

MINISTERUL ÎNVĂȚĂMÂNTULUI
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ

Ing. **GABRIEL MĂLAIMARE**

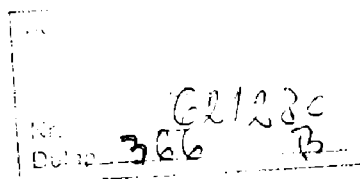
TEZĂ DE DOCTORAT

**CONTRIBUȚII LA PRELUCRAREA
MATERIALELOR FRAGILE ÎN CÂMP
ULTRASONIC CU MASĂ ROTATIVĂ**

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

Conducător științific:
Prof.dr.doc.șt.ing.dhc. **AUREL NANU**

TIMIȘOARA
1998





CUVÂNT ÎNAINTE

În diferite domenii ale tehnicii se utilizează materiale cu caracteristici mult diferite de ale metalelor și aliajelor curente, a căror prelucrare dimensională prin metode și procedee tradiționale devine din ce în ce mai dificilă sau chiar imposibilă. Un astfel de exemplu sunt materialele cu fragilitate și duritate ridicată : sticla, cuarțul, safirul, rubinul, materialele ceramice, germaniul, materialele compozite și altele, majoritatea fiind neelectroconductoare, deci imposibil de prelucrat prin procedee electrofizice.

Materialele compozite și ceramicele moderne își extind domeniul de aplicație datorită proprietăților lor superioare cum ar fi : rezistență ridicată la temperaturi înalte, rezistență la agenții chimici sau rezistență la abraziune.

Aplicațiile diverselor procedee la prelucrarea ceramicelor și a unor materiale compozite indică faptul că prelucrarea abrazivo-cavitațională asigură performanțe tehnologice superioare în condițiile în care se menține a presiune statică mică și un pericol scăzut de deteriorare a suprafeței. Din încercările experimentale efectuate se constată că prelucrarea ultrasonică combinată cu o mișcare suplimentară de rotație conduce la obținerea unor rezultate superioare la prelucrarea orificiilor sau a fantelor.

S-au efectuat cercetări experimentale pentru a extinde prelucrarea cu mișcare de rotație și la suprafețe plane, dar numai prin rotirea blocului ultrasonic (transductor-concentrator-sculă), metodă care prezintă neajunsuri referitoare la alimentarea cu energie electrică a transductorului și la modalitatea de răcire a sistemului electromecanic, motiv pentru care cercetările au fost limitate.

Prelucrarea ultrasonică cu masă rotativă se poate aplica ușor și sunt eliminate neajunsurile prezentate la varianta anterioară, dar se pune problema elucidării mecanismului de îndepărtare de material în condițiile reale de aplicare a mișcării suplimentare de rotație.

Având în vedere stadiul actual și perspectivele viitoare de dezvoltare a tehnologiilor neconvenționale, în general, și în mod special a prelucrării dimensionale prin eroziune în câmp ultrasonic a materialelor fragile lucrarea își propune să rezolve următoarele probleme :

1. Elucidarea mecanismului de prelucrare ultrasonică în condițiile utilizării unei mișcări suplimentare de rotație.
2. Stabilirea expresiilor matematice pentru calculul unor parametri tehnologici (productivitatea prelucrării, uzura sculei, calculul sculei).
3. Ierarhizare principalilor parametri din proces.
4. Influența uzurii sculei asupra stabilității procesului.

Pe această cale, adresez cele mai sincere mulțumiri conducătorului științific, dl.prof.dr.doc.ing.dhc **AUREL NANU** pentru solitudinea și îndrumarea de înaltă competență de care am beneficiat precum și pentru sprijinul efectiv acordat pe toată perioada de pregătire teoretică și de elaborare a tezei.

Mulțumesc, în mod deosebit, d-lui ing. *DAN VIDRAȘCU* de la întreprinderea STIMEL SA Timișoara pentru ajutorul acordat în realizarea standului experimental și asigurarea unei asistențe tehnice permanente pentru efectuarea, în bune condiții, a programului de experimentări. Deasemenea mulțumesc colectivului CTC, de la aceeași întreprindere, care m-a sprijinit, încurajat și ajutat la realizarea probelor și a încercărilor experimentale.

Autorul aduce mulțumiri specialiștilor din instituțiile consultate, în special colegilor de la Catedra TEHNOLOGIA MECANICĂ din Facultatea de Mecanică de la Universitatea Politehnica din Timișoara pentru ajutorul continuu și dezinteresat pe care l-au acordat.

Autorul,
Ing. Gabriel MĂLAIMARE

ABREVIERI FOLOSITE

A -amplitudinea oscilațiilor acustice[μm]; **A₁,A₂** -coeficienți de rezistență ai materialelor abrazive ; **c_F** -exponent care ține seama de raportul dintre rezistența mecanică a piesei și numărul de granule abrazive aflate pe unitatea de suprafață; **d** -diametrul granulei abrazive [μm]; **D** -diametrul sculei [mm]; Δ - diferență a două mărimi; **E_c**-energia cinetică [J] ; **EFC** –experiment factorial complet; **EFF** –experiment factorial fracțional; **f** -frecvența oscilațiilor acustice [Hz]; **f_o** -frecvența de rezonanță a sistemului oscilator [Hz]; **f_r** - frecvența de rotație a mesei [Hz]; **F** -forța cu care particula abrazivă lovește piesa [N]; **F_i** - forța de impuls mecanică [N]; **F_m** -forța maximă de lovire a granulelor abrazive [N]; **F_s** -forța statică de apăsare [gf]; **f(z)** -legea de distribuție Gauss a particulelor abrazive în spațiul de lucru ; **GA** -granulă abrazivă; **h_p** -adâncimea de pătrundere a granulei abrazive în piesă la o lovire [μm]; **h_s** -adâncimea de pătrundere a granulei abrazive în piesă la o lovire [μm]; **H_p** -duritatea piesei [daN/mm^2]; **H_s** -duritatea sculei [daN/mm^2]; **H_v** -duritate Vickers pentru piese [daN/mm^2]; **I_a** -intensitatea unei acustice [W/m^2]; **k** -constanta lui Diacenko, constantă ce înglobează influența factorilor din proces necuprinși în relație; **k₁** -constantă de proporționalitate; **k₂** -coeficient care exprimă gradul de acoperire a suprafeței sculei cu granule abrazive; **k₁₁** -factor care depinde de duritatea granulei abrazive și a piesei; **L** -lucrul mecanic efectuat de o granulă abrazivă [J]; **m** -masa scului [g]; **m_g** -masa unei granule abrazive [μg]; **n** -numărul de granule abrazive care lovesc piesa într-o perioadă; **n_g** -numărul de granule abrazive aflate la un moment dat în spațiul dintre piesă și sculă; **n_o** -numărul de granule abrazive aflate în unitatea de suprafață; **OP** –obiect de prelucrat, piesă, semifabricat; **OT** –obiect de transfer, sculă; ω -pulsția unei acustice [s^{-1}]; **q** –capacitatea de ecruisare a piesei; **Q** –productivitatea prelucrării [mm^3/min]; **P** –puterea ultrasunetului la ieșirea din transductor [W]; **P_c** –puterea ultrasunetului la intrarea în transductor [W]; **R** –raza sculei [mm]; **R_m** –rezistența mecanică la deformare [daN/mm^2]; ρ_a –densitatea materialului abraziv [μm]; **S** –suprafața de contact dintre sculă și piesă [mm^2]; **T** –perioada unei acustice [s]; **t** –timp de lucru [s]; **t_a** –timp activ, format din mai mulți timpi de impuls [s]; **t_i** –timpul

unui impuls [s]; t_p – timp de pauză [s]; v – viteza undei acustice [mm/s]; v_p – viteza de prelucrare [mm/min]; V – volumul de material prelevat [mm³]; V_g – volumul granulei abrazive [μm^3]; V_u – volumul de material prelevat în unitatea de timp, productivitate [mm/min]; x – interstițiul dintre sculă și piesă [μm]; z – dimensiunea maximă a granulei abrazive din granulația folosită [μm]; \bar{z} – media aritmetică a granulelor abrazive a granulației folosite [μm];

CUPRINS

Cuvânt înainte.....	1
Abrevieri folosite.....	3
Cuprins.....	5
1.ASPECTE PRIVIND UNDELE ULTRASONICE.....	7
1.1. Introducere.....	7
1.2. Domenii de utilizare a ultrasunetelor.....	8
1.3. Efecte ale câmpului ultrasonic.....	8
1.3.1. Efectul de înmuiere acustică.....	8
1.3.2. Efectul de durificare acustică.....	11
1.4. Efectul termic.....	13
1.5. Efectul de reducere a frecării de contact.....	13
1.6. Cavitația acustică.....	14
1.7. Efectul spargerii peliculei de oxizi.....	15
1.8. Efectul chimic.....	16
2. BAZELE TEORETICE ALE PRELUCRĂRII MATERIALELOR PRIN EROZIUNE ABRAZIVO-CAVITAȚIONALĂ ÎN CÂMP ULTRASONIC. MECANISMUL PRELUCRĂRII.....	18
2.1. Domenii de aplicativitate.....	18
2.2. Procesul de prelucrare prin eroziune în câmp ultrasonic.....	22
2.2.1. Prelucrarea cu suspensie abrazivă.....	22
2.2.2. Prelucrarea fără suspensie abrazivă.....	24
2.3. Mecanismul prelucrării prin eroziune în câmp ultrasonic.....	25
3. PRODUCEREA ȘI TRANSMITEREA ULTRASUNETELOR.....	38
3.1 Generalități.....	38
3.1.1. Cerințe ale sistemului ultrasonic.....	40
3.2. Tipuri de generatoare de ultrasunete.....	41
3.2.1. Generatoare rotative.....	43
3.2.2. Generatoare cu tuburi electronice.....	44
3.2.2.1. Generatoare cu tuburi electronice, cu excitație independentă.....	44
3.2.2.2. Generatorul autoexcitat cu reacție inductivă.....	46
3.2.3. Generatoare cu semiconductori.....	48
3.3. Acordarea automată a generatorului la frecvența de rezonanță a blocului acustic.....	50
3.4. Tipuri de transductoare.....	52
3.4.1. Materiale folosite în construcția transductoarelor.....	52

3.4.1.1. Materiale piezoceramice.....	52
3.4.1.2. Materiale magnetostrictive.....	58
3.4.2. Transductor piezoelectric.....	62
3.4.3. Transductoare magnetostrictive.....	70
3.5. Concentratori acustici.....	74
3.6. Elemente de fixare și adaptare acustică.....	78
3.7. Scule folosite la prelucrarea în câmp ultrasonic.....	81
3.8. Mediul de lucru.....	82
3.8.1. Particule abrazive.....	82
3.8.2. Lichidul delucru.....	84
4. MODELAREA MATEMATICĂ LA PRELUCRAREA DIMENSIONALĂ ÎN CÂMP ULTRASONIC.....	85
4.1. Ipoteze asupra procesului de prelucrare prin eroziune în câmp ultrasonic cu suspensie abrazivă.....	85
4.2. Ipoteze asupra procesului de prelucrare prin eroziune în câmp ultrasonic cu suspensii abrazive și masă rotitoare (sculă rotitoare).....	92
4.3. Ipoteze asupra procesului de prelucrare prin eroziune în câmp ultrasonic fără suspensie abrazivă.....	94
5. MODELAREA ÎN VEDEREA OPTIMIZĂRII PROCESULUI DE PRELUCRARE DIMENSIONALĂ ÎN CÂMP ULTRASONIC.....	97
5.1. Prezentarea instalației.....	97
5.2. Factorii de influență și funcțiile obiectiv la prelucrarea materialelor fragile prin eroziune în câmp ultrasonic.....	109
5.3. Ierarhizarea factorilor de influență.....	110
5.3.1. Generalități.....	110
5.3.2. Strategia clasică.....	116
5.3.3. Strategia modernă.....	124
5.4. Modelarea prin experiment factorial complet.....	128
5.5. Modelarea matematico-experimentală a productivității.....	143
5.6. Modelarea matematică prin EFF a uzurii sculei la prelucrarea în câmp ultrasonic.....	147
6. CONCLUZII FINALE.....	159
6.1. Concluzii în domeniul cercetărilor fundamentale.....	159
6.2. Concluzii în domeniul cercetării aplicative.....	160
BIBLIOGRAFIE.....	162
ANEXE.....	168



ASPECTE PRIVIND UNDELE ULTRASONICE

1.1. Introducere

Datorită dezvoltării rapide a industriilor: construcțiilor de mașini, a electrotehnicii, electronicii, mecanicii fine, opticii, aeronauticii și altele s-au dezvoltat și s-au pus la punct o serie de "tehnologii neconvenționale" de prelucrare dimensională prin electroeroziune, prin eroziune electrochimică, cu laser, cu fascicul de electroni și nu în ultimul rând cu ultrasunete. Tehnologiile neconvenționale au apărut și continuă să se dezvolte ca o necesitate obiectivă, ele completând neajunsurile tehnologiilor convenționale tradiționale referitoare la prelucrarea unor materiale cu proprietăți mecanice deosebite sau la obținerea de piese de complexitate ridicată /2, 29, 32, 55, 57/.

Apariția și dezvoltarea procedului de prelucrare dimensională cu ultrasunete se bazează pe faptul că permite prelucrarea, în condițiile unor indicatori tehnico-economici superiori, a materialelor noi, cu proprietăți speciale ca: diamante, carburi metalice, safire, materiale mineralo-ceramice, policristale, sticle, oțeluri inoxidabile, refractare, materiale magnetice, materiale din care se pot confecționa piese de mărimi și configurații variate.

Prelucrarea cu energie ultrasonică și-a găsit aplicații foarte diverse, în diferite ramuri ale tehnicii, datorită în special proprietăților pe care le prezintă ultrasunetele:

- lungimea de undă mică;
- accelerații foarte mari ale particulelor (10^5 .g);
- posibilitatea de direcționare a energiei ultrasonice în locuri greu accesibile;
- posibilitatea de concentrare și focalizare a energiei într-un spațiu limitat.

Cu toate acestea procedul nu este suficient de bine studiat și nu a atins un domeniu de aplicare suficient de vast ca și alte procedee neconvenționale.

Prelucrarea dimensională prin eroziune abrazivă ultrasonică este de neînlocuit într-o serie de operații cum ar fi:

- rectificarea filierelor de tras sârme;
- realizarea de alezaje în piese fragile mineraloceramice;
- rectificarea unor alezaje în piese realizate din “materiale noi” prin sinterizare.

1.2. Domenii de utilizare a ultrasunetelor

Aplicațiile la care energia ultrasonică utilizată este suficient de mare pentru a produce modificări structurale ale mediului în care se propagă și modificări dimensionale, poartă denumirea de aplicații active sau tehnologice (tabelul 1.1) /46/.

Aplicațiile la care ultrasunetul are o intensitate relativ scăzută și nu poate provoca modificări structurale și dimensionale, îndeplinind doar rolul de culegere de informații privind obiectul examinat poartă denumirea de aplicații pasive (tabelul 1.2) /46/.

1.3. Efecte ale câmpului ultrasonic

Studiul efectelor ultrasunetelor nu se limitează doar asupra metalelor, ci în ultima vreme tot mai mulți cercetători își orientează cercetările și asupra altor medii solide, nemetalice, cum ar fi: masele plastice, rocile, materialele pulverulente (metalice sau nemetalice), precum și asupra mediilor lichide. În cele ce urmează se vor prezenta unele specte, cele mai importante, ale efectelor ultrasunetelor în medii solide și lichide /4, 10, 16, 29/.

1.3.1. Efectul de înmuiere acustică

Acesta constă în reducerea tensiunii statice de deformare plastică pe măsura creșterii densității de energie acustică. S-au efectuat numeroase încercări experimentale dintre care cele mai bune rezultate s-au obținut prin activarea cu ultrasunete a unor probe supuse la tracțiune, operație care s-a realizat în două variante:

- activare intermitentă;
- activare continuă.

Prin aplicarea primei variante, s-a constatat că sarcina statică exterioară, care menține curgearea în proba supusă încercării, scade brusc până la 40% din valoarea ei nominală, iar prin întreruperea activării ultrasonice sarcina statică exterioară revine la valoarea nominală.

Tabelul 1.1 Aplicații active ale ultrasunetelor în tehnică

APLICATII ACTIVE	IN SOLIDE	Prelucrări prin aşchiere	- găurire - strunjire - frezare - broşare - ascuțire - rectificare, etezire
		Prelucrări prin deformare plastică sau cu tăişuri asociate	- rulare - forfecare - ambutisare - forjare - ştanşare - laminare - tragere - extrudare
		Prelucrări de materiale aflate în stare lichidă sau solidă	- turnare - sudare - lipire - tratament termic - acoperiri galvanice - obținere de materiale
		In combinație cu alte procedee neconvenționale	
	IN LICHIDE	Filtrare	
		Curățire	
		Cristalizare	
		Dizolvare	
		Acțiune asupra proceselor chimice	
		Obținerea emulsiilor	
		Etc	
	IN GAZE	Uscare	
		Precipitarea cețurilor. Fumurilor	
		Purificare	
	ALTE DOMENII	Medicină, farmacie	
		Biologie	
		Fitologie	
		Meteorologie	
		Cercetări științifice	

Tabelul 1.2 Aplicații pasive ale ultrasunetelor în tehnică

APLICAȚII PASIVE	IN SOLIDE	Mărimi fizice și de rezistență	Reziliența Densitate Modul de elasticitate Rezistență
		Mărimi geometrice	Grosimi Granulație Det. macrostructurilor Dimensiuni, distanțe
		Defectoscopie ultrasonică	
	IN LICHIDE	Mărimi fizice	Vâscozitate Compresibilitate Temperatură
		Mărimi geometrice, hidraulice și cinematice	Debite Nivele Viteză
	IN GAZE	Mărimi fizice	Concentrații Temperatura Difuzie Compresibilitate
		Mărimi geometrice	Volume Viteze Presiuni Distanțe
	ALTE DOMENII	Cercetări științifice	
		Meteorologie	
		Medicină, biologie	
		Telecomunicații	

La utilizarea variantei a doua s-a pus în evidență o scădere continuă a sarcinii statice exterioare, deci o coborâre a întregii curbe. Efectul de înmuiere acustică poate fi comparat cu efectul datorat încălzirii probei până la o anumită valoare, lucru evidențiat pe probele din aluminiu, prezentate în figurile 1.1 și 1.2.

Din punct de vedere cantitativ, între cele două energii există o diferență destul de mare. Energia acustică este absorbită numai în acele regiuni din rețeaua cristalină în care se realizează mecanismul de deformare plastică, pe când energia termică este distribuită omogen, prin toți atomii cristalini incluzând și atomii care nu participă la procesul de deformare plastică / 2, 5, 9, 29/.

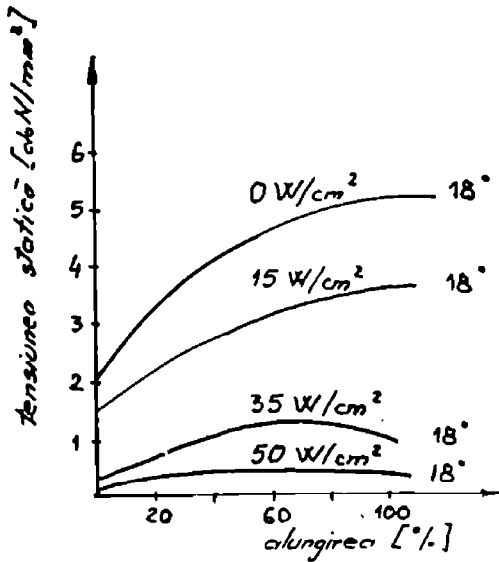


Figura 1.1. Dependenta tensiune-deformație funcție de activarea ultrasonică.

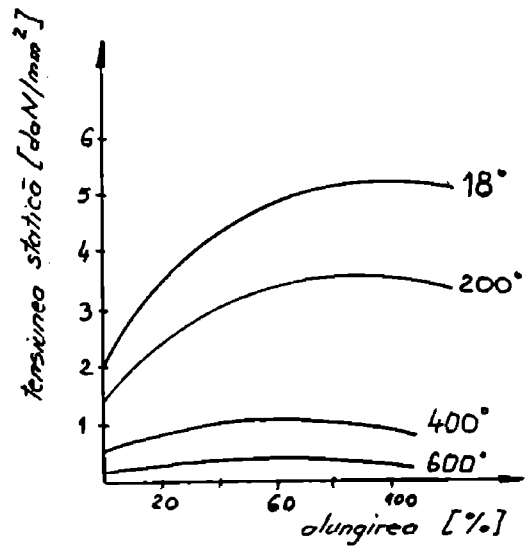


Figura 1.2. Dependenta tensiune-deformație funcție de variația energiei termice.

Efectul de înmuiere menționat a fost observat la mai multe metale: titan, wolfram și oțel (pentru care tensiunea zero s-a obținut la densități de putere de 80-100 W/cm²).

1.3.2. Efectul de durificare acustică

Acesta apare ca un efect rezidual, după activarea cu ultrasunete la intensități mai mari, specifice naturii fiecărui material în parte. Efectul constă în creșterea substanțială a tensiunii statice exterioare necesară deformării plastice a unor metale și aliaje activate în prealabil cu ultrasunete, concomitent cu modificarea unor proprietăți ale structurii.

Din figura 1.3 se observă că, aplicând unui material (de exemplu zinc), o energie ultrasonică cu o intensitate de 5 W/cm², în punctul **a** apare reducerea tensiunii statice exterioare până în punctul **b**. Pe porțiunea **b-c** s-a realizat deformarea plastică în prezența ultrasunetelor, pentru ca după deconectarea activării cu ultrasunete tensiunea statică exterioară să revină la valoarea nominală, deci în punctul **d**. La această intensitate acustică a avut loc fenomenul de înmuiere acustică.

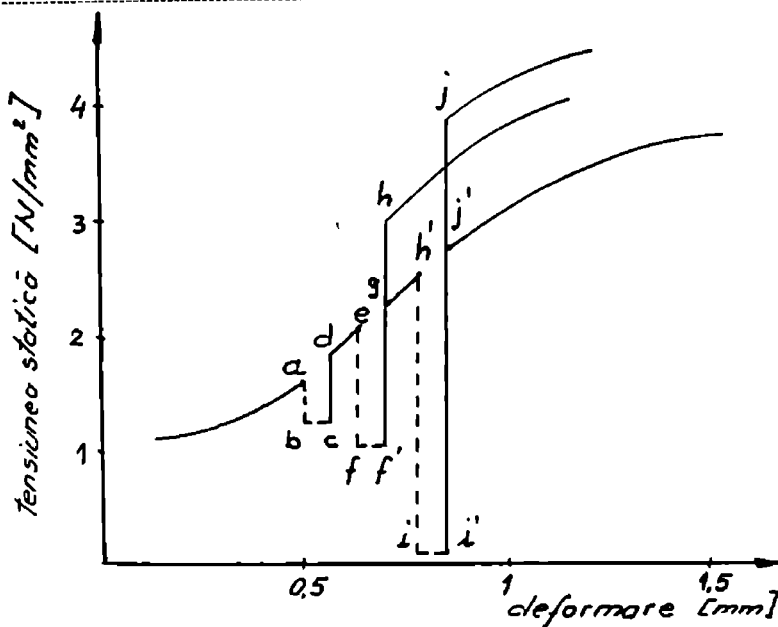


Figura 1.3. Dependenta dintre tensiunea statică și deformație- prin folosirea energiei ultrasonice.

Aplicând o intensitate de $15 W/cm^2$, în punctul e tensiunea statică exterioară reducându-se mai mult, ajungând în punctul f , iar la deconectarea energiei ultrasonore nu s-a mai revenit la valoarea nominală, adică punctul g ci a atins o valoare mai mare, ajungând până în punctul h . Curba continuă după profilul $h-h'$. Creșterea tensiunii statice cu valoarea corespunzătoare punctelor g și h se datorește modificării permanente a unor proprietăți mecanice sub influența ultrasunetelor, adică a avut loc un fenomen de durificare acustică.

Se continuă experimentul din h' , cu o intensitate de $25 W/cm^2$, astfel încât tensiunea statică exterioară atinge valoarea de la punctul i . Are loc fenomenul de deformare plastică în prezența energiei ultrasonore și prin întreruperea ei se atinge nivelul de la punctul j , curba continuându-și configurația $j-j'$.

La aplicarea unor intensități acustice de peste $25 W/cm^2$ (valoarea caracteristică critică a materialului) se produce ruperea monocristalului de material utilizat (de zinc) /3, 4, 9, 29, 31, 46, 55/.

Rezultatele cercetărilor privind durificarea materialelor cu ultrasunete sunt explicate pe baza concepțiilor teoriei dislocațiilor. La aplicarea unor nivele mari de energie acustică, gradul de activare a dislocațiilor blocate și de formare de noi dislocații atinge o valoare suficientă pentru a realiza, în

macrovolumele epruvetei, procese elementare de deformare plastică. În material se produce o creștere a densității de dislocații, formându-se un însemnat număr de obstacole datorită interacțiunii particulelor mobile cu cele imobile precum și a nodurilor blocate de vacanțe, astfel că după terminarea (întreruperea) activării ultrasonore în metal se fixează o structură specifică de dislocații.

Supunând epruveta, cu o astfel de structură, la încercarea de tracțiune se constată că deformarea se produce la tensiuni statice mai mari în comparație cu epruvetele confecționate din același material dar neactivate ultrasonic. Diferența de tensiune se datorează efectului de durificare acustică a metalului.

Energia ultrasonoră se distinge de energia termică prin faptul că aplicarea ultrasunetelor la metale conduce la durificarea lor în timp, efect sesizat numai la intensități acustice mai mari, în timp ce energia termică determină doar o înmuiere continuă a acestora.

1.3.3. Efectul termic

În timpul încercărilor experimentale efectuate, s-a observat o încălzire considerabilă a epruvetelor, în special în ventre, zone care au devenit incandescente. Cercetările întreprinse au evidențiat faptul că dezvoltarea efectelor termice depinde de intensitatea undelor ultrasonore aplicate și de tipul de activare folosit. În acest mod s-a determinat legătura directă dintre nivelul energiei ultrasonore introdusă în epruvetă și energia termică rezultată ca urmare a acțiunii energiei ultrasonore /9,29,31,46,55/.

Absorbția preferențială a energiei ultrasonore, în anumite zone, cum ar fi cele afectate de dislocații, precum și limitele de separare a cristalelor în metale, dă posibilitatea ca energia termică rezultată să fie localizată.

Până în prezent explicațiile acestui fenomen sunt nefundamentate în întregime, existând, în acest sens păreri contradictorii. Efectul a fost evidențiat în timpul încercărilor de tracțiune sau compresiune a unor metale, ajungându-se la ipoteza că s-ar datora fenomenului de histerezis provocat de tensiunile mecanice în mediul solid activat ultrasonic, în condițiile utilizării a unor intensități ultrasonore a căror amplitudine depășește anumite valori considerate limită.

1.3.4. Efectul de reducere a frecării de contact

În majoritatea cazurilor cercetările întreprinse au scos în evidență faptul că sub acțiunea ultrasunetelor are loc o reducere substanțială a frecării de contact la interfața sculă-mediul solid. Mecanismul reducerii frecării de contact între două suprafețe activate ultrasonic a fost mai amplu studiat în procesele de prelucrare prin deformare plastică a metalelor /3, 4, 9, 29, 39, 46, 55/.

Efectele de suprafață și mecanismele de producere a lor au fost analizate de diverși cercetători, astfel că acestea sunt bine conturate din punct de vedere fenomenologic și corelate cu rezultatele cercetării experimentale.

Datele teoretice și experimentale obținute au condus la concluzia că reducerea frecării de contact se datorează atât schimbării coeficientului de frecare, cât și a modificării poziției vectorului frecării. S-a stabilit că, coeficientul de frecare se modifică în condițiile existenței unui câmp ultrasonic, datorită pompării de lubrifianți între suprafețe, a dezvoltării următorilor factori: activarea chimică a lubrifianților, separarea suprafețelor și înmuierea sau topirea asperităților acestora. Ponderea acestor factori nu a fost încă stabilită, dar funcție de procesul tehnologic considerat s-au evidențiat principalii factori de influență. La tragerea țevilor în câmp ultrasonic, cei mai importanți factori sunt: pomparea lubrifianților și înmuierea sau topirea asperităților. Datorită activării cu ultrasunete a suprafețelor în contact, există și se creează noi microfisuri, care se închid și se deschid alternativ, fapt ce produce absorbția și apoi pompare spre exterior a lubrifianților, adică între suprafețe în contact /9, 29, 31, 46, 55/.

Interesul cercetătorilor, în clarificarea deplină a efectului de reducere a frecării, a condus la definirea unui alt efect denumit inversarea vectorului de frecare. Acest fenomen este acceptat de cercetători ca fiind o cauză principală de reducere a forței de deformare în procesele de prelucrare ultrasonică a metalelor. Efectul constă în schimbarea direcției acestui vector, în timpul deformării, sau din reducerea componentei acestuia, în direcția frecării, în acest mod sarcina necesară deformării devine mai mică.

Efectul de inversare a frecării se interpretează ca fiind determinat de faptul că și în timpul procesului de deformare, în câmp ultrasonic, viteza sculei depășește viteza piesei de prelucrat, ceea ce conduce la schimbarea direcției vectorului de frecare, deci, implicit reducerea sau chiar anularea componentei sale care se opune mișcării.

1.3.5. Cavitația acustică

În decursul cercetărilor experimentale s-a constatat fenomenul de rupere și desfacere imediată a lichidului sub acțiunea unor tensiuni suficiente de mari sau a unor variații rapide și bruște de presiune. Ca urmare a distrugerii bulelor de cavitație apărute se formează o undă de șoc a cărei intensitate crește cu creșterea presiunii acustice. Odată cu întreruperea acțiunii energiei ultrasonore lichidul revine la starea sa normală având astfel loc schimbări în structura sa moleculară /9,29,55/.

Sub acțiunea schimbărilor de presiune, distanța medie dintre particulele lichidului variază până la atingerea valorii necesare ruperii acestuia. Ruperea se produce în momentul în care presiunea acustică este negativă și

anulează presiunea corespunzătoare forțelor de coeziune dintre particulele lichidului. Ea nu se produce simultan în toată masa lichidului, ci numai în punctele de slabă rezistență, generate de neomogenități numite germeni de cavitație.

S-a constatat că sub acțiunea undelor ultrasonore bula de cavitație își mărește volumul, prin umplerea cu aerul sau vaporii rezultați din evaporare, care se găseau în locul respectiv, în momentul formării acesteia. Bula de cavitație se dezvoltă până la o anumită mărime, în funcție de presiunea locală și de frecvența ultrasunetelor. După dilatarea relativ lentă a bulei de cavitație se produce comprimarea rapidă urmată de distrugerea instantanee a acesteia.

Există mai multe ipoteze referitoare la mecanismul formării germenilor de cavitație în masa unui fluid: fluctuațiile calorice care au loc în interiorul lichidului, și care, pot da naștere unor bule mici umplute cu vaporii; radiațiile ionizate care, pot induce germeni cavitaționali în lichidele aflate la temperaturi aproape de temperaturile critice ale acestora.

Cavitația acustică într-un lichid produce o serie de efecte de natură mecanică, acustică, optică și chimică. Efectele menționate stau la baza a numeroase aplicații tehnice legate de prelucrarea dimensională a materialelor, curățirea, degresarea și debavurarea pieselor în câmp ultrasonic etc. Până în prezent nu s-a putut da o explicație exactă cu privire la originea germenilor de cavitație și a condițiilor de existență a acestora.

1.3.6. Efectul spargerii peliculei de oxizi

Acest efect își are cea mai mare aplicație în curățirea cu ajutorul ultrasunetelor. Acțiunea ultrasunetelor pentru curățirea suprafețelor solide este un proces complex ce se bazează pe efectele pe care le produc acestea atunci când se propagă în lichidurile în care sunt imersate piesele. Cercetările întreprinse în acest domeniu au demonstrat că la baza procesului de curățire este determinat, în principiu, de fenomenul de cavitație ultrasonică și în foarte mică măsură acțiunea forțelor acceleratoare produse de ultrasunete /9, 29, 36, 55/.

Se constată că fenomenul de fisurare și dezlipire a oxizilor, ruginei, murdăriei și a altor elemente de suprafață se produce în mai multe etape (figura 1.4):

a) producerea bulelor de cavitație care vibreză în apropierea stratului de oxizi, în porii stratului de oxizi sau în golurile ivite între straturile de oxizi și suprafața piesei;

b) dezvoltarea continuă a bulelor produse, care dau naștere la forțe care depășesc forțele de adeziune dintre particulele de oxizi și suprafața piesei, având ca efect desprinderea peliculei și chiar îndepărtarea ei.

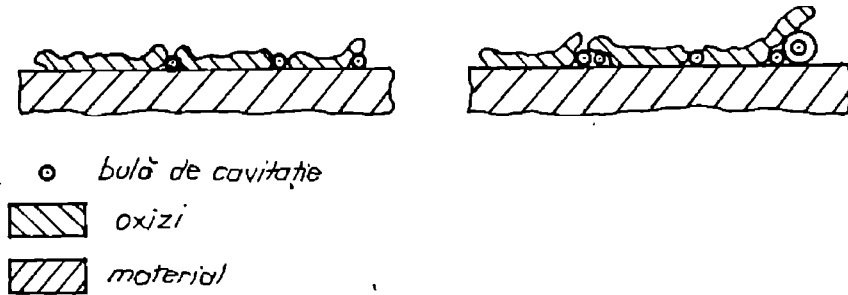


Figura 1.4. Modalități de fisurare și dezlipire a oxizilor.

Datorită efectului de cavitație, deci a undei de șoc care se produce, se produce fisurarea peliculei de oxizi. Experiențele au arătat că prin mișcarea bulelor cavitaționale mici, se pot crea bule de cavitație mari, între care acționează forțe de atracție sau forțe de respingere. Prin atracție, bulele fuzionează, formând bule de dimensiuni mai mari, care în urma imploziei creează unde de șoc, caracterizate de presiuni ale căror intensități depind de numărul de bule mici care au intrat în componențele bulelor mari.

1.3.7 Efectul chimic

Prezența unui câmp ultrasonic, de intensitate mare, într-un mediu lichid produce o serie de efecte chimice ca oxidări, reduceri, polimerizări, depolimerizări, sinteze. Influența ultrasunetelor se poate manifesta fie printr-o accelerare a reacției chimice cunoscute, fie prin producerea unei anumite reacții, care în alte condiții nu se produc. Sub influența ultrasunetelor, apa se descompune în atomi de hidrogeni și în radicali liberi, conform reacției:



Imediat după implozia bulei de cavitație, atomii de hidrogen și radicalii liberi trec în mediul apos, unde pot intra în reacție cu diferite substanțe pe care le conține lichidul. În felul acesta pot avea loc fie procese de reducere, fie procese de oxidare. Se constată că efectele chimice se manifestă numai în lichidele în care se găsesc dizolvate gaze, de a căror natură depinde cinematica de reacție.

Producerea unor reacții chimice este legată de fenomenul de cavitație, deci, este necesară o anumită intensitate acustică limită, pentru ca transformările chimice să poată avea loc. Dacă se depășește pragul intensității

acustice limită, reacția chimică începe să se producă, ea intensificându-se pe măsură ce presiunea acustică crește. Depășindu-se, însă, o anumită valoare a acestei presiuni, pentru care procesul chimic are loc cu maximum de eficacitate, reacția își pierde din intensitate. Cercetările recente evidențiază că frecvența ultrasunetelor nu joacă un rol important în dezvoltarea procesului chimic /9, 29, 55/.

621280
366 B.

BAZELE TEORETICE ALE PRELUCRĂRII MATERIALELOR PRIN EROZIUNE ABRAZIVO-CAVITAȚIONALĂ ÎN CÂMP ULTRASONIC. MECANISMUL PRELUCRĂRII

2.1. Domenii de aplicativitate

Apariția de materiale noi, cu proprietăți și caracteristici superioare, au determinat creerea și extinderea utilizării proceselor neconvenționale de prelucrare în industrie și în alte domenii. Această diversificare s-a realizat atât pe criteriile de performanță, cât și pe domenii de utilizare. Indicații referitoare la posibilitățile de prelucrare și la domeniile de aplicare sunt prezentate în tabelul 2.1. /46/.

Tabelul 2.1 Date comparative referitoare la posibilitățile de prelucrare prin tehnologii neconvenționale

Procedee de prelucrare	Aluminiu	Oțel	Super aliaje	Carburi metalice	Materiale neferoase	Materiale ceramice	Materiale plastice	Sticlă, rubin, diamant, safir.
Electroeroziune	2	1	1	1	2	4	4	1
Electrochimie	2	1	1	2	2	4	4	4
Ultrasunete	3	2	3	2	1	1	2	1
Laser	2	2	2	2	1	1	2	2

unde s-a notat cu: 1 foarte bun; 2 bun; 3 neindicat; 4 neaplicabil.

În figura 2.1 se prezintă, sub formă schematică, o comparație între procedeele neconvenționale de prelucrare ținând seama de dimensiunea prelucrării (d, l) și adâncimea maximă de prelucrare (h).

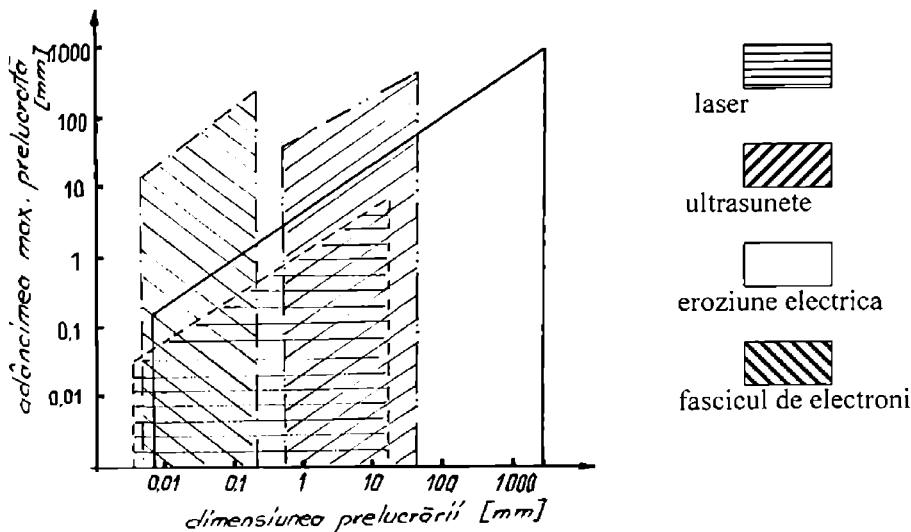


Figura 2.1. Compararea procedeele de prelucrare neconvenționale funcție de dimensiuni.

Sub acțiunea undelor de șoc, granulele abrazive acționează în mod repetat asupra obiectului de prelucrat (semifabricat) determinând îndepărtarea unor particule de material prin: ruperi fragile și ruperi plastice.

Se cunoaște faptul că la materialele fragile, efortul unitar tangențial la forfecare τ_r este mai mic decât efortul unitar tangențial la curgere τ_c , motiv pentru care materialele fragile se deformează elastic până în momentul ruperii, fără ca acest proces să fie însoțit de o deformare plastică /56, 68/.

Materialele cu caracteristici plastice sunt acelea la care ruperea lor este precedată de o deformare elasto-plastică.

Se poate defini un criteriu de prelucrabilitate prin eroziune abrazivă în câmp ultrasonic de forma:

$$K_{pr} = \tau_c / \tau_r \quad \text{sau} \\ K_{pr} = R_c / R_m \quad (2.1)$$

pe baza căruia se apreciază prelucrabilitatea materialele în felul următor:

a. Materiale cu prelucrabilitate bună $K_{pr} > 2$. Din această categorie fac parte materialele la care deformarea predominantă este elastică, iar ruperea acestora

este fragilă, caz în care dislocarea elementelor de material se face numai pe baza propagării unor fisuri.

b. Materialele mediu prelucrabile $K_{pr} = 1 \dots 2$. Din această categorie fac parte materialele la care deformația este elasto-plastică, iar ruperea este fragilă și apare numai după ce s-au epuizat stările de deformație plastice.

c. Materiale greu prelucrabile $K_{pr} < 1$. Din această categorie fac parte materialele la care predomină deformația plastică, iar ruperea apare mai târziu sau nu apare deloc /56, 68/.

Materialele din categoriile a și b se pretează la prelucrări prin eroziune în câmp ultrasonic. Din multitudinea de materiale dure și fragile, pentru realizarea încercărilor experimentale s-au utilizat: sticla și safirul.

Dacă în perioada de pionierat a aplicării procedurii (anul 1960), s-au prelucrat doar sticle optice tip cron normal sau cron ușor și sticle de uz general de tir silico-sodice, în ultimii ani, sticlei (cuarțului- bioxidului de siliciu) i s-a acordat o mai mare importanță. Începutul dezvoltării pe scară largă a materialelor pe bază de sticlă, l-a constituit fibrele optice din sticlă, care sunt obținute prin tragerea cu ajutorul unor filiere. Prelucrarea acestor scule se face prin eroziune abrazivo-cavitațională în câmp ultrasonic, cu sau fără rotirea semifabricatului /33, 60/.

Datorită importanței pe care o are sticla trasă în fire, aceasta se produce în mai multe sorturi, clasificarea acestora făcându-se în funcție de compoziția chimică și proprietățile fizico-mecanice /33/.

În ultimii ani, în cadrul materialelor compozite, o poziție importantă o au cele armate cu fibre de sticlă, unde matricea de bază este constituită dintr-o rășină termoplastă sau termorigidă. Prelucrabilitatea materialelor compozite este dependentă de natura și structura metalografică a acestora, de modul de dispunere a elementului de armare în matricea compozitului și de procedeele de obținere și elaborare a semifabricatelor. Deci, cunoașterea elementului de armare, din punct de vedere al prelucrabilității, dă informații prețioase asupra cunoașterii prelucrabilității materialului compozit respectiv.

Safirul- reprezintă o varietate de CORINDON, ce are în compoziția sa oxizi de fier sau de titan (oxizi care-i dau și culoarea), care se obține frecvent pe cale artificială, prin așa zisa metodă a "creșterii" cristalelor /84/.

Corindonul- (oxid de aluminiu, Al_2O_3), are o duritate apropiată de cea a diamantului, fiind variat colorat, dar de obicei are un aspect albastrui sau cenușiu-gălbui. Varietăți transparente de corindon, în combinație cu diferite impurități, dau : rubinul, safirul, topazul oriental, ametistul oriental și smaraldul oriental /33, 84/.

Din multitudinea de materiale care au la bază oxidul de aluminiu, cele mai cunoscute și cele mai răspândite sunt materialele ceramice. După cum se știe, ceramica tehnică, considerată a reprezenta generația a doua de

materiale, este foarte complexă și care se obține printr-o diversitate de combinații structurale și de compoziție, este însă și foarte solicitată ca element de armare și/sau matrice pentru elaborarea de materiale compozite /33, 60/.

Astfel, din multitudinea materialelor existente, care au la bază oxidul de aluminiu, se află și safirul, material care a fost folosit și în cadrul lucrării de doctorat.

Criteriul de prelucrabilitate (fragilitate) se poate determina folosind valorile eforturilor tangențiale la forfecare și la curgere, precum și rezistențele la curgere și la curgere pentru materialele la care se determină acest indicator. El se mai poate determina și prin măsurarea durtității sub sarcină cu penetrator sub formă de piramidă din diamant (unghiul la vârf este de 136° -microdurimetrul PMT-3), folosind relația:

$$K_{pr} = 0,61 \left(4 + \frac{l^2}{d^2} \right) \frac{1-2\mu}{1+2\mu} \quad (2.2)$$

unde : l - lungimea maximă a fisurilor, în μm ;

d - lungimea diagonalei amprenteii, în μm ;

μ - coeficientul lui Poisson ;

F - sarcina care încarcă penetratorul, în daN.

Tabelul 2.2. Date referitoare la lotul de probe din sticlă

Nr.crt.	D [μm]	l [μm]	H_v [daN/mm ²]	R_m [N/mm ²]	K_{pr}
1	27,4	54	524	89.7	2.477
2	27,5	54	518	89.7	2.468
3	28,0	57	500	80.5	2.559
4	27,9	56	501	83.4	2.523
5	29,2	60	460	72.7	2.584
6	27,1	53	534	93.1	2.459
7	28,8	58	473	77.7	2.531
8	28,5	58	483	77.7	2.558
9	27,8	55	515	86.0	2.487
10	28,2	57	493	80.5	2.541

Forța de apăsare 0,1962daN; $\mu = 0,16$.

Sarcina de încărcare a penetratorului a fost mărită progresiv până când a fost observată atât o lungime măsurabilă a amprenteii, cât și a fisurilor care însoțesc prelucrarea. Astfel, s-a realizat un lot de probe pe baza cărora s-au obținut rezultatele prezentate în tabelul 2.2. (pentru sticlă) și tabelul 2.3. (safir artificial).

Tabelul 2.3. Date referitoare la lotul de probe din safir.

Nr.crt.	D [μm]	L [μm]	H_v [daN/mm ²]	R_m [daN/mm ²]	K_{pr}
1	28,9	55	916	126	1,719
2	29,4	60	885	105	1,842
3	29,3	60	891	108	1,848
4	29,1	58	903	112	1,798
5	29,2	58	897	112	1,793
6	28,7	56	928	120	1,761
7	28,8	56	922	121	1,755
8	29,1	58	903	114	1,798
9	29,2	55	897	124	1,703
10	29,0	57	909	116	1,774

Forța de apăsare 0,3824 daN ; $\mu = 0,23$.

2.2. Procesul de prelucrare prin eroziune în câmp ultrasonic

Prin realizarea unor materiale noi, cu proprietăți mecanice deosebite (fragilitate, duritate, refractaritate, greu de prelucrat prin procedee tradiționale), s-a impus creerea de noi procedee de prelucrare dimensională a acestora, printre care se remarcă și prelucrarea prin eroziune în câmp ultrasonic. Spre deosebire de alte procedee neconvenționale existente, prelucrarea prin eroziune în câmp ultrasonic are un domeniu restrâns de aplicativitate și se poate realiza fie cu suspensie abrazivă fie fără suspensiei abrazive /32, 34, 36, 39, 46, 61, 68, 70, 78,79, 82/.

2.2.1. Prelucrarea cu suspensie abrazivă

Această metodă este cea mai veche și cea mai des întâlnită și constă în faptul că între suprafața de prelucrat a piesei și suprafața activă a sculei activate ultrasonic se introduce un lichid în care se află o anumită densitate de particule abrazive, constituite din materiale dure, care au anumite dimensiuni. Procentul de particule abrazive aflate în lichide (apă, benzonat etc), variază între 20-50%, dimensiunile granulelor fiind situate între 10-200 μm , ele sunt realizate din carburi de siliciu, carburi de bor sau diamant.

Scula (obiectul de transfer), apasă asupra semifabricatului cu o presiune redusă, de valori cuprinse între 0,4--0,5 daN/cm² și vibrează cu o frecvență de 18-25 KHz la o amplitudine de până la 120 μm .

Spațiul de lucru dintre SCULĂ și PIESĂ este alimentat în permanență cu o suspensie abrazivă (apă + pulbere abrazivă) care reprezintă agentul eroziv. Duritatea pulberilor trebuie să fie cel puțin egală cu duritatea

materialului de prelucrat pentru a avea o productivitate ridicată, în caz contrar are loc o uzură mai accentuată a sculei.

Introducerea agentului eroziv în spațiul de lucru se poate realiza prin următoarele metode:

- a - stropire cu sau fără mișcare de rotație (fig. 2.2a și 2.2b);
- b - aspirație prin interiorul sculei (fig.2.2c);
- c - injecție prin interiorul sculei (fig. 2.2d);

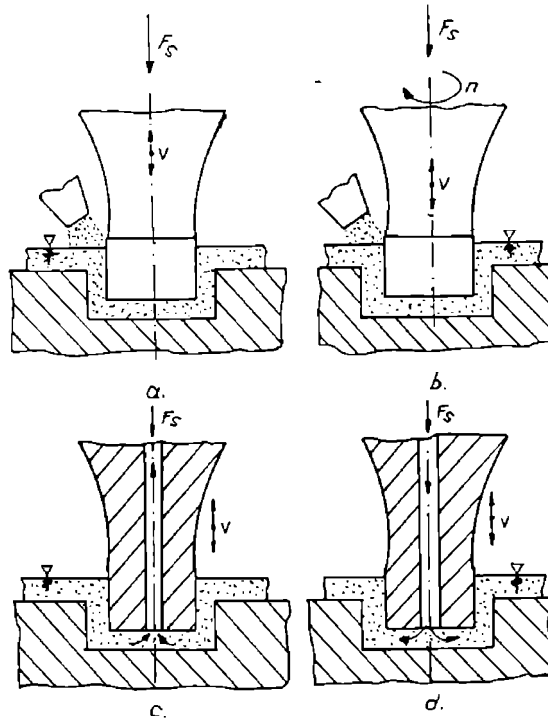


Figura 2.2. Metodele de prelucrare: stropire (a,b), aspirație (c) și injecție (d).

Metodele de prelucrare, prezentate în figurile 2.2.b și c, prezintă o serie de dezavantaje constructive, referitoare la faptul că aceste scule influențează negativ frecvența de rezonanță pe întreg ansamblul, producând complicații în construcția ansamblului traductor-concentrator-sculă și nu se pot prelucra decât orificii străpuse. După prelucrarea prin această metodă se necesită executarea unei operații suplimentare prin rectificarea pentru îndepărtarea abaterilor de formă care au fost copiate de pe sculă.

Precizia dimensională, și productivitatea prelucrării sunt influențate de modul în care se face circulația agentului eroziv, prin care se caută să se asigure următoarele funcții:

- menținerea constantă a temperaturii;

- aducerea de particule neuzate;
- evacuarea particulelor abrazive uzate cât și a produselor rezultate din prelucrare (mâl).

Printr-o circulație forțată a agentului eroziv se urmărește evacuarea particulelor abrazive uzate din spațiul de lucru, cu scopul de a îmbunătăți precizia de prelucrare și de a mări productivitatea prelucrării.

2.2.2. Prelucrarea fără suspensie abrazivă

Schema prelucrării este redată în figura 2.3, în care se constată absența particulelor abrazive în suspensie, acestea fiind fixate (impregnate) pe suprafața activă a sculei.

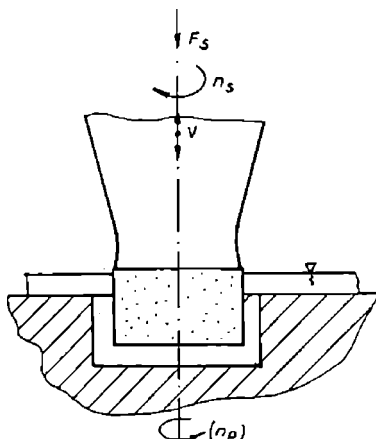


Figura 2.3. Schema de prelucrare fără suspensie abrazivă.

Mediul de lucru este, în majoritatea cazurilor, apa, care trebuie să îndeplinească următoarele funcții:

- evacuarea particulelor uzate desprinse de pe sculă și a produselor rezultate în urma erodării;
- menținerea constantă a temperaturii spațiului de lucru.

Modul de evacuare forțată a particulelor prezintă aceleași caracteristici ca și la metoda anterioară.

Scula este activată ultrasonic cu o frecvență de 20-30 KHz, și apasă asupra piesei cu o presiune de 20-30 daN/cm². Efectul de abrazare este realizat și printr-o mișcare suplimentară de rotație sau rototranslație, executată de sculă sau de piesă, în funcție de profilul de realizat și de construcția utilajului. Pentru a se proteja scula împotriva șocurilor care pot apărea în

timpul procesului de prelucrare, amplitudinea oscilațiilor nu trebuie să depășească $15 \mu\text{m}$ /8,29,30,46/.

Metoda de prelucrare fără suspensie abrazivă prezintă avantajul unei productivități mai ridicate însă apar o serie de complicații în ceea ce privește impregnarea sculelor și construcția blocului ultrasonic rotativ.

Prin combinarea celor două variante se obține o soluție care asigură caracteristici de funcționare superioare. Pe baza cercetărilor efectuate s-a demonstrat că dislocarea materialului se datorează acțiunii prin șoc a sculei asupra particulelor abrazive, care este însoțită de următoarele fenomene:

- a) izbirea piesei de către granulele abrazive cu o energie cinetică ridicată;
- b) ciocnirea granulelor aflate în suspensie;
- c) cavitația acustică;
- d) coroziunea chimică.

Realizarea unor prelucrări fără mediu abraziv a evidențiat faptul că doar 5--10% din cantitatea de material dislocat se datorează ultimelor două fenomene.

2.3. Mecanismul prelucrării prin eroziune abrazivă în câmp ultrasonic

A. Fără mișcare de rotație

În literatura de specialitate sunt prezentate date suficiente referitoare la explicarea mecanismului de producere și dezvoltare a proceselor erozive, în cazul folosirii unor utilaje echipate cu transductoare magnetostrictive de puteri medii sau mari. Cercetările experimentale efectuate pentru rezolvarea lucrării de doctorat au fost efectuate pe mașina MPU-01, echipată cu o masă rotativă și un transductor piezoceramic, de putere mică (max. 500 W- din care s-au folosit doar 205W). În continuare fac o serie de precizări cu privire la avantajul pe care îl asigură prelucrarea dimensională abrazivo-cavitațională în câmp ultrasonic cu mișcare auxiliară de rotație, față de metoda care nu folosește această mișcare.

Prelucrarea dimensională abrazivo-cavitațională, pune în evidență, în prima fază, două etape în desfășurarea procesului de prelucrare: realizarea spațiului minim de lucru dintre sculă și piesă și prelucrarea propriu-zisă. Etapele se repetă la fiecare reluare a impulsului de acțiune, adică, la fiecare timp activ de prelucrare. Durata totală de prelucrare se compune din mai multe perioade de acțiune tehnologică de lucru și de pauză, ciclul de lucru fiind prezentat într-o formă schematică în figura 2.4.

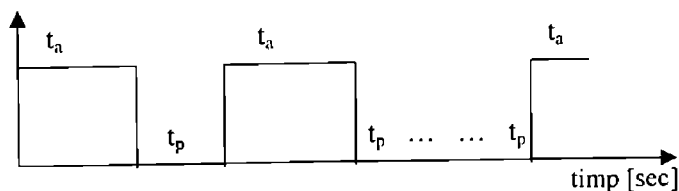


Figura 2.4. Programarea duratelor active și de pauză.

În regimul automat de prelucrare sau chiar și în cel manual, timpii de lucru și de pauză pot lua valori dorite. Din încercările efectuate am constatat că timpul de lucru nu trebuie să fie mai scurt de 5secunde și nici mai lung de 60secunde. Rezultate superioare au fost obținute la durate de lucru cuprinse în intervalul 15...30s și durate de pauză de 10...20s. Pentru a obține un randament superior la durate minime de prelucrare se impune ca duratele de pauză să nu fie mai mari decât cele de lucru, dar nici prea mici deoarece se produce încălzirea transductorului și ieșirea lui din domeniul de lucru.

În decursul prelucrării se disting două etape caracteristice:

- Realizarea spațiului minim SCULĂ-PIESĂ necesar prelucrării;
- Prelucrarea propriu-zisă folosind la început particule abrazive neuzate.

Pe măsura evoluției prelucrării, intensitatea procesului se reduce datorită prezenței particulelor uzate aflate în spațiul de lucru. În timpul de pauză se produce ridicarea blocului ultrasonic, timp în care se realizează un schimb de particule abrazive ca urmare a injectării, în zona de lucru, a unui debit însemnat de particule abrazive neuzate, după care sunt repetate cele două etape.

Forța statică (F_s), este necesară, în primul rând, pentru a realiza un spațiu de lucru (distanță) minim între SCULĂ-PIESĂ și pentru a realiza avansul de lucru. Astfel, la începerea procesului de prelucrare zona de lucru arată ca în figura 2.5.a, ca după un anumit timp (câteva secunde), datorită forței statice și a mișcării oscilatorii, o mare parte din particule sunt scoase din zona de lucru. La realizarea interstițiului participă și multiplele lovituri produse de partea frontală a sculei asupra granulelor abrazive aflate în fața sculei. Această etapă nu este productivă, ea creeând premisele necesare desfășurării celei de-a doua etape. Atingându-se distanța minimă, figura 2.5.b, adică dimensiunea maximă a granulelor abrazive, începe etapa a doua de prelucrare propriu-zisă.

La diminuarea duratei etapei a doua, o influență deosebită o are forța statică de prelucrare, iar dacă există o mișcare relativă între sculă și piesă, acesta permite o accentuare a reducerii etapei respective.

Odată stabilită distanța minimă, dintre cele două elemente, cea corespunzătoare dimensiunilor maxime ale granulelor abrazive, aflate în zona de lucru, începe prelucrarea propriu-zisă, adică etapa a doua de prelucrare.

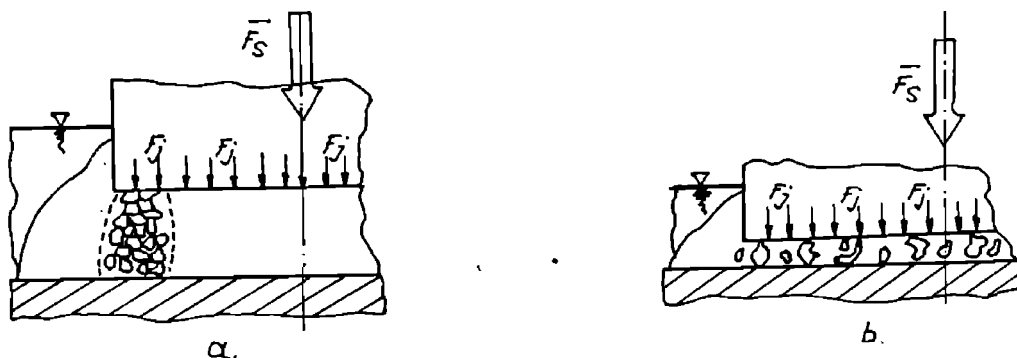


Figura 2.5. Etapele prelucrării.

Spargerea peliculei protectoare (partea exterioară a piesei de prelucrat) are o mare importanță în continuarea procesului de prelevare de material. Astfel, am constatat că partea superioară a piesei (învelișul ei) prezintă o rezistență sporită la atacul făcut de particulele abrazive, în comparație cu miezul piesei. Acest lucru se explică prin faptul că suprafața exterioară nu prezintă microfisuri și deci nu sunt create condițiile necesare prelevării de material.

După mai multe lovituri succesive, date de sculă prin intermediul granulelor abrazive asupra piesei, se crează în mai multe locuri amprente generatoare de microfisuri, creându-se astfel premisele realizării sub sculă a unei rețele longitudinale, mediane și radiale de microfisuri, fapt ce favorizează prelevarea de materiale.

Enomato și Evans and Wilshaw au studiat procesul de îndepărtare a materialului, mai ales la materialele fragile prin creerea de amprente statice și glisante. În urma experimentărilor efectuate s-a constatat că forța statică necesară formării de microfisuri a fost relativ mică, în cazul amprentelor glisante, în comparație cu forța statică cerută pentru realizarea amprentei statice /43, 80/.

La prelevarea de material, datorită efectului piezoelectric, scula parcurge, în raport cu suprafața de prelucrat, următoarele etapele (figura 2.6):

- încărcare (creerea de presiuni suplimentare datorate creșterii amplitudinii- lovitura de ciocan);
- descărcare (revenirea spre faza inițială -fără acționare);
- înaintare (realizată datorită forței statice de avans și pe fondul unei amplitudini negative a oscilațiilor).

Datorită acestor faze are loc formarea de fisuri, și creșterea respectiv propagarea acestora în timp și spațiu. Prezentarea schematică a succesiunii fenomenelor care au loc în procesul de prelucrare a materialelor fragile (sticla, safir, ceramică) este redată în figura 2.7. pentru simplificare se consideră că granulele abrazive au o formă sferică. O dată amprenta reaalizată

are loc creerea de fisuri radiale, mediane și laterale, ultimele putând fi circulare (superficiale sau de adâncime).

