

MINISTERUL EDUCATIEI SI INVATAMINTULUI
INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VULIA" TIMISOARA
FACULTATEA DE MECANICA

Ing. PAULSCU GHEORGHE

CONTRIBUTII LA OPTIMIZAREA TEHNOLOGIEI DE
PRELUCRARE DIMENSIONALA CU UNDE ULTRASONICE
A MATERIALILOR FRAGILE SI DURE

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

Conducător științific:
Prof.dr.des.șt.ing. AUREL NANU

-1987-

INSTITUTUL POLITEHNIC TIMISOARA	
521.068	668
Valoare	359
Data	9

C U R I N U

Pag.

1. INTRODUCERE, DOMENII DE APLICARE, OBIECTIVELE PRINCIPALE ALE TEZEI.....	
1.1. Introducere.....	
1.2. Domenii de aplicare.....	
1.3. Obiectivele principale ale tezei.....	
2. ELUCIDAREA BAZELOR FIZICE SI FENOMOLOGICE LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ULTRASONICA.....	1
2.1. Procesul de eroziune ultrasonica.....	1
2.2. Parametri tehnologici si factorii care influenteaza prelevarea de material la eroziunea ultrasonica.....	4
2.2.1. Prelucrabilitatea materialelor prin eroziune ultrasonica.....	5
2.2.2. Relatiile de calcul a parametrilor tehnologici la eroziunea ultrasonica.....	9
2.2.3. Caracteristicile particulelor abrazive utilizate la eroziunea ultrasonica.....	11
2.2.4. Analiza unor aspecte teoretice si experimentale asupra detaşării materialului prin eroziune ultrasonica.....	14
2.3. Aprecieri asupra productivitatii, uzurii sculei, preciziei de prelucrare si a calitatii suprafetei generate prin eroziune ultrasonica.....	17
2.3.1. Productivitatea prelucrării.....	17
2.3.2. Uzura obiectului de transfer si precizia de prelucrare.....	21
2.3.3. Calitatea suprafetei generate prin eroziune ultrasonica.....	23
2.4. Limitele procedurii de prelucrare prin eroziune ultrasonica.....	24
2.5. Căi pentru îmbunătăţirea performanţelor eroziunii ultrasonice.....	25
2.5.1. Îmbunătăţirea circulaţiei suspensiei abrazive în spaţiul de lucru.....	25
2.5.2. Alte soluţii de optimizare în prelevarea de material la eroziune ultrasonica.....	25
3. CERCETARI PRIVIND TRANSDUCTORILE ULTRASONICE UTILIZATE LA EXPERIMENTARI.....	27
3.1. Fenomenul de magnetostricţiune.....	27

3.2.	Materiale magnetostrictive metalice.....	30
3.3.	Ferite magnetostrictive.....	30
3.4.	Ecuațiile efectului magnetostrictiv.....	33
3.5.	Cercetări privind proiectarea și testarea unor transduc- toare magnetostrictive tip pachet.....	34
3.5.1.	Determinarea condițiilor de rezonanță mecanică a transductorului.....	35
3.5.2.	Dimensionarea geometrică a transductorului din tale de nichel.....	38
3.5.3.	Verificarea frecvenței de rezonanță a transduc- toarelor.....	40
3.5.4.	Cercetarea puterii debitate de transductoare.....	44
3.5.5.	Calculul electric al transductoarelor.....	52
4.	STUDIUL TEORETIC AL CONCENTRATOARELOR ULTRASONICE.....	60
4.1.	Introducere.....	60
4.2.	Ecuația diferențială a oscilațiilor concentratoarelor...	60
4.3.	Studiul concentratoarelor ultrasonice de formă exponen- țială.....	63
4.4.	Studiul concentratoarelor ultrasonice de formă hiperboli- că sau catenoidală.....	69
4.5.	Studiul concentratoarelor ultrasonice de formă conică...	72
4.6.	Studiul concentratoarelor ultrasonice în trepte.....	74
4.6.1.	Studiul vibrației longitudinale a unei bare de secțiune constantă.....	74
4.6.2.	Studiul concentratoarelor în trepte (ecuațiile generale).....	75
5.	CERCETĂRI PRIVIND REALIZAREA CONSTRUCTIVĂ A UNEOR CONCENTRA- TOARE ULTRASONICE.....	82
5.1.	Concentratore ultrasonice exponențiale.....	82
5.2.	Concentratore ultrasonice hiperbolice sau catenoidale..	84
5.3.	Concentratore ultrasonice de formă ^{conică} și cu flanșă în nodul de oscilație.....	85
5.4.	Concentratore ultrasonice cilindrice în trepte.....	85
5.5.	Parametri concentratoarelor ultrasonice în trepte expri- mați în valori raportate.....	87
5.6.	Parametri concentratoarelor ultrasonice exponențiale exprimați în valori raportate.....	90
5.7.	Parametri concentratoarelor ultrasonice catenoidale ex- primate în valori raportate.....	93
5.8.	Parametri concentratoarelor ultrasonice conice roțite în valori dimensionale.....	94

6. CERCETARI EXPERIMENTALE PRIVIND BLOCURILE ULTRASONICE, MĂMĂRĂȚI ACUSTICE ȘI PRELUCRAREA CONCENTRATOARELOR.....	97
6.1. Prezentarea blocurilor ultrasonice realizate.....	97
6.2. Cercetări privind măsurările acustice ale blocurilor ultrasonice	101
6.2.1. Modelul mecanic al sistemului oscilator și condiția de rezonanță.....	101
6.2.2. Prezentarea aparatului pentru măsurări acustice	105
6.3. Cercetări experimentale privind realizarea concentra- toarelor ultrasonice.....	111
7. CERCETARI EXPERIMENTALE DE PRELUCRARE DIMENSIONALA PRIN EROZIUNE ULTRASONICA A UNOR MATERIALE FRAGILE ȘI DURE.....	114
7.1. Prezentarea utilajelor și a condițiilor în care s-au făcut experiențele.....	114
7.1.1. Sistemele de avans utilizate.....	114
7.2. Cercetări privind influența formei concentratoarelor ultrasonice asupra parametrilor <i>tehnologici</i>	118
7.3. Determinarea experimentală a unor forțe statice de avans optime.....	121
7.3.1. Caracterizarea forțelor statice de avans la prelu- crarea cavităților neștrăpune de secțiune dreptunghiulară.....	121
7.3.2. Caracterizarea forței statice de avans la prelucra- rea orificiilor străpune de secțiune circulară	124
7.4. Cercetări asupra <i>UZURII</i> obiectului de transfer și preciziei de prelucrare dimensională.....	137
7.5. Cercetări experimentale privind modificarea curvității sub microscopie a părții active a obiectelor de trans- fer.....	137
7.6. Cercetări experimentale ale calității suprafețelor gene- rate prin eroziune ultrasonică.....	141
7 7.6.1. Factorii care influențează rugozitatea, impor- tanța calității suprafețelor.....	141
7.6.2. Prezentarea aparatului și a principalelor para- metri de profil a rugozității.....	145
7.6.3. Cercetări experimentale privind rugozitatea su- prafețelor generate prin eroziune ultrasonică pe obiecte din sticlă.....	146
7.6.4. Studiul cu ajutorul funcțiilor aleatoare a ru- gozității suprafeței.....	151
8. CONCLUZII FINALE.....	162

1. INTRODUCERE. DOMENIUL DE APLICARE OBIECTIVELE PRINCIPALE ALE TEZEI

1.1. Introducere

În diferite domenii ale tehnicii se utilizează materiale cu caracteristici mult diferite de ale metalelor și aliajelor curenți a căror prelucrare dimensională prin metode și procedee tradiționale devine din ce în ce mai dificilă, sau chiar imposibilă. Așa sînt de exemplu materiale cu fragilitate și duritate ridicată: sticla, cuarțul, materiale ceramice, germaniul, siliciul, safirul, rubinul, feritele, titanatul de bariu, porțelanul, marmora, carburile metalice (aliajele dure), oțelurile călite, diamantul și altele. Majoritatea dintre acestea fiind neelectroconductoare.

Odată cu dezvoltarea în ultimii ani și în țara noastră a industriei optice, mecanicii fine, industriei electrotehnice și electronice, radiotehnice, a tehnicii de calcul și telecomunicațiilor, aparatelor mecanice și electrice de măsură și control, industriei ceasurilor și bijuteriei, cît și în construcții de mașini a producției de scule așchietoare și deformare plastică etc., apare necesitatea introducerii unor noi tehnologii mai eficiente. Tehnologiile neconvenționale sînt apărute și continuă să se dezvolte ca o necesitate obiectivă de a completa neajunsurile tehnologiilor tradiționale. Unul din procedeele neconvenționale fiind și prelucrarea dimensională prin eroziune ultrasonică care se aplică cu precădere la materiale fragile electroizolante pentru degresări și finisări, dar și la materiale electroconductoare în special la operații de finisare [65], [127], [143], [157], [198], [234], [251], [252] .

În țară se resimte nevoia acută de a se asimila producția de mașini și echipamentul tehnologic necesar pentru acest procedeu. La fel este necesară elaborarea unor tehnologii adecvate pentru prelucrarea pieselor din materialele amintite mai sus, mai ales că în țări cu tehnică dezvoltată, se produc astfel de utilaje chiar în

producție de serie [128], [139], [150], [166], [179], [234] și se elaborează tehnologii de prelucrare. Cercetări de laborator au fost inițiate și în țara noastră la Institutul Politehnic București, Institutul Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, Institutul Politehnic Cluj-Napoca și alte centre universitare și institute de cercetare.

În 1972 se realizează la Facultatea de Mecanică din Timișoara catedra TCM, primul model experimental de mașină românească realizată cu componente indigene [97], [210 a], [211]. Tot aici se produc în anii următori mai multe mașini specializate pentru finisat filiere [210 a]. Au luat ființă colective de cercetare în domeniul aplicațiilor ultrasunetelor la prelucrări și curățiri la întreprinderile Electrotimș, Timișoara și AZM Timișoara, unde încep să se producă primele prototipuri omologate.

Cu toate aceste dezvoltări pe plan mondial și național procedeul nu este suficient studiat și nu se cunosc în detaliu toate posibilitățile de utilizare practică. Aceasta datorită fenomenelor complexe care-l însoțesc și a interdependențelor factorilor de care depinde prelevarea de material. Extinderea lui este limitată de productivitatea scăzută, adâncimi și secțiuni mici ale alezajelor și cavitațiilor prelucrate, putere limitată a blocurilor ultrasonice. Cu toate acestea prelucrarea dimensională prin eroziune abrazivă ultrasonică este de neînlocuit într-o serie de operații tehnologice la realizarea alezajelor și cavitațiilor profilate prin copierea conturului obiectului de transfer (scalei) cu precizie ridicată (0,01 mm) în piese fragile electroizolante, dar și electroconductoare. Stratul de suprafață al suprafeței generate nefiind afectat de transformări structurale importante, iar calitatea suprafeței este bună.

1.2. Aplicații de aplicare

Așa cum reiese din aplicațiile ultrasunetelor în tehnica prelucrărilor dimensionale semnalată în bibliografie, principalele direcții în care s-a extins procedeul sînt:

1.) Debitarea cristalelor și a semifabricatelor semiconductor, ceramice, sticlă, ferite etc., în plăcuțe cu diferite grosimi, folosindu-se scule tip lamă, una sau mai multe cu grosimi mici 0,08 mm [128], [234] care înlocuiesc ^{discurile} diamantate cu grosimea de 1...1,2 mm.

2.) Decuparea și perforarea pieselor din plăcuțe de diferite forme și dimensiuni.

3.) Prelucrarea orificiilor, cavităților și canalelor de diferite forme.

4.) Finisarea filierelor din carburi metalice și diamant.

5.) Ascuțirea și profilarea plăcuțelor așchietoare din materiale mineraloceramice și carburi metalice.

6.) Finisarea stașțelor și matrițelor din carburi metalice și oțeluri aliate tratate termic.

7.) Gravarea, marcarea și ștamparea unor piese fragile și dure, în special electroizolante.

1.3. Obiectivele principale ale tezei

Având în vedere stadiul actual și perspectivele de dezvoltare în țară a tehnologiilor neconvenționale în general și în mod special a prelucrării dimensionale prin eroziune ultrasonică a materialelor fragile și dure, autorul și-a propus să realizeze în teză următoarele obiective:

1.) Cercetarea teoretică și experimentală a concentrateurilor ultrasonice de formă conică, exponențială, ostenoidală și cilindrică în trepte, în tratate unitară a relațiilor de dimensionare și verificare, pe baza datelor existente în literatura de specialitate. Concentrateurile compuse nu sînt tratate în teză. Unele aspecte legate de concentrateurile compuse sînt tratate de autor în [172].

Cercetarea transductoarelor magnetostructive din tole de nichel și ferite de tip pachet cu două coloane, a relațiilor de calcul pentru dimensionare și verificare, cît și condiții de realizare. Un studiu al transductoarelor și concentrateurilor era necesar deoarece parametrii acustici, frecvența și amplitudinea deplasării au rol important asupra factorilor tehnologici la prelucrare.

2.) Realizarea unor blocuri ultrasonice cu transductoare din nichel și ferite, unele variante cu posibilitatea de schimbare a concentrateurilor prin înșurubare. Realizarea blocurilor cu caracter experimental s-a efectuat după recomandările existente în literatura tehnică și de ultrasunete al Facultății de Mecanică Timișoara [17], [20], [211 a].

3.) Cercetarea fenomenului de eroziune ultrasonică și a parametrilor tehnologici la prelucrarea prin eroziune ultrasonică a cavităților și orificiilor înfundate și străpuse de secțiune

dreptunghiulară și circulară în piese din sticlă de diferite calități. În capitolul 7 se prezintă rezultatele obținute la prelucrarea sticlei silice-calce-sodică, cât și a unor variante de sticlă optică de tip eron (crown) de fabricație românească C916641R și sovietică K 100, K 108 și LK 105 destinată fabricării unor prize și lentile pentru aparatul optic.

Aici s-au urmărit probleme de prelevare de material, viteze de prelucrare, influența forței statice de avans, uzura obiectului de transfer și influența sa asupra preciziei și calității suprafeței.

Teza cuprinde 8 capitole extinzând pe 155 pagini. Contine 152 figuri și 38 tabele. La elaborare au fost consultate 294 titluri bibliografice, 22 fiind lucrări științifice ale autorului din care 12 personale și 10 în colectiv.

Autorul exprimă în primul rând profunza recunoștință pentru conducătorul științific prof.dr.doc.șt.ing. AUREL MANU pentru modul competent și generos în care l-a îndrumat la elaborarea lucrării. Deasemenea autorul mulțumește tuturor colegilor catedrei Tehnologia Mecanică pentru ajutorul dat la realizarea blocurilor ultrasonice și la elaborarea lucrării.

Mulțumesc conducerii catedrei TCM pentru sprijinul acordat în efectuarea cercetărilor în laboratorul de ultrasunete. Recunoștința mea se îndreaptă în primul rând către prof. emerit dr.ing. GHEORGHE SAVII, conducătorul colectivului de cercetare în ultrasunete, de a mă fi acceptat ca și colaborator în colectivul de cercetare și îndrumările date la realizarea lucrării. Caldă mulțumiri expris colegilor dr.ing. TUDOR ICLANZAN, dr.ing. NICA MIHAIL pentru îndrumările eficiente date la efectuarea experimentelor cât și colegului ș.ing. IOAN GURBAN pentru asamblarea blocurilor ultrasonice și asistența tehnică dată la efectuarea experimentelor.

Autorul mulțumește conducerii și colegilor catedrei Mecanică și Rezistența Materialelor, în special dr.ing. TITUS CIOARA pentru ajutorul dat în măsurările acustice ale blocurilor ultrasonice.

Mulțumesc conf.dr.ing. LUCIAN BĂGIU și ș.ing. S. COSTIN pentru interpretarea și efectuarea probelor metalografice, cât și tehnicienilor E. OLARIU pentru strunjirea reperelor componente ale blocurilor și C. ȘTEF pentru efectuarea unor părți grafice din teză.

Mulțumesc colectivului de la Laboratorul de studii metalelor prof.dr.ing. MARIN TRUSCULESCU și ș.l dr.ing. VICTOR BUDAU

pentru ajutorul dat la determinarea *durității* sub microcercină a pieselor din sticlă de sodiu și sticlă optică de diferite calități și a microfisurilor pentru determinarea gradului de fragilitate.

În mod deosebit mulțumesc conducerii Întreprinderii Electrotinaș Timișoara, colectivului de ultrasunete ing. HANI VIOREL-MINAI, ing. MILITARU CORNEL, ing. MURTEAN NICOLAE și celorlalți colegi pentru ajutorul acordat la efectuarea experimentelor pe mașina NPU-01 ELECTROTINIS.

Autorul mulțumește colegilor de la Facultatea de Mecanică și Electrotehnică care l-au sprijinit la efectuarea lucrării cât și colaboratorilor de la Întreprinderea ASM Timișoara, Întreprinderea Optică Timișoara și Întreprinderea Mecanică Timișoara.

CAPITOLUL 2

ELUCIDAREA BAZELOR FIZICE SI TEHNOLOGICE LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ULTRASONICA

2.1. Procesul de eroziune ultrasonica

Procedeele de prelucrare prin eroziune ultrasonica face parte din metoda de prelucrare dimensională prin eroziune în construcția de mașini și aparate fiind una din aplicațiile active ale undelor ultrasonice în tehnică. El face parte din tehnologiile neconvenționale, care în ultimii ani au cunoscut o dezvoltare rapidă datorită utilizării unor materiale cu proprietăți fizice-chimice excepționale ca fragilitate, duritate, refractaritate, greu sau imposibil de prelucrat la precizie dimensională corespunzătoare prin alte metode și procedee. Procedeele de prelucrare prin eroziune ultrasonica se aplică la prelucrarea dimensională a obiectelor din materiale fragile, electroizolante sau electroconductoare la producție individuală sau de serie, pentru cavități, orificii, rebitări și generări de suprafețe de dimensiuni în general mici [126] [203] [65] [200] [198] [143], [157].

Principial se cunosc două variante de prelucrare prin eroziune ultrasonica:

- 1.) cu abraziv liber delegat (fig.2.1) vehiculat în spațiul de lucru cu ajutorul unui lichid purtător (de obicei apă); fiind varianta cea mai răspândită;
- 2.) cu abraziv legat (fig.2.2.) particulele abrazive de obicei din diamant, fiind impregnate pe suprafața activă a obiectului de

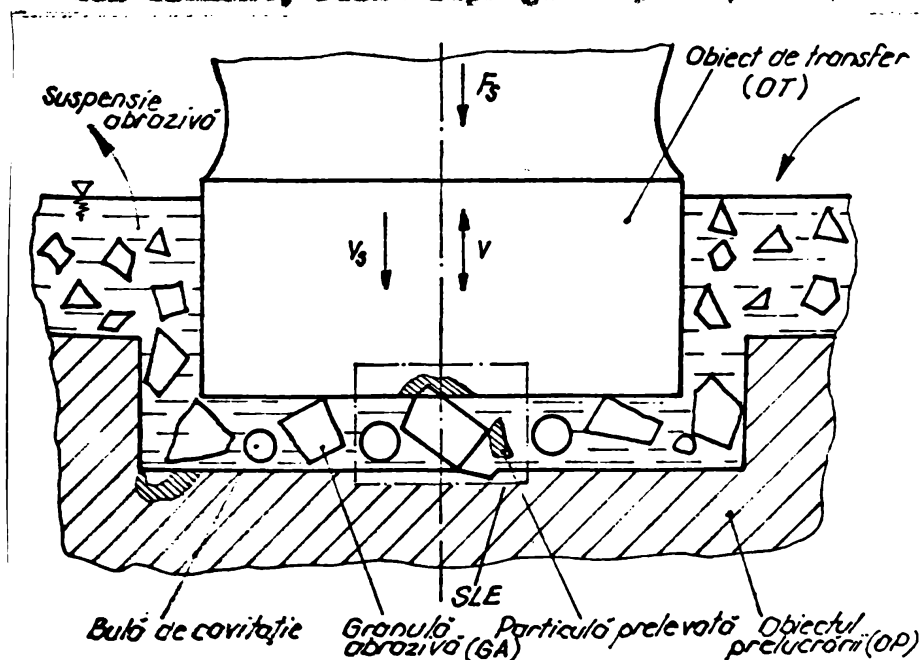


Fig.2.1.

transfer, variantă dezvoltată în ultimii ani mai puțin răspândită. Intre obiectul de transfer OT și obiectul prelucrării OT existind o mișcare relativă, fie prin rotirea OT (mișcarea I) sau OP (mișcarea II). Lichidul are rolul de răcire, evacuarea produselor

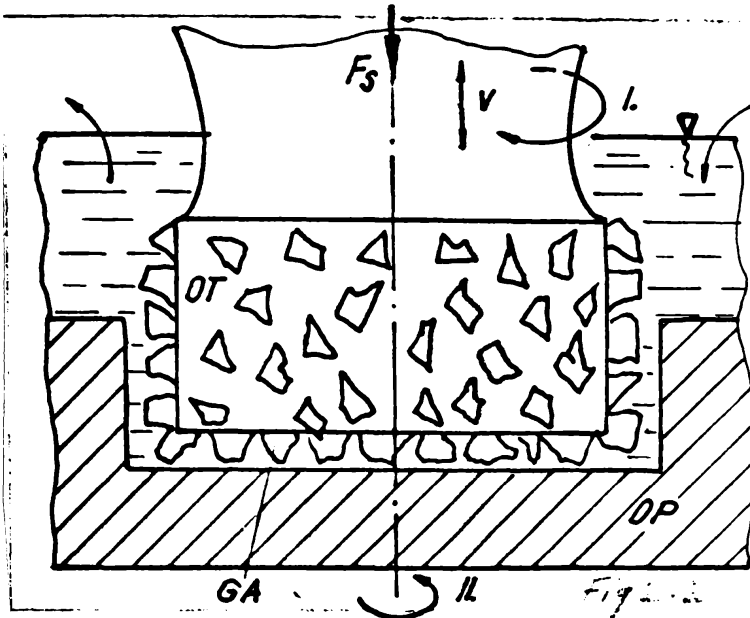


Fig.2.2.

nelegat), fig.2.1. este următorul: energia cinetică de vibrație cu frecvență ultrasonică $f = 16 \dots 35$ kHz a obiectului de transfer OT (sculă), se transmite obiectului prelucrării OP (piesă) prin intermediul particulelor abrazive GA, numite generic "granule" abrazive fără a ne referi la mărimea lor; găsite într-un lichid purtător (apă suspensie abrazivă (granule și apă în proporție volumică 40...50 %) este circulată în spațiul de lucru, printr-un circuit de pompare (stropire, aspirație sau refulare) cu scopul înlocuirii abrazivului uzat cu altul proaspăt, evacuării produselor de eroziune, răcire, favorizarea unor fenomene de cavitație ultrasonică, și asigurării unui cuplaj acustic bun în spațiul de lucru.

Prelevarea de material este condiționată de proprietățile de eroziune abrazivă a granulelor, de microașchieresa acestora, trebuie însă ca duritatea granulelor abrazive să fie mai mare decât a piesei sau cel puțin egală, condiție cerută ca și la așchieresa clasică.

Acțiunea combinată și simultană a următoarelor efecte [280], [283], [27], [198], [157], [143], duc la prelevarea de material:

- 1.) Transmiterea directă, neajlocită a șocurilor dinamice a obiectului de transfer OT prin granulele abrazive GA la obiectul prelucrării OP;
- 2.) Accelerarea și impactul GA libere din spațiul de lucru cu suprafața OP;
- 3.) Eroziunea cavitațională ultrasonică a lichidului suspensiei abrazive;
- 4.) Acțiunea chimică a lichidului asociată cu proprietățile acestuia de a fi un mediu de cuplaj acustic bun între OT, GA și OP pentru transmiterea undelor de șoc.

de eroziune (spălare), cît și de cuplaj acustic între OT și OP. Evident că prin această variantă nu se pot genera suprafețe diferite de ale unor corpuri de rotație prin copierea formei macroscopice a profilului OT.

Mecanismul generării suprafețelor și prelevării de material la eroziunea ultrasonică cu suspensie abrazivă circulată în spațiul de lucru (abraziv

Primul factor este dominant în acțiunea de prelevare a materialului din OP. Pentru ca acest efect să fie eficient, între OT și OP se creează prin mecanismul de avans al sașinii, o forță statică $F_s = 0,01 \dots 0,15 \text{ daN}$.

Sub acțiunea șecurilor mecanice repetate transmise de OT cu frecvență ultrasonică granulelor abrazive mai mari creează o rețea fină de microfisuri în stratul de suprafață, fragil al OP. Aceste microfisuri progresază în adâncime producând desprinderi de microparticule din OP, coplindu-se la scară microscopică forța OT în OP. Aceste șecuri afectează și stratul de suprafață al OT prin desprinderi de microparticule, producând uzură sa.

Ponderea de material prelevat prin accelerarea și impactul GA libere, de dimensiuni mai mici găsite în interstițiul frontal OT-OP, este de 4.....20% [260]; din prelevarea cu abrazivi având granulație mai mare.

GA de dimensiuni mici privesc șecul de la OT sînt accelerate și la impactul lor cu OP transferă energia părții de prelucrat.

O serie de cercetători printre care și de țara noastră [97], [260], [62], au scos în evidență rolul deosebit al forței statice în prelevarea de material corelată cu înlocuirea abrazivului uzat cu altul proaspăt și evacuarea produselor de eroziune. Concluzii în acest sens dă și autorul prezentei teze în capitolul 7. De altfel, încercările experimentale în lipsa forței statice între OT și OP au dat rezultate slabe.

Acțiunea de eroziune cavitațională ultrasonică în spațiul de lucru și a eroziunii chimice, nu sînt complet elucidate, experiențele arată că ele au efect în prelevarea de material [198], [127], [52], [6], ponderea fiind mai mică decît a primului factor. Lichidul purtător de abraziv este supus la întinderi și compresii ciclice, în ritmul vibrației ultrasonice a OT, la faza de tracțiune, întindere, se produce rupere în masa lui formîndu-se microbule cavitaționale, care sînt favorizate și de *incluziunile* gazease și prezente GA, care în faza de compresie [5], [6], se distrug prin implozie producînd șecuri hidraulice și presiuni locale ridicate. Sub acțiunea acestora lichidul pătrunde în rețeaua de fisuri a OP și prin efect de pană mecanică desprinde microparticule din OP. Deși în literatură [53], [127], [198], sînt exprimate păreri contradictorii cu privire la rolul cavitației ultrasonice în prelevarea de material încercările de prelucrare fără lichid, numai cu GA în aer nu au dat rezultate scontate. Datorită cuplajului acustic asigurat de lichid în spațiul de lucru prezența lui la prelucrarea prin eroziune ultrasonică este obligatorie.

Cercetările Institutului de Acustică din URSS [198], [127] [283], și a altor cercetători, arată că fenomenul de cavitație ultrasonice (de altfel insuficient studiat), are efecte diferite asupra prelevării de material. Pe de o parte modifică concentrația abrazivului sub OT, în partea centrală se rarefiază, existînd o mișcare spre margine și efectul de șoc al primului factor scade, iar pe de altă parte accelerează mișcarea abrazivului în spațiul de lucru, ușurînd înlocuirea celui uzat, ceea ce duce la mărirea prelevării.

Coroborarea în spațiul de lucru elementar SLE (fig.7.1) între șocurile dinamice directe și indirecte, efectul cavitației ultrasonice, efectul undelor de șoc hidraulice, împreună cu o circulație optimă a suspensiei abrazive de reînprospătare a abrazivului uzat, sînt esențiali pentru prelucrarea prin eroziune ultrasonice.

Agenti erozivi în spațiul de lucru sînt: granulele abrazive, bulele de cavitație ultrasonice de la vibrația OT și implozie bulelor cavitaționale în mediu lichid. Efectele termice, electrochimice care însoțesc cavitația au un rol secundar. [283].

7.7. Parametri tehnologici și factori care influențează prelevarea de material la vibrația ultrasonice

Filmările rapide ale procesului, efectuate de Eiacenke P.F., Kazantev V.F. și alții [128] cu viteze de 2000...4500 cadre pe sec. la prelucrarea sticlei cu OT de 6 mm diametru, $f = 20$ kHz și amplitudinea $\xi_m = 35 \mu\text{m}$, cu abraziv corbură de bor B_4CBr_2 în apă cu concentrația 50% (volumic), în lumină reflectată; au arătat că la început sub OT în centrul ariei sale apare fenomenul de cavitație care se amplifică treptat de aceea scade concentrația abrazivului sub sculă în centru și se concentrează spre periferie pe o zonă inelară, unde se amorosează prelevarea de material și continuă spre centru în zone inelare cu reze din ce în ce mai mici. Ruperea particulelor se efectuează de către granulele mai mari care privesc șocul mecanic de la OT. Probabilitatea formării craterelor și deci a particulelor este relativ mică, una la câteva sute de granule sub OT. Unele particule cu dimensiuni mai mari ($50 \mu\text{m}$) au forme semicirculare, dar majoritatea sînt particule mici ($10 \mu\text{m}$) de formă triunghiulară. Se detașează circa 50...60 particule pe secundă adică o particulă la 20 perioade de oscilație ale OT, apariția lor avînd un caracter aleator după legea de distilatie a lui Poisson. Ele au înălțimea $h = 1,1...1,7 \mu\text{m}$ și lățimea $b = 1,7 \mu\text{m}$, deci circa 1% din

dimensiunea abrazivului ($100...125 \mu\text{m}$) iar raportul $da/2 \left\{ \begin{array}{l} n = 1,7... \\ ..2. \end{array} \right.$ La abraziv mai fin $B_4C \text{ nr } 6, h = 5...10 \mu\text{m} = (6...17)\%da$. Cu creșterea forței statice F_s , crește numărul și dimensiunea particulelor prelevate.

2.2.1. Prelucrabilitatea materialelor prin eroziune ultrasonică

Prelucrabilitatea materialelor prin procedeul ultrasonic, poate fi apreciată indirect prin criteriul de fragilitate t_x , introdus de Ujik G.V. [127], [128], care exprimă raportul între rezistența la rupere la forfecare $\tau_r = R_f$ și rezistența la rupere la tracțiune $\sigma_r = R_m$ a materialului piesei

$$K_{pr} = t_x = \frac{\tau_r}{\sigma_r} = \frac{R_f}{R_m} \quad (2.1)$$

Dacă $t_x > 1$, ruperea are caracter fragil, iar dacă $t_x \leq 1$ ruperea are caracter plastic, înainte de limita de rupere se produc deformări plastice însemnate. Markov A.I. [127] clasifică materialele după prelucrabilitatea lor prin eroziune ultrasonică în trei grupe:

I. Materiale cu prelucrabilitate bună: la care $K_{pr} > 2$, (sticlă, cuarț, ceramice, germaniu, siliciu, ferite etc), care au fragilitate ridicată și duritate nu prea mare și care ^{nu} suferă deformări plastice înainte de rupere ($R_f > R_m$)

II. Materiale cu prelucrabilitate medie, la care $K_{pr} = 1...2$ (carburi metalice, oțeluri cılıte, aliaje de titan etc., care sub acțiunea granulelor abrazive suferă inițial deformări elastice, apoi microdeformații plastice, ruperea are un caracter fragilo-plastic după fenomenul de întărire (ecruisare) a materialului)

III. Materiale neprelucrabile sau greu prelucrabile, la care $K_{pr} < 1$ (otelul moale, cuprul, aluminiul etc., materiale care au deformări plastice mari înainte de rupere, $R_f < R_m$) în care granulele abrazive se încetărează fără a preleva material în cantități rentabile economic.

Procedeul ultrasonic este rațional să se aplice la materialele din prima grupă și doar parțial la cele din grupa a doua, pentru finisări și semifinisări, după ce în prealabil au fost degreșate prin alte procedee neconvenționale (eroziune electrică, laser etc) sau convenționale (rectificare etc)

Criteriul de fragilitate (prelucrabilitate) K_{pr} poate fi determinat prin măsurarea durității sub microsarcină cu penetrator

de diamant având unghiul la vîrf 136° (la microdurimetru PMT-3, FPYTI etc.), cu relația [127]:

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

în care $l[\mu\text{m}]$ este lungimea fisurilor; $d[\mu\text{m}]$ - lungimea diagonalei asprentei; μ - coeficientul lui Poisson; $F[\text{daN}]$ - forța care încarcă penetratorul.

În teză se prezintă rezultatele obținute la prelucrarea prin eroziune ultrasonică a unor semifabricate din sticlă de diferite calități, vezi capitolul 7. Pentru variante de sticlă: sticlă silico-calcico-sodică (denumită în continuare sticlă de sodiu sau natriu Na); sticlă optică de tip cron (crown) normal C 5166412 fabricată în țară; cron ușor LK 105 și cron normal K 100, ultimele de fabricație URSS; s-a determinat criteriul de fragilitate cu ajutorul microdurimetrului PMT-3. S-a determinat și duritatea sub microscarină corespunzătoare masei 200g (200 gf) cât și suma lungimilor microfisurilor după timpul de 15 secunde de încălzire și menținere a sarcinii. După eliminarea rezultatelor cu erori grosolane, în tab.2.1 se dau valorile obținute pe 12 replici (determinări repetate în mod identic). În partea inferioară a tabelului se dau și prelucrarea statistică a măsurătorilor. Mărimile d , l , K_p și H_V pot fi variabile aleatoare caracterizate de medie m - care dă centrul de grupare și abaterea medie pătratică σ a mulțimii (colectivității) respectiv dispersia $\sigma^2 = D$, care măsoară gradul de împrăștiere a variabilei față de medie (STAS/839-72; STAS 2631-72; STAS 7122-72). În practică se efectuează un număr nu prea mare de determinări experimentale ($n = 5 \dots 20$), iar parametri statistici se estimează prin \bar{x} - media aritmetică de sondaj (selecție, probă) și respectiv s - abaterea medie pătratică (corectată) de sondaj. Se utilizează variabila aleatoare t cu o repartiție Student pentru a determina intervalele de încredere [240], [196] ale mărimilor cercetate

$$t = \frac{\bar{x} - m}{s} \sqrt{n} \quad (2.3)$$

Admițând un nivel de semnificație (risic) $\alpha = 0,05$ bilateral atunci intervalul de încredere care acoperă cu probabilitatea $P = 1 - \alpha = 0,95$ valoarea parametrului estimat (media m) va fi:

$$\bar{x} - I \leq m \leq \bar{x} + I \quad (2.4)$$

$$\text{în care: } I = \left(\frac{t}{2}\right) \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.5)$$

Tabelul 2.1

STICHI de Na₂μ = 0,160 Cron C516641μ=0,209 Cron uger LR105 μ=0,184 Cron K100 μ = 0,210

Nr.	C516641		Cron		uget		LR105		Cron		K100		μ = 0,210			
	g μm	Y μm	H ₂ μm	H ₂ dcm/μm ²	g μm	Y μm	H ₂ μm	H ₂ dcm/μm ²	g μm	Y μm	H ₂ μm	H ₂ dcm/μm ²	g μm	Y μm	H ₂ dcm/μm ²	
1	29,5	96	2,38	434	76,1	66	2,60	950	22,5	54	2,75	735	21,0	57	2,85	840
2	29,0	54	2,34	448	25,9	65	2,59	558	22,8	59	2,72	708	20,2	54	2,78	916
3	30,1	58	2,42	416	26,4	68	2,66	532	21,4	53	2,85	807	21,3	58	2,84	829
4	30,9	97	2,35	406	27,0	68	2,58	512	22,5	52	2,62	733	21,6	99	2,85	792
5	28,1	94	2,41	476	25,7	65	2,60	562	22,0	53	2,76	760	22,0	60	2,84	760
6	29,0	96	2,42	448	26,2	64	2,49	540	21,6	54	2,73	792	21,8	62	3,03	776
7	29,8	55	2,32	424	26,5	66	2,55	528	22,1	52	2,68	792	20,8	56	2,80	858
8	28,0	52	2,34	478	25,0	65	2,69	994	21,9	52	2,71	768	21,1	98	2,87	830
9	29,6	98	2,46	430	27,0	72	2,78	512	22,0	54	2,82	760	21,6	58	2,79	792
10	30,0	60	2,92	418	26,5	70	2,74	528	23,0	56	2,79	694	21,4	98	2,83	808
11	29,6	61	2,59	430	26,0	67	2,66	546	22,7	54	2,72	714	21,8	99	2,82	776
12	29,0	62	2,69	448	25,9	66	2,62	552	22,5	63	3,33	733	22,3	61	2,86	736
Σ	29,35	56,9	2,43	438,0	25,17	66,90	2,63	542,0	22,33	54,33	2,79	746,16	21,40	58,33	2,84	808,50
μ	0,76	3,0	0,11	22,5	0,96	2,42	0,08	23,0	0,41	2,99	0,17	33,61	0,57	2,14	0,06	48,44
σ	0,48	1,9	0,07	14,3	0,35	1,54	0,05	14,6	0,26	1,90	0,11	21,35	0,36	1,36	0,04	30,78
μ ₁	28,86	94,9	2,36	423,6	24,81	65,36	2,57	528,2	22,06	52,43	2,67	724,80	21,04	56,96	2,80	777,71
μ ₂	29,83	98,8	2,50	452,3	25,33	68,49	2,68	557,4	22,59	56,23	2,90	767,52	21,77	59,69	2,88	839,28

l este incertitudinea sau eroarea limită, n - numărul de replici iar $\nu = n - 1$ numărul gradelor de libertate; $t_{\alpha/2, \nu}$ - variabila t - Student tabelată. Pentru $n = 12$; $\nu = 11$; $P = 1 - \alpha = 0,95$ din [240] rezultă $t_{0,025;11} = 2,201$.

Limitele intervalelor de încredere $m_1 = \bar{m} - l$ și $m_2 = \bar{m} + l$ sînt date în tab.2.1. Se observă că sticlele optice au K_p mai mare decît sticla de sodiu. În afară de relația (2.2) ^{sa cercetat} dacă există o relație mai simplă de legătură între K_p și l . Pentru aceasta se aplică analiza regresiei liniare la datele din tab.2.1 obținîndu-se ecuații ale regresiei liniare de forma $y = A + Bx$ și coeficientul de corelație r care s-au trasat în fig. 2.3.

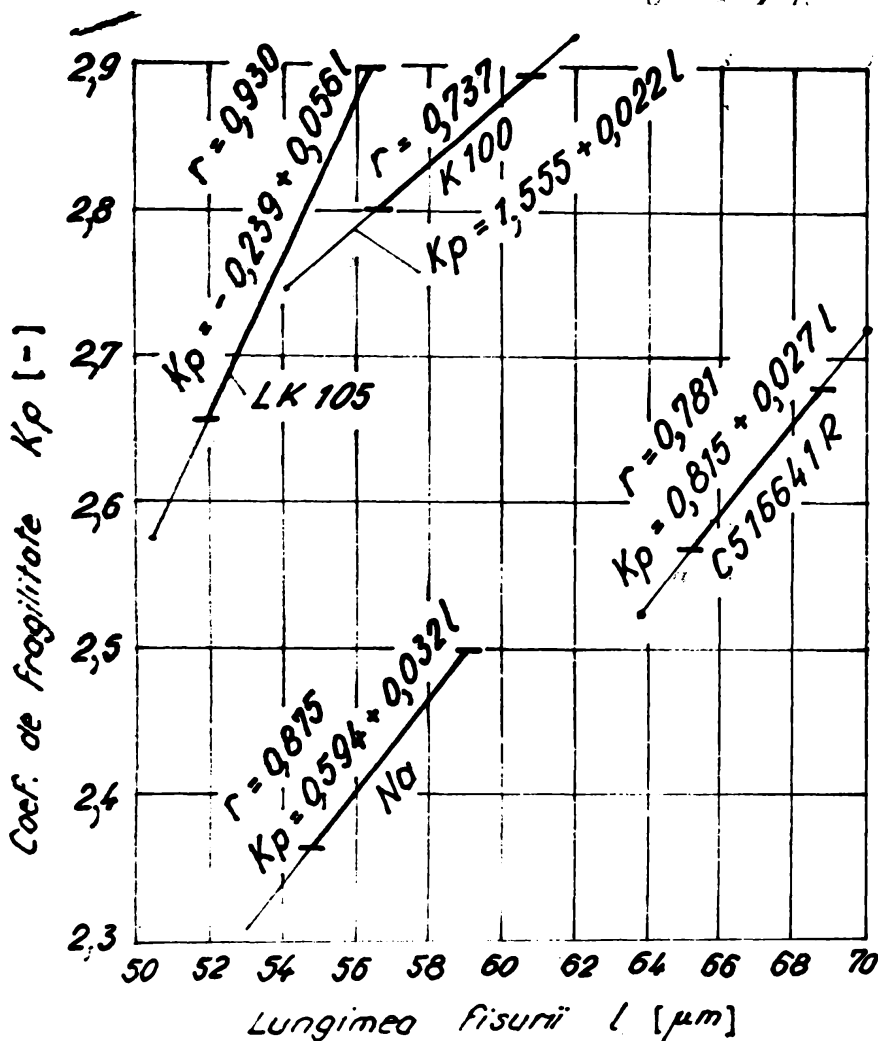


Fig.2.3.

Se observă că există o corelație mai bună pentru LK105 și sticla de sodiu ($r = 0,930$, $r = 0,875$) și mai slabă pentru sticlele K100 ($r = 0,737$) și C516641R ($r = 0,781$). Pe dreptele regresiei liniare s-au limitat segmentele îngroșate care corespund intervalelor de încredere din tab.2.1. pentru K_p . Amprentele observate la microscop au formă de patrat cu laturile concave spre deosebire de metale unde laturile sînt rectilinii. Fisurile s-au produs atât

în prelungirea diagonalelor cît și paralel cu laturile.

Pentru a studia procesul de prelucrare prin eroziune ultrasonică la care vîrfurile granulelor pătrund în stratul de suprafață al piesei, s-au făcut studii comparative cu pătrunderea unui penetrator cu vîrf conic în piese fragile (fig.2.4.a) și plastice (fig.2.4.b) [127]. Spre deosebire de cele plastice la care unghiul craterului (amprentei) α este egal cu al conului penetratorului, iar adîncimea h crește uniform cu forța F care soliciță penetratorul (fig.2.5.), la

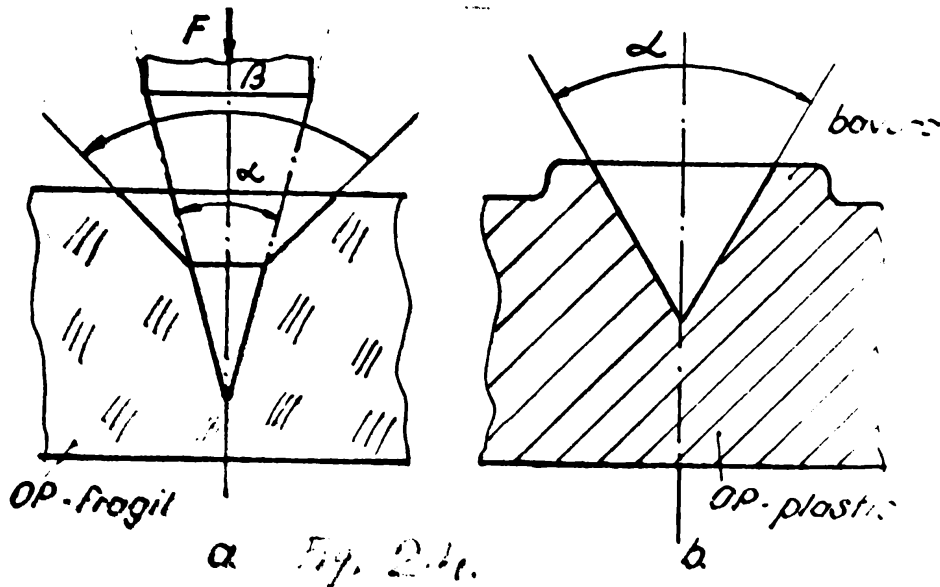


Fig. 2.4.

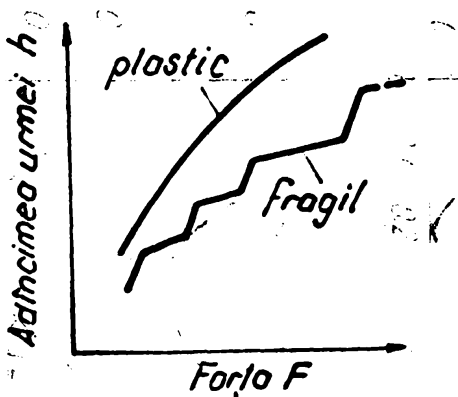


Fig.2.5.

corpurile fragile (fig.2.4.a) apar două suprafețe conice în crater $\alpha = \alpha$ penetrator = $60^\circ \dots 90^\circ$ și un al doilea con $\beta = 120^\circ \dots 140^\circ$, conul forfecării naturale, iar forța pe penetrator variază în salturi (fig.2.5.) [127], [128]. Unghiul α nu se ia mai mare de 90° pentru a nu se produce fisuri prea mari. Experimentele au arătat [127] că unghiul conului forfecării naturale β diferă puțin cu adîncimea de penetrare și cu unghiul penetratorului. Majoritatea granulelor abrazive au unghiul la vîrf apropiat de $\alpha = 90^\circ$. Forma craterelor suprafețelor generate prin eroziune ultrasonică a fost studiată și cu ajutorul profilograzelor pentru profile nefiltrate și de autorul tezei. Destul de dificil se pot urmări trecerile între cele două conuri.

2.2.2. Relațiile de calcul a parametrilor tehnologici la eroziunea ultrasonică

ÎNCĂ nu există standarde în domeniul eroziunii care să re-

elemente simbolurile mărimilor fizice, terminologia și unitățile de măsură. S-au făcut unele propuneri de viitor în acest sens la Conferința de Ultrasonice la Timișoara 1986. De aceea în teză se vor folosi unele notații consacrate în domeniul respectiv.

1.) Productivitatea (capacitatea productivă) volumică Q_v , exprimă volumul de material V_{OP} prelevat în unitate de timp:

$$Q_v = \frac{V_{OP}}{t_p} \text{ mm}^3/\text{min} \quad (2.6.)$$

t_p - timpul de prelucrare

2.) Viteza de prelucrare v_p , pentru prelucrarea alezajelor fără ridicarea OT sau coborîrea mesei cu OP pentru reumplere cu suspensie abrazivă proaspătă:

$$v_p = \frac{h}{t_p} \text{ mm/min, sau} \quad (2.7)$$

$$v_p = Q_v/S_{OT} \text{ (mm}^3/\text{min)/mm}^2 \quad (2.5')$$

avînd înțelesul de debitul volumic prelevat pe unitatea de secțiune a OT.

h, mm - adîncimea de prelucrare;

S_{OT}, mm^2 - aria secțiunii transversale a OT

Uneori prin cîntărire se determină masa de material prelevat

$$M_{OP} = \rho_{OP} \cdot V_{OP}; \quad Q_v = \frac{M_{OP}}{\rho_{OP} t_p}; \quad v_p = \frac{M_{OP}}{\rho_{OP} t_p S_{OT}} \text{ în care } \rho_{OP}, \text{g/mm}^3 \text{ este}$$

densitatea piesei (OP).

3.) Viteza de prelucrare v_p la prelucrarea alezajelor adînci cu ridicarea periodică a OT sau coborîrea mesei pentru reumplere cu abrazivi.

$$v_p = \frac{(nh)h}{t_p + t_r n} \text{ mm/min} \quad (2.8.)$$

t_p - timp de prelucrare; t_r - timpul unei ridicări; n - număr de ridicări.

Între Q_v și v_p există relația:

$$Q_v = v_p S_{OT} \text{ mm}^3/\text{min}$$

4.) Prelucrarea medie relativă α (productivitate specifică)

$$\alpha = (Q_{OP}/Q_{OT}) \cdot 100 \%$$

în care Q_{OT} - debitul uzat din OT

Dacă se cunosc masele M_{OT} și M_{OP} :

$$q = \frac{\rho_{OT} M_{OP}}{\rho_{OP} M_{OT}} \cdot 100 \quad *$$

M_{OT} este masa prelucrată din OT, ρ_{OT} - densitatea OT

5.) Uzura longitudinală relativă U_r

$$U_{rL} = \frac{U_L}{h} \cdot 100 \quad \% \quad (2.9)$$

U_L mm - uzura longitudinală OT; h , mm - adâncimea de prelucrare în OP

6.) Conicitatea sculei uzate:

$$K_u = \frac{d-d_u}{l_u} \quad (2.10)$$

d , mm - diametrul OT neuzat; d_u , mm - diametrul OT uzat; l_u , mm - lungimea uzată a OT.

7.) Uzura medie relativă a sculei:

$$U_r = \frac{1}{q} = \frac{q_{OT}}{\rho_{OP}} \cdot 100 \quad \% \quad (2.11)$$

8.) Conicitatea alezajului sau cavității prelucrate:

$$K_{OP} = \frac{D_1 - D_f}{H} \quad (2.12)$$

$D_1 - D_f$, mm - diametrul OT la începutul prelucrării la intrarea OT, respectiv la sfârșitul prelucrării la ieșirea OT sau în fundul cavității.

H - adâncimea de prelucrare.

2.2.3. Caracteristicile particulelor abrazive utilizate la eroziunea ultrasonică

Particulele abrazive din suspensia abrazivă constituie elementul eroziv dominant la prelevarea de material prin eroziune ultrasonică. Se utilizează de obicei abrazivi sintetici, similari ca cei utilizați la procedeele de rectificare și netezire fină (lepuire, rodaj). Abrazivii naturali au o utilizare restrinsă, chiar diamantul tehnic natural, cu toate că are proprietăți de eroziune abrazivă (microșchiere) foarte bune, el este scump și deficitar. Altele ca corundul, silica, nisipul cuarțos se utilizează foarte puțin din cauze propriităților lor de eroziune scăzută. Cei mai utilizați abrazivi la eroziunea ultrasonică sînt: carbura de ber (B_4C), carbura de siliciu sau carborundul (SiC), electrocorundul (Al_2O_3) și diamantul sintetic fo-

lesit de obicei la prelucrarea pieselor de diamant (filiers)

Principalele caracteristici ale acestor materiale abrazive sînt date în tab.2.2. [127].

Proprietățile abrazivilor

Tab.2.2.

Materialul abraziv	Propriet. de eroziune relativă	Uzura relativă	Densitate g/cm ³	Micro-duritate $\frac{daN}{mm^2}$	Duritate Mohs	Duritate Knoop
Diamantul	1	1	3,48-3,56	10000	10	8000-8500
Carbură de bor (B ₄ C)	0,5-0,6	4	2,5	4300	9,6	2250
Carbură de siliciu (SiC)	0,35-0,45	4,9	3,12-3,22	3100-3300	9,4	2050-2150
Electrocerund (Al ₂ O ₃)	0,14-0,16	10,5	3,2 - 4	2200-2600	9	1620-1680

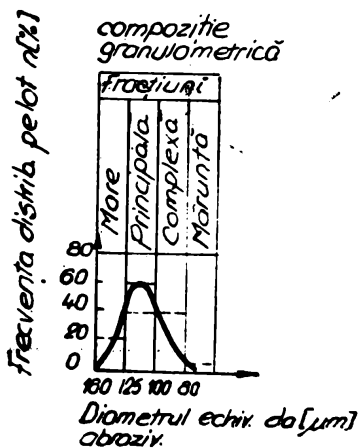
Proprietățile de eroziune se determină prin volumul de material îndepărtat în unitatea de timp, fiind între două discuri de sticlă care se rotesc în sens invers și apăsate cu o anumită forță s-a interpus o anumită cantitate de abraziv.

Fiecare sort de granule s-au micropulberi se caracterizează printr-o compoziție granulometrică STAS 1753-76 exprimată în procente, în cinci fracțiuni: fracțiunea limită, mare, principală, complexă, măruntă.

Formele granulelor de poliedri neregulați sînt foarte diferite, cele mai avantajoase la eroziune ultrasonică sînt cele care tind spre forma cubică [127] Muchiile sînt rotunjite cu diferite raze ρ care cresc odată cu mărirea granulei. Exemplu pentru electrocerund M28 (20...28 μm), $\rho = 2,7 \mu m$; Nr₄ (28...40 μm) $\rho = 3,7 \mu m$ iar la Nr₁₆ (160...200 μm) $\rho = 13 \mu m$. Pentru B₄C valorile sînt apropiate. Cu cît este mai mică raza ρ cu atît tensiunile mecanice locale, create în OP la șocul ultrasonic de la CT, sînt mai mari și eficacitatea desprinderii de material din OP mai bună. Granulele nu trebuie să aibă în compoziția lor grafit, deoarece se distrug rapid la prelucrare, scăzînd și capacitatea productivă. Gradul de finisare a abrazivului la eroziunea ultrasonică este unul din factorii importanți a prelucrabilității abrazivului, este important ca abrazivul să nu fie fragil și să aibă rezistență mare la compresiune. Din acest punct de vedere este mai bună carbură de bor decît carbură de siliciu și electrocerundul. Densitatea abrazivului trebuie să fie

mică și să aibe proprietăți bune de udare (umectare) a suprafețelor pentru a fi preluat ușor de lichid.

Cel mai bun lichid al suspensiei abrazive s-a dovedit a fi apa. Concentrația optimă a abrazivului în apă este de 30...50% în volum, 1/4...1/2 și chiar 1/1 în greutate. Apa are bune proprietăți de umectare, vâscozitate mică, conductivitate termică bună (răcire bună). În suspensie având ca lichid apa se recomandă să se introducă substanțe anticorozive. Kopa L. [110] a studiat influența frecvenței, uzurii, abrazivului asupra parametrilor tehnologici la prelucrarea prin eroziune ultrasonică. El introduce și noțiunea de "durabilitate" a abrazivului, ca fiind timpul de prelucrare până când capacitatea productivă scade la jumătate. Distribuția dimensiunilor granulelor pe fracțiuni (lot) pentru S1C Nr12 este redată în fig.2.6. [110].



Contactul inițial dintre OT și GA are loc pe granulele cele mai mari (fig.2.7.a.) ele prelucând cea parte F_d/n din forța dinamică F_d . După ce se sparg (strivesc) cele mai mari GA, tot mai multe granule mai mici vin în contact cu OT corespunzătoare altor fracțiuni, scăzând și forța dinamică care revine pe o granuță F_{dj} (fig.2.7.b.) și deci și prelevarea de material Q_v .

Prelucrările s-au efectuat pe o mașină SGA 20 ($P_{GIE} = 1 \text{ kW}$) pe OP - sticlă, OT - oțel carbon S1C45. Variația productivității Q_v și a interstițiului lateral Δ dintre OT OP în funcție de timpul de prelucrare t_p , min pentru un volum dat de abraziv 120 cm³ S1C, Nr12, cu concentrație volumică 30% în

Fig.2.6. apă cu amplitudinea de oscilație $\{a = 50 \mu\text{m}$ și $P_g = 15 \text{ N}$ cu OT ci-

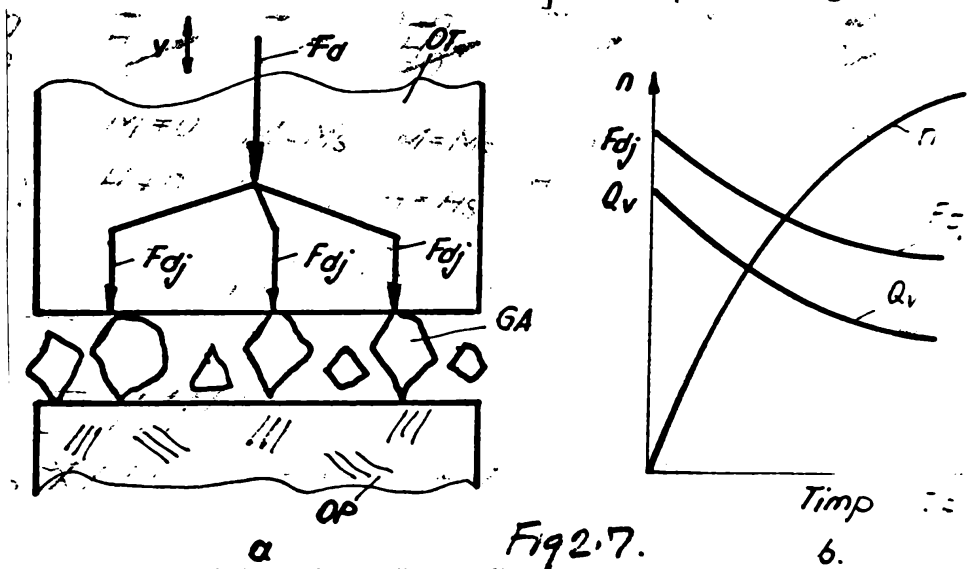
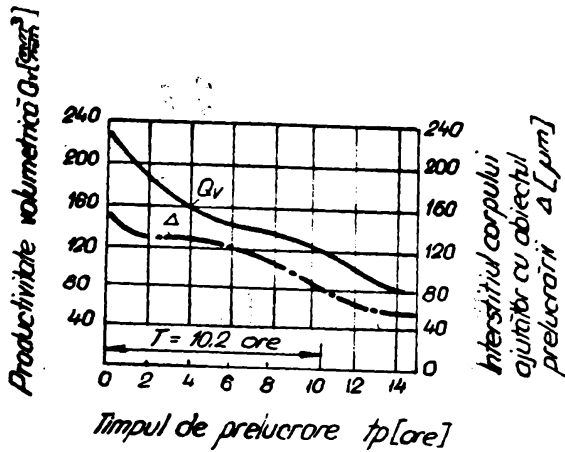


Fig.2.7.



lindric $\varnothing 10\text{mm}$; este dată în fig.2.8. Se observă că prin scăderea lui v_p se poate pune în evidență gradul de uzură al abrazivului și precizarea unei "durabilități" a acestuia [110]

Fig.2.8.

2.2.4. Analiza unor aspecte teoretice și experimentale asupra detașării materialului prin eroziune ultrasonică.

Forțe, tensiuni mecanice, productivități.

Un interes deosebit prezintă determinarea și pe cale teoretică a forțelor necesare detașării particulelor din OP și aprecieri asupra vitezei de prelevare respectiv productivității. La bază stau cercetările lui Show M.E. [127], Kazantsev V.F. [233], [128], OR H.L. Pankow D. Finnie I [163] Institutului SMIME URSS [126], [127], cit și observațiile utile date de cercetătorii noștri în [97] și [260] cit și a altor cercetători. Show M.E. consideră granulele abrazive interpusse între OT și OP (fig.2.9.a.) de formă sferică și toate având aceeași mărime cu diametrul echivalent d_a , solicitate fiecare de forța F_{max}/n .

În ipotezele că prășirea de material depinde de patru factori importanți:

1. - dimensiunea d_a , forma GA și adâncimea h_p de penetrație $K_1 (h_p d_a)^{3/2}$;
2. - numărul de GA active (care sînt în contact cu OT și OP la distanța minimă dintre ele) care revin unității de secțiune a OT; $K_2/(d_a^2)$;
3. - probabilitatea detașării unei particule dată prin K_3 ;
4. - numărul șecurilor care este egal cu frecvența de oscilație f ; adâncimea de penetrare în OP;

$$h_p = \sqrt{\frac{4 \{ n \cdot F_s \cdot d_a \}}{\pi K_2 (1 + K_4) v_{OP}}} \quad (2.13)$$

și debitul volumic:

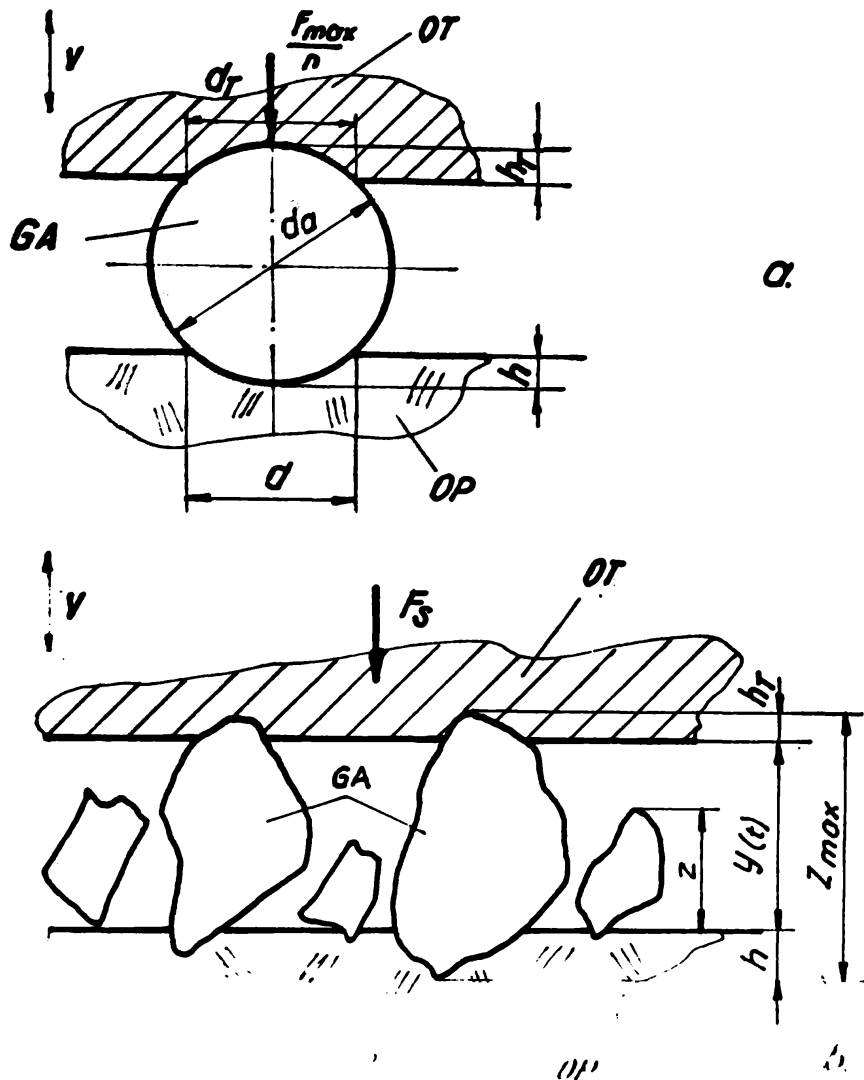


Fig. 2.9

$$\sigma_v = K_1 K_2 K_3 \left[\frac{4 \{ n \cdot F_p \}}{\pi K_2 (1 + K_A) \sigma_{OT}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot da^{\frac{1}{2}} \quad (2.14.)$$

Coeficientul K_A se determină prin măsurarea dăbăităților pentru OP și OT. Pentru oțel și OT din OLC45: $K_A = 630/160 \approx 4$. Calculând raportul hr/da , rezultă că la finisare $hr/da = 1,5\%$ iar la degroșare $hr/da = 0,5\%$. În realitate GA nu sînt sferice, sînt poliedrice cu vîrfuri care au rază de rotunjire ρ . Pentru ca rezultatele să fie mai aproape de realitate în relația lui Show (2.14) în loc de da se introduce $da = 2\rho$ diametrul echivalent rotunjirii vîrfurilor arămate:

$$\sigma_v = K_1 K_2 K_3 \left(\frac{da}{\sigma_{OT}} \right)^{\frac{3}{2}} \left[\frac{4 \{ n \cdot F_p \}}{\pi K_2 (1 + K_A)} \right]^{\frac{3}{2}} \frac{r}{\sqrt{da}} \quad (2.15)$$

Această relație arată că σ_v este direct proporțională cu frecvența și proporțională cu $\{ n \cdot 0,75$

Modelul fizic propus de Kazantsev V.E. [263] este redat în fig.2.9.b. El ține cont de aceeași granulație de exemplu Nr 10, în funcție de compoziția granulometrică și mărimea granulelor diferite pe fracțiuni. Neuniformitatea abrazivului este un factor determinant la prelucrarea prin eroziune ultrasonică. Notând cu Z înălțimea granulelor, pentru granulația Nr.10 (GOST 3647-59) numai 10% din granule vin în contact cu ambele suprafețe frontale ale OT și OP. Comprind particulele abrazive la coborârea OT, cele mai mari vor penetra atât în OP cu adâncimea h cât și în OT cu h_p , neglijând comprimarea elastică a abrazivului. La distanța minimă dintre OT și OP, Y_{min} se obține penetrarea maximă.

$$h + h_p = Z_{max} - Y_{min} \quad (2.16)$$

Kazantsev V.F. determină o lege de distribuție a abrazivului $\psi(z)$ apropiată de o lege normală Gauss și deduce relația pentru Q_v :

$$Q_v = \int_{Y_{min}}^{\bar{z}} V_1 \cdot f \cdot (z - Y_{min}) \cdot n \psi(z) dz \quad (2.17)$$

în care $\psi(z) = 1.095/\sqrt{\pi} [1 - (z - \bar{z})^2]^{-0.5}$; \bar{z} - media aritmetică ponderată a dimensiunii granulelor; f - frecvența, V_1 - volumul prelevat de o particulă, n - numărul de particule abrazive în interstițiul frontal de lucru.

Kazantsev determină și relația dintre forța maximă F_{max} , forța statică F_s și amplitudinea de oscilație ξ m:

$$F_{max} = 1.7 F_s \sqrt{\xi} \quad (2.18)$$

$$F_s \text{ [daN]}; \quad \xi \text{ [}\mu\text{m]}$$

Cercetătorii Ch N.L., Pankov D. și Finni I [163] pleacă de la sistemul fizic propus de Kazantsev, dar adăugă o lege de distribuție a dimensiunilor abrazivului după Weibull V , lege care ține cont de fiabilitatea (de durabilitatea) abrazivului (înfrângerea lui în timp), fiind apropiată de o lege exponențială.

Diacenko I.W împreună cu un colectiv de cercetători din URSS [127] a dedus o relație experimentală pentru timpul de prelucrare t_p

$$t_p = K \frac{S \cdot h^{5/3}}{2 \xi L \text{ daF}} \quad (2.19)$$

pe baza căreia se poate deduce viteza de prelucrare v_p și debitul prelevat Q_v :

$$v_p = \frac{2 \int m \cdot L \cdot a \cdot f \cdot 60}{K \cdot S \cdot h^{2/3}} \quad \text{mm/min} \quad (2.20)$$

$$v_v = \frac{2 \int m \cdot L \cdot a \cdot f \cdot 60}{K \cdot h^{2/3}} \quad \text{mm}^3/\text{min} \quad (2.21)$$

în care $S[\text{mm}^2]$ - aria secțiunii transversale a OT, $h[\text{mm}]$ adâncimea de prelucrare, $2 \int m[\mu\text{m}]$ - dublul amplitudinii de oscilație, $L[\text{mm}]$ - perimetrul OT; $a[\mu\text{m}]$ - dimensiunea abrazivului (SiC); $f[\text{kHz}]$ - frecvența, K - constantă care înglobează restul factorilor necuprinși în relație. Pentru prelucrarea oțelului $K = 3,85 \cdot 10^5$, iar pentru cuarț $K = 13 \cdot 10^5$. Condițiile experimentale în care au fost determinate relațiile (2.19)....(2.21) au fost: $\int m = 10...50 \mu\text{m}$, $h = 0...10 \text{ mm}$; $f = 18...30 \text{ kHz}$; granulatia abrazivului Nr 3...16; $S = 200 \text{ cm}^2$, $L = 100 \text{ mm}$, suspensia abrazivă a fost eliminată manual.

Cele mai apropiate de realitate sînt relațiile deduse pe cale experimentală, valabile pentru anumite condiții date. Formulele deduse teoretic dau valori orientative, noi sînt sau mai puțin apropiate de cele reale. În ele intră coeficienți care la rîndul lor trebuie determinați experimental. Au importanță de cercetare teoretică pentru a vedea factorii de care depinde prelucrarea de material cît și ponderea lor de influență.

Așel Srainer L.A. a verificat prin calcul presiunea statică necesară detașării materialului din OT din cuarț [283] în ipoteza lui Show pentru un strat de granule identice, sfere cu diametrul de $100 \mu\text{m}$ au rezultat valori foarte mari $p = 2500 \text{ daN/cm}^2$ ceea ce nu corespunde realității deoarece dimensiunile nu sînt identice după cum s-a văzut și forma nu este sferică ci poliedrică, piramidală, chiar spre forme conice, care tensionează local materialul OT mult mai mult decît forma sferică.

2.3. Aprecieri asupra productivității, uzurii sculei, preciziei de prelucrare și a ca- lității suprafeței generate prin eroziune ultrasonică

52^u 668
359 A

Ca și în cadrul oricărui procedeu de prelucrare și la eroziune ultrasonică interesează productivitatea (capacitatea productivă) precizia dimensională și a formei geometrice și calitatea suprafețelor obținute la piese.

