care lucrează în domeniu.

Mecanismul procesului eroziv a fost formalizat și descris cu suficientă acuratețe în mai multe lucrări [KAZ-1], [ROS-1], [NEP-1,2,3] mai ales în perioada de debut a studierii procedurii.

S-a sperat ca prin cunoașterea lui cât mai amănunțită și exactă să se poată controla și dezvolta acest procedeu de prelucrare, dar când a devenit clar că limitele acestuia, legate mai ales de prezența aleatorie a granulelor în suspensie, nu pot fi depășite, creșterile de performanță au fost căutate în sporirea nivelului energiei ultrasonice concentrate. Și aceste căutări au pus în evidență limitele procesului, mai ales legate de materialele folosite, corelate cu aria relativ redusă a aplicării și cu necesitatea unui raport firesc între cheltuiile de cercetare și beneficiile obținute din exploatare. Aceste studii asupra procesului au fost practic abandonate după anii 1970. Singurul lucru care a contat a fost acela de a asocia ficărei aplicații o tehnologie adecvată a cărei punere în practică să necesite cheltuieli minime. *În prim plan a trecut realizarea unor echipamente specializate*, iar ideea prelucrării cu ultrasunete ca procedeu aplicabil unor piese din materiale diferite a fost abandonată. În esență se constată că nu merită să fie investigate atât de mult și profund fenomene încă neclare ale unui proces, atâta timp cât câștigurile în planul aplicării practice sunt nerelevante.

Ca atare, *prelucrarea cu ultrasunete* poate fi privită astăzi într-un mod foarte pragmatic ca și o *tehnologie foarte specializată*, rațional a fi utilizată în *cazuri speciale de prelucrare a unor materiale dure și fragile* atunci când prelucrarea acestora cu alte procedee fie că este nerealizabilă, fie că nu asigură caracteristicile de performanță dorite.

”

1.3 Metode de prelucrare cu ultrasunete

Se cunosc două metode de prelucrare cu ultrasunete:

- prelucrarea cu suspensie abrazivă;
- prelucrarea fără suspensie abrazivă;

Cele două metode de prelucrare ultrasonică sunt redată schematic în figura 1.4 a și 1.4 b.

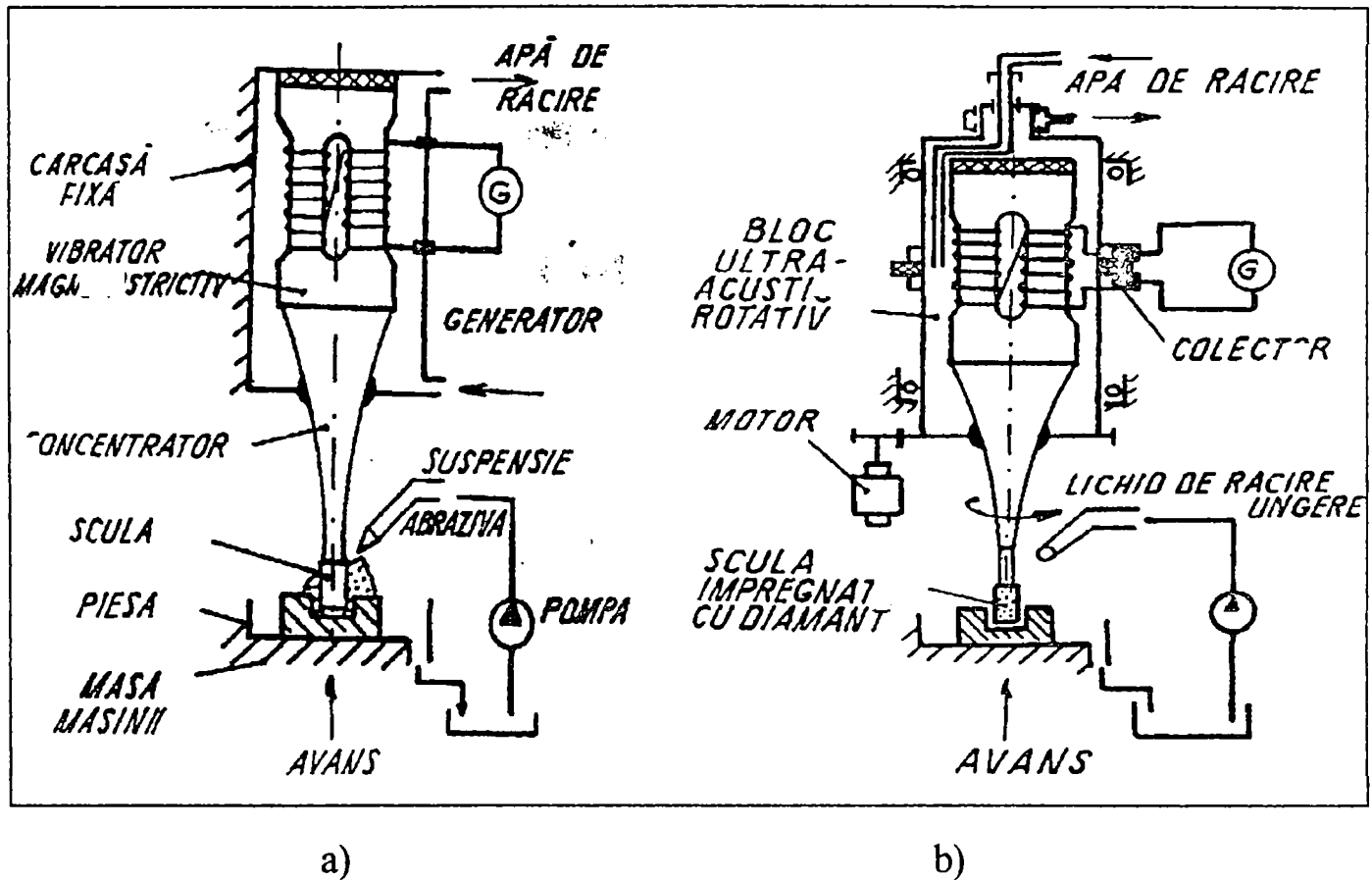


Figura 1.4 Metode de prelucrare cu ultrasunete [ICL-3]

- a) cu suspensie abrazivă;
b) fără suspensie abrazivă.

Asupra piesei supuse prelucrării, acționează un corp solid, vibrat cu frecvența de 20-30 kHz., prin intermediul unui concentrator atașat unui transductor care este conectat cu un generator de ultrasunete.

Pentru a se produce prelucrarea, care are loc prin prelevare de material și prin copierea formei sculei, este necesar ca acestea din urmă să fie apăstate pe piesa de prelucrat cu o presiune relativ joasă de 0,5- 4 daN/cm², prin intermediul unui sistem de avans. La locul prelucrării este necesară prezența unei suspensii abrazive, de regulă carbură de siliciu sau de bor. Abrazivul joacă rolul de agent eroziv, iar suspensia joacă în același timp rolul de cuplaj acustic între sculă și piesă, precum și rolul de agent de răcire al prelucrării. Concentrația în greutate a

625.352/181 D

suspensiei abrazive este de 50% în cele mai multe cazuri, iar la alimentarea prin corpul sculei, sub presiune, este necesar ca această concentrație să fie de numai 20%, pentru a putea asigura fluenta necesară alimentării și evitării blocării prin depunere în spațiile de acces. Conform acestei metode s-au realizat până în prezent majoritatea mașinilor de prelucrat cu ultrasunete Fig. 1.4.a [ICL-3].

Pe aceste tipuri de mașini este posibilă realizarea unei game largi a formei orificiilor prelucrate, precum și prelucrarea unor suprafețe exterioare prin carotări, debitări și gravări. În esență, acest model de prelucrare cu ultrasunete, corespunde realizării suprafețelor prin „copierea formei sculei”.

Adâncimea prelucrării este limitată numai de lungimea sculei, deși la valori mari ale acesteia, procesul prelucrării se desfășoară foarte greu și cu viteze de înaintare foarte mici, din motive pe care pe parcursul tezei le vom identifica și detalia.

Metoda prezentată presupune câteva variante în privința modului de aducere a suspensiei abrazive la locul prelucrării și anume prin simplă stropire, prin absorbție prin sculă, respectiv prin refularea prin sculă așa cum reiese din fig. 1.5.

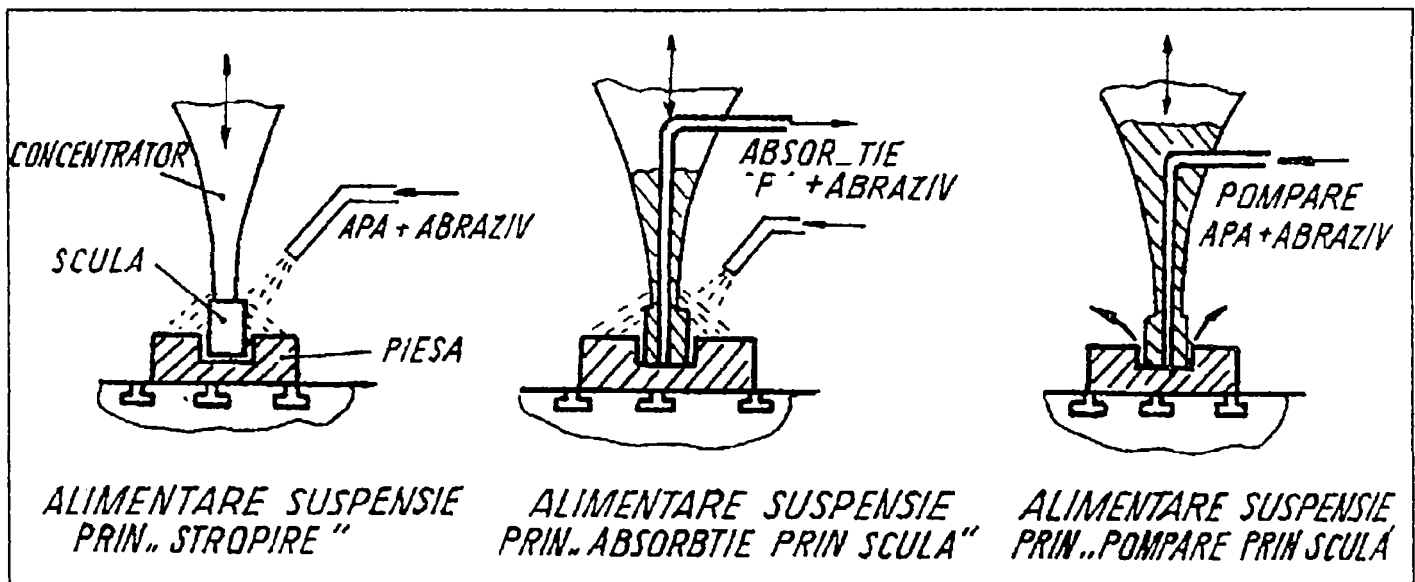


Figura 1.5. Moduri de alimentare cu suspensie abrazivă la prelucrarea prin „copierea formei sculei”

Ultimele două moduri de alimentare asigură avantajul unei productivități sporite a prelucrării.

În paralel s-a impus și metoda prelucrării prin ultrasunete fără suspensie abrazivă (Fig 1.4. b), care presupune ca în locul alimentării prelucrării cu agent eroziv, să se folosească acțiunea erozivă a sculei care vibrează cu frecvență ultrasonică. Pentru ca aceasta să fie posibilă, scula trebuie să fie impregnată cu granule fine de diamant, iar între sculă și piesă este necesară o mișcare

suplimentară de rotație. Condițiile prelucrării sunt și ele schimbate, în sensul că amplitudinea oscilațiilor necesare sculei pentru a realiza prelucrarea este redusă la maxim de $15\mu\text{m}$. (față de $50-100\mu\text{m}$.), pentru a nu periclita integritatea sculei. De asemenea, presiunea necesară prelucrării este mult mai mare, aceasta situându-se în jurul valorii de 30 daN/cm^2 .

Frecvențele utilizate se încadrează între aceleași valori de $20-30\text{ kHz}$., însă turația medie a mișcării relative de rotație între sculă și piesă este de 2000 rot./min .. De aceea este obligatorie asigurarea în zona de lucru a unui lichid necesar cuplajului acustic între sculă și piesă și necesar răcirii.

Până în prezent, nu există studii comparative privind performanțele celor două metode, care să fundamenteze recomandarea uneia sau alteia dintre ele. Metoda cu sculă diamantată necesitând însă cheltuieli mult mai mari și mașini mult mai complexe, se folosește pentru materiale extrem de dure și în condiții tehnologice deosebit de grele, în care prelucrarea ultrasonică cu suspensie abrazivă prezintă limitări în ceea ce privește capacitatea productivă a prelevării de material, $Q_v(\text{mm}^3/\text{min})$.

Acest model de prelucrare corespunde realizării suprafețelor „*prin generare*”. Pentru calculul capacității productive a prelucrării se poate admite relația (1.1), determinată experimental:

$$Q_v = f(f_0^m, A^n, p, k) \quad (1.1)$$

unde:

- f_0 - frecvența vibrațiilor ultrasonice a sculei (kHz.);
- A - amplitudinea vibrației sculei (μm .);
- p - presiunea de contact dintre piesă și sculă (daN/cm^2 .);
- k - modul de alimentare cu suspensie abrazivă;

Pentru exponenții „ m ” și „ n ”, determinările experimentale au stabilit diferite valori, de $0,75$, 1 și 2 , în funcție de condițiile concrete ale experimentului și autorii consultați.

Pe lângă mărimile prezente în expresie, capacitatea productivă depinde și de caracteristicile suspensiei abrazive.

Trecând sumar în revistă acești *factori de influență*, vom constata că:

f_0 - *frecvența de lucru* este stabilită pentru majoritatea mașinilor ultrasonice la valori de $20-30\text{ kHz}$. și se păstrează fixă, datorită necesității funcționării sistemului oscilant în regim de rezonanță. *Creșterea frecvenței influențează neesențial capacitatea de producție*, iar frecvențele sub pragul de 20 kHz ., nu pot fi admise din cauza efectelor auditive nocive.

A - *amplitudinea de oscilație a sculei este principalul factor de influență a productivității prelucrării*.

Valoarea sa este însă limitată de posibilitățile limitate ale generatorului și de rezistența mecanică a convertorului ultrasonic la vibrații. De aceea, experimental s-a stabilit că valorile optime ale amplitudinii

vibrațiilor în raport cu dimensiunea medie a granulelor de abraziv (d_a), sunt $2A/d_a=0,6-0,8$.

p - *presiunea de contact are o foarte mare importanță* în procesul de prelucrare. O presiune prea mică nu asigură o bună transmitere a energiei ultrasonice granulelor de abraziv, iar o presiune prea mare poate duce la amortizări ale sistemului oscilant. Se recomandă ca, pe cât posibil, presiunea de contact piesă-sculă să se mențină constantă, pentru ca desfășurarea procesului să se facă aproximativ în aceleași condiții și să nu apară vibrații parazite ce pot duce la amortizări nedorite.

k - este un parametru tehnologic care are o semnificație mai largă în sensul că *ține cont de modul de alimentare cu suspensie, dimensiunile și caracteristicile granulelor abrazive, precum și caracteristicile suspensiei*. Experimentele au pus în evidență faptul că alimentarea prin absorbție duce la o creștere substanțială a productivității, față de alimentarea prin stropire.

Pentru alimentarea prin stropire, concentrația în greutate se recomandă să fie de 50%, iar pentru sistemele de refulare scade la 20%, concomitent cu creșterea presiunii de contact.

În ceea ce privește precizia de prelucrare în cazul prelucrării cu suspensie abrazivă, aceasta este determinată de mărimea granulelor abrazive care intră în suspensie, în principal și numai în mică măsură de amplitudinea de oscilație a sculei.

În tabelul 1.3 [ICL-3] se prezintă informativ câteva date privind precizia prelucrării ultrasonice cu suspensie abrazivă folosind granule de mărime diferită. Datele se referă la calitatea suprafeței obținute, dar trebuie să amintim că sunt inerente și abateri de formă.

Tabelul 1.3

Nr. Granule STAS	Dimensiunea Granulelor [μm]	Precizia orificiului la introducere	Ra [μm]			
			Sticlă		Aliaje dure	
			Lateral	Frontal	Lateral	Frontal
10	105 – 125	± 40	12,5	3,20	3,2 – 6,3	0,8 – 1,6
5	63 – 75	± 20	3,20	1,6	3,2	0,4 – 0,8
M ₄₀	28 – 42	± 10	1,6	0,8	1,6	0,2

Metoda prelucrării fără suspensie abrazivă (Fig. 1.4.b), cu scule impregnate cu granule de diamant, prezintă unele particularități:

- Productivitatea prelucrării este apropiată de cazul anterior și este la rândul ei determinată de frecvență, dar amplitudinile necesare pentru aceeași productivitate sunt mai mici, de ordinul a 10-15 μm .

- Presiunea de contact optimă este în jurul valorii de 30 daN/cm².

- Dimensiunile granulelor din care este compusă pulberea de impregnare, influențează și ele prelucrabilitatea.

În ceea ce privește precizia de prelucrare, ea este determinată de granulația pulberii de impregnare și în general este superioară celei obținute cu primul procedeu pentru același indice al productivității. Se afirmă că pe lângă parametri amintiți, viteza de rotație a sculei determină creșterea productivității, iar avansul influențează precizia și calitatea suprafeței. Se dau valori orientative ale rugozității ca fiind de $0,8 \mu\text{m}$ la avansuri mici.

Comparând cele două procedee de prelucrare ultrasonică, se pot formula următoarele concluzii:

- sunt comparabile din punct de vedere al productivității prelucrării după datele oferite de literatura de specialitate [ICL-3], [KAZ-1], [ROS-1], [NEP-1,2,3];

- posibilitățile de prelucrare pe mașinile cu suspensie abrazivă sunt mult mai largi, orice formă fiind realizabilă datorită prelucrării prin copierea formei sculei, pe când la mașinile de prelucrat fără suspensie abrazivă se pot obține numai piese care reprezintă orificii sau combinații ale acestora (prelucrare prin generarea formei);

- scula este accesibilă, ieftină și ușor de înlocuit, în schimb foarte scumpă și pretențioasă la sistemul fără suspensie abrazivă;

- la sistemul cu suspensie abrazivă există unele dificultăți datorită alimentării, pentru care este nevoie de pompe speciale și existenței pericolului de depuneri, murdăriri, etc., pe când în celălalt caz, acestea nu apar. În acest caz apar însă complicații constructive datorită necesității rotirii sculei împreună cu convertorul ultrasonic la turații foarte mari, de 1000-2000 rot./min;

- amplitudinile necesare prelucrării cu suspensie abrazivă sunt mai mari, deci mai greu de obținut, însă la cealaltă prelucrare apare pericolul de „spargere” a sculei la amplitudini mai mari decât cele prescrise, sau la regimuri mai dure de prelucrare;

- condițiile cinematice ale prelucrării sunt mai avantajoase la mașinile fără suspensie abrazivă, datorită presiunii de contact mai mari, de ordinul a 30 daN/cm^2 .

Din cele prezentate, rezultă avantaje și dezavantaje în cazul ambelor procedee de prelucrare ultrasonică, ceea ce face ca alegerea unuia sau altuia să se poată face numai în funcție de condițiile tehnologice concrete impuse pentru prelucrare.

1.4. Evoluții, realizări și limite ale procesului

1.4.1. Evoluții, realizări

Prelucrarea cu ultrasunete a fost obiectul unor studii sistematice începând din anii 1950. La început efortul principal a fost desfășurat spre studierea procesului de eroziune abrazivă în câmp ultrasonic [KAZ-1], [ROS-1], [NEP-1], formându-se modele mai mult sau mai puțin sofisticate, mai mult sau mai puțin acceptate. Suportul material al acestor cercetări l-au reprezentat mașinile de frezat sau de găurit, la care s-au adaptat mecanisme de avans (mecanice, hidraulice, electromecanice) și generatoare echipate cu convertoare ultrasonice de tip magnetostrictiv [ICL-3]. Destul de mult timp, până în anii 1970-1975, a persistat ideea realizării unor mașini polyvalente de prelucrare cu ultrasunete a materialelor dure și fragile. Pragmatismul industrial însă, a infirmat această tendință și din ce în ce mai mult mașinile de prelucrat cu ultrasunete construite și așa în număr foarte redus (USA, URSS, Cehoslovacia, Germania și Franța) care erau universale, au lăsat loc mașinilor specializate. Simpla lectură a datelor oferite de tabelul 1.4, care cuprinde capacitatea productivă a mașinii Diatron (Lehfeldt-Germania), sugerează performanțe extreme pentru materiale diferite, dar toate situate în grupa materialelor „dure și fragile”, prelucrabile cu ultrasunete și greu sau imposibil de prelucrat cu alte procedee.

Tabelul 1.4 [Lehfeldt & Co.]

Material	Capacitate productivă Volumetrică Q_v [mm ³ /min.]		Uzura relativă a sculei raportată la cantitatea de material prelucrat [%]
Sticlă	1200	250	1
Germaniu	800	180	3
Ferită	800	150	3
Grafit	500	100	1
Ceramică	250	50	6
Rubin, safir	30	8	10
Carburi metalice	30-40	5-7	50-80
C 120	8	1	120
Rp	4	1	200
Condiții de încercare: $F_0 = 22$ KHz.; Putere generator=400w; Scula $\varnothing 10/1$; Abraziv-carbură de bor nr.4; h prelucrare= 0-5 mm. fără aspirație 0-20 mm. cu aspirație			

Constatăm că în anii 1980-1990, deși apar realizări remarcabile în construcția generatoarelor ultrasonice de putere (1000-3000w) și a concentratoarelor piezoceramice de tip PZT (cu puteri de la 500 la 1500 w și randamente electroacustice mai mari de 90%), evoluția realizării mașinilor de prelucrat cu ultrasunete pare mai degrabă blocată și situată la echilibrul precar dintre o cerere de piață relativ modestă (în aeronautică și electrotehnică) și posibilitatea de creștere a performanțelor în exploatare. Deși apar grupuri noi de interes în cercetare și aplicare, nimeni nu mai studiază procesul eroziunii. Capacitatea productivă ridicată, este acum lesne de obținut prin mărirea energiei ultrasonice (puterii) utilizate.

Apar în schimb cerințe tot mai ridicate privind precizia și calitatea prelucrării, odată cu tendința simplificării soluțiilor constructive ale mașinilor.

În raport cu alte aplicații, prelucrarea cu ultrasunete, deși bine cunoscută de specialiști, apare tot mai des ca o aplicație „exotică” pentru lumea industrială. Singura problemă reală rămasă nerezolvată era de fapt corecta adecvare a resurselor tehnologice oferite de acest procedeu cu anumite obiective specifice. În acest context reapare nevoia de revitalizare a cunoașterii procedurii, optimizarea tehnologiei pe cazuri concrete de aplicație (mai degrabă „piese” decât „materiale”) și mai ales a opțiunii privind creșterea performanțelor, prin acestea înțelegând calitatea și precizia prelucrării cu echipamente cât mai ieftine.

În Tabelul 1.5, se redau prin sinteza raportărilor din literatura de specialitate și a firmelor, evoluția caracteristicilor mașinilor de prelucrat cu ultrasunete.

Tabelul 1.5

Anul	Tipuri de mașini realizate	Obiective principale cercetate	Tendențe – caracteristici	Autori și producători reprezentativi
1950 1960	Prototipuri Primele modele industriale	Procesul eroziunii ” Cautarea frenetică a productivității	Structuri constructive adaptate (mașini de găurit și frezat) Generatoare mari dau puteri și randamente reduse	Neppiras '56, '57 Miller '57 Kasaņev '62 Markov '62 Kasaņev '63 Kaytheon USA Lehfeldt Germania Kerry Anglia ENIMS –URSS
1960 1970	Mașini de serie cu suspensie abrazivă	Optimizarea procesului tehnologic Randamente electroacustice	Realizarea unor modele universale Introducerea convertoarelor	Kerry Anglia KLN Germania Ultron Annemasse Franța

Anul	Tipuri de mașini realizate	Obiective principale cercetate	Tendențe – caracteristici	Autori și producători reprezentativi
		superioare	piezoceramice (PTZ)	Legge '66 Iakimovici '77
1970 1980	Dezvoltarea mașinilor cu scule diamantate	Studiul capatelor ultrasonice rotative PTZ Automatizarea ciclului de lucru	Dominatia modelelor cu scule diamantate Generatoare ultrasonice tot mai performante	Branson USA UKAEA Anglia Mecasonic Franța VUMA Cehoslovacia ENIMS URSS Iclănzan '75, '78 MPU-01, MPU-02, MPU-03 România
1980 1990	Modele industriale de ambele tipuri pe o piață tot mai saturată	Fiabilitatea sistemelor electroacustice și mecanice (concentratoare, scule)	Coexistă cele două tipuri de mașini, dar oferta de firmă este în regresie Realizarea unor modele în țările mai puțin dezvoltate RAF-reglajul automat al frecvenței de rezonanță	MFU-03 România IP Timișoara SerieMPU, ICTCM București Electrotimiș România Institutul de Construcții Bulgaria
1990 1995	Mașinile specializate	Reconsiderarea unor criterii de proiectare modularizarea, eficiența economică Adaptarea comenzilor numerice Asocierea inspecției optice pentru mărirea preciziei de prelucrare	Apar mașinile specializate din ultima generație, asociate cu comenzi numerice Polarizarea pe un număr redus de constructori Mașinile specializate domină în raport cu cele polivalente	Exeron Branson Exeron MPU-05 România

Prelucrarea cu ultrasunete își găsește în tehnica modernă un câmp de aplicabilitate punctual dar diversificat, impunându-se însă în mod deosebit în prelucrarea materialelor dure și fragile, acolo unde tehnicile tradiționale de prelucrare nu dau rezultate satisfăcătoare sau sunt imposibil de aplicat.

Prin procedeul prelucrării ultrasonice se pot realiza o gamă variată de configurații de cavități înfundate și străpunse.

Materialul care se prelucrează cel mai bine este sticla. Productivitatea prelucrării sticlei, pe unele mașini, a ajuns chiar la valori de 9000 mm³/min., (Model 4773 A-Rusia).

O perspectivă promițătoare o reprezintă prelucrarea sticlei optice în industria optică, dovedindu-se avantajoasă prelucrarea și fasonarea lentilelor și prismelor.

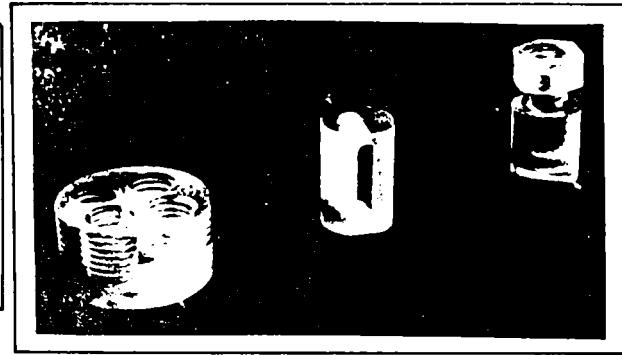
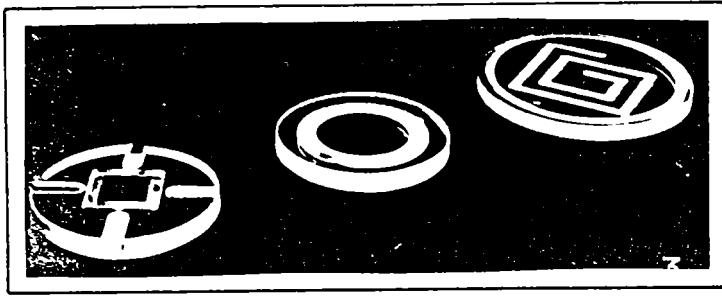


Fig.1.6. Prelucrări în plăcuțe de sticlă
[Kerry Ultrasonic Ltd.]

Fig.1.7. Prelucrarea șuruburilor, piulițelor
și canelurilor în sticlă
[Kerry Ultrasonic Ltd.]

Astfel, pentru exemplificare, în Fig. 1.6 și 1.7 sunt prezentate câteva exemple de prelucrare a sticlei, efectuate pe mașini realizate în Anglia de firma Kerry Ultrasonics Ltd., în Fig. 1.8 pe mașini Diatron din Germania, iar în Fig. 1.9 prelucrări de precizie realizate pe o mașină experimentală.

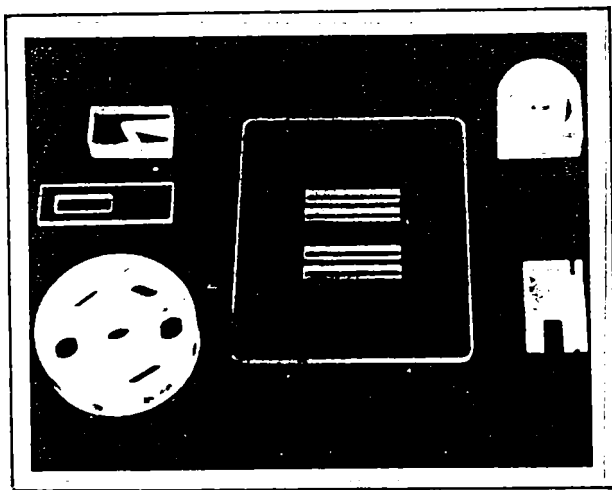


Fig. 1.8. Prelucrarea sticlei pe mașini
Diatron [Lehfeldt & Co]

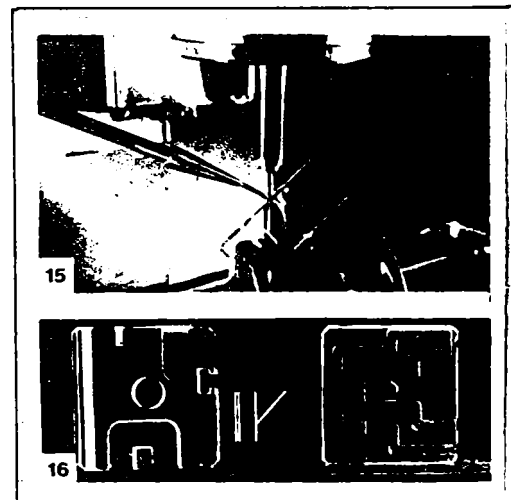


Fig.1.9. Prelucrări de precizie în sticlă
[UKAEA Anglia]

Forme diferite de prelucrare la o precizie de $\pm 0,025$ mm., la dimensiunea minimă a orificiului de 0,76 mm., realizate pe mașina prototip UKAEA Harwell-Anglia, sunt prezentate în Fig. 1.10, iar în Fig. 1.11 este prezentat un tip interesant de concentrator cu sculă multiplă, care poate debita pe mașina Diatron aproximativ 100 de pastile de sticlă pe minut.

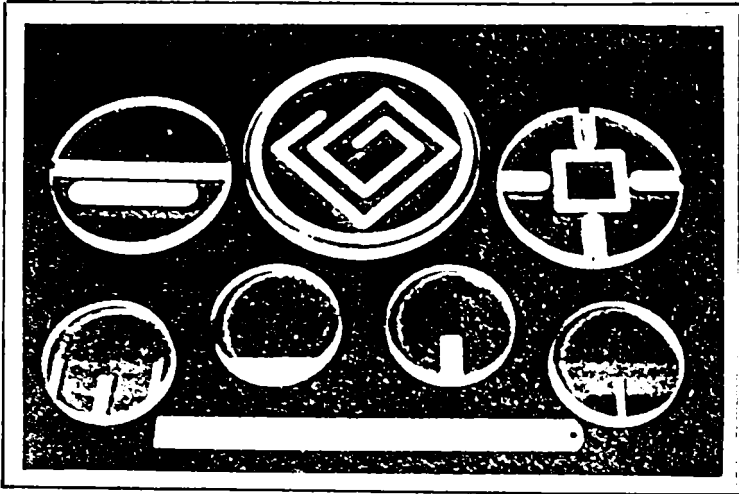


Fig. 1.10. Prelucrarea sticlei prin găurire și canelare la dimensiunea minimă a găurii de 0.76 mm [UKAEA Anglia]

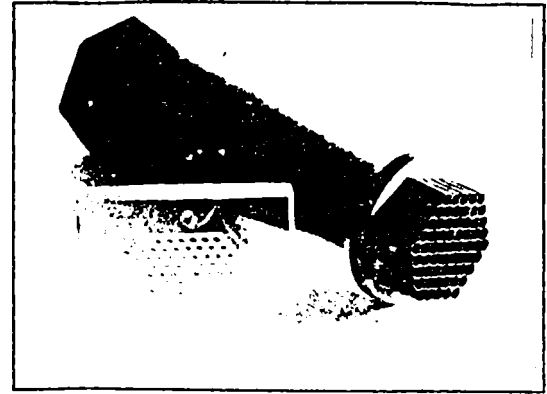


Fig. 1.11. Concentrator cu sculă multiplă pentru 100 de plăcuțe debitate [Lehfeltd & Co]

De rezultatele prelucrării cu ultrasunete a materialelor fragile, beneficiază industria electrotehnică, unde se pune în mod deosebit problema debitării și prelucrării materialelor semiconductoare și a ceramicilor izolatoare. Procedul se aplică de asemenea cu bune rezultate la prelucrarea germaniului și siliciului, folosindu-se același gen de sculă multiplă ca cea prezentată în figurile 1.12 și 1.13.

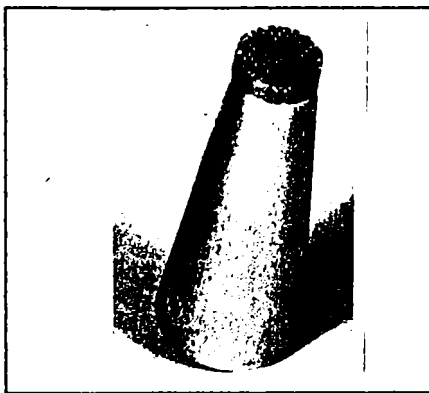


Fig. 1.12. Sculă multiorificiu pentru Germaniu și Siliciu [Kerry Ultrasonics Ltd.]

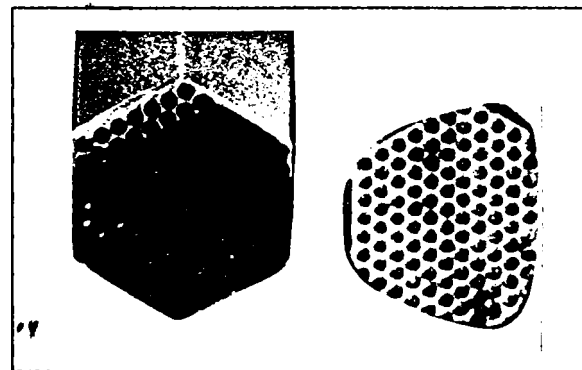


Fig. 1.13. Sculă multiorificiu pentru materiale semiconductoare [Kerry Ultrasonics Ltd.]

Rezultatele prelucrării diferitelor orificii în ceramică și alumină sunt ilustrate în Fig. 1.14. și 1.15.

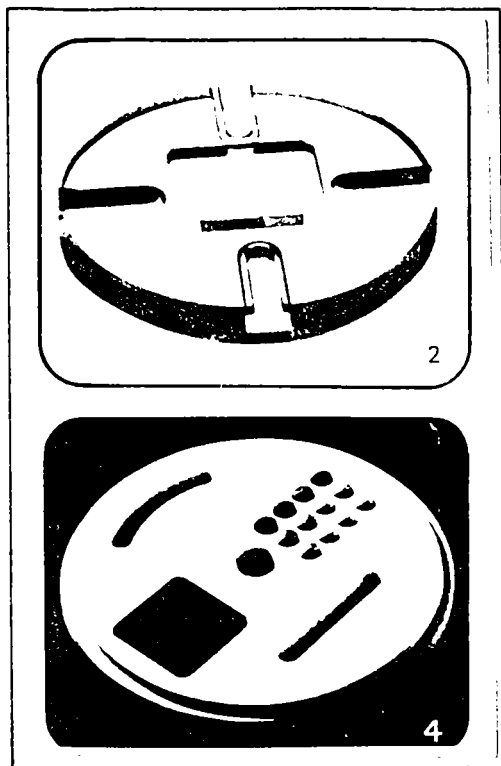


Fig. 1.14. Orificii prelucrate în sticlă și ceramică
[Kerry Ultrasonics Ltd.]

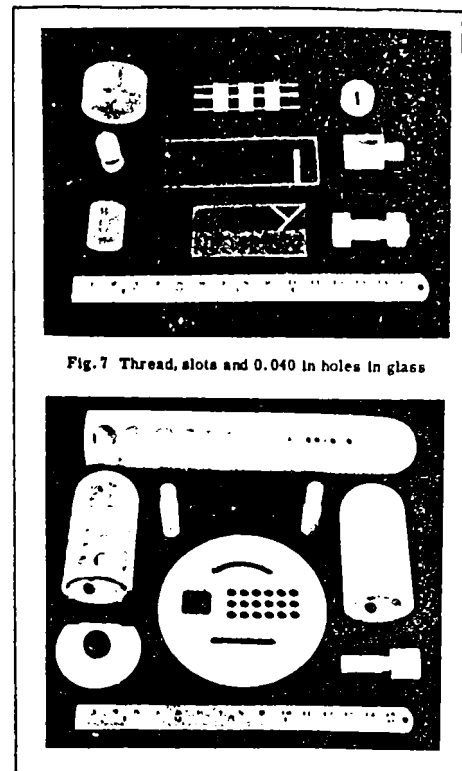


Fig. 1.15. Prelucrarea în sticlă, aluminiă și ceramică
[Dawe Instruments]

Ferita, material foarte utilizat în radiotehnică și tehnica de calcul, se prelucurează cu rezultate foarte bune utilizând prelucrarea ultrasonică, așa după cum se poate vedea în Fig. 1.16.

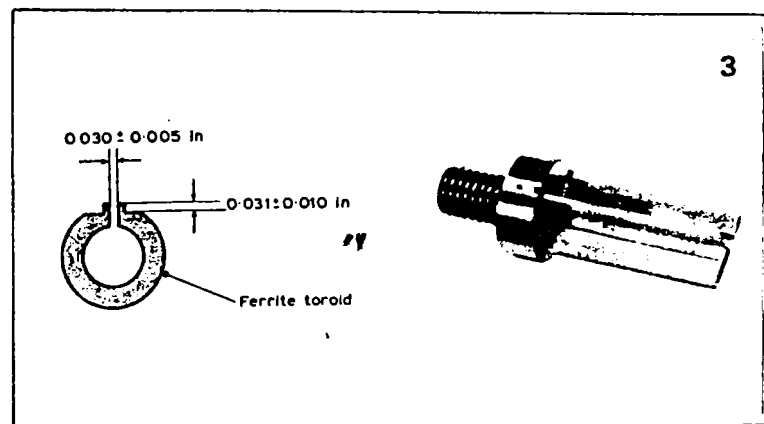


Fig. 1.16. Tăierea unui inel de ferită cu sculă profilată specială
[Rolls Royce]

Deasemenea, această prelucrare se aplică în aeronautică, ceasornicărie și industria aparaturii medicale, unde se pune problema unor materiale ca rubinul, safirul, stelitul, cuarțul sau mica.

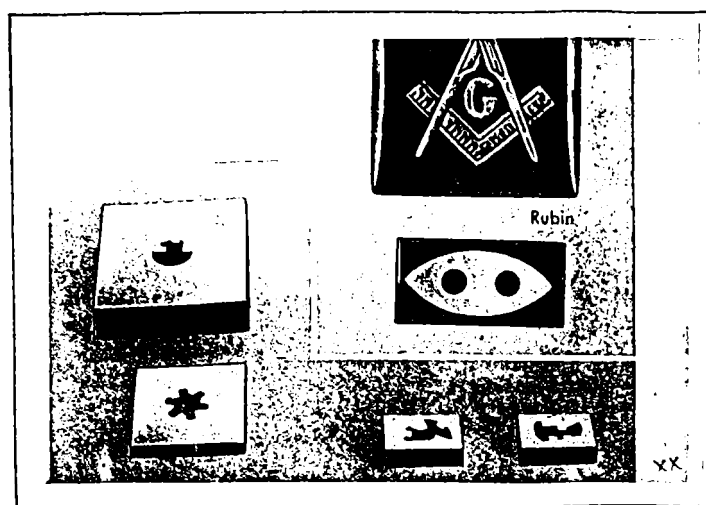


Fig. 1.17. Prelucrări de matrițe în rubin
[Lehfeldt & Co]

Câteva matrițe realizate în rubin cu mașina Diatron sunt prezentate în Fig 1.17. Prelucrarea rubinului și safirului este deosebit de importantă la confecționarea lagărelor de mare precizie și finețe în ceasornicărie și la aparatura de cercetare. Prin prelucrarea carburilor de wolfram și a unor contururi mai complexe în plăci de metale dure, se dovedește utilitatea acestei prelucrări și în industria constructoare de mașini.

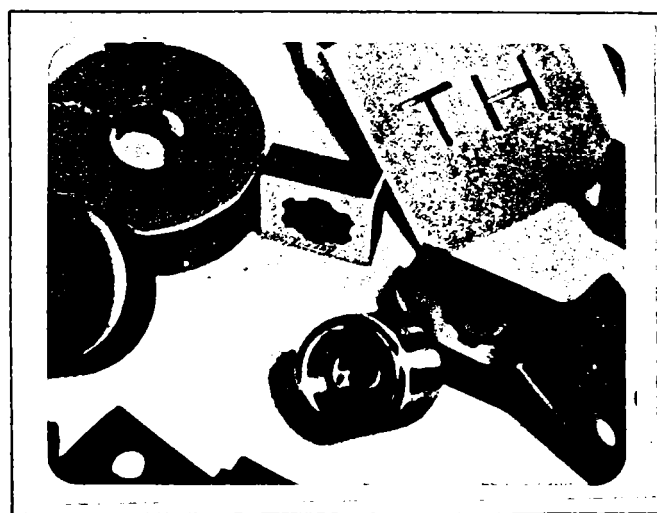


Fig. 1.18. Piese complexe prelucrate din carbură de wolfram
[Kerry Ultrasonics Ltd.]

În Fig. 1.18 sunt prezentate câteva exemple de prelucrare a carburilor de wolfram, matrița din Fig 1.18, tot din wolfram, fiind realizată cu o precizie de 0,005 mm.

Prelucrări în carburi de wolfram și metale dure sunt ilustrate în figurile 1.19 și 1.20.

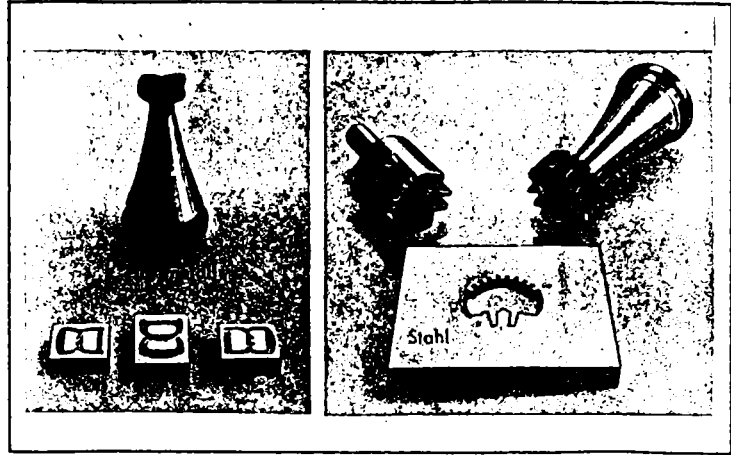
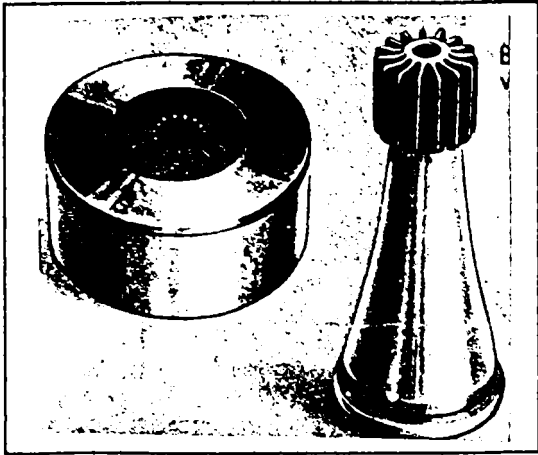
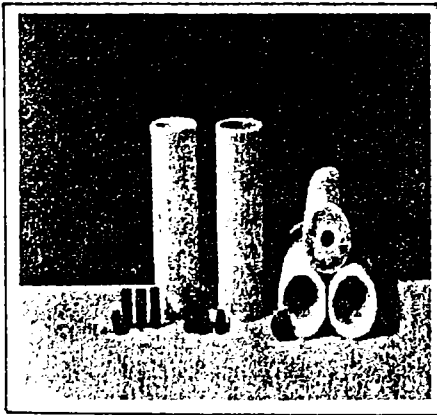
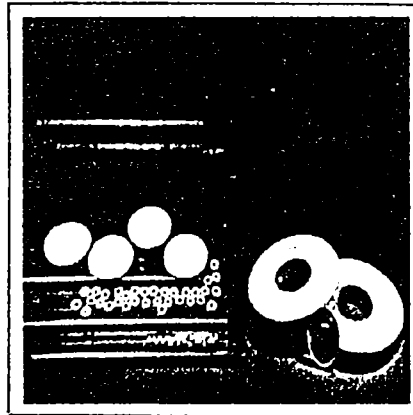


Fig. 1.19. Matriță din carbură de wolfram [Lehfeltd & Co]
 Fig. 1.20. Piese prelucrate din metale dure pe mașina Diatron [Lehfeltd & Co]

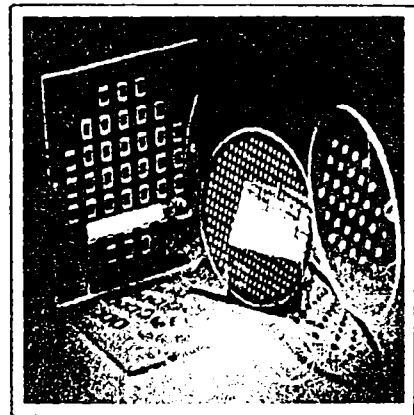
Mașinile ultimei generații, concepute după 1990, sunt produse în țările avansate tehnologic, din care le prezentăm în Fig 1.21 produsele realizate de mașinile firmei EXERON. Acestea se remarcă prin productivități foarte mari și prelucrări de foarte mare precizie.



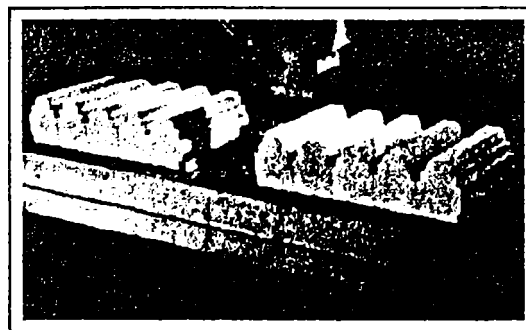
Carbonați de siliciu



Piezocerămice



Sticlă



Prelucrare de profilare

Fig. 1.21 Prelucrări realizate pe mașini tip EXERON

Dezvoltările recente au pus în evidență și alte domenii de aplicare a prelucrării ultrasonice, acestea fiind prelucrarea materialelor sinterizate în industria constructoare de mașini și a bioxidului de uraniu pentru centralele atomoelectrice. Este de așteptat ca pe măsura diversificării cererilor tehnologice, să apară noi posibilități de aplicare a acestui procedeu de prelucrare.

S-a ajuns la performanțe greu de imaginat în perioada anterioară. Astfel, discurile mici de germaniu sau siliciu se execută pe mașini echipate cu scule multiple, așa cum am prezentat, realizându-se productivități de zeci de mii de bucăți pe zi, în condițiile respectării cerințelor tehnologice impuse.

În România, interesul pentru aplicarea prelucrării cu ultrasunete s-a manifestat cu precădere în învățământul superior, rezultatele obținute fiind apoi preluate de industrie.

În 1975, la Institutul Politehnic Timișoara s-a realizat prima mașină de prelucrat cu ultrasunete din România [ICL-3], [SAV-1]. Colectivul condus de Profesorul SAVII, în care se remarcă inginerii Tudor Iclănzan și Mihai Nica s-a afirmat ca unul dintre cele mai active din țară, iar rezultatele obținute sunt pe de o parte cele mai semnificative datorită aplicării lor cu precădere în industrie. În Tabelul 1.6 se prezintă aceste realizări care sunt completate și de altele în domeniul aplicării ultrasunetelor la sudarea materialelor termoplastice, curățirea industrială și activarea unor procese fizico-mecanice în solide și lichide.

Experiența dobândită în cadrul colectivului timișorean a fost apoi preluată și dezvoltată de întreprinderile Electrotimiș și I. A. E. M. (Întreprinderea de Aparare Electrice de Măsură) din Timișoara. În România, au mai fost realizate 2 prototipuri la I. C. T. C. M. și unul la Institutul Politehnic, ambele din București. *În prezent, Universitatea din Timișoara este singura instituție din țară în care se pot executa și se mai fac lucrări privind realizarea echipamentelor tehnologice cu ultrasunete.*

În perioada anilor 1990-1995 s-au realizat încă trei modele experimentale, o parte din cercetări constituind obiectul prezentei teze de doctorat.

Stadiul actual de dezvoltare a domeniului a scos în evidență însă și limitele procesului, aspect foarte puțin comentat de literatura de specialitate, dar inevitabil pentru stabilirea corectă a obiectivelor oricărei cercetări.

Sistemele tehnologice cu ultrasunete, fie că se definesc în mașini, fie în dispozitive, pot fi prezentate în esență, ca o structură funcțională electromecanică, în regim de rezonanță.

Un generator de ultrasunete furnizează energie la puteri $P=50...2500$ w, pe frecvența de rezonanță $f_0 = 20...40$ KHz. pentru funcționarea ansamblului la un randament electroacustic maxim posibil. Cu excepția sistemelor ultrasonice de curățire și activare a unor lichide, transferul de energie către mediul activat se face prin concentrarea energiei ultrasonice.

Tabelul 1.6

Anul	Modelul mașinii / Executant	Tipul mașinii	Beneficiar
1975	MPUme / Catedra T.C.M	Prototip. Mașină de prelucrat de tip universal 20 KHz/1500W	Catedra T.C.M. I.P Timișoara
1977-1978	MFU 01 / Catedra T.C.M.	Mașina de finisat cu ultrasunete filiere de diamant și carburi metalice 20KHz / 100W	I.C.E.E. Zalău (4 mașini) Electrotimiș Timișoara (o mașină)
1979	MPU 01 / Catedra T.C.M.	Mașină de prelucrat cu ultrasunete a pieselor din ferită 20 KHz / 200W	I.C.S.I.T.E. București
1984-1987	MPU 01 Electroson / Electrotimiș pe baza modelelor IP Timișoara	Mașină de prelucrat cu ultrasunete de tip universal 20KHz /350W	I.C. Tg. Mureș I.C.E.E. Zalău I.P. Timișoara F.C. București și Buzău (5 mașini)

Sistemul rezonant este supus din partea mediului activat la reacții perturbatoare, dintre care cele mai importante sunt:

- **amortizările** datorită presiunilor de contact;
- **disiparea energetică** datorită cuplajului mecanic defectuos (dezacordul impedanțelor);
- **reflexii** ale mediului, **însoțite de amortizări**;
- **modificări ale caracteristicilor mediului** (temperaturi, vâscozitate, dimensiuni).

Reacțiile perturbatoare conduc la modificarea curbei de rezonanță cu deplasări ale frecvenței, **însoțite de scăderi ale eficienței**, chiar până la încetarea funcționării în regim de rezonanță.

Modul de funcționare descris este caracterizat de următoarele limite:

- **puterea ultrasonică** eficient utilizabilă este limitată în sistemele concentratoare la maxim 2500 w, luând în considerare suprafața maximă de emisie a transductoarelor magnetostrictive metalice de circa 30 cm.² și încărcarea specifică limită de 85 w/cm.², admisă pentru un randament

electroacustic acceptabil, deși fenomenul de disipare prin energie calorică este deja important. De altfel tendința manifestată mult timp de către constructori, de ameliorare a performanțelor tehnologice pe seama creșterii de putere, s-a dovedit inacceptabilă întrucât efectele secundare (disipare, încălziri puternice, tensiuni mecanice în sistem) devin prea importante, diminuând raportul global *efecte tehnice obținute/energie consumată*. Din punct de vedere al raportului amintit se pare că puterea maximă optimă recomandată pentru transductoarele sistemelor rezonante concentratoare se situează în jurul valorilor de 500...800w. Creșterea dimensiunilor transversale a sculelor și implicit a mărimii suprafețelor active este limitată de considerentul compatibilității dimensiunii transversale cu lungimea de undă. În caz contrar apar vibrații parazite pe direcție transversală, cu diminuarea drastică a randamentului. Pentru frecvența uzuală de 20 kHz. valoarea $\lambda/2$ în cazul oțelului este de circa 130mm. și prin urmare dimensiunea transversală maximă admisibilă devine practic de 100mm.

- **frecvența ultrasonică** a sistemelor rezonante ultrasonice este fixă, sau variază într-un ecart foarte mic. Majoritatea aplicațiilor utilizează valoarea de 20kHz, numai unele instalații de curățire folosindu-se o frecvență de 40kHz. Scăderea acesteia sub 20kHz., deși tentantă, privind raportul efecte tehnice/energie consumată, este inacceptabilă din cauza pragului audibil și a creșterii nedorite a dimensiunilor longitudinale a convertoarelor. Pe de altă parte, creșterea frecvențelor este însoțită de diminuarea randamentului electroacustic, mai ales la transductoarele metalice.

Problema esențială în funcționarea unui sistem rezonant este legată de menținerea frecvenței de rezonanță de lucru, egală cu cea proiectată a sistemului, astfel încât în cazul existenței unor mici dezacorduri, să fie posibilă compensarea ei automată prin reglajul automat al frecvenței (RAF). Din păcate, frecvența optimă tehnologic, depinde și de puterea de lucru, de unde rezultă dificultatea precizării frecvenței de proiectare în multe cazuri. Creșterea simultană a puterii și a nivelului perturbațiilor, depășește în multe situații capacitatea de reacție limitată a R A F, conducând fie la funcționarea cu pierderi substanțiale, fie chiar la dezacordul definitiv al sistemului.

Practic, pentru fiecare aplicație în parte ar fi de dorit să se precizeze raportul optim al nivelului de amplificare realizabil în corelație cu puterea maximă utilizată.

- **randamentul electroacustic** al sistemului rezonant este o mărime puternic influențată de modul de funcționare, dimensionare, materiale utilizate și perturbații.

Creșterea puterilor poate duce la părăsirea domeniului de funcționare liniară și la apariția saturațiilor sistemului convertor, afectând negativ randamentul. Dimensionarea neadecvată a elementelor componente, precum și utilizarea în confecționarea lor a unor materiale necorespunzătoare (altele decât D16T sau aliaje de titan la convertoare adaptoare de undă) pot conduce la diminuarea randamentului electroacustic. Efectul perturbațiilor este extrem de complex, insuficient elucidat, dar cu mare influență asupra randamentului electroacustic. Din păcate o serie de aplicații, potențial foarte interesante, devin discutabile tocmai din cauza dezacordului de structuri rezonante (dezacordul impedanțelor) insuficient cunoscute la ora actuală. Pentru toate aceste situații creșterea puterii în proces prin „fortarea” procesului este irațională. În acest context ar fi mult mai edificator să nu se opereze cu indicatori de tipul *volum prelevat/timp*, sau *densități specifice de energie* ori *putere/suprafață*, ci cu unul global, care să se poată exprima sub forma *efecte tehnice/energia consumată*. Efectul limitativ al perturbațiilor este foarte complex și foarte diferit de la caz la caz. El este de fapt și foarte puțin studiat, constituine un obstacol pentru multe aplicații potențiale.

Echipamentele moderne compensează total sau parțial, funcție și de natura aplicației efectul perturbator prin sistemele R A F, restabilind măcar în parte performanțele de exploatare ale sistemului, dar ridicând costul echipamentului ultrasonic.

1.4.2. Limitele procedurii

În ceea ce privesc limitele procedurii de prelucrare, acestea sunt legate de două aspecte și anume diametrul mediu al orificiilor prelucrate și adâncimea maximă a prelucrării.

Din analiza rezultatelor obținute pe plan mondial se constată că orificiile circulare sub diametrul de 0,5 mm sunt deosebit de dificile din cauza sensibilității foarte mari cerute mecanismelor de avans și a rezistenței diminuate la flambaj și oboseală a unor asemenea scule. O prelucrare la aceste dimensiuni este limitată și în ceea ce privește adâncimea prelucrării, la maxim 10mm.. În ceea ce privește limitele adâncimilor cunoscute, se apropie de valori de 50mm.. La adâncimi mari, pe lângă alimentarea cu agent eroziv, devine dificilă și evacuarea produselor eroziunii. Adâncimea maximă de prelucrare este impusă și de însăși de lungimea sculei, care la rândul ei este limitată în raport cu diametrul.

Productivitatea și calitatea de prelucrare respectiv precizia de prelucrare, depind evident de tehnologia adoptată, de parametrii de prelucrare stabiliți.

Astfel, încercările de prelucrabilitate efectuate la Politehnica din Timișoara, au arătat că precizia nu poate fi asigurată decât consecutiv, cu limitări ale densităților de putere și cu reducerea presiunilor de contact, ambele în detrimentul productivității. Dimensionarea adecvată a sculelor și ciclul de lucru cu retrageri succesive devine hotărâtoare. Deși câmpul de aplicabilitate deosebită a prelucrării ultrasonice îl constituie materialele dure și fragile, există tendința de a se introduce prelucrarea ultrasonică și pentru unele cazuri de prelucrare a materialelor metalice. Astfel, o serie de cercetători, compară acest procedeu chiar cu eroziunea electrică. După datele lor experimentale, în comparație cu eroziunea electrică, prelucrarea cu ultrasunete, raportată la același consum de la rețea, arată că metoda eroziunii electrice este de 1 la 2 ori mai productivă și permite prelucrări ale unor suprafețe mai mari în cazul metalelor dure, capacitățile de așchiere la ambele metode fiind deja aproape egale. Totuși, procedeul cu ultrasunete are avantajul decisiv că permite folosirea imediată, după prima străpungere a plăcii din oțel dur, ca matriță, fără să fie necesară o prelucrare ulterioară.

Alt avantaj al acestei prelucrări, este acela că produce muchii foarte ascuțite, nesolicitate termic. Dacă s-ar folosi eroziunea electrică, ar trebui pentru aceasta o finisare ulterioară prin curenți foarte slabi, care însă duc la creșterea pronunțată a timpilor de prelucrare, încât procedeul poate deveni neeconomic. Se pare că aceste afirmații nu sunt temeinic argumentate, așa încât ele necesită un studiu mai complet și comparativ al celor două procedee.

Ținând cont de datele furnizate de firma Kerry Ultrasonics Ltd., lider în domeniul construcției mașinilor de prelucrat cu ultrasunete, **viitorul acestei prelucrări îl constituie combinarea ei cu procedeul electrochimic**, care oferă un câmp mai larg de aplicabilitate a prelucrării ultrasonice.

Perspectivile apropiate ale perfecționării procedeeului de prelucrare, care reprezintă și obiectul studiului nostru din cadrul tezei de doctorat, constituie realizarea la indici calitativi superiori ai preciziei dimensionale, fineței prelucrării, creșterii productivității și nivelului de reproductibilitate, printr-un control continuu și eficient al prelucrării.

CONCLUZII

- 1. Prelucrarea dimensională cu ultrasunete este un procedeu aplicat cu precădere materialelor dure și fragile, acolo unde alte procedee nu dau satisfacție, sau sunt imposibil de aplicat.*
- 2. Procesul de prelucrare este de eroziune abrazivă, datorită energiei ultrasunetelor. Cavitația ultrasonică are un rol neînsemnat.*
- 3. Aplicarea prelucrării cu ultrasunete este rațională pentru cazuri specifice, iar construcția echipamentului trebuie adecvată cazului. Mașinile sunt mai degrabă specializate decât polivalente.*
- 4. Dimensiunile și configurațiile prelucrabile sunt limitate de condiții tehnice specifice și în mod deosebit de cele impuse de funcționarea unui sistem oscilant rezonant.*
- 5. În raport cu realizările pe plan mondial, experiența națională concentrată în special la Universitatea Politehnică din Timișoara este notabilă și relevantă pentru a putea imagina și realiza obiective în cercetarea și aplicarea industrială.*
- 6. Prelucrarea discurilor optice din sticlă și a lentilelor din safir, reprezintă cazuri specifice ce impun studii particularizate având în vedere prioritatea condițiilor de precizie și calitate în raport cu cele de productivitate.*

Capitolul 2

2. OBIECTIVELE CERCETĂRII

Obiectivele cercetării care constituie esența prezentei teze de doctorat se regăsesc în necesități concret exprimate de industria de apărare a României cu câțiva ani în urmă. În anul 1989 Întreprinderea Optică din Timișoara solicita Institutului Politehnic realizarea pe baza de contract a unei cercetări cu titlul

“Tehnologia și echipamentul pentru carotarea cu ultrasunete a pieselor optice circulare și cu grosimi între 0,5 și 1 mm și diametre 3-5 mm și pentru perforarea lentilei de safir”
(Contract nr. 126/1989 în valoare de 326.000 lei)

Cercetarea urma să se desfășoare pe mai multe etape pornindu-se de la fezabilitatea procedurii (având în vedere caracteristicile specifice produsului cu destinație specială) și până la elaborarea tehnologiei, proiectarea și execuția echipamentului.

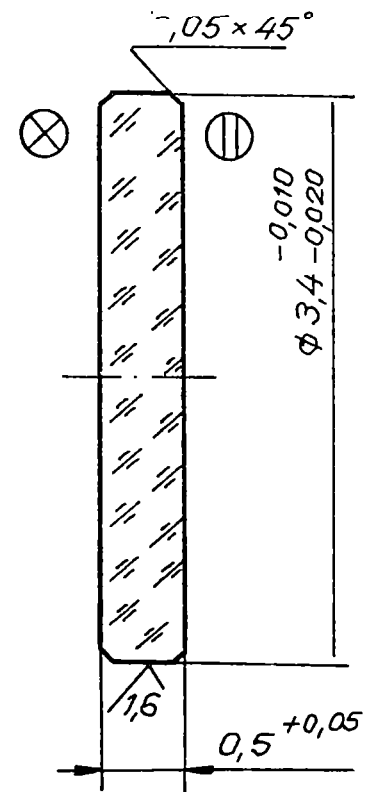
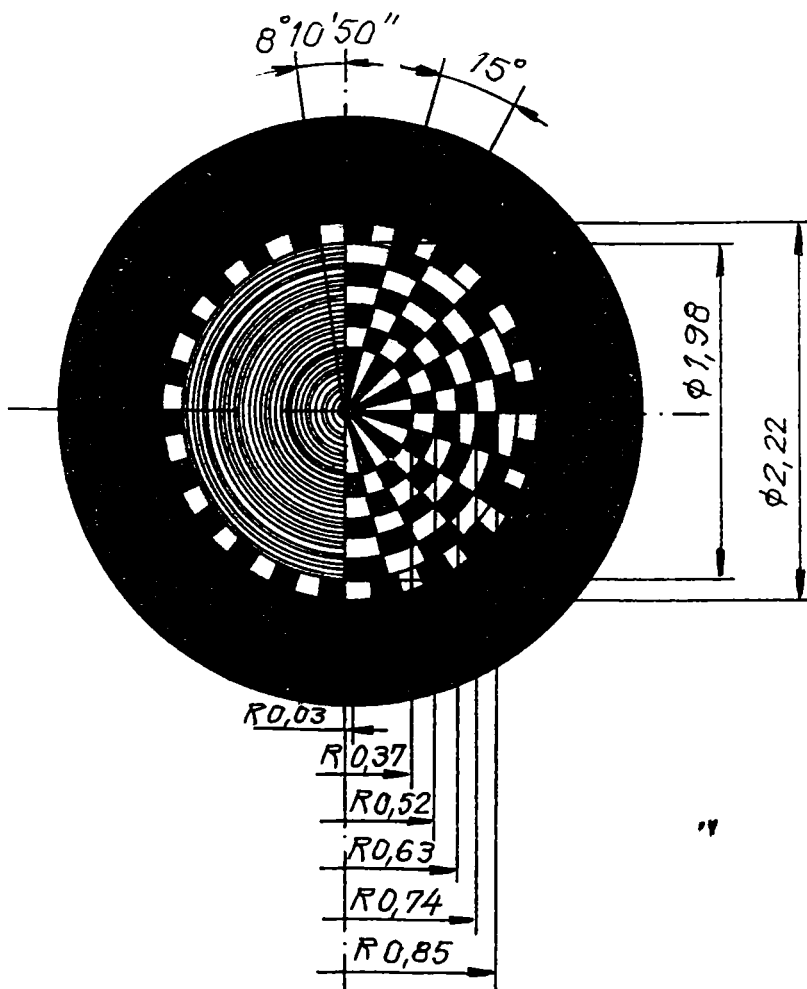
Cerințele de precizie a carotării, calitate a suprafețelor prelucrate și protecție a desenului imprimat pe discurile directoare redată în desenul alăturat au impus o abordare specifică în definirea obiectivelor cercetării, a mijloacelor tehnice utilizate și a soluției constructive finale pentru echipament. Această optică a fost pe deplin confirmată de lucrările realizate în laboratorul de ultrasunete al Catedrei de TCM de la Universitatea Politehnică din Timișoara în cursul anului 1990. În paralel cu experimentele preliminare privind tehnologia de prelucrare, autorul prezentei teze participă la proiectarea și realizarea structurii mecanice a prototipului mașinii de prelucrat tip MPU-05, mașină concepută cu precădere pentru realizarea unor prelucrări de precizie.

În ciuda rezultatelor promițătoare obținute, Întreprinderea Optică Română din Timișoara, atinsă și ea de problemele recesiunii economice și a blocajului financiar, nu poate asigura finanțarea în continuare a lucrărilor comandate. Cum rezolvarea acestei probleme prezintă totuși un interes particular având în vedere aplicațiile posibile într-un domeniu sensibil, Ministerul Cercetării și Tehnologiei reiterează finanțarea lucrării cu o transă de 1,5 milioane lei, prin contractul nr. 103038/1993. Deși suma afectată este mai degrabă simbolică în raport cu nevoile de finanțare a acestei cercetări există semnalul necesității și oportunității finalizării lucrării.

Acesta este momentul care a determinat realizarea temei cu resurse proprii în cadrul unei teze de doctorat cu titlul:

“Contribuții privind prelucrarea cu ultrasunete a discurilor optice din sticlă și a lentilelor din safir”

Finisore și tratament		
⊗	$\lambda = 3,3 \mu\text{m}$ NIOR 1569-80	
⊕	NIOR 1896-73 Tip D	
Condiții pentru sticlă	Δn_c	5G
	$\Delta(n_F - n_c)$	5G
	Omogenitate	4
	Birefrigență	4
	ϵ_A	7
	Striuri	18
Condiții pentru piesă	Bule	1
	$N_{1,2}$	2
	$\Delta N_{1,2}$	0,5
	θ	11



0,012 / ✓ / ✓

Proiectat			
Desenat			
Verificat			
Contr. STAS			
Aprobat			
		Masa netă:	
		20:1	DISC MODULATOR
		Data:	

Desenul de execuție al discului optic (modulator) este ilustrat în Figura 2.1. Figura 2.2. reprezintă fotografia semifabricatelor și sculelor pentru carotarea discurilor optice și prelucrarea lentilelor de safir.

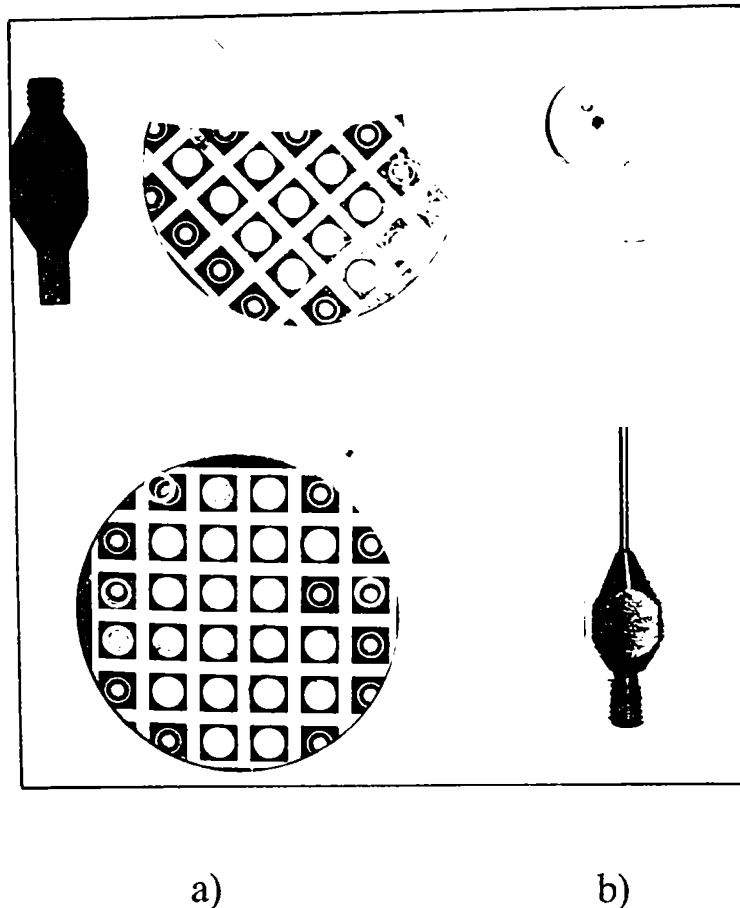


Fig. 2.2. Semifabricatele și sculele necesare prelucrărilor
a) discurilor optice;
b) lentilelor de safir

Realizarea tezei de doctorat și consecutiv acesteia, finalizarea cercetării, au impus începerea lucrărilor cu un studiu preliminar de analiză și sinteză a experiențelor cunoscute în domeniu.

În raport cu cerințele tezei au rezultat următoarele particularități:

- studiile făcute publice relativ la tehnologia în echipamentele de prelucrare cu ultrasunete, deși numeroase, nu oferă soluții imediate și adecvate cererilor orientate pe cazuri particularizate de aplicare, cum este cel din prezenta lucrare;

- experiența colectivului de la Universitatea Politehnica din Timișoara, singurul operativ în domeniu din țară, este relevantă dar se cere completată;

- echipamentele existente deși nu sunt cele mai performante, ele sunt disponibile și pot asigura acuratețea experimentelor.

Există posibilitatea ca raportul *rezultate obținute / resurse investite* „să fie finalmente” unul favorabil și acceptabil.

Specificitatea obiectivelor de care trebuie să ținem cont în finalizarea cercetărilor **determină următoarele condiții:**

- se solicită o **tehnologie optimizată** de prelucrare cu ultrasunete a unor discuri optice din sticlă și lentile safir **pentru care precizia și calitatea prelucrării reprezintă condiția primordială**. Spre deosebire de majoritatea cazurilor productivitatea prelucrării nu mai este principalul indicator urmărit. Se acceptă chiar valori modeste ale productivității, dar asigurându-se cu prioritate precizia și calitatea prelucrării ;

- **comenzile de producție** au în vedere **loturi scurte de maxim 500 bucăți**, situate aleator în timp;

- **desenul de marcaj** de pe discurile optice realizat prin fotodepunere, trebuie să **ramână intact** în condițiile unei prelucrări de carotare prin eroziune cu abraziv în câmp ultrasonic. Aceasta presupune un regim de prelevare de finețe care face nesemnificativ indicatorul de productivitate al prelucrării;

- **condițiile de precizie și calitate** impuse la carotare și găurire fac inevitabil ciclul de lucru cu **retrageri periodice** ale sculei atât pentru reâmprospătare cu abraziv cât și pentru asigurarea unor **inspecții optice** repetate a spațiului de lucru (erodarea piesei – uzura sculei);

- **mașina de prelucrat** cu ultrasunete care să satisfacă condițiile de mai sus, nu poate fi una de tip universal (polivalent) ci una **specializată**. Construcția ei trebuie să fie totuși cât mai simplă pentru a asigura un raport favorabil *investiție/permanență*.

Pe baza particularităților și condițiilor mai sus exprimate, s-a stabilit efectuarea cercetărilor din cadrul tezei de doctorat în următoarea logică:

1. *Studiu de analiză și sinteză a experienței tehnologice și constructive în domeniu;*
2. *Definirea caracteristicilor tehnice specifice ale tehnologiei și echipamentului de prelucrare care constituie obiectivul cercetării;*
3. *Realizarea unui set preliminar de încercări experimentale pentru adecvarea dispozitivelor și echipamentelor disponibile în laboratorul de ultrasunete (mașina tip MPU-05, stand experimental, cu mașina tip ME, cuplată cu un microscop de scule Carl Zeiss Jena, dispozitive de fixare, scule și concentratoare, generator Electroson);*
4. *Studii și încercări experimentale pentru stabilirea tehnologiei optime de prelucrare a discurilor de sticlă optică și lentilelor de safir;*
5. *Studiul și concepția unei mașini specializate pentru prelucrarea cu ultrasunete a discurilor optice și lentilelor de safir;*
6. *Protecția proprietății industriale.*

Capitolul 3

3. STUDIUL DE SINTEZĂ PRIVIND TEHNOLOGIILE DE PRELUCRARE CU ULTRASUNETE

3.1 Considerații generale

Literatura de specialitate oferă un material relativ bogat privind studiul tehnologiilor de prelucrare cu ultrasunete cu precădere pentru cazuri concrete de utilizare, dar studiile exhaustive și care-și propun modele generalizatoare sunt puține [MIL-1], [MAR-2], [NEP-1,2,3], [KAZ-2].

Aceste studii realizate în anii 60-70, când prelucrării cu ultrasunete i se prefigurau perspective promițătoare de aplicare industrială, nu au fost urmate de dezvoltări. Majoritatea specialiștilor le-au considerat suficiente și și-au axat efortul principal pe cazuri concrete și pe ameliorarea performanțelor echipamentelor. La un moment dat, în anii '80-'85 studiile asupra tehnologiilor cu ultrasunete au înregistrat o diminuare ca număr și ca nivel al contribuțiilor, originale determinate pe de o parte de limitele evidențiate în aplicarea procedului, iar pe de altă parte, atingerea unei capacități productive superioare fiind realizată prin creșterea performanțelor echipamentului și în special a puterii ultrasonice a ansamblului transductor - generator. În prezent, deși prelucrarea cu ultrasunete poate fi considerată ca și o aplicație "exotică" în raport cu amploarea extensiei altor procedee, totuși asistăm la o reiterare a interesului pentru această prelucrare din punct de vedere al preciziei și calității prelucrării.

Din acest punct de vedere este semnificativă apariția pe o piață de mașini aparent saturată și limitată, a mașinilor de prelucrat tip EXERON (firma Erodierstechnologie GmbH). Pe de altă parte, obiectivul prezentei teze de doctorat, confirmă interesul regăsit pentru această tehnologie.

Pentru studiul tehnologiei de prelucrare am realizat **sinteza unor lucrări reprezentative** în domeniu, având ca elemente de referință următoarele:

-capacitatea de a defini un model teoretic viabil pentru prelucrarea cu ultrasunete;

-capacitatea de a defini și apoi confirma prin propriile încercări experimentale interdependența principalilor parametri tehnologici;

-capacitatea de a defini caracteristici constructive și funcționale cât mai adecvate pentru mașini de prelucrare cu ultrasunete.

O caracteristică specifică și general acceptată, în majoritatea lucrărilor, este aceea a definirii principalilor parametri tehnologici ai prelucrării prin:

1. amplitudinea de oscilație a sculei în contact cu materialul de prelucrat;
2. presiunea de contact sculă-piesa în timpul prelucrării;

3. modul de asigurare a suspensiei abrazive la locul prelucrării.

Pe lângă cei trei parametri, sunt puși în evidență și parametrii secundari, considerați astfel din cauza rolului mai redus în influențarea procesului, cum sunt:

- calitățile lichidului purtător al suspensiei abrazive;
- concentrația și granulația abrazivului;
- rotația sculei (în unele cazuri de prelucrare);
- forma și dimensiunile sculei.

Inițial, mare parte din cercetătorii implicați în studierea aprofundată a fenomenelor care se petrec pe parcursul desfășurării procesului, au atribuit un rol esențial în producerea distrugerilor la materialul prelucrat cavitației. Acest fenomen apare în lichidul purtător al particulelor abrazive datorită șocurilor scurte de ordinul a 10^8 /secundă, ca urmare a imploziilor bulelor cavitaționale produse de mișcarea cu frecvența ultrasunetelor a sculei față de piesă.

Cercetările experimentale desfășurate ulterior au pus însă în evidență faptul că efectul principal asupra prelucrării este cel al acțiunii directe a sculei asupra particulelor de abraziv, prin intermediul cuplajului acustic asigurat de lichidul purtător al abrazivului.

În consecință, teoria inițială denumită *hidrodinamică*, ce atribuia rolul primordial în prelucrare cavitației, s-a dovedit a fi lipsită de temei și a fost abandonată de specialiștii în domeniu, care folosesc denumirea de *prelucrare cu ultrasunete* în locul celei de "*prelucrare abraziv cavitațională în câmp ultrasonor*". Cu toate acestea, procesul cavitațional poate să aibă un rol în procesul de prelucrare, coeficientul său de influență însă nu a putut fi pus în evidență până în prezent.

Rolul care este atribuit cavitației pe parcursul prelucrării, este de a favoriza mișcarea particulelor abrazive în câmpul operațional (de lucru) și înlăturarea particulelor prelevate din materialul prelucrat.

În urma studierii documentației avute la dispoziție și din numeroasele determinări experimentale executate, nu ne putem situa de nici o parte a disputei referitoare la rolul cavitației în procesul prelucrării ultrasonice. Deși cei care minimalizează rolul cavitației în proces, dispun de mai multe argumente, în urma cercetărilor întreprinse, pe parcursul desfășurării experimentărilor în cauză, se constată unele inconsecvențe dintre care cea mai importantă este încercarea de prelucrare cu abraziv fără lichid purtător.

Aceasta face ca între piesă și sculă să nu existe cuplajul acustic atât de necesar și realizat numai prin suspensia abrazivă din zona de lucru.