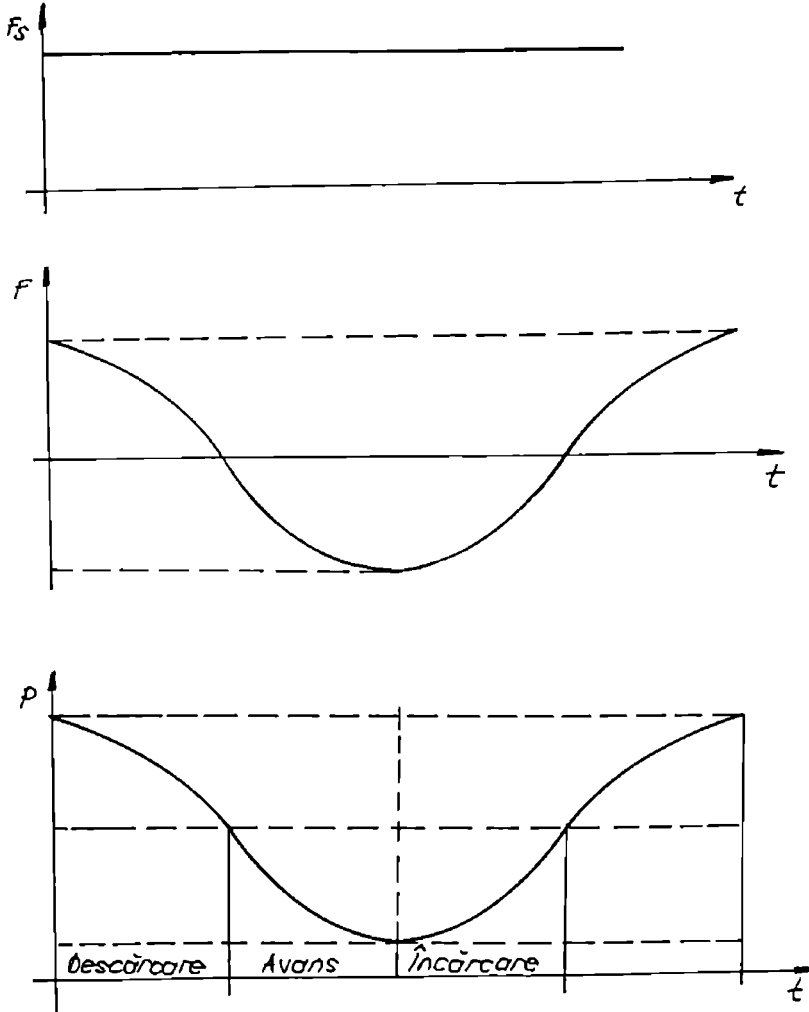


Figura 2.6. Etape de acțiune ale sculei.

Important este ca fisurile laterale (cele superficiale și de adâncime) să nu fie prea lungi, deoarece înrăutățește calitatea suprafeței prelucrate. Un rol foarte important în îndepărtarea de material, îl au fisurile laterale de adâncime. Pentru ca prelevarea să fie accelerată este obligatoriu ca fisurile laterale de adâncime, formate de două amprente adiacente, să se întâlnească (figura 2.8).

Vedere de sus

Vedere laterală

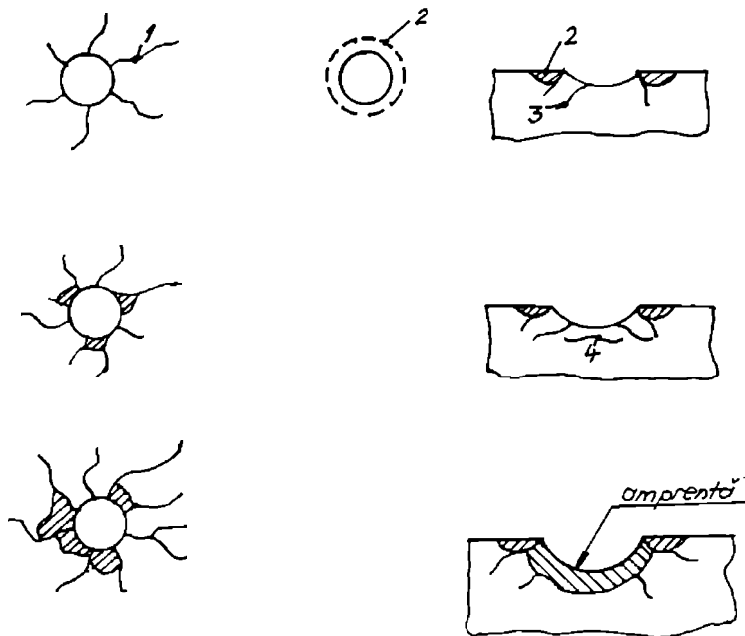


Figura 2.7. Succesiunea fenomenelor care participă la realizarea prelucrării.

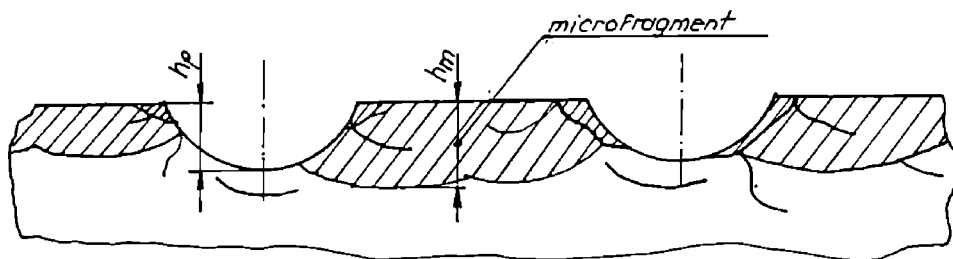


Figura 2.8. Succesiunea fenomenelor care participă la realizarea prelucrării.

Se poate spune că realizarea de microfisuri, radiale și laterale, depinde de: sarcina statică, amplitudinea oscilației (energia transmisă) și de caracteristicile mecanice ale materialului de prelucrat. S-au putut astfel defini:

Lungimea fisurii radial – L_r ;

Lungimea fisurii laterale – L_l .

$$L_r = P^{0.5} / (H^{0.25} \cdot R_c^{0.33}) \quad (2.3)$$

$$L_1 = (P / R_c)^{0.75} \quad (2.4)$$

Sub acțiunea forței rezultante P, granulele abrazive inițiale, de dimensiuni maxime (pionierele prelucrării), se uzează devenind de dimensiuni mai mici, conducând prin aceasta la creșterea numărului de granule active aflate în spațiul de lucru. Cu cât numărul granulelor din spațiul de lucru este mai mare cu atât procesul de prelevare de material este mai intens, dar totuși limitat de granule uzate care realizează amprente, fără a participa și la microașchiere. În cazul prelucrării există un număr de granule libere, de dimensiuni mai mici, care datorită fenomenului de oscilație sau cavitație sunt îndreptate fie spre interiorul piesei de lucru, fie spre exteriorul acesteia. Cele îndreptate spre exterior vor fi scoase din spațiul de lucru, dar nu înainte ca oscilațiile transversale să le izbească de pereții laterali, creând în aceștia amprente, ale căror mărime sunt mai mici decât cele realizate în părțile frontale, putând fi astfel neglijate. Toate fisurile care apar pe suprafețele laterale sunt datorate numai solicitărilor produse de oscilațiile longitudinale /33, 43/.

Datorită acțiunii vibratoare a sculei, au loc, în faza de încărcare a acestora, șocuri hidraulice care favorizează atât îndepărtarea de microparticule, cât și creșterea fisurilor mediane.

În timpul procesului de eroziune, în câmp ultrasonic, prelevarea de material se datorează și fenomenului de cavitație. Ca să se producă acest fenomen, undele ultrasonice trebuie să dispună de o intensitate apreciabilă, cu atât mai mare cu cât frecvența ultrasunetelor este mai mare. Bulele de cavitație sunt de mărimi diferite. Ele au o mișcare ascensională, cărând la suprafața lichidului gazele cuprinse în ele contribuind astfel la degazarea lichidului. Dar ele mai au și alte mișcări, în toate direcțiile. Odată cu bulele de cavitație intră în mișcare și particulele abrazive, aflate între obiectul de stransfer și obiectul de prelucrat, care sunt mai ușoare și au dimensiunile mai mici, fiind antrenate în mișcarea ascensională pentru a fi eliminate din zona de interacțiune dintre cele două elemente.

Viața unei bule de cavitație este relativ scurtă. În momentul în care o bulă se distruge, lichidul pătrunde în locul ei, și într-un interval foarte scurt de timp, apare, în acea zonă, depresiuni locale importante (de mii de atmosfere), care se desfășoară într-un volum foarte mic. Astfel, prin distrugerea unei bule ia naștere o undă de șoc, în care presiunea este cu atât mai mare cu cât raza maximă a bulei, înainte de spargere, este mai mare. Cum mărimea bulei depinde de intensitatea acustică, presiunea care apare este și ea direct proporțională cu intensitatea acustică. Aceste unde de șoc antrenează într-o mișcare puternică microparticulele de abraziv, izbindu-le de piesă și sculă. Totodată și undele de șoc propriu-zise se comportă ca niște ciocane

care lovesc piesa sau scula. Bulele, în timpul mișcării de agitație, se pot ciocni între ele, producând fie o bulă mai mare, fie se sparg /10/.

La intensități acustice mari, aceste bule dau impresia fierberii lichidului, ele putând atinge dimensiuni de aproximativ 0,1 mm. La spargerea lor, lichidul antrenează în mișcare complexă, toate elementele din zonă, determinând îndepărtarea granulelor abrazive mai mici sau a microașchiilor, prin scoaterea acestora din spațiul de lucru, în final, în zona respectivă rămânând doar particulele mari, lichidul și unele particule uzate. Dacă intensitatea acustică este mai mică, antrenarea granulelor mari este mai greu de realizat, eliminându-se, din spațiul de lucru, doar granulele sparte și microașchiile din sculă, respectiv piesă. După o perioadă de timp, mai lungă decât în primul caz (intensitatea acustică mare), în zona de lucru vor rămâne lichidul și unele granule uzate, moment în care este necesară alimentarea cu noi particule abrazive.

B. Cu mișcare de rotație

Față de situația prezentată, în cazul în care masa sau scula efectuează o mișcare de rotație, mecanismul prelevării de material deci procesul de formare, și propagare a fisurilor și îndepărtarea microparticulelor prelevate va fi puțin diferit. În prima fază scula lovește granulele abrazive aflate între OT și OP determinând realizarea de amprente și fisuri ca și în cazul standard (fără rotație). /43, 69, 80, 81/

În timp ce scula se descarcă, piesa se rotește cu un anumit unghi, ocupând o nouă poziție, dar și granulele abrazive vor fi rostogolite pe tot timpul cât durează rotirea piesei de lucru. Atunci când scula se încarcă, lovește granulele abrazive, rezultând amprente care aproape că se suprapun peste cele realizate la lovitura anterioară (figura 2.9). Un anumit număr de granule abrazive vor fi înglobate în sculă, cauzând un proces asemănător de microașchiere, fenomen asemănător operației de rectificare.

Ansamblul fisurilor realizate se produc în cerc, realizând o prelucrare inelară. Prin suprapunerea radială a acestor inele se acoperă aproape integral suprafața de prelucrat, rămânând, însă o zonă parțial prelucrată, situată în partea centrală a suprafeței frontale (figura 2.10).

În acea zonă, prelucrarea se realizează integral după principiul standard, cauzând, prin aceasta, o reducere a productivității prelucrării precum și o abatere de formă. Prin evitarea zonei menționate realizarea unei perforări folosind o sculă inelară, procesul decurge cu intensitate sporită.

Procesul de prelevare cu mișcare de rotație, determină pe suprafețele alezajului prelucrat, abateri geometrice, rezultând înclinații ale pereților verticali, după modelul prezentat în figură (în cazul orificiilor

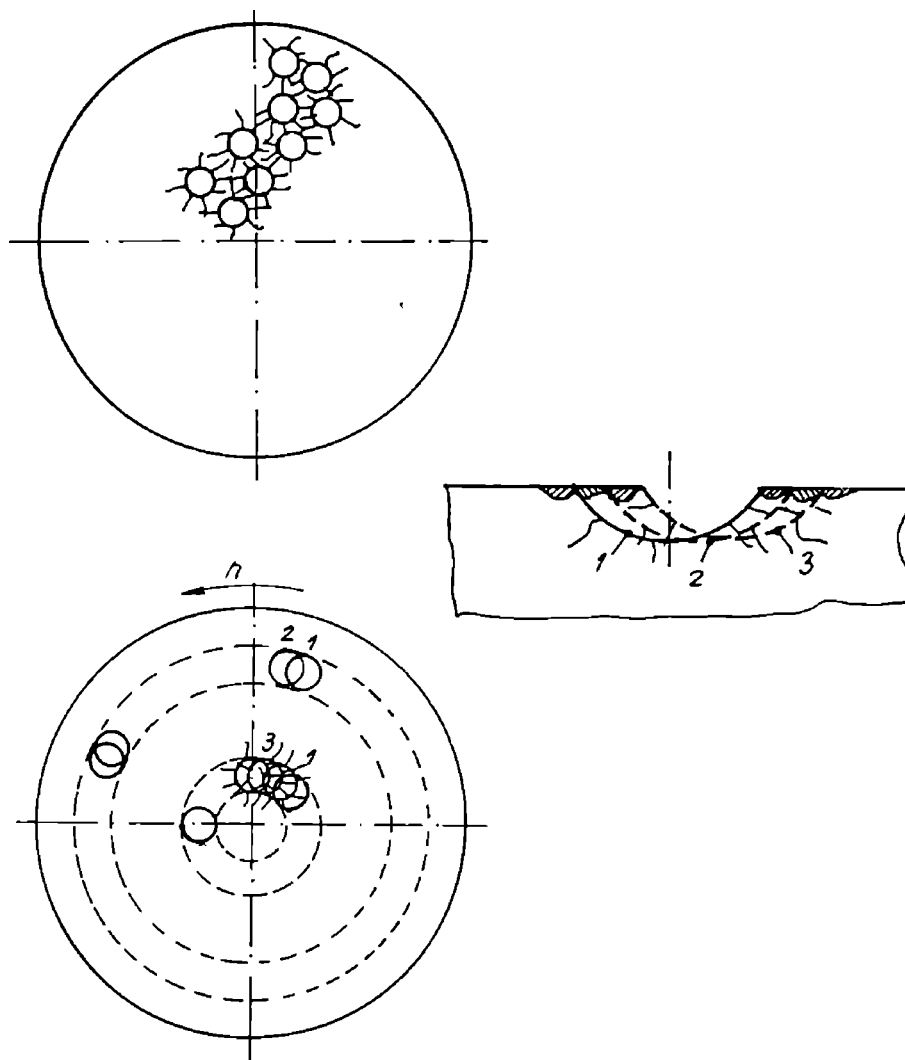


Figura 2.9. Modelul prelucrării în cazul rotirii piesei.

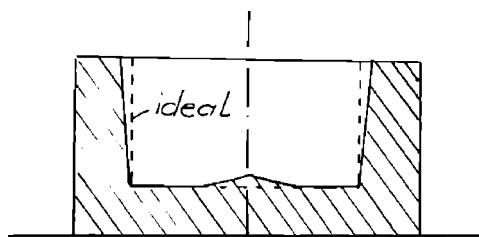


Figura 2.10. Abateri geometrice ale suprafețelor prelucrate.

înfundate). Apariția acestor abateri, cât și încetinirea procesului, se datorează și faptului că lichidul fiind antrenat în mișcarea de rotație se va îndepărta de axa de rotație, datorită forței centrifuge, determinând o prelucrare fără lichid de lucru. Cu cât mișcarea de rotație este mai mare (turație mai mare), cu atât partea de microașchiere participă mai intens la prelevarea de material însă are ca efect scoaterea, din zona de lucru, a lichidului și a granulelor abrazive, particularitate care împiedică producerea următoarelor acțiuni: șocul hidraulic, cavitația și diminuarea șocurilor mecanice.

Ca atare, se impune reducerea turației de antrenare până la valori care să realizeze performanțe tehnologice (productivitate, calitatea suprafeței) la valori maxime.

Din cercetările experimentale personale s-a constatat că turația optimă, pentru o productivitate maximă, se situează la o valoare a turației de 205 rot/min, pentru diametrul alezajului de prelucrat de 10 mm. La valoarea unui alezaj de 6 mm, cercetătorii M. Komaraiah și P. Narasimha Reddy au stabilit o turație optimă de 220 rot/min. Pentru alte dimensiuni ale alezajelor turațiile putând lua valori cu atât mai mari cu cât orificiile sunt mai mici și invers /43/.

Prin mișcarea de rotație, mărul rezultat (microașchiile) în urma prelucrării, este mult mai ușor de îndepărtat din spațiul de lucru, odată cu deplasarea lichidului. Cu cât timpul de lucru al unui ciclu este mai mare, cu atât mai mult lichidul părăsește spațiul de lucru, dar numai până la realizarea echilibrului lichid-turație.

La oprirea mișcării de rotației, lichidul antrenează particulele abrazive neuzate din spațiul de lucru, iar mărul rămâne la marginea cuvei. Prin mișcarea de rotație particulele abrazive uzate sunt rostogolite prin spațiul de lucru. Ciclul se reia, scula atingând particulele abrazive de dimensiune maximă, moment în care granulele abrazive participă la prelucrare, acestea având forme diferite, fiind caracterizate de dimensiuni diferite, dimensiuni care sunt repartizate după curba de distribuție Gauss).

După cum se constată din figura 2.11, datorită vitezei relative dintre OT-OP, particulele abrazive angajate în prelucrare, execută o mișcare de rotație în jurul punctului O, determinând o prelevare de material, atât din piesă, cât și din sculă (OT). Pe baza principiului acțiunii și reacțiunii, particula acționează asupra OP sau OT cu o forță egală și de sens contrar, fapt ce conduce la creerea unui moment de rotație în jurul axei proprii (punctul O), adică aceasta participă efectiv la prelevarea de material. Dacă, însă, duritatea particulelor abrazive este comparabilă cu cea a piesei de prelucrat, uzura particulelor (tocirea muchiilor așchietoare) iar prelucrarea prin așchiere se desfășoară tot mai dificil.

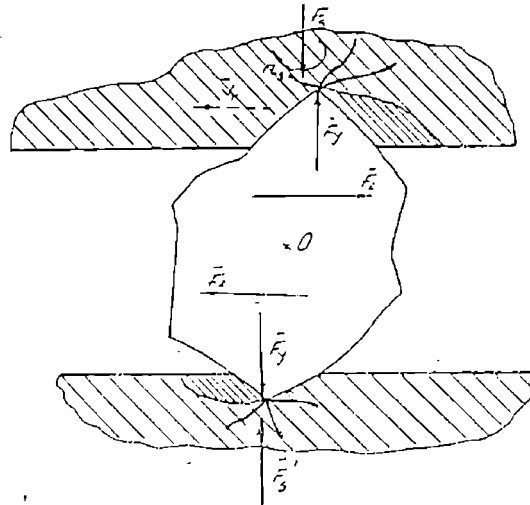


Figura 2.11. Principiul prelucrării elementare.

Unele particulele abrazive, care, datorită poziției lor pe care o au la un moment dat, cât și datorită forței de avans, pătrund în sculă, fixându-se pe aceasta. Particulele abrazive respective, prelevează material atât prin microașchiere, cât și prin șoc, iar într-un anumit moment putând deveni din nou libere. Întregul ciclu decurge de la sine, ducând la mărirea volumului de material prelevat, evoluția fenomenelor producându-se rapid, fără a putea fi controlate.

Datorită forței de apăsare și a unei anumite poziții între suprafața sculei și cea a piesei, granulele abrazive inițiale se fragmentează după planele de clivaj, rezultând o multiplicare a acestora la dimensiuni mult mai reduse (figura 2.12).

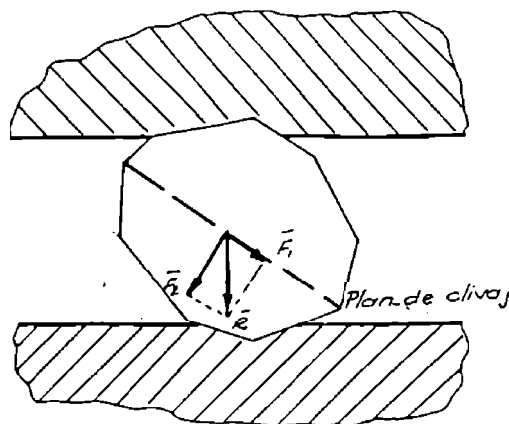


Figura 2.12. Principiul fragmentării particulelor abrazive.

Acest lucru este condiționat de faptul că granulele abrazive, de diferite forme și configurații, se orientează în mod diferit (cu muchiile lor ascuțite) în raport cu suprafețele active ale obiectului de prelucrat sau a celui de transfer. Datorită mișcării de rotație, muchiile așchietoare ale granulelor abrazive se succed într-un ritm mai rapid, în diferite poziții, ducând la creșterea capacității așchietoare ale acestora. Prin fragmentare, asemănător fenomenului de reascuțire, rezultă noi granule abrazive active, care vor participa la prelevarea de material. Noile particule abrazive sunt de dimensiuni mai mici decât dimensiunile particulelor neuzate, motiv pentru care sunt expulzate din zona de lucru, împreună cu mâlul format, sub acțiunea forțelor centrifuge și a fenomenului de cavitație. Datorită acestor fenomene, granulele abrazive de dimensiuni mari sunt aduse la dimensiuni reduse, ceea ce conduce la creșterea numărului de granule abrazive care participă efectiv la prelucrare.

Se pune problema următoare: Oare la ce turație a semifabricatului, în zona de prelucrare nu va mai fi lichid de lucru și dacă absența lui conduce la mărirea sau la micșorarea productivității ?

Pentru a răspunde la o astfel de întrebare vom determina în principal turația critică, adică turație pentru care lichidul de lucru va părăsi zona de contact OT-OP iar prelucrarea se va face în regim uscat.

Astfel, în figura 2.13 s-a prezentat evoluția lichidului de lucru până la o valoare de echilibru, valoare atinsă după un timp t . Pentru determinarea turației critice se va folosi relațiile pentru secțiunile I-I și II-II:

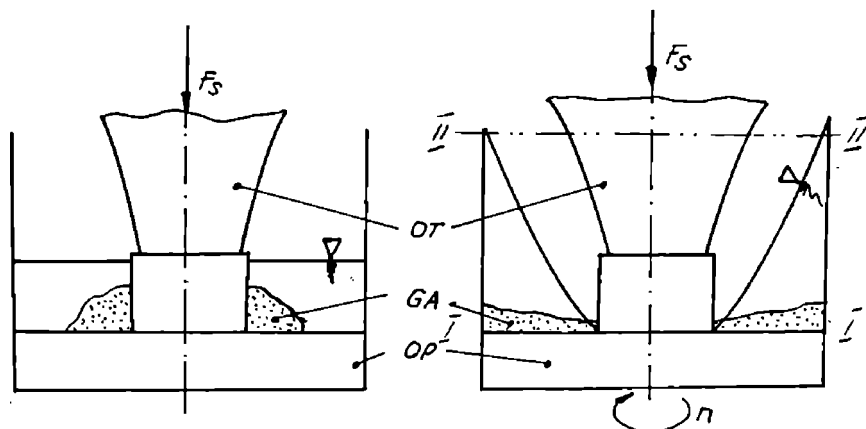


Figura 2.13. Evoluția lichidului de lucru în regim de mișcare.

$$gz - \omega^2 r^2 / 2 = C \quad (2.5)$$

secțiunea I-I caracterizată de mărimile: $z = 0$; $r = d / 2$;

$$0 - \omega^2 d^2 / 8 = C \quad (2.6)$$

secțiunea II-II caracterizată de mărimile: $z = h$; $r = D/2$;

$$gh - \omega^2 D^2/8 = C \quad (2.7)$$

Din egalitatea relațiilor (2.6) și (2.7) se va obține turația critică.

$$gh - \omega^2 D^2/8 = -\omega^2 d^2/8 \quad (2.8)$$

$$8gh = \omega^2 (D^2 - d^2) \quad (2.9)$$

$$(\pi n / 30)^2 = 8gh / (D^2 - d^2) \quad (2.10)$$

$$n = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{8gh}{D^2 - d^2}} \quad (2.11)$$

Printr-un program de încercări experimentale, se poate obține turația critică, ca fiind valoarea maximă atinsă de productivitate a prelucrării în cazul baleerii turației de la minim la maxim (0...380 rot/min).

Materialele ceramice, materialele dure și cele fragile își extind domeniul de aplicație cât mai mult datorită proprietăților lor superioare față de alte materiale, care se referă la elementele:

- rezistență ridicată la temperaturi înalte;
- rezistență la coroziune;
- duritate mare;
- rezistență la uzură;
- densitate mică;
- fragilitate la șocuri.

Motivul pentru care extinderea materialelor ceramice pe plan mondial nu atinge cote importante îl constituie costul ridicat al prelucrării acestora prin tehnologiile clasice, în comparație cu materialele uzuale. Pe piața mondială își fac apariția materialele compozite, unele dintre ele cu proprietăți deosebite și care necesită metode speciale de prelucrare.

Dintre diferitele procedee de prelucrare materialelor ceramice, prelucrarea în câmp ultrasonic, prin rotirea sucei, folosind granule abrazive legate sau libere, se caracterizează printr-un potențial ridicat și o viteză mare de îndepărtare de material, și printr-o calitate superioară a suprafeței prelucrate (fără strat influențat termic). Mișcarea de rotație se aplică numai la realizarea cavităților de revoluție.

Pe plan mondial s-au făcut numeroase încercări pentru a extinde procedeul de prelucrare ultrasonică prin rotație la realizarea de suprafețe plane sau caneluri (crestături).

Concomitent cu preocupările de extindere a procedului și la prelucrarea altor tipuri de suprafețe, diferite de cele circulare, pe plan mondial se fac cercetări intense pentru a amplifica viteza de îndepărtare de material, prin folosirea celor două procedee de prelucrare, procedee care sunt pe cât de asemănătoare, pe atât de diferite.

Atât pentru prima metodă (prelucrare ultrasonică cu suspensie abrazivă și mișcare de rotație), cât și pentru procedeul de prelucrare cu sculă impregnată cu material abraziv, s-au elaborat numeroase modele teoretice pentru a explica atât mecanismul de prelevare de material, cât și pentru a determina parametrii tehnico-economici de prelucrare. În capitolele următoare se va prezenta în detaliu aceste elemente esențiale pentru înțelegerea prelucrării. Se impune deci prezentarea asemănărilor și deosebirilor care apar între cele două metode de prelucrare.

Prelucrare abrazivo- cavitațională cu mișcare de rotație în câmp ultrasonic

Cu granule abrazive libere	Cu granule abrazive legate
- lucrează la turații mici	- lucrează la turații mari
- presiune statică mai mică	- presiune statică mai mare
- granule abrazive: carburi metalice; diamant	- granule abrazive: diamant; carburi metalice
- costuri minime cu scula	- costuri mari cu scula
- costuri reduse cu masa rotitoare	- costuri mari cu capul rotitor
- amplitudini mari	- amplitudini mici

PRODUCEREA ȘI TRANSMITEREA ULTRASUNETELOR

3.1. Generalități

Instalația cu ultrasunete este determinantă în aplicarea unor tehnologii specifice de prelucrare. Variantele adoptate trebuie să conducă la micșorarea pierderilor de energie acustică, în fiecare element al sistemului, prevăzând o impedanță corespunzătoare de ajustare între componente, precum și amplasamente de lucru și legături acustice care să reziste la sarcinile statice și dinamice impuse de condițiile de exploatare. În figura 3.1 este prezentată în forma schematică o instalație folosită la prelucrarea dimensională în câmp ultrasonic /16, 29, 27, 30, 41, 56, 57, 68/.

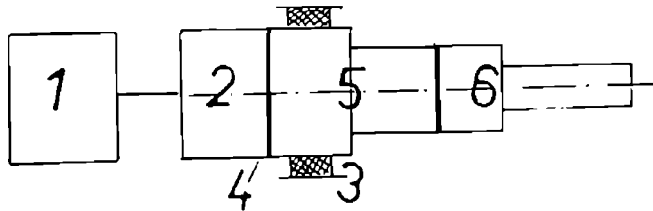


Figura 3.1. Schema instalației de prelucrare cu ultrasunete.

1. Generatorul de ultrasunete transformă curentul electric, de frecvență industrială, în curent de înaltă frecvență, cu scopul alimentării transductorului electroacustic. Generatoarele universale se pot lega cu o diversitate mare de transductoare, în funcție de cerințele folosirii ultrasunetelor, admitând o varietate mare a parametrilor de ieșire:

- putere;
- frecvență;
- tensiune;
- impedanță.

În cazul generatoarelor specializate, parametrii de ieșire sunt invariabili, lucrând doar la o frecvență fixă și o putere de ieșire constantă. Randamentul generatorului depinde de tipul dispozitivului de convertire a frecvenței și de calitatea subansamblor și a pieselor folosite în construcția lor.

2. Transductorul transformă, cu un anumit randament energia primară în energie mecanică radiantă. După principiul fizic de funcționare al transductoarelor electromecanice, acestea se împart în două categorii principale : magnetostictive și piezoelectrice.

Există o mare varietate de transductoare, realizate în game largi de puteri și frecvențe proprii de rezonanță, adoptate funcționării în legătură cu generatoarele electronice, iar în același timp, adoptate ca formă, dimensiune, condiții de răcire, rezistență la coroziune, condițiilor de utilizare existente în instalația în care se încorporează. În mod schematic s-ar putea face o clasificare a transductoarelor sub forma celor prezentate în tabelul 3.1.

Tabelul 3.1. Clasificarea transductoarelor.

TRANSDUCTOARE ELECTROMECHANICE					
După principiul de transformare a energiei	După structura sistemului vibrator			După regimul de funcționare	
	Simple	Compuse			
1. electromagnetice	1. bară	Un element pasiv	Două elemente pasive	1. rezonante	
2. electrodinamice	2. placă				
3. magnetostrictive	3. disc				
4. electrostrictive	4. cilindru			1. simetrice	2.
5. piezoelectrice	5. sferă			2. asimetrice	nerezonante

3. Elementele de fixare mecanică cu izolare acustică fac o legătură eficientă între instalația acustică și structura de rezistență a utilajului tehnologic respectiv, urmărind totodată realizarea unei izolații acustice eficiente între cele două părți. Aceste elemente permit transmiterea energiei acustice spre suprafața de lucru, oprind transmiterea ei spre instalație. Din considerente energetice (eliminarea pierderilor) și de stabilitate dinamică, sistemul mecano-acustic trebuie montat într-un nod de oscilație.

4. Cuplajele mecano-acustice realizează atât legătura mecanică, cât și cea acustică între suprafețele celor două elemente aflate în contact: transductor-concentrator și concentrator-sculă. Aceste elemente trebuie să transmită fără pierderi energia acustică adică amplitudinea utilă A_u .

5. Concentratorul transmite energie acustică de la transductor la sculă producând o amplificare a amplitudinii undei și este realizat dintr-un material care să reziste cât mai bine la uzură și oboseală. O atenție deosebită trebuie acordată geometriei acestui element. Concentratorul furnizează amplitudinea utilă A_u , în condițiile unor pierderi minime de energie și a unor rezistențe

ridicate la uzură și oboseală. Fiecare element se dimensionează pe principiul frecvenței de rezonanță, caz în care lungimea lui trebuie să fie un număr întreg de jumătăți de lungime de undă.

$$L = n \cdot \lambda / 2; n \in \mathbb{N} \quad (3.1)$$

O atenție deosebită se acordă geometriei acestui element.

3.1.1 Cerințe ale sistemului ultraacustic

Există o serie de cerințe comune, tehnologice și acustice, pe care orice sistem acustic trebuie să le satisfacă. Fiecare element trebuie să satisfacă unele cerințe:

a) Generatorul de U.S.:

- promptitudine în readucerea frecvenței de rezonanță;
- stabilitate a funcționării în timp.

b) Transductorul:

- pierderi minime de energie;
- randament de transformare ridicat;
- sesibilitate maximă;
- robustețe;
- fiabilitate sporită.

c) Concentratorul:

- rezistență la uzură și oboseală;
- stabilitate în funcționare;
- calitatea îmbinării cu transductorul;
- concentrarea maximă a energiei ultrasonore.

Pierderi minime de energie ultrasonoră sunt posibile atunci când sistemul oscilator lucrează în regim de rezonanță. Pentru a se respecta această cerință, frecvența proprie a elementelor componente și a întregului sistem oscilator trebuie să coincidă cu frecvența oscilațiilor excitatoare. Restabilirea regimului de rezonanță al sistemului oscilator este posibil prin variația frecvenței de excitație, adică prin reacordarea sistemului generator electronic-sistem ultraacustic.

Pierderile de energie acustice se pot produce atât în transductor, cât și în concentrator, ele depinzând de materialul din care sunt confecționate elementele sistemului. Pierderile interne de energie sunt datorate frecărilor interne, iar pierderile prin absorbție depind de natura materialului și de frecvența oscilațiilor. Materialele din care vor fi confecționate elementele sistemului ultraacustic trebuie să aibe o bună elasticitate, decrement logaritm scăzut de amortizare și o mare rezistență la oboseală. Materialele folosite pentru confecționarea transductoarelor sunt materialele feromagnetice, piezoelectrice, iar cele destinate construcției

concentratoarelor sunt aliaje de titan, duraluminiu, oțelurile cu conținut ridicat de carbon, etc.

Micșorarea pierderilor de energie este condiționată de calitatea îmbinărilor dintre elementele sistemului, trebuind să se asigure un cuplaj acustic bun și sigur și o legătură rigidă dar și elastică.

Pierderile de energie acustică devin minime dacă sistemul ultraacustic este rezemat doar în nodurile de deplasare. Sunt preferabile soluțiile care prevăd rezemarea pe elemente multiple (dacă e posibil).

Stabilitatea regimului de rezonanță al întregului sistem oscilator (sistemul generator acustic-sistemul ultraacustic) în timpul funcționării se asigură prin alegerea corespunzătoare a dimensiunilor de rezonanță a elementelor componente, prin izolare acustică și prin utilizarea generatoarelor cu reacție acustică. Stabilitatea funcționării în timp a sistemului depinde de stabilitatea funcționării în timp a generatorului acustic cât și de variația rezistenței sarcinii.

6. Scula este partea finală a instalației acustice care transmite piesei toate elementele acustice dorite în procesul tehnologic la parametrii impuși de tehnolog. Fiecare element din lanțul acustic se dimensionează pe principiul frecvenței de rezonanță, caz în care lungimea lui trebuie să fie un număr întreg de jumătăți de lungime de undă, respectiv relația (3.1).

3.2. Tipuri de generatoare de ultrasunete

Generatoarele de ultrasunete realizează transformarea curentului electric, cu frecvență industrială, în curent de înaltă frecvență, cu scopul alimentării transformatoarelor electroacustice /8, 16, 29, 32, 46, 68/. După natura dispozitivelor care realizează curenții de înaltă frecvență, generatoarele se împart în:

- generatoare cu tuburi electronice;
- generatoare cu semiconductoare;
- mașini electrice rotative.

Generatoarele cu tuburi electronice, precum și cele cu semiconductoare, pot avea excitație independentă, autoexcitație, autoreglare acustică sau electrică a frecvenței, stabilizarea parametrilor de ieșire, etc.

În funcție de tehnica constructivă și necesitățile tehnologice, generatoarele de ultrasunete pot fi universale sau specializate.

Generatoarele universale admit o variație mare a parametrilor de ieșire (putere, frecvență, tensiune, impedanță) și se pot conecta cu o diversitate de dispozitive tehnologice. Se folosesc în special la experimentări în instalațiile unde este necesară o reglare largă a parametrilor de ieșire.

Generatoarele specializate au parametrii de ieșire invariabili (frecvență fixă; putere de ieșire constantă) folosindu-se în procese tehnologice specializate.

Caracteristicile electrice ale generatoarelor de ultrasunete sunt:

- game de frecvențe;
- puterea de ieșire;
- randamentul;
- stabilitatea și precizia de reglare a frecvenței;
- asigurarea stabilității amplitudinii oscilațiilor mecanice;
- nivelul perturbațiilor introduse în rețeaua electrică industrială.

Caracteristicile neelectrice ale generatoarelor de ultrasunete se referă la particularitățile constructive:

- construcția simplificată și tehnologică;
- desevice și reparare ușoară;
- răcire forțată sau naturală;
- comportarea cu mediul ambiant;
- nivelul zgomotului;
- indici economici și energetici;
- fiabilitatea și durata de serviciu;
- gabarit și masă;
- cost.

Funcție de destinația instalației ultrasonice se stabilește gama de frecvențe, astfel, pentru aplicații tehnologice se folosesc generatoare cu frecvența de 10-80 Khz și puteri de 0,04-20 KW (mergând până la 250 KW în cazul generatoarelor rotative).

De obicei, randamentul unui generator pentru alimentarea transductoarelor electroacustice se situează între 30-98%, el depinzând de puterea generatorului, de tipul dispozitivului de convertire a frecvenței, de calitatea subsansamblelor și pieselor, de regimul de lucru, etc.

Stabilitatea și precizia de reglare a frecvenței sunt deosebit de importante. Aceste caracteristici sunt determinate de caracterul sarcinii care definește condițiile de rezonanță. Precizia reglării frecvenței este la fel de importantă ca stabilitatea frecvenței și este condiționată de calitatea elementelor constructive ale generatorului.

În generatoarele cu sisteme de reglare a frecvenței, reglajul trebuie să asigure o apropiere maximă a frecvenței f_g a generatorului de frecvență de rezonanță f_0 , a transductorului iar diferența Δf .

$$\Delta f = f_g - f_0 \text{ să nu scoată din rezonanța sistemul acustic.} \quad (3.3)$$

Din punct de vedere al tehnologiei de lucru, interesează raportul în care se află amplitudinea oscilațiilor transductorului A_0 (la frecvența de rezonanță) față de valoarea ei admisibilă A_{adm} .

$$K_{adm} = A_{adm} / A_0 = 1 / \sqrt{1 + (2\Delta f_{adm} Q / f_0)^2} \quad (3.4)$$

unde: Q - factorul de calitate al sistemului mecanic al tronsonului;
 f_{adm} - diferența de frecvență admisă pentru procese tehnologice;
 K_{adm} - 0,6-0,8 – coeficient de fidelitate.

Stabilitatea amplitudinii oscilațiilor mecanice a transductorului electroacustic se poate asigura și prin metode electrice (reglaje, constructive). La prelucrarea materialelor solide, când factorii externi conduc la schimbarea parametrilor transductorului electroacustic, modificând amplitudinea oscilațiilor, generatorul asigură stabilitatea acesteia la capătul concentratorului, prin introducerea în generator a unei scheme de autoreglare a frecvenței, uneori și prin reglarea automată a puterii de alimentare a transductorului.

În practică se folosesc următoarele regimuri de lucru:

- funcționare continuă la amplitudine constantă;
- funcționare în impulsuri;
- modulație în amplitudine.

3.2.1. Generatoare rotative

Sunt generatoarele care dau puterile cele mai mari, ele putând ajunge până la 250 KW. Un parametru important este randamentul, care este determinat de mărimea pierderilor electrice, pierderi care pot fi scrise sub forma:

$$W = W_h + W_l = K_1 f \cdot B^{1,6} + K_2 f^2 \cdot B_{\max}^2 \quad (3.5)$$

unde: W_h - pierderi prin histerezis;

W_l - pierderi prin curenții turbionari;

K_1, K_2 - constante care caracterizează materialul;

B_{\max} - amplitudinea maximă a inducției magnetice.

Principalele căi de reducere a pierderilor electrice sunt:

- micșorarea grosimii tolelor statorului și rotorului;
- izolarea corespunzătoare a tolelor pentru reducerea curenților turbionari;
- dimensionarea corespunzătoare a statorului și rotorului.

Variația sarcinii (transductoarele), tensiunii și a frecvenței de alimentare conduc la variația turației, pe seama modificării alunecării. Deoarece sarcina are o bandă de frecvență limitată, determinată de factorul de calitate a sistemului mecanic oscilator. Instabilitatea frecvenței conduce la reducerea eficacității instalației ultrasonice.

Principiul de multiplicare a frecvenței constă în modificarea intenționată a formei curentului sau tensiunii pentru obținerea armonicilor de ordin superior.

Schema multiplicatorului, în număr par de ori (figura 3.2), are o înfășurare de polarizare W_1 care în același timp este și înfășurare de multiplicare a frecvenței și înfășurările primare W_2 și W_3 . Înfășurările primare sunt astfel conectate ca forța magnetomotoare să se adune cu forța magnetomotoare de polarizare dintr-un miez și în celalt miez să se scadă. În

orice moment unul din miezuri este saturat iar celălalt funcționează la inducții mici.

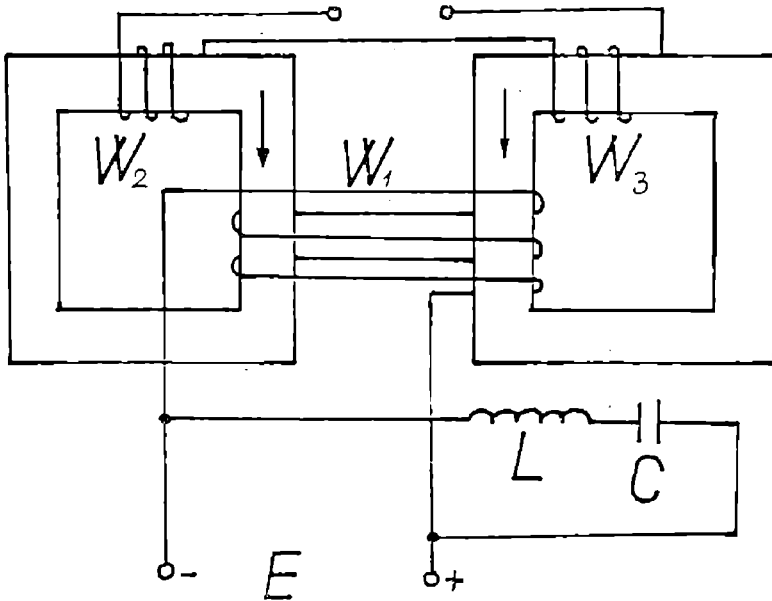


Figura 3.2. Schema multiplicatorului de frecvență.

Raportul favorabil al amperspirelor ale înfășurării primare $I_1 W_1$ și al amperspirelor înfășurării de polarizare $I_0 W_0$ pentru separarea a două armonici, este:

$$I_1 W_1 / I_2 W_2 = 1 \dots 2 \quad (3.6)$$

Acest tip de generator prezintă avantajul unei simplități și a unei eficiențe mari în exploatare.

3.2.2. Generatoare de ultrasunete cu tuburi electronice

Acestea pot fi cu tuburi electronice cu excitație independentă și cu autoexcitație cu reacție inductivă.

3.2.2.1. Generatori cu tuburi electrice, cu excitație independentă

În funcție de poziția punctului de funcționare, de mărimea tensiunii de excitație și a tensiunii sursei de alimentare anodică, tubul electronic poate să lucreze în clasa A sau clasa B. Regimul de lucru în clasa A nu se folosește în generatorul de ultrasunete deoarece randamentul din circuitul anodic nu depășește 40%. În regimul de lucru, în clasa B, forma curentului anodic se modifică, prezentând o formă semisinusoidală,

randamentul circuitului anodic fiind cuprins între 65% și 85 %. Se întâlnesc trei regimuri subcritic, critic și supracritic. Între regimurile de lucru subcritic și supracritic se află domeniul de lucru, în regim critic care corespunde momentului de apariție a curentului de grilă după caracteristica ideală.

Generatorul de ultrasunete lucrează în regim critic sau apropiat de acesta, deoarece puterea de ieșire și randamentul sunt maxime.

Randamentul generatorului în circuitul anodic va fi:

$$\eta = 0,5 k_u \alpha_1 / \alpha_0 \quad (3.7)$$

Puterea maximă și randamentul maxim se obțin pentru valori ale lui $\theta = 60^\circ - 90^\circ$, când raportul $\alpha_1 / \alpha_0 = 1 + 2$ și $k_u = 0,85 \dots 0,95$.

Acordarea generatorului de ultrasunete este foarte importantă deoarece condițiile de acordare determină regimul de lucru și caracteristicile energetice ale generatorului. Adaptarea generatorului la sarcină se obține prin folosirea unor circuite speciale de cuplaj ale tubului electronic cu circuitul de sarcină. Cuplajul se realizează prin transformatoare, autotransformatoare sau condensatoare de cuplaj. Generatorul de ultrasunete cât sarcina de lucru (alegarea în paralel și b-legarea în serie), și transductorul sunt reprezenta schematic în figurile 3.3a și b.

Pentru ca generatorul să lucreze în sarcină activă trebuie îndeplinită condiția $X = 0$ și $\Sigma X = 0$ (suma impedanțelor să fie zero). Calculul elementului de corecție se face la frecvența de lucru a transductorului, astfel pentru compensarea în paralel, din condiția:

$$X_c + X_{cl} = 0 \quad (3.8)$$

iar pentru compensarea în serie, din condiția:

$$X_c X_{cl}^2 + R_m^2 / (X_c + X_{cl})^2 = 0 \quad (3.9)$$

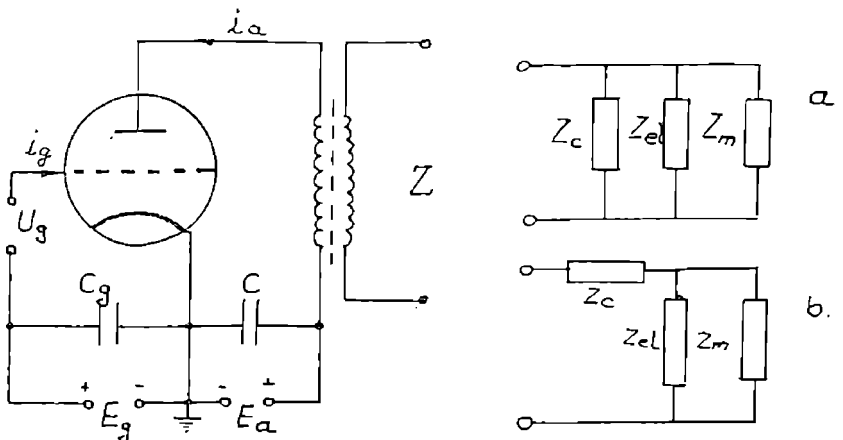


Figura 3.3. Generatorul de ultrasunete cu excitație independentă.

Rezistențele echivalente de sarcină, pentru schema de compunere în paralel, se determină cu formula:

$$R_c = \frac{X_{cl}^2 R_m}{X_c^2 + R_m^2 \left(1 + \frac{X_e}{X_{cl}}\right)^2} \quad (3.10)$$

iar pentru schema în serie, se determină cu formula:

$$R_c' = X_{cl}^2 R_m^2 / (X_{cl}^2 + R_m^2) \quad (3.11)$$

După cum se poate constata, trebuie cunoscute toate componentele lui Z și $\cos \varphi$ ale transductorului. La majoritatea generatoarelor, adaptarea se realizează prin schimbarea numărului de spire ale transformatorului de ieșire. Legătura dintre rezistența echivalentă a generatorului R_c , randamentul transformatorului η_{tr} , numărul optim de spire n și rezistența echivalentă a sarcinii R_c' , se stabilește cu relația:

$$R_c = n^2 R_c' \eta_{tr} \quad (3.12)$$

Generatorul de ultrasunete cu excitație independentă se compune din câteva etaje, printre care oscilatorul pilot (oscilator autoexcitat), care furnizează tensiunea cu frecvența cerută și mai multe etaje de amplificare.

Oscilatorul autoexcitat transformă curentul continuu în curent alternativ fără intervenția unui semnal din exterior.

3.2.2.2. Generatorul autoexcitat cu reacție inductivă

Un generator cu un singur etaj este prezentat schematic în figura 3.4, cu precizarea că generatoarele cu mai multe etaje se folosesc foarte rar.

Dacă într-un circuit oscilant se introduc impulsuri de energie electrică, în acesta apar oscilații amortizate, care pot deveni stabile doar dacă pierderile din circuit sunt compensate cu energia primită din exterior. Completarea pierderilor se face în faza corespunzătoare oscilațiilor existente în circuit.

Amplificarea oscilațiilor se produce până la starea staționară determinată de proprietățile tubului. Frecvența oscilațiilor este determinată doar de parametrii circuitului.

Prin suprapunerea caracteristicilor oscilatorii cu familia dreptelor de reacție, pot fi explicate condițiile de apariție a oscilațiilor și stabilitatea lor față de abaterile de la starea staționară, precum sunt prezentate în figura 3.5.

Regimul de autoexcitație puternică asigură un randament mai bun al generatoarelor din această categorie. Pentru favorizarea apariției oscilațiilor se folosește negativarea automată, în circuitul de grilă, datorită căreia în momentul inițial generatorul lucrează în regim de autoexcitație

ușoară. Pe măsură ce oscilațiile cresc, din cauza curentului de grilă, punctul de lucru se deplasează până la stabilitatea regimului normal de lucru.

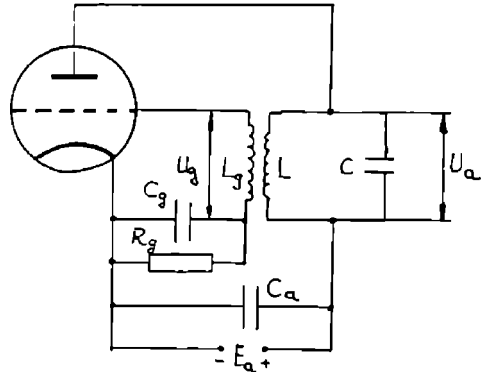


Figura 3.4. Generatorul de ultrasunete cu excitație inductivă.

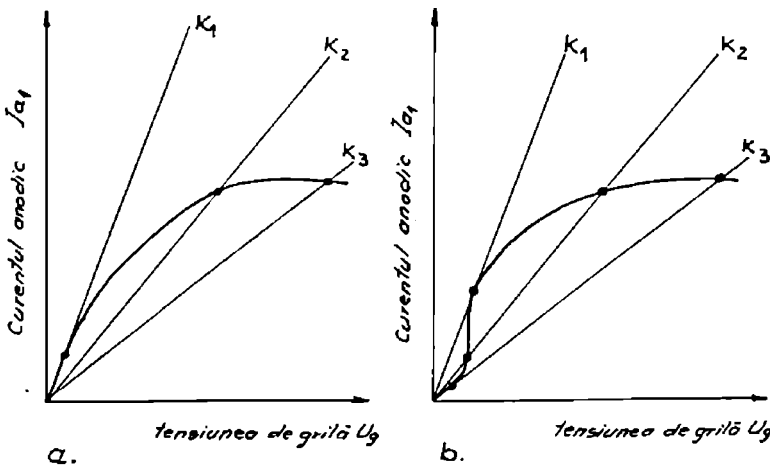


Figura 3.5. Reprezentarea caracteristicilor oscilatorii și a dreptelor de reacție.

Ponderea în exploatare a generatoarelor cu tuburi electronice scade continuu, în locul lor folosindu-se generatoare cu semiconductoare.

Stabilitatea frecvenței generatorului autoexcitat este determinată de precizia și stabilitatea tubului și a circuitului oscilant, de constanta sarcinii,

de variația tensiunii de alimentare, de temperatură. Variațiile tensiunii de alimentare conduc la schimbarea regimului de lucru și a defazajului excitației de grilă în urma variației armonicele componente ale curentului de grilă, precum și la schimbarea puterii de ieșire din generator și la încălzirea elementelor circuitului oscilant. Acest factor are o importanță hotărâtoare în cazul generatoarelor de ultrasunete. Importantă este dependența frecvenței generatorului autoexcitat de acțiunea destabilizatoare a sarcinii, fapt ce conduce la modificarea componentelor reactive a impedanței introdusă în schemă. În acest caz stabilitatea frecvenței poate fi îmbunătățită pe seama folosirii unei scheme cu un factor de calitate mai ridicat.

3.2.3. Generator cu semiconductoare

În acest caz tuburile electronice sunt înlocuite cu tranzistoare sau tiristori. Deoarece tranzistoarele au o putere limitată, folosirea regimurilor de clasă A sau B, la puteri mari este nestăționară.

Randamentul energetic cel mai ridicat 85-98 % se obține în domeniile de saturație și de tăiere, necesitând o putere minimă de disipare în circuitul colectorului.

La folosirea tranzistoarelor în regim de comutație trebuie să se țină seama de următoarele elemente:

- timpii de comutație;
- tranzistorii au o tensiune de alimentare scăzută, putere de ieșire relativ mică, deci pentru obținerea de puteri mari este necesară montarea lor în paralel, într-o schemă de funcționare în contratimp;
- în regimul de comutație, forma tensiunii de ieșire este dreptunghiulară ceea ce face ca armonicele superioare impare, care au o pondere mare, să ducă atât la apariția de pierderi suplimentare în tranzistoare, cât și în transductoare.

Generatoarele de ultrasunete tranzistorizate se construiesc după scheme cu excitație independentă, cu autoexcitație și cu acord automat de frecvență. Fiecare etaj de amplificare funcționează în regim de comutație. Condițiile bune de lucru ale tranzistoarelor sunt datorate montajului acestora cu emitori comuni.

Pentru puteri de 0,1-0,2 KW se folosesc scheme în contratimp, iar pentru puteri mai mari de 0,2 KW se recomandă utilizarea schemelor în contratimp cu montare în semipunte (figura 3.6.).

Pentru a obține puteri mai mari se folosesc scheme cu însumare a puterilor, deci însumare a puterii blocurilor componente, funcționând în contratimp și în semipunte. Comanda blocurilor se face de la un excitator comun, iar ieșirea blocurilor se conectează la un transformator de ieșire comun unde se realizează și însumarea puterii.

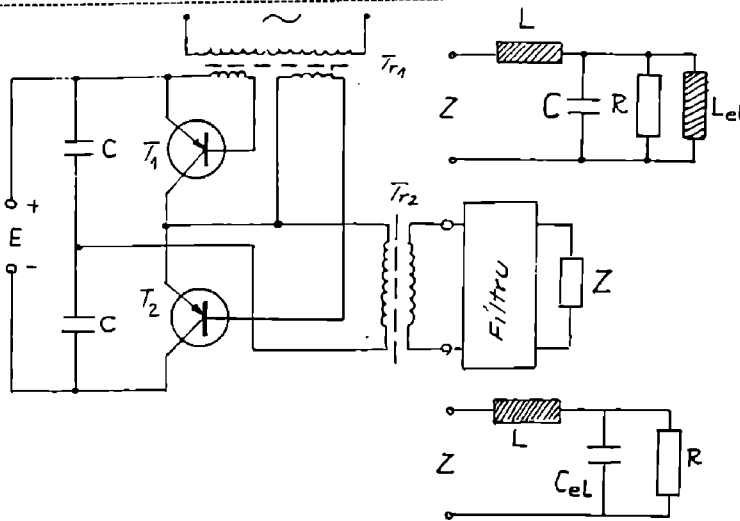


Figura 3.6. Generatorul cu semiconductoare montate în contratimp.

Introducerea filtrelor de corecție are o influență pozitivă nu numai asupra caracteristicilor energetice ale generatorului, ci și asupra formei curentului, obținându-se o formă sinusoidală, ceea ce creează condiții favorabile pentru comutarea tranzistoarelor și permite lărgirea gamei de frecvență.

În figura 3.7.a este arătată schema de conexiune a transductorului magnetostrictiv, unde R , L_{cl} sunt parametrii transductorului iar L și C sunt elementele filtrului de corecție. Impedanța circuitului paralel R , C și L_{cl} are un caracter capacitiv și împreună cu inductanța L asigură rezonanța pe frecvența fundamentală.

Schema de conexiune a transductorului piezoelectric este prezentată în figura 3.7.b. Filtrul de corecție este format din inductanța L și capacitatea C_{cl} , iar parametrii transductorului este rezistența R . Liniile întrerupte indică domeniul de folosință, care este apropiat de fenomenul de rezonanță. Modul de variație a inductanței de intrare a transductorului în funcție de numărul de armonici (în funcție de frecvență) este prezentat în figura 3.7a și b.

Transductoarele magnetostrictive au un randament ridicat, datorită pierderilor mici de putere ce apar la armonici superioare, dar mai mici decât valoarea maximă posibilă. Compensarea în paralel a transductorului prezintă nici un avantaj pentru că în acest caz cresc pierderile în rezistențele interne la armonici superioare deoarece sarcina devine capacitivă și duce la scăderea randamentului.

Mai puțin avantajoasă este folosirea transductorului piezoelectric, la care odată cu creșterea frecvenței, pentru armonici superioare cresc pierderile de semnal. Pentru a obține un randament bun, impedanța Z trebuie competată cu elemente pentru care, la frecvența fundamentală,

rezistența de intrare a sarcinii să devină activă, iar la armonici superioare acestea să mărească considerabil valoarea lui Z . Elementul de corecție (filtrul) trebuie să aibe pierderi minime.

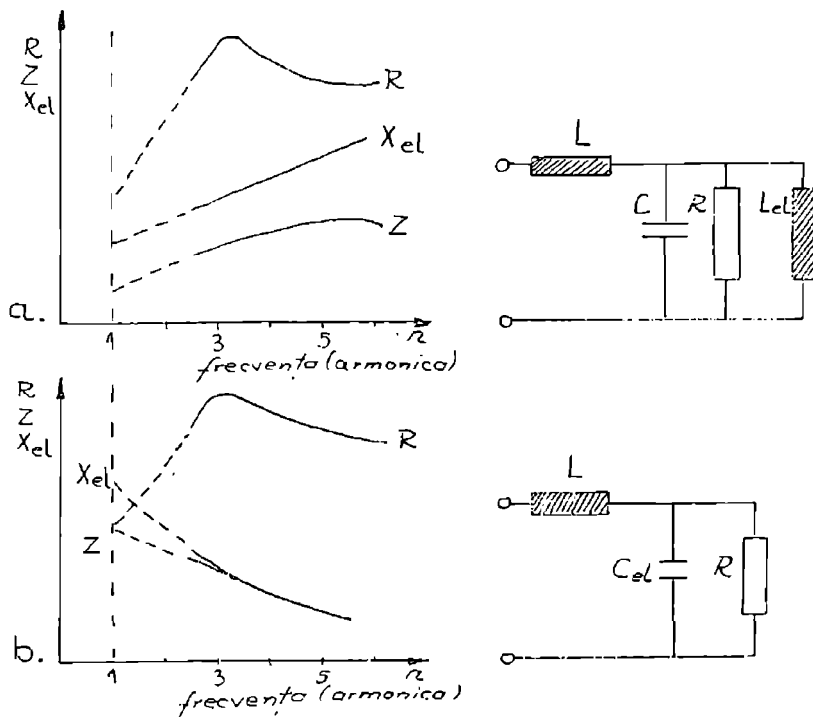


Figura 3.7. Schema de conexiune a transductorului magnetostrictiv (a), piezoelectric (b).

3.3 Acordarea automată a generatorului la frecvența de rezonanță a blocului acustic

În timpul funcționării instalațiilor de ultrasunete se produce modificarea frecvenței de rezonanță a transductorului electroacustic față de frecvența furnizată de generator. Mărimea variației depinde de construcția transductorului, condițiile de exploatare și de caracterul procesului tehnologic. În unele cazuri se poate ajunge la o diferență de frecvență de până la 1,5KHz, ceea ce conduce la variația regimului de funcționare a instalațiilor

deci și la variația parametrilor oscilațiilor ultrasonice în procesul tehnologic. Alunecarea frecvenței de rezonanță este influențată și de încălzirea elementelor transducoarelor, de variația dimensiunilor geometrice ale sculelor de prelucrare din cauza uzurii, de neliniaritatea parametrilor proprii ai transducoarelor și de variația sarcinii exterioare pe transductori.

Alunecarea frecvenței transductorului, de la valoarea fixă a frecvenței furnizate de generator, conduce la reducerea amplitudinii oscilațiilor, respectiv a mărimii puterii utile transmise în sarcina de lucru și ca urmare la reducerea efectului acțiunii tehnologice a ultrasunetelor. Mărirea amplitudinii oscilațiilor este determinată de valoarea alunecării frecvenței proprii a transductorului și de factorul de calitate al acestuia. Acordarea automată a frecvenței trebuie să asigure menținerea valorii maxime a amplitudinii oscilațiilor suprafeței de lucru a transductorului sau a vitezei de oscilație a particolelor, prin apropierea automată a frecvenței generatorului de frecvența de rezonanță a transductorului /2, 8, 9, 29, 41/.

Sistemele de acordare automată a frecvenței realizează separarea semnalului cu ajutorul căruia frecvența generatorului se pune în concordanță cu cea a transductorului, având ca efect obținerea unei valori maxime a oscilațiilor transductorului. Procesele de separare a unui astfel de semnal se împart în două categorii:

a) Separare directă a semnalului cu ajutorul traductoarelor de măsurare electromecanice. Traductorul de măsurare (magnetostriktiv, piezoceramic, inductiv) se montează în anumite puncte ale sistemului de oscilații dând o informație imediată asupra oscilațiilor transductorului. Semnalul transductorului se amplifică cu ajutorul unui amplificator electronic și se aplică generatorului ca un semnal de reacție. În cazul montării traductorului pe suprafața de lucru a transductorului se asigură cel mai veridic semnal de reacție. Acest procedeu este destul de greu de realizat constructiv și necesită, în plus, amplificatoare suplimentare. S-a realizat un traductor care preia frecvența de rezonanță comparând-o cu cea a generatorului și trimite la acesta un semnal de reacție necesar reacordării. Traductorul este încorporat în transductor printr-un miez de reacție solidar cu miezul de lucru (figura 3.8.). Trebuie avut în vedere și faptul că factorul de calitate al buclei de reacție trebuie să fie inferior factorului mecanic de calitate al transductorului, pentru a se evita influența acestei bucle asupra acordării automate a frecvenței.

b) Separarea indirectă, la care semnalul se separă în circuitul electric de alimentare al transductorului.