2.3.1. Productivitatea prelucrării

Possibilitățile de prelucrare și durata de execuție a unui

produs, interesează în primul rând pe tehnolog. De aceea toți cercetătorii acordă atenție deosebită acestui aspect. Principali factori de care depinde prelevarea de material s'nt dați în fig. 7.10

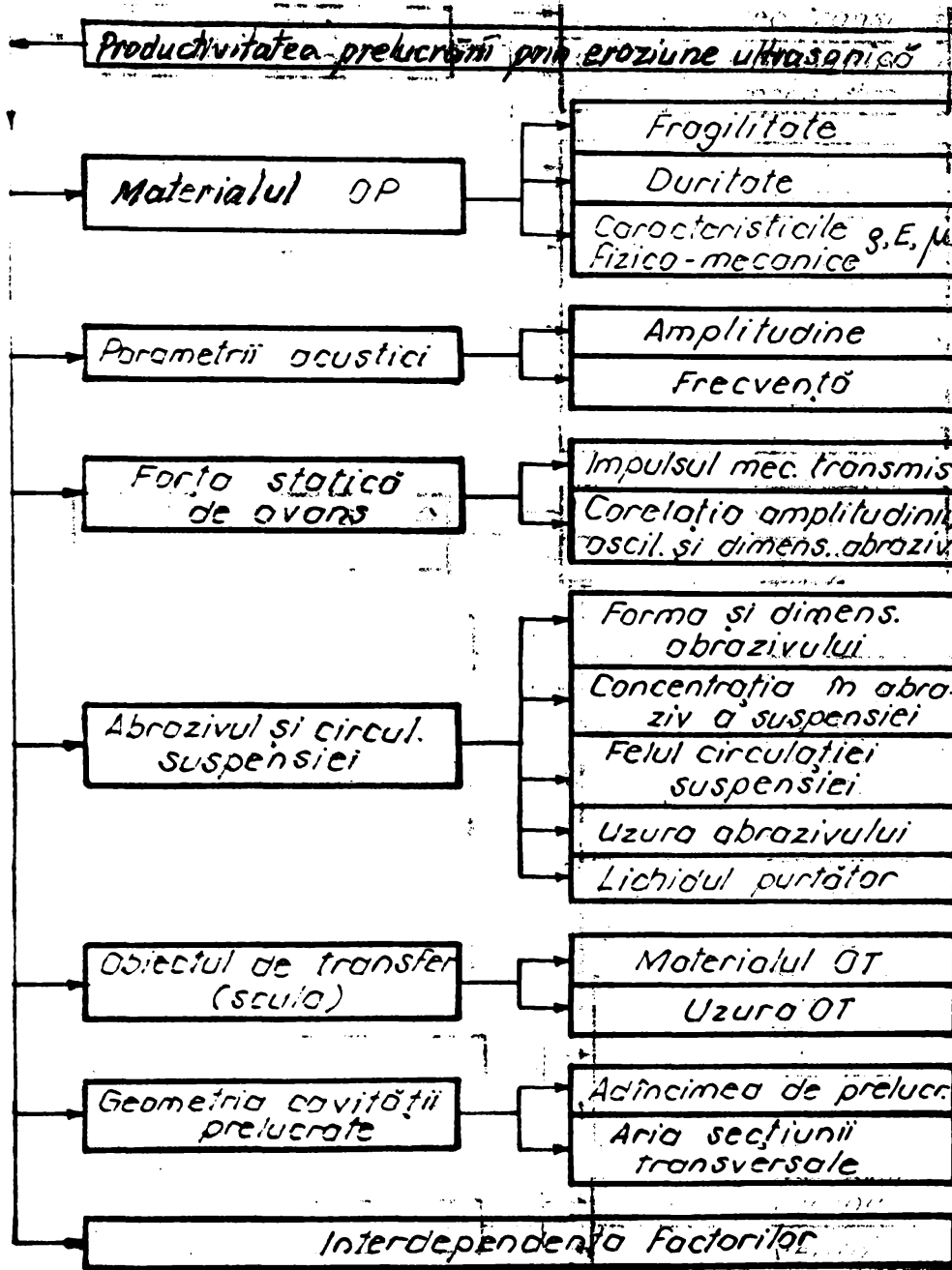


Fig.7.10.

Natura și caracteristicile de fragilitate ale materialului OP s'nt hotărâtoare asupra productivității așa cum s-a arătat deja.

Parametrii acustici, amplitudinea și frecvența oscilației s'nt esențiale pentru un utilaj dat deoarece ei determină puterea introdusă în spațiul de lucru. Produsul lor determină viteza micșării principale la eroziunea ultrasonică

$$v = \frac{A.p. \cdot \xi}{1000} \quad \text{m/s} \quad (2.77)$$

în care f KHz ; ξ , mm , cuprinsă în limitele $v = 0,6 \dots 7 \text{ m/s}$. Cu mărirea lui f și ξ , productivitatea crește. O serie de cercetări experimentale și teoretice în domeniul eroziunii ultrasonice la Institutul de mașini-unelte EWINS din URSS, cât și din alte țări cu industrie dezvoltată arată că viteza de prelevare V_p crește aproape liniar cu viteza mișcării principale v [127] nu numai la prelucrarea sticlei (Fig.2.11) dar și la materialele din grupa II de prelucrabilitate, oțel

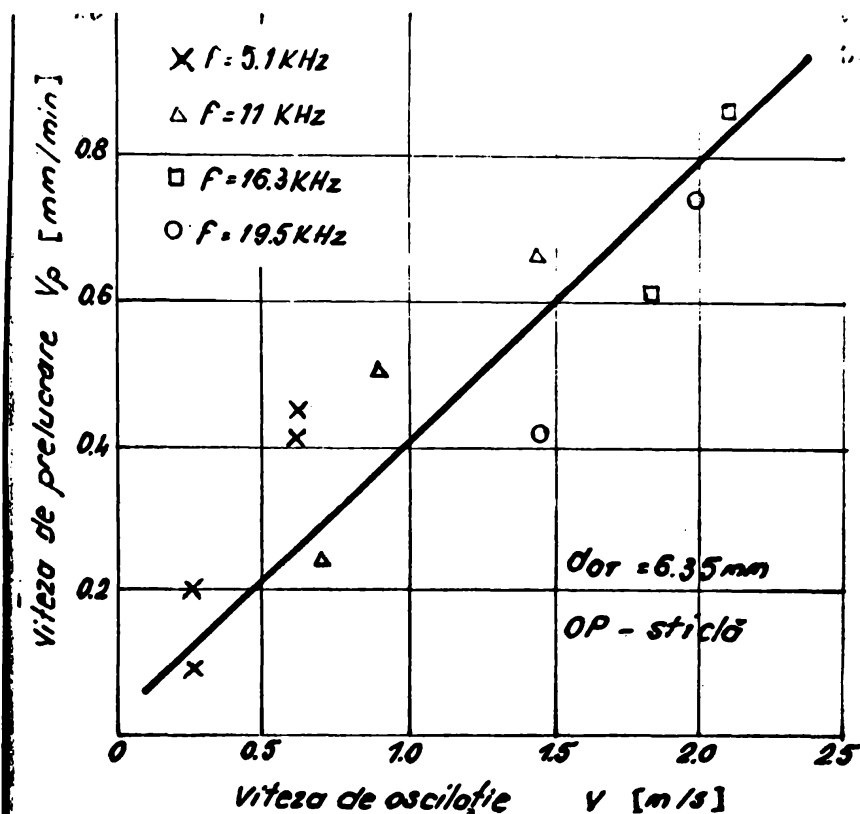


Fig.2.11

și dimensiunea abrazivului trebuie să existe un anumit raport [127]:

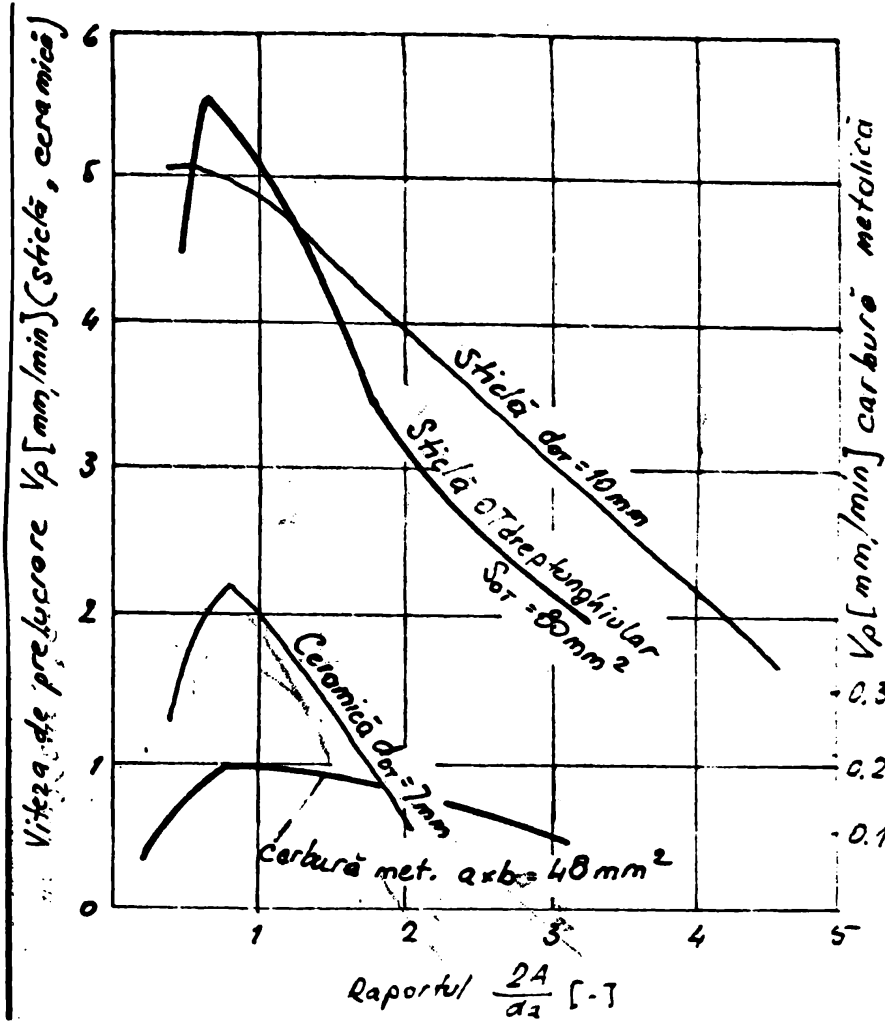
$$2 \cdot \xi / d_a = 0,6 \dots 0,8,$$

pentru care productivitatea este maximă (Fig.2.12) în condițiile unei presiuni statice optime, cu scule din oțel având $d = 10 \text{ mm}$ și $a.b = 80 \text{ mm}^2$ pentru sticlă; $d = 7 \text{ mm}$ (ceramică) și $a.b = 6,8 = 48 \text{ mm}^2$ pentru aliaj dur. Pentru $2 \cdot \xi / d_a > 1$, amplitudinea mare și abraziv din solicitarea GA este prea mare și are loc frământarea lui iar la rapoarte $2 \cdot \xi / d_a < 0,5$ la amplitudini prea mici și abraziv prea mare

de scule tratat termic. Pentru un bloc ultrasonic dat, frecvența rămâne constantă și egală cu cea de rezonanță mecanică putându-se modifica doar amplitudinea deplasării ξ .

Productivitatea relativă față de sticlă, uzura relativă a sculei și câteva constante de material la piese din grupa I de prelucrabilitate este dată în tab.2.3. [127].

Experiențele au arătat că între amplitudinea de oscilație



gecul transmisia CA scade și în unele cazuri productivitatea este mai mică.

Odată cu creșterea adâncimii de prelucrare, productivitatea scade datorită înrăutățirii condițiilor de circulație a suspensiei abrazive ap cum arată și cercetările proprii redată în cap.7.

În același capitol s'nt redată explicațiile influenței forței statice.

Fig. 2.17

Tabelul 2.1.

Materialul de prelucrat	Productivitatea relativă (față de sticlă)	Uzura preceptuală %	Modulul de elasticitate, E daN/cm²	Coefficientul lui Poisson μ	Densitatea ρ kg/cm³
Titanat de beriu	1,1	0,4	-	-	-
Sticlă	1	0,5-0,8	7100-8000	0,14-0,25	2,2-2,9
Ferite	0,75-0,85	0,5	-	-	-
Steelomecanic	0,75-0,80	0,5	-	-	-
Siliciu	0,4 -0,75	0,8	(4,6-16,9)10 ⁵	0,27-0,28	2,33
Germaniu	0,35-0,70	0,8	(3,1-19,9)10 ⁵	0,21-0,27	-
Agat	0,75	1	-	-	2,8
Cuart	0,45-0,70	2	-	-	2,65
Harcuri și ceramici	0,4 -0,65	1 - 2	-	-	2,2-2,5
Mineraleceramici	0,15-0,20	3 - 5	-	-	-
Rubin	0,12-0,18	20-40	50.000	0,20	3,85
Diamant	0,01-0,005	1000	20.000	-	3,52

2.3.3. Uzura OT și precizia de prelucrare

Uzura OT și precizia de prelucrare depinde în principal de proprietățile fizico-mecanice ale OP și OT, de grosimea peretelui și de granulatia abrazivului. Forma uzurii la OT cilindrice pline și tubulare este redată în fig.2.13, U_L - uzura longitudinală (frontală) iar U_t - uzura transversală (sau laterală). Relațiile de cal-

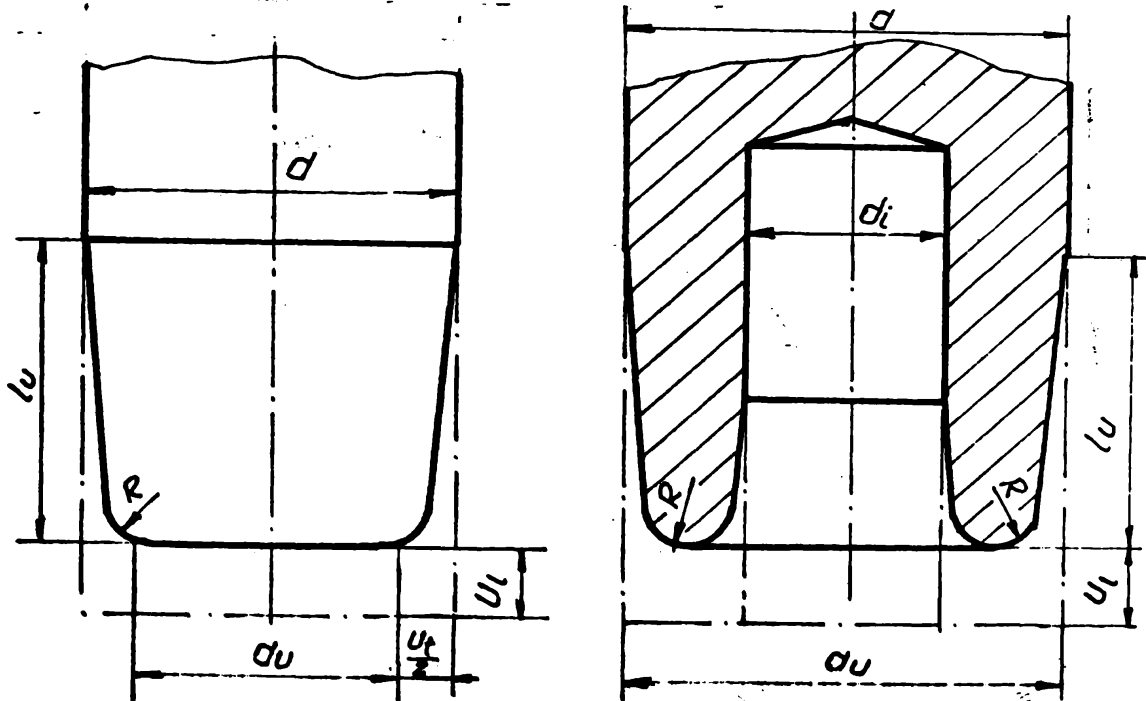


Fig.2.13.

cul pentru determinarea uzurii au fost date la 2.2.2. Uzura longitudinală crește cu adâncimea de prelucrare. Grosimea peretelui OT are influență asupra uzurii care crește mult la grosimi sub 1 mm.

Uzura transversală influențează direct precizia dimensională în special la cavități nestrupite prin concitarea care se formează. Concitarea și uzura transversală la OT din diferite materii este redată în fig.2.14. [127] , pentru OP - ceramică, adâncimea de prelucrare 16 mm. Concitarea este 0,005...0,007. La prelucrarea otelului se obțin valori mai mici iar la carburi metalice mai mari. Pentru mărirea preciziei de prelucrare Markov A.I. [127] [128] propune scule cu concitate inversă și fațete de ghidare pentru menținerea cotei (fig.2.15), cât și scule coaxiale monolit pentru degroșare și finisare (a se vedea capitulul 7). Aceste soluții duc și la creșterea productivității prin ușurarea circulației suspensiei abrazive în interstițiul lateral OT-OP (1...1,5 ori).

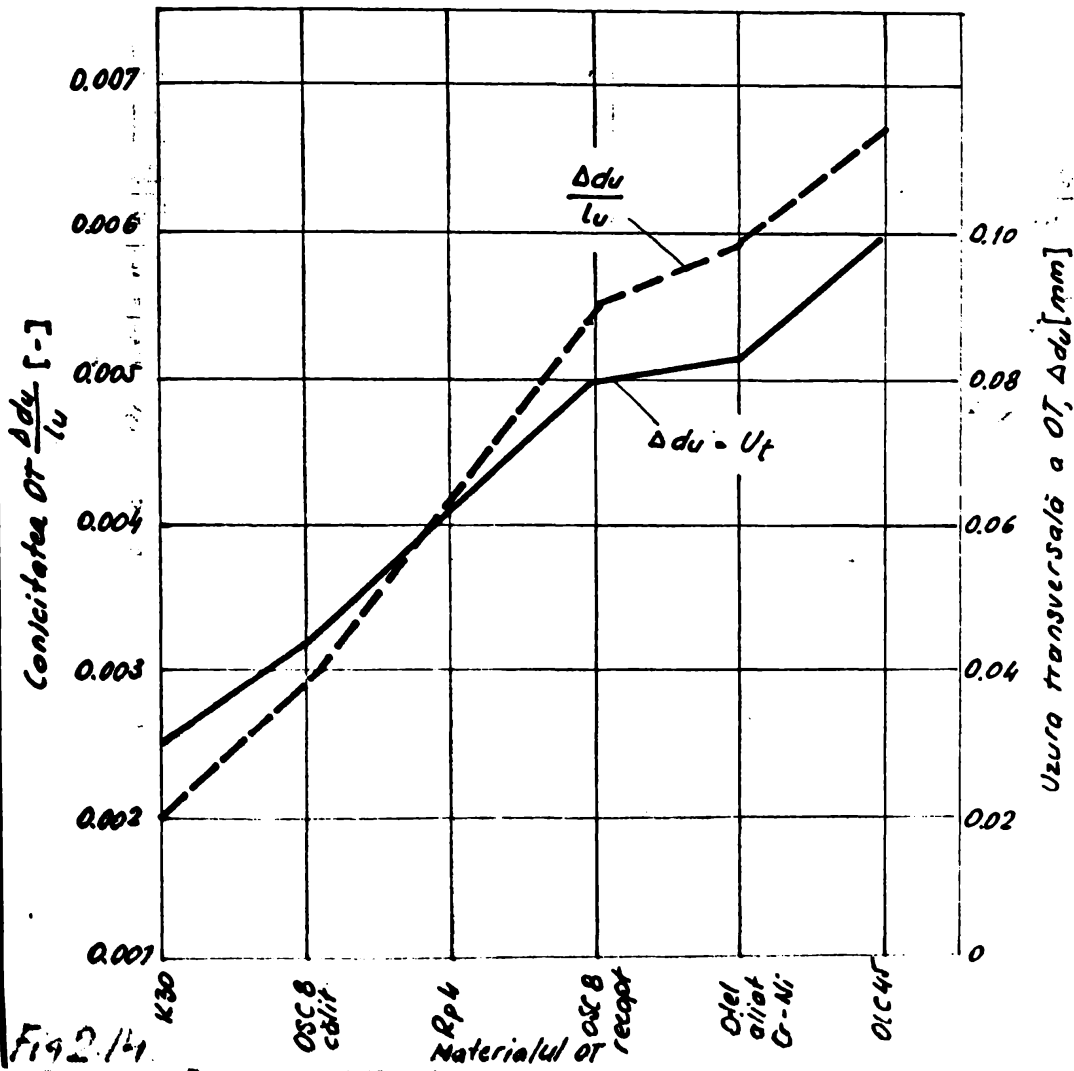


Fig.2.14.

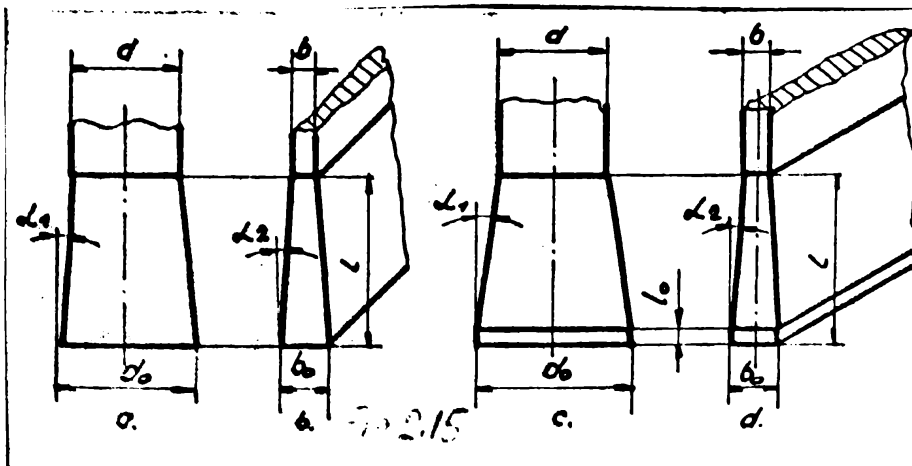


Fig.2.15.

Evitarea ciobirilor (spargerilor) la intrarea și ieșirea sculei (în special) se pot realiza fie prin placarea unor plăci (din sticlă) de adese lipite cu ceară sau alt adeziv. (fig.2.16.)

Abaterile de la planitate pe fundul cavității străpuse datorită neomogenității repartiției abrazivului pe suprafața frontală a OT cresc cu adâncimea de prelucrare și cu scăderea prelucrabilității materialului OP. Înălțimea acestor proeminente la carburi metalice la $h = 1,1 \text{ mm}$

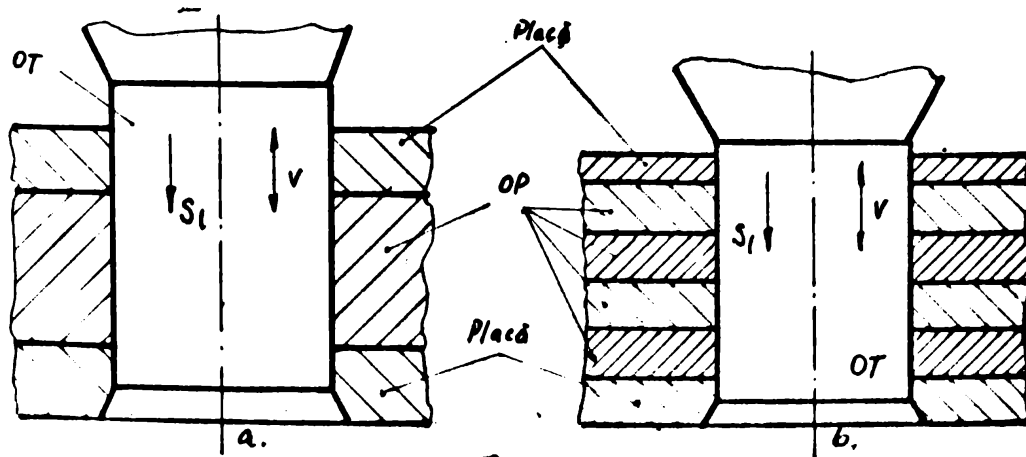


Fig. 2.16.

cu secțiunea transversală 15x15 mm pot atinge 0,2...0,25 mm [127].

2.3.3. Calitatea suprafeței generate prin eroziune ultrasonică

La operații de finisare și semifinisare interesează calitatea suprafeței obținute. Rugozitatea suprafeței la prelucrarea prin eroziune ultrasonică depinde de: granulația abrazivului, proprietățile fizico-mecanice ale OP, amplitudinea de oscilație, rugozitatea suprafețelor OT, adâncimea de prelucrare și durata prelucrării, lichidul de suspensiei abrazive și circulația acestuia în spațiul de lucru. Rugozitatea pereților laterali este mai mare decât pe suprafața frontală (fig. 2.17) datorită acțiunii de zgîriere a granulelor în timpul circulației suspensiei.

Cu mărirea dimensiunilor abrazivului rugozitatea scade (fig. 2.18) [126], iar la aceeași dimensiune depinde de rezistența pe care

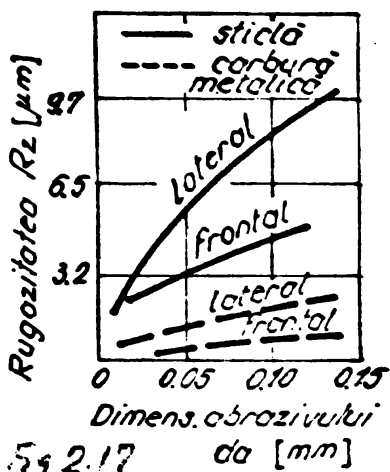


FIG. 2.17.

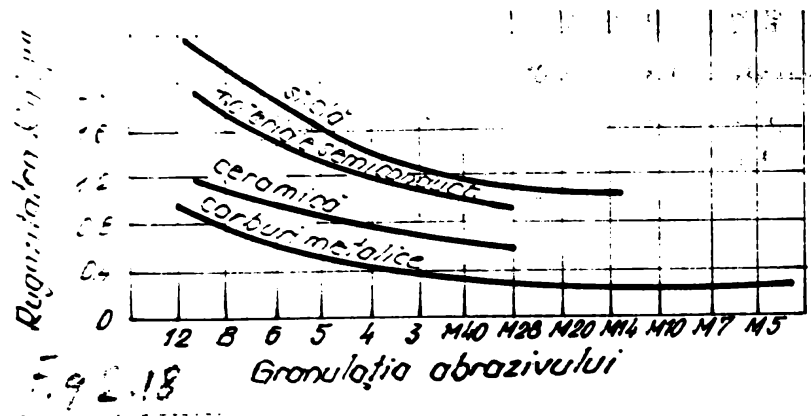


Fig. 2.18.

o epune materialul OP la penetrarea granulei având aceeași forță de avans.

Neregularitățile de pe OT se copiază pe OP. Cercetările au arătat că suprafețele OT trebuie să fie mai fine cu una sau două clase de rugozitate față de cea cerută de OP.

Înlocuirea apei cu ulei de transferator duce la îmbunătățirea calității suprafeței având efect asupra scăderii productivității iar fenomenul de cavitație duce la înrăutățirea calității suprafeței [198] [234].

2.4. Limitile procedurii de prelucrare prin eroziune ultrasonică

Prelucrarea prin eroziune ultrasonică este avantajoasă pentru materialele fragile și dure din prima grupă de prelucrabilitate ($K_{pr} > 2$). În viitor se va extinde datorită avantajelor: prelucrare economică materialele fragile neelectroconductoare, are o schemă cinematică relativ simplă, există posibilitatea copierii profilului complex al obiectului de transfer, forțele statice necesare la prelucrare sînt în general mici.

Procedul are însă și o serie de dezavantaje, care au făcut să nu prindă o extindere mare în industrie. Printre acestea se enumeră:

1.) Suprafețele generate sînt mici. aria secțiunii transversale este redusă la prelucrarea găurilor și a cavităților. Generarea pe cale cinematică propusă de diferiți autori [127] [198] etc., nu s-a dezvoltat din cauza unor complicații cinematice mari. Secțiunile maxime prelucrate sînt limitate de puterea transductorului (max 2...4 kw) și de apariția oscilațiilor transversale. La o singură trecere în materialele din grupa I de prelucrabilitate se generează $S_{max} = 1000 \dots 5000 \text{ mm}^2$.

2.) Adîncimile de prelucrare sînt în general mici. La mașinile ultrasonice cu sisteme de alimentare a suspensiei abrazive prin stepire și cădere liberă adîncimile de prelucrare sînt limitate la 10 mm. La creșterea adîncimii se înrăutățesc brusc condițiile de circulație a suspensiei abrazive.

3.) Productivitate scăzută și uzură mare la sculele utilizate la prelucrarea pieselor din carburi metalice și oteluri călitate. La aceste materiale lung răspîndite în construcția de mașini se obțin productivități de 20...50 ori mai mici și uzură de 20...100 ori mai mari decît la prelucrarea oțelului cuarțului sau ceramicii. Din aceste motive eroziunea ultrasonică se aplică doar la finisarea

pieselor din carburi metalice și oțeluri călitate.

2.5. Căi pentru îmbunătățirea performanțelor eroziunii ultrasonice

Din studiul procesului de prelevare a materialului la prelucrarea prin eroziune ultrasonică se desprind următoarele direcții mai importante de creștere a eficienței procedurii [178] . [102] . [198] : îmbunătățirea condițiilor de circulație a suspensiei abrazive în zona de lucru și asigurarea unei concentrații optime a abrazivului între OF și OP; mărirea vitezei de oscilație a sculei; modificarea proprietăților materialului OP prin fragilizarea lui în spațiul de lucru, alegerea unor parametri optimi ai regimului de prelucrare, utilizarea unor tehnologii racionale, intensificarea acțiunii de șoc a granulelor abrazive, producerea și utilizarea unor abrazivi rezistenți la șoc și cu acțiune erozivă mai bună decât carbura de bor în apă, găsirea de noi lichide purtătoare de abraziv în suspensie și altele.

Direcția cea mai importantă în care s-au făcut deja progrese însemnate este:

2.5.1. Îmbunătățirea circulației suspensiei abrazive în spațiul de lucru

Creșteri importante de productivitate s-au obținut prin aspirarea prin vacuum a suspensiei abrazive și refularea ei sub presiune utilizând scule tubulare sau orificii mici în piese [166] [102] .

2.5.2. Alte soluții de optimizare în prelevarea de material la eroziunea ultrasonică

Energia introdusă în spațiul de lucru depinde de amplitudinea și frecvența de oscilație a sculei, și care intră în viteza mișcării principale. Mărirea amplitudinii este limitată de rezistența la oboseală a materialului din care sînt confecționate concentratele și sculele. La oțeluri se limitează la 50...55% a. O soluție de viitor este găsirea de noi aliaje și materiale cu preț de cost acceptabile. Recomandate ar fi aliajele de titan care sînt ușoare și care au rezistență la oboseală și la uzură de 1,5....2 ori mai mare, ele sînt deficitare și scumpe. Se pot utiliza oțeluri în stare normalizată sau îmbunătățită, cu suprafețe durificate prin diferite metode [178] pentru a rezista la oboseală. Îmbunătățirea ran-

amentului electroacustic al blocului ultrasonic și a generatorilor de ultrasunete cît și creșterea puterii lor sînt soluții deosebite eficiente. Ele sînt legate de găsierea de noi materiale magnetostrictive metalice sau ceramice și electrostrictive care să aibă deformatii specifice mari, puteri și randamente ridicate [15]. Odată cu perfecționarea componentelor electronice se îmbunătățesc și performanțele generatoarelor ultrasonice [50] [54.a] [54.b] [90.c] [82].

Deosebit de importantă este automatizarea acordului generatorului cu capul acustic al sașinii.

Ca și în cazul aşchierii clasice și la eroziunea ultrasonică se pune problema de a se optimiza regimurile de prelucrare. La eroziunea ultrasonică prin regim de prelucrare se înțelege realizarea următoarelor condiții:

- 1.) Stabilirea amplitudinii și frecvenței de oscilație a sculei.
- 2.) Asigurarea stabilității amplitudinii în timpul prelucrării.
- 3.) Felul alinării spațiului de lucru cu suspensie abrazivă.
- 4.) Felul abrazivului, granulația, rezistența la uzură, concentrația lui în lichid și felul lichidului.
- 5.) Forța de avans.
- 6.) Rădăcirile periodice ale sculei pentru înprospătarea abrazivului și evacuarea produselor de eroziune.

Pentru intensificarea acțiunii de șoc ale abrazivului și îmbunătățirea circulației lui în zona de lucru se semnalează în literatură [126], aplicarea unor vibrații de joasă frecvență ($F = 50 \dots 10$ Hz cu amplitudinea $0,1 \dots 0,5$ mm) peste frecvența ultrasonică a sculei, paralel cu axa ei în special la sașinii cu putere mică.

Pentru materiale electroconductive aplicarea prelucrărilor combinate: eroziune ultrasonică și electrochimică; eroziune ultrasonică și eroziune complexă, au dat rezultate promițătoare [126] [125] și au perspectivă de viitor.

CAPITOLUL 3

CERCETARI PRIVIND TRANSDUCTOARELE ULTRASONICE
UTILIZATE LA EXPERIMENTARI

3.1. Fenomenul de magnetostricțiune

Există în tehnică o serie de materiale magnetice cu magnetizare spontană la care variația magnetizației M este însoțită de schimbări ale dimensiunilor geometrice ale corpului. Acest fenomen poartă numele de magnetostricțiune. [58] [52] [105]. După natura deformațiilor mecanice ale materialului magnetic supus acțiunii câmpului magnetic, magnetostricțiunea poate fi de trei tipuri:

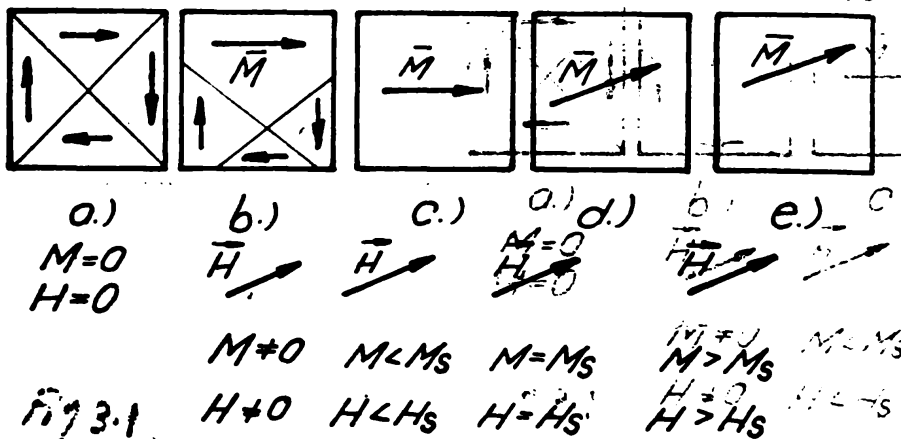
1.) Magnetostricțiunea longitudinală, liniară $\epsilon = \Delta l / l$ la care deformațiile de lungire sau scurtare Δl ale corpului cu lungimea inițială l se produc pe direcția magnetizației;

2.) Magnetostricțiunea transversală, la care deformațiile se produc pe o direcție perpendiculară la direcția magnetizației materialului;

3.) Magnetostricțiunea de volum prin care se produc modificări ale volumului corpului feromagnetic sau ferimagnetic (ferite).

Aceste deformații sînt cunoscute sub numele de diferite efecte și au numeroase aplicații în tehnică. Astfel magnetostricțiunea longitudinală este cunoscută și sub numele de efect Joule, ea avînd valoarea cea mai mare și cele mai multe aplicații practice. Modificările dimensionale transversale și cele de volum au valori mici.

Dacă un material feromagnetic se introduce într-un câmp magnetic exterior de valoare mică, are loc o deplasare reversibilă, elastică a pereților Bloch în așa fel încît se produce o schimbare a denanșului Weiss care are direcția și sensul dipolilor magnetici



M identice cu cele ale câmpului magnetic exterior aplicat H (Fig. 3.1.) [58] [148].

Porțiunea OA pe curba de magnetizare (Fig. 3.2.) corespunde deplasării elasti-

Fig. 3.1.

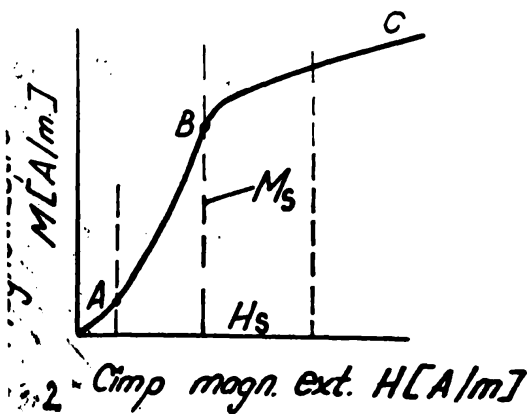


Fig. 3.2.

reversibile ale peretilor Bloch mutate și salturi Barkhausen devin tot mai numeroase și astfel vectorul de magnetizare M crește (AB fig. 3.2). Transformările sînt ireversibile deoarece la o scădere a valorii cîmpului magnetic în domeniul AB starea de magnetizare nu revine la valoarea inițială corespunzătoare aceleiași valori a intensității cîmpului magnetic exterior. Cu alte cuvinte deplasarea în sens descrescător a cîmpului nu se face pe aceeași curbă ci pe una situată deasupra. Pentru valori și mai mari ale cîmpului magnetic exterior (fig. 3.1 e) respectiv porțiunea BC (fig. 3.2) nu mai au loc salturi Barkhausen, creșterea vectorului de magnetizare se face doar prin rotația momentelor magnetice ale dipolilor magnetici ai steilor.

Se spune că materialul magnetostrictiv s-a saturat din punct de vedere magnetic (fig. 3.2.) Zona de saturație BC este tot o zonă reversibilă, rotația dipolilor magnetici dispărînd cu scăderea cîmpului magnetic exterior corespunzător punctului B de pe caracteristica de magnetizare (fig. 3.2.)

3.2. Materialle magnetostrictive metalice

Materialele cele mai utilizate pentru confecționarea transductoarelor magnetostrictive sînt: nichelul, aliaje fier-cobalt, fier-aluminiu, aliaje fier-nichel, ferite magnetostrictive. Nichelul tehnic pur, permendurul și feritele au o largă utilizare în tehnica ultrasunetelor.

Nichelul are proprietăți magnetostrictive bune, $\xi = -(35... 40) \cdot 10^{-6}$ avînd și alte avantaje tehnologice: prelucrare mecanică ușoară prin aşchiere și ştanţare prin tratament termic adecvat se formează uşor pe toată o peliculă de oxid izolator electric și rezistent din punct de vedere mecanic, se poate lipi uşor, nu este

fragil și rezistă la coroziune.

Aliajele Fe-Co cunoscute sub denumirea permandur [127][185] au valori mari pentru coeficientul de magnetostricțiune $\epsilon = 30.. \dots 60 \cdot 10^{-6}$. Cele mai utilizate compoziții sînt: Co 50%V 2%(50%Co, 48%Fe, 2%V); Co 49%V 2%(49%Co, 49%Fe, 2%V); Co 65%(65%Co, 35%Fe). Cel mai răspîndit din aceste aliaje este Co 49%V 2% el avînd efect magnetostriktiv mai mare decît al nichelului, dar se prelucurează mecanic mai dificil, este fragil (adăusul de vanadiu 2% îl face mai prelucrabil prin aşchiere, deformare plastică și ştanţare), prin tratament termic nu formează peliculă izolatoare din punct de vedere electric și nici nu are rezistență mecanică. De aceea toate le de permandur se izolează între ele electric prin mîsuri speciale, cu lacuri electroizolante, folie de nichel sau alte materiale electroizolante.

Pe lîngă aceste dezavantaje, permandurul are o rezistență mică la coroziune în comparație cu nichelul. Lipirea permandurului cu elementele componente ale sistemului oscilator ultrasonic se face la fel de bine ca și lipirea nichelului.

Aliajele Fe - Al numite alfer au de asemenea proprietăți magnetostrictive bune ($\epsilon = 40 \cdot 10^{-6}$), din care cele mai răspîndite aliaje sînt: Al 12%(12%Al, 88%Fe) și Al 14%(14%Al, 86%Fe). Au o rezistivitate electrică ridicată ceea ce face ca transductoarele din alfer să aibă pierderi de energie mult mai mici decît la cele din nichel. Are dezavantajul că se lipește foarte greu, îmbinarea cu piesa intermediară sau cu concentratorul ultrasonic făcîndu-se prin sudare cap la cap ceea ce complică mult tehnologia de realizare a sistemului oscilator. Dependența magnetostricțiunii în funcție de intensitatea cîmpului magnetic $\epsilon = f(H)$ pentru diferite materiale este dată în figura 3.3.

De perspectivă sînt feritele magnetostrictive și ceramice magnetostrictive [276], [82], pentru confecționarea miezurilor transductoarelor magnetostrictive, deoarece pierderile lor electrice prin curenți turbionari sînt neglijabile, avînd rezistivități electrice foarte mari. Principalul lor dezavantaj este rezistența lor mecanică scăzută și fragilitatea care le limitează în prezent în instalații de ultrasunete de putere mică.

Proprietățile materialelor și aliajelor magnetostrictive (tab.3.1.) în special valoarea magnetostricțiunii depind atât de compoziția chimică a lor, dar pot interveni modificări importante în funcție de prelucrările mecanice și tratamentul termic. Calitatea tratamentului termic are influență mare asupra efectului magnetostriktiv. Tratamentul termic de recoacere se aplică tolelor

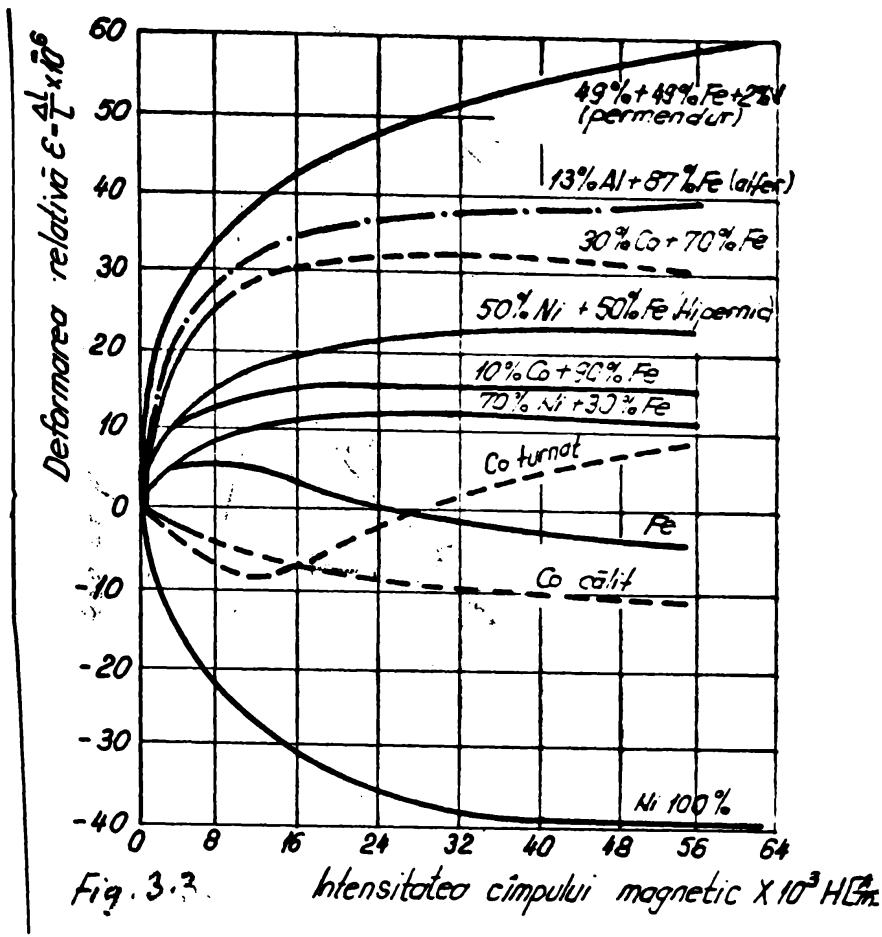


Fig. 3.3.

Fig. 3.3.

Intensitatea cimpului magnetic $\times 10^3 H/cm$

după prelucrările mecanice finale și are ca scop refacerea structurii cristaline distruse, diminuarea tensiunilor interne iar la nichel realizarea peliculei de oxid izolator electric și rezistent mecanic.

Tolele de nichel se introduc în cuptor la temp de 100°C, se încălzește până la 650°-700°C cu viteza de încălzire 100°-200°C/oră după care se menține timp de 2 ore la temperatura fi-

3.3 Ferite magnetostriective

De câteva decenii s-au adus perfecționări în realizarea materialelor magnetostriective, așa numitele materiale magnetostriective ceramice, numite ferite, care înlocuiesc cu succes la puteri mici materialele feromagnetice metalice [52], [196].

Caracteristicile unor ferite magnetostriective s'nt date în 3.2. [92], [157].

Principalele avantaje ale transducerelor magnetostriective realizate din ferite:

- 1.) Se realizează sub formă compactă, monolit prin presare și sintetizare prin metalurgia pulberilor, nefiind necesare tole subțiri de 0,1...0,3 mm obținute prin laminare care apoi trebuie izolate electric între ele și asamblate în pachet.

Tabelul 3.1.

Proprietăți	Nichel 100% Ni	Alfer 14%Al, 86% Fe	Permenur 49%Co, 49%Fe 2%V	65%Co, 35%Fe
Viteza acustică C_L (m/s)	4750	5100	5200	5000
Magnetostricțiunea la saturatie ϵ_s -	$35 \cdot 10^{-6}$	$40 \cdot 10^{-6}$	$70 \cdot 10^{-6}$	$90 \cdot 10^{-6}$
Inductia magnetică la saturatie B_s [T]	0,64	1,34	2,4	2,2
Permeabilitatea magnetică relativă inițială μ_{r0} -	400	1000	700	150
Permeabilitatea magnetică relativă maximă μ_{rmax} -	2500	2800	4500	1500
Câmpul magnetic coercitiv H_c [A/m]	55,70	55,70	199,155	294,436
Rezistivitatea electrică ρ_e [$\Omega \cdot m$]	$7 \cdot 10^{-8}$	$99 \cdot 10^{-8}$	$26 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-8}$
Modulul lui Young E [N/m^2]	$2,1 \cdot 10^{11}$	$1,77 \cdot 10^{11}$	$2,18 \cdot 10^{11}$	$2,24 \cdot 10^{11}$
Rezistența la rupere σ_{tr} [N/mm^2]	47	79	45	67
Densitatea ρ , kg/m^3	8900	6650	8080	8250

Tabelul 3.2.

Caracteristici	F 21	F 38	F 41	F 42
Densitatea ρ , kg/m^3	5200	5270	5210	5200
Viteza acustică C_L , m/s	5790	9940	5750	5490
Magnetostricțiunea la saturatie ϵ_s -	$-26 \cdot 10^{-6}$	$-9 \cdot 10^{-6}$	$-26 \cdot 10^{-6}$	$-26 \cdot 10^{-6}$
Punctul Curie $^{\circ}C$	990	260	990	975
Coefficientul de transmisie magnetomecanică la inducția rezonanță	0,15	0,10	0,16	0,23
Coefficientul de transmisie magnetomecanică la inducția optică	0,21	0,14	0,24	0,33

2.) Au pierderi foarte mici prin curenti turbionari.

3.) Au rezistență mare la coroziune și dese pot funcționa în medii agresive din punct de vedere chimic.

4.) Feritele au o rezistivitate electrică de $10^8 \dots 10^{10}$ și mai mare decât metalele magnetostriective și ca atare pierderile prin curenti turbionari s'nt neglijabile în comparație cu celele metalice oricât de subțiri ar fi.

5.) Randamentul electromecanic este ridicat.

6.) Pierderile de putere fiind mai mici în ferite ele pot funcționa la frecvențe mari.

7.) Miezurile din ferită fiind confecționate prin presare și sintetizare în construcție monolit, au o tehnologie de fabricație mai ușoară decât transductoarele din tele, factorul de calitate mecanic Q_m la transductoarele monolit din ferită este totdeauna mai mare decât la miezuri asamblate din tele.

8.) Lipsește anizotropia proprietăților magnetice și magnetostriective la ferite și care la tele există datorită laminării și prelucrărilor mecanice.

9.) Premagnetizarea miezurilor din ferită se realizează mult mai ușor și comod prin intercalarea în miezul de ferită a unor plăcuțe înleiate din ferite magnetizate permanent. Datorită acestor metode de premagnetizare se simplifică problema alimentării cu curent electric continuu și crește totodată randamentul nefiind necesar un consum în plus de energie.

Compoziția chimică a unei ferite este:

$MeO \cdot Fe_2O_3$, unde Me - un metal bivalent Me = Ni, Co, Fe, Mn, Mg, Cu. Compoziția chimică a unor ferite este dată în tab.3.3.

Tab.3.3.

Tipul feritei	Compoziția chimică
F 21	(NiO) · (Fe ₂ O ₃)
F 38	(NiO) _{0,50} · (ZnO) _{0,50} · (Fe ₂ O ₃)
F 41	(NiO) _{0,99} · (CoO) _{0,01} · (Fe ₂ O ₃)
F 42	(NiO) _{0,98} · (CuO) _{0,02} · (Fe ₂ O ₃)

Proprietățile magnetostrictive ale feritelor, ca și pentru materialele metalice, pot fi caracterizate prin magnetostricțiunea de saturație ϵ_s , permeabilitatea magnetică inițială μ_{0F} , câmpul magnetic coercitiv H_c , inducția magnetică de saturație B_s .

Cea mai mare constantă magnetostrictivă o are ferita de cobalt $\epsilon_s = - 120 \cdot 10^{-6}$, saturația se atinge în câmpuri magnetice mari $H_s = 40.000 \dots 200.000$ A/m, permeabilitatea magnetică este mică iar H_c de ordinul sutelor și mii de A/m. Dintre feritele simple, cea mai bună combinație a proprietăților o are ferita de nichel, $\epsilon_s = - (25 \dots 30) \cdot 10^{-6}$, $\mu_{0F} = 15 \div 45$ în funcție de tehnologia de elaborare, ea se utilizează în instalații tehnologice cu ultrasunete.

3.4. Ecuațiile efectului magnetostrictiv

Legătura fundamentală între proprietățile magnetice și mecanice este dată de fenomenul de magnetostricțiune, care se poate prezenta prin următoarele ecuații [58], [294]:

$$\sigma = f_1(B, \epsilon) \quad \text{și} \quad H = f_2(B, \epsilon) \quad (3.1)$$

în care σ - este tensiunea mecanică elastică în materialul feromagnetic

$\epsilon = \Delta l/l$ - deformarea elastică specifică;

B - inducția magnetică;

H - intensitatea câmpului magnetic.

Diferențiala totală a acestor funcții este:

$$d\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial B} dB + \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} d\epsilon \quad (3.2)$$

$$dH = \frac{\partial H}{\partial B} dB + \frac{\partial H}{\partial \epsilon} d\epsilon \quad (3.3)$$

Prima ecuație caracterizează efectul magnetostrictiv direct iar a doua efectul magnetostrictiv invers. Pentru cele două efecte se introduc constantele următoare:

$$\gamma = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial B} \right)_{\epsilon = ct} \left[\frac{H}{T} \right] - \text{constanta} \quad (3.4)$$

magnetostrictivă directă, care caracterizează transformarea energiei magnetice în energie mecanică și

$$\gamma^* = \left(\frac{\partial H}{\partial \epsilon} \right)_{B = ct} \left[\frac{A}{m} \right] - \text{constanta} \quad (3.5)$$

magnetostrictivă inversă, care caracterizează transformarea energiei mecanice în energie magnetică. Luând în considerare și măsurile:

$\left(\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}\right)_{B=ct} = E \left[\frac{H}{\sigma}\right]$ - modelul lui Young (de elasticitate longitudinal) și

$\left(\frac{\partial H}{\partial B}\right)_{\epsilon=ct} = \frac{1}{\mu}$, în care $\mu \left[\frac{H}{B}\right]$ permeabilitatea magnetică, ecuațiile efectului magnetostrictiv devin:

$dV = \gamma dB + z d\epsilon$, (3.6)

$dH = \frac{1}{\mu} dB + \gamma' d\epsilon$, (3.7)

care se utilizează la proiectarea și verificarea transductoarelor magnetostrictive.

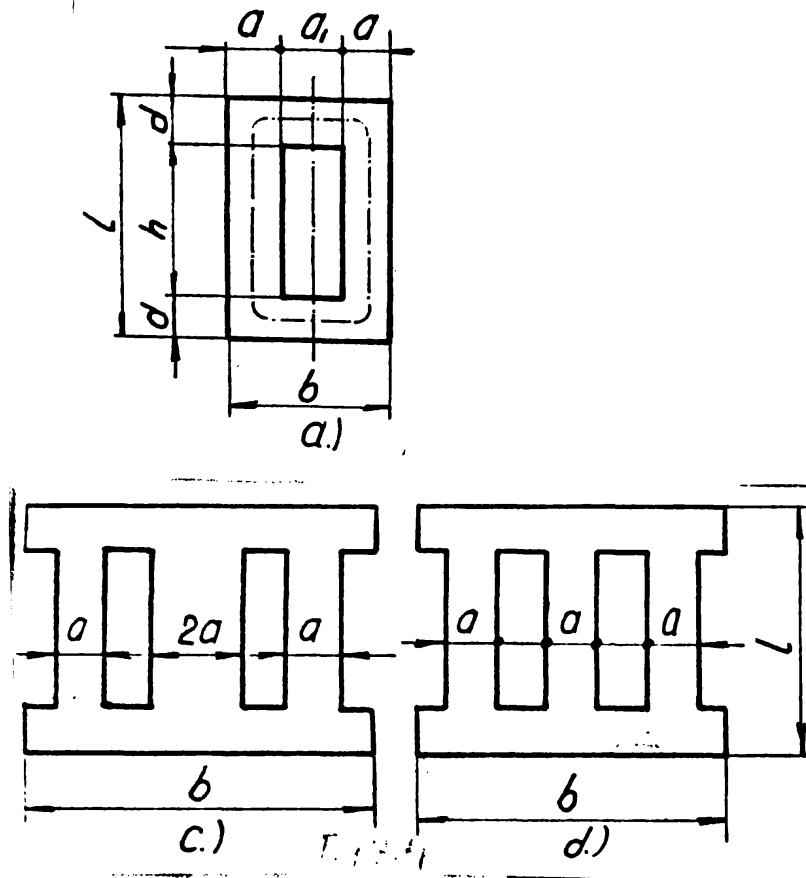
În lucrare s-au utilizat transductoare magnetostrictive metalice din tole de nichel și din ferite magnetostrictive care s-au proiectat, verificat și testat experimental în vederea efectuării experiențelor de prelucrare dimensională.

3.6. Cercetări privind proiectarea și testarea unor transductoare magnetostrictive tip pachet

Transductorul magnetostrictiv notat în continuare prescurtat TSM este subansamblul component al capului acustic sau blocului ultrasonic al mașinilor de prelucrat cu ajutorul undelor ultrasonice, în care se transformă energia electrică de frecvență ultrasonică în vibrații mecanice clasice la ieșire, care se transmit în spațiul de lucru tehnologic [128] . [151] . [197] .

Cele mai utilizate variante de TSM utilizate la mașinile unelte ultrasonice s'nt cele de tip pachet cu circuit magnetic închis [126] [58] multicoilantă, fiind cele mai raționale din punct de vedere al fluxului magnetic de dispersie minim (Fig.3.4.)

La puteri mici și mijlocii se utilizează frecvent TSM cu două coloane respectiv cu o ferestră, variantele a) și b) din Fig.3.4. TSM metalici se realizează din tole cu grosime mică 0,1.. ..0,3 mm pentru a micșora pierderile prin curenți turbionari iar cele din ferite în construcție unicilant având rezistivitatea electrică mult mai mare cu pierderi neglijabile. Pe coloanele de dimensiuni a,b,t se plasează bobinajele de excitație și premagnetizare (sau bobinaj comun) ele constituind elemente active în care are naștere efectele magnetostrictive. Jugurile de dimensiuni



d.b.t. s'nt elemente pasive, ele ajut la închiderea fluxului magnetic și la formarea suprafeței radiante $S_r = b \cdot t$ prin care vibrațiile mecanice se transmit sub formă de unde elastice (acustice) spre concentratorul ultrasonic sau chiar direct în mediul de lucru.

Fig. 3.4.

3.5.1. Determinarea condițiilor de rezonanță mecanică a transductorului

Transductoarele cu două coloane (fig. 3.4 a și b) pot fi echivalente cu elementul oscilant echivalent din fig. 3.5, respectiv fig. 3.6 obținut din fig. 3.4 a prin secționare cu un plan secțian vertical

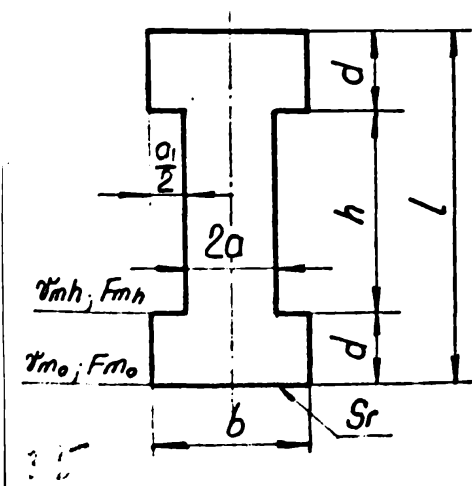


Fig. 3.5.

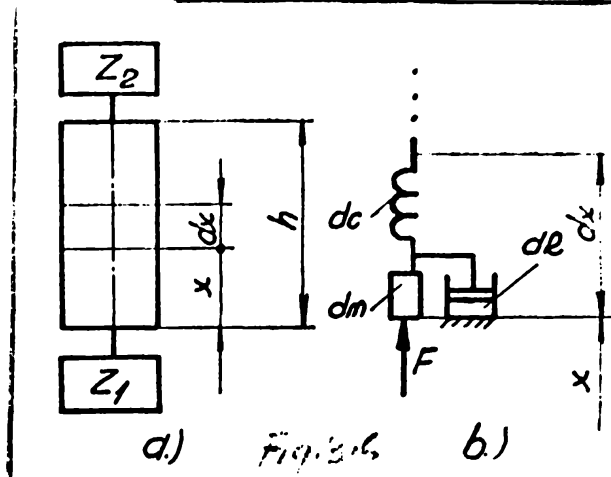


Fig. 3.6.

și alipirea celor două jumătăți pe laturile exterioare laterale. Un element similar se obține și din varianta 3.4.b., însă de lățime a.

pe coloană și b/c la capete.

Partea activă centrală are forma unei bare cu secțiune constantă cu parametri distribuiți [108], [253] încărcată cu impedanța de sarcină Z_s a jugurilor pasive (Fig. 3.7.). Notând masa barei m , Kg:

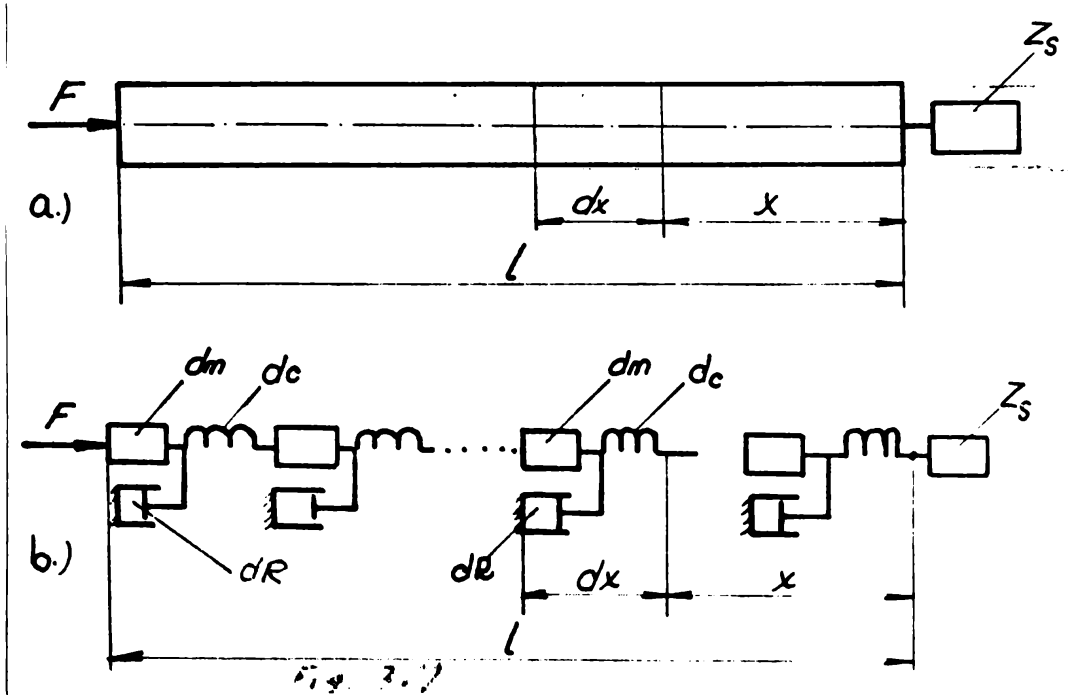


Fig. 3.7.

$R \left[\frac{NS}{m} \right]$ sau $\left[\frac{KE}{g} \right]$ - rezistența activă de pierderi prin frecare și $C \left[\frac{m}{N} \right]$ - flexibilitatea, inversul constantei elastice, fiecare lungime elementară dx a coloanei poate fi echivalentă cu parametrii elementari.

$d_m = \frac{m}{l} dx = m_1 dx$; $dc = \frac{C}{l} dx = C_1 dx$ și $dR = \frac{R}{l} dx = R_1 dx$, în care m_1 este masa pe unitatea de lungime, C_1 și R_1 , respectiv flexibilitatea și rezistența activă pe unitatea de lungime. Bara, respectiv coloana activă având secțiunea S și modulul de elasticitate E , are flexibilitatea $C = l/ES \left[m/N \right]$, respectiv $C_1 = 1/ES$, de unde se obține viteza de propagare a undelor elastice, $C_1 = \sqrt{E/\rho} = 1/\sqrt{m_1 C_1} \left[m/s \right]$. Aplicând legile mecanicii de echilibru al elementului dx asupra căruia acționează forța armonică F și viteza de oscilație v , se obțin amplitudinile complexe ale forței \underline{F}_m și vitezei \underline{v}_m .

$$\underline{F}_m = F_m e^{j\omega t} \text{ch}kx + v_m \frac{m_1}{\rho} e^{j\omega t} \text{sh}kx \quad (3.8.)$$

$$\underline{v}_m = v_m e^{j\omega t} \text{ch}kx + \frac{F_m}{\rho} e^{j\omega t} \text{sh}kx \quad (3.9)$$

în care: $\underline{v}_0 = \sqrt{\frac{R_1 + j\omega m_1}{j\omega C_1}}$. (3.10)

este impedanța, (rezistență) de undă a coloanei cu pierderi active serie sub formă complexă (obs.: mărimile complexe sînt bgrate în

partea inferioară). Se omite hăărarea pentru F_n și v_n . F_{n1} și v_{n1} - amplitudinea forței și vitezei (mărimi complexe) la capătul de ieșire a coloanei la $x = 0$ (în dreapta). Dacă pierderile prin frecare sînt mici și este satisfăcută inegalitatea $R_1 \ll \omega a_1$, constanta de propagare devine:

$$v_0 = \rho c_L S \left[\frac{R_1}{\omega} \right] \text{ sau } \left[\frac{kR}{\omega} \right] \quad (3.11)$$

fiind rezistența de undă a coloanei fără pierderi și egală cu partea reală a impedanței de undă \underline{v}_0 . Se observă că ea nu depinde de frecvență ci de constantele de material ρ , c_L și secțiunea S a coloanei. Ținând cont de $\underline{k} = jk$ și de relațiile $\text{ch}jkx = \text{cosh}kx$ și $\text{sh}jkx = j\text{sinh}kx$, formulele 3.8. și 3.9. devin:

$$F_n = F_{n1} \cdot \text{cosh}kx + jv_{n1} v_0 \cdot \text{sinh}kx \quad (3.12)$$

$$v_n = v_{n1} \cdot \text{cosh}kx + j \frac{F_{n1}}{v_0} \cdot \text{sinh}kx \quad (3.13)$$

care sînt expresiile generale ale amplitudinilor forței F_n și vitezei v_n la distanța x față de capătul de ieșire (din dreapta) al coloanei fără pierderi active ($R_1 = 0$), de secțiune constantă excitată cu o forță armonică la intrare (capătul din stînga). Aceste relații simplificite se aplică în calculele ingineresti pentru sisteme vibratoare fără pierderi, iar în cazul în care pierderile devin importante acestea se iau în considerare prin coeficienți de corecție. Aplicând ecuațiile (3.12) și (3.13) pentru TSN cu două coloane din fig. 3.6 redet echivalent în fig. 3.7.a. unde coloana activă de lungime h este echivalentă simetric cu impedanțele de sarcină egale Z_2 este egal cu $Z_1 = Z_2$ ale celor două juguri pasive. Notînd amplitudinea forței F_{n0} și a vitezei v_{n0} pe suprafața radiantă a jugului (fig. 3.6) și dacă jugul ar fi din material diferit al coloanei avînd rezistența de undă v_{01} și numărul de undă $k_1 = \omega/c_{L1} = 2\pi/\lambda_1$ aplicînd ecuațiile (3.12) și (3.13) pentru $x = d$ se găsesc expresiile

$$F_{n1} = F_{n2} = F_{n0} \text{cosh}k_1 d + jv_{n0} v_{01} \text{sinh}k_1 d$$

$$v_{n1} = v_{n2} = v_{n0} \text{cosh}k_1 d + j \frac{F_{n0}}{v_{01}} \text{sinh}k_1 d$$

Dacă pe suprafața radiantă a jugului nu există sarcină $F_{n0} = 0$ TSN oscilează liber, impedanța de intrare a jugului este $Z_0 = F_{n1}/v_{n1}$

$$Z_0 = F_{n1}/v_{n1} = jv_{01} \text{tg}k_1 d \quad (3.14)$$

Notînd cu Z_{in} impedanța de intrare la mijlocul coloanei $x = h/2$ se obține:

$$Z_{in} = \frac{F}{v_m} = \frac{\cos k \cdot \frac{h}{2} + j \cdot \frac{R_1}{v_m} \cdot \sin k \cdot \frac{h}{2}}{\frac{1}{2} \cdot \cos k \cdot \frac{h}{2} + j \cdot \frac{1}{v_m} \cdot \sin k \cdot \frac{h}{2}} \quad (3.15)$$

care în lipsa pierderilor ($R_1 = 0$) la mijlocul coloanei viteza de oscilație va fi null $v_m = 0$ și $Z_{in} = \infty$. Neglijând cu zero numitorul expresiei (3.15) se obține condiția de rezonanță mecanică a TSM:

$$\frac{1}{2} \cdot \cos k \cdot \frac{h}{2} + j \cdot \frac{1}{v_m} \cdot \sin k \cdot \frac{h}{2} = 0 \quad (3.16)$$

Introducând expresia lui Z_{in} dată de (3.14) se obține forma finală a condiției de rezonanță:

$$\operatorname{tgk} \cdot \frac{h}{2} \cdot \operatorname{tgk}_1 \cdot d = \frac{R_1}{\rho_1 c_1} \quad (3.17)$$

unde: $W_0 = \int \rho_1 \cdot c_1 \cdot n_c \cdot v_c^2 \quad (3.18)$

este rezistența de undă a coloanei, n_c - nr. de coloane; ρ_1 - aria secțiunii transversale a unei coloane, iar

$$W_{01} = \int \rho_1 \cdot c_1 \cdot v_r^2 \quad (3.19)$$

este rezistența de undă a jugului. Dacă jugul și coloana sînt din același material cum obișnuit se realizează în practică, atunci: $W_0/W_{01} = n_c \cdot S_0/S_r = q$ obținându-se condiția practică de rezonanță mecanică:

$$\operatorname{tgk} \cdot \frac{h}{2} \cdot \operatorname{tgk} \cdot d = q = \frac{2h}{2l + a_1} \quad (3.20)$$

l fiind coeficientul de reducere al secțiunii coloanelor în raport cu aria suprafeței radiante S_r . Treacînd această relație în mîrșii dimensionale mai comode de utilizat la proiectare:

$$\lambda = d/(\lambda/4); \quad \beta = \frac{h}{\lambda} = \frac{2h}{\lambda}; \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.21)$$

în care λ este lungimea de undă în materialul magnetostriktiv, se obține:

$$\operatorname{tg}(\lambda \pi / 2) \cdot \operatorname{tg}(\beta \pi / 2) = q \quad (3.22)$$

La proiectare se deduce lungimea coloanei h cînd se cîștă frecvența (3.20):

$$h = \frac{\lambda}{2} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(\frac{q}{\operatorname{tg}(\lambda \pi / 2)} \right) \quad (3.23)$$

3.5.2. Dimensionarea geometrică a transductorului din tele de nichel TMS-Ni-1

Pentru puterea electrică activă $P_0 = 800$ W și frecvența de $f = 25$ MHz, s-a realizat TSM din tele de nichel cu grosimea de 0,1 mm, $c_1 = 4760$ m/s, cu aria suprafeței radiante de formă patrată

$S_r = b \cdot b$, dedusă din $S_r = P_c / P_{exp} = 16 \text{ cm}^2$; $b = \sqrt{S_r} = 4 \text{ cm} = 40 \text{ mm}$
 în care $P_{exp} = 50 \text{ W/cm}^2$ [127] - puterea electrică specifică admisă la nichel. Admitând că $q = n_c \cdot S_c / S_r = 0,8$ ($q = 0,5 \dots 1$) și $n_c = 2$ coloane, rezultă secțiunea unei coloane $S_c = n \cdot S_r / n_c = 6,4 \text{ cm}^2 = ab$, $a = 1,6 \text{ cm}$. Lățimea ferestrei a , trebuie să țină cont de spațiul necesar aşezării bobinei și condiții bune de răcire și evacuarea căldurii în timpul funcționării, ea se recomandă [127] $a_1 = 0,8 \dots 1,5 \text{ cm}$. Se adoptă $a_1 = 10 \text{ mm}$ și $a = 15 \text{ mm}$.

Înălțimea jugului $d = (0,8 \dots 1,2)a$ [127] este limitată inferior de saturația magnetică, iar superior de masa inertă (în plus) care duce la modificarea frecvenței proprii de oscilație la rezonanță a coloanei active. Se alege $d = 15 \text{ mm}$. Numărul de unde $k = 2\pi f / v_L = 33 \text{ m}^{-1}$, iar lungimea activă a coloanei $h = 57,389 \approx 57 \text{ mm}$, aplicând formula (3.23). Lungimea totală a TSM este $l = h + 2d = 87 \text{ mm}$. Această lungime a fost verificată și cu alte formule date în literatură [81] [132] obținându-se rezultate apropiate.