În cercetările teoretice și practice efectuate asupra procesului de prelucrare ultrasonică s-au făcut încercări de determinare analitică a productivității prelucrării, considerată la acele date cel mai important parametru

ce trebuie urmărit, pentru interpretarea diferitelor fenomene ce \nso]esc prelucrarea.

Cercetările care s-au impus, în acest cadru teoretic al studierii procesului prelucrării cu ultrasunete, sunt cele efectuate de americanul MILLER [MIL-1], rușii MARKOV [MARK-2] și KAZANȚEV [KAZ-1] și completate cu date practice de cercetările de la Politehnica din Timișoara, în perioada ulterioară [ICL-1]. În ordinea enunțată vom prezenta principalele elemente ale teoriilor fundamentate de cei trei.

Modelul „Miller” [MIL-1]

Cercetările amănunțite și cuprinzătoare desfășurate de americanul MILLER, au dus la fundamentarea teoriei sale. În cadrul fundamentării teoretice, cercetătorul a obținut rezultate concludente, în mare măsură confirmate de rezultatele practice ale experimentărilor. În definirea modelului s-a recurs la ipoteze simplificatoare.

Conform acestora, procesul prelucrării ultrasonice presupune trei factori esențiali:

- vibrația longitudinală a unei scule;
- o piesă apasată pe scula;
- o suspensie abrazivă.

Se remarca noutatea formulării teoriei acestuia prin faptul că are ca obiect de studiu materialele tenace, deși acestea, pe parcursul evoluției procesului de prelucrare cu ultrasunete nu fac obiectul acesteia, iar materialele dure și fragile care sunt în prezent prelucrate, în mare măsură și cu foarte bune rezultate, în conceptul cercetătorului este considerat ca fiind un caz particular.

Modelul teoretic simplificat pe care îl adoptă Miller prezintă procedeul de prelucrare ca o acțiune de încrustare a abrazivului în piesă și sculă, sub acțiunea șocurilor sculei, care inițial produce deformări plastice în materialul de prelucrat, urmate de fisurări semnificative și spargere.

La materialele ductile, ecrusarea limitează procesul de prelucrare, iar la cele casante, productivitatea procedeului de prelucrare depinde numai de mărimea așchiilor obținute și de rapiditatea înlăturării lor.

Miller, în cercetările sale, fundamentează noțiunea “cantitatea ecrusării” ca raport între “cantitatea deformării plastice” și “cantitatea deformării plastice necesare ruperii”.

Factorii de dependență sunt identificați ca fiind:

- *cantitatea deformării plastice;*
- *viteza cu care sunt imprimate particulele de abraziv în piesa de prelucrat;*
- *capacitatea de ecrusare a materialului piesei de prelucrat.*

De asemenea, *cantitatea de deformare plastică și ecrusare*, depinde de:

- forțele de fricțiune dintre abraziv și piesa de prelucrat;
- temperatura piesei;
- orientarea individuală a granulelor în piesa.

Pentru a menține relația matematică mai simplă, ultimul factor a fost evitat. Din toate ipotezele inițiale enunțate, productivitatea volumică a prelucrării a fost definită conform următoarei expresii:

$$Q_v = k \cdot (DP) \cdot (NL) \cdot (EDP) \cdot (VD) \cdot (PR) \cdot (A) \quad (3.1)$$

în care:

- k - constantă de proporționalitate;
- (DP) - deformația plastică datorată fiecărei particule pe piesă;
- (NL) - numărul total de lovituri;
- (EDP) - cantitatea de ecrusare pe unitatea de deformare plastică;
- (VD) - volumul de material dislocat de fiecare lovitură;
- (PR) - proporția la care fisurile formate sunt relovite;
- (A) - gradul acoperirii suprafeței sculei de particule abrazive.

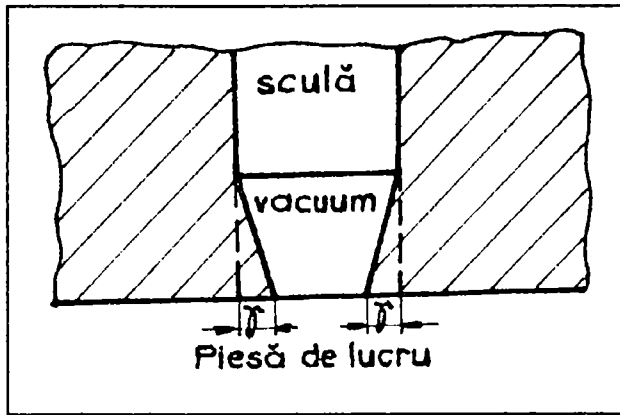
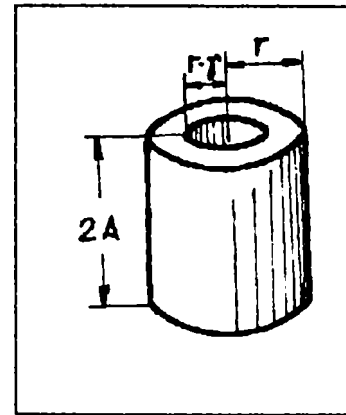
Aceasta, exprimă proporționalitatea directă, între productivitatea valorică a prelucrării cu ultrasunete și cei mai importanți parametri care o determină.

Se poate observa că nu se ține cont de un element constatat experimental ca fiind foarte important în desfășurarea procesului de prelucrare și anume circulația abrazivului în zona de lucru liberă, introdusă prin absorbție sau injectat prin sculă.

În prezentarea acestei teorii, deși din punct de vedere fenomenologic denumirea "*cantitatea ecrusării*" nu este cea mai adecvată, am păstrat-o așa cum a dat-o autorul.

În procesul de explicitare a expresiei și transformarea ei matematică, se au în vedere următoarele ipoteze:

- deformația plastică este direct proporțională cu tensiunea exercitată;
- tensiunea exercitată de o particulă abrazivă acționează o fracțiune de ciclu;
- scula imersată în suspensia abrazivă acționează ca un piston așa cum rezultă din figura 3.1., sub care ia naștere vacuum, drept care modelul matematic va fi de forma din figura 3.2;
- forța "F" acționează pe un ciclu complet;
- adâncimea de pătrundere depinde de mărimea particulelor;
- volumul materialului înlăturat de fiecare particulă abrazivă este proporțional cu aria prezentată la suprafața piesei de particula abrazivă și înălțimea ei. De asemenea, mai depinde de perioada de timp cât piesa de prelucrat este lovită și de densitatea abrazivului din zona de lucru.

Fig. 3.1 Modelul fizic
[Miller-1]Fig. 3.2 Modelul matematic
[Miller-1]

Conform modelului matematic adaptat și ipotezele simplificatoare enumerate, productivitatea volumică va avea expresia matematică:

$$Q_{v\phi} = K_0 \frac{p \cdot d \cdot A \cdot Fat \cdot x \cdot f}{q \cdot GB \cdot r \cdot \rho_a \vartheta (x + 1)} \quad (3.2)$$

în care:

- K_0 -constantă de proporționalitate;
- p -presiunea de contact sculă – piesă;
- d -diametrul abrazivului;
- A -amplitudinea oscilației;
- Fat -forța atmosferică pe suprafața suspensiei;
- x -raportul dintre masa abrazivului și lichidului utilizat ca abraziv;
- f -frecvența de oscilație;
- ρ -capacitatea de ecrisare;
- G -modulul elastic transversal Burger al materialului de prelucrat;
- B -vectorul lui Burger;
- r -raza sculei;
- ρ_a -densitatea abrazivului;
- ϑ -volumul suspensiei în amestecul abraziv-lichid purtător;
- $x+1$ -constantă de proporționalitate.

Analizând expresia obținută se ajunge la concluzia potrivit căreia productivitatea prelucrării ultrasonice depinde direct de:

- frecvența de oscilație – (f)
- amplitudinea oscilației – (A)
- presiunea de contact sculă – piesă (p)

- dimensiunile particulelor de abraziv (d)
- și invers proporțional de:
- raza sculei (r)
 - densitatea granulelor de abraziv (ρ_a)
 - capacitatea de ecruisare (q)
 - proporția suspensiei abrazive (x)

Totodată, se evidențiază influența materialului de prelucrat și caracteristicile suspensiei abrazive ca natură și concentrație.

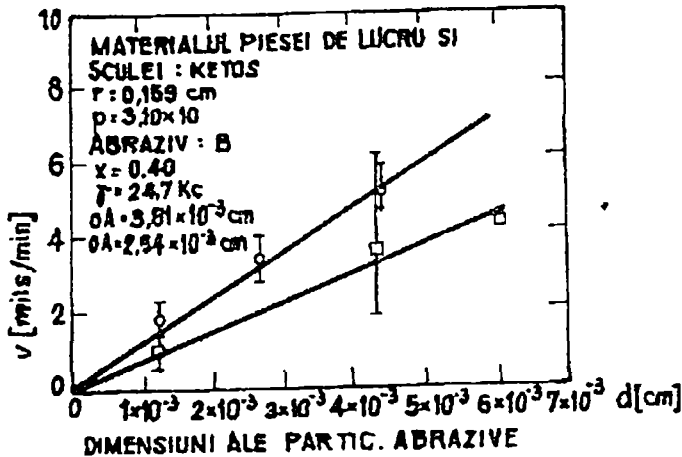


Fig. 3.3 Variația cap. de prod. în funcție de diametrul abrazivului [MIL-1]

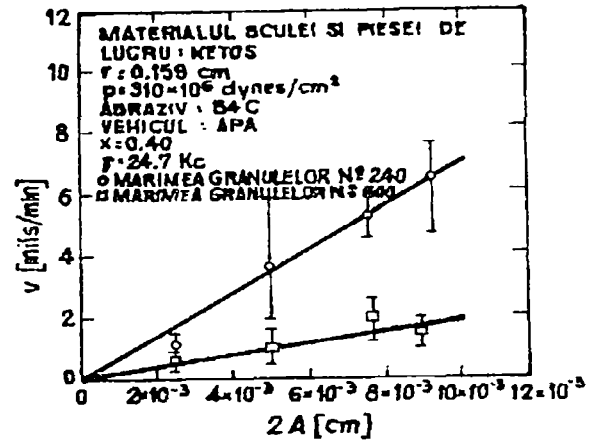


Fig. 3.4 Variația cap. de prod. în funcție de amplitudine [MIL-1]

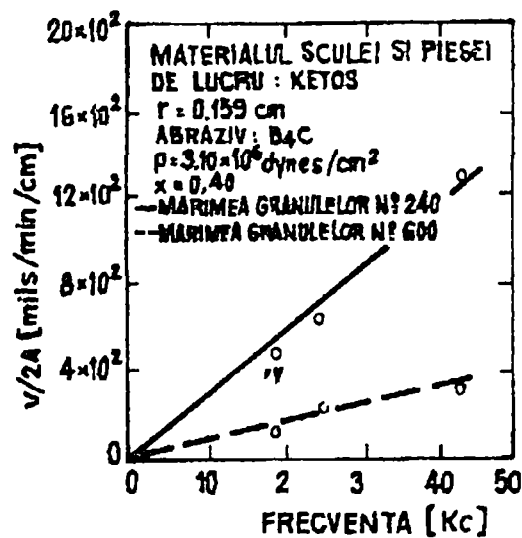


Fig. 3.5 Variația cap. de prod. în funcție de frecvență [MIL-1]

După obținerea acestui model matematic rezultatele experimentărilor executate de cercetător, au evidențiat dependența liniară a capacității de producție de d , A și f_0 așa cum reiese din figurile 3.3., 3.4. și 3.5..

Referitor la presiunea de contact, Miller constată că presiunea de contact influențează crescător valoarea capacității de producție iar de la o anumită valoare, aceasta rămâne constantă, indiferent de creșterea presiunii [MIL -1] conform fig. 3.6. Din această diagramă rezultă și faptul că presiunea optimă este invers proporțională cu dimensiunea sculei.

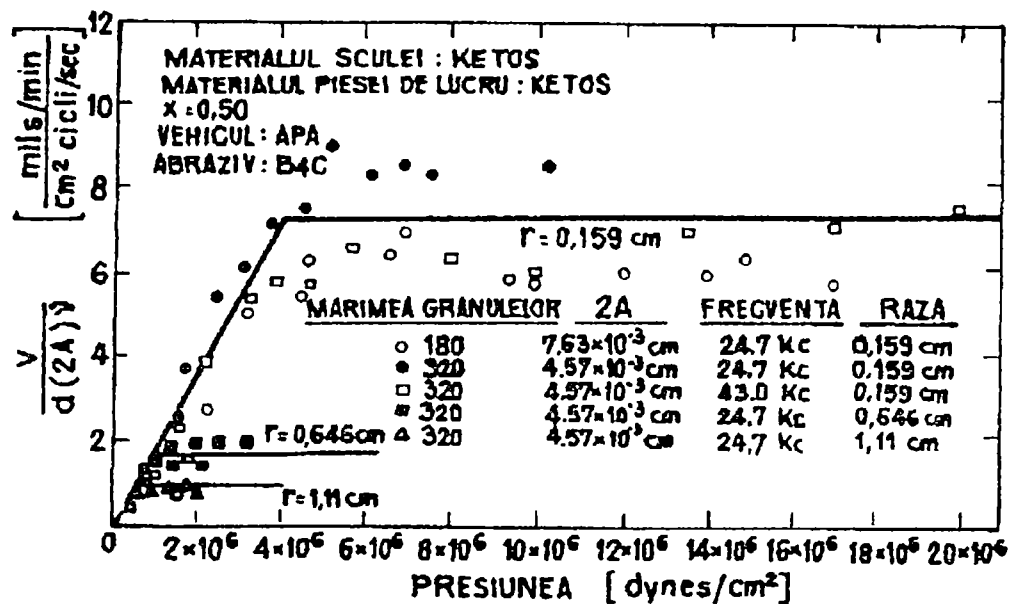


Fig. 3.6. Variația capacității de producție în funcție de presiunea de contact [MIL-1]

Rezultatele obținute de cercetătorul american corespund cu rezultatele încercărilor practice efectuate de noi, mai ales în ceea ce privește presiunea de contact.

Modelul „Markov” [MARK-2]

Modelul descris de Markov [MARK-2] pornește de la următoarele premize:

- scula oscilantă acționează asupra granulelor abrazive prin crearea unor accelerații foarte mari, producându-se acțiunea de șoc a granulelor asupra suprafeței de contact;
- scula oscilantă acționează printr-un șoc direct asupra granulelor, ceea ce produce „baterea” lor în suprafața de prelucrat.

Calculul preliminarilor au ilustrat că primul factor are un rol redus de circa 5%, efectul determinant avându-l cel de-al II-lea.

Ipotezele simplificatoare adoptate de cercetător pentru a crea modelul matematic al procesului sunt:

- particulele de abraziv atacă suprafața sculei și a piesei de prelucrat printr-un mecanism de lovire;
- la prelucrarea materialelor ductile, sunt necesare trei procese:
 - deformarea plastică;
 - ecruisarea;
 - spargerea;
- deformarea plastică este o funcție liniară de tensiune;
- particulele de abraziv au o formă perfect circulară;
- tensiunea de curgere plastică este determinată de produsul dintre modulul de frecare și vectorul lui Burger;
- aria secțiunii transversale a sculei nu se schimbă pe timpul prelucrării;
- efectul vâscozității ordinare în suspensia cu apa este neglijabil;
- pe măsură ce suspensia devine mai vâscoasă, factorul major de limitare care determină cantitatea suspensiei de sub sculă este “împiedicarea sterică”;
- sub o porțiune a suprafeței de lucru a sculei, există un vacuum, cel puțin o parte din timp.

Cercetătorul a constatat că eroziunea chimică și cavitația au o influență foarte mică în procesul de înlăturare a materialului de prelucrat.

Ținând cont de ipotezele simplificatoare adoptate, cercetătorul rus a pornit de la următoarea expresie matematică a energiei cinetice primită de granula abrazivă considerată o sferă de diametru “ d_a ”:

$$E_a = \frac{\pi^3}{12} \cdot \rho_a \cdot d_a^2 \cdot A^2 \cdot f^2 \quad (3.3)$$

Pe parcursul prelucrării pentru un material fragil dat, autorul consideră că productivitatea de prelucrare depinde de patru factori:

- volumul mediu al particulei depinde de dimensiunea și forma granulei abrazive și adâncimea de pătrundere (K1);
- numărul de granule pe unitatea de suprafață a sculei (K2);
- posibilitatea desprinderii particulei (K3);
- numărul șocurilor exercitate de sculă asupra granulelor abrazive, pe unitatea de timp.

Se pornește de la ipoteza că între sculă și piesă există o singură granulă abrazivă, cum se ilustrează în fig. 3.7 [MAK –3] asupra căreia acționează forța

$\frac{P}{n}$, unde:

P - forța maximă care acționează;

n - numărul granulelor abrazive active pe unitatea de suprafață.

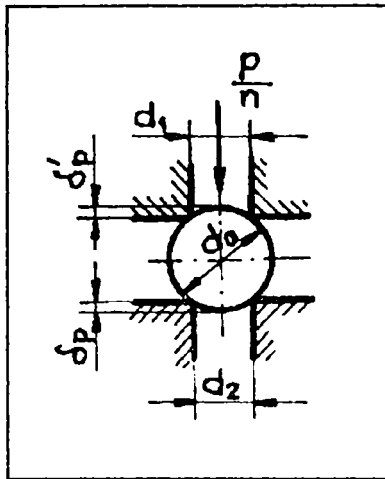


Fig. 3.7 Modelul fizic [MARK-2]

Introducând toate aceste ipoteze simplificatorii, în expresia matematică de calcul a productivității volumetrice a prelucrării, rezultă:

$$V = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \left(\frac{d_a}{l} \right)^{3/4} \cdot \left[\frac{4 \cdot A \cdot p}{K_2 \cdot \pi \cdot (1 + K_4)} \right] \cdot \frac{f}{d_a^{1/2}} \quad (3.4)$$

unde, în afara coeficienților explicitați:

ρ - raza de rotunjire a muchiiilor, granulelor abrazive;

K_4 - raportul între duritatea piesei și cea a sculei.

Prin relația stabilită, se constată că productivitatea prelucrării este proporțională cu frecvența și amplitudinea oscilației precum și cu presiunea statică, (toate la puterea 0,75) și invers proporțională cu greutatea specifică a abrazivului.

Modelul Kazantev [KAZ-1]

Modelul descris de Kazantev [KAZ -1], pornește de la următoarele ipoteze:

- suprafața activă a sculei se află într-o mișcare de oscilație în imediata vecinătate a piesei de prelucrat și în contact cu aceasta;
- scula vine în contact în prima etapă cu particulele mai mari de abraziv pe care le încrustează în fața piesei și în partea activă a sculei;

- când scula termină mișcarea, suprafața de prelucrare vine în contact cu un număr mai mare de granule, capacitatea de reacție a fiecărei granule crește și fiecare participă la distrugerea suprafeței de prelucrat.

În aceste condiții, forța totală F , care acționează asupra tuturor particulelor în contact cu piesa și scula (fig.3.8), are următoarea expresie:

$$F = N \cdot \int_x^{z_m} \Phi_{(z)} \cdot (Z - X) \cdot \Psi_z dz \quad (3.5)$$

unde: N - numărul de particule;

Z - înălțimea particulei abrazive, fig. 3.8 [Kaz -1] ;

Z_m - înălțimea maximă a particulelor abrazive;

Φ_z - funcția de distribuție a abrazivului în zona de lucru;

$Z - X$ - cea mai mare adâncime de încrustare a particulelor;

X - distanța medie de separație dintre sculă și piesă;

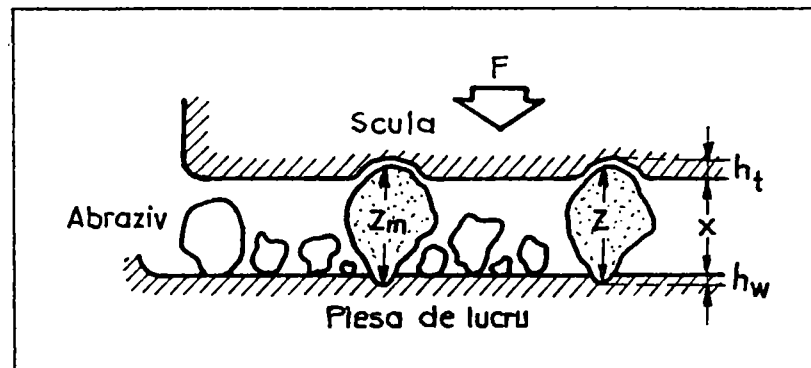


Fig. 3.8 Modelul fizic [KAZ-1]

Presupunându-se că distribuția concentrației abrazivului nu se schimbă pe parcursul prelucrării, productivitatea va avea următoarea expresie:

$$Q = C_{(z)} \cdot \left(\frac{\dot{m}}{N_0} \right)^{q_{(z)}} \cdot N_0 \cdot f \quad (3.6)$$

Valorile coeficienților $C_{(z)}$ și $q_{(z)}$ variază în funcție de z , conform diagramelor prezentate în figurile 3.9, a și b [KAZ -1].

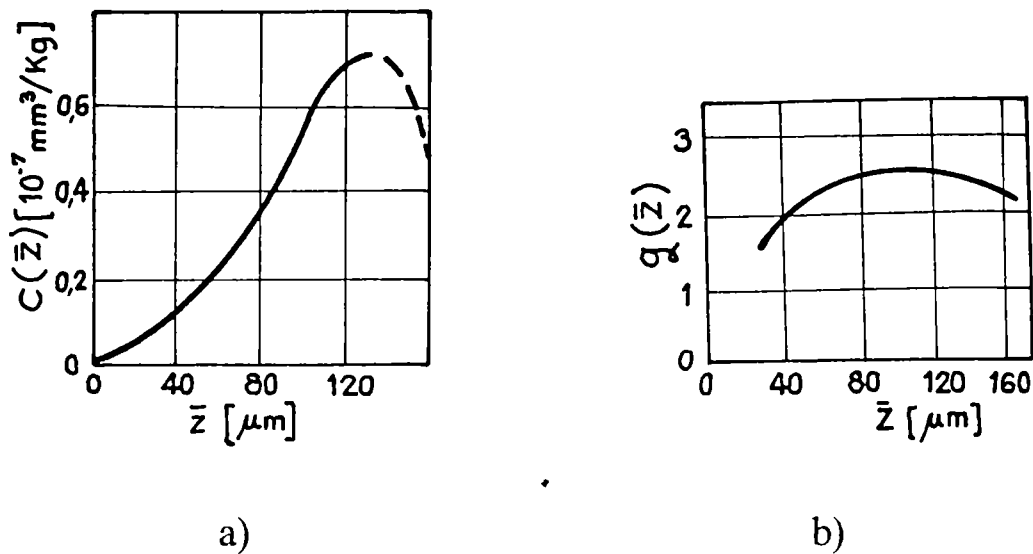


Fig. 3.9 Variația coeficienților $C_{(z)}$ și $q_{(z)}$ [KAZ-1]

a) Variația coeficientului $C(z)$

b) Variația coeficientului $q(z)$

Autorii au stabilit în urma experimentărilor executate o relație empirică între volumul de material prelucrat și îndepărtat V și forța medie de impuls, $V \cong F_{imp}^{2,5}$ (3.7), care este în concordanță cu rezultatele teoretice obținute.

S-a concluzionat de asemenea că, o forță de apăsare mai mare duce la micșorarea distanței între suprafețe, aceasta măbind adâncimea maximă de producere a fisurilor.

Pentru cazul particular al prelucrării sticlei, s-a stabilit că productivitatea este proporțională cu cubul tensiunii de vârf.

$$Q = \alpha \cdot T_m^3 \quad (3.8)$$

Tensiunea de vârf este direct proporțională cu amplitudinea oscilației și presiunea de contact.

Ca un rezultat al experimentărilor îl reprezintă relația empirică a vârfului de tensiune în cursul impactului:

$$T_m = K \cdot (\zeta_m^2 \cdot P_{ct})^{\frac{1}{3}} \quad (3.9)$$

K = constanta de proporționalitate care depinde de dimensiunile abrazivului și de proprietățile fizice ale sculei și obiectului de prelucrat;

ζ_m - amplitudinea vibrației;

P_{ct} - presiunea statică.

Variația tensiunii în funcție de cele două variabile este exemplificată în diagramele 3.10 și 3.11 [KAZ-1].

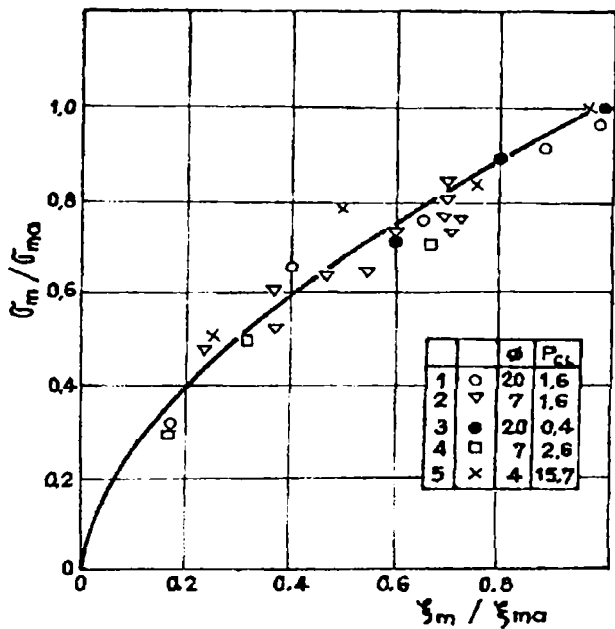


Fig. 3.10. Variația tensiunii funcție de ampl. vibrației [KAZ-1]

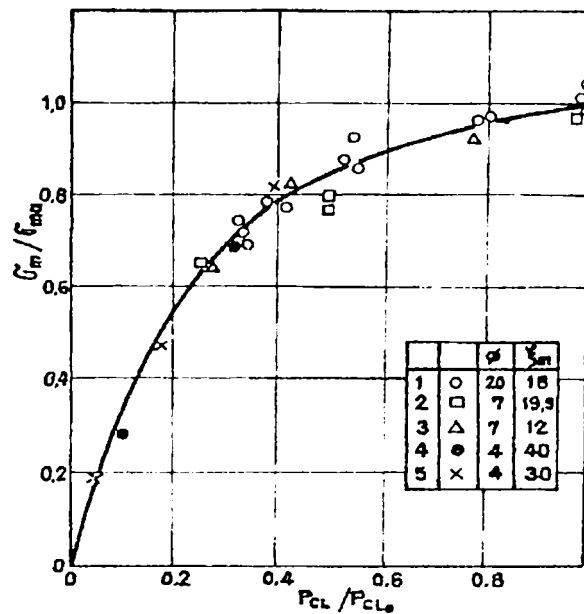


Fig. 3.11. Variația tensiunii funcție de presiunea statică [KAZ-1]

Aceleași valori au fost obținute și de alți autori prin diferite tehnici, ceea ce dă un suport experimental remarcabil.

Variația productivității în funcție de adâncimea de pătrundere poate fi exprimată sub forma $V = V_0 e^{\alpha h}$ (3.10) dacă $h > h_0$, unde V_0 și α depind de condițiile de prelucrare, iar valorile obținute experimental, sunt ilustrate în fig. 3.12 [KAZ-1].

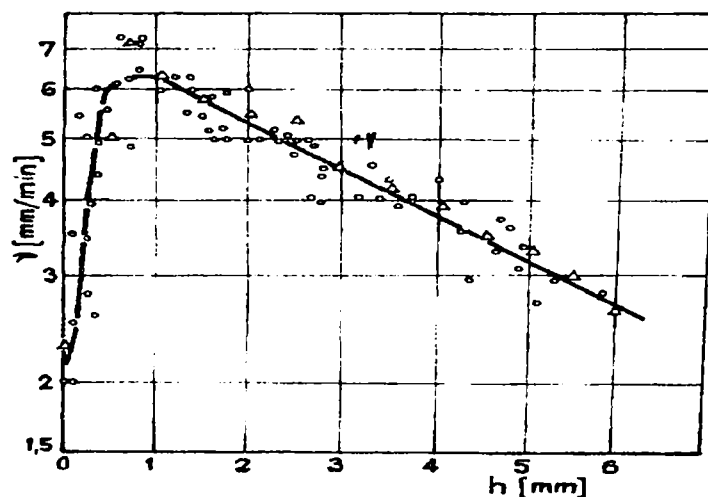


Fig. 3.12. Variația productivității funcție de adâncimea de pătrundere [KAZ-1]

Încercări de definire a mecanismului prelucrării cu ultrasunete și determinarea coeficienților de influență a principalilor parametri, amplitudinea oscilației, presiunea statică, frecvența oscilațiilor, dimensiunile și natura abrazivului utilizat sau adâncimea de prelucrare, au fost înregistrate la mai mulți cercetători [AUG-1], [KOP-2], [NEP-6] cu concluzii similare sau apropiate de cele rezultate din teoriile enumerate. Toți au ajuns la concluzia că parametri de bază ai prelucrării cu ultrasunete sunt frecvența și amplitudinea oscilațiilor, presiunea de contact și dimensiunile sau natura abrazivului utilizat.

În general, productivitatea prelucrării cu ultrasunete are forma generală:

$$Q = \Phi(f^m, A^n, p, K) \quad (3.10).$$

Asupra coeficienților „m” și „n” nu există încă o unitate de vederi, aceștia prezentând valori diferite de 0,75, 1 sau 2.

3.2 Analiza corelației proces-tehnologie-echipament de prelucrare cu ultrasunete [ICL-1], [ICL-2], [SAV-5].

Cercetările teoretice și experimentale efectuate la Politehnica din Timișoara în anii 1975 – 1985, au avut ca rezultat o serie de rezultate care au fost confirmate și prin realizarea unor mașini [MPU-01], [MFU-01], de prelucrat cu performanțe superioare, implementate în industrie (Timișoara, Zalău, București, Tg. Mureș)

S-a pornit de la considerentul că nu este necesară restudierea și implementarea altui model teoretic al procesului de prelucrare, deoarece modelele adoptate și fundamentate de predecesori au dus la rezultate mulțumitoare și destul de apropiate de rezultatele experimentale.

În acest context, studierea influențelor parametrilor menționați în toate teoriile enunțate, asupra desfășurării prelucrării cu ultrasunete s-a făcut experimental, insistându-se pe identificarea parametrilor optimi, pentru prelucrarea unor materiale bine individualizate.

Acest lucru s-a datorat în mare parte faptului că datele tehnologice în fiecare caz sunt raportate la utilaje cu caracteristici și posibilități diferite, ceea ce a dus la imposibilitatea de uniformizare a condițiilor și deci obținerea unor rezultate greu de comparat.

Ținând cont de toate aceste elemente, s-a considerat utilă, proiectarea și realizarea unui model experimental de mașină care să permită fundamentarea și adoptarea unei tehnologii corelate cu elementele constructiv-funcționale ale utilajului [MPU_{me}].

Pornindu-se de la suficiența modelelor Miller și Kazanțev, în care indicatorul principal urmărit a fost productivitatea prelucrării, s-a propus să se evalueze rolul parametrului presiune de contact în raport cu ceilalți parametri de prelucrare, considerând că acesta are influența hotărâtoare în construcția mecanismului de avans al unei mașini cu performanțe superioare.

Pentru actuala teză, prezintă interes, faptul că aceste cercetări preliminare au avut în vedere și efectul specific al formei sculei utilizate, investigându-se scule pline și scule tubulare. Investigația privind sculele tubulare sunt evident de interes major pentru obiectul actualei teze.

De asemenea, rezultatele prezintă un interes particular privind definirea caracteristicilor cinematice, care se impun la realizarea unui mecanism de avans adecvat, aspect de asemenea important pentru obiectul tezei de față.

Din multitudinea de aspecte studiate, ne vom opri asupra verificării experimentale a parametrului tehnologic de bază (p) și corelarea acestuia cu condițiile cinematice pentru sistemul de avans.

Parametrul tehnologic principal ce caracterizează sistemul de avans din punct de vedere al eficienței, este presiunea statică piesă-sculă. Numeroase cercetări au definit un domeniu optim între $0,5-4 \text{ daN/cm}^2$ cu depășiri până la 16 daN/cm^2 în cazul prelucrărilor de dimensiuni mici sub $\Phi 2 \text{ mm}$.

Parametrul presiune statică este astfel precizat uneori cu destulă incertitudine deși el influențează semnificativ eficiența și uneori chiar și calitatea prelucrării (mai ales la orificii pătrunse).

Presiunea statică este importantă nu numai din punct de vedere a **mărimii șocului transmis de granula abrazivă** la suprafața de prelucrat, dar și din punct de vedere al **menținerii granulei în suspensie sub sculă**, a **reîmprospătării cu suspensie și eliminarea produselor de eroziune** precum și a păstrării concentrației optime pentru prelucrare. Efectul presiunii statice asupra eficienței prelucrării este foarte complicat și încă necesită studii și cercetări particulare, mai ales în prelucrarea orificiilor adânci [SAV-5]. Se pare că eficiența prelucrării depinde aproape proporțional de valoarea presiunii statice până la o valoare optimă stabilită experimental, după care creșterea presiunii de contact ar urma o tendință de scădere mai mult sau mai puțin accentuată [MAR-2], [NEP-2], iar după alți autori, o tendință de a se păstra constantă [MIL-1]. Din păcate nu avem precizări prea clare în ce măsură judecarea acestui parametru s-a făcut sau nu în aceleași condiții ale parametrului k , adică $A = \text{const.}$ și $f = \text{const.}$

Pe măsura creșterii presiunii de contact în mod automat trebuie să admitem o reducere a valorii amplitudinii prin micșorarea traseului parcurs de scula în vibrație, evident cu consecințe în creșterea forței de impact și a energiei ce se transmite granulei abrazive, apoi o creștere a frecvenței de

rezonanță în sensul deplasării ei, creștere ce poate fi compensată la sistemul cu autoacordare și în mod normal e de așteptat o **modificare a parametrului k în sensul scăderii efectului său**, deoarece la creșterea presiunii, evident realimentarea cu suspensie abrazivă în spațiul de lucru devine mai dificilă.

Teoretic trebuie să admitem că valoarea presiunii statice este limitată superior, problema ce rămâne este de a vedea în ce măsură, această limitare corespunde cu limitele actual admise și în ce măsură această limitare este sau nu impusă și de alți factori ce pot apare în procesul de prelucrare (configurația sculei, suprafața, perimetru, etc.). Evident că și „p” este condiționată la rândul ei de valorile amplitudinii, de dimensiunea granulelor, de modul de alimentare, de mărimea suprafeței de prelucrat (la suprafețe mari abrazivul pătrunde greu sub sculă) și chiar de proprietățile materialului de prelucrat. Rezultă clar acest lucru din încercările efectuate de diverși autori, această interdependență fiind de altfel considerată normală. **Cea mai evidentă corelație** pare să fie cea **între A și p** constatându-se că odată cu creșterea amplitudinii poate crește presiunea.

Modul de variație al acestei dependențe este însă intens discutată și anume, după unii există o variație liniară [MIL-1], [MAR-2], iar după alții [NEP-2] ar reieși că la presiunea optimă, adică aceea care asigură eficiența maximă, amplitudinea diferă foarte puțin de valoarea pe care o atinge când presiunea este nulă. Nishimura [NIS-1] explică acest fenomen prin faptul evident că obținerea eficienței maxime depinde nu numai de întrebuințarea unei forțe mari de șoc care-i rezultatul indirect al presiunii, dar și de o amplitudine ridicată, necesară realizării agitării și reînnoirii graunților abrazivi. Această explicație este considerată mult mai temeinică și mai aproape de realitate, deși observațiile noastre asupra sculelor mici au pus în evidență și o tendință de așa zisă expulzare a suspensiei abrazive. Pe de altă parte, **perioada de durabilitate a abrazivului scade simțitor atunci când presiunea crește**, adică un motiv în plus ca să se lucreze în primul rând cu amplitudini mari de oscilație, care permit presiuni mari în condiții mai bune de circulație a abrazivului [KAZ-5], [KOP-2].

Cercetări efectuate de Kops, pe mașini de serie, au putut pune în evidență că presiunea optimă pentru care se obține o eficiență maximă, corespunde la o forță de izbire ceva mai mică decât forța maximă și cu o amplitudine cu puțin inferioară celei maxime.

Aceste observații, deși par cele mai apropiate de realitate, nu sunt pe deplin împărtășite de alți autori și cercetători. De altfel, așa după cum se va vedea, în domeniul stabilirii unei presiuni optime și a interdependenței presiunii cu ceilalți factori ai prelucrării apar interpretări uneori chiar eronate. Observând aceste dependențe, se constată că vârfurile de eficiență corespund de fapt, în ordine, unor presiuni de 3 daN/cm^2 și $2,66 \text{ daN/cm}^2$.

Aceasta ilustrează că de fapt viteza de prelucrare depinde de presiunea de contact și în mai mică măsură de aria suprafeței de prelucrare. De aici se pare că în realitate nu există o dependență a presiunii optime în raport cu aria de

prelucrare. În situația de față putem atribui valori diferite de viteze de prelucrare datorită unor condiții eventual diferite de menținere și reîmprospătare a suspensiei abrazive sub sculă, mai ales la suprafețe mari de prelucrare. Aceasta confirmă de fapt variația aproape liniară a eficienței cu presiunea de contact, până în jurul valorii de 4 daN/cm^2 . Ținând cont de acest lucru, putem spune că sunt în mai mică măsură confirmate, ipotezele potrivit cărora, „ p_{opt} ” ar fi invers proporțională cu raza sculei : ($p_{\text{opt}} = k \cdot 1/R$).

În realitate trebuie urmărit aspectul menținerii și recirculației agentului eroziv sub sculă.

Acest lucru este de fapt confirmat și de încercările experimentale efectuate la „ Politehnica” din Timișoara [SAV-5], pe un set de scule tubulare începând de la scula plină, până la scula cu pereți subțiri. Astfel, s-a demonstrat că variația suprafeței, nu poate să influențeze decât în foarte mică măsură eficiența prelucrării.

Factorul ce influențează hotărâtor eficiența prelucrării este valoarea presiunii de contact. Tot în literatură se constată că la prelucrarea materialelor mai dure, cum sunt aliajele ceramice dure, presiunea optima de prelucrare crește [MAR-2], [SAV-2], [ROZ-4].

În concluzie, pentru prima etapă observăm că existența unei valori optime a presiunii statice este explicată prin stabilirea celei mai avantajoase distanțe, între piesa de prelucrat și scula care ne dă adâncimea optimă de penetrație a abrazivului, precum și cele mai bune condiții de circulație a suspensiei sub sculă. În acest context, forța de impact ar trebui să fie atât de mare, pe cât este posibil. S-au pus în evidență două procese diferite și anume:

- creșterea presiunii statice astfel încât, să nu suprimă sau să atenueze vibrația, ceea ce duce la creșterea forței de impact și a adâncimii de penetrație a granulelor abrazive (care în final conduc la o creștere a cantității materialului prelevat);

- creșterea presiunii prin reducerea distanței dintre piesă și sculă, impune restricții la reîmprospătarea abrazivului și îndepărtarea produselor eroziunii [MAR-2].

Granulele abrazive din zona prelucrării sunt distruse în câteva secunde de scula ce vibrează, iar absența abrazivului proaspăt reduce viteza de prelucrare. Rezultatele experimentale confirmă acest lucru. Cu o sculă de diametru mic condițiile de circulație a abrazivului sunt foarte bune primul mecanism predominând. Forța de impuls ar trebui să crească pe cât posibil, astfel încât creșterea adâncimii pătrunderii granulei de abraziv să ducă la creșterea eficienței. Oricum, în acest caz, presiunea statică „ p_{opt} ” are un maxim destul de ridicat. Se pare că aceasta este explicația datorită căreia unii autori consideră valoarea optimă de 16 daN/cm^2 . [MAR-2].

Pe de altă parte, la sculele cu Φ mare (suprafață mare) cel de al doilea factor devine important. Condițiile optime, în această situație când distanța

centru-periferie e mai mare, conduc la valori mai mici ale lui „ p_{opt} ”, condițiile pentru circulația abrazivului fiind mai grele, acest lucru impunând creșterea numărului granulelor de abraziv ce pot acționa efectiv.

În condițiile unei circulații cu absorbție, sau retrageri intermitente ale sculei, acest efect este diminuat astfel că se poate considera mai departe primul efect ca fiind cel predominant și deci valoarea optimă a presiunii trebuie să se situeze la valori de vârf.

În proiectarea sistemului de avans s-a avut în vedere în primul rând realizarea unui asemenea sistem care să fie cât mai convenabil prelucrării din acest punct de vedere. Se pare că sistemul de avans intermitent în care presiunea de contact variază, fiind mare la început și scăzând într-un ciclu de prelucrare în limitele stabilite, urmată de o reîmprospătare periodică, ar fi sistemul convenabil.

O altă observație se referă la faptul că la creșterea raportului numărului de particule abrazive de la periferie/suprafață, când suprafața este constantă, condițiile de circulație se îmbunătățesc, iar „ p_{opt} ”, crește. Această teorie se impune însă a fi verificată.

Pentru confirmarea supozițiilor anterior prezentate, s-a recurs la o serie de încercări experimentale, chiar pe modelul de mașină proiectat și realizat ca prototip [MPU_{me}], care în mare măsură au confirmat cele anterior prezentate [ICL-1].

Astfel, s-a pornit de la ideea că se poate admite ca valabilă ipoteza formulată de Adithan și Kazanțev, potrivit căreia în prelucrarea ultrasonică a orificiilor circulare străpunse sau înfundate, de o anumită valoare a diametrului, și-ar fi dovedit eficacitatea prelucrării sculelor tubulare în locul celor pline. Ideea în sine a fost confirmată și de încercările executate, dar interpretarea rezultatelor diferă de cele ale altor autori și chiar esențial în anumite privințe.

Se remarcă faptul că aceste încercări au confirmat tocmai că eficiența prelucrării este în directă legătură cu presiunea și nu cu factorul de formă al sculei. Au apărut chiar unele constatări surprinzătoare față de care însă ne exprimăm rezerva, având în vedere numărul relativ redus de încercări și care de fapt cer confirmare experimentală mult mai substanțială.

În cele ce urmează se prezintă modul de lucru și interpretarea acestor rezultate experimentale.

La sculele tubulare cercetătorii admit că există cel puțin 2 factori de bază, care determină ca viteza prelucrării „ v ”(mm/min), adâncimea prelucrării „ h ”(mm) și uneori chiar și capacitatea productivă „ Q ”(mm³/min) să fie mai mari decât la sculele pline. Sculele tubulare permit o mai ușoară reîmprospătare a locului prelucrării cu suspensie abrazivă și eliminarea produselor de eroziune, astfel că între viteza de fărâmițare a materialului și viteza de înlocuire a abrazivului se realizează mai ușor condiția egalității.

În al doilea rând, apare evident faptul că la aceeași valoare a capacității productive „Q”, sculele tubulare vor permite o viteză „V” și o adâncime „H” mai mari. Acest lucru e remarcat de fapt și în lucrările unor autori [ADI-1], [KAZ-6], în care însă nu sunt făcute suficiente precizări privind rolul presiunii de contact piesă-sculă și rolul adâncimii de pătrundere a sculei, elemente care în cazul unei alimentări cu suspensie abrazivă prin simpla stropire, pot fi hotărâtoare. Având în vedere aceste considerente, s-au făcut un număr mare de încercări pe plăci de sticlă de 8 mm grosime (sticla fiind materialul cel mai semnificativ al prelucrării ultrasonice) cu o suspensie abrazivă de carbură de bor cu o concentrație volumică de circa 50%, granulație 40, aplicată prin stropire. Sculele utilizate au avut dimensiunile $\Phi_{ext}=10$ mm și $\Phi_{int} = 2,4,6,8,9$ mm, la o lungime de 10 mm fiind confecționate din OSC 10 și atașate concentratorului prin înșurubare. Pentru toate încercările, amplitudinea oscilației a fost păstrată constantă. S-au obținut o serie de rezultate ce au impus interpretarea lor.

Urmărind adâncimea de pătrundere H (fig. 3.13) după 3 minute de prelucrare, se constată că valoarea maximă atinsă, se obține indiferent de mărimea forței de avans pentru scula tubulară având factorul de formă $d/D=0,6$. Totodată, se constată că adâncimea de pătrundere crește cu mărirea forței de avans și scade substanțial pentru sculele tubulare subțiri, caracterizate de factorul de formă, $d/D > 0,6$.

Urmărind pentru aceeași durată de prelucrare (fig. 3.14) cantitatea de material îndepărtat „Q”, se constată că aceasta este maximă pentru scula cu factorul de formă $d/D=0,6$ doar în cazul forțelor de avans de 0,5 daN și 1 daN. În cazul forței de avans de 2 daN, valoarea maximă a cantității de material înlăturat se deplasează în dreptul sculei cu $d/D=0,2$.

În privința volumului de material detașat „Q”, după o prelucrare de 5 minute, se constată că valoarea maximă se păstrează pentru scula cu $d/D=0,6$ doar în cazul unei forțe de avans mică (0,5 daN), iar pentru forțele de avans de 1 daN, 2 daN și 3 daN, valoarea maximă se manifestă pentru sculele cu $d/D=0,4$; $d/D=0,2$ și respectiv $d/D=0$ (fig. 3.15) și în cazul unei prelucrări de 7 minute la o forță de avans de 3 daN valoarea maximă a lui Q se produce pentru scula cu $d/D < 0,2$ practic pentru scula plină (fig. 3.16).

În toate cazurile însă, se constată scăderea adâncimii de prelucrare „H” pentru sculele cu $d/D > 0,6$ și mai ales scăderea accentuată a cantității de material înlăturat „Q” pentru aceste scule.

Aceste constatări par să fie în contradicție cu cercetările experimentale anterioare, însă rezultatele obținute trebuie puse în concordanță cu parametrul tehnologic principal, presiunea de contact „p” dintre piesă și sculă. Urmărind punctele de maxim de pe curbele $H=f(d/D)$ și „Q”= $f(d/D)$ din figurile 3.13, 3.14, 3.15 și 3.16, se constată că de fapt acestea corespund unor valori ale presiunii de contact cuprinse între 1 și 4 daN/cm². Aceasta ne face să tragem concluzia că de

fapt nu reîmprospatarea și circulația abrazivului, deci implicit forma tubulară a sculei, este factorul determinant în prelucrare, ci presiunea de contact.

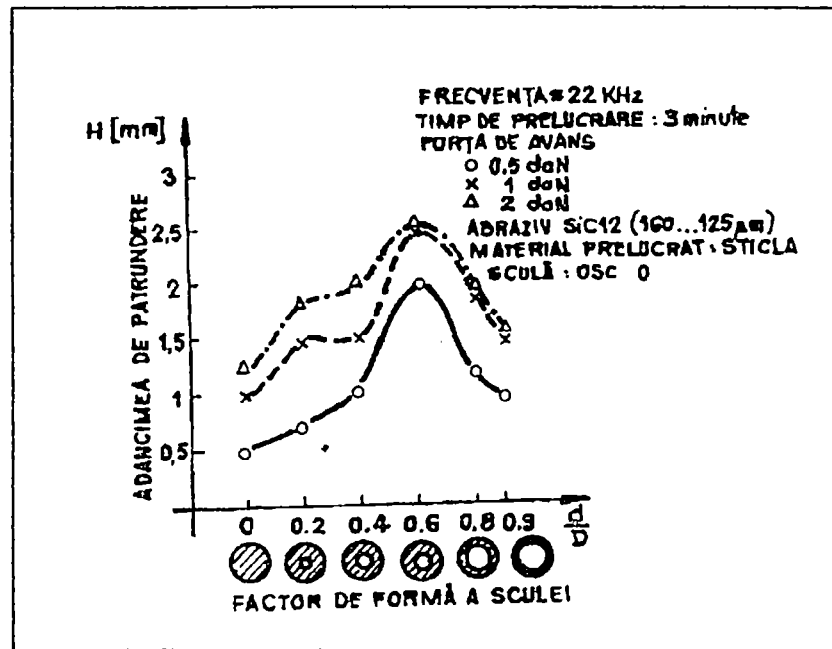


Fig. 3.13 Variația adâncimii de pătrundere în funcție de factorul de formă al sculei după 3 minute de prelucrare [SAV-5]

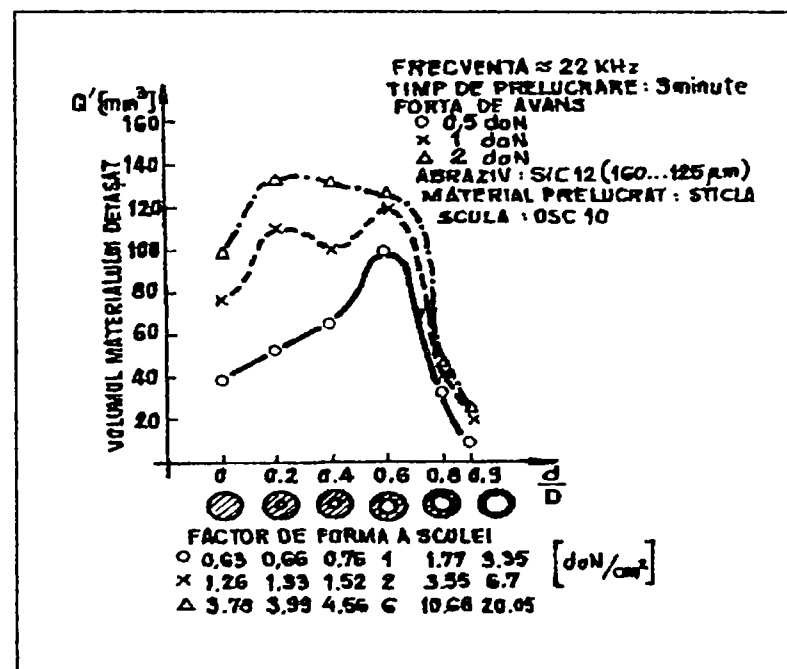


Fig. 3.14. Influența factorului de formă asupra volumului materialului detașat după 3 minute de prelucrare [SAV-5]

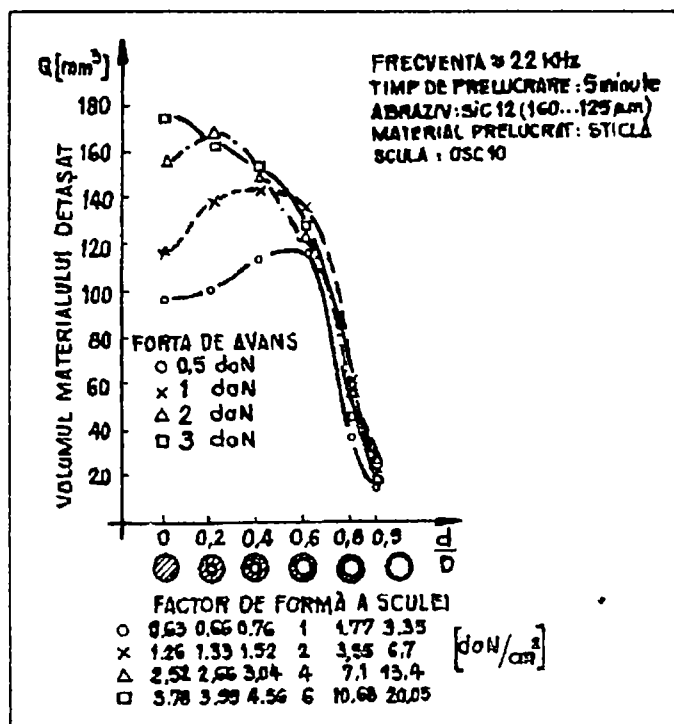


Fig. 3.15. Influența formei sculei asupra volumului de material după 5 minute de prelucrare [SAV-5]

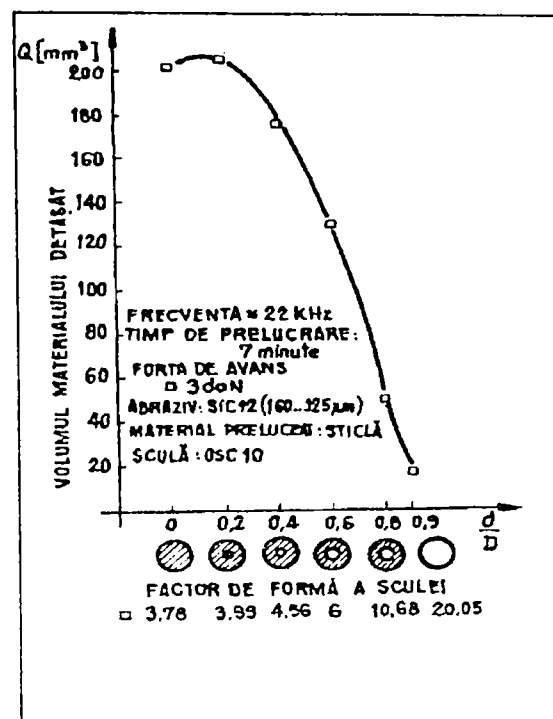


Fig. 3.16. Influența formei sculei asupra volumului de material după 7 minute de prelucrare [SAV-5]

Doar în cazul sculelor cu $d/D > 0,6$ se constată valori reduse ale „H” și „Q”, chiar și la presiuni de contact între 1 și 4 daN/cm², ceea ce ne face să considerăm că la aceste scule există tendința de expulzare a suspensiei abrazive cu creșterea adâncimii de prelucrare, datorită câmpului acustic puternic.

Surprinzător, sculele pline execută prelucrări în condiții mai bune și la adâncimi mai mari. Într-o primă aproximare, putem să acredităm ideea că la sculele tubulare cu $d/D > 0,6$ mai există o tendință de “expulzare” a abrazivului, pe când la sculele pline se pare că există o confirmare indirectă la teoria lui Miller, potrivit căreia, prelucrarea avânsează sub forma unui inel de la marginea sculei către centru, lucru care ar putea favoriza o bună reîmprospătare cu suspensie abrazivă. Rezultă deci că sculele tubulare cu $d/D < 0,6$ pot fi avantajoase doar în cazul unor prelucrări de grosimi mici ($H < 1$ mm). Pentru $H > 1$ mm prelucrarea este avantajoasă, doar cu sisteme de reîmprospătare a suspensiei abrazive, prin retragerea intermitentă a sculei, sau prin absorbție prin sculă.

În urma analizării acestor experimentări, rezultă că factorul tehnologic principal ce determină eficiența prelucrării este presiunea de contact „p” a cărei valoare „p_{opt}” este de 1 la 4 daN/cm².

Depășirea limitei de 4 daN/cm² duce la o scădere lentă a capacității productive. Pe de altă parte, rezultă că **forma și dimensiunile sculei nu constituie un factor tehnologic**, ea acționând prin intermediul presiunii de contact „p” și a lui „k” caracteristica suspensiei și a modului de alimentare ce acționează în ecuația productivității prelucrării

$$Q = \Phi(f, A, p, k). \quad (3.11)$$

S-au impus și unele concluzii colaterale și anume că **pentru prelucrările ultrasonice cu stropire a suspensiei, sculele cele mai avantajoase sunt cele cu raportul $d/D=0,6$** , pe când sculele tubulare cu pereți subțiri sunt dezavantajoase și duc chiar la înrăutățirea suprafeței prelucrate.

În cazul prelucrărilor de profunzime, dacă se asigură condiții bune de circulație, chiar sculele pline pot fi avantajoase.

CONCLUZII

1. *Deși inițial mulți cercetători care au studiat procesul prelucrării cu ultrasunete, au atribuit un rol esențial cavitației, această ipoteză s-a dovedit a fi lipsită de temei;*
2. *Modelele adoptate de diferiți cercetători, însoțite de ipoteze simplificatoare, au condus la concluzii asemănătoare, în ceea ce privesc parametrii de influență ai prelucrării, ca și ponderea acestora;*
3. *Se remarcă influența hotărâtoare a presiunii de contact sculă-piesă, care se dovedește a fi optimă în intervalul $1-4 \text{ daN/cm}^2$, alături de caracteristicile fizico-chimice ale abrazivului și modul de alimentare cu acesta a spațiului de lucru;*
4. *Presiunea este limitată inferior de imposibilitatea executării prelucrării și superior, de caracteristicile mecanice ale materialelor sculelor, modalitatea de alimentare cu suspensie abrazivă, dimensiunile sculelor, precum și posibilitatea atenuării vibrațiilor;*
5. *Spre deosebire de perioada anilor 1950-1970, perioadă în care procesul prelucrării se studia pur teoretic și se verifica pe baza experimentărilor efectuate, în prezent se insistă pe realizarea de modele experimentale care să permită corelarea unor tehnologii de prelucrare cu elemente constructiv-funcționale ale echipamentelor, în scopul obținerii unor eficiențe sporite ale prelucrării;*
6. *Tendința inițială de apreciere a prelucrării cu ultrasunete prin capacitatea productivă Q_v , a fost înlocuită în ultima vreme cu un complex de indicatori în care cei de calitate a suprafețelor obținute și precizie de execuție dimensională și de formă sunt prioritari;*
7. *Din experimentările recente se constată că adâncimea de pătrundere scade substanțial pentru sculele tubulare subțiri. Sculele pline execută prelucrări la adâncimi mai mari în condiții mai bune;*
8. *Cele mai avantajoase scule tubulare pentru prelucrarea cu ultrasunete, cu suspensie abrazivă, a cărei alimentare se face prin stropire, sunt cele cu rapoarte $d/D=0,6$.*

Capitolul 4

4. STUDIU DE SINTEZĂ PRIVIND CONSTRUCȚIA ȘI FUNCȚIONALITATEA MAȘINILOR DE PRELUCRAT CU ULTRASUNETE

Prelucrarea cu ultrasunete se utilizează cu o eficiență deosebită, la materialele dure și fragile, adică exact în domeniul în care prelucrările tradiționale și chiar cele neconvenționale nu dau rezultate satisfăcătoare.

În urma stabilirii influențelor hotărâtoare ale parametrilor prelucrării asupra eficienței sale pe de o parte și a obținerii preciziei de prelucrare și calității suprafeței, pe de altă parte, realizatorii tehnologiilor de prelucrare au avut de rezolvat o serie de probleme legate de:

- generatorul de ultrasunete;
- transductorul;
- concentratorul adaptor de undă;
- scula;
- adoptarea celor mai eficiente sisteme de comandă și control;
- adoptarea mecanismului de avans;
- adoptarea sistemului de alimentare cu suspensie abrazivă.

•

4.1. Generatoare de ultrasunete

Generatoarele de înaltă frecvență reprezintă sursa primară de energie și realizează transformarea curentului electric de frecvență industrială, în curent de înaltă frecvență, în scopul alimentării transductoarelor ultrasonice. Sunt construcții electronice concepute a funcționa:

- fie pe principiul generării și amplificării de semnal sinusoidal,
- fie pe principiul comutației,

astfel încât, pe baza energiei electrice absorbite să genereze la ieșire tensiune sau curent de intensități mari la frecvențe stabile de oscilație ultrasonică. Din punct de vedere al posibilităților de variație a parametrilor semnalului de ieșire, generatoarele de ultrasunete pot fi:

- de frecvență nominală fixă, având totuși posibilitate de semireglaj a frecvenței într-o plajă îngustă de valori pentru compensarea alunecării de frecvență și acordarea pe frecvență de rezonanță a convertorului. Gama de aplicații posibile este limitată, de aceea se folosesc convertoare care au frecvența de rezonanță apropiată de frecvența nominală de lucru a generatorului :

- de frecvență variabilă, cu posibilitatea de reglaj a frecvenței într-o plajă largă de valori, acoperitoare pentru o gamă variată de aplicații.

În echipamentele ultrasonice industriale se utilizează, de obicei, generatoare cu reglare automată a frecvenței pe frecvența de rezonanță a transductorului.

Odată cu dezvoltarea studiilor teoretice privind prelucrarea cu ultrasunete a materialelor dure și fragile, generatoarele de ultrasunete au suferit o serie de transformări.

În mod uzual, diversele echipamente tehnologice utilizează generatoare de înaltă frecvență, lucrând de obicei în următoarele domenii de frecvență:

- 20 kHz. $\pm 7,5\%$

- 40 kHz. $\pm 10\%$

Aceste generatoare permit reglarea frecvenței pentru acoperirea domeniilor de frecvență necesare procesului. În unele cazuri, la experimentările pe instalații tehnologice la care este necesară o reglare a parametrilor de ieșire într-o plajă largă, se folosesc generatoare universale cu posibilități mai mari de modificare a frecvenței.

Aplicațiile ultrasunetelor s-au dezvoltat multă vreme ca urmare a efectelor tehnice particulare ale acestora, în comparație cu alte procedee.

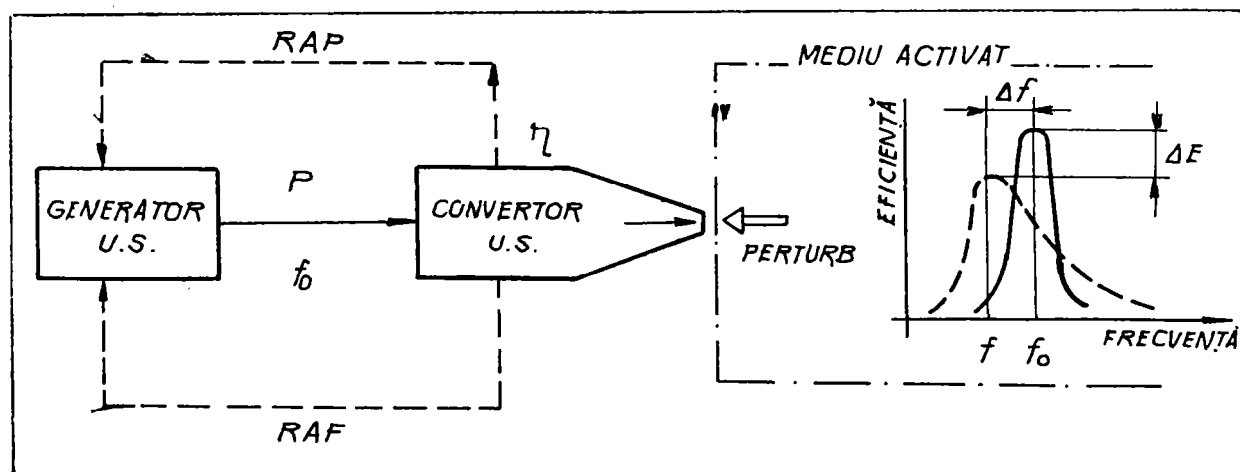
Aceste efecte rezultau în majoritatea cazurilor din concentrarea energiei în spațiul tehnologic.

Astfel, inițial, se considera că se poate ajunge la productivități sporite numai prin creșterea puterii. Acest lucru a dus la consumuri nejustificat de mari, de cele mai multe ori rezultatele prelucrărilor nefiind cele dorite. Această tendință, manifestată mult timp de către constructori, s-a dovedit inacceptabilă, deoarece efectele secundare ca: disiparea puterii, încălzirile puternice, tensiunile mecanice care apar în sistem, devin prea importante, diminuând raportul global - *efecte tehnice obținute/energie consumată*.

Ulterior, s-a ajuns la concluzia că alegerea corectă a valorii capacității separatoare și a filtrului „oprește banda”, constituie unul din principalele elemente ale adoptării mărimilor de ieșire din generator pentru obținerea regimului dorit de executare eficientă a prelucrării [ICL-2]. Astfel, s-a ajuns la concluzia utilizării generatoarelor în funcție de condițiile de prelucrare impuse piesei finite.

În cazul pieselor care fac obiectul tezei de doctorat, s-a ales un generator de 100 w, care asigură suficientă putere realizării experiențelor. Creșterea nejustificată a puterii poate avea ca efect părăsirea domeniului de funcționalitate liniară și de apariție a saturațiilor sistemului convertor (transductor-concentrator), elemente care afectează negativ eficiența prelucrării. Efectul perturbațiilor este complex, insuficient elucidat, dar în mod evident diminuator al randamentului electroacustic.

Sistemele tehnologice cu ultrasunete, fie că se definesc în mașini, fie în dispozitive, pot fi prezentate în esență ca o structură funcțională electromagnetică în regim de rezonanță, redată schematic în figura 4.1.



4.1. Schema bloc a unei instalații tehnologice cu ultrasunete

Un generator de ultrasunete electronic, furnizează energie la puteri $P=50-2500W$, pe frecvența de rezonanță f_0 de 20 sau 40kHz., pentru funcționarea ansamblului la un randament electroacustic maxim posibil.

Cu excepția sistemelor ultrasonice de curățire și activare a unor lichide, transferul de energie către mediul activat se face prin concentrarea energiei ultrasonice. Sistemul rezonant este supus din partea mediului activat la reacții perturbatoare, dintre care cele mai importante sunt:

- amortizările datorită presiunilor de contact;
- disiparea energetică datorită cuplajului mecanic defectuos (dezacordul impedanțelor);
- reflexii ale mediului, însoțite de atenuări;
- modificări ale caracteristicilor mediului (temperatură, vâscozitate, dimensiuni).

Reacțiile perturbatoare conduc la modificarea curbei de rezonanță cu deplasări ale frecvenței, însoțite de scăderi ale eficienței, chiar până la încetarea funcționării în regim rezonant. Echipamentele moderne compensează total sau parțial funcție și de natura aplicației, efectul perturbațiilor din sistemele RAF (acord automat al frecvenței de rezonanță) și RAP (acord automat al puterii emise) restabilind măcar în parte performanțele de exploatare ale sistemului, dar ridicând costul echipamentului ultrasonic.

Generatoarele de înaltă frecvență sunt caracterizate de:

- caracteristici electrice;
- caracteristici neelectrice.

Caracteristicile electrice sunt frecvența de lucru, puterea de ieșire, randamentul, stabilitatea și precizia de reglare a frecvenței și asigurarea stabilității amplitudinii oscilațiilor mecanice.

Caracteristicile neelectrice se referă la particularitățile constructive ale generatorului.

În echipamentele industriale se utilizează, de obicei, generatoare cu reglare automată a frecvenței de rezonanță a transductorului. Aceste tipuri de generatoare permit obținerea de valori maxime ale oscilațiilor transductorului. Schema bloc a unui astfel de generator este prezentată în figura 4.2.

Reglajul frecvenței trebuie să asigure o apropiere maximă a frecvenței generatorului (f_0) de frecvența de rezonanță a transductorului (f_0), iar diferența:

$$\Delta f = f_0 - f_0 \quad (4.1)$$

să nu scoată din rezonanță sistemul acustic.

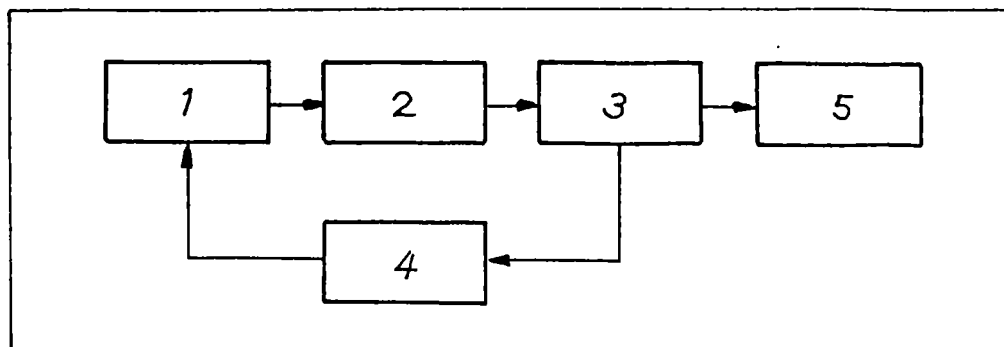


Fig. 4.2. Schema bloc a generatorului

- 1 oscilator comandat;
- 2 amplificator de putere;
- 3 transductor;
- 4 circuit de reacție;
- 5 zona de lucru.

În practică prezintă interes raportul în care se află amplitudinea oscilațiilor transductorului A_0 , la frecvența de rezonanță, față de valoarea ei admisibilă, A_{adm} .

$$K_{adm} = \frac{A_{adm}}{A_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2 \cdot \Delta f_{adm} Q \cdot 1 \cdot f_0^2)}} \quad (4.2)$$

în care:

Q- factor de calitate al sistemului mecanic al transductorului;

f_{adm} - diferența admisibilă de frecvență între cea a generatorului și cea de rezonanță a transductorului.

La generatoarele destinate echipamentelor de prelucrare

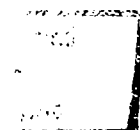
$$K_{adm} = \pm(1-5) \cdot 10^2 \quad (4.3.)$$

În proiectarea generatoarelor de înaltă frecvență se ține cont de transductoarele pe care urmează să le alimenteze. Generatoarele de putere, de înaltă frecvență, prezintă o mare varietate tipodimensională pe plan mondial. Astfel, în funcție de transductorul pe care debitează, acestea pot fi „generatoare pentru sarcină inductivă” (transductor magnetostrictiv), sau „generatoare pentru sarcină capacitivă” (transductor piezoceramic).

Generatoarele utilizate de diverse firme constructoare de echipamente cu ultrasunete, diferă în general, prin modul de cuplaj a sarcinii și prin tensiunea aplicată ei.

În funcție de modul de lucru, există trei tipuri constructive de generatoare:

- a) generatoare cu excitație separată;



- b) generatoare cu autoexcitație;
c) generatoare cu reacție pozitivă de mișcare.

La rândul lor, aceste scheme de bază pot lucra în regim sinusoidal sau în comutație. Pentru obținerea unor puteri mari în sarcină, etajele finale pot fi semipunte sau punte.

În tabelul 4.1. sunt prezentate caracteristicile generatoarelorde ultrasunete realizate în țară, la întreprinderea „ELECTROTIMIȘ” din Timișoara.

Tabelul 4.1

Nr. crt.	Caracteristici/Tip generator	Electroson 01m	Electroson 500	GUSP-100/40
1	Frecvența nominală a semnalului de ieșire	15-25 kHz. (ajustabilă)	38-44 kHz. (reglabilă)	25 sau 40 kHz (ajustabilă)
2	Puterea electrică de activare ultrasonică	85-350 W (reglabilă)	45-90 W (comutabilă)	Max. 50 W (reglabilă)
3	Tip de sarcină	Transduct. MagnStr cu prepolariz. Magn proprie	-	Transductori Electrostrictivi (piezoceramici)
4	Caracterul impedanței de sarcină	Inductiv (15-30mH)	Capacitiv (3,6-4,8 nF)	Capacitiv (3,6-28,8 nF)
5	Sarcina maximă (numărul de transductori)	7 buc.-ferite tip FN-1	1 buc. TGUS 150/40	6buc. TGUS 150/40 sau 100/25
6	Tensiunea de alimentare	220V _{ca} +PE; 50Hz.	220V _{ca} +PE; 50Hz	220V _{ca} +PE; 50Hz
7	Puterea electrică maximă absorbită de la rețea	650 W	250 W	750 W
8	Dimensiuni de gabarit:-Lungime -Lățime -Înălțime	375 mm. 390 mm. 150 mm.	438 mm. 362 mm. 150 mm.	375 mm. 390 mm. 150 mm.
9	Masa netă	19 Kg	15 Kg	21 Kg

4.2. Convertoare ultrasonice

Convertorul ultrasonic este definit ca ansamblul format din transductor-concentrator adaptor de undă și sculă.

Convertorul ultrasonic realizează transferul de energie ultrasonică necesară prelucrării, de la generator la piesa de prelucrat, astfel încât în mare măsură performanțele unei mașini de prelucrat cu ultrasunete depind de modul de dimensionare, construcție și adaptare la structura cinematică a mașinii. Convertorul ultrasonic este format dintr-un element activ, transductorul și un element pasiv, transformatorul acustic sau

concentratorul, care are rolul de a transmite sculei vibrațiile elastice ale transductorului. Totodată, prin intermediul concentratorului se asigură protejarea transductorului și legătura cu scula. Ansamblul astfel format, transductor-concentrator-sculă, se montează în zona nodală pe structura de bază a mașinii. Câteva din schemele de montaj realizabile pentru convertor și folosite în diverse construcții de mașini ultrasonice, sunt redată în figura 4.3.

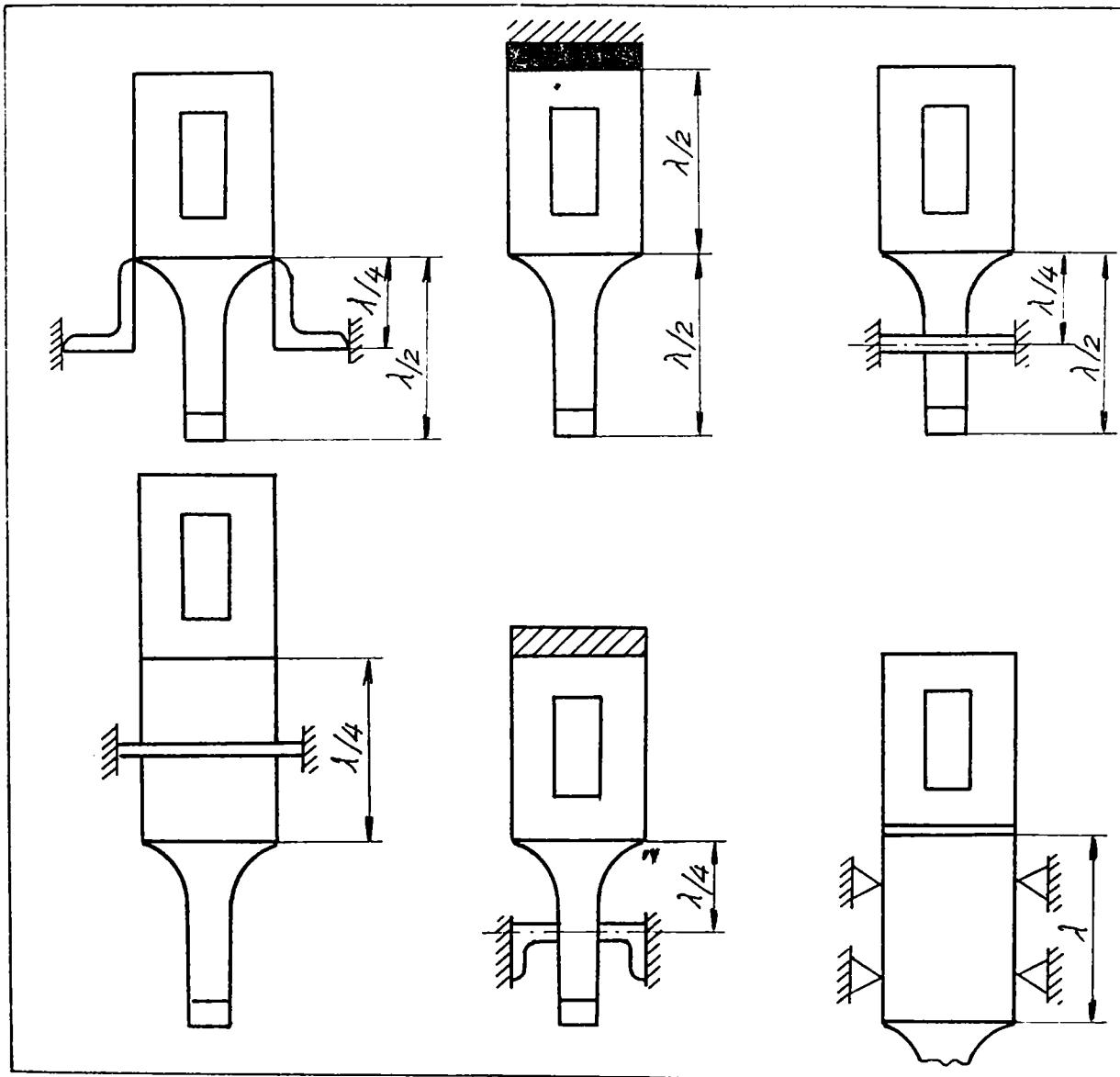


Figura 4.3. Scheme de montaj pentru convertoare [ICL-1]

La adoptarea uneia dintre ele trebuie să se aibă în vedere două condiții esențiale:

- să fie suficient de rigide pentru a asigura precizia cinematică și de prelucrare a mașinii;
- să fie astfel realizate, încât să ducă la pierderi minime de energie.

Principalele probleme care se cer rezolvate privind convertorul ultrasonic se pot rezuma la următoarele:

- decizia adoptării transductorului de tip magnetostrictiv sau de tip electrostrictiv;
- dimensionarea elementelor componente pe frecvența de rezonanță;
- alegerea schemei de montaj în carcasă și izolarea acustică;
- adoptarea corectă a sculelor;
- realizarea ajustărilor necesare pentru funcționarea cât mai corectă la rezonanță.

$$Q = \phi(f^m, A_n, p, k) \quad (4.4.)$$

Se remarcă din expresia 4.4. că, deși fiecare variabilă reprezintă de fapt factorii tehnologici de bază ai prelucrării ultrasonice, aceștia pot fi asociați foarte bine unor subansambluri specifice mașinilor de prelucrat cu ultrasunete.

Astfel, se impune ca însăși construcția acestor subansamble să fie orientată în direcția realizării valorii optime impuse sau cerute pentru acești parametri. În felul acesta, parametrii amintiți devin elemente inițiale în proiectarea și construcția utilajului.

Parametrul frecvenței „f” poate fi asociat generatorului de ultrasunete „G” în primul rând și în al doilea rând transductorului. Cum însă transductorul se dimensionează pentru o frecvență fixă (frecvența de rezonanță), considerăm că „f” se poate direct asocia generatorului. Frecvența de lucru este stabilită pentru majoritatea mașinilor ultrasonice la valori cuprinse între 18 și 30 kHz., aceasta considerându-se banda de frecvențe optime pentru prelucrări.

Deși numeroase studii au concluzionat că indicele capacitate productivă „Q” crește aproape liniar cu creșterea frecvenței de lucru, tendința de a utiliza frecvențe înalte nu este rațională, deoarece pentru aceeași valoare a amplitudinii oscilațiilor, puterea necesară a generatorului crește cu pătratul frecvenței. Pe de altă parte, creșterea frecvenței duce la creșterea pierderilor în transductoare de tip magnetostrictiv, datorită curenților turbionari. În cazul sistemelor moderne cu autoreglare pe

frecvența de rezonanță, rolul parametrului „f” scade, deoarece însăși utilajul prin funcția sa asigură valoarea optimă, necesară prelucrării.

Al doilea parametru, amplitudinea oscilației sculei „A”, se poate asocia convertorului constituit din transductor-concentrator-sculă. Astfel, convertorul ultrasonic determină unul dintre cei mai importanți parametri de care depinde capacitatea productivă.