Schema bloc a generatorului de ultrasunete cu reglare automată a frecvenței este prezentată în figura 3.9. Pentru apariția oscilațiilor în sistem trebuie să se asigure condiția de amplitudine $k(\omega) > 0$ și condiția de fază $\varphi(\omega) = n2\pi$. Aceasta se referă la generatorul autoexcitat care lucrează în clasa A sau în clasa B.

1. Transductor
2. Traductor de oscilații
3. Concentrator

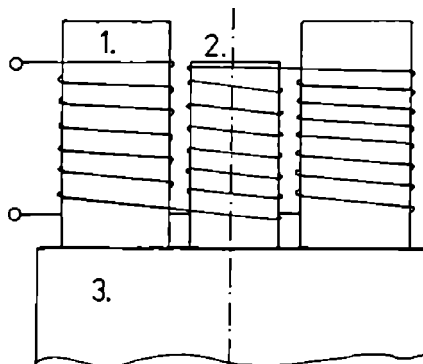


Figura 3.8. Schema transductorului cu element de reacție.

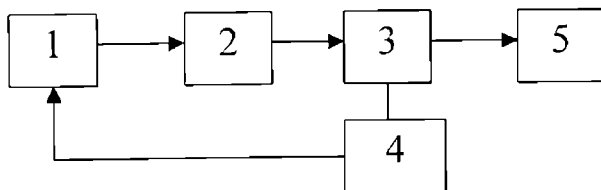


Figura 3.9. Schema bloc a sistemului de reglare.

3.4. Tipuri de transductoare

3.4.1 Materiale folosite în construcția transductoarelor

Pentru construirea transductoarelor se folosesc, în principal, materiale piezoceramice și magnetostrictive.

3.4.1.1. Materiale piezoelectrice

Fenomenul de piezoelectricitate prezintă două aspecte complementare: PRESIUNE- ELECTRICITATE. Prin aplicarea unei tensiuni mecanice se produce o redistribuire a sarcinilor în volum, rezultând o polaritate volumică și o sarcină electrică indusă pe suprafață. Prin aplicarea unui câmp electric se produce deformarea materialului. Fenomenul de piezoelectricitate reprezintă o strânsă legătură între mărimile dielectrice și

mecanice /53/. In figura 3.10. sunt reprezentate schematic legăturile care se pot stabili între :

tensiunea mecanică	T
câmpul electric	E
deformarea elastică	S
inducția electrică	D

Alegerea variabilelor independente ale sistemului este arbitrară, putându-se alege oricare din cele două. Astfel în anumite cazuri este necesar să se scrie ecuații pentru situația când mediul piezoelectric este deformat datorită câmpului electric, rezultând un set de ecuații /53,60/:

$$\begin{aligned}
 T &= C^D S - h_i D \\
 E &= -hS + \beta^S D \\
 S &= g_i D + S^D T \\
 E &= \beta^T D - gT \\
 T &= C^E S - e_i E \\
 D &= eS + \epsilon^S E
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

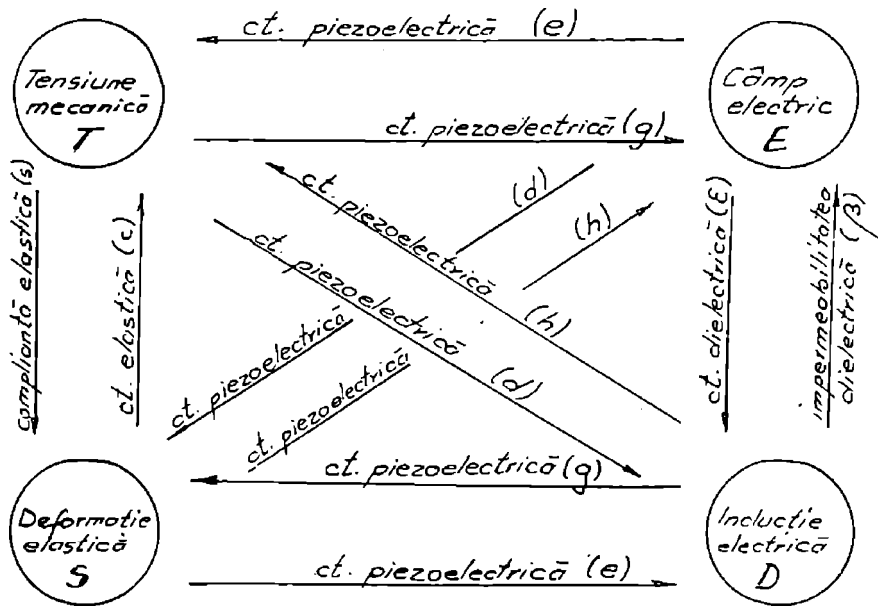


Figura 3.10. Dependența T.E.S.D.

$\varepsilon^r = \left(\frac{\partial D}{\partial E} \right)_r$ constantă dielectrică (permitivitate) măsurată la efort mecanic constant sau nul;

$d = \left(\frac{\partial D}{\partial T} \right)_E$ constantă piezoelectrică măsurată în câmp electric constant sau nul;

$d_i = \left(\frac{\partial S}{\partial E} \right)_r$ constantă piezoelectrică măsurată la efort mecanic constant sau nul;

$S^E = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_E$ compliantă elastică măsurată în câmp electric constant sau nul;

$\varepsilon^S = \left(\frac{\partial D}{\partial E} \right)_S$ constantă dielectrică măsurată la deformare constantă sau nulă;

$e_i = \left(\frac{\partial T}{\partial E} \right)_S$ constantă la efort piezoelectric măsurată în câmp electric constant sau nul;

$\beta^r = \left(\frac{\partial E}{\partial D} \right)_r$ constantă la efort piezoelectric măsurată la deformare constantă sau nulă;

$\beta^S = \left(\frac{\partial E}{\partial D} \right)_S$ constantă de impermeabilitate dielectrică măsurată la efort mecanic constant sau nul;

$C^E = \left(\frac{\partial T}{\partial S} \right)_D$ constanta de impermeabilitate dielectrică măsurată la deformare constantă sau nulă;

$C^E = \left(\frac{\partial T}{\partial S} \right)_E$ constanta de rigiditate elastică măsurată în câmp electric constant sau nul;

$C^D = \left(\frac{\partial T}{\partial S} \right)_D$ constanta de rigiditate elastică măsurată la inducție electrică constantă sau nulă;

$g = \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_D$ constanta de deformare piezoelectrică măsurată la inducție electrică constantă sau nulă;

$g_i = \left(\frac{\partial S}{\partial D} \right)_r$ constanta de deformare piezoelectrică măsurată la efort mecanic constant sau nul;

$S^D = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_D$ complianta electrică măsurată la inducție electrică constantă sau nulă;

$h = \left(\frac{\partial E}{\partial S} \right)_{T,D}$ constantă de efort piezoelectric măsurată la inducție electrică

constantă sau nulă;

$h_i = \left(\frac{\partial T}{\partial D} \right)_S$ constanta de efort piezoelectric măsurată la deformare constantă

sau nulă;

Intre aceste constante există numeroase relații de legătură, de forme matriciale, regăsite și în matricea elasto-piezo-dielectrică. În ecuațiile prezentate s-au notat S, T sunt tensorii deformărilor, a tensiunilor mecanice având 6 componente independente, iar E, D tensorii câmpului electric, ai inducției electrice având 3 componente independente.

Matricea tensorului complianțelor elastice [S], are forma 6x6, și conține 21 coeficienți independenți. Matricea coeficienților piezoelectrice [d], de tipul 3x6, are 18 elemente independente. Matricea permitivităților dielectrice [ε], de tipul 3x3, are 6 elemente independente.

Prin cunoașterea celor 45 constante elastice, dielectrice și piezoelectrice, se poate stabili comportarea unui solid piezoelectric care este supus unui câmp electric (perturbații exterioare).

Diversitatea materialelor piezoelectrice este foarte mare:

- monocristaline (cuarț, TGS ...);
- policristaline (ceramici piezoelectrice ...);
- amorfe (lemn);
- materiale biologice (mușchi, tensoane, ...).

În funcție de simetria caracteristică fiecărui corp piezoelectric, matricea elasto-piezo-dielectrică (cuprinde toți coeficienții elastici, piezoelectrice și dielectrice independenți) se simplifică în mod corespunzător.

Pentru cuarț matricea elasto-piezo-dielectrică se reduce la :

- 7 coeficienți independenți – elastici;
- 2 coeficienți independenți – piezoelectrice;
- 3 coeficienți independenți – dielectrice;

iar pentru materialele ceramice piezoelectrice să obținem :

- 5 coeficienți elastici independenți ;
- 3 coeficienți dielectrice independenți ;
- 3 coeficienți piezoelectrice independenți .

Dintre materialele piezoelectrice cu cea mai largă întrebuințare sunt ceramicele piezoelectrice. Dintre ceramicele folosite mai des sunt cele care cristalizează în structura lor de tip perovski, structură care poate fi descrisă în mod ideal ca o celulă unitate cubică cu un cation mare (A) în colțuri, un cation mic (B) în centrul cubului și oxigenul în centrul fețelor. O astfel de structură este prezentată în figura 3.11. Dintre ceramicele de acest tip amintim:

- soluția solidă de titanat de plumb;
- soluția solidă de zirconat de plumb;

- soluția solidă de titanat de bariu;
- soluția solidă de titanat -zirconat de plumb.

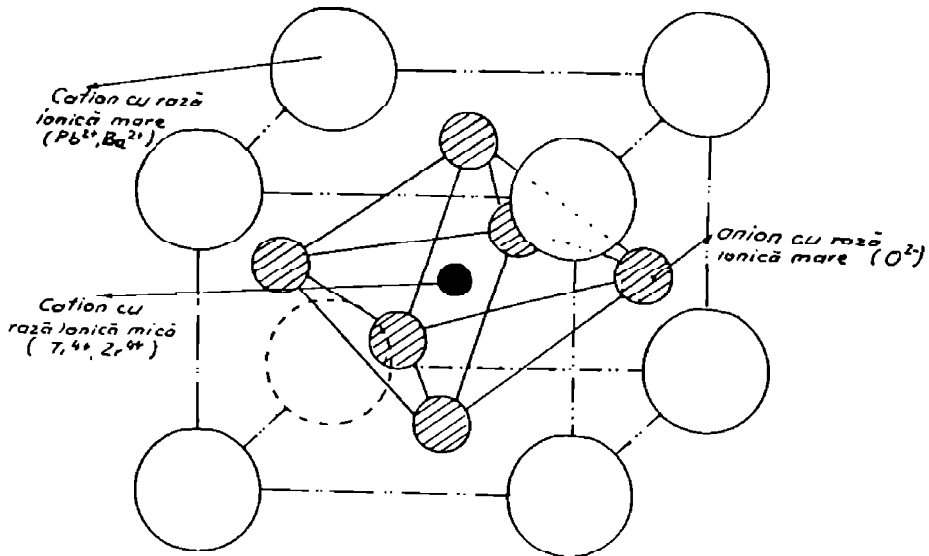


Figura 3.11. Structură de tip perovski.

Ceramica sinterizată este o aglomerare de mici cristale aranjate într-un mod întâmplător, deci un mediu izotrop, care nu poate prezenta proprietăți piezoelectrice decât dacă i se imprimă o axă de anizotropie, care se realizează printr-un tratament de polarizare în urma căruia ceramica dobândește un moment dipolar net, moment ce va răspunde liniar la câmpul electric sau tensiunea mecanică aplicată. Polarizarea se face în băi de ulei - la temperaturi apropiate de temperatura Curie și în câmp electric de intensitate mare (20-30 KV/cm). Axa de polarizare este o axă de simetrie, de rotație, de ordin ∞ , prin ea trecând un număr infinit de plane de reflexie.

Cristalele sinterizate se află în domeniul feroelectric cu orientarea dipolilor în mod aleator, dar prin polarizare se obține o orientare a dipolilor, deci o axă de rotație (direcție de polarizare) după care legătura dintre câmpul electric - deformare este liniară. Celelalte axe nu dau o lege liniară de legătură

La unele materiale piezoelectrice se constată existența a două faze feroelectrice care coexistă într-un interval destul de îngust (maxim 5%). Lărgirea intervalului compozițional și parametrii de rețea ai celor două faze

coexistente sunt afectate de condițiile tehnologice de obținere a materialului și în primul rând de temperatura de sinterizare. Existența celor două faze este predispusă cazului când cationul mic poate fi unul din cele două elemente componente ale ceramicii -Zr, Ti-în cazul $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$.

S-a constatat că la granița de fază (cele două faze feroelectrice) coeficienții care caracterizează ceramica piezoelectrică prezintă valori maxime ceea ce duce la creșterea posibilității de orientare a dipolilor în timpul polarizării și deci conduce la creșterea polarizării remanente.

Ceramicile piezoelectrice își caracterizează comportamentul și prin alte mărimi ca:

- temperatura Curie (T_c);
- factorul de cuplaj electromecanic (K);
- factorul de calitate mecanică (Q_m);
- factorul de disipare electrică ($\text{tg } \delta$);
- variația acestor factori funcție de temperatură;
- variația acestor factori funcție de câmpul electric.

Este normal ca ceramicile piezoelectrice la care există două faze feroelectrice să prezinte proprietăți superioare celor care au doar o fază feroelectrică. Calitatea ceramicii se exprimă prin K, Q_m , $\text{tg } \delta$ și prin stabilitatea acestora în timp. Totuși acești factori pot varia în timp datorită:

- depolarizării termice;
- depolarizării mecanice;
- depolarizării electrice;
- îmbătrânirii naturale în timp.

Prin modul de presare în timpul sinterizării se pot obține materiale astfel încât oricare axă să poată fi aleasă și concepută ca axă de polarizare. Ceramicile piezoelectrice prezintă următoarele avantaje în realizarea transductorilor:

- stabilitate termică;
- temperatura de funcționare relativ mare;
- ușor de realizat la diferite forme (configurații);
- nu apar pierderi datorită fenomenului de histererezis;
- randament de conversie maxim (90 %);
- oricare axă poate fi făcută axă de polarizare.

Dezavantajele ceramicilor piezoelectrice :

- nu au aceeași calitate după toate axele;
- pot prezenta unele imperfecțiuni după sinterizare;
- amplitudine de ieșire limitată (la depășirea ei se produce spargerea ceramicii).

Câteva tipuri de materiale piezoelectrice:

- a) cristale: LiGaO_2 ; LiNbO_3 ;
 - b) ceramice PbTiO_3 ; BaTiO_3 ; $\text{Pb}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$ sau (PZT);
- Ø: PZT2; PZT4; PZT5A; PZT5H; PZT7A;

c) pelicule: CdS; CdSe; ZnO.

3.4.1.2 Materiale magnetostrictive

Există unele materiale care introduse într-un câmp magnetic exterior își modifică dimensiunile. Acest fenomen poartă numele de magnetostricțiune. În practică se întâlnește fenomenul de magnetostricțiune sub următoarele forme:

Magnetostricțiune longitudinală - la care modificarea dimensiunii se face după o singură direcție, care coincide cu direcția de magnetizare.

Magnetostricțiune transversală - la care modificarea dimensiunii se face după o direcție perpendiculară pe direcția de magnetizare.

Magnetostricțiune de volum - la care modificarea dimensiunii se face în toată masa materialului.

Cel mai cunoscut tip, și cu cele mai multe aplicații, este magnetostricțiunea longitudinală. Efectul magnetostrictiv este un efect par, deoarece semnul deformației nu se schimbă la variația sensului câmpului magnetic. Într-un material feromagnetic, magnetostricțiunea se manifestă în interiorul fiecărui domeniu magnetic, datorită deformării spontane a rețelei cristaline în direcția vectorului magnetizării spontane, dar datorită orientării haotice a domeniilor, deformarea medie este nulă.

În momentul aplicării unui câmp exterior, domeniile magnetice se orientează pe direcția câmpului exterior, apărând o deformare evidentă, egală cu suma deformațiilor domeniilor. În figura 3.12 este prezentată curba de magnetizare /21, 22, 68/.

Porțiunea OA, pe curba de magnetizare, corespunde deplasării elastice a pereților Bloch. Această porțiune se poate evidenția atât în figura 3.12a - care corespunde punctului 0, cât și în figura 3.12b - care corespunde porțiunii OA. Câmpul magnetic exterior are o valoare mică, iar deplasarea este mică și reversibilă. Porțiunea AB corespunde cu zona de transformări ireversibile. Crescând câmpul magnetic în structura cu domenii WEISS, apar transformări care duc la ruperea unor pereți Bloch, apărând domenii mai mari, figura 3.12c. În punctul B, unde se atinge valoarea câmpului magnetic de saturație, orientarea momentelor magnetice ale dipolilor coincide cu orientarea câmpului magnetic exterior. Deplasările ireversibile ale pereților Bloch devin tot mai numeroase, astfel că, în punctul B (figura 3.12d) se atinge valoare de saturație. La o scădere a câmpului magnetic exterior, starea de magnetizare nu revine la starea inițială, deci deplasarea nu se face pe aceeași curbă, ci pe o curbă situată deasupra (cea cu linie punctată). Porțiunea BC corespunzătoare zonei de saturație se manifestă prin rotația momentelor magnetice ale atomilor dipolilor la o creștere mai mare a câmpului magnetic exterior. Nu au loc ruperi de pereți Bloch, materialul fiind saturat (figura

3.12e). Zona BC este o zonă reversibilă, rotația spinilor magnetici dispărând odată cu reducerea câmpului magnetic exterior, revenind pe dreaptă până în punctul B.

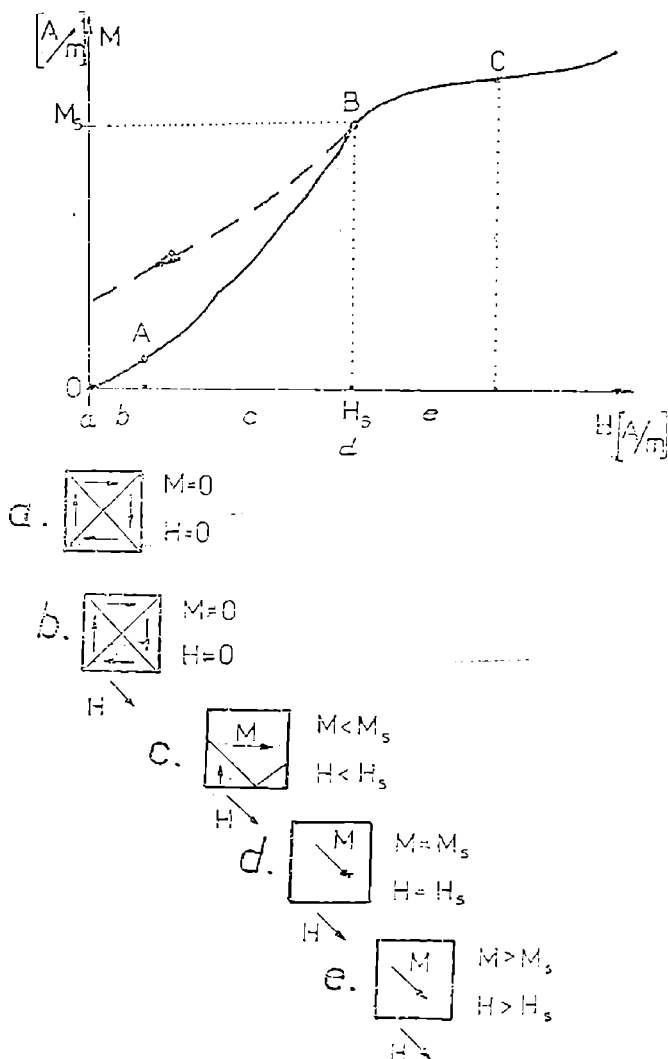


Figura 3.12. Curba de magnetizare a materialelor magnetice.

Deformarea materialului depinde de direcția magnetizării în raport cu axele cristalografice. Cuplajul dintre magnetizare și deformarea mecanică este o consecință a structurii de domenii a materialelor feromagnetice și tensiunilor elastice generate, când vectorii magnetici ai

domeniilor se rotesc sub influența câmpului magnetic aplicat. Dacă un câmp magnetic se aplică paralel cu axa unei bare din material magnetostrictiv, alungirea barei Δl , este rezultatul însumării tuturor deformațiilor microscopice elementare produse în elementul de bază.

$$\Delta l = b \cdot l_0 \cdot B_0^2 \quad (3.14)$$

unde: b - constantă de material;

B_0 - inducția magnetică;

l_0 - lungimea inițială.

Semnul deformații este independent de sensul câmpului magnetic aplicat, deoarece inducția magnetică este la puterea a doua. Dacă peste câmpul de magnetizare constant H_0 , se aplică un câmp de activare variabil H , se obține un efect liniar. În figura 3.13 sunt prezentate deformațiile specifice în funcție de intensitatea câmpului magnetic.

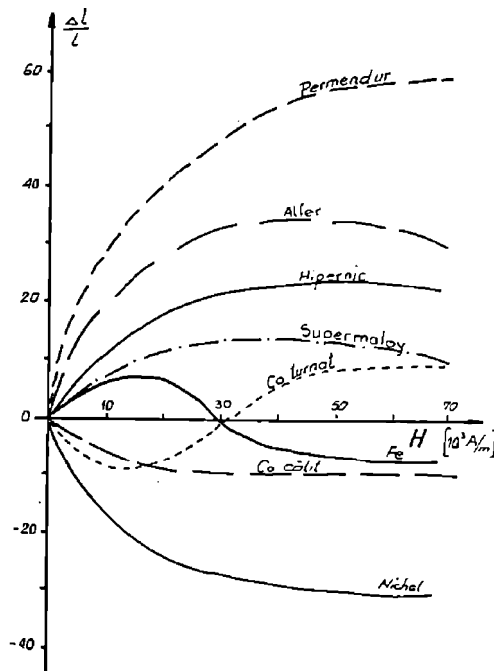


Figura 3.13. Deformațiile specifice funcție de intensitatea câmpului magnetic.

Ecuatiile fundamentale ale corpurilor magnetostrictive sunt:

$$S = 2 \cdot b \cdot B \cdot B_0 = \gamma \cdot B ;$$

$$T = \Delta \cdot B ;$$

$$T = \gamma_0 \cdot B ; \quad (3.15)$$

$$\Delta = \gamma \cdot \gamma_0 ;$$

$$H = B_1 / \mu_0 \cdot \mu_1 - \Delta \cdot S.$$

cu notațiile: S – deformarea; γ - constanta de deformare magnetostrictivă;
 T - tensiunea mecanică; γ_0 - modulul lui Young al materialului;
 Δ - constanta de tensiune magnetostrictivă, putând lua valori negative sau pozitive, după cum se comportă materialul la o variație a câmpului magnetic;
 μ_0 - permeabilitatea magnetică a vidului; μ_1 - permeabilitatea magnetică a materialului.

În figura 3.14 se prezintă schematic diagrama de interacțiune a celor patru mărimi dependente (S , T , B , H).

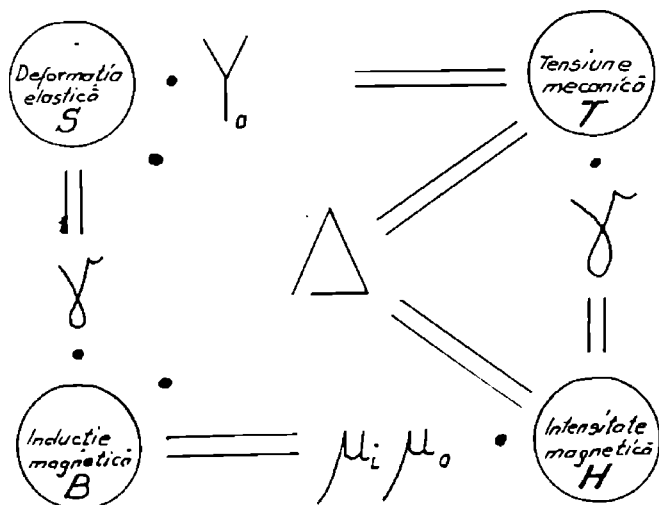


Figura 3.14. Diagrama de interacțiune a mărimilor S, T, B, H .

Materialele magnetostrictive se împart în două categorii:

- materiale magnetostrictive metalice: nichel, aliaje de nichel și aluminiu, aliaje de fier și aluminiu;

- materiale magnetostrictive ceramice: ferite.

Materialele magnetostrictive sunt caracterizate prin următoarele mărimi:

- temperatura Curie T_c - pentru ferite;

- factorul de cuplaj magneto-mecanic;

- rezistența mecanică;

- variația factorului de cuplaj cu mărimea câmpului de magnetizare.

Materialele magnetostrictive metalice prezintă următoarele avantaje:

- rezistență mare la solicitări mecanice;

- suportă temperaturi Curie ridicate;

Dezavantaje:

- coeficient de cuplaj magnetomecanic mic;
- pierderi prin histerezis;
- pierderi prin curenți turbionari, care conduc la încălzirea elementului magnetostrictiv.

Feritele magnetostrictive prezintă următoarele avantaje:

- nu produc pierderi prin curenți turbionari;
- au rezistență ridicată la coroziune;
- au randament magneto-electro-mecanic mai bun decât al materialelor magnetostrictive metalice.

Dezavantaje:

- fragilitate ridicată;
- rezistență mecanică scăzută (nu se folosesc la puteri mari);
- coeficient de cuplaj mai mic decât al materialelor piezoelectrice.

3.4.2. Transductor piezoelectric

Problema vibrațiilor elastice în ceramici piezoelectrice, îndeosebi pentru anumite geometrii simple (bară, cilindru, placă, sferă) și în cazul specificării direcției de anizotropie, se simplifică conducând la realizarea unor soluții simple și la obținerea parametrilor și constantelor de material prin intermediul circuitului echivalent (care leagă soluțiile problemei vibrațiilor de câmpul electric aplicat).

Ceramicile polarizate, aparținând clasei de simetrie D_{mm} , au matricea coeficienților elastici, piezoelectricsi și dielectricsi mult simplificată, cuprinzând următoarea formă:

$$[e] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & e_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{11} & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{31} & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

$$[c] = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

$$[\varepsilon] = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

Prezentarea ecuațiilor și mărimilor caracteristice vibrațiilor elastice în materiale piezoelectrice se poate face în două feluri:

- nu se ține seama de pierderi iar ecuațiile au forma matricială originală;
- se ține cont de pierderi, iar ecuațiile vor fi transformate prin scrierea lor în complex.

În cazul pierderilor mici se poate folosi metoda a) care dă rezultate bune.

Transductorul piezoceramic simplu este un corp vibrator format din unul sau mai multe elemente active, piezoceramice, astfel dispuse încât comportarea traductorului să poată fi asimilată cu cea a unui singur element. Se impune absența discontinuității de material și de suprafață între elementele componente. Formele cele mai obișnuite (uzuale) de transductoare simple sunt prezentate în figura 3.15.

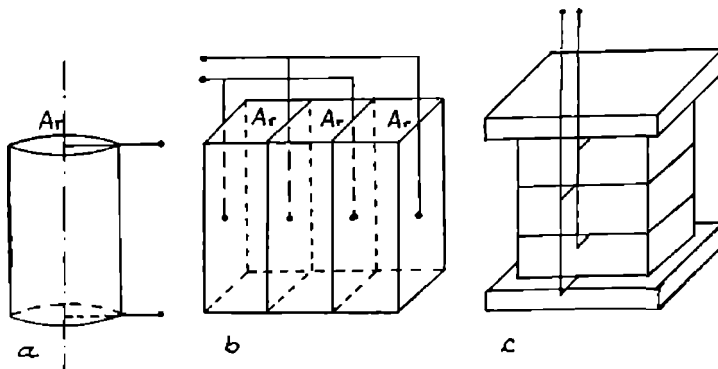


Figura 3.15. Forme uzuale ale transductoarelor piezoceramice.

Vibrația longitudinală nu este influențată de forma secțiunii, ci numai de suprafața de radiație $-A_r$. Dacă elementii transductorului sunt inseriați, parametrii săi coincid cu cei ai transductorului compact.

Dacă legătura este în paralel, se folosesc unele relații de legătură, cu restricția să nu se depășească suprafața de radiație a concentratorului. Formulele de calcul diferențindu-se după felul vibrației acustice, care pot fi longitudinale, transversale și uneori după configurația secțiunii transversale.

O clasificare a traductorului piezoceramic este prezentată schematic în tabelul 3.2.

Tabelul 3.2. Clasificarea transductoarelor piezoelectrice.

TRANSDUCTOARE PIEZOELECTRICE	Simple	1. După direcția de vibrație	Longitudinal Transversal
		2. După forma secțiunii	Circulară Inelară Poligonală
		3. După felul elementelor componente	Compact Secționat Segmentat Secționat și segmentat
	Compușe polarizate mecanic		
	Compușe	1. După locul de plasare a planului normal	Între elementele piezoceramice La limita elementelor piezoceramice
		2. După direcția de vibrație	Longitudinal Transversal
		3. După tipul constructiv	Simetrice Asimetrice
		4. După felul elementelor componente	Un element pasiv Două elemente pasive Un element activ Mai multe elemente active

Parametrii care caracterizează funcționarea unui transductor piezoceramic sunt:

1. frecvențele de rezonanță mecanică și electromagnetică;
2. coeficientul transformării electromagnetice;
3. puterea acustică emisă la rezonanță;
4. puterea acustică emisă la joasă frecvență;
5. tensiunea electrică necesară unei anumite puteri acustice;
6. caracteristica de frecvență a puterii acustice;
7. factorul de calitate mecanic;
8. impedanța electrică;
9. randament electroacustic;
10. sensibilitatea de recepție la rezonanță;
11. sensibilitatea de recepție la frecvențe joase;

12. caracteristica de frecvență a sensibilității de recepție.

Transductoarele de tip bară, cu secțiune pătrată sau dreptunghiulară, se caracterizează prin faptul că dimensiunea corespunzătoare direcției de vibrație este comparativ mai mare decât cea a suprafeței de radiație.

Transductoarele tip cilindru sau inel cilindric, se caracterizează prin faptul că aria de recepție a câmpului electric este aria laterală, iar suprafața de radiație este cea de bază. În cazul cilindrului inelar compact, electrozii depuși pe suprafețele laterale interioare și exterioare permit funcționarea pe baza efectului piezoelectric transversal.

Transductorul cilindric segmentat, are electrozii montați pe suprafețele plane, segmentii fiind dispuși în așa fel încât polarizarea a doi segmenti succesivi să fie de semn opus, ei fiind conectați în paralel. Efectul piezoelectric produs este longitudinal.

Transductorul compus este un ansamblu rezonant de elemente active (piezoceramice) și pasive (nepiezoceramice) care convertește cu eficiență maximă un semnal variabil, de natură electrică, într-o mărime mecanică, fiind astfel proiectat încât să asigure frecvența, amplitudinea de vibrație, directivitatea și puterea corespunzătoare scopului propus. El este format din următoarele părți:

- elementul activ - sursa de vibrații - este de tip piezoceramic;
- elementul radiant - transmite vibrațiile de la sursă la sarcină – este de natură metalică;
- elementul reflectant - stopează transmiterea vibrațiilor – este de natură metalică.

Transductorii compuși sunt destinați să radieze vibrații unidirecționale. Elementul ceramic este acționat de un oscilator electronic (generator de înaltă frecvență), cu o frecvență egală cu cea a ansamblului, transductorul fiind considerat un ansamblu în regim de oscilație forțată. Un astfel de sistem necesită o tratare matematică foarte complicată, în care trebuie să se considere cele cinci medii diferite, reprezentând transductorul, și mediile de contact, iar ceramica să se considere mediul piezoceramic, tratarea făcându-se prin funcții dependente de timp și de cele trei coordonate spațiale.

Modelul matematic simplificat se bazează pe următoarele ipoteze simplificatoare:

- se iau în considerare numai vibrațiile longitudinale;
- influența mediilor de contact se neglijează;
- ceramica piezoelectrică se consideră mediu activ omogen și izotrop;
- mediile refractar și radiant se consideră medii pasive omogene și izotrope;
- axa de vibrație coincide cu axa de polarizare, fiind totodată și axă de simetrie.

Elementul piezoceramic este astfel amplasat încât amplitudinea tensiunilor să fie limitată și să fie în fază cu vibrațiile întregului ansamblu.

Elementul activ vibrează cu amplitudine relativ mică, dar produce tensiuni mari în elementele pasive cu care se află în contact.

Transductoarele, în nodul de vibrație (în centru), au coeficientul de cuplaj electromecanic mai mare. Amplitudinile de vibrație, la suprafețele exterioare, sunt condiționate de raportul impedențelor acustice.

Transductoarele asimetrice (figura 3.16) au planul nodal situat între elementele piezoelectrice și elementul radiant și permit reglarea eficiență a amplitudinii de vibrație prin alegerea materialului elementului reflector.

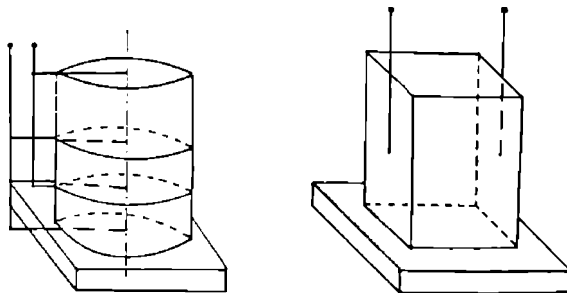


Figura 3.16. Transductoare asimetrice.

Acesta trebuie ales astfel încât să se obțină un coeficient de cuplaj electromecanic maxim. Volumul și poziția elementului piezoelectric decide puterea efectivă a ansamblului transductor. Ceramicile admit o încărcare de 6 W/cm^2 și grosimi de 5-10 mm pentru puteri mari.

Există o limită a raportului dintre lungimea părții ceramice și întregul ansamblu, raport condiționat de apariția neomogenității în distribuția tensiunilor în elementul activ, fapt ce poate duce la spargerea ceramicii sau la micșorarea coeficientului de cuplaj electromecanic.

Plasarea adecvată a elementului activ în transductor este o problemă vitală și ea permite obținerea unui randament maxim.

Pentru un transductor simetric (figura 3.17) cu nodul de vibrație în centrul elementului piezoelectric și părțile pasive identice se constată o distribuție uniformă a vibrațiilor în tot transductorul.

În cazul deplasării elementului piezoelectric spre capătul din spate al transductorului limitează pierderile mecanice în ceramica piezoelectrică. Pierderile mecanice sunt proporționale cu pătratul tensiunii mecanice. Prin această amplasare tensiunile mecanice scad. O astfel de construcție asigură o eficiență mai bună a transductorului dar se modifică alți parametri:

- crește rezistența de radiație;

- scade coeficientul de cuplaj;
- se micșorează banda de frecvență;

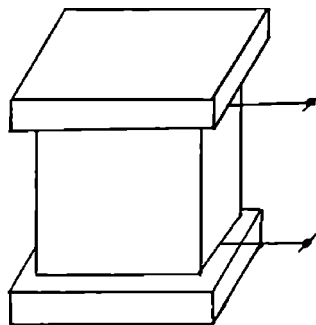


Figura 3.17. Transductor piezoceramic simetric.

Creșterea rezistenței de radiație conduce la creșterea tensiunii electrice, deci crește intensitatea câmpului electric ceea ce duce la creșterea pierderilor electrice în ceramică. Totuși, această amplasare facilitează răcirea transductorului în timpul lucrului, dar creșterea puterii duce și la mărirea dimensiunilor elementelor piezoelectrice.

În cazul transductoarelor compuse, calculele au un caracter aproximativ, rezultatele finale se obțin după realizarea și corectarea construcției. Necesitatea construirii transductoarelor compuse provine din faptul că elementele piezoceramice simple nu pot asigura puterea acustică mare, amplitudinea de vibrație și frecvența de lucru necesară la unele aplicații tehnologice.

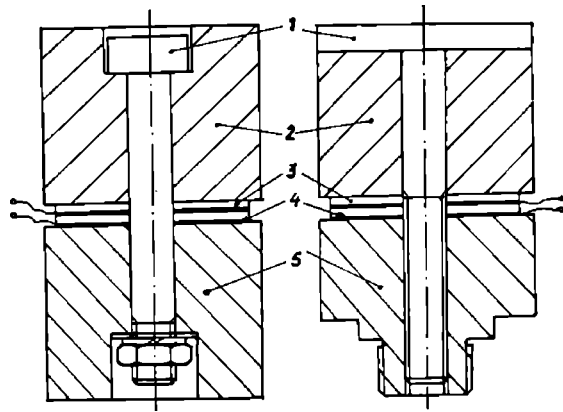
La transductorul compus și polarizat mecanic, polarizarea se realizează prin tensionarea ceramicii piezoelectrice de către un șurub de rezistență mare (figura 3.18.). Planul nodal de vibrație ($v=\min.$) este întotdeauna localizat în partea activă a transductorului. Tensiunea se poate face până la $T \cong T_{\max}$. (limita de rezistență la dilatare mecanică a ceramicii), deoarece la depășirea acestei valori există pericolul ca ceramica să se distrugă.

Rolul polarizării mecanice este de a tensiona ceramica astfel încât, în funcționare, oscilațiile tensiunii elastice să se facă nu în jurul valorii de zero, ci față de nivelul introdus prin polarizare mecanică (figura 3.19).

Un astfel de transductor, asigură o putere acustică mai mare, și influențează frecvența de rezonanță. Se impune condiția ca șurubul de polarizare să aibe aceeași caracteristică ca și elementul reflector.

În proiectarea transductoarelor piezoceramice, în scopul obținerii rezonanței la o anumită frecvență se observă că utilizarea modelului matematic simplificat conduce la abateri mari de frecvență. Aceasta se explică prin faptul că s-a luat în considerare numai direcția longitudinală de oscilație și s-a neglijat cea transversală (cuplajul transversal).

- 1. șurub de strângere
- 2. element radiant
- 3. pastile piezoceramice
- 4. garnituri metalice



3.18. Transductor piezoceramic polarizat mecanic.

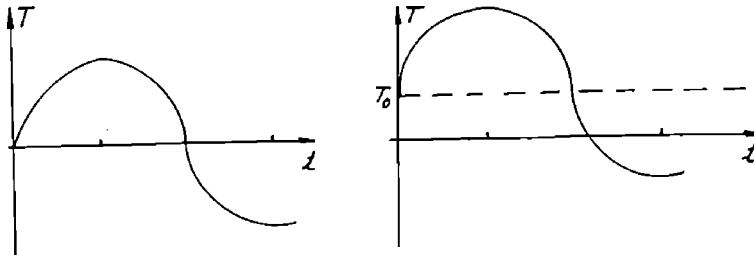


Figura 3.19. Tensiunea elastică la transductorul polarizat mecanic

În cazul în care lungimea de undă este mult mai mică decât diametrul barei (dimensiuni comparabile), aceasta se comportă cu un mediu solid nelimitat existând un domeniu de dispersie, adică o zonă în care viteza undelor longitudinale depinde de lungimea de undă.

Deformarea statică a unui transductor (traductor) se poate calcula cu formula:

$$\Delta l_{st} = d \cdot U \quad (3.19)$$

unde: d – modulul piezoelectric; U – tensiunea aplicată.

Dacă plăcuța este conectată la un oscilator electric de înaltă frecvență, ea va transforma oscilațiile electrice în unde mecanice elastice, puterea acestor vibrații mecanice va depinde de :

- frecvență;
- suprafața plăcuței;
- tensiunea aplicată.

Pentru a obține intensitatea maximă de radiație este necesar ca frecvența proprie a plăcuței să coincidă cu frecvența sursei de alimnetare, definindu-se un factor calitativ Q cu formula:

$$Q = \frac{\pi}{4} \frac{\rho_c c_{cr}}{\rho_{med} c_{med}} \quad (3.20)$$

unde: ρ - densitatea mediului (cristalului);
 c - viteza sunetului în mediu (în cristal).

Frecvența proprie f_0 a plăcuței corespunde aproximativ unei lungimi de undă, putând fi calculată cu formula:

$$f_0 = c_{cr} / 2l \quad (3.21)$$

unde: l – este grosimea plăcuței.

Pentru mărirea puterii unui transductor se folosesc vibratoarele complexe. Un cristal piezoelectric prevăzut pe ambele părți cu plăcuțe metalice, se numește vibrator complex. Plăcuțele metalice reprezintă electrozii transductorului. Un transductor complex se poate compune din una sau mai multe plăcuțe piezoelectrice, ceea ce asigură o suprafață mai mare de radiație și o putere mai mare. La alcătuirea unui astfel de mozaic, trebuie alese plăcuțele care au un coeficient de transformare acustică cât se poate de uniform, fiind așezate în așa fel încât să se respecte polaritatea. Pentru un astfel de ansamblu se poate calcula frecvența de rezonanță cu relația (3.21), în care viteza sunetului în plăcuță se va înlocui cu o viteză echivalentă de forma:

$$C = \frac{p_1 c_{cr} + p_2 c_{met}}{p_1 + p_2} \quad (3.22)$$

unde: $p_{1,2}$ – reprezintă ponderea cristalului sau a armăturii în alcătuirea transductorului.

Materialul metalic folosit în realizarea transductorului trebuie să îndeplinească o condiție foarte importantă:

$$c_{cr} \approx c_{met} \quad (3.23)$$

Dificultatea realizării unui astfel de traductor constă din imposibilitatea menținerii lipiturii dintre armături și cristal (plăcuța piezo) la vibrații puternice și puteri ridicate (frecvențe mai mari de 40.000 Hz).

3.4.3. Transductoare magnetostrictive

Principiul de funcționare al transductoarelor magnetostrictive se bazează pe modificarea dimensiunilor unui corp feromagnetic sub acțiunea unui câmp magnetic variabil suprapuse peste un câmp magnetic de magnetizare. Se cunosc două tipuri de fenomene magnetostrictive:

- liniare (deformația are loc liniar), în direcția aplicării câmpului magnetic;
- volumice (deformația are loc în tot volumul corpului).

Magnetostricțiunea liniară apare numai în câmpuri magnetice relativ slabe și corespunde porțiunii nesaturate a curbei de primă magnetizare, în timp ce magnetostricțiunea volumică apare numai la câmpuri magnetice foarte puternice, și corespunde porțiunii saturate a curbei de magnetizare, fapt pentru care nu se folosește la producerea ultrasunetelor [29, 46, 68, 74].

Pentru a evita efectul de dublare a frecvenței și pentru a mări amplitudinea, respectiv intensitatea ultrasunetelor, se folosește un câmp magnetic de polarizare (de magnetizare). Valoarea câmpului magnetic de polarizare trebuie să fie cel puțin egală cu valoarea eficace a câmpului magnetic variabil.

Efectul magnetostrictiv depinde și el de temperatură, astfel deformația scade odată cu creșterea temperaturii, dispărând când s-a atins limita de temperatură Curie (caracteristică fiecărui material).

Încălzirea transductoarelor se datorește pierderilor de energie electrică și mecanică care se transformă ireversibil în căldură. Aceste pierderi apar datorită producerii în traductor a unei duble transformări de energie electromecanică și magnetomecanică.

Transformarea electromagnetică produce pierderi în înfășurare și în materialul traductorului. În material se produc pierderi prin histerezis și prin curenți turbionari (materiale metalice). Aceste pierderi sunt determinate de natura materialului, de forma și dimensiunile acestora. Ele se pot parțial elimina prin folosirea unor metode speciale în confecționarea transductoarelor.

Pierderile în înfășurări se produc prin efect Joule (încălzirea înfășurării datorită trecerii curentului electric prin aceasta).

La transformarea magnetomecanică se produc pierderi prin frecările interne în material, pierderi în elementul de fixare și pierderi datorită adoptării incorecte a impedanței acustice a traductorului cu cea a materialului cu care se află în contact direct.

Grosimea tolelor din care este confecționat miezul traductorului depinde atât de materialul din care se va realiza traductorul (Ni-0,37 mm; permendur -0,1 mm), cât și frecvența de lucru. Pentru a elimina pierderile prin curenți turbionari, tolele se realizează din diferite materiale, la care variază grosimea izolației (oxid - 3 μm; foi de mică - 0,2 mm).

Premagnetizarea transductoarelor se realizează folosind un curent continuu aplicat unei bobine separate, utilizând chiar înfășurarea de excitație sau folosind magneți permanenți (figura 3.20 a,b,c). Penultimul caz, este mai avantajos, dar trebuie luate și unele măsuri de protecție împotriva pătrunderii curentului alternativ în redresorul de premagnetizare cât și a curentului continuu în generatorul de înaltă frecvență. În acest scop, în circuitul curentului continuu se introduce o bobină de șoc care împiedică trecerea curentului alternativ, iar în circuitul generatorului de curent alternativ se introduce un condensator de blocaj care împiedică trecerea curentului continuu.

Pentru premagnetizarea transductoarelor de puteri mici, sau mijlocii se folosesc magneți sau electromagneți, care se amplasează între coloanele transductorului magnetostrictiv. Acest procedeu se folosește frecvent la transductoarele de ferită.

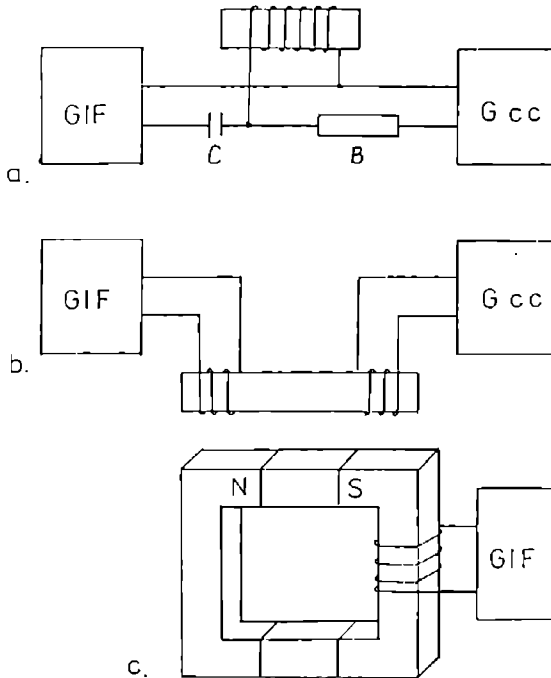


Figura 3.20. Schema de premagnetizare a transductoarelor magnetostrictive cu CC.

Transductorul magnetostrictiv vibrează cu amplitudini cât mai mari, numai dacă frecvența curentului electric alternativ ce străbate înfășurarea de excitație este acordată cu frecvența fundamentală sau cu una din armonicile transductorului.

Transductoarele sub formă de bare (poligonale, cilindrice), sunt niște tije scurte, care pot realiza frecvențe de ordinul zecilor de KHz. Pentru a obține frecvențe mai ridicate, dar fără a scurta lungimea barelor, se folosesc tije cilindrice în care se practică, la distanțe egale, adâncituri având aceeași lungime cu porțile proeminente (figura 3.21). Frecvența unor astfel de bare este de aproximativ zece ori mai mare decât frecvența unei bare simple.

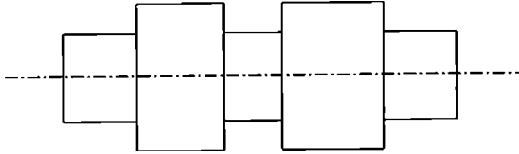


Figura 3.21. Transductor magnetostrictiv sub formă de bară.

Transductoarele pachet, sunt confecționate cu una sau mai multe coloane, realizate din materiale metalice, care cunosc cele mai multe aplicații. Determinarea dimensiunilor geometrice ale unui astfel de transductor, care să vibreze la o anumită frecvență de rezonanță, se face ținând seama că ele conțin coloane, ferestre și juguri (figura 3.22). La transductoarele cu 3 sau 4 coloane, coloanele interioare sunt de două ori mai late decât cele exterioare pentru a se evita efectul de curbare a pachetului de tole, iar lățimea și grosimea pachetului trebuie să fie mai mici decât o jumătate de lungime de undă.

Spre deosebire de transductoarele tip bară, cele tip fereastră (pachet) prezintă avantajul eliminării pierderilor de flux magnetic și demagnetizare prin închiderea circuitului magnetic. Transductoarele magnetostrictive asamblate din tole subțiri izolate, permit să se elimine, în mare măsură, pierderile prin histerezis și prin curenți Foucault. Ele se folosesc la puteri mari, fără a risca distrugerea lor, ceea ce se observă des la transductoarele magnetostrictive de tip tubular.

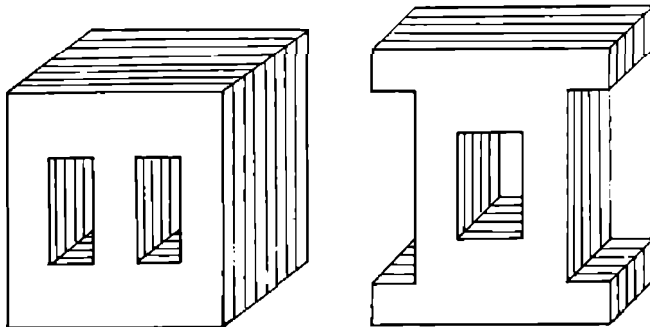


Figura 3.22. Transductoare magnetostrictive sub formă de pachet.

Un factor foarte important în exploatarea transductorilor magnetostrictivi de tip pachet este încălzirea. Efectul magnetostriktiv scade considerabil odată cu creșterea temperaturii, ajungând ca în punctul Curie aceasta să dispară complet, motiv pentru care se impune răcirea obligatorie a transductorului. Gama de frecvență a unor astfel de transductoare este foarte mică, dar prezintă avantajul că se confecționează simplu, sunt ieftine, comode în exploatare, putând fi aplicate într-o gamă foarte mare de puteri.

Funcționarea transductorilor magnetostrictivi este definită de următoarele elemente:

1. frecvența de rezonanță mecanică;
2. frecvența de rezonanță electromecanică;
3. coeficientul de transformare electromecanic;
4. parametrii echivalenți concentrați;
5. factorul de calitate mecanic;
6. tensiunea electrică produsă la rezonanță;
7. inductia magnetică la rezonanță;
8. impedanța electrică;
9. puterea electrică consumată;
10. curenții electrici la rezonanță;
11. randamentul electromecanic.

De o mare importanță, în funcționarea la parametrii optimi a transductorilor magnetostrictivi, este acordul care se realizează între parametrii de intrare ai transductorului și parametrii de ieșire ai generatorului de înaltă frecvență, astfel încât randamentul transformării electromecanice să fie maxim.

Datorită rezistenței mecanice mari a materialelor magnetostrictive, care permit utilizarea lor la puteri electrice mari și solicitări importante în funcționare, transductorii magnetostrictivi metalici sunt folosiți pentru producerea puterilor ridicate la frecvențe de 20-40 KHz. În cazul frecvențelor mai mari se impune folosirea transductorilor magnetostrictivi ceramici.

În cazul transductorilor magnetostrictivi, ca urmare a deplasării de la frecvența de rezonanță, are loc reducerea efectului acțiunii ultrasunetelor asupra prelucrării. Acest neajuns se poate înlătura prin folosirea transductorilor piezoceramici, la care, cele două frecvențe de rezonanță se află foarte apropiate între ele și saltul de la una la alta se face foarte rapid. Se preferă frecvența la care curentul de sarcină este mic, deoarece scade consumul energetic la diferențe de parametrii tehnologici nesemnificativi. Folosirea îndelungată și cu o răcire proastă, provoacă saltul la cealaltă frecvență sau deteriorarea transductorului. Depășirea, în funcționare la sarcină maximă, a unui timp critic, poate duce la fisurarea pastilelor piezoceramice, ceea ce produce distrugerea transductorului. Cu cât cele două frecvențe sunt

mai apropiate, cu atât transductorul este mai sensibil, deci factorul de calitate este mai mare.

3.5. Concentratori acustici

Concentratorii ultrasonici se mai numesc și transformatoare de viteză acustică având ca rol mărirea amplitudinii oscilațiilor, respectiv a vitezei de oscilație a sculei (obiect de transfer) în spațiul de lucru și la concentrarea întregii energii acustice în zona de prelevare /12, 13, 25, 29, 46, 57, 64, 68/. Concentratoarele trebuie să îndeplinească, în principal, următoarele funcții:

- transferă energia ultrasonică de la transductor la obiectul de transfer;
- concentrează și focalizează energia ultrasonică spre zona de lucru;
- sporește la maximum randamentul prelucrării;
- prin forma lor foarte variată, permit utilizarea transductoarelor la o gamă largă de operații de prelucrare.

Concentratoarele sunt bare de secțiune variabilă, care vibrează după modelul sistemului continuu, adică în zone de secțiuni diferite, amplitudinea și viteza oscilațiilor se conservă. Sistemul continuu se consideră perfect elastic și nedisipativ, care oscilează după o anumită lege, care se prezintă sub forma:

$$\frac{\partial^2 \xi(x,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial \xi(x,t)}{\partial x} \frac{\partial \ln S(x)}{\partial x} = \frac{1}{C_1} \frac{\partial^2 \xi(x,t)}{\partial t^2} \quad (3.24)$$

unde:

$\xi(x,t)$ – este amplitudinea de deplasare a oscilațiilor;

$$\xi(x,t) = \xi(x) \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.25)$$

x – deplasarea;

t – timpul;

$S(x)$ -secțiunea variabilă în poziția x ;

C_1 - viteza ultrasunetelor;

ω . $\omega = 2\pi f$ - pulsația oscilațiilor.

Considerându-se variația doar în raport cu deplasarea x , ecuația (3.24) devine

$$\frac{\partial^2 \xi(x,t)}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial \xi(x,t)}{\partial x} + \frac{\omega^2}{c_1^2} \xi(x,t) = 0 \quad (3.26)$$

Acest tip de ecuație se poate integra în anumite condiții limită inițiale, și pentru anumite funcții ale secțiunii transversale S . Condițiile limită sunt:

1. Frecvența proprie de oscilație a transductorului (specifică fiecărui transductor), care coincide și cu cea a generatorului (reglată), trebuie să coincidă cu frecvența de oscilație a concentratorului.

2. Ideal, la locul de îmbinare, **deformațiile specifice vor fi nule.**

3. În secțiunea finală, în lipsa sarcinii exterioare, variațiile deformațiilor specifice vor fi nule.

Toate aceste condiții impun ca funcționarea ansamblului TRANSDUCTOR – CONCENTRATOR să se facă la o frecvență cât mai apropiată de frecvența de rezonanță a transductorului.

Asamblarea concentratorului cu transductorul și cu obiectul de transfer se poate realiza prin lipire sau prin înșurubare. Un factor foarte important, care caracterizează funcționarea instalației, este calitatea fixării elementelor:

A) transductor- concentrator;

B) concentrator- obiect de transfer.

În cazul A, se recomandă asamblarea cu un aliaj de lipit dur, fapt ce asigură o exploatare de lungă durată și-n bune condiții. Lipirea se va face numai după obținerea frecvenței ideale de rezonanță a ansamblului.

În cazul B, datorită faptului că obiectul de transfer este destul de des înlocuit, se recomandă fixarea mecanică a acestuia. Pentru a micșora la minim tensiunile mecanice care apar la locul de îmbinare, prinderea se va face într-un punct nodal.

Pentru evitarea pierderilor, în propagarea undelor longitudinale este necesar să se acorde o mare atenție fixării concentratorului de cele două elemente, astfel încât să nu existe porțiuni nelipite sau goluri.

Ținând seama de funcționarea corespunzătoare a ansamblului transductor-concentrator-sculă, se impun cele două dimensiuni pentru concentrator:

1. diametrul inițial D_1 – care trebuie să coincidă cu cel al transductorului;
2. diametrul final D_f – care trebuie să coincidă cu diametrul inițial al sculei. Se va ține seama și de dimensiunea elementului de fixare.

Studiul concentratoarelor acustice s-a făcut în ipoteza existenței, în lungul barelor, a undelor longitudinale — deoarece ele interesează în cazul procesului de prelevare de material.

Pentru ca această ipoteză să-și păstreze valabilitatea este necesar ca dimensiunile liniare ale secțiunii maxime a barei să nu depășească jumătate din lungimea undei care se propagă în ansamblu. Îndeplinirea, în practică, a acestei condiții este posibilă, neconducând la dimensiuni prea mici și nici la dimensiuni exagerate, aceasta datorită faptului că domeniul de frecvențe folosit este destul de îngust și se situează la limita inferioară a frecvenței ultrasunetelor.

Dacă dimensiunile liniare ale barei ar depăși jumătate din lungimea de undă, în bară, pe lângă undele longitudinale ar mai apărea și

unde complexe (unde radiale și transversale), fapt ce ar duce la micșorarea simțitoare a eficienței ansamblului acustic.

În timpul funcționării, concentratorul ultrasonic suferă eforturi mecanice apreciabile, motiv pentru care este obligatoriu ca în oricare secțiune din bară să nu existe deformații și eforturi mecanice, care să depășească limitele admisibile referitoare la elasticitatea și rezistența materialului folosit.

Cele mai uzuale materiale pentru concentratoarele acustice sunt:

- oțeluri OLC45, OSC8, OLC60, Rp3;
- titanul;
- duraluminiul;
- monelul;
- alama Am60;
- oțeluri rezistente la oboseală.

La calculul concentratoarelor nu se poate ține cont de porțiunea care servește la fixarea concentratorului de cele două componente, fapt ce conduce la obținerea unei alte frecvențe de rezonanță puțin diferită de cea ideală. Pentru o apropiere cât mai fidelă de frecvența ideală (a transducerului) a ansamblului transducer- concentrator, se folosește acordarea cu ajutorul unui frecvențmetru. După realizarea ansamblului și determinarea unei noi frecvențe de rezonanță, se poate prelucra câte puțin din concentrator până se obține în final frecvența ideală. Astfel, întreg ansamblu este acordat pe frecvența care dă cel mai bun randament. Dacă frecvența de rezonanță a ansamblului este mai mică decât cea ideală înseamnă că concentratorul este prea lung, în caz contrar este prea scurt, deci ar trebui realizat un alt concentrator, mai lung. După stabilirea frecvenței de rezonanță urmează calculul sculei.

Concentratoarele de secțiune transversală variabilă, se clasifică după generatoarea care realizează profilul astfel:

- conice;
- cilindrice în trepte;
- exponențiale;
- catenoidale-descrie o funcție trigonometrică.

Scula poate avea forma cilindrică sau prismatică, iar împreună cu concentratorul poate forma un concentrator compus. O analiză teoretică a acestor concentratori compuși este necesară pentru a se putea alege soluția rațională la proiectarea lor. De dorit este ca întreaga lungime a concentratorului compus să fie un număr întreg de semilungimi de undă:

Concluzii asupra concentratoarelor

Analizând concentratoarele conice, cilindrice în trepte, exponențiale, catenoidale (descrie o funcție trigonometrică) se pot formula următoarele recomandări:

1. din punct de vedere constructiv cele mai ușoare de realizat sunt concentratoarele în trepte, conice, exponențiale și catenoidale;

2. scula atașată concentratorului duce la micșorarea lungimii de rezonanță a concentratorului;
3. reducerea presiunii mecanice scade cu cât secțiunea și lungimea sculelor este mai mare;
4. la concentratoarele compuse se obțin amplitudini ale oscilațiilor mai mari la ieșire decât în cazul concentratoarelor simple;
5. la concentratoarele cilindrice, zonele de trecere reduc raportul de amplificare, dezavantaj pe care celelalte concentratoare nu îl au;
6. la concentratoarele cilindrice, în zonele de trecere, apar tensiuni mecanice mari;
7. concentratorul cilindric în trepte sunt recomandate la puteri mici sau medii și la operații de semifinisare;
8. concentratorul cilindric în trepte se dezacordează față de frecvența transductorului;
9. concentratoarele exponențiale și catenoidale asigură amplificări de amplitudini mai mari decât cele conice, dar și tensiuni mecanice superioare (figura 3.23; și 3.24).

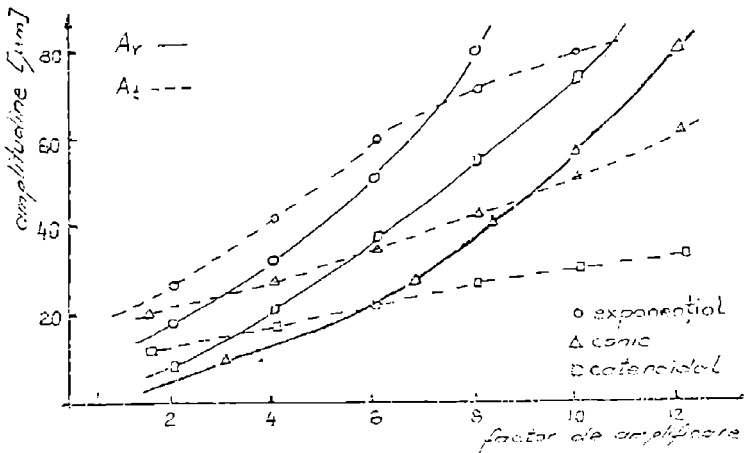


Figura 3.23.. Amplitudinea oscilațiilor în cazul diferitelor concentratoare.