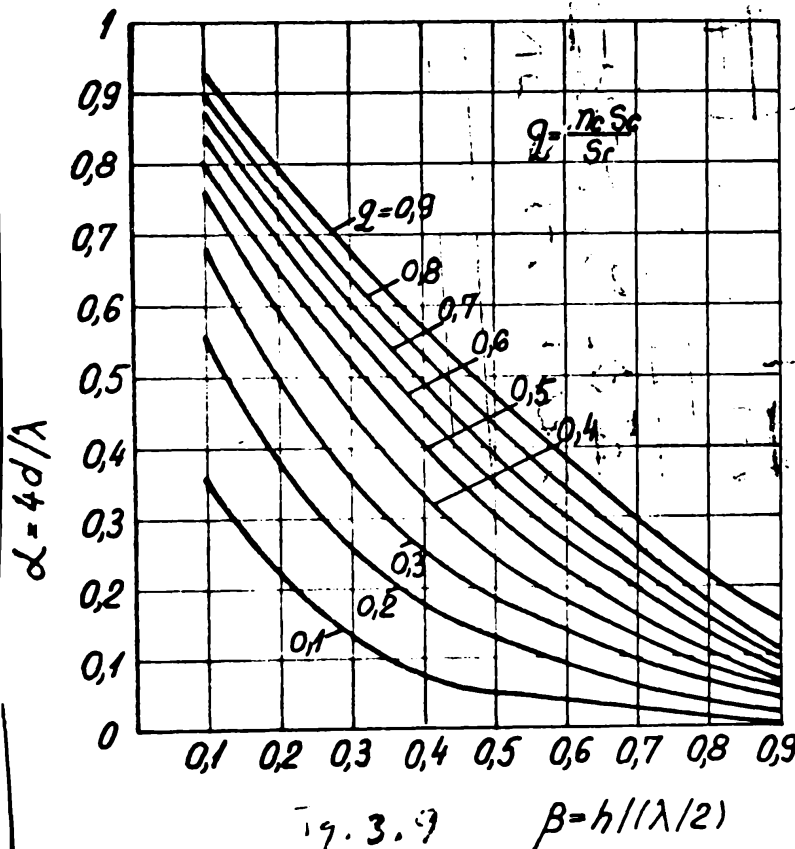
Dimensiunile și forma TSM obținut sînt date în fig.3.8.

Verificarea dimensiunilor TSM s-a făcut și în măriri adimensionale bazate pe relația din care s-a exprimat α în funcție de β avînd ca parametru q :

$$\alpha = \frac{2}{\pi} \arctg\left(\frac{q}{\sqrt{1 - q^2}}\right) \quad (3.24)$$

care este redată în fig.3.9.

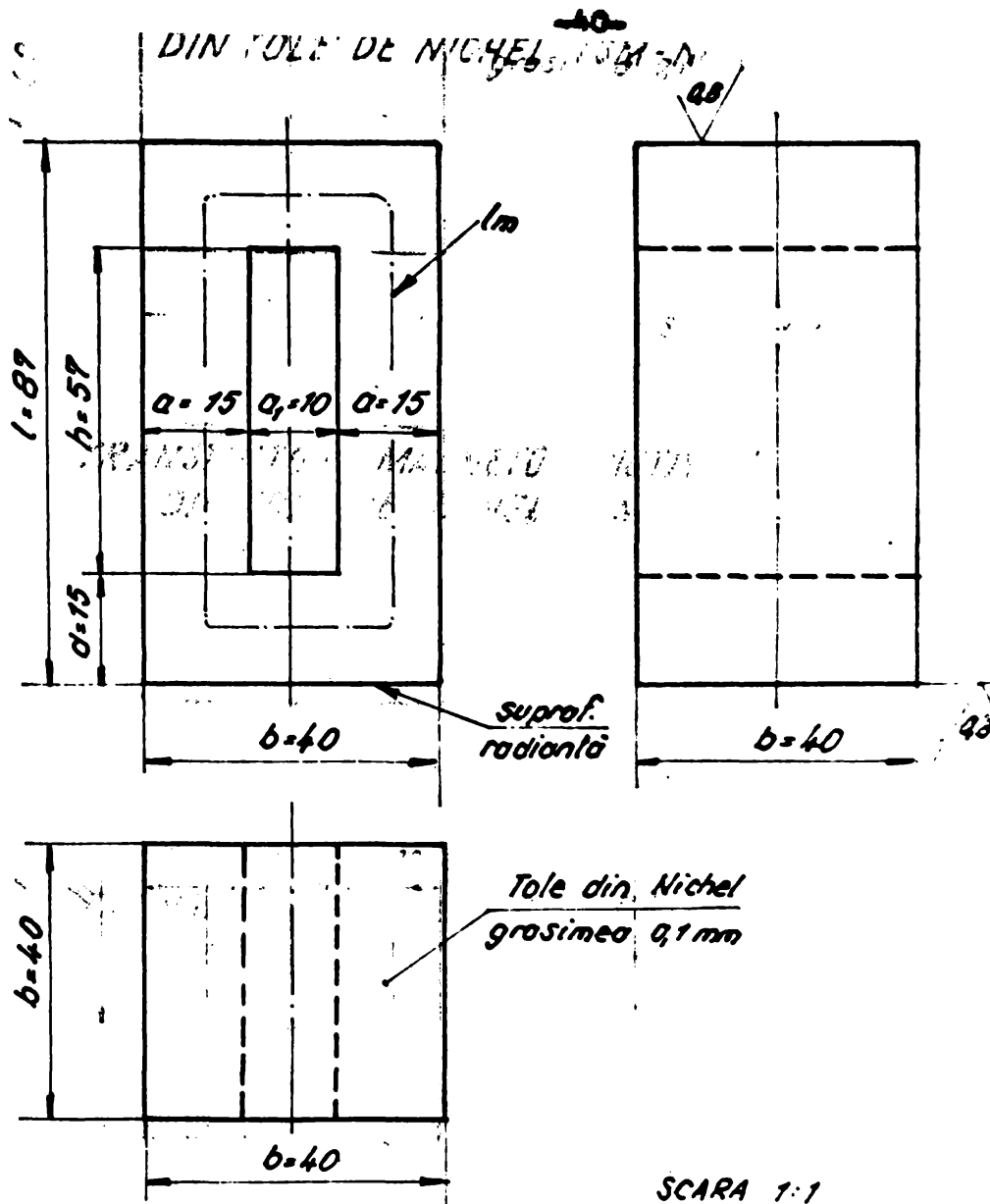
Lungimea raportată a TSM se deduce din $\alpha + \beta = l / (\lambda / 2)$ și este redată în fig.3.10.



Datele pentru TSM realizat sînt: $\alpha = 26 / (87 / 2) = 30 / 95,2 = 0,315$;
 $\beta = h / (\lambda / 2) = 57 / 95,2 = 0,6$; $q = n_c \cdot S_c / S_r = 2,6 / 16 = 0,75$; pentru $\lambda / 2 = v_L / (2f) = 95,2 \text{ mm}$ ($f = 25.000 \text{ Hz}$), rezultă (fig.3.10) $l / (\lambda / 2) = 0,915$ iar lungimea totală TSM va fi $l = 87,1 \text{ mm}$ valoarea propriată de lungimea calculată.

Fig.3.9.





**TRANSDUCTOR MAGNETOSTRICTIV
DIN TOLE DE NICHEL TSM-Ni-1**

Fig. 3.8.

**3.3.3. Verificarea frecvenței de rezonanță a
transductoarelor**

La experimentări s-a utilizat și ferite magnetostriective fabricate în țară la Institutul de Cercetări și Proiectări Electronice - ICE București notată cu TSM - F₂ (fig. 3.11); TSM - F₃, având dimensiunile $l = 105$ mm; $h = 61$ mm; $d = 72$ mm; $a = 13$ mm; $b = 55$ mm; $t = 0,25$ mm și aceeași formă ca și TSM-F₁, cât și o ferită de fabricație japoneză TSM-F₁ (fig. 3.12).

Atât pentru transductoarele din nichel cât și pentru cele din ferite s-a verificat prin calcul și apoi s-a testat experimental

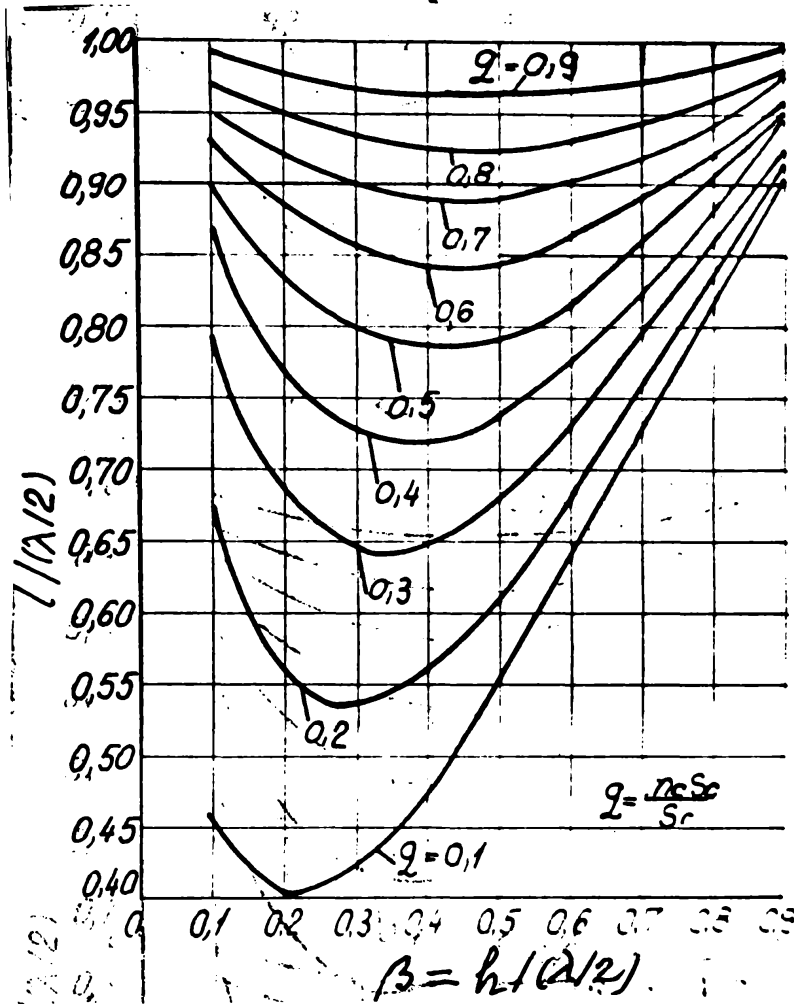
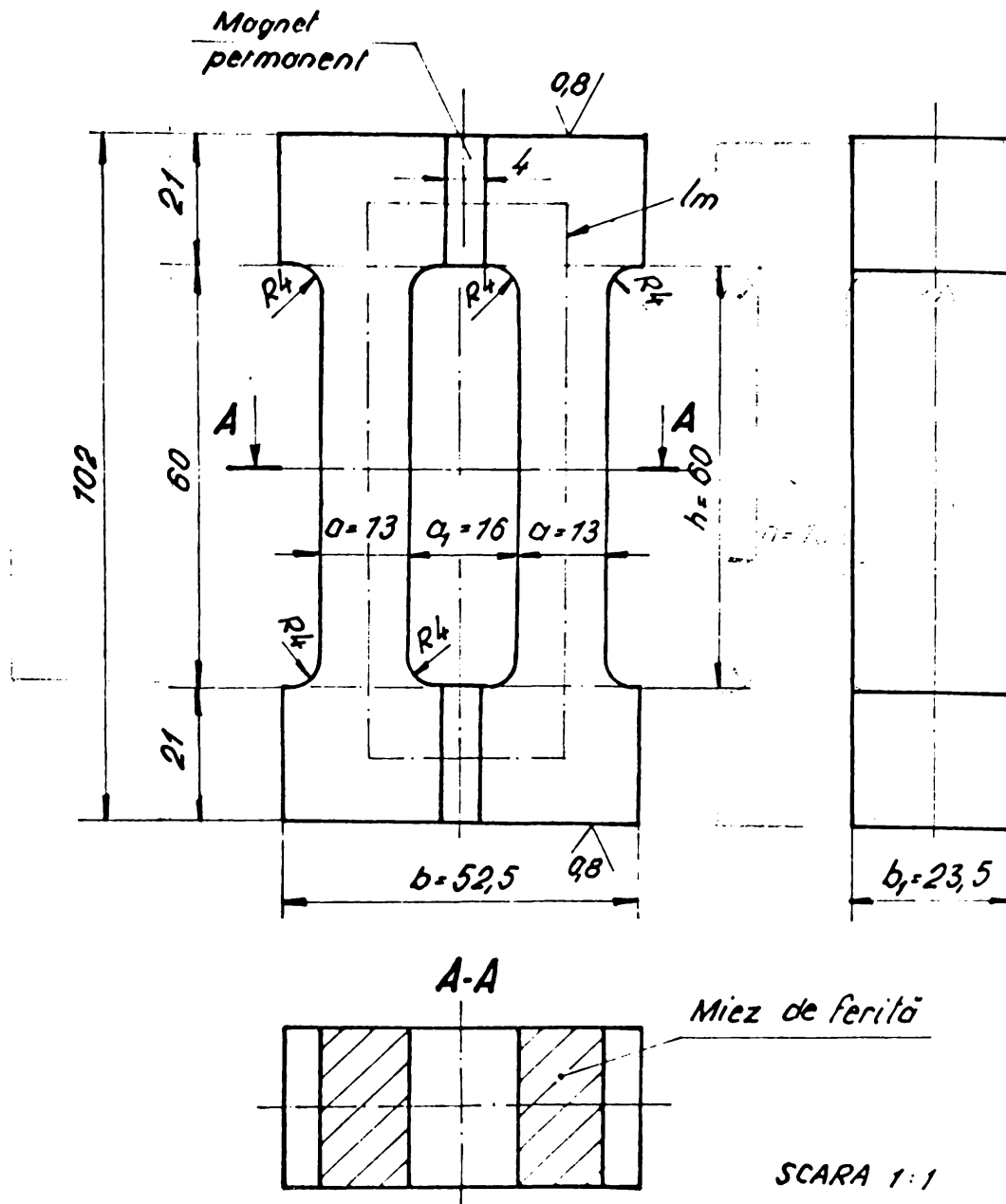


Fig. 3.10

frecvența proprie de rezonanță. Pentru verificarea frecvenței se utilizează relația (3.20), în care se pune în evidență frecvența și care fiind o ecuație transcendentă se rezolvă pe cale grafică sau numerică cu ajutorul calculatorului electronic, punându-se sub formă:

$$\begin{cases} \gamma_2 = \operatorname{tg}(\pi a_2 / \lambda_2) & (3.25) \\ \gamma_2 = q / \operatorname{tg}(\pi b_1 / \lambda_1) & (3.26) \end{cases}$$

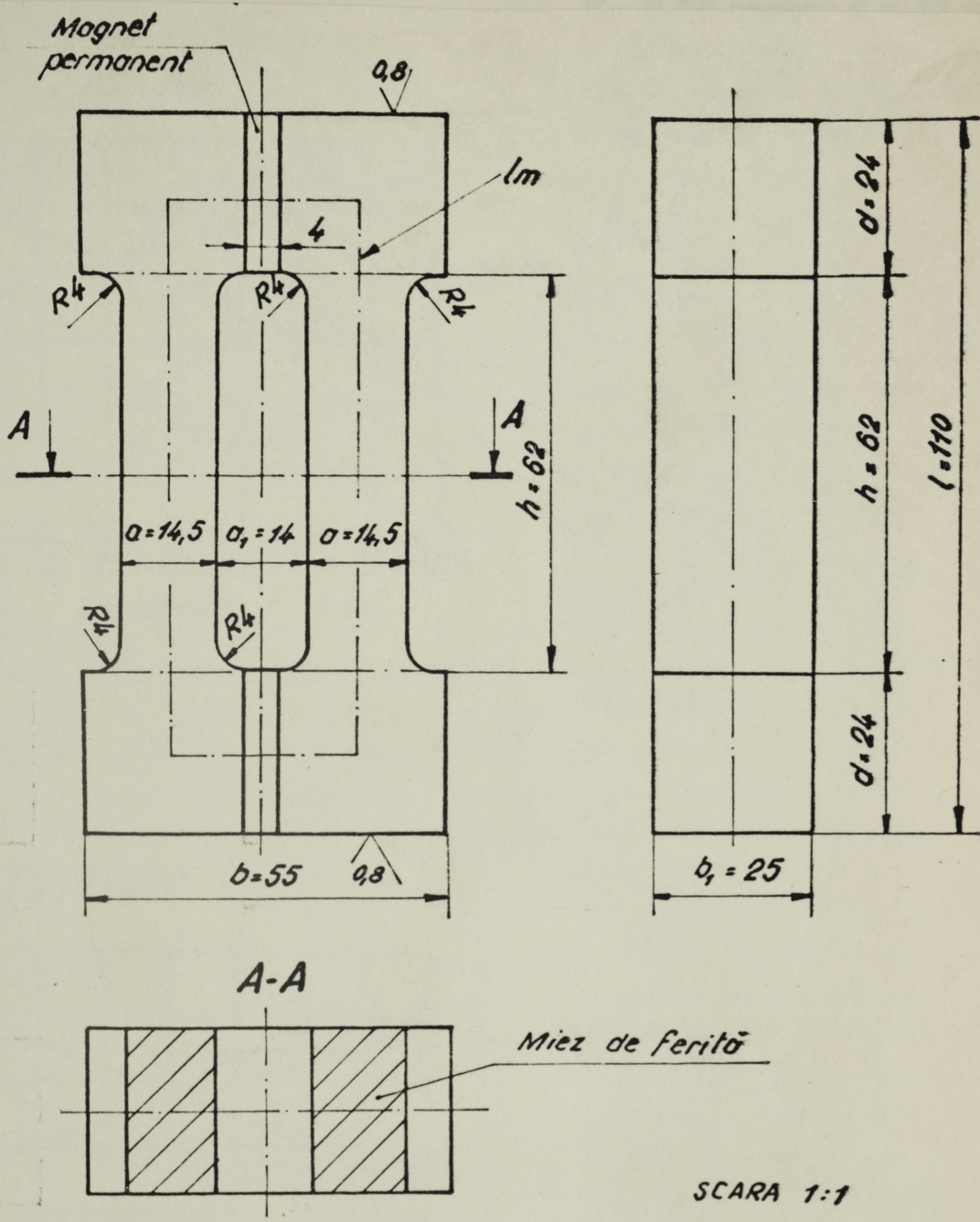
-41a-



TRANSDUCTOR MAGNETOSTRICTIV
DIN FERITĂ TSM-F2 .

Fig. 3.11

Fig 3.11

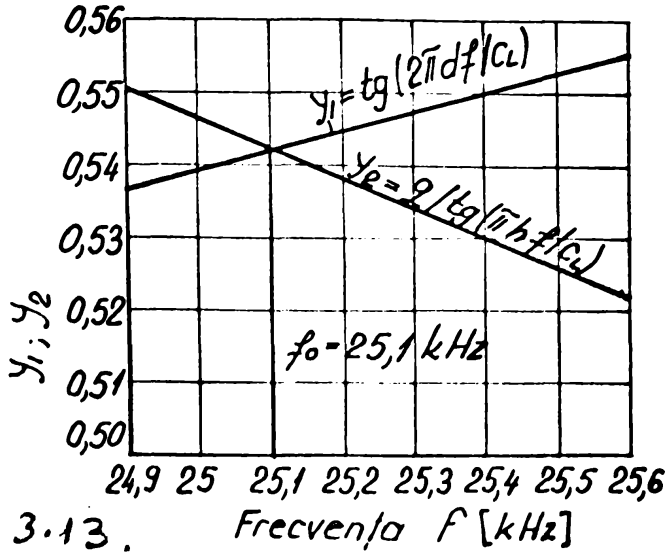


TRANSDUCTOR MAGNETOSTRICTIV
DIN FERITĂ TMS-F1

Fig. 3.12.

iar la intersecția curbilor se obține frecvența de rezonanță f_0 (fig. 3.13; 3.14). Valorile obținute sînt date centralizat în tab. 3.4 și tab. 3.5. Calculele cu relația 3.20 dau erori mici decât 1,3% dacă $q \geq 0,5$ și $\alpha / (\alpha + 3) \leq 0,6$ [278]. Relația (3.20) nu ține cont de posibilitatea apariției oscilațiilor transversale, de încovoiere ale jugului. Acestea se iau în considerare prin coeficienți de corecție cînd raportul lățimii ferestrei a_1 la lățimea coloanei a : $a_1/a \geq 1,5$. Atunci $f'_0 = \varphi f_0$, în care $\varphi = 0,95$ pentru $f \leq 25$ kHz;

TSM - Ni



$\varphi = 0,90$ pentru $f = 25 \pm 50$ kHz [278]. In cazul TSM analizate aceste conditii nu s'nt depășite.

Fig. 3.13

TSM - F2

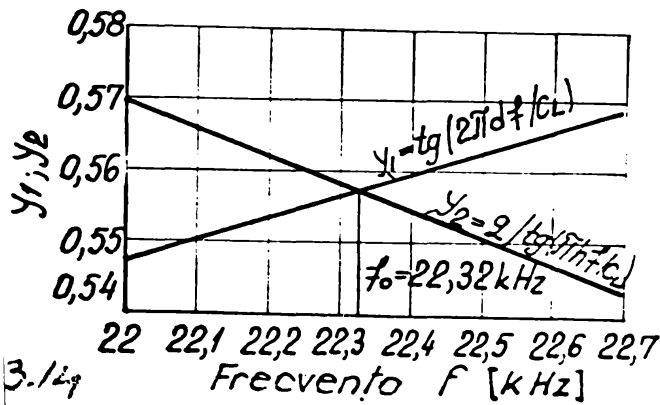


Fig. 3.14.

Tabelul 3.4.

TSM	a	b	a ₂	t	h	d	l	S ₀	S _F	V	M
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm ²	cm ²	cm ³	kg
N1	15	40	10	40	57	15	87	6,000	16,000	116,400	1,036
F ₂	13	52,5	16	23,5	60	21	102	3,055	12,337	94,417	0,491
F ₁	14,5	55	14	25	62	24	110	3,625	13,750	110,950	0,578
F ₃	13	55	14,5	25	61	22	105	3,250	13,750	100,150	0,521

Tabelul 3.5.

TSM	ϵ_L	ρ	$E \cdot 10^{11}$	f	α	B	q
	m/s	kg/m ³	N/m ²	kHz	-	-	-
M1	4760	8900	7,0165	25,100	0,3164	0,6011	0,7500
F ₂	5790	5200	1,743	22,370	0,3238	0,6688	0,4952
F ₁	5750	5210	1,7225	20,960	0,3498	0,4519	0,5273
F ₃	5790	5200	1,743	21,200	0,3235	0,4485	0,4727

3.3.4. Corectarea puterii debitate de transducătoare

Energia electrică aplicată de la generatorul de ultrasunete asupra miezului transducerului creează în acesta tensiuni mecanice și deformări datorită efectului magnetostriktiv conform relației (3.12). Tensiunea mecanică se numește și tensiune magnetostriktivă.

$$\sigma_M = \gamma B + \epsilon E, \tag{3.27}$$

Iar forța magnetostriktivă va fi dată de produsul acestei tensiuni cu secțiunea transversală a miezului $F_M = \sigma_M \cdot S$.

Atunci când frecvența forței magnetostriective excitatoare se apropie de frecvența mecanică a TSM, în miezul acestuia se produc tensiuni mecanice maxime și deformări cu amplitudini maxime. Fenomenul a fost studiat de mai mulți cercetători Y. Kikuchi [106] I. I. Teumin [238] ; L. Ia. Gutin, I. P. Golimins [276] ; C. M. van den Burst, H. Tieda [276] ; A. I. Marhev [126][127] ; L. D. Rosenberg [198]

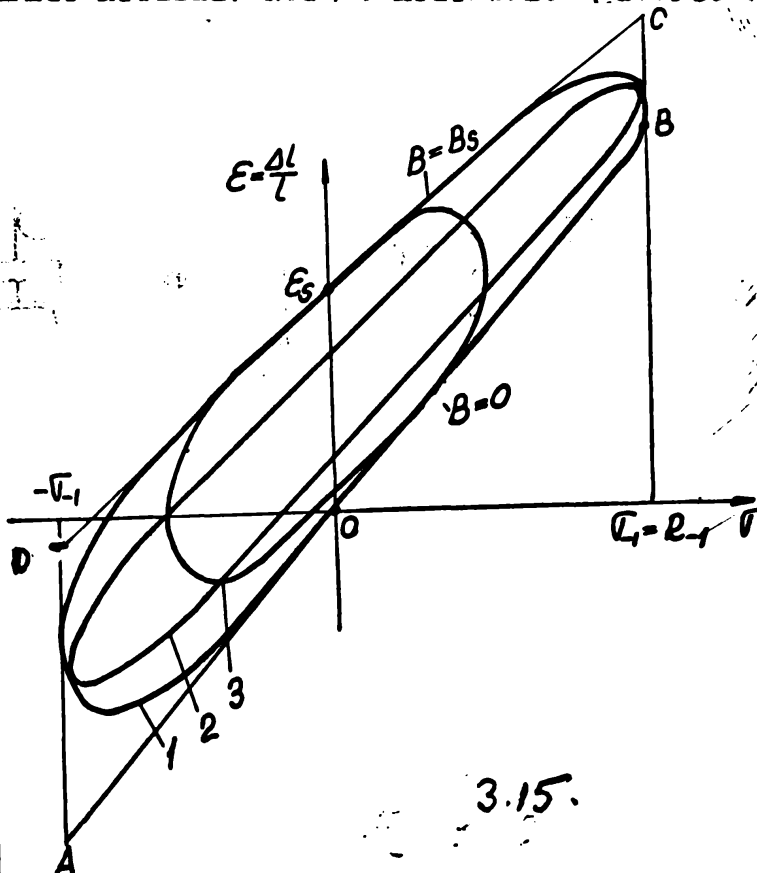


Fig. 3.15.

[276] și alții. Considerând o schemă simplificată după Y. Kikuchi [106], se poate descrie starea de sollicitare mecanică și de magnetizare a miezului conform fig. 3.15., stare care există în miez în același timp. Pe abscisă s-a dat tensiunea mecanică σ care acționează asupra miezului iar pe ordonata deformarea relativă ϵ produsă.

Curbele au fost aproximate cu drepte AB respectiv CD, prima re-

3.15.

din starea micului ^{ne}magnetizat $B = 0$, ($H = 0$ magnetizarea nulă) dreapta trece prin origine, asupra micului acționează numai tensiunea mecanică din exterior, iar a doua CD starea micului la saturația magnetică $B = B_s$. Inclinarea fiecărei drepte este invers proporțională cu modulul de elasticitate E (Young). Pentru stări de magnetizare intermediare vor exista drepte intermediare între AB și CD. Dacă deformările sau tensiunile depășesc patrulaterul ABCD, atunci materialul se rupe. Deformările repetate ale micului, cu frecvența ultrasonică pot duce la ruperea prin oboseală a materialului, solicitarea mecanică limită fiind deci $\sigma_{-1} = R_{-1}$ la oboseală. Aria patrulaterului ABCD este proporțională cu energia consumată pe unitatea de volum la un ciclu, analogă cu curbele de histereză magnetică $B = f(H)$ din electrotehnică: $W_m = \oint \sigma_{-1}$. Componenta principală a acestei energii este dată de aria elipsei înscrise în patrulater. $W_1 = \frac{1}{2} \sigma_{-1} R_{-1}$ și puterea maximă dată de TSM $P_1 = W_1 \cdot f \cdot V$ [W], în care f este frecvența și V volumul TSM, corespunzând elipsei 1 din fig. 3.15. Aceasta arată că astfel trebuie aleasă sarcina mecanică a TSM încât tensiunea mecanică maximă în materialul lui să atingă solicitarea limită la oboseală $\sigma_{-1} = R_{-1}$ la variația inducției magnetice B între $B = 0$ și $B = B_s$ valoarea sa la saturație; atunci se obține de la TSM puterea maximă. Aceasta corespunde acordului optim al transducerului cu sarcina exterioară. Așa cum devedit experimentele, în majoritatea cazurilor practice la eroziune ultrasonică sarcina mecanică din spațiul de lucru nu coincide cu cea corespunzătoare pentru acord optim. Așa cum se observă și din fig. 3.15, în practică pot exista două cazuri limită:

1.) Sarcina mecanică este atât de mică încât tensiunea mecanică variabilă atinge limite la oboseală $\sigma_{-1} = R_{-1}$ fără ca inducția magnetică să atingă saturația magnetică. $B < B_s$, curba 2 din figură, în acest caz TSM lucrează în regiunea de "subîncărcare"

2.) Dacă sarcina mecanică exterioară este așa de mare încât frînează creșterea deformărilor mecanice datorită efectului magnetostriktiv atunci, tensiunea mecanică σ care ia naștere în micul TSM este mai mică decât limita la oboseală $\sigma < R_{-1}$, chiar dacă inducția magnetică atinge saturația maximă $B = B_s$, curba 3 din figură. Acest regim se numește de "supraîncărcare" sau de supraîncărcare a TSM.

Se observă că puterea maximă dată de transducătoare este limitată fie de caracteristicile neliniare ale micului (caracteristică magnetostriktivă $\epsilon = F(B)$, curbe de magnetizare $B = f(H)$, $\sqrt{W} = f(B)$ etc.), fie de rezistența mecanică a lui.

În fiecare din aceste două cazuri limită aria elipsei de funcționare a TSM (curbele 2 și 3), va fi mai mică decât cea cores-

penzătoare la acordul optim.

Atit timp cit TSM lucrează în regiă de supraîncălzire, curba de rezonanță a TSM (variația puterii sau amplitudinea de deplasare în funcție de frecvență, în jurul frecvenței de rezonanță) va rămâne îngustă, mărimile mecanice ale oscilației suprafeței radiante cit și în întregul TSM, deplasarea, viteza și accelerația vor varia după o lege aproape sinusoidală armonică:

$y = y_m \cdot \sin(\omega t - kx)$; $v = dy/dt = \omega y_m \cdot \cos(\omega t - kx)$; $a = d^2y/dt^2 = -\omega^2 y$; $\epsilon = dy/dx = -ky_m \cdot \cos(\omega t - kx)$, $\sigma = \epsilon E$, în care y - deplasarea, v - viteza de oscilație, a - accelerația, ϵ - deformația specifică, σ - tensiunea mecanică, $\omega = 2\pi f$ - pulsația, $k = \omega/c_L = 2\pi/\lambda$ - nr de undă.

Amplitudinile mărimilor sînt: y_m ; $v_m = \omega y_m$; $a_m = \omega^2 y_m$; $\epsilon_m = k y_m = y_m \omega/c_L$. c_L - viteza undelor acustice longitudinale. În determinarea puterii transducerului are rol important deformația specifică maximă la mijlocul TSM și viteza de oscilație a suprafeței radiante. $\epsilon_m = \epsilon_1$, $v_m = v_1$, exprimînd amplitudinile lor. Atit timp cit tensiunea mecanică care soliciță TSM nu depășește limita la oboseală legătura între ϵ_1 și v_1 poate fi considerată liniară. Astfel pentru un transducer cu secțiune constantă și de lungime semiundică $l = \lambda/2$, (λ - lungimea de undă), conform relațiilor de mai sus:

$$v_1 = \omega \frac{\epsilon_1}{k} = \omega \frac{l}{\pi} \epsilon_1 = c_L \epsilon_1 \left(\frac{\omega l}{\pi c_L} \right) = c_L \epsilon_1 \sqrt{A_F} \quad (3.28)$$

în care: $A_F = \left(\frac{\omega l}{\pi c_L} \right)^2 \quad (3.29)$

este un factor de formă a TSM. El este egal cu unitatea pentru TSM cu secțiune constantă și de lungime $\lambda/2$ și $A_F < 1$ pentru fersele reale ale TSM compuse din coloane și juguri. Pentru TSM tip pachet dreptunghiular din fig.3.5.a,b, el are expresia:

$$A_F = \left(\frac{\sin \pi d/2}{\cos \pi d/2} \right)^2 = \left(\frac{\sin \pi/2}{\cos \pi/2} \right)^2 \quad (3.30)$$

dedusă din (3.28) $A_F = v_1^2 / (c_L^2 \epsilon_1^2)$. în care s-a înlocuit deformația specifică:

$$\epsilon_1 = \frac{v_1}{c_L} \cdot \frac{\cos(2\pi d/\lambda)}{\sin(\pi d/\lambda)} \quad (3.31)$$

seriesă pentru $x = h/2$, la mijlocul coloanei în schema echivalentă a TSM din fig.3.6.

Se observă că A_F depinde numai de factorii dimensionali α și β și este invariant în raport cu frecvența de rezonanță a TSM, atit timp cit forma se rămâne neschimbată. Din cauza undelor staționare care se formează în lungul TSM, prin suprapunerea unei directe, incidente, peste cea reflectată centrul tensiunii mecanice

și al deformației va fi la mijlocul celeanei iar vîntul vitezei de oscilație și al deplasării la extremitățile celeanei cînd sarcina este neglijabilă.

Puterea pe care o transmite TSM sarcinii este:

$$P = \frac{1}{2} \cdot r_a \cdot v_1^2 \quad (3.32)$$

în care r_a - rezistența acustică a mediului, fiind partea reală a impedanței mecanice de sarcină:

$$Z_a = r_a + j \cdot X_a \quad \frac{Ns}{m} \quad \frac{kg}{s} \quad (3.33)$$

X_a - fiind reactanța mecanică a mediului iar:

$$r_a = X_a = \rho_a \cdot c_a \cdot S_r \quad \frac{Ns}{m} \quad (3.34)$$

Dacă mediul în care se transmite energia ultrasonică este lichid, suspensie abrazivă și se produce fenomenul de cavitație, rezistența acustică a mediului va scădea. Gradul de scădere al lui r_a se introduce prin coeficientul de cavitație f găsit experimental de Kikuchi [106]:

$$f = \frac{\sqrt{2} \cdot 10^5}{\rho_a \cdot c_a \cdot v_1} \quad (3.35)$$

$$r_a = X_a = f \cdot \rho_a \cdot c_a \cdot S_r \quad (3.36)$$

Introducînd relațiile (3.36) și (3.35) în (3.32) se obține formula puterii debitate de transduceri:

$$P = \frac{1}{2} \cdot f \cdot \rho_a \cdot c_a \cdot S_r \cdot c_L^2 \cdot \varepsilon_1^2 \cdot A_T \quad (3.37)$$

respectiv intensitatea undelor acustice radiate de TSM:

$$I = \frac{P}{S_r} = \frac{1}{2} \cdot f \cdot \rho_a \cdot c_a \cdot c_L^2 \cdot \varepsilon_1^2 \cdot A_T \quad \frac{W}{m^2} \quad (3.38)$$

Amplitudinea forței magnetoelectrice F_M se obține din amplitudinea tensiunii magnetoelectrice σ_M înmulțită cu aria secțiunii celeanei $n_c \cdot S_c$ (fig.3.6.)

$$F_M = n_c \cdot S_c \cdot \sigma_M = q \cdot S_r \cdot \sigma_M \quad (3.39)$$

care redusă la jumătatea înălțimii jugului unde are valoarea:

$$F_1 = F_M \cdot 2 \cos(kd/2)$$

Exprimînd valoarea vitezei pe suprafața radiantă v_1 în funcție de forță și impedanța mecanică Z_M a TSM și cea de sarcină Z_a se obține expresia:

$$v_1 = \frac{F_1}{Z_M + Z_a} = \frac{F_M \cdot 2 \cos(kd/2)}{2 + f \cdot \rho_a \cdot c_a \cdot S_r} \quad (3.40)$$

coeficientul mecanoacustic este dat de raportul dintre puterea acustică

țică P_a și puterea mecanică P_{mec} dezvoltată de TSM:

$$\eta_{mech} = \frac{P_a}{P_{mec}} = \frac{Z_p}{Z_p + Z_s} = \frac{j\omega \mu_0 \cdot c_s \cdot \epsilon_r}{j\omega \mu_0 \cdot c_s \cdot \epsilon_r + R} \quad (3.41)$$

în care $R = \rho \cdot c_L \cdot \epsilon_r$ este rezistența de undă TSM. Înlocuind numitorul din (3.41) în (3.40) se obține:

$$v_1 = \frac{\eta_{mech}}{\rho} \cdot \frac{\sqrt{\sigma}}{c_s \cdot \epsilon_r} \cdot q \cdot \cos(kd/2) \quad (3.42)$$

În cazul acordului optic cu sarcină se poate obține puterea maximă P_{max} debitată de TSM, atunci când deformarea specifică atinge valoarea limită dedusă din rezistența la oboseală a materialului la o variație a inducției magnetice în tot intervalul între 0 și B_s (fig. 3.16). Din figură se observă că:

$$\sqrt{m}_{lim} = 2\sqrt{m} = 2\epsilon_s \cdot i \sqrt{m} = 2\epsilon_s \cdot i \sqrt{m} \quad (3.43)$$

ier viteza v_1 devine:

$$v_1 = \frac{\eta_{mech}}{\rho} \cdot \frac{2\epsilon_s \cdot i \sqrt{m}}{c_s \cdot \epsilon_r} \cdot q \cdot \cos(kd/2) \quad (3.44)$$

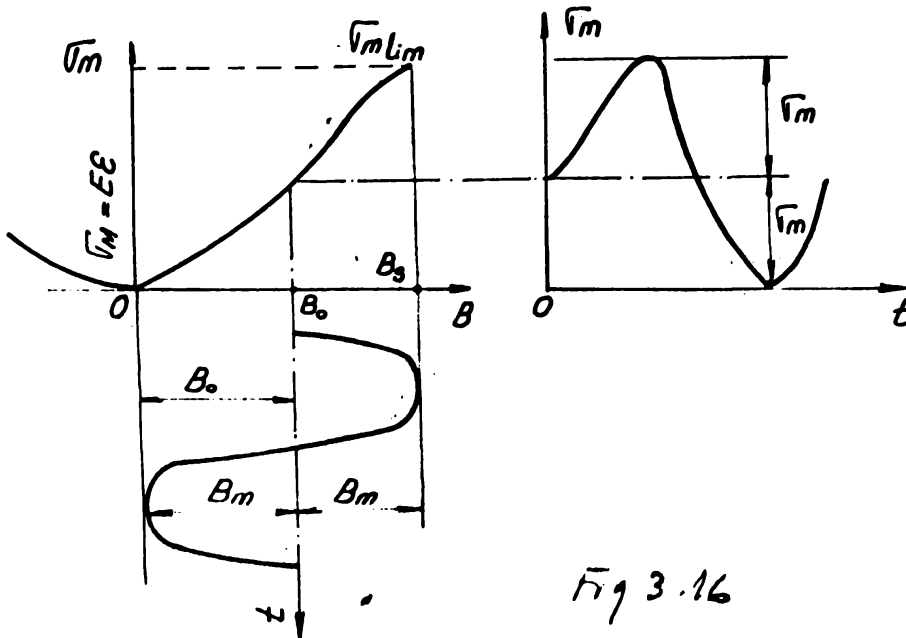


Fig. 3.16

Pentru a vîrînde ambele aspecte în relație antonomatică, saturația magnetică a miezului și solicitarea pînă la limita de oboseală a TSM, în expresia puterii: $P = 1/2(\rho_s \cdot v_1 \cdot v_2)$ o viteză v_1 se înlocuiește cu (3.44) și celelalte v_2 cu relația (3.28) în care:

Fig. 3.16.

$$\epsilon_1 = \epsilon - 1$$

$$P_{max1} = \frac{1}{2} \cdot \eta_{mech} \cdot \rho_s \cdot \epsilon_s \cdot \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot (q \cdot \cos(kd/2)) \cdot \sqrt{A_p} \quad (3.45)$$

sau $A_p = (q \cdot \cos(kd/2)) \sqrt{A_p}$, se obține:

$$P_{max1} = \frac{1}{2} \cdot \eta_{mech} \cdot \rho_s \cdot \epsilon_s \cdot \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot A_m \quad (3.46)$$

ier intensitatea maximă:

$$I_{max1} = \frac{P_{max1}}{S_r} = \frac{1}{2} \cdot \eta_{ms} \cdot E \cdot \epsilon_2 \cdot c_L \cdot \epsilon_1 \cdot A_m \cdot \frac{V}{S_r} \quad (3.47)$$

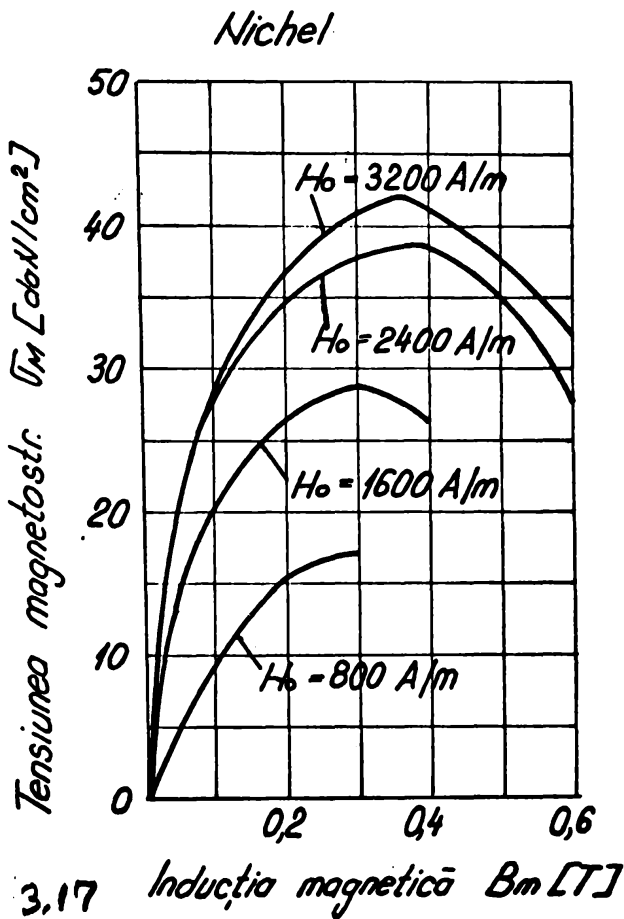
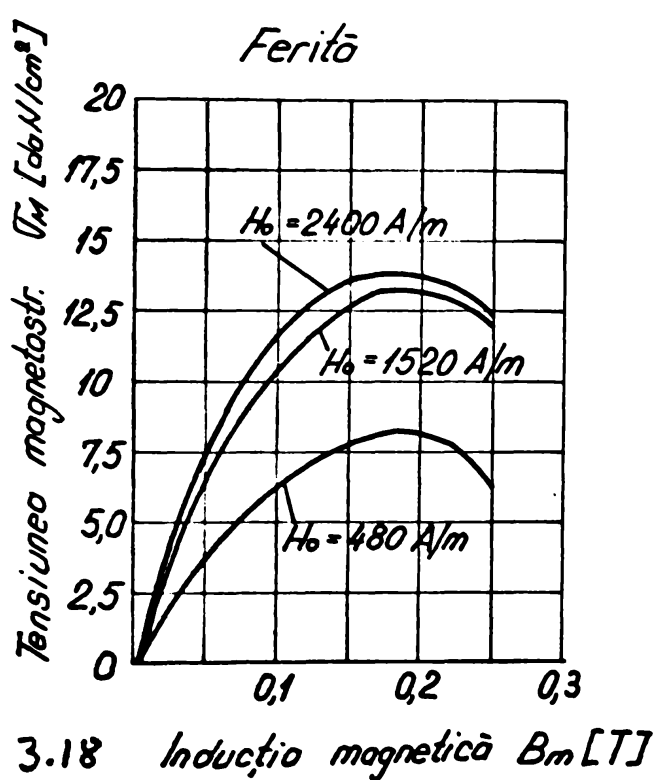


Fig. 3.17.



Acosta este totuși un caz ideal, limită. În realitate trebuie ținut cont de dependența între amplitudinea tensiunii magnetostriective \bar{V}_m și amplitudinea inducției magnetice pentru nichel (fig. 3.17) și ferite (fig. 3.18) la diferite intensități ale câmpului magnetic de premagnetizare H_0 [276]. Înlocuind în $\epsilon_2 = \bar{V}_{M1m}$ corespunzător maximului din aceste grafice verificate experimental se obține:

$$I_{max2} = \frac{1}{2} \cdot \eta_{ms} \cdot r \cdot \bar{V}_{M1m} \cdot c_L \cdot \frac{P_{max2}}{S_r} \cdot \epsilon_1 \cdot A_m \quad (3.48), \quad (3.49)$$

Din ecuația amplitudinii vitezei (3.13) aplicată TME echivalent din fig. 3.6., se deduce expresia amplitudinii de deplasare pe suprafața radiante:

$$\xi_1 = \xi_2 = \frac{R-1}{\rho_0 \cdot \omega} \cdot \gamma$$

$$\cdot \frac{\cos \alpha \cdot \pi/2}{\sin \alpha \cdot \pi/2} \cdot A_0 \quad (3.50)$$

Se introduce notația pentru coeficientul de formă A_0 . Din expresia deplasării

$$A_0 = \frac{\cos \alpha \cdot \pi/2}{\sin \alpha \cdot \pi/2} \cdot A_0 \quad (3.51)$$

$$\xi_1 = \frac{R-1}{\rho_0 \cdot \omega} \cdot A_0 \quad (3.52)$$

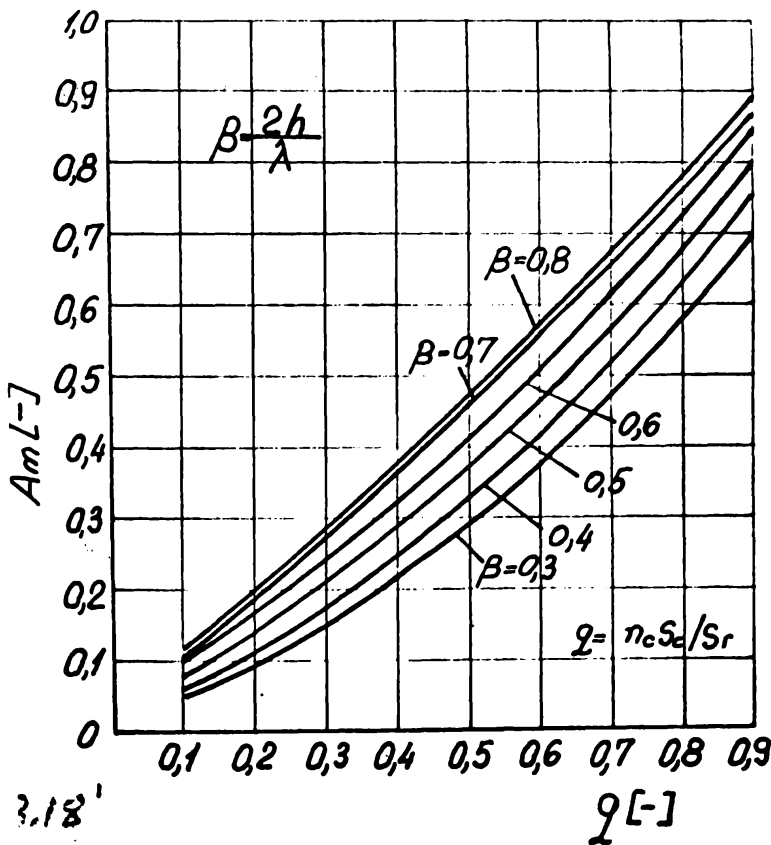
La calculul coeficienților de formă A_m și A_0 se ține cont și de legătura între α , β și γ prin condiția de rezonanță.

Fig. 3.18.

Adeesea în practică sarcina transducerului se determină mai ușor din factorul de calitate sub sarcină a transducerului Q_s dedus din curba de rezonanță a sistemului oscilant ridicată pe cele experimentale. ($Q = \omega_m/r$; $Q = f_p/(f_2-f_1)$), unde r - este rezistența de frecări interioare, f_p - frecvența de rezonanță) [238], [276], [198].

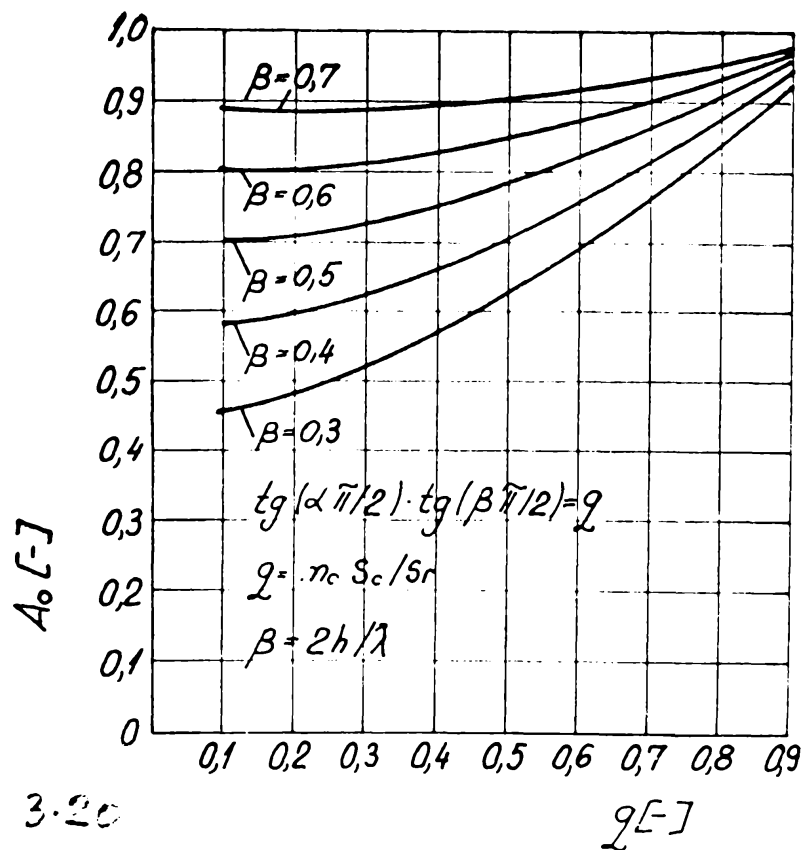
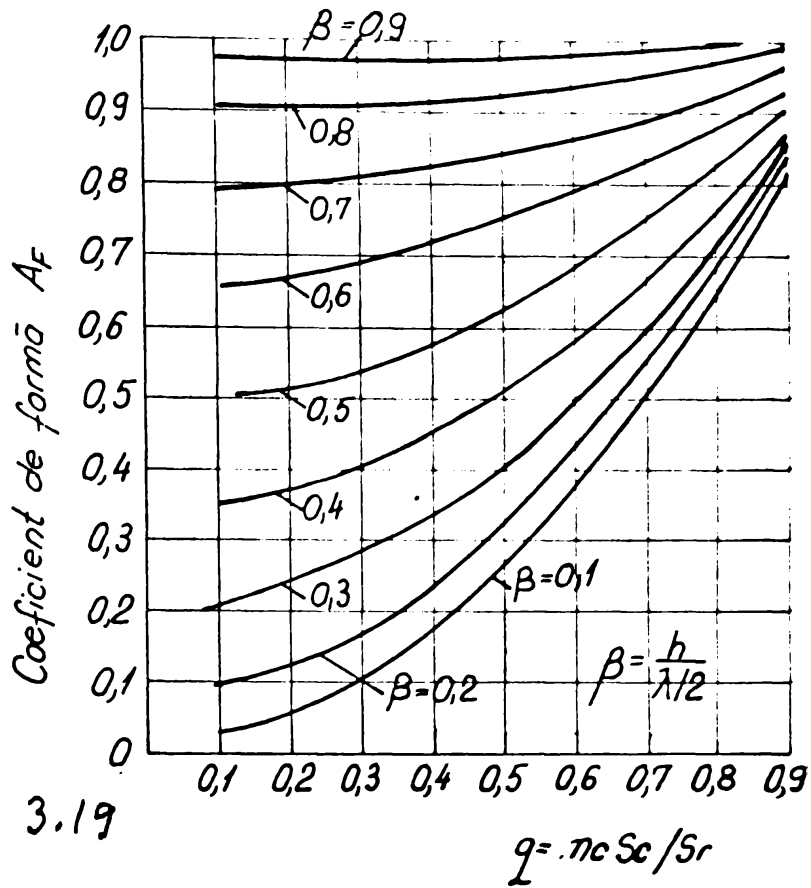
Tensiunea magnetoelectrice în vînz va fi $\sqrt{U_{max}} = \sqrt{U_{min}} \cdot Q_s$ și ea se compară cu $\sqrt{U_{-1}} = R_{-1}$, cele trei condiții de funcționare a TSM devin:

- 1.) $\sqrt{U_{min}} \cdot Q_s > R_{-1}$, pentru regiă de subfrecvență, rezistența mecanică a TSM limitează P și ϵ_1 (la funcționare în gol sau cavitate puternică)
- 2.) $\sqrt{U_{min}} \cdot Q_s = R_{-1}$ acord optim,
- 3.) $\sqrt{U_{min}} \cdot Q_s < R_{-1}$, pentru regiă de suprafrecvență, P și ϵ_1 fiind limitate de saturația magnetică.



Pe baza formulelor deduse s-a trecut la calculul parametrilor transducerelor analizate. După un program în limbaj BASIC, obținându-se valorile din tab. 3.6. și tab. 3.7 rulate pe calculator.

Coefficienții de formă A_p , A_m , A_o în funcție de parametrii adimensionali α , β și γ se pot determina ușor din graficele construite pe baza formulelor date mai sus, din fig. 3.18' pentru A_m ; fig. 3.19 pentru A_p și fig. 3.20 pentru A_o . Fig. 3.18''



Tabelul 3.6.

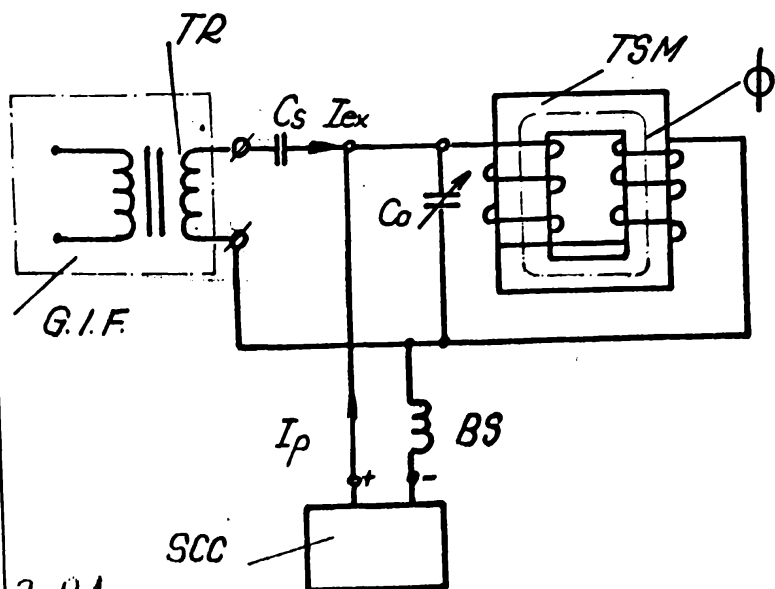
TSM	\bar{U}_{M11w}	H_0	B_0	η_{ms}	$\epsilon_1 \cdot 10^{-6}$	$\epsilon_2 \cdot 10^{-6}$	$v_1 = c_L \epsilon_1$	
	$N/m^2 \cdot 10^6$	A/m	T	-	-	-	m/s	-
H1	1,5	800	0,220	0,70	35	193,36	0,0447	0,0993
F ₂	1,4	2400	0,175	0,80	26	85,06	0,4985	0,1892
F ₁	1,4	2400	0,175	0,85	26	116,11	0,6175	0,1412
F ₃	1,4	2400	0,175	0,80	26	86,06	0,4985	0,1892

Tabelul 3.7.

TSM	A_p	A_m	I	I_{max1}	I_{max2}	ξ_1	A_0
	-	-	V/cm	V/cm	V/cm	m	-
H1	0,8450	0,6685	5,368	159,643	32,138	5,52	0,9224
F ₂	0,5796	0,3647	2,042	32,929	10,177	2,70	0,7600
F ₁	0,5844	0,3877	2,758	49,257	15,398	3,88	0,7658
F ₃	0,5481	0,3390	1,931	30,609	9,460	2,75	0,7402

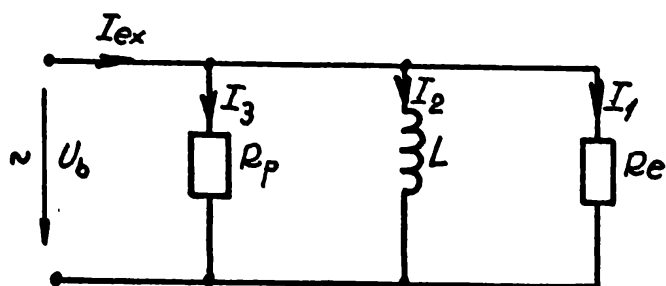
3.3.5. Calculul electric al transducatorelor

De calculul electric al TSM s-au ocupat o serie de cercetători [58], [82], [98], [127], [132], [164], [198]. Se menționează faptul că stabilirea unor scheme electrice echivalente cât mai precise este foarte dificilă din cauza nelinierității componentelor, imposibilității determinării exacte a pierderilor prin curent turbionari și histeresisă și dependenței parametrilor schemei față de puterea aplicată pe TSM, acuratarea de execuție tehnologică a piezului etc. De aceea, în practică se utilizează scheme și relații mai simplificate care apoi se verifică și se corectează experimental.



3.21

Fig. 3.21.



3.22

Schema electrică de alimentare a TSM din nichel este redată în fig. 3.21. Iar schema electrică echivalentă în regim de rezonanță în fig. 3.22. În care GIF - generatorul de ultrasunete (putere aparentă de 1500 VA cu frecvență reglabilă $f = 19... ..10^7$ kHz), SCC - sursă de curent continuu pentru pre-magnetizare, TSM - transduc-

tor magnetostriktiv; TR - transformator de putere, de legătură al GIF; I_{ex} - curentul de excitație, I_p - curent de pre-magnetizare, C_s - condensator de separare pentru protecția GIF, B^* - bobină de șoc pentru protecția SCC, C_a - condensator de acord al GIF cu sarcina TSM. În fig. 3.22 s-a notat: R_p - rezistența activă de pierderi electrice în materialul TSM ținând cont de curenții turbionari și de

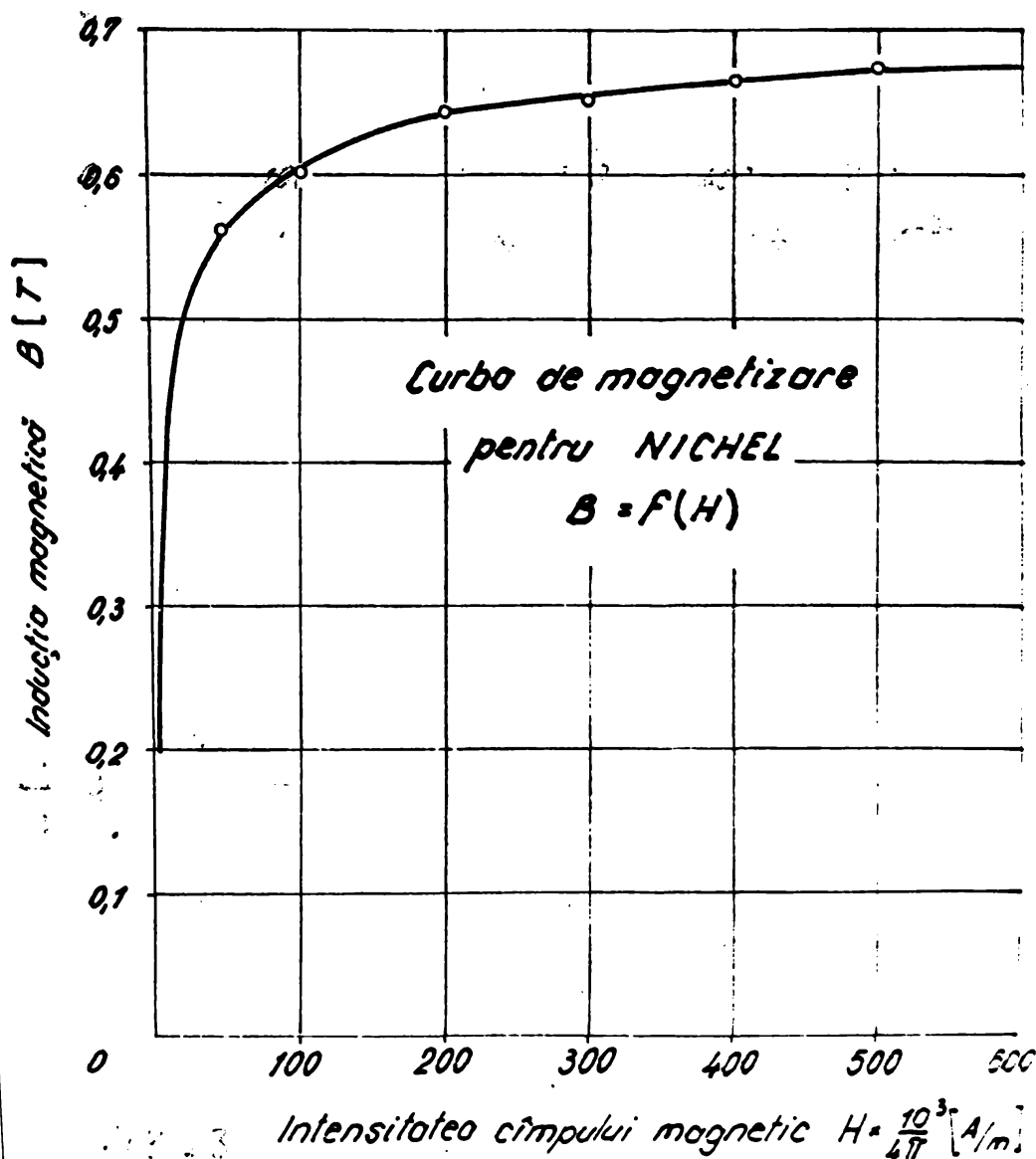


Fig. 3.22.

pierderile prin histererezis. L - inductivitatea bobinei; R_e - rezistența activă a părții mecanice a TSM, transferată în schema electrică echivalentă. R_e ține cont de puterea mecanică a TSM:

$P_{mec} = P_a / \eta_{ms}$, în care $P_a = 90,208...530,2$ W este puterea acustică radiată de TSM-Ni dedusă din tab.3.7. ($P_a = I_{ex}^2 \dots I_{max}^2 R_e$), $\eta_{ms} = 0,7$ randamentul mecanoacustic (tab.3.6.)

Pe aceeași bobină se aplică atât curentul de excitație I_{ex} variabil de la QIF cât și cel de premagnetizare I_p de la SCC. Bobinajul se calculează cu relațiile cunoscute din electrotehnică [203], [235], Ea fiind cu miez din nichel, este element nelinier datorită caracteristicii neliniare de magnetizare a nichelului fig.3.23 și respectiv a caracteristicii neliniare magnetostrictive fig.3.24.

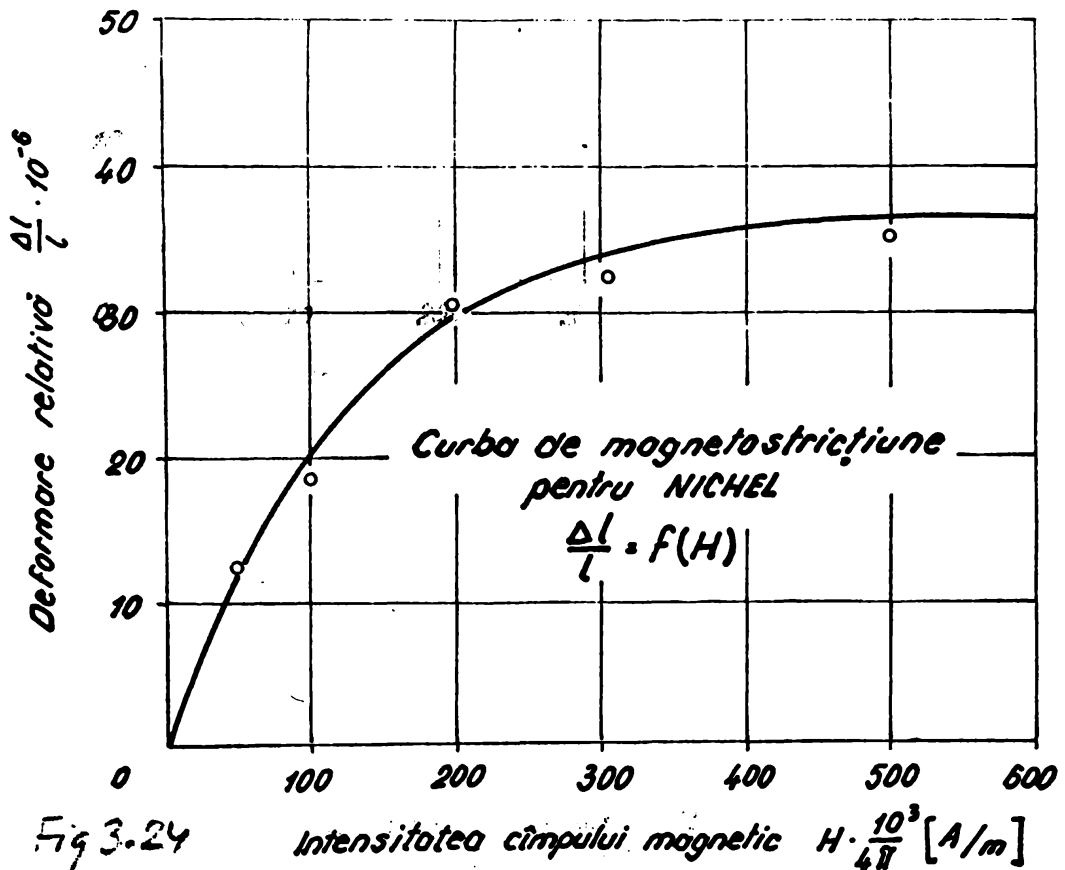


Fig.3.24.

Tensiunea electrică efectivă aplicată pe bobină este $U = 220$ V iar curentul I_1 va fi:

$$I_1 = \frac{P_a}{\eta_{ms} \cdot U} = \frac{530,2}{0,7 \cdot 220} = 3,44 \text{ A}$$

Conform celor de mai sus se poate admite că fluxul magnetic în miez variază sinusoidal $\phi = \phi_m \cdot \sin \omega t$, atunci tensiunea contraelectromotoare (t.e.e.m.) dezvoltată în bobină prin fenomenul

de autoinducție va fi $e = -N \frac{d\Phi}{dt} = N\omega\Phi_m \sin(\omega t - \pi)$, $E_m = N\omega\Phi_m$ fiind amplitudinea t.c.s.m., $e = E_m \sin(\omega t - \pi)$ a cărei valoare efectivă (eficace) este:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N \Phi_m = 4,44 f N \Phi_m; \text{ dar } \Phi_m = B_m \cdot S_c, \text{ se obține:}$$

$$E = 4,44 f N S_c \cdot B_m \quad V$$

În care N = nr. de spire pe o coloană, S_c = secțiunea coloanei TSM, B_m = amplitudinea inducției magnetice variabile. Din teorema II a lui Kirchhoff $U = U_b = r I_{ex} = E$, neglijând $r \approx 0$ rezistența electrică a bobinei, $U = E$, se deduce numărul de spire pe cele două coloane:

$$2N = \frac{U}{4,44 f \cdot S_c \cdot B_m} = \frac{220}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,06 \cdot 0,06} =$$

= (33...55) spire dacă bobinele sînt legate în serie.

Amplitudinea inducției magnetice variabile recomandată pentru nichel [127], [198], [82] este $B_m = 0,06 \dots 0,1$ T, iar valoarea permeabilității magnetice relative dinamice $\mu_{rel} \approx 10^4$ [-] ($H_c = 14615 \text{ Oe} = 1120-1300 \text{ A/m}$) intensității câmpului magnetic variabil va fi:

$$H_m = \frac{B_m}{\mu_{rel} \mu_0} = \frac{B_m}{\mu_{rel} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = \frac{0,1 \dots 0,06}{50,4 \cdot 10^{-7}} = 796 \dots 1126 \text{ A/m.}$$

Se alege $H_m = 1100 \text{ A/m}$. Aplicînd legea circuitului magnetic (suma algebrică a selențiilor $\oint H_K l_K$ de-a lungul ochiului de circuit magnetic este egală cu suma algebrică a căderilor de tensiune magnetice pe laturile ochiului $H_K l_K$) secțiunea transversală a coloanelor și jugurilor fiind aceeași și fluxul magnetic constant, neglijînd fluxul de dispersie: $(2N) \cdot I_2 = H_m \cdot l_m$, se obține curentul I_2 :

$$I_2 = \frac{H_m \cdot l_m}{2N} = \frac{1100 \cdot 0,194}{33 \dots 55} = 6,47 \dots 3,88 \text{ A.}$$

Alegînd $2N = 34$ spire, $N = 17$ spire pe coloană se obține $I_2 = 6,28 \text{ A}$, l_m = lungimea medie a liniei de câmp magnetic. Curentul I_2 , care trece prin rezistența de pierderi R_p se deduce din puterea consumată de GIV pentru acoperirea pierderilor prin curenti turbionari P_{CT} și prin histerezis P_H .