Dacă stabilirea unei valori fixe a frecvenței este impusă de dimensionarea la rezonanță a convertorului, în cazul amplitudinii „A”, aceasta poate varia în limite destul de largi, limite impuse de condițiile de rezistență la oboseală a elementelor convertorului ultrasonic, dar tendința generală este de a crește eficiența prelucrării prin obținerea unor energii mari a ultrasunetelor transmise mediului activat.

În prezent, amplitudini de 80-100 μ m la capătul concentratorului sunt considerate ca fiind valori de vârf. La mașinile ultrasonice care lucrează cu scule diamantate amplitudinea este limitată de durabilitatea sculei. Obținerea unor valori superioare ale amplitudinii oscilațiilor este determinată de factori de proiectare, execuție, material magnetostrictiv sau electrostrictiv, adaptare la generator și regim corect de excitația a convertorului

4.2.1. Transductoare de ultrasunete [ICL-1]

În mare măsură, progresele realizate în construcția de mașini de prelucrat cu ultrasunete au fost determinate de materialele utilizate în construcția transductorilor.

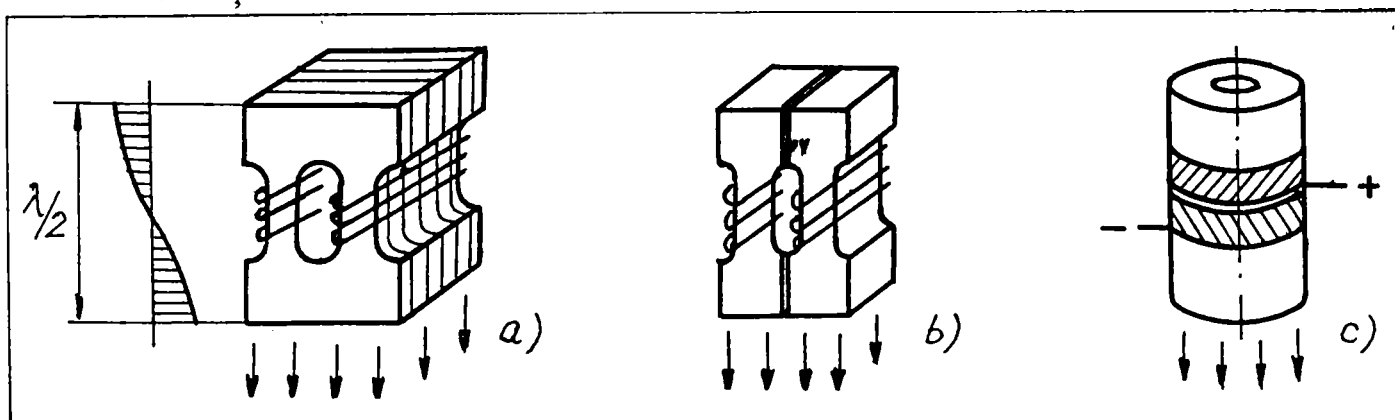


Figura 4.4. Forma tipică a diferitelor transductoare

- a) metalic-din tole laminate;
- b) ferită;
- c) piezoceramice (PTZ)

Astfel, se întâlnesc trei categorii de materiale din care se confecționează transductorii, după cum se prezintă și în figura 4.4.

Deși descoperirea vibratorului magnetostrictiv care a permis utilizarea ultrasunetelor de mare putere (Pierco-1928), nu mai este de dată recentă, progrese la scară industrială în utilizarea macrosunetelor au fost posibile doar după 1945, culminând cu introducerea în 1956, pe lângă nichel și a aliajelor pe bază de nichel cu compoziția optimă (Clark). Ultimele decenii au consacrat utilizarea cu deosebit succes datorită proprietăților piezoelectrice remarcabile a zirconat-titanatului de plumb (PTZ-uri) pe de o parte și a feritelor magnetostrictive pe de altă parte (Kikuchi-1957, Van der Burgt-1956). Dezvoltările tehnologice ulterioare au dus pe lângă perfecționarea transductoarelor pe bază de ferite și zirconat-titanat de plumb, la o recuperare a utilizării în domeniul macrosunetelor a transductoarelor magnetostrictive.

Pentru transductoarele mașinilor ultrasonore de prelucrat este foarte importantă alegerea materialelor, pe baza criteriilor comparative și anume pe baza eficienței potențiale η_{pot} , sau pe baza factorului de cuplaj electromecanic efectiv K^2 . Eficiența poate fi definită cu ajutorul unei expresii aproximative deja stabilite (Van der Burgt și Struijts-1963):

$$\eta_{pot} = f(K_{ef}^2, Q_m, Q_c) \cong 1 - \frac{2}{\sqrt{K_{ef}^2 * Q_m * Q_c}} \quad (4.5)$$

în care:

K_{ef} -cuplajul electromecanic efectiv;

Q_m -factor de calitate elastic;

Q_c -factor de calitate dielectric.

Pentru compararea practică, importante sunt constantele fundamentale ale materialului din definiția fizică a cuplajului. Eficacitatea unui transductor pe bază de ceramici electrostrictive poate fi exprimată prin factorul de cuplaj electromecanic, definit ca raportul dintre energia mecanică produsă și energia totală furnizată sistemului:

$$K_{ef}^2 = e^2 / E S \quad (4.6.)$$

unde: e - constanta piezoelectrică [C/N];

E - permitivitatea [F/m];

S - rigiditatea [N/m²].

În cazul transductoarelor magnetostrictive (respectiv adaptarea unei sarcini inductive pe generator), factorul de cuplaj electromecanic (magnetomecanic) este definit de relația:

$$K_{ef}^2 = d^2 / S \mu \quad (4.7.)$$

în care: d - constanta magnetostrictivă;
 S - rigiditatea [N/m^2];
 μ - permeabilitatea [Gs].

Este important ca aceste mărimi să rămână constante în raport cu schimbarea condițiilor ambiante la funcționare (timp, temperatură, încărcare elastică, polarizare electrică).

4.2.1.1. Transductoare magnetostrictive metalice

Aceste transductoare se bazează pe efectul magnetostrictiv caracteristic unor metale și aliaje cum sunt Ni, Co, aliajele acestora, precum și alferul (Al-Fe).

Urmărind modul de manifestare al diferitelor metale și aliaje magnetostrictive în ceea ce privește coeficientul static al magnestrictunii ($\lambda_s = \Delta l/l$) pentru diferite valori ale intensității câmpului magnetic aplicat, se constată faptul că aliajele Fe-Co și Fe-Al prezintă proprietăți magnetostrictive maxime. Deși Ni nu prezintă cele mai evidente proprietăți magnetostrictive, iar valoarea punctului Curie destul de scăzută ($355^{\circ}C$), acesta și-a găsit frecvent utilizarea în construcția transductoarelor [ICL-1].

În mare măsură limitările privind utilizarea aliajelor de diferite tipuri au apărut ca urmare a progreselor realizate de materialele electrostrictive. Astfel, la un moment dat se părea că în construcția transductoarelor, materialele magnetostrictive metalice vor fi lesne înlocuite de acestea din urmă. Esențial din acest punct de vedere era valoarea coeficientului de cuplaj electromecanic și valoarea eficienței electroacustice net superioare în cazul materialelor ceramice electrostrictive. Cu toate acestea, în ultimul timp se semnalează o reorientare spre utilizarea materialelor magnetostrictive metalice și anume a aliajelor pe baza sistemului Ni-Co, care prin îmbunătățiri tehnologice au repus în actualitate utilizarea materialelor magnetostrictive metalice, tocmai datorită unor valori ridicate ale coeficientului de cuplaj electromecanic și mai ales a eficienței electroacustice.

4.2.1.2. Feritele magnetostrictive

Feritele magnetostrictive prezintă o rezistență mecanică mare, iar pierderile prin curenți turbionari sunt practic nule. Astfel, se pot utiliza sub forma unor miezuri monolite, obținute prin operații de presare-sinterizare. Au formula generală (MO) (Fe_2O_3), în care M este un atom bivalent, proprietățile lor depinzând în mare măsură de compoziția chimică, dar și de tehnologia de elaborare.

Prin folosirea feritelor se pot obține transductori cu coeficient de cuplaj electromecanic K_{ef} destul de ridicat, comparabil cu materialele metalice utilizate. Un avantaj deosebit este faptul că temperatura punctului Curie este peste 500°C .

Mașinile de prelucrat cu ultrasunete utilizate la cercetările din teză, au fost echipate cu transductoare din ferită, românești (I.C.E. București), având următoarele caracteristici:

- Frecvența de rezonanță..... $19,5 \pm 0,4$
- Factorul de cuplaj electromecanic K [%]..... ≥ 13
- Factorul mecanic de pierderi Q_m ≥ 150
- Factorul de conversie electroacustic η [%]..... ≥ 10

Tabelul 4.2.

Nr. Crt.	Material	Densitate [Kg/m ³]	Rigiditate [N/m ²]	Coeficient static al Magn.str. (alungire) [m]	Permeabilitate Relativă [-]	Punct Curie [°C]	Factor de cuplaj electro-mecanic [%]
1	Nichel	$3,9 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^{11}$	$-40 \cdot 10^{-6}$	40	360	30
2	4,5% Co-Ni	$8,9 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^{11}$	-	130	410	51
3	1,4%Co-2,3%Cr-Ni	$8,8 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^{11}$	-	75	260	37
4	2,2% Cr-Ni	$8,8 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^{11}$	-	150	240	40
5	Alfer(13%Al-Fe)	$6,7 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^{11}$	$40 \cdot 10^{-6}$	190	50	25-30
6	Permendur (49%Co-49%Fe-2%Va)	$8,1 \cdot 10^3$	$2,6 \cdot 10^{11}$	$70 \cdot 10^{-6}$	50	980	25-31
7	Ferită Tip 7 A1	-	$1,77 \cdot 10^{11}$	-	15-25	540	25-30
8	Ferită Tip 7 A2	-	$1,82 \cdot 10^{11}$	-	8-15	540	22-25
9	Ferită Tip 7 B2	-	-	-	-	540	19-22
10	Ferită Tip 21	$5,2 \cdot 10^3$	$1,75 \cdot 10^{11}$	$-2,6 \cdot 10^{-6}$	44	>500	21
11	Ferită Tip 38	$5,27 \cdot 10^3$	$1,75 \cdot 10^{11}$	$-9 \cdot 10^{-6}$	90	>500	14

Notă: 7A1- $\{(Ni_{0,8}Cu_{0,2})\}_{0,978} (CaO)_{0,022}(FeO_{0,03}) (Fe_2O_3)$
 7A2- $\{(Ni_{0,8}Cu_{0,2})\}_{0,99} (CaO)_{0,01}(Fe_2O_3)$
 7B2- $(Ni)_{0,988} (CaO)_{0,012} (Fe_2O_3)$
 21 - NiO Fe₂O₃
 38 – NiO_{0,5}ZnO_{0,5} Fe₂O₃

Tabelul 4.2. redă comparativ principalele proprietăți ale materialelor magnetostrictive metalice și ale feritelor, mai des utilizate în construcția transductorilor.

4.2.1.3. Transductoare electrostrictive (piezoceramice)

Ultimii ani au marcat o puternică pătrundere în construcția instalațiilor tehnologice cu ultrasunete chiar de puteri mai mari ale transductoarelor din ceramici electrostrictive. Aceste materiale au cunoscut o dezvoltare rapidă de dată recentă și pe lângă titanatul de bariu BaTiO₃ și niobatul de plumb PbNb₂O₆ cu deosebire în tehnica macrosunetelor, s-a impus zirconat-titanatul de plumb (PbTiO₉)_{0,45} (PbZrO₃)_{0,55}.

Pe lângă altele, cel mai deosebit avantaj este acela că are o eficiență electroacustică deosebit de ridicată, în jur de 90% și un factor de cuplaj acustic K_{ef} care poate să atingă chiar valoarea de 0,75.

În tabelul 4.4. sunt redate principalele caracteristici ale acestor materiale, PTZ-4 și PTZ-5 reprezentând variantele comerciale ale zirconat-titanatului de plumb fabricate de firma Vernitron Ltd din Anglia.

Tabelul4.4.

Nr. Crt.	Material	Densitate [Kg/m ³]	Rigiditate [N/m ²]	Constantă Electrostrictivă [C/N]	Permitivitate [F/m]	Fact. de cuplaj el.magnetic [%]
1	BaTiO ₃	5,7·10 ³	4,87·10 ¹⁰	190·10 ⁻¹²	1250·10 ⁻¹¹	20-50
2	PbNb ₂ O ₆	6,0·10 ³	2,9·10 ¹⁰	90·10 ⁻¹²	240·10 ⁻¹¹	31
3	PTZ4	7,5·10 ³	8,1·10 ¹⁰	235·10 ⁻¹²	875·10 ⁻¹¹	63
4	PTZ5	7,7·10 ³	8,7·10 ¹⁰	320·10 ⁻¹²	1200·10 ⁻¹¹	70

Notă: PZT-(PbTiO₉)_{0,45} (PbZrO₃)_{0,55}

De remarcat este faptul că utilizarea presupune spre deosebire de magnetostrictorii metalici sau ferite, adaptarea la generatorul de ultrasunete a unei sarcini capacitive, iar costul lor este relativ ridicat.

La noi în țară au fost asimilate transductoare piezoceramice cu foarte bune caracteristici tehnico-funcționale, care le fac apte de a fi utilizate în construcția echipamentelor cu ultrasunete. Elementul piezoceramic este de asemenea constituit din zirconat-titanat de plumb, ale cărui caracteristici sunt indicate în tabelul 4.5. (I.M.S. - București).

Tabelul 4.5.

Nr. crt.	Caracteristica/tip transductor	U. M.	TGUS 150-040-1	TGUS 300-020-1	TGUS 500-020-1
1	Frecvența de rezonanță serie fundamentală f_s	KHz.	$40 \cdot 10^{-2}$	20±1	20±1
2	Frecvența de rezonanță paralel fundamentală f_p	KHz.	$43 \cdot 10^{-2}$	22±1	22±1
3	Puterea electrică maximă în sarcină P_{max}	W	150	300	500
4	Capacitatea proprie C_0	NF	4,2±0,6	4,1±0,6	5,8±0,6
5	Tangenta unghiului de pierderi (valoarea max) $tg\sigma$	-	$15 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$
6	Factor de cuplaj electromecanic f_{ef}	-	0,25	0,25	0,25
7	Eficiența optimă η_0	%	85	85	85
8	Puterea de activare P	W	150	300	500
9	Curent activ I	MA	300	400	500
10	Masa M	Kg	0,26±0,04	0,7±0,06	1,1±0,01

În tabelul 4.6. este prezentată situația comparativă a tuturor categoriilor de transductoare ultrasonice, bazată pe analiza unor multiple criterii de evaluare în care calitatea acestora a fost marcată printr-un punctaj de la 1 la 12.

Tabelul 4.6.

Nr. crt.	Mat./criterii de evaluare	Sig.	Coef. de a.	F	T.	F x	Dis	Ct.	Sta b	P.	Pid.	Fb	Tot.
1	ADP	5	5,5	3	1	3	4	9	2	1	2,5	1	37,0
2	Ti- Ba	7	8,6	6	1	5	10	10	4	2	3,5	4	61,1
3	Ferită	6	5,5	5	5,5	5	7	6	4	2	2,5	4	52,5
4	Zr-Ti- Pb	8	12	6	3	5	9	8	5	3	6	4	69,0
5	Sulfat de Li	4	6,4	3	0,5	3	4	9	1	1	2,5	1	35,4
6	Ni	12	3	12	3,7	10	10	10	7	6	2,3	4	80,0
7	Permendur	12	2,3	12	10	10	4	4	7	7	1	2	71,3
8	Cuarț	19	1,9	8	6	5	5	3	6	6	1	3	53,9
9	Sare Rochelle	3	10	2	0,5	3	8	9	2	1	2,5	1	42,0
10	4%Co-Ni	12	5,5	12	4,1	10	9	9	7	4	2,7	3	78,3

Criteriile de evaluare sunt:

- Sig.-Siguranța
- Coef. de a.-Coeficient de amplificare

- F.-Fragilitate
- T.-Temperatura de operare
- Fx.-Fixare, adeziune
- Dis.-Disponibilitate acces
- Ct.-Cost
- Stab.-Stabilitate a impedanței
- P.-Capacitatea de putere
- Fb.-Fabricare
- Tot.- Total calități

Din analiza punctajului obținut la însumarea tuturor calităților pe baza criteriilor enunțate, se constată surprinzător faptul că global, transductoarele magnetostrictive metalice se situează pe primul loc.

4.2.2 Concentratoare adaptoare de undă

Majoritatea instalațiilor tehnologice cu ultrasunete utilizează convertoare concentratoare de energie. Concentratorul adaptor de undă ca element de transfer al energiei ultrasonice are rolul de a realiza la capătul activ (opus transductorului) vibrații longitudinale de amplitudini și viteze cât mai mari. El se proiectează pe baza rezolvării pentru situații concretizate a ecuației potențialului acustic în ghidurile de undă, cunoscută ca ecuația lui Webster:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{dx^2} + \frac{\partial \varphi}{\partial x} (\ln S_x) * \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{1}{c^2} * \frac{\partial^2 \varphi}{dt^2} \quad (4.8.)$$

în care:

$\varphi = f(x, t)$ - reprezintă elongația oscilației

iar secțiunea transversală S_x este:

$S_x = S_0 (x/x_0)^2$ -concentratoare conice;

$S_x = S_0 (x/x_0)$ -concentratoare catenoidale;

$S_x = S_0 e^{mx}$ -concentratoare exponențiale;

$S_x = kS_0$ -concentratoare cilindrice în trepte.

În practică se utilizează două metode de proiectare a concentratoarelor adaptoare de undă:

-metoda utilizării unor relații ingineresti simplificate rezultate din rezolvarea ecuației 4.8., eventual combinată cu utilizarea nomogramelor. Această metodă are în vedere majoritatea aplicațiilor (prelucrare, activări procese) în care au loc schimbări frecvente ale condițiilor de lucru (scule,

pieșe activate) și ale factorilor perturbatori (solicitări mecanice, termice). Eventuala lipsă de acuratețe a metodei poate fi ameliorată prin folosirea RAF în sistemul ultrasonic rezonant.

-metoda elementelor finite cu utilizarea calculatorului și eventual asocierea unor aparate de măsurare de tipul analizoarelor pentru verificarea proprietăților acustice ale materialelor folosite. Această metodă de proiectare foarte precisă a concentratorului, ca unic element de transfer al energiei ultrasonice către piesă, oferă posibilitatea unui randament maxim în funcționare și se aplică cu precădere la sudarea materialelor termoplastice sau a metalelor. Este cazul fabricațiilor de serie mare. Schimbarea condițiilor de lucru nu mai permite utilizarea aceluiași concentrator sculă impunându-se o nouă dimensionare.

Cazurile cele mai întâlnite în practica industrială, se referă la patru tipuri de concentratoare adaptoare de undă, care au la bază relații ingineresti simplificate:

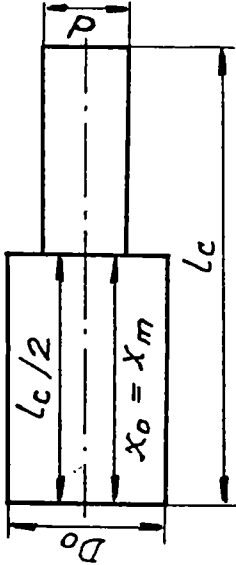
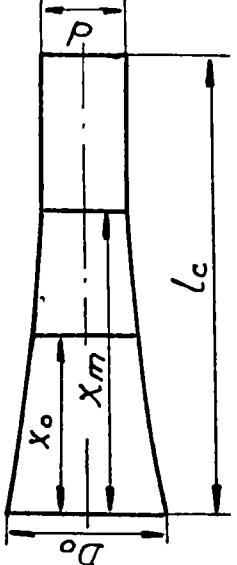
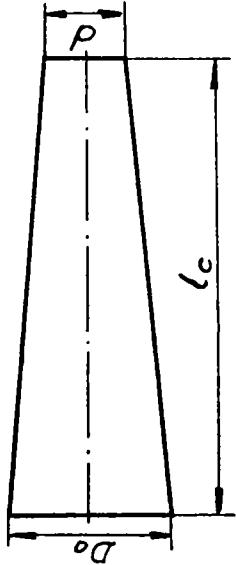
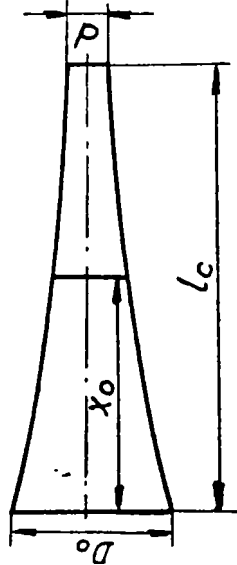
- concentratoare cilindrice în trepte;
- concentratoare exponențiale;
- concentratoare conice;
- concentratoare catenoidale;
- concentratoare Fourier.

În tabelul 4.7. se prezintă sintetic relațiile de calcul a elementelor geometrice ale concentratoarelor adaptoare de undă în $\lambda/2$ cel mai des folosite în aplicațiile tehnologice ale ultrasunetelor.

Dintre cele patru tipuri de concentratoare adaptoare de undă prezentate, cel mai mare raport al amplitudinii de vibrație îl realizează concentratoarele cilindrice în trepte. Acesta se recomandă a fi utilizat la puteri de activare mici și mijlocii și în general la operațiile tehnologice de finisare și semifinisare, având o bandă relativ îngustă la frecvența de rezonanță. Din acest motiv este necesară adoptarea pentru acest tip de concentratoare adaptoare de undă a unor generatoare de frecvență autooscilante sau cu control automat al frecvenței, puterii de activare sau defazajului.

În schimb, concentratoarele exponențiale sunt mai robuste în ceea ce privește tensiunea mecanică și mai stabile, având o bandă mai largă a frecvenței de rezonanță. Se pot încărca cu puteri acustice relativ mari, utilizarea fiind tot la prelucrări de finisare și semifinisare, datorită amplitudinii de vibrație mici. Pentru regimuri de degroșare, la puteri mari și foarte mari, se recomandă utilizarea unor concentratoare adaptoare de undă compuse.

Tabel 4.7

Tipul concentratorului	Ecuatia curbei	Factorul de amplificarea teoretic, k_a	Lungimea de rezonanță, l_c	Coordonata punctului nodal al deplasării, x_0	Coordonata antinodului tensiunii x_m
<p>In trepte</p> 	$D_x = D_0$ când $0 \leq x \leq l_c/2$; $D_x = d$ când $l_c/2 \leq x \leq l_c$	$k_a = \left(\frac{D_0}{d}\right)^2 = N^2$	$l_c = \frac{\lambda}{2} = \frac{v_s}{2f}$	$x_0 = \frac{l_c}{2} = \frac{v_s}{4f}$	$x_m = \frac{l_c}{2} = \frac{v_s}{4f}$
<p>Exponential</p> 	$D_x = D_0 \cdot e^{-\beta x}$ $\beta = \frac{\omega}{c_L} \cdot \frac{\ln N}{\sqrt{\pi^2 + (\ln N)^2}}$ $N = \frac{D_0}{d}$	$k_a = \frac{D_0}{d} = N$	$l_c = \frac{v_s}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln N}{\pi}\right)^2}$	$x_0 = \frac{l_c}{\pi} \operatorname{arccctg} \left(\frac{\ln N}{\pi}\right)$	$x_m = \frac{l_c}{\pi} \operatorname{arccctg} \left(-\frac{\ln N}{\pi}\right)$
<p>Conic</p> 	$D_x = D_0 (1 - \alpha' \cdot x)$ $\alpha' = \frac{D_0 - d}{D_0 \cdot l_c}$	$k_a = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi l_c}{\lambda}\right)^2}$	$l_c = \frac{\lambda}{2} \cdot \left(\frac{\alpha l_c}{\pi}\right)$ $\alpha l_c = \text{rădăcina ec.}$ $\operatorname{tg}(\alpha l_c) = \frac{\alpha l_c}{(1-N)^2 + 1}$	$x_0 = \frac{1}{\alpha} \operatorname{arctg} \left(\frac{\alpha}{\alpha'}\right)$ $\alpha = \frac{\omega}{v_s}$	
<p>Catenoidal</p> 	$D_x = d \cdot \operatorname{ch} \gamma (l_c - x)$ $\gamma = \frac{1}{l_c} \operatorname{Arccch} N$	$k_a = \frac{N}{\cos(k'l)}$ $k_a > N$	$l_c = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{(k'l)^2 + (\operatorname{Arccch} N)^2}{}}$ $k'l = \text{rădăcina ec.}$ $k'l + \operatorname{tg}(k'l) = -\sqrt{1 - \frac{1}{N^2}} \times \operatorname{Arccch} N$	$x_0 = \frac{1}{k} \times \operatorname{arctg} \left(\frac{k'}{\gamma} \cdot \operatorname{cth} \gamma \cdot l_c\right)$ $k' = \sqrt{\alpha^2 - \gamma^2}$	

Concentratoarele de tip conic deși prezintă simplitate în proiectare și execuție, au dezavantajul unei comportări acustice mediocre. În toate cazurile se vor folosi elemente de ajustare și corecție a relațiilor utilizate, având la bază date de experimentare și exploatare.

În anexă este prezentată proiectarea asistată de calculator a unor concentratoare adaptoare de undă în baza relației complexe, conform brevetului SUA nr. 3175406-Eisner.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{dt^2} - \frac{E}{\rho^a} * \frac{\partial}{\partial x} * (a * \frac{\partial \Phi}{\partial x}) = 0 \quad (4.9.)$$

Concentratoarele adaptoare de undă, proiectate pe calculator pe baza ecuației diferențiale a lui Eisner, au variația secțiunii cu lungimea după o lege exponențială și Fourier.

4.2.3. Scule [ICL-1]

Scula, element de transfer a energiei de la concentrator la piesă pe de o parte și element de configurare a prelucrării este conformă celor două principii de prelucrare:

-la prelucrarea cu sculă diamantată, prin rotirea sculei, aceasta va fi de tip cilindric, generând suprafețele prelucrate;

-în cazul prelucrării cu suspensie abrazivă, forma sculei este diferențiată deoarece prelucrarea se realizează prin copierea formei sculei. În ambele cazuri însă se cere ca scula să fie cât mai intim îmbinată concentratorului, dar să permită totuși demontarea ei pentru demontare sau înlocuire.

La prelucrarea dimensională cu ultrasunete, cu suspensie abrazivă, scula lovește particule abrazive pe suprafața de prelucrat, particule care îndepărtează material nu numai de pe piesă ci și de pe sculă,uzând-o. Uzura sculei apare atât pe suprafața care lovește particulele abrazive, suprafața frontală, în general, cât și suprafața laterală, ca urmare a existenței abrazivului și în spațiul dintre această suprafață și cea a alezajului prelucrat.

Pentru condițiile de lucru:

- abraziv-carbură de bor, granulație 10;
- sculă tubulară, $\Phi_{ext.}=7mm$, $\Phi_{int.}=4mm.$;
- material de prelucrat-ceramică;

- frecvența $f=18$ kHz;
- amplitudinea $A=20\mu\text{m}$;
- presiunea $p=0,15$ daN
- adâncimea prelucrării $h=15$ mm.

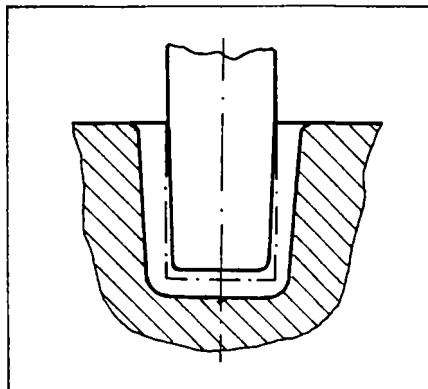


Figura 4.5. Schema uzurii sculei și forma suprafeței prelucrate

În figura 4.5. este dată schema uzurii sculei la executarea unui alezaj, iar tabelul 4.8. conține valorile uzurilor unor scule din diverse materiale.

Tabelul 4.8.

Materialul sculei	Uzura relativă a sculei în lungime[%]	Uzura maximă pe diametru a sculei [mm]	Viteza prelucrării [mm/min.]
Aliaj dur, VK 8	1,3	0,03	1,5
OSC 8 netratat termic	2,5	0,082	0,6
OSC 8 tratat termic	2,8	0,046	1,4
OLC 45	2,7	0,099	0,6
10 NC 180	3,5	0,089	0,44
Alamă	15,0	-	-
Aluminiu	30,0	-	-

Așa cum rezultă și din tabelul 4.8., materialele moi (alama, aluminiu) nu se recomandă pentru executarea sculelor deoarece se uzează mult.

Sculele se execută cel mai des din oțeluri moi, cu conținut scăzut în carbon, fără tratament termic. Alezajele cu diametrul mic se execută cu scule din OLC 45, 70 și OSC 8.

Se recomandă OLC-urile, deoarece, ca și concentratorul au și rolul de a transmite oscilațiile, iar datorită conținutului ridicat de carbon, determină pierderi minime de energie prin frecare interioară.

Tratarea termică a sculelor, în scopul ridicării durității lor, deși îmbunătățește proprietățile acestora, este mai rar practică, deoarece complică execuția sculelor.

Sculele din aliaje dure, deși au proprietăți prelucrătoare superioare, datorită dificultăților privind execuția lor, se recomandă să fie utilizate doar la prelucrarea materialelor cu duritate relativ mică (sticlă, materiale semiconductoare, etc.), la prelucrarea cărora durabilitatea acestor scule este foarte mare.

În tabelul 4.9., este ilustrată influența materialului de prelucrat asupra uzurii sculelor.

Tabelul 4.9.

Materialul prelucrat	Uzura sculei în % din volumul îndepărtat	Materialul prelucrat	Uzura sculei în % din volumul îndepărtat
Germaniu	0,5	Cuarț	2,0
Siliciu	0,5	Rubin	50
Ferite	0,5	Aliaj dur (VK)	60-80
Sticlă	0,9-1,0	Oțel călit	100

Dimensionarea zonei active a sculelor pentru executarea alezajelor și a celor destinate prelucrării conturului exterior, funcție de dimensiunile suprafeței prelucrate, poate fi făcut cu ajutorul schemei din figura 4.6. și a relațiilor 4.9. și 4.10.

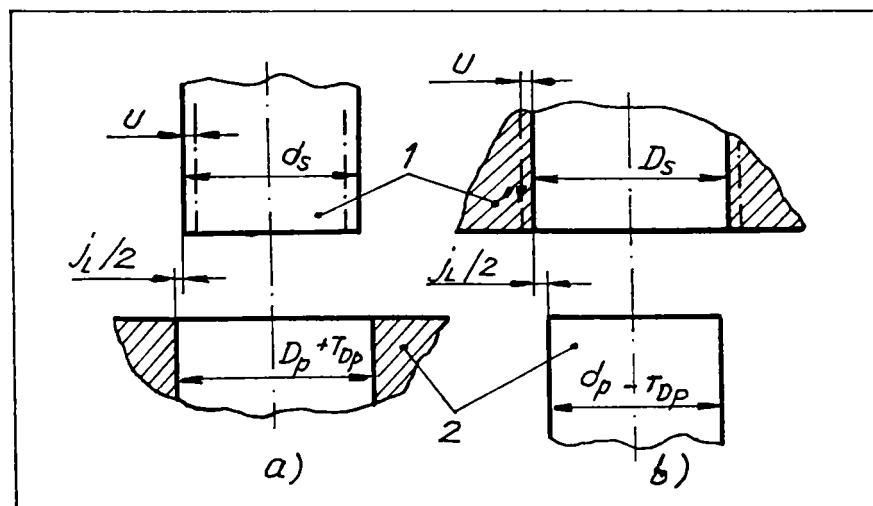


Figura 4.6. Schemă pentru determinarea dimensiunilor sculelor

Dacă se notează cu b_{max} . dimensiunea maximă a particulelor abrazive ce vor fi folosite la prelucrare, dimensiunea sculei pentru executarea alezajului va fi:

$$d_s = D_p + T_{Dp} - 2b_{max}. \quad (4.9.)$$

iar dimensiunile sculei pentru prelucrat exterior:

$$D_s = d_p + T_{dp} + 2b_{max}. \quad (4.10.)$$

Scula astfel dimensionată asigură precizia dimensională impusă prelucrării, atâta timp cât uzura acesteia nu depășește valoarea toleranței dimensiunii suprafeței prelucrate.

În scopul micșorării conicității, se pot utiliza scule cu suprafața laterală conică (1/10), iar partea frontală cilindrică, având înălțimea de 1-2mm..

La executarea alezajelor străpunse, foarte precise, în scopul păstrării reglajului sculei, pentru fazele necesare de degroșare și finisare, se recomandă utilizarea sculelor în trepte, la care o treaptă este pentru degroșare iar cealaltă pentru finisare. Se recomandă $d_{max} - d_{min} \approx 0,5mm$. Pentru a avea rezistența mecanică și rigiditatea cât mai mari, sculele trebuie să aibă lungimea doar atât cât este impusă adâncimea de prelucrat. Asamblarea dintre sculă și concentrator se face prin îmbinări demontabile sau fixe, după cum se observă din figura 4.7.

O mare parte a sculelor se îmbină demontabil cu concentratorul, prin filet. Pentru asigurarea coaxialității scula este prevăzută cu suprafețe de îmbinare cilindrice sau conice, tija filetată trebuie să aibă diametrul de cel puțin 5mm, iar lungimea de minim două diametre. Sculele cu diametru mic de până la 3mm se pot fixa cu bușe elastice, sau prin lipire.

Domeniile de utilizare a diferitelor tipuri de îmbinări sunt prezentate în tabelul 4.9.

Tabelul 4.9.

Felul îmbinării	Tensiunea limită în îmbinare [daN/cm ²]	Domeniul de utilizare
Suprafețe conice netede, lipite moale	80-100	Sticlă, ferite, materiale semiconductoare
Demontabilă cu filet	110-160	Sticlă, ferite, materiale semiconductoare
Fixă, prin lipire tare	≥160	Aliaje dure

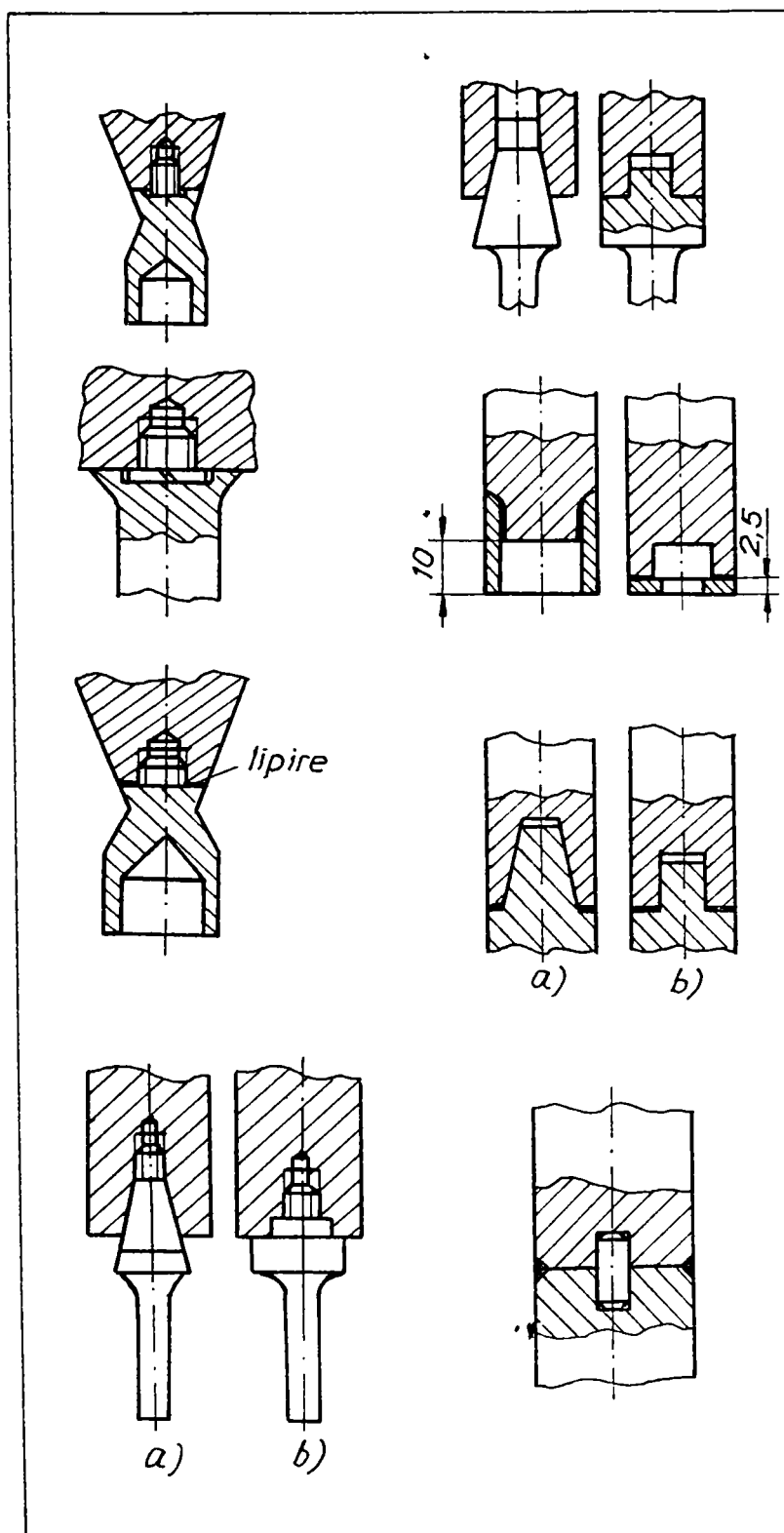


Fig. 4.7. Îmbinări tipice sculă-concentrator

În figura 4.8. exemplificăm modalitățile de îmbinare alese pentru experimentările executate în cadrul prezentei teze.

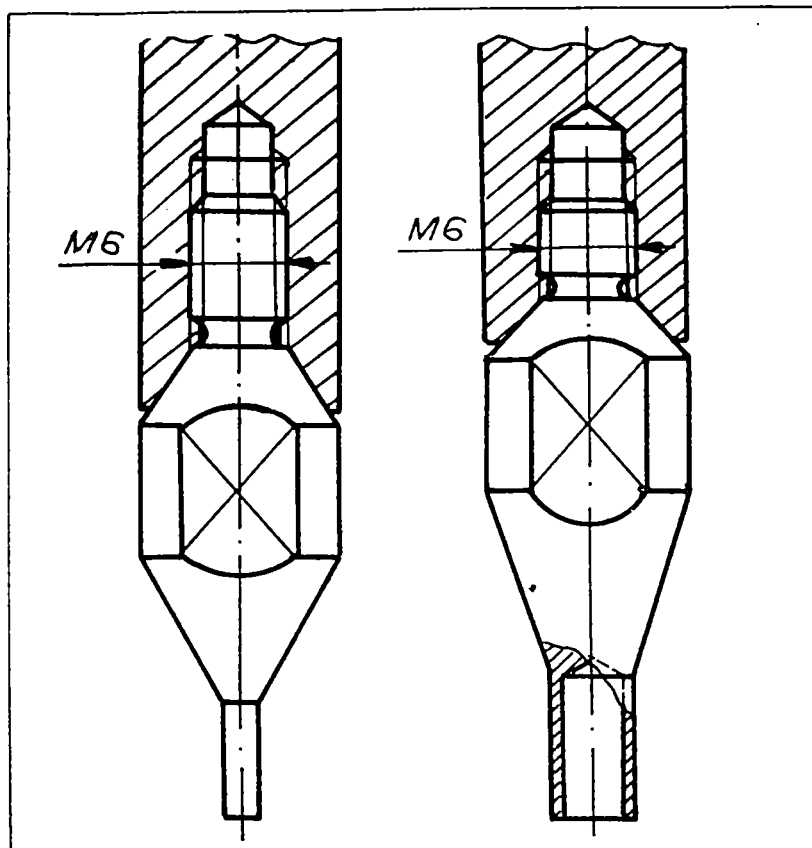


Figura 4.8. Modalitățile de îmbinare alese

4.3. Sisteme de alimentare cu suspensie abrazivă

Prelucrarea ultrasonică cu suspensie abrazivă este condiționată de asigurarea unei alimentări corespunzătoare a spațiului de lucru cu agent eroziv.

Există trei soluții utilizate, ilustrate în figura 1.5 din capitolul 1 al tezei, acestea fiind:

-alimentarea **prin stropire**- la care dezavantajul constă în creșterea dificultăților de acces a agentului eroziv la locul prelucrării pe măsură ce crește adâncimea de prelucrare;

-alimentarea continuă prin **absorbție prin sculă**, al cărui dezavantaj constă în faptul că este imposibil de aplicat în cazul sculelor de dimensiuni mici. La aceasta se mai adaugă și necesitatea unui sistem de absorbție mai complicat;

-alimentarea continuă prin **pompare prin sculă**, care pe lângă dezavantajele variantei precedente, mai prezintă și riscul înfundării cu abraziv.

În cazul cercetărilor din teză, dimensiunile reduse și condițiile de precizie care impun retrageri periodice și inspecția optică a sculei au dus la concluzia folosirii sistemului cu alimentare manuală, prin stropire intermitentă.

4.4. Sisteme de avans

Presiunea de contact piesă-sculă este unul dintre parametrii hotărâtori ai procesului.

Literatura de specialitate consemnează un interval de la 0,5 la 4 daN/cm² în care prelucrarea se poate desfășura în bune condiții.

O valoare prea mare introduce amortizări și chiar blocarea prelucrării, iar o valoare prea mică, după ce că este foarte dificil de realizat din punct de vedere cinematic, diminuează și eficiența prelucrării.

Realizarea parametrului „p”-presiunea de contact, condiționează modul de realizare a mecanismului de avans al mașinii. Se iau în considerare de asemenea următoarele elemente:

- necesitatea realizării unei viteze de avans foarte mici (mm./min.) la pătrunderea superficială în material, pentru a evita spargerile și ciobiturile;

- necesitatea controlului de către operator a vitezei de avans în funcție de fazele prelucrării;

- necesitatea sesizării și reacției sistemului de avans la modificările condițiilor de prelucrare (scăderea capacității productive, modificarea regimului de funcționare a sculei de la percutant la nepercutant, deplasarea frecvenței de rezonanță, înrăutățirea condițiilor de circulație a suspensiei și a produselor de eroziune);

Realizarea mecanismelor de avans impune ghidaje de înaltă precizie, cu sensibilitate și viteze maxime de reacție pentru menținerea presiunii în limitele impuse. În majoritatea lor, aceste sisteme duc la complicații constructive ale mașinilor. Pentru a nu acționa asupra convertorului acustic cu urmări neprevăzute asupra prelucrării, în marea lor majoritate, mecanismele de avans, sunt în legătură cu masa de lucru.

Se prezintă câteva soluții realizate de-a lungul timpului, de diferiți producători:

4.4.1. Mecanismele cu greutate echilibrate, sunt cele mai simple mecanisme de avans, în care efortul ia naștere în urma diferenței de greutate a capului acustic și a contragreutății [ICL-2], fiind constant pe întreaga perioadă a prelucrării. Aceasta nu poate satisface cerința ca la amorsarea prelucrării și străpungerea materialului viteza de prelucrare să fie micșorată.

Dezavantajul principal îl reprezintă faptul că la începutul prelucrării forța este foarte mare, existând pericolul de spargeri nedorite la amorsarea

prelucrării, la sfârșitul cursei de prelucrare putând chiar ca acesta să nu mai aibă loc datorită presiunii mici.

Contragreutățile sunt suspendate de o bandă elastică trecută peste două role de rulare sau așezate pe o pîrghie. Mărimea forței de apăsare se realizează prin greutăți de schimb, sau prin deplasarea lor de-a lungul pîrghiei.

Avantajul sistemelor descrise este simplitatea.

Ca dezavantaje principale menționăm:

- sensibilitate redusă;
- reglarea incomodă;
- dificultatea modificării forței după un anumit program.

Un sistem de avans cu contragreutăți și cu modificarea forței de avans prin cufundarea contragreutății într-un lichid a cărei presiune se poate regla, este folosit la mașina Dawe type 1138 Anglia.

4.4.2. Mecanismul de avans cu resort echilibrat este mai compact decât mecanismele cu contragreutăți, este foarte sensibil datorita numarului mic de piese in frecare, dar prezinta dezavantajul variatiei fortei de avans cu lungimea cursei.

Dezavantajul principal îl reprezintă faptul că la începutul prelucrării forța este foarte mare, existând pericolul de spargeri nedorite la amorsare, iar la sfârșitul cursei, prelucrarea să nu mai aibă loc, datorită presiunii foarte mici.

4.4.3. Mecanisme de avans acționate pneumatic sau hidraulic sunt mai rar întâlnite. Acționarea pneumatică se aplică de regulă la deplasări rapide iar acționările hidraulice se folosesc pentru forțe mari. Mecanismul de avans al mașinii nu se încadrează în nici una din categoriile amintite. În plus, utilizarea lichidului ca mijloc de transmitere a forței de avans nu permite obținerea de sensibilități necesare.

4.3.4. Mecanismul de avans cu solenoid este folosit la mașinile 4772 și 4770 A, fabricate în fosta URSS. Acestea reprezintă cele mai perfecționate sisteme de avans, totodată fiind și comode în exploatare. Acest sistem de avans utilizează un motor electric care funcționează în regim frânat.

Reglarea forței de avans se realizează prin modificarea efortului de tracțiune al solenoidului, care are ca miez contragreutatea, o parte a acesteia sau numai un pistonăș.

Solenoidul permite variația forței de avans, după un program dat, prin modificarea curentului de alimentare. La acest sistem se poate realiza îndepărtarea periodică, rapidă, a sculei pentru pătrunderea suspensiei abrazive în zona de lucru.

Un neajuns al acestui sistem îl reprezintă variația proporțională a forței de tracțiune, a solenoidului, cu lungimea cursei.

4.4.5. Mecanismul de avans acționat de un motor electric care lucrează în regim frânat

Deși este mai complicat, mecanismul de avans cu motor frânat se folosește cu foarte bune rezultate, dovedindu-se mai fiabil. Deasemenea, valoarea forței de avans nu depinde de lungimea cursei ansamblului mobil, iar forța de avans se poate comanda după orice program impus.

În general, la mecanismele de avans avem ghidaje cu role sau bile. Elementele mobile amintite, sunt separate în colivii. Compensarea jocurilor se realizează prin menținerea în contact forțat a plăcii mobile, cu elementele fixe de ghidare, prin intermediul șuruburilor sau cu resorturi. Tot sistemul mobil al mecanismului de avans trebuie proiectat urmărindu-se o frecare minimă.

4.4.6. Mecanismul de avans electromecanic este instalat pe o mașina ultrasonică mai perfecționată de tipul 4772 de fabricație rusească. Acest tip de mecanism de avans (patent USA nr. 3094814) produs de ENIMS (fosta URSS) acționează asupra capului mașinii care este fixat la capătul unei carcase funcționale străbătută de un arbore principal. Arborele principal împreună cu carcasa sunt menținuți în poziția de lucru de un sistem de echilibrare cu pârghie și contragreutăți. Pârghia este în legătură cu miezul unui electromagnet, alimentat de la un autotransformator și un redresor.

Forța de avans este astfel controlată prin ajustarea corespunzătoare a curentului ce trece prin bobină. Sistemul este înzestrat și cu un amortizor mecanic, pentru reducerea forței de avans și cu posibilitatea cuplării unui avans manual, pentru a realiza retragerile periodice necesare. De asemenea dispune de indicatoare ale valorii avansului.

Acest sistem de avans echipează o mașină cu putere de ieșire de 1,5 kw la generator.

4.4.7. Mecanism de avans cu plunjer (patent USA nr. 3482360) instalat pe mașina britanică model 1138 A, a firmei "Dawe Instruments Ltd"

produsă sub licența UKAEA - Harwell acționează tot asupra capului mașinii, contrabalansat de o contragreutate cu plunjer ce se cufundă într-un bazin de ulei.

Partea inferioară a plunjerului este în legătură cu conducta unui circuit hidraulic ce cuprinde o pompă și un drosel, pentru reglare. Uleiul deversat se recuperează printr-o conductă auxiliară. Acest sistem de contrabalansare prin flotarea și reglarea forței de avans de la drosel asigură presiunea constantă necesară prelucrării.

Reglarea presiunii se poate face într-un interval larg. În construcția de mașini ultrasonice se mai cunosc numeroase variante constructive, însă cele anterior prezentate sunt cele mai reprezentative pentru stadiul actual cunoscut.

4.5. Studiu comparativ al unor mașini de prelucrat cu ultrasunete

În cele ce urmează, se prezintă un studiu comparativ al unor soluții constructive de mașini de prelucrat cu ultrasunete, care ar putea să servească cel mai adecvat prelucrările de precizie a discurilor potice și lentilelor de safir.

4.5.1. Mașina de prelucrat cu ultrasunete-Brevet SUA nr. 3.191.589 din 1965

Este destinată prelucrărilor de perforare și finisare a pieselor dure și fragile de dimensiuni mici. Schema cinematică este prezentată în figura 4.9.

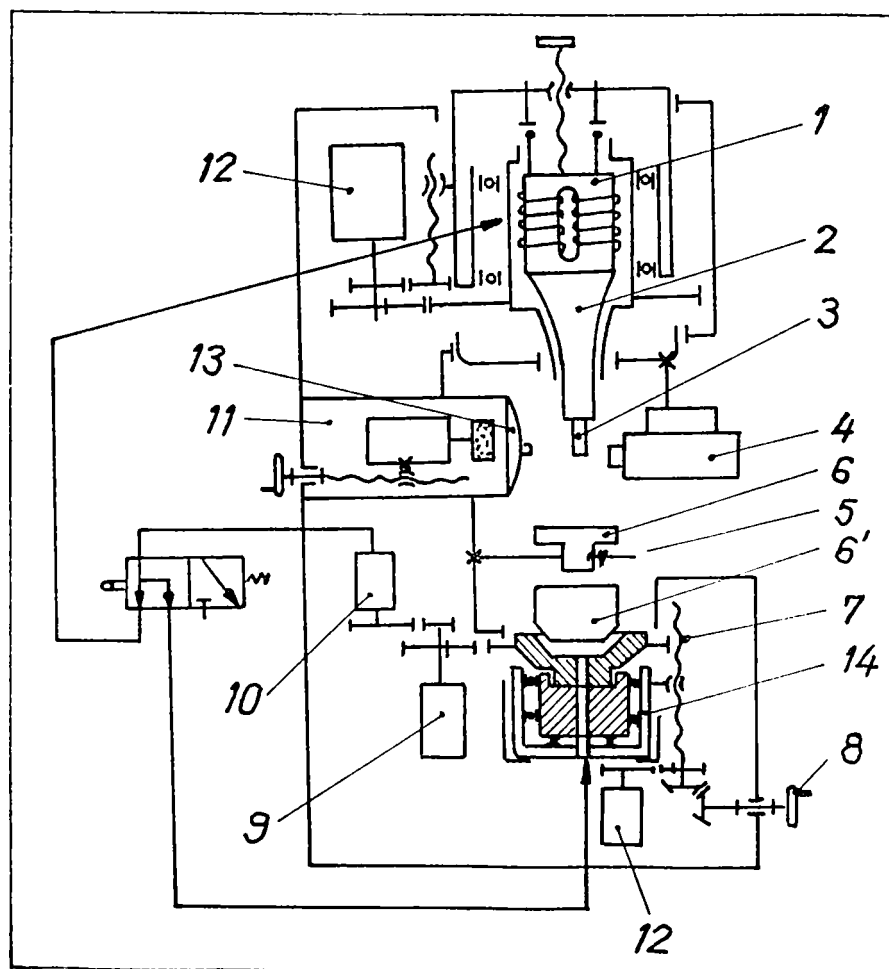


Figura 4.9. Schema cinematică a mașinii Brevet SUA nr. 3.191.589/'65

Convertorul ultrasonic, poate fi deplasat în punctul superior sau în punctul inferior, de lucru, prin intermediul mecanismului șurub-piuliță, cu ajutorul motorului 12.

Mașina dispune de un sistem pneumatico-hidraulic de deplasare a mesei de lucru, dublat de unul manual, materializat prin roata de mână 8 și sistemul șurub-piuliță 7. Sistemul hidraulic este compus din trei piese, conform figurii 4.10., peretele exterior 4, placa ce bază 5 și capacul superior 6, care prin deplasarea în plan vertical al întregului ansamblu creează o diferență de presiuni între camerele inelare (exterioară 8 și interioară 9), aceasta ducând la deplasările limitate ale mesei.

Motorul 9, are rolul de a roti masa de lucru, împreună cu piesa de prelucrat și de a transmite mișcarea de rotație compresorului. Acesta furnizează aer comprimat de răcire transductorului și sistemului pneumatico-hidraulic, pe care îl acționează periodic prin intermediul distribuitorului. Distribuitorul este acționat de rotirea mesei.

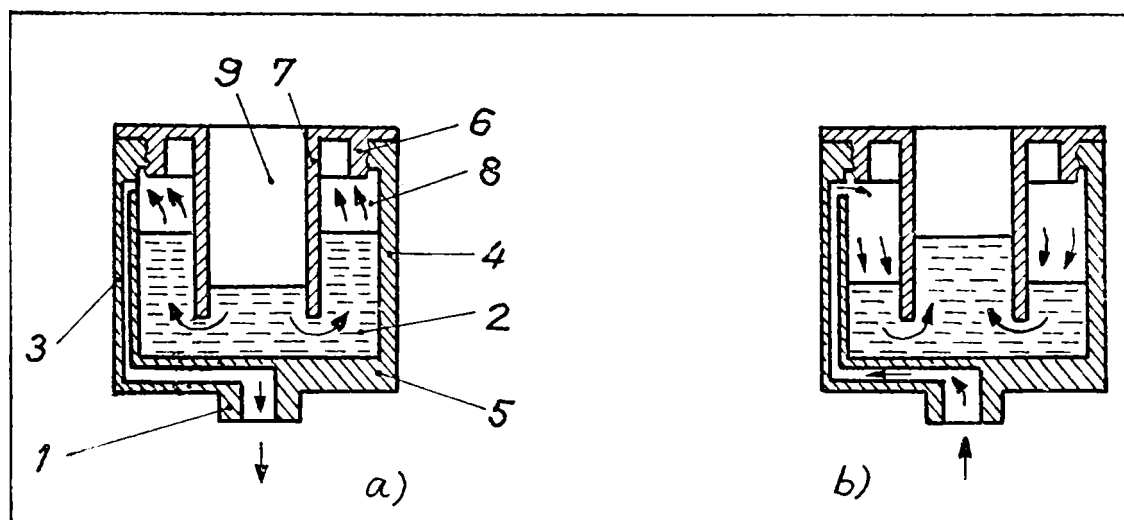


Figura 4.10. Sistemul hidraulic al mașinii Brevet SUA nr. 3.191.589/'65

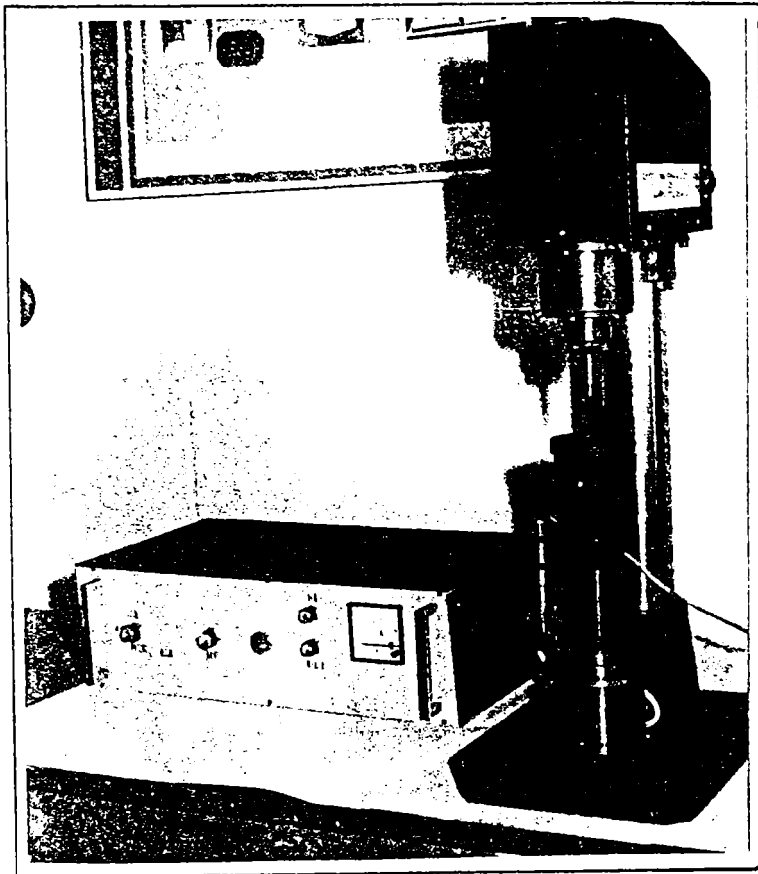
Mașina prezintă noutăți în ceea ce privește inspecția optică, posibilă datorită dispozitivului optic 4, atât asupra sculei, cât și asupra piesei.

În urma constatării uzurii sculei, se poate trece la rectificarea acesteia, chiar pe mașina de prelucrat, prin intermediul dispozitivului de rectificat 11.

Mașina are disponibilități numeroase, însă datorită complexității sistemelor care o compun este foarte scumpă și nu se pretează decât la prelucrarea cu ultrasunete a unor loturi de serii foarte mari și de masă.

4.5.2. Mașina de prelucrat cu ultrasunete tip MPU-03

Este realizată ca model experimental în laboratorul de ultrasunete al Politehnicii din Timișoara.



Ea constă din următoarele subansamble, conform fotografiei 4.11. și schemei cinematice 4.12.:

- batiu;
- coloană de ghidare;
- masă cu dispozitivul de fixare a piesei;
- convertorul ultrasonic.

Batiul, are rolul de a asigura stabilitatea mașinii pe bancul de lucru.

Coloana de ghidare, are rolul de a asigura mișcările convertorului în plan vertical, atât pentru deplasările rapide, cât și de poziționare.

Figura 4.11. Mașina de prelucrat cu ultrasunete tip MPU-03

Mașina poate fi echipată cu convertor fix, sau cu mișcare de rotație, în funcție de prelucrarea care se execută.

Deplasarea pe verticală a brațului mobil, împreună cu convertorul, se execută prin intermediul motorului electric ME-2 și a mecanismului șurub-piuliță, montat în coloana de ghidare. Aceasta îi oferă mașinii avantajul compactității construcției.

Presiunea de lucru, necesară procesului de prelucrare este asigurată de sistemul de avans, acționat de motorul electric ME-1, a cărui comandă se asigură de microîntrerupătoarele 6 și 7.

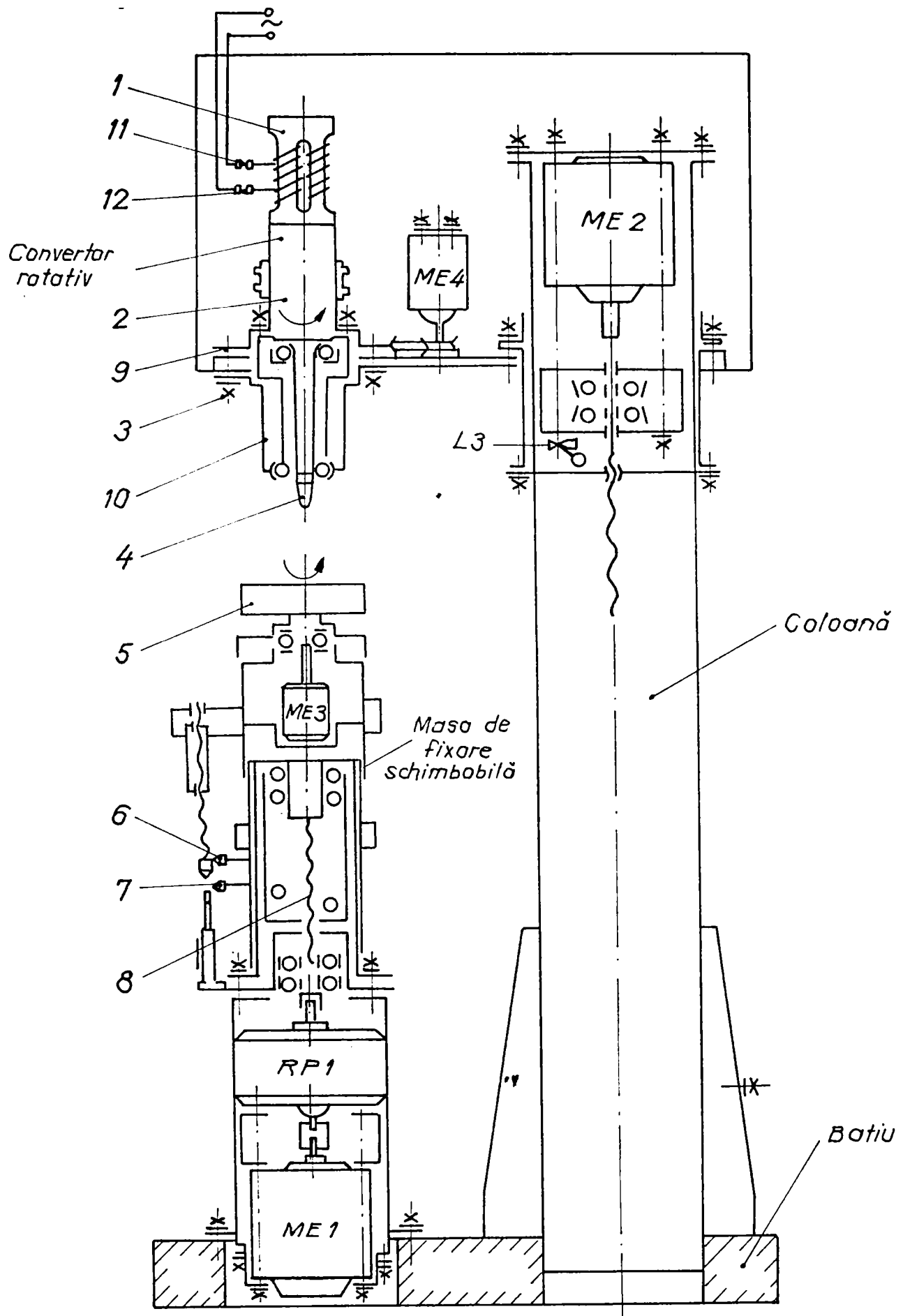


Fig. 4.12 Schema cinematică
a mașinii de prelucrat cu ultrasunete
MPU - 03

În funcție de presiunea de lucru necesară desfășurării procesului de prelucrare, limitele se stabilesc ținând cont de constanta elastică a resortului 8, situat în interiorul mesei telescopice.

Convertorul este format dintr-un transductor magnetostrictiv metalic 1, sau din ferită, un concentrator adaptor de undă 2, izolat acustic în nodul de oscilație 3, prin intermediul unor inele elastice de cauciuc.

Prin îmbinarea corpurilor de strângere superior, 9 și inferior, 10 se asigură poziția de lucru corectă prin autocentrare.

Conectarea convertorului la generatorul de oscilații ultrasonice se face cu ajutorul unor perii, în contact cu inelele circulare 12. Rotația convertorului este asigurată de motorul electric ME-4, printr-o transmisie cu curea.

Pentru executarea prelucrării pieselor prin generare, mașina este prevăzută și cu varianta rotirii mesei de lucru, prin motorul electric ME-3, situat în interiorul mesei telescopice.

Mașina de prelucrat cu ultrasunete tip MPU-03 prezintă însă unele dezavantaje, dintre care amintim:

- contactul dintre periile electrice și inelele circulare ale transductorului, poate cauza pierderi datorită uzurii periilor;

- lipsa unui dispozitiv optic de inspecție, poate duce la un număr mare de rebuturi, iar inspectarea pe dispozitive optice separate, poate conduce la abateri dimensionale și de formă.

4.5.3. Mașina de prelucrat cu ultrasunete tip MPU-01

Mașina este asimilată în fabricație la Întreprinderea „Electrotimiș” din Timișoara (figura 4.13.)

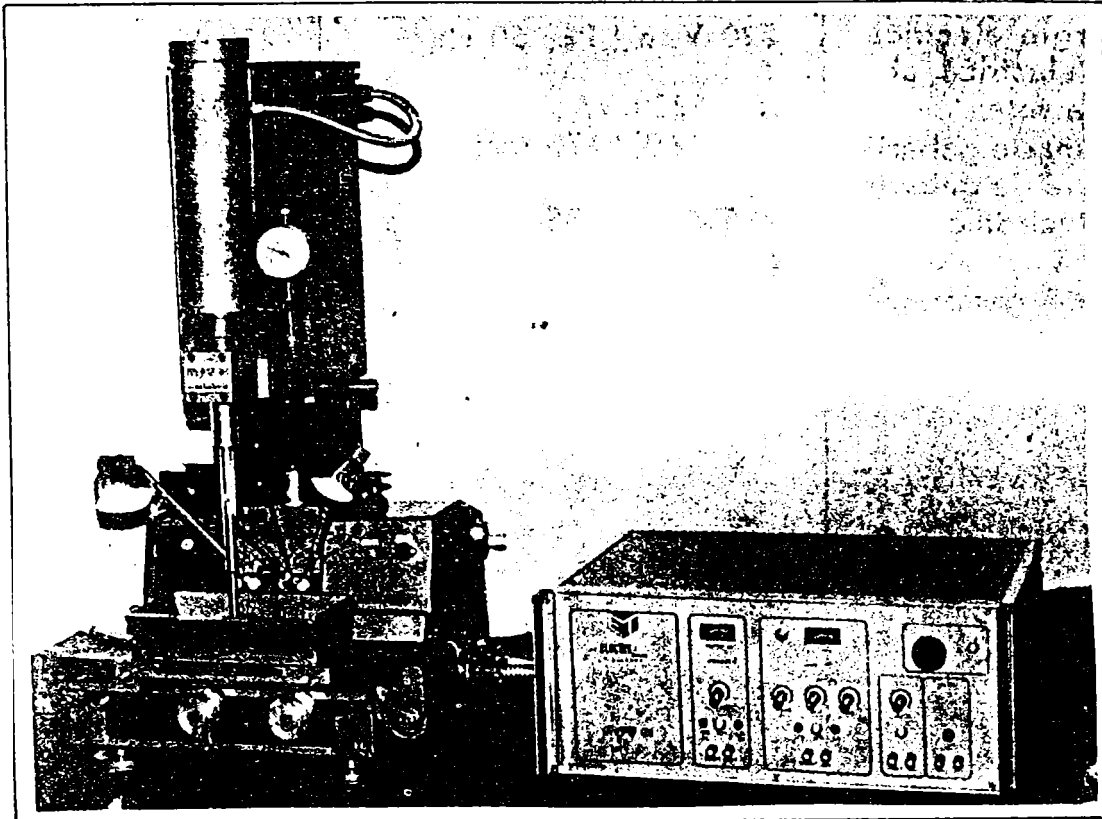


Figura 4.13. Mașina de prelucrat cu ultrasunete tip MPU-01

Este destinată prelucrării ultrasonice cu abraziv a unei mari diversități de materiale dure, extradure și fragile, ca sticla, safirele, cuarțul, carburile și materialele ceramice, care nu pot fi prelucrate cu mijloace convenționale. Operațiile de prelucrare sunt de tipul: retezare, găurire, profilare, gravare și rectificare.

Prelucrarea se realizează prin copierea formei sculei în materialul supus prelucrării.

Mașina este compusă din:

- batiu;
- coloană de ghidare;
- convertor ultrasonic;
- masă de lucru în coordonate sau rotativă;
- sistem de alimentare cu suspensie abrazivă.

Caracteristicile de lucru ale mașinii sunt:

- frecvența nominală de activare.....20 kHz.
- puterea nominală de activare.....min.200W
- forța de apăsare sculă-piesă.....1,5-20 N
- cursa de poziționare pe verticală.....110±10mm.
- avansul tehnologic de lucru.....30±10mm.
- dimensiunile mesei de lucru.....180*100mm.
- cursa de poziționare a mesei de lucru.....50*50mm.
- diametrul mesei rotative.....Φ 100mm.
- turația mesei de lucru.....1000rot./min.
- durata ciclului de prelucrare.....5-60sec.
- productivitate de lucru etalon.....min.50mm³/min.
- dimensiuni de gabarit (L·l·H)
 - mașina propriu-zisă.....445·500·860
 - casetă electrică.....470·410·200
- masa netă
 - mașina propriu-zisă.....cca.65kg
 - caseta electrică.....cca.9kg

Toate mașinile analizate de fabricație românească pot fi folosite experimental, dar nici una nu este adecvată scopului tezei decât parțial. De aceea s-a impus crearea unui montaj experimental, specializat, care să țină cont de condițiile dimensionale și de calitate impuse suprafețelor pieselor.

■

4.5.4. Mașinile de prelucrat cu ultrasunete tip Exeron

Una din realizările de vârf în domeniu, este reprezentată de mașinile de prelucrare cu ultrasunete tip Exeron. Domeniile de întrebuințare a acestor mașini sunt industria ceasurilor, tehnica medicală (prelucrarea ceramicii pentru dinți), construcția sculelor și a tiparelor, industria sticlei, industria chimică, electrotehnică și electronică, etc.

Modelele Exeron US 102, US 302 și US 303, după cum se observă și din fotografiile 4.14.; 4.15 și 4.16., sunt dotate cu comandă modernă de urmărire a traseului, cu confort mărit în manipulare și siguranță în exploatare.

Punctul de „contact” între om și mașină este un IBM-PC compatibil, cu grafică color și monitor de 14 inch. Ciclurile de măsurare a uzurii, conținute în programele de prelucrare permit o compensare automată chiar în timpul prelucrării.

Ciclurile de cursă și cele de ridicare, comandate în funcție de timp, pot fi activate în programul de prelucrare și la nevoie pot fi optimizate în timpul prelucrării.

Exeron prin tehnologia de prelucrare Grubtt oferă în cadrul categoriei mașinilor de prelucrare cu ultrasunete, care și-au confirmat calitățile în practică, modele exeron 102; 302 și 303.

Tabelul 4.10 cuprinde principalele caracteristici dimensionale și de lucru ale mașinilor Exeron.

Tabelul 4.10

Date tehnice	U.M	Exeron US 102	Exeron US 302	Exeron US 303
Intervale de reglaj XYZ	mm	300 x 20 x 250	400x250x300	600x400x400
Domeniul de prindere	mm	500 x 340	500x400	550x480
Greutate concentrator	Kg	20	20	20
Instalație pentru suspensie abrazivă	l	30	30	30
- capacitate totală	l	24	24	24
- suspensie	l	6	6	6
- apă de spălare				
Dimensiunile întregii instalații	mm	1400x1050x1980	2100x1870x2100	2360x2400x2600
Lățime x Adâncime x Înălțime				
Puterea totală	W	1300	1300	1300
Racordul la rețea		380V	380V R,S,T 3x25A	380V R,S,T 3x25A

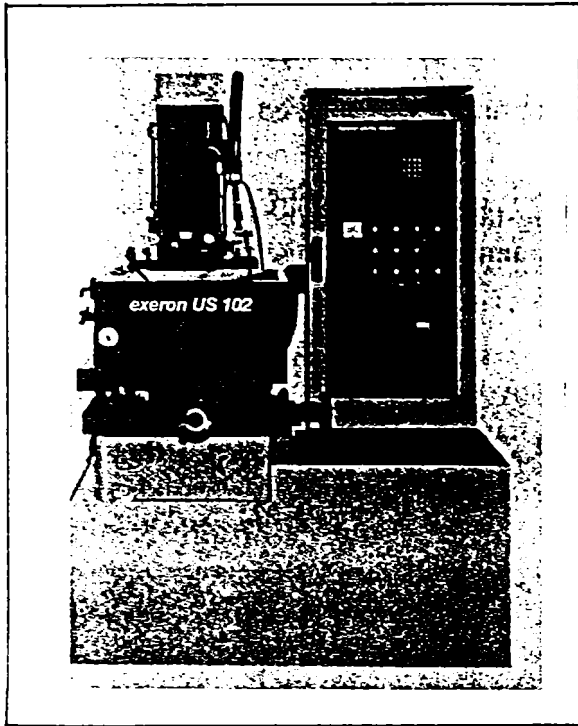


Fig. 4.14. Mașina de prelucrat cu
ultrasunete Exeron US-102

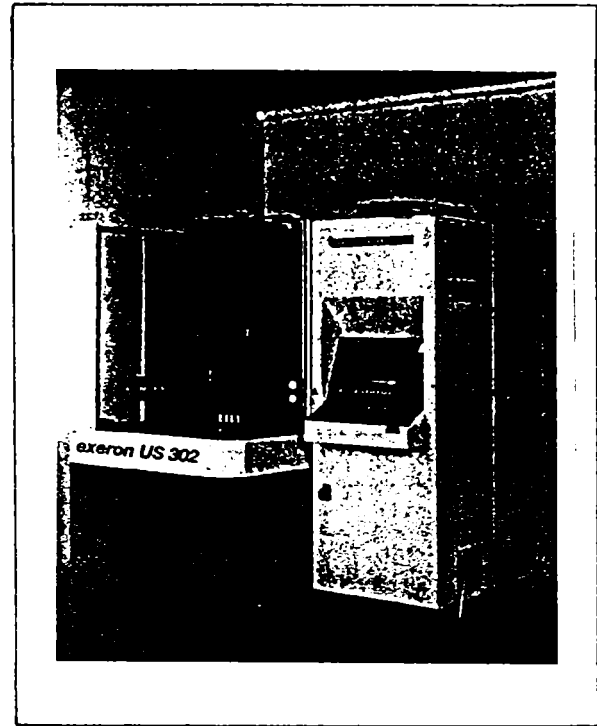


Fig. 4.15. Mașina de prelucrat cu
ultrasunete Exeron US-302

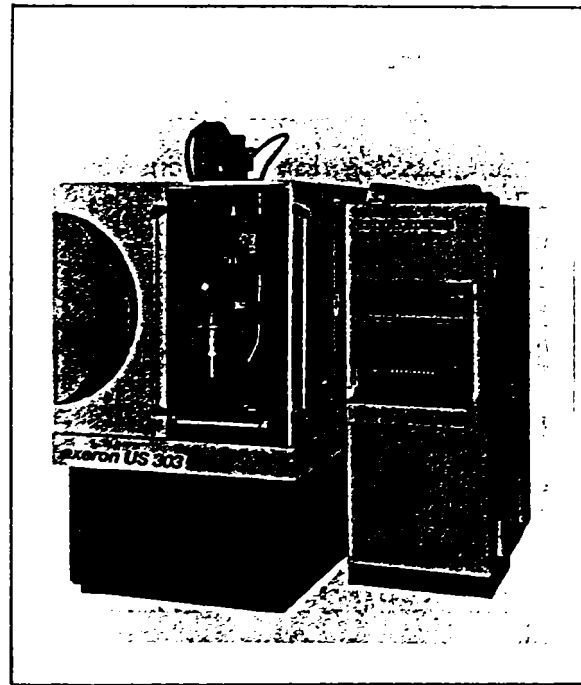
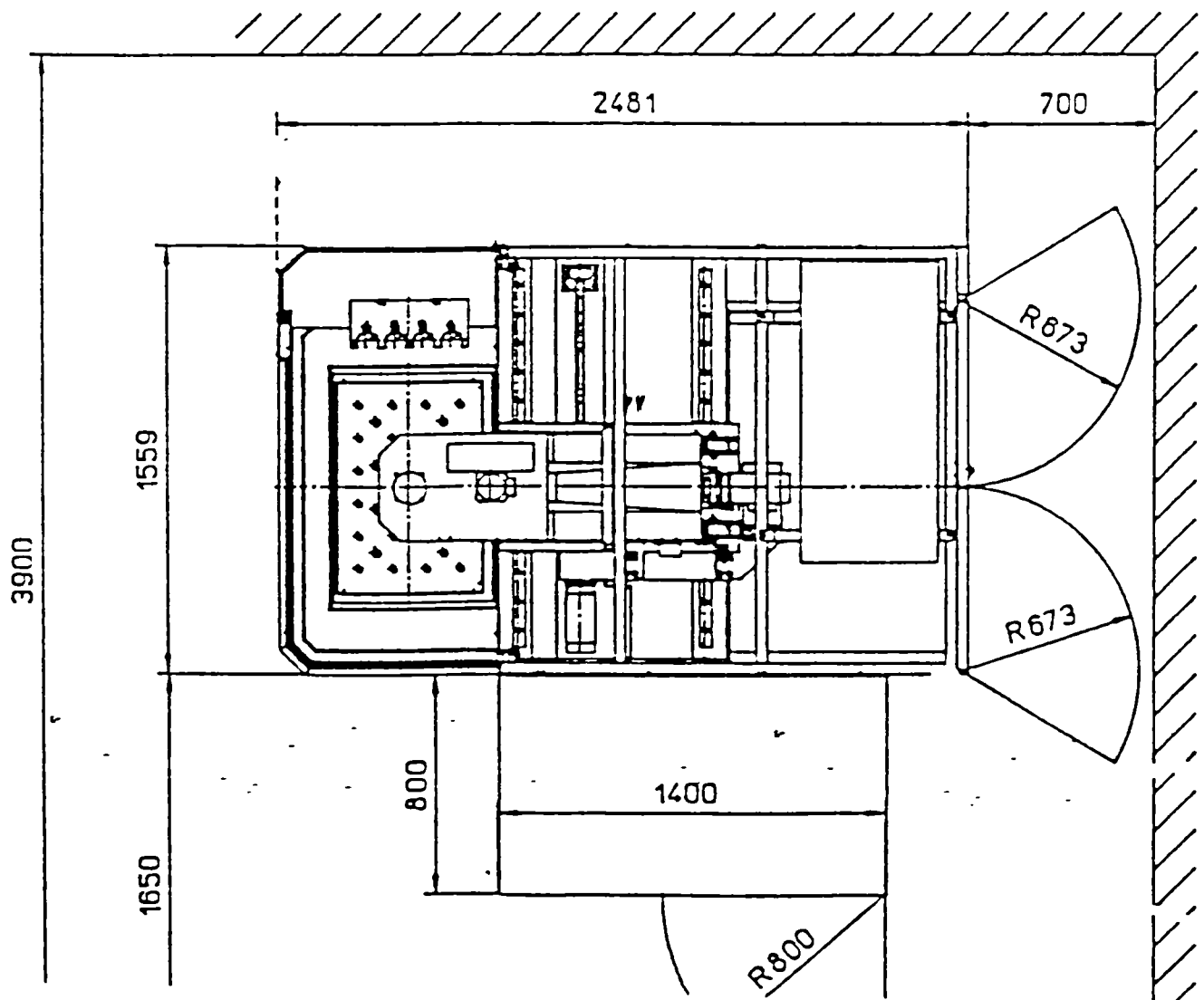
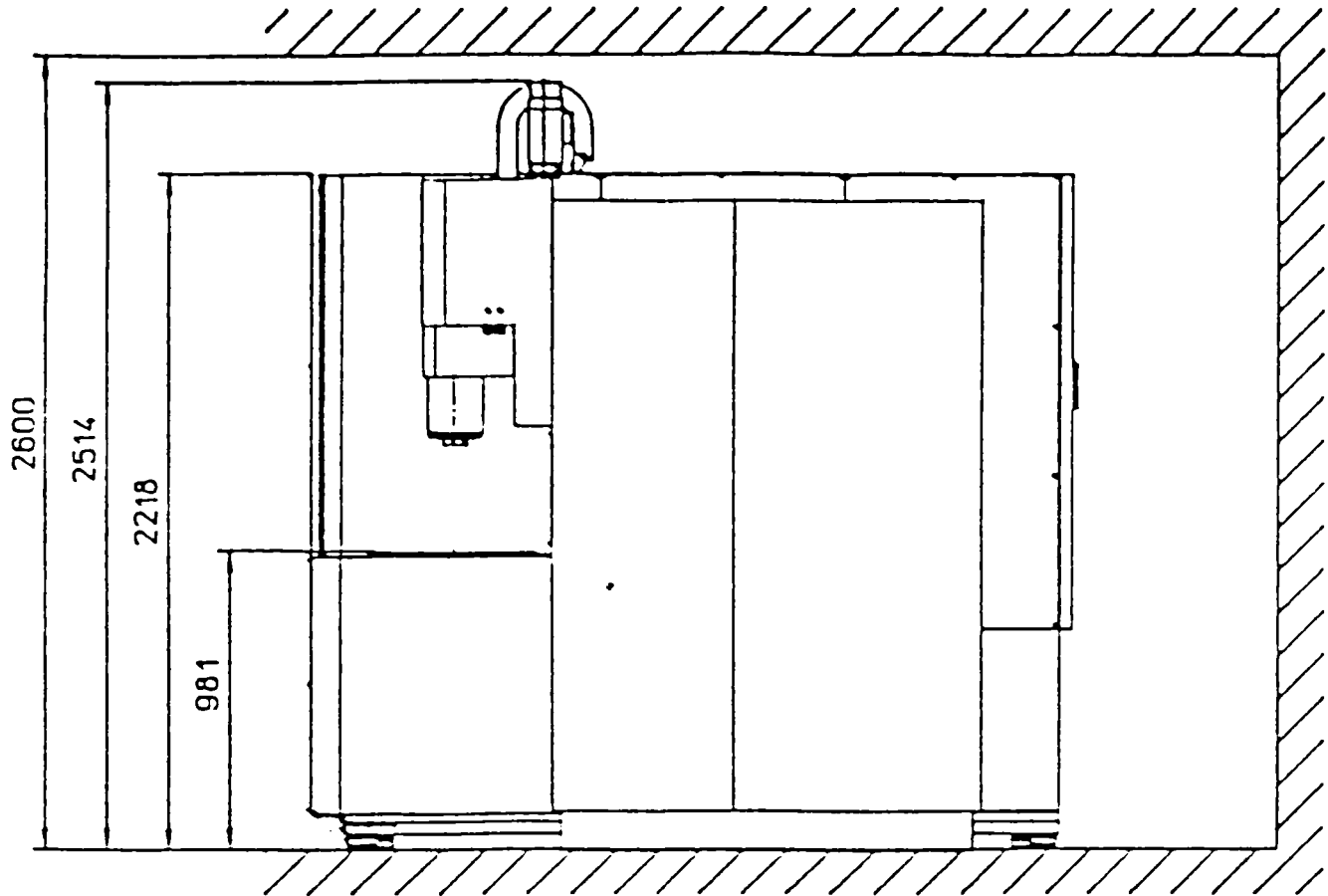


Fig. 4.16. Mașina de prelucrat cu ultrasunete
Exeron US-303

Technische Daten exeron US 303

Fig. 4.17 Maşina de prelucrat cu ultrasunete
tip Exeron US 303



Modelele exeron US 302 și US 303 sunt dotate cu comandă modernă de urmărire a traseului cu confort mărit în manipulare și siguranță în exploatare.