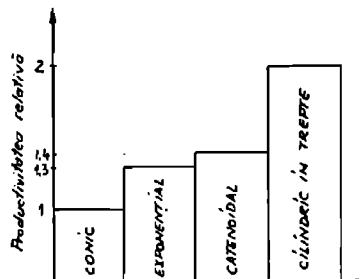


Figura 3.24. Comparații asupra productivității.

3.6 Elemente de fixare și adaptare acustică

Sistemul acustic este format din transductor, concentrator, sculă și elemente asamblate între ele în așa fel încât să transforme și să transmită eficient energia acustică mediului de lucru. Fixarea elementelor sistemului acustic se poate realiza prin lipire sau înșurubare.

Lipirea se realizează folosind aliaje de argint, nichel, cositor, alamă sau rășini speciale. Materialul de lipit se distribuie uniform pe întreaga suprafață de contact astfel încât să formeze un strat subțire și compact. Nu sunt admiși pori sau locuri nelipite. Pentru a se evita lipirea înclinată a celor două elemente este indicat ca operația să se realizeze într-un dispozitiv special, care să asigure stabilitatea ansamblului. Se obține o lipire mai bună dacă se folosește următoarea tehnologie de lucru:

- cele două suprafețe de asamblat se vor curăța mecanic și chimic;
- se distribuie materialul de lipit pe suprafețele care vin în contact;
- lipirea se face prin presarea și încălzirea prin inducție a celor două elemente.

Fixarea prin înșurubare a elementelor se realizează folosind sistemul de asamblare demontabilă prin filet. Fixarea sculei de concentrator se realizează direct prin filet, dar asamblarea concentratorului de transductor se realizează cu ajutorul unei piese intermediare (figura 3.25), care se lipește de transductor, iar concentratorul se înșurubează în ea. Se constată două cazuri distincte:

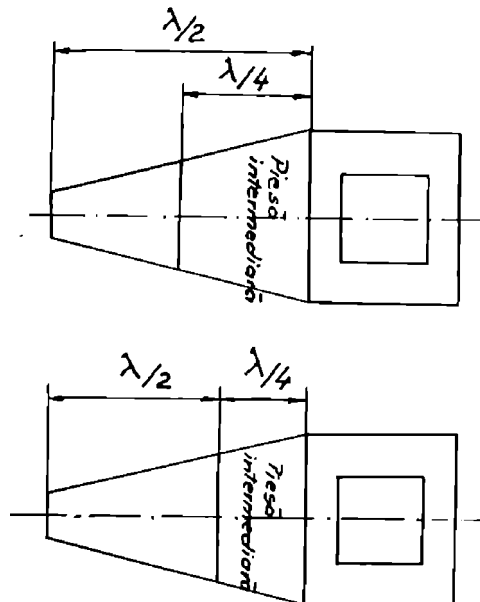


Figura 3.25. Scheme de montare a elementului intermediar.

a) elementul intermediar este parte distinctă a sistemului acustic, având lungimea de $\lambda/4$ (figura 3.25a);

b) elementul intermediar este parte distinctă din concentrator, dar de lungime $\lambda/4$ (figura 3.25b).

La îmbinările demontabile trebuie realizat un contact etanș între elementele sistemului, deoarece în caz contrar au loc pierderi însemnate de energie acustică sau chiar distrugerea îmbinării. La îmbinarea unui concentrator de secțiune circulară cu un transductor de secțiune dreptunghiulară trebuie ca suprafața concentratorului să o cuprindă pe cea a transductorului și axele de simetrie să corespundă. Părțile care ies în afara transductorului pot fi ajustate (pentru aspect).

Pentru a realiza stabilizarea sistemului acustic în timpul exploatării, un rol determinant îl are fixarea (rigidizarea) sistemului în structura de rezistență a instalației. Trebuie respectată cerința ca fixarea sistemului acustic să se facă în punctele nodale.

$$X_n = (L / n\pi) \operatorname{arctg}(\ln g / n\pi + n'\pi) \quad (3.25)$$

$$g = \frac{V_L \text{ vîrf}}{V_L \text{ baza}} \quad (3.26)$$

unde: g – factor de amplificare;

V_L vîrf - mărimea vitezei la vîrfurile barei;

V_L bază - mărimea vitezei la baza barei.

Se folosesc următoarele procedee de fixare a sistemului acustic în structura de rezistență, astfel încât să se reducă pierderile de energie (figura 3.26)

1) Fixarea în nodul de vibrație al transductorului, în $\lambda/2$ (figura 3.26a). Se fixează cu ajutorul a două prisme transductorul în punctul nodal. Pentru protecția mecanică, între prisme și transductor, se interpun garnituri de cauciuc. Acest mod de fixare are avantajul stabilității nodului, în cazul variației sarcinii transductorului, dar și dezavantajul că nu se asigură o fixare rigidă a acestuia în structura de rezistență.

2) Fixarea de pe un suport la $\lambda/2$ de la transductor (figura 3.26b). Suportul cilindric se fixează la partea superioară în zona de îmbinare a transductorului cu concentratorul acustic, iar la partea inferioară se fixează rigid de carcasa exterioară. Acest procedeu asigură o bună rigiditate a sistemului dar conduce la o mare pierdere de energie acustică dacă se modifică sarcina transductorului respectiv lungimea de undă a ultrasunetelor.

3) Fixarea într-un nod de vibrație a concentratorului (figura 3.26c și d). Realizarea unui concentrator (piesă intermediară) cu un disc gros de 2-3 mm, disc aflat la o lungime de $\lambda/4$ de la partea superioară fixată de transductor. Amplificatorul poate avea lungimea de $\lambda/2$ sau $\lambda/4$. Această

fixare este ușor de realizat dar asigură o funcționare optimă a sistemului într-o bandă îngustă de frecvență (în jurul frecvenței de rezonanță).

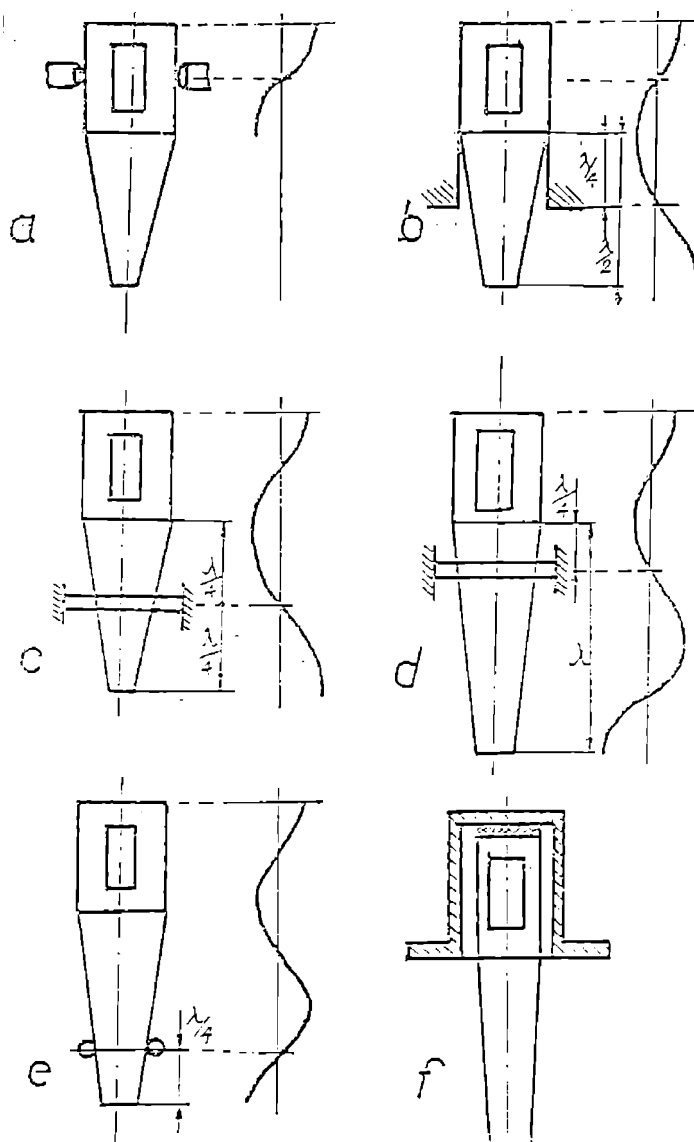


Figura 3.26. Procedee de fixare a sistemului acustic.

4) Fixarea cu reazeme de cauciuc, în ultimul nod al concentratorului și apăsare de sus în jos a sistemului (figura 3.26e). La o distanță de $\lambda/4$ de capătul concentratorului se amplasează o garnitură de cauciuc care joacă rolul

de izolator acustic. Această metodă asigură o bună transmitere a energiei ultracustice,

În timpul funcționării sistemului se transmite instalației vibrații, ceea ce determină anumite efecte negative, atât asupra acesteia, cât și în zona de lucru. Pentru a evita apariția acestor efecte transductorul se izolează acustic față de ansamblul instalației cu ajutorul unor garnituri de cauciuc care îl îmbracă efectiv. Materialul utilizat pentru izolare este fonoabsorbant. În acest fel, pe lângă izolarea acustică se realizează și o fixare a transductorului în cadrul instalației (figura 3.26f).

3.7 Scule folosite la prelucrarea în câmp ultrasonic

În cazul prelucrării dimensionale cu ultrasunete, sculele au, de obicei, profilul conjugat al suprafeței care trebuie realizată. În cazul unor producții de serie mică sau unicat, concentratorului ultrasonic i se atașează scula, ca parte componentă a concentratorului ultrasonic. La producții de serie mare sau în cercetări experimentale scula propriu-zisă se va asambla cu concentratorul astfel încât ansamblul format din transductorul – concentratorul –scula să aibă frecvența cât mai apropiată de frecvența de rezonanță a transductorului. Din punct de vedere constructiv, forma și dimensiunile sculei se stabilesc în funcție de forma și dimensiunile suprafeței prelucrate.

Materialele din care se confecționează sculele pentru prelucrarea în câmp ultrasonic trebuie să fie ușor prelucrabile prin așchiere și să aibă proprietăți superioare de reziliență. Ele se pot confecționa din oțel laminat sau oțel de calitate și care după tratament termic să aibă aproximativ 40 HRC. Suprafețele exterioare se vor rectifica iar zona de contact cu concentratorul se va lepuși. În acest caz scula va avea configurația concentratoarelor, fiind o prelungire a acestora deci îndeplinind aceleași cerințe ca orice concentrator ultrasonic. De o importanță deosebită, pentru realizarea ansamblului rezonator le au și sculele, pentru aceasta se impune realizarea lor la frecvența de rezonanță sau cât mai aproape de aceasta, deci proiectarea lor este de mare importanță pentru întreg procesul de prelucrare în câmp ultrasonic.

Prin dimensionarea corespunzătoare a sculei se poate obține un salt mic între cele două frecvențe de rezonanță, ceea ce duce la o creștere a productivității. Chiar dacă dimensionarea s-a făcut la întâmplare, blocul ultrasonic va putea lucra cu cele două frecvențe de rezonanță, dar distanța (diferența) dintre ele va fi ceva mai mare. După un interval de timp, când masa sculei se va diminua, această diferență se va micșora tinzând spre apropierea celor două frecvențe. La scăderea masei sub cea optimă are loc un salt în diferența dintre cele două frecvențe. O folosire îndelungată la frecvența cu curent de sarcină ridicat poate duce la creerea de microfisuri în materialul sculei și deci ieșirea din zona de rezonanță, fapt ce determină înlocuirea

acesteia. Acest fenomen este cu atât mai frecvent întâlnit cu cât scula prezintă o duritate mai mare după tratamentul termic. Microfisuri pot apărea și după realizarea tratării termice a sculelor, iar prin prelucrare, aceste fisuri să se extindă, deci să creeze imposibilitatea de racordare pe frecvența de rezonanță.

Calculul unei scule se prezintă în *anexa 2*, folosindu-se programul prezentat în *anexa 3*.

3.8 Mediul de lucru

Un element foarte important în prelucrarea prin eroziune abrazivo-cavitațională în câmp ultrasonic, este mediul de lucru, constituit din următoarele componente:

- particule abrazive;
- lichidul de lucru.

3.8.1 Particule abrazive

Două elemente sunt importante în procesul de prelucrare dimensională în câmp ultrasonic : granulele abrazive (material, dimensiuni) și emițătorul ultrasonic (generatorul ultrasonic, transductorul și concentratorul). Particulele abrazive, care îndeplinesc de fapt funcția de prelevare de material de la suprafața piesei, trebuie să se caracterizeze prin valori ridicate ale durității și rezilienței, fragilitate redusă și să prezinte un indice relativ de prelucrabilitate bun /5, 11, 19, 33, 42, 44, 68, 79/

În raport cu natura materialului de prelucrat se va face și alegerea materialului granulelor abrazive, dar numai după ce s-au comparat duritatea acestuia cu cea a materialului de prelucrat. Literatura de specialitate recomandă:

a.la prelucrarea unor materiale ca: sticla, ceramică, unele materiale compozite (pe bază de fibre de sticlă sau pe bază de corindon- Al_2O_3), germaniu, safir și rubin se recomandă ca materialul granulelor abrazive să fie carbura de siliciu sau corindonul;

b.la prelucrarea materialelor mai dure, cum ar fi : diamantul, carburile metalice și materialele mineralo-ceramice, se recomandă ca prelucrarea să se facă cu carbura de bor sau chiar cu diamant.

În funcție de tipul operației care se execută (degroșare, finisare sau semifinisare), se va face alegerea dimensiunilor granulelor abrazive. O clasificare a granulelor abrazive după dimensiune se prezintă în tabelul 3.3

În realizarea încercărilor experimentale s-a folosit:

- A. Carbură de bor cu granulația 5 și 6;
- B. Carbură de siliciu cu granulația 5, 6 și 8.

Tabelul 3.3. Granulații ale materialelor abrazive.

	Granulația –pulberi						
	3	4	5	6	8	10	12
Dimensiunea granulelor [μm]	28..40	40...50	50...63	63...80	80..100	100... 125	125... 160

	Granulația –micropulberi								
	M5	M7	M10	M14	M20	M28	M40	M50	M63
Dimensiune a granulelor [μm]	3-5	5-7	7-10	10-14	14-20	20-28	28-40	40-50	50-63

Corbura de bor este folosită în foarte multe domenii, cum ar fi: prelucrarea duzelor de focalizare pentru instalațiile de debitat cu jet de apă și pulbere abrazivă în suspensie; la prelucrarea unor matrițe pentru extrudarea unor repere; realizarea unor piese care lucrează în medii puternic oxidante; în componența fibrelor unor materiale compozite; în instalațiile nucleare ca element de reglare a reacțiilor neutronice ale lentilelor termonucleare și nu în ultimul rând, sub formă de granule pentru diferite operații (honiure, rodare, eroziune ultrasonică).

Carbura de bor (sub diferitele forme) se caracterizează prin calități deosebite de așchiere și asta ca urmare a procesului de autoașchiere, pe întreaga durată de lucru, determinat de fisurarea și sfărâmarea granulelor. Din literatura de specialitate se constată că, caracteristicile sale fizico-mecanice se apropie de cele ale diamantului, dar în unele cazuri chiar le depășește. Spre deosebire de diamant, carbura de bor prezintă o stabilitate termică mult mai bună. Un alt avantaj față de diamant îl constituie modul de clivare, care este o expresie foarte importantă a diferenței structurale dintre cele două materiale. În timp ce diamantul clivează după 4 plane de clivaj, carbura de bor clivează după 6 planuri. Acest fapt are implicații deosebite, deoarece prin modul său de clivaj se asigură în mod permanent autoașchieria și realizarea de noi granule active dar de dimensiune mai mică. Clivarea se produce doar după ce forța de acțiune a atins valoarea critică de-a lungul unui plan de clivaj.

Duritatea Vickers a carburilor de bor variază în limite foarte largi: 4400 ...9000 N/mm², funcție de compoziția chimică a noilor compuși.

Spre deosebire de carbura de bor, carbura de siliciu prezintă o duritate mai mică (4000....50000 N/mm²), având și o utilizare mai restrânsă, datorită faptului că prezintă dificultăți tehnologice în realizarea de materiale mineralo-ceramice, materiale compozite armate cu carburi de siliciu (SiSiC,

SiC, SSiC..)și a prețului ridicat de producție, dar prezintă și unele avantaje, care determină realizarea lor doar într-o gamă mai restrânsă. Cu toate că prezintă dezavantaje, acestea sunt utilizate în următoarele domenii: în construcția electrozilor bujiilor; la realizarea matrițelor pentru turnare sub presiune a pieselor din aluminiu sau fonte cenușii; în industria chimică la realizarea de reperi care lucrează în medii puternic oxidante; în construcția de lagăre sau ghidaje; la realizarea de pulberi pentru diferite operații de prelucrare și în componența corpurilor abrazive.

Toate aceste carburi prezintă o structură monocristalină, deci planele de clivaj după care se face sfărâmarea se reduc la două, iar forța critică de la care se produce clivarea este mai mică decât în cazul carburii de bor.

3.8.2 Lichidul de lucru

Rezultate foarte bune se obțin atunci când prelucrarea se realizează cu o substanța abrazivă este “amestecată” cu un lichid. Astfel, prin prelucrările efectuate de-a lungul anilor, numeroși cercetători au studiat comportarea deferitelor lichide ca: apa, uleiul mineral, petrolul lampant, benzina, terebentina, benzolul sau alcoolul, constatând că cele mai bune rezultate se obțin cu ajutorul unui mediu apos./29, 43, 68, 79/

Lichidul de lucru (apa) servește la răcirea zonei de prelucrare, la înlăturarea așchiilor detașate din materialul prelucrat, a granulelor abrazive uzate și în mai mică măsură la prelucrare prin efectul de cavitație.

O foarte mare importanță în prelucrarea dimensională în câmp ultrasonic o are concentrația de granule abrazive în suspensie. Literatura de specialitate recomandă că cea mai bună suspensie (abraziv și lichid) se obține în cazul raportului componentelor de 1:1, ceea ce reprezintă o concentrație volumică de 1:2.

După modul de introducere a suspensiei abrazive în spațiul de lucru se disting următoarele modalități:

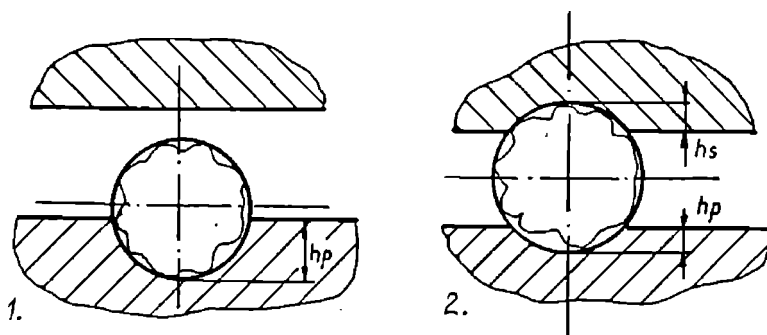
- prin aspirație;
- prin absorbție;
- fără antrenarea suspensiei.

În realizarea programului de încercări experimentale pe care l-am efectuat, am utilizat un lichid de lucru constituit din apa cu o concentrație volumică a suspensiei abrazive libere de 1:2.

MODELAREA MATEMATICĂ LA PRELUCRAREA DIMENSIONALĂ ÎN CÂMP ULTRASONIC

4.1. Ipoteze asupra procesului de prelucrare prin croziune în câmp ultrasonic cu suspensie abrazivă

① Markov, Show, M.E. Rosenberg precum și alți cercetători /29, 43, 68/, presupun că între sculă și materialul de prelucrat se află particule abrazive identice, de formă SFERICĂ, și de aceeași dimensiune d , după modelul prezentat în figura 4.1.



1. proiectarea particulei spre suprafața de prelucrat
2. lovirea și apăsarea particulei pe suprafața de prelucrat și pe suprafața sculei

Figura 4.1. Modelul grafic al particulei abrazive în acțiune.

Știind că deplasarea sculei față de poziția medie, (luată ca poziție de zero) este dată de relația:

$$y = [A \sin(2\pi ft)] / 2 \quad (4.1)$$

Viteza maximă cu care se izbește granula de piesă se poate calcula cu relația:

$$y = A \cdot \pi \cdot f \quad (4.2)$$

Energia cinetică E_c pe care o primește granula abrazivă în momentul impactului se poate calcula cu formula:

$$E_c = m_g \cdot v^2 / 2 \quad (4.3)$$

$$m_g = \rho_g V_g = \rho_g \frac{4 \pi r^3}{3} = \rho_g \frac{\pi d^3}{6} \quad (4.4)$$

$$E_c = \rho_g g \frac{\pi d^3}{6} \frac{\pi^2 A^2 f^2}{2} = \rho_g \frac{g \pi^3 A^2 f^2 d^3}{12} \quad (4.5)$$

La la impactul cu piesa, granula abrazivă pătrunde în piesă pe adâncimea h_p , învingând rezistența opusă de aceasta (F):

$$F = R_m d h_p \pi \quad (4.6)$$

Lucrul mecanic efectuat de forța F , la pătrunderea în piesă pe adâncimea h_p în piesă se calculează cu relația:

$$L = \int_0^{h_p} F_m d h_p = F h_p = R_m \pi d h_p^2 \quad (4.7)$$

Știind că întreaga energie cinetică se transformă în lucru mecanic, deci, din egalitatea celor două mărimi se poate determina adâncimea de pătrundere în piesă h_p .

$$E_c = L \quad (4.8)$$

$$\pi R_m d h_p^2 = \rho_g \frac{g \pi^3 A^2 f^2 d^3}{12} \quad (4.9)$$

$$h_p^2 = \rho_g \frac{\pi^2 A^2 f^2 d^2}{12 R_m} \quad (4.10)$$

$$h_p = \pi A f d \left(\frac{\rho_g}{12 R_m} \right)^{1/2} \quad (4.11)$$

Din relațiile 4.10 și 4.11 se poate constata că adâncimea de pătrundere în piesă este direct proporțională cu mărimile:

- amplitudinea și frecvența transductorului, mărimi date de parametrii constructivi ai aparaturii;

- diametrul particulei și radicalul din densitatea materialului din care s-a realizat abrazivul și invers proporțional cu:

- radical din rezistența mecanică a piesei.

Considerând că n_g este numărul de particule abrazive aflate în zona de contact SCULA - PIESA, la un ciclu de lucru, putem calcula aproximativ această valoare.

$$n_g \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (4.12)$$

$$n_g = \left(\frac{D}{d}\right)^2 \quad (4.13)$$

unde: d - diametrul particulei abrazive;

D - diametrul frontal al sculei.

Din numărul total de particule abrazive doar o parte dintre acestea ajung în contact cu piesa, altele se ciocnesc între ele și apoi ricoșează între piesă sau sculă. În final, numărul de particule care ajung în contact cu piesa, (n) se poate calcula cu relația:

$$n = k_n \cdot n_g = k_n (D/d)^2 \quad (4.14)$$

unde: k_n - factor de probabilitate, care exprimă procentul de particulele abrazive aflate în spațiul de lucru, care participă la pătrunderea în piesă.

Volumul de material prelevat din piesă se poate scrie și sub o altă formă care ține seama de anumiți factori de probabilitate k_1 , k_n și de particulele care lovesc piesa.

$$V = k_1 k_n f d^{1/2} h_p^{3/2} \quad (4.15)$$

Introducând valoarea lui h_p din relația 4.10 în relația 4.15 și ținând seama de timpul de lucru, obținem volumul de material prelevat în unitatea de timp.

$$V = k_1 k_n f^{5/2} d (\pi^2 A^2 \rho_g / 6 R_m)^{3/4} \quad (4.16)$$

Dacă se ține seama și de duritatea piesei H_p , respectiv a granulei abrazive H_g se poate defini un coeficient de duritate k_H , care introdus în expresia volumului de material prelevat în unitatea de timp, se obține o nouă formulă de forma:

$$V_u = k_1 k_n^{1/4} \left[4 A d / \pi R_m (1 + k_H) \right]^{3/4} \cdot f \cdot d^{1/2} \quad (4.17)$$

② Cum modelul prezentat nu se potrivește cu realitatea, V.F. Kazanțev propune drept model fizic al procesului de prelucrare dimensională

ultrasonică, un nou model care este prezentat schematic în figura 4.2 /29, 43, 68/.

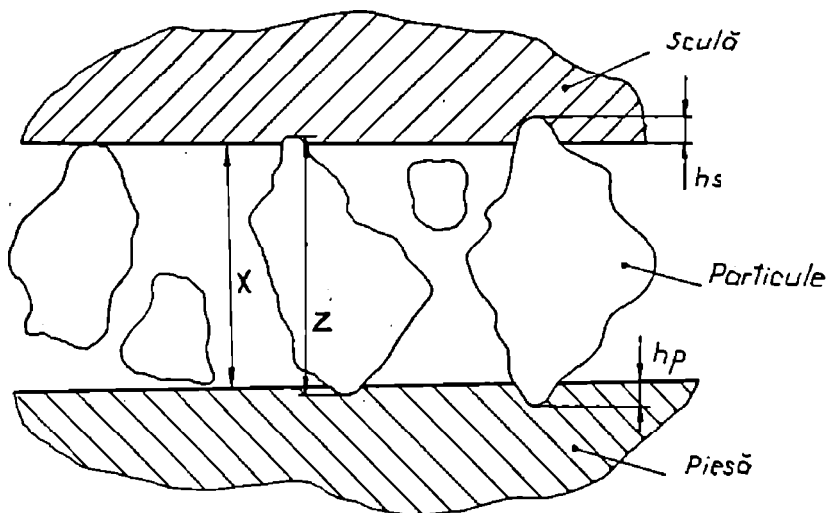


Figura 4.2. Modelul fizic de prelucrare.

Relație ce prezintă frecvența de distribuție a mărimilor particulelor abrazive aflate în zona SCULA-PIESA, evoluție apropiată de legea de distribuție Gauss.

$$f(z) = \frac{1,095}{z} \left[1 - \frac{(z - \bar{z})}{z^2} \right]^3 \quad (4.18)$$

Deoarece particulele abrazive din zona de lucru nu sunt identice, la început scula și piesa vin în contact cu mulțimea granulelor care au dimensiunile cele mai mari. Pe măsura evoluției prelucrării, majoritatea granulelor mari sunt mărunțite prin mecanismul prezentat, diminuându-se considerabil numărul acestora. Distribuția după înălțime a celor n_p particule abrazive aflate în zona de contact SCULA-PIESA, este dată de funcția $f(z)$ prezentată anterior, unde:

$$z = x + h_p + h_s \quad (4.19)$$

Cele două pătrunderi ale unei granule abrazive în sculă h_s și piesei h_p , sunt asemănătoare cu procesul de pătrundere a penetratorului durimetrului în material, la determinarea durității acestuia.

De aici putem determina cele două pătrunderi (h_p și h_s):

$$h_p = F / (4H_p d_{px}) \quad (4.20)$$

$$h_s = F / (4H_s d_{sx}) \quad (4.21)$$

unde: H_p –duritatea piesei;

H_s –duritatea sculei;

d_{px} –diametrul urmei pe piesă;

d_{sx} –diametrul urmei pe sculă;

F – forța statică (forța de acțiune).

Dacă se ține seama că materialul prelucrat este fragil, adâncimea pătrunderii penetratorului în piesă se poate calcula cu relația:

$$h_p = (F - F_i) / K_1 H_p \quad (4.22)$$

unde: F_i –forța care acționează asupra penetratorului în momentul începerii distrugerii locale a materialului de prelucrat;

K_1 –coeficient de corecție;

H_p –duritatea materialului prelucrat.

Datorită fragilității materialului abraziv se poate defini o forță critică F_{cr} a cărei valoare reprezintă limita superioară de la care începe procesul de fărâmițare a particulelor abrazive. De valoarea forței critice depinde procesul de detașare a materialului piesei (semifabricatul), care se poate determina cu relația:

$$F_{cr} = 10^{-3} A_1 \bar{z} + 10^{-7} A_2 \bar{z}^2 \quad (4.23)$$

unde A_1 , A_2 sunt coeficienți de rezistență pentru materiale abrazive, dați în tabelul 4.1.

Tabelul 4.1 Coeficienți de rezistență pentru materiale abrazive

Material	$A_1 \cdot 10$ $\text{daN}/\mu\text{m}^2$	H_p $\text{daN}/\mu\text{m}^2$	$A_1/H \cdot 10^8$
Cuart	1,8	1120	1,62
Corund nat	3,4	2060	1,54
Carbură de siliciu	6,7	3000	2,23
Carbură de bor	9,8	5000	1,96

Kazanțev propune, pentru determinarea vitezei de prelucrare v_p , următoarea relație de calcul:

$$v_p = k_{II} c(\bar{z}) n_o f \left(\frac{R_m}{n_o} \right) \quad (4.24)$$

unde: k_{II} -valoare care depinde de duritatea materialului de prelucrat și cea a abrazivului folosit;

R_m - rezistența medie la deformare a piesei

n_o - reprezentând numărul de granule abrazive aflate într-o suprafață de 1 cm^2 ;

C_f - exponent care ține seama de raportul dintre rezistența mecanică a piesei și dimensiunea abrazivului;

$c(\bar{z})$ - coeficient care reflectă dependența vitezei de dimensiunea medie a particulei abrazive

Volumul de material prelevat se poate calcula cu relația:

$$V_u = S v_p = \frac{\pi D^2}{4} K_{II} c(\bar{z}) n_o f \left(\frac{R_m}{n_o} \right) \quad (4.25)$$

Rezultatele experimentale efectuate au confirmat în mare măsură, modelul teoretic folosit. Datele experimentale referitoare atât la volumul de material prelevat, cât și la viteza de prelucrat s-au apropiat de cele calculate. În realizarea acestui model s-au făcut și unele simplificări, luându-se în considerare următoarele aspecte:

- concentrația abrazivului din zona de lucru;
- forța maximă dată de amplitudinea sistemului oscilator;
- presiunea exercitată de sculă asupra granulelor abrazive ;
- influența forței de apăsare (Fs);
- proprietățile mecanice ale sistemului SCULA - PIESA.

③ Cercetări detaliate asupra procesului de prelucrare ultrasonică, a făcut și germanul Miller, obținând rezultate concludente /29, 43, 68/. Deși a făcut destule ipoteze simplificatoare, rezultatele experimentale au confirmat în mare măsură corectitudinea modelului său.

Procesul de prelucrare ultrasonică presupune trei factori esențiali de care se ține seama în realizarea modelului de prelucrare:

- vibrația longitudinală a sculei;
- presiunea dintre sculă și piesă;
- suspensia abrazivă.

Modelul prezentat de Miller presupune că particulele abrazive aflate sub acțiunea șocurilor periodice ale sculei, se înfig în sculă și piesă producând deformări plastice și ecruisări locale, iar materialul ecruisat (durificat) este înlăturat prin fisurare și spargere. S-a constatat că la

materialele ductile procesul ce limitează productivitatea este ecruisarea iar la cele fragile mărimea așchiilor și rapiditatea înlăturării lor. Modelul propus s-a explicat pe următoarea schemă prezentată în figura 4.3.

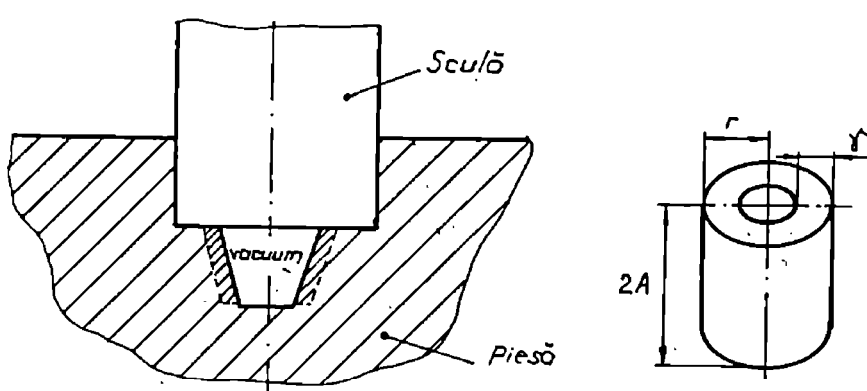


Figura 4.3. Reprezentarea grafică a modelului Miller.

Se presupune că volumul de material înlăturat depinde de următorii factori:

- deformația plastică cauzată de fiecare particulă pe o perioadă de lucru;
- numărul total de lovituri (timpul de lucru);
- capacitate de ecruisare pe unitatea de deformare plastică;
- proporția în care fisurile formate sunt relovite;
- gradul de acoperire al suprafeței sculei cu particule abrazive;
- volumul materialului dislocat;
- constantă de proporționalitate.

Pentru fiecare din acești factori se va determina o relație aproximativă pentru a defini participarea la volumul de material înlăturat. Expresia finală ia în considerare următoarele elemente:

$$V_{ii} = f(f, A, d, F_c, R^{-1}, \rho_a^{-1}, q) \quad (4.26)$$

unde: f – frecvența ultrasunetului; A – amplitudinea de oscilație; d – diametrul mediu al granulelor abrazive; R – raza sculei; ρ_a – duritatea granulei abrazive; F_c – forța de contact SCULĂ-PIESĂ; q – capacitatea de ecruisare a piesei.

④ Cercetătorii Finni I., Oh H. L. și Pankow D. au admis o lege de distribuție a dimensiunilor abrazivului după o altă lege, diferită de cea a lui

Kazanțev V.E. În exprimarea adâncimii de prelucrare au folosit tot modelul experimental propus de Kazanțev V.E. (vezi modelul ②), dar au ținut seama de durabilitatea abrazivului pe durata prelucrării, obținând în final o lege exponențială de exprimare a volumului de material prelevat /29, 43, 68, 80, 81/.

⑤ Diacenko I.N. a dedus o relație experimentală care ne dă informații utile asupra adâncimii de prelucrare într-un anumit timp (t) /29, 43, 68, 80, 81/.

$$h_p^{5/3} = \frac{t_p \cdot 2A \cdot 2\pi D \cdot 4 \cdot f \cdot d}{k \pi D^2} = \frac{t_p A \pi 8 f d}{k D} \quad (4.27)$$

Pe baza acestei relații se poate determina și volumul de material prelevat în unitatea de timp, sub forma:

$$V_u = \frac{2 A \pi D d f \cdot 60}{k \cdot h^{2/3}} \quad (4.28)$$

⑥ Cercetătorul Cook N.H. /43/ a dedus o expresie experimentală pentru viteza de prelucrare de forma:

$$v_p = 5,9 f \left(\frac{\sigma_r}{H_p} \right) A^{1/2} R^{1/2} \quad (4.29)$$

Folosind această expresie se poate determina și volumul de material prelevat în unitatea de timp de forma:

$$V_u = 5,9 \pi f^2 \left(\frac{\sigma_r}{H_p} \right) A^{1/2} R^{5/2} \quad (4.30)$$

4.2. Ipoteze asupra procesului de prelucrare prin eroziune în câmp ultrasonic cu suspensii abrazive și masă rotitoare (sculă rotitoare)

În acest caz nu s-a creat un model matematic special, diferit de cele prezentate anterior. În capitolul următor se prezintă o formulă de calcul a vitezei de înaintare a sculei și implicit de determinare a productivității prelucrării, formulă care va cuprinde și turația, și care ar putea fi aplicată numai pentru cazuri particulare, aceasta neavând un caracter general. Apariția

mișcării de rotație la piesă, creează unele probleme în zona de lucru SCULA-PIESA referitoare la abrazivul aflat în suspensie și la lichidul de lucru utilizat. De remarcat că, după o anumită valoare critică a turației, în spațiul de lucru rămân doar particulele abrazive deoarece lichidul este expulzat sub acțiunea forței centrifuge. Pentru înlăturarea acestui neajuns, se propune rotirea sculei, dar din punct de vedere tehnic, soluția este mult mai greu de realizat datorită dificultății de alimentare a transductorului cu energie electrică și a preciziei de orientare și lăgăruire a acestuia.

Pentru turații relativ mici ale piesei, se pot obține rezultate superioare comparativ cu varianta fără rotire, și asta datorită faptului că în zona de lucru sunt aduse în permanență, în poziție activă, particule noi neuzate. Intreg procesul de prelucrare este ușor favorizat de poziționarea unor noi particule cu dimensiunea maximă între sculă și piesă, conform figurii 4.4

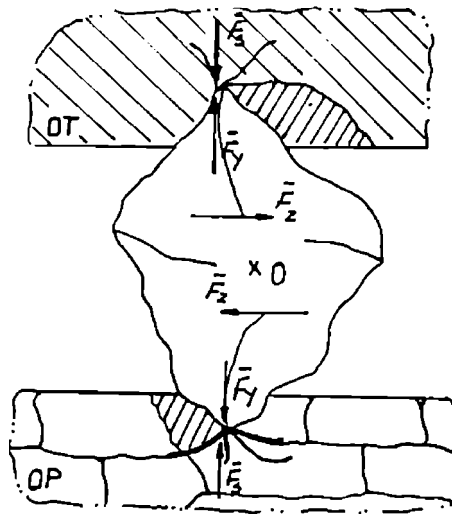


Figura 4.4. Modelul prelucrării cu particule neuzate.

Procesul de prelucrare se desfășoară, în principal, datorită eroziunii în câmp ultrasonic și în mai mică măsură datorită mișcării de rotație. În acest caz formula pentru determinarea productivității, respectiv pentru calculul volumului de material prelevat este influențată de turație, a cărei valoare utilă se stabilește ușor pe cale experimentală.

La o rotație completă a mesei se produce o multiplicare a loviturilor, situație determinată de inegalitatea :

$$f_s \ll f \quad (4.31)$$

unde: f – frecvența ultrasunetelor;
 f_s –frecvența de rotație a sculei.

Condiție ce trebuie satisfăcută pentru ca loviturile să se facă cât mai apropiat unele de altele, chiar suprapunându-se. În acest caz loviturile dau o acțiune concertată, însumarea efectelor, teorie prezentată mai detaliat în capitolul 2.

Cel mai important aspect, remarcat, la acest mod de prelucrare, este scurtarea duratei până când între sculă și piesă se află un strat de granule abrazive, materialul aflat în plus fiind eliminat mai ușor, și mai repede, fapt ce îmbunătățește procesul de prelucrare prin microașchiere.

În cele ce urmează se prezintă principalele elemente care influențează volumul de material prelevat:

- presiune statică;
- materialul abraziv;
- frecvența de lucru;
- turația sculei;
- tensiunea de alimentare (puterea electrică de alimentare și implicit amplitudinea oscilațiilor);
- granulația abrazivului.

În capitolul următor, (capitolul 5) se prezintă cercetările proprii, referitoare la determinarea unei relații de legătură între toți acești parametrii, pentru a putea determina viteza de avans sau productivitatea prelucrării.

4.3. Ipoteze asupra procesului de prelucrare prin eroziune în câmp ultrasonic fără suspensie abrazivă

În cazul prelucrării materialelor fără suspensie abrazivă se poate crea un model matematic destul de simplu a cărei reprezentare grafică este redată în figura 4.5. Scula este impregnată cu pulbere sau granule de diamant, de anumite dimensiuni, adică abrazivul este legat de sculă printr-o tehnologie specială.

Între granulele abrazive aflate pe sculă există o serie de goluri a căror prezență este necesară pentru acumularea așchiilor în perioada activă, care sub acțiunea forței centrifuge sau a exploziei bulei de cavitație sunt eliminate din zona de lucru. Prelucrarea este asemănătoare seamănă cu o prelucrare prin frezare, cu o freză cu foarte mulți dinți, care taie toate asperitățile întâlnite în cale. Pe suprafața sculei repartiția granulelor abrazive se face într-un mod neuniform, la diferite distanțe între ele cu orientări întâmplătoare și în plus au diferite mărimi de încastrare (h_i). Granulele abrazive care sunt bine încastrate în sculă au cel mai adesea unghiul de

degajare (γ) negativ, spre deosebire de cele slab prinse în sculă care au obișnuit un unghi de degajare pozitiv și care la o primă atingere cu piesa se vor desprinde devenind astfel granule abrazive libere.

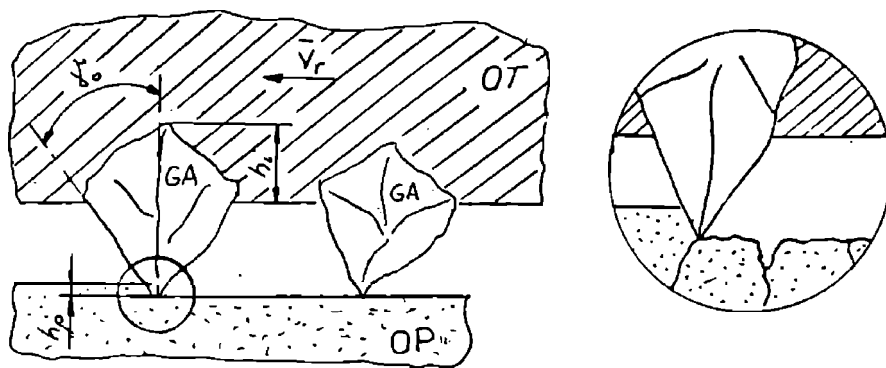


Figura 4.5 Principiul prelucrării fără suspensie abrazivă

După cum se știe, la o perioadă T a oscilației, doar pe alternanța pozitivă are loc lovirea de către sculă a materialului de prelucrat, pătrunzând în piesă pe adâncimea h_p . Numărul de particule (n_g) aflate pe suprafața activă a sculei se determină cu relația:

$$n = K_g \frac{\pi D^2}{4} \frac{4}{\pi d^2} = K_g \left(\frac{D}{d} \right)^2 \quad (4.32)$$

unde: K_g –coeficient care ține seama de gradul de încărcare a sculei cu particule abrazive;

D –diametrul sculei;

d –diametrul granulei abrazive.

În acest caz blocul ultrasonic se rotește cu o turație destul de mare $n = 2.000-5.000$ rot/min. ceea ce corespunde unei frecvențe de rotație:

$$f_r = n r / 60 \quad (4.33)$$

a cărei valoare este cuprinsă în intervalul de 33...84 Hz, mărime care este mult mai mică decât frecvența de rezonanță a blocului ultrasonic. La o rotație completă a sculei se produc un număr de aproximativ 4.000 de lovituri, fiecare fiind distribuită în alt loc, diferit de cel inițial, împânzite pe toată circumferința. La fiecare lovitură, se creează în piesă tot atâtea microfisuri, multi direcționale, care creează premisele prelevării de material și apariția de cratere în locurile de unde s-au îndepărtat microparticulele.

Datorită mișcării de rotație se prelevează material și prin procesul de aşchiere, fenomen asemănător rectificării.

În concluzie fiecare particulă abrazivă participă la procesul prelucrării prin două acțiuni:

- penetrează materialul;
- aşchiază materialul.

fact pentru care volumul de material prelevat putându-se calcula cu ajutorul formulei:

$$V_u = f \left(A, F_s, \frac{1}{R}, \frac{1}{\rho_g}, \frac{1}{q}, n, f \right) \quad (4.34)$$

La această metodă de prelucrare uzura materialului abraziv nu se realizează datorită efectului de fărâmițare a granulelor, ci mai ales datorită dezlipirii particulelor abrazive de pe sculă, rămânând în stare liberă. Pentru particulele rămase libere prelevarea se face după principiul prezentat anterior. Metoda este recomandată prelucrării unor materiale care prezintă densitate foarte mare: diamant, materiale mineralo-ceramice etc.

Relațiile prezentate dau o serie de informații asupra volumului de material prelevat, fiind mai mult sau mai puțin apropiate de evoluția datelor obținute pe cale experimentală. Ele asigură niște rezultate orientative, datorită atât a unor coeficienți determinați pe cale experimentală, cât și datorită unor ipoteze simplificatoare de la care s-a pornit în realizarea modelului matematic. Totuși utilizarea lor este importantă deoarece prezintă informații asupra factorilor care influențează procesul de prelucrare, precum și evidențierea ponderilor în explicarea fenomenelor.

Cele mai apropiate de realitate, sunt relațiile deduse pe cale experimentală, valabile pentru anumite condiții concrete de lucru. În capitolul următor se va încerca să se prezinte o astfel de relație, determinată pe baza a numeroase încercări experimentale, și folosind diverse metode de determinare.

MODELAREA ÎN VEDEREA OPTIMIZĂRII PROCESULUI DE PRELUCRARE DIMENSIONALĂ ÎN CÂMP ULTRASONIC

5.1. Prezentarea instalației

Programul de încercări experimentale asupra materialelor fragile s-a realizat pe mașina MPU-01, căreia i-au fost aduse unele îmbunătățiri la sistemul de producere a tensiunii de înaltă frecvență, care a fost echipată cu aparate pentru a se putea citi curentul și tensiunea de sarcină (pe transductor), însă din cauza performanțelor reduse a aparaturii folosite s-a limitat puterea transductorului.

În figura 5.1 este prezentat standul de lucru. Mașina propriu-zisă este constituită dintr-un batiu (1), pe care este montată o masă de lucru (2) care se poate poziționa în coordonate carteziane, prin intermediul căreia se realizează o poziționare corectă a sculei în raport cu semifabricatul. Pe masa de lucru este dispusă o masă rotativă (3), a cărei mișcare de rotație este asigurată de un motor de curent continuu și un reductor melcat. Prin modificarea tensiunii de alimentare a motorului mesei rotative se poate regla turația piesei, operație care se poate realiza cu ajutorul butonului (4) aflat pe panoul generatorului de înaltă frecvență (5).

Capul de lucru (7) se poate deplasa, în direcție verticală, pe un ghidaj cilindric (6), poziționarea capului de lucru se realizează de la maneta (8), iar blocarea în poziția dorită de la mânerul (9). Capul de lucru conține un sistem de avans automat, care permite deplasarea pe verticală a acestuia pe niște ghidaje (10).

Acționarea în mișcare de avans a capului de lucru se face cu ajutorul unui motor alimentat printr-un variator de curent alternativ, motor care acționează asupra greutății capului de lucru, ridicând o parte din contragreutatea (11).

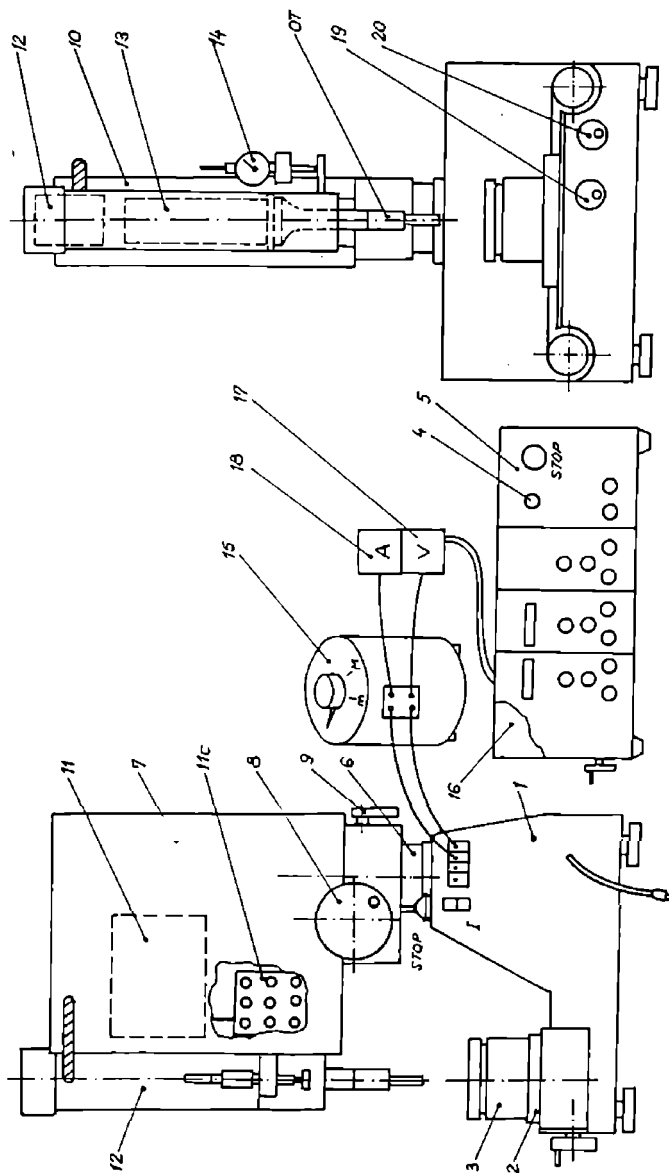


Figura 5.1. Schema instalației.

Cum valoarea forței statice din proces era greu de determinat, datorită atât a frecărilor, cât și datorită acțiunii variabile a motorului (ridicarea contragreutății), a fost eliminat acest sistem de avans, utilizându-se un sistem manual, realizat cu o greutate. În acest sens capul de lucru a fost echilibrat cu ajutorul unor greutăți din mulțimea celor aflate în dotare. Prin așezarea unei greutăți pe capul de lucru se va realiza o apăsare egală cu forța gravitațională dată de greutate (F_s).

Capul de lucru are în componența sa următoarele elemente:

- ventilatorul (12), aflat în partea superioară ;
- blocul acustic (13) format din: transductor, concentrator și sculă.
- dispozitivul de măsurare a deplasării (14), utilizând în acest sens un comparator.

Instalația electrică este alcătuită din următoarele elemente:

- autotransformator (15);
- blocul de comandă (16);
- generatorul de înaltă frecvență (5);
- aparate de măsurare (voltmetrul 17, ampermetrul 18).

Pentru determinarea influenței pe care o exercită puterea de alimentare asupra procesului de prelucrare și modul de influență asupra frecvenței de lucru s-a folosit un autotransformator, care permite variația tensiunii de alimentare și implicit tensiunea pe transductor. După cum s-a putut constata, în timpul experimentelor, transductorul se încălzește, fenomen care are ca efect modificarea frecvenței de rezonanță la o altă frecvență, evidențându-se astfel cele două frecvențe de rezonanță, corespunzătoare curentului minim respectiv curentului maxim (valorile lor fiind comparabile), curenți prezentați în figura 5.2.

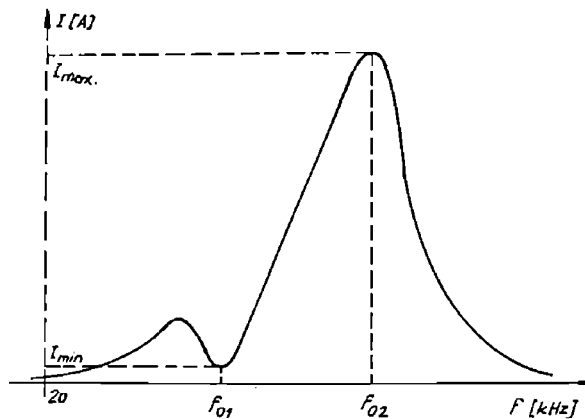


Figura 5.2. Dependența dintre frecvența de lucru și curent.

Dacă primul salt se poate urmări relativ bine, putându-se stabili timpul după care acesta se produce, cel de-al doilea salt, care produce

distrugerea pastilelor din transductor, nu se poate stabili decât după evidențierea temperaturii de lucru a pastilelor. S-a încercat stabilirea prin măsurare a temperaturii de lucru a pastilelor, dar curenții de înaltă frecvență induc în aparatul de măsurare paraziți, care perturbă procesul de măsurare și conduc la erori grosolane. Pentru o măsurare corectă și exactă a temperaturii la care are loc saltul ar fi nevoie de aparatură care să dispună de elemente de măsurare ecranate. Dacă se lucrează la intensitate maximă, o perioadă mai îndelungată de timp, s-ar putea ști când să se întrerupă procesul de prelucrare, fără a deteriora pastilele transductorului. Există cazuri când procesul de prelucrare durează ceva mai mult, și atunci este obligatoriu să se cunoască atât momentul opririi prelucrării, cât și timpul de pauză, perioadă în care are loc răcirea transductorului.

În tabelul 5.1 s-a prezentat modul de influență a tensiunii de alimentare (adică a puterii consumate de transductor) în cazul unei funcționări continue, asupra celor două frecvențe de lucru, prezentându-se intervalul de timp după care s-a făcut saltul pe frecvența superioară. În tabel se prezintă și influența pe care o are presiunea statică asupra acestui interval de timp. Dacă OP ar executa o mișcare de rotație, valorile obținute nu diferă semnificativ de cele prezentate în tabel, de aceea datele evidențiate se referă numai la cazul de prelucrare fără rotirea mesei.

Tabelul 5.1. Influența tensiunii de alimentare asupra frecvențelor de lucru.

Tensiune [V]	Forță statică				Condiții de lucru
	560gf	960gf	1160gf	1370gf	
80	5' 25"	5' 02"	4' 48"	4' 05"	-carbură de bor
90	4' 20"	4' 07"	3' 48"	3' 28"	-granulație CN5
100	3' 32"	3' 21"	3' 03"	2' 56"	-turație 0
110	2' 53"	2' 48"	2' 42"	2' 37"	-duritate sculă 38HRC
120	2' 04"	2' 05"	1' 58"	1' 52"	
130	1' 43"	1' 39"	1' 31"	1' 26"	
140	1' 25"	1' 22"	1' 17"	1' 13"	
150	1' 12"	1' 09"	1' 03"	1' 01"	

Deoarece la o tensiune de alimentare de 150V curentul pe autotransformator depășește valoarea de 8A, zonă în care autotransformatorul lucrează suprasolicitat, în regim de scurtă durată, nu s-a putut lucra cu tensiuni mai mari de 150V, iar o funcționare îndelungată la curenți mari (15 A) conduce

la fisurarea plăcuțelor piezoceramice ale transductorului. În tabelul 5.2 se prezintă legătura TENSIUNE – CURENT (putându-se stabili ușor puterea consumată de transductor în procesul de prelucrare, $P = U \cdot I$).

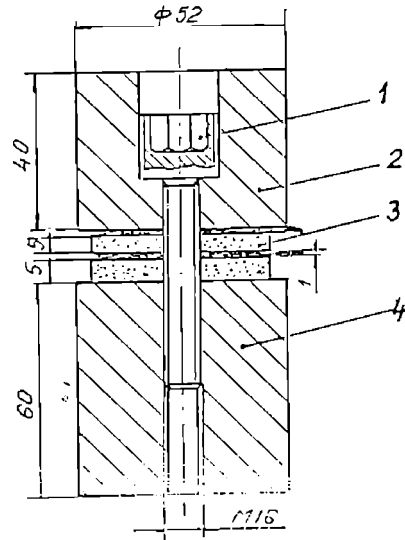
Tabelul 5.2. Dependența dintre tensiune și curent.

	Tensiunea de alimentare U [V]							
	80	90	100	110	120	130	140	150
Curent pentru frecvență mică [A]	0,5	0,85	1,1	1,25	1,5	1,8	2,05	2,3
Curent pentru frecvență mare [A]	4,6	5,1	5,6	6,2	6,7	7,3	8,1	8,6
Tensiune pe transductor [V]	12,7 -	14,3	15,9	17,5	19,0	20,6	22,2	24
Putere max. consumată [W]	58,42	72,93	89,04	108,5	127,3	150,4	179,8	206

Transductorul folosit în structura mașinii este de construcție românească, fabricat la “ Institutul de Mecanica Solidelor București” sub codul TGUS 500/20 (figura 5.3), fiind de tipul piezoceramic compus, cu două elemente pasive diferite, polarizate mecanic. Alegerea sa, s-a făcut pe baza tipului de material folosit în construcția pastilelor și a celor doi parametri: puterea electrică maximă de alimentare $P = 500W$ ($U=36V$ iar curentul absorbit $I \cong 13,5A$) și frecvența de vibrație $f = 20 \pm 2kHz$. Pe lângă cei doi parametri electrici, acesta mai prezintă și următoarele caracteristici tehnice:

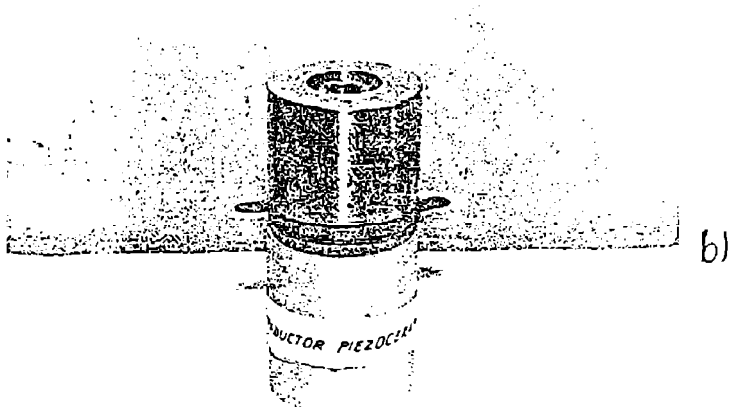
- amplitudinea vibrațiilor la suprafața liberă a elementului radiant $A \cong 17\mu m$;
- diametrele elementelor radiant și cel reflector $D = 52 mm$;
- înălțimea elementului radiant $h_r = 40mm$;
- înălțimea elementului reflector $h = 60mm$;
- grosimea pastilelor $h_p = 5mm$;
- diametrul pastilelor $d = 45mm$;
- tensionarea mecanică se realizează cu un prezon M16 la o forță de 2kN.

Elementul radiant este realizat din duraluminiu iar elementul reflector din oțel. Materialul pastilelor piezoceramice este de tipul titanozirconaților de plumb PZT, prezentat în unele literaturi de specialitate sub forma PTZ. Opțiunea pentru acest tip de material pentru pastile este



a)

- 1 - șurubul pentru tensionare mecanică
- 2 - elementul reflector
- 3 - cristale piezoceramice (PZT)
- 4 - elementul radiant



b)

Figura 5.3. Transductor de tip piezoceramic.

determinată de valorile superioare ale factorului de cuplaj electromecanic k_p , comparativ cu celelalte materiale (tabelul 5.3) și constanței frecvenței de vibrație /29/. Acești doi parametri sunt cei mai importanți dintre toți factorii care caracterizează calitatea unui material și prezintă constanță până la temperaturi de 100 - 150 C (figura 5.4 : a-factorul de cuplaj electromecanic; b-constanta de frecvență).

Tabelul 5.3. Mărimile caracteristice ale pastilelor piezoceramice

Nr crt	Materiul	Tem. Curie (K) T_C	Densitate (kg/dm ³) ρ	Modulul Young (GN/m ²) E	Permit electric (pF/m) ϵ	Modul piezoel (pC/N) k	Factor cupm (%) k_p
1	Cuarț	843	2.65	86,0	45	2.2	0,10
2	Sare Rochelle	327	1.77	14.9	4440	435.0	0,78
3	Titanat de bariu	393	5.50	118,0	12.5	190.0	0,40
4	Niobat de plumb	523	6.00	29,0	2400	90.0	0,31
5	PTZ 1	548	7.21	75,0	5200	180.0	0,43
6	PTZ 3	453	7.35	80,0	10090	400.0	0,43
7	PTZ 4	601	7.50	81,0	8750	235.0	0,63
8	PTZ 5	638	7.70	87,0	12000	320.0	0,70
9	PTZ 21	683	7.12	90,0	10180	67.0	0,20
10	PTZ 23	558	7.10	7.5	20300	200.0	0,43

Obținerea unei suprafețe mari de radiație, la transductoarele piezoceramice, este limitată de înrăutățirea condițiilor de răcire (dacă este cazul). Această problemă a fost rezolvată destul de ușor, prin folosirea transductoarelor cu mai multe elemente active dispuse în sistem mozaic (figura 5.5).

În acest caz se ridică o altă problemă, referitoare la construcția și realizarea pastilelor piezoceramice. Toate pastilele componente trebuie să aibă o comportare identică din punct de vedere electric, acustic, și să posede aceleași caracteristici.

Transmiterea oscilațiilor ultrasonice spre mediul activ se realizează printr-o placă metalică ale cărei condiții de transparență acustică trebuie să îndeplinească condiția:

$$L = k \cdot \lambda / 2 \quad (5.1)$$

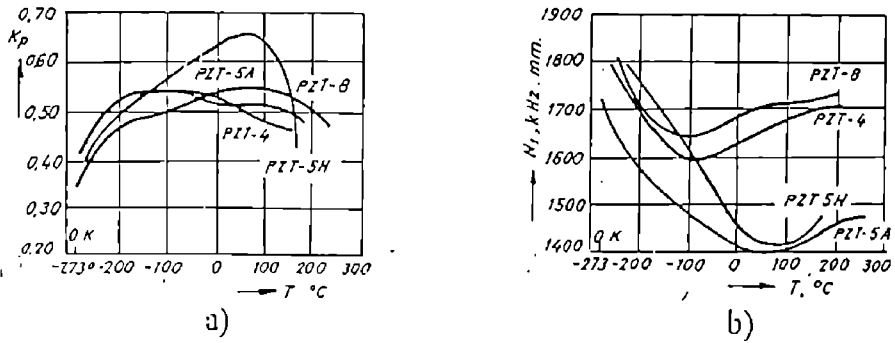


Figura 5.4. Dependența dintre factorul de cuplaj electromecanic și frecvența funcție de temperatură.