Pierderile pe unitatea de masă a TSM sînt 127 :

$$P_{CT,SP} = \frac{\pi^2}{6 \cdot \rho_{el} \cdot f} \cdot \Delta^2 \cdot f^2 \cdot B_m^2 = \frac{\pi^2}{6 \cdot 7 \cdot 10^{-8} \cdot 5000} (0,1 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 25.000^2 \cdot (0,06 \dots 0,1)^2 = 49,4 \dots 165 \text{ W/kg}$$

$$P_{CT} = P_{CT,SP} \cdot M = 61,5 \dots 170,96 \text{ W}$$

$\rho_{el} = 7 \cdot 10^{-8} \Omega$ = rezistivitatea electrică a nichelului, $\rho = 8900 \text{ kg/m}^3$

densitatea, $\Delta = 0,1 \cdot 10^{-3}$ a grosimea tolei de Ni; f , Hz ; B_m , T

Pierderile prin histerozis se deduc cu relația experimentală alui Steinmetz: [127], [198] care trecută la sistemul de unități SI are forma: $P_{hsp} = 298,58 \cdot f \cdot B_m^{1,6} / \rho = 298,58 \cdot 25.000(0,06 \dots 0,1)^{1,6} = (9,304 \dots 21,07) \text{ W/kg}$.

$$P_h = P_{hsp} W = 9,64 \dots 21,82 \text{ W}; W, \text{ kg} \text{ fiind masa IEM.}$$

Pierderile totale în miez așnt:

$$P_p = P_{CT} + P_h = 71,14 \dots 106,87 \text{ W}$$

$$I_p = \frac{P_p}{U} = \frac{71,14 \dots 106,87}{270} = 0,26 \dots 0,39 \text{ A}$$

Curentul total de excitație efectiv:

$$I_{ex} = \sqrt{(I_1 + I_p)^2 + I_2^2} = \sqrt{(3,44 + 0,39)^2 + 6,28^2} = 7,6 \text{ A}$$

Curentul de premagnetizare se aplică pe aceeași bobină de excitație, el se deduce din legea circuitului magnetic $\mathcal{R}_p = (2N)I_p =$
= Heins:

$$I_p = \frac{H_p l_p}{2N} = \frac{1200 \cdot 0,194}{28} = 6,85 \text{ A}$$

Curentul total care alimentează bobina:

$$I_{tot} = \sqrt{I_{ex}^2 + I_p^2} = \sqrt{7,6^2 + 6,85^2} = 10,23 \text{ A}$$

Aria secțiunii necesare conductorului electric:

$A_{nec} = I_{tot} / j = 10,23 / 2,5 = 4,092 \text{ mm}^2$; $j = 2,5 \dots 3 \text{ A/mm}^2$
densitatea de curenți diametrul sîrmei de cupru necesare:

$d = \sqrt{4 A_{nec} / \pi} = 2,28 \text{ mm}$ Din STAS 10970-83 se alege conductor emailat de cupru Cu-EM-1, avînd diametrul $d = 2,36 \text{ mm}$ și cu izolație $d_{iz} = 2,5 \text{ mm}$. Verificarea așezării în ferestră a bobinei:
 $N = h / (d_{iz} k_u)$; $k_u = h / (N \cdot d_{iz}) = 37 / 17 \cdot 2,5 = 1,34 > 1$, K_u = coeficient de umplere. Reluctanța magnetică a bobinei:

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S} = \frac{0,194}{60,4 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{-4}} = 4,29 \cdot 10^6 \text{ A/Wb}$$

Inductivitatea bobinei:

$$L = \frac{(2N)^2}{R_m} = \frac{(2 \cdot 17)^2}{4,29 \cdot 10^6} = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ H}$$

Fluxul magnetic total în miez:

$$\Phi = (2N)I_{tot} / R_m = 8,11 \cdot 10^{-5} \text{ Wb}$$

Rezistența electrică a așntii:

$$r = \rho_{Cu} \frac{l}{A} = 1,73 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{6,29}{4,374 \cdot 10^{-6}} = 0,025 \Omega$$

$$l = 2(a+t+2d) \cdot 2N + 1,5 = 6,29 \text{ m. lungimea conductorului}$$

$$\rho_{\text{ol}} = 1,73 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}. \quad A = \pi d^2 / 4 = 4,374 \text{ mm}^2$$

Puterea electrică necesară $P_{\text{elec}} = P_{\text{a max}} + P_{\text{p max}} = 930,2 + 186,82 = 1117,02 \text{ W}$.

Încălzirea (puterea) electrică specifică:

$$P_{\text{olap}} = \frac{P_{\text{elec}}}{V_0} = \frac{1117,02}{16} = 69,81 \text{ W/cm}^3 < 90 \text{ W/cm}^3 [127].$$

3.9.5.1. Acordul transducerului cu generatorul

Există diferite metode de a realiza acordul generatorului cu blocul ultrasonic al mașinii [127], [58], [106], [198], [238] [94]. Un procedeu simplu care a dat rezultate acceptabile și în cadrul experimentelor din prezenta teză, constă în conectarea în paralel cu bobina TSM a unui condensator variabil (baterie de condensatoare) C_0 (fig. 3.21), a cărui reactanță capacitivă să compenseze reactanța inductivă a bobinei TSM

$$X_L = X_C$$

$$X_L = \omega L = 2\pi f_p \cdot L; \quad X_C = 1/(\omega C_0)$$

$$C_0 = \frac{1}{\omega \cdot L} = \frac{1}{(2\pi f_p) \cdot L} = \frac{1}{(2\pi \cdot 25000) \cdot 2,7 \cdot 10^{-4}} = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ F} = 0,15 \mu\text{F}$$

Capacitatea condensatorului de acord se va corecta experimental pentru cazul când de TSM este atașat și concentratorul cu obiectul de transfer, în așa fel încât bobina împreună cu condensatorul de acord să fie acordată în rezonanță de curenti la frecvența de rezonanță mecanică a transducerului. Prin aceasta se mărește amplitudinea de oscilație în spațiul de prelucrare, în același timp se micșorează curentul preluat de la generator.

Această variantă de acord a fost necesară să se aplice la efectuarea experimentelor când s-au testat mai multe forme de concentratori ultrasonici, schimbabili prin înșurubare sau obiecte de transfer (scule) deosebite schimbabile. Dacă TSM împreună cu concentratorul și scula au frecvența proprie de oscilație diferită de frecvența de oscilație a TSM, atunci întregul sistem oscilant va funcționa în regiunea de rezonanță la o frecvență ceva mai mică și reactanța inductivă a bobinei X_L modificată, diferită din cauza sarcinii față de cea anterior determinată. Această modificare poate fi compensată prin varierea capacității condensatorului de acord C_0 conectat în paralel cu bobina de excitație.

Blocurile ultrasonice cu transducere din ferite magnetostrictive au fost alimentate de la generatoarele de ultrasunete exis-

tente în laboratorul de ultrasunete al IPTV Timișoara, construite cu elemente tranzistorizate și având puterea de ieșire de 100 W; 150 W; 250 W cu frecvența reglabilă grosier și fin în domeniul 16...35 kHz. Schema de alimentare este asemănătoare cu cea din fig. 3.21, lipsind sursa de curent continuu SCC, ea nema fiind necesară deoarece premagnetizarea se face cu plăcuță de magnet permanent cu grosimea de 4 mm lipită în porțiunea mediană a feritei. Premagnetizarea cu magnet permanent simplifică alimentarea electrică a TSM, crește randamentul electroacustic $\eta_{ea} = 0,7...0,75$ și se micșorează puterea consumată datorită curentilor constanti la TSM metalici, cu până la 15...20 % [276].

Cercetări din străinătate [276], [106], cit și în țară I.C.E. București și [63], [56], [34.a], [97], [98.c], [141.a], [155.a], [210.b] și alții au studiat feritele românești și posibilitățile lor de utilizare optimă. Din aceste cercetări rezultă că magnetul permanent dezvoltă un câmp magnetic constant $H_0 = 16...30 G_0 = 1280...2400 A/m$.

Calculul bobinajului electric la TSM din ferită se face cu aceleași relații ca și la TSM din Ni, pierderile prin curenti turbionari fiind practic nule din cauza rezistivității electrice mari.

Rezultatele calculului se dau în tab.3.8.

Tensiunea electrică efectivă aplicată pe bobina TSM a fost de $U = 15...20 V$. Intensitățile acustice (Tab.3.7) au fost de $I = 2...10 W/cm^2$ pentru feritele F_2 și F_3 și $I = 2,7...15 W/cm^2$ pentru ferita F_1 .

La experimentări curentii de excitație la ferite nu au depășit 4,5...5 A (valori efective), la tensiuni efective de 15...20 V; nu s-a depășit puterea activă pe o ferită de cca. 100 W, la un regim de durată pentru a evita pericolul de fisurare.

Tabloul 3.6.

Denunirea	Simbol și U.M.	TSM-P ₂	TSM-P ₁	TSM-P ₃
Deformație magnetostriectivă	ϵ_s -	$25 \cdot 10^{-6}$	$26 \cdot 10^{-6}$	$26 \cdot 10^{-6}$
Inductia magnetică la saturație	B_s T	0,33	0,36	0,33
Câmp magn. coercitiv	H_c A/m	224	160	224
Permeabilitatea magn. rel. din.	μ_{rd} -	44	51	44
Câmp magn. premagnetiz.	H_0 A/m	1440	1600	1440
Amplit. inductiei variab.	B_m T	0,08	0,1	0,08
Amplit. câmp magn. variab.	H_m A/m	1446	1560	1446
Factor de cuplaj electromecanic	K -	0,13...0,21	0,2...0,21	0,13...0,21
Constanta magnetostrie.	$\gamma \frac{H}{B^2 T}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
Densitate	ρ kg/m ³	5200	5210	5200
Viteza undelor longitud.	c_L m/s	5790	5730	5790
Frecvența proprie fără concentrator	f kHz	22,320	20,960	21,280
Frecvența de rezonanță cu concentrator și sculă	f_r kHz	21,320	18,60	19,20
Aria coloanei	S_c cm ²	3,055	3,625	3,75
Aria supraf. radiante	S_r cm ²	12,337	13,75	13,75
Lungimea medie a lîinii de câmp magnetic	l_m cm	22	22,9	22,1
Masa feritei	M kg	0,491	0,578	0,521
Tensiunea efect. electr.	U V	15...20	15...20	15...20
Curentul I_1	I_1 A	1,57...7,85	2,23...12,45	1,66...8,12
Curentul I_{2max} calculat	I_2 A	12,23	11,91	12,29
Curentul de excitație max. calculat	I_{ex} A	12,33...14,53	12,11...17,23	12,4...14,73
Nr. de spire pe o col.	N spire	15	15	15
Diametrul sîrmei de Cu STAS 10570-83	d cm	2,5	2,8	2,5
Diam. cond. oscilat	d_{os} mm	2,65	3,0	2,65
Putere acustică	P_a W	25,5...126,6	37,9...211,7	26,6...150
Reluctanța magnetică	R_m A/Vb	$11,21 \cdot 10^6$	$9,86 \cdot 10^6$	$12,3 \cdot 10^6$
Inductivitatea	L H	$6,03 \cdot 10^{-5}$	$9,13 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$
Reactanța inductivă	X_L Ω	8,8	10,67	6,63
Rezistența electrică ohmică a bobinei	r Ω	0,013	0,012	0,014
Capacitatea condens. la acord	C_c pF	0,983	0,800	1,263

CAPITOLUL 4

STUDIUL TEORETIC AL CONCENTRATOARELOR ULTRASONICE

4.1. Introducere

În sistemele oscilatoare ale mașinilor unelte ultrasonice o verigă importantă e constituia concentratorului ultrasonic masiv și transformator de viteză acustică. Concentratorul ultrasonic face legătura între transductorul magnetostriktiv și obiectul de transfer cu scopul de a mări amplitudinea de oscilație și de a asigura un acord de impedanță între transductor și sarcina din spațiul de lucru. La un utilaj dat, tehnologul intervine mai puțin la schimbarea transductorului și mai frecvent la înlocuirea obiectului de transfer (scula) sau a concentratorului împreună cu scula, în scopul prelucrării dorite a pieselor. Prelucrarea pieselor din materiale fragile și dure prin eroziune ultrasonică se realizează în gama de frecvență inferioară ale ultrasunetelor 15...25 kHz. Creșterea productivității prelucrării în aceste condiții poate fi realizată prin mărirea amplitudinii de oscilație la obiectul de transfer fără a depăși valorile limită de rezistență mecanică la oboseală a materialelor din care se confecționează concentratoarele ultrasonice [127] , [132] , [198] .

Calculul exact al dimensiunilor și formelor concentratoarelor ultrasonice (C.U.) este în general complicat și în anumite situații practice imposibil de realizat datorită multitudinii de factori de care depinde. Totuși în anumite ipoteze simplificatoare se pot pune bazele unei metodei ingineresti de calcul a C.U. iar prin corecții aduse pe cale experimentală să se poată definitiva forma și dimensiunile necesare în practică.

Concentratoarele cu forma unor bare cu secțiune transversală variabilă prin care se propagă oscilații longitudinale.

4.2. Ecuația diferențială a oscilațiilor concentratoarelor

Calculul concentratoarelor ultrasonice se poate face în ipoteze simplificatoare ca de exemplu:

1.) Se examinează concentratorul simetric axial, de obicei de secțiune circulară, relațiile aduse pot fi aplicate și pentru alte forme de exemplu prismatic [136] , [137] , [157] , [159] [174] .

2.) Se consideră ipoteza undelor longitudinale plane, la care frontul de undă rămâne plan iar tensiunea mecanică este uniform distribuită pe secțiune. Această ipoteză este corectă aproximativ deoarece deformația elastică longitudinală a barei va fi însoțită și de deformații elastice transversale, care la rândul lor vor conduce la neuniformitatea distribuției tensiunilor mecanice pe secțiune denaturând ~~frontul~~ frontul de undă. Deoarece lungimea concentratorilor este mult mai mare decât diametrul lor, influența deformațiilor transversale nu sînt mari, ipoteza de calcul poate fi admisă cînd dimensiunile transversale ale concentratorilor sînt mult mai mici decât lungimea de undă a ultrasunetului care se propagă în lungul lor.

3.) La logirea C.U. se consideră impedanța mecanică nulă adică fără sarcină mecanică. Existența unei sarcini la capătul liber al C.U. ar da o reacție inversă a mediului (spațiului de lucru) provocînd în C.U. unde staționare în lungul său.

Din concentratorul cu secțiune variabilă (fig.4.1) se decupează un element de volum de masă ^{si} a lungime dx .

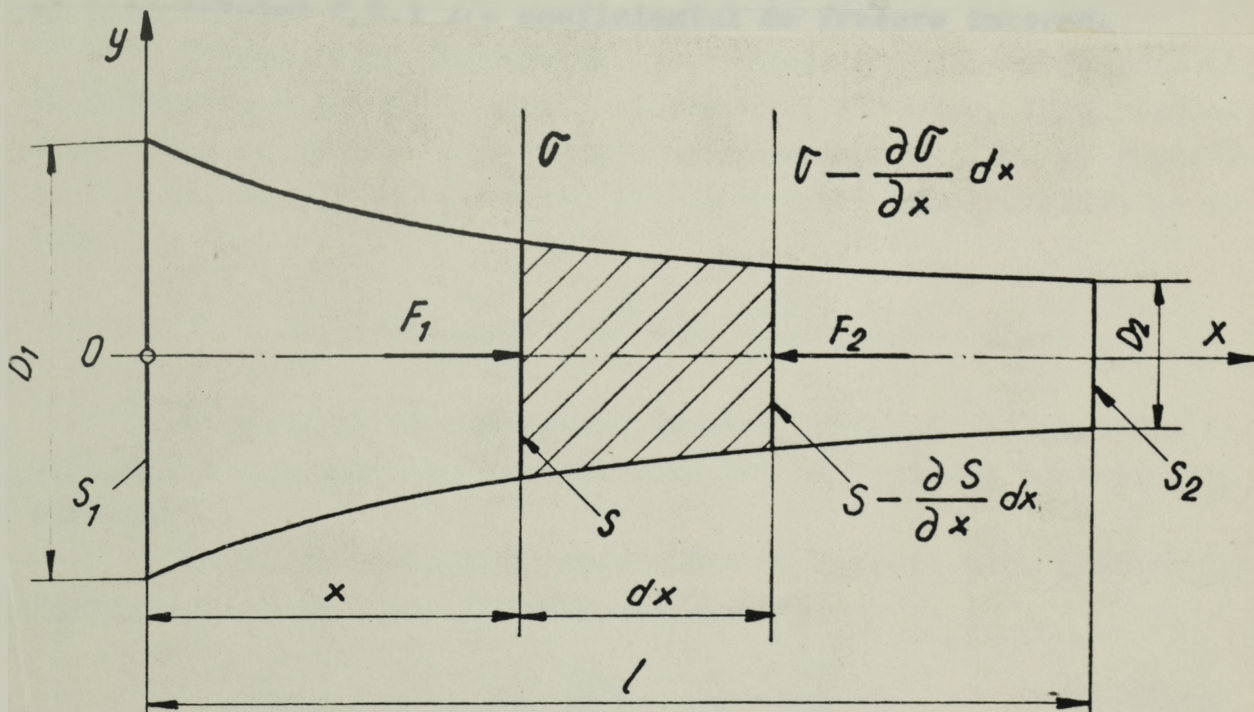


Fig.4.1.

Forța rezultantă care acționează asupra elementului de volum atunci cînd prin concentrator se propagă unde longitudinale este:

$$F_r = F_1 - F_2 = \sigma \cdot S - \left(\sigma - \frac{\partial \sigma}{\partial x} dx \right) \cdot \left(S - \frac{\partial S}{\partial x} dx \right) \quad (4.1)$$

în care s-a notat cu S - aria secțiunii transversale a concentratorului în dreptul coordonatei curente x și σ - efortul unitar normal sau tensiunea mecanică normală în secțiunea S .

Făcând calculele în (4.1) și neglijând infiniții mici de ordin superior (dx^2), se obține:

$$F_x = S \frac{\partial \sigma}{\partial x} \cdot dx + \sigma \frac{\partial S}{\partial x} \cdot dx = d(\sigma S) \quad (4.2.)$$

Aplicând legea a III-a a dinamicii pentru elementul de volum se obține:

$$d(\sigma S) = m \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (4.3)$$

În care $\xi = \xi(x, t)$ este deplasarea elementului de volum a C.U. în direcția coordonatei x de propagare a undelor longitudinale ultrasonice. Având în vedere că pierderile de energie mecanică în concentrator sînt proporționale cu viteza de oscilație [28], [35], [52] tensiunea mecanică se poate exprima prin legea lui Hooke completată cu aceste pierderi, astfel:

$$\sigma = E \frac{\partial \xi}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (4.4)$$

În care E - modulul de elasticitate longitudinal (modulul lui Young) al materialului C.U. și μ - coeficientul de frecare internă.

Diferențiind relația (4.4) și introducînd-o în formula (4.3) se obține ecuația de mișcare a elementului de volum. Înlocuind masa $m = \rho S \cdot dx$, în care ρ este densitatea materialului C.U. și împărțind cu $S \cdot dx$, iar $C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ fiind viteza undelor longitudinale se obține:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\mu}{E} \frac{\partial^3 \xi}{\partial x^2 \partial t^2} + \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\mu}{E} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x \partial t} \right) \cdot \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} = \frac{1}{C_L^2} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (4.5)$$

Formula (4.5) reprezintă ecuația diferențială generală de vibrație a concentratoarelor ultrasonice cu secțiune transversală variabilă.

În cazul neglijării pierderilor de energie prin frecări interne care $\mu = 0$ se obțin formule mai simple:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial \xi}{\partial x} \cdot \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} = \frac{1}{C_L^2} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (4.6)$$

În situația oscilațiilor armonice ale C.U. și considerînd numai variația deplasării de oscilație $\xi(x)$ numai în funcție de coordonată x și nu și de timp, formula (4.5) devine:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\omega^2}{C_L^2 (1 + \gamma)} \cdot \xi = 0 \quad (4.7)$$

În care: $\omega = 2\pi f$ este pulsația oscilațiilor armonice cu frecvența

și are un coeficient de pierderi care pentru oțeluri poate fi neglijat [281] :

$$\eta = \mu \frac{\omega}{E} = (1,4 \dots 5) \cdot 10^{-4},$$

iar $j = \sqrt{-1}$ este unitatea imaginară.

Notând cu :

$$k = \frac{\omega}{c_L} = \frac{2\pi c}{\lambda_f} = \frac{2\pi}{\lambda},$$

numărul de unde, λ fiind lungimea de undă, se obține relația:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{1}{v} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} + k^2 \xi = 0 \quad (4.8)$$

ecuația diferențială a concentrațoarelor ultrasunice, utilizată în calculele ingineresti de proiectare.

Deoarece viteza de oscilație este $v = \frac{\partial \xi}{\partial t}$, relația (4.8) poate fi scrisă în funcție de viteză:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{1}{v} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + k^2 \cdot v = 0 \quad (4.9)$$

Ecuațiile diferențiale de ordinul doi (4.8) și respectiv (4.9) descriu variația amplitudinii de oscilație $\xi(x)$, respectiv a vitezei de oscilație $v(x)$ în lungul concentrațoarelor ultrasunice, când prin acestea se transmit vibrații ultrasunice longitudinale. Soluții generale pentru aceste ecuații diferențiale nu se pot da. Ele se pot integra doar pentru anumite funcții ale secțiunii transversale $S = S(x)$. Dificultatea rezolvării în general a ecuațiilor diferențiale de ordinul doi constă în determinarea constantelor de integrare din condițiile limită inițiale. De aceea aceste ecuații se vor rezolva pentru următoarele legi de variație a secțiunii transversale a C.U.: exponențiale, hiperbolice sau catenoidale, conice și cilindrice în trepte. De altfel aceste forme de concentrație sînt cele mai folosite în practică.

4.3. Studiul concentrațoarelor ultrasunice de formă exponențială

Concentrațoarele exponențiale sînt utilizate frecvent în experimentele de laborator cît și în instalațiile ultrasunice industriale. Legea de variație a secțiunii în lungul generatorului concentratorului este:

$$S = S(x) = S_1 \cdot e^{-2\alpha x}, \quad (4.10)$$

în care α este un coeficient de reducere a secțiunii, iar S_1 - aria secțiunii de intrare la locul de fabricare cu transductorul magnetostriktiv sau cu piesa intermediară atîc la capătul gros al C.U.

Calculăm expresia:

$$\frac{1}{x} \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{1}{x} (\ln. 3) = \frac{3'}{3} = -2\beta \text{ și înlocuim în (4.8) se obt.}$$

$$\frac{d^2 f}{dx^2} - 2\beta \frac{df}{dx} + k^2 f = 0 \quad (4.11)$$

care reprezintă ecuația diferențială a C.U. exponențiale. Dacă secțiunea transversală este de formă circulară, variația diametrului în lungul generatorii C.U. după o curbă exponențială (fig.4.2.)

$$D(x) = D = D_1 e^{-\beta x}$$

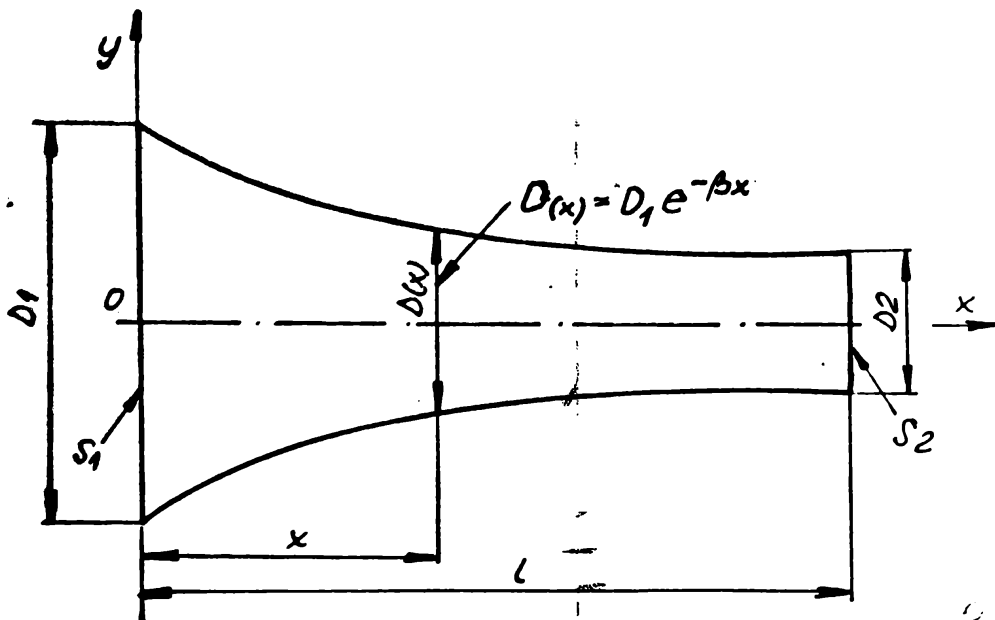


Fig.4.2.

Pentru rezolvarea acestor ecuații diferențiale se consideră următoarele condiții limită inițiale :

1.) Concentratorul se fixează rigid cu partea de intrare (dimensiunea mare) la elementul activ vibrator care este transductorul magnetostriktiv. Se impune ca frecvența proprie de oscilație a C.U. să fie egală cu frecvența de rezonanță a transductorului. În cazul unui acord teoretic, ideal între transductor și concentrator variațiile deformației specifice vor fi nule la locul de fabricare:

$$\frac{df(x)}{dx} = f'(0) = 0; \quad \frac{dv(x)}{dx} = v'(0) = 0 \quad (4.12)$$

2.) În secțiunea de ieșire a C.U., la extremitatea cu dimensiunea mică \$x = l\$, în lipsa sarcinii exterioare, a reacției din partea obiectului de transfer și a spațiului de lucru, de asemenea variațiile deformațiilor specifice vor fi nule:

$$\frac{d^2 \xi(t)}{dt^2} - \xi'(t) = 0 ; \frac{d^2 v(t)}{dt^2} - v'(t) = 0 \quad (4.13)$$

Condițiile arată că sistemul oscilant transductor (din exemplul de mai sus) - concentrator funcționează la rezonanță, iar prin atașarea C.U. nu modifică regimul de funcționare al transducerului, acesta oscilând ca și în cazul lipsei C.U.

Ecuație caracteristică a ecuației diferențiale de ordinul doi (4.11) este:

$$r^2 - 2\beta r + k^2 = 0$$

care are soluțiile $r_{1,2} = \beta \pm \sqrt{\beta^2 - k^2}$. Dacă rădăcinile sînt imaginare rezultă că $\beta^2 - k^2 < 0$, respectiv $k^2 - \beta^2 = k_1^2 > 0$; ceea ce dă $r_{1,2} = \beta \pm j.k_1$. Aceste rădăcini duc la două soluții particulare

Soluția generală se obține prin însumarea celor două soluții particulare:

$$\xi = e^{\beta x} (A \cdot \cosh k_1 \cdot x + B \cdot \sinh k_1 \cdot x) \quad (4.14)$$

în care A și B sînt constante de integrare.

Se cunoaște din fizică că viteza de fază C_1 a undelor longitudinale în bare cu secțiunea variabilă diferă de valoarea vitezei în bare cu secțiunea constantă C_1 [53] , [127] , [128] , [136] .

$$C_1 = \frac{C_1}{\sqrt{1 - \frac{\beta^2}{\omega^2}}} \quad (4.15)$$

viteza C_1 a undelor longitudinale în C.U. cu secțiunea variabilă este mai mare decât în bare cu secțiune constantă în funcție de coeficientul β de reducere a secțiunii. Pentru ca vibrațiile acustice să poată fi transmise progresiv de la transducer la obiectul de transfer și deci în spațiul de lucru, prin C.U., valorile adoptate la proiectare pentru β nu pot depăși o anumită valoare din condiția ca relația (4.15) să fie reală (radicalul să existe (fig. 4.3)):

$$\beta_{cr} < \frac{\omega}{C_1}$$

Introducînd în soluția generală (4.14) condițiile (4.12) și (4.13) se obțin constantele de integrare care înlocuite în (4.14) dau soluția finală:

$$\xi(x) = \xi_1 \cdot e^{\beta x} (\cosh k_1 x - \frac{\beta}{k_1} \cdot \sinh k_1 x) \quad (4.16)$$

și relația:

$$(\beta^2 + k_1^2) \cdot \sinh k_1 l = 0$$

care are soluția generală: $k_1 l = \pi \cdot n$, $n = nr.$ întreg

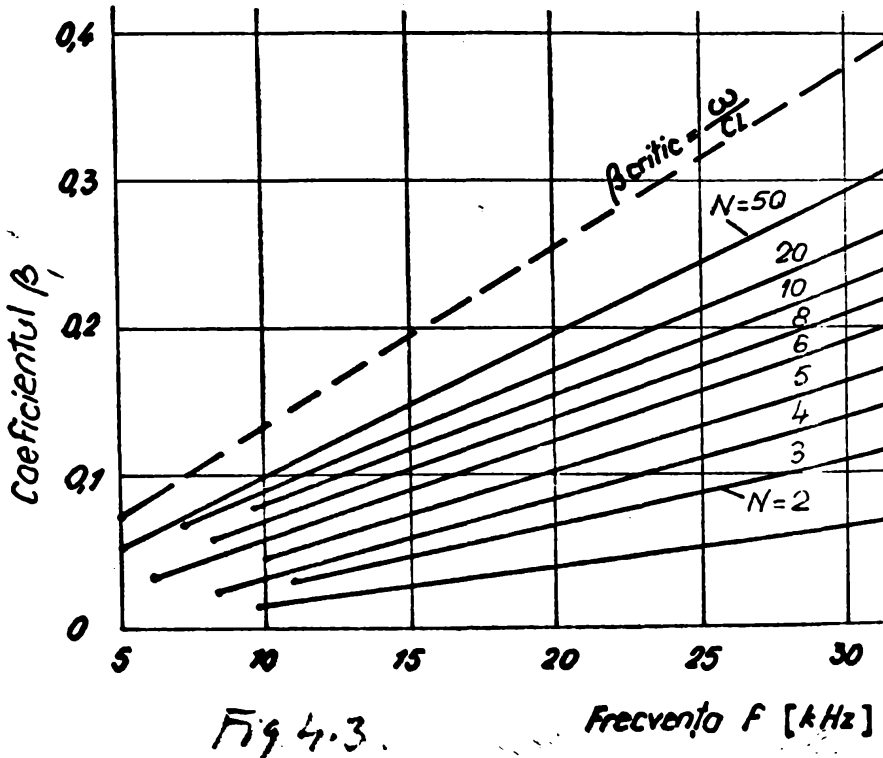


Fig. 4.3.

Atunci cînd undele acustice se reflectă la capătul liber al concentratorului sau din spațiul de lucru, în lungul lui se formează unde staționare caracterizate prin ventru și noduri de oscilație. Distanța între un nod și ventru vecin este de $\frac{\lambda_1}{2}$, în care λ_1 este lungimea de undă în materialul concentratorului cu secțiune variabilă. Pentru a funcționa în rezonanță, lungimea con.

centratorului trebuie să fie un număr întreg de $\frac{\lambda_1}{2}$ adică de semilungimi (distanța între două ventru $\lambda_1/2$; $l = n(\lambda_1/2)$).

Înlocuind în relația (4.13) $x = l$ se obține:

$$S_2 = S_1 \cdot e^{-2\alpha l} \quad ; \quad e^{2\alpha l} = \frac{S_1}{S_2}, \text{ iar prin logaritmare se obține}$$

$$\alpha = \frac{1}{2l} \ln\left(\frac{S_1}{S_2}\right)$$

valoarea coeficientului de reducere a secțiunii S . Notînd cu N raportul de reducere al diametrelor C.U. pentru secțiuni circulare $N = \frac{D_1}{D_2}$; relația lui α devine:

$$\alpha = \frac{1}{2l} \ln N \tag{4.17}$$

Punînd: $k_1^2 = k^2 - \alpha^2$; $k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1}$; înlocuind pe λ_1 din $l = n(\lambda_1/2)$ α din (4.17) se obține expresia finală pentru lungimea de rezonanță a C.U. experimental:

$$l = \frac{1}{k} \sqrt{(\pi \cdot n)^2 + (\ln N)^2} \tag{4.18}$$

respectiv

$$l = n \cdot \frac{c_l}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln N}{\pi n}\right)^2} \tag{4.19}$$

Pentru C.U. exponențial în $\lambda_1/2$ (semilungime) se adoptă $n = 1$:

$$l = \frac{c_l}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln N}{\pi}\right)^2} = \frac{1}{k} \sqrt{\pi^2 + (\ln N)^2} \tag{4.20}$$

Pentru $N = \frac{D_1}{D_2} = 1$; $D_1 = D_2$; $l_{ul} = 0$ se obține lungimea secțiunii
a colectorilor cilindrice, utilizate ca piese de adaptare și fixare
în sistemele oscilatoare ultrasonice

$$l = \frac{c_1}{2f} = \frac{\pi}{k}$$

respectiv pentru un multiplu de $\lambda/2$:

$$l = n \cdot \frac{c_1}{2f} = \frac{n\pi}{k} \quad (4.21)$$

Analiza expresiilor (4.18), (4.19) și (4.20) arată că la
 $n = 0$ și la frecvența dată f , lungimea geometrică a concentratoru-
lui *exponential* este cu atât mai mare cu cât raportul diametrelor
 $N = D_1/D_2$ este mai mare. Pe de altă parte, dacă $N = \text{constant}$ și $n =$
 $= \text{constant}$ lungimea de rezonanță scade ^{cu} frecvența și crește cu vite-
za ultrasunetului în materialul C.U. Când frecvența variază, există
o frecvență critică sub care undele acustice nu se mai transmit
prin C.U.

Notând cu f_1 și f_2 , amplitudinile oscilației (deplasărilor)
la intrarea și respectiv la ieșirea din concentrator, cu ajutorul
relatiei (4.16) se poate deduce raportul de mărire (de amplificare)
al amplitudinilor de oscilație al C.U. exponențial:

$$M = \frac{f_2}{f_1} = \left| -\frac{D_1}{D_2} \right| = \frac{D_1}{D_2} = N \quad (4.22)$$

Acesta este egal și cu raportul diametrelor de intrare și ieșire a
concentratorului. În practică interesează deformația specifică ε ,
tensiunea mecanică σ care soliciță materialul C.U. când prin acesta
se transmit undele ultrasonice. Deformația specifică are expresia:

$$\varepsilon = \frac{\partial \xi}{\partial x} = - \frac{f_1 (k^2 + k_1^2)}{k_1} \cdot e^{ikx} \cdot \sin k_1 x \quad (4.23)$$

Tensiunea mecanică se calculează cu formula:

$$\sigma = E \varepsilon = - E \frac{f_1 (k^2 + k_1^2)}{k_1} \cdot e^{ikx} \cdot \sin k_1 x \quad (4.24)$$

Poziția ventrului deformației specifice ε , respectiv a ten-
siunilor mecanice maxime se deduce din condiția: $d\varepsilon/dx = 0$:

$$x_m = l - \frac{l}{2} \cdot \arcsin \left(\frac{k}{k_1} \right) \quad (4.25)$$

În aceste secțiuni se va verifica ca valoarea lui σ_{max} să fie
mai mică decât valorile admisibile ale efortului unitar normal la
oboseală $\sigma_{-1} = N$ -1 pentru materialul din care este confecționat con-

concentratorului.

În soluțiile constructive la care fixarea sistemului oscilator în carcasa blocului ultrasonic se face în nodul de oscilație al concentratorului, interesăm și poziția acestui nod. Coordonata poziției planului nodal x_0 se deduce din formula (4.16) pentru $\xi(x) = 0$:

$$x_0 = \frac{1}{k_1} \text{arc.tg.} \frac{k_1}{k_2} \quad (4.26)$$

Analizând expresiile (4.25) și (4.26) nu coincid. Se poate arăta că la C.U. exponențiale coordonatele x_0 și x_m sînt plasate simetric față de mijlocul concentratorului $x = l/2$, în ipoteza că masa obiectului de transfer este neglijabilă în raport cu a C.U.

În cazul cel mai general cînd lungimea C.U. este un număr întreg de jumătăți de lungimi de undă $l = n\lambda/2$ poziția nodurilor se determină cu relația:

$$x_0 = \frac{1}{k_1} \text{arc.tg.} \left(\frac{k_1}{k_2} + n\pi \right) \quad (4.27)$$

Pentru $n = 0$ se obține primul nod, $n = 1$ al doilea etc.

Pînă acum s-a analizat ecuația diferențială a C.U. exponențial avînd ca variabilă deplasarea de oscilație $\xi(x)$ a particulelor de material ce fiind funcție numai de coordonata x . Dacă se consideră și timpul t pe lîngă coordonata x adică $\xi(x,t)$, atunci soluțiile vor fi deduse similar:

$$\xi(x,t) = \xi(x) \cdot e^{j\omega t} = (x) \cdot \sin \omega t$$

Expresiile pentru viteza $v(x,t)$ și accelerația $a(x,t)$ se deduc prin derivări în raport cu timpul.

La proiectare se adoptă materialul concentratorului care trebuie să reziste la tensiunile mecanice apreciabile alternative care soliciță la oboseală C.U. în timpul exploatării. În funcție de scop se vor alege materiale ca: titaniul, duraluminiul, oțelul carbon de calitate, oțelul carbon de scule, oțelul inoxidabil austenitic, nichelul etc. La alegerea materialului trebuie precizate valorile modului de elasticitate E și viteza de propagare a undelor ultrasonice C_L , valori care intră direct în relațiile de calcul dimensionale ale concentratorului. În calculule de proiectare mai sînt necesare: frecvența de rezonanță f , forma și dimensiunile ariei de intrare S_1 ; D_1 ; în funcție de forma și dimensiunile suprafeței radiante a transducerului sau piesei intermediare; forma și dimensiunile suprafeței de ieșire S_2 ; D_2 ; care depind de forma și dimensiunile obiectului de transfer (sculei) și deci de forma cavității prelucra-

te în pică. Cu dimensiunile secțiunii transversale de intrare și ieșire se pot determina rapoartele de reducere a secțiunii C.U.:

$$K = \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} = \frac{D_1}{D_2} \text{ pentru secțiuni circulare;}$$

$$K = \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} = \sqrt{\frac{a_1 \cdot b_1}{a_2 \cdot b_2}} .$$

pentru secțiuni dreptunghiulare cu dimensiunile a și b:

$$K = \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} = \frac{D}{\sqrt{D^2 - d^2}} .$$

pentru secțiuni înclinate la C.U. tubulare de tip trepan. După stabilirea numărului de unde $k = \omega/c_L$ (lungimea semiundei) se determină lungimea de rezonanță l , se stabilește coeficientul de reducere a secțiunii C.U. exponențială iar în final se precizează secțiunea variabilă respectiv diametrul variabil $D(x)$ al C.U.

4.4. Studiul concentratoarelor ultrasonice de formă hiperbolică sau catenoidală

Denunțarea concentratorului hiperbolic sau catenoidal provine de la faptul că generatoarea sa este descrisă de o funcție cosinus hiperbolic demunită și catenoidală, formă aplicată la concentratori ultrasonici pentru prima dată de L.G. Merkulev [135], [136]. Seamănă cu curba întăzătorului de la echilibrul sferelor, fig.4.4.

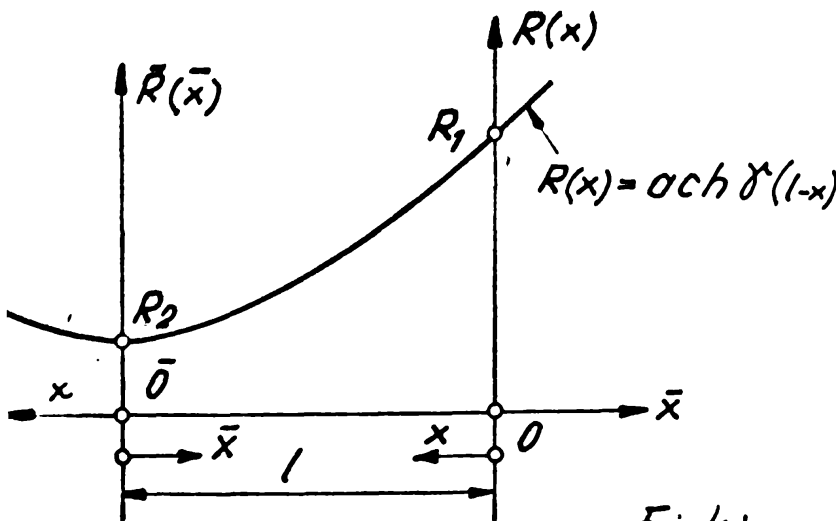


Fig.4.4.

Dacă sistemul de axe se ia la dimensiunile a și c ale concentratorului atunci ecuația generatoarei exprimate prin raza curburii $R(\bar{x})$ este:

$$R(\bar{x}) = a \cdot \text{ch}(\gamma \bar{x}) \quad (4.28)$$

sare din condițiile limită (inițiale) $\bar{x} = 0$ și $\bar{x} = l$ se obține $R(0) = R_2$ și $R(l) = R_1$, adică:

$$R(\bar{x}) = R_2 \cdot \text{ch}(\gamma \bar{x}) \quad (4.29)$$

$$(4.30)$$

unde: $\gamma = \frac{1}{a} \text{ argh}(\frac{R_1}{R_2})$.

este coeficientul de reducere a secțiunii.

Pentru o reprezentare similară ca și la concentratorul exponențial se mută originea sistemului de axe de coordonate (reperul) la

rază maximă R_1 , iar ecuație generatoarei concentratorului devine:

$$R(x) = R_1 \cdot \text{ch} [\delta (l - x)] \quad (4.31)$$

Aria secțiunii transversale considerînd-o circulară $S(x) = \pi R^2(x)$, legea de variație a secțiunii transversale va fi (fig. 4.5):

$$S(x) = S_2 \cdot \text{ch}^2 \delta (l - x) \quad (4.32)$$

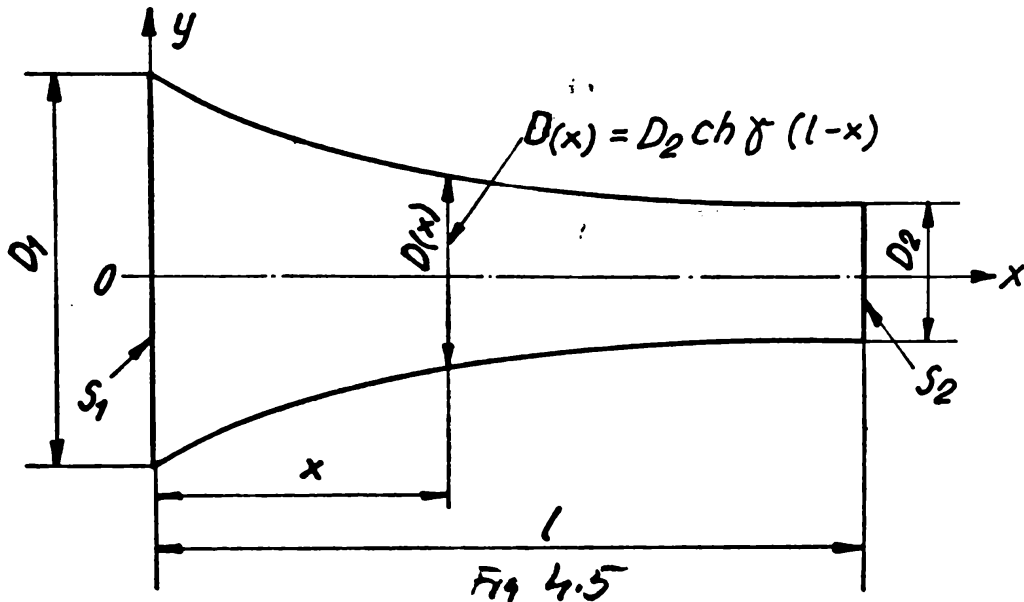


Fig. 4.5.

Calculînd: $\frac{1}{x} \cdot \frac{\partial}{\partial x} = -2\delta \text{th} \delta (l - x)$, care înlocuim în (4.8) se obține ecuația diferențială pentru oscilațiile concentratoarelor hiperbolice:

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} - 2\delta \text{th} \delta (l - x) \cdot \frac{df(x)}{dx} + k^2 f(x) = 0 \quad (4.33)$$

avînd soluția:

$$f(x) = \frac{f_1 \text{ch} \delta l}{\text{ch} \delta (l - x)} \cdot \cos k_1 x - \frac{\delta}{k_1} \text{th} \delta l \cdot \sin k_1 x \quad (4.34)$$

Ele se deduc similar, în aceeași ipoteză simplificatoare ca și la concentratoarele exponențiale, iar notațiile avînd aceeași semnificație:

$$k = \frac{\omega}{c_1} = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad k_1 = \frac{\omega}{c_1} = \frac{2\pi}{\lambda_1} \quad (4.35)$$

viteza de fază a undelor ultrasonice:

$$c_1 = \frac{c_L}{\sqrt{1 - \frac{\delta^2}{\omega^2} c_L^2}} \quad (4.36)$$

$$(k_1 l) \text{tg}(k_1 l) = -\sqrt{\lambda^2 - l^2} \cdot \text{arctgh} \quad (4.37)$$

$$N = \frac{D_1}{D_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

Ecuația transcendentă (4.37) se rezolvă pe cale grafică prin metode numerice. Din rezolvare se obține $(k_1 \ell)$ care se introduce în soluția generală (4.34). Această soluție trebuie totdeauna considerată la proiectare și verificată împreună cu ecuația transcendentă (4.37).

Legătura între constante este:

$$k_1 = \sqrt{k^2 - \gamma^2} \quad (4.38)$$

iar:

$$\gamma = \frac{1}{\ell} \operatorname{argch} \frac{D_1}{D_2} = \frac{1}{\ell} \operatorname{argch} N \quad (4.39)$$

înlocuind în soluția ecuației diferențiale (4.34) $x = 0$ și $x = \ell$ se obțin ξ_1 și ξ_2 , cu care se determină raportul de mărire al amplitudinii $M = \frac{\xi_2}{\xi_1}$:

$$M = N \left[\cos k_1 \ell - \frac{1}{k_1 \ell} \operatorname{argch} \left(N \sqrt{1 - \frac{1}{N^2}} \right) \sin k_1 \ell \right] \quad (4.40)$$

L.G. Merkulov [135] dă o formulă pentru M la concentratori catenoidali dedusă din (4.37):

$$M = \frac{N}{\cos(k_1 \ell)} > N \quad (4.41)$$

Această relație se verifică în practică cu precizia de 10^{-4} . Se observă că la C.U. catenoidali raportul de mărire al amplitudinii de oscilație este mai mare decât la C.U. exponențiali la care $M = N = \frac{D_1}{D_2}$. Aceasta în special la valori mari ale lui N , când numitorul relației (4.41), $\cos k_1 \ell$ are valori mai mici decât unitatea.

Lungimea secundică de rezonanță se determină înlocuind relația (4.39) în (4.36), după transformări se obține:

$$\ell = \frac{1}{\gamma} \cdot \sqrt{(k_1 \ell)^2 + \operatorname{argch}^2 N} \quad (4.42)$$

valoarea $(k_1 \ell)$ fiind determinată în prealabil din ecuația transcendentă (4.37).

Deformația specifică și tensiunea mecanică se deduc din relațiile: $\varepsilon = d \xi(x)/dx$ și $T = E \varepsilon$, cu ajutorul soluției (4.34):

$$\begin{aligned} T(x) = & \frac{E \xi_2 \delta \operatorname{ch} \gamma \ell \operatorname{sh} \gamma (\ell - x)}{\operatorname{ch}^2 \gamma (\ell - x)} \cdot \left(\cos k_1 x - \frac{\gamma}{k_1} \operatorname{th} \gamma \ell \sin k_1 x \right) - \\ & - \frac{E \xi_2 \operatorname{ch} \gamma \ell}{\operatorname{ch} \gamma (\ell - \gamma)} \cdot (k_1 \sin k_1 x + \gamma \operatorname{th} \gamma \ell \cos k_1 x) \quad (4.43) \end{aligned}$$

Coordonata tensiunii mecanice maxime σ_m , se deduce din condițiile punctelor de extrem:

$$\frac{d\sqrt{\quad}}{dx} = 0; \quad \frac{d^2 \xi(x)}{dx^2} = 0$$

Poziția nodului de oscilație x_0 din soluția (4.34) se determină punând $\xi(x) = 0$:

$$x_0 = \frac{1}{k_1} \operatorname{arctg} \left(\frac{k_1}{\gamma} \operatorname{ctg} \gamma l \right) \quad (4.44)$$

Cunoscând materialul C.U. catenoidal, E, C_1 , dimensiunile de intrare și ieșire D_1 și D_2 , frecvența de rezonanță f , se determină k_1 ($k_1 l$) din ecuația transcendentă (4.37), k din (4.35); lungimea de rezonanță din (4.42) și coeficientul de reducere al secțiunii C.U. γ din (4.39). Determinarea diametrelor intermediare $D(x)$ pentru proiectarea și execuția C.U. catenoidal se deduce din (4.31):

$$D(x) = D_2 \operatorname{ch} \gamma (l-x), \text{ pentru } x \in [0, l] \quad (4.45)$$

4.5. Studiul concentratoarelor ultrasonice de formă conică

Generatoarea concentratorului conic este o dreaptă (fig.4.6)

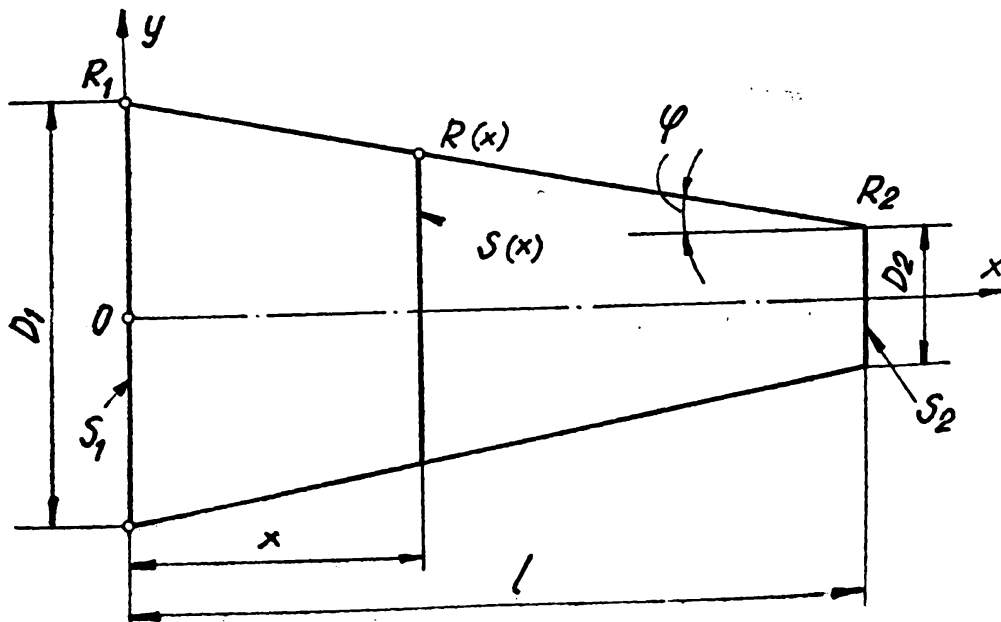


Fig.4.6.

care are ecuația:

$$R(x) = R_1 - x \operatorname{tg} \varphi = R_1 - \frac{R_1 - R_2}{l} x \quad (4.46)$$

considerând secțiunea transversală circulară $S(x) = \pi R(x)^2$, legea

de variație a secțiunii: $\gamma(x) = \gamma_1 \left(1 - \frac{D_1 - D_2}{D_1 l} x\right)^2$, notând cu

$\alpha = \frac{D_1 - D_2}{D_1 l}$ coeficientul de reducere al secțiunii, se obține:

$$S(x) = \gamma_1 (1 - \alpha x)^2 \tag{4.47}$$

Înlocuind $\frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial x} = -\frac{2\alpha}{1-\alpha x}$ în ecuațiile (4.8) rezultă ecuația diferențială de ordinul doi pentru C.U. de formă conică:

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} - \frac{2\alpha}{1-\alpha x} \cdot \frac{df(x)}{dx} + k^2 f(x) = 0, \tag{4.48}$$

având soluția:

$$f(x) = f_1 \cdot \frac{1}{1-\alpha x} (\cos kx - \frac{\alpha}{k} \sin kx) \tag{4.49}$$

Împreună cu condiția de rezonanță:

$$\operatorname{tg}(kl) = \frac{(kl)}{1 - \frac{H(kl)^2}{(1-H)^2}} \tag{4.50}$$

unde $k = \omega / c_L = 2\pi / \lambda$ este numărul de unde.

Soluția (4.49) a ecuației diferențiale a C.U. de formă conică va da rezultate corecte numai atunci când și ecuația transcendentă (4.50) este satisfăcută în același timp. Aceasta înseamnă că la fiecare raport de diametre $H = \frac{D_1}{D_2}$ se adoptă o anumită valoare pentru (kl) .

Relația (4.50) se poate pune și sub formă:

$$\frac{H}{(1-H)^2} = \frac{(kl) - \operatorname{tg}(kl)}{(kl)^2 \cdot \operatorname{tg}(kl)} \tag{4.51}$$

pe baza egalității a două funcții se poate continua sistemul:

$$\begin{cases} y = \frac{H}{(1-H)^2} \\ y = \frac{(kl) - \operatorname{tg}(kl)}{(kl)^2 \cdot \operatorname{tg}(kl)} \end{cases} \tag{4.52}$$

care se poate rezolva prin metoda grafică sau numerică. Se determină soluția (kl) pentru care cele două ecuații ale sistemului au valori egale, ce va satisface și ecuația transcendentă (4.52) respectiv (4.51).

Soluția găsită servește și la determinarea lungimii de rezonanță a C.U.

$$l = \frac{(kl)}{k} \tag{4.53}$$

Raportul de mărire a amplitudinii se deduce din soluția (4.49) pt.

$$f(0) = f_1 \text{ și } f(1) = f_2$$

$$N = \frac{f_2}{f_1} = N \cdot \cos(kl) + \frac{1-N}{(kl)} \cdot \sin(kl) \quad (4.54)$$

Deformația specifică $\varepsilon = d f / dx$ și tensiunea mecanică $\sigma = E \varepsilon$, se deduce din relația (4.49):

$$\sigma(x) = \frac{E f_1}{(1-\alpha x)^2} \left[\alpha^2 x \cos kx + \left(\alpha kx - k - \frac{\alpha^2}{k} \right) \cdot \sin kx \right] \quad (4.55)$$

Poziția ventrului tensiunii mecanice x_m se deduce din ecuația $d \sigma(x) / dx = 0$:

$$\left(2 \alpha^3 x_m + 2 \alpha k^2 x_m - \alpha^2 k^2 x_m^2 - k^2 \right) \cdot \cos kx_m + \left(\alpha^3 k x_m^2 - \alpha k - \frac{2 \alpha^3}{k} \right) \cdot \sin kx_m = 0 \quad (4.56)$$

Poziția pleurului nodal x_0 al C.U. conic, pentru fixarea în nodul de oscilație al sistemului oscilator se deduce din (4.49) pentru $f(x) = 0$:

$$x_0 = \frac{1}{k} \arctg \frac{k}{\alpha} \quad (4.57)$$

Nodul deplasării și al vitezei de oscilație nu coincide cu mijlocul lunginii C.U. ca în cazul barelor cilindrice, el este plasat mai aproape de capătul mare.

Cu toate că în C.U. conic viteza de fază a undelor longitudinale este aceeași ca și în bare cu secțiune constantă, așa cum arată soluțiile (4.49) și (4.50), $c_L = \omega / k$, lungimea de rezonanță pentru frecvența fundamentală nu este egală cu $\lambda / 2$ iar armonicile superioare nu mai sînt sinusoidale.

În cazul limită pentru un C.U. conic cu vîrf ascuțit

$N = \frac{D_1}{D_2} = \infty$, $D_2 = 0$, din ecuația transcendentă (4.50) se obține:

$$\operatorname{tg}(kl)_\infty = (kl)_\infty$$

care are soluțiile $(kl)_\infty = 4,493; 7,725; 10,90; \text{etc.}$ Dacă $N = 1$, $D_1 = D_2$, pentru bare cilindrice cu secțiune constantă, se obține $\operatorname{tg}(kl) = 0$ cu soluțiile $(kl) = n\pi$.

4.6. Studiul concentratoarelor ultrasonice în trepte

4.6.1. Studiul vibrației longitudinale a unei bare de secțiune constantă

Pentru secțiune constantă $S = \text{ct}$, ecuația (4.8) devine:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + k^2 \xi = 0 \quad (4.58)$$

care are soluția pentru amplitudinea deplasării:

$$\xi = A \cdot \sin kx + B \cdot \cos kx \quad (4.59)$$

și a forței F_m :

$$F_m = E \cdot S \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} = E \cdot S \cdot k \cdot (A \cdot \cos kx - B \cdot \sin kx) \quad (4.60)$$

În caz general se consideră că la intrare, pentru $x = 0$, amplitudinea deplasării este ξ_0 iar amplitudinea forței F_0 . Din aceste condiții inițiale se determină constantele A și B:

$$\xi_{mx} \ x=0 = \xi_0 \quad \text{și} \quad F_{mx} \ x=0 = F_0 \quad B = \xi_0; \quad A = \frac{F_0}{kES}$$

Amplitudinile deplasării și forței pentru o coordonată curentă x vor fi:

$$\xi_{mx} = \frac{F_0}{kES} \cdot \sin kx + \xi_0 \cdot \cos kx \quad (4.61)$$

$$F_{mx} = F_0 \cdot \cos kx - \xi_0 kES \cdot \sin kx \quad (4.62)$$

$$\xi_{m\zeta} = \frac{F_0}{kES} \cdot \sin k\zeta + \xi_0 \cdot \cos k\zeta \quad (4.63)$$

$$F_{m\zeta} = F_0 \cdot \cos k\zeta - \xi_0 kES \cdot \sin k\zeta \quad (4.64)$$

Ecuațiile deformației specifice și tensiunii mecanice vor fi:

$$\varepsilon_{mx} = \frac{F_{mx}}{ES} = \frac{F_0}{ES} \cdot \cos kx - \xi_0 k \cdot \sin kx \quad (4.65)$$

$$\tau_{mx} = \frac{F_{mx}}{S} = \frac{F_0}{S} \cdot \cos kx - \xi_0 k \cdot \sin kx \quad (4.66)$$

Aceste relații vor servi la calculul concentratearelor în trepte

4.6.2. Studiul concentratearelor în trepte (ecuațiile generale)

Considerând acordul ideal cu transducerul la intrare și lipsa sarcinii la ieșire, concentratorul vibrează ca și cum ar avea capetele libere.

Dacă concentratorul este format din tronsoane cu secțiuni diferite, atunci valorile amplitudinilor deplasării și forței de la sfârșitul unui tronson, $\xi_{m\zeta}$ și $F_{m\zeta}$ vor fi în același timp și valori inițiale pentru tronsonul următor. Aceasta se impune din legea continuității amplitudinii deplasării ξ_m și amplitudinii forței F_m în

secțiunea de trecere între tronșoane (la saltul de secțiune) la transmiterea undelor ultrasonice longitudinale prin concentrator. Legea continuității permite scrierea ecuațiilor pentru ξ și F succesiv pentru toate tronșoanele concentratorului, iar din condițiile limită corespunzătoare se pot determina fie pulsațiile proprii ω din $k = \omega / c_L = 2\pi / \lambda$ fie lungimile de rezonanță corespunzătoare.

Având în vedere cele de mai sus, concentratorul poate fi considerat cu capetele libere în timpul vibrației. Deci din condițiile inițiale: $\xi_0 = \xi_1$ și $F_0 = 0$.

Se presupune același material pentru cele două tronșoane $E = E_1 = E_2$ din fig.4.7.

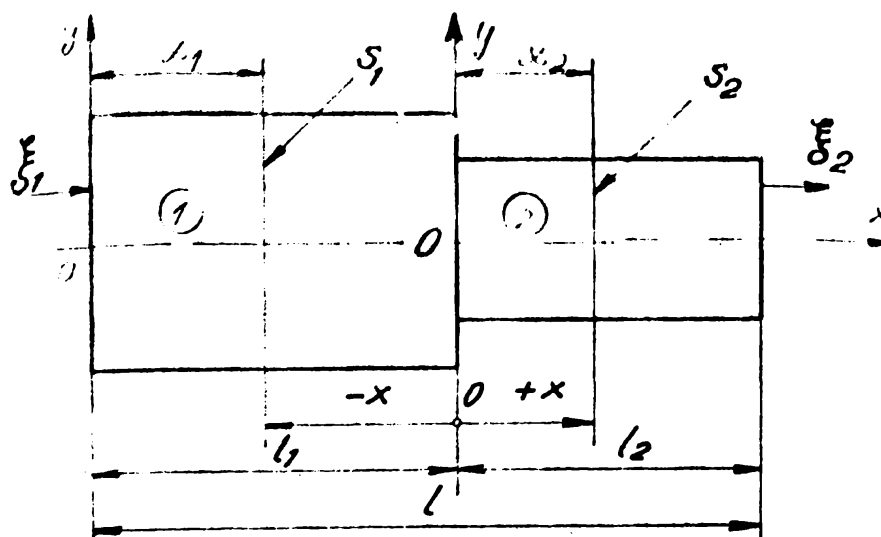


Fig.4.7.

Ecuațiile (4.61) și (4.62) devin pentru primul tronșon ① :

$$\begin{cases} \xi_{mx_1} = \xi_1 \cdot \cos kx_1 \\ F_{mx_1} = -\xi_1 \cdot k \cdot S_1 \cdot \sin kx_1 \end{cases} \quad (4.67)$$

pentru $x_1 = l_1$ relațiile (4.63) și (4.64) respectiv cele anterioare devin:

$$\begin{cases} \xi_{ml_1} = \xi_1 \cdot \cos kl_1 \\ F_{ml_1} = -\xi_1 \cdot k \cdot S_1 \cdot \sin kl_1 \end{cases} \quad (4.68)$$

Valorile de ieșire pentru tronșorul ① vor fi și valori inițiale de intrare, pentru tronșorul ②. Înlocuind deci pentru tronșorul ②, în formulele (4.61) și (4.62)

$$\begin{cases} \xi_0 = \xi_{ml_1} = \xi_1 \cdot \cos kl_1 \\ F_0 = F_{ml_1} = -\xi_1 \cdot k \cdot S_1 \cdot \sin kl_1 \end{cases} \quad (4.69)$$

se obțin relațiile:

$$\xi_{mx_2} = -\xi_1 (\sin kl_1) \left[\frac{1}{s_2} \sin kx_2 - \operatorname{ctg} kl_1 \cdot \cos kx_2 \right] \quad (4.70)$$

$$F_{mx_2} = -\xi_1 k s_2 (\sin kl_1) \left[\frac{1}{s_2} \cos kx_2 + \operatorname{ctg} kl_1 \sin kx_2 \right] \quad (4.71)$$

Deformația specifică are expresiile:

$$\varepsilon_{mx_1} = -\xi_1 k \sin kx_1 \quad (4.72)$$

$$\varepsilon_{mx_2} = -\xi_1 k (\sin kl_1) \left[\frac{1}{s_2} \cos kx_2 + \operatorname{ctg} kl_1 \sin kx_2 \right] \quad (4.73)$$

Considerând sistemul de referință cartezian cu originea $O(0,0)$ la intrarea concentratorului, $x_1 = x$ și $x_2 = x - l_1$, relațiile de mai sus devin:

Amplitudinea deplasării:

$$\xi_{mx} = \xi_1 \cos kx \quad \text{pt. } x \in [0, l_1] \quad (4.73)$$

$$\xi_{mx} = -\xi_1 (\sin kl_1) \left[\frac{1}{s_2} \sin k(x-l_1) - \operatorname{ctg} kl_1 \cdot \cos k(x-l_1) \right] \quad (4.74)$$

pt. $x \in [l_1, l]$

Amplitudinea deformației specifice:

$$\varepsilon_{mx} = -\xi_1 k \sin kx \quad \text{pt. } x \in [0, l_1] \quad (4.74)$$

$$\varepsilon_{mx} = -\xi_1 k (\sin kl_1) \left[\frac{1}{s_2} \cos k(x-l_1) + \operatorname{ctg} kl_1 \sin k(x-l_1) \right] \quad (4.75)$$

pt. $x \in [l_1, l]$

Amplitudinea forței:

$$F_{mx} = -\xi_1 k s_1 \sin kx \quad \text{pt. } x \in [0, l_1] \quad (4.76)$$

$$F_{mx} = -\xi_1 k s_2 (\sin kl_1) \left[\frac{1}{s_2} \cos k(x-l_1) + \operatorname{ctg} kl_1 \sin k(x-l_1) \right] \quad (4.77)$$

pt. $x \in [l_1, l]$

Amplitudinea tensiunii mecanice: $\sigma_{mx} = F_{mx}/A$

Dacă se consideră sistemul de axe de coordonate cartezian cu originea plasată la secțiunea de trecere dintre tronsoane, (fig.4.7) se face o translație a sistemului de coordonate, iar în formulele anterioare se va înlocui: $x \rightarrow x+l_1$ și $x-l_1 \rightarrow x$; respectiv $x_1 \rightarrow x+l_1$ și $x_2 = x$. Față de noul sistem de coordonate formulele devin:

Pentru amplitudinea deplasării:

$$\xi_{mx} = \xi_1 \cos k(x+l_1) = \xi_1 (\sin kl_1) \left[-\sin kx + \operatorname{ctg} kl_1 \cos kx \right] \quad (4.78)$$

pt. $x \in [-l_1, 0]$

$$\xi_{mx} = -\xi_1 (\sin kl_1) \left[\frac{1}{s_2} \sin kx - \operatorname{ctg} kl_1 \cos kx \right] \quad (4.79)$$

pt. $x \in [0, l_2]$

Pentru amplitudinea deformației specifice:

$$\varepsilon_{\max} = -\int_1 k \sin k(x+l_1) = -\int_1 k (\sin k l_1) [\cos kx + \operatorname{ctg} k l_1 \sin kx] \text{ pentru } x \in [-l_1, 0] \quad (4.80)$$

$$\varepsilon_{\max} = -\int_1 k (\sin k l_1) \left[\frac{s_1}{s_2} \cos kx + \operatorname{ctg} k l_1 \sin kx \right] \text{ pentru } x \in [0, l_2] \quad (4.81)$$

Alegerea originii sistemului de axe în secțiunea de trecere dintre trepte are avantaje pentru studiul concentrațiilor cilindrice în trepte, în special când se analizează influența diferitelor raze de rotunjire sau în general a porțiunilor de trecere lină între trepte, asupra raportului de amplificarea amplitudinii deplasării și a deformației specifice respectiv a tensiunii mecanice

1.) Raportul de amplificarea amplitudinii deplasării

Acest raport are forma $M = f_2 / f_1$, în care f_2 este amplitudinea deplasării la ieșire iar f_1 la intrarea concentratorului în trepte.

Înlocuind $x = l_2$ în relația (4.79), $f_2 = f_1$ se obține:

$$M = \left| -\frac{s_1}{s_2} \sin k l_1 \cdot \sin k l_2 + \cos k l_1 \cdot \cos k l_2 \right| \quad (4.82)$$

Dacă cele două trepte au lungimi egale și $l_1 = l_2 = \frac{\lambda}{4}$ și $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, se obține valoarea maximă a raportului de amplificarea amplitudinii deplasării $M_{\max} = \frac{s_1}{s_2}$.

Dacă concentratorul în trepte este cilindric, cel mai frecvent utilizat, $s_1 = \pi D_1^2 / 4$, $s_2 = \pi D_2^2 / 4$, $M = D_1 / D_2$, $M_{\max} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 = K^2$

2.) Determinarea lungimii de rezonanță

Expresiile amplitudinii forței la concentratoarele în trepte având originea axelor în secțiunea de trecere se obțin pentru

$x_1 = x + l_1$ și pentru $x_2 = x$:

$$F_{\max} = -\int_1 k B_1 \sin(x+l_1) \text{ pentru } x \in [-l_1, 0] \quad (4.83)$$

$$F_{\max} = -\int_1 k B_2 \left(\frac{s_1}{s_2} \sin k l_1 \cos kx + \cos k l_1 \sin kx \right) \text{ pentru } x \in [0, l_2] \quad (4.84)$$

La oscilarea concentratorului în regiunea de rezonanță, el se comportă ca și cum ar fi cu capetele libere, deci forțele la capete au valoare nulă: $F_{nl_1} = 0$, $F_{nl_2} = 0$. Din ecuația (4.84) se obține:

$$\frac{s_1}{s_2} \sin k l_1 \cos k l_2 + \cos k l_1 \sin k l_2 = 0,$$

care dă condiția de rezonanță:

$$\frac{S_1}{S_2} \operatorname{tg} k l_1 + \operatorname{tg} k l_2 = 0 \quad (4.85)$$

Dacă se adoptă valori pentru l_1 se determină l_2 pentru ca condiția de rezonanță să fie respectată $l_1 + l_2 = \lambda/2$:

$$l_2 = \frac{\lambda}{2} \operatorname{arctg} \left[-\frac{S_1}{S_2} \operatorname{tg}(k l_1) \right] \quad (4.86)$$

Dacă se știe frecvența de rezonanță f sau pulsația $\omega = 2\pi f$ și secțiunile transversale ale celor două tronșoane S_1 și S_2 , alegând valori pentru l_1 se obține lungimea corespunzătoare a lui l_2 cu formula de mai sus pentru ca concentratorul să oscileze la rezonanță în $\lambda/2$.

Scrind condiția de rezonanță:

$$\frac{\cos k l_1}{\cos k l_2} = -\frac{S_1}{S_2} \frac{\sin k l_1}{\sin k l_2}$$

care înlocuită în M din (4.82), se obține raportul sau coeficientul de amplificare (mărire) a amplitudinii deplasării în condiții de rezonanță:

$$M = \frac{\cos k l_1}{\cos k l_2} = -\frac{S_1}{S_2} \frac{\sin k l_1}{\sin k l_2} \quad (4.87)$$

Pentru concentrator cilindric în trepte $S_1/S_2 = (D_1/D_2)^2 = K^2$ expresiile amplitudinii deplasării se pot scrie:

$$\begin{cases} \xi_{mx} = \xi_1 \cos k(x+l_1) = \xi_1 (\sin k l_1) [-\sin kx + \operatorname{ctg} k l_1 \cdot \cos kx], \\ \text{pentru } x \in [-l_1, 0] \end{cases} \quad (4.88)$$

$$\begin{cases} \xi_{mx} = \xi_1 (-K^2) (\sin k l_1) [\sin kx + \operatorname{ctg} k l_2 \cdot \cos kx] \\ \text{pentru } x \in [0, l_2] \end{cases} \quad (4.89)$$

Aceste relații se aplică în condițiile când concentratorul oscilează pe frecvența proprie de vibrație, respectiv la rezonanță:

$$l_1 + l_2 = \frac{\lambda}{2}.$$

3.) Determinarea poziției nodului de oscilație sau a planului nodal.