Prin programarea care poate fi ușor înțeleasă și facilitățile grafice pe care le are, manipularea mașinii este simplă și se poate învăța repede. În funcție de sarcina de prelucrare se află la dispoziție două tipuri de comandă.

Prelucrarea cu avans forțat cu limita reglabilă a forței maxime, sau **prelucrarea cu forța constantă** de contact a sculei, în vederea optimizării autonome a vitezei de prelucrare la sarcini noi de prelucrare și în cazul lipsei de tehnologie.

Când se prelucrează, se supraveghează efectul forței asupra sculei, iar dacă viteza de avans pe timpul prelucrării alese este prea mare, se reduce corespunzător.

Un generator de înaltă frecvență furnizează o putere în gol de 1300W (1800W)

Indicația optică de suprasarcină cu limita de suprasarcină preselectabilă ca și indicația puterii active sau a amplitudinii, permit supravegherea procesului de prelucrare.

La prelucrarea cu ultrasunete se fixează cerințe speciale pentru domeniul de lucru. Prin prelucrarea cu suspensie abrazivă (B_4C+H_2O) domeniul ar urma să poată fi configurat flexibil, pentru ca la prelucrare să se ofere pe cât posibil puține posibilități de depunere pentru B_4C .

Dispozitivul de alimentare integrat, permite accesul suspensiei abrazive în zona de lucru și spălarea – curățare a zonei de lucru.

Datorită dispozitivului de rotație integrat pe concentratorii standard, se poate centra scula pe piesă, se lipesc și se blochează în poziție de lucru.

Datorită concentratorilor speciali cu port-scula conică se pot întrebuința sculele standard ale ansamblului transductor electroacustic rotativ. Totuși, această întrebuințare se recomandă numai la adâncimi mici de prelucrare. Port-scula conică este avantajoasă la folosirea unor scule de contur mai mici.

Pentru prelucrarea alezajelor se recomandă întrebuințarea ansamblului cu transductor electroacustic rotativ

În cele ce urmează se prezintă modelul Exeron US-303 (figurile 4.16. și 4.17.), modelul cel mai reprezentativ și mai performant al seriei.

Exeron US 303

Batiu de mașina nedivizat din beton polimerizat.

Ghidajele pe axele X, Y și Z prin ghidaje de circulație liniar - sferice foarte precise. Sisteme de antrenare a axului prin motoare de curent alternativ dinamice și fusuri de precizie pe bile.

Protecție sonoră și antistropire automat rabatabilă.

Cursa mobilă a axei Z = 400 mm.

Generator de înaltă frecvență comandat de tiristor.

Frecvența de lucru 20 - 24 KHz cu adaptare automată a frecvenței când scula este uzată. Putere de ieșire în înalta frecvență 1300 / 1800 W.

Indicația de suprasarcină cu limita preselectată.

Transductor electroacustic (piezoceramic) cu randament maxim.

Reglare independentă de sarcină a amplitudinii de ieșire.

Programare în tehnică sprijinită grafic.

Prelucrare pe traseu cu interpolare liniară, circulară și curbă.

Anunțarea erorilor cu text chiar cu indicarea datei și orei.

Viteze mari de mers rapid (3 m /min) când rezoluția simultană pentru acționare este ridicată.

Domeniul de prindere al piesei 780 x 520 mm.

Cursa mobilă X - Y 520 x 360 mm.

Rezervor din oțel superior cu capacitatea de 30 l, 24 l suspensie și 6 l apă de spălare.

Mecanism de amestec pentru prepararea suspensiei.

Pompă separată pentru suspensie și de spălare.

Pompă cu furtun pentru prelucrarea cu absorbție.

Racord pneumatic 6 barr.

CONCLUZII

Analiza comparativă a mașinilor de prelucrat cu ultrasunete care ar corespunde în cele mai bune condițiuni prelucrării de precizie a discurilor optice și lentilelor din safir, indică următoarele:

- mașinile de precizie și performanță tip Exeron, sau cea cu sistem de inspecție optică (Brevet SUA nr.3.191.589) sunt practic inabordabile. Acestea reprezintă unități scumpe, de mare productivitate și achiziționarea lor nu justifică serii scurte de fabricație;

- mașinile de tip MPU – 03 (Universitatea Politehnica Timișoara) și respectiv MPU – 01 (Electrotimiș Timișoara), deși sunt la îndemână, nu asigură caracteristici pentru prelucrări de precizie specifice discurilor optice și lentilelor de safir. Ele nu sunt corespunzător echipate pentru centrarea semifabricatelor și inspecția optică periodică;

- soluția optimă pentru cazul concret de utilizare studiat în teză impune proiectarea, realizarea și încercarea unei mașini de construcție specializată prelucrărilor de precizie, cu facilități specifice de exploatare (centrare, inspecție periodică). Această mașină ar putea avea o construcție simplificată, realizată cu resurse proprii și cu o investiție considerabil mai mică, pornind de la asigurarea unor performanțe de exploatare limitate doar la cele impuse de specificul prelucrărilor de precizie cerută. Acestea se regăsesc într-o structură cinematică simplificată, cu un mecanism de avans adecvat și un sistem atașabil de inspecție optică prezentate în capitolul 6 și care a constituit unul din obiectivele tezei de doctorat.

- un mecanism de avans care să satisfacă cerințele unor prelucrări eficiente și de precizie considerăm că ar trebui să satisfacă următoarele cerințe:

- să permită trecerea cu ușurință la valori diferite ale sensibilității prin montaje simple, respectiv să răspundă atât prelucrărilor de finețe, cât și celor grosiere (versatilitate);

- posibilitatea asigurării retragerilor periodice intermitente pentru reîmprospătarea cu abraziv;

- posibilitatea inspecției optice de finețe a uzurii sculei și a locului prelucrării în intervalul dintre două retrageri;

-eventualitatea realizării unei soluții tehnice originale și brevetabile.

Capitolul 5

5. CERCETĂRI PRIVIND OPTIMIZAREA PROCEDEULUI PENTRU PRELUCRAREA DISCURILOR OPTICE ȘI A LENTILELOR DE SAFIR

5.1 Generalități

Încercările experimentale descrise și analizate în cele ce urmează au avut la bază următoarele premize:

- efectuarea lor în condițiile optime oferite de o structură constructivă adecvată (încercări efectuate pe mașinile MPU-05 și ME model experimental cu un microscop de scule);

- puterea de lucru a generatorului situată la valori reglabile între 20 și 150 W asigură densități optime ale energiei ultrasonice la interfața sculă-piesă, fără să asocieze fenomenele nedorite de expulzare a abrazivului și ciobire a marginilor piesei la ieșirea sculei;

- precizia de prelucrare a fost permanent monitorizată prin adoptarea unor sisteme optice adecvate (microscop stereo pe MPU-05 și microscop de scule pe ME) și care permit de asemenea centrarea și poziționarea corectă a piesei pe mașină;

- retragerile periodice pentru inspecția optică permit reîmprospătarea manuală cu suspensie abrazivă a locului prelucrării, eliminând necesitatea echipării mașinii cu sisteme de alimentare cu suspensie abrazivă.

Orice procedee de prelucrare, inclusiv cele de prelucrare în câmp ultrasonic sunt caracterizate de procese prin care are loc transformarea formei și dimensiunilor semifabricatului în scopul obținerii piesei dorite.

Un proces de prelucrare poate fi studiat prin una sau mai multe funcții de proces care stabilesc relații cantitative între caracteristicile de interes ale procesului și variabilele sale semnificative (factorii de influență).

Stabilirea funcțiilor de proces mai este denumită și “ *modelarea matematică a procesului* ”. Cu ajutorul acestor modele se poate lucra în mod științific, folosind proiectarea asistată de calculator. Acest proces trebuie să țină cont de:

- suprafețele generate sunt mici, limitate de puterile transductoarelor și apariția oscilațiilor transversale;

- adâncimile de prelucrare sunt relativ mici datorită înrăutățirii considerabile a condițiilor de prelucrare la adâncime, circulația substanței abrazive făcându-se foarte greu;

- productivitatea scăzută și uzura mare la sculele utilizate la prelucrarea pieselor.

În vederea desfășurării experimentărilor în condițiile impuse, pentru obținerea unor rezultate concludente în ceea ce privește fenomenul și rezultatele sale, s-a întocmit un **plan de experimentare**.

5.2 Plan de experimentare

1⁰. Identificarea echipamentelor experimentale și pregătirea materialelor consumabile.

2⁰. Studiul și însușirea planului de experimentare și încadrarea într-o concepție "**plan de experimentare ortogonal redus pe baze statistice**".

3⁰. Realizarea experimentelor.

4⁰. Concluzii preliminare.

5⁰. Prelucrarea datelor și completări ale concluziilor.

Parametrii avuți în vedere sunt:

A - amplitudinea de oscilație a sculei determinată de diferite puteri acustice 30, 50, 70 și 100w;

f - frecvența de oscilație a sculei $f_0 - 1\text{kHz}$; $f_0 - 0.5\text{kHz}$; f_0 ;

$f_0 + 0.5\text{kHz}$; $f_0 + 1\text{kHz}$ (f_0 – frecvența de rezonanță a convertorului ultrasonic)

p - presiunea de contact piesă - sculă 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4
daN/cm²;

c - configurația sculei - cu diferite forme geometrice;

av - tipul avansului - continuu;

- cu retrageri succesive la 30s ; 60s ; 90s;

n - tipul mișcării sculei - fără rotație; π

t - durata prelucrării 10"; 20"; 30"; 40"; 50"; 60"; 70"; 80"; 90"

K- suspensia abrazivă - granulația 12;

- concentrație volumică 20%; 40%; 60%

- alimentarea prin stropire; aspirație; refulare;

- tip B₄C; SiC;

m - material - sticlă;

- safir;

**Determinarea vitezei reale de pătrundere și a “durabilității”
abrazivului:**

$$\left. \begin{array}{l} P_{\max} \rightarrow 100\text{w} \\ p_{\text{opt}} \approx 2\text{daN} / \text{cm}^2 \\ f_0 \rightarrow 20,2\text{KHz} \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} \frac{\Delta h}{\Delta t} \rightarrow \text{viteza} \cdot \text{prelucrării} \\ \Delta T = f(\Delta H) \rightarrow \text{durata} \cdot \text{prelucrării} \end{array}$$

alimentare-permanentă; cu retrageri succesive și realimentări;
material – sticlă; safir;
abraziv - B₄ C granulație 12

Determinarea Q = f (puterea ultrasonica / presiunea de contact)

$$h = f(p_a) \text{ la } t_{50}$$

Condiții:

- f₀ ; p_{opt}; t₅₀(h)
- material : sticlă; safir;
- scula : tubulară; plină;
- a_v : constant;
- abraziv : B₄ C granulație 12
- h = f(t₅₀, p_a) [mm]
- t₅₀ = f(h, p_a) [s]

Determinarea Q = f (fus)

$$h = f(\text{fus}) \text{ [mm]} \quad \text{sau} \quad t_{50} = f(\text{fus}) \text{ [s]}$$

$$P_{ac} = 20 \text{ w};$$

scula : tubulară și plină;

material : sticlă ; safir;

abraziv : B₄ C granulație 12

Determinarea Q = f (% abraziv) ”

$$h = f(\% \text{ vol. abraziv}) \text{ [mm]}$$

$$t_{50} = f(\% \text{ vol. abraziv}) \text{ [s]}$$

$$P_{ac} = P_{ac \text{ max}}$$

scula : tubulară ; plină;

material : sticlă ; safir;

abraziv: B₄ C granulație 12

Concluzii: **parametrii optimi:** P_{ac} ; p_{ap} ; K % ⇒ f₀

Influența retragerilor periodice pentru Q_{opt} și scula de configurație optimă

Influența configurației sculei

$$h = f(\text{configurație}) [\text{mm}]$$

$$t_{50} = f(\text{configurație}) [\text{s}]$$

Influența rotației pentru Q_{opt} (scula optimă și regim de prelucrare cu retrageri repetate)

Se va urmări: calitatea prelucrării; precizia prelucrării; uzura sculei.

5.3 Structura programelor experimentale

Pentru determinarea numărului de experiențe și a valorilor variabilelor pentru fiecare experiență (stabilirea programului experimental) s-au dezvoltat o serie de programe experimentale. Dintre acestea cel mai des sunt folosite programele factoriale la care punctele regiunii experimentale rezultă din efectuarea tuturor combinațiilor posibile între variabile și nivelurile de variație atribuite.

Astfel de programe, denumite **programe factoriale întregi** folosesc toate combinațiile posibile între variabilele independente și nivelurile codificate respective. Un astfel de program necesită, de cele mai multe ori, efectuarea unui număr relativ mare de experiențe. Pentru determinarea modulelor de ordinul doi se folosesc așa numitele programe centrale compuse.

Aceste programe au avantajul că se pot dezvolta secvențial, întâi programul factorial întreg cu care se determină modelul de ordinul întâi și dacă acesta se dovedește inadecvat, atunci se completează programul cu punctele așa-numite axiale, pentru estimarea termenilor patratici obținându-se programele compuse (pentru ordinul doi).

La numărul de experiențe necesare determinării valorilor coeficienților variabilelor, trebuie să se adauge un număr de experiențe la care sunt plasate în centrul domeniului experimental. Acestea sunt denumite experiențe centrale și servesc la estimarea erorii experimentelor și determinarea preciziei răspunsului (variabilei dependente) în centrul experimentului, adică verificarea adecvantei modelului.

Datorită numărului mare de experiențe, precum și faptului că efectele interacțiunii de ordinul 2,3 sau superioare sunt fizic ne semnificative, rezultă că o dată cu creșterea numărului de variabile, raportul dintre datele utile și numărul experiențelor descrește rapid.

Aceste motive au dus la folosirea programului factorial complet.

Un program factorial fracționat, permite estimarea coeficienților variabilelor

independente și a principalelor lor acțiuni. Aceste programe (ca de altfel și cele întregi) trebuie să continue și experimentele repetate din centrul domeniului de experimentare.

Astfel, în studiul experimental al proceselor tehnologice în vederea optimizării acestora, sunt multe cazuri în care sunt implicați doi sau mai mulți factori având efect direct asupra răspunsului sistemului, dar mai ales interacțiunea acestora primând uneori față de cea a factorilor înșiși.

În raport cu investigarea prin loturi (batch) sau eşantioane (sample) care necesită replici pentru diferite niveluri ale variabilei independente și deci un număr foarte mare de încercări cu costuri neeconomice, **experimentul factorial realizează o optimizare importantă a numărului de încercări.**

5.3.1 Experimentul factorial

Pentru a lămurii principiul acestei proceduri, vom considera un experiment care dezvoltă acțiunea a doi factori A și B la nivelurile a și b prin toate combinațiile posibile ale factorilor la cele două niveluri posibile minim, codificat -1 și respectiv maxim, codificat 1.

Se definește efectul unui factor asupra sistemului, schimbarea, în răspuns al acestuia, produsă de schimbarea sa în nivel. Totodată, acesta se mai numește efect principal, deoarece se referă la un efect primar al factorului de interes din experiment.

Cuantificarea efectului principal se face prin diferența mediilor efectelor la nivelul superior și respectiv inferior al factorului. Deci creșterea factorului A de la nivelul -1 la 1 implică un răspuns mediu. Analog se determină efectul principal al factorului B.

În mod convențional se notează A, B, AB efectele principale și interacțiunea factorilor și cu “-” și “+” nivelurile minim și maxim ale acestora. De asemenea, în mod convențional se notează cu a, b, ab totalurile pentru răspunsul sistemului la valorile maxime ale factorilor principali.

Calculul efectelor principale și respectiv al interacțiunii se fac prin calculul mediilor la diferențele răspunsurilor pe fiecare nivel după cum urmează:

$$A = \frac{1}{2n} \{ [ab - b] + [a - (1)] \} = \frac{1}{2n} [ab + a - b - (1)] \quad (5.1.)$$

$$B = \frac{1}{2n} [ab + b - a - (1)] \quad (5.2.)$$

$$AB = \frac{1}{2n} [ab - (1) - a - b] \quad (5.3.)$$

Alte notații convenționale sunt:

$$\text{Contrast A} = [ab + a - b - (1)] \quad (5.4.)$$

$$\text{Contrast B} = [ab + b - a - (1)] \quad (5.5.)$$

$$\text{Contrast AB} = [ab + (1) - a - b] \quad (5.6.)$$

Sumele patratelor efectelor principale:

$$SS_A = \frac{[ab + a - b - (1)]^2}{n \cdot 4} \quad (5.7.)$$

$$SS_B = \frac{[ab + b - a - (1)]^2}{n \cdot 4} \quad (5.8.)$$

$$SS_{AB} = \frac{[ab + (1) - a - b]^2}{n \cdot 4} \quad (5.9.)$$

Pe baza acestor estimatori se realizează analiza de varianță a efectelor modelului factorial.

Analiza ANOVA permite aprecierea nivelului de semnificație pentru efectele principale și interacțiunii. Analiza rezidualilor pe baza modelului de regresie pentru răspunsurile aflate, permit determinarea apariției sau nu a unor tendințe de grupare a valorilor. Deci în prima fază vom folosi experimentul factorial cu două variabile de răspuns.

Mărimile variabile sunt: timpul prelucrării, presiunea de contact sculă-piesă, frecvența, puterea, concentrația volumică a suspensiei abrazive, configurația sculei.

Din literatura de specialitate și din experiența personală, domeniile în care acestea variază nu se iau complet aleatoriu ci în domenii destul de bine cunoscute.

5.3.2 Analiza unifactorială "ANOVA"

În scopul stabilirii domeniului de investigare, s-a procedat în primul rând la analiza unifactorială ANOVA care să justifice normalitatea distribuției valorilor experimentale. Acest experiment reprezintă o tehnică ce permite să se determine efectul unei variabile asupra populației.

În analiza de varianță se clasifică fiecare observație într-un eșantion corespunzător unui singur factor la diferite niveluri. Pentru fiecare eșantion se consideră efectul variabilei realizând experimentul randomizat.

Analiza ANOVA realizează studiul efectului unui factor calitativ asupra populației prin variabila de răspuns a sistemului. Experimentul poate fi echilibrat sau nu, dar condiția care se pune este că variabila aleatoare (dependentă) să urmeze o distribuție normală.

Un exemplu tipic de date pentru un experiment cu un singur factor este:

Nivelul experimentului	Observații	Totaluri	Medii
1	$y_{11} \dots y_{1n}$	y_1	y_1
2	$y_{21} \dots y_{2n}$	y_2	y_2
:	:	:	:
:	:	:	:
a	$y_{a1} \dots y_{an}$	y_a	y_a
		$y_{..}$	$y_{..}$

Formula generală a răspunsului sistemului este:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \tag{5.10.}$$

μ - este media tuturor observațiilor;

τ_i - este efectul fiecărui nivel (eșantion);

ε_{ij} - este componenta erorii;

Se observă că asupra modelului intervin trei componente din care două au efect fix și una efect variabil.

τ_i - este numită și abaterea față de media totală a observațiilor și verifică

relația:
$$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0 \tag{5.11.}$$

y_i - este suma valorilor observațiilor pentru nivelul I;

$y_{..}$ - este suma totalurilor de la fiecare nivel de observație a variabilei dependente;

$$y_i = \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (5.12.)$$

$$\bar{y}_i = \frac{y_i}{n} \quad i = 1, 2, \dots, a \quad (5.13.)$$

$$y_{..} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (5.14.)$$

$$\bar{y}_{..} = \frac{y_{..}}{N} \quad (5.15)$$

Media observațiilor din eșantionul de ordin i este data de relația:

$$E (y_{ij}) = \mu_i = \mu + \tau_i \quad i = 1, 2, \dots, 9 \quad (5.16.)$$

Pentru realizarea analizei de varianță se face porționarea variabilei dependente în părțile sale componente, plecând de la descompunerea sumei (corectate) a patratelor:

$$\sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 \quad (5.17.)$$

Ecuția fundamentală a analizei de varianță ANOVA este:

$$\sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = n \sum_{i=1}^9 (\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (5.18.)$$

În tabelul standard ANOVA se mai calculează mediile sumelor patratelor pentru fiecare nivel și suma patratelor erorilor aferente.

Pentru un singur factor și efecte fixe ale modelului, tabelul ANOVA se prezintă astfel:

Tabelul 5.1.

Sursa de variație	Suma patratelor	Numărul gradelor de libertate	Media patratelor	F ₀
Între eșantioane (niveluri)	SS _{NIVEL}	a-1	MS _{NIVEL}	F ₀ = MS _{NIVEL} * MS _E
Eroarea (în eșantionare)	SS _E	N-a	MS _E	
TOTAL	SS _T	N-1		

Dezavantajul metodei constă în faptul că nu sunt puse în evidență efectele interacțiunilor între variabilele independente cercetate.

Acest dezavantaj este eliminat prin experimentul factorial - **metoda suprafețelor de răspuns**.

5.3.3. Metoda suprafețelor de răspuns (RMS)

Metoda suprafețelor de răspuns sau RMS reprezintă un ansamblu de tehnici geometrice și statistice a răspunsului sau răspunsurilor de interes în funcție de doi sau mai mulți parametri la diverse niveluri cu scopul optimizării comportamentului sistemului.

De exemplu, modelul matematic al sistemului poate fi: $y = f(x_1, x_2) + \varepsilon$

Unde: ε - erorile observațiilor.

Dacă notăm răspunsul sistemului $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$, atunci suprafața reprezentată prin $\eta = f(x_1, x_2)$ reprezintă suprafața de răspuns a sistemului.

În figura care reprezintă răspunsul sistemului se pot trasa, pentru anumite înălțimi de răspuns echicontururile corespunzătoare.

În majoritatea problemelor de RMS se pune problema de a relaționa răspunsul sistemului de variabile independente.

Se utilizează expresii polinomiale de gradul 1:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k + \varepsilon \quad (5.16.)$$

sau de gradul 2:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (5.17.)$$

pentru cazul în care se detectează curbarea suprafeței de răspuns în zona studiată.

Problema care se pune în cazul problemelor de RMS este de a detecta aria în care au loc răspunsuri semnificative. De asemenea într-o astfel de zonă cu o curbură evidentă se pune problema optimizării perechilor de variabile independente astfel încât să se obțină maximul sau minimul.

Accesarea procedurii sub Mediul STATG se face prin accesarea succesivă a opțiunilor:

Quality / Experimental / Responce Surface Method.

După lansarea procedurii în primul ecran se cere numărul variabilelor dependente (se vor alege două).

Opțional se va preciza un titlu pentru fișierele de ieșire.

Se vor declara valorile extreme pentru variabilele dependente.

Se alege în continuare un experiment „ 2^3 ” adică doi parametri independenți la 3 niveluri (design centrat) sistemul proiectând pentru 9 încercări. În urma introducerii datelor și respectiv a măririi designului „i” cu răspunsul sistemului, se obține ecranul variabilelor independente și respectiv dependente.

Salvarea și analiza rezultatelor - se obțin coeficienți de regresie, tabelul ANOVA, diagrama PARETO și plotările suprafeței de răspuns și respectiv contur.

Pentru a concluziona, se vor interpreta rezultatele oferite de diferitele opțiuni.

În cazul folosirii acestei metode (a suprafețelor de răspuns) apare un avantaj cu evidente implicații în micșorarea numărului de experiențe necesare contribuind esențial în economia de timp necesar - cu aceleași rezultate.

”

Tabelul 5.2.

FACTORUL FICHER $F_{3, n; 0,2}$
 Valorile minime ale gradelor de libertate pentru numărător

Nr. crt.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	5.83	7.50	8.20	8.58	8.82	8.98	9.10	9.19	9.26	9.32	9.41	9.49	9.58	9.63	9.67	9.71	9.76	9.80	9.85
2	2.57	3.00	3.15	3.23	3.28	3.31	3.34	3.35	3.37	3.38	3.39	3.41	3.43	3.43	3.44	3.45	3.46	3.47	3.48
3	2.02	2.28	3.36	2.39	2.41	2.42	2.43	2.44	2.44	2.44	2.45	2.46	2.46	2.46	2.47	2.47	2.47	2.47	2.47
4	1.81	2.00	2.05	2.06	2.07	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08
5	1.69	1.85	1.88	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.88	1.88	1.88	1.88	1.87	1.87	1.87
6	1.62	1.76	1.78	1.79	1.79	1.78	1.78	1.78	1.77	1.77	1.77	1.76	1.76	1.75	1.75	1.75	1.74	1.74	1.74
7	1.57	1.70	1.72	1.72	1.71	1.71	1.70	1.70	1.70	1.69	1.68	1.68	1.68	1.67	1.67	1.66	1.66	1.65	1.65
8	1.54	1.66	1.67	1.66	1.66	1.65	1.64	1.64	1.63	1.63	1.62	1.62	1.61	1.60	1.60	1.59	1.59	1.58	1.58
9	1.51	1.62	1.63	1.63	1.62	1.61	1.62	1.62	1.59	1.59	1.58	1.57	1.56	1.56	1.55	1.54	1.51	1.53	1.53
10	1.49	1.60	1.60	1.59	1.59	1.58	1.57	1.56	1.56	1.55	1.54	1.53	1.52	1.52	1.51	1.51	1.50	1.49	1.48
11	1.47	1.58	1.58	1.57	1.56	1.55	1.54	1.53	1.53	1.52	1.51	1.50	1.49	1.49	1.48	1.47	1.47	1.46	1.45
12	1.46	1.56	1.56	1.55	1.54	1.53	1.52	1.51	1.51	1.50	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.44	1.43	1.42
13	1.45	1.55	1.55	1.53	1.52	1.51	1.50	1.49	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.42	1.41	1.40
14	1.44	1.53	1.53	1.52	1.51	1.50	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.41	1.40	1.39	1.38
15	1.43	1.52	1.52	1.51	1.49	1.48	1.47	1.46	1.46	1.45	1.44	1.43	1.41	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36
16	1.42	1.51	1.51	1.50	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.44	1.43	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34
17	1.42	1.51	1.50	1.49	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.43	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33
18	1.41	1.50	1.49	1.48	1.46	1.45	1.44	1.43	1.43	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.32
19	1.41	1.49	1.49	1.47	1.46	1.44	1.43	1.42	1.41	1.41	1.40	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.32	1.30
20	1.40	1.49	1.48	1.47	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.32	1.31	1.29
21	1.40	1.48	1.48	1.46	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.35	1.34	1.33	1.32	1.31	1.30	1.28
22	1.40	1.48	1.47	1.45	1.44	1.42	1.41	1.40	1.39	1.39	1.37	1.36	1.34	1.33	1.32	1.31	1.30	1.29	1.28
23	1.39	1.47	1.47	1.45	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.35	1.34	1.33	1.32	1.31	1.30	1.28	1.27
24	1.39	1.47	1.46	1.44	1.43	1.41	1.40	1.39	1.38	1.38	1.36	1.35	1.33	1.32	1.31	1.30	1.29	1.28	1.26
25	1.39	1.47	1.46	1.44	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.34	1.33	1.32	1.31	1.29	1.28	1.27	1.25
26	1.38	1.46	1.45	1.44	1.42	1.41	1.39	1.38	1.37	1.37	1.35	1.34	1.32	1.31	1.30	1.29	1.28	1.26	1.25
27	1.38	1.46	1.45	1.43	1.42	1.40	1.39	1.37	1.36	1.35	1.33	1.32	1.31	1.30	1.28	1.27	1.26	1.24	1.24
28	1.38	1.46	1.45	1.43	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.34	1.33	1.31	1.30	1.28	1.28	1.27	1.25	1.24
29	1.38	1.45	1.45	1.43	1.41	1.40	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.32	1.31	1.30	1.29	1.27	1.26	1.25	1.23
30	1.38	1.45	1.44	1.42	1.41	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.32	1.30	1.29	1.28	1.27	1.26	1.24	1.23
40	1.36	1.44	1.42	1.40	1.39	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.31	1.30	1.28	1.26	1.25	1.24	1.22	1.21	1.19
60	1.35	1.42	1.41	1.38	1.37	1.35	1.33	1.32	1.31	1.30	1.29	1.27	1.25	1.24	1.22	1.21	1.19	1.17	1.15
120	1.34	1.40	1.39	1.37	1.35	1.33	1.31	1.30	1.29	1.28	1.26	1.24	1.22	1.21	1.19	1.18	1.16	1.13	1.10
∞	1.32	1.39	1.37	1.35	1.34	1.31	1.29	1.28	1.27	1.25	1.24	1.22	1.19	1.18	1.16	1.14	1.12	1.08	1.00

V A L O R I L E M I N A L E D E L I B E R T A T E P E N T R U N U M A R A T O R

5.3.4. Dimensionarea și execuția sculelor

Sculele pentru executarea încercărilor experimentale au fost proiectate și executate având în vedere următoarele considerente:

- necesitatea de prindere a sculei în concentrator prin înșurubare cu M6;

- partea de strângere cu S 10 mm;

- sculele pentru perforare foarte îngrijit executate la $\varnothing_{\text{ext}} = 2$ mm iar la sculele de carotare $\varnothing_{\text{int}} = 4$ mm;

- pentru a studia influența formei sculelor s-au confecționat scule tubulare cu margini exterioare tesite la 30° , 45° și 60° ca și practicarea unei borduri exterioare.

Sculele au fost executate din OLC 45.

În toate aplicațiile care au ca scop determinarea valorilor optime ale parametrilor asupra procesului de prelucrare și influența calitativă și cantitativă a acestora asupra întregului fenomen, se caută obținerea unei cantități maxime de energie, ceea ce pentru o frecvență fixă înseamnă amplitudine maximă de oscilație la rezonanță.

Efectele calorice nedorite asupra transductorului și concentratorului, se pot elimina prin sisteme de răcire cu apă sau ventilare.

Forța axială de apăsare diferențiată ca valoare, dar specifică fiecărui proces tehnologic, în care obiectul de prelucrare este un corp solid, reprezintă elementul perturbator care trebuie controlat.

Abateri față de valoarea prescrisă tehnologic pot să apară în procesele de prelucrare cu evoluție cvasialeatorie sau în cazul în care mecanismele de execuție sunt prea puțin sensibile.

În cazul prelucrării dimensionale, capacitatea productivă Q_v este în aparență indicatorul cel mai semnificativ privind eficiența prelucrării.

$$Q_v = (\text{volumul de material prelevat}) / \text{unitatea de timp} \quad \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{s}} \right]$$

Indicatorul cel mai potrivit pentru aprecierea capacității productive, care ar permite comparații permanente privind aplicațiile și echipamentele folosite, ar trebui să fie raportul între valoarea efectelor.

realizate și energia totală consumată. Evaluarea fenomenului pe aceste baze se practică încă sporadic.

Întrucât în timpul prelucrării variația suprafeței active a sculei suferă modificări nesemnificative, am asociat capacitatea productivă Q_v cu adâncimea de prelucrare h .

Această mărime de ieșire este dependentă de **amplitudinea** oscilațiilor sculei și în consecință, dependența de **puterea ultrasonică** utilizată. Acești parametri se asociază cu funcțiile specifice ale ansamblului generator de ultrasunete – convertor ultrasonic.

Altă mărime de influență este **presiunea de contact sculă-piesă**, care din experiență și literatura de specialitate este maximă pentru valori în domeniul $0,5 - 4 \text{ daN/cm}^2$. Presiunile mai mici afectează cuplajul acustic necesar, iar presiunile mai mari introduc amortizări în sistemul oscilant.

O altă mărime cu o influență considerabilă asupra desfășurării procesului de prelucrare o reprezintă **caracteristicile suspensiei abrazive**, acesta fiind un parametru complex care integrează **duritatea granulei, mărimea și starea ei de suspensie**.

Pe lângă principalii parametri de mai sus, trebuie să remarcăm faptul că o serie de măsuri tehnologice legate de ciclul de lucru al mașinii (cu sau fără retrageri periodice) respectiv forma și dimensiunile sculei pot influența, uneori substanțial, capacitatea productivă.

Încercările experimentale s-au realizat pe o mașină ultrasonică tip MPU_{me} (model experimental cu microscop de scule, cinematic similar cu MPU-03, existent în laboratorul de ultrasunete al Politehnicii din Timișoara) a cărei schemă cinematică este redată în figura 5.2. iar în figura 5.3. fotografia ei.

Principalele caracteristici ale mașinii sunt:

- Generator de ultrasunete ELECTROSON 100W / 20 Khz;
- Convertor ultrasonic rotativ în $\lambda/2$, cu două ferite tip I;
- Masa telescopică, cu sensibilitate 0,02 daN;
- Ciclu comandat manual sau semiautomat;
- Gabarit 0,5 x 0,5 x 0,9 m.

MPU_{me} poate asigura împreună cu accesoriile din înzestrare cvasitotalitatea situațiilor regăsite în practica prelucrării dimensionale cu ultrasunete.

Din acest considerent, prezintă interes pentru lucrarea de față:

- **studiul influenței parametrilor regimului de lucru și ai tehnologiei asupra capacității productive.**

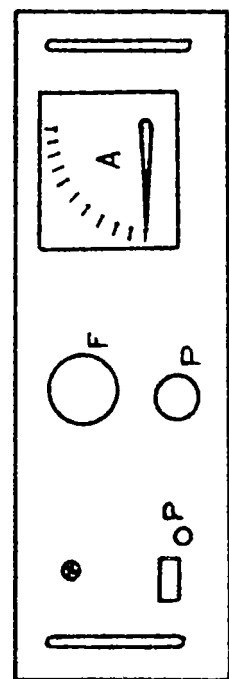
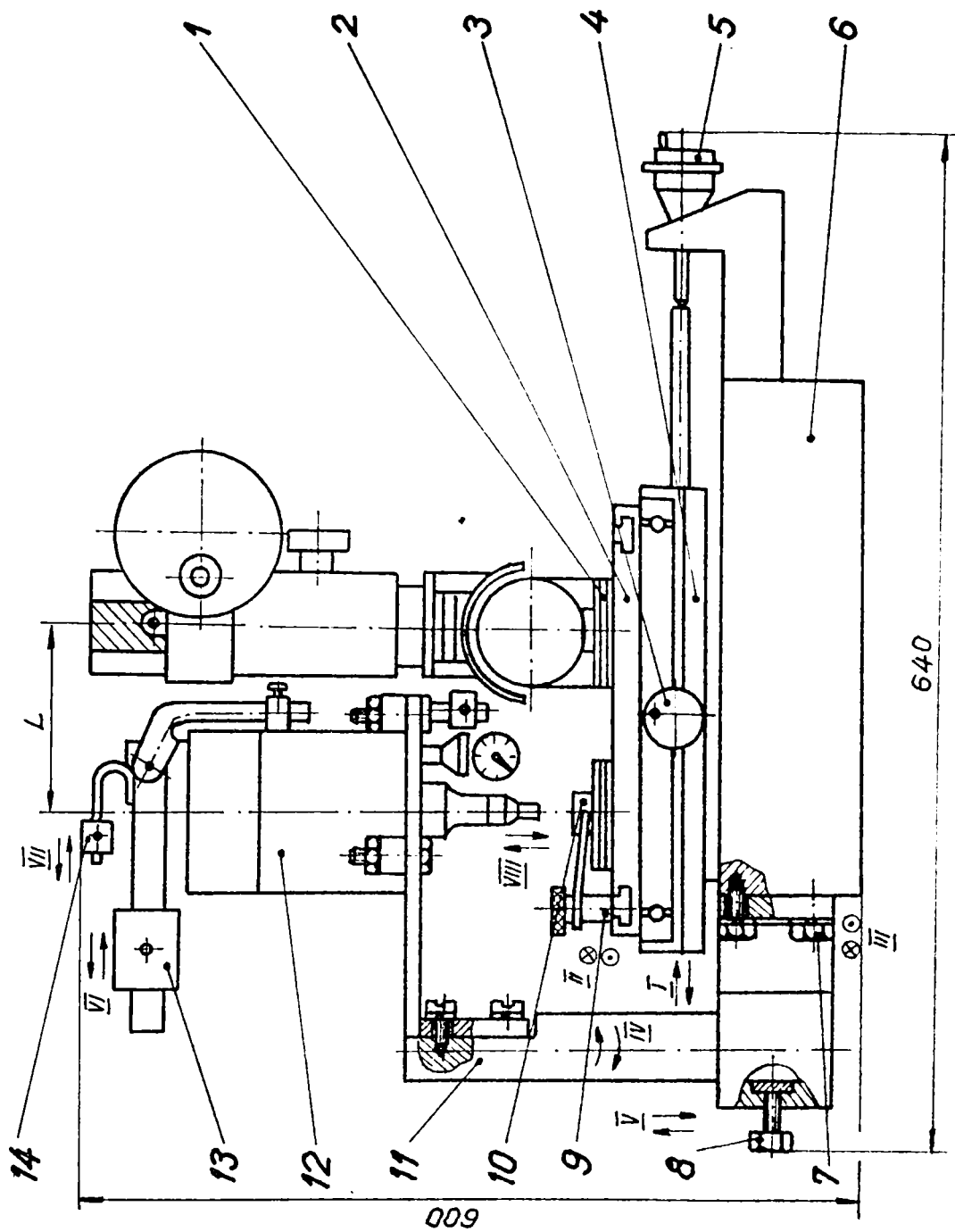


Fig. 5.2 Mașina de prelucrat cu ultrasunete MPU me

- studiul influenței parametrilor regimului de lucru asupra preciziei și calității prelucrării.

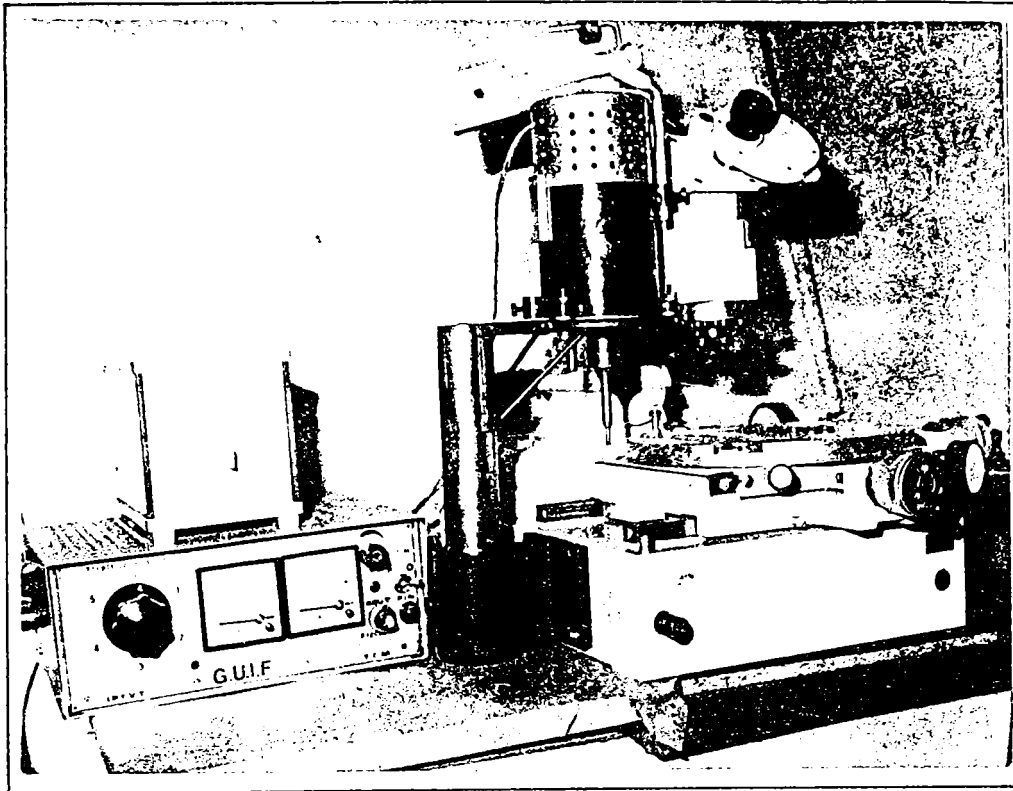


Figura 5.3 . Mașina de prelucrat MPU_{me}

În acest scop se face identificarea elementelor de comandă și control ale ciclului de lucru. În procesul verificărilor și identificărilor s-au confruntat realitatea existentă cu elemente cuprinse în documentația de bază a mașinii.

Astfel, puterea optimă necesară procesului de carotare nu depășește 20 W, ceea ce limitează ecartul experimentărilor și crește spre 100 W la perforarea lentilei de safir.

Se constată o foarte bună stabilitate a frecvenței pe parcursul desfășurării prelucrării, ceea ce ajută la buna desfășurare a experimentului.

Studiul comparativ al prelucrabilității s-a făcut pe un set de eșantioane din sticlă și safir artificiale, utilizându-se condiții similare de încercare:

- P = 20 w - constantă;
- p = 2 daN/cm² – constantă;
- τ = 2 minute
- Abraziv = B₄C granulația 12;
- Scule= Pentru perforare d = 2 mm.

Pentru studiul influenței presiunii de contact asupra capacității productive (exprimată prin adâncimea de prelucrare) s-a lucrat cu aceleași scule, variind valorile presiunii de contact în limitele deja cunoscute 1-4 daN/cm².

Datele rezultate se introduc în programul de analiză statistică și se vor obține elementele grafice care ne conduc la concluzii referitoare la influența presiunii de contact asupra adâncimii de prelucrare.

Analog, se procedează în studiul influenței amplitudinii oscilațiilor (prin varierea puterii), a timpului de prelucrare și a frecvenței de lucru. Datele se introduc în programul SOFTWARE "STATGRAPHICS" versiunea 6.1., licențiat pentru utilizare în Universitatea Politehnica Timișoara.

În urma analizei răspunsurilor grafice ale acestui program, se vor putea trage concluziile necesare îmbunătățirii prelucrabilității materialelor dure și fragile în câmp ultrasonic cu suspensie abrazivă.

Pentru a studia influența concentrației abrazivului asupra adâncimii de prelucrare se folosește același montaj, variind proporția volumică a abrazivului în lichidul purtător (apa). Datele de răspuns ale experimentului oferă ocazia analizării acestui factor important de influență în procesul prelucrării.

S-a constatat din practică faptul că o mare influență asupra capacității productive, mai ales la adâncimi mari de 8 - 15 mm, o reprezintă retragerea periodică a sculei cu reâmprospătarea în zona de lucru a suspensiei abrazive.

În funcție de rezultatele obținute în studiul influenței timpului asupra adâncimii de prelucrare se pot stabili timpul optim de prelucrare, cu această valoare să stabilim perioada optimă de retragere și realimentare.

Se studiază de asemenea influența factorului de formă a sculei, atât asupra capacității productive, cât și asupra preciziei dimensionale și de formă sau calității suprafeței obținute.

În analiza rezultatelor tuturor experimentelor, alături de influențele asupra capacității productive se vor include și influențele asupra calității suprafețelor obținute și preciziei dimensionale sau de formă. Aceasta mai ales datorită faptului că prelucrările cu suspensie abrazivă în câmp ultrasonic a materialelor dure și fragile nu au ca indicator predominant capacitatea productivă, ci calitatea și precizia suprafețelor prelucrate.

5.4. Rezultatele experimentărilor obținute la carotarea discurilor optice

$$h = f(t)$$

Nr. Crt	Timp [s]	Adanc [mm]
1	10	0.20
2	10	0.30
3	10	0.10
4	10	0.10
5	10	0.20
6	20	0.60
7	20	0.80
8	20	0.60
9	20	0.50
10	20	0.80
11	30	0.90
12	30	1.10
13	30	1.00
14	30	0.90
15	30	1.10
16	40	1.40
17	40	1.30
18	40	1.20
19	40	1.10
20	40	1.30
21	50	1.68
22	50	1.55
23	50	1.51
24	50	1.42
25	50	1.60
26	60	1.94
27	60	1.90
28	60	1.93
29	60	1.76
30	60	1.91
31	70	2.15
32	70	2.22
33	70	2.10
34	70	1.92
35	70	2.15

$$h = f(p_{ap})$$

Nr. Crt	Pres. [daN/cm ²]	Adanc [mm]
1	1.0	1.40
2	1.0	1.35
3	1.0	0.92
4	1.0	0.77
5	1.5	1.81
6	1.5	1.76
7	1.5	1.86
8	1.5	1.80
9	2.0	2.30
10	2.0	2.21
11	2.0	2.20
12	2.0	2.15
13	2.5	2.10
14	2.5	1.97
15	2.5	2.30
16	2.5	2.28
17	3.0	1.70
18	3.0	1.61
19	3.0	2.15
20	3.0	2.08
21	3.5	1.58
22	3.5	1.50
23	3.5	1.70
24	3.5	1.60
25	4.0	1.53
26	4.0	1.45
27	4.0	1.37
28	4.0	1.31

$$h = f(f_0)$$

Nr. Crt	Frecv. [Khz]	Adanc [mm]
1	20.07	0.21
2	20.07	0.20
3	20.07	0.21
4	20.07	0.22
5	20.09	0.55
6	20.09	0.60
7	20.09	0.62
8	20.09	0.50
9	20.11	1.00
10	20.11	1.11
11	20.11	1.20
12	20.11	1.30
13	20.13	1.80
14	20.13	1.60
15	20.13	1.90
16	20.13	1.80
17	20.15	0.95
18	20.15	1.00
19	20.15	0.90
20	20.15	0.95
21	20.16	0.80
22	20.16	0.90
23	20.16	0.60
24	20.16	0.70
25	20.18	0.62
26	20.18	0.50
27	20.18	0.70
28	20.18	0.60
29	20.20	0.24
30	20.20	0.20
31	20.20	0.30
32	20.20	0.25

$$h = f(P_{ac})$$

Nr. Crt.	Putere [W]	Adancime [mm]
1	10.0	1.000
2	10.0	1.100
3	10.0	1.200
4	10.0	1.000
5	13.5	2.050
6	13.5	2.100
7	13.5	2.050
8	13.5	1.950
9	17.0	2.340
10	17.0	2.350
11	17.0	2.350
12	17.0	2.355
13	20.0	2.490
14	20.0	2.500
15	20.0	2.490
16	20.0	2.470

$$h = f(\% \text{ abr})$$

Nr. Crt.	Concentr [%]	Adancime [mm]
1	20	0.38
2	20	0.37
3	20	0.40
4	20	0.38
5	20	0.37
6	30	0.40
7	30	0.45
8	30	0.47
9	30	0.45
10	30	0.48
11	40	0.89
12	40	0.90
13	40	0.70
14	40	0.95
15	40	0.92
16	50	2.50
17	50	2.56
18	50	2.39
19	50	2.70
20	50	2.30
21	60	2.30
22	60	2.25
23	60	2.40
24	60	2.30
25	60	2.35
26	70	2.05
27	70	1.95
28	70	2.15
29	70	2.20
30	70	1.90
31	80	1.80
32	80	1.60
33	80	1.70
34	80	1.80
35	80	1.80

5.4.1. Studiul influenței variației timpului asupra adâncimii de prelucrare

În vederea încadrării în variațiile edificatoare ale timpului pentru materialul prelucrat, regimul de lucru adoptat și abrazivul folosit, s-au executat mai multe experimentări pentru a se stabili timpul mediu de străpungeră a sticlei, după care s-a optat varierea timpului până la această valoare de 80 s (70 s).

Se execută analiza de varianță $h = f(t)$ după cum se observă pentru un interval de 95% din valorile experimentului cu factorul F (Fischer) de 214,851 conform tabelului 5.4.1.2.

Comparația cu factorul F (0,25, 6,28) din tabelul de varianță al valorilor minime care este de 1,40, ne conduce la concluzia că se respinge ipoteza nulă. Valoarea mare a diferenței indică o influență substanțială asupra răspunsului (h) a variantei independente (t).

Erorile cuprinse în tabelul 5.4.1.3. sunt mici, deci experimentul se desfășoară în limite de precizie foarte bune. În graficile de variație a adâncimii de prelucrare în funcție de timp se reprezintă parametrii din tabelul ANOVA din care rezultă valoarea de balans a fiecărui eșantion (reprezentat prin medie și mediană), cât și dispersia în cadrul fiecărui eșantion, prin amplitudinea formelor adoptate (figurile 5.4.1 a, 5.4.1 b și 5.4.1 c).

Astfel, se observă că în figura de prezentare grafică a valorilor reziduale preconizate de program 5.4.1 d, acestea au o împrăștiere aleatoare, cerința obligatorie ca experimentul să aibă gradul de confidență propus pentru a fi concludent, valoarea prezisă de program fiind de 0,009.

Dacă valorile reziduale se grupează după o anumită lege, se impune revizuirea condițiilor inițiale impuse și reexecutarea experimentului.

În cazul de față gradul de confidență este mare iar valorile sunt răspândite în așa fel încât precizia rezultatelor experimentului să se înscrie în condițiile impuse.

În tabelele 5.4.1.4., 5.4.1.5. și 5.4.1.6. de la sfârșitul derulării interpretării datelor experimentului sunt înscrise valori ale testului general, care denotă atât omogenitatea grupelor investigate cât și a unui contrast semnificativ între grupe (față de $\pm 0,13476$ contrast limită, contrastul real este cuprins între valorile -0,48 și -1,928), concluzie în concordanță cu analiza ANOVA.

În concordanță cu constatările de mai sus, utilizând opțiunea analizei de regresie s-a determinat un model liniar, pentru parametrii studiați. Astfel, în figura care reprezintă grafic regresia adâncimii de prelucrare în funcție de variabila timp, aceasta se materializează printr-o dreaptă, iar valorile variabilei dependente, sunt reprezentate sub formă de puncte.

Tab. 5.4.1.1. One-Way Analysis of Variance

Data : ULTRA.adanc
 Level codes : ULTRA.timp
 Labels :
 Means plot : LSD Confidence level : 95 Range test : LSD

Tab. 5.4.1.2. Analysis of variance

Source of variation	Sum of Squares	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig.level
Between groups	13.942629	6	2.3237714	214.851	0.0
Within groups	0.302840	28	0.0108157		
Total (corrected)	14.245469	34			

0 missing value(s) have been excluded.

Tab. 5.4.1.3 Table of means for ULTRA.adanc by ULTRA.timp

Level	Count	Average	Std. Error (internal)	Std. Error (pooled s)	95 % LSD intervals for mean	
10	5	0.180	0.0374166	0.0465096	0.1126176	0.2673824
20	5	0.660	0.0600000	0.0465096	0.5926176	0.7273824
30	5	1.000	0.0447214	0.0465096	0.9326176	1.0673824
40	5	1.260	0.0509902	0.0465096	1.1926176	1.3273824
50	5	1.552	0.0435201	0.0465096	1.4846176	1.6193824
60	5	1.888	0.0327719	0.0465096	1.8206176	1.9553824
70	5	2.108	0.0507346	0.0465096	2.0406176	2.1753824
Total	35	1.2354286	0.0175690	0.0175790	1.2099604	1.2608967

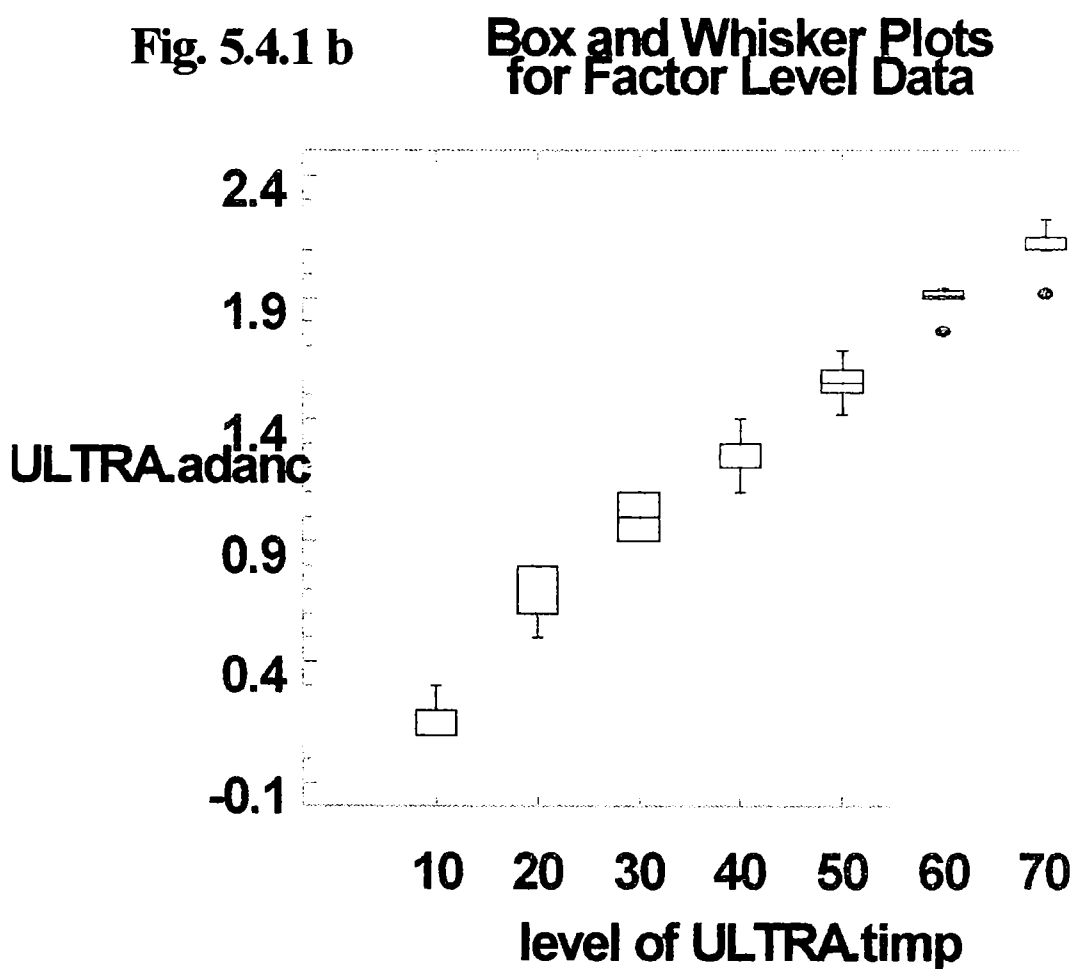
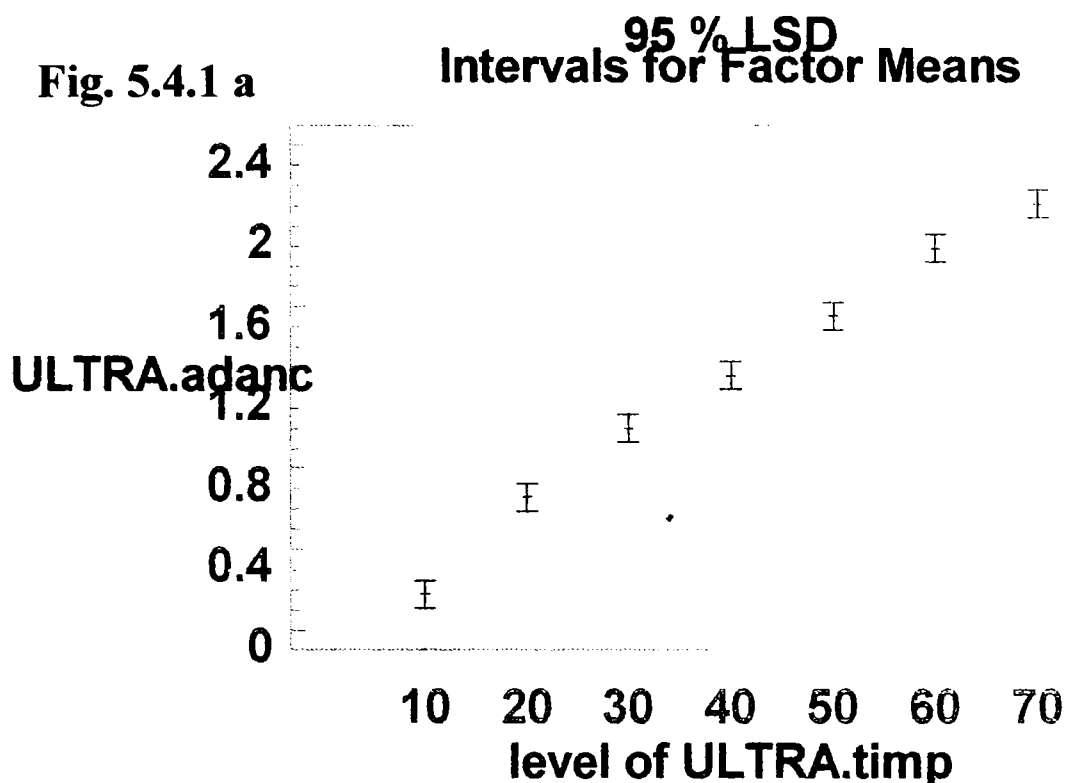


Fig. 5.4.1 c

Notched Box and Whisker Plots for Factor Level Data

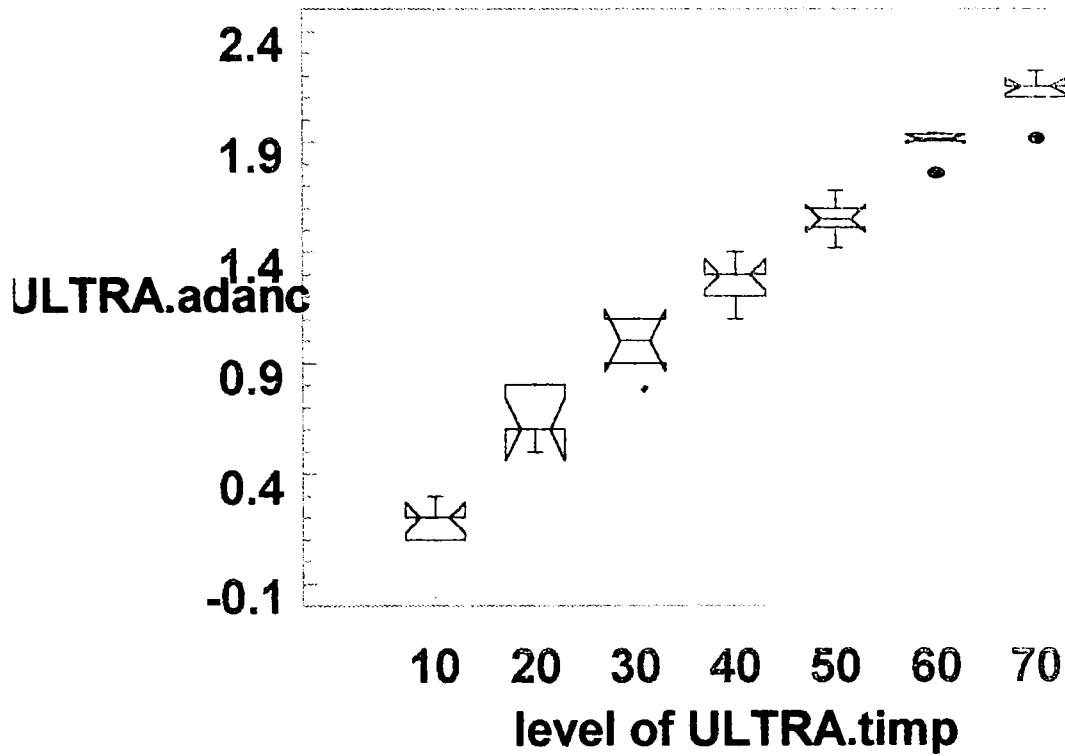
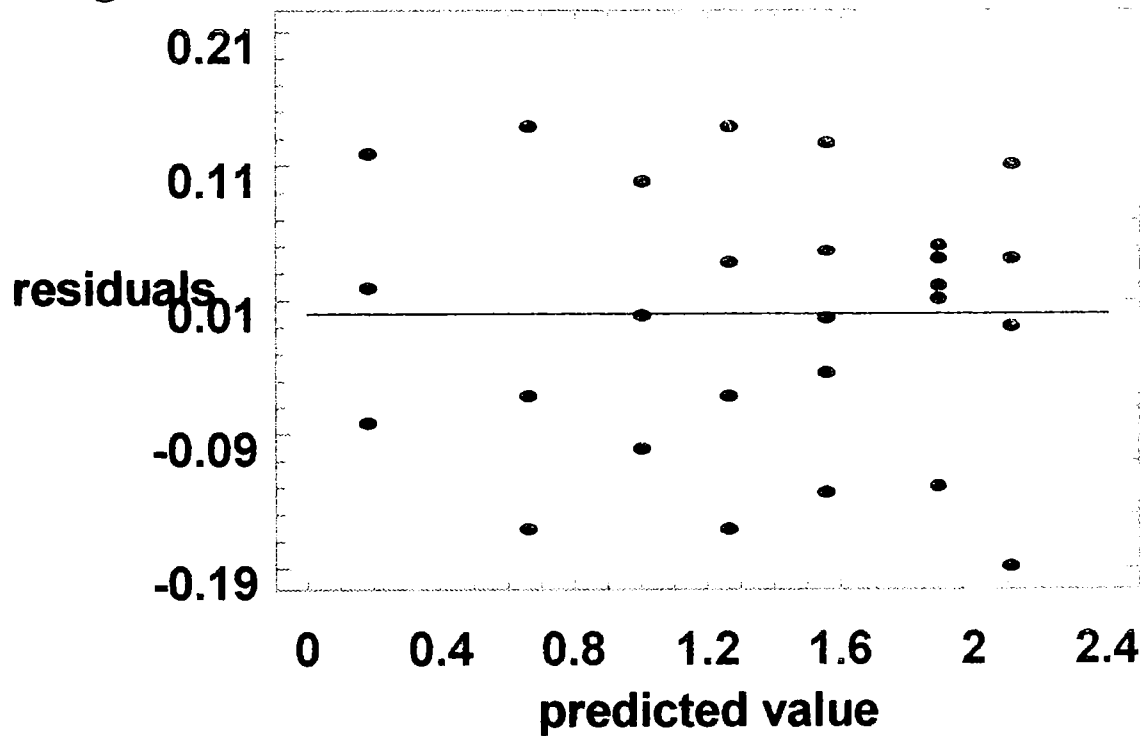


Fig. 5.4.1 d

Residual Plot for ULTRA.adanc



Tab. 5.4.1.4 Multiple range analysis for ULTRA.adanc by ULTRA.timp

Method: 95 Level	Percent Count	LSD Average	Homogeneous Groups
10	5	0.180	X
20	5	0.660	X
30	5	1.000	X
40	5	1.260	X
50	5	1.552	X
60	5	1.888	X
70	5	2.108	X

contrast	difference	+/-	limits
10 - 20	-0.480		0.13476 *
10 - 30	-0.820		0.13476 *
10 - 40	-1.080		0.13476 *
10 - 50	-1.372		0.13476 *
10 - 60	-1.708		0.13476 *
10 - 70	-1.928		0.13476 *

* denotes a statistically a significant difference.

Tab. 5.4.2.1 One-Way Analystis of Variance

Data : ULTRA.adanc
 Level codes : ULTRA.pres
 Labels :
 Means plot : LSD Confidence level : 95 Range test : LSD

Tab. 5.4.2.2 Analysis of variance

Source of variation	Sum of Squarea	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig.level
Between groups	3.8129929	6	0.6354988	20.539	0.0
Within groups	0.6497500	21	0.0309405		
Total (corrected)	4.4627429	27			

0 missing vale(s) have been excluded.

Tab. 5.4.1.5 Regression Analysis - Linear model : $Y = a + bX$

Dependent variable : ULTRA.adanc Independent variable: ULTRA.timp

Parameter	Estimate	Standard Error	T Value	Prob.Level
Intercept	-0.0205714	0.0437441	-0.470268	0.64126
Slope	0.0314	9.7814E-4	32.1015	0.00000

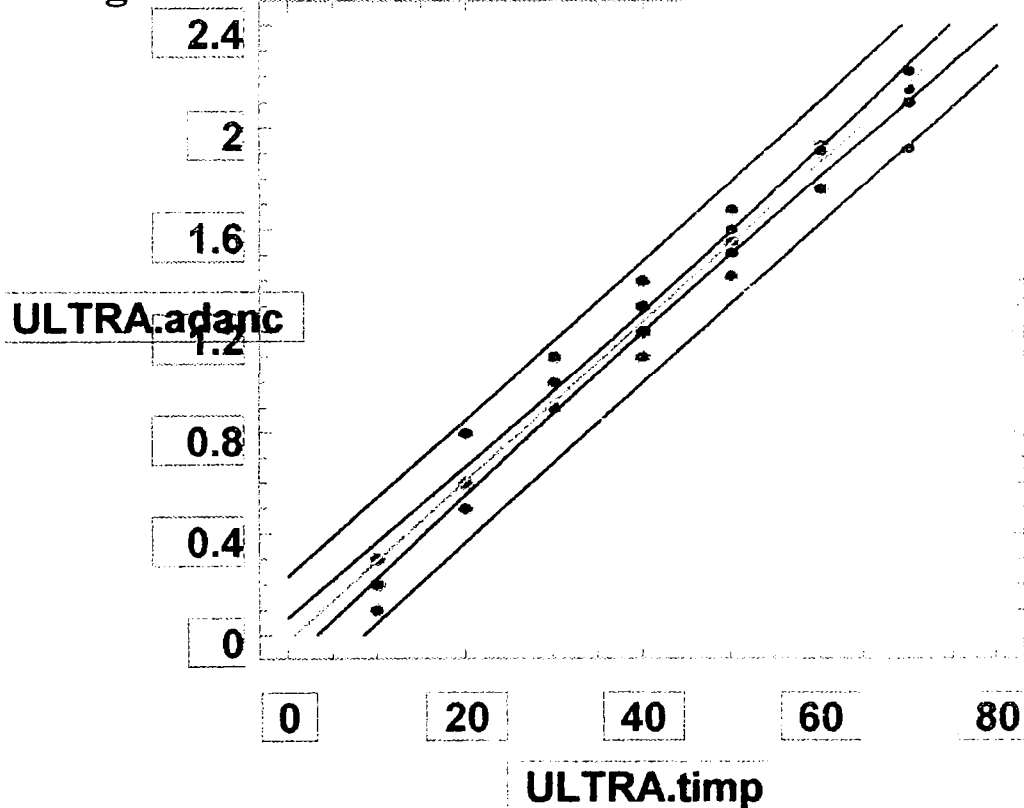
Tab. 5.4.1.6 Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob.Level
Model	13.8034	1	13.8034	1030.507	0.00000
Residual	0.442029	33	0.013395		

Total (Corr.) 14.245469 34
 Correlation Coefficient = 0.984363 r-squared = 96.90 percent
 Stnd. Error of Est. = 0.115736

Regression of ULTRA.adanc on ULTRA.timp

Fig. 5.4.1 e



După cum rezultă din experimentările realizate, se observă că **adâncimea de prelucrare crește considerabil în prima parte a prelucrării până la o anumită valoare a timpului de prelucrare**, după care creșterea este nesemnificativă ceea ce ne conduce la concluzia că în optimizarea procesului tehnologic de prelucrare, trebuie executată prelucrarea numai pe perioada eficientă, de aceea **sunt necesare retrageri periodice la intervale de 40 s** (stabilit experimental) **cu reîmprospatarea suspensiei abrazive** în zona prelucrării. Aceasta, deoarece o dată cu creșterea adâncimii de prelucrare, evacuarea materialului prelucrat se face din ce în ce mai greu, concomitent cu erodarea particulelor erozive.

5.4.2 Studiul influenței variației presiunii asupra adâncimii de prelucrare

Din experiența anterioară și din literatura de specialitate, pentru a nu mări numărul de încercări nejustificat de mult, s-a ales ecartul presiunilor de 1 - 4 daN/cm².

În urma experimentelor executate, a rezultat analiza de varianță a adâncimii de prelucrare în funcție de presiunea contactului sculă-piesă pentru un interval de 95% din valorile experimentului. Factorul F este 20,539 conform tabelului 5.4.2.2. față de $F(0.25,6,21) = 1.43$ estimat, deci ipoteza nulă se respinge.

Diferența dintre valorile nominale ale celor doi parametrii indică o influență mare a variabilei independente (p) asupra variabilei dependente (h) dar mai mică decât a primului parametru studiat (t).

Astfel, valorile de balans (Fig. 5.4.2 a) reprezentate prin dimensiunile grafice, sunt mai mici.

Pe parcursul varierii presiunii de contact, se observă o omogenitate diferențiată. Neomogenitățile sunt puse în evidență în Fig. 5.4.2 b și Fig. 5.4.2 c prin amplitudinea reprezentărilor. De exemplu cele mai mari sunt la $p = 1 \text{ daN/cm}^2$ și 3 daN/cm^2 . După forma acestora rezultă că valorile sunt dispuse în ambele părți ale mediei, ceea ce denotă la aceste valori o instabilitate condițiilor de executare a prelucrării.

Variația parametrului dependent nu poate fi reprezentată printr-un model liniar, decât pe două intervale diferite și anume $1-2 \text{ daN/cm}^2$ și $2-4 \text{ daN/cm}^2$.

În figura 5.4.2 d care prezintă valorile reziduale se observă o distribuție aleatoare, ceea ce dă experimentului o bună confidență, cu valoarea prezisă de program, de 0,03.

Se observă și din tabelul 5.4.2.4., faptul că erorile cele mai mari se întâlnesc la $p=1 \text{ daN/cm}^2$ de 0,156365 și la $p=3 \text{ daN/cm}^2$, de 0,1348147 iar omogenitățile se remarcă la $p=1,5 \text{ daN/cm}^2$ și $3,5 \text{ daN/cm}^2$.