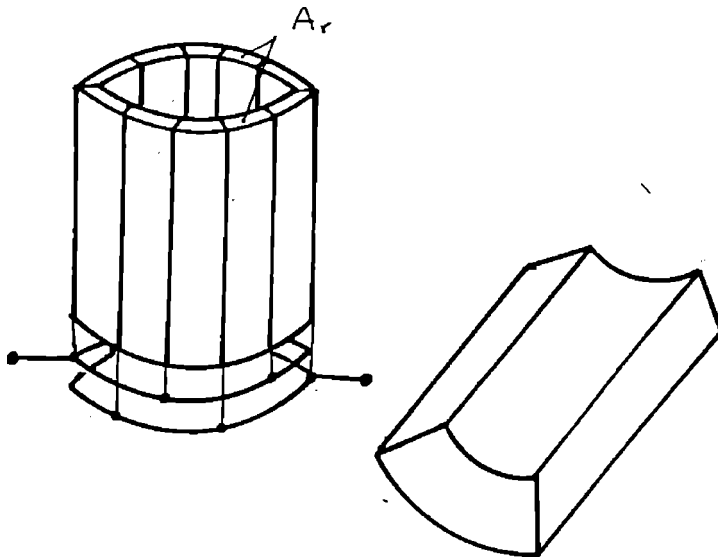


Figura 5.5. Transductoare cu mai multe elemente active dispuse în mozaic.

Îmbunătățirea condițiilor de lucru, creșterea capacității rezonante, și reducerea frecvenței de rezonanță spre valoarea minimă a

intervalului de lucru se fac prin folosirea unor transductoare compuse (tip sandwich) – similare cu cel cu care este echipată mașina utilizată. Și în acest caz se caută să se mărească suprafața radiantă, dar acest lucru este posibil doar pe seama creșterii diametrului pastilelor, care la depășirea unei anumite valori:

$$D_r = 2,04 c_r / \pi f_r \quad (5.2)$$

$$c_r = E^{0,5} / \rho^{0,5} (1 - \mu) \quad (5.3)$$

apar oscilații transversale și radiale atât în elementul pizoceramic, cât și în elementele metalice, iar prin concentrator spre OP /16, 29, 46/.

Îmbunătățirea calității transductorului se poate realiza prin următoarele elemente:

1. cele două pastile pizoceramice trebuie să fie perechi (să prezinte aceleași caracteristici);
2. toate cele trei elemente să nu prezinte discontinuități în material, fisuri sau alte defecte;
3. elementul reflectant se calculează cu relațiile:

$$l_1 = (2n - 1) c / 4f_0 \quad (5.4)$$

$$f_0 = (f_{01} + f_{02}) / 2 \quad (5.5)$$

unde: $n=1$; $c=5130$ m/s ; $f_0=22550$ Hz; deoarece ansamblul rezonant prezintă două frecvențe proprii de rezonanță: f_{01} și f_{02} .

Prin calculele efectuate (tabelul 5.4) s-a obținut o valoare de 58mm dar pentru a menține valoarea constantă a masei (eliminarea găurii) s-a ales o lungime de 60mm. Orice modificare a dimensiunilor constructive atrage după sine și-o modificare a frecvenței de rezonanță și deci o diferență între cele două frecvențe – cea a generatorului, care poate fi modificată, și cea a transductorului, cea care rămâne fixă dar se modifică în prelucrare prin uzura sculeii.

Principalele dezavantaje ale unui astfel de transductor le constituie fragilitatea ridicată a cristalului și capacitatea scăzută de înmagazinare a energiei. De astfel, aceste dezavantaje sunt caracteristice tuturor materialelor piezoceramice. Un alt dezavantaj al acestor transductoare îl constituie pierderea fiabilității prin îmbătrânire naturală, motiv pentru care se recomandă înlocuirea pastilelor după 14 – 16 luni de funcționare intensă. Pentru acest tip de transductor durata de funcționare continuă este de câteva secunde, dar prin răcire cu apă această durată poate crește considerabil. Constanța păstrării frecvenței de vibrație depinde și de fiabilitatea

Tabelul 5.4 Valorile ansamblului rezonator (concentrator-sculă)

Nr crt	Diametrul inițial [mm]	Diametrul final [mm]	Lungime [mm]	Materialul	Viteza sunet [mm/sec]	Amplitud. [μm]	Coef de amplific. k	Lungime calculată [mm]
1	52,5	30.0	64.4	Duralumin	5130	29.75	1.75	64.1
2	30.0	15.0	128.8	Duralumin	5130	59.50	2.00	128.2
3	15.0	15.0	64.4	Duralumin	5130	59.50	1.00	64.1
4	15.0	9.5	62.8	OL42	5170	93.90	1.57	58.8
5	9.5	10.0	59.2	OL42	5170	89.24	0.95	58.8
6	10	10.0	2.5	OL42	5170	89.24	1.00	

componentelor electronice din generatorul de înaltă frecvență. Cu cât stabilitatea alimentării transductorului este mai bună, cu atât și funcționarea sa este mai de durată.

Concentratorul – are rolul de a transmite, amplifica și concentra energia acustică la suprafața OP. În figura 5.6 se prezintă concentratorul cu care este echipată mașina MPU-01.

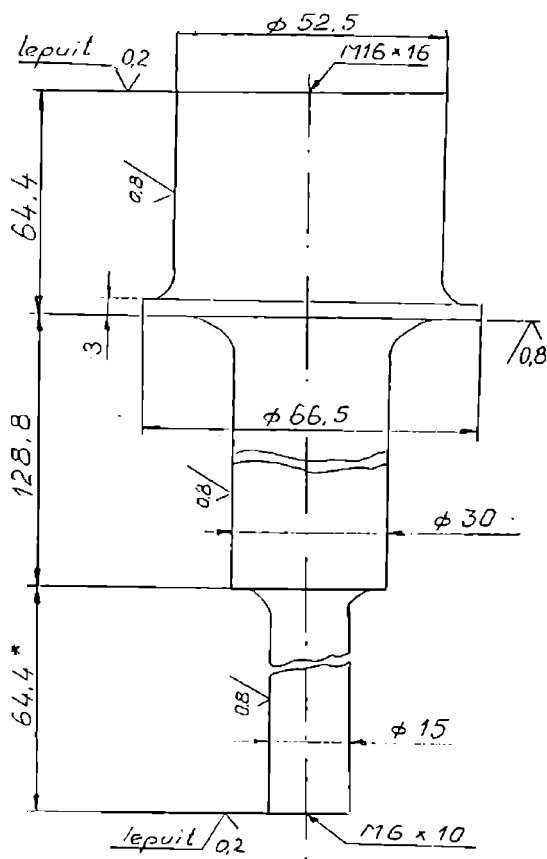


Figura 5.6. Concentratorul folosit pe mașina MPU-01.

Obiectul de transfer - scula are rolul de-a amplifica, transmite și concentra energia acustică asupra OP, fiind redat schematic în figura 5.7. Realizarea celor două elemente se poate face din același material sau din materiale diferite, fiind elementele care au fost proiectate pe baza unui program de calcul prezentat în anexă. De precizat că, construcția și realizarea

concentratorului nu pune probleme deosebite întrucât există numeroase lucrări în literatura de specialitate care tratează această temă: **CONCENTRATORUL**.

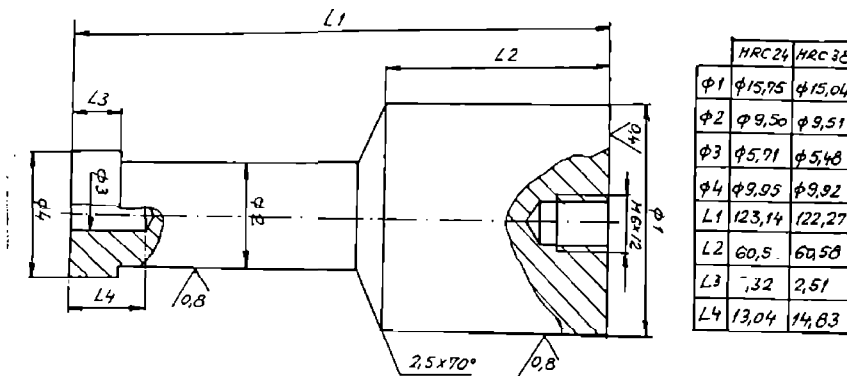


Figura 5.7. Obiectele de transfer utilizate pe mașina MPU-01.

Calculul factorului teoretic de amplificare a AMPLITUDINI

Folosind formulele din literatura de specialitate s-a calculat valoarea maximă a amplitudinii vibrațiilor acustice în poziția de impact dintre sculă-piesă, iar valorile intermediare și finale obținute sunt prezentate în tabelul 5.4. /46/. Din rezultatele obținute se poate determina valoarea aproximativă a amplitudinii pentru diferite valori ale tensiunii de alimentare. Așa am stabilit valoarea maximă a amplitudinii cu care s-au făcut încercările experimentale și care este de 60,84μm dar în urma măsurărilor făcute valoarea a fost de 58 μm.

$$K_A = A_1 / A_s \quad (5.6)$$

unde: A_1 – este amplitudinea de oscilație a transductorului;

A_s – este amplitudinea de oscilație a sculei;

K_A – este valoarea reală a factorului total de amplificare, având valoarea de 3,42.

5.2. Factorii de influență și funcțiile obiectiv la prelucrarea materialelor fragile prin eroziune în câmp ultrasonic

Prelucrarea dimesională prin eroziune abrazivo-cavitațională, în câmp ultrasonic, are o largă aplicare industrială, în special în cazul materialelor fragile, cu duritate ridicată, greu prelucrabile prin alte metode și procedee. Din acest motiv se impune elaborarea unei strategii de optimizare a proiectării și a tehnologiei de prelucrare, în condițiile în care se consideră că procesul tehnologic este un sistem ce interconectează și transformă o mulțime de intrări specifice, într-o mulțime similară de ieșiri.

În figura 5.8, în blocul A, sunt prezentate componentele sistemului de prelucrare, care determină o serie de parametrii prestabiliți sau de reglare, ce vor constitui mărimile de intrare ale sistemului. Interacțiunea acestora va genera, prin mecanismele specifice procesului, ale căror caracteristici sunt prezentate în blocul B, mărimile de ieșire sau funcțiile de răspuns ale sistemului (blocul C), grupate după natura lor, în caracteristici tehnologice și, respectiv, tehnico-economice /1, 32, 34, 48, 56, 61/.

Legitățile care exprimă legăturile dintre diferiții factori și parametrii ce intervin sunt numai parțial cunoscute, prelucrarea fiind rezultatul unui șir de fenomene complexe și interconectate, care fac modelarea analitică pretențioasă, chiar adoptând o serie de ipoteze simplificatoare. Deci., este rațional să se recurgă la modelarea empirică, experimentul având ca finalitate, după adoptarea modelului matematic, optimizarea sistemului. O primă etapă de parcurs în atingerea acestui scop este identificarea factorilor de influență și a funcțiilor de răspuns ce urmează a fi optimizate.

Pentru selecția factorilor de influență ai procesului de prelucrare prin EACUUS, este necesar să se țină cont de condițiile pe care trebuie să le îndeplinească aceștia:

- să fie independenți;
- să fie controlabili;
- să fie compatibile unul cu altul;
- se preferă date cantitative și nu calitative.

Pentru a aprofunda analiza acestor factori vom detalia blocul A, prezentat în figura 5.8, în sensul evidențierii principalelor module funcționale ce compun utilajul tehnologic și a parametrilor stabiliți prin intermediul fiecăruia dintre acestea, precum și a mărimilor de reglare aferente (figura 5.9). Se observă că procesul e influențat de o multitudine de factori, mulți dintre aceștia fiind interdependenți. Ținând cont de condițiile concrete de experimentare oferite de utilajul tehnologic folosit, de necesitatea îndeplinirii condițiilor enunțate anterior, inclusiv în ceea ce privește reducerea, pe cât posibil, a factorilor calitativi, precum și de informațiile existente în literatura

de specialitate, s-a considerat oportun să se rețină ca factori de influență pentru modelarea empirică, cei prezentați mai jos:

- frecvența, f ;
- tensiunea de alimentare, U ;
- forța statică (forța de avans), F_s ;
- turația obiectului de prelucrat, n ;
- granulația abrazivă, GA ;
- timpul unui impuls, t_i ;
- natura abrazivului, Ab .

La alegerea mărimilor care pot constitui funcții de răspuns ale sistemului analizat, trebuie ținut cont de condițiile pe care, în general, trebuie să le îndeplinească acestea:

- să caracterizeze esența transformării tehnologice specifice sistemului ;
- să aibă o semnificație fizică clară;
- să poată fi exprimată cantitativ;
- să aibă un caracter univoc;
- să aibă o expresie matematică simplă;
- să poată fi determinată cu o precizie suficientă.

Tinând cont de aceste cerințe au fost identificate (blocul C din figura 5.8) funcțiile de răspuns specifice prelucrării prin EACUUS. Ele exprimă calitativ și cantitativ rezultatele transformării tehnologice și au fost grupate după natura lor, în funcții de răspuns tehnico-economice și, respectiv tehnologice. Acestea din urmă au fost clasificate în raport cu parametrul sistemului asupra căruia se efectuează măsurări pentru determinarea lor.

Figura 5.10 prezintă categoriile de funcții de răspuns, parametrii prin care acestea se definesc și sunt determinate, precum și factorii de referință ai acestora, împreună cu legăturile existente între ei.

În cercetările ulterioare, dintre aceste funcții de răspuns, urmează să fie selectate acelea care sunt considerate reprezentative pentru transformarea tehnologică considerată, ele urmând să constituie, de fapt, funcțiile obiect în viitoarele acțiuni de modelare și optimizare.

5.3. Ierarhizarea factorilor de influență

5.3.1 Generalități

La începutul aplicării procesului de prelucrare, cercetătorii au apelat la o metodă deterministă (nealeatoare) de studiere și prezentare a fenomenelor analizate. Se presupunea că se pot controla toate variabilele care intervin în proces, la valoarea dorită, și se poate separa, o anumită variabilă, care ulterior să fie cercetată. O asemenea metodă conduce la rezultate mulțumitoare la procesele cu un număr mic de variabile (factori) și cu o pondere precisă în proces /49, 50, 62, 77/.

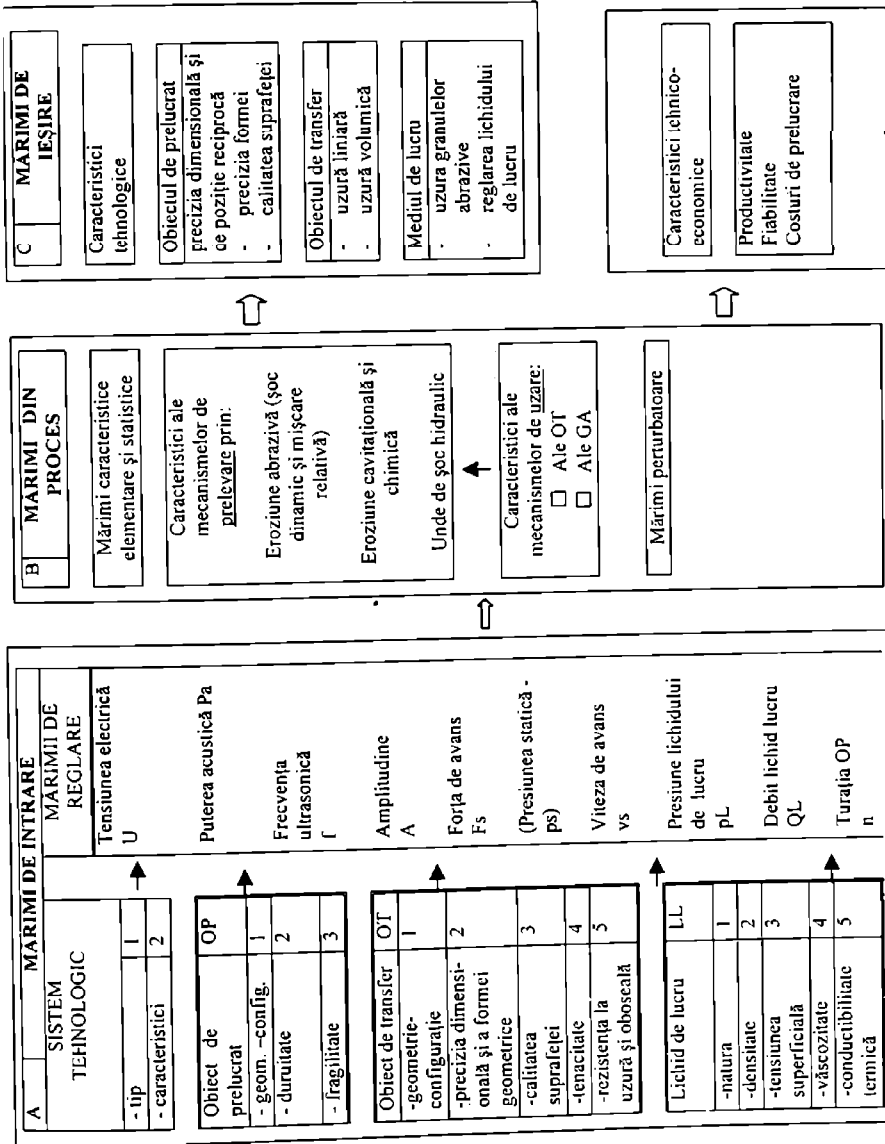


Figura 5.8 Sistemul tehnologic la prelucrarea prin eroziune abrazivo-cavitațională în câmp ultrasonic

FACTORI PROVENIȚII DE UTILAJUL TEHNOLOGIC	CARACT. ALE GENERATORULUI DE INĂLTĂ FRECVENȚĂ (GIF)	Tip	Cu autoexcitație	1	Mărimi de reglat ⇒ Frecvență ultrasonică, f 2 Putere acustică, Pa 3 Tensiune electrică, U 4	
			Cu autoexcitație independentă			
	CARACT. ALE SISTEMULUI DE AVANS (SA)	Tip	Precizia de deplasare	Gravitațional	1	⇒ Presiune statică, ps 4 Forță de avans, F_s 5
				Electromecanic		
				Hidraulic		
				Pneumatic		
				Δ OP	2	
				Δ OT	2	
				Sensibilitate	3	
	CARACT. ALE BLOCULUI MECANIC (BM)	Mod de generare		Prin copierea formei	1	⇒ Viteza de avans la conturare, v 5 Turanția n a OP sau OT 6
				Cinematică		
		Caracteristici		Rigiditate	2	
				Exactitate geometrică	3	
	Exactitate cinematică			4		
	CARACT. ALE BLOCULUI ULTRASONIC (BUS)	Tip transductor		Magnetostrictiv	1	⇒ Amplitudine, A 4
				Piezostriktiv		
		Forma concentrator		Cilindric în trepte	2	
				Exponențial		
				Conic		
			Catenoidal			
			Caracteristici fizico-mecanice ale materialului concentratorului	3		
CARACT. ALE SISTEMELOR DE ALIMENTARE CU SUSPENSIE ABRAZIVĂ (SASA)	Tipul pompei			1	⇒ Presiune, p_L 3 Debit Q_h 4	
	Mod de aplicare (circulație)	Absorbție prin vacuum		2		
		Refulare sub presiune				
Stropire						
CARACT. ALE DISP. DE INST. A OP (DIOP)	Abaterea unghiulară de instalare			1		
	Abaterea coordonatelor în plan orizontal			2		

Figura 5.9 Parametrii și mărimi de reglare ai utilajului tehnologic.

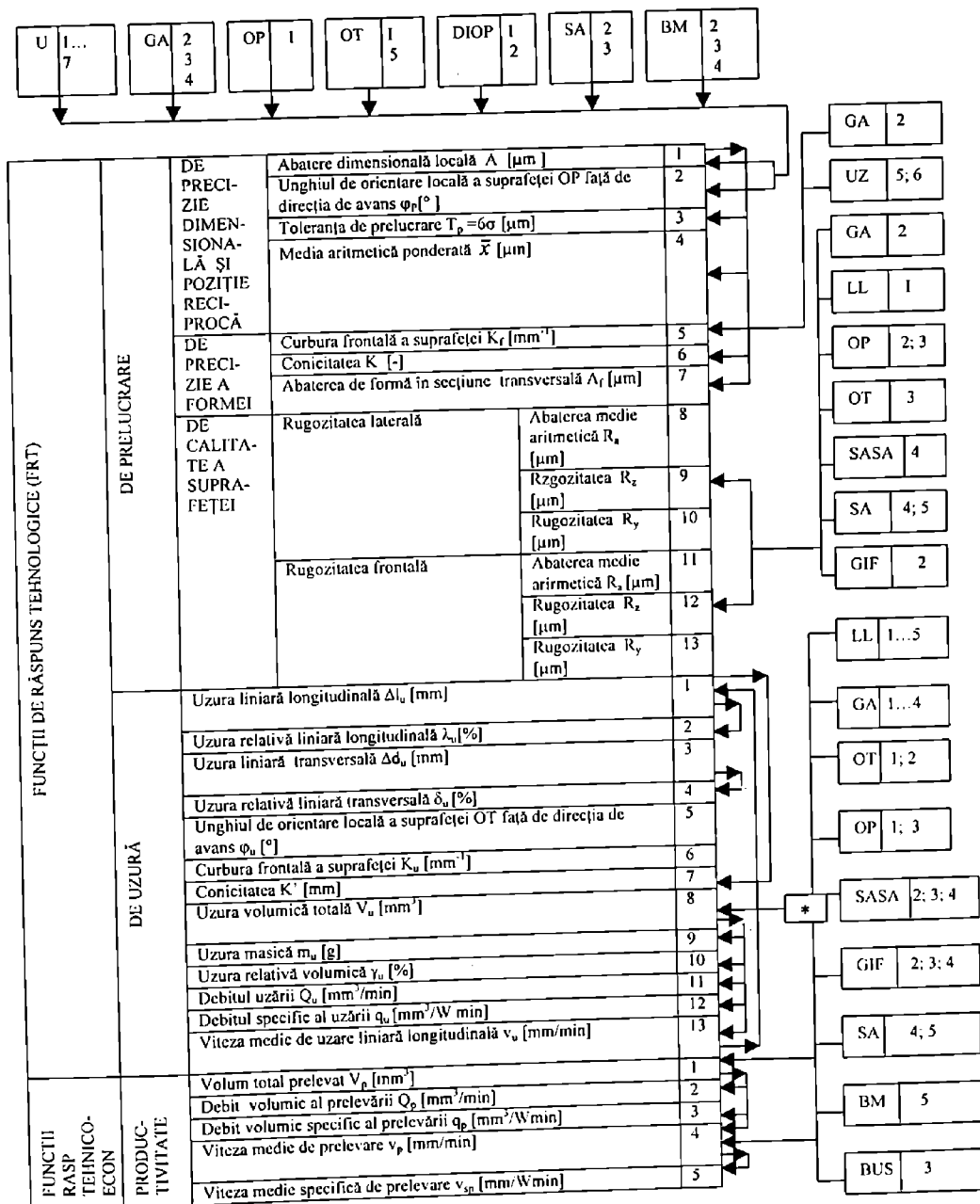


Figura 5.10 Categoriile de funcții de răspuns

La procesele complexe, cu numeroși factori, și mai ales cu ponderi imprecise ale unor factori, în timpul procesului, metoda deterministă a devenit necorespunzătoare. Din acest motiv se impune găsirea unor noi metode de cercetare, care se bazează pe elemente de statistică matematică. S-au elaborat metode care permit evaluarea fenomenelor aleatoare și determinarea caracteristicilor lor constante. Dacă în procesul cercetat, apar și fenomene neconcludente pe parcursul derulării procesului, pe baza teoriei probabilităților, s-a introdus hazardul. Așa s-a ajuns la conceptul de randomizare.

Organizarea unui experiment, pentru a evidenția interacțiunea parametrilor independenți- dependenți, implică un consum mai mare sau mai mic de materiale, manoperă și energie.

Pentru a micșora aceste consumuri și ținând seama de faptul că este imposibil, din punct de vedere practic, să se ia în considerare toți factorii de influență ai procesului studiat, este recomandabil a se concentra atenția asupra acelor mărimi care au o influență majoră în proces și să se renunțe la acele mărimi care au o influență minoră sau nesemnificativă. Astfel, a apărut necesitatea ierarhizării factorilor, a grupării acestora în clase de influență.

Programul experimentului a fost astfel organizat, încât să se considere ca aleatori acei factori care acționează sistematic și care pot fi greu controlați, aceștia putând fi neglijați.

În procese tehnologice se caută, de obicei, valorile optime (extremele – fie ele minime sau maxime) și-n acest scop s-a introdus conceptul de model matematic. Prin modelarea matematică a unui proces de prelucrare se obțin expresii matematice asociate acestuia, care servesc la un studiu de optimizare.

Pentru obținerea modelului matematic al procesului se parcurg următoarele etape:

1. Prelucrarea informațiilor și eliminarea factorilor nesemnificativi din proces;
2. Obținerea modelului matematic al procesului sub forma unei funcții de răspuns;
3. Căutarea domeniilor de optim ale procesului cercetat pe baza funcției de răspuns determinate;
4. Obținere modelului matematic al procesului cercetat în domeniul de optim sub forma unor funcții de răspuns cât mai explicite;
5. Căutarea cordonatelor punctelor de optim.

În scopul determinării optimului (min sau max), sau a realizării controlabilității sistemelor cercetate, este necesară modelarea matematică a proceselor, adică stabilirea de legături între diferiții parametrii din proces și funcțiile obiectiv. Modelarea matematică se poate realiza în două variante distincte:

- analitic (matematico -fizic);

- empiric (experimental).

Modelul matematic obținut, pentru procesul cercetat, trebuie să îndeplinească următoarele proprietăți:

- să descrie fidel realitatea modelată;
- să nu prezinte dificultăți în interpretare;
- să furnizeze informații despre direcțiile în care se găsesc valorile extreme (optimul).

În mod curent se deosebesc trei categorii de modele matematice:

- modele matematice la care se cunosc structurile acestora;
- modele matematice care se pot realiza cu ajutorul unor funcții dintr-o serie de modele matematice cunoscute (asemănarea de procese);
- modele matematice care nu se cunosc dar care se pot determina pe baza unor ipoteze de plecare, pe care să se axeze viitorul model matematic.

În realizarea problemei programării experimentale s-au considerat două strategii de cercetare:

- clasică – Gauss-Seidel – un factor este considerat la un moment dat (figura 5.11);
- modernă – Box-Wilson – toți factorii sunt considerați în fiecare moment (figura 5.12).

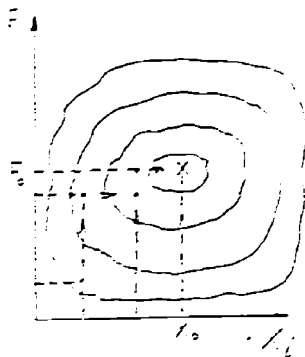


Figura 5.11 Programare experimentală prin strategia de cercetare clasică

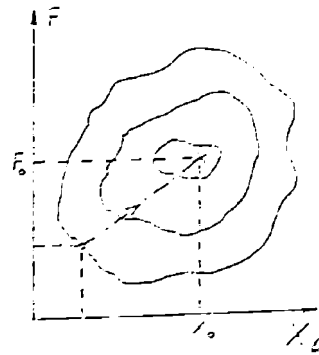


Figura 5.12 Programare experimentală prin strategia de cercetare modernă

Programul (metodologia) experimentului activ Box-Wilson are o serie de avantaje:

- simplificarea considerabilă a calculelor;
- micșorarea numărului de determinări experimentale;
- creșterea preciziei de determinare a coeficienților de regresie;
- pe parcurs, gradul modelului matematic poate fi modificat relativ ușor pentru a reflecta adecvat funcția de răspuns.

În vederea realizării modelului matematic se poate aplica două grupe de metode de lucru:

- a. Metode de cercetare preliminară. În această grupă sunt incluse atât metodele care se referă la estimarea informațiilor primite despre proces (metoda experimentului psihologic), cât și metode care realizează experimente de selectare a factorilor semnificativi (metoda balanței aleatoare, analiza dispersională).
- b. Metode de cercetare de bază. În această grupă întâlnim metodele de determinare a modelului matematic (metoda experimentului factorial complet, metoda experimentului factorial fracționat) fiind ajutate de factorii semnificativi prezentați de grupa a.

5.3.2 Strategia clasică

Această primă strategie, în ordine cronologică, se bazează pe variația succesivă a unei singure variabile. Din mulțimea variabilelor în discuție se alege una singură, care este modificată pe un domeniu convenabil ales (determinat), iar restul variabilelor rămânând constante. Se identifică astfel o valoare sau un interval pentru care mărimea funcției de răspuns este extremă (minimă sau maximă), determinându-se optimul acelei variabile.

În continuare se menține prima variabilă la nivelul optim și se reia ciclul cu o a doua variabilă, apoi cu a treia și așa mai departe, până când sunt analizate toate variabilele.

Majoritatea rezultatelor încercărilor publicate până acum, în diferite lucrări de specialitate, au la bază această strategie experimentală. În general, dependențele sunt redată sub forma unor reprezentări grafice, prin curbe parametrice, cu 1, 2, 3 sau 4 parametri. În cazuri mai rare, se prezintă dependența, în mod algebric, sub forma unor ecuații de regresie.

În cele ce urmează, se va prezenta sintetizat influența principalilor parametri independenți asupra unor funcții de răspuns exprimate prin unele caracteristici tehnologice, tehnico-economice, cantitative și calitative (productivitatea prelucrării, uzura relativă volumică, rugozitatea medie aritmetică, etc.), informațiile necesare fiind furnizate de încercările experimentate prezentate în tabelele 5.5.

La eroziunea abrazivo-cavitațională în câmp ultrasonic, prin regim de prelucrare se înțelege realizarea următoarelor condiții :

1. Stabilirea frecvenței de oscilație a sculei, corespunzătoare unei amplitudini maxime.
2. Asigurarea stabilității frecvenței în timpul prelucrării.
3. Felul alimentării spațiului de lucru cu suspensie abrazivă.
4. Felul mediului de lucru (materialul abrazivului, granulația, concentrația sa în lichid și felul lichidului).
5. Valoarea forței de avans (presiunea statică).

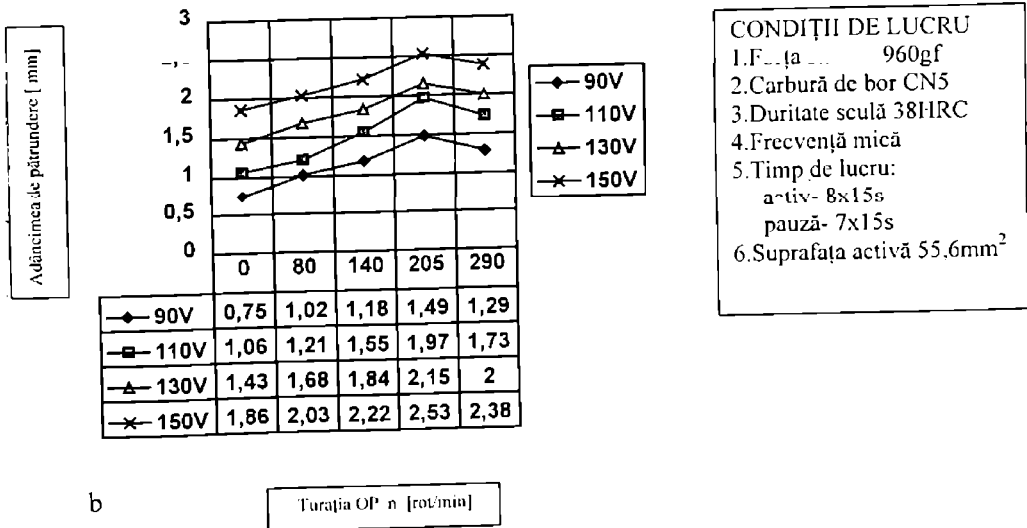
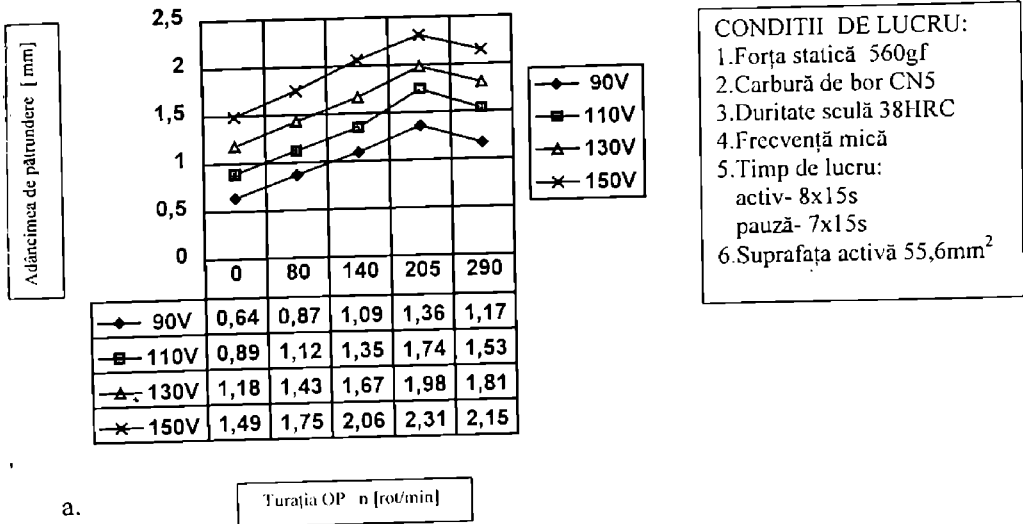
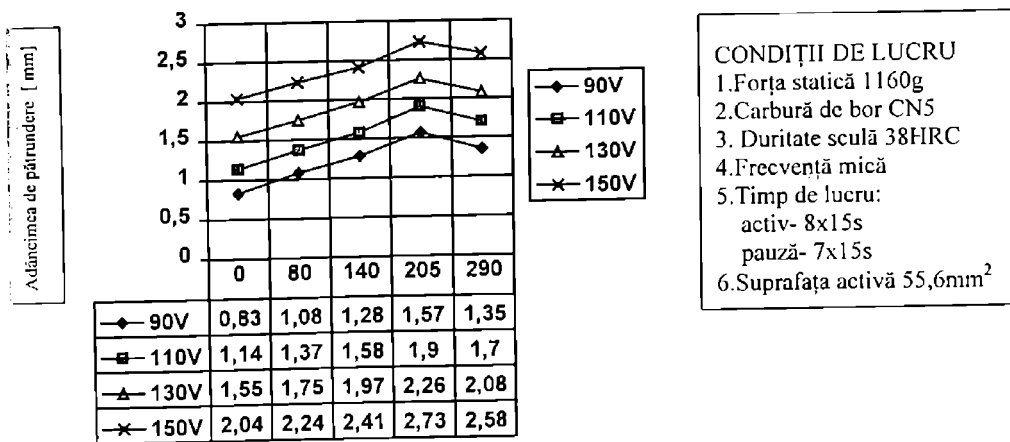
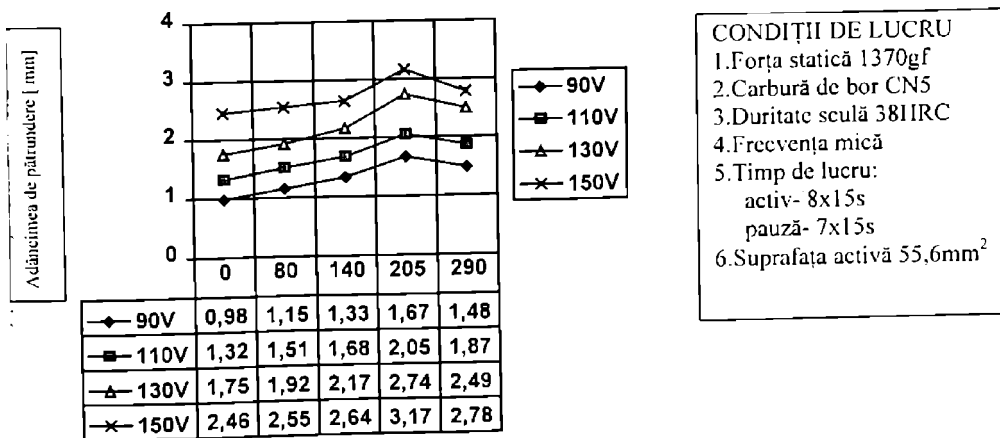


Figura 5.13. Dependența dintre adâncimea de pătrundere și turația OP.



c

Turația OP n [rot/min]



d

Turația OP n [rot/min]

Figura 5.13. Dependența dintre adâncimea de pătrundere și turația OP.

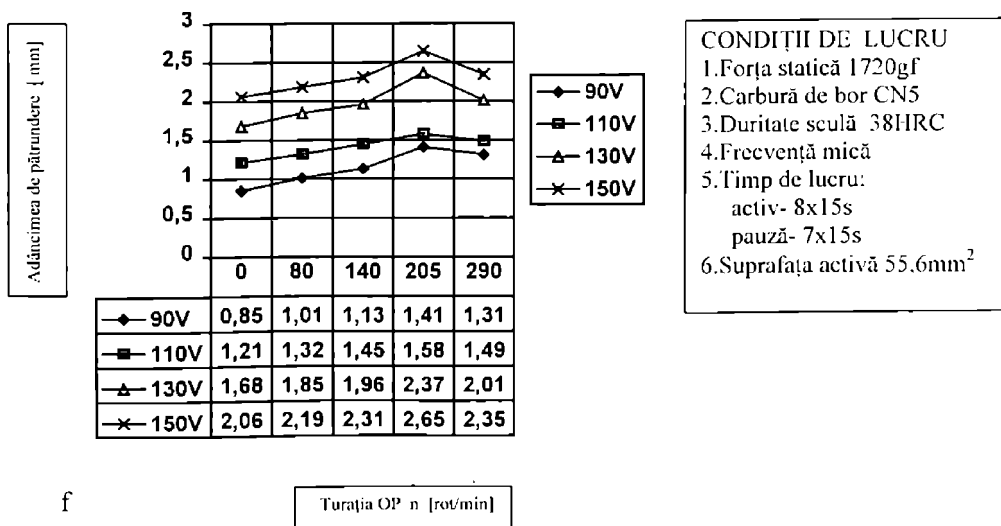
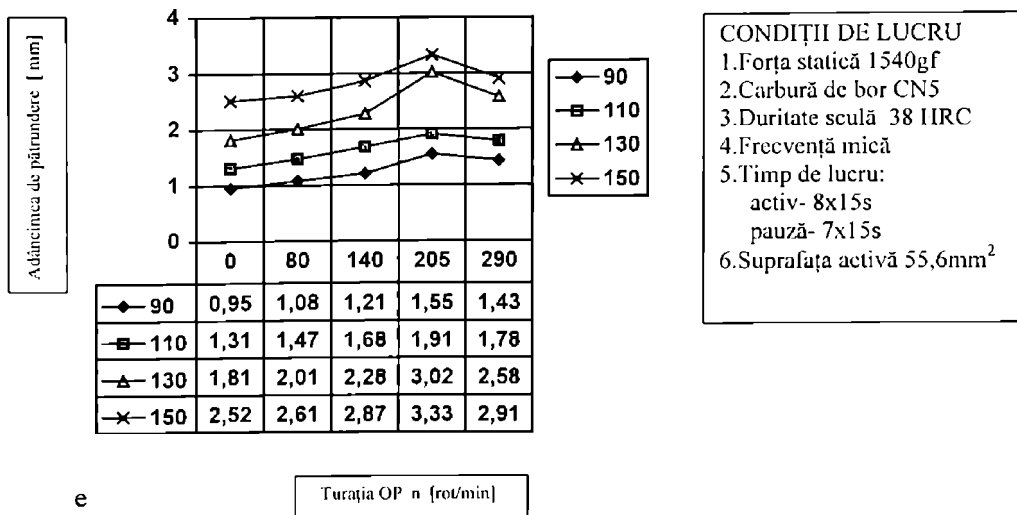
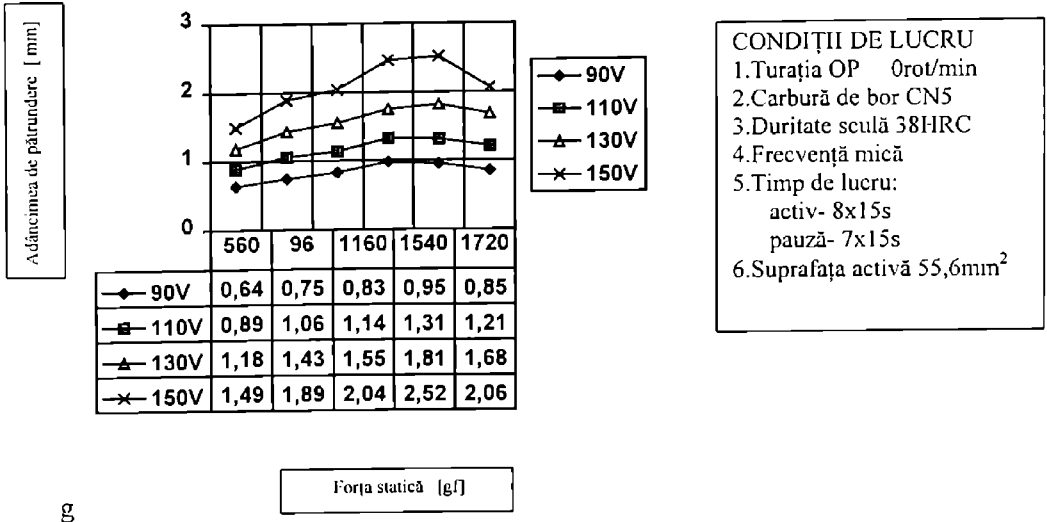
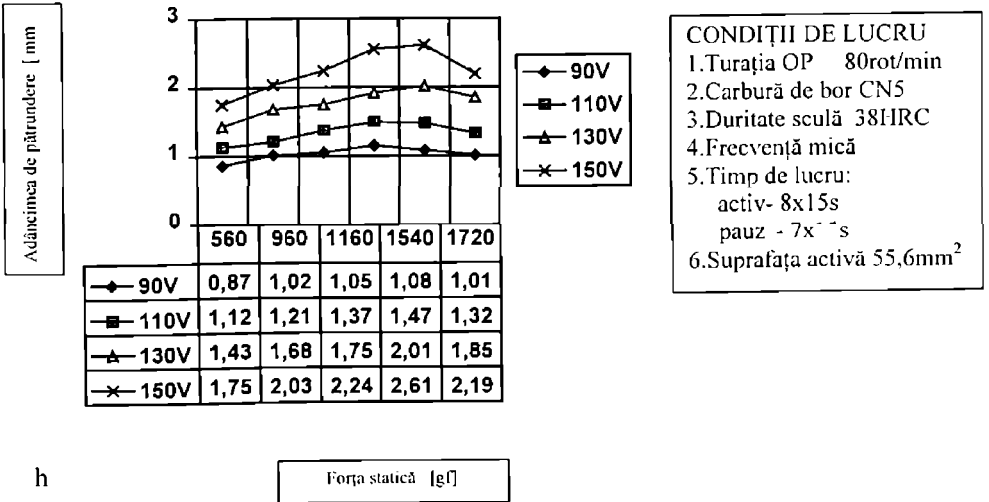


Figura 5.13. Dependența dintre adâncimea de pătrundere și turația OP.



g



h

Figura 5.13. Dependența dintre adâncimea de pătrundere și forța statică.

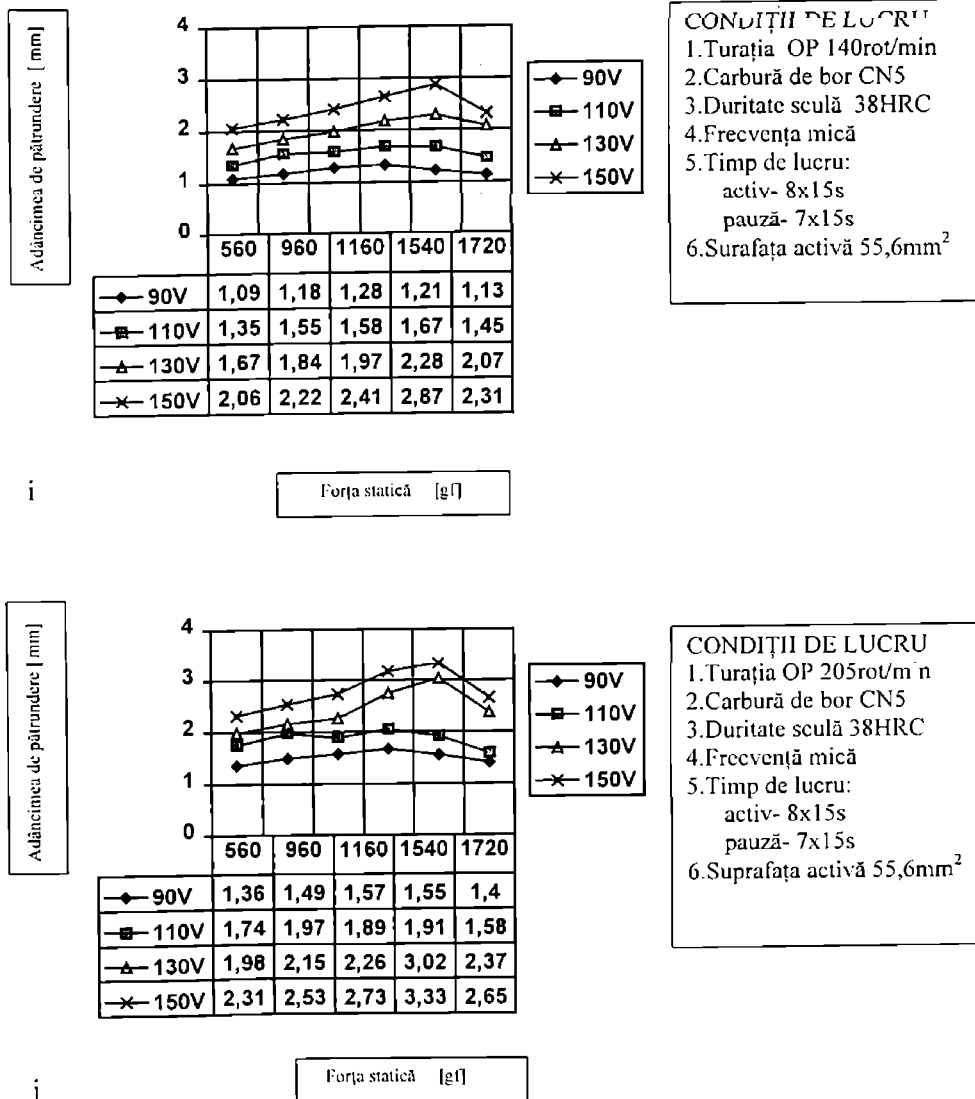
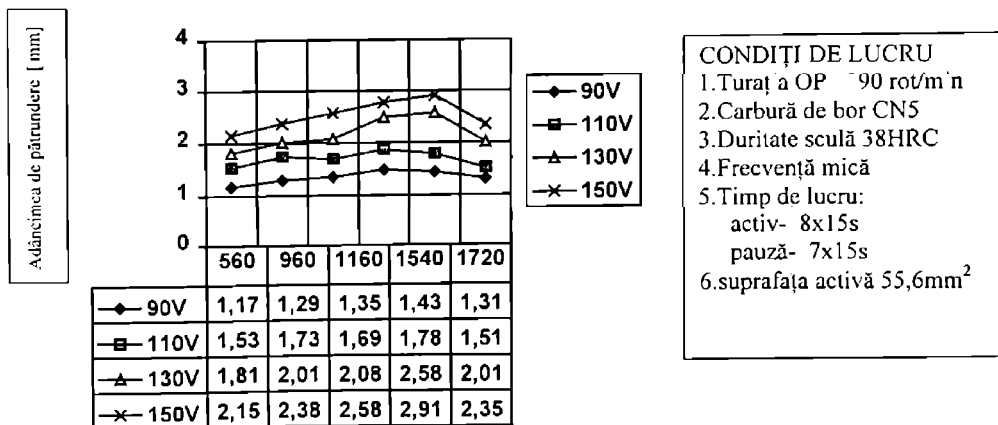
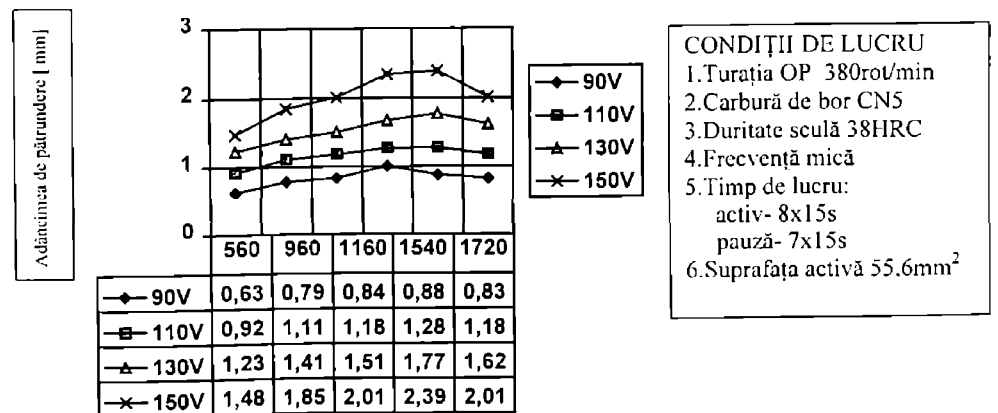


Figura 5.13. Dependența dintre adâncimea de pătrundere și forța statică.



k

Forța statică [gf]



l

Forța statică [gf]

Figura 5.13. Dependența dintre adâncimea de pătrundere și forța statică.

6. Timpii activi și de pauză necesari înprospătării zonei de lucru cu abraziv nou, evacuarea celui uzat cât și a produselor eroziunii.

Fiecărei reprezentări grafice i se asociază atât tabelul cu datele experimentale cât și mărimile constante ale parametrilor care nu au fost modificate (pentru a avea o imagine mai amplă asupra celor prezentate), rezultând astfel o imagine cât mai clară a condițiilor de experimentare (graficele prezentate în figura 5.13 a....1).

Tabele 5.5. Rezultate experimentale pentru sticlă.

Nr crt	Tensiune alimentare [V]	Fără Turație [rot/min]	Turația 140 [rot/min]	Turația 205 [rot/min]	Condiții de lucru
1	80	0,53			Carbură de siliciu Granulația 5 Forța statică 560gf Suprafața frotală 55,58mm ² Timp de lucru: -timp activ 8x15sec -timp pauză 7x15sec
2	90	0,61	1,02	1,33	
3	100	0,69			
4	110	0,87	1,31	1,68	
5	120	1,05			
6	130	1,14	1,60	1,96	
7	140	1,30			
8	150	1,46	1,95	2,28	

Nr crt	Tensiune alimentare [V]	Fără turație [rot/min]	Turația 140 [rot/min]	Turația 205 [rot/min]	Condiții de lucru
1	80	0,60			Carbură de siliciu Granulația 5 Forța statică 960gf Suprafața frotală 55,58mm ² Timp de lucru: -timp activ 8x15sec -timp pauză 7x15sec
2	90	0,72	1,15	1,48	
3	100	0,93			
4	110	1,03	1,46	1,87	
5	120	1,24			
6	130	1,40	1,79	2,10	
7	140	1,58			
8	150	1,79	2,15	2,39	

Nr crt	Tensiune alimentare [V]	Fără turație [rot/min]	Turația 140 [rot/min]	Turația 205 [rot/min]	Condiții de lucru
1	80	0,63			Carbură de siliciu Granulația 5 Forța statică 1160gf Suprafața frotală 55,58mm ² Timp de lucru: -timp activ 8x15sec -timp pauză 7x15sec
2	90	0,81	1,25	1,50	
3	100	0,98			
4	110	1,12	1,56	1,84	
5	120	1,30			
6	130	1,48	1,89	2,19	
7	140	1,72			
8	150	2,00	2,32	2,64	

Nr crt	Tensiune alimentare [V]	Fără Turație [rot/min]	Turația 140 [rot/min]	Turația 205 [rot/min]	Condiții de lucru
1	80	0,67			Carbură de siliciu Granulația 5 Forța statică 1370gf Suprafața frotală 55,58mm ² Timp de lucru: -timp activ 8x15sec -timp pauză 7x15sec
2	90	0,97	1,29	1,65	
3	100	1,15			
4	110	1,29	1,59	2,06	
5	120	1,46			
6	130	1,68	2,11	2,61	
7	140	1,87			
8	150	2,19	2,43	2,98	

Pe lângă consumul mare de timp, strategia de experimentare clasică prezintă un mare dezavantaj, în ceea ce privește dificultatea sau chiar imposibilitatea realizării scopului propus- *de căutare a optimului*.

Chiar dacă individual, fiecare variabilă a fost adusă la o valoare optimă, optimul global, care ține seama simultan de toate variabilele, este posibil să nu fie găsit. Acest aspect poate apărea datorită interacțiunilor dintre variabile. Astfel, interacțiunea poate determina ca valoarea optimă a unei variabile să fie dependentă de valoarea altei variabile. Un alt dezavantaj ar consta în faptul că nu ierarhizează variabilele, adică nu le așează după importanța cuvenită. Avantajul conferit de această metodă constă în faptul că ea prezintă o serie de informații mult mai clare asupra influenței (influență liniară, cu maxim sau cu minim, influență exponențială,...) pe care o are o variabilă asupra funcției obiectiv.

5.3.3. Strategia modernă (bilanț aleator)

Înlăturarea dezavantajelor menționate este posibilă prin utilizarea unei strategii moderne de experimentare, bazată pe programarea statistică a experimentelor. În aceste experimente, deși variabilele iau diferite valori (sunt modificate) simultan, efectul fiecăreia poate fi determinat izolat și mai ales interacțiunile dintre variabile pot fi evaluate contabil.

La nivel de principiu, etapele necesare aplicării unui program statistic de analizare a experimentelor, sunt următoarele:

- a) Formularea problemei și a întrebărilor la care trebuie să răspundă programul.
- b) Din totalitatea variabilelor posibile, sunt alese acelea care se consideră că influențează răspunsul urmărit. Matricea variabilelor trebuie făcută cu mult discernământ. Este preferabil să se rețină mai multe variabile decât mai puține, cele ne semnificative putând fi înlăturate ulterior.

- c) Selecționarea intervalului de variație, permis tehnologic, de utilaj, etc, pentru fiecare variabilă luată în discuție.
- d) Alegerea în aceste intervale a unor puncte discrete numite niveluri, importante pentru a evalua variabilele.
- e) Determinarea mărimii erorii experimentale prin replicarea experimentelor.
- f) Efectuarea experimentelor din program într-o ordine aleatoare.
- g) Determinarea răspunsurilor simultane ale fiecărei experiențe.
- h) Analiza statistică a datelor culese și dezvoltarea unor relații între variabilele dependente și cele independente.
- i) Interpretarea tehnologică a rezultatelor analizei statistice.

În vederea realizării modelului matematic, trebuie început cu determinarea celor mai importanți factori, ce influențează o anumită funcție de răspuns, care, în cazul nostru este considerată productivitatea (reprezentată prin adâncimea de pătrundere). Astfel, în urma numeroaselor încercări efectuate, s-au luat în mod aleator perechi de factori de influență, pe baza cărora s-a completat tabelul 5.6.

După calcularea mediilor valorilor individuale ale factorilor de influență pentru fiecare nivel în parte s-a întocmit tabelul 5.7, unde s-a evidențiat și domeniul de variație a fiecărui factor realizându-se totodată și ierarhizarea factorilor.

În tabelul 5.8 s-au trecut valorile funcției de răspuns după eliminarea de fiecare dată, a câte unui factor, folosind în acest scop formulele:

$$c_q = \bar{y} - y_{i,q} \quad (5.7)$$

$$y'_{i,q} = y_{i,q} - c_q \quad (5.8)$$

în care sau efectuat următoarele notații:

\bar{y} - media aritmetică a valorilor funcției de răspuns;

c_q - corecția pentru nivelul q (indiferent de factor);

y_i - funcția de răspuns pentru rândul i;

y'_i - noua funcție de răspuns pe rândul i.

Corecțiile după factorul "tensiune" se fac pe baza calculelor:

Nivelul 1 1,664 - 1,237 = 0,427

Nivelul 2 1,664 - 1,479 = 0,185

Nivelul 3 1,664 - 1,717 = -0,053

Nivelul 4 1,664 - 2,223 = -0,559

Corecțiile după factorul "forță statică" se fac prin valorile:

Nivelul 1 1,664 - 1,184 = +0,480

Nivelul 2 1,664 - 1,703 = -0,039

Nivelul 3 1,664 - 1,773 = -0,109

Nivelul 4 1,664 - 1,996 = -0,332

Tabelul 5.6. Factorii de influență asupra productivității.

	Tensiunea de alimentare	Forța statică	Frecvența	Turație	Timp activ	Tipul carburii	Granulație	Duritate sculă	Adâncimea de pătrundere
	U]	Fs	f	n	t	Abr	CN	HRC	h
1	4	1	1	1	2	1	1	2	0,73
2	3	1	1	1	2	2	1	1	0,65
3	2	1	1	1	1	2	1	2	0,63
4	1	2	1	1	1	1	2	1	0,61
5	4	2	1	2	2	1	2	1	2,00
6	3	2	1	2	2	2	2	2	1,75
7	2	3	1	2	1	1	1	1	1,40
8	1	3	1	2	1	2	1	2	1,24
9	4	3	1	3	2	2	1	2	2,34
10	3	4	1	3	2	1	2	1	1,97
11	2	4	1	3	1	2	2	1	1,96
12	1	4	1	3	1	1	2	2	1,53
13	1	1	2	3	2	2	1	2	1,43
14	2	1	2	3	2	1	1	1	1,47
15	3	1	2	3	1	2	1	1	2,06
16	4	2	2	3	1	1	2	2	2,81
17	1	2	2	2	2	2	2	2	1,46
18	2	2	2	2	2	2	2	1	1,72
19	3	3	2	2	1	1	1	1	2,07
20	4	3	2	2	1	1	1	2	2,58
21	1	3	2	1	2	1	1	2	1,15
22	2	4	2	1	2	2	2	2	1,70
23	3	4	2	1	1	1	2	1	1,80
24	4	4	2	1	1	2	2	1	2,88
	1. 90V 2. 110V 3. 130V 4. 150V	760gf 960gf 1160gf 1370gf	22,52 22,93 kHz	1- 0 2- 140 3- 205 rot/min	1-8x15s 2-4x30s	1-CSi 2-CBr	1- CN4 2- CN6	1-38 2-22	39,94 1,664

Tabelul 5.7. Valorile individuale ale factorilor de corecție.

Corecția 1	Corecția 2	Corecția 3	Corecția 4	Corecția 5	Corecția 6
0,171	0,651	1,009	1,272	1,370	1,446
0,597	1,077	1,435	1,698	1,600	1,676
0,815	1,295	1,652	1,915	1,817	1,741
1,037	0,998	1,356	1,619	1,717	1,641
1,441	1,402	1,363	1,626	1,724	1,800
1,697	1,658	1,619	1,882	1,784	1,860
1,585	1,476	1,437	1,700	1,798	1,722
1,667	1,558	1,519	1,782	1,684	1,608
1,781	1,672	1,352	1,615	1,517	1,593
1,917	1,586	1,266	1,529	1,627	1,703
2,145	1,814	1,494	1,757	1,659	1,583
1,957	1,626	1,306	1,569	1,667	1,591
1,857	2,337	2,017	1,754	1,656	1,732
1,655	2,135	1,817	1,554	1,652	1,728
2,007	2,487	2,167	1,904	1,806	1,730
2,251	2,212	1,892	1,629	1,727	1,651
1,887	1,848	1,809	1,546	1,448	1,524
1,905	1,866	1,827	1,564	1,466	1,542
2,017	1,908	1,869	1,606	1,704	1,628
2,021	1,912	1,873	1,610	1,708	1,632
1,577	1,468	1,826	1,563	1,661	1,737
1,885	1,554	1,912	1,649	1,551	1,627
1,747	1,416	1,774	1,511	1,609	1,533
2,321	1,990	2,348	2,085	1,987	1,911

Corecția după factorul "turație" se face cu ajutorul valorilor:

Nivelul 1 $1,664 - 1,306 = +0,358$

Nivelul 2 $1,664 - 1,702 = -0,038$

Nivelul 3 $1,664 - 1,984 = -0,320$

Corecția după factorul "frecvență" se va face prin:

Nivelul 1 $1,664 - 1,401 = +0,263$

Nivelul 2 $1,664 - 1,927 = -0,263$

Corecția după factorul "tipul carburii" are în vedere:

Nivelul 1 $1,664 - 1,566 = +0,098$

Nivelul 2 $1,664 - 1,762 = -0,098$

Corecția după factorul "timp activ" se va face cu următoarele

valori:

Nivelul 1 $1,664 - 1,588 = +0,076$

Nivelul 2 $1,664 - 1,740 = -0,076$

Tabelul 5.8. Valorile funcțiilor de ierarhizare.