Pentru tronșonul ①, $x \in [-l_1, 0]$, în relația (4.88) se pune condiția: $\xi_{mx} = 0$, iar pentru tronșonul ②, $x \in [0, l_2]$, în relația (4.89) se anulează amplitudinea oscilației $\xi_{mx} = 0$. Notind cu x_0 poziția nodului de oscilație se deduce că:

$$x_0 = -\frac{\lambda}{2} \operatorname{arctg} [\operatorname{ctg}(k l_1)] \text{ pt. } x \in [-l_1, 0] \quad (4.90)$$

$$x_0 = \frac{\lambda}{2} \operatorname{arctg} [-\operatorname{ctg}(k l_2)] \text{ pt. } x \in [0, l_2] \quad (4.91)$$

Dacă $l_1 = \frac{\lambda}{4}$ și $l_2 = \frac{\lambda}{4}$ atunci $x_0 = 0$ adică nodul de oscilație se găsește în zona de trecere la saltul de secțiune între cele două trossoare.

4.) Deformația specifică și tensiunea mecanică în concentrațiile în trepte

Din (4.80) și (4.81) se obține:

$$\sigma_{mx} = -\frac{1}{2} k (\sin k l_1) [\cos kx + \operatorname{ctg} k l_1 \sin kx] \quad (4.92)$$

pentru $x \in [-l_1, 0]$

$$\sigma_{mx} = -\frac{1}{2} k (\sin k l_1) \left[\frac{2}{\sin 2k l_2} \cos kx + \operatorname{ctg} k l_2 \sin kx \right] \quad (4.93)$$

pentru $x \in [0, l_2]$

Dacă se ține cont și de condiția de rezonanță, prin derivarea ecuațiilor (4.88) și (4.89) se obțin deformațiile specifice iar prin înmulțirea cu E , se obțin tensiunile mecanice (amplitudinile) lor:

$$\varepsilon_{mx} = -\frac{1}{2} k (\sin k l_1) [\cos kx + \operatorname{ctg} k l_1 \sin kx] \quad (4.94)$$

pentru $x \in [-l_1, 0]$

$$\varepsilon_{mx} = -\frac{1}{2} k k^2 (\sin k l_1) [\cos kx - \operatorname{ctg} k l_2 \sin kx] \quad (4.95)$$

pentru $x \in [0, l_2]$

și respectiv:

$$\sigma_{mx} = E \varepsilon_{mx}$$

5.) Determinarea poziției ventrului amplitudinilor deformației specifice, respectiv a tensiunilor mecanice.

Prin derivarea ecuațiilor (4.94) și (4.95) și anularea lor se obține poziția deformațiilor specifice maxime, respectiv a tensiunilor mecanice maxime notată cu x_m :

$$x_m = \frac{1}{k} \operatorname{arctg} [\operatorname{ctg}(k l_1)] \text{ pentru } x \in [-l_1, 0] \quad (4.96)$$

$$x_m = \frac{1}{k} \operatorname{arctg} [-\operatorname{ctg}(k l_2)] \text{ pentru } x \in [0, l_2] \quad (4.97)$$

Se observă $x_m = x_0$, iar pentru $l_1 = l_2 = \lambda/4$, $x_m = x_0 = 0$. În figura 4.8. este redată organigrama pentru calculul concentrațiilor ultrasonice pentru care s-a elaborat un program "CONCENT" în limbaj BASIC.

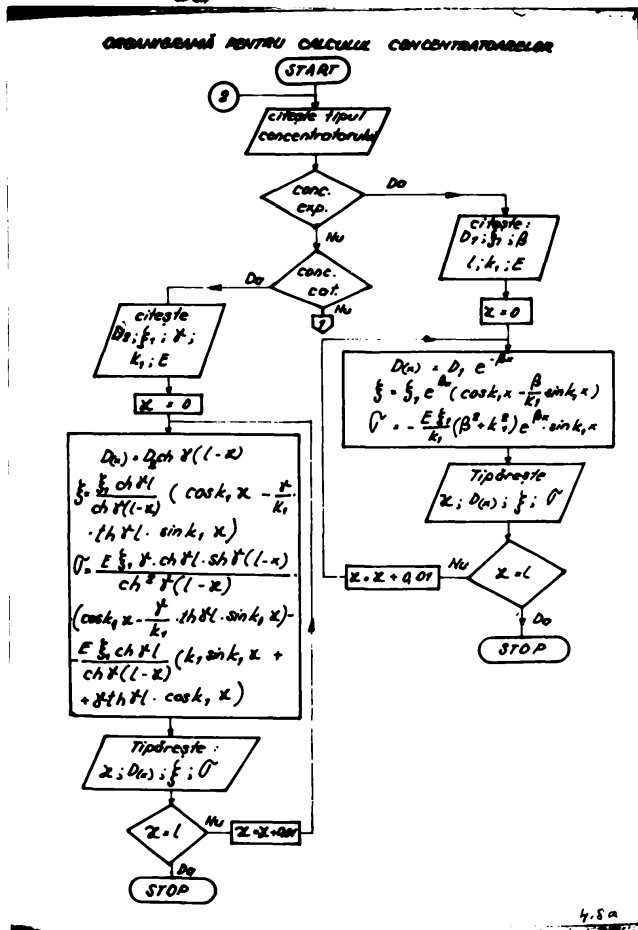
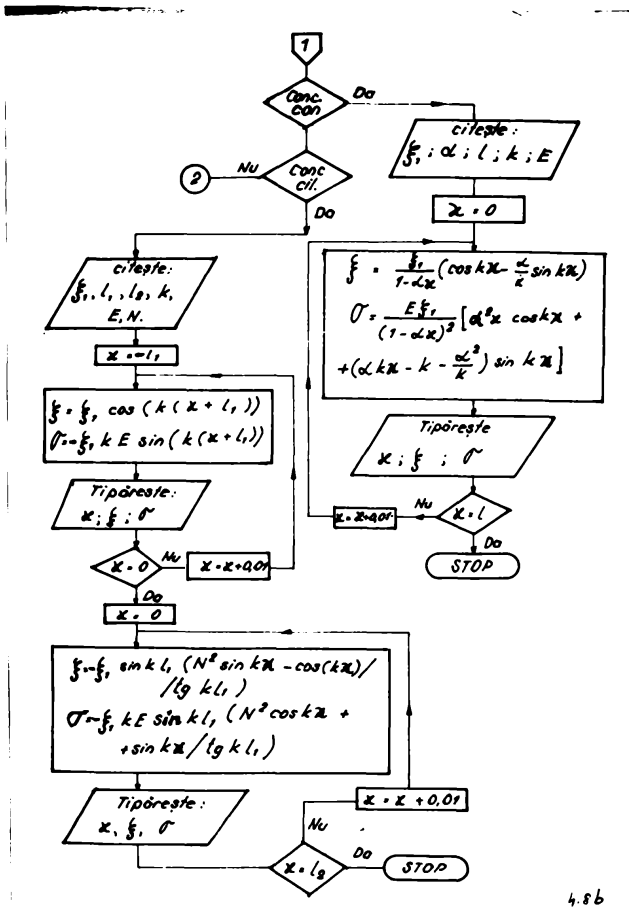


Fig. 4.8



CAPITOLUL 5

5. CERCETARI PRIVIND ANALIZAREA CONSTRUCTIVA A UNOR CONCENTRATOARE ULTRASONICE

Relațiile teoretice deduse în cap. 4 stau la baza calculului proiectării și realizării concentratoarelor ultrasonice care s-au utilizat la prelucrarea dimensională prin eroziune ultrasonică.

Formele principale luate în studiu sînt concentratoarele exponențiale, hiperbolice, conice și cilindrice în trepte. Pentru frecvența de $f = 22 \text{ kHz}$ s-au realizat concentratori atât din oțel OLC 45 cît și din duraluminiu D 16, avînd următoarele date de proiectare: diametrele de intrare $D_1 = 50 \text{ mm}$ și diametrele de ieșire $D_2 = 10 \text{ mm}$; viteza undelor ultrasonice longitudinale $c_L = 5180 \text{ m/s}$ pentru oțel și $c_L = 3100 \text{ m/s}$ pentru duraluminiu, modulul de elasticitate longitudinal $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$ pentru oțel și respectiv $E = 0,72 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$ pentru duraluminiu.

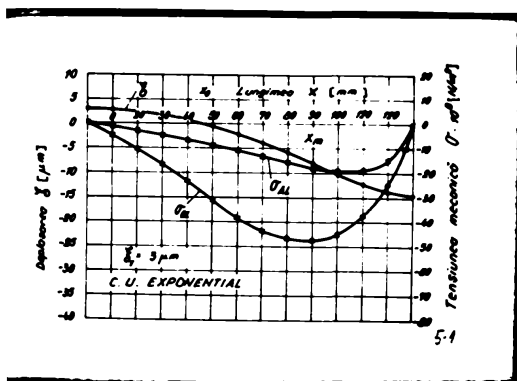
5.1. Concentratoare ultrasonice exponențiale

Constantele de calcul care intră în relațiile de dimensionare sînt redată în tabelul 5.1 iar diametrele $D(x)$ în tabelul 5.2.

Constante de calcul exponențial

Tabelul 5.1.

Mărimea și SİMBOL	Unitatea de măsură	Valoare	
		OL	Al
c_L	m/s	5100	3100
f	kHz	22	22
k	m^{-1}	26,6853	26,7887
k_1	m^{-1}	23,7478	23,8422
B	m^{-1}	12,1717	12,2143
ξ	m	0,1322	0,1318
E	N/m^2	$2,1 \cdot 10^{11}$	$0,72 \cdot 10^{11}$



Variația amplitudinii deplasării $\xi(x)$ determinată de relația (4.16) și amplitudinea tensiunii mecanice $\sigma(x)$ calculată cu formula (4.24) pentru diferite valori ale deplasării oscilației la intrare ξ_1 , se prezintă în tab. 5.3.

Pentru unele valori ale amplitudinii de intrare $\xi_1 = 3 \mu\text{m}$ s-au tras Fig. 5.1

sot și graficele de variație ale lui $\sigma = f(x)$ pentru concentratoarele din oțel și duraluminiu, iar pentru amplitudinea de oscilație $\xi = g(x)$ doar pentru oțel, cele pentru duraluminiu avind valori apropiate (fig.5.1)

Variația diametrelor concentratoarelor exponențiale Tabelul 5.2.

x mm	D(x)	
	OL	Al
0	50,000	50,000
10	44,2699	44,2510
20	39,1965	39,1651
30	34,7045	34,6601
40	30,7274	30,6750
50	27,2060	27,1481
60	24,0881	24,0266
70	21,3276	21,2641
80	18,8834	18,8192
90	16,7194	16,6554
100	14,8033	14,7404
110	13,1068	13,0455
120	11,6048	11,5456
130	10,2748	10,2181

C.U. exponențial $\xi; \sigma = f(x); \xi_2 = 3 \mu m;$ Tabelul 5.3.

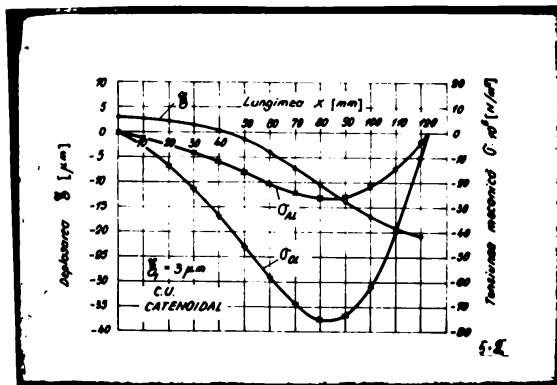
x mm	$\xi_2 = 3 \mu m$			
	OL		Al	
	$\xi \mu m$	$\sigma \cdot 10^6 N/m^2$	$\xi \mu m$	$\sigma \cdot 10^6 N/m^2$
0	3	0	3	0
10	2,88	- 9,02	2,92	- 1,22
20	1,82	- 17,79	2,15	- 4,46
30	2,50	- 11,02	2,64	- 2,71
40	0,80	- 25,00	1,39	- 6,44
50	- 0,55	- 32,19	0,33	- 8,60
60	- 2,25	- 38,79	- 0,99	- 10,87
70	- 4,23	- 44,10	- 2,66	- 13,15
80	- 6,42	- 47,33	- 4,64	- 15,32
90	- 8,69	- 47,67	- 6,90	- 17,21
100	- 10,90	- 44,27	- 9,40	- 18,65
110	- 12,84	- 36,39	- 12,06	- 19,43
120	- 14,28	- 23,42	- 14,76	- 19,32
130	- 14,98	- 4,99	- 14,87	- 18,08

5.7. Concentratoarea ultrasonice hiperbolice sau catenoidale

Constantele de calcul care intră în relațiile de calcul a amplitudinii de oscilație (4.34) și amplitudinii tensiunii mecanice (4.43) sînt date în tab.5.4. pentru concentratoare hiperbolice.

Constante de calcul pentru C.U. catenoidal Tabelul 5.4.

Mărimea SIMBOL	Unitatea de măsură	Valoare	
		OL	A1
C_L	m/s	5180	5100
f	kHz	22	22
k	m^{-1}	25,6853	26,7887
k_1	m^{-1}	18,8054	18,8286
γ	m^{-1}	18,9768	19,0557
δ	m	0,1208	0,2303
ϵ	N/m^2	$2,1 \cdot 10^{11}$	$0,72 \cdot 10^{11}$
$(k_1 \delta)$	-	2,38	2,38



Variația amplitudinii deplasării și tensiunii mecanice în lungul concentratorului, în fig.5.2.

Ecuația transcendentă (4.37) se pune sub formă de sistem și se rezolvă prin metoda grafică (sau numerică):

Fig.5.2.

$$\begin{cases} y = (k_1 \delta) & (5.1) \\ y = \frac{\operatorname{arctg} \sqrt{y^2 - 1}}{t_2(k_1 \delta)} & (5.2) \end{cases}$$

Reprezentînd cele două curbe, pentru valori arbitrare date variabilei $(k_1 \delta)$ (fig.5.3), se obține soluția comună: $(k_1 \delta) = 2,38$.

Dimensiunile constructive ale concentratorului de formă catenoidală și formă exponențială din oțel, sînt redată în fig.5.4.

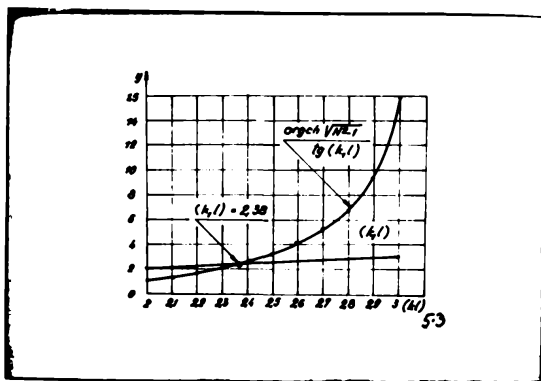


Fig.5.3.

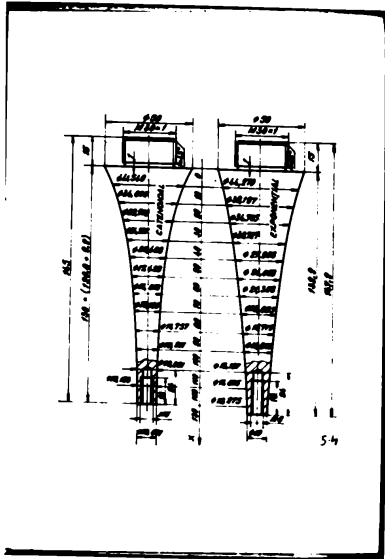


Fig.5.4.

5.3. Concentratoare ultrasonice de formă conică simplă și cu flanșă în secul de oscilație (deplasare)

Constantele de calcul pentru concentratoare conice din oțel și duraluminiu sînt date în tab.5.5.

Pentru unele variante de concentratoare conice simple și cu flanșă confecționate din oțel, se dau și grafic variațiile funcțiilor ξ și σ în lungul axei concentratorului fig.5.5 și fig.5.6.

Constante de calcul pentru C.U. conic Tabelul 5.5.

Mărimea SİMBOL	Unitatea de măsură	Valoare	
		OL	Al
c_L	m/s	5180	5100
f	kHz	22	22
k	s^{-1}	26,6853	26,7887
α	s^{-1}	5,6940	5,7184
β	m	0,1405	0,1399
H	-	5	5
(k, β)	-	3,749	3,479

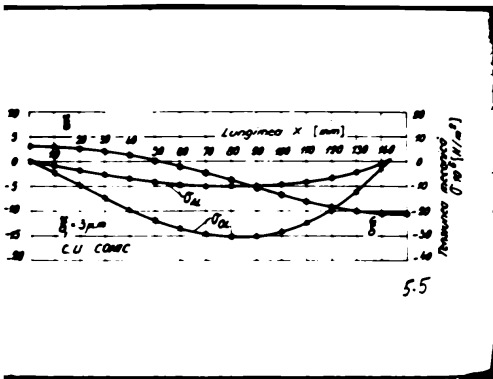


Fig.5.5

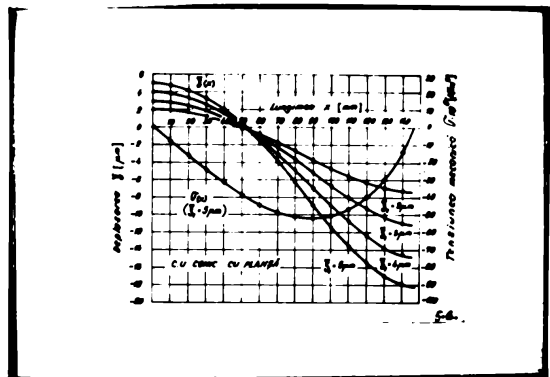


Fig.5.6.

5.4. Concentratoare ultrasonice cilindrice în trepte

Se consideră varianta de concentrator cilindric în trepte, cînd $l_1 = l_2 = \lambda/4$, care are valoarea raportului de amplificare a deplasării maxia $M = N^2$, fiind cel mai utilizat în practică. Constantele de calcul pentru concentratoare cilindrice în trepte din oțel și duraluminiu sînt date în tabelul 5.6.

C.U. cilindric în trepte

Tabelul 5.6.

Mărimea Simbol	Unitate de măsură	Valoare	
		OL	A1
c_L	m/s	5180	5100
f	kHz	22	22
k	m^{-1}	26,6853	26,7887
β	m^{-1}	0,1177	0,1173
N	-	5,0	5,0
E	N/m^2	$2,1 \cdot 10^{11}$	$0,72 \cdot 10^{11}$
ν_1	-	0,5	0,5

Valorile pentru amplitudinile deplasării și tensiunii mecanice, pentru diferite valori ale amplitudinii deplasării de intrare ξ_1 , sînt date în tabelul 5.7.

C.U. cilindric în trepte

Tabelul 5.7.

x mm	$\xi_1 = 1 \mu m$			
	$\xi \mu m$		$\sigma \cdot 10^6 N/m^2$	
	OL	A1	OL	A1
- 60	1,00	1,00	+ 0,16	+ 0,07
- 50	0,97	0,97	- 1,31	- 0,44
- 40	0,87	0,88	- 2,73	- 0,92
- 30	0,72	0,72	- 3,90	- 1,34
- 20	0,51	0,51	- 4,82	- 1,66
- 10	0,26	0,26	- 5,40	- 1,86
0	0	0	- 5,60	- 1,93
0	0	0	-148,10	- 48,22
10	- 6,59	- 6,62	-135,14	- 46,50
20	- 12,72	- 12,76	-120,61	- 41,40
30	- 17,94	- 17,99	- 97,55	- 33,47
40	- 21,89	- 21,95	- 67,58	- 23,08
50	- 24,30	- 24,33	- 32,83	- 11,05
60	- 25,00	- 24,98	- 4,24	+ 1,76

Rezolvarea ecuației transcendente (4.51) respectiv (4.52) este redată în fig. 5.7., obținindu-se soluția $(k_1) = 3,749$.

Dimensiunile pentru concentratoarele cilindrice în trepte și conice simple pentru varianta constructivă din oțel sînt date în fig. 5.8.

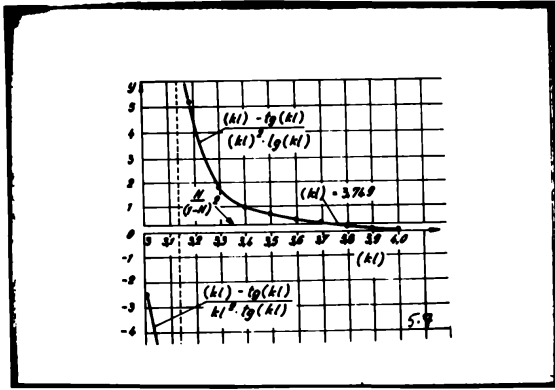


Fig. 5.7

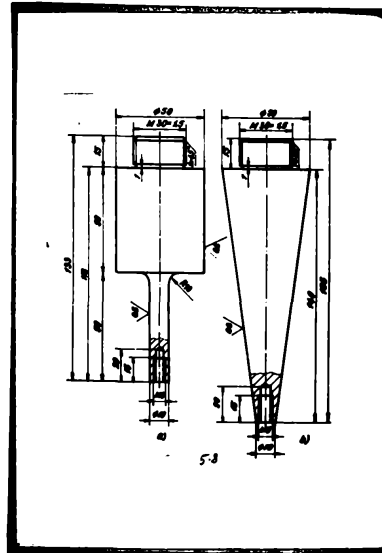


Fig. 5.8.

5.5. Parametri concentratoarelor ultrasonice în trepte exprimați în valori raportate

În practica de concepție și proiectare a concentratoarelor ultrasonice pentru determinări orientative ale dimensiunilor și a parametrilor este utilă folosirea unor diagrame exprimate în valori raportate. Aceste diagrame în valori raportate dau un caracter mai general de utilizare, pentru concentratoare de același tip însă de diferite dimensiuni. Lungimea celor două tronșoane ale concentratorului cilindric în trepte se exprimă prin parametri p_1 și respectiv p_2 care reprezintă ponderile, adică cota-parte din lungimea totală $l = \lambda / 2$ semiundică a concentratorului.

$$l_1 = p_1 \frac{\lambda}{2}, \quad l_2 = p_2 \frac{\lambda}{2}, \quad \text{în care } p_1 \in [0, 1], \quad p_2 \in [0, 1]$$

iar

$l = l_1 + l_2 = \lambda / 2$, devine $l = (p_1 + p_2) \lambda / 2$, existînd condiția $p_1 + p_2 = 1$. Pentru o bară cu secțiune constantă de lungime semiundică $l = \lambda / 2 = \frac{c_1}{2f} = \frac{\pi c_1}{\omega}$, confecționată din diferite ma-

teriale, se ia drept etalon de comparație. Lungimea de rezonanță semiundică în funcție de frecvență, pentru bara cu secțiune constantă este redată în fig. 5.9.

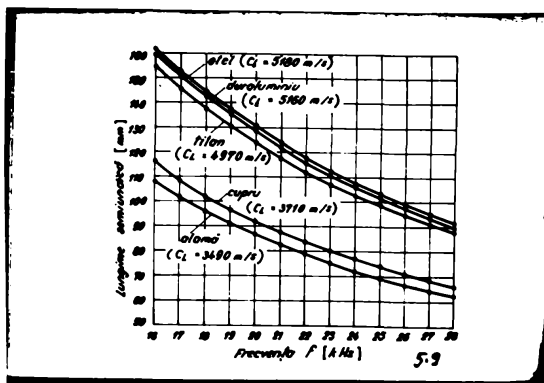


Fig. 5.9

La concentratoarele cilindrice în trepte, dacă se aleg diferite dimensiuni pentru lungimea tronșoului de intrare l_1 , din condiția de rezonanță (4.85) rezultă lungimi bine determinate pentru tronșoul de ieșire l_2 conform relației (4.86). Această relație se mai poate pune și sub forma:

$k l_2 = \text{arctg}[-N^2 \text{tg}(k l_1)]$, luind pentru numărul de undă $k = 2\pi/\lambda$ și ținând cont de ponderile p_1 și p_2 se poate scrie:

$$k l_1 = \pi p_1 \quad ; \quad k l_2 = \pi p_2 \quad (5.3)$$

Pondera lunginii l_2 devine:

$$p_2 = \frac{1}{\pi} \text{arctg}[-N^2 \text{tg}(\pi p_1)] \quad (5.4)$$

Luind valori ale lui $p_1 = 0,1 \dots 0,9$ cu un pas de 0,1 pentru concentratoarele cilindrice în trepte și pentru rapoarte ale diametrelor $N = D_1/D_2 = 1 \dots 8$, s-au calculat valorile p_2 .

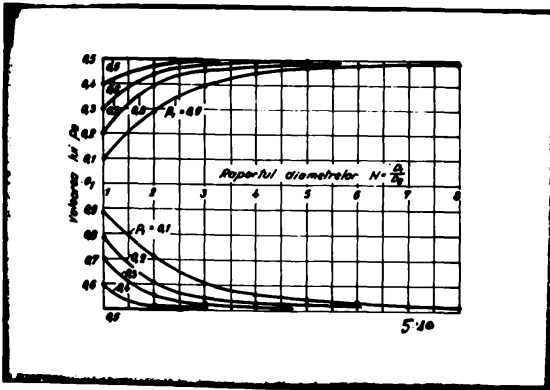


Fig. 5.10

Diagramele $p_2 = f(N)$ având ca parametru pondera p_1 sînt date în fig. 5.10.

Din această figură se observă că influența raportului diametrelor $N = D_1/D_2$, asupra ponderii p_2 la valori peste $N = 5$ practic este neglijabilă.

Lunginiile tronsonului de ieșire l_2 a concentratoarelor cilindrice în trepte se determină în funcție de raportul diametrelor N și valoarea ponderii p_1 , din relație (5.4):

$$l_2 = \frac{\lambda}{2\pi} \text{arctg}(-N^2 \text{tg}(\pi p_1)) \quad (5.5)$$

Deci se ia ca variabilă independentă N și ca parametru p_1 , variația lui l_2 pentru oțelul OLC 45 la frecvența $f = 20$ kHz este reprezentată în fig. 5.11

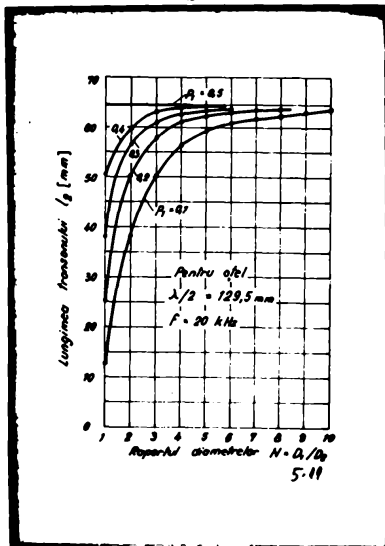


Fig. 5.11

Exprimiind amplitudinea deplasării (de oscilație) ξ_{\max} în funcție de valoarea raportată a lunginii tronsonului concentratorului $u = x/l_1$ respectiv $u = x/l_2$, relațiile (4.88) și devin:

$$(4.89) \quad \xi_{\max} = \frac{\xi}{\xi_1} = \frac{\xi}{\xi_1} \left(\sin \pi p_1 \right) \left(-\sin \pi p_1 u + \frac{\cos \pi p_1 u}{\text{tg} \pi p_1} \right) \text{ pt. } u \in [-1, 0] \quad (5.6)$$

$$\xi_{\max} = \frac{\xi}{\xi_1} = -N^2 \left(\sin \pi p_1 \right) \left(\sin \pi p_1 u + \frac{\cos \pi p_1 u}{\text{tg} \pi (1-p_1)} \right) \text{ pt. } u \in [0, 1] \quad (5.7)$$

Pentru oțel OLC 45 și $f = 20\text{kHz}$ se dau $\xi/\xi_1 = f(N)$ și $\xi/\xi_1 = f(u)$ în fig.5.12 și respectiv 5.13.

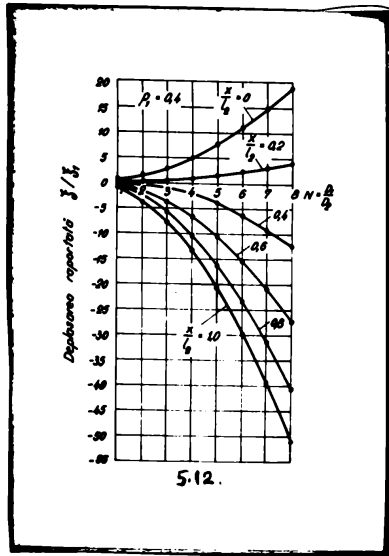


Fig.5.12

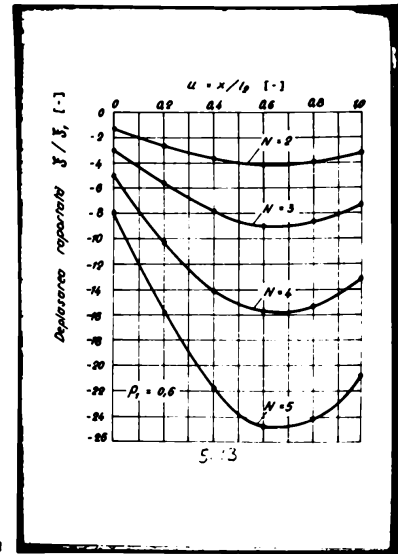


Fig.5.13

Amplitudinea tensiunii mecanice deosebenes se poate expriza prin valori raportate. Relațiile (4.92) și respectiv (4.93) se pot pune sub formă adimensională, înlocuind $k\xi_1 = \pi p_1$; $k\xi = \pi$; $k\xi_2 = \pi p_2$, $k = 2\pi/\lambda$ și $p_2 = 1 - p_1$ se obtine:

$$\frac{\sigma_{\text{max}} \cdot l}{\xi_2} = \frac{\pi [\cos \pi p_1 u + (\text{ctg} \pi p_1) (\sin \pi p_1 u)]}{\pi^2 [\sin \pi (1-p_1) + \cos \pi (1-p_1)]} \quad \text{pt. } u \in [-1, 0] \quad (5.8)$$

$$\frac{\sigma_{\text{max}} \cdot l}{\xi_2} = \frac{\pi [\cos \pi (1-p_1) u - \text{ctg} \pi (1-p_1) \cdot \sin \pi (1-p_1) u]}{\sin \pi (1-p_1) + \cos \pi (1-p_1)} \quad (5.9)$$

pt. $u \in [0, 1]$

$$\frac{\sigma_{\text{max}} \cdot l}{\xi_1} = -\pi (\sin \pi p_1) (\cos \pi p_1 u + \text{ctg} \pi p_1 \cdot \sin \pi p_1 u) \quad (5.10)$$

pt. $u \in [-1, 0]$

$$\frac{\sigma_{\text{max}} \cdot l}{\xi_1} = -\pi^2 (\sin \pi p_1) [\cos \pi (1-p_1) u - \text{ctg} \pi (1-p_1) \cdot \sin \pi (1-p_1) u] \quad (5.11)$$

pt. $u \in [0, 1]$

În fig.5.14 este reprezentată tensiunea mecanică raportată (adimensională) $\frac{\sigma_{\text{max}} \cdot l}{\xi_1} = f(u)$ în funcție de lungimea raportată

$u = x/l_{1,2}$ având ca parametru ponderea p_1 , pentru $N = 4$.

Se observă saltul de tensiune mecanică în secțiunea de trecere $u = 0$ și deplasarea valorilor maxime (în nodul) a tensiunii mecanice în funcție de ponderea p_1 .

Admițând lungimea tronsonului $l_2 = \lambda/4$ raportul de amplificarea

al amplitudinilor deplasării dată de relația (4.87) devine:

$$M = K^2 \operatorname{sinc} k l_1 = K^2 \operatorname{sinc} \sqrt{p_1} \quad (5.12)$$

pentru $p_1 = 0,1 \dots 0,5$, lungimea tronsonului de intrare $l_1 = \frac{\lambda}{2}$ va varia între $l_1 = 0,1 \frac{\lambda}{2} \dots \frac{\lambda}{4}$, iar pentru $l_2 = \frac{\lambda}{4} = \text{constant}$, lungimea totală a concentratorului va varia între $l = 0,6 \lambda/2 \dots 1,0 \lambda/2$.

Relația (5.12) este redată grafic în fig. 5.15.

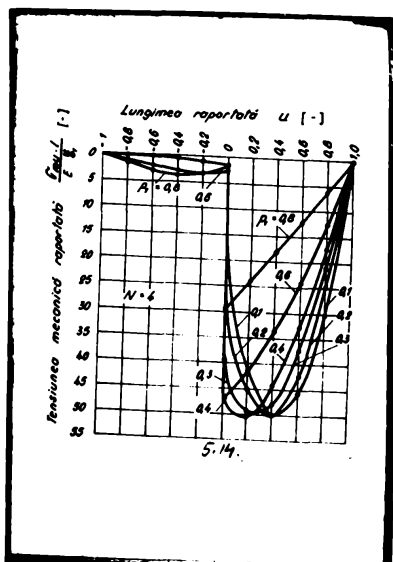


Fig. 5.14

Întrucât se păstrează constant tronsonul de intrare $l_1 = \lambda/4 = \text{constant}$

și se variază numai lungimea tronsonului de ieșire $l_2 = (0,1 \dots 0,5) \lambda/2$, raportul de amplificare al amplitudinii deplasării are expresia:

$$M = \frac{K^2}{\operatorname{sinc} k l_2} = \frac{K^2}{\operatorname{sinc} \sqrt{p_2}} \quad (5.13)$$

fiind reprezentat grafic în fig. 5.16.

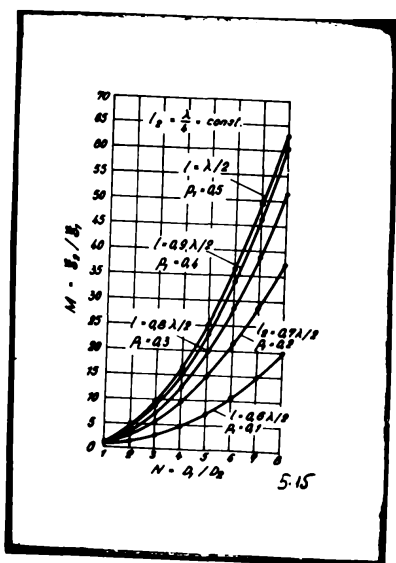


Fig. 5.15

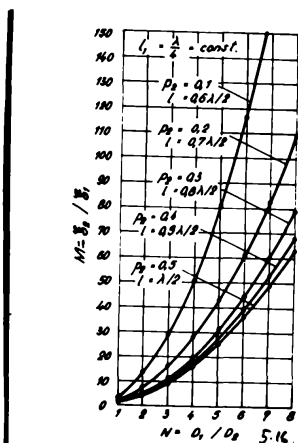


Fig. 5.16

Atunci când modificarea lungimii unui tronson se face în detrimentul celuilalt tronson, în așa fel încât să fie respectată condiția $l_1 + l_2 = l = \lambda/2$, adică $p_1 + p_2 = 1$, raportul de amplificare al amplitudinilor de deplasare va fi $M = K^2$.

Concentratele cilindrice în trepte pot de cele mai mari amplitudini ale deplasării necesare de a fi transmise obiectului de transfer din spațiul de lucru, dar tot la acestea se obțin și cele mai mari tensiuni mecanice în secțiunea de trecere care duc la distrugerea lor prin oboseală la puteri mari.

5.6. Parametri concentratelor ultrasonice exponențiale exprimați în valori raportate

Introducând notația $u = x/l$ pentru coordonata raportată, amplitudinea deplasării din (4.16) se poate scrie ca valoare raportată

(fig.5.17):

$$\frac{f}{f_1} = N^u \cdot (\cos \pi u - \frac{\ln N}{\pi} \sin \pi u) \quad (5.14)$$

$$\frac{f}{f_2} = N^{u-1} \left(\frac{\ln N}{\pi} \sin \pi u - \cos \pi u \right) \quad (5.15)$$

Pentru tensiunea mecanică se procedează analog (fig.5.18):

$$\frac{\sigma_{m \cdot g}}{\sigma} \Big|_1 = N^u \left(\pi + \frac{\ln^2 N}{\pi} \right) \sin \pi u \quad (5.16)$$

$$\frac{\sigma_{m \cdot g}}{\sigma} \Big|_2 = N^{u-1} \left(\pi + \frac{\ln^2 N}{\pi} \right) \sin \pi u \quad (5.17)$$

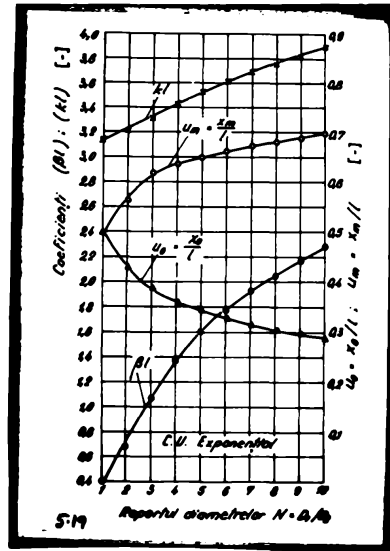
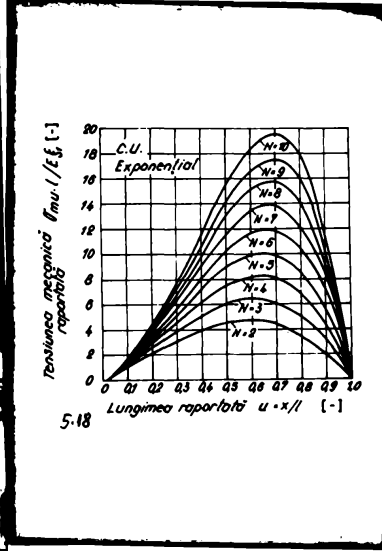
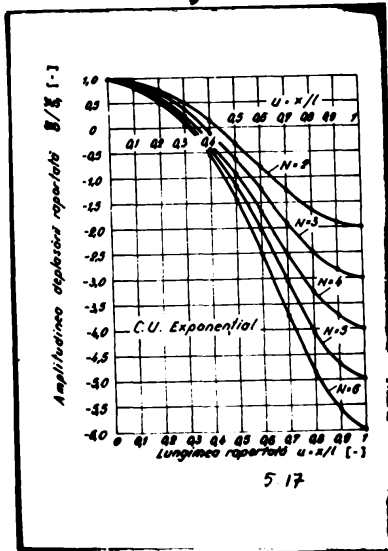


Fig.5.17

Fig.5.18

Fig.5.19.

În relațiile de mai sus s-au înlocuit $k^2 l^2 = \pi^2 + \ln^2 N$, $e^{0 \cdot k u} = N^u$ și $e^{\pi^2 (u-1)} = N^{u-1}$. Domeniul de definiție; pentru $u \in [0, 1]$.

Variația coeficienților adimensionali pentru reducerea secțiunii (βl), a numărului de undă ($k l$) în funcție de raportul diametrelor pentru concentratoare exponentiale este dată în fig.5.19.

Poziția nodului deplasării respectiv al vitezei de oscilație se determină cu formula (4.26) care poate fi sub formă adimensională:

$$u_0 = \frac{x_0}{l} = \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{\pi}{\ln N} \right) \quad (5.18)$$

Poziția ventrului amplitudinii tensiunii mecanice σ , respectiv al deformării specifice ϵ este dată de formula (4.25) care de asemenea se poate pune sub formă adimensională:

$$u_m = \frac{x_m}{l} = \frac{1}{\pi} - \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{\pi}{\ln N} \right) = 1 - u_0 \quad (5.19)$$

Variația mult mai lină a amplitudinii tensiunii mecanice a C.U. exponențiale în lungul concentratorului, neexistând variație în salt ca la C.U. cilindrice în trepte, le recomandă pentru a fi

Tabelul 5.8.

C.U. EXPERIMENTAL

$u = x/2$

$N = 1/2$

$f_2 = f(u, N)$

u	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1.0	0.5	0.333	0.250	0.200	0.167	0.143	0.125	0.111	0.1
0.1	0.951	0.473	0.313	0.234	0.186	0.154	0.132	0.113	0.102	0.091
0.2	0.809	0.390	0.250	0.181	0.145	0.113	0.094	0.079	0.069	0.060
0.3	0.589	0.257	0.141	0.087	0.056	0.036	0.022	0.012	0.005	0.001
0.4	0.309	0.065	0.012	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.6	0.309	0.383	0.413	0.413	0.413	0.416	0.412	0.408	0.404	0.400
0.7	0.589	0.622	0.626	0.623	0.613	0.613	0.607	0.602	0.597	0.592
0.8	0.809	0.817	0.814	0.809	0.804	0.799	0.795	0.790	0.786	0.782
0.9	0.951	0.951	0.949	0.946	0.944	0.942	0.940	0.938	0.937	0.935
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Tabelul 5.9.

C.U. EXPERIMENTAL

$u = x/2$

$N = 1/2$

$f_2 = f(u, N)$

u	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	0.971	0.545	0.505	0.338	0.288	0.256	0.233	0.215	0.200	0.198
0.2	1.846	1.112	0.860	0.728	0.647	0.583	0.536	0.503	0.474	0.450
0.3	2.541	1.641	1.222	1.150	1.040	0.961	0.901	0.852	0.813	0.779
0.4	2.986	2.067	1.734	1.554	1.436	1.351	1.286	1.234	1.190	1.153
0.5	3.141	2.329	2.035	1.876	1.773	1.692	1.643	1.597	1.559	1.527
0.6	2.986	2.374	2.161	2.050	1.981	1.934	1.898	1.870	1.847	1.828
0.7	2.541	2.165	2.051	2.003	1.980	1.968	1.961	1.958	1.958	1.958
0.8	1.846	1.685	1.663	1.672	1.689	1.710	1.731	1.752	1.772	1.791
0.9	0.971	0.930	0.976	1.009	1.045	1.075	1.106	1.134	1.160	1.185
1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

utilizate la puteri mai mari neexistind pericolul rușerii lor prin oboseală la un material ales corespunzător.

5.7. Parametri concentratoarelor ultrasonice catenoidale exprimați în valori raportate

Deplasarea raportată la amplitudinea de intrare a deplasării ξ_1 va fi (fig.5.20):

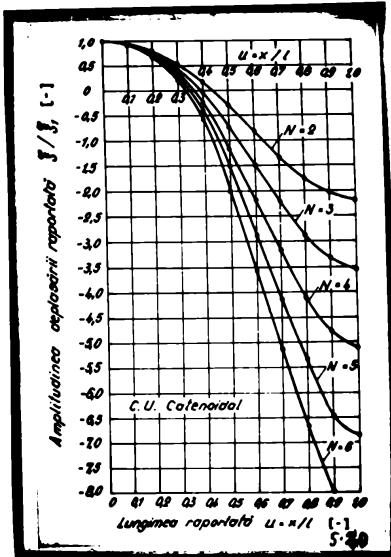


Fig.5.20

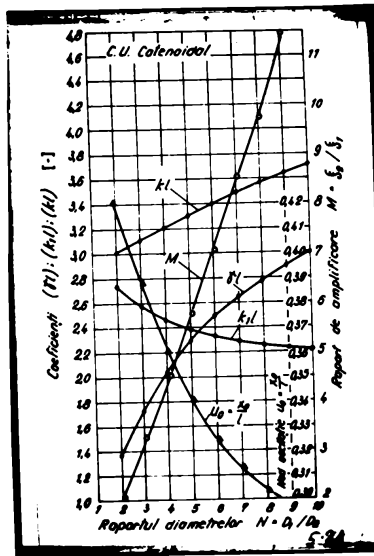


Fig.5.21

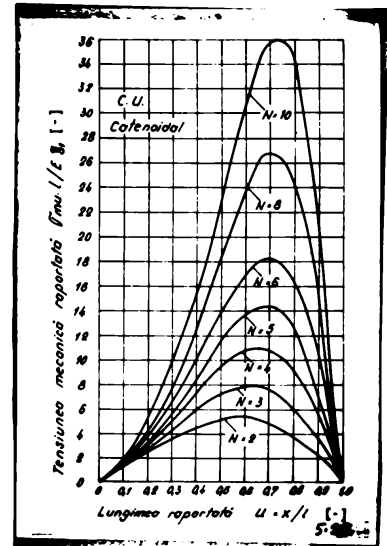


Fig.5.22

$$\frac{\xi(u)}{\xi_1} = \frac{\text{ch } \delta l}{\text{ch } \delta l(1-u)} (\text{cosh } k_1 l u + \text{tg } k_1 l \cdot \text{sinh } k_1 l u) \quad (5.20)$$

Pentru $u = 1$, $\xi(1) = \xi_2$ se obțin valorile rapoartelor de amplificare a amplitudinii deplasării:

$$N = \frac{\xi_2}{\xi_1} = (\text{ch } \delta l) \cdot (\text{cosh } k_1 l + \text{tg } k_1 l \cdot \text{sinh } k_1 l) \quad (5.21)$$

seu

$$N = \text{ch } \delta l / \text{cosh } k_1 l \quad (5.22)$$

Poziția nodului de oscilație se poate obține:

$$u_0 = \frac{x}{l} = \frac{1}{k_1 l} \arctg \left(\frac{k_1 l}{\text{th } \delta l} \right) \quad (5.23)$$

Tinând cont de (4.32), $\text{ch } \delta l = N$; $\delta l = \text{arccosh } N$, relațiile de mai sus se pot exprima și în funcție de raportul diametrelor concentratorului $N = D_1/D_2$. Valorile coeficienților adimensionali δl , $k_1 l$, kl legați prin expresia $k_1 = \sqrt{k^2 - \delta^2}$, respectiv $(k_1 l)^2 = (kl)^2 - (\delta l)^2$, cît și raportul de amplificare N în funcție de N sînt date în fig.5.21.

Amplitudinea deplasării se poate exprima și în funcție de amplitudinea de ieșire ξ_2 :

$$\frac{f(u)}{f_2} = \frac{\cos k_1 l (1-u)}{\operatorname{ch} \gamma l (1-u)} \quad (5.24)$$

Amplitudinea tensiunii mecanice în funcție de lungimea raportată a concentratorului $u = x/l$ se obține din fig. 5.27.

$$\frac{T_{\max} l}{E f_2} = \frac{k_1 l \operatorname{tg} k_1 l \operatorname{ch}^2 \gamma l \operatorname{sh} \gamma l (1-u)}{\operatorname{sh} \gamma l \operatorname{ch}^2 \gamma l (1-u)} (\cos k_1 l u + \operatorname{tg} k_1 l \cdot \sin k_1 l u) + \frac{k_1 l \operatorname{ch} \gamma l}{\operatorname{ch} \gamma l (1-u)} (\sin k_1 l u + \operatorname{tg} k_1 l \cdot \cos k_1 l u) \quad (5.25)$$

Amplitudinea tensiunii mecanice se poate exprima și în funcție de amplitudinea de ieșire a deplasării f_2 :

$$\frac{T_{\max} l}{E f_2} = \frac{k_1 l \sin k_1 l (1-u)}{\operatorname{ch} \gamma l (1-u)} + \frac{l \cos k_1 l (1-u) \operatorname{sh} \gamma l (1-u)}{\operatorname{ch}^2 \gamma l (1-u)} \quad (5.26)$$

Lungimea de rezonanță se determină cu relația:

$$l = \frac{c_1}{2\pi f} \sqrt{(k_1 l)^2 + \ln^2(N + \sqrt{N^2 - 1})}, \quad (5.27)$$

Din cele prezentate mai sus se observă că nodul de oscilație se deplasează spre diametrul de intrare D_1 al concentratorului catenoidal, odată cu creșterea raportului diametrelor N , iar ventrul amplitudinii tensiunii mecanice se deplasează spre diametrul de ieșire al concentratorului D_2 . Cu creșterea lui N se mărește atât raportul de amplificarea amplitudinii deplasării sau vitezei de oscilație cât și valoarea amplitudinii tensiunii mecanice.

5.8. Parametri concentratoarelor ultrasonice conice redați în valori adimensionale

Precedând similar ca la concentratoarele catenoidale și la C.U. conice se pot exprima parametri în valori adimensionale. La ambele forme de concentrare, ecuațiile lor diferențiale de ordinul doi au coeficienți variabili iar soluția lor generală depinde de o ecuație transcendentă care se rezolvă prin metode grafice sau numerice.

Spre deosebire de C.U. catenoidale, la C.U. conice viteza de fază a undelor ultrasonice longitudinale coincide cu viteza de propagare în bare cu secțiune constantă $c_1 = c_l$ iar numerele de undă $k_1 = k$.

Raportul de amplificarea amplitudinii deplasării:

$$M = \frac{1}{(\alpha l - 1) \cos kl - \frac{\alpha l}{kl} \sin kl} \quad (5.26)$$

Poziția nodului de oscilație se deduce din (4.57):

$$u_0 = \frac{x_0}{l} = \frac{1}{kl} \arctg \frac{kl}{\alpha l} \quad (5.29)$$

Rezolvarea ecuației transcendente (4.94) prin metode numerice permite calculul coeficienților (kl) , (αl) , M și u_0 dați în diagrama fig.5.23 în funcție de N . Valorile raportate ale amplitudinii deplasării în fig.5.24.

$$\frac{1}{1} \frac{1}{1} = \frac{1}{1 - \alpha l u} (\cos klu - \frac{\alpha l}{kl} \sin klu) \quad (5.30)$$

$$\frac{1}{2} \frac{1}{2} = \frac{1}{\alpha l u - 1} \left[(1 - \alpha l) \cos kl(1+u) + \frac{\alpha l}{kl} \sin kl(1-u) \right] \quad (5.31)$$

Amplitudinea tensiunii mecanice în funcție de $u = x/l$ se obține din (4.55) fig.5.25:

$$\frac{\sigma_{max}}{E} = \frac{1}{(1 - \alpha l u)^2} \left[\alpha^2 l^2 u \cos klu + (\alpha l \cdot kl \cdot u - kl - \frac{\alpha^2 l^2}{kl}) \cdot \sin klu \right] \quad (5.32)$$

$$\frac{\sigma_{max}}{E} = \frac{-\alpha l}{(\alpha l u - 1)^2} \left[(1 - \alpha l) \cos kl(1+u) + \frac{\alpha l}{kl} \sin kl(1+u) \right] + \frac{1}{\alpha l u - 1} \left[(\alpha l - 1) kl \sin kl(1+u) - \alpha l \cos kl(1-u) \right] \quad (5.33)$$

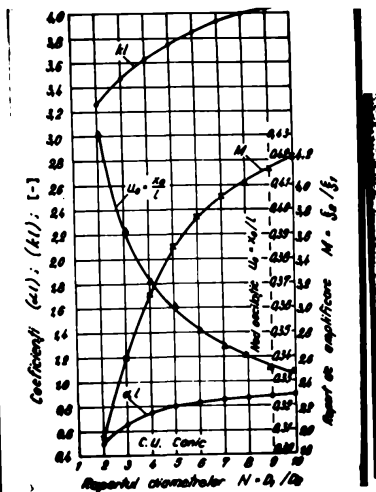


Fig.5.23

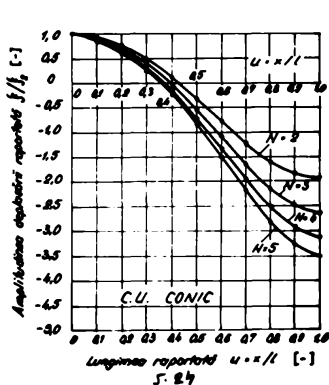


Fig.5.24

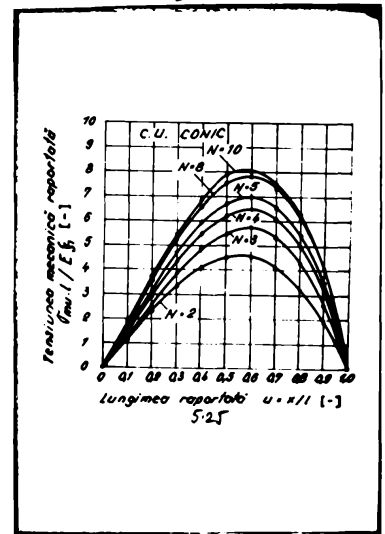


Fig.5.25

Lungimea de rezonanță pentru C.U. conice:

$$l = \frac{(kl)}{k} = \frac{c_{in}(kl)}{2\pi f} \quad (5.34)$$

în care (kl) este soluția ecuației transcendente.

Din figurile prezentate se observă variații ale parametrilor C.U. canice asemănătoare cu cele catenoidale și exponențiale. Valorile amplitudinii de deplasare și amplitudinilor tensiunilor mecanice variază lin în lungul concentratorului. Raportul de amplificarea al amplitudinii are valori relativ mici, iar ventrul tensiunii mecanice nu este periculos pentru distrugerea prin oboseală la o alegere corespunzătoare a materialului. Tehnologiile se confecționează mult mai ușor decât C.U. exponențiale și catenoidale.

CAPITOLUL 6

CERCETARI EXPERIMENTALE PRIVIND BLOCURILE ULTRASONICE, MASURARILE ACUSTICE SI FREIN- CRAREA CONCENTRATOARELOR

6.1. Prezentarea blocurilor ultrasonice realizate

Blocul ultrasonic sau capul acustic al maginilor unelte ultra-sonice cuprinde sistemul oscilator, care constituie partea specifi- că a acestor magini. El se compune din transductorul magnetostrictiv coloana intermediară în $\lambda/2$ fiind un element intermediar, ghid de undă care poate lipi de obicei, concentrator ultrasonic și obiect ^{de}

transfer
sau sculă.

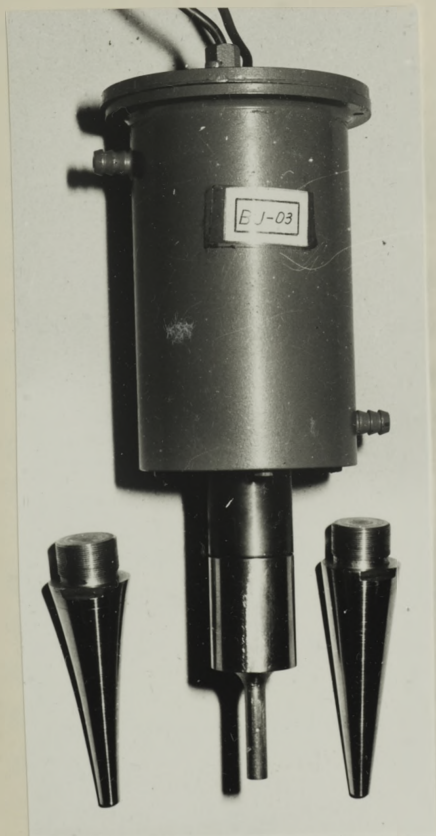


Fig. 6.1.

Vederea de ansamblu a blocului ultrasonic cu transductor magnetostrictiv cu tole din nichel este redată în fig. 6.1 iar sistemul oscilator în fig. 6.2. Coloana intermediară de lungime cemiundică prevă- zută cu flanșă în nodul de oscilație pen- tru fixarea sistemului oscilator în carca- sa capului acustic, are alezaj filetat în partea inferioară pentru a putea schimba concentratorii ultrasonici, având diferite forme de reducere a secțiunii transversale. Transductorul confecționat din tole de ni- chel cu grosimea de 0,1 mm s-a lipit de coloana intermediară cu un aliaj de lipit pe bază de staniu. Tratamentele termice de reconacere pentru tolele de nichel este cel prezentat în capitolul 3 al țării, trata- ment care a avut scopul de a forma oxidul de nichel având rezistență ridicată elec- trică și mecanică necesară izolării elec- trice reciproce între tole pentru ca pier-

derile prin curenți turbionari să fie minime. După asamblarea tolelor în pachet și strângerea lor cu ajutorul a două coliere s-a rectificat suprafața frontală radiantă. Stângerea și izolarea acustică a siste- mului oscilant față de carcasă s-a făcut prin intermediul a două gar- nituri de cauciuc strinse pe flanșa de fixare cu șuruburi. Sistemul este prevăzut cu gtuțuri de admisie și evacuare a apei de racire.

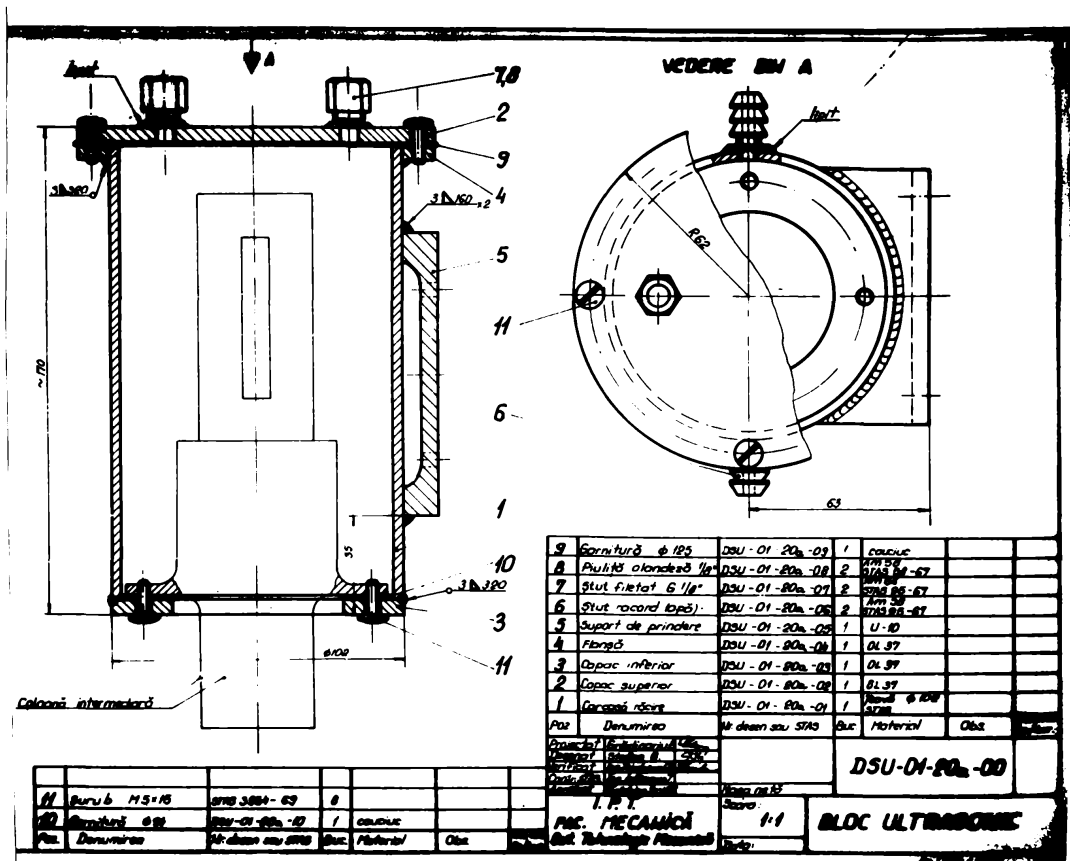


Fig. 6.2.

In partea superioară a transducerului s-a lipit un strat de cauciuc peres cu grosimea de 7 mm. Toilele au fost decupate în lungul direcției de laminare a benzii pentru ca efectul magnetostrictiv să fie cât mai mare. După decupare toilele au fost îndreptate între două plăci, apoi curățate și degreșate prin spălare în benzină.

Blocurile ultrasonice având transductoare magnetostrictive din ferite (notate în capitolul 3 cu F_2 fabricate în țară la ICE Bucu-
raști) s-au realizate în variantele BU - 1 (fig. 6.3), BU - 2 (fig. 6.4) și BU - 3 (fig. 6.5).

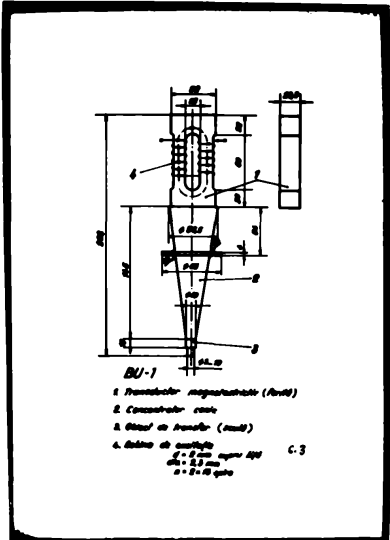


Fig. 6.3

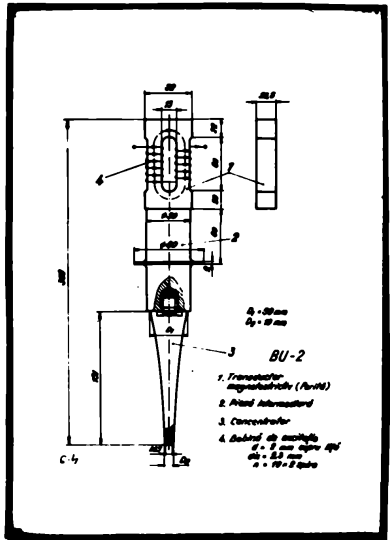


Fig. 6.4

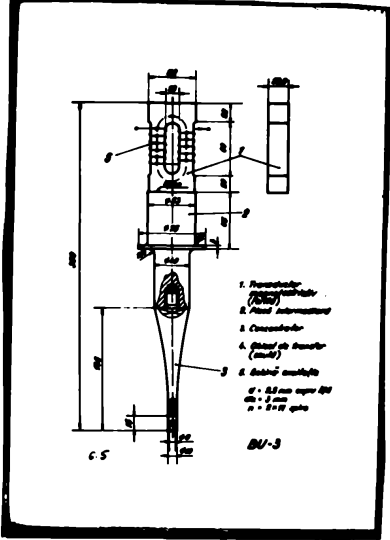


Fig. 6.5

La varianta BU - 1 transductorul s-a lipit direct pe concentratorul conic cu flanșă în nodul de oscilație, iar la variantele BU-2 și BU-3 ferita s-a lipit pe o coloană intermediară de lungime asemănătoare cu tronșoane având diametre egale la varianta BU-2 și neegale la varianta BU-3, ambele coloane intermediare au în partea inferioară alezaj filetat M 30X1 pentru concentratoare ultrasonice amovibile de diferite forme. Lipirea transductoarelor din ferite magnetostriective s-a făcut cu rășini epoxidice de tip araldit Az 15 cu întăritor Hg 15 produse de firma CIBA din Elveția.

Feritele s-au selectat și verificat să nu aibă fisuri și alte defecte și înainte de lipire suprafața frontală radială a fost netezită fin. La fel, suprafețele frontale la locul de îmbinare ale coloanelor intermediare și concentratorului conic au fost rectificate și netezite fin prin lustruire pentru ca contactul la asamblare să se facă cât mai etanș iar pierderile prin reflexia undelor ultrasonice să fie minime.

S-au finalizat și suprafețele frontale ale concentratoarelor la îmbinarea acestora cu coloanele intermediare prin înșurubare, cât și a obiectelor de transfer cu concentratoarele. În locurile de îmbinare amovibilă prin înșurubare atât a concentratoarelor cât și a sculelor stingerii trebuie făcută bine, uneori s-au interpus rondelle de oțel moale cu grosime mică 0,3...0,5 mm pentru un contact metalic cât mai intim.

Suspendarea blocurilor ultrasonice în suportul corpului acustic al mașinii s-a făcut prin elemente izolante acustic, unele din teflon și cauciuc, evitând rigidizarea suspendării.

Bobinarea transductoarelor s-a făcut conform calculului preliminar redat în capitolul 3, care au fost ajustate experimental la testarea și încercarea de prelucrare a blocurilor ultrasonice. S-a respectat *sensul* de înfășurare pe coloanele active ale transductoarelor având grijă ca fluxul magnetic să se închidă în același sens pe circuitul magnetic închis.

Aceste prescripții au fost respectate la realizarea blocurilor ultrasonice, în cadrul laboratorului de ultrasunete al Facultății de Mecanică, unde personalul are o bogată experiență în acest domeniu.

La realizarea sistemului oscilator trebuie avute în vedere o serie de cerințe funcționale care sînt de natură acustică, mecanică și tehnologică pe care trebuie să le satisfacă blocul ultrasonic pentru a putea fi utilizat în mod corespunzător la prelucrarea dimensională prin eroziune ultrasonică.

Unele din aceste cerințe au fost amintite mai sus. Precizia de

execuție a sistemului oscilator, precizia formei geometrice, calitatea suprafețelor elementelor componente, caracteristicile mecanice, fizice și tehnologice ale materialelor utilizate, tratamentul lor termic, rezistența la oboseală și la uzură, stabilitatea termică a proprietăților mecanice și acustice; toate au influență majoră asupra calității funcționale ale blocului ultrasonic. Pe de altă parte este necesar să se asigure o simplitate tehnologică și constructivă a elementelor componente ale sistemului oscilator pentru a micșora prețul de cost al corpului acustic în ansamblu.

Din punct de vedere al exploatării practice a blocurilor ultrasonice este necesar ca acestea să aibă posibilitatea înlecuirii rapide a sculelor (obiectelor de transfer) și chiar a concentratoarelor în funcție de noile tehnologii la prelucrarea prin eroziune ultrasonică.

Continuitatea mediului material elastic prin care se propagă undele ultrasonice în lungul sistemului oscilator este esențială pentru transmiterea energiei mecanice de vibrație din locul de formare a ei, în coloanele active ale transductorului până în spațiul de lucru tehnologic. Orice discontinuitate la locurile de îmbinare sau în interiorul materialului unui element component (defecte, goluri, pori, sufluri etc.) dau naștere la pierderi de energie [198], [97], [98], [126], [210], [254], [64].

Transductoarele magnetostriective metalice ca de exemplu nichelul sînt disipatoare de energie, comparativ cu feritele magnetostriective. Parte din energia transmisă transductorului de nichel se transferă în căldură care trebuie evacuată prin răcire forțată cu apă, pierderile prin curenți turbionari fiind importante la puteri de 500...1500 W, chiar dacă telele sînt subțiri de 0,1 mm și bine izolate între ele prin stratul de oxid. La transductoarele din ferite pierderile sînt mult mai mici și lucrînd la puteri mici max. 100...150 W, este suficientă răcirea cu aer. La răcirea cu apă trebuie luate măsuri de protecție contra coroziunii interioare a carcasi capului acustic și a elementelor din interior, cit și contra eroziunii produse prin cavitație. Există mai multe soluții care se pot aplica, vopsire, inhibare cu bitum sau suală, suflare cu azot, cit și confecționarea carcasi și altor elemente din oțeluri inoxidabile rezistente la coroziune, aceasta fiind o soluție eficientă.

Flanșe plasate în nodul de oscilație a coloanei intermediare lucrează în condiții destul de grele. Suprafețelor trebuie bine finisate, avînd o execuție de slabă calitate va da o durabilitate mică în funcționare datorită sollicitărilor la oboseală

ea fiind plasată în vântul tensiunilor mecanice. Pe lângă calitatea foarte bună care se impune suprafețelor elementelor de fixare se cer și raza de recordare corespunzătoare.

Realizarea coaxialității elementelor componente ale corpului acustic este deosebit de importantă pentru a evita oscilațiile laterale care dau abateri de la forma geometrică dorită la prelucrarea covităților prin copierea profilului obiectului de transfer (sculei). Deosebit de rezistențele acustice specifice ($\lambda = \rho c_2$; ρ - densitatea, c_2 - viteză undelor longitudinale) ale elementelor care se montează în sistemul oscilant trebuie să fie cât mai apropiate, ideal egale.

6.2. Cercetări privind măsurările acustice ale blocurilor ultrasonice

6.2.1. Modelul mecanic al sistemului oscilator și condiția de rezonanță

Sistemul oscilator al blocului ultrasonic din fig.6.6.a., compus din transducerul TSM, coloana intermediară CI, concentratorul ultrasonic C.U. și obiectul de transfer OT, poate fi asimilat, cu modelul mecanic de tip Kelvin redat în fig.6.6.b. [39], [35]. Modelul mecanic oscilează sub acțiunea forței excitatoare de tip armonic $F = F_0 \cdot e^{j\omega t}$, cu frecare viscoasă caracterizată de forța de frecare $F_f = -rv$, care se opune vitezei de oscilație v fiind proporțională cu viteza prin

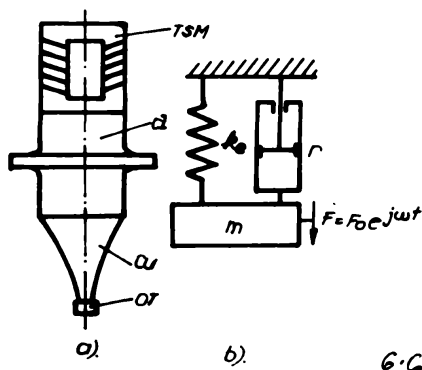


Fig.6.6.

coeficientul de proporționalitate r . Proprietățile elastice ale sistemului oscilant sînt caracterizate de forța elastică a resortului $F_0 = -k_0 \cdot \xi$ proporțională cu deplasarea ξ prin constanta de proporționalitate k_0 care este constantă elastică sau rigiditatea arcului [36], [222].