Tab. 5.4.2.3 Table of means for ULTRA.adanc by ULTRA.timp

Level	Count	Average	Std. Error (internal)	Std. Error (pooled s)	95 % LSD intervals for mean	
1	4	1.110	0.1563650	0.0879495	0.9806383	1.2393617
1.5	4	1.807	0.0205649	0.0879495	1.6781383	1.9368617
2	4	2.215	0.0312250	0.0879495	2.0856383	2.3443617
2.5	4	2.162	0.0783555	0.0879495	2.0331383	2.2918617
3	4	1.885	0.1348147	0.0879495	1.7556383	2.0143617
3.5	4	1.595	0.0411299	0.0879495	1.4656383	1.7243617
4	4	1.415	0.0478714	0.0879495	1.2856383	1.5443617
Total	28	1.7414286	0.0332418	0.0332418	1.6925344	1.7903227

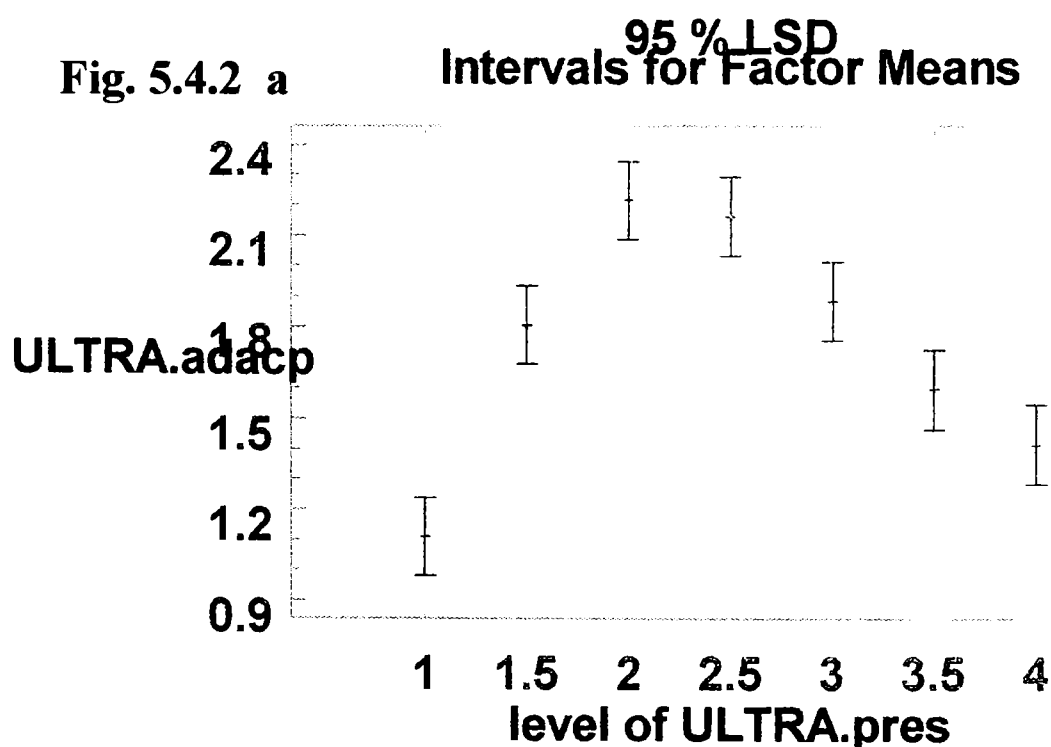


Fig. 5.4.2 b

Box and Whisker Plots for Factor Level Data

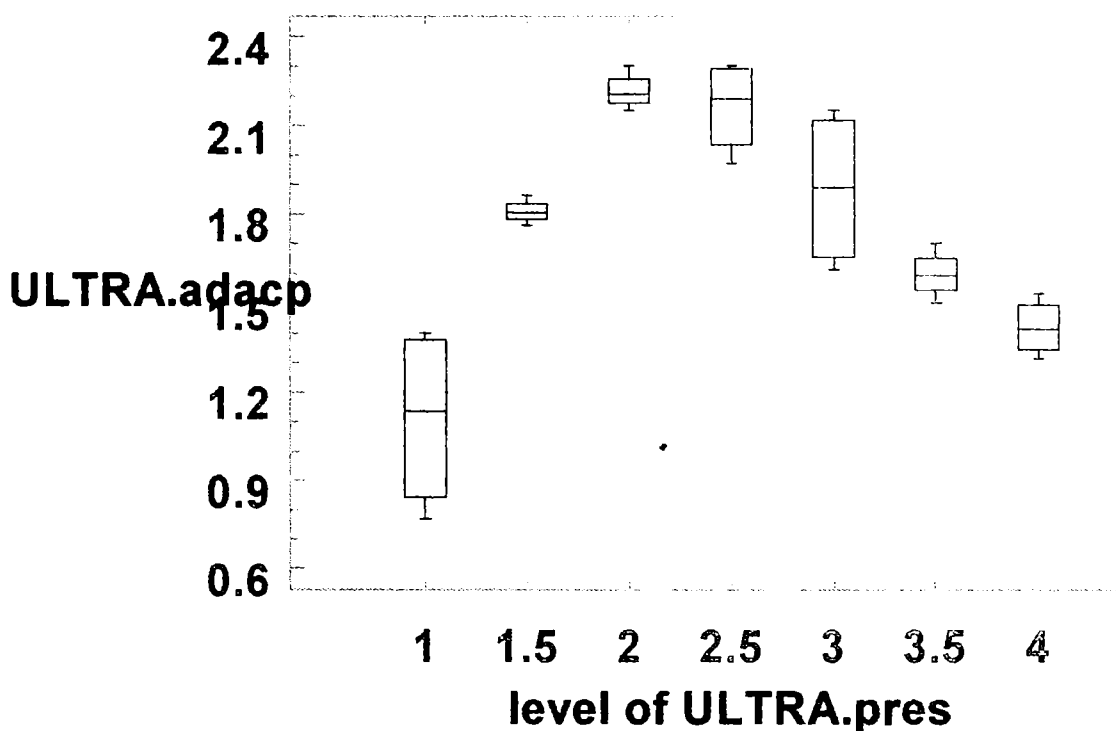
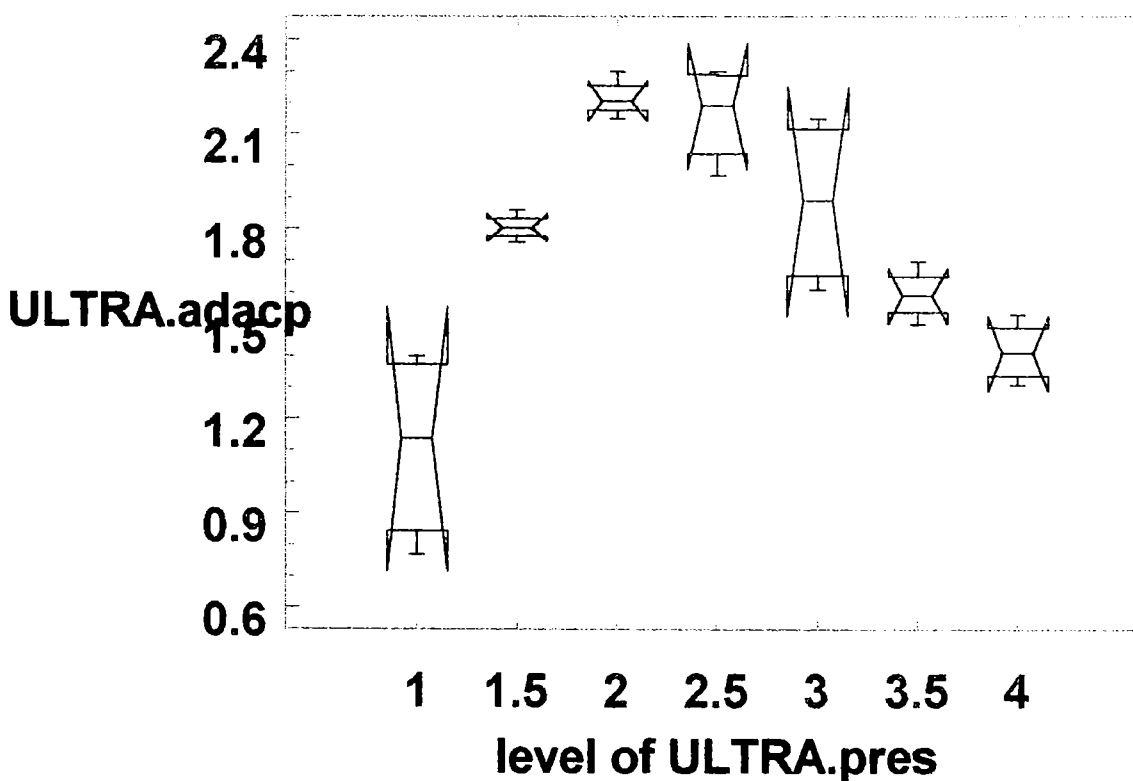
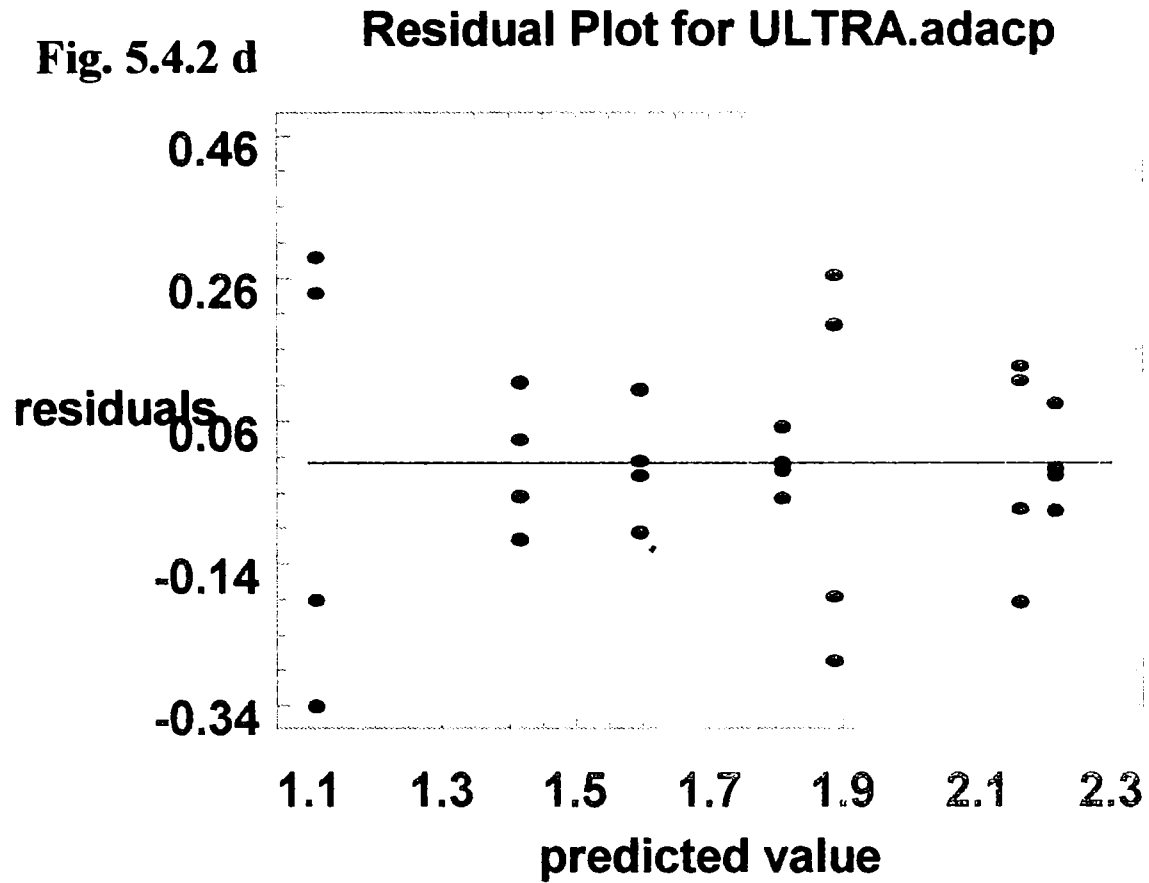


Fig. 5.4.2 c

Notched Box and Whisker Plots for Factor Level Data





Tab. 5.4.2.4 Multiple range analysis for ULTRA.adanc by ULTRA.pres

Method: 95 Level	Percent Count	LSD Average	Homogeneous Groups
1	4	1.110	X
4	4	1.415	X
3.5	4	1.595	XX
1.5	4	1.807	XX
3	4	1.885	X
2.5	4	2.162	X
2	4	2.215	X

contrast	diffrence	+/-	limits
1 - 1.5	-0.69750		0.25872 *
1 - 2	-1.10500		0.25872 *
1 - 2.5	-1.05250		0.25872 *
1 - 3	-0.77500		0.25872 *
1 - 3.5	-0.48500		0.25872 *
1 - 4	-0.30500		0.25872 *

* denotes a statistically significant difference.

De asemenea în același tabel se observă că față de contrastul limită admis de $\pm 0,258872$, contrastul între grupe este semnificativ, de la 0,305 la -1,105 , deci în acord cu analiza ANOVA.

Rezultatele experimentale, comportă discuții pe cele două laturi ale intervalului.

Astfel, la presiuni de lucru mici nu se poate amorsa prelucrarea eficientă, iar la forțe de apăsare mari, circulația abrazivului aflată în suspensie în zona de lucru, se face foarte greu, aceasta îngreunând prelucrarea materialelor.

5.4.3.3 Studiul influenței variației frecvenței asupra adâncimii de prelucrare

Analiza de varianță a adâncimii de prelucrare în funcție de variația frecvenței se execută pe un interval de 95% din valorile experimentului care se încadrează în valorile experimentale ale programului, cu $F = 136.001$ față de $F(0.25,7,24) = 1.40$, ipoteza nulă fiind respinsă.

Diferența mare dintre valorile absolute ale factorilor F real și minim admis - conduc la ideea ca această variabilă independentă (f) are o influență mare asupra răspunsului sistemului (h).

Din reprezentările grafice rezultate în urma prelucrării datelor, rezultă faptul că balansul valorilor nu este prea mare în anumite zone valorile fiind aproape identice (la 20,07 KHz și 20,15 KHz) sau foarte apropiate (la 20,2 KHz)

Față de condițiile inițiale propuse pentru a le satisface pe parcursul experimentului, de a varia frecvența de la 19 la 21 KHz pe mașina de prelucrat cu ultrasunete MPU_{me}, din cadrul laboratorului, nu s-au putut realiza experimente decât în limitele 20,07 - 20,2 KHz.

În afara acestui ecart instalația nu a reușit să asigure un regim de prelucrare.

Se observă că variația parametrului dependent nu poate fi asimilată unui model matematic liniar decât pe doua intervale, între 20,07 - 20,13 KHz și 20,15 - 20,2 KHz.

Răspândirile valorilor obținute în jurul valorilor medii nu sunt prea mari, ceea ce denotă că încercările au fost executate îngrijit și erorile datorate cauzelor aleatoare au fost limitate corespunzător.

Valorile reziduale, ilustrate grafic în figura 5.4.3 d, dau confidența necesară a testului, valoarea prezisă de program a rezidurilor fiind de 0,017.

Din tabelele finalului experimentului se observă înaltul grad de omogenitate al grupelor experimentale, precum și contrastul dintre grupe fiind semnificativ. Astfel, față de minimul admis de $\pm 0,12845$, în realitate valorile sunt de la -0,3575 la -1,565.

Tab. 5.4.3.1 One-Way Analystis of Variance

Data : ULTRA.adanc
 Level codes : ULTRA.frecventa
 Labels :
 Means plot : LSD Confidence level : 95 Range test : LSD

Tab. 5.4.3.2 Analysis of variance

Source of variation	Sum of Squarea	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig.level
Between groups	7.3711219	7,	1.0530174	136.001	0.0
Within groups	0.1858250	24	0.0077427		
Total (corrected)	7.5569469	31			

0 missing vale(s) have been excluded.

Fig. 5.4.3 a 95 % LSD Intervals for Factor Means

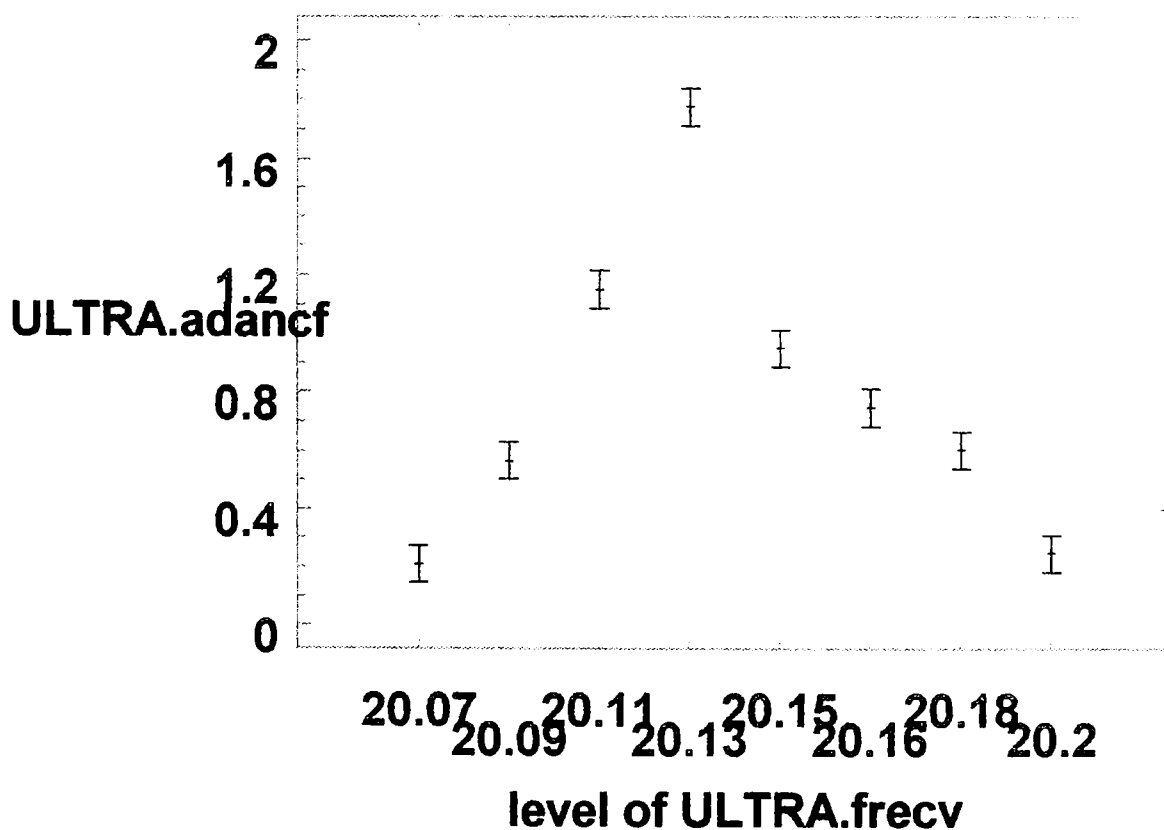


Fig. 5.4.3 b

Box and Whisker Plots for Factor Level Data

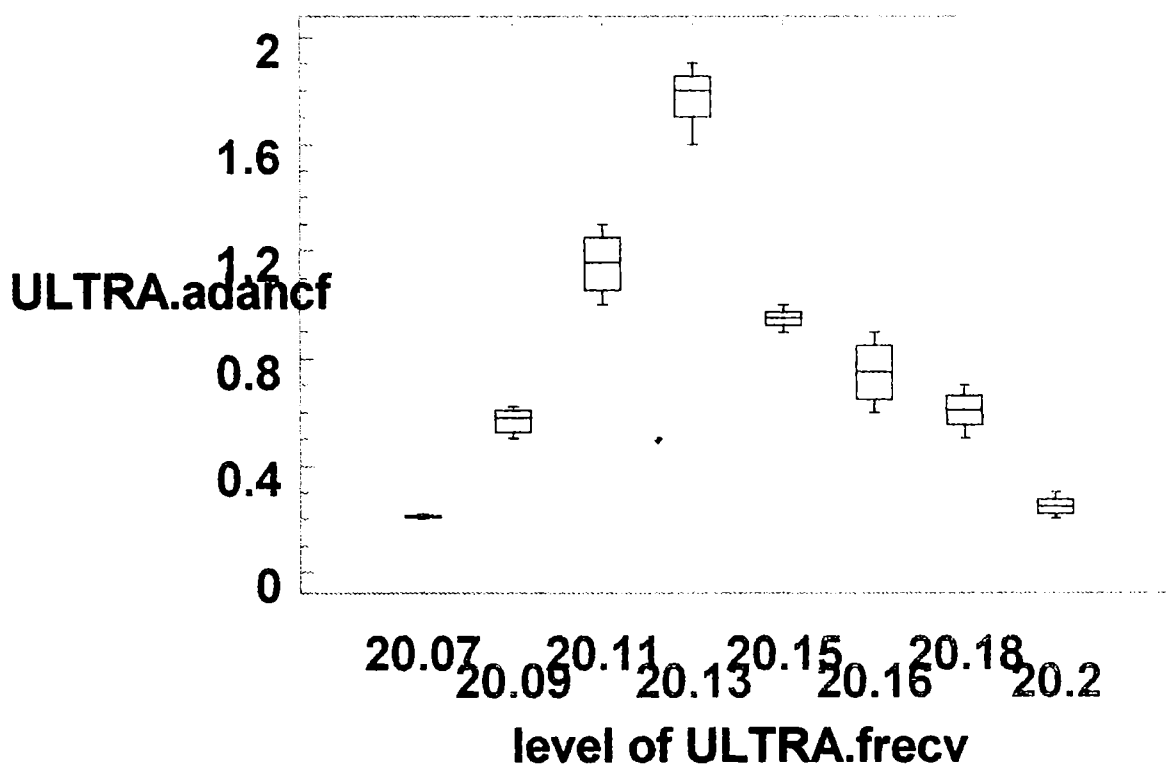


Fig. 5.4.3 c

Notched Box and Whisker Plots for Factor Level Data

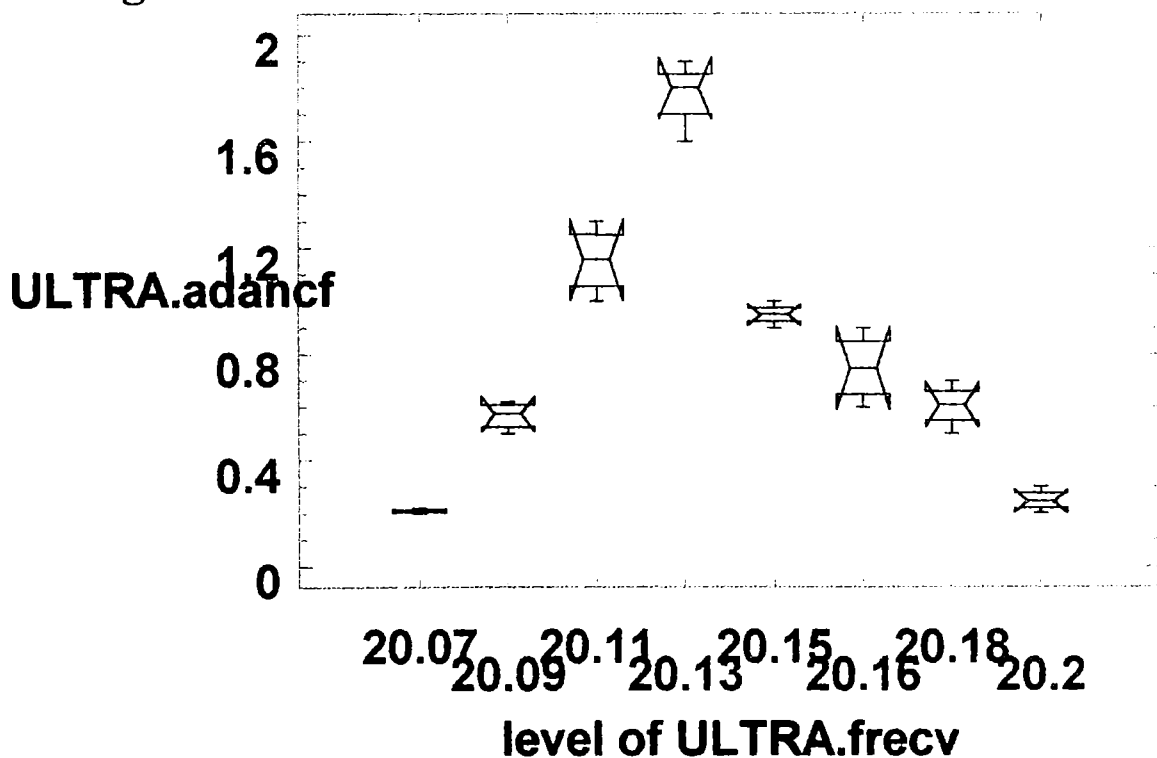
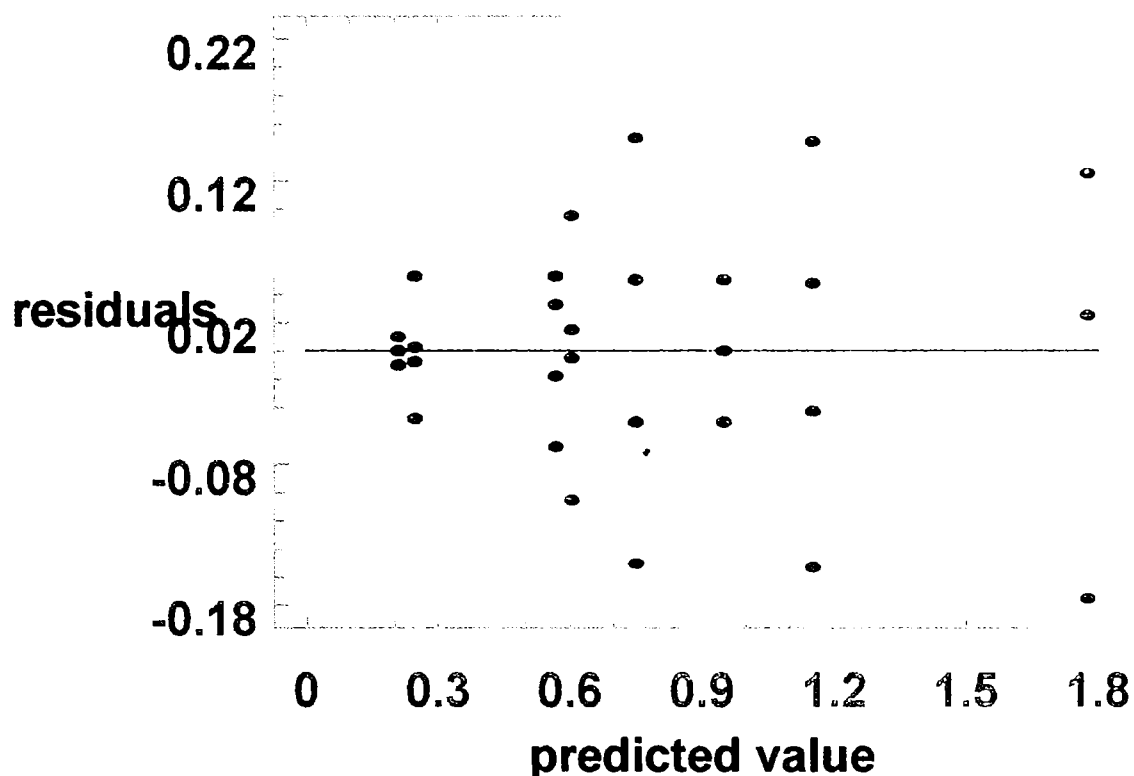


Fig. 5.4.3 d Residual Plot for ULTRA.adancf



Tab. 5.4.3.3 Multiple range analysis for ULTRA.adanc by ULTRA.frecv

Method: 95 Level	Percent Count	LSD Average	Homogeneous Groups
20.07	4	0.210	X
20.20	4	0.247	X
20.09	4	0.567	X
20.18	4	0.605	X
20.16	4	0.750	X
20.15	4	0.950	X
20.11	4	1.152	X
20.13	4	1.775	X

contrast	difference	+/-	limits
20.07 - 20.09	-0.35750		0.12845 *
20.07 - 20.11	-0.94250		0.12845 *
20.07 - 20.13	-1.56500		0.12845 *
20.07 - 20.15	-0.74000		0.12845 *
20.07 - 20.16	-0.54000		0.12845 *

* denotes a statistically significant difference.

Din experiențe s-a concluzionat faptul că variația frecvenței se poate face într-un interval foarte mic, în funcție de toate caracteristicile sistemului (de la generatorul de ultrasunete, la sculă).

Alegerea frecvenței optime trebuie făcută foarte atent și respectată cu strictețe în procesul de prelucrare.

5.4.4. Studiul influenței variației puterii asupra adâncimii de prelucrare

Datorita faptului că s-a luat măsura de a studia influența puterii din sistemul oscilant asupra adâncimii de prelucrare, în condițiile în care sunt menținute constante $f_0 = 20,2$ KHz, $p = 2$ daN/cm² și $t = 40$ s, și ținând cont de corelația puterii cu amplitudinea oscilației, vom studia influența variației puterii asupra adâncimii de prelucrat.

După executarea experimentelor, rezultatele au fost introduse în programul ANOVA, în vederea prelucrării și interpretării lor. Astfel, se observă că analiza se face pentru un interval de 95% din valorile experimentului care se încadrează în valorile estimate ale programului, cu $F = 486.643$ față de $F(0,25, 3,12) = 1,56$. În acest caz ipoteza nu este nulă.

Față de puterea înscrisă în documentația de exploatare a generatorului de oscilație, în practică blocul ultrasonic nu poate genera decât 20 W. Această limită maximă se datorează imposibilității acordului necesar (putere-frecvență) pentru executarea prelucrării.

Limita inferioară de variație a puterii a fost stabilită experimental la valoarea de 10W. Sub această valoare a puterii prelucrarea este practic imposibilă (cunoscută fiind relația dintre putere și amplitudine, ultima nu este suficientă prelucrării).

Influența foarte mare a variabilei independente față de răspuns este pusă în evidență de diferența foarte mare dintre valorile reale și minim acceptate ale factorului Fisher.

Din partea grafică a răspunsului analizei ANOVA concluzionăm că variația puterii se poate modela matematic liniar, însă pentru concluziile practice reținem faptul că la puteri mari, gradientul creșterii se micșorează.

Valoarea de balans a valorilor obținute la experimentări de fiecare eșantion, precum și dispersia valorilor în cadrul fiecărui eșantion sunt mici în zona valorilor puterii de 17 - 20 W, fiind aproape de valoarea medie rezultată și simetrice. Dispersia valorilor din ecartul amintit fiind foarte redusă, se concluzionează că procesul în acest interval are o stabilitate foarte mare.

Valorile reziduale sunt dispersate aleator, ceea ce dă experimentului o confidență corespunzătoare, valoarea prezisă de program fiind de 0,0113.

În concluzie ținând cont de mijloacele tehnice avute la dispoziție, puterea optimă de prelucrare este de 20 W.

Tab. 5.4.4.1 One-Way Analystis of Variance

Data : ULTRA.adanc
 Level codes : ULTRA.putere
 Labels :
 Means plot : LSD Confidence level : 95 Range test : LSD

Tab. 5.4.4.2 Analysis of variance

Source of variation	Sum of Squarea	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig.level
Between groups	4.8626297	3	1.6208766	486.643	0.0
Within groups	0.0399688	12	0.0033307		
Total (corrected)	4.9025984	15			

0 missing vale(s) have been excluded.

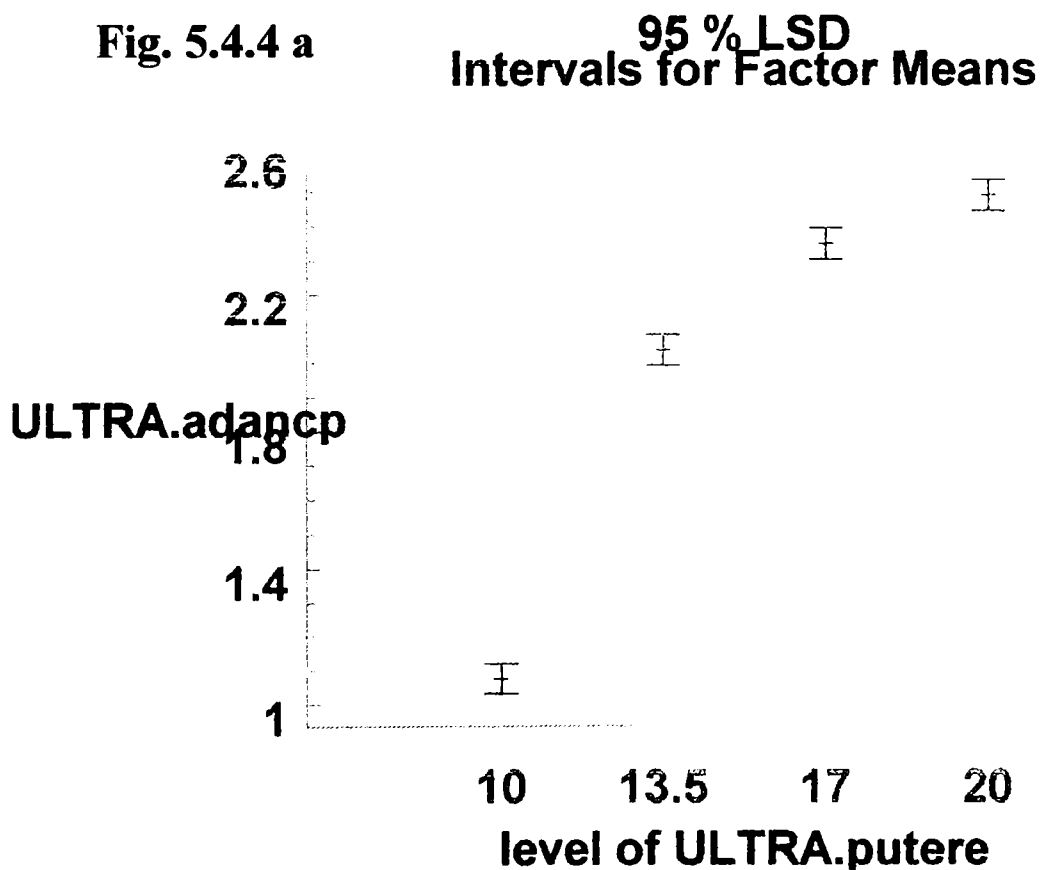


Fig. 5.4.4 b

Box and Whisker Plots for Factor Level Data

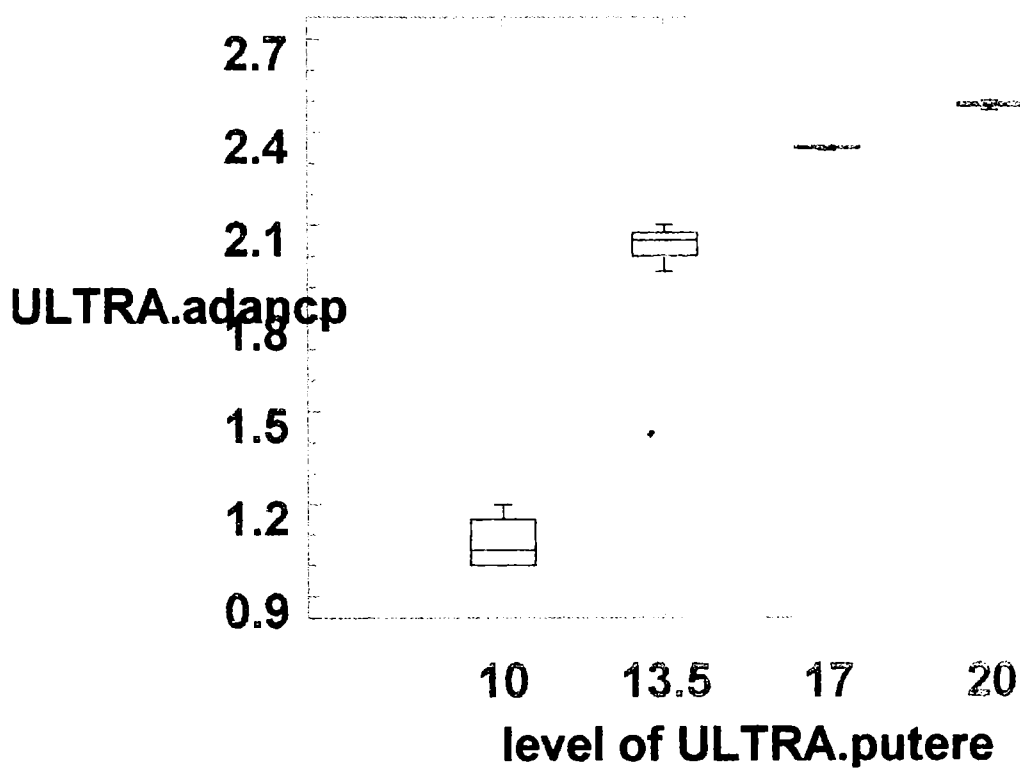


Fig. 5.4.4 c

Notched Box and Whisker Plots for Factor Level Data

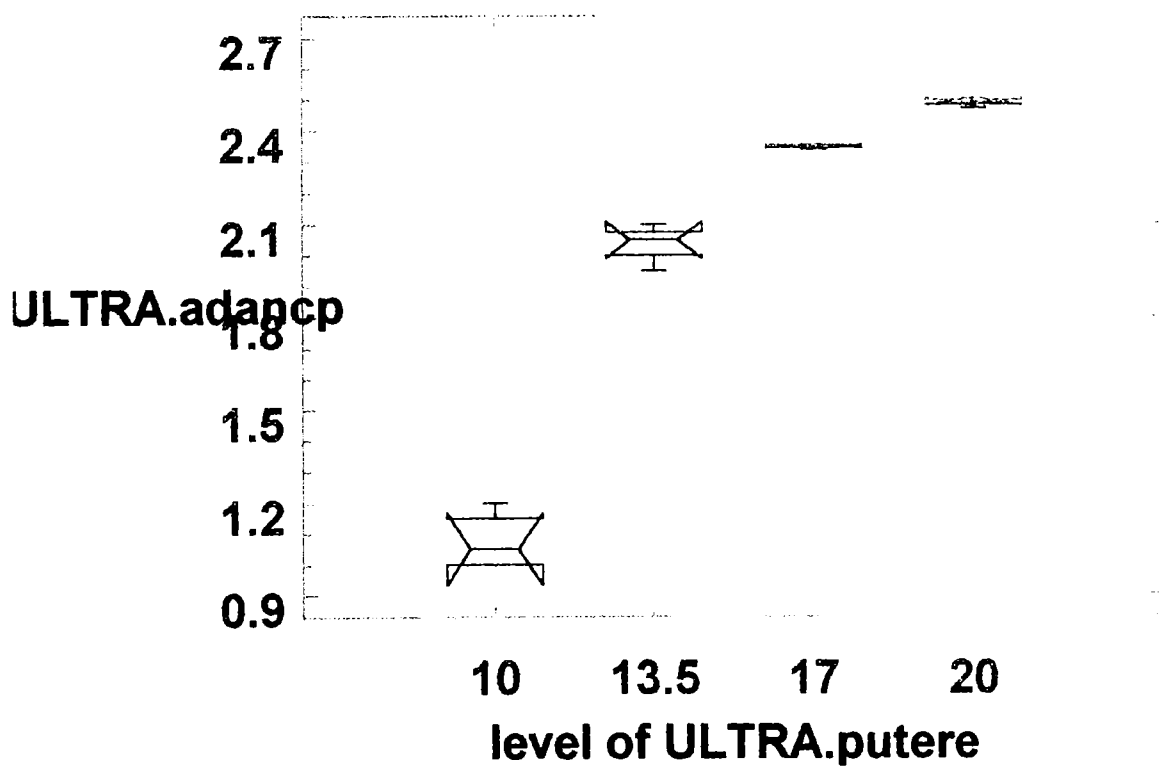
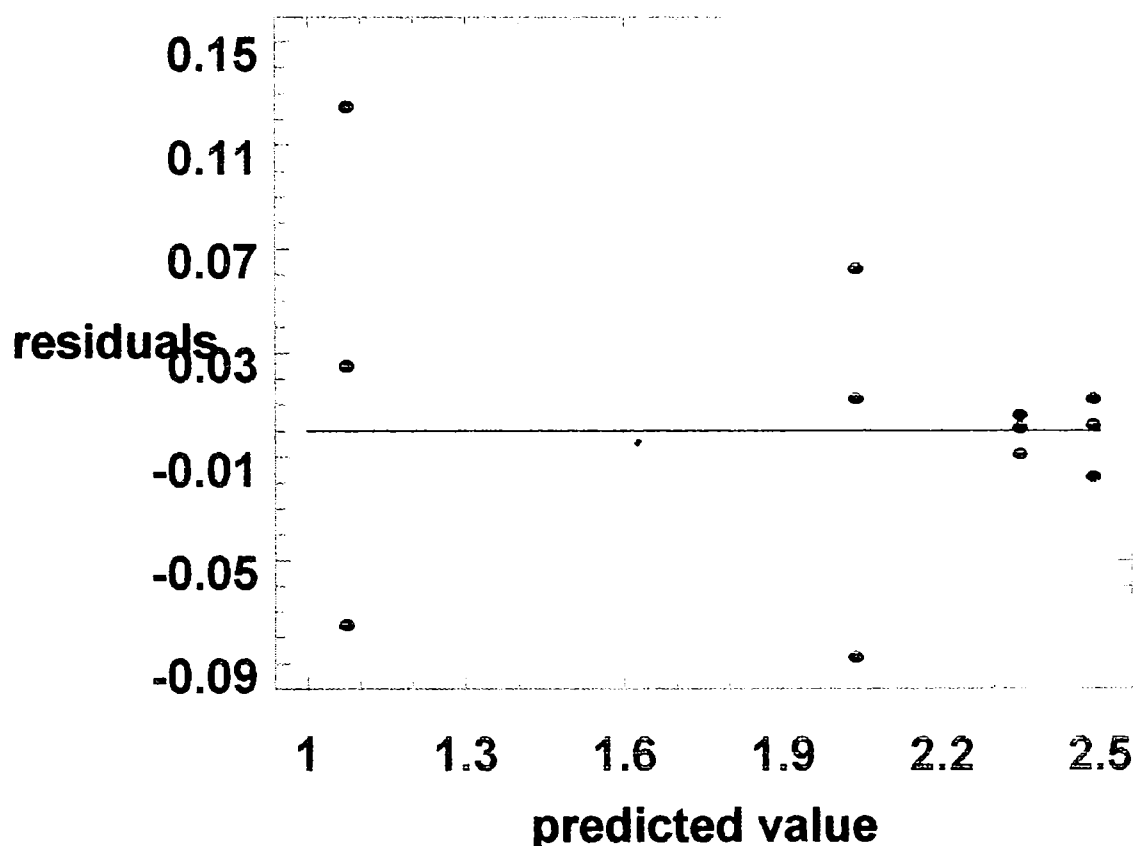


Fig. 5.4.4 d Residual Plot for ULTRA.adancp



Tab. 5.4.4.3 Multiple range analysis for ULTRA.adanc by ULTRA.putere

Method: 95 Level	Percent Count	LSD Average	Homogeneous Groups
10	4	1.0750	X
13.5	4	2.0375	X
17	4	2.3487	X
20	4	2.4875	X

contrast	difference	+/-	limits
10 - 13.5	-0.96250		0.08894 *
10 - 17.0	-1.27375		0.08894 *
10 - 20.0	-1.41250		0.08894 *
13.5 - 17.0	-0.31125		0.08894 *
13.5 - 20	-0.45000		0.08894 *
17 - 20	-0.13875		0.08894 *

* denotes a statistically a significant difference.

Omogenitatea grupelor este bună iar contrastele dintre grupele de eșantioane este peste valoarea minimă admisă, de $\pm 0,8894$ (de la -0.13875 la -1.4125), ceea ce dă un grad mare de credibilitate experimentului și rezultatelor acestuia.

5.4.5. Studiul influenței variației concentrației suspensiei abrazive asupra adâncimii de prelucrare

După cum s-a observat și din experimentele anterioare, o foarte mare influență asupra prelucrabilității materialelor cu această tehnologie, o reprezintă prezența în zona de lucru a abrazivului.

În experimentul de față ne propunem să studiem influența concentrației volumice a abrazivului într-un mediu lichid asupra adâncimii de prelucrare.

Într-un vas gradat se toarnă apă - lichidul purtător ales, peste care se toarnă abraziv, astfel încât proporția volumică să se obțină prin creșterea nivelului apei la nivelul corespunzător. Se agită foarte bine, ca amestecul să aibă o componentă cât mai omogenă și manual se alimentează zona de prelucrare.

Procesul menține constanți ceilalți parametri de lucru: putere, frecvență, presiune de contact, timp de prelucrare stabilizate la valorile optime $p = 20 \text{ W}$, $f = 20,2 \text{ KHz}$, $p = 2 \text{ daN/cm}^2$, $t = 30 \text{ s}$.

Cu rezultatele obținute, introduse în programul ANOVA se prezintă analiza răspunsurilor acestuia.

Analiza de variantă se face pentru 95% din valorile experimentului. Factorul $F = 446,464$ este foarte mare față de minimul admis de $F(0.25,6,28) = 1,4$. De aici rezultă concluziile că ipoteza nulă nu poate fi posibilă, iar influența variabilei independente „k” este foarte mare asupra variabilei dependente „h”.

După cum se observă din reprezentările grafice 5.4.5 a, 5.4.5 b și 5.4.5 c, datorită valorilor obținute, fenomenul nu poate fi încadrat într-un model matematic liniar pe întregul domeniu al variației concentrației abrazivului, ci în două modele liniare, pe intervalele 20 - 40 % și 50 - 80%.

Valoarea concentrației volumice optime, de 50%, confirmă experiențele anterioare și indicațiile literaturii de specialitate.

Această concentrație asigură atât fluiditatea suspensiei pentru ușurarea alimentării cu abraziv a prelucrării și evacuarea oportună a abrazivului folosit împreună cu materialul prelucrat, cât și cantitatea de abraziv necesar unei prelucrări eficiente.

Valorile de balans ale fiecărui eșantion sunt reduse, ceea ce indică faptul că experimentările s-au executat îngrijit, valorile răspunsurilor situându-se aproape de valoarea medie.

Tab. 5.4.5.1 One-Way Analystis of Variance

Data : ULTRA.adanc
 Level codes : ULTRA.concentr
 Labels :
 Means plot : LSD Confidence level : 95 Range test : LSD

Tab. 5.4.5.2 Analysis of variance

Source of variation	Sum of Squarea	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig level
Between groups	23.791417	6	3.9652362	446.464	0.0
Within groups	0.248680	28	0.08814		
Total (corrected)	24.040097	34			

0 missing vale(s) have been excluded.

Fig. 5.4.5 a

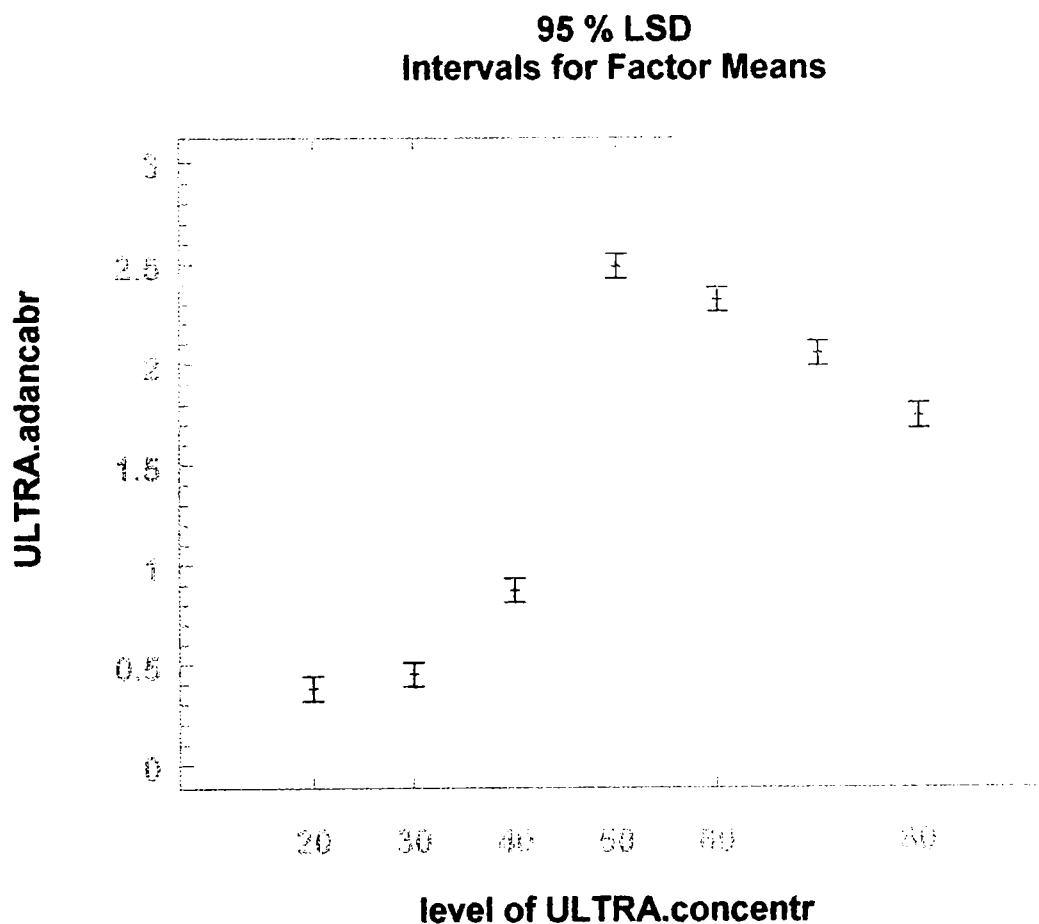


Fig. 5.4.5 b

Box and Whisker Plots for Factor Level Data

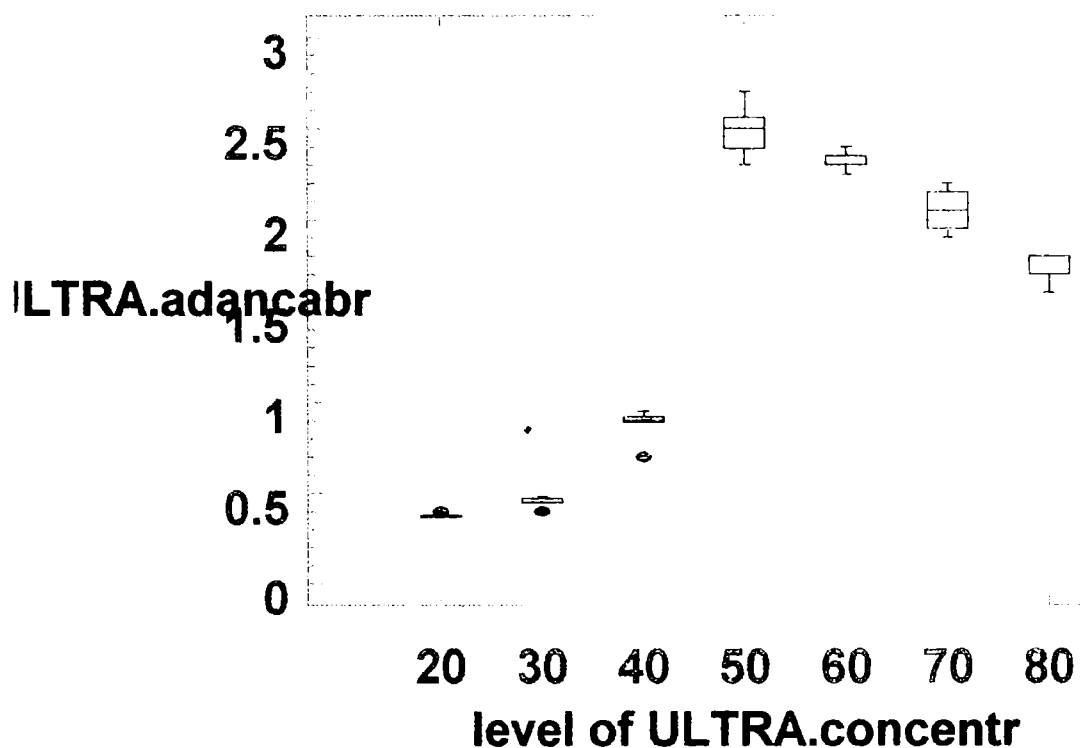
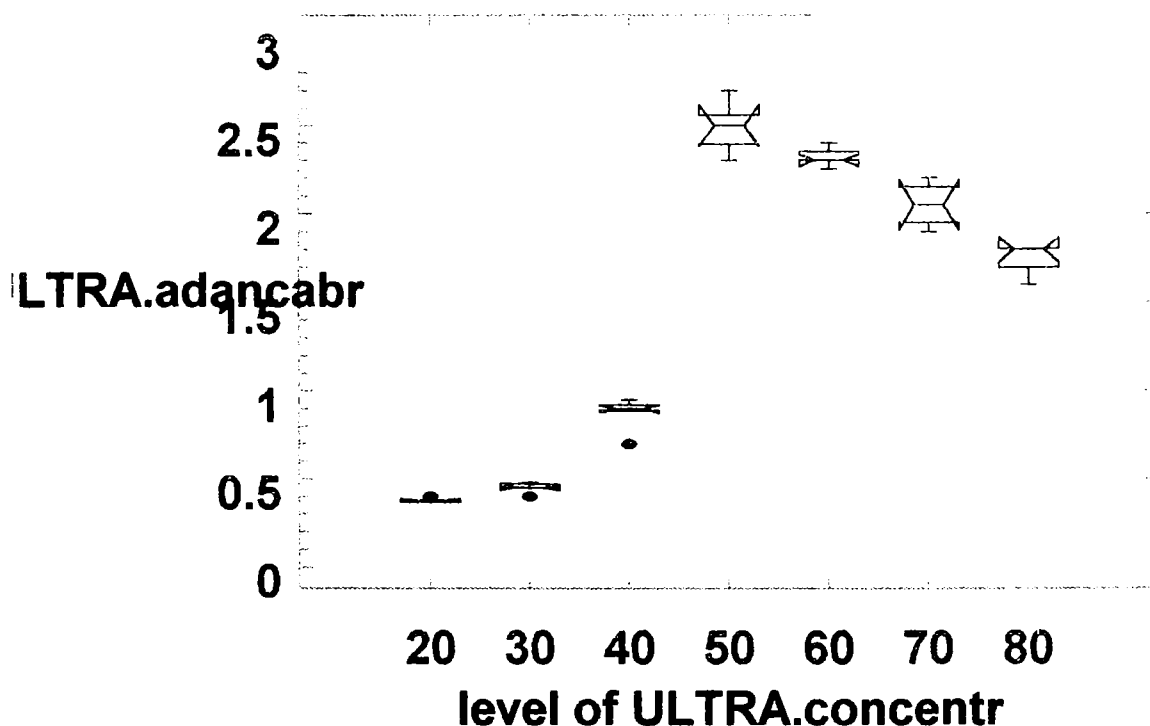
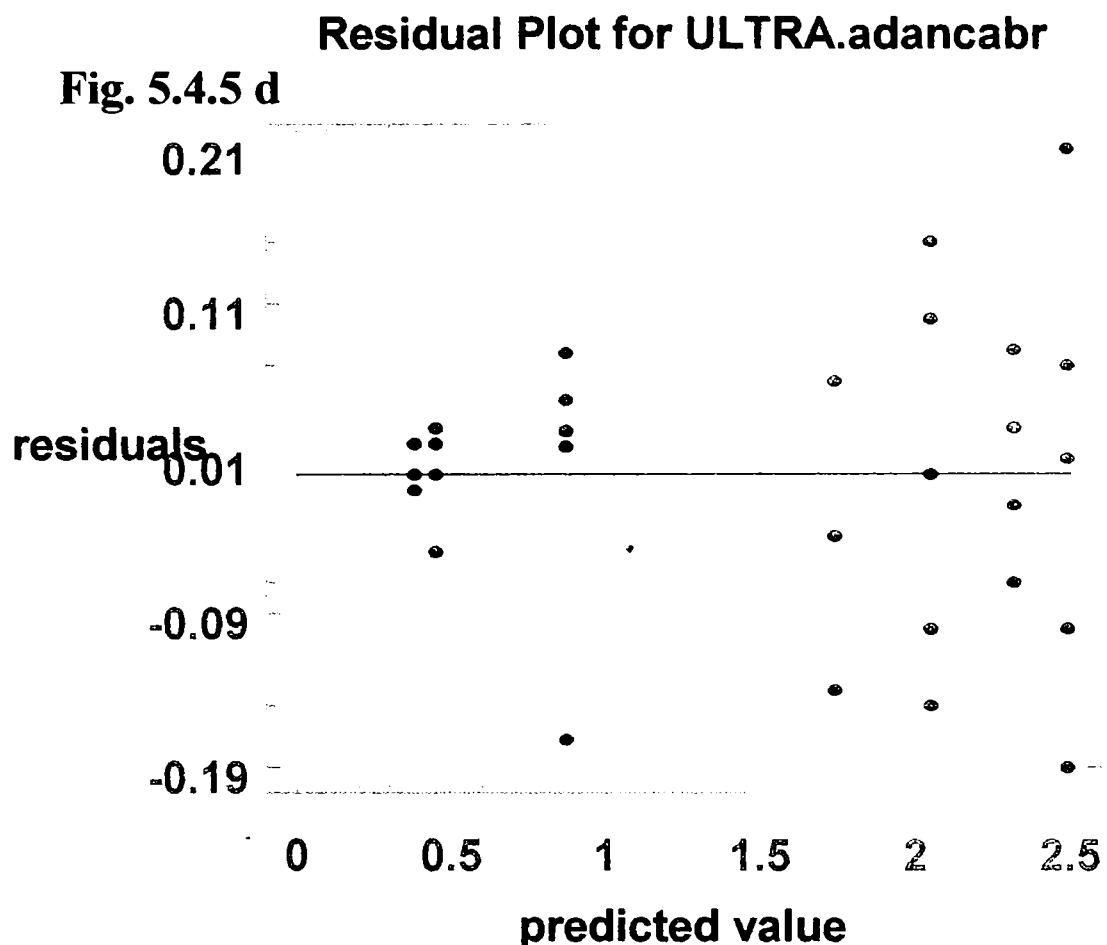


Fig. 5.4.5 c

Notched Box and Whisker Plots for Factor Level Data





Tab. 5.4.5.3 Multiple range analysis for ULTRA.adanc by ULTRA.concentr

Method: 95 Level	Percent Count	LSD Average	Homogeneous Groups	
20	5	0.380	X	
30	5	0.450	X	
40	5	0.872	X	
80	5	1.740	X	
70	5	2.050	X	
60	5	2.320	X	
50	5	2.490	X	

contrast	difference	+/-	limits
20 - 30	-0.070		0.12212
20 - 40	-0.492		0.12212 *
20 - 50	-2.110		0.12212 *
20 - 60	-1.940		0.12212 *
20 - 70	-1.670		0.12212 *
20 - 80	-1.360		0.12212 *

* denotes a statistically a significant difference.

În ceea ce privește omogenitatea suspensiei abrazive, este foarte greu de controlat dar din variațiile mici ale răspunsurilor se constată că variația a fost destul de mică.

Dispersia valorilor obținute este foarte mică deși posibilitățile de a avea condiții identice la experimentări diferite sunt aproape nule.

Se observă pe prima porțiune o dispersie mult mai bună a rezultatelor.

Valorile reziduale sunt răspândite aleatoriu cu valoarea prezisă de program de 0,009, ceea ce oferă experimentului o confidență corespunzătoare.

Omogenitatea grupelor este bună, contrastul dintre grupe față de minimul admis de $\pm 0,12212$ este cuprinsă între -0,07 și 1,99.

5.4.6 Studiul influenței variației puterii asupra timpului de prelucrare

Cei doi factori cu influență așa de mare asupra adâncimii de prelucrare interacționează vizibil și între ei, în momentul în care menținem constante $f = 20\text{KHz}$, $h = 1\text{ mm}$, concentrația = 50% și $p = 2\text{ daN/cm}^2$.

Rezultatele experimentărilor s-au introdus în programul ANOVA, din care s-a obținut concluzia că analiza se face pe 95% din valorile experimentului. Factorul $F = 335,815$ obținut, este mult mai mare decât valoarea estimată de programul Fisher, de $F(0.25,3,12) = 1,56$.

De aici rezultă influența mare a variabilei independente „P” asupra variabilei dependente „t”. De asemenea, ipoteza nulă este exclusă.

Din interpretarea grafică a valorilor obținute în urma desfășurării experimentului propus, se observă că timpul necesar prelucrării unei sticle pe o adâncime de 1mm scade de la 45s la 12 s, când puterea crește de la 10 la 20 W. Acestei variații i se poate atribui un model matematic liniar.

Se observă o dispersie a valorilor medii obținute, ceea ce dă procesului un caracter de stabilitate.

Valorile reziduale sunt repartizate aleatoriu, ceea ce conferă experimentului o bună confidență, având valoarea estimată de program 0.

Omogenitatea grupelor este bună, iar contrastul între grupe este foarte bun. Față de valoarea minimă admisă de $\pm 2,53611$, are valorile cuprinse între 3,75 și 33,5.

5.4.7. Studiul influenței variației presiunii asupra timpului de prelucrare

Condițiile de experimentare sunt aceleași ca la anterioara experimentare, cu diferența că la $f = 20,2\text{ KHz}$, $h = 1\text{ mm}$, $p = 20\text{ W}$, concentrație abraziv 50%, variază presiunea de contact sculă - piesă în limite deja consacrate $1-4\text{ daN/cm}^2$.

Tab. 5.4.6.1 One-Way Analystis of Variance

Data : ULTRA2.timputere
 Level codes : ULTRA1.putere_t
 Labels :
 Means plot : LSD Confidence level : 95 Range test : LSD

Tab. 5.4.6.2 Analysis of variance

Source of variation	Sum of Squarea	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig.level
Between groups	2728.5	3	909.50000	335.815	0.0
Within groups	32.5	12	2.70833		
Total (corrected)	2761	15			

0 missing vale(s) have been excluded.

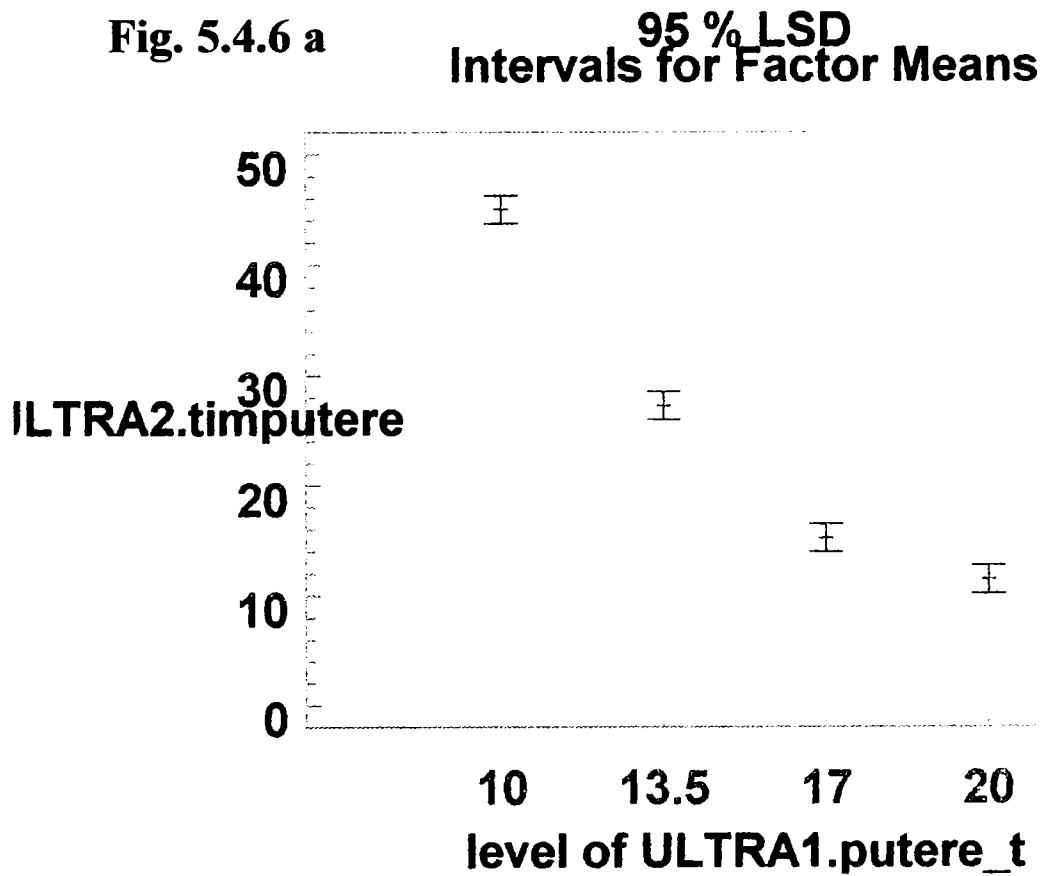


Fig. 5.4.6 b Box and Whisker Plots for Factor Level Data

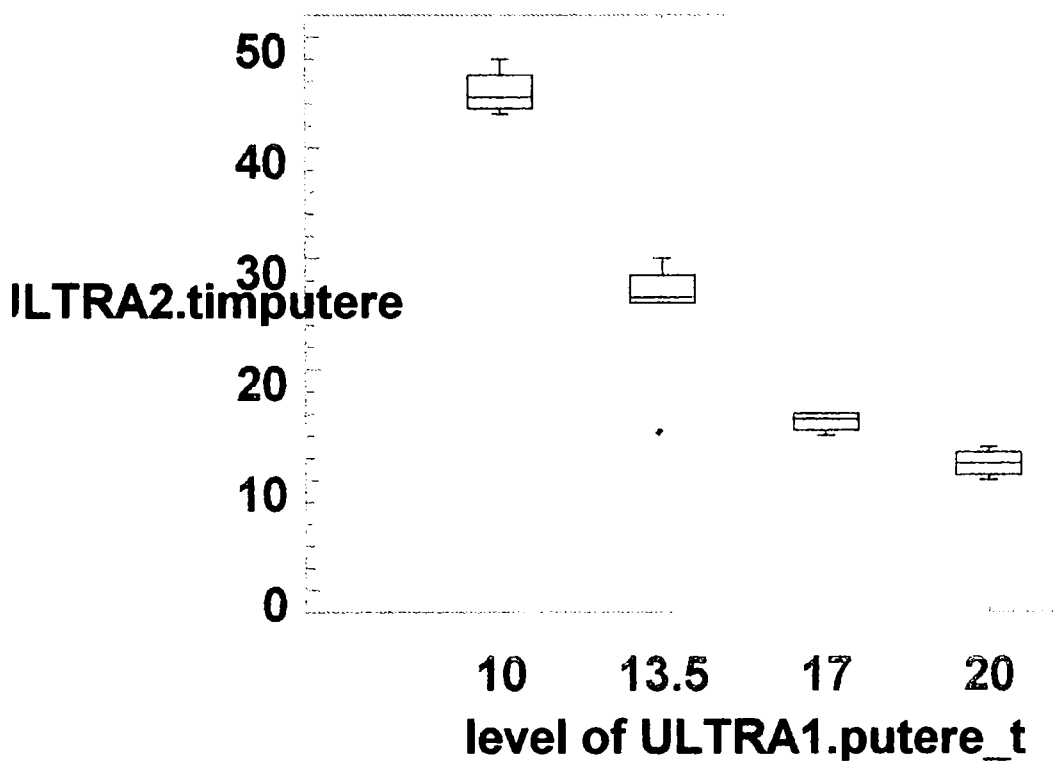


Fig. 5.4.6 c Notched Box and Whisker Plots for Factor Level Data

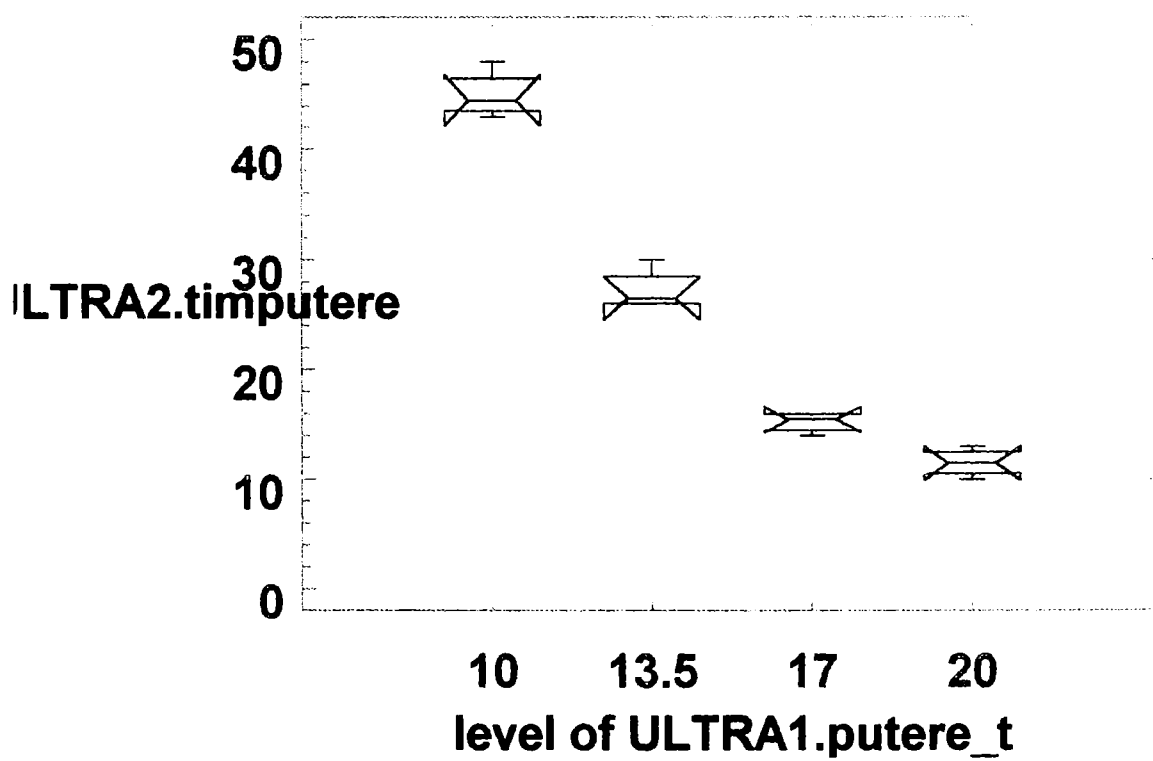
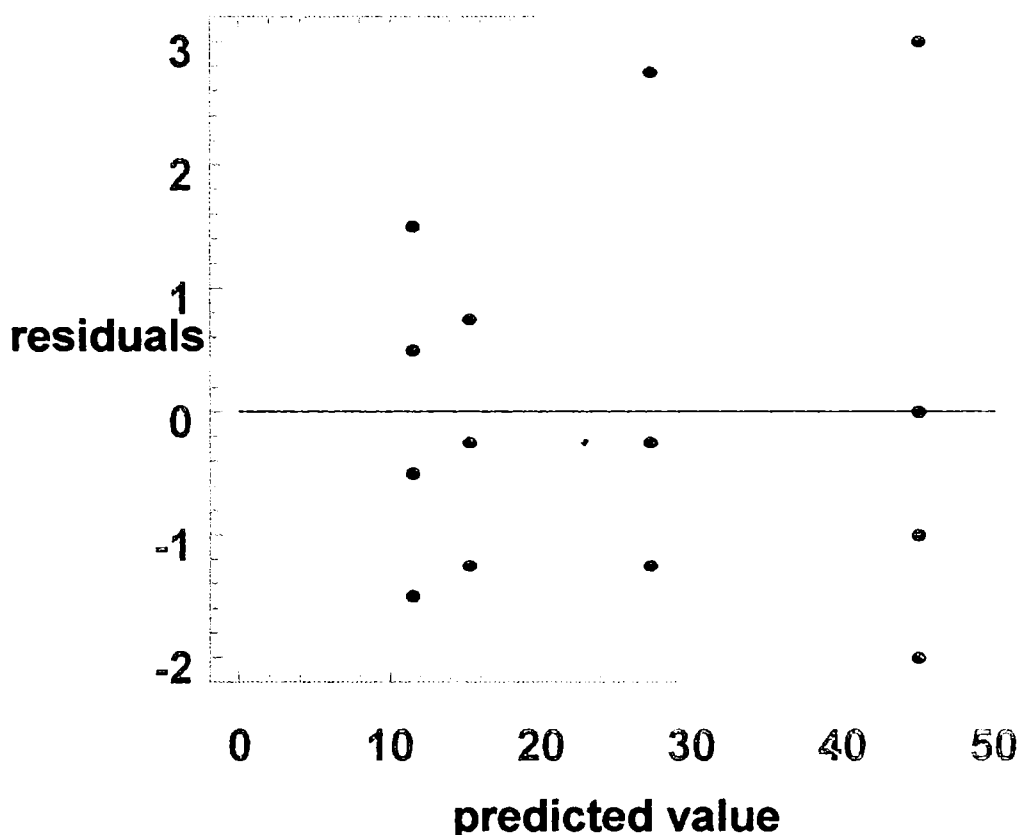


Fig. 5.4.6 d Residual Plot for ULTRA2.timputere



Tab. 5.4.6.3 Multiple range analysis for ULTRA2.timputere by ULTRA1.putere_t

Method: 95 Level	Percent Count	LSD Average	Homogeneous Groups
20	4	11.50	X
17	4	15.25	X
13.5	4	27.25	X
10	4	45.00	X

contrast	difference	+/-	limits
10 - 13.5	17.75		2.53611 *
10 - 13.5	29.75		2.53611 *
10 - 13.5	33.50		2.53611 *
13.5 - 13.5	12.00		2.53611 *
13.5 - 13.5	15.75		2.53611 *
17 - 13.5	3.75		2.53611 *

• denotes a statistically a significant difference.

Tab 5.4.7.1 One-Way Analystis of Variance

Data : ULTRA2.timpres
 Level codes : ULTRA1.presiune_t
 Labels :
 Means plot : LSD Confidence level : 95 Range test : LSD

Tab 5.4.7.2 Analysis of variance

Source of variation	Sum of Squarea	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig.level
Between groups	669.92857	6	116.65476	69.007	0.0
Within groups	35.50000	21	1.69048		
Total (corrected)	735.42857	27			

0 missing vale(s) have been excluded.

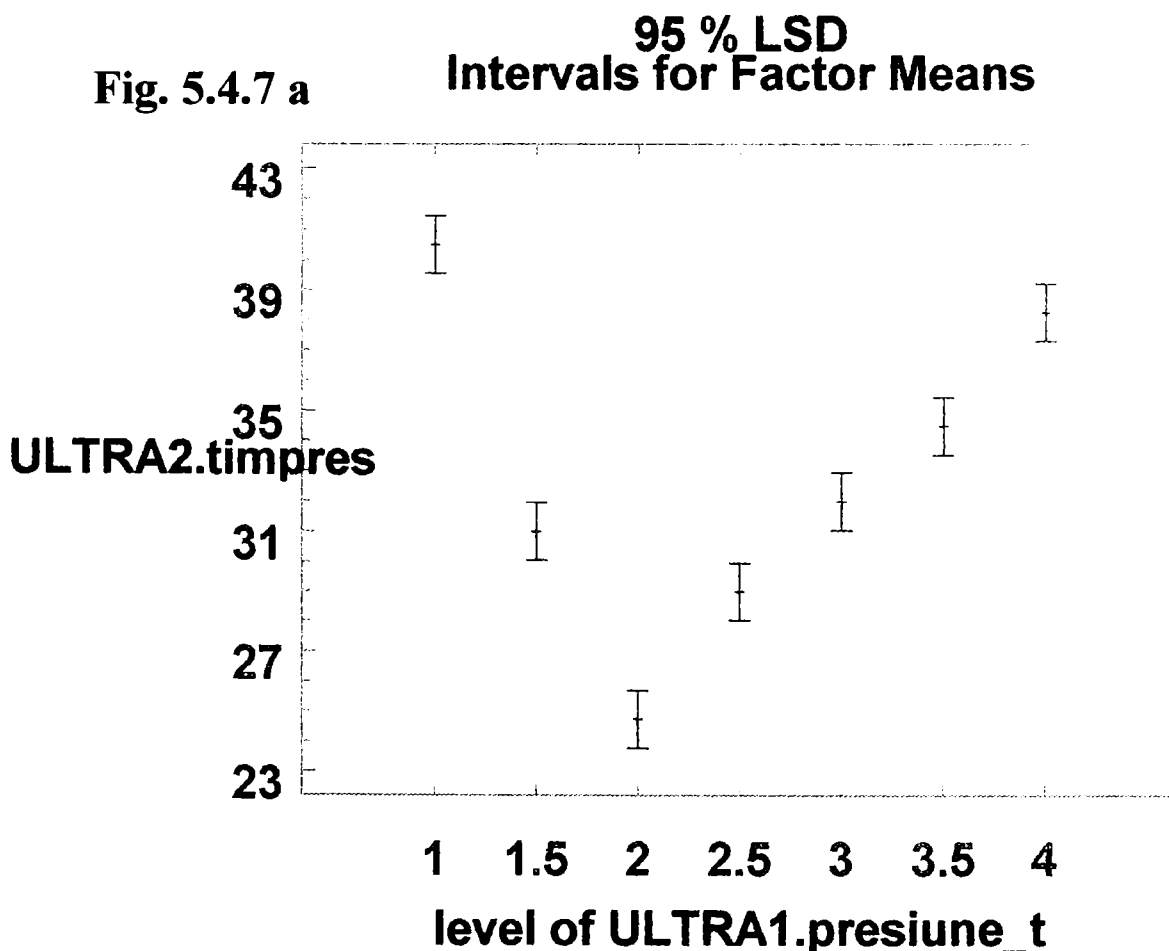


Fig. 5.4.7 b

Box and Whisker Plots for Factor Level Data

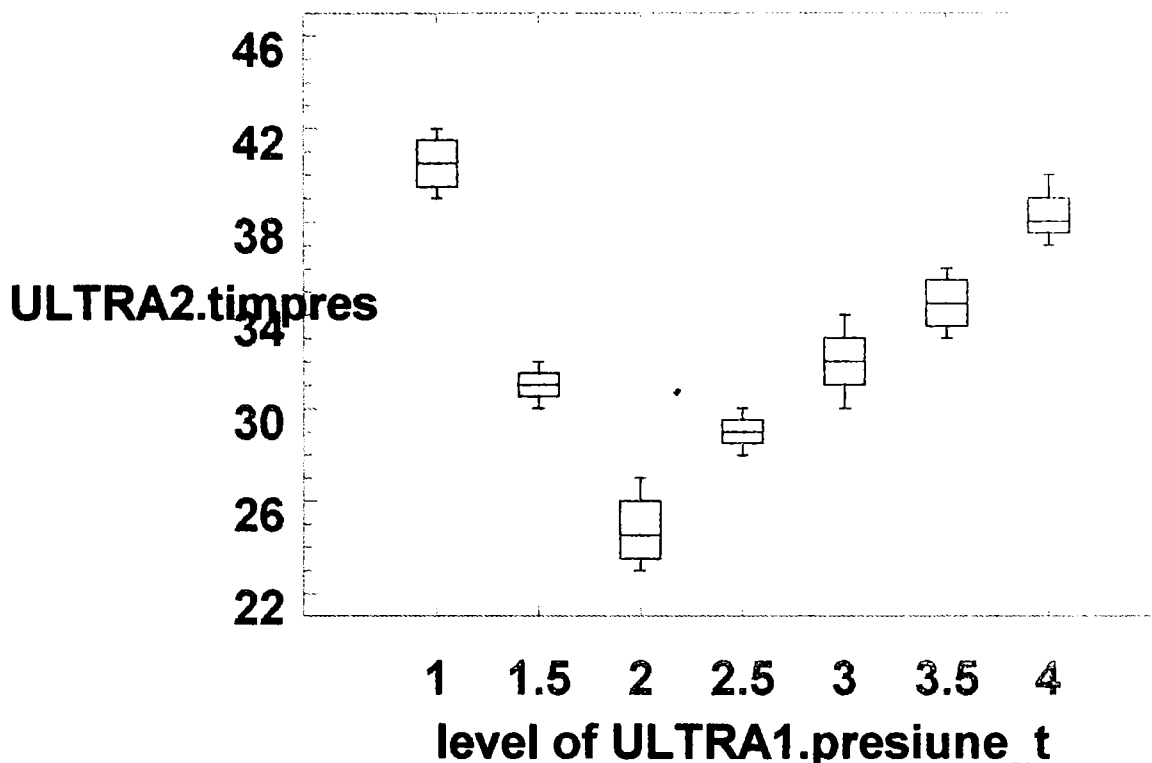


Fig. 5.4.7 c

Notched Box and Whisker Plots for Factor Level Data

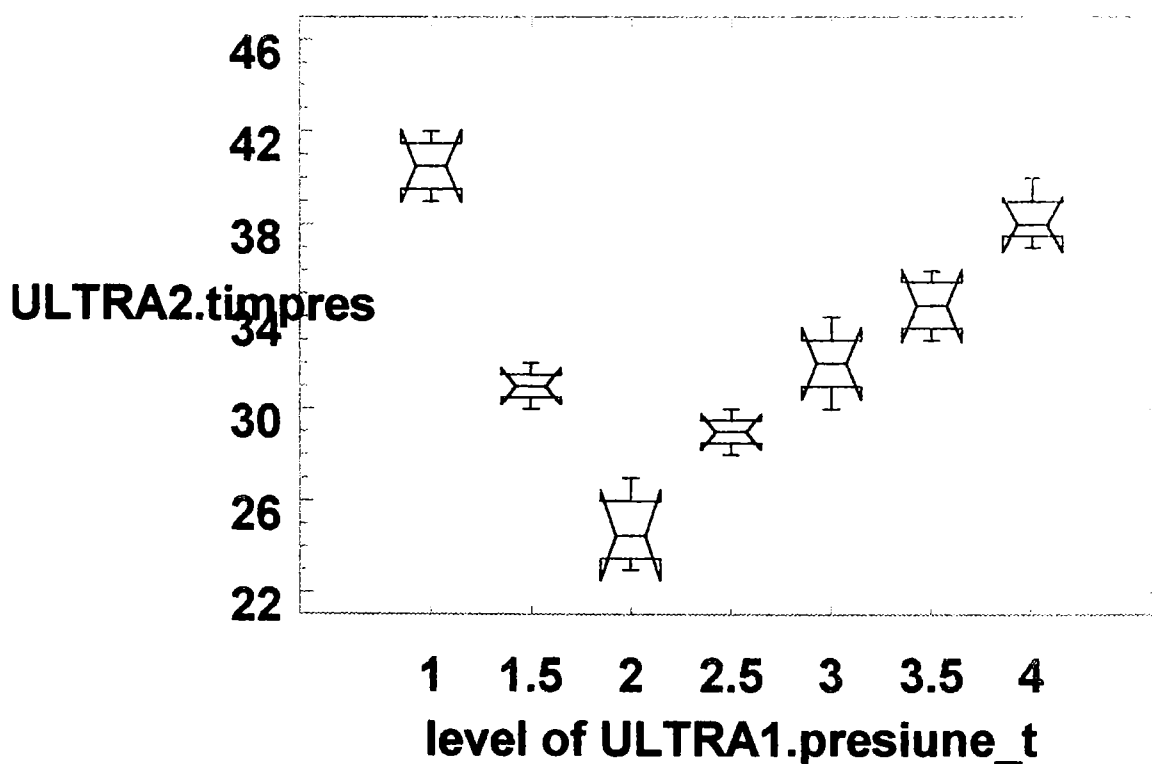
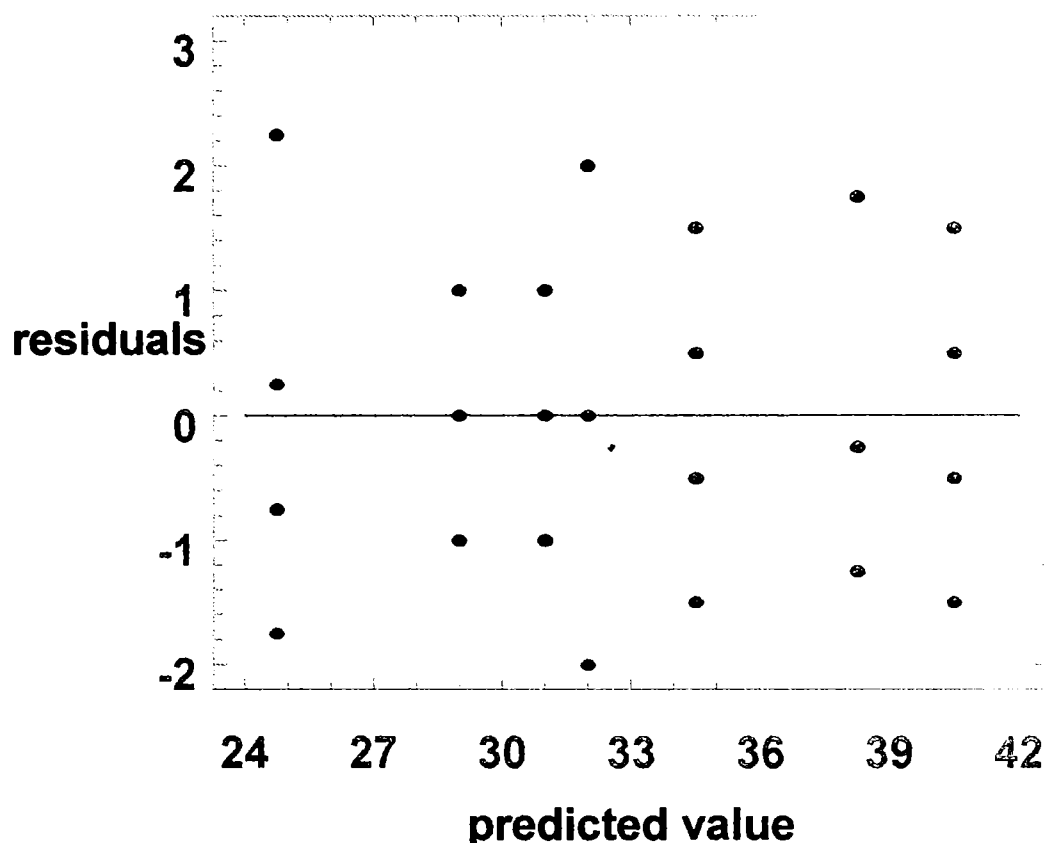


Fig. 5.4.7 d Residual Plot for ULTRA2.timpres



Tab. 5.4.7.3

Multiple range analysis for ULTRA2.timpres by ULTRA1.presiune_t

Method: 95 Level	Percent Count	LSD Average	Homogeneous Groups
2	4	24.75	X
2.5	4	29.00	X
1.5	4	31.00	X
3	4	32.00	X
3.5	4	34.50	X
4	4	38.25	X
1	4	40.50	X

contrast	difference	+/-	limits
1 - 1.5	9.50		1.91239 *
1 - 2	15.75		.91239 *
1 - 2.5	11.50		.91239 *
1 - 3	8.50		1.91239 *
1 - 3.5	6.00		1.91239 *
1 - 4	2.25		1.91239 *

Analiza ANOVA se execută pe 95% din valorile experimentului care se încadrează în valorile estimate ale programului, cu factorul Fisher 69,007 față de minimul admis extras din tabel $F(0.25,6,21)=1,43$

Din comparația valorilor nominale rezultă influența variabilei independente „p” asupra variabilei dependente „t”, ipoteza nulă fiind exclusă.