		Tensiune alimentare	Forța statică	Frecvența	Turația de lucru	Țimp activ	Țipul carburii	Granulație	Duritate sculă
1	Nivelul 1	1,237	1,1617	1,4008	1,2687	1,7975	1,677	1,3958	1,7158
	Nivelul 2	1,479	1,725	1,9275	1,7775	1,5308	1,652	1,9625	1,6125
	Nivelul 3	1,717	1,797		1,9462				
	Nivelul 4	2,223	1,9733						
	DV	0,986	0,8116	0,8116	0,6775	0,2667	0,0250	0,5367	0,1033
2	Nivelul 1		1,1838	1,4008	1,2687	1,7967	1,6139	1,4790	1,6971
	Nivelul 2		1,7030	1,9267	1,7764	1,5308	1,7137	1,8480	1,6305
	Nivelul 3		1,7730		1,9462				
	Nivelul 4		1,9953						
	DV		0,8115	0,5259	0,6775	0,2659	0,0998	0,3690	0,0666
3	Nivelul 1			1,4010	1,3060	1,6045	1,5658	1,6650	1,6790
	Nivelul 2			1,9280	1,7030	1,7243	1,7625	1,6640	1,6490
	Nivelul 3				1,9840				
	DV			0,5270	0,6780	0,1198	0,1967	0,0010	0,0300
4	Nivelul 1			1,4010		1,7240	1,5657	1,6640	1,6790
	Nivelul 2			1,9270		1,6040	1,7626	1,6640	1,6490
	DV			0,5260		0,1200	0,1969	0	0,0300
5	Nivelul 1					1,7240	1,5657	1,6644	1,6794
	Nivelul 2					1,6040	1,7626	1,6638	1,6488
	DV					0,1200	0,1969	0,0006	0,0360
6	Nivelul 1					1,7400		1,6644	1,6957
	Nivelul 2					1,5880		1,6638	1,6325
	DV					0,1520		0,0006	0,0632
7	Nivelul 1							1,6644	1,683
	Nivelul 2							1,6638	1,645
	DV							0,0006	0,038

5.4 Modelarea prin experiment factorial complet

În vederea determinării unui optim, în cazul unui proces tehnologic, cel mai simplu este, dacă se poate, stabilirea unei relații care să dea informații cât mai precise despre parametri de intrare și funcția obiectiv studiată /49, 61, 85/. Astfel, în primă fază se impune stabilirea parametrilor de intrare, apoi ierarhizarea acestora prin una din metodele:

- experiment psihologic;
- analiza dispersională;

- bilanț aleator.

În urma aplicării bilanțului aleator, s-a putut determina ordinea de influență a parametrilor de intrare asupra productivității (adâncimea de pătrundere), obținându-se :

1. tensiunea de alimentare;
2. forța statică,
3. turația OP;
4. frecvența de lucru;
5. natura materialul abraziv;
6. timpul impulsului;
7. duritatea obiectului de transfer;
8. granulația materialului abraziv.

În continuare, se va prezenta un model matematic pentru adâncimii de pătrundere prin eroziune abrazivo-cavitațională cu unde ultrasonice (EACUU), a materialelor fragile sticlă și safir, prelucrare realizată pe mașina MPU-01. În vederea realizării acestui deziderat (prelucrarea sticlei) s-a recurs la experimentul factorial complet EFC 2^5 , în care s-au considerat următorii factori de influență:

factorul A -- tensiunea de alimentare (puterea electrică de alimentare);

factorul B -- forța statică (presiunea statică);

factorul C -- turația OP;

factorul D -- frecvența de lucru;

factorul E -- tipul granulelor abrazive.

Nivelele de variație adoptate pentru factorii prezențați mai sus sunt cele redată în tabelul 5.9

Tabelul 5.9. Nivele de variație pentru factorii de influență.

	Tensiunea de alimentare U	Forța statică F _s	Turația OP n	Frecvența de lucru f	Tipul abrazivului CN
Nivel superior	150 V	13,7 N	205 rot/min	Mare 22.935Hz	2 CBr 43 GPa
Nivel inferior	90 V	9,6 N	0 rot/min	Mică 22.522Hz	1 CSi 30 GPa

În tabelul 5.10. se prezintă matricea de programare a experimentului EFC 2^5 , având N= 32 măsurări, în care s-au notat cu +1 și -1 valorile codificate ale nivelelor superior și inferior. Funcția de răspuns, adâncimea de pătrundere (h), reprezintă adâncimea cu care sula a pătruns în semifabricat în decursul unui ciclu de lucru (8x15s- timp activ și 7x15s- timp de pauză, t = 225s).

Tabelul 5.10 Matricea de program a experimentului EFC 2⁵

Tensiunea de alimentare	Forța statică	Turatia OP	Frecvența	Tipul de carbură	Adâncimea de pătrundere
-1	-1	-1	-1	-1	0.67
+1	-1	-1	-1	-1	1.73
-1	+1	-1	-1	-1	0.86
+1	+1	-1	-1	-1	2.18
-1	-1	+1	-1	-1	1.30
+1	-1	+1	-1	-1	2.28
-1	+1	+1	-1	-1	1.42
+1	+1	+1	-1	-1	2.71
-1	-1	-1	+1	-1	0.96
+1	-1	-1	+1	-1	2.04
-1	+1	-1	+1	-1	1.16
+1	+1	-1	+1	-1	2.53
-1	-1	+1	+1	-1	1.68
+1	-1	+1	+1	-1	2.72
-1	+1	+1	+1	-1	1.79
+1	+1	+1	+1	-1	3.18
-1	-1	-1	-1	+1	0.72
+1	-1	-1	-1	+1	1.96
-1	+1	-1	-1	+1	0.98
+1	+1	-1	-1	+1	2.56
-1	-1	+1	-1	+1	1.47
+1	-1	+1	-1	+1	2.53
-1	+1	+1	-1	+1	1.57
+1	+1	+1	-1	+1	2.92
-1	-1	-1	+1	+1	1.08
+1	-1	-1	+1	+1	2.19
-1	+1	-1	+1	+1	1.25
+1	+1	-1	+1	+1	2.97
-1	-1	+1	+1	+1	1.80
+1	-1	+1	+1	+1	2.87
-1	+1	+1	+1	+1	1.86
+1	+1	+1	+1	+1	3.25

Polinomul funcției de răspuns va avea următoarea formă:

$$\begin{aligned}
 h = & b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_5 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 \\
 & + b_{14} X_1 X_4 + b_{15} X_1 X_5 + b_{23} X_2 X_3 + b_{24} X_2 X_4 + b_{25} X_2 X_5 + b_{34} X_3 X_4 + \\
 & + b_{35} X_3 X_5 + b_{45} X_4 X_5
 \end{aligned}
 \quad (5.9)$$

unde b_{jk} reprezintă coeficienții de regresie de interacțiune a factorilor k, j .

Folosind programul STATGRAPHICS s-a obținut o ierarhizare a factorilor de influență, rezultatele fiind redată în figura 5.14. După eliminarea influențelor nesemnificative, în urma calculelor, s-au obținut coeficienții de regresie cu ajutorul cărora se obține expresia funcției polinomiale de răspuns:

$$h = 0,15476 + 0,00448U - 0,089781Fs + 0,002899n \pm 0,17094f \pm 0,08656Abr + 0,001407U.Fs \quad (5.10)$$

Pentru a vedea dacă modelul matematic găsit corespunde din punct de vedere practic se va compara valorile calculate prin modelul găsit cu valorile determinate experimental, comparație prezentată în tabelul 5.11.

Tabelul 5.11. Comparație între valorile calculate și cele experimentale

Nr. Crt	Tensiune de alimentare [V]	Forța statică [N]	Turatia OP [rot/min]	Frecvența [kHz]	Tipul de carbură [material]	Adâncimea de pătrundere [mm]	
						Măsurată	Calculată
1	90	9,6	0	22,52 (-1)	CSi (-1)	0,72	0,654
2	110	9,6	205	22,93 (+1)	CSi (-1)	2,04	1,950
3	130	13,7	0	22,52 (-1)	CSi (-1)	1,68	1,755
4	150	13,7	205	22,93 (+1)	CSi (-1)	3,21	3,167
5	90	13,7	0	22,93 (+1)	CB (+1)	1,25	1,320
6	90	9,6	205	22,52 (-1)	CB (+1)	1,77	1,621
7	150	9,6	0	22,52 (-1)	CB (+1)	1,86	1,906
8	150	13,7	205	22,93 (+1)	CB (+1)	3,45	3,340

Comparând valorile calculate și cele măsurate se observă o apropiere mulțumitoare între ele, astfel încât, chiar dacă curbele de nivel constant nu pot fi utilizate direct în evaluarea parametrilor tehnologici ai prelucrării prin eroziune în câmp ultrasonic în vederea optimizării, însă pot furniza puncte centrale ale unor experimente pe baza cărora să se obțină modele empirice mult mai fidele, care de fapt este și scopul modelării matematice.

Din studiul figurii 5.14, care prezintă ierarhizarea factorilor de influență, se poate constata că nu există o mare diferență între rezultatele date de programul STATGRAPHICS și rezultatele obținute prin bilanț aleator (rezultate prezentate în paragraful anterior).

Din figură se poate constata că, cea mai mare influență asupra procesului o are tensiunea de alimentare deci amplitudinea oscilațiilor sculei. Există tendința de a se lucra cu valori cât mai mari ale amplitudinii. Creșterea amplitudinii este limitată de rezistența sistemului generator-transductor-concentrator. Din practică s-a constatat că depășirea valorii de 120μm pentru

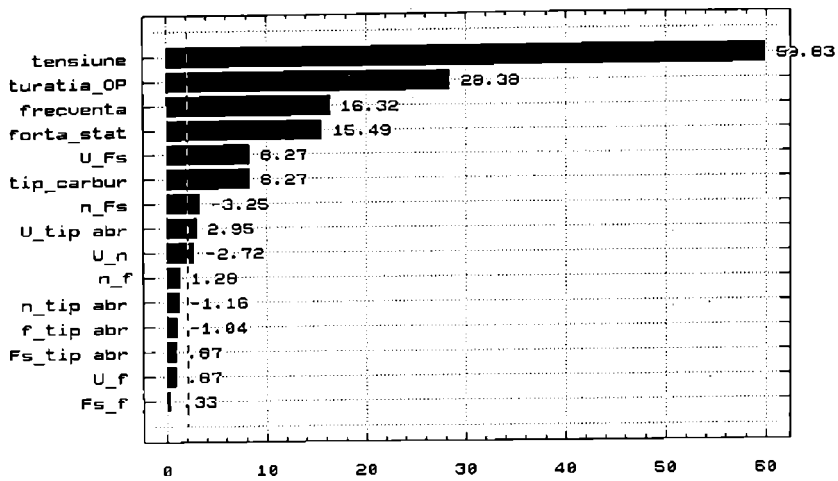


Figura 5.14. Ierarhizarea factorilor de influență asupra adâncimii de pătrundere.

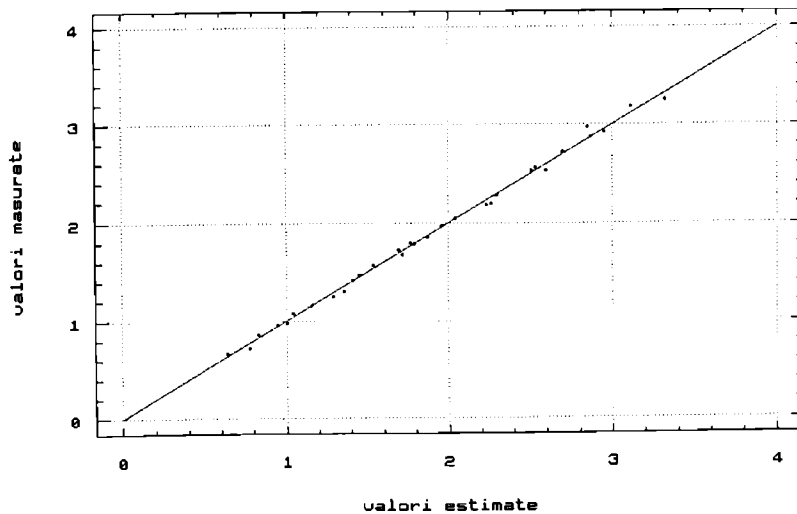


Figura 5.15. Concordanța modelului prezentat pentru funcția studiată.

amplitudinea oscilațiilor sculei este periculoasă pentru concentratorul de energie ultrasonică, conducând la fisurarea sa, la ruperea sa sau cel mai adesea la desprinderea sa de transductor deoarece liantul folosit nu rezistă la un astfel de regim de lucru. Pentru a se obține totuși un maxim de productivitate se recurge la reducerea tensiunii de alimentare sau se proiectează scula în așa fel încât valoarea finală a amplitudinii să nu depășească 100μm.

În acest caz, coeficientul de concordanță între valorile estimate și cele determinate experimental are o valoare mai mare decât pragul acceptat ($R^2=99,68 \% > 90 \%$), am considerat că ecuația (5.10) descrie adecvat suprafața reală de răspuns, situație demonstrată și de dreapta de concordanță, reprezentată în figura 5.15..

În scopul modelării procesului de găurire prin eroziune abrazivo-cavitațională, în câmp ultrasonic, a sticlei de sodiu, s-a recurs la efectuarea unui experiment factorial complet. Funcția de răspuns, considerată de interes tehnologic, a fost adâncimea de pătrundere, cu ajutorul căruia se poate exprima un parametru important al procesului și anume: productivitatea prelucrării (Q).

$$Q = A \cdot h / t \quad (5.11)$$

În urma desfășurării acestui experiment s-au determinat influențele factorilor și interacțiunile semnificative de ordinul întâi, s-au explicat coeficienții polinomului de regresie și s-a verificat concordanța între valorile estimate cu ajutorul modelului și cele măsurate.

Obiectivul final al modelării îl constituie identificarea punctelor sau zonele de optim, utilizând polinomul de regresie găsit anterior. Practic această identificare este mai rapidă prin trasarea, cu ajutorul programului STATGRAPHICS, a dependențelor funcționale:

$$h = f(U, F_s) \quad \text{figura 5.16}$$

$$h = f(U, n) \quad \text{figura 5.17}$$

$$h = f(F_s, n) \quad \text{figura 5.18}$$

Aceste suprafețe de răspuns definesc domeniul de existență caracteristic al funcției de răspuns (productivitate-dată prin adâncimea de pătrundere), în spațiul factorial determinat de intervalele de interes practic:

$$U \in [90 \dots 150] \text{ V}; \quad F_s \in [9,6 \dots 13,7] \text{ N}; \quad n \in [0 \dots 205] \text{ rot/min}$$

Prin secționarea suprafețelor de răspuns cu plane orizontale, se obțin curbele de nivel constant, figurile 5.19, 5.20 și 5.21. În toate reprezentările grafice, factorii de influență considerați ca parametrii constanți se află la nivelele corespunzătoare valorilor centrale ale intervalelor prezentate mai sus.

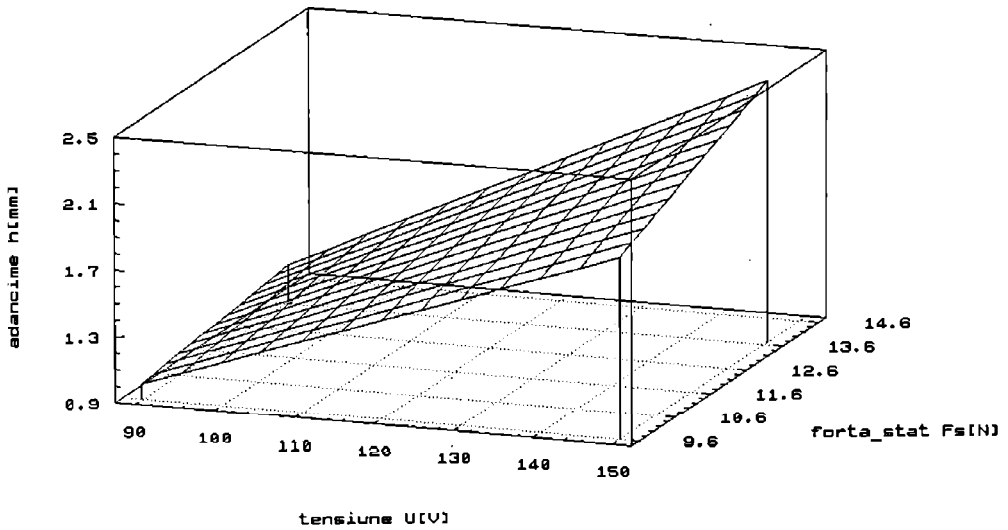


Figura 5.16. Dependența dintre viteza de avans, tensiune și forța statică.

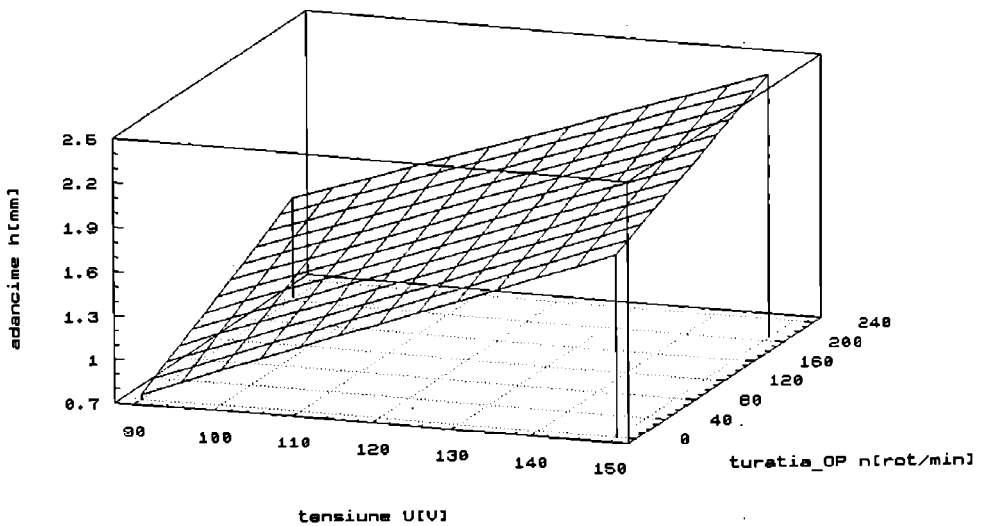


Figura 5.17. Dependența dintre viteza de avans, tensiune și turația OP.

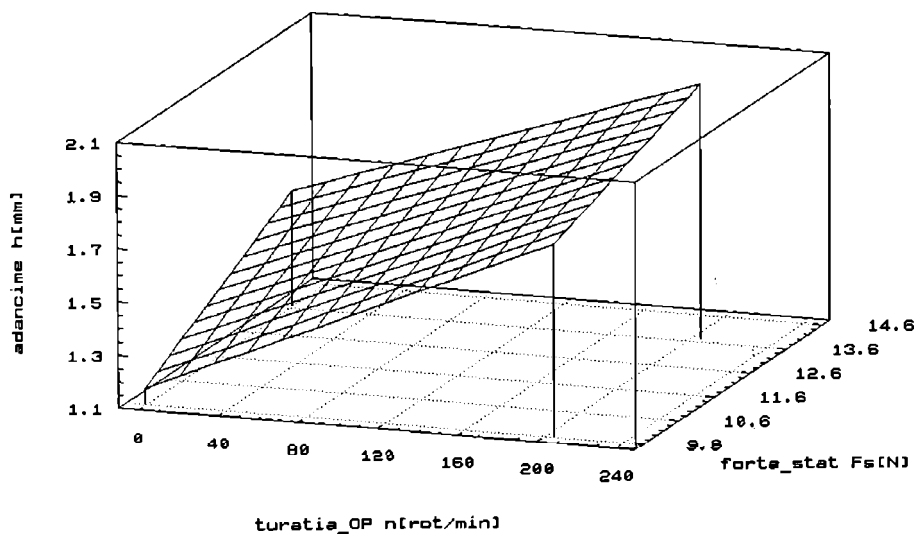


Figura 5.18. Dependența dintre viteza de avans, forța statică și turația OP.

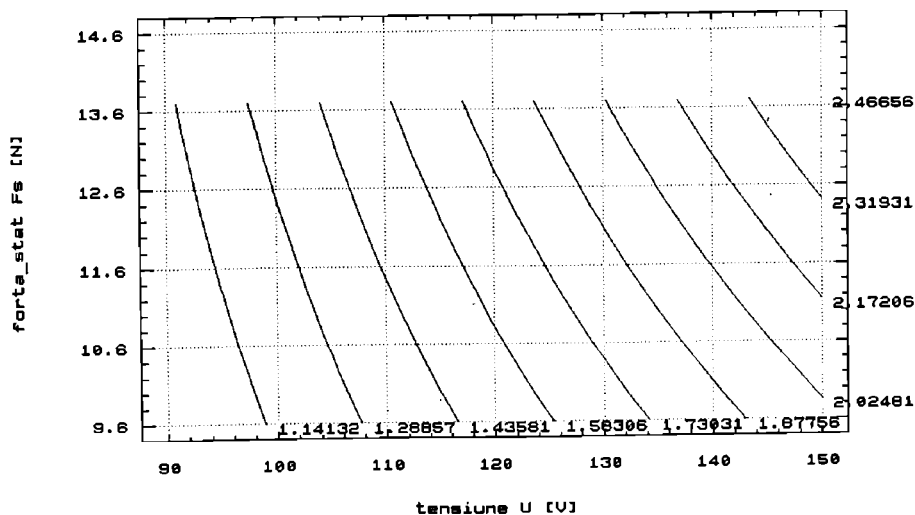


Figura 5.19. Curbe de nivel constant TENSIUNE- FORȚA STATICĂ.

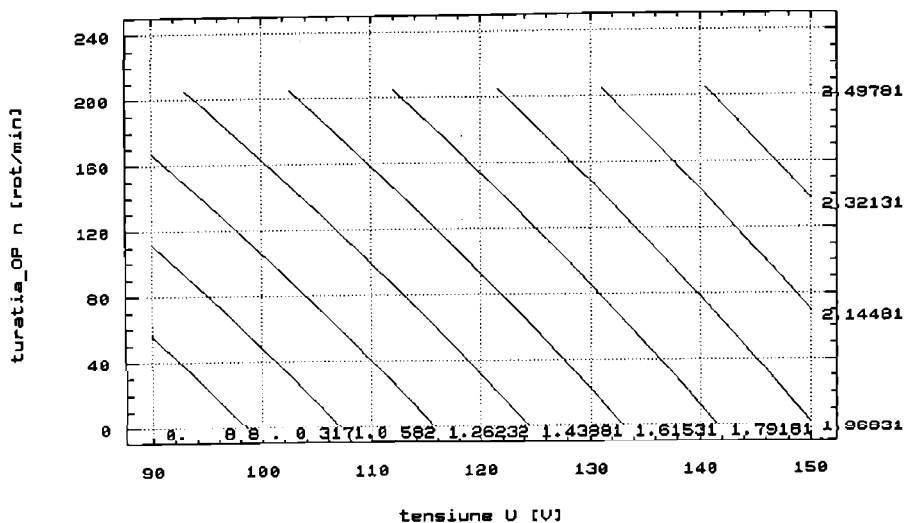


Figura 5.20. Curbe de nivel constant TENSIUNE-TURAȚIA OP.

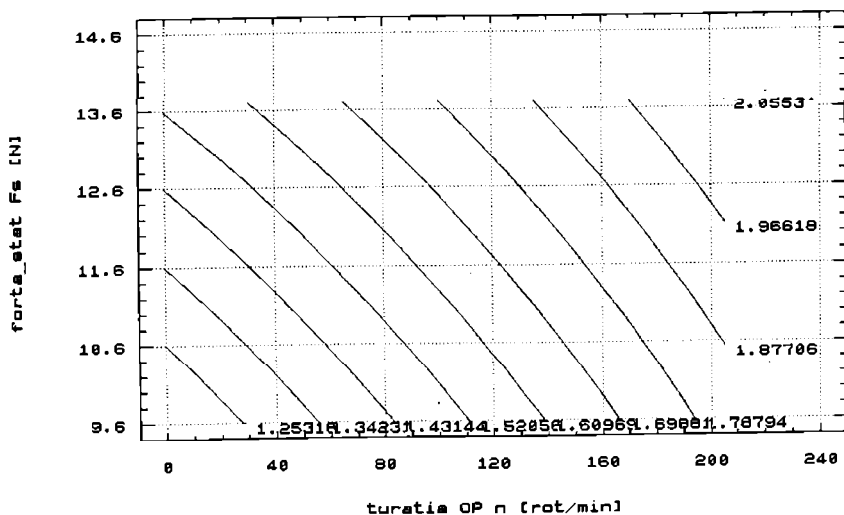


Figura 5.21. Curbe de nivel constant FORȚA STATICĂ-TURAȚIA OP.

Curbele de nivel constant obținute, deși nu pot fi utilizate direct pentru optimizarea procesului tehnologic, pot furniza puncte centrale ale unor experimente ulterioare, în scopul obținerii unor modele, ce urmează a fi folosite la optimizarea găuririi materialelor dure și fragile prin eroziune abrazivo-cavitațională în câmp ultrasonic.

În continuare, se va prezenta un model matematic al adâncirii de pătrundere prin eroziune abrazivo-cavitațională cu unde ultrasonice (EACUU), a safirului, prelucrarea realizându-se tot pe mașina MPU-01.

În vederea realizării acestui deziderat (prelucrarea safirului) s-a recurs la experimentul factorial cu puncte centrale (parametrii la valorile centrale ale intervalului), în care s-au considerat următorii factori de influență:

- tensiunea de alimentare (puterea electrică de alimentare);
- forța statică (presiunea statică);
- turația OP;
- frecvența de lucru;
- tipul granulației granulelor abrazive.

Nivelele de variație adoptate pentru factorii prezentați mai sus sunt cele redată în tabelul 5.12

Tabelul 5.12. Nivele de variație pentru factorii de influență.

	Tensiunea de alimentare U	Forța statică Fs	Turația OP n	Frecvența de lucru F	Dimensiune granule CN
Nivel superior	150 V	13,7 N	205 rot/min	Mare 22.935Hz	57μm
Nivel inferior	90 V	9,6 N	0 rot/min	Mică 22.522Hz	68μm

În tabelul 5.13. se prezintă matricea programare a experimentului.

Folosind programul STATGRAPHICS s-a obținut o ierarhizare a factorilor de influență, rezultatele fiind redată în figura 5.22. După eliminarea influențelor nesemnificative, în urma calculelor, s-au obținut coeficienții de regresie cu ajutorul cărora se obține expresia funcției polinomiale de răspuns:

$$h = -4,1923 + 0,0058U + 0,0017Fs + 0,0058n + 0,15f + 0,0051d \quad (5.12)$$

Obiectivul final al modelării îl constituie identificarea punctelor sau zonele de optim, utilizând polinomul de regresie găsit anterior. Practic această identificare este mai rapidă prin trasarea, cu ajutorul programului STATGRAPHICS, a dependențelor funcționale:

$$\begin{aligned} h &= f(U, Fs) && \text{figura 5.23} \\ h &= f(U, n) && \text{figura 5.24} \\ h &= f(Fs, n) && \text{figura 5.25} \end{aligned}$$

Aceste suprafețe de răspuns definesc domeniul de existență caracteristic al funcției de răspuns (productivitate-dată prin adâncimea de pătrundere), în spațiul factorial determinat de intervalele de interes practic:

$$U \in [90 \dots 150] \text{ V}; \quad F_s \in [9,6 \dots 13,7] \text{ N}; \quad n \in [0 \dots 205] \text{ rot/min}$$

Tabelul 5.13. Matricea program a experimentului folosit la prelucrarea saafirului artificial.

Nr crt	Tensiune alimentare	Turația OP	Frecvența	Forța statică	Dim. abraziv	Adâncime atinsă
1	90	0	22.5	137	57	0.32
2	90	205	22.9	96	68	0.64
3	120	102	22.7	116	62	0.31
4	120	102	22.7	116	62	0.31
5	90	205	22.5	96	57	0.55
6	120	102	22.7	116	62	0.31
7	150	0	22.9	137	57	0.96
8	120	-102	22.7	116	62	0.31
9	90	205	22.9	137	57	0.63
10	120	102	22.7	116	62	0.31
11	180	102	22.7	116	62	0.54
12	120	102	22.7	116	51	0.21
13	120	102	23.1	116	62	0.15
14	150	205	22.9	96	57	0.93
15	120	102	22.7	157	62	0.35
16	150	0	22.9	96	68	0.71
17	120	102	22.7	116	73	0.39
18	120	307	22.7	116	62	0.35
19	90	0	22.7	96	68	0.35
20	120	102	22.7	116	62	0.31
21	150	0	22.5	137	68	0.80
22	120	102	22.3	116	62	0.17
23	120	102	22.7	116	62	0.31
24	150	205	22.9	137	68	1.18
25	150	205	22.5	137	57	1.06
26	120	102	22.7	75	62	0.36
27	150	0	22.5	96	57	0.82
28	90	0	22.9	137	68	0.59
29	120	102	22.7	113	62	0.31
30	90	205	22.5	137	68	0.58
31	120	102	22.7	116	62	0.31
32	90	0	22.9	96	57	0.44
33	120	102	22.7	116	62	0.31
34	120	102	22.7	116	62	0.31
35	150	205	22.5	96	68	0.84
36	60	102	22.7	116	62	0.05

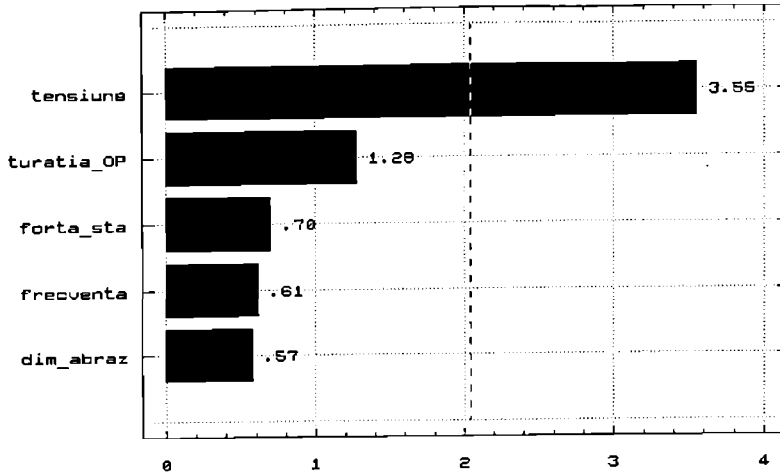


Figura 5.22. Ierarhizarea factorilor de influență.

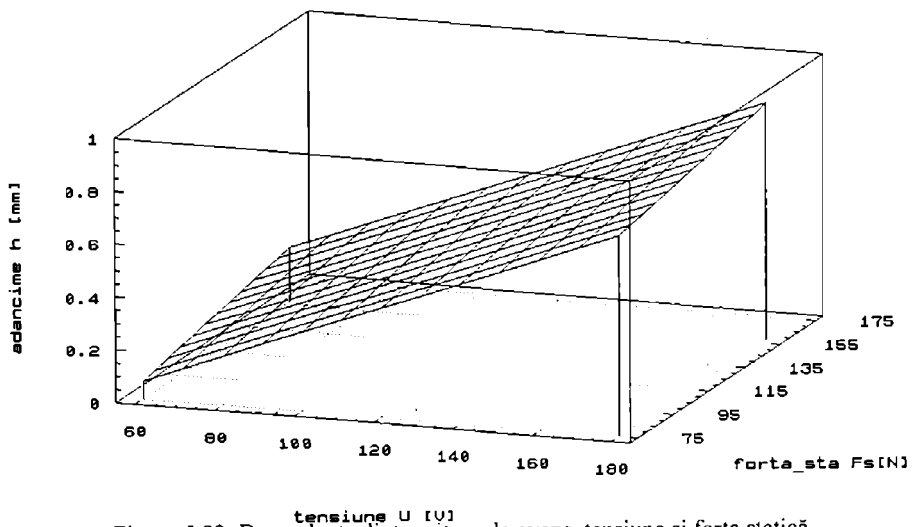


Figura 5.23. Dependența dintre viteza de avans, tensiune și forța statică.

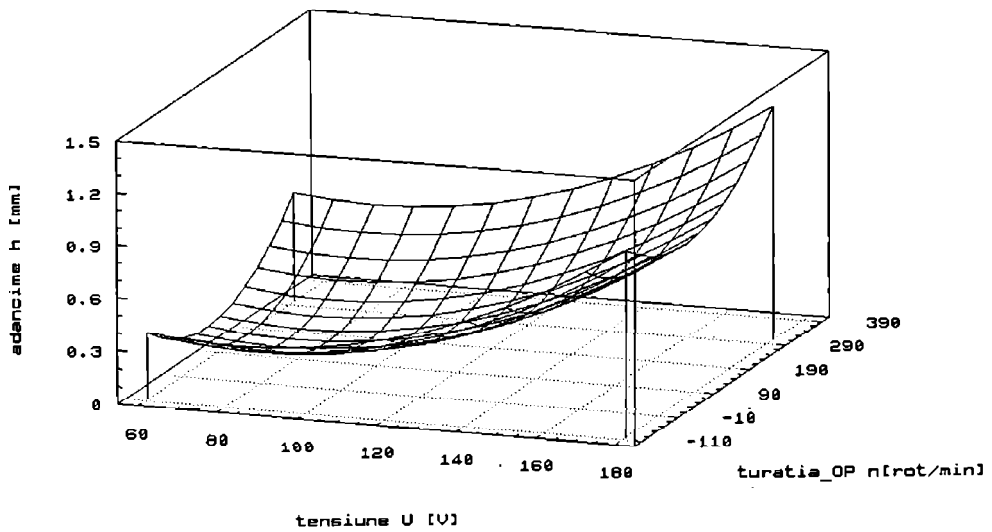


Figura 5.24. Dependența dintre adâncimea de pătrundere, tensiune și-turația OP.

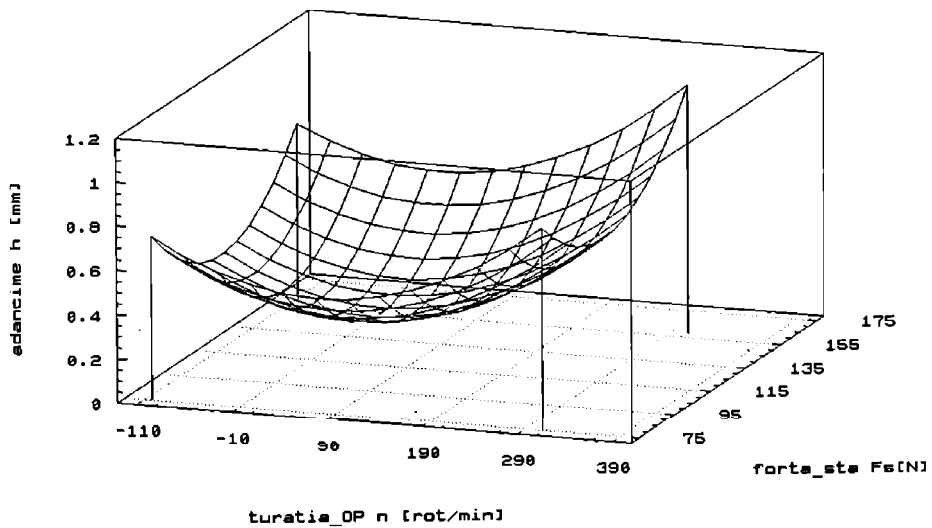


Figura 5.25. Dependența dintre adâncimea de pătrundere, forța statică și turația OP.

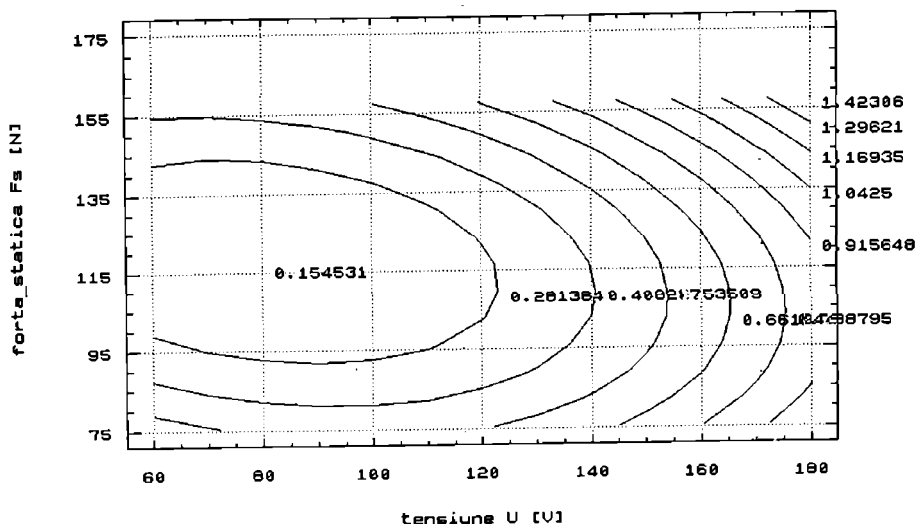


Figura 5.26. Curbe de nivel constant TENSIUNE- FORȚA STATICĂ.

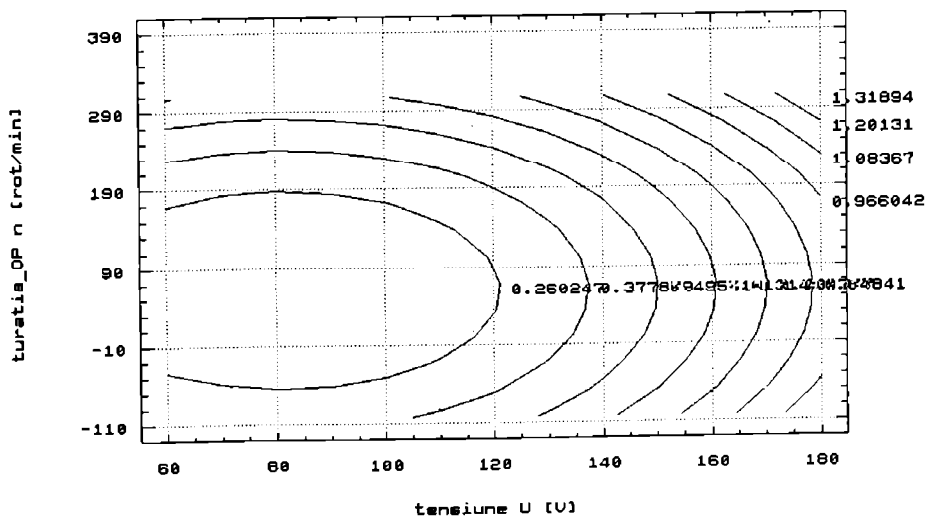


Figura 5.27. Curbe de nivel constant TENSIUNE- TURAȚIA OP.

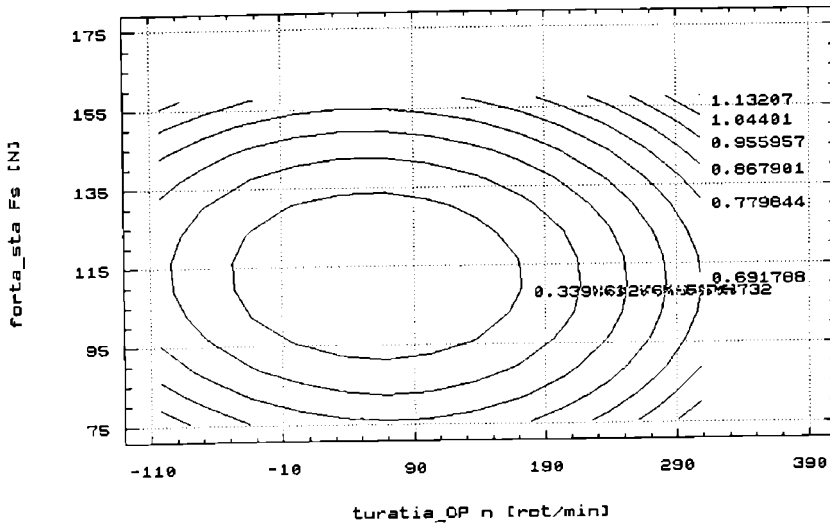


Figura 5.28. Curbe de nivel constant FORȚA STATICĂ-TURAȚIA OP.

Prin secționarea suprafețelor de răspuns cu plane orizontale, se obțin curbele de nivel constant, figurile 5.26, 5.27 și 5.28. În toate reprezentările grafice, factorii de influență considerați ca parametrii constanți se află la nivele corespunzătoare valorilor centrale ale intervalelor prezentate mai sus.

Pe baza curbelor de nivel constant prezentate anterior, se poate determina adâncimea de pătrundere și deci productivitatea prelucrării, ce se obține cu anumiți parametri tehnologici utilizați la găurire. Pe de altă parte, reprezentând aceste curbe și pentru alte valori ale parametrului constant, este posibilă stabilirea valorilor tensiunii (U), forței de avans (F_s), și a turației OP (n), care asigură adâncimea de pătrundere (h) sau viteza de avans (v), necesară obținerii unor deziderate tehnico- economice.

În cazul în care se urmărește obținerea unei calități a suprafeței prescrise este necesară realizarea unui nou experiment factorial, având ca funcție de răspuns rugozitatea suprafeței prelucrate. Pe baza aceluiași algoritm de calcul se trasează curbele de nivel constant, care împreună cu cele prezentate în lucrare permit determinarea parametrilor tehnologici ce asigură obținerea rugozității prescrise, la o viteză de avans maximă posibilă.

5.5 Modelarea matematico- experimentală a productivității

De cele mai multe ori se preferă expresiile polinomiale, în locul celor de tip monomial și asta datorită explicitării mai bine a dependenței care exista între parametri și funcția obiectiv studiată. În realizarea expresiei trebuie să se țină seama de toți parametri care ar influența funcția obiectiv.

Dacă expresiile de tip monomial prezintă influențele parametrilor asupra funcției de răspuns sub formă liniară, expresiile de tip polinomial prezintă aceste influențe sub forme curbilinii. Și într-un caz și în altul este destul de dificil de a se determina aceste expresii, de aceea s-au făcut unele ipoteze simplificatoare.

Ca și majoritatea cercetătorilor care au încercat să realizeze modele matematice cât mai exacte, și în cadrul lucrării s-au considerat o serie de ipoteze simplificatoare, prin care s-au neglijat următoarele aspecte:

1. ciocnirea granulelor aflate între sculă și OP;
2. cavitația acustică;
3. corозиunea chimică;
4. uzura granulelor abrazive de-a lungul procesului;
5. uzura sculei;
6. variația frecvenței de lucru care poate apare datorită uzurii sculei;
7. existența între sculă și OP a diferitelor dimensiuni de granule abrazive;
8. prelucrarea OP și datorită fenomenului de așchire mecanică.

În realizarea modelului matematic (a productivității) s-a ținut cont de următorii parametri:

- dimensiunea medie a clasei granulelor abrazive aflate în spațiul de lucru, (d), [mm];
- tensiunea de lucru (U), în V- ca expresie a amplitudinii undelor acustice;
- turația OP (n), în rot/min ;
- microduritatea granulelor abrazive (HB_g) în daN/mm²;
- microduritatea obiectului de prelucrat (HB) în daN/mm²;
- presiunea statică exercitată de sculă asupra OP (p) în daN/mm²,
cu ajutorul cărora s-a obținut expresia:

$$h = C_1 \cdot d^a \cdot U^b \cdot n^c \cdot p^d \cdot HB^e \cdot HB_g^f \quad (5.13)$$

unde : constantele C_1 și C_2 sunt factori de proporționalitate, care țin seama de frecvența de rezonanță cu care se lucrează (frecvența mică –curent minim- respectiv frecvența mare –curent maxim) și de alte elemente.

Odată stabilită forma expresiei matematice empirice se va proceda la determinarea exponentilor și a constantelor, care intră în componența acesteia. Pentru aceasta se execută mai multe experiențe perechi, prin modificarea unuia dintre parametrii, timp în care, ceilalți se mențin

constanți, și tot așa până când se epuizează toți parametrii. Relația (5.13) se va logaritma, ajungându-se în final la expresiile :

$$\text{Lg } h = \text{lg } C + \text{lg } x^j \quad (5.14)$$

$$\text{Lg } h = \text{lg } C + j \text{ lg } x \quad (5.15)$$

unde, cu x s-a notat parametrul curent care se variază, iar cu j s-a notat exponentul curent, cel care se va determina. Se observă că în sistemul de coordonate dublu logaritmice, relația (5.13) reprezintă o familie de drepte, care au pante și depărtări de origine diferite.

În reprezentarea grafică j reprezintă coeficientul unghiular al dreptei considerate,

$$j = \text{tg } \alpha \quad (5.16)$$

Determinarea exponenților se face după rezolvarea ecuației (5.15) :

$$\text{Lg } h_1 = j \text{ lg } x_1 + \text{lg } C \quad (5.17)$$

$$\text{Lg } h_2 = j \text{ lg } x_2 + \text{lg } C \quad (5.18)$$

Prin scăderea celor două relații și eliminarea părții constante, se obține expresia:

$$j = (\text{lg } h_1 - \text{lg } h_2) / (\text{lg } x_1 - \text{lg } x_2) \quad (5.19)$$

După determinarea tuturor exponenților, cu ajutorul relației (5.19), se vor determina constantele C_1 și C_2 , din expresia (5.13), pe baza valorilor din tabelele folosite anterior în tabelele 5.5 și a celor date în anexa 1.

Pe baza calculelor efectuate s-au obținut următoarele valori pentru cele două tipuri de necunoscute:

$$C_1 = 0,13 \quad C_2 = 0,23$$

$$a = 1,04 \quad b = 1,12 \quad c = 0,18 \quad d = 0,9 \quad e = 0,7 \quad f = -0,95$$

După înlocuire, se obțin următoarele expresii empirice :

$$h = 0,13 d^{1,04} U^{1,12} n^{0,18} p^{0,9} \text{HB}_g^{0,7} \text{HB}^{-0,95} \quad (5.20)$$

$$h = 0,13 d^{1,04} U^{1,12} n^{0,18} p^{0,9} \text{HB}_g^{0,7} \text{HB}^{-0,95} \quad (5.21)$$

Odată determinat un model matematic se impune verificarea compatibilității sale. Pentru a vedea dacă modelul găsit corespunde cu realitatea, valorile calculate se apropie de cele măsurate, se face o comparație între aceste valori, această verificare este evidențiată prin tabelul 5.14.

Tabelul 5.14. Comparație între valorile calculate și cele experimentale

Nr Cr t	Tensiune de alimentare [V]	Forța statică [N]	Turația OP [rot/min]	Frecvența [kHz]	Tipul de carbură [material]	Adâncimea de pătrundere [mm]	
						calculată	măsurată
1	90	9,6	0	22,52	CSi	0,72	0,7076
2	110	9,6	205	22,93	CSi	2,04	2,0333
3	130	13,7	0	22,52	CSi	1,68	1,6785
4	150	13,7	205	22,93	CSi	3,21	3,2230
5	90	13,7	0	22,93	CB	1,25	1,2696
6	90	9,6	205	22,52	CB	1,77	1,7864
7	150	9,6	0	22,52	CB	1,86	1,8721
8	150	13,7	205	22,93	CB	3,45	3,4667

La cele prezentate anterior trebuie făcute câteva observații:

A. Influența presiunii statice asupra productivității este crescătoare, până la o anumită valoare, după care descrește, deci expresiile (5.20) și (5.21) sunt valabile doar pentru o pantă crescătoare.

B. Tot în același mod influențează și productivitatea respectiv granulația, dar în acest caz s-au evidențiat experimental anumite legături, care există între granulație și amplitudinea vibrațiilor acustice. În acest caz, există trei păreri referitoare la legăturile menționate:

1. amplitudinea vibrațiilor să fie apropiată, ca valoare, de dimensiunile granulelor abrazive;

2. amplitudinea vibrațiilor să reprezinte cca. (0,6...0,8) din dimensiunile granulelor abrazive;

3. amplitudinea vibrațiilor să fie aproximativ jumătate din dimensiunile granulelor abrazive.

Deci, pentru valori ale amplitudinii oscilațiilor de până la dimensiunea ideală ($A = d_g$), formulele determinate rămân valabile, iar pentru panta descrescătoare se stabilesc alte expresii.

Se pune următoarea problemă: la ce turație a obiectului de prelucrat, în zona de lucru, nu va mai fi lichid activ, știind că absența acestuia conduce la mărirea sau la micșorarea productivității prelucrării.

Pentru a rezolva această problemă se va determina, în principal, turația critică, mărime pentru care lichidul de lucru va părăsi zona de contact OT-OP iar prelucrarea se va face pe uscat.

După ce sistemul se pune în mișcare, particulele împreună cu lichidul de lucru se mișcă după legi hiperbolice până când se atinge starea de echilibru, straturile limită de la una din frontierele orizontale, deci o poziție (r,h). Aici, ele își schimbă direcția și sunt împinse datorită rotației către

marginile până când ies din stratul limită, trecând într-o altă poziție de echilibru.

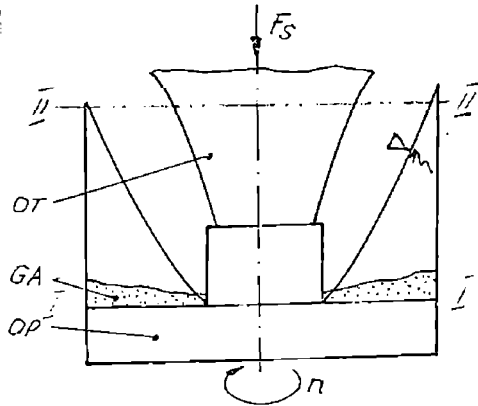


Figura 5.29. Evoluția lichidului de lucru.

Astfel, în figura 5.29 s-a prezentat evoluția lichidului de lucru până la o anumită valoare de echilibru, care poate fi obținută după un timp t , particulele fiind caracterizate de poziția (r, h) . Pentru determinarea turației critice se va folosi relația (2.11), care dă o funcție de forma:

$$f(n) = \sqrt{\frac{8gh}{D^2 - d^2}} = f(h, D, d) \quad (5.22)$$

În urma calculelor efectuate s-a obținut valoarea critică a turației ca fiind. Și în urma încercărilor experimentale se poate obține turația critică, ca fiind valoarea maximă a productivității, în cazul baleerii turației de la minim la maxim (0...380 rot/min).

Rezultatele experimentale obținute sunt prezentate în tabelul 5.15.

Tabelul 5.15. Rezultate experimentale.

Nr. crt.	Tensiune [V]	Adâncimea de pătrundere [mm]					
		Turația mesei [rot/min]					
		0	80	140	205	290	380
1	90	0,98	1,15	1,33	1,67	1,48	0,65
2	110	1,32	1,56	1,68	2,05	1,87	0,78
3	130	1,75	1,92	2,17	2,70	2,50	0,97
4	150	2,46	2,55	2,64	3,17	2,78	1,13

Cercetările experimentale s-au făcut în următoarele condiții:
-materialul abraziv : Carbură de bor CN5;

- obiectul de prelucrat -sticlă;
- duritatea sculei 38HRC;
- forța statică, dată de masa de 1380 g;
- timpul de lucru (8x15s timp activ și 7x15s pauze).

Pe baza rezultatelor experimentale prezentate în tabelul 5.15, au fost trasate curbele $h = f(n)$, cu tensiunea de alimentare a generatorului ca parametru (figura 5.30).

În urma încercărilor s-a putut constata, că turația are o influență hotărâtoare asupra vitezei de înaintare și implicit asupra productivității prelucrării. Această îmbunătățire se manifestă numai până la o anumită valoare a turației, denumită **turația critică**, după care are loc o scădere a productivității. Este mult mai ușor să se determine, în mod analitic, turația critică, decât să se stabilească pe cale experimentală. Rezultatele obținute prin cele două metode dau valori apropiate.

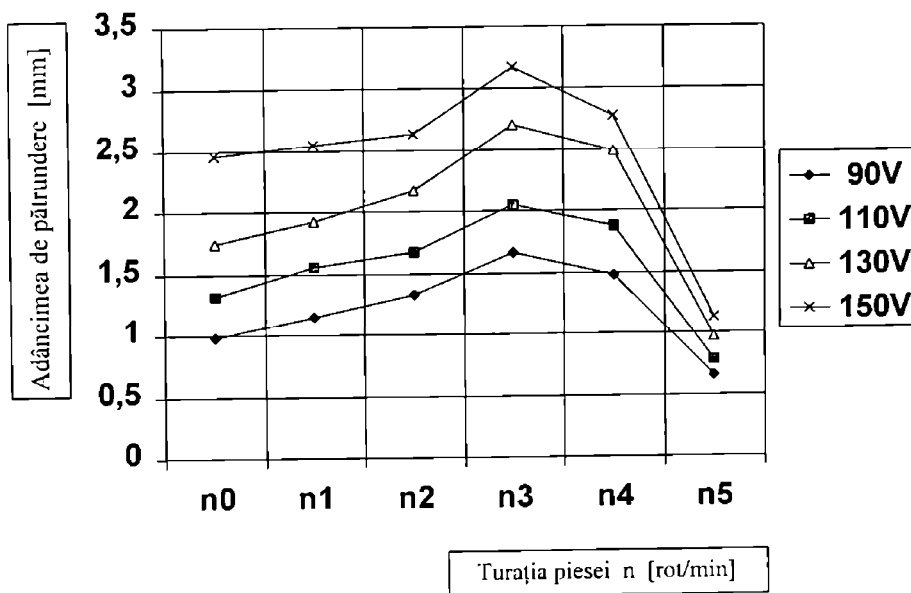


Figura 5.30. Dependența dintre viteza de avans și turația piesei.

5.6 Modelarea matematică prin EFF a uzurii sculei la prelucrarea în câmp ultrasonic

O altă funcție obiectiv de mare importanță în procesul de prelucrare, care, însă este foarte puțin studiată, este uzura sculei așchietoare.

În timpul procesului de prelucrare, datorită acțiunii simultane a granulelor abrazive, atât asupra OP, cât și asupra OT, se produce uzura sculei pe direcție longitudinală și pe direcție transversală.

Forma acestei uzuri este dependentă atât de forma inițială a sculei, cât și de modul de lucru, care poate fi :

- prelucrare cu suspensie abrazivă staționară sau cu suspensie abrazivă activă (deplasată prin aspirație sau stropire);
- prelucrare cu mișcare de rotație sau fără mișcare de rotație.

Au fost stabilite două variante de lucru:

A) prelucrare cu suspensie abrazivă staționară și fără rotirea sculei;

B) prelucrare cu suspensie abrazivă staționară și cu rotirea sculei.

În ambele variante, materialul sculei a fost același (OL 42), cu o duritate 38HRC și în urma prelucrării s-au obținut următoarele forme de uzură; pentru cazul A fiind redată în figura 5.31, iar pentru cazul B fiind redată în figura 5.32. Timpul de prelucrare (60 min) și condițiile de lucru (tensiune de alimentare, presiune statică, piesa, materialul abraziv, granulația) au fost aceleași dar masa și dimensiunile sculei au diferit relativ puțin, deoarece este imposibil să se obțină două scule perfect identice. Aceste mici diferențe nu au influențat forma și mărimea uzurii sculei.

De remarcat este aspectul celor două uzuri, adică diferența de forme geometrice obținute la utilizarea celor două tipuri de prelucrări. La figura 5.31 se evidențiază o modificare accentuată a profilului, înspre partea interioară, fenomen datorat imposibilității evacuării spre interior a granulelor abrazive care, produc numai o deformare plastică a materialului, cauzată de aplicarea multiplelor lovituri aplicate piesei. Deformația care se evidențiază se datorează efectului de înmuiere acustică, efect prezentat mai detaliat în capitolul 1. Spre exterior, se constată o rotunjire a muchiilor, datorate ieșirii lichidului de lucru din zona de contact împreună cu microparticulele rezultate prin spargerea abrazivului.

În cazul figurii 5.32 se evidențiază rotunjirea muchiilor interioare și exterioare, datorită mișcării de rotație executate de sculă, fapt ce determină apariția frecărilor între OP și OT. Spre exterior raza de racordare este mai mare datorită faptului că acolo au loc frecări mai intense decât spre interior.

În funcție de condițiile concrete de lucru (mărirea puterii) se poate produce o ușoară accentuare a fenomenului de uzură atât pe partea frontală, a sculei cât și pe cea laterală.

La prima vedere s-ar crede că, prin mărirea durității sculei s-ar obține o uzură mai mică a acesteia, afirmație valabilă doar parțial. În urma unor încercări experimentale s-a constatat că o duritate a sculei mai amre de 42HRC conduce la mărirea rezistenței la uzură, dar scade foarte mult fiabilitatea sculei, determinând apariția de micro sau macrofisuri, fenomen care detelierează definitiv scula. Prin folosirea de scule cu o duritate scăzută,

se obține o creștere semnificativă a fiabilității dar și o creștere tot la fel de semnificativă a uzurii

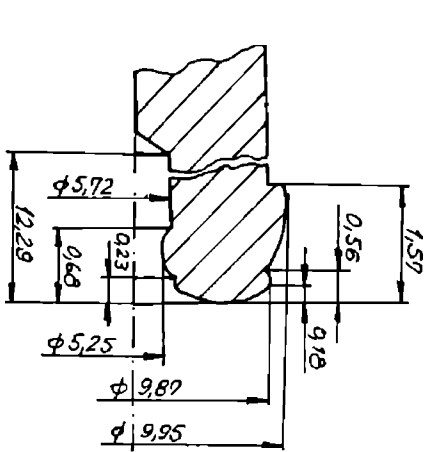


Figura 5.31. Uzura specifică pentru prelucrarea cu suspensie abrazivă staționară

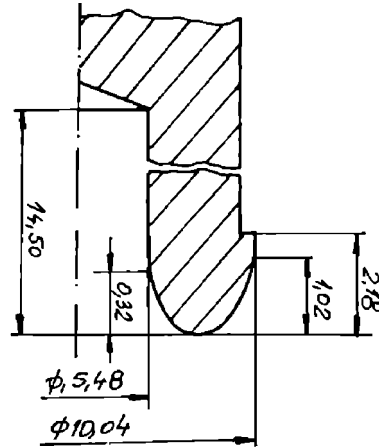


Figura 5.32. Uzura specifică pentru prelucrarea cu suspensie abrazivă și rotirea sculei

În vederea măririi durabilității OT, aceasta se confecționează din carbură metalică și se lipește pe un concentrator intermediar, aspect prezentat schematic în figura 5.33.

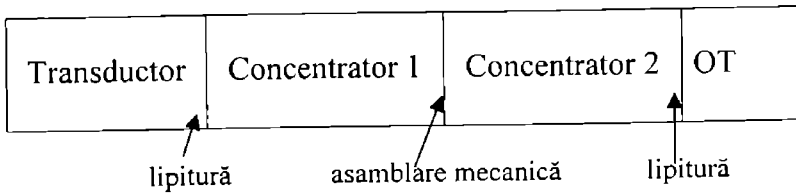


Figura 5.33. Modalitate de asamblare a sistemului transductor-concentrator-sculă.

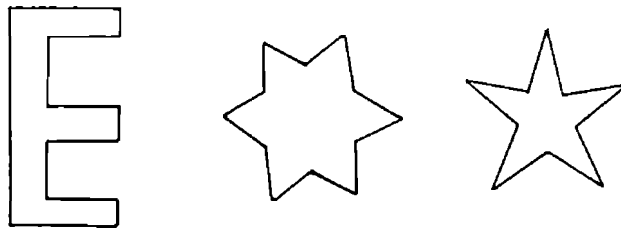


Figura 5.34. Configurații complexe de scule.

Acest tip de sculă se folosește doar în cazul unor producții de serie mare sau în cazul în care se cere o precizie deosebită pentru piesă, deoarece ansamblul OT este relativ de scump din cauza utilizării carburii metalice, care poate să prezinte configurații geometrice complexe (figura 5.34). Concentrator 2 se poate realiza din materiale ca: oțel de scule, OLC45, duraluminiu, OL40 sau alte materiale mai ieftine, dar cu proprietăți acustice bune.

Prin fixarea de concentrator a unei mase m_i cântărită în prealabil, conduce la modificarea frecvenței de rezonanță a întregului ansamblu rezonat, deci apare o dezacordare relativă Δf_i față de rezonanța ansamblului fără această masă. În acest caz este evident necesar reșezarea ansamblului rezonator pe o nouă frecvență de rezonanță, frecvență care se va determina cu formula:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\sqrt{[\Delta f_i^2(m_i - m) + 2\Delta f_i(m_i - m) + m_i]}}{(1 + \Delta f_i)m_i} \quad (5.23)$$

unde: Δf – deviația de frecvență măsurată;

Δf_i – dezacordarea relativă față de frecvența de rezonanță;

f_0 – frecvența de rezonanță a ansamblului rezonator fără masa m_i .

Se poate determina și masa admisibilă m_a a ansamblului mecano-rezonator astfel încât aceasta să oscileze în banda de frecvență pentru care a fost proiectat, masă determinată prin formula:

$$m_a = m_i \frac{\Delta f_a (2 + \Delta f_a) (1 + \Delta f_i)^2}{\Delta f_i (2 + \Delta f_i) (1 + \Delta f_a)^2} \quad (5.24)$$

unde: Δf_a – dezacordarea relativă admisibilă ce asigură vibrarea ansamblului acustic în banda de frecvență pentru care s-a proiectat.