Din ecuația de echilibru a forțelor care acționează asupra sistemului se deduce ecuația diferențială a sistemului oscilant excitat cu o forță armonică:

$$m \ddot{\xi} + r \dot{\xi} + k_0 \xi = F_0 e^{j\omega t} \quad (6.1)$$

În care $\omega = 2\pi f$ este pulsația forței excitatoare magnetostriective cu amplitudinea F_0 , $j = \sqrt{-1}$ unitatea imaginară. Împărțind cu masa

echivalentă a a sistemului oscilant și notând $2\delta = r/m$, δ fiind coeficientul de frecare viscoasă și $k_0/m = \omega_0^2$, $\omega_0 = 2\pi f_0$, pulsația proprie a sistemului, ecuația (6.1) devine:

$$\ddot{f} + 2\delta\dot{f} + \omega_0^2 f = \frac{F_0}{m} e^{j\omega t} \quad (6.2)$$

Soluția acestei ecuații diferențiale se compune din soluția ecuației omogene la care se adaugă o soluție particulară a ecuației, neomogene de formă armonică [89], [35], [221]:

$$f = e^{-\delta t} (A e^{j(\omega_1 t + \varphi_1)} + B e^{-j(\omega_1 t + \varphi_1)}) + \frac{F_0}{m} e^{j(\omega t + \varphi)} \quad (6.3)$$

în care $\omega_1 = \sqrt{\omega^2 - \omega_0^2}$ este pulsația (pseudopulsația) oscilațiilor amortizate libere; A, B - constante complexe care depind de condițiile inițiale, φ_1 ; φ - defazajul dintre forță și deplasare.

În sistemul oscilator detorită frecărilor interne oscilațiile proprii se amortizează după un anumit timp și rămân numai oscilațiile forțate aplicate de la generator. De aceea, pentru aplicații practice interesăm partea a doua a soluției.

Înlocuind în (6.2) soluția particulară a deplasării sub formă complexă

$$f = \underline{f}_m e^{j\varphi} e^{j\omega t} = \underline{f}_m e^{j\omega t}, \text{ unde } \underline{f}_m = \underline{f}_m e^{j\varphi} \text{ este amplitudinea complexă a deplasării (barată inferior) se obține:}$$

$$\underline{f}_m = \frac{F_0/m}{\omega(\omega_0^2 - \omega^2 + 2j\delta\omega)} \quad (6.4)$$

respectiv modulul amplitudinii reale a deplasării:

$$f_m = \frac{F_0/m}{\omega \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2\omega^2}} \quad (6.5)$$

și defazajul între deplasare și forța excitatoare:

$$\varphi = \arctg \frac{2\delta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (6.6)$$

Relația (6.5) arată că amplitudinea deplasării este direct proporțională cu amplitudinea forței excitatoare F_0 și scade cu creșterea masei echivalente a a sistemului oscilator. Ea mai depinde de diferența pulsațiilor proprii ω_0 și pulsația forței excitatoare ω , cât și de proprietățile de amortizare 2δ ale blocului ul-

trasonic. Dacă sistemul ar fi ideal, fără frecări rezonanța mecanică s-ar produce când $\omega = \omega_0$, iar amplitudinea ar crește nelimitat. În realitate există frecări interne $\delta \neq 0$ iar la rezonanța mecanică a sistemului oscilator amplitudinea oscilațiilor va avea o anumită valoare maximă.

Acest fenomen de rezonanță mecanică se urmărește întotdeauna a fi realizat pentru a avea efect maxim de eroziune ultrasonică în spațiul de lucru.

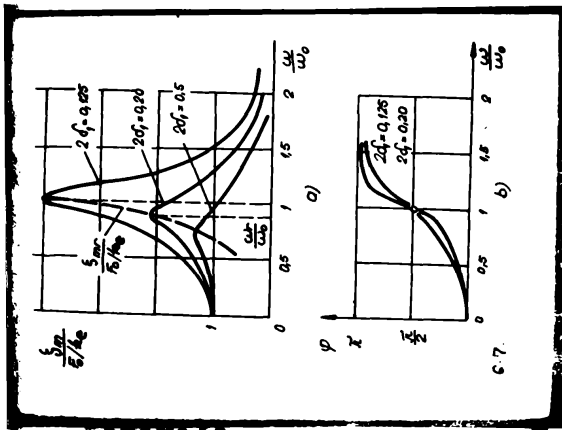
Amplitudinea oscilațiilor forțate atinge valoarea maximă pentru o pulsație ω la care se anulează derivata amplitudinii în raport cu ω :

$$\omega = \omega_r = 2\pi f_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}, \quad (6.7)$$

care înlocuită în (6.5) se obține amplitudinea deplasării la rezonanță:

$$\xi_{nr} = \frac{F_0}{2n\delta\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}} \quad (6.8)$$

Cu cât crește amortizarea sistemului oscilant δ cu atât scade amplitudinea maximă și frecvența de rezonanță în amplitudine se mută spre stînga frecvenței proprii de oscilație (fig.6.7)



Pentru a putea exprima amplitudinea deplasării și faza ei în mărimi adimensionale se face substituția $\delta = \delta_1 \omega_0$, respectiv coeficient de amortizare viscoasă δ_1 limit și factor de amortizare este:

$$\delta_1 = \frac{\delta}{\omega_0} = \frac{r}{2\sqrt{mk_0}} \quad (6.9)$$

Relațiile (6.5) și (6.6) devin:

$$\xi_{nr} = \frac{F_0/k_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta_1^2 \omega_0^2 \omega^2}} \quad (6.10)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\delta_1 \omega_0 \omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (6.11)$$

Scotînd de sub radical pe ω_0^2 și ținînd seama că $k\omega_0^2 = k_0$, se obține:

$$\xi_{nr} = \frac{F_0/k_0}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + (2\delta_1)^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad (6.12)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{2\delta_1 \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad (6.13)$$

Decreșterea numărului relației (6.12) este o sumă de putrate factorului de amplificarea a amplitudinii de deplasare $\xi = F_0/k_0$ este finit pentru orice valoare a pulsației relative ω/ω_0 .

Pulsația la rezonanță este:

$$\omega_r = \omega_0 \sqrt{1 - 2\delta_1^2} \quad (6.14)$$

iar amplitudinea de rezonanță:

$$\xi_{\text{nr}} = \frac{F_0/k_0}{2\delta_1 \sqrt{1 - \delta_1^2}} \quad (6.15)$$

Se observă din fig. 6.7 că efectul amortizării vâscoase (vibroelastice) se resimte numai în vecinătatea zonei de rezonanță, în rest curbele practic coincid, curbele au maximum puțin la stînga sistemului neamortizat, locul geometric al acestor maxime corespunde curbei dusă cu linie-punct în fig. 6.7.a. Cînd amortizările sînt foarte mici $\delta_1 \ll 1$, rezonanța în amplitudine apare la $\omega_r = \omega_0$. Faza de comportare la rezonanță a blocului ultrasonic este dat și de factorul de calitate Q definit astfel:

$$Q = \frac{\omega_r}{\delta_1} = \frac{\omega_r}{\omega_r} = \frac{\omega_0}{2\delta_1} = \frac{1}{2\delta_1} \quad (6.16)$$

Așa cum se observă din relația (6.13) și fig. 6.7.b., amplitudinea deplasării este defazată în urma forței perturbatoare cu unghiul φ . Pentru $\omega = \omega_0$ se obține $\varphi = \pi/2$ indiferent de valoarea factorului de amortizare δ_1 . Această proprietate de fază este rezonanța de fază caracterizată de faptul că deplasarea și forța sînt în cuadratură iar $Q = 1/2\delta_1$. Cînd amortizările sînt foarte mici rezonanța de fază coincide practic cu rezonanța de amplitudine iar pulsația de rezonanță cu pulsația proprie a capului acustic.

Din fig. 6.7.b. se observă că dacă $\delta = 0$ sub rezonanță $\varphi = 0$ iar deasupra ei $\varphi = \pi$, în timp ce la blocurile ultrasonice care au totdeauna amortizare va exista o diferență de fază între forță și deplasare.

Experimental amortizarea se poate studia prin măsurarea amplitudinilor deplasării la oscilații libere a capului acustic prin decrementul logaritmic sau studiind rezonanța în cazul vibrației forțate. La vibrații forțate ale blocului ultrasonic se poate determina amortizarea δ_1 sau factorul de calitate în diferite feluri.

1.) Experimental se ridică curba de rezonanță măsurînd amplitudinea de rezonanță ξ_{nr} , cunoscînd $\omega_0 = \omega$, F_0 și k_0 se poate determina din (6.15) δ_1 , respectiv Q .

2.) Marcim pe curba de rezonanță punctele de jumătate putere (scăpături) ceea ce corespunde la $\xi_{mr}/\sqrt{2} = 0,70$ ur din amplitudinea maximă a deplasării și aplicăm formula:

$$Q = \frac{1}{2\delta_1} = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (6.17)$$

conform fig.6.8.

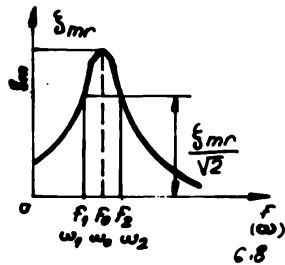


Fig.6.8

$$F_f = r \frac{d\xi}{dt} = r \xi \omega \sin(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}) \quad (6.18)$$

este egală cu lucrul mecanic al acestei forțe de frecare pe ciclu:

$$\begin{aligned} \Delta A &= \int_0^{2\pi} \frac{2\sqrt{2}}{\omega} F_f d\xi = \int_0^{2\pi} \frac{2\sqrt{2}}{\omega} r \xi^2 \omega^2 \cos^2(\omega t - \varphi) dt = \\ &= \sqrt{2} r \omega \xi^2 \pi \end{aligned} \quad (6.19)$$

Amplitudinea $\xi_{mr}/\sqrt{2}$ se numește amplitudinea punctelor de jumătate putere intrucit din această relație (6.19) și corespunde a pierdere de energie pe ciclu egală cu jumătate din cea corespunzătoare rezonanței. Această metodă s-a aplicat la experimentări.

6.2.2. Prezentarea aparatului pentru măsurări acustice

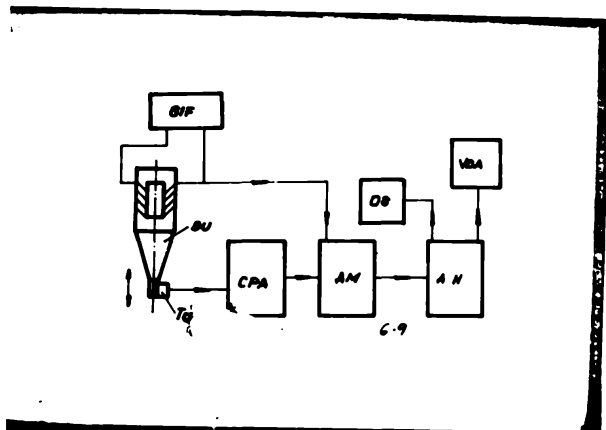


Fig.6.9.

Schemă bloc a standului experimental de testări acustice a blocurilor ultrasonice utilizate la prelucrare prin eroziune ultrasonică se prezintă în fig.6.9.

Schema se compune din următoarele elemente componente: BU- bloc ultrasonic GIF - generator de ultrasunete; Ta - transducer accelerometric a firmei Bruel-Kjaer (BK) din Danemarca, tip BK 8507, CPA -calibrator accelerometric și preamplificator tip BK-4292; AN amplificatorul de

de măsură M-2606; AM - analizorul heterodină MK - 2010; VDA - voltmetrul digital tip BK - 2427; OS - osciloscopul (Philips) tip PW 3232.

În domeniul frecvențelor ultrasonice unde accelerațiile sînt mari și deplasările relativ mici, capterii de vibrații cei mai adecvați sînt transducerii accelerometricei piezoelectricei [79], [89], [56].

Accelerometrul 8307 are domeniul de frecvență pînă la 25... ..30 kHz domeniul de accelerație pînă la 10.000 g $\approx 100.000 \text{ m/s}^2$ iar frecvența de rezonanță 75 kHz. Sensibilitate transversală sub 5%. Se fixează de obiectul vibrant cu adeziv cianocrilat și cu oeară de albine pentru protenții mai puțin severe.

Etalonarea accelerometrului 8307 s-a realizat cu ajutorul calibratului CPA tip 4292 care are încorporat un generator de vibrație electrodinamic cu frecvența de 79,6 Hz ceea ce corespunde la $\omega = 500 \text{ rad/s}$ la un nivel de accelerație egal cu $1g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Semnalul de ieșire al transducerului accelerometric T_a , tensiunea electrică, este aplicat la un preamplificator CPA care îl va converti în semnal de impedanță foarte redusă utilizabilă pentru conectarea la aparatele de măsură, amplificatorul de măsură AM și analizorul heterodină AM prevăzute cu o impedanță de intrare relativ redusă. Conectarea directă a unei sarcini la ieșirea T_a chiar de impedanță ridicată, ar reduce considerabil sensibilitatea accelerometrului și caracteristica sa de frecvență (accelerometrul are impedanță mare).

Preamplificatorul CPA împreună cu cablurile speciale de legătură au rol de convertor de impedanță. Filtrele electrice de bandă de frecvență sînt încorporate în amplificatorul de măsură AM și în analizorul heterodină AM. Analizorul heterodină AM, tip MK - 2010 are filtre cu lățimi de bandă constantă de 3, 10, 30, 100 și 1000 Hz care nu variază cu frecvența centrală pe care sînt acordate. Analizorul heterodină, în afară de funcția de filtre cu lățime de bandă constantă, îndeplinește și rolul de amplificator selectiv și de oscilator de bită. Caracteristica de frecvență este de la 2 Hz pînă la 200 kHz în trei benzi: 2 Hz - 2 kHz; 20 Hz - 20 kHz și 200 Hz - 200 kHz, care pot fi reglate continuu în fiecare bandă.

Frecvențele de rezonanță și unele armonii superioare măsurate la blocurile ultrasonice sînt redată în tab.6.1.

Pentru blocurile ultrasonice cu transductoare din ferită s-au determinat și factorii de calitate mecanică pe baza caracteristicii

Tabelul 6.1

Bloc ultra- sonic	Frecvența fundamen. f_r kHz	Armonici superioare (moduri de oscilație) f kHz				
		1	2	3	4	5
TSM-N1	24,610	-	-	-	-	-
BU-1	20,888	41,97	62,96	83,93	104,89	125,89
BU-2	21,280	42,60	63,90	85,20	106,51	127,80
BU-3	21,240	42,50	63,73	84,95	106,20	127,42

de frecvență. Semnalul de tensiune indicat de voltmetrul digital VDA a fost proporțional cu amplitudinea de deplasare.

Fig. 6.9

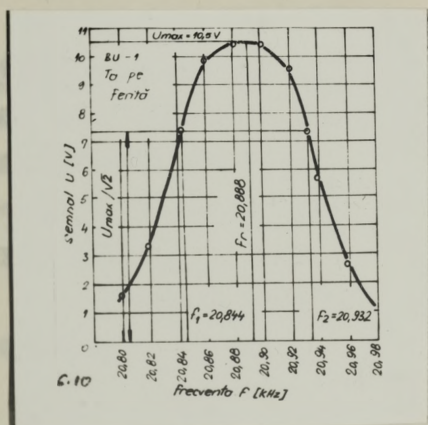


Fig. 6.10

În jurul frecvenței de rezonanță fundamentale s-a ales frecvența obținându-se curba din fig. 6.10. Pe principiul metodei prezentate schematic în fig. 6.8, s-au determinat factorii de calitate mecanică la mersul în gol (fără prelucrare)

Pentru BU-1 aplicând relația (6.17) se obține:

$$Q = \frac{f_r}{f_1 - f_2} = \frac{20,888}{20,932 - 20,844} = 237,36$$

Pentru BU-2:

$$Q = \frac{f_r}{f_1 - f_2} = \frac{21,272}{21,325 - 21,222} = 217,06$$

Pentru BU-3:

$$Q = \frac{f_r}{f_1 - f_2} = \frac{21,24}{21,294 - 21,205} = 225,96$$

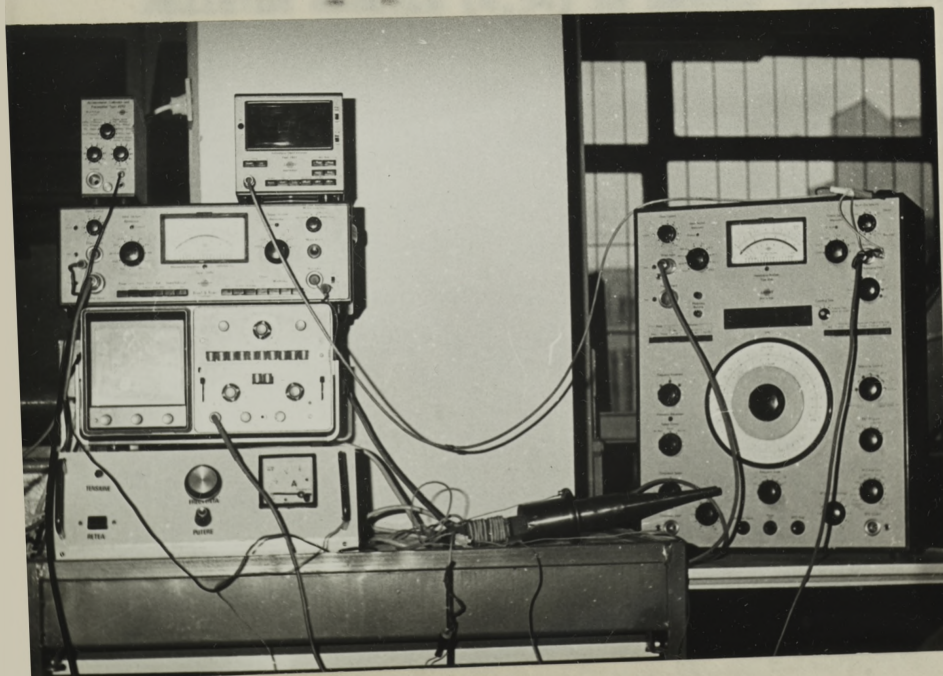


Fig. 6.11

Vederea de ansamblu a standului experimental pentru măsurările acustice ale blocurilor ultrasonice este redată în fig. 6.11.

Schema de amplasare a transductorului accelerometric și de variație a amplitudinii de

concentrator, se obține:

$$\begin{cases} \xi = \xi_2 \cos 25,76x & \text{pentru } x \leq l/2 = 0,06 \text{ m,} \\ \xi = \xi_2 [29 \sin 25,76(x-0,06) - 0,0252 \cos 25,76(x-0,06)] & \text{pentru } x \geq 0,06 \text{ m} \end{cases}$$

Pentru blocul ultrasonic BU-1 fără coloană intermediară având C.U. COMIC lipit direct pe ferită, are frecvența de rezonanță $f_r = 20,90$ kHz. Concentratorul este din oțel DAC 45 prevăzut cu flanșă în nodul de oscilație. Determinările se fac similar ca mai sus și se obține: $k = 29,35 \text{ m}^{-1}$; $\xi = 0,146 \text{ m}$, $N = 5,7$; $\alpha = 5,647 \text{ m}^{-1}$, $M = 2,88$

$$\xi = \xi_2 \frac{1}{1 - 5,6x} (\cos 25,35x - 0,22 \sin 25,35x)$$

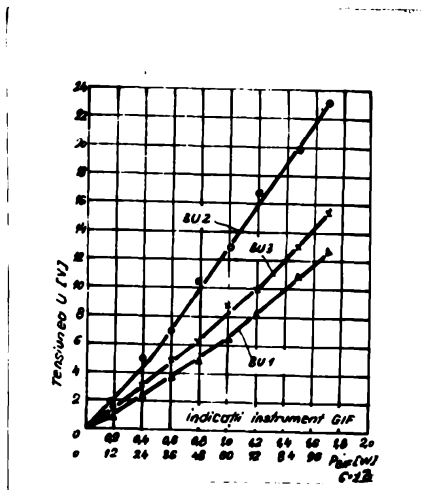


Fig. 6.13.

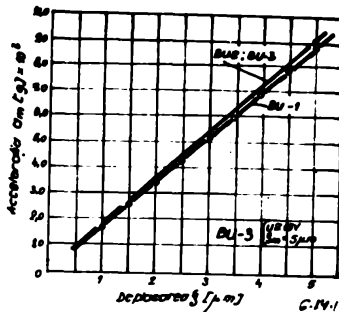


Fig. 6.14

Cu ajutorul curbelor de etalonare din fig. 6.13, care dau legătura între indicațiile instrumentului indicator de pe panoul generatorului tranzistorizat GIP și tensiunea semnalului indicat de voltmetrul digital VDM (fig. 6.9), semnal proporțional cu amplitudinea accelerației, conform etalonării pentru fiecare bloc ultrasonic: s-au verificat modurile de oscilație ale sistemelor oscilatoare. Trecură de la amplitudinea accelerației la amplitudinea deplasării se face în diagrame din fig. 6.14. Se face observația că curbele din fig. 6.13 și fig. 6.14 sînt valabile doar în zona frecvenței de rezonanță și pentru un anumit acord, oft mai apropiat de cel optim dintre generator și blocul ultrasonic.

Variația amplitudinii (de oscilație) deplasării măsurată experimental pentru blocul ultrasonic BU-3 cu diferiți concentratori, este redată în fig. 6.15, 6.16, 6.17 iar pentru BU-1 în fig. 6.18.

S-a trecut și forma teoretică a curbelor amplitudinilor deplasării, calculată cu relațiile date mai sus, pentru diferite amplitudini ale accelerației respectiv a deplasării ξ_2 , amplitudini ale accelerației reglate la amplificatorul de măsurare AM (fig. 6.9).

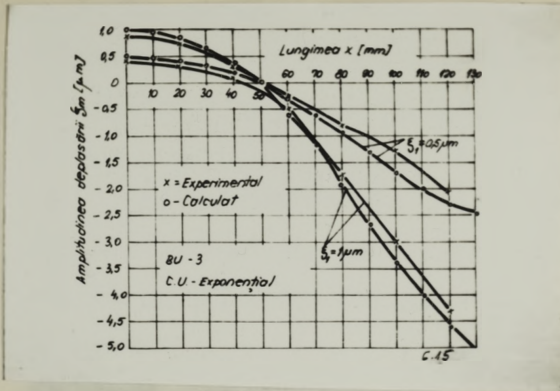


Fig. 6.15

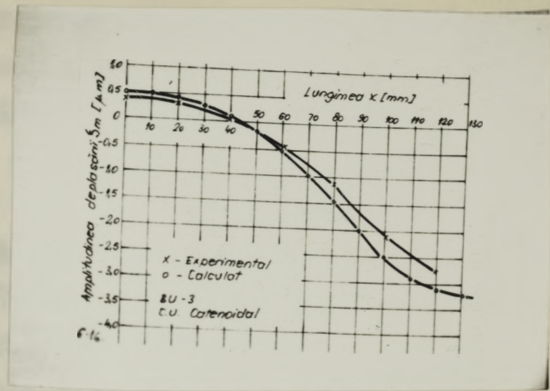


Fig. 6.16

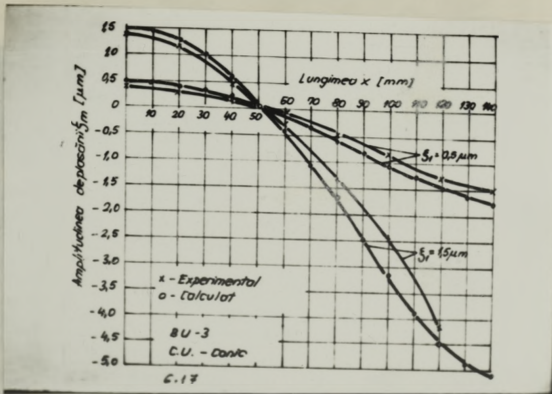


Fig. 6.17

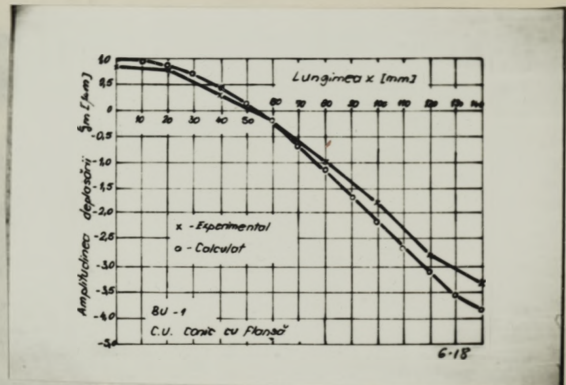


Fig. 6.18

S-a căutat ca la virful concentratorului, accelera iile produse să sa iasă din domeniul dinamic admis al traductorului accelerometric (a_max = 10.000 g pentru BK-8307). Se observă că modurile de vibrație ale amplitudinii oscilației în lungul sistemului oscilator, respectiv   aproximativ calculele teoretice.

Observa ii critice

Diferen ele între valorile măsurate  i cele calculate sînt în medie 14...17%. Acestea se datorează:

- ipotezelor simplificatoare admise în deducerea rela iilor de calcul;
- viteze de propagare a undelor longitudinale diferite de cele acceptate în calcule, determinate din modulul de elasticitate longitudinal E (Young)  i densitatea materialului respectiv;
- gradul de execuție îngrijită a elementelor componente ale capului acustic;
- calitatea lipirilor  i asamblărilor mecanice ferme, contact metalic bun, la asamblare;
- omogenitatea materialelor  i lipsa defectelor interioare;
- fixarea traductorului accelerometric c t mai rigid de concentrator cu ajutorul piesei biconcave cu suprafețe conjugate cu accelerometrul  i concentratorul prin intermediul adezivului acrilic.

La experimentări nu s-a făcut corecția între unghiul de înclinare între generatoarea înclinată a concentratorului și axa longitudinală a lui (prin $\cos \alpha$) deși unghiul de înclinare nu depășește 10° .

Amplitudini ale deplasării peste $5,2 \mu\text{m}$ ($a_m = 9.250 \text{ g}$) nu s-au măsurat pentru a nu atinge limita maximă a accelerației permise de accelerometrul BK 8307 ($a_{\text{max}} = 10.000 \text{ g}$). Forma oscilațiilor nefiltrate și filtrate la vibrația blocului BU-1, fotografiate pe ecranul osciloscopului pentru $f_1 = 1 \mu\text{s}$ sînt date în fig. 6.19 și respectiv 6.20.

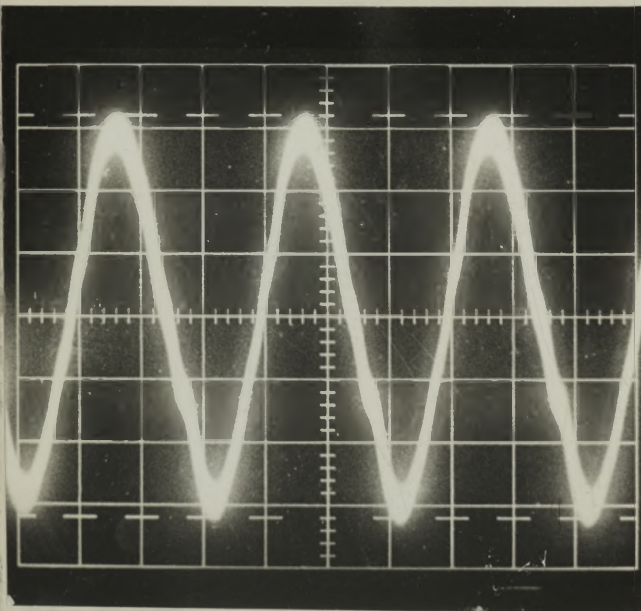


Fig. 6.19

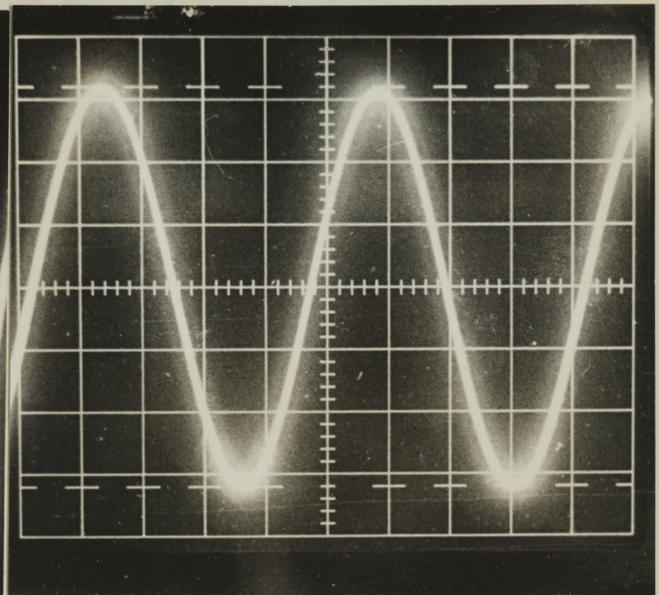


Fig. 6.20

6.3. Cercetări experimentale privind realizarea concentratoarelor ultrasonice

Prelucrările mecanice ale concentratoarelor s-au efectuat pe strungurile cu comandă numerică cu bandă perforată SNC 323: SF 260 HCC cft și cu dispozitivul de strungit conic (rigla de copiat) după șablon pe strungurile normale SN 400 și SNA 500. Deși fiind dificilitatea de prelucrare prin așchiere a concentratoarelor exponențiale și catenoidale, cft și a celor compuse pe strungurile clasice, cel mai rațional din punct de vedere al preciziei dimensionale și a calității suprafețelor generate este prelucrarea lor pe strungurile cu comandă numerică [178.c]

Semifabricatul a fost sub formă de bare din oțel OLC 45 cărora li s-au aplicat un tratament termic de îmbunătățire la duritatea de HRC = 30 ± 35 . Principalele operații și faze de prelucrare

au fost: debitarea, strunjire frontală I, burghiere, tarodare, centrare I, strunjire frontală II, centrare II, strunjire treaca exterior $\varnothing 32 \times 25$, strunjire profilată exterioară degroșare și finisare pe CNC - 325, cu bandă perforată (80 fraze) (pentru concentrator exponențial cu $D_1 = 40$ mm; $D_2 = 10$ mm; $l = 146$ mm regimul de așchiere a fost $t = 3$ mm; $s = 0,6$ mm/rot; $v = 90$ m/min; $n = 710$ rot/min; $i = 5$ treceri), strunjire profilată exterioară de finisare ($t = 0,22$ mm; $s = 0,3$ mm/rot; $v = 112$ m/min; $n = 1400$ rot/min; $i = 2$), strunjire treaca pentru filetare $\varnothing 30$ mm; degajare plus țesire, filetare M30x1, control CTC.

Schema generală de elaborare a programului pentru comanda numerică este redată în fig.6.21, iar schița așchierii în fig.6.22.

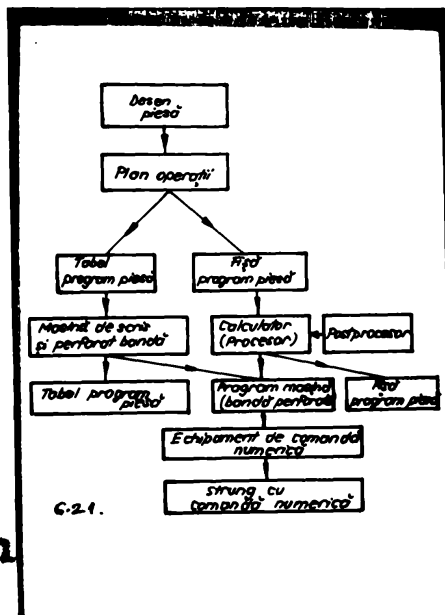


Fig.6.21

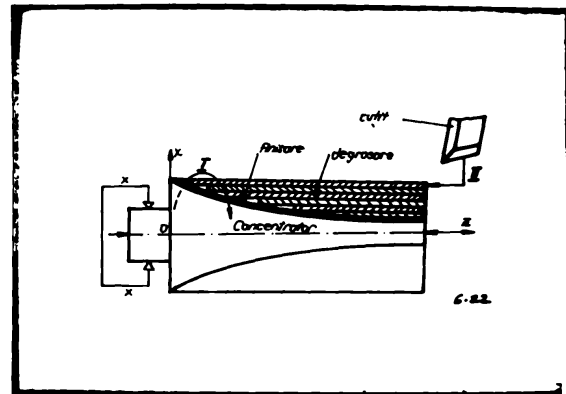


Fig.6.22

Exemple de programe pentru un concentrator exponențial cu unul catenoidal se prezintă în fig.6.23.

PROGRAM C.U.
EXPONENTIAL

PROGRAM C.U.
CATENOIDAL

BOOK
N1 T2
N2 G4 Z1000
N3 G95 G64
N4 G0 Z600000 Z600000 S1 N4
N5 G92 Z439800 Z420200
N6 S5
N7 G0 Z11000 Z150000 G94 D7
N8 G1 Z137000 F250
N9 X16000 Z96500
N10 Z21000 Z68500
N11 Z26000 Z46500
N12 X31000 Z28500
N13 X36000 Z13500
N14 Z41000 Z0
N15 G0 Z150000
N16 X10000 S7
N17 G1 Z136250 F150
N18 X11000 Z126893
N19 X12000 Z118331
N20 X13000 Z110404
N21 X14000 Z103180
N22 X15000 Z96399
N23 X16000 Z90056
N24 X17000 Z84098
N25 X18000 Z78480
N26 X19000 Z73266
N27 X20000 Z68125
N28 X21000 Z63350
N29 X22000 Z58758
N30 X23000 Z54389
N31 X24000 Z50206
N32 X25000 Z46194
N33 X26000 Z42339
N34 X27000 Z38630
N35 X28000 Z35055
N36 X29000 Z31606
N37 X30000 Z28276
N38 X31000 Z25052
N39 X32000 Z21931
N40 X33000 Z18907
N41 X34000 Z15973
N42 X35000 Z13124
N43 X36000 Z10355
N44 X37000 Z7662
N45 X38000 Z5041
N46 X39000 Z2488
N47 X40000 Z0
N48 G0 Z150000
N49 Z439800 Z420200 D0 G53
N50 G92 Z600000 Z600000
N51 N5 N30

BOOK
N1 T2
N2 G4 Z1000
N3 G95 G64
N4 G0 Z600000 Z600000 S1 N4
N5 G92 Z439800 Z420200
N6 S5
N7 G0 X10000 Z105000 G94 D7
N8 G1 Z88000 F250
N9 X16000 Z47000
N10 Z21000 Z32000
N11 Z26000 Z21200
N12 X31000 Z15000
N13 X36000 Z5000
N14 X41000 Z0
N15 G0 Z105000
N16 X10000 S7
N17 G1 Z88000 F150
N18 X11000 Z89083
N19 X12000 Z81458
N20 X13000 Z75740
N21 X14000 Z70224
N22 X15000 Z64958
N23 X16000 Z60350
N24 X17000 Z56097
N25 X18000 Z52126
N26 X19000 Z34384
N27 X20000 Z31835
N28 X21000 Z29451
N29 X22000 Z27210
N30 X23000 Z25093
N31 X24000 Z23087
N32 X25000 Z21180
N33 X26000 Z19362
N34 X27000 Z17674
N35 X28000 Z15959
N36 X29000 Z14361
N37 X30000 Z12824
N38 X31000 Z11343
N39 X32000 Z9915
N40 X33000 Z8536
N41 X34000 Z7202
N42 X35000 Z5910
N43 X36000 Z4658
N44 X37000 Z3443
N45 X38000 Z2263
N46 X39000 Z1116
N47 X40000 Z0
N48 G0 Z105000
N49 Z439800 Z420200 D0 G53
N50 G92 Z600000 Z600000
N51 N5 N30

Fig. 6.23.

CAPITOLUL 7

CONDITII EXPERIMENTALE DE PRELUCRARE DIMENSIONALA PRIN EROZIUNE ULTRASONICA A UNOR MATERIALE FRAGILE SI DURE

7.1. Prezentarea utilajelor si a conditiilor in care s-au fcut experimentele

Cercetările experimentale de prelucrare prin eroziune ultrasonice s-au efectuat pe două mașini de prelucrat cu ultrasunete, prima fiind un model experimental realizat la Facultatea de Mecanică Timișoara, catedra TCM, existentă în laboratorul de ultrasunete, iar a doua un prototip conceput în 1987 WPU-01 la Electrotimș - Timișoara. Caracteristicile în detaliu ale modelului experimental sînt redată în [97] și [211] iar cercetarea blocurilor ultrasonice realizate în acest laborator în [211 a.] și altele.

Blocul ultrasonic cu transducer magnetostriktiv din table de nichel a fost alimentat de generatorul cu lampi al mașinii, care lucrează în gama de frecvențe $f = 19...107$ kHz, întreaga gamă cuprinzînd trei intervale de frecvențe 19...33; 29...53,5 și 54,5...107 kHz. Puterea de ieșire a generatorului, cînd impedanța de sarcină este acordată cu generatorul, este 1500 W putere electrică activă pe o impedanță de ieșire de 10Ω sau 40Ω . Puterea poate fi reglată de la zero la valoarea maximă.

Blocurile ultrasonice cu transduceri din ferită realizate și prezentate de autor în teză au fost alimentate de la un generator transistorizat cu puterea de 100 W, avînd gama de frecvențe variabilă $f = 16...35$ kHz, de asemenea și puterea poate fi reglată continuu. În același timp s-au fcut experimentări și cu generatoare transistorizate de putere mai mare 150 W și respectiv 250 W.

- Sistemul de microavans este de tip electroacustic aplicat la masa
subiectului prelucrării pe o cursă de 40 mm, realizat de un motor
sincron care lucrează în regim frânat (ca un arc spiral) asigurând
o forță constantă de apăsare, indiferent de poziția cursii mesei.

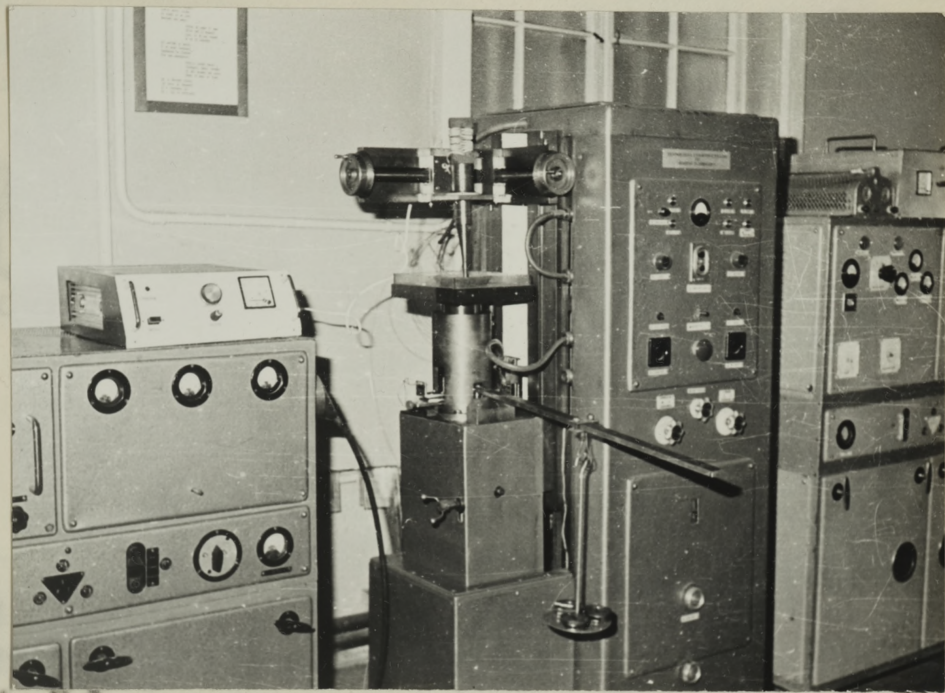


Fig.7.1.

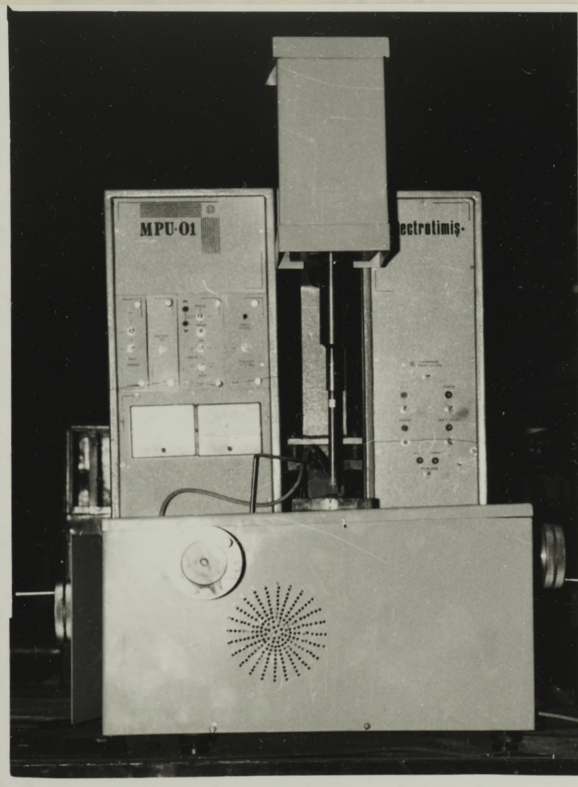


Fig.7.2.

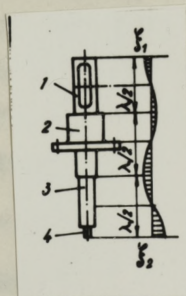


Fig.7.3

Reglajul fin (0,1...
..5N) și grosier (5..
...20N) fiind conti-
nuu.

- Capul acustic (blo-
cul ultrasonic) a fost
făcut din două ferite
magnetostrictive 1
(fig.7.3) lipite pe
concentratorul cilin-
dric în trepte 2, în
care s-au înșurubat obiectele de
transfer 3 în $\lambda/2$ cu partea lor ac-
tivă 4. S-au utilizat două blocuri
ultrasonice, unul cu concentrator
cilindric în $\lambda/2$ și altul în λ .

Ca sistem de avans s-au utilizat
atât sistemul original de avans al
modelului experimental, electroac-
ustic secvențial cu ciclu automat și
cu posibilități de comandă manuală

Accepul acestei a-
daptări a fost, cres-
rea posibilității de
control mai precis
a forței statice
de avans F_a respec-
tiv a presiunii de
contact între obiectul
de transfer OT
(sculă) și obiectul
prelucrării OP (pie-
să).

Schema princi-
pală a sistemului
de avans gravitațio-

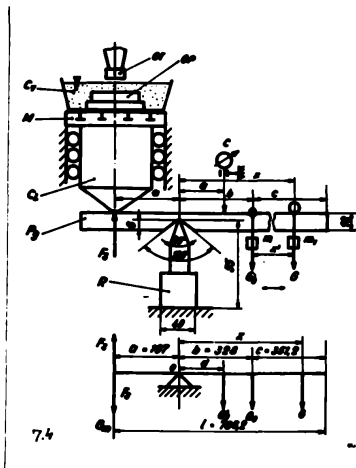


Fig.7.4.

nal este redată în fig.7.4.

Contactul dintre reazorul R și pârghia orizontală P_g , este de tip prismatic, machie de cuțit ca la balanțe, avînd unghiul la reazor de 30° iar la locașul pârghiei 120° .

În schema de solicitare a pârghiei (fig.7.4.b) G_m cuprinde greutatea cilindrului CL, a masei, curvei cu OP și suspensia abrazivă. G_p este greutatea pârghiei. Pentru o anumită greutate a OP, echilibrul semistatic în gol (fără prelucrare) se realizează cu greutatea G_m , care se obține din ecuația de momente:

$$G_m \cdot a - G_p \cdot d - F_c \cdot b = 0$$

în care F_c - forța arcului compensărilor

Momentul static de echilibru este:

$$G_p \cdot b = (G_m + F_c) \cdot a - G_p \cdot d$$

Pe cale experimentală s-a găsit $G_p \cdot b$, măsurînd brațul lui G_p , $b = 120$ mm iar pentru $G_p = (0,428 + 0,151)g = 0,586 \cdot 9,81 = 5,748$ N.

În timpul prelucrării, solicitarea pârghiei se poate considera statică, dat fiind vitezele mici de prelucrare. Forța statică se poate realiza fie prin masele n plasate pe talerul lui G_p , pentru care există relația:

$$F_c = \frac{Mg}{g} n = 30,072 n \quad [N] \text{ și } [kg]$$

fie prin deplasarea unei mase n_1 în lungul barei la distanța x

față de rezan:

$$F_g = \frac{m_1 x g}{a} = 91,682 m_1 x, \text{ N} ; m_1, \text{ kg} ; x, \text{ m} ;$$

$$F_g = 9,1682 \cdot 10^{-3} m_1 x, \text{ N} ; m_1, \text{ g} ; x, \text{ mm} .$$

Prin varierea probuzului $m_1 x$ se pot obține diverse valori ale forței de avans F_g . La experimentări s-a utilizat prima variantă prin plasarea de masă a pe talerul lui G_0 .

$$F_g = 0,03072 m, \text{ N} ; m, \text{ g} , \text{ respectiv } m = 32,57 F_g, \text{ g} ;$$

$F_g, \text{ N}$. Pentru a crea forța statică de $F_g = 1 \text{ N}$, trebuie masă $m = 32,57 \text{ g}$.

Prin plasarea unui diametru etalon între OF și OP și încărcind cu diferite mase a s-a verificat corectitudinea aprecierii forței statice F_g .

Prin aşezarea unui comparator C (fig.7.4.a) la distanța $a = 107^{\text{mm}}$ egală cu cea de la rezan la cilindrul mesei, se poate determina cursa de ridicare pe verticală a OP . De altfel comparatorul poate fi plasat pe masa M sau oricare alt element stabil al sistemului de măsurare. Citind indicațiile la contactul OF și OP înainte de prelucrare și după prelucrare pe suprafața inițială a OP la marginea orificiului sau cavității, curățind suprafețele de suspensia abrazivă,

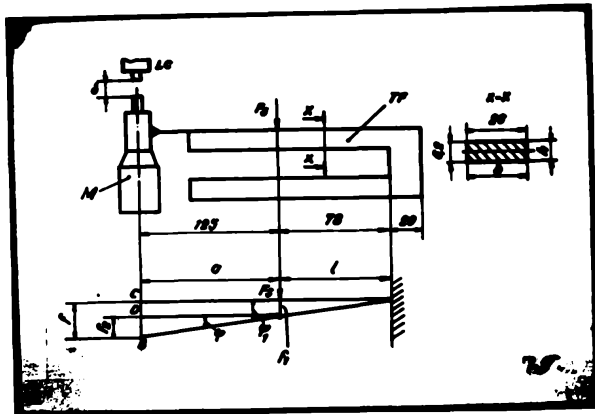


Fig.7.5.

se poate determina uzura longitudinală a OP , care a fost comparată cu măsurările directe ale lungimii OP înainte și după prelucrare.

Anterior utilizării sistemului gravitațional s-a realizat și încercat un traductor dinamometric tip furcă (fig.7.5) solidarizat cu un micrometru cu limitator de cursă care a înlocuit telescopul comparatorului cu fotodiodele originale ale mașinii. În acest fel s-a putut

beneficia de teste economice în ciclul antrenat sau cu comandă manuală a mașinii.

Utilizând schema de calcul din fig.7.5 s-a dedus săgeata în dreptul micrometrului. Pe porțiunea AB a traductorului, momentul încovoiător fiind nul, fibra medie deformată este o linie dreaptă.

Săgeata totală va fi:

$$f = f_1 + f_2 = f_1 + \text{ctg } \varphi = \frac{F l^3}{3EI_2} + \frac{F l^2}{2EI_2} a$$

$$\text{Săgeata în dreptul forței: } f_1 = \frac{F l^3}{3EI_2}$$

Iar unghiul de rotire: $\varphi_2 = \frac{F_2 \cdot l^2}{2EI_2} \cdot \varphi = \varphi_1$

Admițind modulul de elasticitate $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$, cu dimensiunile din figură rezultă momentul de inerție geometric

$$I_2 = bh^3/12 = 5,1638 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4 ; EI_2 = 108,439 \text{ Nm}^2.$$

Făcând calculul se obține: $f = 4,9653 \cdot 10^{-6} F_2$, unde F_2 în N; $f = 4,9653 \cdot 10^{-3} F_2$, mm. O diviziune la tamburul micrometric $1\mu = 1\mu / 0,49653 = 2,0142 = 0,205 \text{ kgf}$. Făcând greutatea cunoscută pe masa saginii și măsurând săgeata la micrometru cu rezultat valori apropiate de cele calculate. Valori mai sensibile însă se pot obține la sistemul gravitațional pentru forța statică F_2 .

7.2 Cercetări privind influența formei concentratoarelor ultrasunice asupra parametrilor tehnologici

Rendamentul transmiterii energiei de vibrație mecanică de la transductor în spațiul de lucru depinde în esență și de forma, materialul și calitatea execuției concentratoarelor ultrasunice [136], [127], [97], [63], [65] și altele.

Variația formei concentratoarelor ultrasunice, după cum s-a arătat la analiza lor teoretică prezentată în exp.4 și 5 ale tezei are ca scop mărirea amplitudinii de oscilație la capătul de lucru a lor la obiectul de transferul din spațiul de lucru tehnologic.

Capacitatea productivă (productivitatea) este direct legată de valoarea amplitudinii de oscilație pe lângă alți factori importanți ca presiunea statică, condițiile de circulație a suspensiei abrazive în spațiul de lucru, frecvența fiind în general constantă și egală cu frecvența de rezonanță mecanică pentru un bloc ultrasonic dat. Forma concentratoarelor ultrasunice constituind și elemente de adaptare a impedanței spațiului de lucru (sarcinii) cu transductorul și respectiv a acestuia, cu generatorul.

S-au testat experimental concentratoarele ultrasunice (C.U.) de formă: conică, exponențială și catenoidală și unele C.U. cilindrice în trepte, de secțiune circulară și a căror raport de reducere a secțiunii transversale $N < 6$. Experimentele făcute în laborator pentru $N > 6$ arată o comportare dificilă, apariția unor oscilații transversale și o instabilitate în timpul lucrului. S-a utilizat blocul ultrasonic BU-3 cu ferită magnetostriktivă F_2 , prezentat în exp.6. Concentratoarele confecționate din oțel GIC-45 înmănușărit de formă conică, exponențială și catenoidală au fost încercate în celelalte intermedie-

ră a vibratorului. Obiecte de transfer din GI 37 de formă cilindrică cu $\phi = 3$ mm, prevăzute cu filet metric M 3 au fost înscrubete la extremitatea acestor concentrateare. Prelucrările s-au făcut pe plăci de sticlă cu grosime de 2 mm cu abraziv carbunil de bor având granulația Nr 10 în concentrație în apă 45 - 50% volumic. Suspensiile abrazive s-au fost dirijată prin strepșire și curgere liberă cît și prin agitare manuală.

Pentru fiecare formă de concentrator s-au efectuat cîte 5 orificii străpunsse cu diametrul de 3 mm. La fiecare probă s-a cronometrat timpul total de perforare. După indicațiile comparatorului la adâncimi de 1...1,5; 2...2,5 și 3...3 mm s-a comandat manual cîte o retragere pentru reumplerea cavității cu abraziv proaspăt uzat, dîndu-se posibilitate de evacuare a produselor de eroziune și abrazivului fîrînit și uzat. Aceasta a fost necesar pentru sistemul de avans gravitațional, care face parte din sistemele de avans mecanice cu acțiune continuă [97], [128], [129] și care nu permite pulsarea forței statice pentru a ușura intrarea abrazivului proaspăt uzat între suprafețele frontale ale GI și GE.

Rezultatele încercărilor experimentale sînt prezentate în tab. 7.1.

Dacă se neglijează ușoarele modificări de frecvență prin diferența de mază a concentratearelor pentru a oscila la rezonanța mecanică (amplitudine de deplasare maximă) atunci diferența de timp medii s-or datoru creșterii amplitudinii de deplasare (oscilație) aproximativ la restul factorilor constanți.

În funcție de timpul de prelucrare pentru C.U. conic ca unitate de referință productivitatea raportată, proporțională cu t_p / t_p^0 , este redată în fig.7.6.

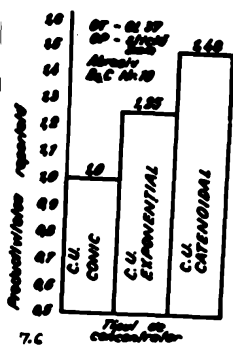


Fig.7.6.

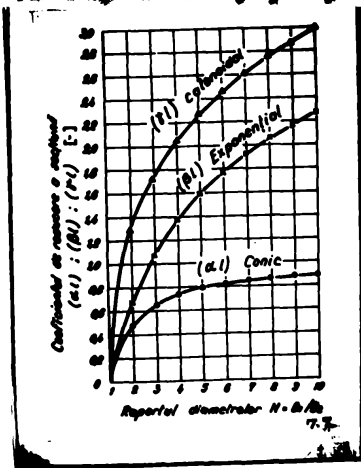


Fig.7.7.

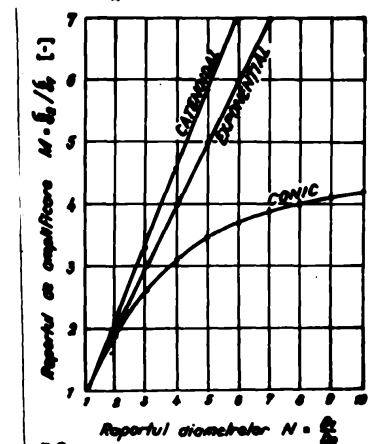


Fig.7.8.

Pentru raportul diametrelor $N = D_1/D_2$ a concentratearelor $K = 3$ Coeficienții adimensionali de reducere a secțiunii transversale sînt cei determinați din fig.7.7 iar rapoartele teoretice de amplificarea a amplitudinii din fig.7.8.

Tabela 7.1

Nr. pro- bei	C.U. COORD			C.U. EXPONENTIAL			C.U. CATEGOIDAL			
	σ_p	σ_p	σ_p	σ_p	σ_p	σ_p	σ_p	σ_p	σ_p	
1.	3,0	2,10	0,95	6,73	1,60	1,19	8,41	1,40	1,43	10,10
2.	3,0	2,00	1,00	7,07	1,70	1,17	8,31	1,41	1,42	10,02
3.	3,0	1,90	1,05	7,44	1,69	1,18	8,36	1,38	1,45	10,24
4.	3,0	2,30	0,87	6,13	1,60	1,25	8,85	1,45	1,38	9,75
5.	3,0	2,15	0,93	6,57	1,65	1,21	8,57	1,40	1,44	10,10
\bar{Y}	2,09	0,957	6,765	1,665	1,201	8,490	1,408	1,422	10,042	
s	0,13	0,068	0,490	0,040	0,031	0,210	0,026	0,025	0,181	
m_1	1,88	0,86	6,08	1,61	1,15	8,19	1,37	1,38	9,79	
m_2	2,29	1,05	7,44	1,72	1,24	8,78	1,44	1,45	10,29	
σ_p/σ_p	1,0	-	-	1,25	-	-	1,48	-	-	
m_1/σ_p	1,0	-	-	5,0	-	-	5,89	-	-	
m_2/σ_p	1,0	-	-	1,428	-	-	1,671	-	-	
s	0	-	-	14,24	-	-	12,9	-	-	

Diferențele procentuale între rezultatele experimentale și cele calculate teoretic sînt de 14,24% la concentratorul exponențial și de 12,9% la cel catenoidal, după ce în prealabil au fost eliminate de la hîm început unele încercări care s-au abătut cu mult (pînă la 40% și chiar mai mult) față de media datî în tabel. Pentru datele din tabelul 7.1 s-a făcut și o prelucrare statistică a rezultatelor determinîndu-se intervalele de încredere [m_1 , m_2] care garantează cu o probabilitate de 95% valorile parametrilor estimați.

Deși legitatea de mîrire a productivității, respectiv de micșorare a timpului de prelucrare, cu mîrirea amplitudinii se respectă, diferențele sensibile care apar se datoresc ipotezelor simplificatoare introduse în relațiile de calcul, reduse în cap.4 și 5 al tezei, precum și rolul deosebit de important pe care îl are presiunea statică dintre OT și OP și în special condițiile optime de circulație a suspensiei abrazive în spațiul de lucru, așa cum au realizat corect și alți cercetători [97], [260], [126], [155 a.]

Dezavantajul blocurilor ultrasunecice cu colează intermediară, cu concentratoare schiabile prin înșurubare și a obiectelor de transfer de asemenea schiabile, îl reprezintă întreruperea continuității și omogenității căii de propagare a undelor elastice, fiind cauzele la reflexii și pierderi locale. Așa se explică amplitudinile relativ mici obținute cu feritele σ_2 fabricate în țară (așa cum s-a văzut în cap.6) și respectiv productivități mici.

Avantajul acestora constă în gradul mai mare de a studia dife-

rite forme de concentratoare și diferite scule. Prin aceste construcții experimentale de laborator autorul tezei a urmărit studiul experimental comparativ al concentratoarelor de diferite forme în ceea ce privește legea de reducere a secțiunii transversale având aceleași dimensiuni de intrare și ieșire și lungime diferită încât să fie acordate pe aceeași frecvență de rezonanță, respectiv într-o zonă cât mai restrânsă. Decisur că se puteau realiza cîte trei sisteme oscilatorii avînd feritele selectate cu caracteristici cît mai apropiate de care să se lipescă direct cîte un concentrator de formă diferită, așa cum s-a realizat de exemplu BU-1 avînd ferită F_2 și C.U. conic. Transmiterea undelor acustice prin acesta este mult mai bună. Numai un contact metalic foarte bun, prin strîngerea ferii a pieselor anaxiale poate duce la creșterea randamentului energetic al blocurilor ultrasonice din elemente mobile. De lîngă aceasta mai este necesar ca și impedanțele acustice de undă a pieselor componente să fie cît mai apropiate ($\rho_1 c_1 = \rho_2 c_2 = \dots = \rho_n c_n$).

7.3. Determinarea experimentală a unor ferite statice de avans optime

7.3.1. Cercetarea forțelor statice de avans la prelucrarea cavităților nestrupuse de secțiune dreptunghiulară

Seria următoare de experiențe a fost prelucrarea unor cavități infundate în sticla de sodiu și sticlă optică de formă dreptunghiulară (fig.7.9) cu scule prismatice avînd secțiunea dreptunghiulară $a \times b = 15 \text{ mm}, b = 3 \text{ mm}$. Alegerea acestor dimensiuni s-a făcut cu scopul

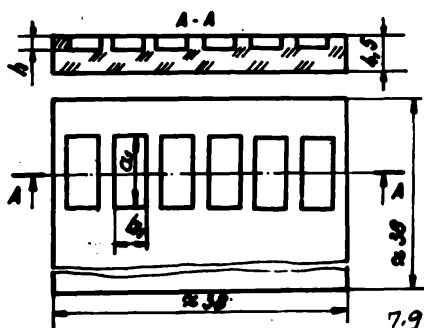


Fig.7.9.

sa ulterior să se poată măsura rugozitatea suprafețelor generate, în special pe fundul cavității, cu ajutorul palpatoarelor de care dispune profilograful - profilometrul Tip 252 (Kalier)

Utilizînd obiecte de transfer din OL 37 suspensie abrazivă B_2C Nr 10 concentrație 50% volumetric, alimentat prin stropire și agitare. În cadrul laboratorului de ultrasunete al Facultății de Mecanică Timișoara există un bloc ultrasonic cu ferită FKK_{65}

fabricație japoneză lipită pe un concentrator conic [97], de foarte bună calitate, constituind un etalon pentru blocurile ultrasonice cu ferite magnetostriective. Această ferită a fost notată cu F_1 în prezenta textă ale cărei caracteristici dimensionale au fost prezentate în cap.

Rezultatele încercărilor experimentale sînt redată centralizat în tabelele 7.2, 7.3, 7.4 și 7.5. La timpul de prelucrare $t_p = 1, 2, \dots, 6$ minute, la forța statică constantă pe aceeași piesă.

Cele șase cavități de pe aceeași piesă diferă doar prin durata de prelucrare și deci prin adfîncimea de pătrundere a OT în OT.

OT 15.3 mm: $F_s = 10,5$ N; $p_s = 2,6$ daN/cm² Tabelul 7.2

Mări- uri	UM	Piesa 1 Proba Nr1					
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
t_p	min	1	2	3	4	5	6
h	mm	1,32	2,06	2,22	2,46	2,95	4,06
m_1	g	15,007	15,747	14,985	14,908	14,401	14,033
m_2	g	15,742	15,985	14,708	14,401	14,033	13,526
Δm	g	0,165	0,297	0,277	0,307	0,368	0,507
v_p	mm/min	1,32	1,03	0,748	0,615	0,590	0,676
Q_v	mm ³ /min	68,60	53,58	38,49	31,99	50,69	35,20

OT 15.3 mm: $F_s = 6,7$ N; $p_s = 1,68$ daN/cm² Tabelul 7.3

Mări- uri	UM	Piesa 2 Proba Nr1					
		2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6
t_p	min	1	2	3	4	5	6
h	mm	0,95	2,05	2,56	3,10	3,30	3,95
m_1	g	15,920	15,310	15,554	15,233	14,848	14,436
m_2	g	15,810	15,554	15,235	14,848	14,436	13,945
Δm	g	0,118	0,236	0,519	0,387	0,412	0,493
v_p	mm/min	0,95	1,025	0,850	0,775	0,660	0,658
Q_v	mm ³ /min	49,419	53,320	44,390	40,315	34,330	34,240

OT 15.3 mm: $F_s = 13,38$ N; $p_s = 3,35$ daN/cm² Tabelul 7.4.

Mări- uri	UM	Piesa 3 Proba Nr1					
		3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6
t_p	min	1	2	3	4	5	6
h	mm	1,90	2,15	3,22	3,45	3,60	-
m_1	g	15,821	15,984	15,316	14,914	14,483	-
m_2	g	15,984	15,316	14,914	14,483	14,034	-
Δm	g	0,237	0,268	0,402	0,431	0,449	-
v_p	mm/min	1,900	1,075	1,073	0,862	0,720	-
Q_v	mm ³ /min	98,84	55,97	55,83	44,87	37,45	-

OT 15.3 mm $F_g = 17,14$ N $p_g = 4,28$ daN/cm²

Tabela 7.3

Mări-	mm	Piesa 4 Proba Nr1					
		4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6
t_p	min	1	2	3	4	5	6
h	mm	1,27	2,37	2,40	2,45	2,50	2,51
m_1	g	15,850	15,692	15,396	15,097	14,791	14,479
m_2	g	15,692	15,396	15,097	14,791	14,479	14,166
Δm	g	0,158	0,296	0,299	0,306	0,312	0,313
v_p	mm/min	1,27	1,185	0,800	0,612	0,500	0,418
Q_p	mm ³ /min	60,065	61,644	41,616	31,862	26,010	27,760

Adâncimea h a cavităților a fost măsurată direct pe piesă cu ajutorul unui comparator de 0,01 mm a cărui palpator a fost înlocuit cu un vîrf conic $\alpha = 11,68^\circ$ și lungimea 22 mm construit special pentru aceste măsurări de adîncime. Masa piesei înainte de prelucrare m_1 și după prelucrarea fiecărei cavități m_2 a fost cîntărită cu ajutorul unei balanțe analitice cu precizia de 1 mg.

Variația adîncinii de prelucrare h a cavităților în funcție de timpul de prelucrare este redată în fig.7.10, iar variația productivității în funcție de timpul de prelucrare în fig.7.11. Ambele figuri au

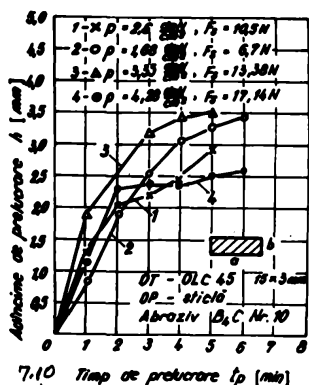


Fig.7.10

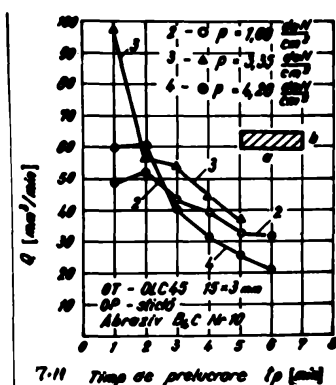


Fig.7.11

ca parametru presiunea statică p_g , respectiv forța statică F_g . Din fig.7.10 se observă că în condițiile experimentale date există o valoare apropiată de presiunea statică optimă, cea corespunzătoare piesei 3 avînd $F_g = 13,38$ N respectiv $p_g = 3,55$ daN/cm².

Pe de altă parte, se observă că la începutul prelucrării,

deci la adîncimi mici, este preferabil să avem presiuni statice mai mari iar la adîncimi mai mari (de exemplu peste 2 mm) sînt mai convenabile presiunile mai mici (vezi curba 4 din fig.7.10).

Acesta are o legătură directă cu posibilitatea înlocuirii suspensiei abrazive în interstițiul frontal dintre OT și OP, dat fiind condiții mai grele de circulație a suspensiei abrazive odată cu creșterea adîncinii de prelucrare.

Dacă presiunea statică este prea mică, (curba 2, respectiv 1) la aceeași amplitudine de oscilație, respectiv putere aplicată de la generator (aprox. 125 W), nu circulația suspensiei abrazive în spațiul de lucru dăte cauza micșorării prozării ei în acest caz scade forța si-

mezii transmisii direct granulelor abrazive, conforma celor explicate in cap.2 scăzând adâncimea de penetrare în stratul de suprafață al piesei [126], [97], [109], [260], [139]. La presiuni statice prea mari, este posibil să apară un efect de frinare, amortizare a oscilațiilor, micșorându-se amplitudinea oscilațiilor, acestou depinzând de fiecare sistem acustic în parte.

Capacitatea productivă a procesului v_p (fig.7.11) scade odată cu creșterea timpului de prelucrare, respectiv a adâncinii de prelucrare, în cazul sistemului analizat. Dacă s-ar lucra cu aspirația suspensiei abrazive, sau cu refularea acesteia, desigur că altele ar fi rezultatele. Un sistem ideal de avans ar fi acela la care efectul de piston, de șoc dinamic, (impuls) ar rămâne constant pe toată adâncimea de prelucrare, iar viteza de înlocuire a abrazivului uzat și a produselor de eroziune ar fi egală cu viteza de reîmprespătare, de introducere a abrazivului proaspăt neuzat. Fenomenul este extrem de complex, existind mulți factori care intervin la prelucrare și o interdependență reciprocă a acestora.

7.3.2. Creșterea forței statice de avans la prelucrarea orificiilor străpunse de secțiune circulară

Urmițarea serie de experiențe s-a realizat cu obiecte de transfer cilindrice de diferite diametre $d = 3,4,5, 6, 7$ mm în plăci de oțel de acid cu grosimea de 6 mm efectuându-se orificii străpunse la diferite forțe statice de avans. Suspensia abrazivă a fost tot carbura de ber B_4C Nr 10 în apă în concentrația de 50% volumetric, alimentată în spațiul de lucru prin strepșire și agitare.

S-a utilizat același bloc ultrasonic BU-F₁, cu ferită magnetostrictivă F₁ lipită direct pe concentrator ultrasonic oalic.

Rezultatele experimentale obținute se dau în tabelele 7.6 și 7.7.

În tab.7.6. s-a notat cu m [g] masa necesară creerii unei anumite forțe statice dorite F_s [N], conform schemei din fig.7.4. Forțele statice au fost reglate în intervalul $F_s = 2 \dots 15$ N, în funcție de diametrul obiectului de transfer. Pentru fiecare probă s-a făcut o prelucrare străpunasă (perforare), pentru același obiect de transfer și probă menținându-se constantă forța statică de avans F_s . Perioadic s-au făcut retrageri ale masei cu obiectul prelucrării pentru reumplerea cavității cu abraziv proaspăt, considerat normal în funcție de adâncime, după indicațiile comparatorului atunci când viteza de prelucrare a materialului scadea. Durata medie a unei retrageri pentru reumplere a fost de cinci sec.

Perforare OP sticla Nr 6 mm, OT cilindric

BU-1 B₄C Nr.10

Tabelul 7.6

Mărire	UM	d = 3 mm Piese 6 Proba Nr:					
		6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6
F _s	N	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
n	g	65,0	97	130	163	195	228
t _p	min	7,30	5,80	5,60	5,0	5,80	6,60
Mărire	UM	d = 4 mm Piese 7 Proba Nr:					
		7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6
t _p	min	7,0	6,5	6,1	6,3	6,9	7,4
F _s	N	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
n	g	65,0	97	130	163	195	228
Mărire	UM	d = 5 mm Piese 8 Proba Nr:					
		8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6
F _s	N	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
n	g	195	228	260	293	326	358
t _p	min	7,9	7,3	7,1	7,25	7,9	8,4
Mărire	UM	d = 6 mm Piese 10 Proba Nr:					
		10.1	10.2	10.3	10.4	10.5	10.6
F _s	N	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0
n	g	326	358	390	423	456	489
t _p	min	9,10	8,80	8,40	8,80	9,10	9,20
Mărire	UM	d = 7 mm Piese 11 Proba Nr:					
		11.1	11.2	11.3	11.4	11.5	11.6
F _s	N	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0
n	g	326	358	390	423	456	489
t _p	min	11,9	11,85	11,4	11,1	11,3	12,0

OT cilindric, GL 37: OP sticla Nr. 6 mm, B₄C Nr.10 Tabelul 7.7.

Mărire	UM	Diametrii OT, 6 mm				
		3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
V _{OT}	mm ²	7,07	12,56	19,63	28,27	38,48
t _{pain}	min	5,0	6,1	7,1	8,4	11,1
F _{s opt}	N	5,0	4,0	6,0	12,0	13,0
p _{s opt}	daN/cm ²	7,07	5,18	4,075	4,24	3,38
n	mm	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
v _p	mm/min	1,20	0,98	0,845	0,71	0,54
Q _{med}	mm ³ /min	8,48	12,35	14,99	20,19	20,80

Variația timpului de prelucrare pentru găuriri totale în funcție de diferite forțe statice de avans este redată în fig. 7.12 și 7.13.