Din interpretarea datelor obținute în urma experimentărilor executate, rezultă concluziile următoare:

- balansul valorilor obținute experimental se încadrează în limite normale în jurul valorii medii obținute;

- fenomenului nu i se poate atribui un model matematic liniar pe întregul domeniu de experimentare, ci două modele matematice liniare, unul pe intervalul 1-2 daN / cm², iar al doilea pe intervalul 2-4 daN/cm²;

- la $p = 2 \text{ daN/cm}^2$ timpul de prelucrare este minim, deci aceasta este presiunea optimă de prelucrare a discurilor din sticlă optică.

Dispersia valorilor rezultate în urma experimentărilor nu este mare, fiind însă destul de simetrică, după cum ilustrează reprezentările grafice 5.4.7 b și 5.4.7 c. Cele mai mici diferențe dintre valorile obținute sunt la presiunile de 1,5 și 2,5 daN/cm².

Valorile reziduale sunt dispersate aleatoriu, ceea ce dă credibilitate condițiilor de desfășurare a experimentelor și rezultatelor acestora.

Omogenitatea grupelor este bună, iar contrastul dintre grupe este cel admis.

5.5. Analiza interacțiunilor principalilor factori de influență a prelucrării dimensionale în câmp ultrasonic-experimentul

5.5.1. Experimentul factorial cu două variabile

După cum am menționat la prezentarea experimentului în prezenta teză de doctorat, experimentul factorial prezintă avantajul posibilității de a considera acțiunea similară a mai multor parametri independenți asupra răspunsului sistemului, prin una sau mai multe variabile dependente.

Plecând de la principul de bază în analiza statistică a dezvoltării treptate a unui experiment prin identificarea tendințelor de evoluție a principalilor factori, am folosit cel mai simplu experiment factorial, luând în considerare 2 variabile independente.

Pentru a determina tendința de curbare a sistemului (neliniaritatea sa) am folosit metoda suprafețelor de răspuns (3²) în care s-au considerat 3 nivele ale

variabilelor independente (minim, mediu, maxim) din care rezultă 9 soluții posibile.

Pentru valorile rezultate la începutul experimentului, opțiunile de analiză ale programului ne permit următoarele aprecieri conform tabelului 5.5.1.1.

Cea mai mare importanță o are puterea asupra variabilei dependente, considerabil mai mare decât presiunea.

Considerand influențele de ordinul doi, semnificative sunt influențele puterii și presiunii, neapărând interacțiuni semnificative între cei doi factori.

Aceleași concluzii rezultă și din analiza ANOVA (tabelul 5.5.1.2) în care valori semnificative ale factorului Fisher sunt cele corespunzătoare puterii, ca și în tabelul anterior. Ca influențe de ordinul doi se remarcă puterea și presiunea.

Prin valoarea de 0.97462 a factorului R^2 se concluzionează că 97% din valorile experimentului se încadrează în valorile estimate ale programului.

În tabelul 5.5.1.3 se prezintă coeficienții de regresie pentru modelul de ordinul doi.

Dacă într-un experiment factorial se consideră mai mulți factori, și dacă interacțiunile sunt nesemnificative, ele se pot neglija și prin urmare i se poate fi atribuit un model matematic liniar.

Acest lucru poate fi făcut și diferențiat, pe intervale, programul oferind opțiuni de reevaluare în acest sens.

Din reprezentările grafice, 5.5.1 a și 5.5.1 b, cuprind efectele standard asupra răspunsului, aceasta numindu-se analiza PARETO pentru identificarea atât a efectelor principale cât și a interacțiunilor de ordinul doi.

Se remarcă influența foarte mare a puterii în comparație cu presiunea, interacțiunile lor având valori de asemenea influență în procesul de prelucrare.

Următoarele două reprezentări grafice 5.5.1 c și 5.5.1 d, prezintă un interes practic deosebit.

În figura 5.5.1 c, este reprezentată suprafața de răspuns a interacțiunilor dintre putere, presiune și timp. Aceste elemente variază între limitele 10 - 20 W, 1 - 4 daN/cm² și 0-60s. Se observă că pentru a prelucra un disc optic este avantajos să se folosească zona graficului în care puterea este 20W, presiunea 2daN/cm² timpul fiind minim. În această zonă, suprafața de răspuns prezintă minimumul.

În reprezentarea grafică 5.5.1 d, sunt reprezentate curbele de nivel obținute prin intersectarea suprafeței de răspuns cu planuri echipotențiale, reprezentante ale lui $t = \text{constant}$.

Se observă și din acest grafic faptul că prelucrarea este optimă la presiunea de 20W, presiunea de 2-2,5daN/cm², curba de răspuns fiind cea mai pronunțată.

Planurile se vor trasa la valorile dorite de utilizator în intervalul investigat (în exemplul ilustrat curbele sunt trasate la valorile: 15s, 20s, 25s, 35s, 45s, 55s).

Tab. 5.5.1.1 Estimated effects for timp - 2 factor study

average	=	22.3333	+/-	3.65993
A: putere	=	-40.6667	+/-	4.00925
B: presiune	=	2	+/-	4.00925
AB	=	1	+/-	4.91031
AA	=	18	+/-	6.94422
BB	=	16	+/-	6.94422

Standard error estimated from total error with 3 d.f. (t = 3.18245)

Tab. 5.5.1.2 ANOVA for timp - 2 factor study

Effect	Sum of Squares	DF	Mean Sq.	F-Ratio	P-value
A: putere	2480.66667	1	2480.6667	102.88	0.0020
B: presiune	6.00000	1	6.0000	0.25	0.6571
AB	1.00000	1	1.0000	0.04	0.8537
AA	162.00000	1	162.0000	6.72	0.0809
BB	128.00000	1	128.0000	5.31	0.1046
Total error	72.33333	3	24.1111		
Total (corr.)	2850.00000	8			

R-squared = 0.97462

r-squared (adj. for d.f.) = 0.93232

Tab. 5.5.1.3 Regression coeffs.for timp - 2 factor study

constant	=	187.389
A: putere	=	-15.0333
B: presiune	=	-18.1111
AB	=	0.066667
AA	=	0.36
BB	=	3.55556

Fig. 5.5.1 a Pareto Chart for timp

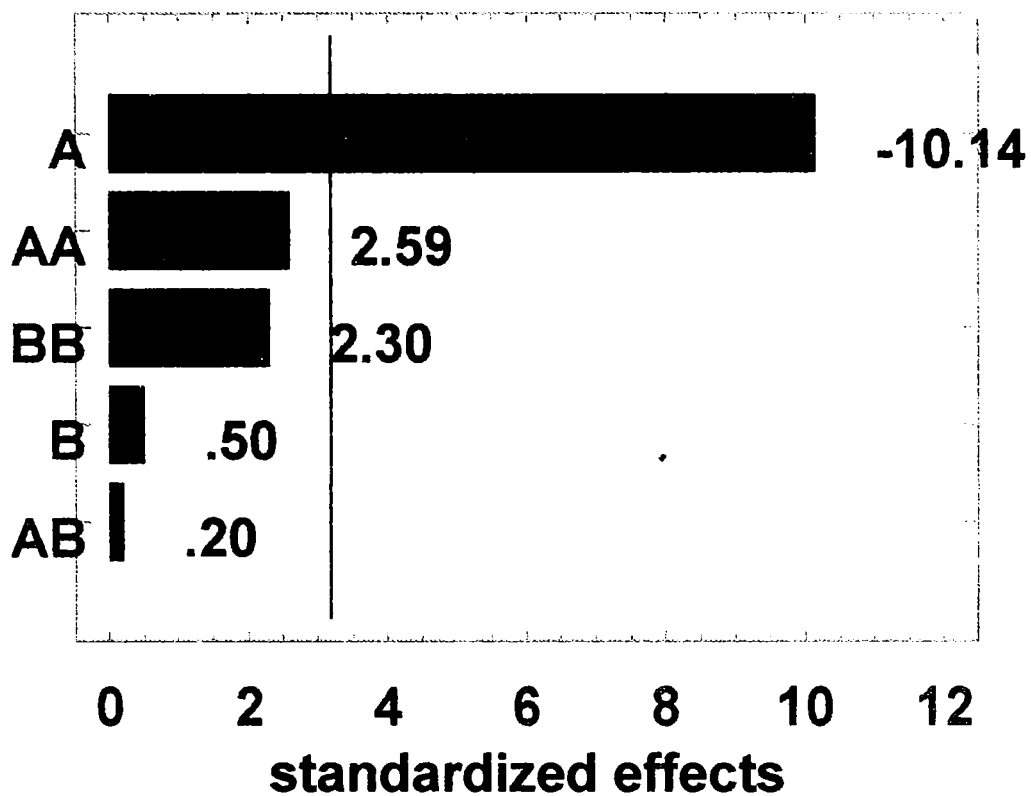


Fig. 5.5.1 b Predicted Response Plot for timp

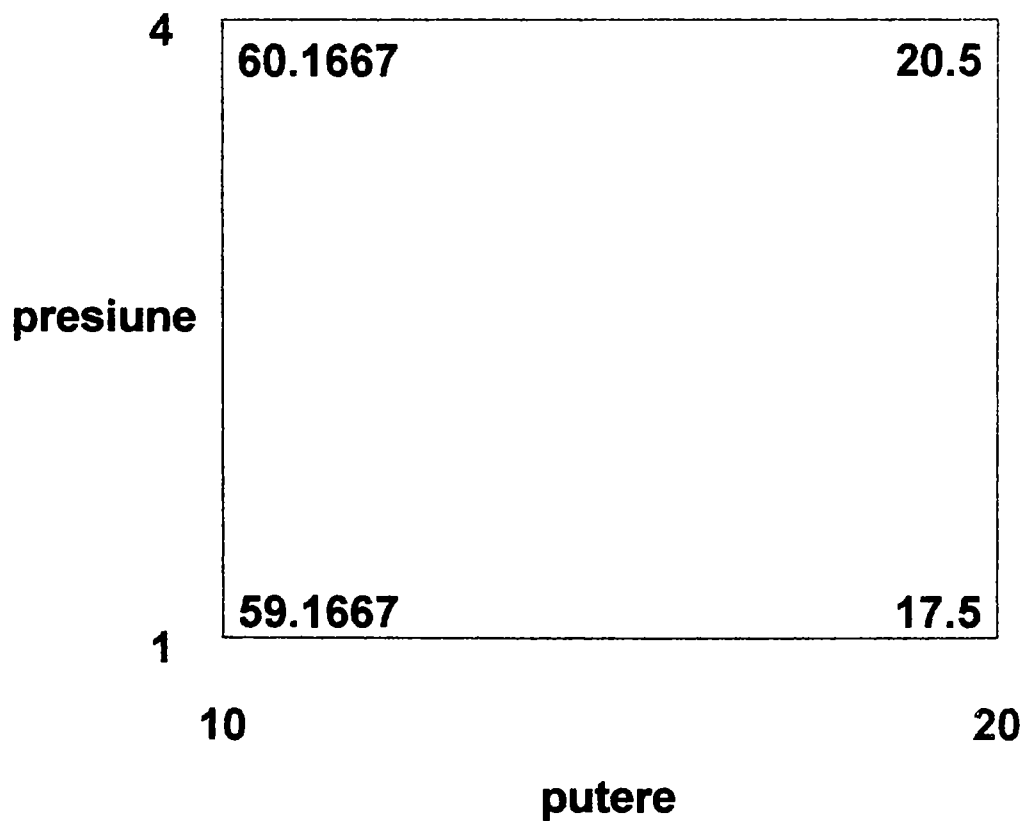


Fig. 5.5.1 c **Estimated Response Function**

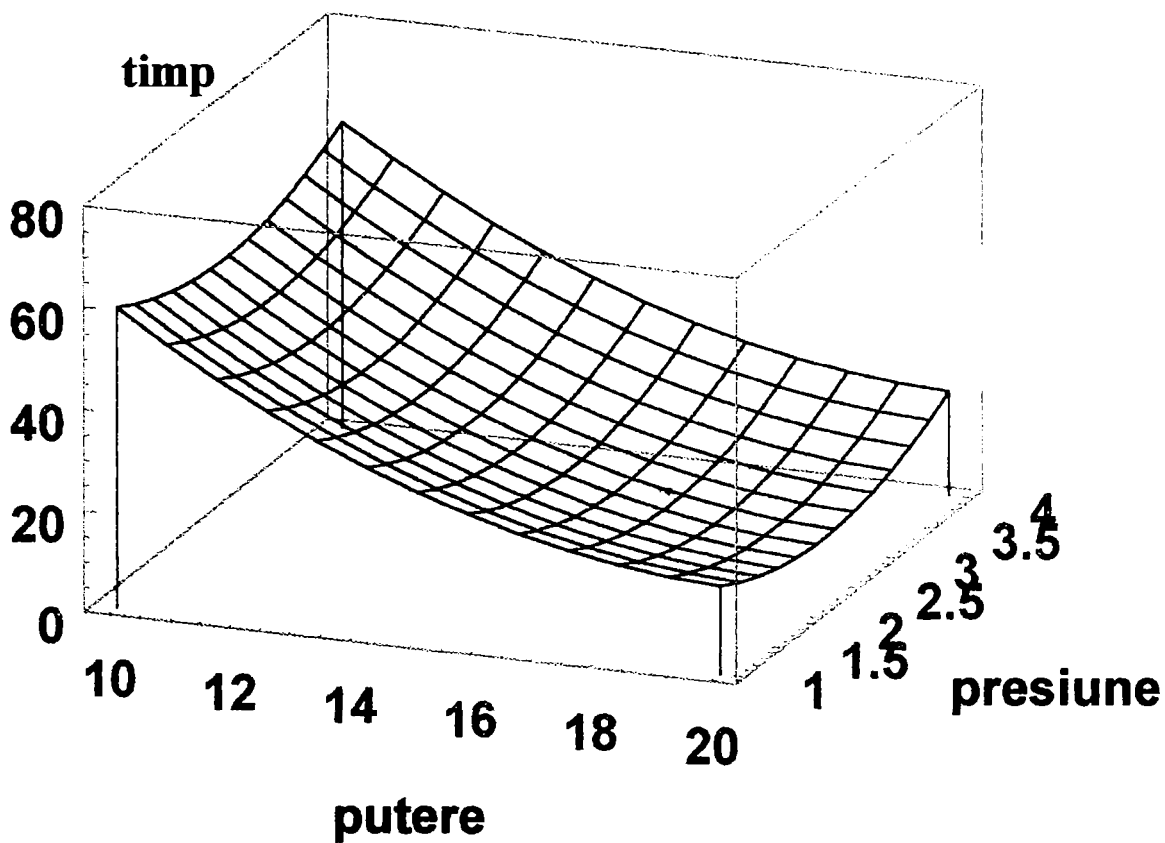
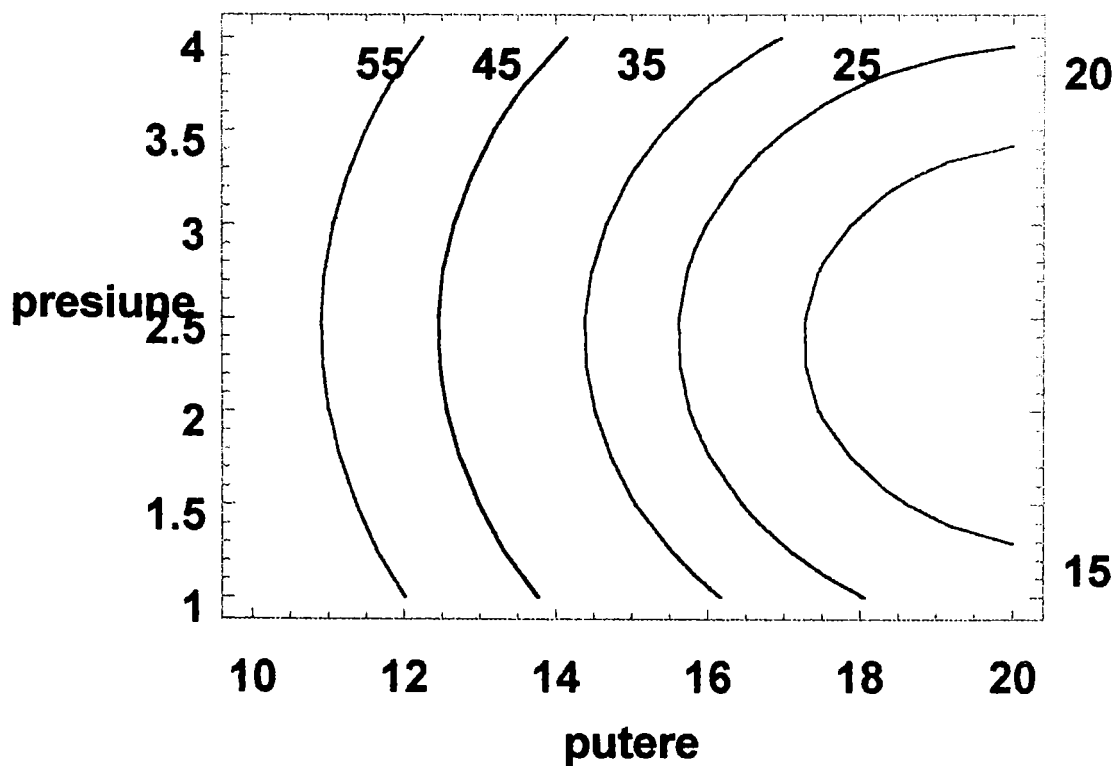


Fig. 5.5.1 d **Estimated Response Function**



Analog se pot obține curbe de nivel reprezentând interacțiunea putere - timp la presiune constantă și presiune- timp la putere constantă.

În următoarea fază a prelucrării datelor experimentale introduse în program, ne-am propus investigarea a patru parametri considerați din experiența anterioară și din literatura de specialitate ca fiind cele mai importante în influențarea desfășurării procesului de prelucrare studiat și analizat.

Analiza rezultatelor experimentale evidențiază următoarea ordine de influență conform tabelului 5.5.2.1.:

- timp	1,85
- interacțiunea timp de ordinul doi	-1,02906
- frecvență	-1,47
- interacțiunea presiune frecvență	1,56
- interacțiunea presiune timp	-1,515
- interacțiunea frecvență de ordinul doi	-1,14906
- interacțiunea putere de ordinul doi	0,370943

Aceleași elemente le evidențiază și analiza ANOVA (Tabelul 5.5.2.2.) referitoare la influența asupra parametrului adâncime a celor patru factori principali, ca și ai interacțiunilor lor de ordinul doi.

Este evident că deși se evidențiază interacțiuni principale și secundare ale mai multor factori, nu putem reprezenta în spațiu aceste interacțiuni decât două câte două. În continuare, sunt prezentate suprafețele de răspuns și contururile de răspuns pentru combinațiile posibile ale parametrilor independenți:

- presiune - timp – adâncime;
- presiune - putere – adâncime;
- presiune – frecvență - adâncime;
- timp - putere – adâncime;
- timp – frecvență - adâncime;
- putere – frecvență - adâncime;

în intervalele $t=0 - 80$ s , $p = 1 - 4$ daN/cm², $P= 10-20$ W, $f = 20-20,2$ KHz.

Se remarcă pentru toate cazurile faptul că modelul de ordinul doi este potrivit, simplificarea acestuia fiind posibilă numai prin eliminarea interacțiunilor nesemnificative.

Atât reprezentările suprafețelor de răspuns cât și contururile de răspuns pot pune în evidență extreme singulare sau multiple.

De asemenea, se pot trage concluzii asupra tendințelor sistemului cu efecte similare.

Din graficul 5.5.2 a se alege zona centrală în care presiunea și timpul influențează mai mult adâncimea de prelucrare, la $p=2$ daN/cm² și $t=40-60$ s.

Din graficul 5.5.2 b se alege din același motiv al găsirii optimului procesului de prelucrare $p=2-2,5$ daN/cm² și $P=20$ W.

5.5.2 Experimentul factorial cu patru variabile

Tab. 5.5.2.1
Estimated effects for adancime 4 factor study

average	= 1.7984 +/-	0.0780573
A: presiune	= 0.08	+/- 0.275649
B: timp	= 1.85	+/- 0.275649
C: putere	= 0.062	+/- 0.123274
D: frecventa	= -1.47	+/- 0.275649
AB	= -1.515	+/- 0.308185
AC	= 0.05	+/- 0.137825
AD	= 1.56	+/- 0.308185
BC	= -0.035	+/- 0.137825
BD	= 0.105	+/- 0.308185
CD	= -0.05	+/- 0.137825
AA	= -1.35906	+/- 0.245383
BB	= -1.02906	+/- 0.245383
CC	= 0.370943	+/- 0.245383
DD	= -1.14906	+/- 0.245383

Standard error estimated from total error with 3 d.f. (t = 3.18245)

Tab. 5.5.2.2 **ANOVA for adancime - 4 factory study**

Effect	Sum of Squares	DF	Mean Sq.	F-Ratio	P-value
A: presiune	0.00320000	1	0.0032000	0.08	0.7934
B: timp	1.71125000	1	1.7112500	45.04	0.0068
C: putere	0.00961000	1	0.0096100	0.25	0.6546
D: frecventa	1.08045000	1	1.0804500	28.44	0.0129
AB	0.91809000	1	0.9180900	24.16	0.0161
AC	0.00500000	1	0.0050000	0.13	0.7444
AD	0.97344000	1	0.9734400	25.62	0.0149
BC	0.00245000	1	0.0024500	0.06	0.8184
BD	0.00441000	1	0.0044100	0.12	0.7591
CD	0.00500000	1	0.0050000	0.13	0.7444
AA	1.16539104	1	1.1653910	30.68	0.0116
BB	0.66815175	1	0.6681518	17.59	0.0247
CC	0.08681842	1	0.0868184	2.29	0.2278
DD	0.83306604	1	0.8330660	21.93	0.0184
Total error	0.11397396	3	0.0379913		
Total (corr.)	11.4127778	17			

Tab. 2.7.2.3

Regression coeffs. for adancime - 4 factor study

constant	=	-54497.3
A: presiune	=	-158.92
B: timp	=	-0.421695
C: putere	=	1.32882
D: frecventa	=	5444.18
AB	=	-0.016833
AC	=	3.33333E-3
AD	=	8
BC	=	-1.16667E-4
BD	=	0.0269232
CD	=	-0.0769225
AA	=	-0.30202
BB	=	-5.71717E-4
CC	=	7.41819E-3
DD	=	-135.968

Fig. 5.5.2 a Estimated Response Function

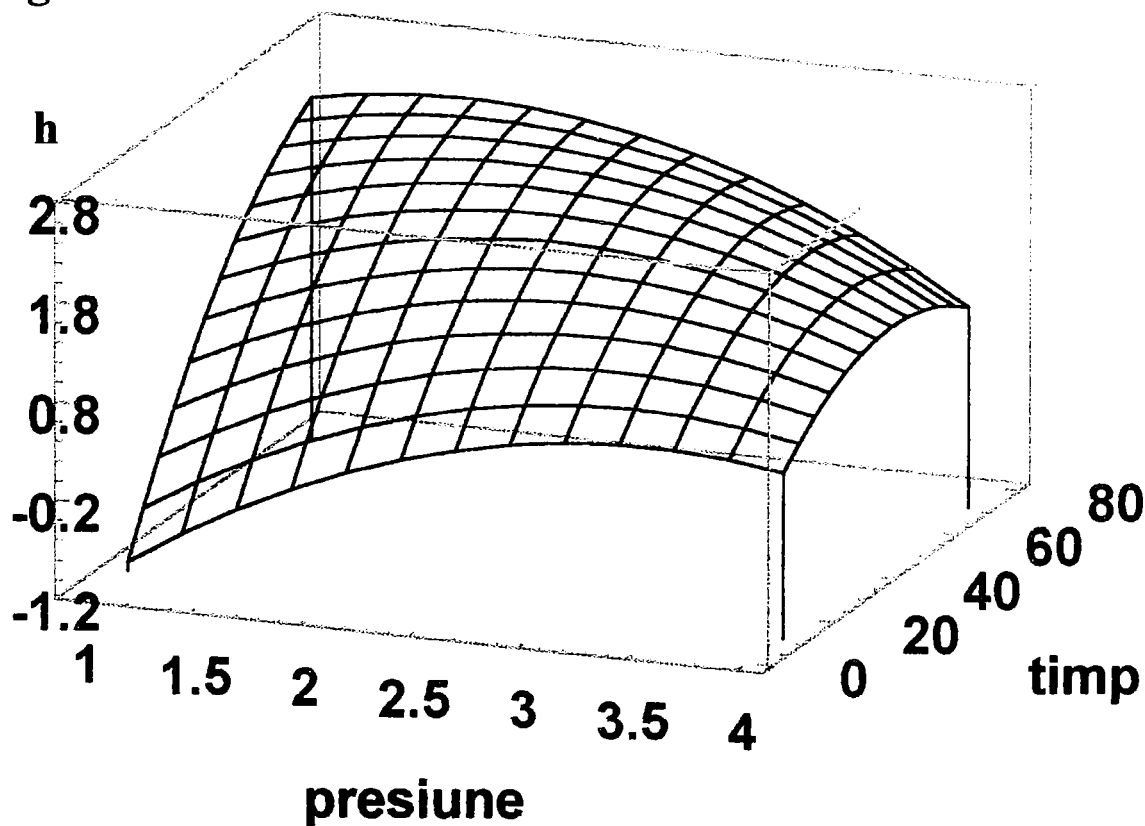


Fig. 5.5.2 b Estimated Response Function

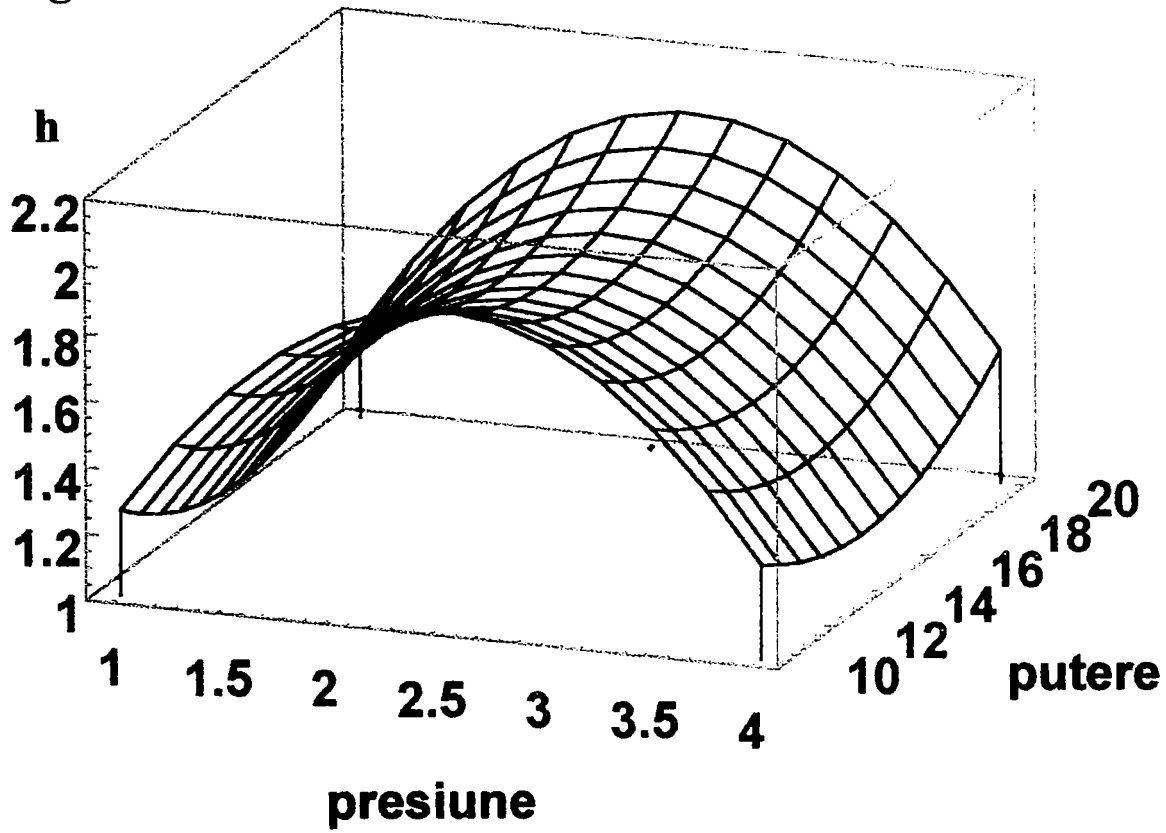


Fig. 5.5.2 c Estimated Response Function

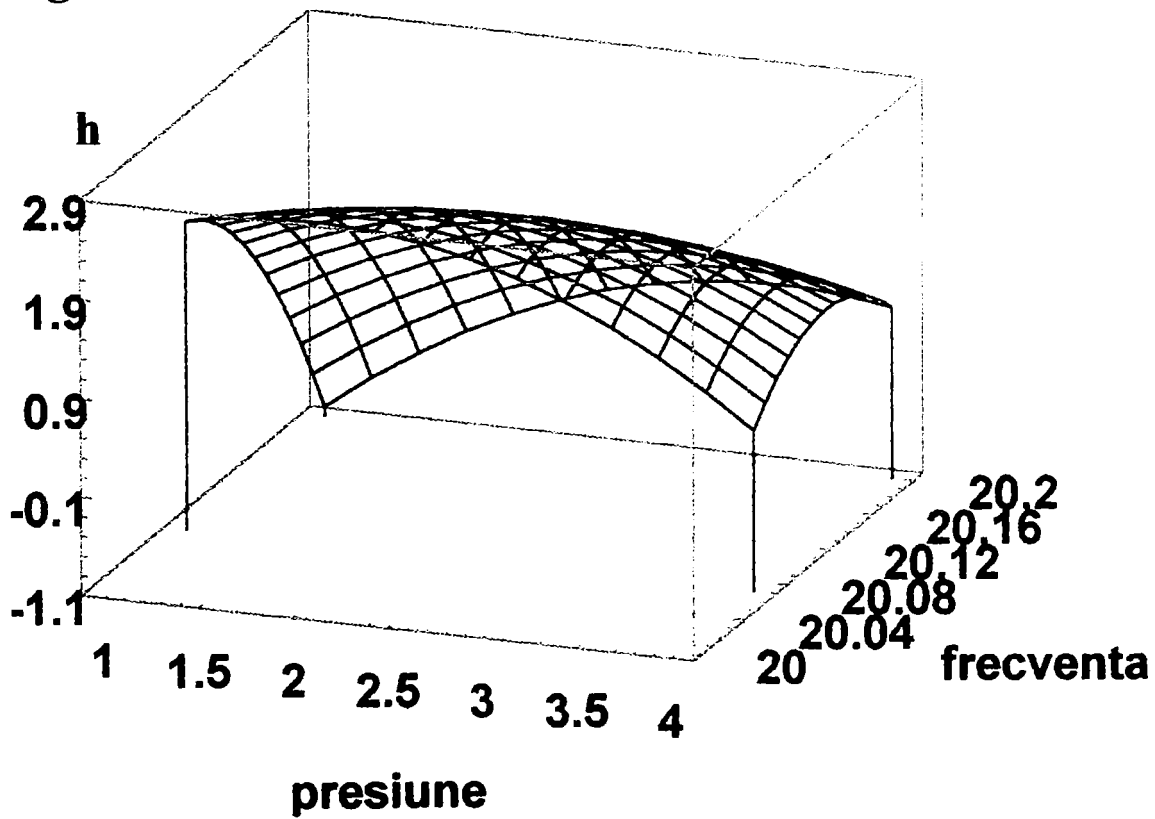


Fig. 5.5.2 d Estimated Response Function

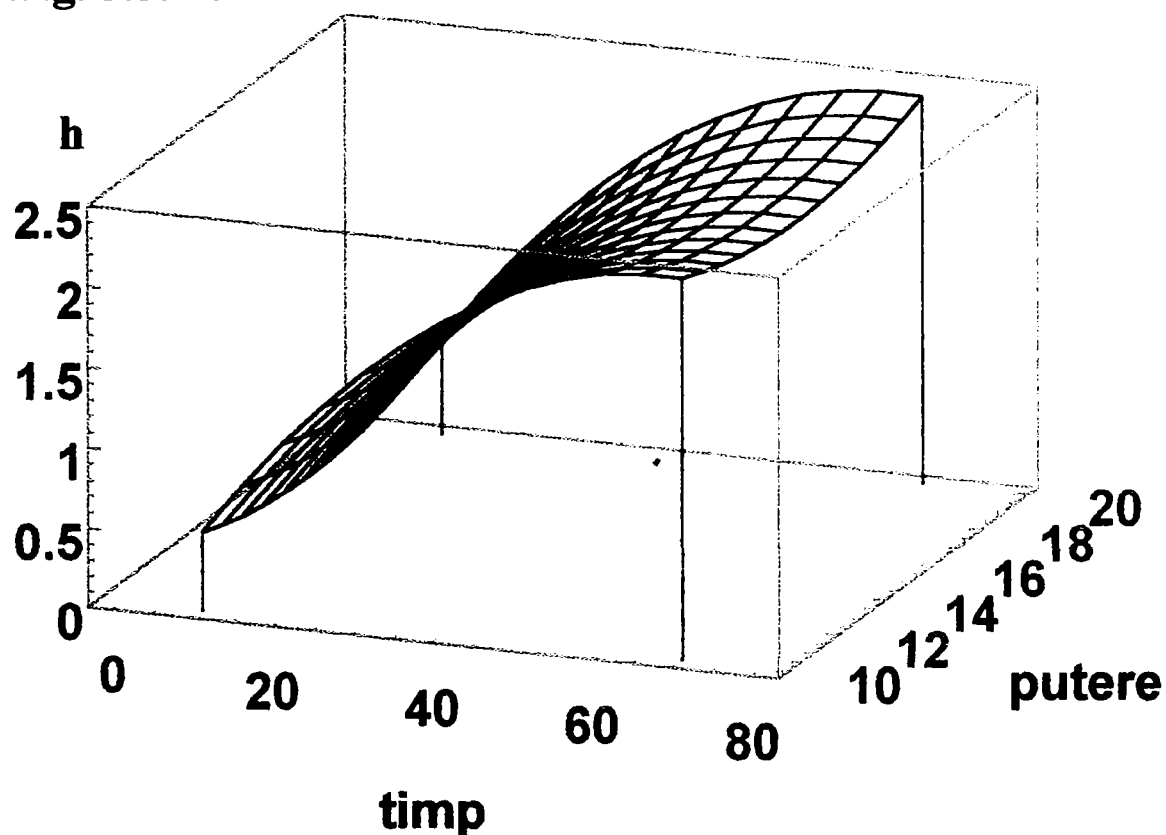


Fig. 5.5.2 e Estimated Response Function

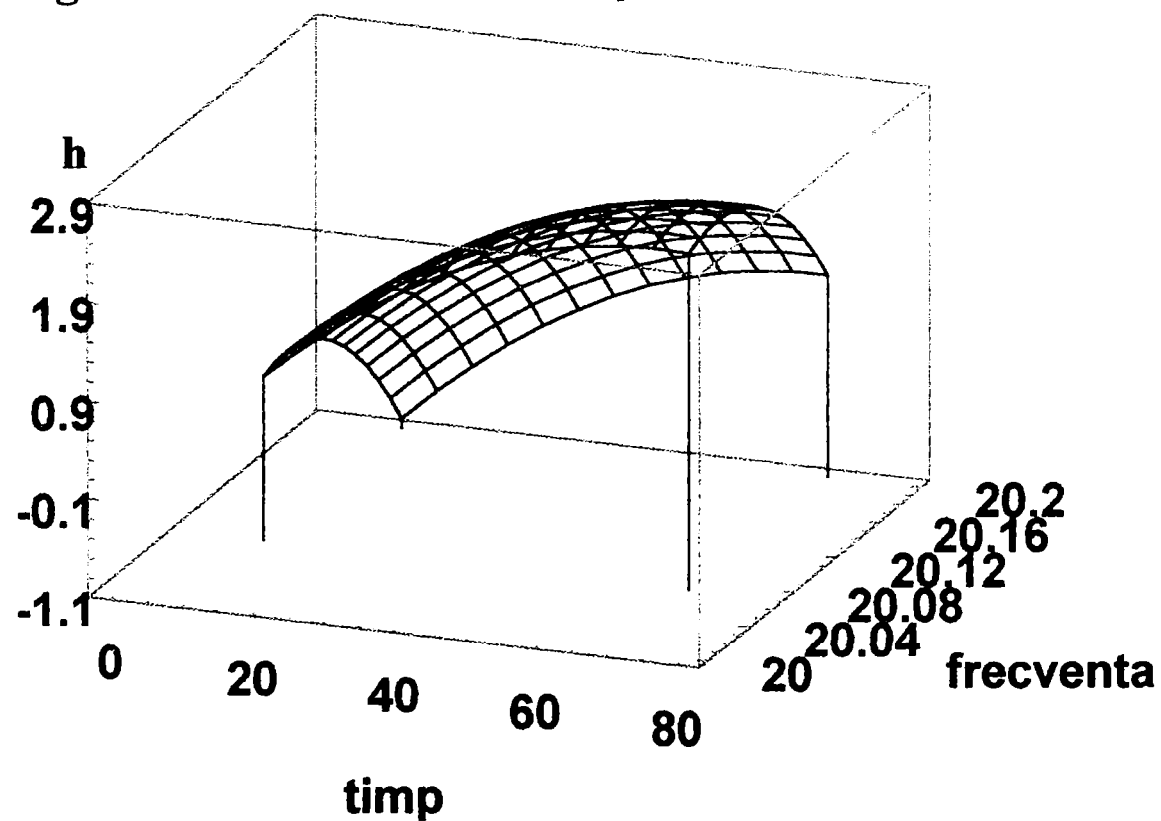


Fig. 5.5.2 f Estimated Response Function

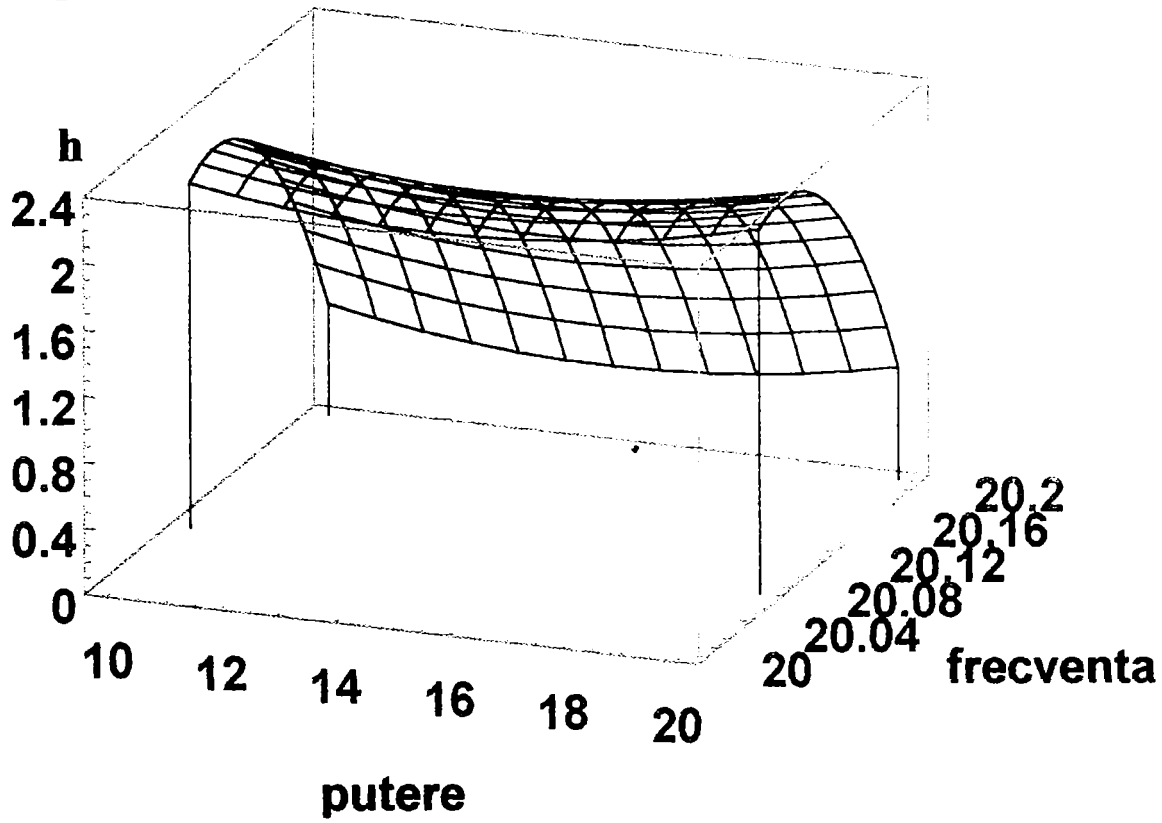


Fig. 5.5.2 g Estimated Response Function

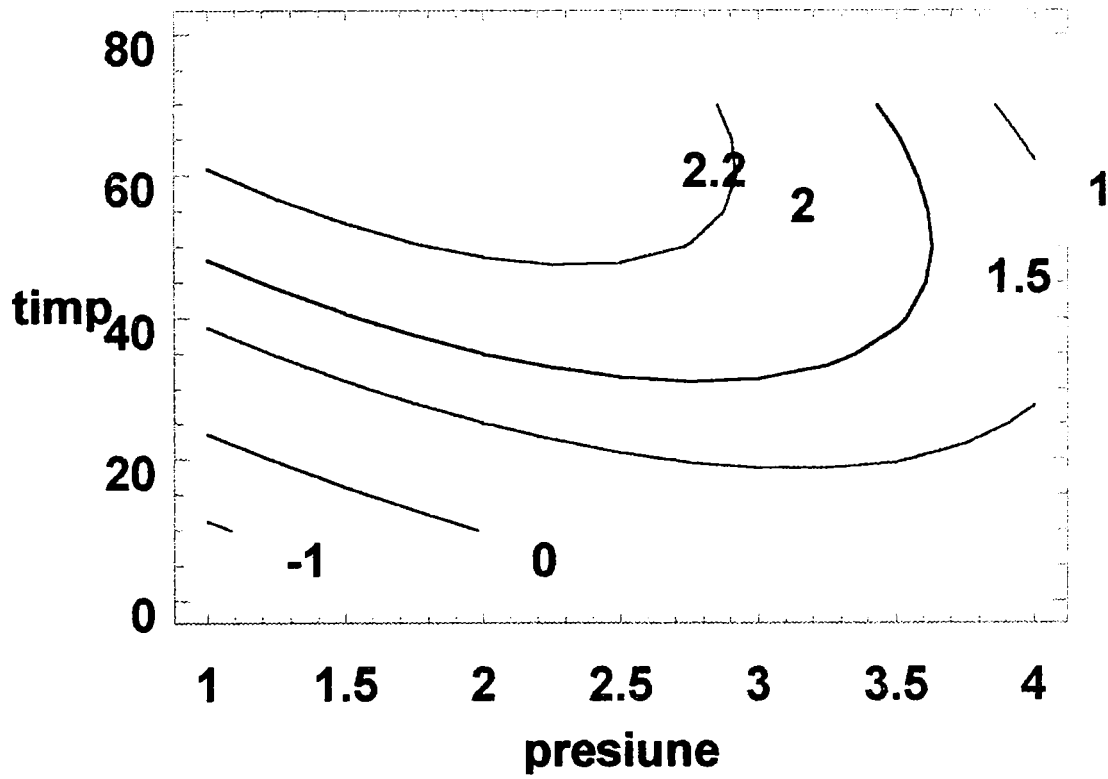


Fig. 5.5.2 h

Estimated Response Function

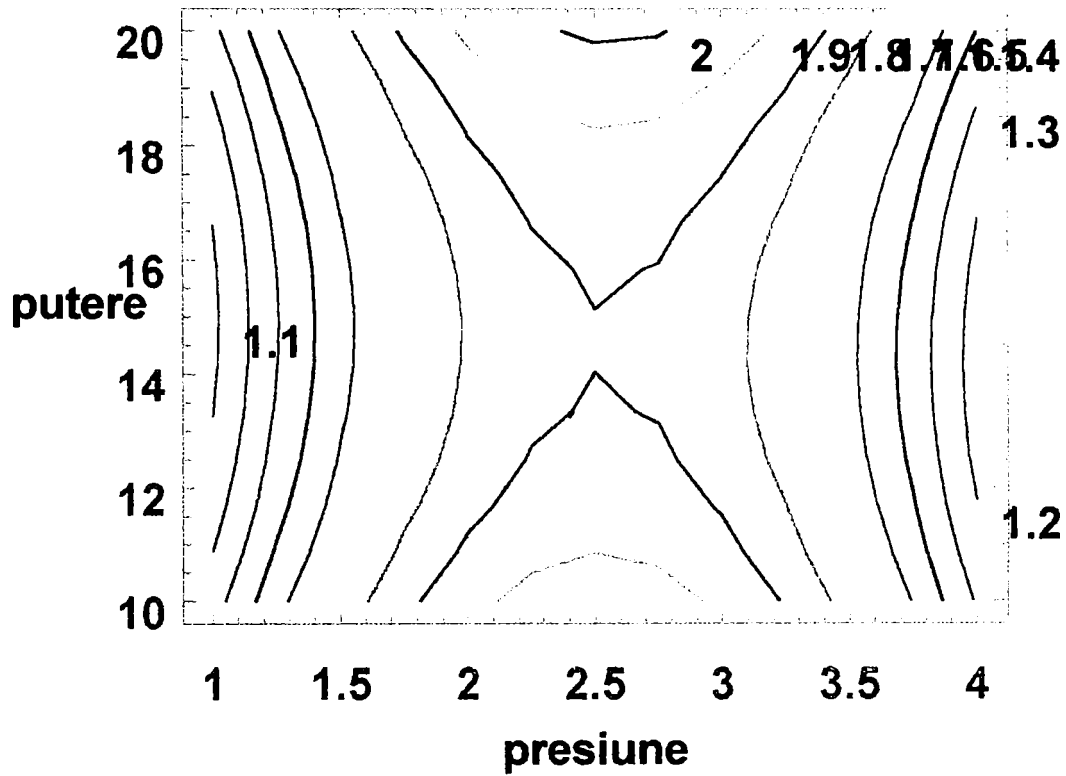


Fig. 5.5.2 i

Estimated Response Function

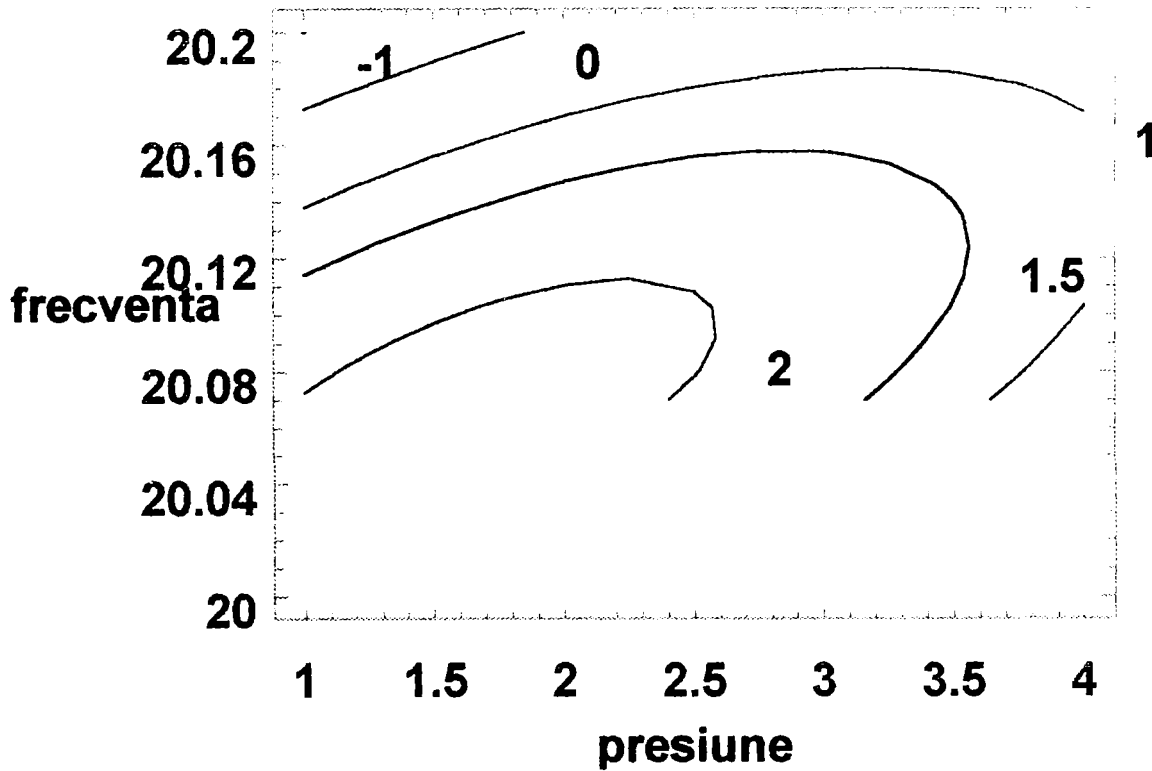


Fig. 5.5.2 j Estimated Response Function

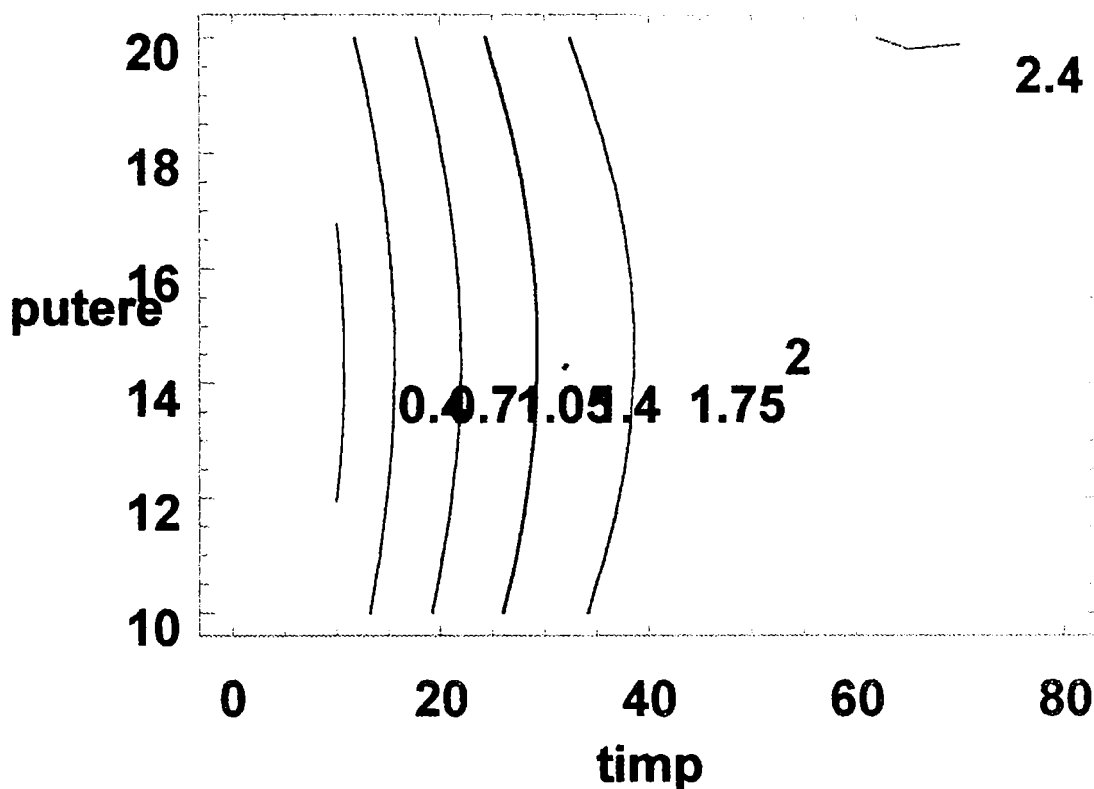


Fig. 5.5.2 k Estimated Response Function

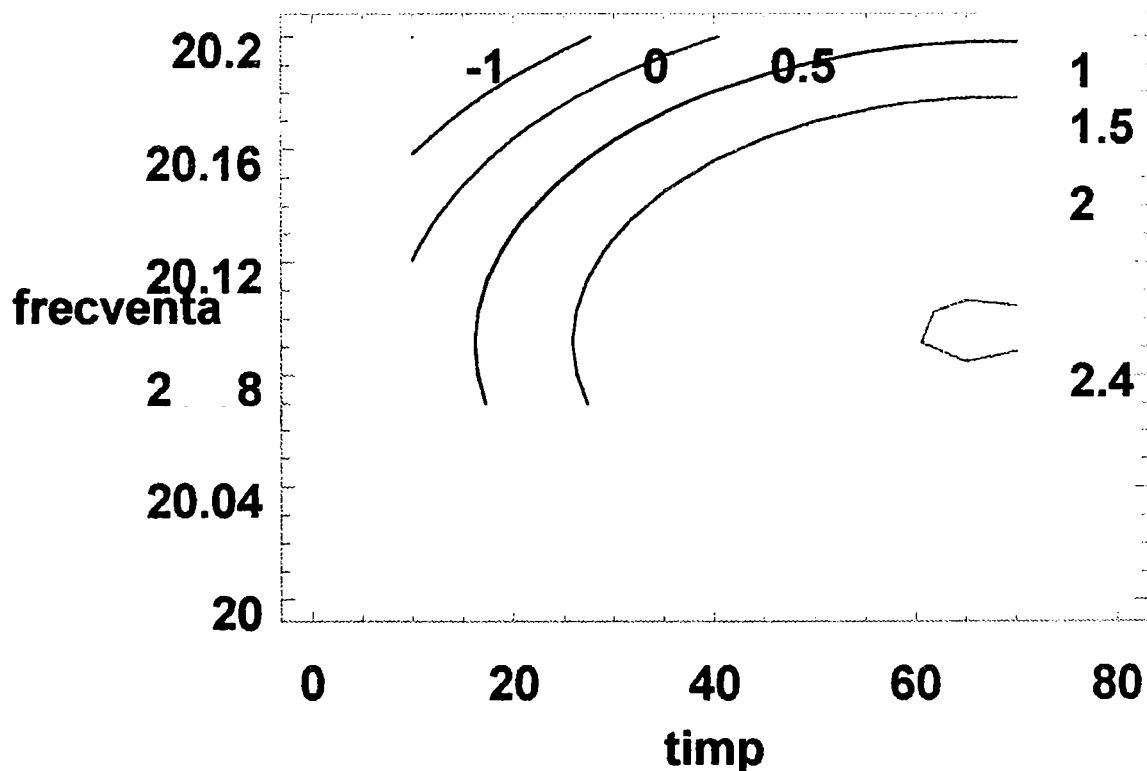
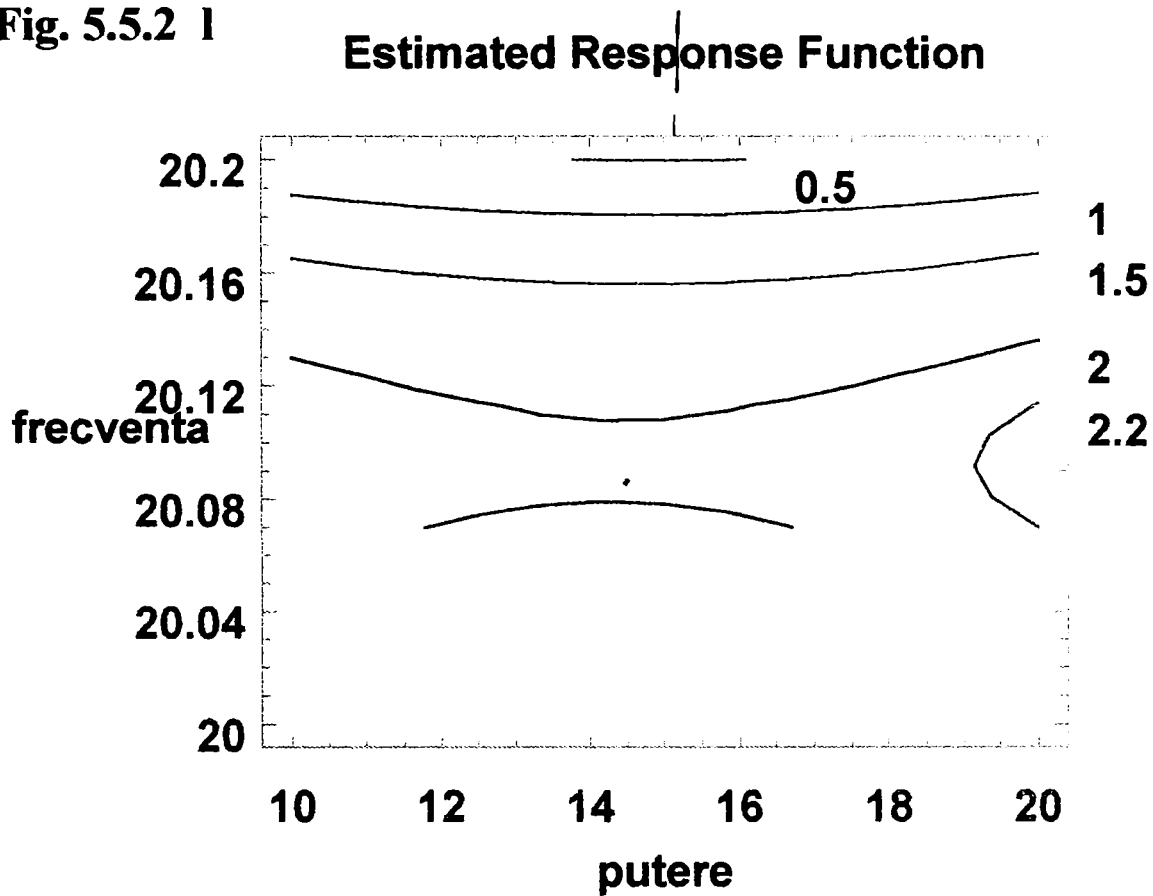


Fig. 5.5.2 1



Procedând analog, vom obține din reprezentările grafice următoare, valorile optime ale parametrilor:

- figura 5.5.2 c $p=2,5\text{daN/cm}^2$ și $f=20,12\text{kHz}$
- figura 5.5.2 d $P=20\text{W}$ și $t=40-60\text{s}$
- figura 5.5.2 e $t=60-80\text{s}$ și $f=20,08\text{kHz}$
- figura 5.5.2 f $P=10-20\text{W}$ și $f=20,08\text{kHz}$

Reprezentările grafice 5.5.2 g-l, confirmă alegerile parametrilor optimi de prelucrare, în final oprindu-ne asupra valorilor optime cel mai des întâlnite în cadrul experimentărilor:

- $P=20\text{W}$;
- $p=2\text{daN/cm}^2$;
- $f=20,1\text{kHz}$;
- $\% = 50\%$;
- $t=40\text{s}$.

Din toți parametrii de influență trebuie precizat că $t=40\text{s}$ reprezintă perioada de retrageri succesive și realimentare cu abraziv.

5.5.3. Influența profilului sculei asupra calității suprafețelor de prelucrat

S-a executat un set de experimentări pentru a urmări efectul configurației sculei asupra calității suprafeței prelucrate.

În această idee s-au confecționat scule tubulare cu teșiri exterioare de 30° , 45° , 60° conform fig. 5.5.3.1.

În urma prelucrării cu acestea s-a stabilit faptul că la cele cu teșirea de 60° spărtura la ieșire a fost cea mai mare, ceea ce ne conduce la concluzia că datorită unghiului între suprafața de prelucrare și orizontala planului de rupere fiind perpendicular pe suprafața activă, determină spărturi mai mari. Aceasta ne îndreaptă către ideea că cel mai reusit profil pentru prelucrarea sticlei este cel cu $\alpha = 0^\circ$. Forța nedescompunându-se pe două direcții componenta laterală este aproape inexistentă.

La prelucrarea cu această sculă s-a constatat o sensibilă creștere a productivității, aceasta datorându-se în principal a doi factori:

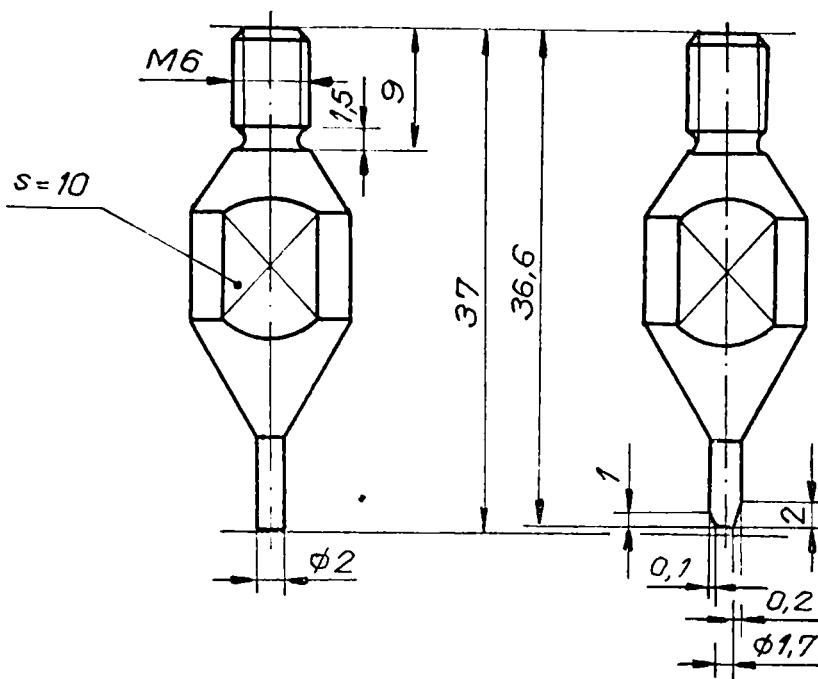
- circulația mult mai bună a suspensiei abrazive datorată unei evacuări facile în interstițiului dintre sculă și suprafața prelucrată, de deasupra bordurii;
- micșorarea frecării între sculă și pereții laterali la adâncimi mari prin micșorarea suprafeței de frecare, la dimensiunea bordurii practicate sculei.

Aceste două elemente necesită studii laborioase și amănunțite în viitor, cu scopul modelării matematice a influențelor lor.

Odată cu uzura sculei, în procesul de prelucrare, se înregistrează spărturi mai mari, ceea ce justifică concluzia anterioară.

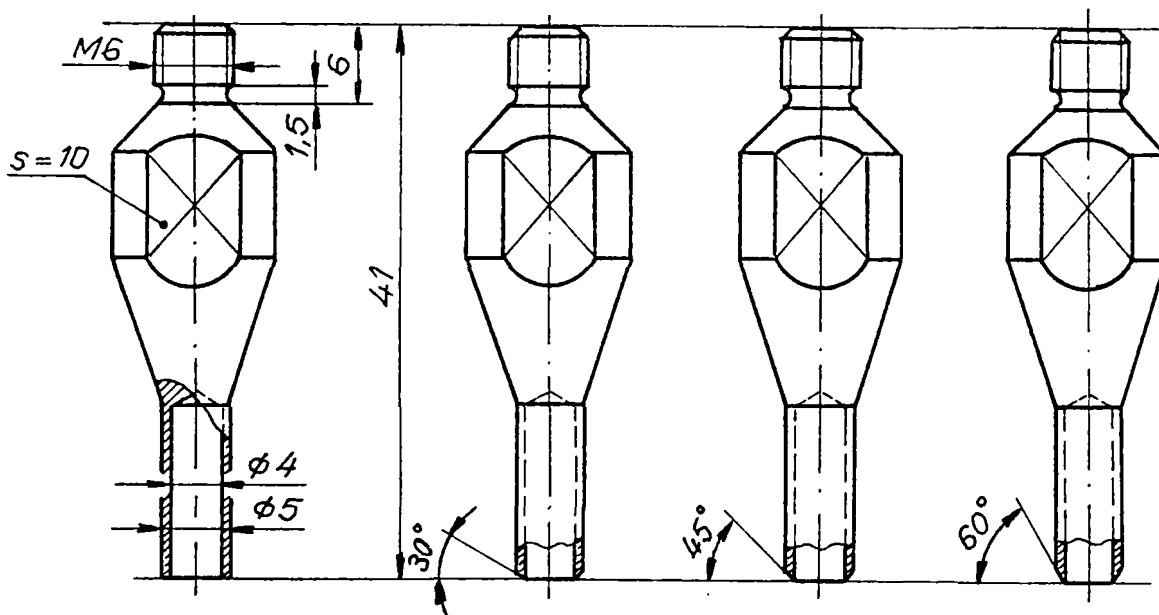
SCULA LA INCEPUTUL
PRELUCRARIII

SCULA DUPA 50 DE
PRELUCRARI LA $H_{med}=2\text{mm}$



SCULA LA INCEPUTUL
PRELUCRARIII

SCULELE DE CAROTARE
INAINTE DE PRELUCRARE



SCULA DUPA 50 DE
PRELUCRARI LA $H_{med}=2.5\text{mm}$

SCULELE DE CAROTARE
DUPA 50 DE PRELUCRARI LA $H_{med}=2.5\text{mm}$

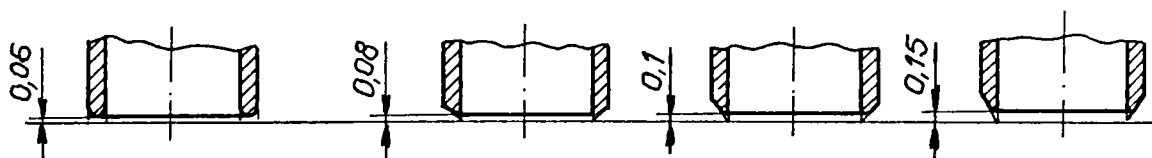


Fig.5.5.3.1 Sculele utilizate

5.6. Valorile rezultate în urma prelucrărilor lentilelor de safir

$P = 30W$
 $P_{ap} = 2daN/cm^2$
 $f = 20,1kHz$
 $\%_{abr} = 50\%$

$h=f(t)$

Nr. Crt.	Timp [s]	Adânc. [mm]
1.	20	0,15
2.	20	0,20
3.	20	0,10
4.	20	0,15
5.	40	0,30
6.	40	0,45
7.	40	0,40
8.	40	0,45
9.	60	0,50
10.	60	0,55
11.	60	0,65
12.	60	0,60
13.	80	0,80
14.	80	0,85
15.	80	0,75
16.	80	0,85
17.	100	0,95
18.	100	1,00
19.	100	0,90
20.	100	0,95
21.	120	1,10
22.	120	1,05
23.	120	1,00
24.	120	1,05
25.	140	1,15
26.	140	1,10
27.	140	1,10
28.	140	1,10

$P = 30W$
 $f = 20,1kHz$
 $t = 120s$
 $\%_{abr} = 50\%$

$h=f(p_{ap})$

Nr. crt.	P_{ap} [dan/cm ²]	Adânc. [mm]
1.	1,00	0,40
2.	1,00	0,35
3.	1,00	0,40
4.	1,00	0,30
5.	1,50	0,90
6.	1,50	0,85
7.	1,50	1,85
8.	1,50	1,80
9.	2,00	1,05
10.	2,00	1,10
11.	2,00	1,15
12.	2,00	1,05
13.	2,50	1,15
14.	2,50	1,20
15.	2,50	1,25
16.	2,50	1,20
17.	3,00	1,25
18.	3,00	1,30
19.	3,00	1,35
20.	3,00	1,35
21.	3,05	1,10
22.	3,05	1,25
23.	3,05	1,20
24.	3,05	1,20
25.	4,00	1,05
26.	4,00	1,10
27.	4,00	1,15
28.	4,00	1,15
29.	4,50	1,10
30.	4,50	1,05
31.	4,50	1,15
32.	4,50	1,10

$P = 30W$
 $P_{ap} = 3daN/cm^2$
 $t = 120s$
 $\%_{abr} = 50\%$

$h=f(f)$

Nr. crt.	F [kHz]	Adânc. [mm]
1.	20,07	0,80
2.	20,07	0,75
3.	20,07	0,75
4.	20,07	0,70
5.	20,09	1,05
6.	20,09	1,10
7.	20,09	1,10
8.	20,09	1,15
9.	20,11	1,25
10.	20,11	1,30
11.	20,11	1,30
12.	20,11	1,35
13.	20,14	1,10
14.	20,14	1,20
15.	20,14	1,10
16.	20,14	1,05
17.	20,17	0,85
18.	20,17	0,80
19.	20,17	0,80
20.	20,17	0,85
21.	20,20	0,65
22.	20,20	0,70
23.	20,20	0,75
24.	20,20	0,60

$f=20,1\text{kHz}$
 $p_{ap}=3\text{daN/cm}^2$
 $t=120\text{s}$
 $\%_{abr}=50\%$

$h=f(P)$

Nr.crt.	Putere	Adâncime
1	10,00	0,40
2	10,00	0,50
3	10,00	0,55
4	10,00	0,50
5	15,00	0,80
6	15,00	0,75
7	15,00	0,70
8	15,00	0,80
9	20,00	0,95
10	20,00	0,95
11	20,00	1,05
12	20,00	1,10
13	25,00	1,15
14	25,00	1,15
15	25,00	1,18
16	25,00	1,20
17	30,00	1,25
18	30,00	1,30
19	30,00	1,25
20	30,00	1,35

$f=20,1\text{kHz}$
 $p_{ap}=3\text{daN/cm}^2$
 $t=120\text{s}$
 $\%_{abr}=50\%$

$h=(\%_{abr})$

Nr. crt.	Concentr.	Adâncime
1	20,00	0,90
2	20,00	0,95
3	20,00	0,95
4	20,00	1,00
5	35,00	1,10
6	35,00	1,15
7	35,00	1,10
8	35,00	1,15
9	50,00	1,25
10	50,00	1,30
11	50,00	1,25
12	50,00	1,30
13	70,00	1,20
14	70,00	1,20
15	70,00	1,15
16	70,00	1,15

5.7. Rezultatele experimentale obținute la prelucrarea lentilelor din safir

5.7.1. Studiul influenței variației timpului asupra adâncimii de prelucrare

S-au executat mai multe experimentări pentru a se stabili timpul mediu de străpungere a lentilei de safir (figura 5.7.1.), după care s-a optat varierea timpului până la această valoare de 140 s.

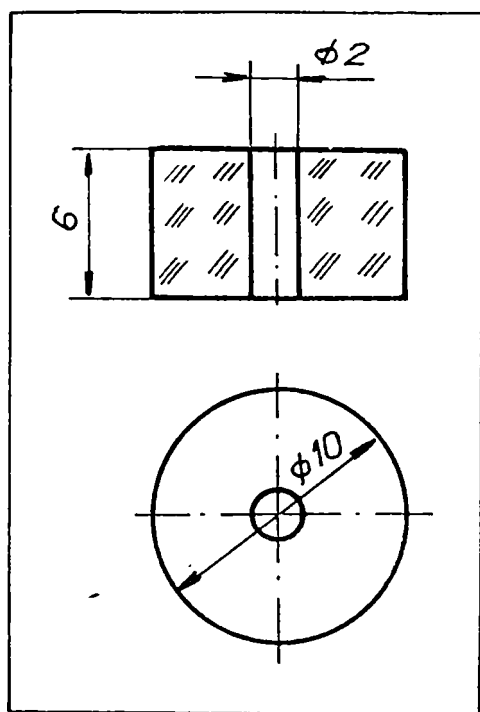


Fig. 5.7.1. Lentila de safir

Analiza de varianță $h = f(t)$ după cum se observă pentru un interval de 95% din valorile experimentului cu factorul F (Fischer) de 211,085.

Comparația cu factorul F (0,25, 6,21) din tabelul de varianță al valorilor minime care este de 1,43, ne conduce la concluzia că se respinge ipoteza nulă. Valoarea mare a diferenței indică o influență substanțială a variantei independente (t), asupra răspunsului (h).

Erorile cuprinse în tabelul următor sunt mici, deci experimentul se desfășoară în limite de precizie foarte bune.

În graficele de variație a adâncimii de prelucrare în funcție de timp 5.7.1 b și c, se reprezintă parametrii din tabelul ANOVA din care rezultă o valoare de balans a fiecărui eșantion (reprezentat prin medie și mediană), în limite foarte bune. Reprezentările fiind compacte rezultă că experimentele au decurs în condiții apropiate, iar rezultatele au un grad de confidență foarte mare.

Valorile reziduale preconizate de program sunt de 0,001. Valorile reziduale obținute în cadrul experimentului au o împrăștiere aleatoare, cerință obligatorie ca experimentul să aibă gradul de confidență propus și pentru a fi concludent.

În cazul de față valorile sunt răspândite în așa fel încât precizia rezultatelor experimentului să se înscrie în condițiile impuse.

Constrastul semnificativ între grupe (față de $\pm 0,07167$ contrast limită, contrastul real este cuprins între valorile -0,012 și -0,550), care denotă atât omogenitatea grupelor investigate cât și concordanța cu analiza ANOVA.

Din constatările de mai sus, utilizând opțiunea analizei de regresie s-a determinat un model liniar, pentru parametrii studiați. Astfel, în figura 5.7.1 e, .