Uzura sculei depinde, în bună parte de aceiași parametrii care influențează productivitatea prelucrării, cu precizarea că în studiul realizat nu s-a luat în considerare decât unii dintre aceștia:

- tensiunea de alimentare (puterea);
- presiunea statică;
- turația sculei;
- duritatea sculei;
- frecvența de lucru.

Uzura sculei duce la scăderea în greutate a ansamblului concentrator-obiect de transfer și deci la modificarea frecvenței de rezonanță, care conduce la modificarea condițiilor de lucru. Trebuie remarcat faptul că, în timpul prelucrării se modifică frecvența de lucru, iar frecvența reală este mai mare decât cea calculată (cea a generatorului). Acest aspect se datorează

fenomenului de uzură a sculei și are drept consecință atât modificarea poziției punctelor nodale, cât și punctul de concentrare a energiei ultrasonice (figura 5.35) /29, 44, 46, 68/.

Prin pierderea de masă a OT (scurtare accentuată), se constată o creștere a frecvenței, care determină o diferență de frecvență Δf , între cea dată de generator și cea de lucru. Este de o deosebită importanță realizarea exactă a sculei și calculul sculei pentru frecvența de rezonanță. Acest lucru se face folosind una dintre expresiile redată în tabelul 5.16. La o lungime reală, mai mare, decât lungimea optimă, se obține o frecvență de lucru mai mică.

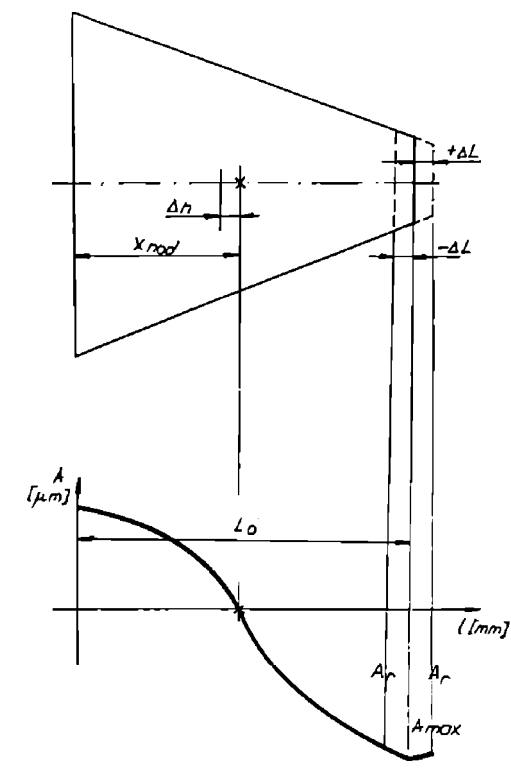
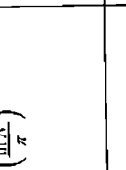
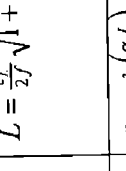
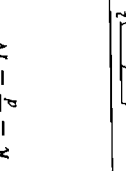
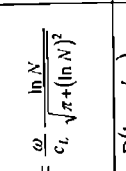
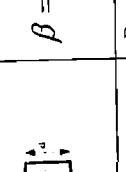


Figura 5.35.Principiul modificării punctelor nodale și a punctului de concentrare a energiei.

Această diferență de lungime poate conduce la modificarea amplitudinii oscilațiilor din zona de contact (micșorarea acestora). În același mod influențează și uzura sculei care provoacă o modificare de dimensiune și implicit o modificare a frecvenței, respectiv o micșorare a amplitudinii undelor ultrasonice în zona de lucru. Uneori mărirea diferenței de lungime este

Tablul 5.16 Relații de calcul pentru concentrator sau sculă.

Nr. crt	Tipul concentratorului	Legea de variație	Coef. teoretic de amplificarea amplitudinii	Lungimea concentratorului	Coordonatele punctului nodal
1		$D_x = D e^{-\beta x} \quad N = \frac{D}{d}$ $\beta = \frac{\omega}{c_L} \frac{\ln N}{\sqrt{\pi + (\ln N)^2}}$	$k = \frac{D}{d} = N$	$L = \frac{c_L}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln N}{\pi}\right)^2}$	$x_{nod} = \frac{L}{\pi} \arctg \frac{\ln N}{\pi}$
2		$D_x = D(1 - \alpha' x)$ $\alpha' = \frac{D-d}{DL}$	$k = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi L}{\gamma}\right)^2}$ $k > N$	$L = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{\alpha L}{\pi}\right)$ αL este rădăcina ecuației: $tg \alpha L = \frac{\alpha L}{(\alpha L)^2 N + 1}$	$x_{nod} = \frac{L}{\alpha} \arctg \frac{\alpha}{\alpha'}$ $\alpha = \frac{\omega}{c_L}$
3		$D_x = D \operatorname{ch} \gamma(L-x)$ $\gamma = \frac{1}{L} \operatorname{arc} \operatorname{ch} N$	$k = \frac{N}{\cos(K'L)}$ $k > N$	$L = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\left((K'L)^2 \operatorname{arc} \sin N\right)^2}$ $K'L$ este rădăcina ecuației: $(K'L) + \operatorname{tg}(K'L) = \sqrt{1 - \frac{1}{N^2}} \operatorname{arc} \operatorname{ch} N$	$x_{nod} = \frac{L}{K'} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(\frac{K'}{\gamma} \cdot \operatorname{ch} \gamma L\right)$ $K' = \sqrt{\alpha^2 - \gamma^2}$
4		$D_x = D$ pentru $0 \leq x \leq \frac{L}{2}$ $D_x = d$ pentru $L/2 \leq x \leq L$	$k = \left(\frac{D}{d}\right)^2 = N^2$	$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{c_L}{2f}$	$x_{nod} = \frac{L}{\pi} \operatorname{arc} \operatorname{tg}^2 \frac{\ln N}{\pi}$
5		$D_x = D_0 e^{-\frac{\omega x}{c_L}}$ $\beta = \frac{\omega}{c_L}$	$k = \sqrt{1 + 4 \ln N}$	$L = \frac{\lambda}{2} \left[\frac{2\sqrt{\ln N}}{\pi} + \frac{1}{2} + \frac{\operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(2 \frac{\sqrt{\ln N}}{\pi}\right)}{\pi} \right]$	$x_{nod} = \frac{L}{\pi} \arctg^2 \frac{\ln N}{\pi}$

relativ mare (câțiva milimetri), de aceea este foarte important ca în unele procese tehnologice să se cunoască această diferență (uzura). Reașezarea pe frecvența nouă de rezonanță se face prin modificarea frecvenței generatorului, singura mărime care poate fi controlată.

Modificarea dimensională influențează, în plus, și precizia dimensională a piesei. Pe baza acestor două aspecte s-a determinat o ecuație empirică de calcul a modificării masice, mărime care influențează direct procesul de prelucrare. În vederea determinării formei algebrice a expresiei uzurii s-a folosit un experiment factorial fracțional de forma $N=2^{5-1}$, valorile obținute fiind prezentate în tabelul 5.17 [61, 85].

În scopul modelării procesului de găurire prin eroziune abrazivo-cavitațională în câmp ultrasonic, a sticlei de natriu sau a safirului artificial, s-a procedat la efectuarea unui experiment factorial fracționar, care dă informații suficiente în legătură cu stabilitatea procesului. Funcția de răspuns considerată a fost aleasa ca fiind variația masei sculei Δm [mg] (uzura masică).

Tabelul 5.17. Experiment factorial fracțional de forma $N=2^{5-1}$.

Nr crt	Tensiunea de alimentare [V]	Forța statică [gf]	Turația OP [rot/min]	Frecvența de lucru	Duritate sculă [HRC]	Modificare masică [mg]
1	90	1370	0	2 (+1)	38	3,70
2	140	960	205	1 (-1)	38	3,90
3	90	960	205	1	22	4,90
4	140	960	0	1	22	4,65
5	140	960	205	2	22	6,40
6	140	960	0	2	38	2,45
7	90	960	205	2	38	3,90
8	140	1370	205	2	38	5,35
9	90	1370	205	2	22	6,70
10	140	1370	0	2	22	5,75
11	90	1370	0	1	22	4,25
12	140	1370	205	1	22	6,95
13	90	960	0	2	22	4,05
14	90	960	0	1	38	1,80
15	140	1370	0	1	38	2,55
16	90	1370	205	1	38	4,50

În urma desfășurării experimentului s-au determinat influențele factorilor și interacțiunile de ordinul întâi semnificative, s-au explicitat coeficienții polinomului de regresie și s-a verificat concordanța între valorile estimate cu ajutorul modelului și cele măsurate (experimentale). Polinomul funcției de răspuns are următoarea formă:

$$\begin{aligned} \Delta m = & b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_5 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + \\ & b_{14} X_1 X_4 + b_{15} X_1 X_5 + b_{23} X_2 X_3 + b_{24} X_2 X_4 + b_{25} X_2 X_5 + b_{34} X_3 X_4 + \\ & b_{35} X_3 X_5 + b_{45} X_4 X_5 \end{aligned} \quad (5.25)$$

unde b_{jk} reprezintă coeficienții de regresie de interacțiune a factorilor j, k .

Folosind programul STATGRAPHICS s-a obținut o ierarhizare a factorilor de influență, rezultatele fiind redate în figura 5.36. După eliminarea influențelor ne semnificative, calculele permit determinarea coeficienților de regresie, care sunt utilizați la scrierea polinomului funcției de răspuns, de forma:

$$\begin{aligned} \Delta m = & -0.34875 + 0.0105U + 0.002406Fs + 0.00817n + 0.31625f + \\ & + 0.0375HRC - 0.00875U.HRC + 0.0005313Fs.f \end{aligned} \quad (5.26)$$

HRC și f datorită faptului că nu sunt valori continue se vor introduce cu valorile codificate, valorile maxime cu $+1$ iar cele minime cu -1 .

Cum, în acest caz coeficientul de concordanță dintre valorile estimate și cele determinate experimental are o valoare mai mare decât pragul acceptat ($R^2 = 98\% > 90\%$), am considerat că ecuația descrisă de relația (5.26) descrie adecvat suprafața reală de răspuns, situație demonstrată și de dreapta de concordanță, prezentată în figura 5.37.

Obiectivul final al modelării îl constituie identificarea punctelor sau zonele de optim, utilizând polinomul de regresie găsit anterior. Practic această identificare este mai rapidă prin trasarea, cu ajutorul programului STATGRAPHICS, a dependențelor funcționale, considerate pentru carbura de siliciu:

$$m = f(U, Fs) \quad \text{figura 5.38}$$

$$m = f(U, n) \quad \text{figura 5.39}$$

$$m = f(Fs, n) \quad \text{figura 5.40}$$

Aceste suprafețe de răspuns definesc domeniul de existență caracteristic al funcției de răspuns și uzura masică, în spațiul factorial determinat de intervalele de interes practic:

$$U \in [90 \dots 150] \text{ V}; \quad Fs \in [9,6 \dots 13,7] \text{ N}; \quad n \in [0 \dots 205] \text{ rot/min}$$

Prin secționarea suprafețelor de răspuns cu plane horizontale se obțin curbele de nivel constant din figurile 5.41, 5.42 și 5.43. În toate reprezentările grafice, factorul de influență considerat ca parametru constant, se află la nivelul corespunzător valorii centrale a intervalelor prezentate mai sus (tabelul 5.17).

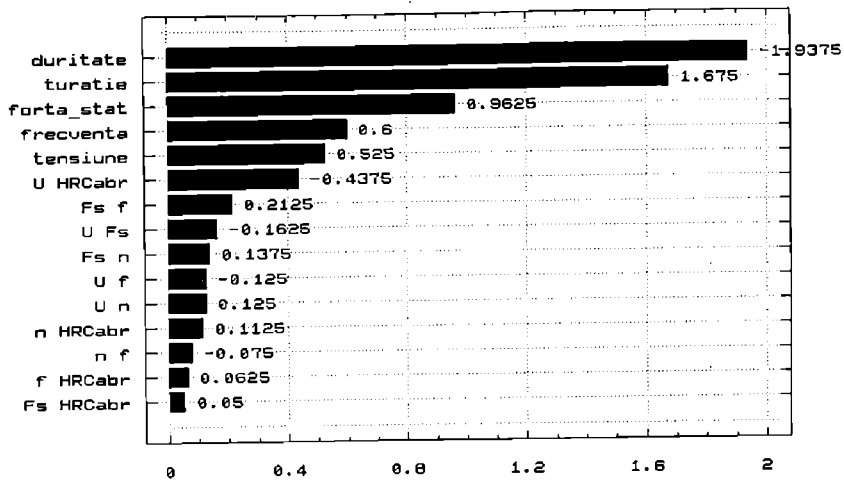


Figura 5.36. Ierarhizarea factorilor de influență asupra uzurii OT.

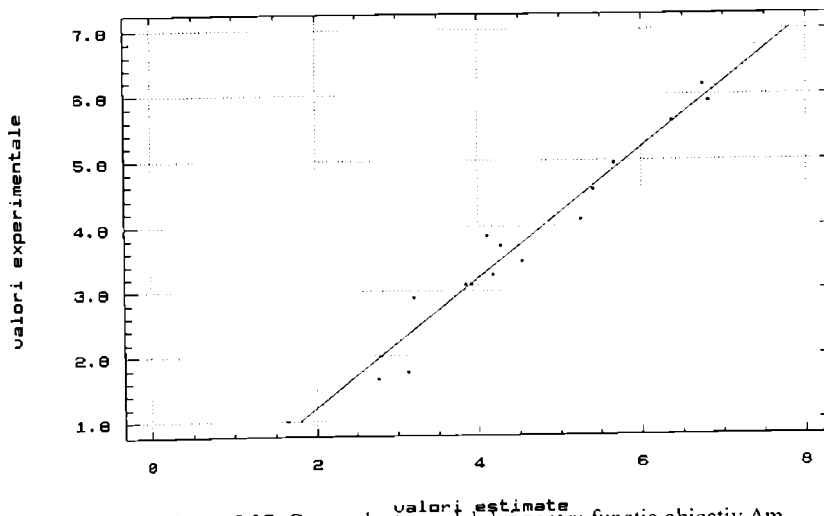


Figura 5.37. Concordanța modelului pentru funcția obiectiv Δm .

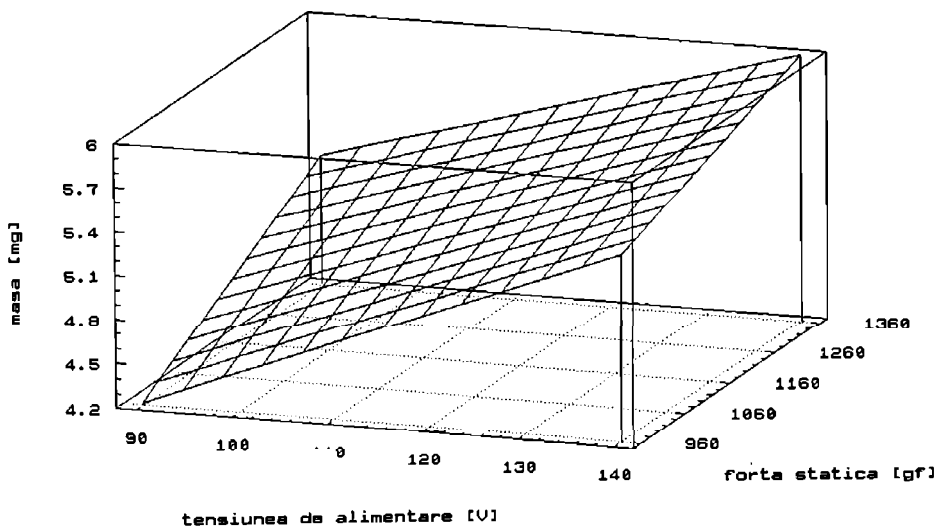


Figura 5.38. Dependența dintre uzura OT, tensiune și forța statică.

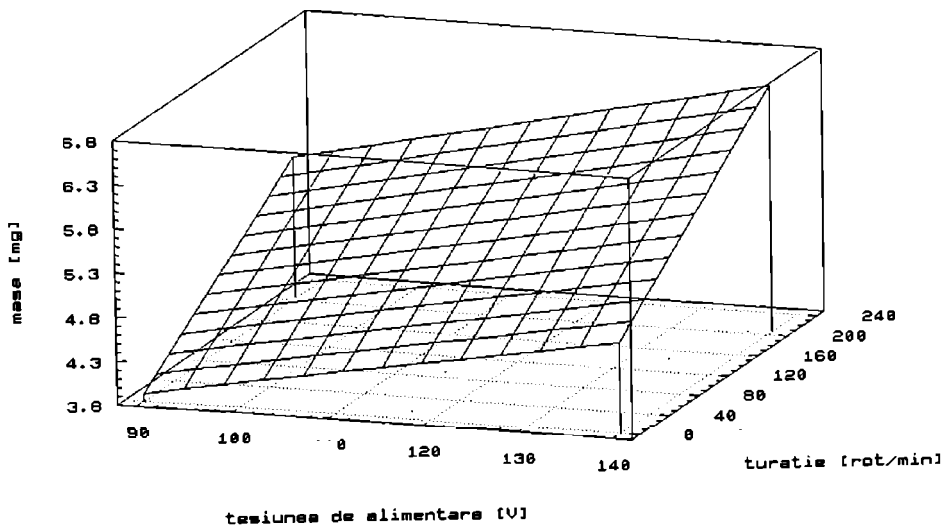


Figura 5.39. Dependența dintre uzura OT, tensiune și turația OP.

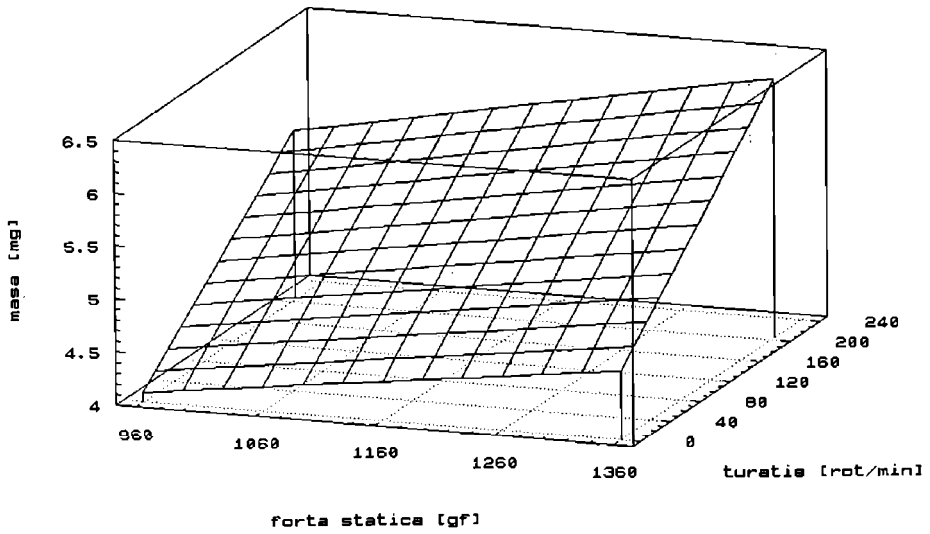


Figura 5.40. Dependența dintre uzura OT, forța statică și turația OP.

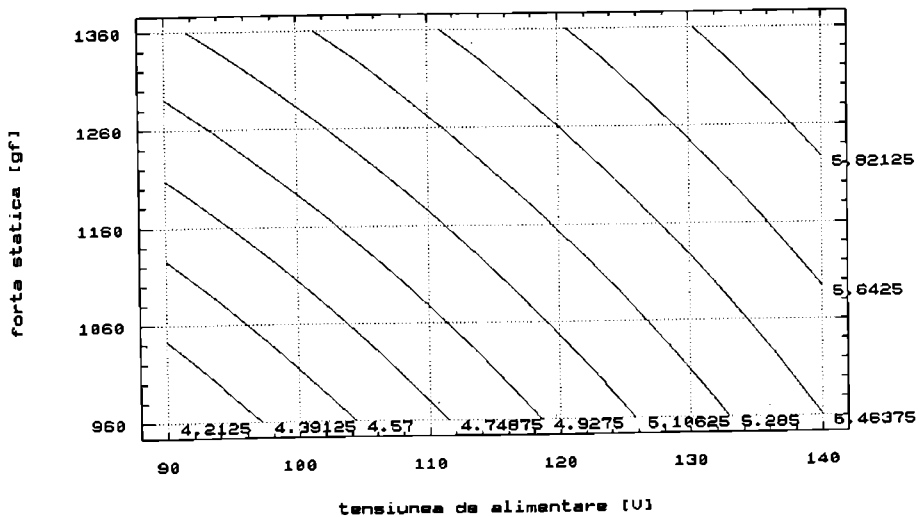


Figura 5.41. Curbe de nivel constant TENSIUNE- FORȚA STATICĂ.

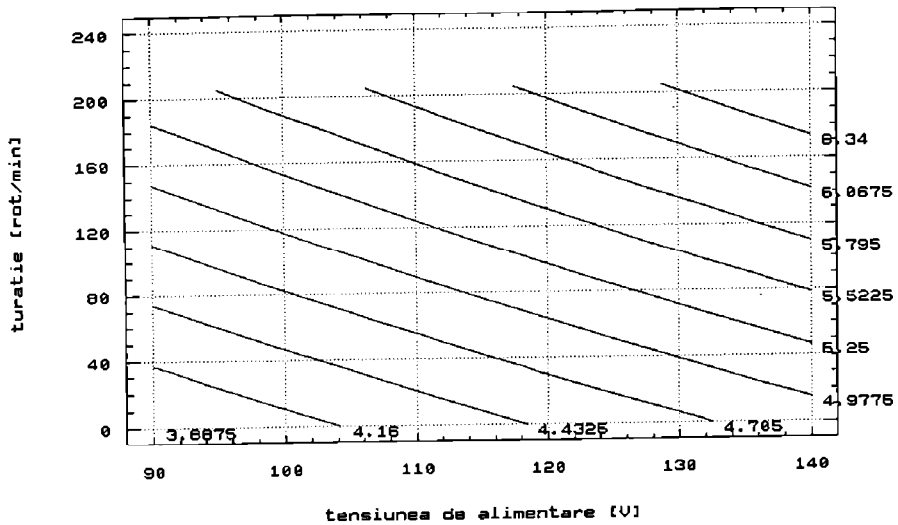


Figura 5.42. Curbe de nivel constant TENSIUNE-TURAȚIA OP.

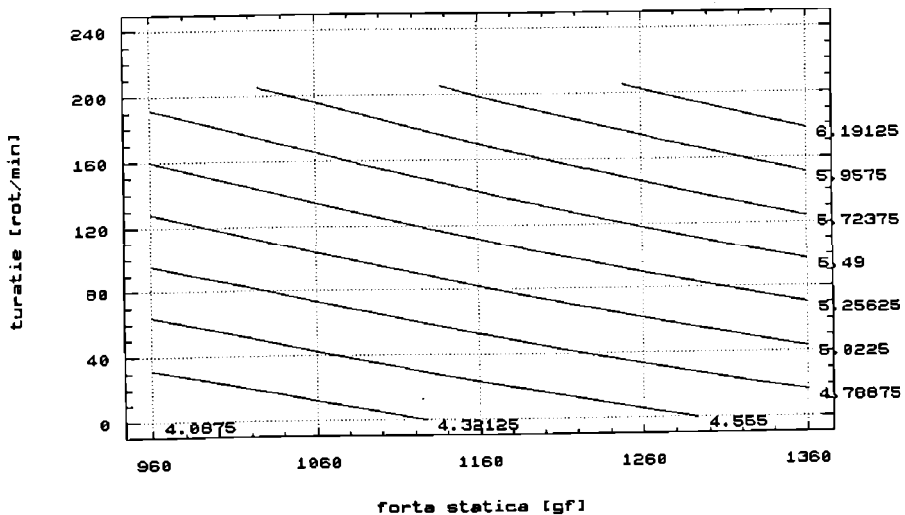


Figura 5.43. Curbe de nivel constant FORȚA STATICĂ-TURAȚIA OP.



6. CONCLUZII FINALE

Cercetările experimentale au fost efectuate pe semifabricate confecționate din sticlă, safir artificial și carburi metalice. Deoarece prelucrarea carburii metalice nu a dat rezultatele scontate, productivitate scăzută în comparație cu alte procedee, eroziunea electrică, s-a abandonat prelucrarea acestor materiale.

Datorită mulțimii și complexității aspectelor ce caracterizează prelucrarea, cercetătorii din domeniu nu s-au pus de acord în privința fenomenelor fundamentale aferente diferitelor mecanisme de prelevare de material, rămânând destule *pete albe* pe harta cunoașterii.

Prin cercetările efectuate în cadrul tezei, se aduce o modestă contribuție la lămurirea unor fenomene din spațiul de lucru la prelucrarea prin eroziunea ultrasonică, folosind și o mișcare suplimentară- *rotația mesei*. Prin elementele de calcul, grafice, formulele determinate și diagrame se caută să se dea unele informații suplimentare pentru cei care doresc să studieze prelucrarea în câmp ultrasonic. Cercetările constituie un ghid orientativ pentru introducerea în unele ramuri ale industriei a procedului de prelucrare dimensională prin eroziune abrazivo-cavitațională în câmp ultrasonic a materialelor dure și fragile.

Din conținutul tezei se evidențiază următoarele concluzii și contribuții originale ale autorului la prelucrarea materialelor fragile și dure prin eroziune abrazivo-cavitațională în câmp ultrasonic folosind rotirea piesei (*mesei*).

6.1 CONCLUZII ÎN DOMENIUL CERCETĂRILOR FUNDAMENTALE

- s-a efectuat un studiu experimental asupra prelucrabilității sticlei, element de referință în cazul prelucrării materialelor prin eroziune abrazivo-cavitațională în câmp ultrasonic și safirului artificial, determinând criteriul de prelucrabilitate K_p atașat acestui procedeu de prelucrare.

- pentru prima dată în țară, se analizează posibilitatea de prelucrare folosind și o mișcare suplimentară de rotație.
- s-au modelat bazele fizico-mecanice și fenomenologice ale prelucrării prin eroziune abrazivo-cavitațională în câmp ultrasonic folosind mișcarea de rotație a mesei, propunându-se un mecanism de prelucrare și îndepărtare a particulelor erodate din spațiul de lucru.
- se analizează rolul jucat de lichidul de lucru în procesul de prelucrare studiat, dându-se limitele prelucrării, determinându-se și definindu-se turația critică ca fiind turația de la care în zona de lucru nu se mai află lichid.
- s-a realizat și verificat un program de calcul în TURBO PASCAL pentru diferite concentratoare: cilindrice, conice și exponențiale, putându-se da informații asupra amplitudinii și sarcinii mecanice în capătul ansamblului rezonator (concentrator-sculă).
- se fac aprecieri asupra calității și randamentului energetic ridicat pentru generatoarele de înaltă frecvență cu circuite integrate și componente electronice de ultimă generație.
- se fac aprecieri asupra transductoarelor piezoceramice și modului particular de funcționare: randament ridicat pentru transferul de energie, fiabilitate în funcționare și a particularităților în funcționare.
- s-a analizat sintetizat influența factorilor perturbatori: coeficientul de amplificare a amplitudinii oscilațiilor, masa și dimensiunile sculei cât și forma concentratoarelor.
- s-au elaborat două modele matematice de calcul pentru determinarea adâncimii de pătrundere (h) și implicit a productivității prelucrării (Q).
- s-a elaborat un model de sistem tehnologic pentru prelucrare prin eroziune abrazivo-cavitațională în câmp ultrasonic cu sau fără mișcare de rotație.
- s-a evidențiat și demonstrat influența diferiților parametri tehnologici ai procesului de prelucrare asupra adâncimii de pătrundere cât și asupra uzurii masice a sculei.

6.2 CONCLUZII ÎN DOMENIUL CERCETĂRII APLICATIVE

- s-a determinat o formulă empirică pentru adâncimea de pătrundere folosind în calcul condițiile concrete în prelucrarea sticlei și a safirului artificial.
- se analizează principalii factori care influențează productivitatea prelucrării (adâncimea de pătrundere) prin două metode diferite, făcându-se o ierarhizare a acestora, funcție de influența pe care o au asupra prelucrării.

- s-a realizat un model matematic care să exprime productivitatea prelucrării în cazul prelucrării sticlei și a safirului artificial, prin exprimarea adâncimii de pătrundere.
- se cercetează factorii care influențează uzura obiectului de transfer precum și influența formei acesteia asupra formei geometrice a piesei obținute.
- cunoscându-se faptul că pierderea de masă atrage schimbarea frecvenței de oscilație, se determină o relație de calcul, pe baza unui model matematic, pentru calculul uzurii obiectului de transfer.
- s-a conceput și realizat în colectiv generatorul de înaltă frecvență pentru dotarea mașinii cu care s-au făcut experimentările.
- s-a determinat o formulă de calcul pentru determinarea turației critice.
- din cercetările efectuate se poate desprinde recomandarea ca pentru fiecare material prelucrat să se aleagă materiale abrazive mai dure iar granulație să fie aleasă funcție de operația care se va executa. Folosind modelele prezentate în teză se poate determina în mod orientativ productivitatea prelucrării.

* * *

Autorul este conștient de faptul că, prezenta lucrare nu a putut soluționa pe deplin problema fenomenologică la prelucrarea abrazivo-cavitațională în câmp ultrasonic cu masă rotativă, rezentând păreri asupra acestui procedeu. De o mare importanță pentru clarificarea unor aspecte tehnologice l-au reprezentat rezultatele experimentale cât și modelele matematice determinate. Fără nici o îndoială că, în afară de aspectele trecute în revistă, mai există și altele dar care nu au fost semnalate.


BIBLIOGRAFIE

1. ACHIMESCU, N., Sistemul de acțiune tehnologică la prelucrarea prin eroziune electrică, A IV-a CNTN, Timișoara, 3-5 noiembrie, 1983.
2. AMZA, Gh., Sisteme ultraacustice, Editura Tehnică, București, 1988.
3. AMZA, Gh., Stadiul actual al deformării plastice în câmp ultrasonic, referat, Catedra Tehnologia Materialelor, Institutul Politehnic București, 1976.
4. AMZA, Gh., Contribuții la studiul fenomenelor de deformare plastică în câmp ultrasonic, Teză de doctorat, Institutul Politehnic București, 1979.
5. AMZA, Gh., Îmbunătățirea calității suprafețelor pieselor de tipul axelor prin netezire în câmp ultrasonic, A II-a Conferință Națională de Mașini- Unelte, București, 1977.
6. AMZA, Gh., Posibilități practice de utilizare a ultrasunetelor la strunjirea metalelor, Cercetări de mecanică aplicată, nr. 3, București, 1979.
7. AMZA, Gh., DRIMER, D., Metodă și instalație pentru măsurarea amplitudinii și solicitării concentratoarelor de energie ultrasonică, Brevet de invenție, nr. 86616 din 30.10.1979.
8. AMZA, Gh., DRIMER, D., Tehnologia materialelor. Prelucrări cu ultra-sunete, Institutul Politehnic București, 1984.
9. AMZA, Gh., BARB, D., CONSTANTINESCU, F., Sisteme ultraacustice, Editura Tehnică, București, 1988.
10. ANTON, I., Cavitația, vol. I și II, Editura Academiei RSR, București, 1984 și 1985.
11. ATANASIU, N., Mărirea productivității prelucrării cu ultrasunete în condiții de suprapresiune în spațiul de lucru, Construcția de mașini, nr. 2 și 3, București, 1977.

-
- 12.ATANASIU,N., Optimizarea profilului concentratoarelor ultrasonice,Seria mecanică,Tom XLII nr4, I.P. Gh. Gheorghiu-Dej, București,1984
 - 13.ATANASIU,N., RADU,C., AMZA,Gh., Calculul și proiectarea profilului optim al concentratoarelor ultrasonice, Construcția de Mașini, București,1977
 - 14.BALTĂ,P., Sticla și aplicațiile ei actuale,Editura Enciclopedică Română, București, 1969.
 - 15.BALTĂ,P., Tehnologia sticlei, Editura didactică și Pedagogică, București, 1984.
 - 16.BĂDĂRĂU,E., GRUMĂZESCU,M., Ultraacustică fizică și tehnică, Editura Tehnică, București, 1967.
 - 17.BEGG,R.F., Ultrasound production by rattus villosissimus, Ultrasonics, no.14, 1976.
 - 18.BIKOV,V.Z., EFREMOV,A., ZAKONNIKOV,V.A., SALNIKOV, I.V., SEMIBRATOV,M.N., Tehnologia prelucrării pieselor optice, vol I și II, Editura Tehnică, București, 1977.
 - 19.BROWN,B., Progrese recente în aplicarea ultrasunetelor la procesele de prelucrare, ICDDT, București, 1966.
 - 20.BUZDUGAN,Gh., MIHĂILESCU,E., RADEȘ,M., Măsurarea vibrațiilor, Editura Academiei RSR, București,1979.
 - 21.CEDIGHIAN,S., Ferite, Editura Tehnică, București, 1966.
 - 22.CEDIGHIAN,S., Materiale magnetice, Editura Tehnică, București,1967.
 - 23.CICALĂ,E.F., Optimizarea proceselor de tăiere conturată cu laser a materialelor, Teză de doctorat, Timișoara,1997.
 - 24.CHIVERS,R.C., A multiple nomogram for ultrasonic propagation calculation, Ultrasonics, no17, 1979.
 - 25.CLEȘIU,S.R., Contribuții privind utilizarea aliajului AlCu4Mg1,5Mn în construcția sonotroadelor exponențiale, Ultraacustica 86, caietul 22, Timișoara, 1986.
 - 26.DĂRĂBANȚ,A., IORGA,I., CIODARU,M., Măsurarea zgomotului și vibrațiilor în tehnică, Editura Tehnică, București,1983.
 - 27.DIMITRIE,E.,NICOLAU,P.,TEODORU,V., Ultrasunetele- posibilități de utilizare în industria alimentară și biologie, Editura Ceres, București, 1990.
 - 28.DOLGA,V., Construcția traductoarelor și senzorilor, Litografia UTT, Timișoara, 1993.

-
29. DRĂGAN, O., IANCU, C., AMZA, Gh., DRIMER, D., ISARIE, I., *Ultrasunete de mari energii*, Editura Academiei RSR, București, 1983.
 30. DRIMER, D., AMZA, Gh., *Prelucrarea cu ultrasunete*, Lito. Institutul Politehnic București, 1984.
 31. DRIMER, D., AMZA, Gh., *Cercetări privind prelucrarea suprafețelor materialelor metalice cu ajutorul energiei ultrasonice*, Construcția de mașini, nr2 și 3, București, 1977.
 32. DRIMER, D., SAVII, Gh., AMZA, Gh., ICLĂNZAN, T., ATANASIU, N., SONEA, I., CSAPO, Gh., CONDURĂTEANU, E., *Utilizarea ultrasunetelor în prelucrarea materialelor*, Lito Institutul Politehnic București, 1975.
 33. DUMITRAȘ, C., OPRAN, C., *Prelucrarea materialelor compozite, ceramice și minerale*, Editura Tehnică, București, 1994.
 34. FISCHER, G., *Prelucrarea prin ultrasunete. Mașini-unelte echipate cu un sistem de aspirație prin pompă de vid*, ICDT, București, 1966.
 35. FRIDMAN, V.M., KLOPOVSKZ, V.A., *The low liquid pressure acoustic hydrodynamic transducer and its use in spraying processes*, *Ultrasonics*, no14, 1976.
 36. GAVRILAȘ, I., DRĂGUȚ, E., VIERU, A., BONOIU, V., *Tehnologii de prelucrare cu scule din materiale dure și extradure*, Editura Tehnică, București, 1977.
 37. GAVRILAȘ, I., MARINESCU, N.I., *Prelucrări neconvenționale în construcția de mașini*, vol I, Editura Tehnică, București, 1991.
 38. GAVRILĂ, I., *Ultrasunerea acumulatorilor electrice*, Editura Științifică și Tehnică, București, 1985.
 39. GRUMĂZESCU, M., *Ultrasunetul în acțiune*, Editura Științifică, București, 1964.
 40. HERBERTZ, J., *Measurement of ultrasonic power on cylindrical rods*, *Ultrasonics*, no14, 1976.
 41. ICLĂNZAN, T., *Cercetări asupra parametrilor constructivi și funcționali la mașinile de prelucrat cu ultrasunete*, Teză de doctorat, Institutul Politehnic Timișoara, 1975.
 42. KAZANTSEV, V.F., MECHETNER, B.H., ROZENBERG, L.D., *Căile pentru ridicarea productivității și a preciziei de prelucrare cu ultrasunete*, ICDT, București, 1966.

-
43. KOMARAI AH, M., NARASIMHA REDDY, P., A study on the influence of workpiece properties in ultrasonic machining, *International Journal of Machine Tools Manufacture*, vol.33, No.3, pag 495-505, 1993
 44. KOPS, L., O cercetare asupra influenței uzurii pudrei abrazive asupra indicilor tehnologici ale prelucrării cu ultrasunete, IC DT, București, 1966.
 45. MARINESCU, I. D., *Diamantul și aplicațiile lui*, Editura Tehnică, București, 1985.
 46. MARINESCU, N. I., *Prelucrări cu ultrasunete*, Editura Tehnică, București, 1986.
 47. MATRA, I., SCHEIANU, D., Aparat pentru măsurarea amplitudinii vibrațiilor ultrasonice, *Ultraacustica* 86, caietul 22, Timișoara, 1986.
 48. MĂLAIMARE, G., GUBENCU, D., Factorii de influență și funcțiile obiectiv la modelarea prelucrării abrazive în câmp ultrasonic, *Zilele academice Timișene*, Ediția V, Timișoara, 1997.
 49. MĂLAIMARE, G., GUBENCU, D., Modelarea prin experiment factorial a prelucrării cu unde ultrasonice, *Zilele academice Timișene*, Ediția V, Timișoara, 1997.
 50. MĂLAIMARE, G., Considerații asupra ierarhizării prin bilanț aleator a factorilor de influență la prelucrarea cu unde ultrasonice, *Zilele academice Timișene*, Ediția V, Timișoara, 1997.
 51. MĂLAIMARE, G., MARCUȘANU, A., Considerații privind influența forței de apăsare a sculei asupra productivității prelucrării cu unde ultrasonice, *Zilele academice Timișene*, Ediția V, Timișoara, 1997.
 52. MĂLAIMARE, G., NANU, A., MĂRCUȘANU, A., Considerații asupra influenței rotirii piesei asupra productivității prelucrării cu unde ultrasonice, *Zilele academice Timișene*, Ediția V, Timișoara, 1997.
 53. MNERIE, D., Contribuții la optimizarea utilizării materialelor piezoceramice în construcția traductoarelor de forță, *Teză de doctorat*, Timișoara, 1997.
 54. MURAYAMA, N., NAKAMURA, K., OBARA, H., SEGOWA, M., The strong piezoelectricity in polyvinylidene fluoride (PVDF), *Ultrasonics*, no14, 1976.
 55. NAGY, I. I., *Ultrasunetele și utilizarea lor*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1982.

-
56. NANU, A., Tehnologia materialelor, Editura Didactică și Pedagogică, București, edițiile 1972, 1977, 1983.
 57. NANU, A., NANU, S., PAULESCU, Gh., Prelucrarea prin eroziune abrazivo-cavitațională în câmp ultrasonic, Manualul inginerului mecanic, vol III, Editura Tehnică, București, 1972.
 58. NEPPIRAS, F. A., Prelucrarea și formarea prin ultrasunete, ICDT, București, 1966.
 59. NEPPIRAS, F. A., High-power ultrasonics general, Ultrasonics, no 4 și 13, 1975.
 60. NICA, Al., Ceramica tehnică, Editura Tehnică, București, 1988.
 61. NICHICI, Al., POPOVICI, V., NICA, M., ACHIMESCU, N., POPA, H., PAULESCU, Gh., Prelucrarea prin eroziune în construcția de mașini, Editura Facla, Timișoara, 1983.
 62. NICHICI, Al., CICALĂ, E. F., MEE, R., Prelucrarea datelor experimentale, Lito Institutul Politehnic Timișoara, 1996.
 63. NICHICI, Al., PAULESCU, Gh., POTROVIȚĂ, N., Contribuții la studiul rugozității suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică, A IV-a CNTN, Timișoara, 1983.
 64. PAULESCU, Gh., Studiul concentratoarelor catenoidale la prelucrarea prin eroziune ultrasonică, Ultraacustica 86, caietul 22, Timișoara, 1986.
 65. PAULESCU, Gh., NANU, A., Unele cercetări privind calitatea suprafețelor prelucrate prin eroziune ultrasonică. Ultraacustica 86, caietul 22, Timișoara, 1986.
 66. PAULESCU, Gh., Studiul formei concentratoarelor ultrasonice asupra parametrilor acustici și tehnologici la prelucrarea prin eroziune ultrasonică, Tehnologii Neconvenționale- simpozion, Timișoara, 1986.
 67. PAULESCU, Gh., Aspecte ale studiului fenomenului de uzură și a preciziei dimensionale la prelucrarea materialelor fragile prin eroziune ultrasonică, A III-a CNTN seria D, Sibiu, 1982.
 68. PAULESCU, Gh., Contribuții la optimizarea tehnologiei de prelucrare dimensională cu unde ultrasonice a materialelor fragile și dure, Teză de doctorat, Timișoara, 1987.
 69. PEI, Z. J., FERREIRA, P. M., KAPOOR, S. G., HASELKORN, M., Rotary ultrasonics machining for face milling of ceramics, International Journal of Machine Tools Manufacture, vol. 35, No. 7, pag 1033-1039, 1995.

-
70. PENTLAND, W., Îmbunătățirea vitezelor de prelucrare cu ultrasunete-câteva studii privind posibilitățile de aplicare-, ICDT, București, 1966.
71. POHLMAN, R.G., WERDER, B., The ultrasonics cleaning process, Ultrasonics, no6, 1972.
72. POHLMAN, R.G., HEISLER, K., CICHOS, M., Powdering aluminium and aluminium alloys by ultrasound, Ultrasonics, no1 și 12, 1974.
73. RUSISKI, L.Z., Prelucrarea matematică a datelor experimentale, Editura Tehnică, București, 1974.
74. SAVII, Gh., ICLĂNZAN, T., MLADIN, E., EGLER, I., Studiul experimental al blocurilor ultraacustice destinate instalațiilor tehnologice cu ultrasunete Buletin Științific și Tehnic, IPTV Timișoara, seria mecanică, Tom18(32), 1973.
75. SCHEFFEL, M., ȘTIUCĂ, P., Dispozitive cu ultrasunete, vol I și II, Editura Tehnică, București, 1989.
76. SHOH, A., Welding of thermoplastics by ultrasound, Ultrasonics, no14, 1976.
77. TALOI, D., Optimizarea proceselor tehnologice, Editura Academiei RSR, București, 1987.
78. VAINSTOK, I.S., Ultrasunetele și utilizarea lor în construcția de mașini, Editura Tehnică, București, 1959.
79. VUCU, I., Cercetări asupra prelucrării dimensionale ultrasonice cu suspensie abrazivă a unor ferite, Teză de doctorat, Timișoara, 1977.
80. ZHIXINN, J., JIANHUA, Z., XING, A., Study on a new kind of combined machining technology of ultrasonic machining and electrical discharge machining, International Journal of Machine Tools Manufacture, vol.37, No.2, pag 193-201, 1997.
81. ZHANG, D.Y., FENG, X.J., WANG, L.J., CHEN, D.C., Study on the drill skidding motion in ultrasonic vibration microdrilling, International Journal of Machine Tools Manufacture, vol.34, No.6, pag 847-853, 1994.
82. * * * Găurirea ultrasonică cu scule impregnate cu diamant, ICDT, București, 1966.
83. * * * Determinarea rugozității suprafețelor, ICDT, București, 1970.
84. * * * Dicționarul explicativ al limbii române, Editura Academiei RSR, București, 1975.
85. * * * Programul de lucru STATGRAPHIC, USA, 1995.

ANEXE TEZA DE DOCTORAT

Nr. ctr	Tensiunea alimentare [V]	Tipul de lucru [sec]	Turajia 0 rot/min		Turajia 80 rot/min		Turajia 140 rot/min		Turajia 205 rot/min	
			HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	80	7x15sec timp activ 8x15sec timp pauză	0,41	0,43		0,72				
2	90		0,47	0,52		0,85	0,95	0,98	1,18	1,22
3	100		0,50	0,57		0,91				
4	110		0,58	0,63		1,00	1,11	1,15	1,40	1,43
5	120		0,62	0,68		1,10				
6	130		0,67	0,73		1,18	1,41	1,47	1,72	1,74
7	140		0,74	0,79		1,27				
8	150		0,76	0,84		1,38	1,60	1,65	1,90	1,96
1	80	3x30sec timp activ 4x30sec timp pauză	0,38	0,41		0,68				
2	90		0,43	0,49		0,77	0,87	0,90	1,07	1,11
3	100		0,45	0,54		0,90				
4	110		0,48	0,63		0,98	1,10	1,14	1,35	1,38
5	120		0,51	0,66		1,05				
6	130		0,65	0,72		1,16	1,30	1,32	1,45	1,48
7	140		0,70	0,77		1,20				
8	150		0,74	0,82		1,25	1,51	1,55	1,74	1,78
1	80	1x60sec timp activ 1x30sec timp pauză	0,34	0,38						
2	90		0,39	0,44						
3	100		0,43	0,51						
4	110		0,46	0,57						
5	120		0,49	0,62						
6	130		0,52	0,68						
7	140		0,54	0,71						
8	150		0,47	0,68						

Carbură de bor granulația 4 ; forța statică 560gf ;

Nr. crt	Tensiunea alimentare [V]	Tipul de lucru [sec]	Turajia 0 rot/min		Turajia 80 rot/min		Turajia 140 rot/min		Turajia 205 rot/min	
			HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	80	7x15sec timp activ 8x15sec timp pasiv	0,49	0,53		0,79				
2	90		0,59	0,64		0,92		1,10		
3	100		0,80	0,83		1,15				
4	110		0,91	0,96		1,27		1,38		
5	120		1,08	1,15		1,43				
6	130		1,34	1,32		1,68		1,70		
7	140		1,49	1,45		1,84				
8	150		1,67	1,63		1,98		2,07		
1	80	4x30sec timp activ 3x30sec timp pasiv	0,48	0,51		0,72				
2	90		0,53	0,63		0,88		1,02		
3	100		0,75	0,80		1,07				
4	110		0,87	0,96		1,20		1,37		
5	120		0,98	1,08		1,35				
6	130		1,18	1,17		1,59		1,65		
7	140		1,32	1,31		1,74				
8	150		1,56	1,57		1,86		1,96		
1	80	1x60sec timp activ 1x30sec timp pasiv	0,42	0,50						
2	90		0,51	0,61						
3	100		0,71	0,78						
4	110		0,83	0,91						
5	120		0,92	1,04						
6	130		1,12	1,15						
7	140		1,29	1,32						
8	150		1,48	1,53						

Carbură de bor granulația 4 ; forța statică 960gf ;

Nr. ctr	Tensiunea alimentare [V]	Tipul de lucru [sec]	Turația 0 rot/min		Turația 80 rot/min		Turația 140 rot/min		Turația 205 rot/min	
			HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	80	7x15sec timp activă 8x15sec timp pasiv	0,56	0,62		0,88				
2	90		0,68	0,78	0,95	0,97	1,20	1,24	1,42	1,46
3	100		0,87	0,97		1,20				
4	110		1,03	1,13	1,30	1,33	1,57	1,61	1,81	1,82
5	120		1,19	1,30		1,50				
6	130		1,44	1,53	1,71	1,74	1,85	1,87	1,99	2,02
7	140		1,58	1,68		1,90				
8	150		1,82	1,96	2,04	2,07	2,28	2,31	2,48	2,51
1	80	3x30sec timp activă 4x30sec timp pasiv	0,51	0,57		0,80				
2	90		0,65	0,71	0,86	0,88	1,08	1,11	1,34	1,38
3	100		0,82	0,88		1,11				
4	110		0,98	1,04	1,22	1,25	1,40	1,42	1,65	1,67
5	120		1,15	1,22		1,43				
6	130		1,38	1,36	1,64	1,67	1,71	1,74	1,87	1,90
7	140		1,49	1,60		1,82				
8	150		1,75	1,86	1,96	1,98	2,01	2,07	2,30	2,34
1	80	1x60sec timp activă	0,48	0,52						
2	90		0,57	0,65						
3	100		0,78	0,86						
4	110		0,94	1,02						
5	120		1,08	1,19						
6	130		1,27	1,32						
7	140		1,39	1,46						
8	150		1,65	1,75						

Carbură de bor granulația 4 ; forța statică 1160gf ;

Nr. crt	Tenstunea alimentare [V]	Tipm de lucru [sec]	Turajia 0 rot/min		Turajia 80 rot/min		Turajia 140 rot/min		Turajia 205 rot/min	
			HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	80	8x15sec timp activ 7x15sec timp pauza	0,38	0,46		0,53				
2	90		0,52	0,61	0,70	0,72	1,15	1,18	1,40	1,48
3	100		0,69	0,77		0,96				
4	110		1,01	1,13	1,20	1,24	1,53	1,57	1,88	1,92
5	120		1,20	1,31		1,38				
6	130		1,60	1,73	1,81	1,85	2,00	2,06	2,53	2,66
7	140		1,91	2,04		2,18				
8	150		2,14	2,26	2,34	2,37	2,80	2,53	2,90	2,98
1	80	4x30sec timp activ 3x30sec timp pauza	0,31	0,36		0,48				
2	90		0,34	0,42	0,65	0,67	0,98	1,00	1,37	1,40
3	100		0,56	0,63		0,91				
4	110		0,82	0,92	1,15	1,18	1,45	1,48	1,75	1,79
5	120		1,12	1,19		1,33				
6	130		1,58	1,70	1,74	1,77	2,04	2,01	2,40	1,41
7	140		1,78	1,86		2,12				
8	150		2,01	2,15	2,27	2,31	2,73	2,45	3,08	3,11
1	80	1x60sec timp activ 1x30sec timp pauza	0,28	0,32						
2	90		0,33	0,40						
3	100		0,5	0,61						
4	110		0,76	0,84						
5	120		1,03	1,19						
6	130		1,35	1,44						
7	140		1,62	1,71						
8	150		1,93	2,06						

Carbură de bor granulația 4; forța statică 1370gf;

Nr. crt	Tensiunea alimentare [V]	Tipul de lucru [sec]	Turajia 0 rot/min		Turajia 80 rot/min		Turajia 140 rot/min		Turajia 205 rot/min	
			HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	80	7x15sec timp activ 8x15sec timp pauza	0,50	0,56	0,78	0,83				
2	90		0,56	0,64	0,91	0,98	1,06	1,09	1,34	1,36
3	100		0,65	0,73	1,06	1,13				
4	110		0,80	0,89	1,15	1,22	1,30	1,35	1,58	1,74
5	120		0,98	1,09	1,26	1,34				
6	130		1,07	1,19	1,39	1,45	1,60	1,67	1,81	1,98
7	140		1,19	1,37	1,60	1,66				
8	150		1,38	1,49	1,80	1,87	2,03	2,06	2,18	2,31
1	80	4x30sec timp activ 3x30sec timp pauza	0,47	0,53	0,68	0,74				
2	90		0,54	0,61	0,82	0,90	0,98	1,01	1,22	1,24
3	100		0,63	0,72	0,96	1,02				
4	110		0,77	0,84	1,09	1,16	1,20	1,22	1,50	1,53
5	120		0,95	1,01	1,21	1,28				
6	130		1,03	1,15	1,34	1,40	1,44	1,46	1,66	1,67
7	140		1,14	1,23	1,48	1,56				
8	150		1,35	1,43	1,67	1,74	1,81	1,85	2,00	2,02
1	80	1x60sec timp activ 1x30sec timp pauza	0,41	0,45						
2	90		0,50	0,53						
3	100		0,59	0,64						
4	110		0,71	0,78						
5	120		0,92	0,99						
6	130		0,99	1,07						
7	140		1,08	1,15						
8	150		1,26	1,33						

Carbură de bor granulația 5 ; forța statică 560gf ;

Nr. crtr	Tensiunea alimentare [V]	Tipm de lucru [sec]	Turația 0 rot/min		Turația 80 rot/min		Turația 140 rot/min		Turația 205 rot/min	
			HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	80	7x15sec timp activa	0,56	0,63	0,88	0,95				
2	90		0,65	0,72	0,97	1,06	1,15	1,18	1,44	1,49
3	100		0,86	0,95	1,14	1,25				
4	110		0,98	1,06	1,28	1,34	1,52	1,55	1,77	1,97
5	120	8x15sec timp activa	1,11	1,28	1,47	1,53				
6	130		1,37	1,43	1,60	1,67	1,82	1,85	1,98	2,15
7	140		1,53	1,64	1,82	1,88				
8	150		1,88	1,86	2,11	2,17	2,19	2,22	2,50	2,53
1	80	4x30sec timp activa	0,53	0,60	0,80	0,86				
2	90		0,62	0,72	0,92	0,98	1,08	1,11	1,37	1,40
3	100		0,81	0,94	1,11	1,18				
4	110		0,95	1,01	1,22	1,27	1,43	1,46	1,16	1,64
5	120	1x30sec timp activa	1,03	1,14	1,39	1,46				
6	130		1,26	1,35	1,61	1,68	1,73	1,76	1,89	1,92
7	140		1,47	1,59	1,85	1,92				
8	150		1,79	1,86	2,02	2,08	2,15	2,19	2,31	2,34
1	80	1x60sec timp activa	0,45	0,53						
2	90		0,52	0,64						
3	100		0,73	0,87						
4	110		0,85	0,98						
5	120	1x60sec timp activa	0,98	1,04						
6	130		1,17	1,25						
7	140		1,32	1,40						
8	150		1,68	1,75						

Carbură de bot granulația 5 ; forța statică 960gf ;

Nr. ctr	Tensiunea alimentare [V]	Tipm de lucru [sec]	Turația 0 rot/min		Turația 80 rot/min		Turația 140 rot/min		Turația 205 rot/min	
			HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	80	7x15sec timp activă	0,61	0,69		0,98				
2	90		0,75	0,82	0,97	1,09		1,28		1,57
3	100	8x15sec timp activă	0,93	0,98		1,28				
4	110		1,08	1,14	1,32	1,40		1,58		1,90
5	120	7x15sec timp activă	1,24	1,33		1,57				
6	130		1,51	1,55	1,75	1,82		1,97		2,27
7	140	8x15sec timp activă	1,68	1,76		2,01				
8	150		1,92	2,04	2,11	2,31		2,41		2,73
1	80	4x30sec timp activă	0,59	0,62		0,88				
2	90		0,73	0,80	0,92	0,98		1,19		1,43
3	100	3x30sec timp activă	0,89	0,97		1,20				
4	110		1,05	1,15	1,20	1,29		1,53		1,78
5	120	4x30sec timp activă	1,18	1,26		1,48				
6	130		1,46	1,57	1,61	1,70		1,85		1,96
7	140	1x60sec timp activă	1,53	1,62		1,96				
8	150		1,89	1,96	2,01	2,18		2,36		2,47
1	80	1x30sec timp activă	0,52	0,59						
2	90		0,69	0,74						
3	100	1x30sec timp activă	0,81	0,88						
4	110		0,98	1,05						
5	120	1x30sec timp activă	1,15	1,21						
6	130		1,33	1,37						
7	140	1x30sec timp activă	1,49	1,56						
8	150		1,78	1,83						

Carbură de bot granulația 5 ; forța statică 11160gf ;

Nr. entr	Tensiunea alimentare [V]	Tipul de lucru [sec]	Turația 0 rot/min		Turația 80 rot/min		Turația 140 rot/min		Turația 205 rot/min	
			HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	80		0,64	0,70		1,07				
2	90		0,92	0,98	1,19	1,22	1,30	1,35	1,63	1,68
3	100		1,13	1,20		1,38				
4	110		1,24	1,34	1,50	1,54	1,63	1,68	1,96	1,98
5	120		1,42	1,51		1,73				
6	130		1,68	1,76	1,92	1,94	2,07	2,17	2,28	2,75
7	140		1,93	2,02		2,24				
8	150		2,37	2,46	2,65	2,68	2,60	2,64	2,90	3,06
1	80		0,58	0,62		0,94				
2	90		0,87	0,83	1,00	1,03	1,32	1,36	1,47	1,49
3	100		1,08	1,14		1,24				
4	110		1,19	1,25	1,34	1,36	1,64	1,67	1,78	1,81
5	120		1,37	1,42		1,58				
6	130		1,61	1,66	1,82	1,84	2,89	1,92	2,18	2,22
7	140		1,85	1,91		2,03				
8	150		2,23	2,31	2,15	2,20	2,45	2,49	2,77	2,80
1	80		0,51	0,57						
2	90		0,83	0,89						
3	100		1,02	1,08						
4	110		1,16	1,21						
5	120		1,34	1,40						
6	130		1,56	1,62						
7	140		1,78	1,83						
8	150		2,14	2,21						

Carbură de bor granulația 5 ; forța statică 1370gf ;

Nr. crtr	Tensiunea alimentarea [V]	Tipm de lucru [sec]	Turația 0 rot/min		Turația 80 rot/min		Turația 140 rot/min		Turația 205 rot/min	
			HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	80	7x15sec timp activ 8x15sec timp pauză	0,45	0,48						
2	90		0,50	0,56	0,78		0,99			1,32
3	100		0,62	0,68						
4	110		0,84	1,08				1,28		1,64
5	120		0,94	1,01						
6	130		1,06	1,14	1,32			1,57		1,92
7	140		1,18	1,26						
8	150		1,34	1,40	1,68			1,93		2,26
1	80	4x30sec timp activ 3x30sec timp pauză	0,38	0,47						
2	90		0,46	0,52	0,73		0,94			1,21
3	100		0,57	0,63						
4	110		0,75	0,80	1,01			1,20		1,48
5	120		0,90	0,96						
6	130		1,03	1,08	1,23			1,51		1,83
7	140		1,12	1,19						
8	150		1,24	1,31	1,59			1,86		2,06
1	80	1x60sec timp activ 1x30sec timp pauză								
2	90									
3	100									
4	110									
5	120									
6	130									
7	140									
8	150									

Carbură de siliciu granulația 6 ; forța statică 560gf ;

Nr. crtr	Tensiunea alimentare [V]	Tipul de lucru [sec]	Turajia 0 rot/min		Turajia 80 rot/min		Turajia 140 rot/min		Turajia 205 rot/min		
			HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	80	7x15sec timp activ 8x15sec timp pauză	0,53	0,58							
2	90		0,61	0,70	0,90	0,93	1,08	1,12	1,30	1,46	
3	100		0,82	0,89							
4	110		0,93	1,00	1,24	1,26	1,43	1,45	1,62	1,82	
5	120		1,14	1,22							
6	130		1,30	1,39	1,53	1,57	1,74	1,76	1,96	2,08	
7	140		1,46	1,56							
8	150		1,75	1,79	2,02	2,05	2,10	2,13	2,33	2,36	
1	80	4x30sec timp activ 3x30sec timp pauză	0,49	0,54							
2	90		0,60	0,68	0,80	0,84	0,96	0,98	1,18	1,20	
3	100		0,77	0,84							
4	110		0,89	0,95	1,14	1,17	1,31	1,34	1,46	1,49	
5	120		1,06	1,13							
6	130		1,25	1,30	1,53	1,56	1,62	1,65	1,86	1,85	
7	140		1,43	1,48							
8	150		1,67	1,74	1,90	1,95	2,00	2,03	2,15	2,18	
1	80	1x60sec timp activ 1x30sec timp pauză									
2	90										
3	100										
4	110										
5	120										
6	130										
7	140										
8	150										

Carbură de siliciu granulația 6 ; forța statică 960gf ;

Nr. crt	Tensiunea alimentare [V]	Tipul de lucru [sec]	Turația 0 rot/min		Turația 80 rot/min		Turația 140 rot/min		Turația 205 rot/min	
			HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	80	7x15sec timp activ	0,60	0,65						
2	90		0,76	0,81	0,98	1,02		1,20		1,47
3	100		0,88	0,96						
4	110	8x15sec timp activ	1,02	1,09	1,30	1,35		1,53		1,83
5	120		1,22	1,28						
6	130		1,33	1,44	1,71	1,76		1,85		2,16
7	140	7x15sec timp activ	1,66	1,67						
8	150		1,91	1,98	2,13	2,19		2,28		2,40
1	80		0,51	0,58						
2	90	4x30sec timp activ	0,64	0,73	0,90	0,94		1,05		1,33
3	100		0,84	0,90						
4	110		0,93	1,00	1,25	1,27		1,42		1,67
5	120	1x60sec timp activ	1,15	1,21						
6	130		1,38	1,45	1,57	1,62		1,78		1,88
7	140		1,56	1,62						
8	150		1,79	1,95	1,98		2,11		2,30	
1	80	1x60sec timp activ								
2	90									
3	100									
4	110									
5	120									
6	130									
7	140									
8	150									

Carbură de siliciu granulată 6 ; forța statică 1160gf ;