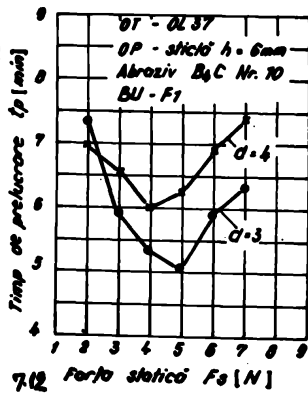


Fig. 7.12

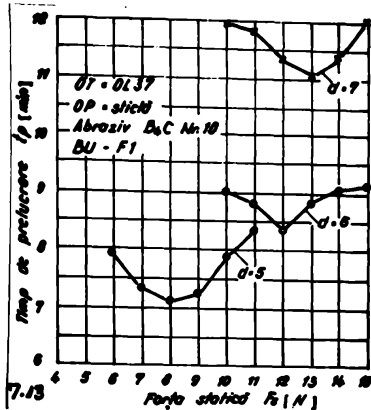


Fig. 7.13

Din aceste figuri se observă că toate curbele (cuze sub forma de centur poligonal prin unirea succesivă a punctelor experimentale) arată că dependențele au un caracter extremal, în sensul că prezintă un minim. Deci există pentru fiecare dimensiune a obiectului de tratat o valoare a forței sta-

tice de avans optimă pentru care prelevarea de material este maximă. În tab. 7.5 s-au calculat valorile presiunilor statice optime p_{sept} , viteza medie de prelucrare v_p și productivitatea volumică medie Q_v pentru timpii de prelucrare minimi obținuți experimental din tab. 7.6 și fig. 7.12 și 7.13. Dependența grafică a productivității volumice Q_v și ale vitezei de prelucrare v_p , ca valori medii, în funcție de diametrul obiectului de transfer, în condițiile unor forțe F_{sept} respectiv presiunii statice optime p_{sept} sînt redată în fig. 7.14. Din această

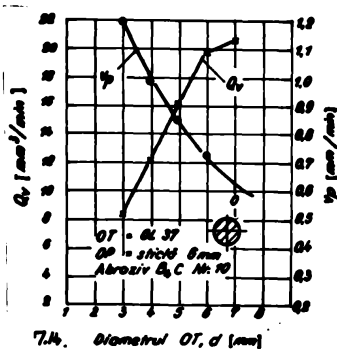


Fig. 7.14

figură se observă că, atunci cînd se asigură condiții bune de evacuare a produselor de eroziune și de înlocuire a abrazivului uzat cu altul proaspăt și valori optime ale forței statice, capabilă să transmită impulsuri mecanice eficiente granulelor abrazive, volumul de material detașat din OT în unitatea de timp crește. Deși (aparent) v_p scade cu diametrul OT, ea este o viteză optimă medie pentru un anumit diametru, respectiv o anumită arie a secțiunii transversale a OT. Urzînd datele din

tab. 7.7 se observă că în condițiile experimentale la diametrul OT mic $d = 3$ mm, presiunea statică optimă este $7,07 \text{ daN/cm}^2$, iar pentru diametrele mai mari $d = 4, 5, 6$ mm, presiunea crește de la $5,18 \dots 4,24 \text{ daN/cm}^2$ la diametre mai mari ($d = 7$ mm), iar este tendința de scădere a presiunii statice optime ($p_{\text{sept}} = 3,38 \text{ daN/cm}^2$).

Astfel tezei desprinde de aici concluzie că, la fiecare prelucrare comartă prin eroziune ultrasonică, este necesar să se precizeze foarte bine condițiile experimentate în care s-au făcut determină-

rile, iar pentru parametri tehnologici ai procesului nu este suficient să se precizeze numai Q_v sau v_p , este bine să se dea împreună. Autorul prezentei teze aduce o critică unor date din literatură de specialitate care foarte vag amintesc niște condiții experimentale incomplete iar uneori acestea nici nu sînt amintite. Precizarea vagă a presiunii statice în spațiul de lucru în literatură de specialitate doar în limitele $p = 0,5 \dots 4 \text{ daN/cm}^2$ trebuie luată doar cu caracter orientativ de informare generală.

La prelucrarea sticlei optice de tip cron K 100 și a sticlei de sodiu pe mașina MPU-01, s-a determinat forța statică optimă la care se obține adîncimea maximă de prelucrare după același timp $t_p = 2 \text{ min}$ (fig.7.15)

Variația adîncinii de prelevare în funcție de timp pentru trei tipuri de sticlă Na, C516641R și K 100 sînt redată în fig.7.16.

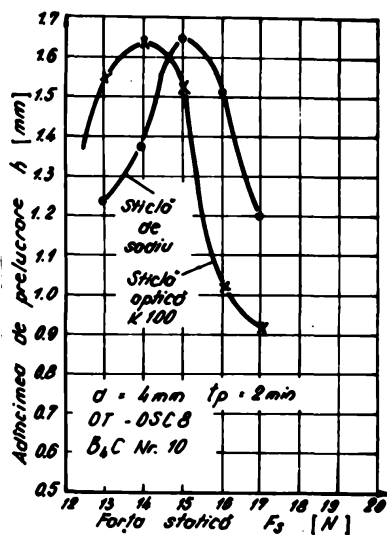


Fig.7.15

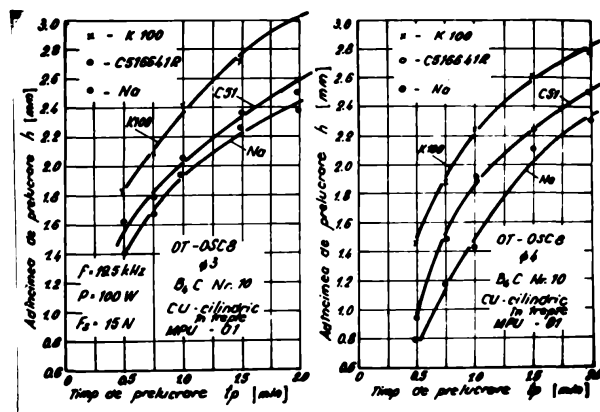


Fig.7.16.

Se observă existența unei prelucrabilități mai bune a sticlei optice K 100 și C516641R decît a sticlei de sodiu. Aceasta se datorează diferențelor de compoziție chimică, tratament termic și duritate, care pot fi caracterizate global prin coeficientul de fragilitate determinat experimental în tab.2.1.

Compoziția chimică a sticlei de sodiu (silico-calco-sodică) a fost 72 % SiO_2 ; 9 % CaO ; 3,5 % MgO ; 13,5 % Na_2O ; 1 % Al_2O_3 .

Sticlele optice de tip cron (C516641R) au compoziția 72 % SiO_2 ; 8 % E_2O_3 ; 2 % CaO ; 10 % K_2O ; 7 % Na_2O ; 1 % ($\text{MgO} + \text{As}_2\text{O}_3$). Indicele de refracție optică $n_D = 1,516$ iar coeficientul de dispersie (numărul lui Abbé): $\nu_D = 64,1$, densitatea $\rho = 2,38 \text{ g/cm}^3$. Sticlele optice K100 și LK 105 au compoziția chimică asemănătoare, pentru K 100: $n_D = 1,521$; $\nu_D = 59,62$; $E = 7700 \text{ daN/mm}^2$; $\rho = 2,63 \text{ g/cm}^3$; $\mu = 0,210$; iar pentru LK 105 (cron ușor): $n_D = 1,478$; $\nu_D = 65,59$; $E = 6980 \text{ daN/mm}^2$; $\rho = 2,27 \text{ g/cm}^3$ coeficientul lui Poisson $\mu = 0,184$. Toate variantele de

sticlă au fost detensionate printr-un tratament termic de recoacere.

S-au efectuat experiențe în aceleași condiții cu cele descrise mai sus cu obiecte de transfer tubulare de secțiune inelară (fig.7.17).

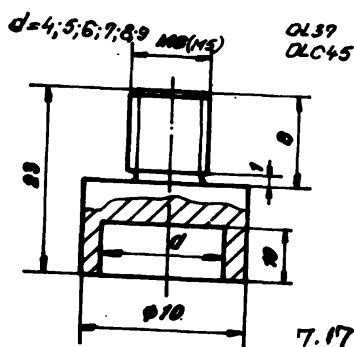


Fig.7.17.

(Fig.7.18) gravitațional) ajunge la concluzia că prelevarea de material a

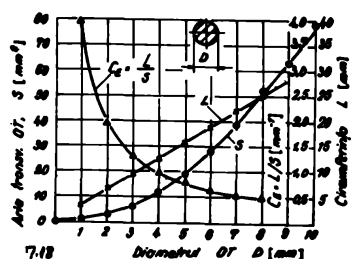


Fig.7.18

Mulți cercetători au studiat influența așă zisului factor de formă sau coeficient de formă a OT asupra condițiilor de prelevare de material la eroziunea ultrasonică. În [2] [128], [97], [260], [198], etc. se definește drept coeficient de formă $c_2 = L/S$ ca fiind perimetrul exterior al OT raportat la aria secțiunii transversale a lui. De exemplu Adithan M. [2] a făcut experiențări pe o mașină DIATRON 400, tipul IC cu putere de 0,9 kw de tip orizontală, la care forța statică a fost variată prin inclinarea șampului

ajunge la concluzia că prelevarea de material a fost mai bună la prelucrarea cu OT cilindrice cu secțiune inelară decât cu secțiune plină obținând după același timp de prelucrare adâncimi mai mari decât cu OT pline. Aceste rezultate au fost verificate și în cadrul laboratorului de ultrasonete de la Facultatea de Mecanică Timișoara [97], [260] și în cercările experimentale ale autorului prezentei teze. Așa cum s-a arătat mai sus, conclu-

sia din [2] poate fi adevărată numai în cazul când la alimentarea prin strepșire și curgere liberă a suspensiei abrazive se fac reumpleri periodice ale cavității pentru reîmprospătarea abrazivului: Mejnev B.I. [198] făcând experiențe de prelucrare a orificiilor pentru aspirație suspensiei abrazive ($D = 8 \text{ mm}$, $d = 6 \text{ mm}$) ($P_{GIF} = 1 \text{ kw}$, $f = 22,6 \text{ kHz}$) și și alte experiențe făcute cu refularea suspensiei [198], [126], [128] au dus la mășiri ale productivității.

Din experiențele efectuate și prezentate mai sus rezultă că odată cu creșterea coeficientului de formă exterior se îmbunătățesc condițiile de înlocuire ale suspensiei abrazive și prelevarea de material crește. Autorul tezei a făcut un studiu teoretic al variației acestor coeficienți pentru OT cu secțiune circulară plină (fig.7.18) dreptunghiulară (fig.7.19) și inelară (fig.7.20) în gama dimensiunilor experimentate. Pentru OT circulare s-a introdus și un coeficient de formă interior $c_1 = L/s$ ca fiind circumferința interioară raportată la aria secțiunii transversale a OT, în ipoteza că la reumplerea interioară este prinsă o anumită cantitate de abraziv proaspăt și în

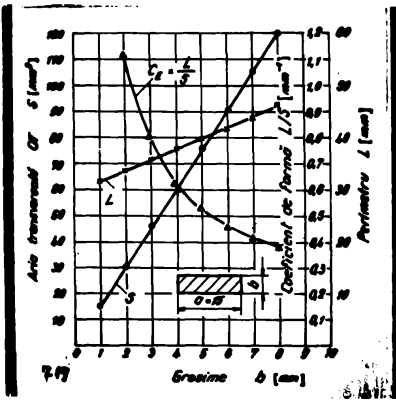


Fig. 7.19

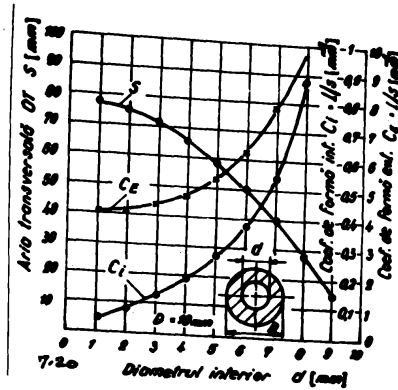


Fig. 7.20

tru cele trei forme de OT (fig. 2.21), (fig. 7.22) și (fig. 7.23). Ultimele

gelul interior al OT. Luând ca parametru cîteva valori ale presiunii statice $p_s = 1, 2, 3, 4 \text{ daN/cm}^2$, în gîna celor recomandate în literatură, prin calcul se poate reduce legătura teoretică între forța statică și dimensiunea secțiunii transversale variabile a OT per

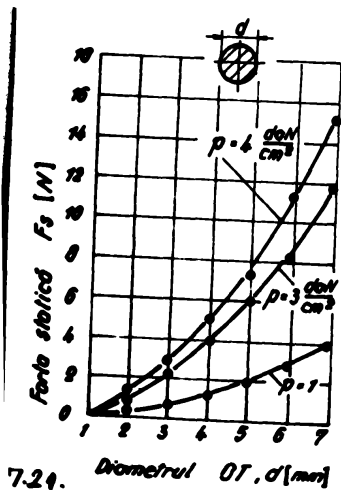


Fig. 7.21

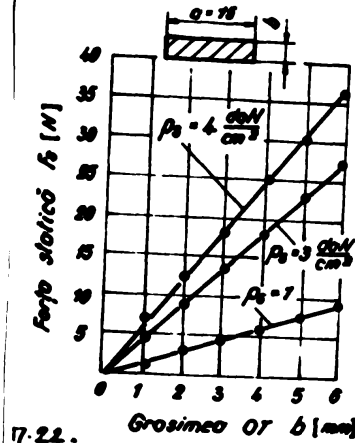


Fig. 7.22

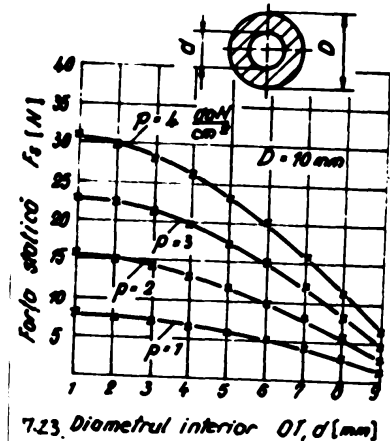


Fig. 7.23

representări sînt doar cazuri cu totul teoretice și nu țin cont de complexitatea fenomenelor din proces, de fărîmîțarea granulelor abrazive, dificultatea de circulație prin interstițiul lateral și cel frontal într-OT și OP și alți factori. Există de fapt o presiune statică de avans p_s așa cum a fost ea definită mai sus, cît și o presiune reală de contact dintre OT, granule și granule și OP, valoare care are un caracter elastic și nu este posibil de controlat. Cele două valori pot diferi mult una de alta.

Poate ar fi mai corect să se dea forța optimă de avans, precizată pentru o anumită formă a OT și dimensiuni ale sale, de aceea noțiunea de presiune statică definită ca forță statică raportată la aria secțiunii transversale a OT, trebuie considerată cu anumite rezerve.

Din experiențele proprii și concluziile altor cercetători rezultă că $F_{s \text{ opt}}$ sau $p_{s \text{ opt}}$ nu este un parametru constant, depinde de adîncime și de alți factori. Pentru fiecare operație tehnologică este ne-

cesar să se determine, pe cale experimentală F_{sopt} ca fiind cea corespunzătoare timpului minim de prelucrare la o anumită adâncime dată. Se poate realiza și o variație progresivă a ei cu adâncimea pentru a avea o cifră mai bună prelevare de material. Rezultatele obținute arată că prelevarea de material prin eroziune ultrasonică scade cu adâncimea. Prelevarea de material este direct legată de relația care există între viteza de înfrânitare a granulelor abrazive și de viteza de înlocuire a acestora. La adâncimi mici ($h = 1...2$ mm) se poate mări F_s , prin care forța dinamică medie pe granule crește și volumul de material dizlocat de ea din OP se mărește. Pe măsură ce crește adâncimea, condițiile de înlocuire ale abrazivului se înrăutățesc și volumul de material prelevat scade. La forțe F_s mari efectul de măcinare și înfrânitare a abrazivului este mai accentuat iar cantitatea de abraziv cu dimensiunea fracției principale din granulatie corelată cu amplitudinea de oscilație a OP, este insuficientă, acest fenomen nu se resimte la adâncimi mici. Micșorarea prelevării cu adâncimea cavității este cu atât mai importantă cu cât este mai mare F_s . Circulația suspensiei este mai ușoară fiind interstițiul lateral este mai mare, deci la granulatie mai mare a abrazivului.

Micșorînd grosimea peretelui OP cilindric tubular de la 1...2mm la 0,5 mm ($D/d = 10/9$) s-a observat o înrăutățire a prelucrării prin creșterea rezistenței de circulație a suspensiei în zona de eroziune și prin "fuga" abrazivului de sub suprafața frontală a OP. Cu OP tubulare se pot face prelucrări acceptabile la grosimi ale peretelui mai mari de 1,5...2 mm. În cazul în care viteza de înfrânitare a abrazivului este mai mică decît viteza de înlocuire a suspensiei, atunci volumul de material prelevat depinde numai de forța dinamică transmisă granulelor și care depinde de forța statică F_s .

Pentru forța statică $F_s = 12$ N, ($p_s = 2$ daN/cm²) cu scule avînd secțiune dreptunghiulară 15x4 mm s-au prelucrat cavități înfuziate în semifabricate din sticlă de sodiu și sticlă optică cren C516641K cu suspensie abrazivă B₄C nr.10 în apă (50 % volumetric), circulația în spațiul de lucru făcîndu-se prin strepîre și agitare manuală. La mașina KPV-01 s-a reglat coborîrea și ridicarea periodică a mesei în mod automat pentru reumplerea cu abraziv proaspăt din 30 s în 30 s.

Adîncimile de prelucrare h , mm, s-au măsurat după diverși timpi t_p , min. Pentru fiecare timp t_p s-au efectuat 5 replici (tab.7.8). Dependența $h = f(t_p)$ este redată în fig.7.24. Pentru un nivel de semnificație (risic) bilateral de 0,05, numărul gradelor de libertate $\nu = n - 1 = 4$ se obțin din [240]:

Variabile cu repartiție Student $t_{0,025; 4} = 2,776$, care înmulțită cu s/\sqrt{n} dă eroarea limită sau incertitudinea. Media valorilor s-

adâncimii de prelucrare este cuprinsă de încredere $[m_1; m_2]$ cu o probabilitate de 95 %. Experiențele au arătat că la adâncimi mici de prelucrare $h \leq 2$ mm, există o dependență aproape liniară între h și t_p , deoarece se asigură condiții bune de falcare a abrazivului și nu cu altul precum.

Adâncimea de prelucrare h mm Tabelul 7.8

Obiectul prelucrat	Nr. $t_{p \text{ min}}$ realizat	Adâncimea de prelucrare h mm					
		0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	
Sticlă optică	1	0,49	0,69	1,10	1,51	1,81	
	2	0,47	0,73	1,08	1,53	1,75	
	3	0,42	0,81	0,96	1,41	1,70	
	4	0,46	0,75	1,11	1,35	1,72	
	5	0,51	0,70	1,13	1,33	1,74	
	\bar{X}	0,470	0,736	1,067	1,350	1,744	
CS16641R	1	0,034	0,047	0,069	0,058	0,041	
	m_1	0,428	0,677	0,976	1,258	1,677	
	m_2	0,512	0,794	1,147	1,402	1,816	
Sticlă de sodiu	1	0,30	0,41	0,80	1,20	1,70	
	2	0,32	0,50	0,87	1,23	1,76	
	3	0,26	0,45	0,91	1,21	1,71	
	4	0,31	0,60	0,82	1,19	1,78	
	5	0,35	0,55	0,84	1,27	1,72	
	\bar{X}	0,308	0,498	0,848	1,22	1,73	
	6	0,033	0,073	0,043	0,031	0,034	
	m_1	0,267	0,407	0,794	1,181	1,686	
	m_2	0,349	0,588	0,901	1,258	1,770	

Aplicând analiza regresiei liniare [200], [196], prin metoda celor mai mici pătrate se găsesc ecuațiile analitice $h = A + Bt_p$ și coeficientul de corelație r , luând valorile medii din tab.7.8. Pentru sticla optică CS16641R se obține: $A = 0,340$; $B = 0,436$; $r = 0,996$; $h = 0,34 + 0,346t_p$, iar pentru sticla de sodiu: $A = 0,086$; $B = 0,397$; $r = 0,997$ și ecuația $h = 0,086 + 0,397t_p$, deci dependențele $h = f(t_p)$ sînt funcționale directe, avînd coeficientul apropiat de +1. După un minut de prelucrare s-au obținut productivitățile $Q_v = 42 \text{ mm}^3/\text{min}$ pentru sticla optică și $30 \text{ mm}^3/\text{min}$ pentru sticla de sodiu, deci cu 40 % mai mare la sticla optică.

La prelucrarea celor 4 variante de sticle cu carburi de siliciu SAC nr 10 și OT cilindric $\phi 3$ și $\phi 4$ (fig.7.25 și 7.26) dependența $h = f(t_p)$ arată că se respectă criteriul de fragilitate (prelucrabilitate) determinat în capitolul 2 al tezei.

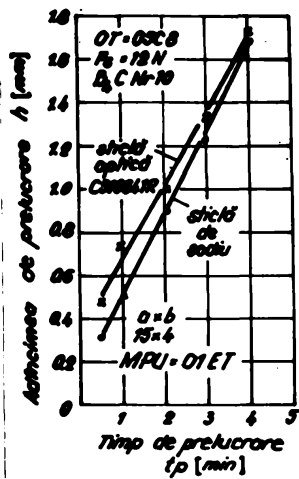


Fig.7.24

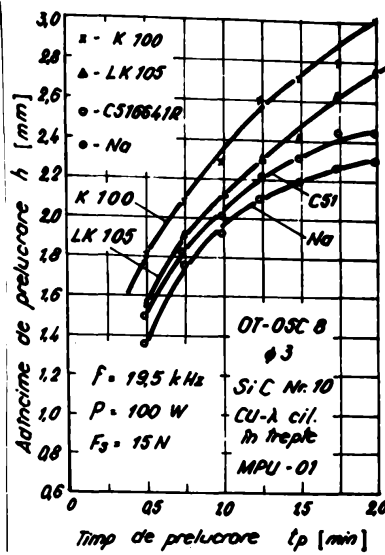


Fig.7.25

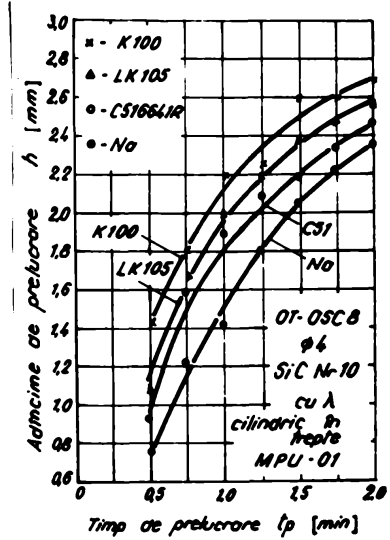


Fig.7.26

7.4. Cercetări experimentale asupra uzurii obiectelor de transfer și preciziei de prelucrare dimensională

Uzura obiectului de transfer determină durabilitatea sa și are o influență importantă asupra preciziei de prelucrare.

Uzura longitudinală U_L a OT depinde în principal de proprietățile fizico-mecanice ale materialului de prelucrat (OP) și materialul obiectului de transfer (OT), de grosimea perestului OT, de granulația abrazivului și condițiile de circulație a suspensiei abrazive, cît și de alți factori.

Uzura transversală, U_t , în afară de factorii mai sus enumerați depinde esențial de oscilațiile transversale ale OT, de circulația suspensiei abrazive în interstițiul lateral, cît și de forma secțiunii transversale a OT.

La seria de experimentări cu OT avînd secțiunea dreptunghiulară 15x3 mm, s-au determinat și uzurile acestora, care sînt redată în tab.7.9a și 7.9b.

Pentru cavitățile infundate, nestrăpune, aprecierea uzurii se face cel mai corect prin uzura volumică determinată cu relația:

$$U_r = \frac{\Delta V_{OT}}{\Delta V_{OP}} 100\% = \frac{\rho_{OP} \Delta m_{OT}}{\rho_{OT} \Delta m_{OP}} 100\%$$

în care ρ_{OP} și ρ_{OT} sînt densitățile OP respectiv OT, iar Δm_{OT} și Δm_{OP} masele prelevate din OT și respectiv din OP, cîntărite cu balanța analitică ($\rho_{OP} = 2,4 \text{ g/cm}^3$ pentru sticlă de Na și $\rho_{OT} = 7,85 \text{ g/cm}^3$ pentru oțel OL 37).

Pentru a urmări și influența uzurii asupra preciziei de prelu-

UZURA MASICA SI VOLUMICA OT-OL 37, OP-ATIOLA Na, B_LC Nr.10 Tabelul 7.9a

Nr. MARINE	UM	TIMP DE PRELUCRARE t _p min					
		1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
1	Δ ^m _{OT}	mg 13	21	24	26	32	41
	Δ ^m _{OP}	mg 165	257	277	307	368	507
	U _r	% 2,40	2,50	2,65	2,93	2,66	2,41
2	Δ ^m _{OT}	mg 11	19	21	23	25	27
	Δ ^m _{OP}	mg 118	256	319	387	412	493
	U _r	% 2,05	2,27	2,01	1,82	1,05	1,01
3	Δ ^m _{OT}	mg 26	32	45	43	49	50
	Δ ^m _{OP}	mg 237	268	432	431	449	-
	U _r	% 3,33	3,65	3,50	3,42	3,34	-
4	Δ ^m _{OT}	mg 31	66	67	69	71	73
	Δ ^m _{OP}	mg 158	296	299	306	312	313
	U _r	% 6,0	6,82	6,85	6,89	6,96	7,1

UZURA LONGITUDINALA OT-OL 37, OP-ATIOLA Na; B_LC Nr.10 Tabelul 7.9b

Nr. MARINE	UM	TIMP DE PRELUCRARE t _p min					
		1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
1	U _l	μm 45	62	69	71	90	102
	h	mm 1,52	2,06	2,22	2,46	2,95	4,06
	U _l %	% 3,41	3,00	3,10	2,88	3,37	2,51
2	U _l	μm 28	58	71	87	96	100
	h	mm 0,95	2,05	2,36	3,10	3,30	3,95
	U _l %	% 2,94	2,83	2,77	2,80	2,90	2,82
3	U _l	μm 61	64	85	96	107	-
	h	mm 1,90	2,15	3,22	3,45	3,60	-
	U _l %	% 3,20	1,69	2,64	2,78	2,97	-
4	U _l	μm 48	83	88	98	109	112
	h	mm 1,27	2,37	2,40	2,45	2,52	2,52
	U _l %	% 3,79	3,50	3,67	4,00	4,36	4,46

crare in adincime s-a determinat și uzura longitudinală a OT măsurând cu ajutorul unui ortotest (0,001 mm) variația de lungime (măsurat la sere înainte de prelucrare și măsurat după prelucrare) (tab.7.9b)

In fig.7.27 este redată uzura longitudinală absolută, în funcție de timpul de prelucrare, iar în fig.7.28 uzura longitudinală relativă calculată cu relația:

$$U_r = \frac{U_l}{h} \cdot 100 \quad \%, \text{ în care}$$

h, mm, este adincimea cavității prelucrate în piesă. Ca parametru s-a

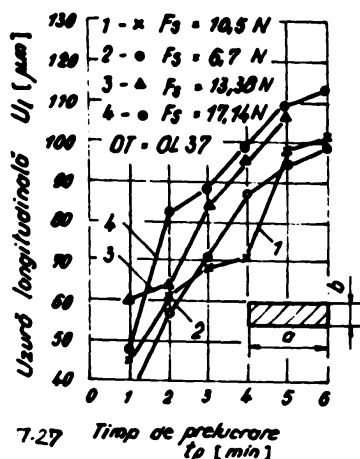


Fig. 7.27

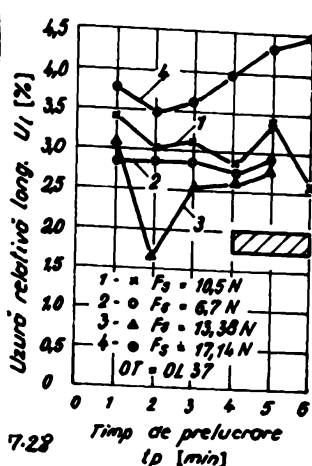


Fig. 7.28

luat forța statică F_s .
 În fig. 7.27 se observă că uzura longitudinală a OT crește aproape liniar cu timpul de prelucrare, mai ales la timpii mici, respectiv adâncimi mici. Forța statică are influență asupra uzurii. Cădată cu creșterea ei se mărește și uzura (vezi piesa nr. 4).

Uzurile volumice relative (tab. 7.9a) au variat între U_v % = 1,62...7,13 % iar cele longitudinale relative între U_l = 1,69...4,46 % pentru OT din OL 37.

Rezultate similare s-au obținut și cu scule cilindrice pline și tubulare.

Precizia de prelucrare este determinată de utilaj și de procesul de eroziune ultrasonică propriu-zis, așa cum s-a arătat în cap. 2. Dintre factorii de proces esențiali sînt: dimensiunea abrazivului și circulația sa în spațiul de lucru, uzura sculei și precizia de execuție a sculei cît și oscilațiile sale transversale, stabilitatea interstițiului între OT și OF, adâncimea de prelucrare etc. Precizia cavităților infundate, neștrîguse este determinată în esență de trei factori [127]: precizia geometrică de realizare a sculei, precizia de copiere a formei OT pe OF și oscilațiile transversale parazite ale OT, perpendiculare pe axa OT. Precizia de realizare a OT se face în funcție de precizia cerută pentru OF, ținîndu-se seama de lărgirea suplimentară datorită dimensiunilor granulelor abrazive.

Dimensiunea nominală a OT, atît la fază de degroșare cît și de finisare mai ales trebuie determinată ținînd cont de lărgirea suplimentară laterală cît și șanțul [126], [234], [260]. Această lărgire nu este o mărime constantă, ea variază în funcție de adâncime și deci cu timpul de prelucrare [126]. La fază de degroșare cu abrazivi avînd granulația mare Nr. 12, $\Delta D = 0,4...0,5$ mm, iar cu granulație mică, la finisări, Nr. 3, $\Delta D = 0,03...0,06$ mm.

La eroziunea ultrasonică interstițiul lateral este în medie $\Delta = 1,5$ de ^{în care} este dimensiunea particulelor abrazive din fracțiunea principală a granulației. După recomandările din [126], la operații sau faze de degroșare cu abrazivi avînd granulația Nr. 6...12

(STAS 1751-76) la prelucrarea aalezajelor, dimensiunile nominale ale OT se iau mai mici cu 0,2...0,3 mm față de dimensiunile nominale ale aalezajului OP, iar la finisare cu abrazivi având granulația Nr.3...N 40 cu 0,02...0,10 mm. La generarea suprafețelor, prelucrând cu OT tubulară cu partea interioară a OT, se vor aări dimensiunile interioare ale OT față de OP cu valorile respective. Schema de calcul pentru stabilirea dimensiunilor OT se aă în fig.7.29.

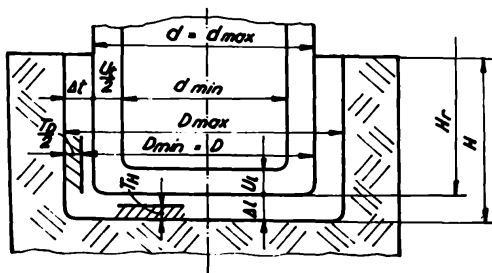


Fig.7.29

Se consideră interstițiul $\Delta = \bar{\Delta} + 3\sqrt{\bar{\Delta}}$, ca o mărime medie $\bar{\Delta}$ constantă, determinată pe cale experimentală din 4...5 încercări pe adâncime mică $h = 1...2$ mm stabilindu-se și abaterea medie patrată $\sqrt{\bar{\Delta}}$ corespunzătoare. Știind că în timpul prelucrării OT se uzază și își micșorează dimensiunile, se plasează interstițiul transversal Δ_t la dimensiunea maximă a aalezajului D_{max} . Uzura transversală a OT este permisă pînă la dimensiunea efectivă limită a aalezajului. D_{min} este necesară ca piesele prelucrate să rîndă în dimensiunile lor în câmpul de toleranță. Ținînd cont de aceste condiții (din fig.7.29) se deduc relațiile:

$$\begin{aligned} d_{max} &= D_{min} + T_D - 2\Delta_t \\ d_{min} &= D_{min} - 2(\Delta_t + k_s \cdot U_t) \\ a_H + a_s &= D_H + A_s - 2\Delta_t \\ d_H + a_1 &= D_H + A_1 - 2(\Delta_t + k_s \cdot U_t) \end{aligned}$$

În care d_H, D_H - sînt dimensiunile nominale ale OT (arborelui) respectiv OP (aalezajului); a_s, a_1 și A_s, A_1 - abaterile limită ale OT respectiv OP; $\Delta_t = \bar{\Delta}_t + 3\sqrt{\bar{\Delta}_t}$ - interstițiul transversal (lateral); $k_s = 0,2...0,3$ coeficient de siguranță. Pe măsură ce prelucrarea continuă OT se uzază lateral, își micșorează dimensiunile, aalezajul primește forma conică. Prelucrarea trebuie oprită atunci cînd $U_t \leq T$. Timpul de prelucrare continuă pînă cînd pe OT se atinge uzura transversală admisibilă, constituie durabilitatea sculei (OT).

Relații similare se pot scrie pentru adâncime. Cota de reglare a OT în adâncime:

$$a_r = (H + T_H) - \Delta_r = \frac{\Delta_r}{2}, \text{ cu condiția ca uzura longitudinală } U_l \leq T_H - k_s T_H \text{ în care } \Delta_r \text{ este cotea de reglare.}$$

Dacă nu se respectă condiția $u_t \leq T_H$, în cota de reglare va intra și u_t [260]: $u_t = (H + T_H) - \Delta_t - \frac{\Delta_t}{2} + u_t$.

Pentru decupare de piesă cu stule tubulare:

$$D_{OT} = d_{OT} - T_d + 2\Delta_t; \quad u_t \leq T_d, \text{ în care } T_d \text{ este toleranța}$$

la dimensiune a piesei. Dacă apar și oscilații parazite transversale ale OT, se va ține cont de mărirea interstițiului lateral Δ_t suplimentar cu 0,03...0,05 mm [234]

Dimensiunile OT se vor corecta cu aceste valori. Toleranța la dimensiune pentru OT se adoptă obișnuit IT 6...IT 8, la operații de finisare. La degroșare dimensiunile OT vor fi mai mici la perforare și mai mari la decupare cu adăosul pentru finisare și 2Δ pentru degroșare în funcție de granulatia abrazivului.

Pentru ameliorarea ștaterii de la cilindricitate, corectarea formei conice, în literatură se indică conicități inverse, fatetele laterale înghițate, precum și tranșeane coaxiale în construcții conice sau prin presare a OT pentru degroșare și finisare [127], [234]. Unele din aceste forme au fost testate și de autor.

Pentru OT combinate din tranșeane coaxiale d_1 pentru degroșare și d_2 pentru finisare, diferența dintre ele se ia $d_2 - d_1 = 0,5$ mm. La perforarea din plin cu OT cilindrică cu $d = 7$ mm cu abraziv B₄C având granulatia Nr.10 SFA 1753-76 în placă de sticlă de Na cu grosimea de 6 mm s-au realizat 5 șturi. La granulatia Nr.10 sînt date compozițiile granulometrice ale fracțiilor: (SFA 1753/76) pentru fracțiunea mare, $d_m = 125 \mu\text{m}$ (20%); fracțiunea principală, $d_m = 100 \mu\text{m}$ (40%); fracțiunea complexă $d_m = 80 \mu\text{m}$; fracțiunea săruntă $d_m = 63 \mu\text{m}$. Alezajele au avut dimensiunile $D = 7,32; 7,36; 7,34; 7,33; d_{med} = 7,332$ mm $2\Delta = 0,332$ mm $\Delta = 0,166$ mm, $= 0,0192$ mm. Exprinim interstițiul în funcție de dimensiunile abrazivului $\Delta = k_{med} \cdot d_{med}$; $0,166 = k_{med} \cdot 0,100$ $\Delta_1 = k_1 d_{max}$; $0,166 = k_1 \cdot 0,125$; $k_{med} = 1,66$, $k_1 = 1,328$. Deci $\Delta = (1,5...1,7)d_m$, în care d_m este dimensiunea fracției principale a granulatiei abrazivului, valori apropiate de cele date în literatură [126], [127].

La intrarea OT și ieșirea lui din OT se produc ciobiri, apar șturi. La intrare aceste ciobiri sînt neglijabile înăi la ieșire au valori apreciabile 0,1...0,5 mm. Micșorarea lor se poate face prin lipire cu oară sau rășini a unor plăci subțiri de sticlă cu adăosuri suplimentare, așa cum se recomandă și în [127], [260], [128] sau se micșorează forța de avans la ieșire [127], [198].

Stabilirea corectă a dimensiunilor OT la prelucrarea cavităților profilate strîpune sau nestrîpune (de formă conică, cilindrică în trepte etc) este dificilă. Problema se rezolvă pe baze de experiment, aplicînd metoda aproximațiilor succesive,

respectiv a prelucrărilor succesive cu scule având forme din ce în ce mai apropiate de forma finală a piesei [151], [152], [234]. Așa de exemplu la prelucrarea alezajelor conice în filiere, Veronesi V.I. [151], [198], a găsit că unghi este necesar la OT: 28 pentru a se obține unghiul dorit la OP 2α :

$$(1 + U_p) \operatorname{ctg} 2\alpha = \operatorname{ctg} 2\theta,$$

în care U_p este uzura relativă a OT pentru material dat al OP. Încercări similare s-au efectuat și în laboratorul de ultrasonete al Institutului Politehnic "Traian Vuia" Timișoara de către colectivul de cercetare la finisarea cu ultrasonete a unor filiere din carburi metalice cu wolfram pentru tras sîră de cupru. La unele prelucrări a participat și autorul tezei. De exemplu pentru finisarea conului de tragere $2\alpha = 18^\circ$ a unei filiere din carburi de wolfram, făcînd prelucrarea cu OT din GSC 8 tratat termic, cu suspensie de B₄C nr. (da = 40 μm), la $P_{GIF} = 200$ W, $f = 19,1$ kHz: $F_g = 2,1$ daN, filiera fiind antrenată în mișcare de rotație cu $n = 122$ rot/min de la un motor de curent continuu prin intermediul unei mase rotitoare plasată pe masa mașinii, în timp de 4 minute s-a modificat unghiul inițial al OT (acului) de la $(2\theta_0) = 14,5^\circ$ la $(2\theta) = 17^\circ 30' \approx 2\alpha$. Din relație ar rezulta uzura relativă $U_p = \operatorname{tg}(2\alpha) / \operatorname{tg}(2\theta) - 1 = 0,194 = 0,2$. Pentru corecția unghiului conului de intrare rezultă:

$$\begin{aligned} 2\theta &= \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{1+U_p} \operatorname{tg} 2\alpha\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{1+0,2} \operatorname{tg} 70^\circ\right) = 66,4^\circ \\ &= 66^\circ 24' 21'' \end{aligned}$$

Făcînd tatonări experimentale în jurul acestor valori s-au găsit unghiurile necesare la care trebuie ascuțite acele (OT) pentru finisarea conurilor filierelor. Se poate determina uzura relativă apoi se calculează corecția de unghi, care după aceea se verifică experimental.

7.5. Cercetări experimentale privind modificarea durității sub microscopie a părții active a obiectelor de transfer

Stratul de material din imediata vecinătate a suprafețelor active ale OT, fiind supus șeurilor repetate în procesul de creziție ultrasonice în contact cu granulele abrazive, este de așteptat că pe lângă fenomenul de uzură prezentat anterior, să se producă deformări plastice și modificări ale durității locale. Cu OT de formă cilindrică plină, tubulare oft și prismatice s-au făcut prelu-

crări în sticla de Ne având ca abraziv B₄C Nr.10 în suspensie în apă, parte din încercări au fost prezentate anterior. Aceste scule au fost secționabile longitudinal, prelucrate metalografic și măsurată duritatea sub microsarcină în apropierea suprafeței frontale uzate, respectiv pe grosimea peretelui la cele tubulare, conform schițelor date în tab.7.10 și a microfotografiilor.

Datele sub microsarcină a unor scule Tab 7.10

Fig. Nr.	Material OT	Condiții de lucru	Duritate sub microsarcină OT în kg/mm ²	Schițe OT
Fig.1	OLC 45	OP - sticlă abraziv B ₄ C Nr.10 OT tubular Ø10/Ø8	198,39 (98) 190,47 (100) 188,88 (101) 183,08 (102)	
Fig.2	OL 37	OP - sticlă B ₄ C Nr.6 OT cilindric Ø3	188,38 (107) 183,23 (108)	
Fig.3	OL 37	OP - sticlă B ₄ C Nr.10 OT cilindric Ø8	183,23 (108) 155,05 (111) 152 (112)	
Fig.4	OL 37	OT prismatică neutralizată la prelucrare (neusată)	131 (119)	
Fig.5	OLC45 normalizat	OP - sticlă B ₄ C Nr.6 OT cilindric Ø3	263,84 (83) 257,54 (88) 260,39 (85) 253,85 (90)	
Fig.6	OL 37	OP - sticlă B ₄ C Nr.10 OT prismatic 15=3	188,28 (107) 160,0 (115) 133,0 (118) 131,0 (119)	
Fig.7	OSC 8 câșt + rev.	OP - sticlă B ₄ C Nr.10 OT cilindric Ø5	263,84 (83) 257,54 (88)	
Fig.8	OLC 45	OP - sticlă B ₄ C Nr.10 OT cilindric Ø5	202,38 (97) 198,29 (98)	

Tab 7.11 (continuare)

Fig.9	OL 37	OP - sticlă B ₄ C Nr.10 OT cilindric Ø5	183,88 (100) 178,01 (104) 189,33 (100)	
Fig.10	OSC 8 câșt + rev.	OP - sticlă B ₄ C Nr.6 OT cilindric Ø5	263,84 (83) 265,91 (84)	
Fig.11	Fig.3 câșt + rev. 100 x 205	OP - sticlă B ₄ C Nr.10 OT cilindric Ø5	260,87 (84) 254,88 (88)	
Fig.12	---	---	---	---
Fig.13	---	Filișă MC OT - OSC 8 B ₄ C Nr.6	1514 (35) 1631 (38)	
Fig.14	scord ; obiectiv 25 / 1,2 ; 1 div = 0,01 mm Div = 2,24 mm ; MO = $\frac{2,24}{0,01} = 224 \times$, MOX 221 MO = mărime optică			
Fig.15	scord ; obiectiv 25 / 6 ; 1 div = 0,01 mm Div = 2,95 mm ; MOX 225			
Fig.16	scord ; obiectiv 50 / 6 ; 1 div = 0,01 mm Div = 5,9 mm ; MOX 530			

Notă: În schițe și în paranteze este dată duritatea medie a suprafeței.

Tabelul 7.10

În tabel sînt date condițiile de lucru pentru OT uzate, materialul și tratamentul termic aplicat diverselor OT.

Pentru determinarea durității sub microsarcină s-au utilizat microdurimetrul tip MDP 100, microscopul SPITM cu obiectiv apocromatic 32.0,65 și conul Vickers NV 0,1 daN/mm² (0,1 kgf/mm²). Pe schițe în tabelul 7,10 și în paranteze după valoarea durității a fost dată valoarea medie a diagonalelor amprentelor în micrometri. În fig.7.30 este expusă microstructura pentru scula tubulară Ø 10/Ø8, din OLC 45 avînd grosimea inițială a peretelui de 1 mm. Se observă constituenții fericiți și perlici stratificați prin procesul de laminare în direcție longitudinală și care în partea inferioară frontală și spre margini există o deviație a grăunților cristalini datorită deformațiilor plastice la contactul cu abrazivul din spațiul de lucru. Fenomenul de întărire ușoară (ecruizare), se observă și din tab.7.10 (poziția 1): duritatea sub microsarcină crește spre suprafața frontală și laterală a OT. Se mai remarcă o ușoară anisotropie longitudinală și transversală prin diferența diagonalelor



Fig.7.30

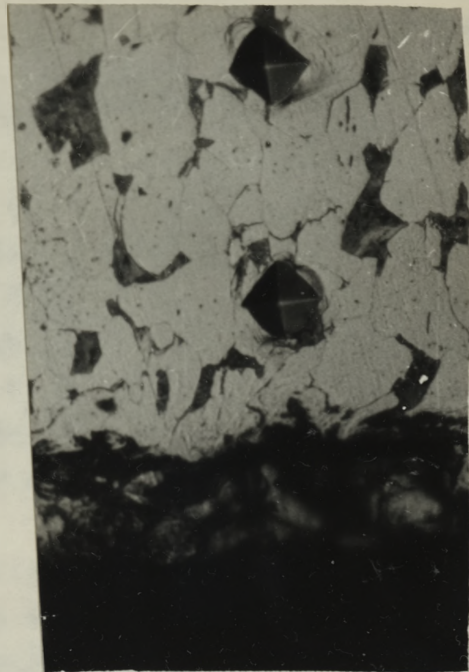


Fig.7.31

asprețelor dar care se datorează procesului de laminare al barei și nu deformațiilor care apar la prelucrarea prin eroziune ultrasonică.

În fig.7.31 este redată microstructura pentru OT cilindric cu diametrul de 3 mm din OL 37 în stare receaptă uzat la prelucrarea sticlei de Na cu B₄C Nr.4 (fig.2 tab.7.10). Se observă o creștere a durității în apropierea suprafeței frontale. Cei doi constituenți ferita majoritară și perlita sînt uniform repartizați. Se observă existența unui strat de material distrus. Obiectele de transfer din OSC 8, călitate și revenite înalt (fig.7.32 și fig.7.33) au o durita-

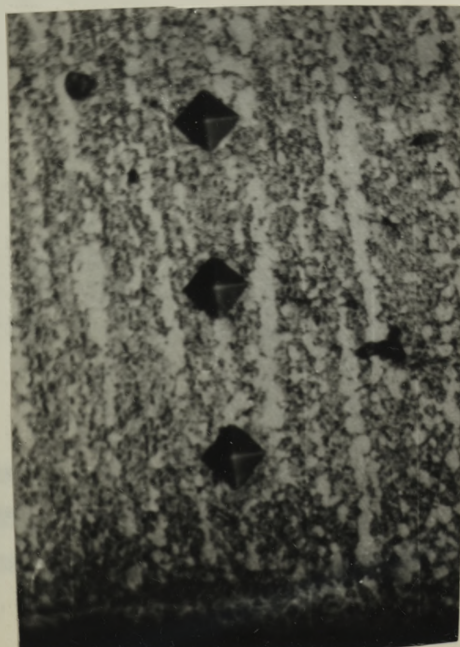


Fig.7.32



Fig.7.33

te sub microsarcină mult mai mare decât OL 37 și OLC 45 (fig.7 și 10 tab. 7.10).

În fig.7.34 este redată microstructura unei scule (OT) din oțel rapid R_p3 (fig.11 tab.7.10). Structura de călire la martensită și apoi revenirea înaltă, are duritate mare (H_v = 940,67) iar asprentele de duritate sînt relativ omogene. Structurile s-au obținut cu atee cu soluție de nital, iar mărirea optică a fost X224.

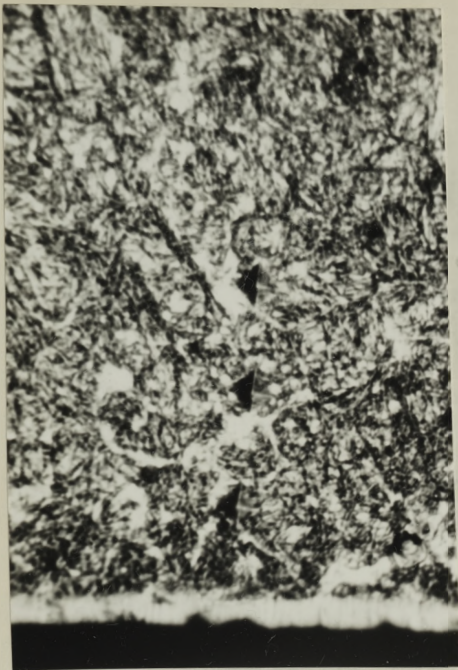


Fig.7.34

Uzurile longitudinale relative ale OT din OL 37; OLC 45; OSC 8 și R_p3, ultimele două în stare întărită, obținute la prelucrarea sticlei de sodiu cu grosimea 6 mm cu OT cilindric d = 5 mm, cu suspensie abrazivă B₄C - Nr 10 în apă (50%) (fig. 7.35). Se observă uzura mică a sculelor din R_p3 și OSC 8, comparativ cu OL 37.

Uzurile longitudinale relative ale OT din OL 37; OLC 45; OSC 8 și R_p3, ultimele două în stare întărită, obținute la prelucrarea sticlei de sodiu cu grosimea 6 mm cu OT cilindric d = 5 mm, cu suspensie abrazivă B₄C - Nr 10 în apă (50%) (fig. 7.35). Se observă uzura mică a sculelor din R_p3 și OSC 8, comparativ cu OL 37.



Fig.7.36

Imaginaa unor obiecte de transfer sînt date în fig.7.36. și 7.37 iar a piștelor prelucrate în fig.7.38.

Imaginaa unor obiecte de transfer sînt date în fig.7.36. și 7.37 iar a piștelor prelucrate în fig.7.38.

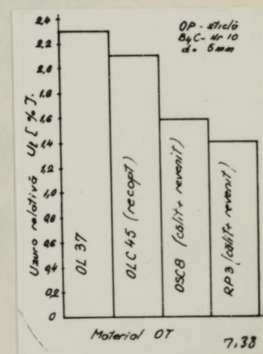


Fig.7.35

La eroziunea ultrasonică apare o întărire (ecruisare) a materialului OT pe suprafețele active cît și deformații plastice. Aici nu e-par zone influențate termic și nici modificări ale structurii nici în OT și nici în OP, ceea ce reprezintă un avantaj al procedurii de eroziune ultrasonică.

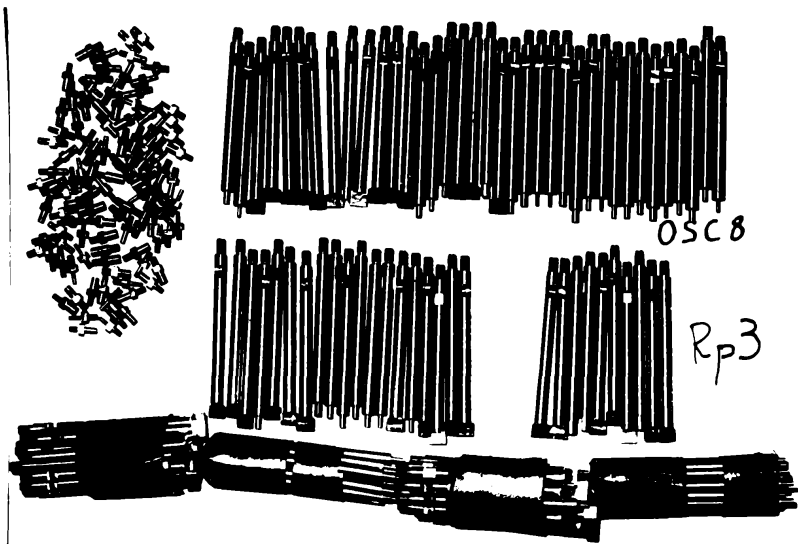


Fig. 7.37

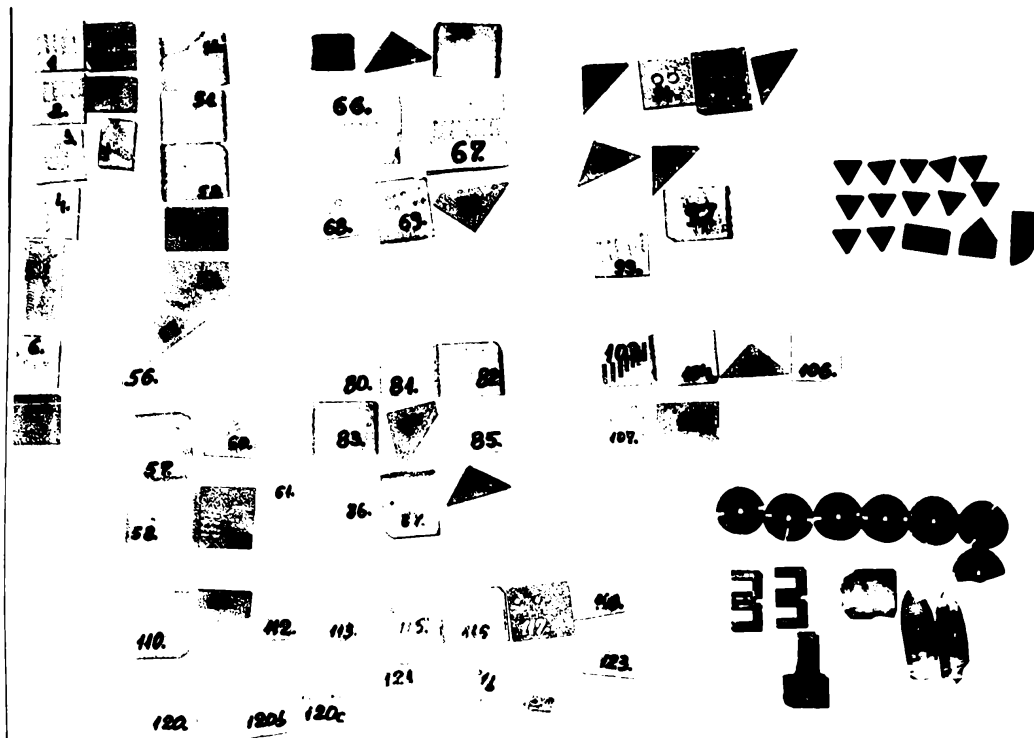


Fig. 7.38

7.6. Cercetări experimentale ale calității suprafețelor generate prin eroziune ultrasonice

7.6.1. Factorii care influențează rugozitatea, importanța calității suprafeței

Calitatea suprafețelor generate prin eroziune ultrasonice depinde de următorii factori mai importanți:

- 1.) Granulația abrazivului;
- 2.) Proprietățile fizico-mecanice ale obiectului prelucrat și

3.) Amplitudinea oscilațiilor obiectului de transfer OT;

4.) Rugozitatea suprafețelor OT;

5.) Lichidul și modul de circulație a suspensiei abrazive în spațiul de lucru.

Forța statică dintre OT și OF are și ea influență asupra rugozității. Markov A.I. [127] arată că la varierea lui F_0^h limitele $F_0^* = 0,4...2,5 \text{ daN}$, $R_2 = 3,6...4,2 \mu\text{m}$, la prelucrarea oțelului cu abraziv având granulatia Nr.12. Creșterea amplitudinii are ca efect mărirea pătrunderii particulelor abrazive în stratul suprafeței OF și deci crește rugozitatea.

Utilizarea uleiului cu vâscozitate mică în loc de apă în suspensia abrazivă a dus la o îmbunătățire a calității suprafeței [128] [129] însă s-a micșorat capacitatea productivă prin îngreunarea circulației suspensiei în zona de lucru. La prelucrarea cavităților rugozitatea pe suprafața frontală a OF este mai mică decât pe pereții laterali din cauza acțiunii de zgîriere a granulelor abrazive mai mari la circulația suspensiei. Diferența este cu atât mai mare cu cât crește granulatia abrazivului.

Rugozitatea suprafeței generate prin eroziune ultrasonică are influență asupra valului funcțional al pieselor în construcția de mașini și aparate.

Rugozitatea admisă pe suprafețele care formează ajustaje influențează toleranțele dimensionale, mărirea jocului sau a strîngerii cit și solicitările la care sînt supuse în timpul funcționării. La ajustajele cu joc și intermediare, caracterul ajustajului se poate modifica datorită uzurii. Lagire de safir și rubin, din materiale ceramice în industria aparatelor de măsură, industria ceasurilor, aparatelor de mecanică fină, industria optică și aparatelor de măsură și control, filiere de trăs sîră etc. sînt doar cîteva domenii în care finisarea suprafețelor prin eroziune ultrasonică găsește cîmp de aplicație, în special la materialele electrice izolante. În cazul unor valori mai ale rugozității, creșterea uzurii este accentuată în zona uzurilor primare, în prima perioadă după care jocul se stabilizează în zona uzurilor normale.

La ajustajele cu strîngere, strîngerea netedă este influențată și de rugozitate. Caracterul ajustajului este păstrat ^{mai bine} cit și rugozitatea suprafețelor conjugate este mai mică. La piesele supuse solicitărilor variabile, rugozitatea suprafețelor are influență asupra rezistenței la șocuri a acestora prin efectul de crestături al golurilor dintre proeminente, care constituie surse de fisură care duc la ruperi prin șocuri.

La suprafețele cu mișcare relativă, la una din suprafețe este necesară de o anumită rugozitate pentru a menține pelicula de lubrifiant.

Coefficientul de frecare este influențat de rugozitatea suprafețelor în mișcare relativă. La frecarea uscată există o anumită valoare a rugozității la care coeficientul de frecare este minim. La rugozități prea mari se întrepătrund neregularitățile și coeficientul de frecare crește, iar la rugozități prea mici se intensifică fenomenul de aderență între suprafețe crescând de asemenea frecările. În astfel de cazuri trebuie prescrisă atât rugozitatea maximă cât și cea minimă.

La frecarea lichidă și semiuscată se prescrie doar rugozitatea maximă admisibilă însoțită de rugozitățile maxime ale suprafețelor conjugate să fie mai mică decât grosimea peliculei de lubrifiant. Rugozitatea axiilor și fețelor active ale sculelor așchietoare, ale ștanțelor și matrițelor, filierelor de tras șirne și bare cu influență asupra durabilității lor. Prezintă interes și orientarea neregularităților. Astfel o suprafață cu urme orientate perpendicular pe direcția de mișcare reține mai bine lubrifiantul înăuntrul și se scindează mai repede în cazul în care se întrerupe filmul de lubrifiant. Calitatea suprafeței are influență și asupra rezistenței la coroziune. Trebuie avut în vedere și aspectul economic, deoarece rugozitățile prea mici duc la creșterea prețului de cost a tehnologiei de prelucrare și deci al produsului.

În teză se va analiza capacitatea portantă a profilului de rugozitate care are influență hotărâtoare asupra rezistenței la uzură a stratului de suprafață în exploatare cu consecințele descrise mai sus. Terminologia și notațiile vor fi în conformitate cu STAS 5730/1-85; STAS 5730/2-85; STAS 5730/3-85 precum și cu unele notații consacrate în literatură de specialitate [90], [195], [195], [167].

7.6.2. Prezentarea aparatului și a principiilor parametrilor de profil a rugozității

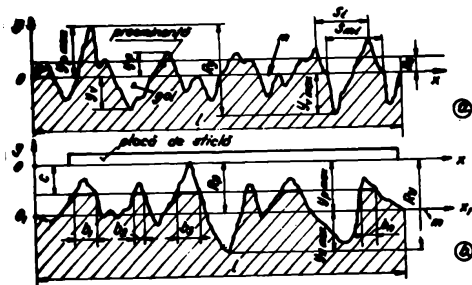
Aparatul utilizat la măsurarea rugozității suprafeței a fost Profilograf-Profilometru Tip A 1, model 252 (URSS), care redă parametri de rugozitate pe înălțime și în direcția longitudinală a profilului în sistemul liniei medii, intrând în categoria aparatelor electrice cu palparea a suprafeței.

Domeniul de măsurare cu profilograf: $0,02 \dots 250 \mu\text{m}$ iar cu profilometru: $R_a = 0,02 \dots 100 \mu\text{m}$; $Y_{pmax} = 0,1 \dots 100 \mu\text{m}$; $Y_{vmax} = 0,1 \dots 100 \mu\text{m}$; $n = 0 \dots 1000$, în care R_a este abaterea medie aritmetică a profilului Y_{pmax} , Y_{vmax} - înălțimea maximă a proeminenței profilului, respectiv n

adâncimea maximă a golului profilului măsurate de la linia medie, n - numărul de intersecții ale liniei medii cu profilul pe lungimea de bază. Nivelul de secționare, exprimat în procente c față de înălțimea maximă a profilului R_p , este: $c = 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90\%$. Amplificarea verticală ca profilograf $A_v = 200; 500; 1000; 2000; 5000; 20000; 50000; 100000$ iar cea orizontală $A_h = 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100; 200; 500; 1000; 2000$; lungimea de palpăre $1,5; 3; 6$ mm, viteza palpatorului $0,6; 6; 60$ mm/min; lungimea de undă limită a filtrului electric $\lambda_H = 0,08; 0,25; 0,8; 2,5$ mm (pasul de tăiere, cut - off) raza de rotunjire a vârfului palpatorului $10 \pm 2,5 \mu\text{m}$ (iar la comandă specială se livrează și virfi cu raza $2^{+2} \mu\text{m}$).

Principali parametri de profil se definesc astfel (STAS 5730/1-85):

R_a - abaterea medie aritmetică a profilului, este media aritmetică a valorilor absolute a abaterilor profilului față de linia medie în limitele lunginii de bază l (fig.7.39)



$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (1)$$

R_a este egală cu înălțimea unui dreptunghi care are lungimea de bază l , aria acestui dreptunghi este numeric egală cu suma ariilor cuprinse între linia medie și profilul de rugozitate pe lungimea l .

Fig.7.39

R_z - înălțimea neregularităților profilului în șase puncte - este media valorilor absolute a celor mai înalte și a celor mai de jos cinci goluri în limitele lunginii de bază:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |Y_{Bi}| + \sum_{i=1}^5 |Y_{Vi}|}{5} \quad (2)$$

Y_{pmax} - Înălțimea maximă a proeminenței profilului - distanța dintre punctul cel mai de sus al profilului și linia medie (fig.7.39) pe o lungime de bază l .

Y_{vmax} - Adâncimea maximă a golului profilului este distanța dintre cel mai de jos punct al profilului și linia medie pe lungimea de bază l .

R_y - Înălțimea maximă a profilului rugozității, este distanța între linia proeminențelor profilului și linia golurilor profilului pe lungimea l , $R_y = R_{max}$ cum era notat în vechiul standard $R_y = Y_{pmax} + Y_{vmax}$.

R_q - Abaterea medie patratică a profilului, este valoarea medie patratică a abaterilor profilului în limitele lunginii de bază.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2 dx} \quad (3)$$

Pentru profile periodice $R_q = 1,25 R_a$

R_p - Adâncimea de nivelare (fig.7.39b) este distanța de la cea mai înaltă proeminență la linia medie $R_p = y_{max}$

c - Nivel de secționare a profilului (fig.7.39b) este distanța între linia proeminențelor (tangenta la cel mai înalt vîrf al proeminențelor) și o dreaptă care intersectează profilul. Se exprimă în procente din R_y .

η_p - lungimea portantă a profilului (fig.7.30b) este suma lungimilor în interiorul proeminențelor profilului (în material) de dreapta care intersectează profilul la nivelul de secționare c , pe lungimea de bază

$$\eta_p = b_1 + b_2 + \dots + b_n$$

t_p - Procentajul lunginii portante a profilului, este raportul dintre lungimea portantă a profilului și lungimea de bază exprimat în procente

$$t_p = \frac{\eta_p}{l} 100 \quad (4)$$

Curba $t_p = t_p(c)$ se numește curba procentajului portant al profilului rugozității sau mai simplu curba de portantă.

S_1 - Pasul proeminențelor profilului, distanța între două proeminențe consecutive (fig.39a), măsurată paralel cu linia medie.

S_{mi} - Pasul neregularităților profilului pe linia medie (fig.39a).

S_n se definește similar ca pasul la filete sau reți dințate, cuprinzînd un gol și un plin, deci distanța între 3 puncte consecutive de intersecție ale liniei medii cu profilul, considerată între punctele extreme.

Valorile medii ale acestor pași \bar{S}_n și \bar{S} se pot determina direct pe profilogramă cu relațiile:

$$\bar{S}_n = \frac{2l_n}{n'(c)-1} ; \quad \bar{S} = \frac{l_0}{n'-1} \quad (5)$$

în care l_n - distanța între prima intersecție a liniei medii cu profilul și ultima intersecție impară, pe lungimea de bază l , $n'(c)$ - numărul de intersecții ale liniei medii cu profilul pe l_n ; l_0 - distanța pe linia medie între prima și ultima proeminență pe l (între maximele extreme), n' - numărul de maxime pe aceeași lungime l_0 . Aceste valori împărțite la amplificarea orizontală dau pașii reali pe profil.

Parametrii de profil și rugozității se determină pe un profil "filtrat trece sus", cu ajutorul filtrelor electrice prevăzute în circuitul calculator și înregistrator al aparatului. Profilul obținut

prin filtrare se măsoară profilul modificat (amplasat), alături de cel real nefiltrat, prin faptul că separă abaterile de tip rugozitate de amplitudine și de abaterile de formă. Pentru o separare cât mai bună a undulației și abaterii de formă, de rugozitate trebuie aleasă corect lungimea de undă limită λ_L (STAS 5730/3-75), numită și pas de tăiere (cut-off) și care se ia numeric egală cu lungimea de bază L mm STAS 5730/2-65, considerată limită convențională de separare a componentelor rugozității transmise de filtrul electric, de componentele atenuate ale undulației și abaterii de formă ale profilului real. Lungimea de palpăre recomandată de instrucțiunile aparatului este $l_p = 2L = 2\lambda_L$. Lungimea de palpăre are o lungime inițială de "liniștire" sau de intrare în oscilații, urmează lungimea efectivă de măsurare sau evaluare a parametrilor de rugozitate și se încheie cu o lungime de atenuare sau amortizare.

7.6.3. Cercetări experimentale privind rugozitatea suprafețelor generate prin eroziune ultrasonică pe obiecte din sticlă

Pe piese din sticlă de sodiu și sticlă optică s-au prelucrat cavități de adâncime mică 0,5...2,5 mm cu scule pneumatice având secțiuni dreptunghiulară a, b, a = 15 mm; 20 mm; b = 3; 4; 5 mm, utilizând abrazivi B₄C și Al₂O₃ de diferite granulații în apă.

Dintre parametrii de structură standardizați ai rugozității, cel mai important este procentajul lunginii portante a profilului t_p , care caracterizează direct rezistența la uzură a pieselor în timpul exploatarei, gradul de etanșitate între suprafețele de contact cit și robustețea (goluri largi și proeminențe înguste) profilului.

La prelucrarea sticlei optice cron normal C51664R și a sticlei de sodiu în aceleași condiții pe mașina MFU-01 electrotunaj, cu OT din OSC B având secțiuni dreptunghiulară 15X3 (tab.7.11), 15X4 (tab.7.12), 15X5 (tab.7.13) se au procentajul lunginii portante t_p în funcție de nivelul de secționare c %, în figurile 7.40; 7.41; 7.42. S-a utilizat suspensie de carburi de bor B₄C- Nr.10 în apă (50 % concentrație volumică). Dacă la secțiunea OT 15X3 mm diferențele de capacitate portantă sînt neglijabile între cele două variante de sticlă, (fig. 7.40), ele se accentuează la secțiuni mai mari (fig.7.41 și fig.7.42). Calitatea mai bună a suprafeței se obține la sticla optică (de exemplu pentru $R_a = 2,2 \mu\text{m}$ față de $R_a = 2,7 \mu\text{m}$ tab.7.12) decât la cea de sodiu, iar capacitate portantă inferioară ($t_p = 32$ % față de $t_p = 30,04$ % la $c = 50$ %).