Tab 5.7.1.1

One-Way Analysis of Variance

Data: SAFIR.adt

Level codes: SAFIR.timp

Labels:

Means plot: LSD Confidence level: 95 Range test: LSD

Tab 5.7.1.2

Analysis of variance

Source of variation	Sum of Squares	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig. level
Between groups	3.0908929	6	.5151488	211.085	.0000
Within groups	.0512500	21	.0024405		
Total (corrected)	3.1421429	27			

0 missing value(s) have been excluded.

Tab 5.7.1.3

Table of means for SAFIR.adt by SAFIR.timp

Level	Count	Std. Error Average	Std. Error (internal)	Std. Error (pooled s)	95 % LSD intervals for mean	
20	4	.1500000	.0204124	.0247006	.1136688	.1863312
40	4	.4000000	.0353553	.0247006	.3636688	.4363312
60	4	.5750000	.0322749	.0247006	.5386688	.6113312
80	4	.8125000	.0239357	.0247006	.7761688	.8488312
100	4	.9500000	.0204124	.0247006	.9136688	.9863312
120	4	1.0500000	.0204124	.0247006	1.0136688	1.0863312
140	4	1.1125000	.0125000	.0247006	1.0761688	1.1488312
Total	28	.7214286	.0093359	.0093359	.7076967	.7351605

Fig 5.7.1 a

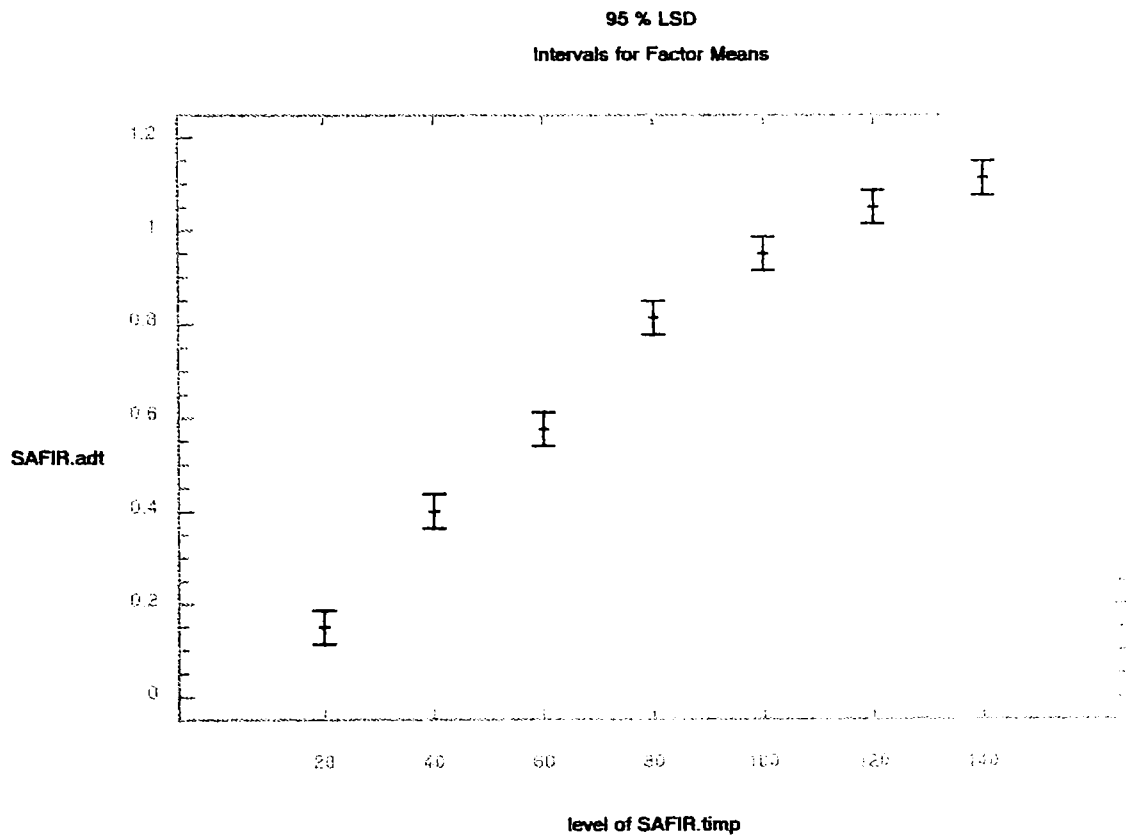


Fig 5.7.1 b

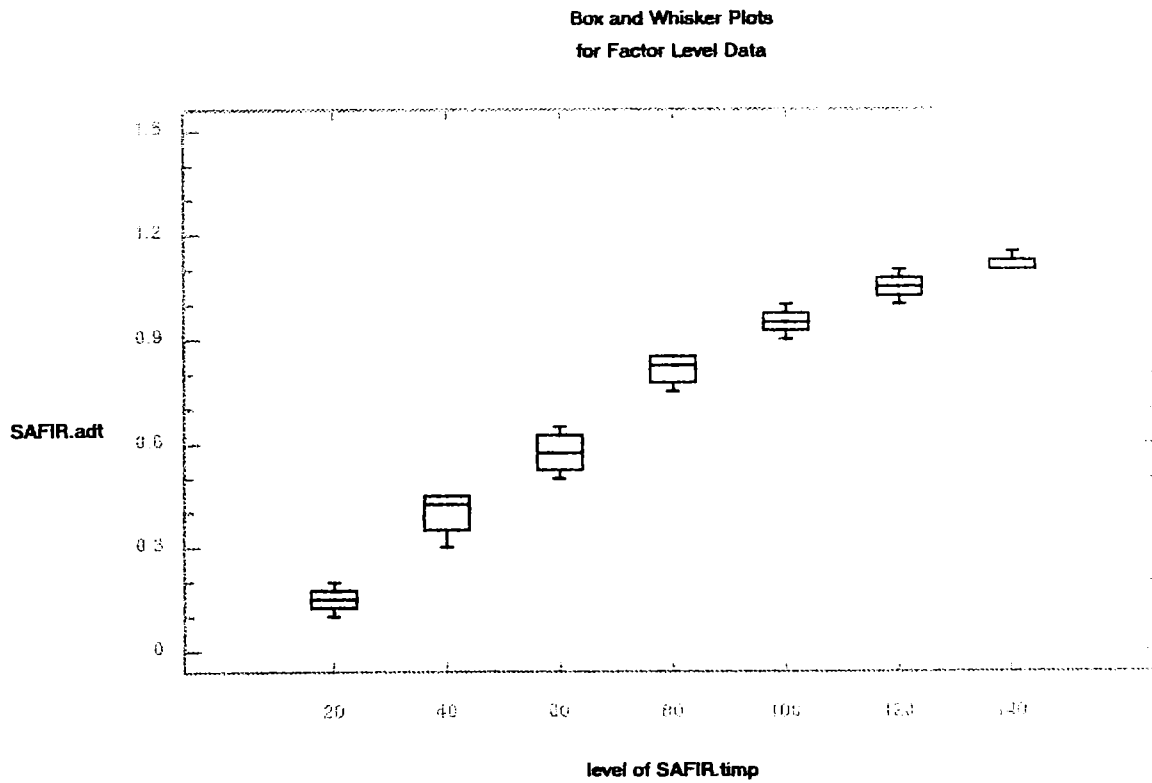


Fig 5.7.1 c

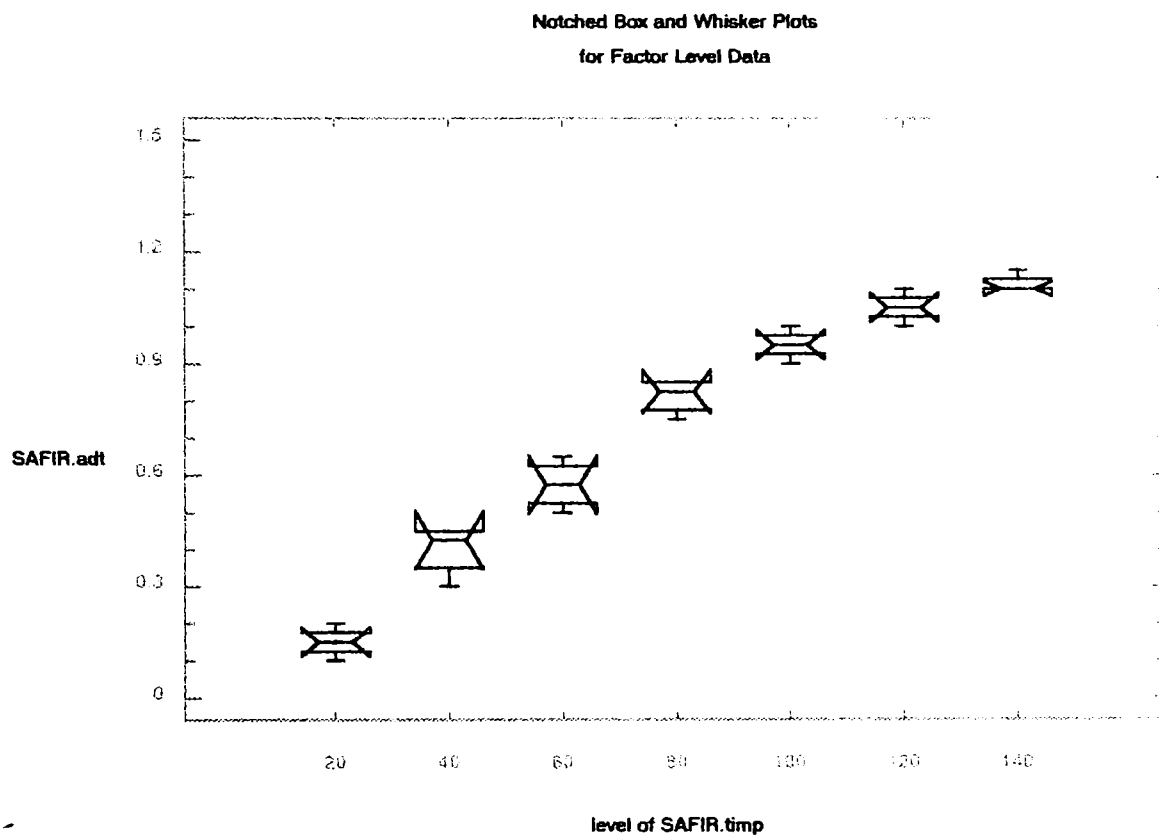
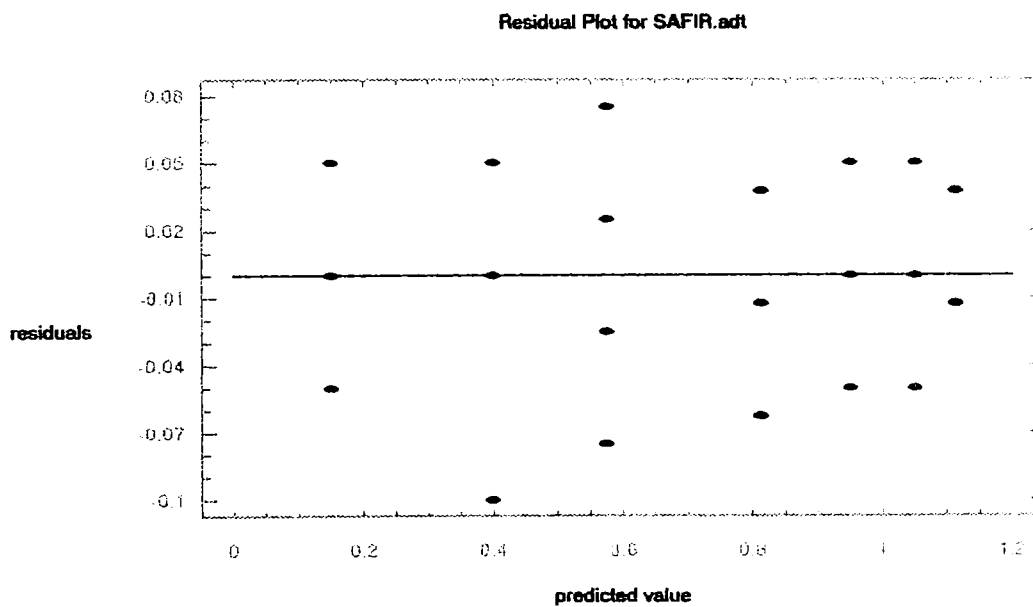


Fig 5.7.1 d



Tab 5.7.1.4

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + bX$

Dependent variable: SAFIR.adt Independent variable: SAFIR.timp

Parameter	Standard Estimate	T Error	Prob. Value	Level
Intercept	0.0696429	0.0340058	2.04797	.05079
Slope	8.14732E-3	3.80196E-4	21.4293	.00000

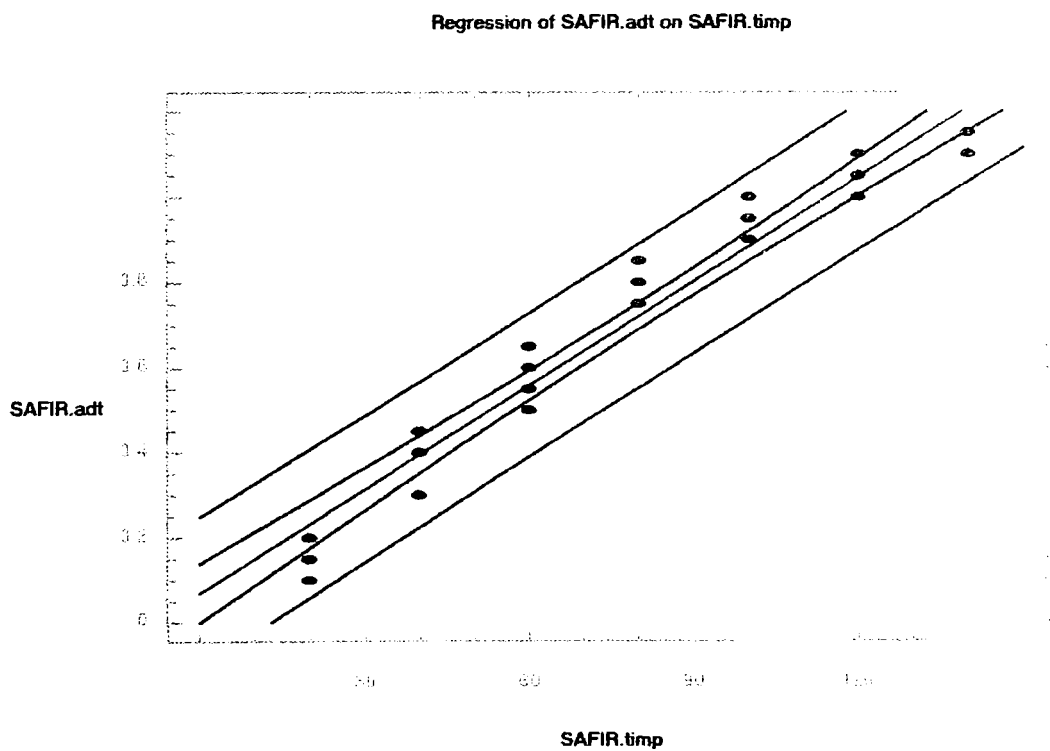
Tab 5.7.1.5

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	2.97377	1	2.97377	459.2138	.00000
Residual	.168371	26	.006476		

Total (Corr.) 3.142143 27
 Correlation Coefficient = 0.972839 R-squared = 94.64 percent
 Std. Error of Est. = 0.0804723

Fig 5.7.1 e



care reprezintă grafic adâncimea de prelucrare în funcție de variabila timp, aceasta se poate materializa printr-o dreaptă, iar valorile variabilei dependente, reprezentate sub formă de puncte.

După cum rezultă din experimentările rezultate, se observă că adâncimea de prelucrare crește considerabil în prima parte a prelucrării până la o valoare de 0.9-1 mm, în 80-100s, după care creșterea este nesemnificativă ceea ce ne conduce la concluzia că în optimizarea procesului tehnologic de prelucrare, trebuie executată prelucrarea numai pe perioada eficientă, fiind necesare retrageri periodice la intervale de 60 s (stabilit experimental) cu reîmprospatarea suspensiei abrazive în zona prelucrării.

Aceasta, deoarece o dată cu creșterea adâncimii de prelucrare, evacuarea materialului prelucrat se face din ce în ce mai greu, concomitent cu erodarea particulelor erozive.

5.7.2. Studiul influenței variației presiunii asupra adâncimii de prelucrare

Pentru a nu mări numărul de încercări nejustificat de mult, s-a ales intervalul presiunilor de 1 - 4 daN/cm², care din experiența anterioară și din literatura de specialitate reprezintă optimul valorii presiunii de prelucrare.

Analiza de varianță a adâncimii de prelucrare în funcție de presiunea contactului sculă-piesă este valabilă pentru un interval de 95% din valorile experimentului. Având factorul Fisher $F = 196,243$ față de $F(0.25,7,24) = 1.40$ ipoteza nulă se respinge. Diferența dintre valorile nominale ale celor doi parametri indică o influență mare a variabilei independente (p) asupra variabilei dependente (h).

Astfel, valorile de balans (Fig. 5.7.2 a) prin dimensiunile reprezentărilor sunt mici, ceea ce concluzionează că experimentul s-a desfășurat în condiții foarte bune.

Pe parcursul varierii presiunii de contact, se observă o omogenitate diferențiată. Neomogenitățile foarte mici, sunt puse în evidență în Fig. 5.7.2 b și Fig. 5.7.2 c prin amplitudinea reprezentărilor. După forma acestor reprezentări rezultă că valorile sunt dispuse compact în ambele părți ale mediei rezultate. Aceasta denotă o stabilitate a răspunsurilor experimentului pe întregul ecart al varierii presiunii de prelucrare.

Variația adâncimii de prelucrare în funcție de presiunea de prelucrare nu poate fi reprezentată printr-un model liniar, decât pe două intervale diferite și anume 1-3daN/cm² și 3-4,5 daN/cm².

În figura de prezentare a valorilor reziduale (Fig. 5.7.2. d) se observă o distribuție aleatoare, ceea ce dă experimentului o bună confidență, cu valoarea prezisă de program, de 0,001.

Tab 5.7.2.1

One-Way Analysis of Variance

Data: SAFIR.adpres

Level codes: SAFIR.presap

Labels:

Means plot: LSD Confidence level: 95 Range test: LSD

Tab 5.7.2.2

Analysis of variance

Source of variation	Sum of Squares	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig. level
Between groups	2.5399219	7	.3628460	196.243	.0000
Within groups	.0443750	24	.0018490		
Total (corrected)	2.5842969	31			

0 missing value(s) have been excluded.

Tab 5.7.2.3

Table of means for SAFIR.adpres by SAFIR.presap

Level	Count	Std. Error Average	Std. Error (internal)	Std. Error (pooled s)	95 % LSD intervals for mean	
1	4	.3625000	.0239357	.0214998	.3311158	.3938842
1.5	4	.8500000	.0204124	.0214998	.8186158	.8813842
2	4	1.0875000	.0239357	.0214998	1.0561158	1.1188842
2.5	4	1.2000000	.0204124	.0214998	1.1686158	1.2313842
3	4	1.3125000	.0239357	.0214998	1.2811158	1.3438842
3.5	4	1.2125000	.0125000	.0214998	1.1811158	1.2438842
4	4	1.1125000	.0239357	.0214998	1.0811158	1.1438842
4.5	4	1.1000000	.0204124	.0214998	1.0686158	1.1313842
Total	32	1.0296875	.0076013	.0076013	1.0185915	1.0407835

Fig 5.7.2 a

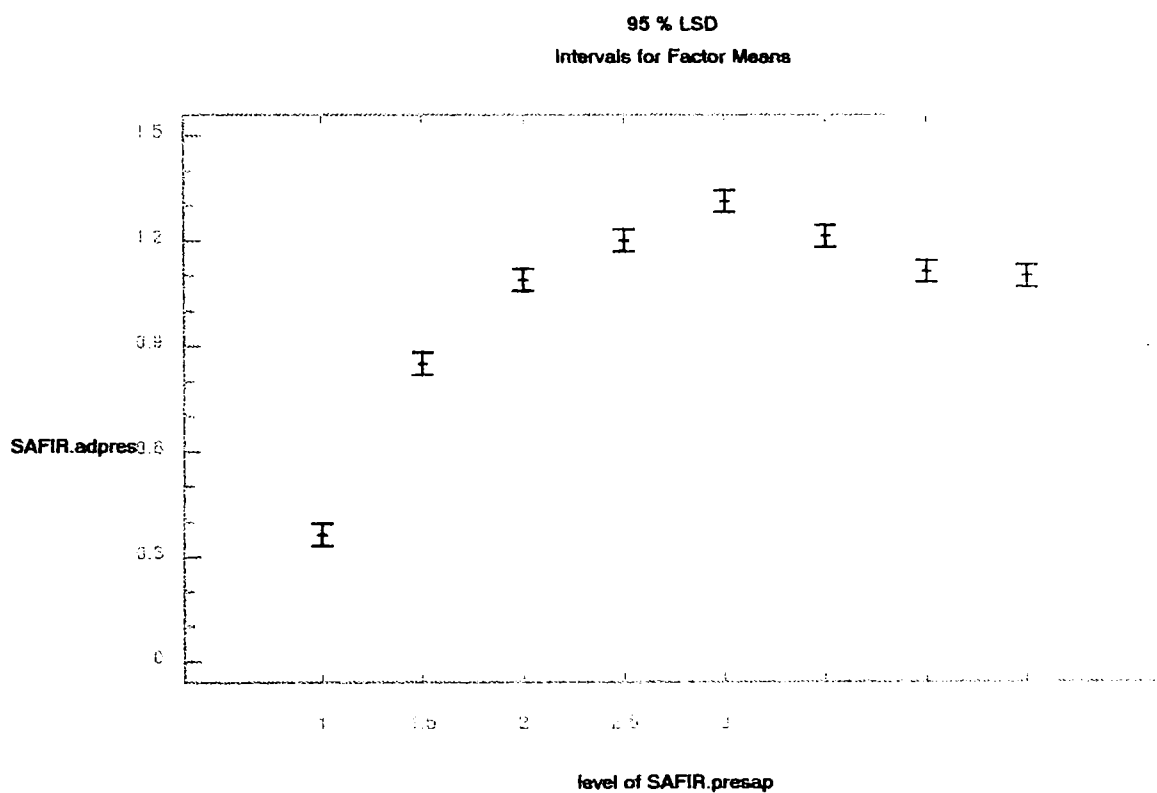


Fig 5.7.2 b

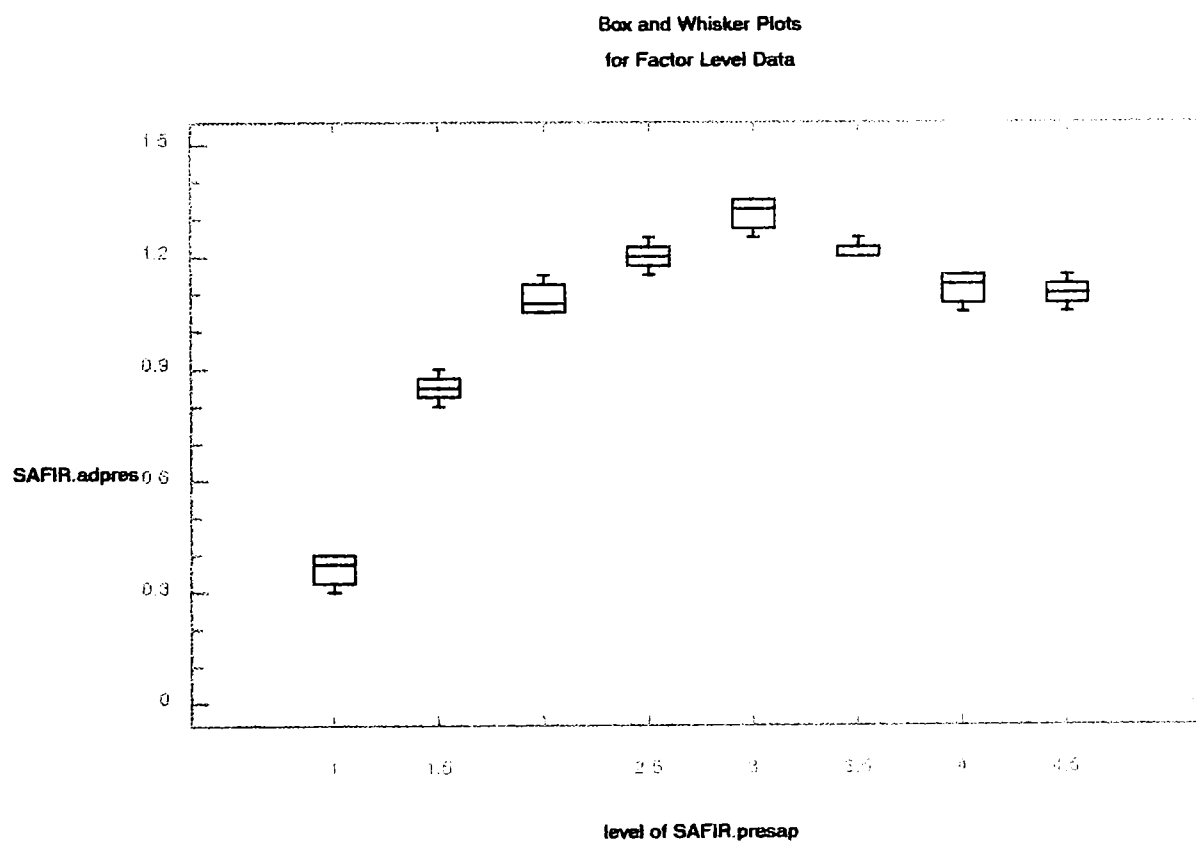


Fig 5.7.2 c

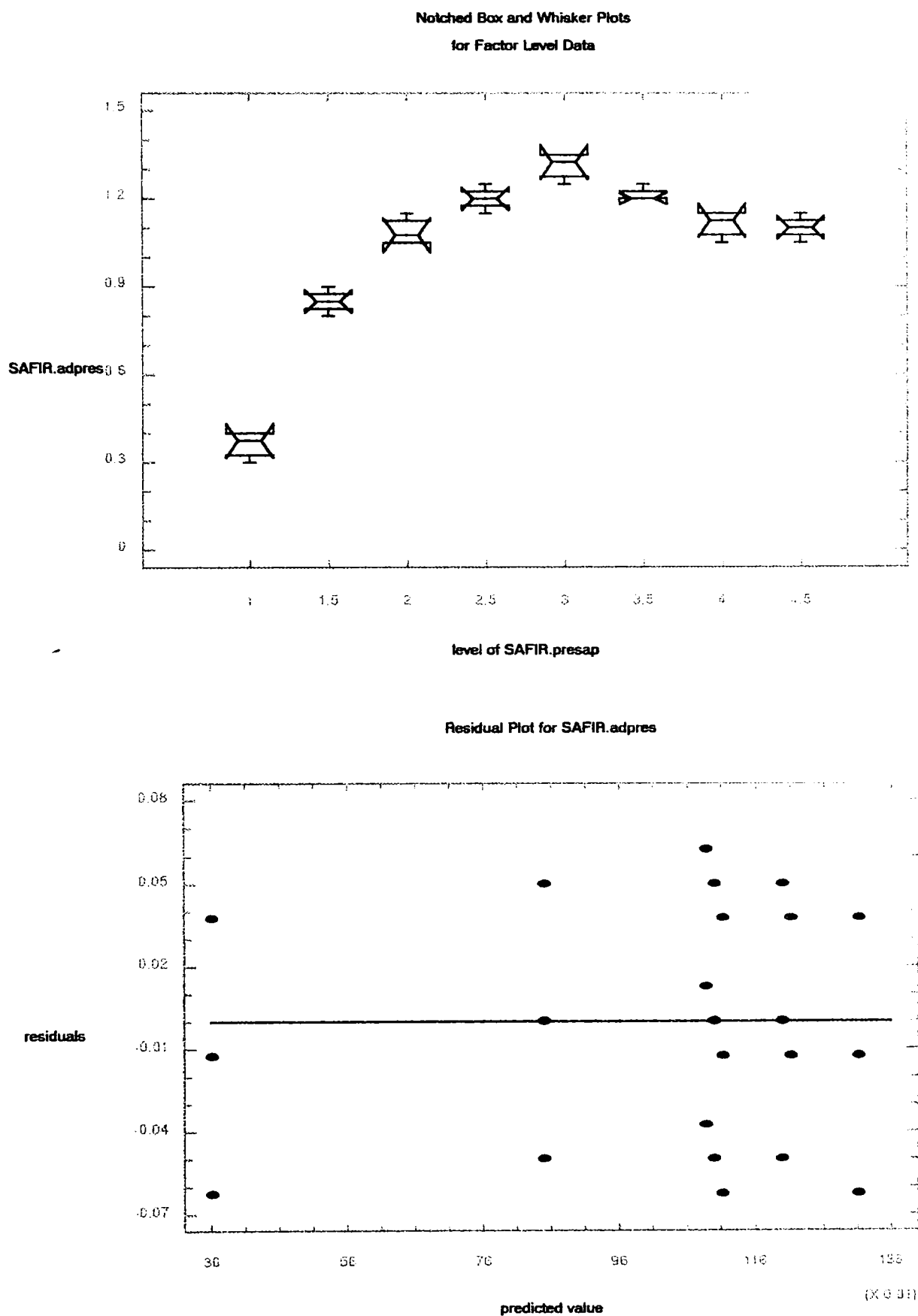


Fig 5.7.2 d

Tab 5.7.2.4

Multiple range analysis for SAFIR.adpres by SAFIR.presap

Method: 95 Percent LSD

Level Count Average Homogeneous Groups

1	4	.3625000	X
1.5	4	.8500000	X
2	4	1.0875000	X
4.5	4	1.1000000	X
4	4	1.1125000	X
2.5	4	1.2000000	X
3.5	4	1.2125000	X
3	4	1.3125000	X

contrast	difference	+/-	limits
1 - 1.5	-0.48750	0.06277	*
1 - 2	-0.72500	0.06277	*
1 - 2.5	-0.83750	0.06277	*
1 - 3	-0.95000	0.06277	*
1 - 3.5	-0.85000	0.06277	*

* denotes a statistically significant difference.

Tab 5.7.2.5

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + bX$

Dependent variable: SAFIR.adpres Independent variable: SAFIR.presap

Parameter	Standard Estimate	Error	T	Prob. Value	Level
Intercept	0.57381	0.100365	5.71724	.00000	
Slope	0.165774	0.0336897	4.9206	.00003	

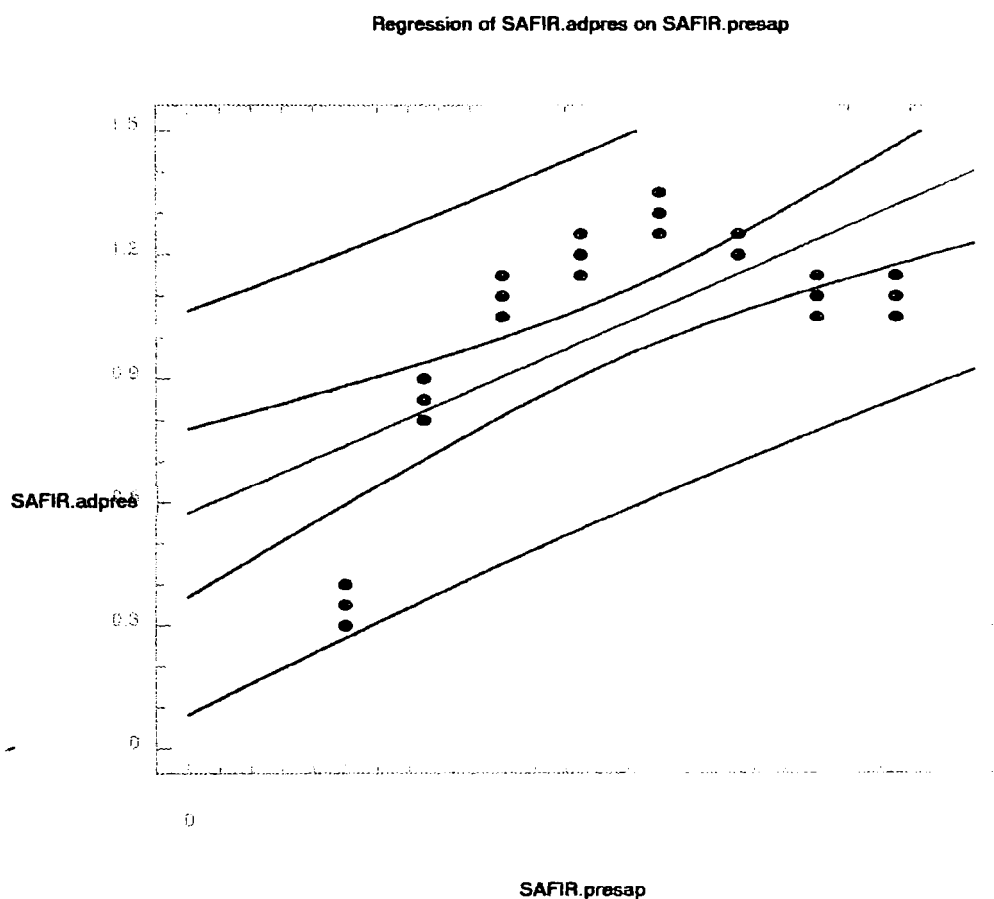
Tab 5.7.2.6

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	1.154200	1	1.154200	24.21235	.00003
Residual	1.430097	30	.047670		

Total (Corr.) 2.584297 31
 Correlation Coefficient = 0.668297 R-squared = 44.66 percent
 Std. Error of Est. = 0.218334

Fig 5.7.2 e



Tab 5.7.3.1

One-Way Analysis of Variance

Data: SAFIR.adfrecv

Level codes: SAFIR.frecv

Labels:

Means plot: LSD

Confidence level: 95

Range test: LSD

Se observă și din tabelul 5.7.2.3., faptul că erorile cele mai mari se întâlnesc la $p=3$ daN/cm² de 1,3125 și la $p=3,5$ daN/cm², de 1,2125 iar omogenitățile se remarcă la $p=1$ daN/cm² și 1,5 daN/cm².

De asemenea în tabelul 5.7.2.4. se observă față de contrastul limită admis de $\pm 0,06277$ contrastul între grupe este semnificativ, de la -0,4875 la -0,9500, deci în acord cu analiza ANOVA. În același tabel se observă că grupele de eșantioane sunt omogene pe întregul interval de experimentare.

Rezultatele experimentale, comportă discuții pe cele două laturi ale intervalului. Astfel, la forțe de apăsare mici nu există presiunea necesară antrenării abrazivului pentru o prelucrare eficientă, iar la forțe de apăsare mari, circulația abrazivului aflată în suspensie în zona de lucru, se face foarte greu, acesta îngreunând prelucrarea materialelor.

Din analiza rezultatelor experimentale, pentru prelucrarea lentilelor de safir vom alege presiunea de 3 daN/cm², ceea ce reprezintă o valoare mai mare decât cea necesară prelucrării sticlei optice.

5.7.3. Studiul influenței variației frecvenței asupra adâncimii de prelucrare

Analiza de varianță a adâncimii de prelucrare în funcție de variația frecvenței se execută pe un interval de 95% din valorile experimentului care se încadrează în valorile experimentale ale programului, cu $F = 103.854$ față de $F(0.25, 5, 18) = 1.46$, ipoteza nulă fiind respinsă.

Diferența mare dintre valorile absolute ale factorilor F real și minim admis - conduc la ideea ca această variabilă independentă (f) are o influență mare asupra răspunsului sistemului (h).

Din reprezentarea grafic 5.7.3 a, rezultată în urma prelucrării datelor, rezultă faptul că balansul valorilor nu este prea mare, acesta menținându-se același pe întregul domeniu al experimentului.

Față de condițiile inițiale propuse pentru a le satisface pe parcursul experimentului, de a varia frecvența de la 19,5 la 21 KHz pe instalația utilizată în cadrul laboratorului, nu s-au putut realiza experimente decât în limitele 20,07 - 20,2 KHz. În afara acestui ecart instalația nu a reușit să asigure un regim de prelucrare.

Se observă că variația parametrului dependent nu poate fi asimilată unui model liniar decât pe două intervale, între 20,07 - 20,13 KHz și 20,15 - 20,2 KHz.

Răspândirile valorilor obținute în jurul valorilor medii, așa după cum se observă din figurile 5.7.3 b și c, nu sunt prea mari, ceea ce denotă că încercările au fost executate îngrijit și erorile datorate cauzelor aleatoare au fost limitate.

Tab 5.7.3.2

Multiple range analysis for SAFIR.adfrecv by SAFIR.frecv

Method: 95 Percent LSD

Level Count Average Homogeneous Groups

20.2	4	.6750000	X
20.07	4	.7500000	X
20.17	4	.8250000	X
20.09	4	1.1000000	X
20.14	4	1.1125000	X
20.11	4	1.3000000	X

contrast	difference +/-	limits
20.07 - 20.09	-0.35000	0.07167 *
20.07 - 20.11	-0.55000	0.07167 *
20.07 - 20.14	-0.36250	0.07167 *
20.07 - 20.17	-0.07500	0.07167 *
20.07 - 20.2	0.07500	0.07167 *
20.09 - 20.11	-0.20000	0.07167 *
20.09 - 20.14	-0.01250	0.07167

* denotes a statistically significant difference.

Tab 5.7.3.3

Analysis of variance

Source of variation	Sum of Squares	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig. level
Between groups	1.2080208	5	.2416042	103.854	.0000
Within groups	.0418750	18	.0023264		
Total (corrected)	1.2498958	23			

Tab 5.7.3.4

Table of means for SAFIR.adfrecv by SAFIR.frecv

Level	Count	Average	Std. Error (internal)	Std. Error (pooled s)	95 % LSD intervals for mean
20.07	4	.7500000	.0204124	.0241163	.7141646 .7858354
20.09	4	1.1000000	.0204124	.0241163	1.0641646 1.1358354
20.11	4	1.3000000	.0204124	.0241163	1.2641646 1.3358354
20.14	4	1.1125000	.0314576	.0241163	1.0766646 1.1483354
20.17	4	.8250000	.0144338	.0241163	.7891646 .8608354
20.2	4	.6750000	.0322749	.0241163	.6391646 .7108354
Total	24	.9604167	.0098454	.0098454	.9457869 .9750464

Fig 5.7.3 a

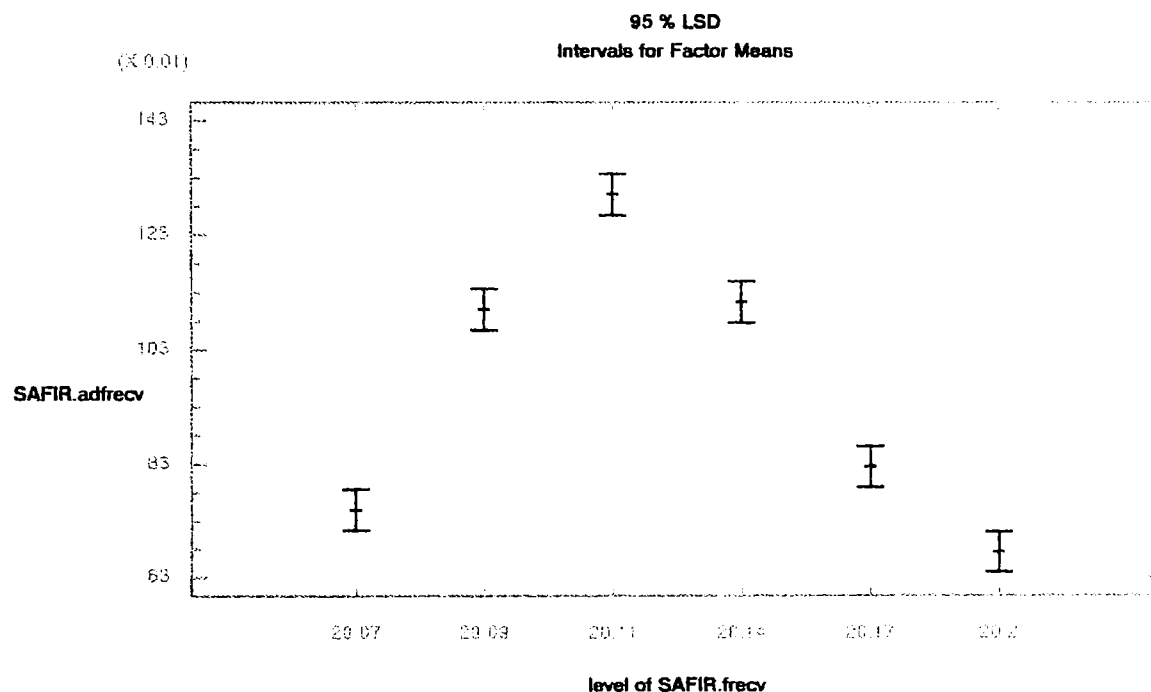


Fig 5.7.3 b

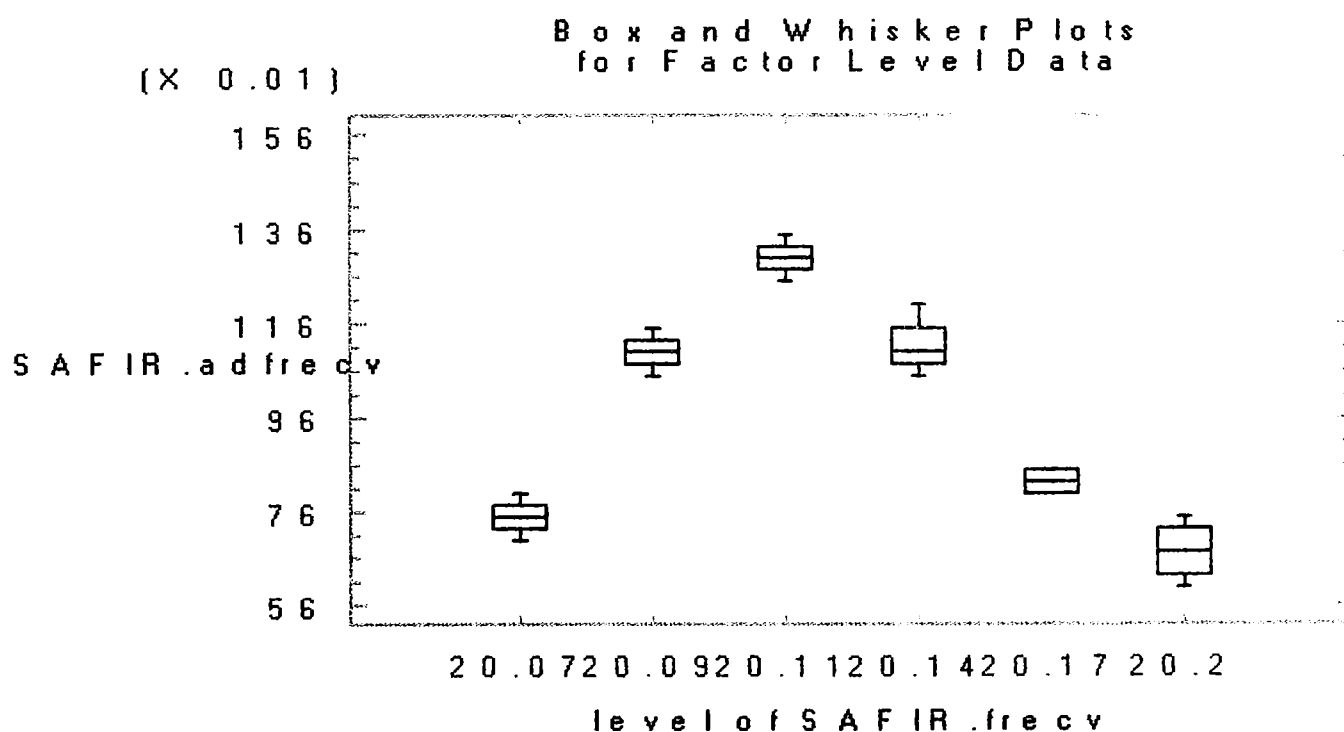


Fig 5.7.3 c

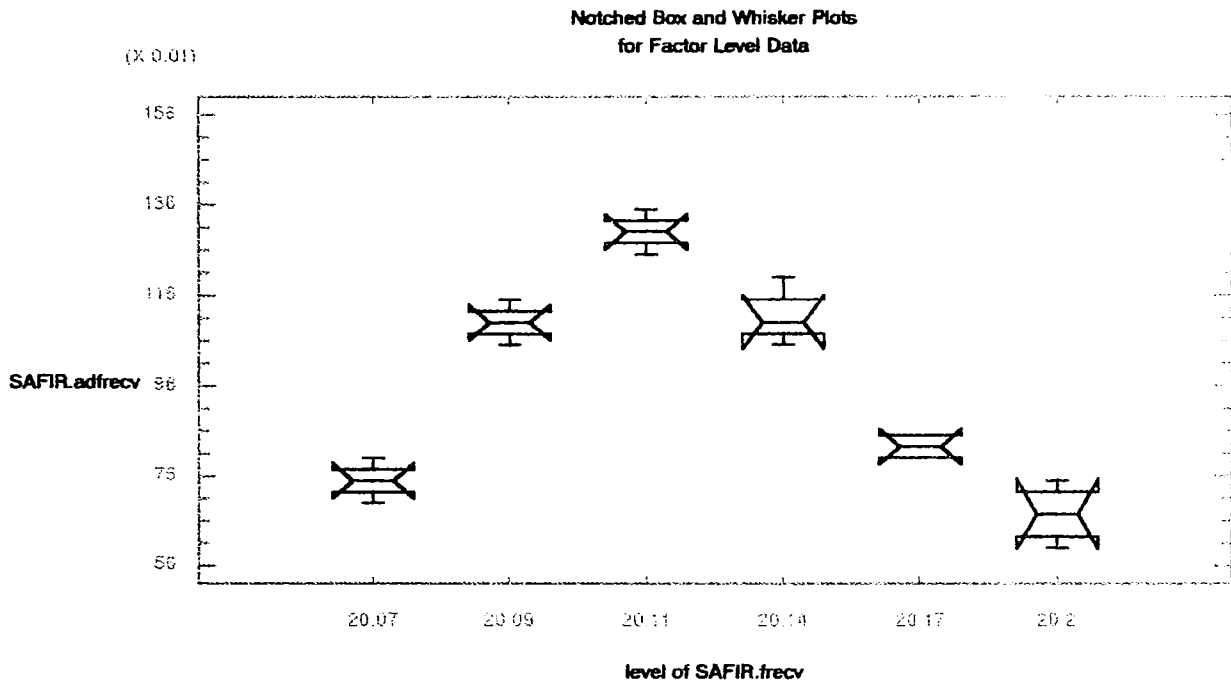
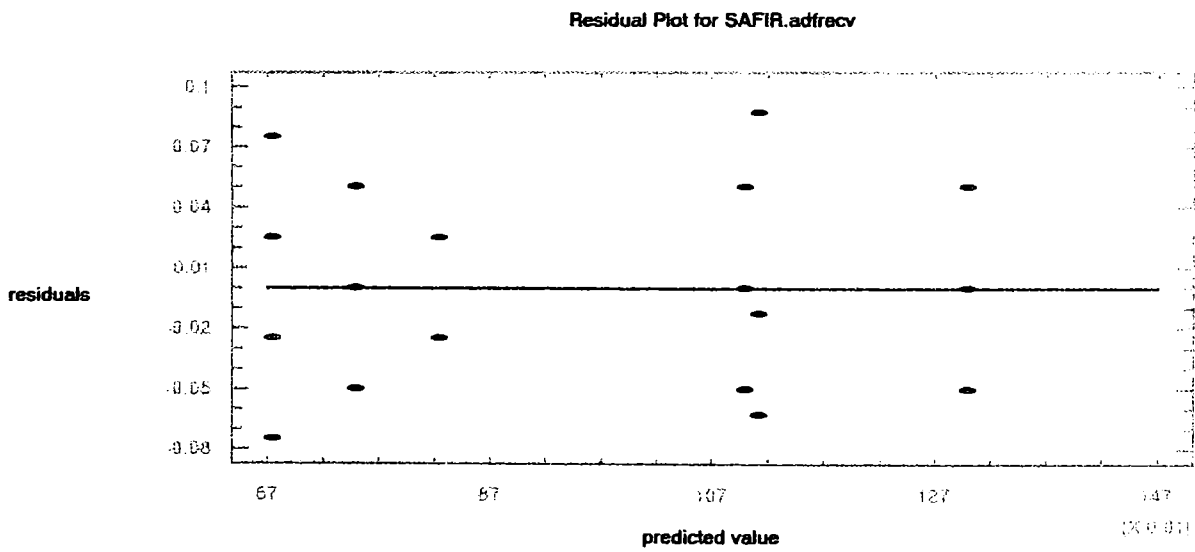


Fig 5.7.3 d



Tab 5.7.3.5

Multiple range analysis for SAFIR.adfrecv by SAFIR.frecv

Method: 95 Percent LSD

Level Count Average Homogeneous Groups

20.2	4	.6750000	X
20.07	4	.7500000	X
20.17	4	.8250000	X
20.09	4	1.1000000	X
20.14	4	1.1125000	X
20.11	4	1.3000000	X

contrast	difference	+/- limits
20.07 - 20.09	-0.35000	0.07167 *
20.07 - 20.11	-0.55000	0.07167 *
20.07 - 20.14	-0.36250	0.07167 *
20.07 - 20.17	-0.07500	0.07167 *
20.07 - 20.2	0.07500	0.07167 *
20.09 - 20.11	-0.20000	0.07167 *
20.09 - 20.14	-0.01250	0.07167

* denotes a statistically significant difference.

Tab 5.7.3.6

Regression Analysis - Linear model: Y = a+bX

Dependent variable: SAFIR.adfrecv

Independent variable: SAFIR.frecv

Parameter	Standard Estimate	Error	T	Prob. Value	Level
Intercept	39.9417	20.0671	1.9904	.05911	
Slope	-1.93648	0.996874	-1.94255	.06498	

Tab 5.7.3.7

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	.1829969	1	.1829969	3.773490	.06498
Residual	1.066899	22	.048495		

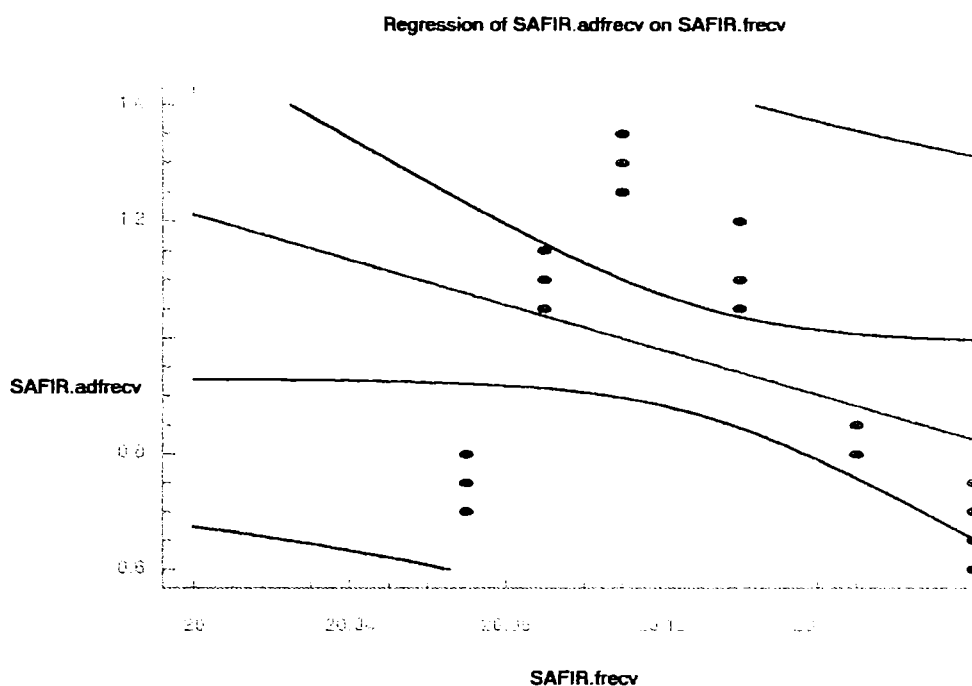
Total (Corr.) 1.249896 23

Correlation Coefficient = -0.382635

R-squared = 14.64 percent

Std. Error of Est. = 0.220217

Fig 5.7.3 e



Tab 5.7.4.1

One-Way Analysis of Variance

Data: SAFIR.adput

Level codes: SAFIR.putere

Labels:

Means plot: LSD

Confidence level: 95

Range test: LSD

Tab 5.7.4.2

Analysis of variance

Source of variation	Sum of Squares	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig. level
Between groups	1.6603800	4	.4150950	140.551	.0000
Within groups	.0443000	15	.0029533		
Total (corrected)	1.7046800	19			

0 missing value(s) have been excluded.

Valorile reziduale, ilustrate grafic în figura 5.7.3 d, dau confidența necesară a testului, valoarea prezisă de program a rezidurilor fiind de 0,001.

Din tabelele finalului experimentului se observă înaltul grad de omogenitate al grupelor, precum și contrastul dintre grupe fiind semnificativ, față de minimul admis de $\pm 0,07167$, în realitate având valori de la -0,075 la -0,5500.

Din experiențe s-a concluzionat faptul că frecvența se poate varia într-un interval foarte mic, în funcție de toate caracteristicile sistemului (generatorului de ultrasunete, transductorului, conexiunii concentrator-transductor, concentratorului, conexiunii concentrator-sculă și sculei).

Alegerea frecvenței optime trebuie făcută foarte atent și respectată cu strictețe în procesul de prelucrare.

Variația adâncimii de prelucrare în funcție de frecvența utilizată nu se poate modela matematic liniar, decât pe două intervale și anume 20,07-20,11kHz și 20,11-20,20kHz.

Din valorile rezultate în cadrul experimentului, frecvența optimă în prelucrarea lentilelor de safir este de 20,1 kHz.

5.7.4. Studiul influenței variației puterii asupra adâncimii de prelucrare

Datorita faptului că s-a luat măsura de a studia influența puterii sistemului oscilant asupra adâncimii de prelucrare, în condițiile în care sunt menținute constante $f_0 = 20,1$ KHz, $p = 3$ daN/cm² și $t = 120$ s, ținând cont de corelația puterii cu amplitudinea oscilației, vom studia influența variației puterii asupra adâncimii de prelucrat.

După executarea experimentelor, rezultatele au fost introduse în programul ANOVA, în vederea prelucrării și interpretării lor. Astfel, se observa că analiza se face pentru un interval de 95% din valorile experimentului care se încadrează în valorile estimate ale programului, cu $F = 140,551$ față de $F(0,25, 4,15) = 1,51$ ipoteza nulă fiind infirmată.

Față de puterea înscrisă în documentația de exploatare a generatorului de oscilații, în practică convertorul ultrasonic nu poate genera decât 30 W. Această limită maximă este impusă de imposibilitatea acordului necesar (putere-frecvență la exigențele de calitate cerute) pentru executarea prelucrării.

Limita inferioară de variație a puterii a fost stabilită la valoarea de 10W deoarece sub aceasta prelucrarea este practic imposibilă (cunoscută fiind relația dintre putere și amplitudine, ultima nefiind suficientă prelucrării).

Influența mare a variabilei independente „P”, față de răspuns „h” este pusă în evidență de diferența foarte mare dintre valorile reale și minim acceptate ale factorului Fisher.

Tab 5.7.4.3

Table of means for SAFIR.adput by SAFIR.putere

Level	Count	Stnd. Error Average	Stnd. Error (internal)	Stnd. Error (pooled s)	95 % LSD intervals for mean	
10	4	.4875000	.0314576	.0271723	.4465367	.5284633
15	4	.7625000	.0239357	.0271723	.7215367	.8034633
20	4	1.0125000	.0375000	.0271723	.9715367	1.0534633
25	4	1.1700000	.0122474	.0271723	1.1290367	1.2109633
30	4	1.2875000	.0239357	.0271723	1.2465367	1.3284633
Total	20	.9440000	.0121518	.0121518	.9256807	.9623193

Fig 5.7.4 a

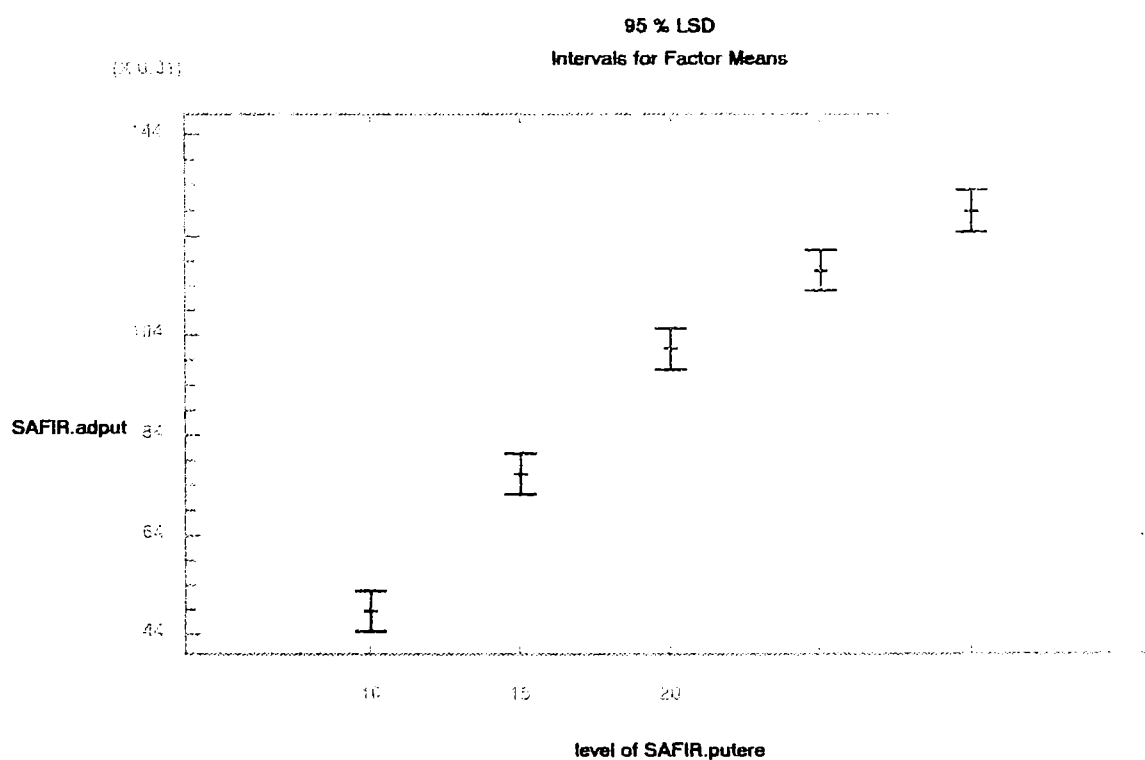


Fig 5.7.4 b

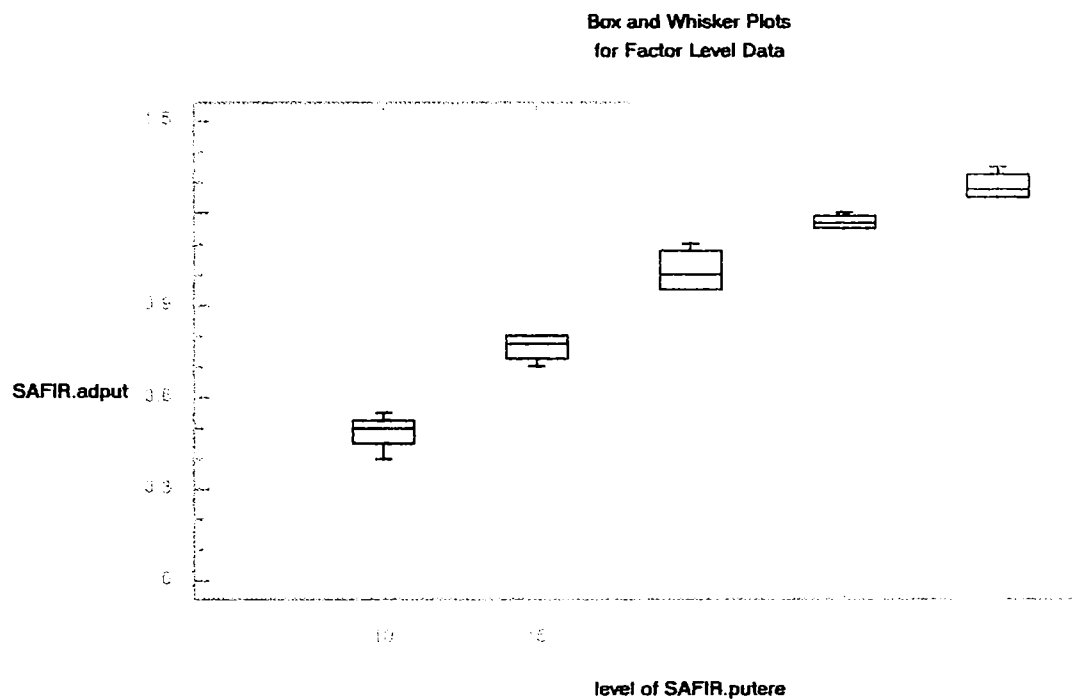


Fig 5.7.4 c

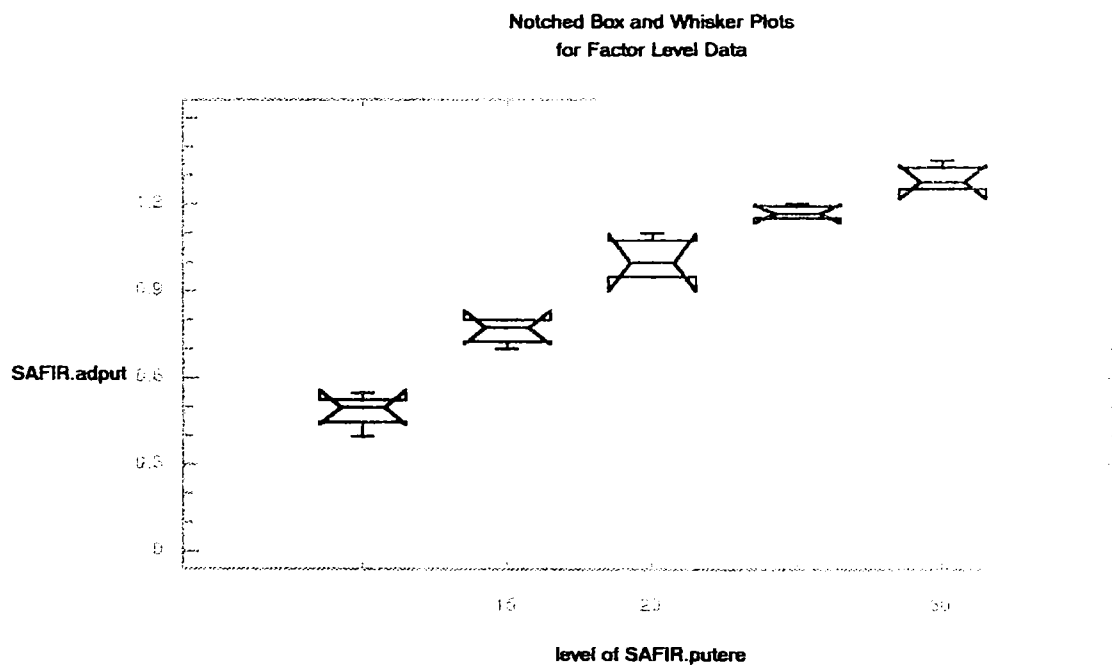
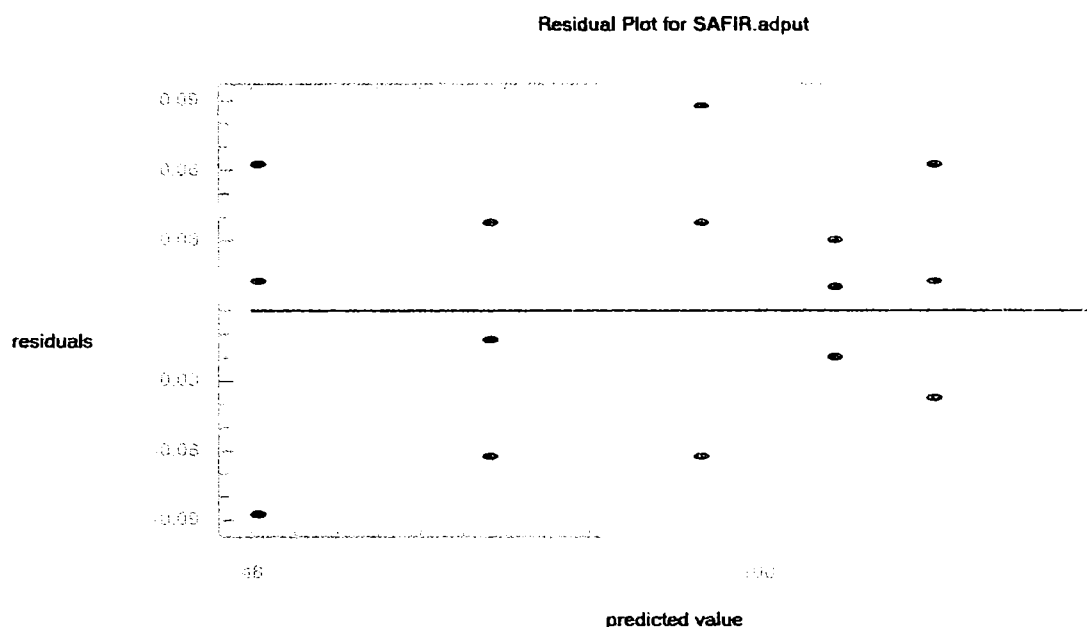


Fig 5.7.4 d



Tab 5.7.4.4

Multiple range analysis for SAFIR.adput by SAFIR.putere

Method: 95 Percent LSD

Level Count Average Homogeneous Groups

Level	Count	Average	Homogeneous Groups
10	4	.4875000	X
15	4	.7625000	X
20	4	1.0125000	X
25	4	1.1700000	X
30	4	1.2875000	X

contrast	difference	+/- limits
10 - 15	-0.27500	0.08193 *
10 - 20	-0.52500	0.08193 *
10 - 25	-0.68250	0.08193 *
10 - 30	-0.80000	0.08193 *
15 - 20	-0.25000	0.08193 *
15 - 25	-0.40750	0.08193 *
15 - 30	-0.52500	0.08193 *
20 - 25	-0.15750	0.08193 *

* denotes a statistically significant difference.

Tab 5.7.4.5

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + bX$

Dependent variable: SAFIR.adput Independent variable: SAFIR.putere

Parameter	Standard Estimate	T Error	Prob. Value	Level
Intercept	0.141	0.0481294	2.9296	.00895
Slope	0.04015	2.26884E-3	17.6963	.00000

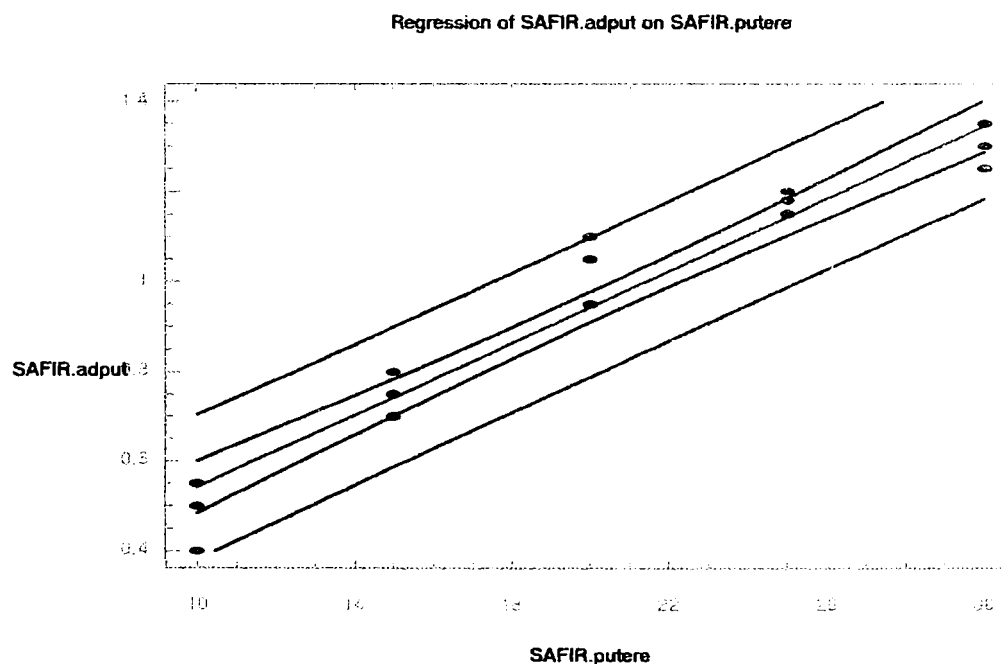
Tab 5.7.4.6

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	1.61202	1	1.61202	313.1577	.00000
Residual	.092658	18	.005148		

Total (Corr.) 1.704680 19
 Correlation Coefficient = 0.972443 R-squared = 94.56 percent
 Std. Error of Est. = 0.071747

Fig 5.7.4 e



Din graficele rezultate din analiza ANOVA concluzionăm că se poate adopta pentru răspuns (h) un model liniar cu o pantă ascendentă, conform figurii 5.7.4 d, pe întregul interval de variație al puterii.

Valoarea de balans a fiecărui eșantion, precum și dispersia valorilor în cadrul fiecărui eșantion sunt mici, așa după cum se poate observa în graficele 5.7.4 a, b, și c, mai ales la 25 W.

De asemenea, valorile experimentului sunt aproape de valoarea medie rezultată și dispuse simetric, de o parte și de alta a acesteia.

Dispersia valorilor din ecartul amintit fiind foarte redusă, se concluzionează că procesul de prelucrare în acest interval are o stabilitate foarte mare.

Valorile reziduale sunt dispersate aleator, ceea ce dă experimentului o confidență corespunzătoare, valoarea prezisă de program fiind 0.

În concluzie puterea optimă de prelucrare a lentilelor de safir este de 30 W pentru sistemul avut la dispoziție.

Omogenitatea grupelor este bună iar contrastele dintre grupele de eșantioane este peste valoarea minimă admisă, de $\pm 0,8193$ (de la -0.1575 la -0,800), ceea ce dă un grad mare de credibilitate experimentului și rezultatelor acestuia.

5.7.5. Studiul influenței variației concentrației suspensiei abrazive asupra adâncimii de prelucrare

După cum s-a observat și din experimentele anterioare, o foarte mare influență asupra prelucrabilității materialelor cu această tehnologie, o reprezintă prezența în zona de lucru a abrazivului.

În experimentul de față ne propunem să studiem influența concentrației volumice a abrazivului într-un mediu lichid asupra adâncimii de prelucrare.

Într-un vas gradat se toarnă apă - lichidul purtător ales, peste care se toarnă abraziv, astfel încât proporția volumică să se obțină prin creșterea nivelului apei la nivelul corespunzător. Se agită foarte bine, ca amestecul să aibă o componentă cât mai omogenă și prin mijloacele cunoscute se alimentează zona de prelucrare.

Procesul menține constanți ceilalți parametri de lucru: putere, frecvență, presiune de contact, timp de prelucrare stabilizate la valorile optime $p = 30 \text{ W}$, $f = 20,1 \text{ kHz}$, $p = 3 \text{ daN/cm}^2$, $t = 120 \text{ s}$.

Cu rezultatele obținute, introduse în programul ANOVA se prezintă analiza răspunsurilor acestuia.

Analiza de variantă se face pentru 95% din valorile experimentului care se încadrează în valorile estimate ale programului, cu valoarea factorului $F = 71,00$ mare față de minimul admis de $F(0.25,3,12) = 1,56$.

Tab 5.7.5.1

One-Way Analysis of Variance

Data: SAFIR.adcon

Level codes: SAFIR.concntr

Labels:

Means plot: LSD Confidence level: 95 Range test: LSD

Tab 5.7.5.2

Analysis of variance

Source of variation	Sum of Squares	d.f.	Mean square	F-ratio	Sig. level
Between groups	.2218750	3	.0739583	71.000	.0000
Within groups	.0125000	12	.0010417		
Total (corrected)	.2343750	15			

0 missing value(s) have been excluded.