Nr. crt	Tensiunea alimentare [V]	Tipm de lucru [sec]	Turajia 0 rot/min		Turajia 80 rot/min		Turajia 140 rot/min		Turajia 205 rot/min	
			HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	80	8x15sec timp activ 7x15sec timp pauză	0,60	0,65		0,98				
2	90		0,91	0,96		1,17	1,00	1,04	1,39	1,42
3	100		1,04	1,13		1,34				
4	110		1,16	1,26		1,48	1,52	1,55	1,85	1,87
5	120		1,36	1,43		1,64				
6	130		1,58	1,66		1,87	2,00	2,03	2,30	2,15
7	140		1,76	1,84		2,03				
8	150		2,11	2,17		2,41	2,67	2,70	2,81	2,87
1	80	4x30sec timp activ 3x30sec timp pauză	0,52	0,60		0,90				
2	90		0,83	0,92		1,10				
3	100		0,98	1,06		1,27				
4	110		1,12	1,18		1,42				
5	120		1,23	1,29		1,53				
6	130		1,46	1,54		1,78				
7	140		1,67	1,72		1,94				
8	150		1,85	1,94		2,27				
1	80	1x60sec timp activ 1x30sec timp pauză								
2	90									
3	100									
4	110									
5	120									
6	130									
7	140									
8	150									

Carbură de siliciu granulată 6 ; forța statică 1370gf ;

Nr. crt	Tensiunea alimentare [V]	Tipul de lucru [sec]	Turația 0 rot/min		Turația 80 rot/min		Turația 140 rot/min		Turația 205 rot/min	
			HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	80	8x15sec timp activ 7x15sec timp pauza	0,28	0,31						
2	90		0,32	0,37	0,58	0,62	0,84	0,87	0,98	1,01
3	100		0,41	0,45						
4	110		0,50	0,56	0,90	0,94	1,00	1,03	1,33	1,36
5	120		0,56	0,62						
6	130		0,64	0,70	1,08	1,11	1,34	1,38	1,65	1,67
7	140		0,70	0,76						
8	150		0,68	0,78	1,22	1,26	1,53	1,59	1,80	1,85
1	80	4x30sec timp activ 3x30sec timp pauza	0,25	0,27						
2	90		0,29	0,34	0,47	0,50	0,80	0,83	0,94	0,98
3	100		0,38	0,43						
4	110		0,47	0,52	0,85	0,88	0,92	0,96	1,23	1,27
5	120		0,53	0,58						
6	130		0,60	0,65	1,00	1,04	1,20	1,25	1,37	1,41
7	140		0,67	0,71						
8	150		0,68	0,73	1,18	1,21	1,40	1,44	1,66	1,71
1	80	1x60sec timp activ 1x30sec timp pauza								
2	90									
3	100									
4	110									
5	120									
6	130									
7	140									
8	150									

Carbură de siliciu granulația 8 ; forța statică 560gf ;

Nr. crtr	Tensiunea alimentare [V]	Tipm de lucru [sec]	Turajia 0 rot/min		Turajia 80 rot/min		Turajia 140 rot/min		Turajia 205 rot/min	
			HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	80	8x15sec timp activ 7x15sec timp pauza	0,37	0,41						
2	90		0,52	0,58		0,84		1,05		1,17
3	100		0,64	0,70		1,21		1,37		1,58
4	110		0,75	0,82						
5	120		0,87	0,95		1,37		1,66		1,86
6	130		1,02	1,08						
7	140		1,15	0,21		1,82		2,00		2,05
8	150		0,32	1,36						
1	80	4x30sec timp activ 3x30sec timp pauza	0,31	0,37						
2	90		0,48	0,53		0,71		0,96		1,02
3	100		0,57	0,64						
4	110		0,70	0,75		1,04		1,28		1,48
5	120		0,82	0,88						
6	130		0,93	0,99		1,28		1,55		1,79
7	140		1,08	1,13						
8	150		1,19	1,24		1,75		1,87		1,93
1	80	1x60sec timp activ 1x30sec timp pauza								
2	90									
3	100									
4	110									
5	120									
6	130									
7	140									
8	150									

Carbură de siliciu granulația 8 ; forța statică 960gf ;

Nr. crt	Tensiunea alimentare [V]	Tipm de lucru [sec]	Turația 0 rot/min		Turația 80 rot/min		Turația 140 rot/min		Turația 205 rot/min	
			HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	80		0,53	0,58						
2	90		0,67	0,71	0,87	0,90	1,14	1,18	1,30	1,32
3	100		0,78	0,84						
4	110		0,87	0,93	1,20	1,22	1,39	1,42	1,68	1,72
5	120		0,95	1,03						
6	130		1,07	1,16	1,41	1,43	1,71	1,75	1,92	1,96
7	140		1,20	1,27						
8	150		1,42	1,48	1,95	1,98	2,13	2,17	2,39	2,43
1	80		0,47	0,54						
2	90		0,62	0,67	0,80	0,84	1,10	1,12	1,25	1,26
3	100		0,70	0,78						
4	110		0,80	0,86	1,12	1,15	1,31	1,35	1,62	1,65
5	120		0,89	0,95						
6	130		1,07	1,11	1,33	1,36	1,65	1,68	1,87	1,90
7	140		1,15	1,21						
8	150		1,32	1,40	1,81	1,86	2,01	2,07	2,33	2,36
1	80									
2	90									
3	100									
4	110									
5	120									
6	130									
7	140									
8	150									

Carbură de siliciu granulația 8 ; forța statică 1160gf ;

Nr. ctr	Tensiunea alimentare [V]	Tipul de lucru [sec]	Turația 0 rot/min		Turația 80 rot/min		Turația 140 rot/min		Turația 205 rot/min	
			HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	80	7x15sec timp activ 8x15sec timp pauză	0,46	0,50						
2	90		0,51	0,57	0,64	0,68	1,28	1,33	1,50	1,53
3	100		0,64	0,70						
4	110		0,91	0,98	1,02	1,07	1,54	1,57	1,87	1,92
5	120		1,17	1,21						
6	130		1,56	1,64	1,75	1,78	1,88	1,93	2,07	2,11
7	140		1,80	1,87						
8	150		1,91	1,98	2,04	2,11	2,29	2,34	2,41	2,47
1	80	4x30sec timp activ 3x30sec timp pauză	0,42	0,48						
2	90		0,53	0,53	0,58	0,62	1,20	1,25	1,42	1,47
3	100		0,58	0,64						
4	110		0,84	0,92	0,97	1,00	1,45	1,48	1,82	1,85
5	120		1,06	1,18						
6	130		1,42	1,58	1,63	1,68	1,82	1,87	1,98	2,00
7	140		1,76	1,81						
8	150		1,85	1,90	2,00	2,05	2,25	2,28	2,31	2,37
1	80	1x60sec timp activ 1x30sec timp pauză								
2	90									
3	100									
4	110									
5	120									
6	130									
7	140									
8	150									

Carbură de siliciu granulația 8 ; forța statică 1370gf ;

Nr. ctr	Tensiunea alimentare [V]	Tipul de lucru [sec]	Turația 0 rot/min		Turația 80 rot/min		Turația 140 rot/min		Turația 205 rot/min	
			HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	80	7x15sec timp pasiv 8x15sec timp activ		0,53						
2	90			0,60		0,84		1,02		1,33
3	100			0,69		1,10		1,31		1,68
4	110			1,05						
5	120			1,14						
6	130			1,30						
7	140			1,45						
8	150					1,72		1,95		2,28

Carbură de siliciu granulația 5 ; forța statică 560gf ;

Nr. ctr	Tensiunea alimentare [V]	Tipul de lucru [sec]	Turația 0 rot/min		Turația 80 rot/min		Turația 140 rot/min		Turația 205 rot/min	
			HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	80	7x15sec timp pasiv 8x15sec timp activ		0,60						
2	90			0,72		0,91		1,15		1,48
3	100			0,93		1,21		1,46		1,87
4	110			1,02						
5	120			1,24						
6	130			1,40						
7	140			1,58						
8	150			1,79		1,90		2,15		2,39

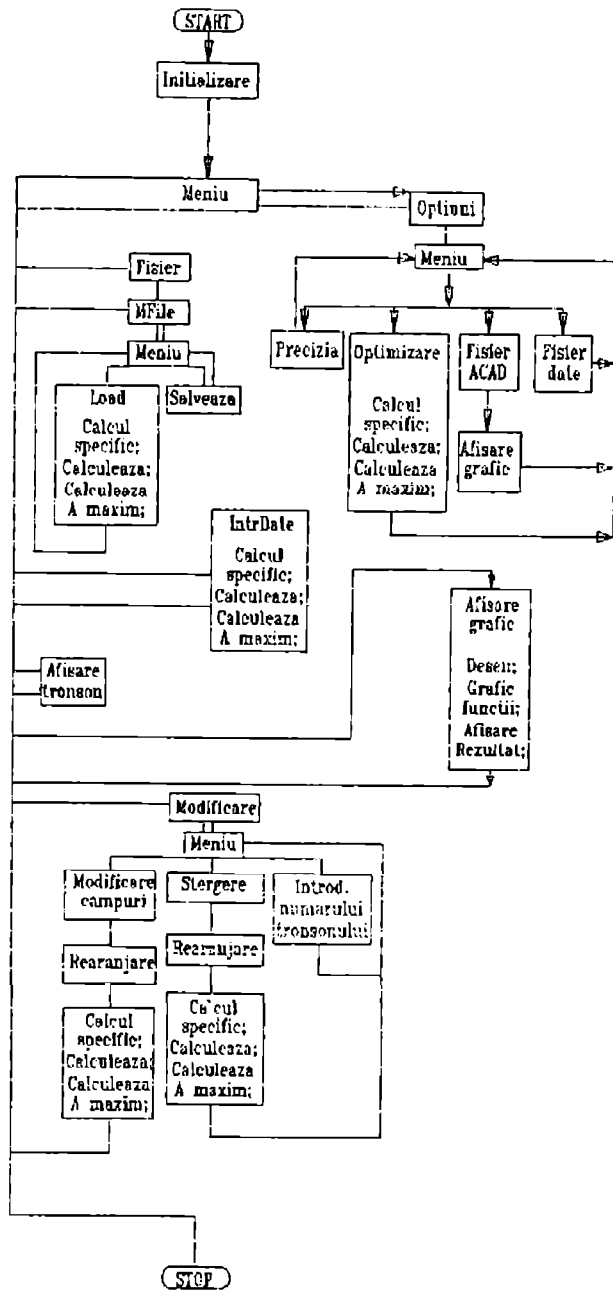
Carbură de siliciu granulația 5 ; forța statică 960gf ;

Nr. ctrr	Tensiunea alimentare [V]	Tipm de lucru [sec]	Turajia 0 rot/min		Turajia 80 rot/min		Turajia 140 rot/min		Turajia 205 rot/min	
			HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	80	7x15sec timp pauză 8x15sec timp activ		0.63						
2	90			0.80		1.02		1.25		1.50
3	100			0.98		1.35		1.56		1.84
4	110			1.12						
5	120			1.30						
6	130			1.48		1.67		1.89		2.19
7	140			1.70						
8	150			2.00		2.14		2.32		2.64

Carbură de siliciu granulația 5 ; forța statică 1160gf ;

Nr. ctrr	Tensiunea alimentare [V]	Tipm de lucru [sec]	Turajia 0 rot/min		Turajia 80 rot/min		Turajia 140 rot/min		Turajia 205 rot/min	
			HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38	HRC 22	HRC 38
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	80	7x15sec timp pauză 8x15sec timp activ		0.67						
2	90			0.97		1.11		1.29		1.65
3	100			1.15						
4	110			1.29		1.41		1.59		2.06
5	120			1.45						
6	130			1.68		1.84		2.11		2.62
7	140			1.87						
8	150			2.21		2.32		2.43		2.98

Carbură de siliciu granulația 5 ; forța statică 1370gf ;



```

Program de calcul al concentratorilor amplificatori de unde;
Uses Dos,Crt,Graph,ForUltra;
Const MaxTronsoane = 10;
      MaxNrPasi = 1000;

```

```

{Meniu principal :
-"Introducere date" = se introduc toate datele referitoare
                    la tronsonul NrElem (pana la 10);
-"Precizia de afisare" = in functie de rezultatele obtinute
                    se pot modifica preciziile de afisare
                    a partii intregi respectiv a celei zecimale;
ATENTIE : Daca precizia este prea mica , atunci calculatorul rotun-
                    jeste rezultatul si pot aparea erori !
-"Modificare" = modificarea datelor referitoare la un tron-
                    son;
-"FISIER":
-"Load" = inregistreaza in memoria calculatorului da-
                    tele salvate anterior intr-un director fii
                    al directorului curent;
-"Save" = salveaza in directorul specificat datele
                    introduse in sesiunea curenta;
-"Calcul" = face calculele pentru tronsonul NrElem;
-"Afisare grafic" = se afiseaza graficul daca variabila de tip
                    <boolean> Se_poate_afisa este <true>;
-"Exit" = parasirea programului;
OBSERVATII :

```

```

}
MenPrinc:MenType=((Name:'Fisier' ;Active:True),
                  (Name:'Introducere Date' ;Active:True),
                  (Name:'Afisare tabel' ;Active:True),
                  (Name:'Modificare' ;Active:True),
                  (Name:'Optiuni' ;Active:True),
                  (Name:'Grafic' ;Active:True),
                  (Name:'eXit' ;Active:True));

```

```

{Selectare tipurilor de tronsoane}
MenSec:MenType=((Name:'Cilindric' ;Active:True),
                (Name:'Conic' ;Active:True),
                (Name:'Exponential';Active:True),
                (Name:'Racordare' ;Active:True),
                (Name:'';Active:False),
                (Name:'';Active:False),
                (Name:'';Active:False));

```

```

{Tipuri de tronsoane}
tp_cil=1;
tp_con=2;
tp_exp=3;
tp_rac=4;

```

```

{Dimensiuni maxime in milimetri ale segmentului afisat}
Lungime_oriz=500; {mm}
Lungime_vert=70 ; {mm}

```

```

{Precizia de afisare}
Intregi:Byte=5;
Zecimale:Byte=4;

```

```

Type TipulDeBaza =Record
    Diam1,      {Echivalent d0}
    VitSunet,  {Echivalent c}

```

```

Frecventa, {Echivalent f}
ModElast, {Echivalent E}
IncCalcul {Echivalent dx}
:Real;
PasI,PasF:Integer;
calculat:Boolean;
Case Tip:Byte of
tp_con:(D2,igAlfa,Alfa:Real);
tp_exp:(Diam2,Beta:Real);
tp_rac:(RazaProf:Real);
End;

Var {Variabile utile calculului}
NrUnda:Real; {Echivalent k}
NumarPasi, {Numarul de pasi pe tronsonul curent}
PasulInitial, {Pasul de plecare pe tronsonul curent}
NumarPasiRamasi, {Pasi ramasi pana la MaxNrPasi}
PasulFinal:0..MaxNrPasi; {Pasul final pe ultimul tronson (echiv.
cu pasul final pe intregul segment)}
PasulInitialAnterior:0..MaxNrPasi;
{Pentru facilitarea modificarilor}
NrElem:0..MaxTronsoane; {Numarul elementului curent}
Lungime:Real; {In cadrul procedurii Afisare_rezultat
contine pe rand lungimile tuturor tron-
soanelor; in rest (dupa apelarea acestei
proceduri) contine lungimea totala a seg-
mentului studiat}
NulRotire:Integer; {Punctul de maxim al amplitudinii}

Var Se_Poate_Afisa,optiin:Boolean;
Matrice:Array[1..MaxTronsoane] of TipulDeBaza;
A:Array[1..3,1..MaxNrPasi+2] of Real;
{campul 1: -reprezinta A
campul 2: -reprezinta A'
campul 3: -A[3,i] reprezinta diametrul segmentului la pasul i}
Rotire:Array[1..MaxNrPasi+2] of Real;
G:Array[1..10,1..2] of Real;
{campul 1: -G[i,1] reprezinta numarul de pasi pe tronsonul i
campul 2: -G[i,2] reprezinta incrementul de calcul pe tronsonul i}

F:Array[1..MaxNrPasi+2] of Real;
InfoA:Record
Amax:Real;
pas:Integer;
Lungime:Real;
End;
InfoB:Boolean;
DrawFile:Record
Name:String[8+4];
Fis:Text;
Done:Boolean;
End;
WorkFile:String;

Procedure Afiseaza(i:Byte;show:Boolean;Var f:Text);Forward;
Procedure IntrDate(Nr:Byte);Forward;
Procedure Calculeaza(Nr:Byte;yn:Boolean);Forward;
Procedure Calculeaza_A_Max(Nr:Byte;yn:Boolean);Forward;
Procedure Calcul_Specific(Cod:Integer;Nr:Byte);Forward;
Procedure Modificare;Forward;
Procedure Calc(i:Byte;yn:Boolean);Forward;
Procedure EroareFisier(cod:Byte);Forward;
Procedure StergeElement(Nr:Byte);Forward;

```

```

Procedure Afisare_Grafic(yn:Boolean);Forward;
Procedure Initializare;Forward;
Function Se_poate_desena:Boolean;Forward;
Function GetPasi:Integer;Forward;

```

```
{Partea de program propriu-zisa }
```

```

Function GetPasi;
Var pasi,i:Integer;
Begin
pasi:=0;
For i:=1 To NrElem Do
  Inc(pasi,Matrice[i].PasF-Matrice[i].PasI);
GetPasi:=pasi;
End;

```

```

Procedure Tabel(i:Byte);
Begin
End;

```

```

Procedure Calculeaza;
Label Corespunde_504;
Var i,OZN_II,Dela:Integer;
    dx,Fora:Real;
Begin
OZN_II:=1;
Dx:=Matrice[Nr].IncCalcul;
G[Nr,1]:=Matrice[Nr].PasF-Matrice[Nr].PasI;
G[Nr,2]:=Dx;
ClrScr;
Corespunde_504: {Label}
If yn Then Begin
  GotoXy(35,10);
  Writeln('Calculez ...');
  End;
Park;
Dela:=Matrice[Nr].PasI;
If Nr=1 Then Inc(Dela);

```

```

For i:=Dela to Matrice[Nr].PasF Do
  Begin
    If OZN_II*i=3 Then Begin
      A[2,1]:=A[2,2];
      i:=0;
      OZN_II:=0;
      Goto Corespunde_504;
    End;
    If yn Then Begin
      GotoXy(1,1);
      Writeln('==> ',MaxNrPasi-i:6);
      End;
      a[1, I + 1] := a[1, I] + dx * a[2, I];
      a[1, I + 2] := (2 - dx * f[I]) * a[1, I + 1] - (1 - dx * f[I] + dx * dx * NrUnda * NrUnda) * a[1, I];
      a[2, I + 1] := (a[1, I + 2] - a[1, I + 1]) / dx ;
      { fora = e * pi * a(2, I + 1) * a(3, I + 1) * a(3, I + 1) / 4 }
    End;
  End;
End;

```

```

Procedure IntrDate(Nr:Byte);

```

```

Var NumarPasi: Integer;

Procedure Cati_Pasi;
Begin
ClrScr;
Write('Introduceti numarul de pasi pe tronsonul ales (< ',1000-GetPasi,'): ');
Readln(NumarPasi);
Matrice[Nr].PasF:=Matrice[Nr].PasI+NumarPasi;
If Matrice[Nr].PasF>MaxNrPasi Then Eroare;
End;

Var l:Real;
Begin
ClrScr;
If Nr > MaxTronsoane Then Begin
ClrScr;
WriteLn('Numarul de tronsoane maxim este ',
MaxTronsoane);
Wait;
Exit;
End;
If Nr > 1 Then Matrice[Nr].PasI:=Matrice[Nr-1].PasF
Else Matrice[Nr].PasI:=0;
WriteLn('Introducerea datelor pentru tronsonul nr. ',Nr,': ');
With Matrice[Nr] do
Begin
{Introducere lui :Frecventa , ModElast , VitSunet}
Input(10,2,'Frecventa de rezonanta (f,[kHz]): ',Frecventa);
Frecventa:=1000*Frecventa;

Input(10,3,'Viteza sunetului in materialul ghidului (c,[m/s]): ',VitSunet);

Input(10,4,'Modulul de elasticitate (E,[N/m²]): ',ModElast);

Input(10,5,'Incrementul de calcul (dx,[mm]): ',IncCalcul);
IncCalcul:=IncCalcul/1000;

Input(10,6,'Diametrul initial (d0,[mm]): ',Diam1);
Diam1:=Diam1/1000;

NrUnda:=2*Pi*Frecventa/VitSunet;
l:=0;
NumarPasiRamasi:=MaxNrPasi-PasI;
WriteLn('Numarul de pasi de calcul : ',NumarPasiRamasi);
Wait;

Case Meniu('Selectati forma ghidului',MenSec) of
tp_cil:Begin
Tip:=tp_cil;
Cati_Pasi;
End;

tp_con:Begin
ClrScr;
Tip:=tp_con;

Write('Diametrul final/Lungime [mm] = ');
Read(D2);
GotoXy(WhereX+1,WhereY);
Write(' / ');
Read(l);
l:=l/1000;
D2:=D2/1000;

```

```

tgAlfa:=(D2-Diam1) / (2*I) ;
Write('Alfa = ',ArcTan(tgAlfa)*180/Pi,'grd. ');
Alfa:=2*tgAlfa/Diam1;
NumarPasi:=Round(Int(l/(IncCalcul)));
PasF:=PasI+NumarPasi;
If PasF>MaxNrPasi Then Eroare;

```

```
End;
```

```
tp_exp:Begin
```

```
ClrScr;
```

```
Tip:=tp_exp;
```

```
Write('Diametrul final/Lungime [mm] = ');
```

```
Read(Diam2);
```

```
GotoXy(WhereX+1,WhereY);
```

```
Write(' / ');
```

```
Read(l);
```

```
l:=l/1000;
```

```
Diam2:=Diam2/1000;
```

```
NumarPasi:=Round(Int(l/IncCalcul));
```

```
Beta:=ln(Diam2/Diam1)/(-l);
```

```
Write('Beta = ',Beta);
```

```
PasF:=PasI+NumarPasi;
```

```
If PasF>MaxNrPasi Then Eroare;
```

```
End;
```

```
tp_rac:Begin
```

```
ClrScr;
```

```
Tip:=tp_rac;
```

```
Input(10,10,'Raza profilului [mm] : ',RazaProf);
```

```
RazaProf:=RazaProf/1000;
```

```
NumarPasi:=Abs(Round(RazaProf/(IncCalcul)));
```

```
PasF:=PasI+NumarPasi;
```

```
End;
```

```
End;
```

```
End;
```

```
Calcul_Specific(Matrice[Nr].Tip*1000,Nr);
```

```
Calc(Nr,True);
```

```
End;
```

```
Procedure Calcul_Specific;
```

```
Var i:Integer;
```

```
dg,l:Real;
```

```
R:Real;
```

```
Begin
```

```
Dg:=Matrice[Nr].DiamI;
```

```
With Matrice[Nr] Do
```

```
If PasI>0 Then
```

```
A[2,PasI+1]:=A[2,PasI+1]*A[3,PasI]*A[3,PasI]/Dg/Dg;
```

```
With Matrice[Nr] Do
```

```
Case cod of
```

```
1000:For i:=PasI+1 to PasF+1 do
```

```
Begin
```

```
F[i]:=0;
```

```
A[3,i]:=Dg;
```

```
End;
```

```
2000:Begin
```

```
l:=0;
```

```

If PasF > MaxNrPasi Then Eroare;
For i := PasI + 1 To PasF + 1 Do
  Begin
    i := i + IncCalcul;
    F[i] := 2 * Alfa / (1 - Alfa * i);
    A[3, i] := Diam1 + 2 * i * tgAlfa;
  End;
End;

```

```

3000: Begin
  l := 0;
  If PasF > MaxNrPasi Then Eroare;
  For i := PasI + 1 To PasF + 1 Do
    Begin
      F[i] := -2 * Beta;
      l := l + IncCalcul;
      A[3, i] := Dg * Exp(-beta * l);
    End;
  End;

```

```

4000: Begin
  l := 0;
  If PasI = 0 Then A[2, PasI + 1] := 0;
  R := Abs(RazaProf);
  i := PasI;
  While (l <= Abs(RazaProf)) and (i < MaxNrPasi) Do
    Begin
      l := l + IncCalcul;
      Inc(i);
      If RazaProf < 0 Then
        If Abs(RazaProf) > 1 Then
          Begin
            F[i] := 4 * (l - R) / (Diam1 - 2 * Sqrt(l * (2 * R - l))) / Sqrt(l * (2 * R - l));
            A[3, i] := Diam1 - 2 * Sqrt(l * (2 * R - l));
          End;
        If RazaProf >= 0 Then
          If Abs(RazaProf) > 1 Then
            Begin
              F[i] := 4 * l / (Diam1 + 2 * R - 2 * Sqrt(Sqr(Abs(R)) - Sqr(l))) / Sqrt(Sqr(Abs(R)) - Sqr(l));
              A[3, i] := Diam1 + 2 * R - 2 * Sqrt(Sqr(Abs(R)) - Sqr(l));
            End;
          End;
      A[3, i + 1] := A[3, i];
    End;
  End;
End;

```

```

Procedure Rearanjare(ElStart: Byte);
Var i: Byte;
    NrPasi: Integer;
Begin
  For i := ElStart To NrElem Do
    Begin
      NrPasi := Matrice[i].PasF - Matrice[i].PasI;
      Matrice[i].PasI := Matrice[i - 1].PasF;
      Matrice[i].PasF := Matrice[i].Pasi + NrPasi;
    End;
  End;

```

```

Procedure Modificare;

```

```

Var pi, pf, NumarPasi: Integer;

```

```

Procedure Cati_Pasi;
Begin
ClrScr;
Write('Introduceti numarul de pasi pe tronsonul ales (< ',1000-GetPasi,') ');
Readln(NumarPasi);
Pf:=Pi+NumarPasi;
If Pf>MaxNrPasi Then Eroare;
End;

```

Const

```

PrevMeniu:MenType=((Name:'Modific tronsonul ';Active:True),
(Name:'Sterg tronsonul ';Active:True),
(Name:'Numarul tronsonului';Active:True),
(Name:'eXit ';Active:True),
(Name:'';Active:False),
(Name:'';Active:False),
(Name:'';Active:False));

```

```

Campuri:MenType=((Name:'Diametrul initial ';Active:True),
(Name:'Viteza sunetului ';Active:True),
(Name:'Frecventa de rez. ';Active:True),
(Name:'Modulul de elasticitate';Active:True),
(Name:'Incrementul de calcul ';Active:True),
(Name:'Tipul (forma) ghidului ';Active:True),
(Name:'eXit ';Active:True));

```

```

Camp_Tip:MenType=((Name:'Tipul cilindric ';Active:True),
(Name:'Tipul conic ';Active:True),
(Name:'Tipul exponential';Active:True),
(Name:'Tipul racordare ';Active:True),
(Name:'';Active:False),
(Name:'';Active:False),
(Name:'';Active:False));

```

Var Nr:Integer;

```

Procedure ModifPas(q:Byte);
Begin
NumarPasi:=Matrice[q].PasF-Matrice[q].PasI;
If Nr>1 Then Matrice[q].PasI:=Matrice[q-1].PasF Else
Matrice[q].PasI:=0;
Matrice[q].PasF:=Matrice[q].PasI+NumarPasi;
End;

```

Const Coduri:Array[1..4] Of Word=(1000,2000,3000,4000);

```

Var s:String;
i:Integer;
ok:Boolean;
l:Real;
trans:TipulDeBaza;

```

Begin

```

Nr:=NrElem;
ok:=False;
Repeat
Str(Nr,s);
Case Meniu('Tronsonul '+s,PrevMeniu) Of
1:ok:=true;
2:Begin
ClrScr;
WriteLn('Elimin elementul nr ',Nr);
For i:=Nr To NrElem-1 Do
Begin

```



```

    Matrice[i]:=Matrice[i+1];
    {ModifPas(i);}
    End;

Rearanjare(1);
Dec(NrElem);
Nr:=NrElem;
For i:=1 To NrElem Do
    Begin
        Calcul_Specific(Matrice[i].Tip*1000,i);
        Calc(i,False);
    End;

End;
3:Repeat
    ClrScr;
    Write('Introduceti numarul tronsonului de modificat (< ',MaxTronsoane,'): ');
    Readln(Nr);
    If Nr > MaxTronsoane Then Begin
        Writeln('Prea mare');
        Wait;
        End;
    Until Nr <= MaxTronsoane;
4:Exit;
End;
Until ok;
Str(Nr,s);
NumarPasi:=Matrice[Nr].PasF-Matrice[Nr].PasI;
If Nr > 1 Then pi:=Matrice[Nr-1].PasF Else pi:=0;
Matrice[Nr].PasI:=pi;
Matrice[Nr].PasF:=pi+NumarPasi;
ok:=False;
Repeat
    With Matrice[Nr] Do
    Case Meniu('Selectati campul de modificat pentru tronsonul '+s,Campuri) Of

1:Begin
    Input(5,3,Campuri[1].Name+' ',Diam1);
    Diam1:=Diam1/1000;
    End;
2:Input(5,3,Campuri[2].Name+' ',VitSunet);
3:Begin
    Input(5,3,Campuri[3].Name+' ',Frecventa);
    Frecventa:=1000*Frecventa;
    End;
4:Input(5,3,Campuri[4].Name+' ',ModElast);
5:Begin
    Input(5,3,Campuri[5].Name+' ',IncCalcul);
    IncCalcul:=IncCalcul/1000;
    End;
6:Case Meniu('Selectati tipul ghidului',Camp_Tip) Of
    tp_cil:Begin
        Tip:=tp_cil;
        Cati_Pasi;
        PasF:=pf;
        End;

    tp_con:Begin
        ClrScr;
        Tip:=tp_con;

        Write('D2/x [mm] = ');
        Read(D2);

```

```

    GotoXy(WhereX + 1, WhereY);
    Write(' / ');
    Read(l);
    l := l / 1000;
    D2 := D2 / 1000;
    tgAlfa := (D2 - Diam1) / 2;
    Write('Alfa = ', ArcTan(tgAlfa) * 180 / Pi, ' grd. ');
    NumarPasi := Round(Int(l / (IncCalcul)));
    PasF := PasI + NumarPasi;
    If PasF > MaxNrPasi Then Eroare;

End;

tp_exp: Begin
    ClrScr;
    Tip := tp_exp;

    Write('D2/x [mm] = ');
    Read(Diam2);
    GotoXy(WhereX + 1, WhereY);
    Write(' / ');
    Read(l);
    l := l / 1000;
    Diam2 := Diam2 / 1000;
    NumarPasi := Round(Int(l / IncCalcul));
    Beta := ln(Diam2 / Diam1) / (-l);
    Write('Beta = ', Beta, ' grd. ');
    PasF := PasI + NumarPasi;
    If PasF > MaxNrPasi Then Eroare;
End;

tp_rac: Begin
    ClrScr;
    Tip := tp_rac;
    Input(10, 10, 'Raza profilului [mm] : ', RazaProf);
    RazaProf := RazaProf / 1000;
    NumarPasi := Abs(Round(RazaProf / (IncCalcul)));
    PasF := PasI + NumarPasi;
End;

End;
7:ok := True;
End;
Until ok;
{
    For i := Matrice[Nr].PasI + 1 To Matrice[Nr].PasF Do
        Begin
            A[1, i] := 0;
            A[2, i] := 0;
            A[3, i] := 0;
            F[i] := 0;
        End;
    }
G[Nr, 1] := 0;
G[Nr, 2] := 0;
Rearanjare(Nr);
For i := Nr To NrElem Do
    Begin
        Calcul_Specific(Coduri[Matrice[i].Tip], i);
        Calc(i, False);
    End;
End;
End;

```

```

Procedure Afiseaza(i:Byte;show:Boolean; Var f:Text);

    Procedure Writelm(S:String;Rez:Real;T:String);
    Begin
        Writeln(f,s,Rez:Intregi:Zecimala,' ',T);
    End;

Begin
If Not Matrice[i].calculat Then Exit;
ClrScr;

Writeln(f,'DATELE TRONSONULUI NR. ',i);
Writeln(f);
Writeln(f,'TIPUL TRONSONULUI : ',MenSec[Matrice[i].Tip].Name);
Writeln(f);

With Matrice[i] do
Begin

Writelm('Viteza sunetului in materialul ghidului : ',VitSunet,'m/s');

Writelm('Frecventa de rezonanta           : ',Frecventa,'Hz');

Writelm('Modulul de elasticitate           : ',ModElast,'N/m²');

Writelm('Incrementul de calcul                : ',Milim(IncCalcul),'mm');

Writelm('Diametrul initial                    : ',Milim(Diam1),'mm');

Writeln(f,'Pasul initial                    : ',PasI,'');

Writeln(f,'Pasul final                          : ',PasF,'');

Writelm('Lungimea tronsonului                 : ',(PasF-PasI)*Milim(IncCalcul),'mm');

Case Tip of
tp_cil:;
tp_con:Begin
Writelm('Alfa                               : ',Alfa,'grad. ');
Writelm('Diametrul final                       : ',Milim(D2),'mm');
End;
tp_exp:Begin
Writelm('Constanta beta                        : ',Beta,'');
Writelm('Diametrul final                       : ',Milim(Diam2),'mm');
End;
tp_rac:
Writelm('Raza profilului                      : ',Milim(RazaProf),'mm');
End;
End;
If show Then
    Begin
        Park;
        Wait;
        End
End;

Procedure ChangePrecizia;
Begin
Clrscr;
Writeln('In acest moment ptr.: -partea intreaga :',Intregi);
Writeln('                    -partea zecimala :',Zecimala);

```

```

Writeln;
Write('Introduceti precizia de afisare a partii intregi :');Readln(Intregi);
Write('Introduceti precizia de afisare a partii zecimale :');Readln(Zecimala);
End;

```

```

Procedure Calculeaza_A_Max;

```

```

Var {Numai OZN - uri}

```

```

    dx,x,b,yx,der,nd,dd,y,bb,yy:Real;

```

```

    j,i:Integer;

```

```

Begin

```

```

  ClrScr;

```

```

  dx:=Matrice[Nr].IncCalcul;

```

```

  nd:=0;

```

```

  dd:=0;

```

```

  y:=0;

```

```

  bb:=0;

```

```

  yy:=0;

```

```

  x:=0;

```

```

  b:=0;

```

```

  yx:=0;

```

```

  der:=0;

```

```

  For I := Matrice[Nr].PasI + 1 To Matrice[Nr].PasF Do

```

```

    Begin

```

```

      y := X + (I - Matrice[Nr].PasI) * dx;

```

```

      IF ABS(B) <= ABS(a[1, I]) THEN Begin

```

```

          B := a[1, I];

```

```

          bb:= I;

```

```

          yy:= y;

```

```

          End;

```

```

      IF I > 1 THEN IF SGN(a[1, I]) <> SGN(a[1, I - 1]) THEN

```

```

          Begin

```

```

            nd := a[1, I - 1];

```

```

            der := a[2, I - 1];

```

```

            dd := I - 1;

```

```

            yx := y - dx;

```

```

            IF ABS(nd) > ABS(a[1, I]) THEN

```

```

              Begin

```

```

                der := a[2, I];

```

```

                dd := I;

```

```

                yx := y;

```

```

                End;

```

```

            End;

```

```

      If yn Then Begin

```

```

        Writeln(' I / X = ',i,' / ',y:0:6);

```

```

        Writeln(' D = ',A[3,i]:0:3);

```

```

        Writeln(' A = ',A[1,i]);

```

```

        Writeln(' A'' = ',A[2,i]:0:10);

```

```

        Wait;

```

```

        End;

```

```

      End;

```

```

  ClrScr;

```

```

  If yn Then Begin

```

```

    Writeln('Nr. de ordine : ',bb:4:0);

```

```

    Writeln(' AMax : ',b:Intregi:Zecimala);

```

```

    Writeln(' X : ',yy:Intregi:Zecimala,' m');

```

```

    If Der <> 0 Then Begin

```

```

      Writeln('Nr. de ordine : ',dd:4:0);

```

```

      Writeln(' A''Max : ',der:Intregi:Zecimala);

```

```

      Writeln(' X : ',yx:Intregi:Zecimala,' m');

```

```

      End;

```

```

  Writeln('Nr. de ordine/pas : ',bb:4:0);

```

```

  Writeln(' Amax : ',b:Intregi:Zecimala);

```

```

WriteLn('          X : ',yy:Intregi:Zecimala,' m');
Wait;
End;

If InfoB or ((InfoA.pas <> 0) and not optim) Then Exit;
InfoA.Amax:=0.0;
InfoA.pas:=0;
InfoA.Lungime:=0.0;

  For j:=Matrice[Nr].PasI+1 To Matrice[Nr].PasF Do
    Begin
      If (Abs(A[1,j])>Abs(InfoA.Amax)) and (Sgn(A[2,j])<>Sgn(A[2,j+1]))
        Then Begin
          InfoA.Amax:=A[1,j];
          InfoA.pas:=j;
          InfoB:=True;
        End;
    End;

  If InfoA.pas <> 0 Then
    Begin
      For i:=1 To Nr-1 Do
        Lungime:=Lungime+(Matrice[i].PasF-Matrice[i].PasI)*Matrice[i].IncCalcul;
        Lungime:=Lungime+(InfoA.Pas-Matrice[Nr].PasF)*Matrice[Nr].IncCalcul;
      If optim Then Begin
        For i:=Nr+1 To NrElem Do
          StergeElement(i);
          Matrice[Nr].PasF:=InfoA.Pas;
          Calculeaza(Nr,False);
        End;
      End;
    End;

  End;

  End;

  End;

Procedure StergeElement;
Begin
Dec(NrElem);
End;

Function Se_poate_desena;
Var i:Byte;
Begin
Se_poate_desena:=False;
If NrElem=0 Then Exit;
If Matrice[1].PasI<>0 Then Exit;
For i:=2 To NrElem Do
  If (Matrice[i].PasI<>Matrice[i-1].PasF) or not Matrice[i].calculat Then Exit;
If NrElem=1 Then Begin Se_poate_Desena:=True; Exit; End;
Se_poate_desena:=True;
End;

Procedure ScriptLine(x1,y1,x2,y2:Integer);
Begin
WriteLn(DrawFile.Fis,'Line ',x1,',',.GetMaxY-y1,',',x2,',',.GetMaxY-y2,',');
End;

Procedure ChangeStyle(s:String);
Begin
WriteLn(DrawFile.Fis,'LineStyle s ',s);
End;

Procedure WriteLnScript(x,y:Integer;s:String);
Begin
WriteLn(DrawFile.Fis,'Text ',x,',',.GetMaxY-y,',',s,',');

```

End;

```
Procedure Afisare_Grafic;
Const Margine=20;
  Margine_Y=480 div 2 -50;
Var Unitatea_X,Unitatea_Y:Real;
  Centru:Integer;
  f:Text;
```

```
Procedure Afisare_Rezultat;
Label The_End;
Var i:Byte;
  s1,s2:String;
Begin
If NrElem=0 Then Exit;
Lungime:=0;
For i:=1 To NrElem Do
  Begin
  Str(i,s1);
  If g[i,1]=0 Then Goto The_End;
  Lungime:=Lungime+G[i,1]*G[i,2];
  Str(Lungime*1000:Integer:Zecimala,s2);
  OutTextXy(Margine+10+((i-1) div 5)*230,10+((i-1) Mod 5)*15,'Tronsonul '+s1+'='+'s2+'
  If yn Then WriteLnScript(Margine+10+((i-1) div 5)*230,10+((i-1) Mod 5)*15,'Tronsonul '+s1-
  End;
The_End:
Wait;
End;
```

```
Procedure Desen;
Function Suma(j:Byte):Real;
Var k:Byte;
  s:Real;
Begin
s:=0;
For k:=1 to j Do
  s:=s+G[k,1]*G[k,2];
Suma:=s;
End;
```

```
Var P: array[1..5] of PointType;
  Centru_Arc_Y1,Centru_Arc_Y2,Centru_Arc_X:Integer;
  StU1,EndU1:Word;
  StU2,EndU2:Word;
  cx,cy1,cy2,m,j,PasRel0:Integer;
```

```
  s:string;
Begin
cx:=Margine;
cy1:=Centru-Round(Milim(A[3,1])*Unitatea_X/2);
cy2:=Centru+Round(Milim(A[3,1])*Unitatea_X/2);
For m:=1 To NrElem Do
  Begin
  For j:=1 To Matrice[m].PasF-Matrice[m].PasI Do
    Begin
    PasRel0:=Matrice[m].PasI+j;
    If (PasRel0=InfoA.pas)
      Then Begin
        SetLineStyle(SolidLn, 0, NormWidth);
        MoveTo(Margine+Round((Milim(Suma(m-1)+j*Matrice[m].IncCalcul))*Unitatea_X).
          2*Centru-50);
        LineTo(GetX,GetMaxY-20);
```

```

If yn Then
ScriptLine(Margine + Round((Milim(Suma(m-1) + j*Matrice[m].IncCalcul))*Unitatea_X
2*Centru-50, Margine + Round((Milim(Suma(m-1) + j*Matrice[m].IncCalcul))*Unit
GetMaxY-20);
SetTextJustify(CenterText, CenterText);
Str(Milim(Suma(m-1) + j*Matrice[m].IncCalcul):Intregi:Zecimala, s);
MoveRel(0, 10);
OutText('l= ' + s);
If yn Then
WriteLnScript(Margine + Round((Milim(Suma(m-1) + j*Matrice[m].IncCalcul))*Unitatea
div 2*TextWidth('W'), GetMaxY-10, 'l= ' + s);
SetLineStyle(SolidLn, 0, NormWidth);
SetTextJustify(LeftText, TopText);
End;

```

```

If (j=Matrice[m].PasF-Matrice[m].PasI) and (Matrice[m].Tip=tp_rac) and (m < NrElem)
and (Matrice[m].RazaProf < 0) Then

```

```

A[3, PasRel0] := A[3, PasRel0 - 1];
Line(cx, cy1, Margine + Round((Milim(Suma(m-1) + j*Matrice[m].IncCalcul))*Unitatea_X),
Centru - Round(Milim(A[3, PasRel0])*Unitatea_X/2));
Line(cx, cy2, Margine + Round((Milim(Suma(m-1) + j*Matrice[m].IncCalcul))*Unitatea_X),
Centru + Round(Milim(A[3, PasRel0])*Unitatea_X/2));
If yn Then Begin
ScriptLine(cx, cy1, Margine + Round((Milim(Suma(m-1) + j*Matrice[m].IncCalcul))*Unitatea_X),
Centru - Round(Milim(A[3, PasRel0])*Unitatea_X/2));
ScriptLine(cx, cy2, Margine + Round((Milim(Suma(m-1) + j*Matrice[m].IncCalcul))*Unitatea_X),
Centru + Round(Milim(A[3, PasRel0])*Unitatea_X/2));
End;

```

```

cx := Margine + Round((Milim(Suma(m-1) + j*Matrice[m].IncCalcul))*Unitatea_X);
cy1 := Centru - Round(Milim(A[3, PasRel0])*Unitatea_X/2);
cy2 := Centru + Round(Milim(A[3, PasRel0])*Unitatea_X/2);
End;

```

```

Line(cx, cy1, cx, cy2);
If yn Then ScriptLine(cx, cy1, cx, cy2);
End;

```

```

s := 'Lungimea nu a ajuns la rezonanta. Mariti lungimea ultimului tronson';
If InfoA.Pas=0 Then OutTextXy(GetMaxX div 2 - Length(s) div 2 *TextWidth('W'), GetMaxY-15, s);
End;

```

```

Procedure Afisare_Functii;

```

```

Var cgraf, hi, ampm, dampm: Real;
cx, cy1, cy2, Centru, jj, i, j, gx, gay, day: Integer;
ch: char;

```

```

Function Suma(i: Byte): Real;

```

```

Var j, k: Integer;
s: Real;
Begin
s := 0;
For j := 1 To i Do
For k := Matrice[j].PasI To Matrice[j].PasF Do
s := s + g[j, 2]*k;
Suma := s;
End;

```

```

Begin
cgraf := (GetMaxX - 2*Margine)/Lungime_oriz*2;
jj := 0;
hi := 0;
ampm := 0;
dampm := 0;

```

```

NulRotire:=0;
For i := 1 To Matrice[NrElem].PasF Do
Begin
If (Sgn(Rotire[i]) <> Sgn(Rotire[i+1]))
And (Sgn(Rotire[i]) <> 0) Then NulRotire:=i+1;
IF ampm < ABS(a[1, i]) THEN ampm := ABS(a[1, i]);
IF dampm < ABS(a[2, i]) THEN dampm := ABS(a[2, i]);
End;
If ampm=0 Then ampm:=1;
If dampm=0 Then dampm:=1;

ampm := Lungime_vert / ampm;
dampm := Lungime_vert / dampm;
Centru:=GetMaxY div 2 ;
cx:=Margine;
cy2:=Centru-Round(a[2, 1] * dampm);
cy1:=Centru-Round(a[1, 1] * ampm);

```

```

For i:=1 To NrElem Do
Begin
IF G[i, 1] = 0 Then Exit;
For j := 1 To Round(G[i, 1]) Do
Begin
Inc(j);
gx := Round(hi+g[i, 2] * j * cgraf*1000 + Margine);
day := Round(a[2, j] * dampm);
gay := Round((a[1, j]) * ampm);
{PutPixel(gx,Centru-day,3);
PutPixel(gx,Centru-gay,3);}
Line(cx,cy1,gx,Centru-gay);
Line(cx,cy2,gx,Centru-day);
If yn Then Begin
ScriptLine(cx,cy1,gx,Centru-gay);
ScriptLine(cx,cy2,gx,Centru-day);
End;

cx:=gx;
cy1:=Centru-gay;
cy2:=Centru-day;
End;
hi:=hi+g[i, 2]*j*cgraf*1000;
End;

```

```

Repeat Until KeyPressed;
ch:=ReadKey;
End;

```

{Procedura de afisare a graficului}

```
Const Marg_sageata=10;
```

```
Var {Numai OZN - uri}
```

```
cgraf,hi,jj,cx,cy:Integer;
```

```
i:Integer;
```

```
Diviziune:Word;
```

```
j:Integer;
```

```
s:String;
```

```
ampm,dampm:Real;
```

```
ok:Boolean;
```

```
Font:String;
```

```
Const MaxFonts=12;
```

```
Font:Array[1..MaxFonts] of String =
```

```
('Cyrillic','Cyrilic','Greek','Greeks','Gothice','Gothic','Italic',
'ItalicT','Romanc','Romand','Romans','Romant');
```



```

Begin
If NrElem=0 Then Exit;
If yn and DrawFile.Done Then yn:=True;
If yn Then Begin
    {$I-}
    Rewrite(DrawFile.Fis);
    If IOResult < > 0 Then Begin
        Writeln('Eroare la deschiderea fisierului ',
            DrawFile.Name);
        Wait;
        {$I+}
        Exit;
        End
    {$I+}
    End;
If yn Then Begin
    Font:=Fnt[MaxFonts];
    Repeat
    ok:=False;
    ClrScr;
    Writeln('Doriti un font anume?(ENTER = < Romant>,? = lista) ');
    Readln(s);
    For i:=1 To MaxFonts Do
        If s=Fnt[i] Then ok:=True;
    If (s < > '') and ok Then Font:=s Else
    If s='?' Then Begin For i:=1 To MaxFonts Do Writeln(Fnt[i]); Wait; End
        Else if (s='') Then ok:=True
    Else
    Begin
    Writeln('Nu am un asemenea font ; mai incercati');
    Wait;
    End;
    Until ok;
    End;
Initgraf;
Unitatea_X:=(GetMaxX-2*Margine)/Lungime_oriz*2;
Unitatea_Y:=Unitatea_X;
Centru:=GetMaxY div 2;

Line(Margine-1,Marg_sageata,Margine-1,GetMaxY-Marg_sageata);
SetLineStyle(CenterLn, 0, NormWidth);
Line(1,Centru,GetMaxX,Centru);
SetLineStyle(SolidLn, 0, NormWidth);

If yn Then Begin
    ScriptLine(Margine-1,Marg_sageata,Margine-1,GetMaxY-Marg_sageata);
    ChangeStyle('DashDot ');
    Writeln(DrawFile.Fis,'LtScale ',30);
    ScriptLine(1,Centru,GetMaxX,Centru);
    ChangeStyle('Continuous ');
    Writeln(DrawFile.Fis,'Style ',Font,' ',Font,' 7 1 ');
    End;

Desen;
Afisare_Rezultat;
Afisare_Functii;
If yn Then Begin
    Writeln(DrawFile.Fis,'zoom a');
    Close(DrawFile.Fis);
    End;
CloseGraph;

```

```

End;

Procedure Calc(i:Byte;yn:Boolean);
Begin
Afiseaza(i,True,OutPut);
Calculeaza(i,yn);
Calculeaza_A_Max(i,yn);
Matrice[i].calculat:=True;
End;

Procedure EroareFisier;
Begin
ClrScr;
Case cod of
1:Begin
  Writeln('Fisierul de lucru nu exista !');
  Wait;
  End;
2:Begin
  Writeln('Director inexistent !');
  Wait;
  End;
End;
End;

Procedure Salveaza(s:String);
Const Term:String[8]='matrice ';
      Tend='.ult';
Var Fis,MyDir:String;
    fil:File of Real;
    t:File of TipulDeBaza;
    fl:File of Integer;
    j,i,int_nrel:Integer;
Begin
{$I-}
Fis:=s;
Assign(t,Fis);
Rewrite(t);
If IoResult < > 0 Then Begin
      Close(t);
      EroareFisier(1);
      Exit;
      End;

For i:=1 To MaxTronsoane Do
  Write(t,Matrice[i]);
Close(t);

{$I+}
End;

Procedure Load(s:String);
Const Term:String[8]='matrice ';
      Tend='.ult';
Var Fis,MyDir:String;
    fi:File of Real;
    t:File of TipulDeBaza;
    fl:File of Integer;
    j,i,int_nrel:Integer;
Begin
{$I-}

Fis:=s;

```

```

Assign(t,Fis);
ReSet(t);
If IoResult < > 0 Then Begin EroareFisier(1); Exit; End;
Initializare;
For i:=1 To MaxTronsoane Do
  Read(t,Matrice[i]);
Close(t);

For i:=2 To MaxTronsoane Do
  If Matrice[i].Diam1=0 Then Begin NrElem:=i-1; i:=MaxTronsoane End;

For i:=1 To NrElem Do
  Begin
  ClrScr;
  Writeln('Incarc ...');
  NrUnda:=2*Pi*Matrice[i].Frecventa/Matrice[i].VitSunet;
  Calcul_Specific(Matrice[i].Tip*1000,i);
  Calculeaza(i,False);
  Calculeaza_A_Max(i,False);
  Matrice[i].Calculat:=True;
  End;
ClrScr;
{$I+}
End;

Procedure MFile(k:Boolean);
Const Mmenu:MenType=((Name:'Incarc';Active:True),
  (Name:'Salvez';Active:True),
  (Name:'eXit ';Active:True),
  (Name:'';Active:False),
  (Name:'';Active:False),
  (Name:'';Active:False),
  (Name:'';Active:False));
Var s:String;

  Procedure AskDir;
  Begin
  Write('Fisierul de lucru (cu extensie) ');
  Readln(s);
  End;

  Function Intreaba:Boolean;
  Label 10;
  Var Ch:Char;
  Begin
  Intreaba:=False;
  10:
  ClrScr;
  Writeln('Sunteti sigur?(d/n)');
  Repeat
  Until KeyPressed;
  Ch:=ReadKey;
  If upcase(ch)='D' Then Intreaba:=True;
  If (upcase(ch)<>'D') and (upcase(ch)<>'N') Then Goto 10;
  End;

Begin
Mmenu[1].Active:=k;
ClrScr;
Case Menu('File',Mmenu) of
1:Begin AskDir; Load(s); WorkFile:=s; End;
2:Begin AskDir; If Intreaba Then Salveaza(s); End;
End;

```

End;

Procedure Optiuni;

Label AskName,AskMe;

```
Const Men:MenType=((Name:'Schimbarea preciziei';Active:True),
  (Name:'Optimizare      ';Active:True),
  (Name:'Creare fisier ACAD ';Active:True),
  (Name:'Creare fisier date ';Active:True),
  (Name:'eXit           ';Active:True),
  (Name:'';Active:True),
  (Name:'';Active:True));
```

Var ch:Char;

ok:Boolean;

i:Byte;

s:String;

f:Text;

Begin

ok:=False;

Repeat

Case Meniu('Optiuni :',Men) of

1:ChangePrecizia;

2:Begin

Repeat

ClrScr;

Writeln('Optimizaz (d/n)?');

Readln(ch);

optim:=(upCase(ch)='D');

Until upCase(ch) in ['D','N'];

For i:=1 To NrElem Do

Calc(i,False);

InfoB:=False;

End;

3:Begin

AskName:

Repeat

ClrScr;

Writeln('Introduceti numele fisierului fara extensie ');

Readln(s);

If Length(s) > 8 Then Begin

Writeln('Numele fisierului are maxim 8 litere');

Wait;

End;

Until Length(s) <= 8;

Repeat

If Pos('.',s) < > 0 Then Delete(s,Pos('.',s),1);

Until Pos('.',s) = 0 ;

DrawFile.Name:=s+'.scr';

{SI-}

Assign(DrawFile.Fis,DrawFile.Name);

ReWrite(DrawFile.Fis);

If IOResult < > 0 Then Begin

Writeln('Eroare la crearea fisierului');

Wait;

{SI+}

Goto AskName;

End

Else Begin

Close(DrawFile.Fis);

DrawFile.Done:=True;

End;

```

{$I+}
Afisare_Grafic(True);
End;
4:Begin
AskMe:
Repeat
ClrScr;
Writeln('Introduceti numele fisierului fara extensie ');
Readln(s);
If Length(s) > 8 Then Begin
    Writeln('Numele fisierului are maxim 8 litere');
    Wait;
End;
Until Length(s) < =8;

Repeat
If Pos('.',s) < > 0 Then Delete(s,Pos('.',s),1);
Until Pos('.',s) =0 ;

s:=s+'.dat';
{$I-}
Assign(f,s);
Rewrite(f);
If IOResult < > 0 Then Begin
    Writeln('Eroare la crearea fisierului');
    Wait;
    {$I+}
    Goto AskMe;
End
Else Begin
    Writeln(f,'DATELE REFERITOARE LA TRONSOANELE FISIERULUI "',WorkFile
    For i:=1 To 3 Do
        Writeln(f);
    For i:=1 To NrElem Do
        Begin
            Afiseaza(i,False,f);
            Writeln(f);
            Writeln(f);
        end;
        Close(f);
    End;

{$I+}

End;
5:ok:=true;
End;
Until ok;
End;

Var i:Byte;
    ok:Boolean;

```

```

Procedure Initializare;
Var i:Byte;
Begin
Se_Poate_Afisa:=False;
NrElem:=0;
PasulInitial:=0;
PasulFinal:=0;
ok:=False;
optim:=False;
A[1,1]:=1;

```

```

A[2,1]:=0;
InfoB:=False;
WorkFile:='';
DrawFile.Name:='';
DrawFile.Done:=False;
For i:=1 To MaxTronsoane Do Matrice[i].Pasl:=0;
End;

```

```

Procedure Prezentare;

```

```

Begin
ClrScr;
GotoXy(2,5);
WriteLn('PROGRAM DE CALCUL AL CONCENTRATORILOR AMPLIFICATORI DE UNDE');
GotoXy(50,15);
WriteLn('De Brostean Marian L. ');
GotoXy(1,20);
WriteLn('ATENTIE ! Pentru a obtine graficul la imprimanta este necesar programul ');
WriteLn('< AUTOCAD > ;cu instructiunea "SCRIPT"+Space+Numele_fisierului se va vizua-');
WriteLn('liza graficul facut cu acest program !');
Wait;
End;

```

```

Begin

```

```

ClrScr;
Prezentare;
Initializare;
Repeat
MenPrinc[6].Active:=Se_poate_desena;
Case Meniu('Meniul principal',MenPrinc) of
2:Begin
Inc(NrElem);
IntrDate(NrElem);
End;
3:Begin
ClrScr;
Write('Introduceti numarul tronsonului ');
ReadLn(i);
Afiseaza(i,True,OutPut);
End;
4:Modificare;
1:MFile(true);
5:Optiuni;
6:Afisare_Grafic(False);
7:ok:=True;
End;
Until ok;
ClrScr;
MFile(False);
End.

```

DATELE REFERITOARE LA TRONSOANELE FISIERULUI "gabi.ult"

DATELE TRONSONULUI NR. 1

TIPUL TRONSONULUI : Cilindric

Viteza sunetului in materialul ghidului : 5130.0000 m/s
Frecventa de rezonanta : 22000.0000 Hz
Modulul de elasticitate : 18000.0000 N/m»
Incrementul de calcul : 1.0000 mm
Diametrul initial : 52.0000 mm
Pasul initial : 0
Pasul final : 64
Lungimea tronsonului : 64.0000 mm

DATELE TRONSONULUI NR. 2

TIPUL TRONSONULUI : Racordare

Viteza sunetului in materialul ghidului : 5130.0000 m/s
Frecventa de rezonanta : 22000.0000 Hz
Modulul de elasticitate : 18000.0000 N/m»
Incrementul de calcul : 1.0000 mm
Diametrul initial : 52.0000 mm
Pasul initial : 64
Pasul final : 75
Lungimea tronsonului : 11.0000 mm
Raza profilului : -11.0000 mm

DATELE TRONSONULUI NR. 3

TIPUL TRONSONULUI : Cilindric

Viteza sunetului in materialul ghidului : 5130.0000 m/s
Frecventa de rezonanta : 22000.0000 Hz
Modulul de elasticitate : 18000.0000 N/m»
Incrementul de calcul : 1.0000 mm
Diametrul initial : 30.0000 mm
Pasul initial : 75
Pasul final : 192
Lungimea tronsonului : 117.0000 mm

DATELE TRONSONULUI NR. 4

TIPUL TRONSONULUI : Racordare

Viteza sunetului in materialul ghidului : 5130.0000 m/s
Frecventa de rezonanta : 22000.0000 Hz

Modulul de elasticitate : 18000.0000 N/m»
Incrementul de calcul : 1.0000 mm
Diametrul initial : 30.0000 mm
Pasul initial : 192
Pasul final : 200
Lungimea tronsonului : 8.0000 mm
Raza profilului : -7.5000 mm

DATELE TRONSONULUI NR. 5

TIPUL TRONSONULUI : Cilindric

Viteza sunetului in materialul ghidului : 5130.0000 m/s
Frecventa de rezonanta : 22000.0000 Hz
Modulul de elasticitate : 18000.0000 N/m»
Incrementul de calcul : 1.0000 mm
Diametrul initial : 15.0000 mm
Pasul initial : 200
Pasul final : 257
Lungimea tronsonului : 57.0000 mm

DATELE TRONSONULUI NR.6

TIPUL TRONSONULUI : Cilindric

Viteza sunetului in materialul ghidului : 3170.0000 m/s
Frecventa de rezonanta : 22500.0000 Hz
Modulul de elasticitate : 21000.0000 N/m»
Incrementul de calcul : 1.0000 mm
Diametrul initial : 15.0000 mm
Pasul initial : 257
Pasul final : 317
Lungimea tronsonului : 60.0000 mm

DATELE TRONSONULUI NR. 7

TIPUL TRONSONULUI : Racordare

Viteza sunetului in materialul ghidului : 3170.0000 m/s
Frecventa de rezonanta : 22500.0000 Hz
Modulul de elasticitate : 21000.0000 N/m»
Incrementul de calcul : 1.0000 mm
Diametrul initial : 15.0000 mm
Pasul initial : 317
Pasul final : 320
Lungimea tronsonului : 3.0000 mm
Raza profilului : - 3.0000 mm

DATELE TRONSONULUI NR. 8

TIPUL TRONSONULUI : Cilindric

Viteza sunetului in materialul ghidului : 3170.0000 m/s
Frecventa de rezonanta : 22500.0000 Hz
Modulul de elasticitate : 21000.0000 N/m²
Incrementul de calcul : 1.0000 mm
Diametrul initial : 9.0000 mm
Pasul initial : 320
Pasul final : 435
Lungimea tronsonului : 115.0000 mm

DATELE TRONSONULUI NR. 9

TIPUL TRONSONULUI : Cilindric

Viteza sunetului in materialul ghidului : 3170.0000 m/s
Frecventa de rezonanta : 22500.0000 Hz
Modulul de elasticitate : 21000.0000 N/m²
Incrementul de calcul : 1.0000 mm
Diametrul initial : 10.0000 mm
Pasul initial : 435
Pasul final : 440
Lungimea tronsonului : 5.0000 mm

Transpond 1 = 64.0000 mm
Transpond 2 = 76.0000 mm
Transpond 3 = 142.0000 mm
Transpond 4 = 206.0000 mm
Transpond 5 = 257.0000 mm

Transpond 6 = 317.0000 mm
Transpond 7 = 320.0000 mm
Transpond 8 = 435.0000 mm
Transpond 9 = 440.0000 mm