Tab 5.7.5.3

Table of means for SAFIR.adcon by SAFIR.concntr

Level	Count	Std. Error Average	Std. Error (internal)	Std. Error (pooled s)	95 % LSD intervals for mean	
20	4	.9500000	.0204124	.0161374	.9251314	.9748686
35	4	1.1250000	.0144338	.0161374	1.1001314	1.1498686
50	4	1.2750000	.0144338	.0161374	1.2501314	1.2998686
70	4	1.1750000	.0144338	.0161374	1.1501314	1.1998686
Total	16	1.1312500	.0080687	.0080687	1.1188157	1.1436843

Fig 5.7.5 a

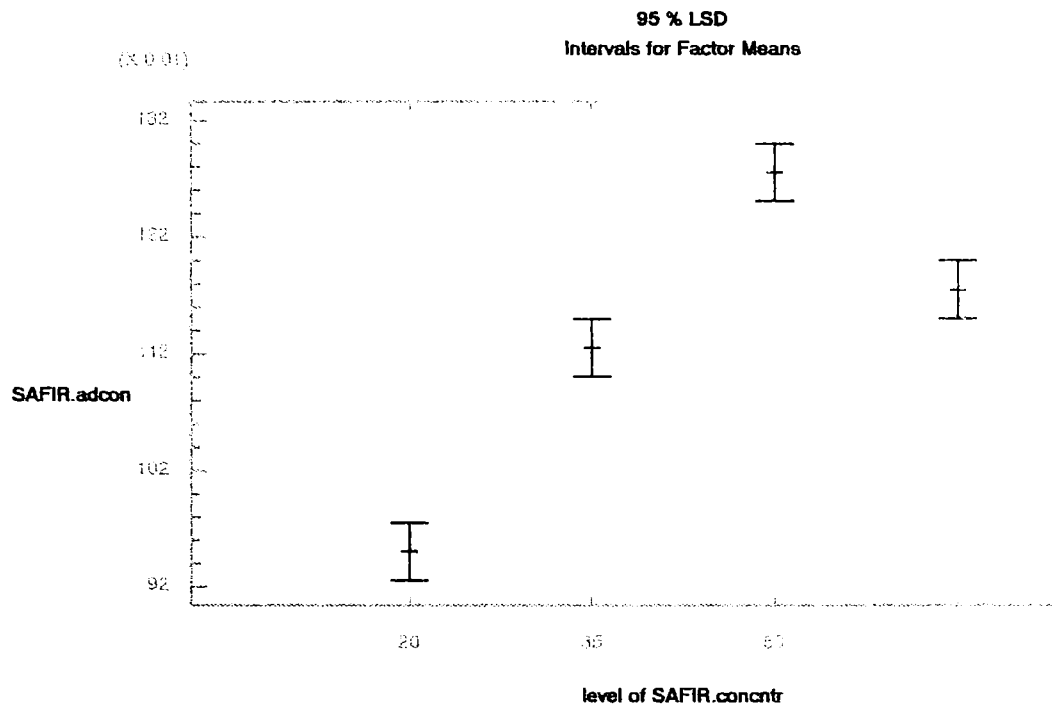


Fig 5.7.5 b

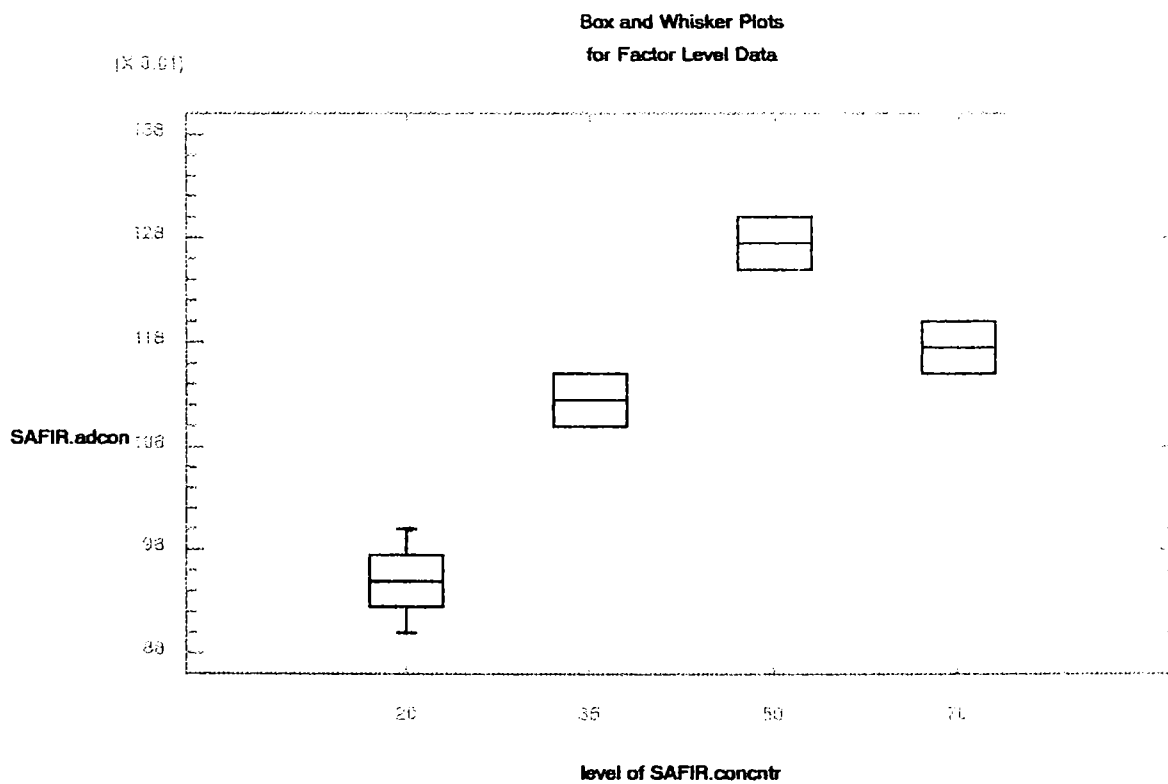


Fig 5.7.5 c

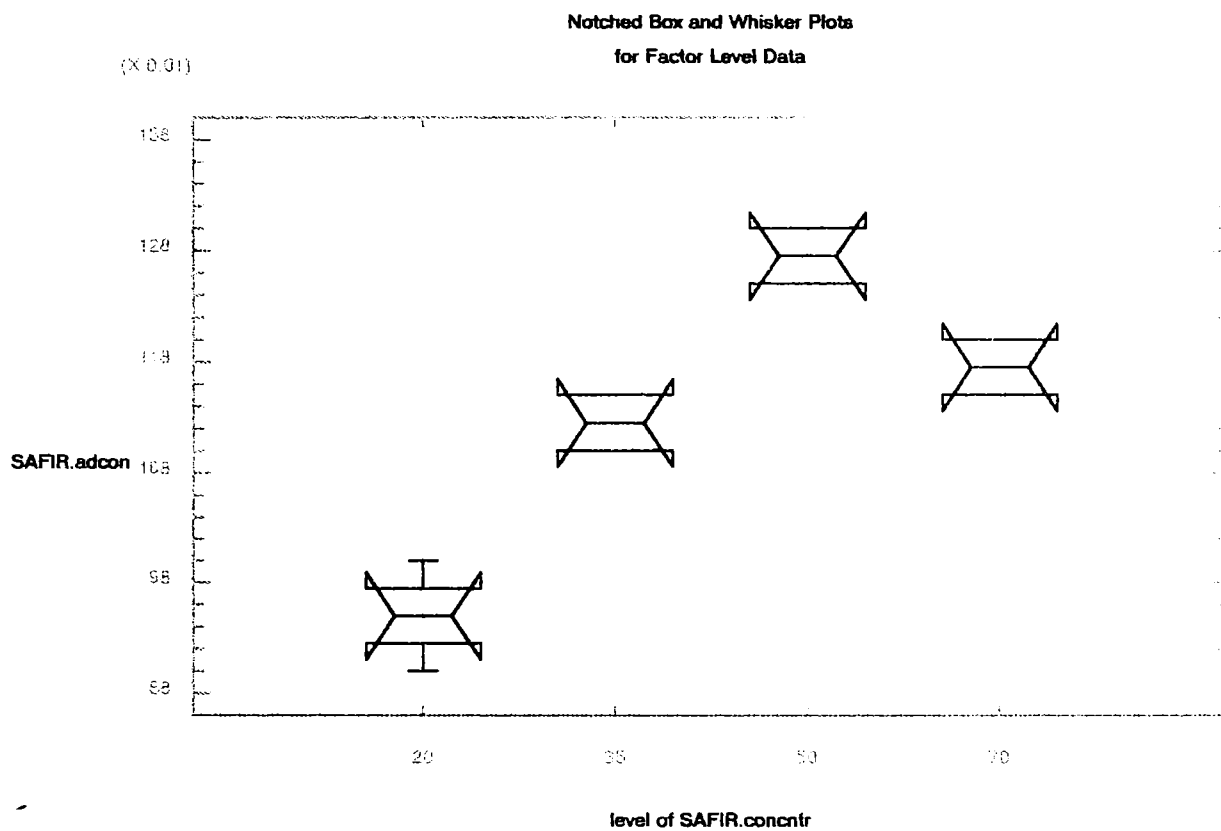
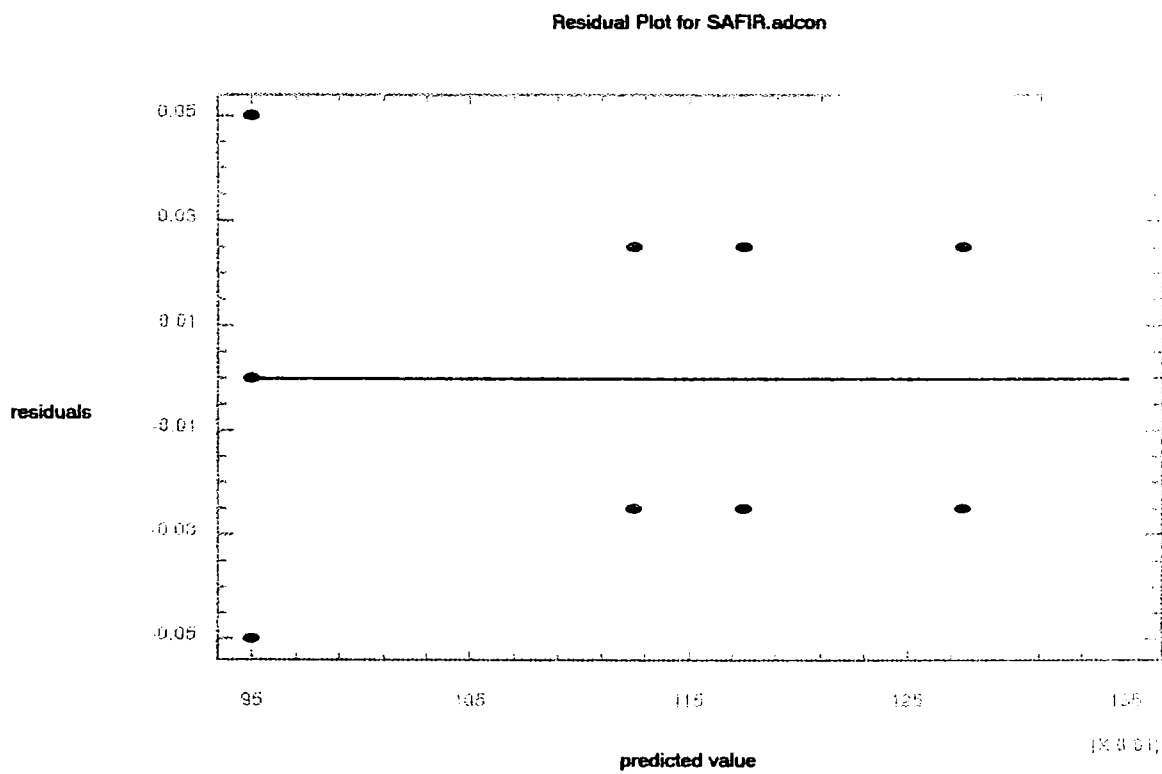


Fig 5.7.5 d



Tab 5.7.5.4

Multiple range analysis for SAFIR.adcon by SAFIR.concntr

Method: 95 Percent LSD

Level Count Average Homogeneous Groups

Level	Count	Average	Homogeneous Groups
20	4	.9500000	X
35	4	1.1250000	X
70	4	1.1750000	X
50	4	1.2750000	X

contrast	difference	+/- limits
20 - 35	-0.17500	0.04974 *
20 - 50	-0.32500	0.04974 *
20 - 70	-0.22500	0.04974 *
35 - 50	-0.15000	0.04974 *
35 - 70	-0.05000	0.04974 *
50 - 70	0.10000	0.04974 *

* denotes a statistically significant difference.

Tab 5.7.5.5

Regression Analysis - Linear model: $Y = a + bX$

Dependent variable: SAFIR.adcon Independent variable: SAFIR.concntr

Parameter	Standard Estimate	Error	T	Prob. Value	Level
Intercept	0.926484	0.05804	15.9628	.00000	
Slope	4.68037E-3	1.2219E-3	3.83041	.00184	

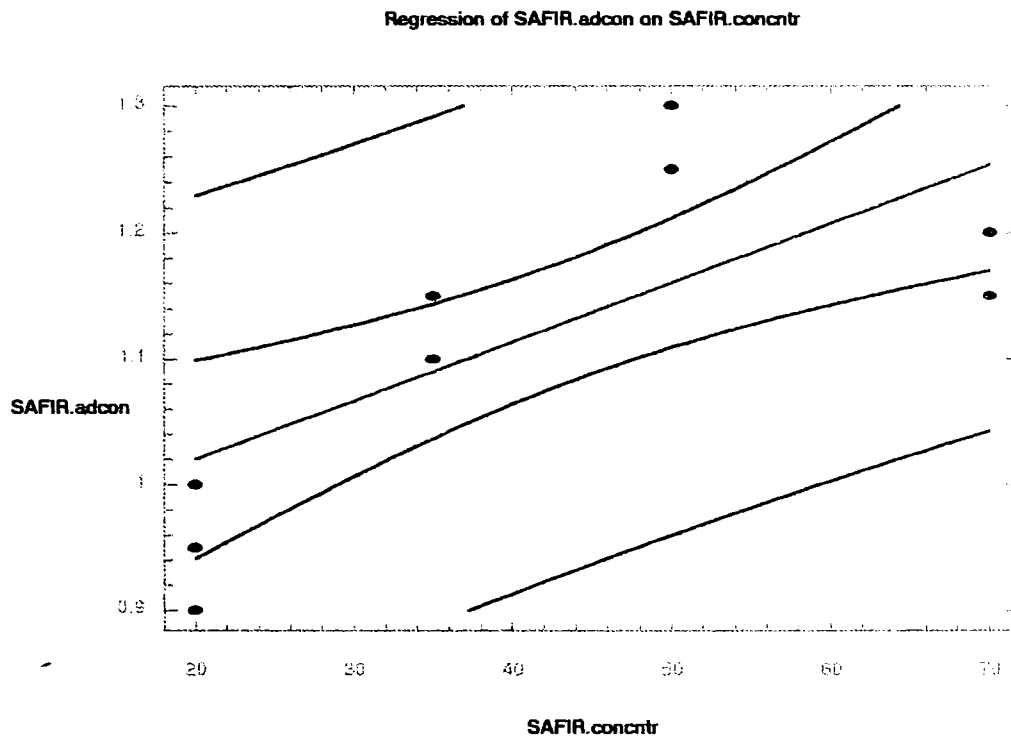
Tab 5.7.5.6

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	Prob. Level
Model	.119934	1	.119934	14.67207	.00184
Residual	.114441	14	.008174		

Total (Corr.) .234375 15
 Correlation Coefficient = 0.715346 R-squared = 51.17 percent
 Std. Error of Est. = 0.090412

Fig 5.7.5 e



De aici rezultă concluziile că ipoteza nulă nu poate fi posibilă. Influența variabilei independente este mare asupra celei dependente, însă într-o mai mică măsură față de ceilalți parametri analizați.

După cum se observă din reprezentările grafice, 5.7.5 a, b, și c, datorită valorilor obținute, fenomenul nu poate fi încadrat într-un model matematic liniar, ci în două modele liniare, pe intervalele 20 - 50 % și 50 - 70%.

Valoarea concentrației volumice optime de 50%, confirmă experiențele anterioare și indicațiile literaturii de specialitate.

Această concentrație asigură atât fluiditatea suspensiei pentru ușurarea alimentării cu abraziv a prelucrării și evacuarea oportună a abrazivului folosit împreună cu materialul prelucrat, cât și cantitatea de abraziv necesar unei prelucrări eficiente.

Valorile de balans ale fiecărui eșantion sunt reduse, ceea ce indică faptul că valorile răspunsurilor au fost apropiate de valoarea medie. Acest lucru ilustrează faptul că experimentul s-a executat îngrijit, deși ca procedură este foarte avantajos.

În ceea ce privește omogenitatea suspensiei abrazive, este foarte greu de controlat dar din variațiile mici ale răspunsurilor se constată că variația a fost destul de mică.

Dispersia valorilor este foarte mică în comparație cu posibilitățile de a avea condiții identice la diferite încercări.

În figurile 5.7.5 b și c, se observă pe întregul domeniu al experimentărilor o dispersie mai mare a rezultatelor, ceea ce reconfirmă faptul că menținerea unei concentrații constante este un deziderat greu de îndeplinit.

Valorile reziduale sunt răspândite aleatoriu cu valoarea prezisă de program de -0,001, ceea ce oferă experimentului o confidență corespunzătoare.

Omogenitatea grupelor este bună, contrastul dintre grupe față de minimul admis de $\pm 0,04974$ este cuprinsă între -0,3250 și 0,10, fiind foarte bună pe majoritatea intervalelor.

CONCLUZII

1. Experimentele care au făcut obiectul acestui capitol au rolul de a clarifica influențele factorilor tehnologici atât asupra productivității prelucrării, dar mai ales asupra calității suprafețelor obținute, element esențial al studiului din prezenta teză;

2. Utilizând programul factorial întreg de analiză statistică, s-a reușit o optimizare importantă a numărului de încercări, iar efectele factorilor calitativi asupra variabilei de răspuns au fost materializate foarte sugestiv prin suprafețele și contururile de răspuns, acestea fiind și ușor de interpretat.

3. Timpul de prelucrare influențează pozitiv prelucrarea cu ultrasunete în prima perioadă a acesteia, după care graficul de creștere a productivității înregistrează o creștere nesemnificativă, condițiile de prelucrare înrăutățindu-se. Aceasta conduce la soluția tehnologică a retragerilor succesive, pentru reînprospătarea abrazivului în zona de lucru, care în funcție de materialul prelucrat se vor executa la 40s pentru discurile optice și 80s pentru lentilele de safir;

4. S-a constatat de asemenea faptul că există în cazul fiecărei prelucrări o presiune optimă de contact sculă-piesă. În cazurile studiate aceasta este la prelucrarea discurilor optice de 2 daN/cm^2 , iar la lentilele de safir de 3 daN/cm^2 . În același context se observă comportarea identică în cazul celor două prelucrări la presiuni mici sau prea mari, zone în care prelucrarea este imposibil de amorsat, respectiv poate produce ciobiri care să afecteze calitatea suprafețelor obținute;

5. Puterea absorbită de convertorul ultrasonic în perioada procesului de prelucrare s-a dovedit a fi diferită de la o prelucrare la alta. Astfel, pentru prelucrarea sticlei optice s-au obținut rezultate bune calitativ cu o putere de 20W, iar la cea a lentilelor de safir de 30W. Odată cu creșterea puterii se observă și o creștere a productivității prelucrării, însă în detrimentul calității suprafețelor obținute.

6. O influență hotărâtoare asupra rezultatelor prelucrării o constituie abrazivul aflat în suspensie, în zona de lucru. S-a optat pentru apă ca lichid purtător, deoarece are vâscozitatea corespunzătoare de a permite accesul abrazivului pătrunderea în zona de lucru și coeficientul de transmitere a căldurii optim realizării răcirii sculei în procesul de erodare.

Pe parcursul tuturor experimentărilor efectuate s-a reconfirmat că așa cum este indicat și în literatura de specialitate, concentrația optimă volumică este de 50% precum și necesitatea reînprospătării spațiului de lucru cu abraziv prin retrageri periodice.

Capitolul 6

6. CERCETĂRI PRIVIND SOLUȚIILE CONSTRUCTIVE ALE MAȘINII DE PRELUCRAT CU ULTRASUNETE

Ținând cont de piesele care urmează a fi executate (ca formă și dimensiuni), de materialul din care sunt confecționate și de posibilitățile existente la nivel național, pentru a realiza prelucrări de mare precizie și finețe au fost adoptate o serie de soluții constructive, acestea materializându-se în mașina de prelucrare cu ultrasunete proiectată și realizată de inginerii Iancu I. și Lupescu D., în laboratorul de ultrasunete al Politehnicii din Timișoara, MPU-05.

6.1. Mașina de prelucrat cu ultrasunete MPU-05

Pentru a se putea obține piesele din sticlă optică și din lentile de safir în condițiile impuse de beneficiar și datorită faptului că din mașinile existente nu a putut fi folosită, cu rezultate favorabile, nici una, au trebuit proiectate și realizate o serie de soluții constructive, care au dat naștere la prototipul experimental al mașinii MPU-05 a cărei schemă cinematică este ilustrată în figura 6.1.

Astfel, pentru a mări rigiditatea întregului sistem tehnologic s-a ajuns la concluzia că va trebui să adoptăm două coloane de ghidare 2 (în loc de una folosită la multe mașini descrise anterior la capitolul 4 în prezenta teză), iar pentru a fi cât mai rigide, acestea au fost dispuse pe diagonală. Acest lucru mărește considerabil rigiditatea sistemului neîmpiedicând însă accesul operatorului în bune condiții. De aceea, coloana din stânga pentru a nu împiedica manevrarea mesei de lucru telescopice între postul de lucru și locul de inspecție, s-a plasat în spate, iar cea din dreapta în față.

Alezajul conic, ce s-a adoptat ca soluție de fixare a mesei de lucru telescopice, a avut la bază ideea unei așezări sigure, fără abateri mari, care să influențeze precizia prelucrării și să asigure poziții cât mai apropiate, la postul de lucru și cel de inspecție.

Precizia de instalare radială, s-a asigurat prin proiectarea unui blocaj tip pană în ambele locuri (de lucru și de inspecție) în poziții identice.

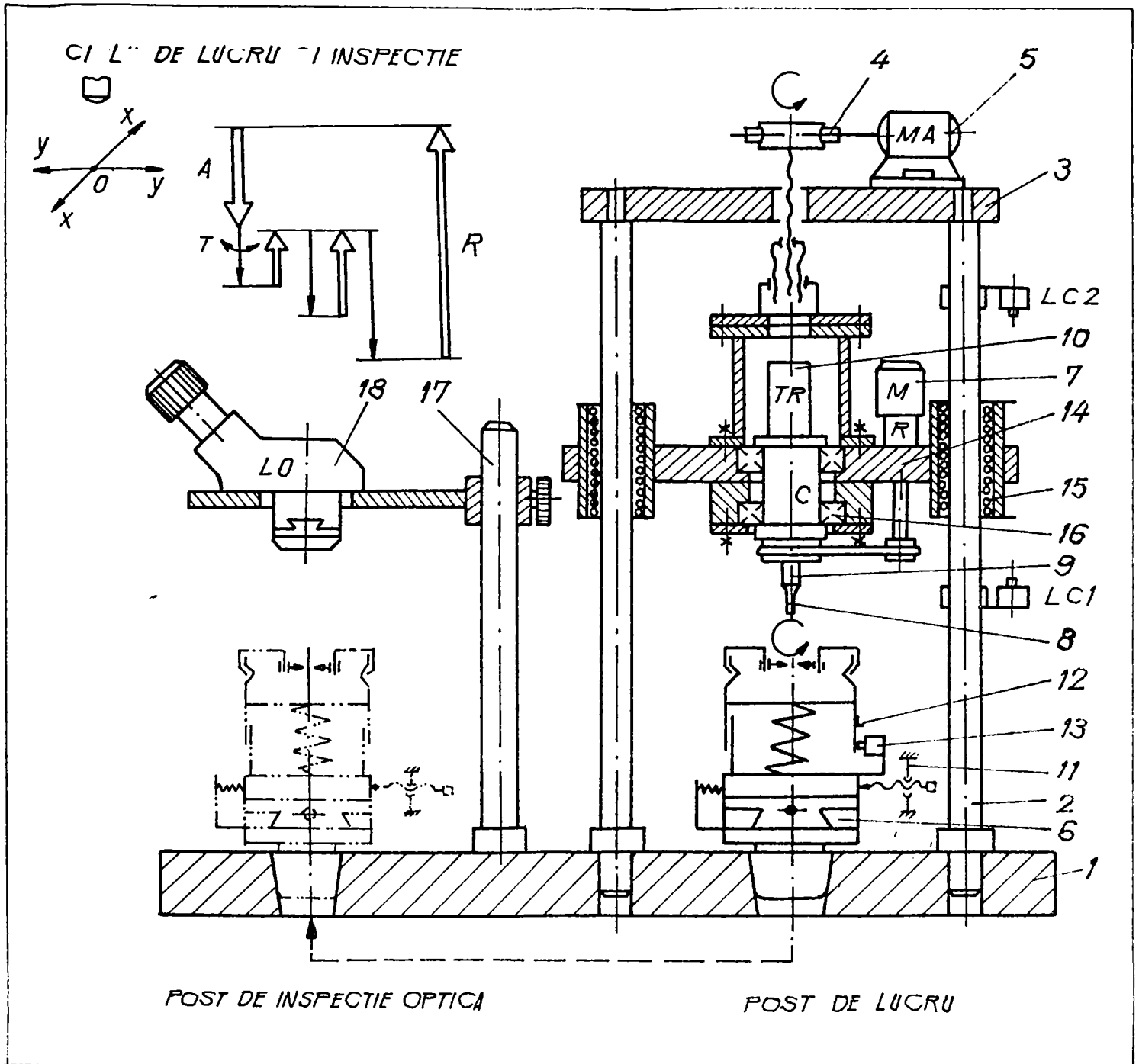


Figura 6.1. Mașina de prelucrat cu ultrasunete MPU-05
Schema cinematică

Masa de lucru a trebuit să fie realizată telescopică, datorită faptului că prelucrarea optimă se realizează între anumite valori ale presiunii de contact,

aceasta fiind în cazul materialelor care fac obiectul prelucrărilor de față, de $0,4 - 4 \text{ daN/cm}^2$.

Aceste limite ale intervalului au următoarea semnificație:

- la presiuni mai mici de $0,4 \text{ daN/cm}^2$ prelucrarea este foarte greoaie sau chiar inexistentă;

- la presiuni mai mari de 4 daN/cm^2 prelucrarea se accentuează ca viteză de înaintare, putând duce la spargeri necontrolate și amorsarea de fisuri laterale în materialul de prelucrat.

Pentru a ne menține în acest interval, în funcție de caracteristica elastică a resortului adoptat (și montat în interiorul mesei telescopice), se vor monta pe cilindrul exterior al mesei doi senzori de cursă pentru a asigura $p \in (0,4...4 \text{ daN/cm}^2)$. Acestea vor asigura:

- pornirea motorului de avans 5 înainte ca presiunea să devină insuficientă executării prelucrării;

- oprirea motorului de avans înainte ca presiunea să devină mai mare decât maxima admisă prelucrării.

În funcție de materialul de prelucrat și caracteristica elastică a arcului folosit, acești senzori de cursă pot fi poziționați diferit, astfel încât prelucrarea să se execute în condiții optime, cu rezultatele dorite.

Evacuarea suspensiei abrazive și a materialului prelevat se face prin interiorul mesei de lucru telescopice, prin cădere liberă și sunt colectate într-un recipient special.

Datorită faptului că se pot prelucra atât piese cilindrice cât și piese extraplate, s-a adoptat soluția constructivă de prindere a piesei atât radial între bancuri (a pieselor cilindrice – lentilele din safir) și axial (a pieselor extraplate- discurile modulatorie).

Poziționarea în câmpul de lucru și de inspecție se asigură în axele de coordonate rectangulare x-x și y-y, cu ajutorul unor micrometre montate pe plăcile de mișcare ale mesei de lucru. Menținerea în contact ferm cu aceste micrometre și revenirea la poziția inițială o asigură două arcuri de readucere.

Pentru realizarea avansului plăcii de lucru – mobile 14, s-a adoptat soluția constructivă a montării pe placa de cap a mașinii 3, a unui motor de curent continuu 5, care printr-un șurub melc 4, angrenat cu o piuliță practică în colivia de protecție și răcire a transductorului, asigură mișcarea în plan vertical a convertorului ultrasonic.

Comanda motorului este asigurată de senzorii de cursă 13, de pe masa de lucru telescopică, pornind la presiunea minimă (masa este ridicată sub

acțiunea arcului interior) și decuplându-se la atingerea unei presiuni apropiată de cea maximă. Pentru retragere, printr-un comutator se inversează alimentarea motorului.

Pentru a se realiza abateri cât mai mici de la rectilinitatea mișcării, s-au avut în vedere trei elemente:

- coloanele de ghidare au fost atent prelucrate, cementate (pentru a rezista în timp la trecerile repetate ale bilelor);

- bilele care ajută la executarea mișcării au fost atent selecționate ca dimensiune și ca sfericitate;

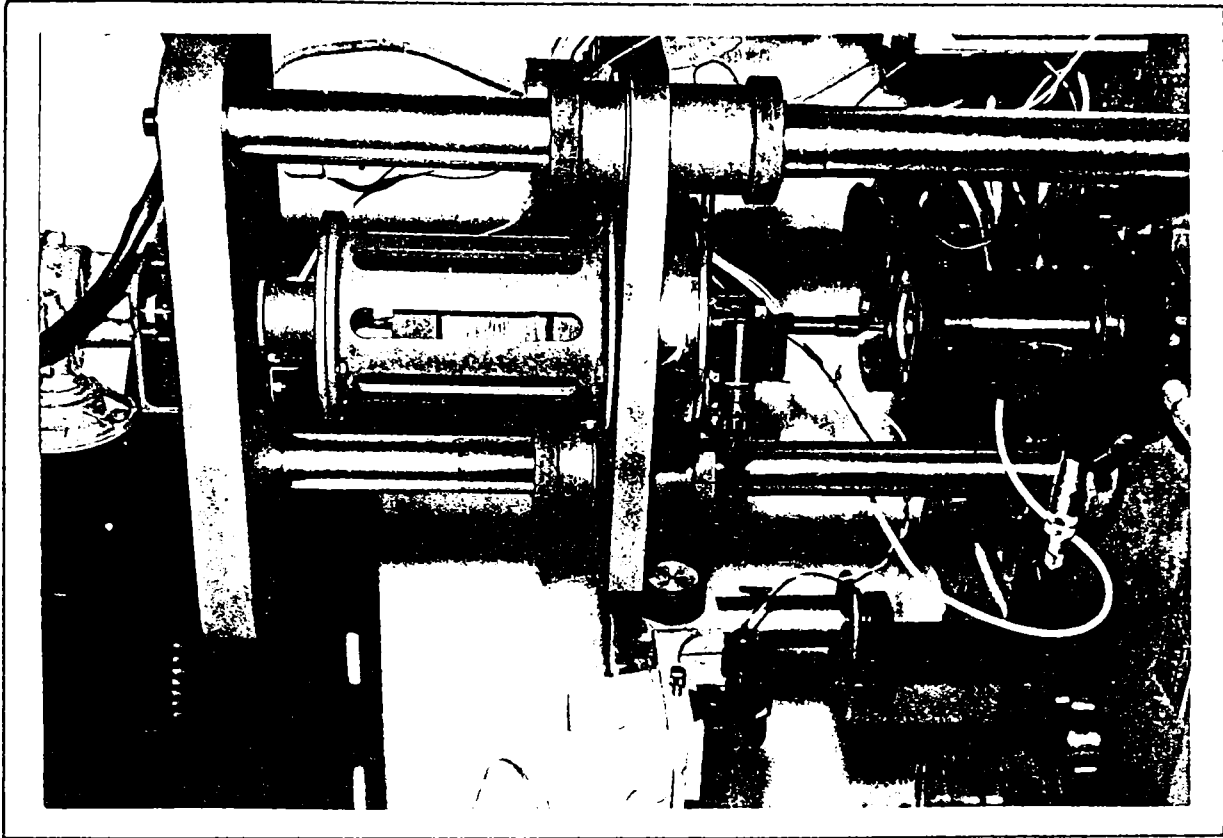
- ansamblul de mișcare a bilelor s-a stabilit a fi o cămașă multiplă cu rolul de poziționare fermă a fiecărei bile în ansamblu, astfel încât să nu avem oscilații ale mișcării perpendiculare pe direcția acesteia.

Deoarece așa cum s-a constatat din practică, datorită anizotropiei materialului sculei, ca și dispunerii neuniforme a suspensiei abrazive în spațiul de lucru, uzura sculei se produce neuniform și aleatoriu. De aceea s-a adoptat soluția de a roti întregul convertor ultrasonic pe placa mobilă cu ajutorul unui motor de curent continuu 7. S-au fixat doi ploți la 350° care inversează sensul polarității alimentării motorului, deci și al mișcării. Rotirea capului ultrasonic se face pe doi rulmenți conici 16. Această mișcare de rotație se folosește în momentul în care prelucrarea presupune un mare volum de material prelevat și o precizie dimensională și de formă acceptabile, întrucât sunt introduse multe elemente care perturbă precizia mișcării sistemului. De asemenea nu se poate aplica decât la piese circulare.

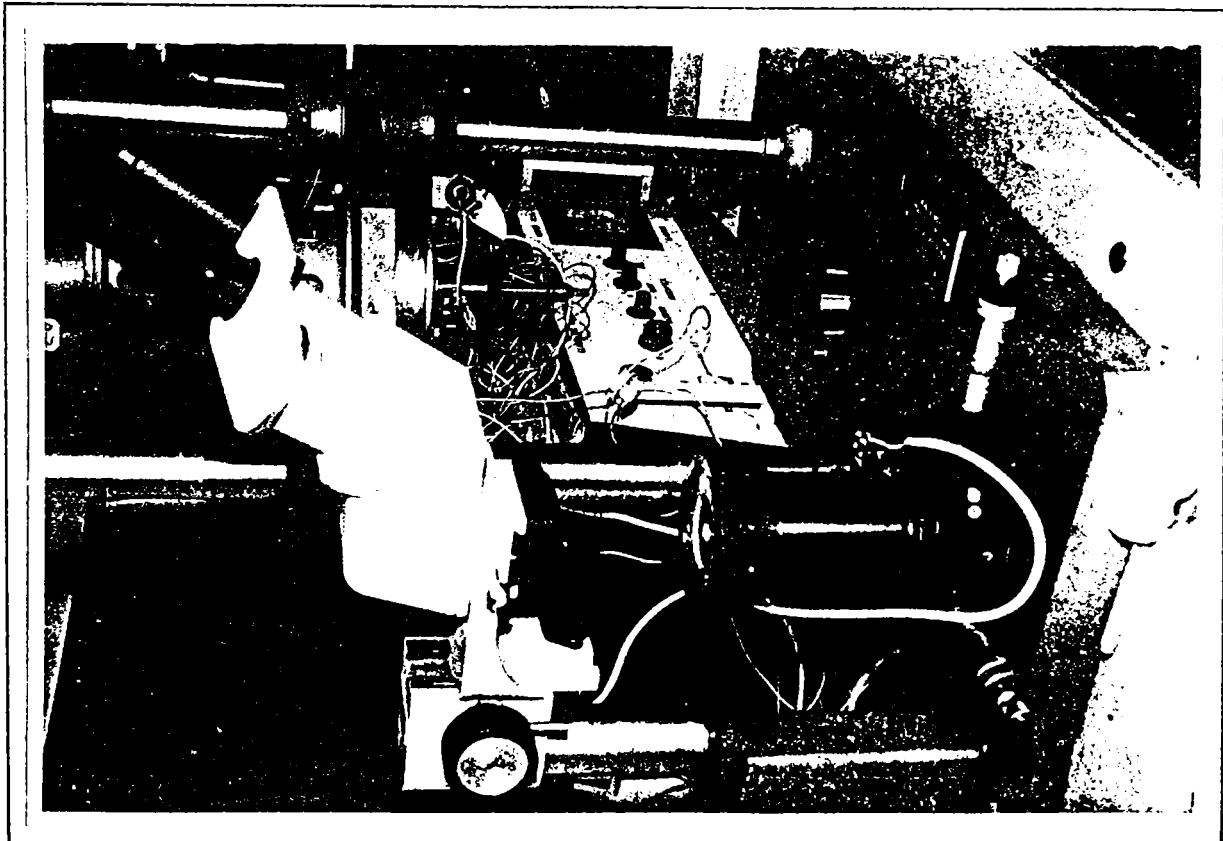
Întrucât s-a stabilit faptul că se asigură o răcire corespunzătoare a transductorului în interiorul unei colivii în care sunt practicate fante diametral opuse (pentru a facilita mișcarea rapidă a aerului de răcire), s-a adoptat această soluție constructivă.

Sistemul optic de instalare și control interoperațional și final este o lunetă binoculară cu puteri de mărire fixe (prin schimbarea lupelor) de pâna la 64 de ori - putere de mărire suficientă pentru lucrările executate.

Particularitatea procesului de prelucrare cu scule acționate prin ultrasunete este deteriorarea calității suprafețelor prelucrate în zona finală a prelucrării, la ieșire. Pentru a se îndepărta acest neajuns se întrebunțează un disc de dimensiunile discului "mamă", cu aceleași calități mecanice, lipit prin intermediul unui liant din rășini. Astfel, spărtura de la sfârșitul prelucrării se înglobează în adaosul tehnologic. După prelucrare se îndepărtează adaosul tehnologic, rămânând numai piesa dorită.



*Fig. 6.3 Masina de prelucrat cu
ultrasunete MPU-05
Vedere frontala*



*Fig. 6.2 Masina de prelucrat cu
ultrasunete MPU-05
Vedere laterala*

Rotunjirea sau ciobirea muchiilor orificiilor se poate evita și în alte moduri:

- prin reducerea amplitudinii oscilațiilor;
- prin reducerea presiunii de contact la prelucrarea zonelor de ieșire a sculei.

Pentru carotarea discului din sticlă optică prezentat în desenul de execuție, 2.1., și perforarea lentilelor de safir (Fig. 2.2.), au fost realizate scule de precizie care se prind pe concentrator prin filet. (Fig 4.8.).

Prelucrările se execută pe mașina de prelucrat cu ultrasunete a căror vederi generale sunt prezentate în fotografiile din figurile 6.2. și 6.3.

6.2. Mașina de prelucrat cu ultrasunete-propunere de brevet

Dezavantajele majorității mașinilor de prelucrat cu ultrasunete cunoscute, constau în aceea că prezintă soluții constructive elaborate pentru mecanismul de avans și nu permit poziționarea și controlul poziționării precise a piesei în raport cu scula atunci când conturul sau locul prelucrării este marcat pe piesă. Pe de altă parte aceste mașini nu prezintă posibilități de inspecție optică periodică a locului prelucrării, pentru evaluarea calității și preciziei acesteia.

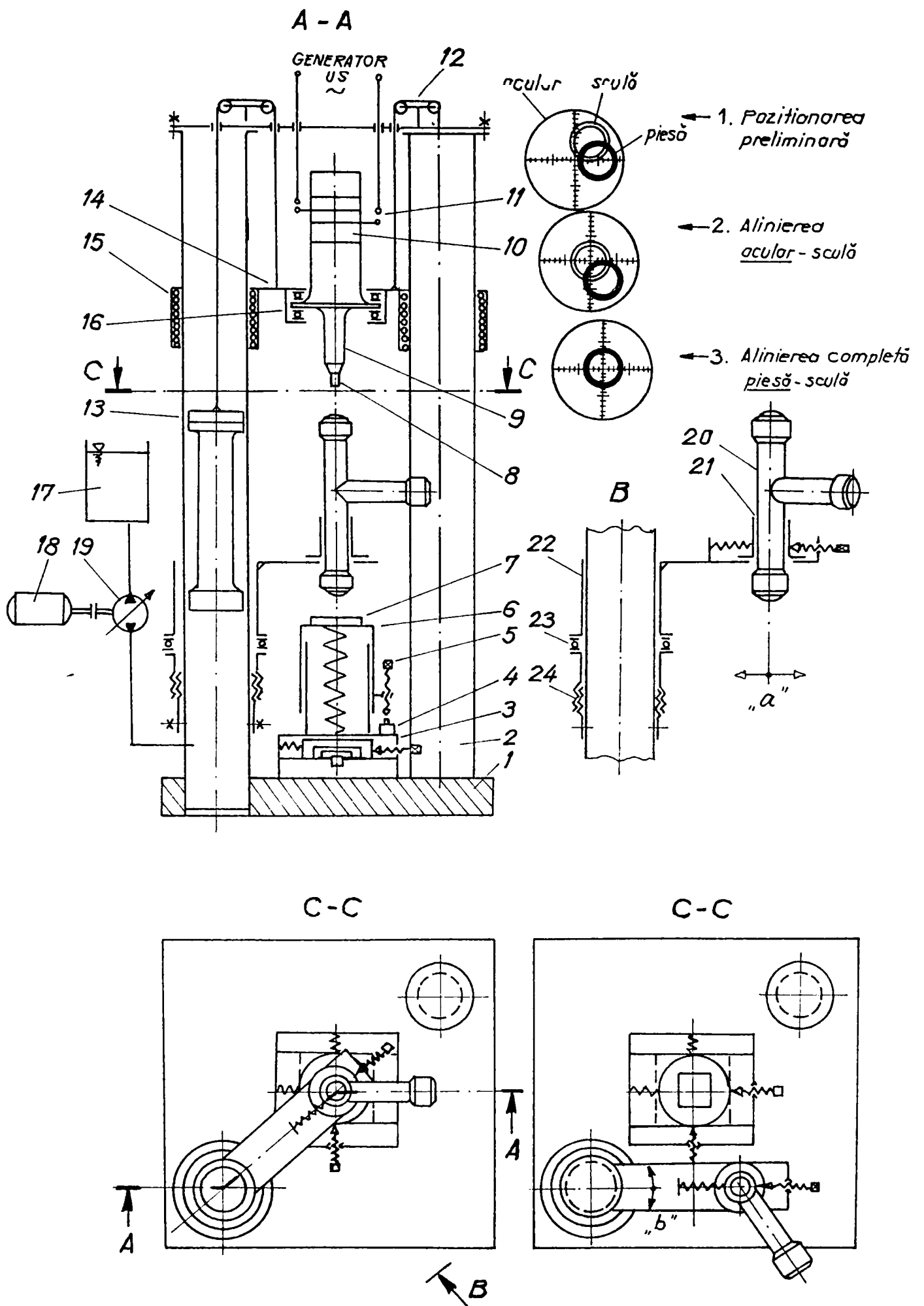
Unul din obiectivele urmărite de prezenta teză de doctorat a constat în mărirea preciziei de instalare a pieselor în mașinile de prelucrat cu ultrasunete și simplificarea construcției sistemului de avans.

Mașina de prelucrat cu ultrasunete concepută și propusă pentru brevetare (dosar OSIM nr. C 2474/24.12.1996) și a cărei schemă este redată în figura 6.4., este formată dintr-un platou de bază 1 în care sunt montate două coloane verticale 2 ce servesc ca elemente a cadrului închis și căi de deplasare-ghidare a ansamblului capului ultrasonic. Pe platoul de bază al mașinii este montat un dispozitiv mecanic 3 de tip elemente asamblate în coadă de rândunică, ce permit poziționări în plan orizontal după două axe perpendiculare x-y. Pe acest dispozitiv mecanic se găsește dispozitivul telescopic elastic al unei mese 6 a mașinii pe care se dispune o piesă de prelucrat 7, reglarea forței de apăsare la contactul sculă-piesă fiind asigurat

de un palpator reglabil 5 față de un microlimitator 4 cu rolul de a întrerupe mișcarea de avans a capului ultrasonic la atingerea forței de apăsare prereglate. La partea superioară, o sculă de prelucrare 8 este înșurubată într-un concentrator 9, cuplat mecanic cu un transductor 10 ce are niște contacte electrice de tip perie-colectoare 11 pentru alimentarea de la generatorul de ultrasunete, întreg ansamblul astfel constituit reprezentând capul ultrasonic susținut în lagăre de rostogolire 16 pe un cadru suport 14 ce se poate deplasa pe verticală, ghidat fiind pe coloanele 2 prin intermediul unor bușe de ghidare cu bile 15. Capul ultrasonic poate fi rotit sau rămâne fixat în timpul prelucrării. Deplasările pe verticală ale capului ultrasonic sunt mișcări de apropiere-retragere sau mișcări de avans asigurate de starea de dezechilibru al unor contragreutăți 13 legate în cadrul-suport 14 prin intermediul unor fire 12 înfășurate pe role suport. Starea de dezechilibru controlat al contragreutăților 13 este provocată de creșterea sau scăderea nivelului de ulei din coloane, creșterea nivelului corespunzându-i avansul, iar scăderii nivelului corespunzându-i retragerea. Creșterile și scăderile de nivel sunt provocate de acționarea printr-un motor 18 al unei pompe volumice reversibile și reglabile 19, care umple sau golește lichidul din coloane într-un rezervor tampon 17. Comanda acționării pompei este asigurată de operator în funcție de necesități și de starea tensionării arcului mesei mașinii 6 sesizată de sistemul palpator-microlimitator 4-5.

Pentru instalarea și alinierea corectă a sculei în raport cu profilul de prelucrat al piesei pe una din coloanele 2 ale mașinii este montat printr-un colier reglabil de înălțime 24 și un rulment axial 25, un manșon 22 solidar cu o traversă radială mobilă, pe care printr-un manșon 21 se montează un dispozitiv optic. Acesta este format din două obiective și un ocular capabil să suprapună în același plan optic atât imaginea frontală a sculei 8 cât și profilul de prelucrat de pe piesă 7. Acest ansamblu permite două poziții, una de lucru când este rabătut în axa sculă-piesă cu capul ultrasonic retras și una de așteptare, când este în exteriorul acestei axe, iar capul de lucru este apropiat pentru contactul sculă-piesă.

Poziția dispozitivului optic este reglabilă în coordonate polare prin rotirea după direcțiile „b” și deplasările micrometrice ale manșonului 21 în direcțiile radiale „a”. Pentru o instalare se procedează la dispunerea manuală a piesei 7 pe masa 6, cât mai centrat posibil în raport cu scula, după care se rabate și se reglează dispozitivul optic pentru a obține clar imaginea de referință a mirei reglate a ocularului, imaginea profilului frontal al sculei și



*Fig. 6.4 Mașina de prelucrat cu ultrasunete
(Dosar OSIM nr. C 2474/24.12.1996)*

imaginea conturului de prelucrare (marcat) al piesei. Se suprapune prin reglaje fine după direcția „a” și „b” axa mirei gradate cu cea a sculei, după care prin reglaje în coordonate rectangulare x-y de la dispozitivul mecanic 3, se aliniaza axa aculei cu cea a piesei. În felul acesta, instalarea corectă fiind realizată, se poate porni ciclul de lucru, după rabaterea dispozitivului optic în poziția de repaos. Pentru inspecții optice periodice se retrage capul acustic și dispozitivul optic poate fi reintrodus pentru o nouă vizualizare.

Mașina de prelucrat cu ultrasunete astfel concepută, prezintă următoarele avantaje:

- asigurarea unor prelucrări de precizie pe piese marcate, prin realizarea centrărilor și aliniierilor cu ajutorul dispozitivului optic rabatabil;
- asigurarea posibilității inspecțiilor optice periodice pentru evaluarea procesului de prelucrare;
- soluția constructivă este simplă în raport cu funcționalitatea cerută mașinii și mai ales pentru mecanismul de avans;
- implică o exploatare simplă, întreținere ușoară și fiabilitate ridicată.

- În anexa tezei de doctorat este redat proiectul sistemului optic prevăzut a fi instalat pe mașina de prelucrat cu ultrasunete propusă pentru brevetare și programul de calculator cu profilurile concentratoarele adaptoare de undă exponențiale și de tip Fourier pentru diferite valori ale coeficientului teoretic de amplificare și deci pentru diferite alternative de utilizare.

7. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Teza de doctorat prezentată pe larg în capitolele anterioare este rezultatul unor cercetări teoretice și experimentale care au pus în evidență următoarele concluzii principale și contribuții relevante ale autorului.

7.1. Concluzii

1. Prelucrarea dimensională cu ultrasunete este un procedeu aplicat cu precădere materialelor dure și fragile, acolo unde alte procedee nu dau satisfacție, sau sunt imposibil de aplicat.
2. Procesul de prelucrare este de eroziune abrazivă, datorită energiei ultrasunetelor. Cavitația ultrasonică are un rol neînsemnat.
3. Aplicarea prelucrării cu ultrasunete este rațională pentru cazuri specifice, iar construcția echipamentului trebuie adecvată cazului. Mașinile sunt mai degrabă specializate decât polivalente.
4. Dimensiunile și configurațiile prelucrabile sunt limitate de condiții tehnice specifice și în mod deosebit de cele impuse de funcționarea unui sistem oscilant rezonant.
5. Tendința aproape exclusivă a altor lucrări de apreciere a prelucrării cu ultrasunete prin capacitatea productivă Q_v , a fost înlocuită cu un complex de indicatori în care cei de calitate a suprafețelor obținute și precizie de execuție dimensională și de formă sunt prioritari.
6. Modelele adoptate de diferiți cercetători, însoțite de ipoteze simplificatoare, au condus la concluzii asemănătoare cu rezultatele obținute prin experimentele din cadrul tezei în ceea ce privesc parametrii de influență ai prelucrării, ca și ponderea acestora. În prezent se insistă pe realizarea de modele experimentale care să permită corelarea unor tehnologii de prelucrare cu elemente constructiv-funcționale ale echipamentelor, în scopul obținerii unor eficiențe sporite ale prelucrării.
7. Prelucrarea discurilor optice din sticlă și a lentilelor de safir, reprezintă cazuri specifice ce impun studii particularizate având în vedere prioritatea condițiilor de precizie și calitate în raport cu cele de productivitate.

8. Se remarcă influența hotărâtoare a presiunii de contact sculă-piesă, care se dovedește a fi optimă în intervalul 1-4 daN/cm², alături de caracteristicile fizico-chimice ale abrazivului și modul de alimentare cu acesta a spațiului de lucru.
9. Presiunea este limitată inferior de imposibilitatea executării prelucrării și superior, de caracteristicile mecanice ale materialelor sculelor, modalitatea de alimentare cu suspensie abrazivă, dimensiunile sculelor, precum și posibilitatea atenuării vibrațiilor.
10. Cele mai avantajoase scule tubulare pentru prelucrarea cu ultrasunete, cu suspensie abrazivă, a cărei alimentare se face prin stropire, sunt cele cu rapoarte $d/D=0,6$. Pentru prelucrarea orificiilor în lentile de safir se recomandă sculele pline.
11. Analiza comparativă a mașinilor de prelucrat cu ultrasunete care ar corespunde în cele mai bune condițiuni prelucrării de precizie a discurilor optice și lentilelor din safir, indică următoarele:
 - mașinile de precizie și performanță tip Exeron, sau cea cu sistem de inspecție optică (Brevet SUA nr.3.191.589) sunt practic inabordabile. Acestea reprezintă unități scumpe, de mare productivitate și achiziționarea lor nu justifică serii scurte și aleatoare de fabricație;
 - mașinile de tip MPU – 03 (Universitatea Politehnica Timișoara) și respectiv MPU – 01 (Electrotimiș Timișoara), deși sunt la îndemână, nu asigură caracteristici pentru prelucrări de precizie specifice discurilor optice și lentilelor de safir. Ele nu sunt corespunzător echipate pentru centrarea semifabricatelor și inspecția optică periodică;
 - soluția optimă pentru cazul concret de utilizare studiat în teză impune proiectarea, realizarea și încercarea unei mașini de construcție specializată prelucrărilor de precizie, cu facilități specifice de exploatare (centrare, inspecție periodică). Această mașină ar putea avea o construcție simplificată, realizată cu resurse proprii și cu o investiție considerabil mai mică, pornind de la asigurarea unor performanțe de exploatare limitate doar la cele impuse de specificul prelucrărilor de precizie cerută;
 - mecanismul de avans trebuie să permită trecerea cu ușurință la valori diferite ale sensibilității prin montaje simple, respectiv să răspundă atât prelucrărilor de finețe, cât și celor grosiere (versatilitate). De asemenea, el trebuie să asigure realizarea retragerilor periodice intermitente pentru reîmprospătarea cu suspensie abrazivă;

- un sistem optic versatil va trebui să asigure posibilitatea inspecției optice de finete a uzurii sculei și a locului prelucrării;

- generatorul de ultrasunete de putere mică nu reclamă acord automat al frecvenței de rezonanță în condițiile unei dimensionări adecvate a concentratorului adaptor de undă.

12. În raport cu realizările pe plan mondial, experiența națională concentrată în special la Universitatea Politehnică din Timișoara este notabilă și relevantă pentru a putea imagina și realiza obiective în cercetarea și aplicarea industrială.

7.2. Contribuții

1. Realizarea unui studiu comparativ original al principalilor modele teoretice privind procesul prelucrării cu ultrasunete cu suspensie abrazivă, analiza experimentelor care le-au fundamentat și definirea coerentă a principalilor factori de influență și a interdependenței lor.

Acest studiu a permis o evaluare actualizată a procesului în raport cu:

- oportunitatea aplicării la diferite cazuri de prelucrare solicitate (materiale, dimensiuni, configurații);
- limitele tehnologice ale procesului;
- definirea indicatorului prioritar de evaluare (capacitate productivă sau precizie și calitate);
- modul de integrare a sistemului rezonant (generator-convertor-concentrator) într-un sistem tehnologic de prelucrare.

2. Afirmarea fundamentată a lipsei de temei a ipotezei rolului hotărâtor al cavitației ultrasonice în procesul prelucrării și definirea ei ca prelucrare abraziv cavitațională.

3. Realizarea unor studii de sinteză privind tehnologiile de prelucrare cu ultrasunete și construcția echipamentelor aferente cu evaluări de imediată utilitate în raport cu obiectivele fixate pentru cercetările tezei de doctorat.

4. Realizarea unui program experimental redus pe baza experimentului factorial pentru studiul prelucrării discurilor optice din sticlă și a lentilelor din safir. Utilizarea programului STATGRAPHICS [cap. 5].

5. Realizarea unor tehnologii de prelucrare a discurilor optice din sticlă și a lentilelor din safir optimizate în care pentru prima dată eficiența

prelucrării nu se mai realizează prin creșterea puterii ultrasonice ci prin asigurarea ei la un nivel optim, corelat cu modul de asigurare a suspensiei abrazive și cu modul de asigurare al avansului sculei (presiunii de contact sculă-piesă).

Indicatorii de calitate și precizie ai prelucrării devin determinanți [cap. 5].

6. Evaluarea rațională și economic eficientă a structurii construcției funcționale și a caracteristicilor de lucru a echipamentului ultrasonic adecvat pentru prelucrarea cu ultrasunete a discurilor optice din sticlă și a lentilelor din safir. Modelele de referință au fost mașini performante realizate pe plan mondial (USA, Germania), dar și mașini disponibile de concepție românească (MPU-03, MPU-01, Electroson) [cap.4]

7. Realizarea unui model experimental de laborator MPU_{me}, care a fost folosit cu precădere pentru prelucrările experimentale, construit pe structura mașinii de prelucrat ultrasonice tip MPU-03 (UPT) și a unui microscop optic de scule pentru evaluarea preciziei și calității de prelucrare [cap.4].

8. Realizarea în colaborare a unei mașini de prelucrat cu ultrasunete tip MPU-05 cu cap de lucru rotativ/oscilant, sistem de ghidare cu două coloane, dispozitiv de avans amovibil și lupă stereo pentru inspecție optică periodică [cap.6].

9. Concepția unei mașini de prelucrat cu ultrasunete de precizie, cu sistem de ghidare pe două coloane, cap ultrasonic rotativ/oscilant, mecanism de avans de sensibilitate mărită și sistem optic de inspecție rabatabil, care fac obiectul propunerii de brevet de invenție C 2474/24.12.1996 [cap.6].

10. Proiectarea elementelor sistemului optic al mașinii de prelucrat cu ultrasunete și proiectarea asistată de calculator a concentratoarelor adaptoare de undă de tip exponențial și Fourier [anexă].

BIBLIOGRAFIE

- 1 ACH-1 ACHKINADZE, SH. D., *The industrial use of ultrasonics in engineering and instruments manufacture*, LDNTP, 1958;
- 2 ACT-1 ACTON, I. W., *The effects of industrial airborne ultrasonnd on humans ultrasonics*, Ultrasonics, 1974;
- 3 ADI-1 ADITHAN, M., *Effect of d/D ratio of tool cross-section on machining rate on ultrasonics drilling-* Journal of the Institution of Engineers, vol. 52, nr. 11, 1972;
- 4 AIS-1 AISEROV, YU. M., *A simplified method of designing ultrasonic catenoidal concentrators in the collection. The technology of instrument manufacture*, Mashgiz, Leningrad, 1958;
- 5 AMZ-1 AMZA, GHE., *Sisteme ultraacustice*, Ed. Tehnică, București, 1988;
- 6 AMZ-2 AMZA, GHE., *Stadiul actual al deformării plastice în câmp ultrasonic*, referat, Catedra Tehnologia Materialelor, I. P. București, 1976;
- 7 AMZ-3 AMZA, GHE., *Contribuții la studiul fenomenelor de deformare plastică în câmp ultrasonic*, teză de doctorat, I. P. București, 1976;
- 8 AMZ-4 AMZA, GHE., *Îmbunătățirea calității pieselor de tipul axelor prin netezire în câmp ultrasonic*, A II-a Conferință Națională de Mașini Unelte, București, 1977;
- 9 AMZ-5 AMZA, GHE., DRIMER, D., *Metodă și instalație pentru măsurarea amplitudinii și solicitării concentratoarelor de energie ultrasonică*, Brevet de invenție, nr. 86616 din 30.10.1979;
- 10 AMZ-6 AMZA, GHE., DRIMER, D., *Tehnologia materialelor. Prelucrări cu ultrasunete*, I. P. București, 1984;
- 11 AMZ-7 AMZA, GHE., BARB, D., CONSTANTINESCU, F., *Sisteme ultrasonice*, Ed. Tehnică, București, 1988;
- 12 ANG-1 ANGUS, N. C., NEPPIRAS, E. A., NICKELBASEN, *Magnetostrictive alloys for electromechanical transducers*, Ultrasonics, 1969;
- 13 ANS-1 ANSEROV, YU. M., TER ZACHARIAN, E. G., *Ultrasonic machining of brittle non-metalic materials*, Mashinostroitel no. 5, 1959;
- 14 AST-1 ASTAȘEV, V. K., *Reglarea mașinilor unelte ultrasonice*, Stanki I instrument nr. 10, 1972;

15 AST-2 ASTAȘEV, V. K., SAKOIAN, A. R., *Experimentalnoe isledovanie dinamiki nolebatelinoi sistemî ultrazvukovo ştauca*, Maşinovedenie, nr. 4, 1967;

16 ATA-1 ATANASIU, N., RADU, C., AMZA, GHE., *Calculul și proiectarea profilului optim al concentratoarelor ultrasonice*, Construcția de mașini, București, 1977;

17 ATA-2 ATANASIU, N., *Optimizarea profilului concentratoarelor ultrasonice*, seria mecanică, tom XLII, nr. 4, I. P. București, 1984;

18 AUG-1 AUGUSTA DE FILIPI, *Prelucrarea cu ajutorul ultrasunetelor. Prelucrarea metalelor prin tehnologii neconvenționale*, B. I. T., nr. 2, 1972;

19 BĂD-1 BĂDĂRĂU, E., GRUMĂZESCU, M., *Ultrasonica fizică și tehnică*, Ed. Tehnică, București, 1967;

20 BĂD-2 BĂDĂRĂU, E., GRUMĂZESCU, M., *Bazele acusticii moderne*, Ed. Academiei Române, București, 1961;

21 BEZ-1 BEZBORODOV, M. A., GEZBURG, A. A., KRASNIKOV, N. P., *Experience in the use of ultrasonics for the machining of glass*, Steklo i keramika, nr. 6, 1955;

22 BID-1 BIDDELL, D. C., STANSOME, D. H., *The development of oscillatory metal-drawing equipment-and engineering view*, Ultrasonics, 1974;

- 23 BID-2 BIDDell, D. C., *Imprimarea ultrasonică cu radiatori radiali*, Acustica, R.F.G., 45/1980;

24 BIK-1 BIKOV, V. Z., EFREMOV, A., ZACOKINIKOV, V. A., SALNIKOV, I. V., SEMIBRATOV, M. N., *Tehnologia prelucrării pieselor optice, vol. I și II*, Ed. Tehnică, București, 1977;

25 BRO-1 BROWN, B., GOODMAN, J. E., *High Intensity Ultrasonics*, Illife Books, London, 1973;

26 BRO-2 BROWN, B., *Progrese recente în aplicarea ultrasunetelor la procesele de prelucrare*, I. C. D. T., București, 1966;

27 BUZ-1 BUZDUGAN, GHE., *Măsurarea vibrațiilor mecanice*, Ed. Tehnică, București, 1964;

28 CHI-1 CHIVERS, R. C., *A multiple nomogram for ultrasonic propagation calculations*, Ultrasonics, nr 17, 1979;

29 CLA-1 CLARK, C. A., *Improved Nickel-Base Alloys for Magnetostrictive Transducers*, The Jurnal of the Acoustical Society of America, vol. 33, nr. 7, 1961;

30 CLA-2 CLARCSO, I., *Ultrasonics in the manufacture and repair of diamond wire drawing dies*, Ultrasonics, 1968;

31 CON-1 CONSTANTINESCU, GHE., *Teoria sonicității*, Ed. Academiei, București, 1985;

- 32 CRA-1 CRAWFORD, A., *A modulator ultrasonic cleaner*, Ultrasonics, 1964;
- 33 DĂR-1 DĂRĂBANȚ, A., IORGA, I., CIODARU, M., *Măsurarea zgomotului și vibrațiilor în tehnică*, Ed. Tehnică, București, 1983;
- 34 DRI-1 DRIMER, D., AMZA GHE., *Prelucrarea cu ultrasunete*, curs lito, I. P. București, 1984;
- 35 DRI-2 DRIMER, D., AMZA, GHE., SAVII, GHE., ICLĂNZAN, T., ATANASIU, N., CSAPO, GHE., CONDURĂȚEANU, E., *Utilizarea ultrasunetelor în prelucrarea materialelor*, curs lito, I. P. București, 1975;
- 36 DRI-3 DRIMER, D., AMZA, GHE., *Tehnologia materialelor. Prelucrări cu ultrasunete*, I. P. București, 1983;
- 37 DUM-1 DUMITRAȘ, C., OPRAN, C., *Prelucrarea materialelor compozite, ceramice și minerale*, Ed. Tehnică, București, 1994;
- 38 EDM-1 EDMONDS, P. D., DUNN, F., *Ultrasonics Methods of Experimental Physics*, vol. 19, California, Academy Press, 1981;
- 39 FIS-1 FISCHER, G., *Prelucrarea prin ultrasunete. Mașini unelte echipate cu un sistem de aspirație prin pompă de vid*, I. C. D. T., București, 1966;
- 40 FIS-2 FISCHER, G., *Prelucrarea cu ultrasunete pe mașini unelte echipate cu sistem de aspirație prin pompă de vid*, La pratique des Industries Mecaniques, nr. 5, Paris, 1964;
- 41 FRE-1 FREDERICK, J. R., *Ultrasonic Engineering*, New York, 1965;
- 42 FRI-1 FRIDMAN, V. M., KLOPOVSKZ, V. A., *The low liquid pressure acoustic hydrodynamic transducer and its in spraying processes*, Ultrasonics, nr. 14, 1976;
- 43 GAV-1 GAVRILAȘ, I., MARINESCU, R., I., *Prelucrări neconvenționale în construcția de mașini, vol. I*, Editura Tehnică, București, 1991;
- 44 GEZ-1 GEZBURG, A., A., *An ultrasonic machine tool for grinding glass flats*, Collection „The application of ultrasonics in engineering technology”, MOPI, 1960;
- 45 GHE-1 GHERSTAL, D., A., *Aparate cu ultrasunete*, Editura Tehnică, București, 1962;
- 46 GHE-2 GHERSTAL, D., A., FRIDMAN, V., M., *Ultrasvukovaya tekhnologhiceskaya apparatura*, Izdatelstvo Energhya, Moskva, 1976;
- 47 GOE-1 GOETZE, D., *Effect of vibration amplitude, frequency and composition of abrasive slurry on the rate of ultrasoniuc machining in keton tool steel*, Journal of the Acoustikal Society of America, No. 6, 1956;
- 48 GRA-1 GRAFF, K., F., *Results from recent studies in power ultrasonics at Ohio State University-* in Ultrasonics International, 1975, Conference Proccedings Session 2., High power ultrasonics general;

- 49 GRO-1 GROSS, A., *Erosion, ein altes Verfahren*, Ultraschall, R.F.G., 1988;
- 50 HAR-1 HARRIS, C., M., CREDE, C., E., *Șocuri și vibrații, vol. I și II*, Editura Tehnică, București, 1968;
- 51 HOR-1 HORBENKO, I., G., *Ultrazvuk v mašinostroenie*, Izdatelstvo mašinostroenie, Moskva, 1966;
- 52 HUL-1 HULST, A., P., *Macrosonics in industry*, 2 Ultrasonic welding of metals, Ultrasonics, 1972;
- 53 ICL-1 ICLĂNZAN, T., *Cercetări asupra parametrilor constructivi și funcționali la mașinile de prelucrat cu ultrasunete*, Teza de doctorat, Institutul Politehnic „Traian Vuia” Timișoara, 1975;
- 54 ICL-2 ICLĂNZAN, T., *Realizări în tehnica prelucrării materialelor prin ultrasunete*, Referat 1 doctorat, Institutul Politehnic „Traian Vuia” Timișoara, 1973;
- 55 ICL-3 ICLĂNZAN, T., *Probleme ale sistematizării tehnice în aplicațiile ultrasunetelor în tehnologie*, Sesiunea „Ultraacustica ‘86””, Academia R. S. R., Comisia de Acustică, Caietul 22, Timișoara, 1986;
- 56 ICL-4 ICLĂNZAN, T., *Prelucrarea ultrasonică a microorificiilor*, Sesiunea „Ultraacustica ‘86””, Academia R. S. R., Comisia de Acustică, Caietul 22, Timișoara, 1986;
- 57 ICL-5 ICLĂNZAN, T., *Tehnologii și echipamente cu ultrasunete*, Îndrumător pentru lucrări de laborator, Timișoara, 1993;
- 58 ICL-6 ICLĂNZAN, T., *Unele considerații privind proiectarea optimizată a concentratoarelor sistemelor ultrasonice rezonante*, A V-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 1989;
- 59 ICL-7 ICLĂNZAN, T., IGNEA, A., *Instrucțiuni tehnologice privind finisarea cu ultrasunete a filierelor pe mașinile de tip MFU-02*, Institutul Politehnic „Traian Vuia” Timișoara, 1978;
- 60 ICL-8 ICLĂNZAN, T., *Mașină experimentală de prelucrat cu ultrasunete*, Proiect tehnic, Timișoara, 1972;
- 61 ICL-9 ICLĂNZAN, T., *Mecanism de avans cu autoreglare pentru mașini de prelucrat cu ultrasunete*, Dosar O. S. I. M. nr. 73999, 1973;
- 62 ICL-10 ICLĂNZAN, T., *Mecanism de avans pentru mașini de prelucrat cu ultrasunete*, Timișoara, Brevet nr. 59972, 1975;
- 63 ICL-11 ICLĂNZAN, T., *Parametrii tehnologici ai prelucrării dimensionale cu ultrasunete*, Institutul Politehnic „Traian Vuia” Timișoara, 1974;
- 64 ICL-12 ICLĂNZAN, T., *Realizări în tehnica prelucrării materialelor prin ultrasunete*, Institutul Politehnic „Traian Vuia” Timișoara, 1974;

- 65 ICL-13 ICLĂNZAN, T., *Parametrii constructivi ai mașinilor de prelucrat cu ultrasunete și construcția lor*, Institutul Politehnic „Traian Vuia” Timișoara, 1975;
- 66 ICL-14 ICLĂNZAN, T., *Sisteme de avans ale mașinilor de prelucrat cu ultrasunete*, Institutul Politehnic „Traian Vuia” Timișoara, 1975;
- 67 ICL-15 ICLĂNZAN, T., SAVII, GH., NICA, M., *Mașină de prelucrat cu ultrasunete*, Timișoara, Brevet nr. 76442, 1981;
- 68 ICL-16 ICLĂNZAN, T., *Mașină de prelucrat și finisat cu ultrasunete*, Timișoara, Brevet nr. 8270, 1989;
- 69 ICL-17 ICLĂNZAN, T., TAMAȘ, M., *Concentrator pentru echipamente tehnologice cu ultrasunete*, Timișoara, Brevet nr. 91355, 1985;
- 70 ICL-18 ICLĂNZAN, T., TAMAȘ, M., TURAK, L., *Dispozitiv de prindere pentru prelucrări cu ultrasunete*, Timișoara, Brevet nr. 90771, 1985;
- 71 ICL-19 ICLĂNZAN, T., *L'utilisation de l'énergie ultrasonique en technologie*, Buletinul Științific și Tehnic al Universității Tehnice Timișoara, Tom 37 Mecanică, 1992;
- 72 ICL-20 ICLĂNZAN, T., *L'usinage par ultrasons des pieces en verre optique et en saphir syntetique*, Buletinul Științific și Tehnic al Universității Tehnice Timișoara, Tom 37 Mecanică, 1992;
- 73 ICL-21 ICLĂNZAN, T., BENOUDJID, A., MOUSS, L., *L'amélioration de l'usinage per ultrasons des pieces en silicium, germanium et ceramiques utilises dans la fabrication des composants electroniques*, Conference sur les semiconducteurs, Alger, 1982;
- 74 ICL-22 ICLĂNZAN, T., BENONAJID, A., *L'usinage per ultrasons la correctitude d'appréciation de l'efficience d'usinage*, Revue Science et Technologie Algerie, Alger, 1983;
- 75 ICL-23 ICLĂNZAN, T., SAVII, GH., *Utilaj pentru prelucrarea prin eroziune ultrasonică*, A II-a Conferință Națională de Mașini Unelte, București, 1976;
- 76 ICL-24 ICLĂNZAN, T., *Rolul parametrilor acustici în construcția sistemelor de avans ale mașinilor de prelucrat prin eroziune ultrasonică*, A II-a Conferință de Tehnologii Noi în Construcția de Mașini, Universitatea Galați, vol. III, 1977;
- 77 ICL-25 ICLĂNZAN, T., SAVII, GH., NICA, M., *Dispozitive și elemente de automatizare în prelucrarea ultrasonică dimensională*, Sesiunea de comunicări științifice, Tg.Mureș, 1980;
- 78 IPP-1 IPPOLITOV, G., M., *Abrasive tools and their use*, Mashgiz, 1959;
- 79 JAN-1 JANA, I., K., *Production of fine diameter holes on ultrasonic drilling machine*, Journal of the Institution of Engineers, India, 1973;

- 80 KAI-1 KAINTH, G., S., *Studiul prelucrării materialelor cu ajutorul ultrasunetelor*, Journal of Machine Tools, Londra, 1989;
- 81 KAS-1 KASHCHEYEV, V., N., *The sharpness of the angle on abrasive particles*, Stanki i instrument, nr. 8, Moskva, 1953;
- 82 KAZ-1 KAZANTSEV, N., F., MECHETNER, B., H., ROZENBERG, L., D., *Căile pentru ridicarea productivității și a preciziei de prelucrare cu ultrasunete*, Stanki i instrument nr. 4, 1966;
- 83 KAZ-2 KAZANTSEV, N., F., *Concerning the physics of the ultrasonic machining of brittle materials*, Collections „The application of ultrasonics in engineering technology”, Td. I. N. T. I., 1960;
- 84 KAZ-3 KAZANTSEV, N., F., *Ultrasonic Cutting, Physical Principles of Ultrasonic Tehnology, vol. 1*, Plenum Press, New York, 1973;
- 85 KAZ-4 KAZANTSEV, N., F., *Dependența productivității prelucrării ultrasonice de regimul de lucru*, Stanki I instrument nr. 3, 1963;
- 86 KAZ-5 KAZANTSEV, N., F., ROZENBERG, L., D., *The mechanism of ultrasonic cutting*, Ultrasonics vol. 3, London, 1965;
- 87 KIK-1 KIKUCHI, K., *Ultrasound Their Application in Science and Technology*, New York, 1989;
- 88 KIT-1 KITAGORODSKIY, Yu., I., KOGAN, M., G., *Ultrasonic equipment for technological use*, Collection „The application of ultrasonics in industry, Mashgiz, 1959;
- 89 KIT-2 KITAGORODSKIY, Yu., I., KOGAN, M., G., TUZLUKOVA, V., A., *A bench type ultrasonic machine tool type USZ-3 for machining hard and brittle materials*, Byulleten obnena proizvodstvenno-tekhnicheschim opytom nr. 6, 1958;
- 90 KON-1 KONOVALOV, E., G., CHACHIN V., N., SIDORENCO, Yu., A., *Vibrating grinding of hard alloys*, Collection „Scientific works of the Physical Technical Institute Akademia Nauk, Moskva, 1958;
- 91 KIT-1 KITAGORODSKIY, Yu., I., KOGAN, M., G., *A Study of surface finish the vibro-grinding of hard alloys*, Collected Scientific Works, 1959;
- 92 KOP-1 KOPS, L., *An ultrasonic machine tool*, Mechanik nr. 5, Moskva, 1959;
- 93 KOP-2 KOPS, L., *A study of ultrasonic machining*, Metal Working Production nr. 6, London, 1961;
- 94 KOP-3 KOPS, L., *Ultrasonic Machining and Machine Tools*, Warșav, 1961;
- 95 KRA-1 KRAJNIV, E., P., *Calculul parametrilor forței de presare la extrudarea cu ultrasunete*, Vestnik Masinostroenia, Moskva, 1980;

- 96 MAK-1 MAKAROV, L., O., *A procedure for designing ultrasonic exponential rod concentrators*, Colection „ The Aplication of ultrasonics in Industry”, Mashgiz, 1959;
- 97 MAK-2 MAKAROV, L., O., *The operation of concentrator under load*, Akusticeskiy Zhurnal nr. 3 și 5, Moskva, 1959;
- 98 MAR-1 MARINESCU, I., D., *Prelucrări cu ultrasunete*, Editura Tehnică, București, 1986;
- 99 MARK-1 MARKOV, A., I., OZEROVA, M., A., USTINOV, I., D., *Primenenie ultrasvuka pri almaznom vîglojivanii detalei*, Vestnik mašinostrenia nr. 9, 1973;
- 100 MARK-2 MARKOV, A., I., *Ultrasonic Machining of Intractable Materials*, Iliffe Books Ltd., London, 1966;
- 101 MARK-3 MARKOV, A., I., *Ultrasvukovoe rezanie trudno obrabotivaenîh materialov*, Mašinostroenie, Moskva, 1968;
- 102 MARK-4 MARKOV, A., I., VASIL'EV, V., I., LYAMIN, B., N., *The machining of hard materials by ultrasonic vibration*, Branch of VINITI, Moskva, 1957;
- 103 MARK-5 MARKOV, A., I., *The kinematics of ultrasonic machining*, Stanki i instrument nr. 10. 1959;
- 104 MARK-6 MARKOV, A., I., *The design and construction of vibrators for ultrasonics machining*, Collection „ The aplication of ultrasonics in industry, Mashgiz, 1959;
- 105 MARK-7 MARKOV, A., I., *A tehnological test procedure for ultrasonic machine tools*, Collection „ The aplication of ultrasonics in engineering tehnology, I. N. T. I., 1960;
- 106 MARK-8 MARKOV, A., I., *Metodhs of increasing the productivity of ultrasonic machining*, Branch of VINITI nr. 11, Moskva, 1959;
- 107 MARK-9 MARKOV, A., I., LYAMIN, B., N., *A metod of ultrasonic machining*, Patent nr. 109844, Moskva, 1957;
- 108 MARK-10 MARKOV, A., I., *A new method of raising the productivity of ultrasonic machining*, Vestnik mashinostroyeniye nr. 12, 1958;
- 109 MARK-11 MARKOV, A., I., *The influence of ultrasonic vibration on the process of cutting heat resistant alloy's*, Collection „ Industrial application of ultrasonics”, Kuibîșev, 1961;
- 110 MARK-12 MARKOV, A., I., *Cinematica prelucrării la dimensiune cu ajutorul ultrasunetului*, Stanki i instrument nr. 10, 1959;
- 111 MER-1 MERKULOV, L., G., *The teory and design of sectional concentrators*, Akusticeskiy Zhurnal vol. 5, 1959;
- 112 MET-1 METZUEV, B., N., *The ultrasonic machining of work-pieces of mineral-ceramic materials*, Collection „ Recent Developments in Electrical and Ultrasonic Machining of Materials, Leningrad, 1959;

- 113 MIL-1 MILLER, E., C., *Special Theory of ultrasonic machining*, Journal of Applied Physics, nr.2, London, 1957;
- 114 NAN-1 NANI, V., *Calculul și proiectarea concentratoarelor adaptoare de undă a sistemelor acustice rezonante*, Referat intern, Institutul Politehnic „Traian Vuia”, Timișoara, 1991;
- 115 NEP-1 NEPIRAS, E., A., *High power ultrasonics general*, Ultrasonics nr. 4 și 13, 1975;
- 116 NEP-2 NEPIRAS, E., A., *Ultrasonic machining and forming*, Ultrasonics vol. 2, London, 1964;
- 117 NEP-3 NEPIRAS, E., A., *Macrosonics in industry*, Ultrasonics, London, 1972;
- 118 NEP-4 NEPIRAS, E., A., *Very high energy ultrasonics*, British Journal of Applied Physics nr. 4, 1960;
- 119 NEP-5 NEPIRAS, E., A., *Ultrasonic machining Modern work shop technology part. 2*, Cleaver-Hume Press, 1959;
- 120 NEP-6 NEPIRAS, E., A., *Ultrasonics*, Ultrasonics no 4, London, 1964;
- 122 PAU-1 PAULESCU, GH., *Studiul concentratoarelor catenoidale la prelucrarea prin eroziune ultrasonică*, Ultraacustica '86, caietul 22, Timișoara, 1986;
- 123 PAU-2 PAULESCU, GH., NANU, A., *Unele cercetări privind calitatea suprafețelor prelucrate prin eroziune ultrasonică*, Ultraacustica '86, caietul 22, Timișoara, 1986;
- 124 PAU-3 PAULESCU, GH., *Studiul formei concentratoarelor ultrasonice asupra parametrilor acustici și tehnologici la prelucrate prin eroziune ultrasonică*, Simpozion „ Tehnologii Neconvenționale”, Timișoara, 1986;
- 125 PAU-4 PAULESCU, GH., *Aspecte ale studiului fenomenului de uzură și a preciziei dimensionale la prelucrarea materialelor fragile prin eroziune ultrasonică*, A III-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Sibiu, 1982;
- 126 PAU-5 PAULESCU, GH., *Contribuții la optimizarea tehnologiei de prelucrare dimensională cu unde ultrasonice a materialelor fragile și dure*, Teză de doctorat, Timișoara, 1987;
- 127 PAU-6 PAULESCU, GH., *Studiul dimensionării concentratoarelor ultrasonice compuse*, A VI-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, 1983;
- 128 RAZ-1 RAZNITSYN, M., A., *A machine tool for ultrasonic machining*, Inventators Certificate nr. 122955, 1959;

- 129 ROZ-1 ROZENBERG, L., D., KAZANŢEV, V., F., MAKAROV, L., O., CABINOVICI, D., F., *Ultrasvukoe rezanie*, Academii Nauc, Moskva, 1962;
- 130 ROZ-2 ROZENBERG, L., D., YAKHIMOVICI, D., F., *Ultrasonic machining of brittle materials*, Profizdat, 1961;
- 131 ROZ-3 ROZENBERG, L., D., YAKHIMOVICI, D., F., *The present state of ultrasonic method of cutting and future development problems*, Collection „ The use of ultrasonic vibration to study the properties off, to inspect, and to machine metals and alloys, Izdatelstvo Academii Nauk, Kiev, 1960;
- 132 ROZ-4 ROZENBERG, L., D., *High Intensity Ultrasonic Fields*, New York, London, Plenum Press, 1972;
- 133 ROZ-5 ROZENBERG, L., D., *Isticiniki moşnogo ultrazvuka*, Izdatelstvo Academii Nauka, Moskva, 1967;
- 134 RUGINĂ, I., BĂJEAN, N., WINTER, C., Creşterea eficienţei transductoarelor piezoceramice compuse utilizate în sistemele ultrasonice de înaltă intensitate, I.F.T.M. Bucureşti, Sesiunea de comunicări ştiinţifice „ Ultraacustica ‘86”;
- 135 SAV-1 SAVII, GH., ICLĂNZAN, T., MLADIN, E., EGLER, I., *Studiul experimental al blocurilor ultraacustice destinate instalaţiilor tehnologice cu ultrasunete*, Buletin Ştiinţific şi Tehnic, Institutul Politehnic „Traian Vuia”, Timişoara, 1973;
- 136 SAV-2 SAVII, GH., ICLĂNZAN, T., *Contribuţii la studiul maşinilor ultrasonice pentru prelucrarea materialelor*, A VI-a Conferinţă de Acustică, caietul 14, Academia R. S. R., Bucureşti, 1973;
- 137 SAV-3 SAVII, GH., ICLĂNZAN, T., ALIMPIE, I., *Echipamente tehnologice cu ultrasunete de utilizări industriale*, Sesiunea de Comunicări a Academiei R. S. R., Bucureşti, 1979;
- 138 SAV-4 SAVII, GH., ICLĂNZAN, T., *Determinarea experimentală a regimurilor optime de funcţionare a blocurilor ultrasonice a maşinilor de prelucrat prin ultrasunete*, Buletin Ştiinţific şi Tehnic, Institutul Politehnic „Traian Vuia” nr. 2, Timişoara, 1972;
- 139 SAV-5 SAVII, GH., ICLĂNZAN, T., VUCU, I., *Effect of tool shape and dimensions in the ultrasonic machining with abrasive slurry*, Ultrasonics, Timişoara, 1974;
- 140 SAV-6 SAVII, GH., ICLĂNZAN, T., MLADIN, E., EGLER, I., *Maşină de prelucrat cu ultrasunete*, Dosar O. S. I. M. nr. 74972, 1973;
- 141 SAV-7 SAVII, GH., ICLĂNZAN, *Unele consideraţii privind aplicarea vibraţiilor ultrasonice în industrie*, Sesiunea „Vibraţii în Construcţia de Maşini” vol. 2, Timişoara, 1975;
- 142 SCH-1 SCHEFFEL, M., ŞTIUCĂ, P., *Dispozitive cu ultrasunete*, vol I şi II, Editura Tehnică, Bucureşti, 1989;

- 143 TAL-1 TALOI, O., *Optimizarea proceselor tehnologice*, Editura Academiei R. S. R., București, 1987;
- 144 TEU-1 TEUMIN, I., I., *Ultrasonic vibratory systems*, Mashgiz, 1959;
- 145 VAI-1 VAINSTOK, I., S., *Ultrasunetele și utilizarea lor în construcția de mașini*, Editura Tehnică, București, 1959;
- 146 VLA-1 VLADIMIROV, A., Yu., *An ultrasonic machine tool for machining hard and brittle materials*, Izvestiya Vuzov Priborostroyeniye nr. 3, Moskva, 1959;
- 147 VUC-1 VUCU, I., *Cercetări asupra prelucrării dimensionale ultrasonice cu suspensie abrazivă a unor ferite*, Teză de Doctorat, Timișoara, 1977;
- 148 VUC-2 VUCU, I., *Studiul prelucrabilității unor ferite*, Referat intern, Institutul Politehnic „Traian Vuia” Timișoara, 1975;
- 149 VUC-3 VUCU, I., *Realizări în domeniul aplicării procesului de prelucrare dimensională ultrasonică*, Referat intern, Institutul Politehnic „Traian Vuia”, Timișoara, 1976;