În tabele sînt date valorile medii pentru 3 replici la fiecare tip de sticlă prelucrată. În partea inferioară se dau media valorilor

CP-otielM de Hai OT - OL 37 a.b. 15.3 h = 0,5 mm. agrariv SIC Tabelul 7.14

Nr.	Crenul. STAGE	h	n	Y _{max}	K _y	C _h						K _p	Σ		
						10	20	30	40	50	60			70	80
1	4	2,20	25,33	5,70	9,90	15,50	10,83	11,02	31,90	65,56	74,53	82,30	89,73	95,03	96,76
2	6	3,60	24,33	8,50	19,66	28,16	5,56	18,83	40,63	66,60	82,83	91,33	93,56	95,70	96,50
3	8	4,40	19,33	6,83	20,73	27,56	5,36	14,83	37,20	63,00	77,20	83,53	90,80	94,13	96,86
4	10	6,03	10,00	10,23	11,43	29,66	3,10	10,66	17,53	28,93	51,73	74,63	87,53	91,86	96,70
5	12	8,76	8,66	13,13	27,63	40,76	3,50	9,23	23,36	33,60	49,26	61,86	75,23	92,30	95,36
6	16	12,16	6,00	13,93	27,10	41,03	2,76	5,80	11,80	21,66	32,23	38,10	54,43	74,26	96,10

Tableul 7.15

Nr. Piece	QT	South	Abbrevi	R _a		R _m		Y _{pmax}		Y _t		e-10%		e-10%		90	90
				mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in		
1. K 100	15x3	81C-N	20	1,59	39,80	7,66	8,37	16,04	1,30	9,28	59,62	91,62	96,34				
2. K 100	15x3	81C-N	40	2,34	19,00	7,95	11,40	16,94	2,04	16,68	67,60	91,92	96,08				
3. LK 105	15x3	81C-N	20	1,42	23,80	4,35	8,36	12,72	1,04	27,44	84,32	95,42	96,78				
4. LK 105	15x3	81C-N	40	2,70	21,80	6,06	11,02	19,08	1,58	16,18	59,38	88,38	96,40				
5. C 51	15x3	81C-N	20	2,08	17,50	5,28	9,30	14,58	2,94	32,50	74,52	93,98	96,52				
6. No	15x3	81C-N	20	2,48	26,40	8,34	10,60	18,94	2,93	15,90	60,38	89,28	96,44				
7. No	15x3	81C-N	40	3,00	29,80	9,94	11,64	21,58	1,70	12,68	51,48	85,70	96,14				
8. P 30	15x3	Mamant	Ø76	1,56	52,20	5,24	10,20	15,44	1,94	29,64	80,54	93,98	95,54				
9. P 30	15x3	81C-Nr.10	1,04	23,20	2,84	4,62	7,46	0,98	1,22	17,48	78,22	94,92					
10. P 30	15x3	81C-Nr.10	1,20	37,20	2,94	5,65	8,40	1,36	13,16	50,10	87,08	95,46					
11. Refir	15x3	81C-Nr.10	2,34	14,20	17,24	8,24	25,48	1,22	2,68	4,62	35,54	92,32					
12. Refir	15x3	81C-Nr.10	2,86	40,00	13,16	10,74	23,90	0,98	2,94	26,12	76,22	94,64					
13. Quartz	15x3	81C-Nr.12	2,16	44,20	7,46	14,08	21,34	1,22	17,82	79,02	94,38	95,50					
14. E 100	15x3	81C-Nr.10	2,72	40,80	7,36	12,70	20,06	1,12	18,76	69,40	91,64	93,46					
15. C 51	15x3	81C-Nr.10	2,82	42,60	10,50	13,68	24,18	1,08	9,02	51,00	89,78	95,50					

Stasiun optikon OP - CS166/128 di stasiun de sedim OP - DUC 9, 15x3 ms, D/C Nr.10 Tabelul 7.11

Proba	K _a	M	Y _{pmx}	t _{year}	P _y	t									
						10	20	30	40	50	60	70	80	90	
Stasiun optikon	2,3	23	6,9	10,8	17,7	2,3	9,3	28,6	48,4	69,4	83,9	92,4	99,2	99,6	
	2,1	18	6,3	7,2	13,5	2,2	9,6	28,6	48,6	69,2	83,1	92,3	99,1	99,5	
	2,2	22	7,5	9,3	16,8	2,9	9,5	29,0	48,6	69,1	83,4	92,2	99,0	99,5	
	2,3	25	4,9	7,3	18,2	2,4	9,9	28,9	48,7	69,5	83,9	91,7	99,8	99,5	
	2,2	16	6,3	10,1	16,4	2,4	9,3	28,7	48,5	69,3	83,8	92,8	99,2	99,5	
	2,22	20,8	6,38	8,94	15,32	2,44	9,52	28,76	48,56	69,30	83,82	92,08	99,16	99,52	
	2 0,08	3,70	0,96	1,63	2,35	0,27	0,24	0,18	0,11	0,15	0,35	0,31	0,11	0,04	
	2,10	15,66	5,04	6,67	12,03	2,06	9,17	28,81	48,40	69,03	83,13	91,64	99,00	99,45	
	2,33	23,93	7,71	11,20	18,58	2,81	9,86	29,01	48,71	69,51	84,11	92,51	99,31	99,58	
	de sedim	2,4	22	7,3	10,9	18,2	1,2	5,9	23,0	43,7	63,3	82,8	91,2	94,2	95,6
2,5		18	7,7	11,5	19,2	1,2	6,0	22,8	44,1	63,5	83,1	91,1	94,1	95,6	
2,5		22	7,2	10,9	18,1	1,4	5,7	22,6	43,7	63,6	82,7	90,9	94,3	95,5	
2,6		18	6,1	10,8	16,9	1,6	5,9	22,9	43,9	65,2	82,9	91,2	94,0	95,6	
2,6		21	7,4	11,4	18,8	1,5	5,8	23,3	44,2	65,7	82,8	91,0	93,9	95,6	
2,52		20,20	7,14	11,10	18,24	1,36	5,86	22,92	43,92	65,30	82,86	91,08	94,10	95,28	
2 0,08		2,09	0,61	0,32	0,87	0,17	0,11	0,25	0,22	0,18	0,15	0,13	0,15	0,04	
2,40		17,35	6,29	10,63	17,02	1,13	5,70	22,56	43,60	65,24	82,65	90,90	93,89	95,31	
2,63		23,04	7,98	11,54	19,45	1,62	6,01	23,27	44,23	65,75	83,06	91,26	94,30	95,64	

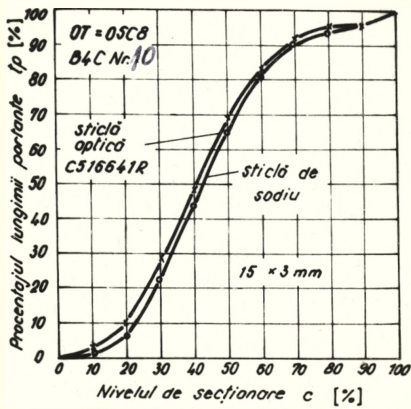


Fig. 7.40

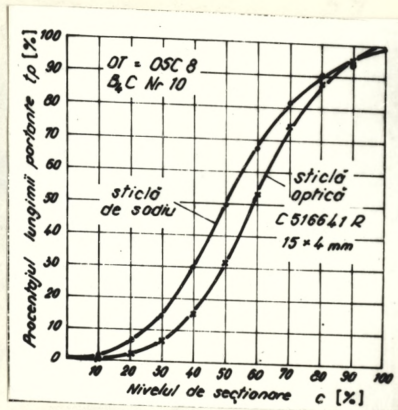


Fig. 7.41

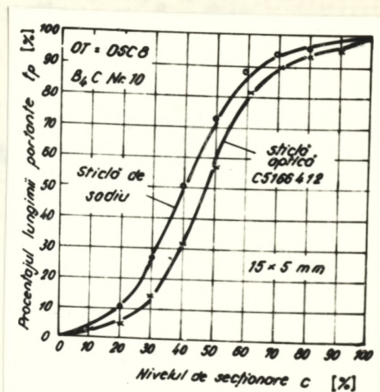


Fig. 7.42.

\bar{x} și abaterea medie pătratică s (abaterea standard) a măsurătorilor în tab. 7.11 se dau și intervalele de încredere $[m_1; m_2]$ care acoperă cu o probabilitate de 95 % valorile medii determinate experimental.

Din experiențe s-a constatat că există diferențe nu prea mari cu adâncimea de prelucrare a procentajului lungimii portante. La adâncimi mai mari diferențele sînt neglijabile. Măsurătorile de mai sus s-au efectuat la aceeași adâncime de prelucrare ($h = 0,5$ mm). De asemenea nu există diferențe mari între curbele de portanță atunci cînd variază forța statică între $F_s = 12...18$ N.

Autentul explicit variația procentajului lungimii portante cu adâncimea de prelucrare prin gradul mai mare de fîrînitare a granulelor din fracțiunea mare a granulației, avînd cele mai mari disensiuni, în primele momente ale prelucrării, deci la adâncimi mici, urmînd apoi o stabilizare la adâncimi ceva mai mari.

Mărirea forței statice duce la o creștere a adâncimii de pătrundere a abrazivului, golurile fiind mai largi decît proeminențele, obținîndu-se un profil cu structură mai fragilă decît la forțe statice mai mici, înăd diferențele sînt neglijabile.

Granulația abrazivului are o influență hotărîtoare asupra calității suprafeței generate. Pentru a pune în evidență influența granulației asupra rugozității profilului s-au prelucrat sticle de sodiu cu scule prismatice $a, b = 15,4$ mm din OL 37, generînd cavități dreptunghiulare cu adâncime mică $0,5...1$ mm. Cu abrazivi SiC Nr. 4; 6; 8; 10; 12 și 16 STAS 1755-76. Rezultatele sînt date în tab. 7.14 ca medie a 5 măsurări fiecare. Se observă în fig. 7.43 că abrazivul cu granulația mai mică are influență mai bună asupra capacității portante a suprafeței decît abrazivul mai gros.

Cu creșterea granulației se mărește și rugozitatea suprafeței R_a (fig. 7.44).

În fig. 7.45 și 7.46 sînt prezentate profilogramele pentru două probe.

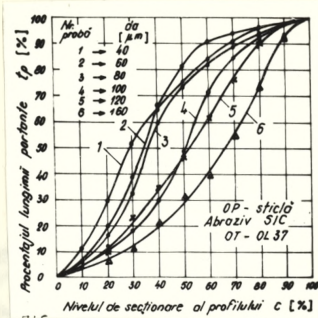


Fig. 7.43

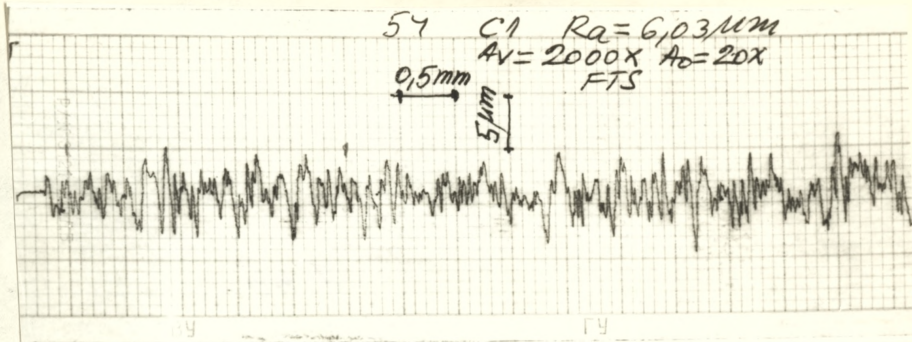


Fig. 7.45

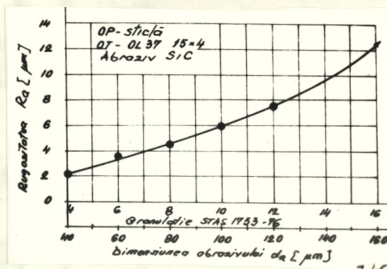


Fig. 7.44

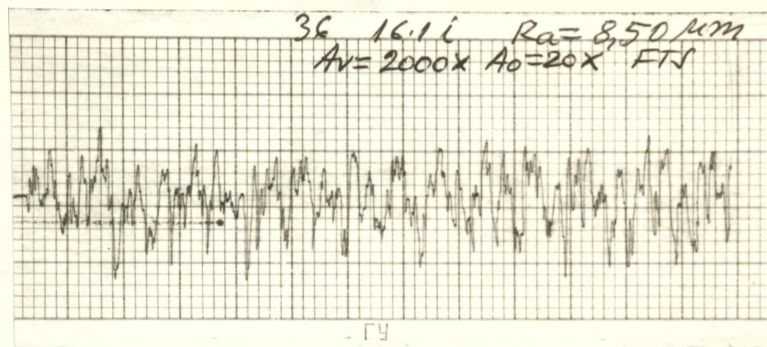


Fig. 7.46

Profilogramele au fost ridicate la amplificarea verticală $A_v = 2000 \times$ și amplificarea orizontală $A_o = 20 \times$ (viteza palpatorului $v_p = 6$ mm/min și viteza benzii de hirtie $v_b = 120$ mm/min), profil filtrat "trece sus" cu pasul de tăiere $\lambda_R = 2,5$ mm, lungimea de bază $l = 2,5$ mm. Coeficientul de comprimare longitudinală a profilegramei

$$K_c = \frac{A_v}{A_o} = \frac{2000}{20} = 100.$$

În tab. 7.13 se dau parametri de rugozitate și procentajul lungimii portante pentru diferite sticle optice cu micropulbere de SiC-M 20 și SiC-M 40, plăcuțe de carbură metalică P 30: safir, ferită, cuarț.

7.6.4. Studiul cu ajutorul funcțiilor aleatoare a rugozității suprafeței

Deși fiind caracterul aleator al profilului de rugozitate la prelucrarea prin eroziune ultrasonică cu abraziv liber în suspensie, neexistând urme orientate periodice ca în cazul aşchierii cu scule svind tăişuri cu o geometrie bine definită, se poate aplica un studiu statistic pentru o apreciere globală a rugozității. Acest studiu constă în determinarea funcției de autocorelație normalizată $f(\tau)$ și a densității spectrale (de putere) a rugozității $S(\omega)$ [95], [199], [158] [159], [67], care permite determinarea și a altor parametri pe care nu-i indică direct aparatul sau ar necesita un studiu prea laborios

Stielm optiel op - C516641R ei stielm de nodju of 0°C 0: 15x4 mm: 3, C-Mr.10 Tabelul 7.12

Proba	R _e µm	n	Y _{pmax} µm	Y _{vmax} µm	R _y µm	C ₂ x												
						10	20	30	40	50	60	70	80	90				
	8,2	13	7,5	8,0	13,5	0,7	2,5	6,2	15,0	31,6	53,5	74,2	88,6	93,1				
Stielm	5,2	14	6,8	7,3	14,1	0,7	2,6	6,3	15,1	31,9	53,9	74,7	88,8	93,1				
optiel	2,1	13	3,5	7,6	13,1	0,7	2,4	6,1	15,3	32,2	54,6	74,7	88,5	93,2				
C516641R	2,2	13	6,4	7,7	14,2	0,6	2,4	6,2	15,0	32,4	53,9	74,7	88,2	93,2				
	2,3	14	7,3	7,7	15,0	0,7	2,4	6,3	14,9	31,9	53,2	74,5	88,0	93,2				
Y	2,20	13,80	6,80	7,66	14,26	0,68	2,46	6,22	15,06	32,00	53,84	74,54	88,34	93,18				
σ	0,07	0,83	0,73	0,23	0,92	0,04	0,08	0,08	0,15	0,30	0,52	0,71	0,24	0,08				
	2,7	21	7,6	9,7	17,2	1,4	6,1	14,4	30,1	50,3	67,7	81,9	91,2	94,7				
Stielm	2,8	18	7,2	9,0	16,2	1,7	6,5	14,9	29,8	49,8	67,6	82,1	91,0	94,6				
de	2,7	18	7,1	9,9	17,0	1,6	6,0	15,1	30,4	50,0	67,7	81,0	91,0	94,6				
nodju	2,5	16	8,1	9,5	17,6	1,8	6,2	14,7	30,1	49,8	67,6	82,4	91,1	94,6				
	2,6	17	7,2	9,0	16,2	1,4	6,3	14,4	30,3	50,3	67,5	82,3	91,0	94,6				
Y	2,62	18,00	7,44	9,62	16,66	1,58	6,22	14,70	30,14	50,04	67,58	82,06	91,06	94,62				
σ	0,08	1,87	0,61	0,40	0,63	0,17	0,19	0,30	0,23	0,23	0,16	0,32	0,08	0,04				

152

STIELEH optedel CP - CS16641R 91 stieleh de sedin: 07 - 022 0, 20x3 mm: B,C Nr.10 Tabelul 7.13

Proba	n ₀	n	Y _{pmax}		R _y		g									
			µm	µm	µm	µm	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
	2,2	13	6,9	14,1	21,0	1,1	4,8	14,4	31,2	57,2	81,1	89,7	93,2	95,5		
stieleh	2,3	13	7,7	13,6	21,3	1,2	4,8	14,4	31,6	57,0	80,8	89,7	93,5	95,4		
Optieleh	2,3	11	7,5	13,3	20,8	1,1	3,9	14,4	32,0	57,4	80,7	89,8	93,0	95,3		
CS16641R	2,4	14	4,8	13,1	17,9	1,2	4,3	12,9	31,4	57,2	80,6	89,6	93,1	95,2		
	2,3	12	4,9	13,0	14,9	1,1	4,2	13,3	31,0	56,6	80,9	89,8	93,0	95,1		
Y	2,30	12,50	6,36	13,42	19,18	1,14	4,40	13,68	31,60	57,08	80,82	89,72	93,12	95,30		
Z	0,07	1,23	1,41	0,44	2,79	0,09	0,39	0,72	0,31	0,30	0,19	0,08	0,13	0,15		
stieleh	2,1	8	4,5	9,5	14,0	2,3	10,6	27,1	51,5	72,6	88,4	94,6	96,3	96,6		
00	2,0	9	5,0	8,7	13,7	2,2	10,9	26,8	50,7	72,8	88,0	94,6	96,1	96,5		
sediu	2,0	12	4,8	8,9	13,3	2,4	10,5	27,1	50,9	72,9	88,1	94,7	96,3	96,5		
	2,0	9	4,8	9,8	14,6	2,4	10,4	27,0	51,2	73,0	88,2	94,6	96,2	96,6		
Y	2,02	9,40	4,80	8,94	13,74	2,30	10,60	27,04	51,06	72,88	88,20	94,64	96,24	96,56		
Z	0,04	1,21	0,18	0,60	0,59	0,10	0,18	0,15	0,30	0,19	0,15	0,09	0,08	0,09		

pentru determinarea lor din profilograme. Prin intermediul parametrilor statistici ai rugozității se pot trage concluzii și asupra stabilității procesului de creziune ultrasonică și influența diferiților factori asupra lui.

Sudait I.A. prezintă în [199] o metodă expeditivă de determinare a funcției de autocorelație și a densității spectrale a rugozității în funcție de punctele particulare ale profilului de rugozitate determinate pe profilograme. Această metodă s-a aplicat și în test pentru prelucrarea prin creziune ultrasonică a celor 6 probe date în tabelul 7.14, în funcție de granulația abrazivului.

Această metodă prezintă succint în cele ce urmează. Înălțimea rugozității dată prin ordonatele sale curente $V(x)$ față de linia de referință (linia medie) (fig.7.39) poate fi considerată o funcție aleatoare, care pentru un proces tehnologic stabil are o distribuție după legea normală (Gauss-Laplace)

Se consideră în mod ideal că $V(x)$ ca funcție aleatoare este staționară, adică valoarea ei medie este constantă, este și omogenă și izotropă, în acest caz funcția de autocorelație $K(Z)$, care ne dă legătura între ordonatele $V(x)$ în sens probabilistic, depinde numai de distanța $Z[\mu m]$ între ordonatele profilului măsurată în direcție orizontală, în lungul profilului. Se se exprimă prin relația:

$$K(Z) = \sigma^2 \cdot \rho(Z) \quad (6)$$

în care σ este abaterea medie pătratică a profilului (abaterea standard) iar $\rho(Z)$ - funcția de autocorelație normală cu valori $\rho = 0..1$.

Cu cât procesul este mai aleator, haotic, cu atât funcția $\rho(Z)$ trebuie să scadă mai repede. Aproximarea lui $\rho(Z)$ s-a făcut prin diferite funcții exponențiale scăzătoare și trigonometrice, 95 , care să imite proprietățile funcției ρ , monotone scăzătoare sau de tipul unei oscilații cu amortizare. S-au analizat funcțiile de tip oscilație armonică cu amplitudine constantă, care apare în cazul osculațiilor și la aşchieră cu urme regulate, care nu sînt adecvate pentru un studiu statistic. S-au admis aproximații pentru $\rho(Z)$ de forma:

$$\rho(Z) = C_1 e^{-\alpha_1 Z^2} + C_2 e^{-\alpha_2 Z^2} \cos \omega_2 Z \quad (7)$$

cele mai uzuale fiind expresiile date în tab.7.16 199 cu un parametru (α) sau maxim doi (α și ω_2). Pentru un proces aleator numărul mediu n al punctelor particulare (de ordinul n) pe unitatea de lungime se determină cu relația:

$$n = \frac{1}{\pi} \left(- \frac{\rho'(z)}{\rho(z)} \right)^{1/2} \quad (8)$$

in care $f^{(2n+2)}(0)$ și $f^{(2n)}(0)$ sînt derivatele de ordinul $(2n+2)$ respectiv $(2n)$ ale funcției $f(z)$ pentru $z = 0$. Aceste puncte particulare sînt date de:

$$w = a = \frac{1}{\pi} \left(-f^{(2)}(0) \right)^{1/2} \quad (9)$$

$$a = \frac{1}{2\pi} \left(-\frac{f^{(4)}(0)}{f^{(2)}(0)} \right)^{1/2} \quad (10)$$

$$a = \frac{1}{\pi} \left(-\frac{f^{(6)}(0)}{f^{(4)}(0)} \right)^{1/2} \quad (11)$$

Funcții de autocorelație normale și densități spectrale

nr. funcție	Funcție de autocorelație normală $f(\xi)$	Densitatea spectrală $S(\omega)$ raportată la $S(\omega)$	Parametri	Intervalul de autocorelație λ	Amplitudă λ
①	$\frac{1}{1+\xi^2}$	$\frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{\omega^2}{2}}$	$\alpha_0 = \frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{\pi}}{2}$	$0 \dots 1$
②	$e^{-\alpha \xi }$	$\frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\pi}{2}} e^{-\frac{\omega^2}{2\alpha^2}}$	$\alpha_0 = \frac{1}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$0 \dots 2$
③	$\frac{\cos \omega_0 \xi}{1 + \alpha \xi^2}$	$\frac{1}{2\pi} \left(c \frac{\omega + \omega_0}{\sqrt{c^2 + \omega^2}} + \frac{\omega - \omega_0}{\sqrt{c^2 + \omega^2}} \right)$	$\alpha_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\beta^2 + 4} - 1$ $\alpha_1 = \sqrt{\beta^2 + 4} \sqrt{\beta^2 + 4}$	$\frac{1}{2\pi} e^{-\frac{\omega^2}{2}}$	$0 \dots 2$
④	$e^{-\alpha \xi } \cos \omega_0 \xi$	$\frac{1}{2\pi} \left(c \frac{\omega + \omega_0}{\sqrt{c^2 + \omega^2}} - \frac{\omega - \omega_0}{\sqrt{c^2 + \omega^2}} \right)$	$\alpha_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\beta^2 + 4} - 1$ $\alpha_1 = \sqrt{\beta^2 + 4} \sqrt{\beta^2 + 4}$	$\frac{1}{2\pi} e^{-\frac{\omega^2}{2}}$	$0 \dots 2$

Tabelul 7.16

in care $n_{(0)} = n$ - este numărul de intersecții (zerouri) ale liniei medii cu profilul de rugozitate, pe unitatea de lungime; m - numărul de maxime (ale profilului și maxime locale) pe unitatea de lungime, a - numărul punctelor de inflexiune ale profilului pe unitatea de lungime. Pe profilegramă se determină pe o lungime de bază $l = 2,5$ cm (pe profilegramă $l \cdot A_0 = 2,5 \cdot 20 = 50$ mm), numărul de zerouri n' , de maxime m' și a punctelor de inflexiune a' apoi se determină $n = n'/l$; $m = m'/l$ și $a = a'/l$ (tab.7.16) (se ia media a trei segmente). Cu ajutorul parametrilor dimensionali:

$$\lambda = \frac{n_{(0)}}{n} \quad (12)$$

$$\lambda_s = \frac{n_s(0)}{S} \quad (13)$$

se determină din fig.7.47b tipul funcțiilor f și S din tabelul 7.16 [199]. Intervalul de variație a acestor factori este $\lambda = 0 \dots 2$, și $\lambda_s = 0 \dots 1,0$. Acești parametri caracterizează cât de alester este profilul de rugozitate. Limitele inferioare arată caracterul cel mai alester, iar limitele superioare profilul fiind mai puțin alester, el tinde spre un profil regulat cu pas uniform.

Intervalul de corelație K_k definit prin relația:

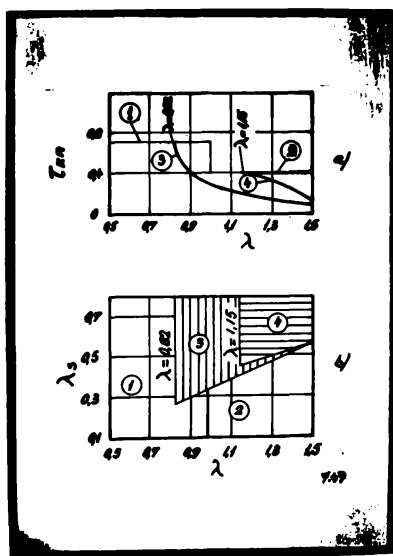
$$r_k = \int_0^{\infty} f(z) \cos kz \quad (14)$$


Fig. 7.47

are importanță deosebită, deoarece el caracterizează viteza de scădere a funcției de autocorelație $f(\tau)$. El este egal cu lățimea unui dreptunghi care are înălțimea egală cu unitatea și aria egală cu aria de sub curba $f(\tau)$. Intervalul de corelație se poate exprima sub formă normată, adimensională:

$$\tau_{kn} = \frac{\tau_k}{n(\sigma)} \quad (15)$$

a cărui valoare nu depinde de $n(\sigma)$ putându-se compara diferite funcții $f(\tau)$. Uneori când se cunoaște λ și τ_{kn} , tipul funcțiilor $f(\tau)$ și $S(\omega)$ se alege din fig. 7.47a.

Parametrii din ecuațiile date în tab. 7.16 se determină cu formulele:

$$\alpha = \pi^2 n^2(\sigma) \alpha_n ; \quad \text{mm}^2 \quad (16)$$

$$\omega_{1, 2} = \pi n(\sigma) \omega_n ; \quad \text{mm}^2 \quad (17)$$

iar intervalul de corelație:

$$\tau_k = n(\sigma) \cdot \tau_{kn} \quad (18)$$

Argumentul densității spectrale a rugozității $S(\omega)$, este $\omega = 2\pi f$, rad/msec, mm^{-1} - pulsația profilului de rugozitate. Notațiile s-au păstrat și la studiul rugozității cu cele analoge de la funcțiile aleatoare variabile în timp cunoscute din mecanică, electrotehnică, teoria reglării automate etc., timpul s-a înlocuit cu constanta τ [mm] în lungul profilului rugozității, iar viteza unghiulară, pulsația, cu pulsația profilului, respectiv f , mm^{-1} frecvența profilului rugozității.

Semnificația fizică a funcțiilor $f(\tau)$ și $S(\omega)$ rămâne aceeași ca și în domeniul timpului.

Din tab. 7.16 se observă că pentru $\lambda = 0,82$, respectiv $\lambda = 1,15$ funcțiile cu doi parametri (5) și (4) trec în cele cu un singur parametru (1) și (2), deoarece pentru ultimele $\omega_n = 0$, profilul devine aleator și va fi caracterizat de o funcție monotonă scăzătoare de tip exponențial (2) sau parabolic (1). Dacă λ tinde spre $\lambda = 2$, profilul devine din ce în ce mai regulat, $\alpha_n = 0$ și $\omega_n = 1$, funcțiile $f(\tau)$ devenind armonice, de tip cosinusoidal. Când λ tinde spre 0,82 respectiv 1,15, τ_{kn} tinde spre valori constante $\sqrt{2}/2 = 0,707$ pentru (1) respectiv $(1/2) \cdot \sqrt{2/\pi} = 0,4$ pentru (2) deoarece $\omega_n = 0$, iar când λ tinde spre ∞ , τ_{kn} tinde spre zero, pentru că $\omega_n = 1$ și $\alpha_n = 0$. Pentru calcule orientative se aleg aproximații pentru $f(\tau)$ de tipul (1) sau (2) ca fiind cele mai simple, iar pentru cercetări mai pretentioase formele (3) sau (4). În concluzie se

poate aprecia că în funcție numai de λ se pot alege aproximații pentru $f(\zeta)$ numai (1) sau (2) iar în funcție de perechea de valori λ și λ_2 se pot alege (3) sau (4).

Precizia determinării rugozității, structura profilului său, depinde de concordanța între funcția reală și cea aproximată. Așa cum arată cercetările [199], [95], [67], [158], în practica inginerescă o astfel de precizie este suficientă.

Marele avantaj al studiului statistic al rugozității suprafețelor, așa cum s-a mai amintit, plecând de la studiul punctelor particulare $n(\sigma)$, n , σ ale profilogramelor ridicate experimental, este că se pot deduce și alți parametri ai rugozității (ai structurii ei) neprecizată de aparate sau profilograme:

Abaterea medie patretică a profilului:

$$\sigma_z = \sigma = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_n \quad (19)$$

Maxa medie de rotunjire a vârfului proeminențelor:

$$r = \frac{1}{2\pi^2 \sigma_n \cdot n(\sigma)} \quad (20)$$

Pasul mediu al proeminențelor: $\lambda = \frac{1}{n}$ (21)

Pasul mediu al neregularităților măsurat pe linia medie:

$$\lambda_n = \frac{1}{n(\sigma)} \quad (22)$$

Unghiul mediu de inclinare a profilului față de linia medie:

$$\theta = \arctg(4\sigma_n \cdot n(\sigma)) \quad (23)$$

După datele din tab.7.17, luând în prindă aproximație ca parametru numai pe $\lambda = 1,024 \dots 1,42$ din fig.7.47b rezultă funcțiile de tipul (2):

$$f(\zeta) = e^{-\alpha \zeta^2} \quad (24)$$

$$s(\omega) = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{\omega^2}{4\alpha} \quad (25)$$

având $\alpha_1 = 4441,32$; $\alpha_2 = 3980,21$; $\alpha_3 = 3535,92$; $\alpha_4 = 1819,16$; $\alpha_5 = 1670,72$; $\alpha_6 = 1499,91 \text{ cm}^{-2}$. Acestea s-au calculat și redat grafic în fig.7.48. Numărul de pe curbe coincide cu numărul probelor din tab.7.14 pentru diferite granulații ale abrazivului.

Pentru perechile de valori λ și λ_2 din tab.7.17 au rezultat din fig.7.47b funcțiile (4) și respectiv (5) redacte în fig.7.49: 7.50 și 7.51 respectiv 7.52.

În tab.7.18 sînt redăți și parametrii rugozității calculați cu relațiile prezentate mai sus cît și intervalele de corelație după

Tabelul 7.17

Nr. p'	m'	s'	$\frac{p-1}{m-1}$	$\frac{s-1}{m-1}$	$\lambda = \frac{p}{m}$	$\lambda = \frac{s}{m}$	$\alpha = \frac{p}{m}$	$\omega = \frac{s}{m}$	$\gamma = \frac{p}{m}$	$\alpha = \frac{p-2}{m-2}$	$\omega = \frac{s-2}{m-2}$	Nr. puse-		
1	75	63	121	30	25	48,4	1,200	0,620	0,333	0,577	0,380	297,9	34,35	4
2	71	50	103	28,4	20	42,2	1,420	0,637	0,143	0,889	0,188	1143,1	79,32	4
3	69	48	97	26	19,2	38,8	1,354	0,670	0,180	0,759	0,276	1200,9	65,34	4
4	48	46	93	19,2	18,4	38	1,043	0,505	0,292	0,545	0,280	1062,4	36,90	3
5	46	43	81	18,4	17,2	32,4	1,070	0,368	0,274	0,672	0,264	915,36	36,85	3
6	43	42	73	17,2	16,8	29,2	1,024	0,389	0,305	0,624	0,292	891,27	35,72	3

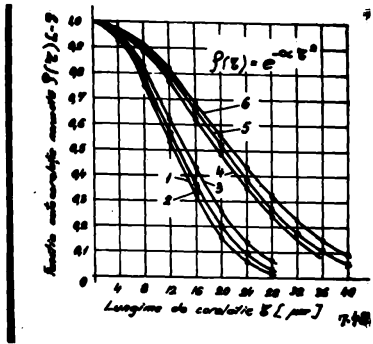


Fig. 7.48

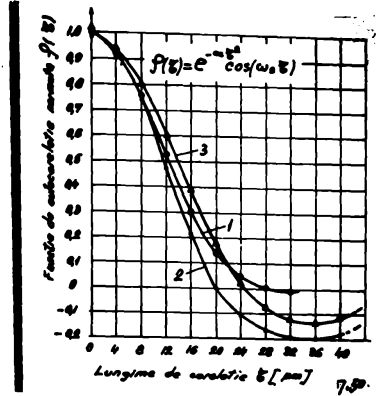


Fig. 7.49

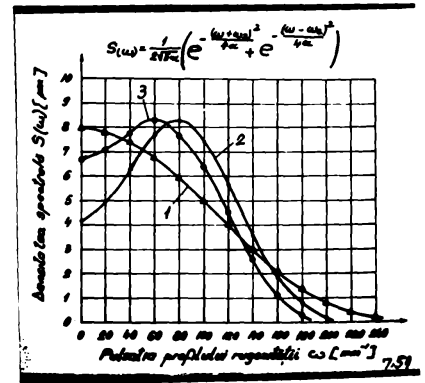


Fig. 7.50

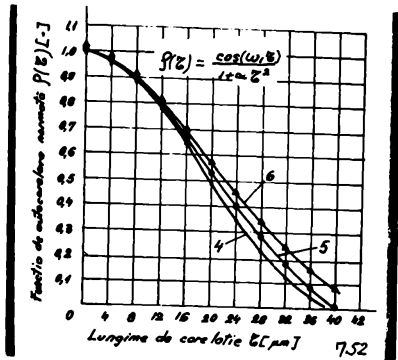


Fig. 7.51

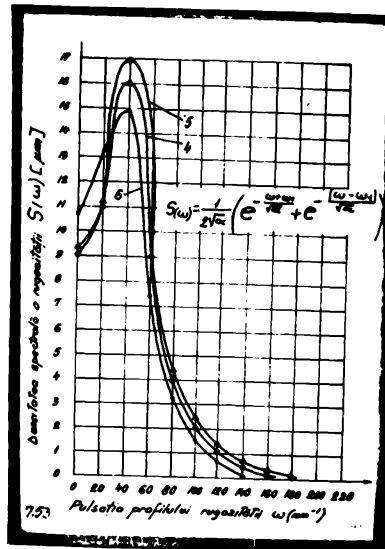


Fig. 7.52

Tipurile de funcții (2), (3) și (4).

Calculul s-a efectuat cu ajutorul calculatorului electronic SIECLAIR XI SPECTRAM, din pînă un program în limbaj BASIC, a cărui organizație este redată în fig. 7.53.

Judecînd influența granulației asupra rezoluției suprafeței, de exemplu după aproximația de tipul (2)

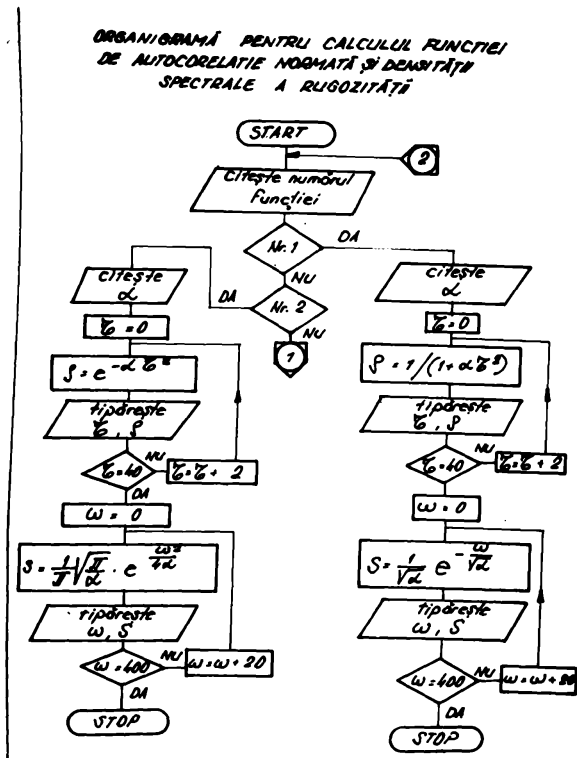
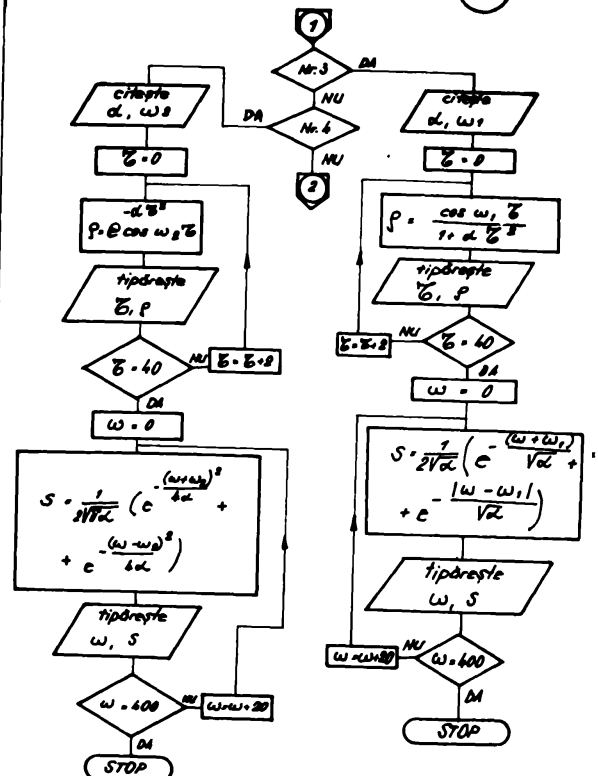


Fig. 7.53 a, b



Tabelul 7.18

Nr. probei	R_q μm	R μm	S μm	R_m μm	θ °	Z_k μm (2)	Z_k μm (3,4)
1	2,76	23,52	38,46	66,67	14,78	13,33	12,66
2	4,51	24,77	50,00	70,42	22,24	14,06	6,62
3	5,51	28,06	52,08	76,92	24,59	15,58	10,54
4	7,56	33,73	54,35	104,16	24,85	20,83	15,24
5	10,98	18,27	58,14	108,69	32,81	21,74	15,38
6	15,25	14,40	59,52	116,28	41,05	23,25	17,00

Judecând influența granulației asupra rugozității suprafeței, de exemplu după aproximația de tipul (2) (fig.7.48) se observă că funcția de autocorelație normată $\rho(r)$ a rugozității este puternic influențată de dimensiunea abrazivului. Structura profilului rugozității este cu atât mai dependentă de dimensiunea abrazivului cu cât granulația este mai mare.

Aceasta se observă atât prin intervalul de corelație Z_k (2) (tab.7.18) cât și prin panta de înclinare a curbelor $\rho(r)$.

Suprafețele generate prin eroziune ultrasonică cu abraziv mai fin (curbele 1, 2, 3) au o rugozitate cu caracter mai alăstăr decât cele generate cu abraziv gros. Graficele mai reflectă și faptul că procesul de prelucrare nu a decurs în condiții identice pentru probele 1, 2, 3 și respectiv 4, 5, 6. Abrazivii notați cu 1, 2, 3 și respectiv 4, 5, 6 au fost obținuți din țărțe diferite la întreprinderea "Carbochim" Cluj-Mareș.

Prin aproximațiile (3) și (4) cu perechile de valori λ și λ_s (fig.7.49; 7.50) și (fig.7.51 și 7.52) ies în evidență câteva detalii de finețe a modului cum s-a desfășurat procesul de prelucrare. Astfel rugozitatea obținută la proba 2 (M.C Nr.6) (fig.7.49) are caracter mai alăstăr decât abrazivul mai fin (Nr.4) utilizat la proba 1. Abrazivul cel mai gros la proba 6 (fig.7.52) nu a fost utilizat la întraga sa capacitate (raportul optim între dublul amplitudinii oscilației obiectului de transfer și dimensiunea funcției principale a granulației $2 \int_m / \lambda_s$), el fiind înlocuit de abrazivi mai fini la probele 5 și 4.

Pentru intervale de corelație mai mari de $Z_k = 6,62...17 \mu m$ (tab.7.18), în aproximațiile (3) și (4) structura profilului de rugozitate devine mai alăstăre, independentă față de granulația abrazivului. Din tabel se mai observă că unghiul de pantă θ al flancu-

zilor proeminențelor crește, iar raza de rotunjire a vîrfului proeminențelor scade cu creșterea granulației ceea ce dă o structură mai puțin robustă, concluzie confirmată de altfel și prin curba de pertanță a profilului.

În concluzie se poate afirma că prin studiul statistic se poate controla procesul tehnologic de eroziune abrazivă ultrasonică la fazele de finisare a suprafețelor.

CAPITOLUL 8

8. CONCLUZII GENERALE

Din conținutul tezei se evidențiază următoarele concluzii și contribuții originale ale autorului la prelucrarea prin eroziune ultrasonică a obiectelor fragile și dure:

I. În domeniul cercetării fundamentale

1.) Autorul efectuează un studiu experimental și teoretic asupra prelucrabilității sticlelor optice de tip crea normal 151604101 R 100, creș ușor LA 105 și a sticlei de sodiu, determinând criteriul de fragilitate k_p prin metoda măsurării durității sub microscopul (197-3), dănd ecuațiile de regresie și coeficienții de corelație pentru k_p în funcție de lungimea fisurilor.

2.) Pe baza unui studiu teoretic a modelelor mecanice de tipul barelor cu secțiune variabilă excitate armonic, se prezintă relațiile de calcul a concentratezării ultrasunice de formă exponențială, catinoidală, conică și cilindrică în trepte. Se scriu relațiile adimensionale și se întocmesc diagrame utile la proiectarea și verificarea concentratezării ultrasunice.

3.) Se studiază teoretic și se dau diagrame pentru amplitudinea deplasării și tensiunii mecanice, atât în valori absolute cât și adimensionale, avînd un caracter general de aplicabilitate pentru aceeași formă (geometrică) a concentratorului.

4.) Pentru prima dată, după cunoștințele noastre, se analizează rugozitatea suprafeței generate prin eroziune ultrasonică cu ajutorul funcțiilor aleatoare de autocorelație normală și densității spectrale a rugozității. Cu ajutorul lor se poate judeca gradul de influență a diferiților factori asupra rugozității și stabilității procesului de eroziune ultrasonică (granulația abrazivului, forța statiei de avans, circulația suspensiei în spațiul de lucru etc.).

5.) Cu ajutorul funcțiilor aleatoare ale statisticii matematice plecînd de la profilogramele suprafețelor generate prin eroziune ultrasonică, pe baza punctelor particulare ale profilului: numărul de intersecții ale liniei medii cu profilul, numărul de maxime și numărul de minime de inflexiune, permiterea de lungime; se pot determina relativ ușor parametrii de finete a profilului: raza de rotunjire a vîrfului proeminenței, unghiul de pantă a profilului, pasul mediu etc.

Acești parametri nu sînt dați de aparatura usuală de măsurare a rugozității, iar prin alte metode ar necesita cercetări laborioase și aparatură complexă de investigație.

6.) Transductorul magnetostriktiv tip pachet cu două coloane a fost asimilat cu un oscilator mecanic pentru care se dau ecuațiile de oscilație, condiția de rezonanță. Pe baza lor autorul scrie expresii dimensionale și construiește diagrame (neexistente în literatură) care upurează proiectarea și verificarea dimensiunilor.

7.) Se fac aprecieri asupra puterii debitate de transductor și se analizează regimurile de încălzire a transducerului cît și condițiile de acord ale acestuia cu sarcina.

8.) Au fost realizate și verificate trei organigrame și programe în limbaj BASIC-SINCLAIR, rulate pe calculatorul SPECTRUM-2M, pentru calculul celor patru tipuri de concentrație, calculul transducțiilor și determinarea funcțiilor de autocorelație normalizată și densității spectrale (de putere) a rugozității.

9.) Se elucidează unele fenomene privind prelevarea de material la eroziunea ultrasonică a obiectelor din sticlă optică și sticlă de sodiu cu suspensie abrazivă liberă. Se analizează rolul jucat de agentul eroziv, particulele abrazive, cavitația ultrasonică și alte efecte, ponderea lor, rolul factorilor acustici, a forței statice de avans condițiile de circulație a suspensiei etc. Se dau limitele și căile de dezvoltare ale procesului.

11. În domeniul cercetării aplicative

10.) S-a determinat prin măsurări procentajul lunginii portante a profilului rugozității suprafețelor generate prin eroziune ultrasonică la piese din sticlă optică de tip cron normal C516641R: K 100: cron ușor LK 103, în comparație cu sticla silico-calco-sodică obișnuită care este un material etalon la prelucrarea prin eroziune ultrasonică. Se analizează principalii factori care influențează capacitatea portantă a suprafeței: granulatia abrazivului, forța statică de avans, adîncimea de prelucrare, etc. Portanța suprafeței are influență hotărîtoare asupra rezistenței la uzură a suprafețelor în mișcare relativă și asupra posibilităților de reținere de lichid.

11.) Se prezintă parametri de profil ai rugozității și procentajul lunginii portante la prelucrarea prin eroziune ultrasonică și la alte materiale fragile și dure ca de exemplu: carburi metalice marca P 30: ferite, safir artificial, cuarț (tab.7.15).

12.) Se cercetează experimental factorii care influențează uzura obiectului de transfer (scula) precum și influența acestuia asupra preciziei formei geometrice, dimensionale și calității suprafeței. Se dau soluții practice de micșorarea erorilor și a cievirilor la intrarea și ieșirea sculei din piesă.

13.) Pe baza unor lanțuri de dimensiuni se conduc fersulele pentru dimensionările obiectelor de transfer ținând cont de toleranța piesei, granulația abrazivului și interstițiul lateral și frontal, determinat în prealabil ca o medie a 4-5 încercări experimentale în aceleași condiții.

14.) S-a cercetat uzura obiectelor de transfer din diferite materiale (OL 37; OLC 45; OSC 8; R_p 3) la eroziunea ultrasonică a sticlei de sodiu obținându-se uzuri mici la R_p 3 și OSC 8.

Din studiul metalografic a stratului de la suprafața obiectelor de transfer uzate, arată o creștere ușoară a durității sub microsar-cină din interior spre suprafața uzată, din cauza întăririi (ecrușării) datorită șocurilor transmise granulelor, și deformării ale grăunților cristalini față de direcția vibrației longitudinale. Nu s-au observat transformări structurale.

15.) Au fost realizate patru blocuri ultrasonice experimentale: BU-NI^{unu} cu transductor din tele de nichel și trei cu transductoare din ferite: BU-1; BU-2; BU-3.

Variantele BU-NI, BU-2 și BU-3 au o celeasă intermediară în $\lambda/2$ cu concentratori schimbabili prin înșurubare, iar la BU-1 concentrato-rul conic este lipit direct pe ferită.

16.) S-au realizat mai multe concentrate de diferite forme (exponențiale, catenoidale, conice, cilindrice în trepte) din oțel OLC 45 și unele din duraluminul o parte din acestea au fost experi-mentate în cadrul lucrărilor. Pentru cele exponențiale și catenoidale se dau regimurile de așchiere și programe de strunjire de finalizare pe strunguri cu comandă numerică.

17.) Autorul a colaborat la două contracte de cercetare științifică încheiate între Institutul Politehnic "Traian Vuia" Timișoara înscutat la catedra TCM, și beneficiarii Intreprinderea Conducători Electrici Smalțai Zalău pentru o mașină de finisat filiere și accesorii de ascuțire, respectiv Institutul de Cercetări Electronice București pentru o mașină de prelucrat nișuri de ferită și alte mate-riale fragile.

18.) Din cercetările efectuate se desprinde recomandarea ca pen-

tru fiecare material al obiectului de transfer și al piesei, formă dată a alezajului sau cavității de prelucrare, granulatie a abrazivului, circulația suspensiei abrazive etc., se impune efectuarea unor prelucrări prealabile de testare a regimului de lucru, pentru a obține o anumită precizie dorită și în perspectivă se fac cercetări de introducere a autoacordului generatorului cu sarcină, a modelării matematice a procesului, a conducerii automate a prelucrării prin eroziune ultrasonică.

Prin cercetările efectuate în cadrul tezei, se aduce o modestă contribuție la măsurirea unor fenomene din spațiul de lucru la prelucrarea prin eroziune ultrasonică, prin elementele de calcul, formule, diagrame ale concentratoarelor și transductoarelor precum și prin tehnologia de prelucrare a unor obiecte din sticlă optică și sticlă de sâmb (regimuri de lucru, capacitate productivă, uzura sculei, precizia formei și a dimensiunilor, calitatea suprafeței). Cercetările constituie un ghid orientativ pentru introducerea în ramurile moderne ale industriei noastre a procesului de prelucrare dimensională prin eroziune abrazivă ultrasonică a materialelor fragile și dure.

BIBLIOGRAFIE

1. ABRAMOV O.V. - Kristalizatsiya metallov v uPtsarvu-kevom pole. Izd. Metallurgiya. Moskva 1972
2. ADITHAN M. - Effect of d/D Ratio of Tool Cross - Section on Machining Rate in Ultrasonic Drilling In: IE(I) Journal M.E. Vol.52 July 1972 pg.378-381
3. ADITHAN M., VENKATESH V. - Effect of System Parameters on Tool Wear in Ultrasonic Drilling. In: IE(I) Journal M.E. Vol.57, July 1976 pg.33-35
4. ADITHAN M., VENKATESH V. - An Appraisal of Wear Mechanisms in Ultrasonic Drilling In: Annals of the CIRP vol 27/1/1978 pg. 119-121
5. ANTON I. - Cavitația vol I., Editura Academiei RSR București 1984
6. ANTON I. - Cavitația vol. II, Editura Academiei RSR București 1985
7. ASTASHEV V.K. - Raschet sterzhnevyykh kontsentratorov s nelineynoy nagruzkoy. In: Akusticheskiy Zhurnal Tom. XXVII nr.6, 1981, pg.821-828
8. ATANASIU M. - Măsurarea productivității prelucrării cu ultrasunete în condiții de suprapresiune în spațiul de lucru. In: Construcția de mașini nr.2-3, 1977, pg. 143-147
9. ATANASIU M. - Optimizarea profilului concentratezelelor ultrasunice. In: I.P.Ch. Gheorgiu-Dej București Seria mecanică Tom XLII nr.4 1984, pg. 95-104
10. ATANASIU M., RADU C., ANZA GH. - Calculul și proiectarea profilului optim al concentratezelelor ultrasunice. In: Construcția de mașini nr.2-3, 1977 pg. 137-142

11. BARANOV S.G., ZADYGOV P.O. - Pritirka i dovedka poverkhnostey detaley mashin. Izd. Mashinostroenie. Moskva 1976.
12. BARICHKOV A.P. - Vibratsionnaya obrabotka detaley. Izd. Mashinostroenie. Moskva 1974
13. BALANEETH L. - Mechanical Impedance Transformers in Relative Ultrasonic Machining. In: Transactions of IRE, PGUE-2, 1955, pg. 23-33
14. BALTĂ P. - Sticle și aplicațiile ei actuale. Edit. Enciclopedică Română, București, 1969.
15. BALTĂ P. - Tehnologia Sticlei, Edit. Didact. și Pedagogică București, 1964
16. BAPYKOV A.V., TSEBARGKIY A. - Almaznoe sverlenie detaley iz trudno - obrabatyvayemykh nemetallicheskih materialov. Izd. Mashinostroenie Moskva 1980
17. BARANOV V.M. - Ul'trazvukovyye izmereniya v atomnoy tekhnike. Izd. Atomizdat Moskva 1975
18. BATUYEV G.S., GOLUBKOV YU.V., KHRINOV A.K., FEDOSOV A.A. - Inzhenerniye metody issledovaniya udarnykh protsessov. Izd. Mashinostroenie Moskva 1977.
19. BAYKALOV A.F. - V vedenie v teoriyu shlifovaniya materialov. Izd. Naukova Dumka. Kiev 1978.
20. BĂDĂRĂU E., GRUMĂZESCU M. - Bazele acusticii moderne Edit. Academiei RPR, București 1961
21. BĂDĂRĂU E., GRUMĂZESCU M. - Ultrasonica fizică și tehnică. Editura Tehnică București 1967
22. BEYTS V.L., KOCHIURA A.E., FEDOTOV A.I. - Kolebatel'nye sistemy mashinnykh agregatov. Izd. Leningradskogo Universiteta Leningrad 1979
23. BIRIN B.V., VOROB'EV I.K., DAVIDOV P.A. - Mekhanizatsiya abrazivnykh dovedochnykh i instrumental'nykh rabot. Izd. Mashinostroenie Moskva 1975.
24. BIRONI V.S. - Primenenie ul'trazvuka pri termi-

24. OLSH L. - ohekoj obrabotke metallov. Metallur-
giya Moskva 1977.
25. BIKOV V.Z., EFREMOV A. - Tehnologia prelucrării piesselor optice.
ZAKONNIKOV V.A., SALNIKOV Vol.1 și 2. Edit. Tehnică București
Iul.V., SEMIBRATOV M.N. 1977.
26. BLYUMENKRANTS D.L., - Oraschete diya ul'trazvukovykh ustano-
POLYAKOV Z.I. vok. In: Tehnologii neconventionale in
prelucrarea metalelor. Timisoara 1971,
pg. 473 - 479.
27. BOBBER R.J. - Underwater electroacoustic measurements
Naval Research Laboratory Washington
D.C. 1970.
28. BOGACHEV I.N. - Kavitatsionnoe razrushenie i kavitatsio-
nno - stoykie splavy. Izd. Metallurgiya
Moskva 1972.
29. BOSDANOV G.B. - Osnovy teorii i primeneniya ferritov
v tekhnike izmereniy i kontrolya. Izd.
Sovetskoe Radio Moskva 1967.
30. BOLEANU L. - Rezistența materialelor Lite IPTV
Timisoara, vol.II, 1973, vol.III 1975
31. BRESTAVETS A.V., - Ul'trazvukovaya ochistka radioappara-
KHUTORHENKO V.D. tury. Izd. Sovetskoe Radio Moskva 1974
32. BROWN E. - Progrese recente in aplicarea ultrasu-
netelor la procesele de prelucrare. IN:
Prelucrarea metalelor cu ultrasunete
I.C.D.T. București 1966 pg. 60-93.
33. BUKHOVSKY I.I. - Fundamentals of vibration engineering.
Mir. Publishers Moscow 1972
34. BUZDUGAN GH. - Măsurarea vibrațiilor mecanice. Editura
Tehnică București 1964.
35. BUZDUGAN GH., FETCU L. - Vibrațiile sistemelor mecanice. Edit.
RADES M. Academ. RSR București 1975
36. BUZDUGAN GH., FETCU L. - Vibrații mecanice Edit. Didactică și
RADES M. Pedagogică București 1979
37. BUZDUGAN GH., MIHAI- - Măsurarea vibrațiilor. Edit. Academiei
LESCU E., RADES M. RSR, București 1979.

38. CAMP. I. - Underwater acoustics. Wiley- Interscience New-York 1970.
39. CEAUSDESCU ELENA - Cuvintare la incheierea lucrărilor Congresului Stiintei și Invățământului Editura Politică București 1985.
40. CEAUSDESCU NICOLAE - Cuvintare la Congresul Stiintei și învățământului, 28 nov.1985, Editura Politică, București 1985
41. CEAUSDESCU NICOLAE - Raport la cel de-al XIII-lea Congres al Partidului Comunist Român, Editura Politică 1984, Buc.
42. CEAUSDESCU NICU, POPESCU I. - Tehnologii neconvenționale vol.I Editura Serisul Românesc Craiova 1982
43. CEDIGHIAN S. - Ferite Editura Tehnică București 1966.
44. CEDIGHIAN S. - Materiale magnetice. Editura Tehnică București 1967
45. CHEPOVETSKIY I.KH. - Mekhanika kontaknogo vzaimodeystviya prialmaznoy obrabotke Izd. Naukova Dumka Kiev 1978.
46. CHORNOHOV T. KH. - Kristallizatsiya metallov i splavov v ul'travukovom pole. Izd. Nauka Alma-Ata 1980-
47. CIOCIRBIA C., DRĂGULANESCU E., DRĂGULANESCU I. - Aliaje dure sintetizate din carburi metalice, Editura Tehnică București 1985.
48. CISMĂN A., ROTHENSTEIN B.F., POLICEC A. - Fenomene fizice în metale feromagnetice solcitate. Editura Academiei RSR, București 1969.
49. CIUCU G., CRAIU V. - Introducere în teoria probabilităților și statistică matematică EDP. București 1971.
- 49a. CLEȘIU S.R. - Contribuții privind utilizarea aliajului AlCu4Mg1,5Mn în constr. sonotrodurilor exponențiale în:

49. DIACONU P.E., IANULESCU I. - Ultrascustica 86, caietul 22, Timișoara 1986, pg. 83-88
50. CONSTANTINESCU P., NEMES A. - Controlul prin ultrasunete al metalelor și fabricărilor sudate. Editura MCICR București 1967.
51. CONSTANTINESCU I., COLUMBOVICI D., MILITARU C. - Prelucrarea datelor experimentale cu calculatoare numerice. Aplicații în construcția de mașini. Editura tehnică București 1980.
52. CRAWFORD A.E. - Technique des ultrasons applications a basse et haute puissances. Dunod Paris 1959.
53. CRAWFORD JR.F.S. - Curs de fizică Berkeley vol.III. Unde Edit.Didact. și Pedag. București 1983.
54. DAMIAN D. - Cercetări privind condițiile de transfer maxim de energie către sarcină la generatoarele de ultrasunete de uz industrial. Teză de doctorat. I.P."Traian Vuia" Timișoara 1982.
- 54.a. DAMIAN D., SAVII GH., BOTEZATU V. - Condiții de obținere a randamentului maxim la generatoarele de ultrasunete de uz industrial. În a IV-a Conf.Națională De Tehnologii Neconvenționale, Timișoara 1983, pg. 467-470
- 54.b. DAMIAN D. - Procedee și dispozitive de menținere a generatoarelor de ultrasunete în zona de rezonanță optimă a transductorului. În a IV-a Conf.Națională de Tehnologii Neconvenționale. Timișoara 1983, pg. 471-474.
55. DANCEA I. - Programarea calculatoarelor numerice pentru rezolvarea problemelor cu caracter tehnic și de cercetare științifică. Editura Dacia Cluj 1973.
56. DARABONT A., IORGA I., CIODARU M. - Măsurarea zgomotului și vibrațiilor în tehnică. Editura Tehnică București 1983.

57. DIACENKO P.F., IACOBSON M.O. - Calitatea suprafețelor la prelucrarea metalelor prin aşchiere
Ed. Tehnică, Bucureşti, 1974
58. DONSKOY A.V., KELLER O.K., KRATYSH G.S. - Ul'trazvukovye elektrotekhnologicheskie ustano_vki Izd. Energiya Leningrad 1968.
59. DORN W.S., CRACKEN D.D. - Metode numerice cu programe în FORTRAN IV Edit. Tehnică, Bucureşti, 1976.
60. DRAGAN O., IANCU C., AMZA GH., DRIMER D., ISARIE I. - Ultrasunete de mari energii. Edit. Academiei RSR, Bucureşti 1983.
61. DREUCEAN A., PAULESCU GH. - Studiul influenței geometriei ouțitului și a regimului de aşchiere re la strunjire asupra calității suprafeței prelucrate In: Bul. Stiințific și tehnic al IPTV Timișoara, Seria mecanică Tom 27(41), 1980, pg. 159
62. DRIMER D., AMZA GH. - Cercetări privind prelucrarea suprafețelor materialelor metalice cu ajutorul energiei ultrasonice. In: Construcția de mașini nr. 2-3, 1977, pg. 135-137
- 63.. DRIMER D., CSAPO GH. - L'optimisation de la forme géométrique des transducteurs ultrasoniques magnetostrictifs de puissance. In: Buletin IP. Gh. Gheorghiu-Dej, Bucureşti Seria Mecanică Tom XLII Nr. 3. 1980. pg. 89-99
64. DRIMER D., AMZA GH. - Contribuții la îmbunătățirea calității suprafețelor pieselor prin deformare plastică în câmp ultrasonor. In: Buletin IP. Gheorghiu-Dej Buc. Tom XLIII Nr. 4, 1981, pg. 149-154
65. DRIMER D., SAVII GH., AMZA GH., ICLANZAN T., ATANASIU N., SONEA I., CSAPO GH., CONDURATEANU E. IP. Bucureşti 1975. - Utilizarea ultrasunetelor în prelucrarea materialelor. Lito

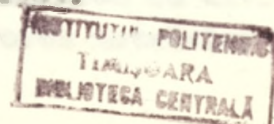
66. DUMPE V.F. - Elektroeroziönmaya obrabotka detaley
Izd. Tekhnika Kiev 1975.
67. DUNIN-BARKOVSKIY I.V., - Izmereniya i analiz sberekhovatosti vel-
KARTASHOVA A.N. - nistesti i nekruglosti povexhnosti.
Izd. Mashinostroenie Moskva 1978.
68. EKENETH J., NICHICI AL., Sensibilitate parametrilor de rugozitate
PAULESCU GH. - si suprafetelor prelucrate prin
eroziune electricä la regimul de prelu-
crare. Lucrare comunicatä la a III-a
Conferință Nationalä de Tehnologii Ne-
conventionale, Seria B. Sibiu 1982.
69. ENACHE STEFÄNUTÄ - Calitatea suprafetelor prelucrate Edit.
Tehnicä București 1966.
70. EPIFANOV V.S., PESINA - Tehnologiya obrabotkialmazov v bri-
A. YA., ZYKOV L.U. - lianty. Izd. Vyshaya Shkola Moskva 1976
71. ESKIN G.I. - Ul'trazvuk shagmul v metallurgiyu. Izd.
Metallurgiya Moskva 1975.
72. FAERMAN V.T. - Soedinenie tekstil'nykh materialov ul'-
trazvukom. Izd. Legkaya Industriya.
Moskva 1977.
73. FÄCÄÄÄRU I., NEGOITÄ C- Mäsuräri si control cu ultrasunete.
BERNATH AL. Edit. Tehnicä București 1965.
74. FILYAEV A.T. - Izmeshivanie staley v ul'trazvukovom
pole. Izd. Nauka i tekhnika Minsk 1978
75. FISCHER G. - Prelucrarea prin ultrasunete, masini
unelte echipate cu un sistem de aspi-
ratie prin pompä de vid. In: Prelucra-
rea metalelor cu ultrasunete. ICOT Buc,
1966, pg. 8-21.
76. POMIN V.N. - Matematicheskaya teeniya parätricheskegi
rezonansa v lineynykh raspredelennykh
sistemakh
Izd. Leningradskogo Universiteta, Le-
ningrad 1972.
77. GAFITÄNU M., FOCSA V. - Vibratii si zgomote. Editura Junimea
MERTICÄRU V., Iasi 1980
BIBOROSCH L.
78. GANIEV R.F., - Dinamika chastits pri vezdeystviy vi-
UKRAINSKIN L.E. - bratsiy. Izd. Naukova Dumka Kiev 1975.

79. CAVRILAS I., DRAGUT E., - Tehnologii de prelucrare cu seale
VIIRU A., BONOIU V. din materiale dure și extensibile
Editura Tehnică București 1977.
80. GEMESI J. - Microscopul cu ultrasunete. Edit.
Energetică de Stat București 1954.
81. GHERSCAL D.A., - Aparatură cu ultrasunete. Edit. Tehnică
FRIDMAN V.M. București 1962.
82. GHERSCAL D.A., - Ul'trazvukovaya tekhnologicheskaya
FRIDMAN V.M. apparatura. Energiya Moskva 1976.
83. GLENDOTSKIY V.A. - Ul'trazvuk v obogashcheniiy poleznykh
ishkopaniykh. Izd. Nauka Alma-Ata 1972
84. GRACHEV YU.P. - Matematicheskie metody planirovaniya
eksperimentov. Izd. Pishchevaya Pro-
myshlennost'. Moskva 1979.
85. GROSANU I. - Mecanica analitică. Vibrații. Lito.
I.P. "Traian Vuia" Timișoara 1977.
86. GRUMAZESCU M. - Ultrasunetul 'n acțiune. Editura
Științifică București 1964.
87. GUZAL.N., GOLOVCHAN V.T. - Difraktsiya uprugikh voln v nesog-
vnyaznykh telakh. Izd. Naukova Dumka
Kiev 1972.
88. HAJDU IOSIF - Rezistența materialelor. Lito. IPTV
Timișoara vol. I, 1980.
89. HARRIS C.M., CRUDE C.E. - Securi și vibrații. Vol I. Baze tea-
retice. Măsurători. Editura Tehnică
București 1968.
90. HENZHOLD G. - Măsurarea rezistenței cu ajutorul
operatelor electrice de palpate. In:
Determinarea rezistenței suprafețe-
lor. ICDF București 1970.
91. HORBENKO I.G. - Ul'trazvuk v mashinostroenie.
Moskva 1974. Izd Mashinostroenie
92. HORTOPAN GH. - Aparatură electrică, principii și
și aplicații. Editia a IV-a EDP BUC.
1980.
93. HORTOPAN GH. - Probleme de aparatură electrică.
EIP București 1982.

93. HORTOPAN GH. ș.a. - Probleme de aparate electrice. EDP București 1982.
94. HOȘOV V.A. - Proektirovanie ul'trazvukovoy izmeritel'noy apparatury. Izd. Mashinostroenie Moskva 1972.
95. HUSU A.P., VITENBERG YU.R., PALMOV V.A. & Sherokhovatsky poverkhnostey teoretiko-veroyatnostnyy podkhod. Izd. Nauka Moskva 1975.
96. IERAGIMOV I.KH. - Teoreticheskie osnovy izmereniya kharakteristik polya uskoreniy. Izd. Leningradskogo Universiteta Leningrad 1979.
97. ICLANZAN T. - Cercetări asupra parametrilor constructivi și funcționali la mașinile de prelucrat cu ultrasunete. Teză de doctorat I.P. "Traian Vuia" Timișoara 1975.
98. ICLANZAN T., NICA M.C., SAVII GH. Traductor magnetostrictiv pentru instalații tehnologice cu ultrasunete. Brevet de invenție nr. 75098 RSR din 28.12.79.
- 98a. ICLANZAN T. - Probleme ale sistematizării tehnice în aplicațiile ultrasunetelor în tehnologie. In: Ultrascustica 86, caietul 22 Timișoara 1986, pag. 29-32.
- 98b. ICLANZAN T., TAMAS M. - Prelucrarea ultrasonică a microorificțiilor. In: Ultrascustica 86, caietul 22 Timișoara 1986, pag. 33-40
- 98c. IGNEA ALIMPIE - Contribuții la calibrarea transductoarelor de măsură cu ultrasunete folosind metoda autoreciprocității în impuls. Teză de doctorat, Timișoara 1986.
- 98d. IGNEA A., BREABAN F. - Măsurarea interferometrică a amplitudinii de vibrație a transductoarelor de ultrasunete. In: Ultrascustica 86, caietul 22, Timișoara 1986, pag. 173-176.
- 98e. ISAR A. - Echipament de măsurare a puterii active în domeniul frecvențelor ultrasonice. In: Ultrascustica 86, caietul 22, Timișoara 1986, pag. 153-156.
99. ISCRULESCU I., ISPASOIU - Sistemul internațional de unități de

- PETRESCU V. - măsură.Ed.Tehn.București 1970-
100. KAZANTSEV V.F. - Zavisimost'napryazheniy v materiale pri ul'trazvukovom obrobke ot amplitudy kolebaniy i sily prizhima. In: Akusticheskiy Zhurnal Tom IX nr.1, 1963.
101. KAZANTSEV V.F. - O mekhanizme vnutrennego treniya amplitudno-zavisimoy oblasti. In: Akusticheskiy Zhurnal, Tom XXVII nr.5,1981, pag. 748-751.
102. KAZANTSEV V.F.,MECHETNER B.H.- Metode pentru ridicarea productivității și a preciziei de prelucrare cu ultrasunete. In: Prelucrarea metalelor nr.14/66 I.C.D.T. București 1966.
103. KAZANTSEV V.F.,ROZENBERG L.D.- The Mechanism of Ultrasonic Cutting. In: Ultrasonics 4,166, 1965.
104. KELLER O.K., KRATISH G.S., LUBYANITSKIY G.D. - Ul'trazvukovaya ochistka. Izd. Mashinostroenie, Leningrad 1977.
105. KHOLOPOV YU.V. - Ul'trazvukovaya svarka. Izd. Mashinostroenie, Leningrad 1972.
106. KIKUCHI E. - Ul'trazvukovye preobrazovateli Izd. Mir, Moskva, 1972.
107. KLETKIN I.D. e.a. - Ul'trazvukovaya svarka pri izgotovleniy adezhdy. Izd. Legkaya Industriya Moskva, 1979.
108. KOLESNIKO V.N. - Ul'trazvukovaya mikrosvarka. Izd. Nauka i Tekhnika, Minsk, 1977.
109. KONYUKHOV M.E. - Elektromekhanicheskie funktsional'nye preobrazovateli. Izd. Mashinostroenie, Moskva, 1977.
110. KOPS L. - O cercetare asupra influenței uzurii pulberii abrazive asupra indicilor tehnologici la prelucrarea cu ultrasunete. In: Pre-

- lucrarea metalilor cu ultrasunete. ICDT București 1966, pg. 121-137.
111. KOSTYUKOVICH S.S., DECHKO E., DOLGOV V.T. - Tehnost' obrabotki glubokikh otverstiy. Izd. Vysshaya Shkola, Minsk 1978.
112. KOVALENKO V.S. - Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov. Izd. Vishcha Shkola, Kiev, 1975.
113. KOZYREV S.P. - Gidrobrazivnyy iznos metallov pri kavitatsii. Izd. Mashinostroenie, Moskva, 1971.
114. KRASILNIKOV V.A. - Unde sonore. Editura Tehnică, București 1957.
115. KRASNIKOV V.F. - Tekhnologiya miniaturnykh izdeliy. Izd. Mashinostroenie, Moskva 1976.
116. KREMEN' Z.I. - Dovotka ploskikh poverkhnostey. Izd. Tekhnika Kiev, 1974.
117. KUDRIAVTSEV V.V. - Experiente simple cu ultrasunete. Edit. Tehnică București 1956.
118. KULEMIN A.V. - Ul'trazvuk i difuziya v metallakh. Izd. Metallurgiya, Moskva, 1978.
119. LEGGE P. - Machining Without Abrasive Slurry. In: Ultrasonics, 1966, July, pg. 157-162.
120. LEVINSON E.M. - Otverstiya bolykh razmerov. Izd. Mashinostroenie, Leningrad, 1977.
121. LEVINSON E.M., LEV V., GUTKIN B.G., LIVSHITS A.L., YUTKIN L.A. - Elektroznyadnaya obrabotka materialov. Izd. Mashinostroenie, Leningrad 1971.
122. LOSHAK M.G., ALEKSANDROVA L.I. - Uprechnenie tvördykh splavov. Izd. Naukova Dumka, Kiev, 1977.
123. MAKAROV L.O. - Grabote sterzhnevoogo kontsentratora v naruzhnom rezhime. In: Akusticheskiy Zhurnal, Tom V, nr. 2, 1959, pag. 372-374.
124. MAKSIMOV L.S., SHEYNIN I.S. - Izmereniya vibratsii skoruzheniy. Izd. Stroyizdat, Leningrad, 1974.
125. MARINESCU I.D. - Diamantul și aplicatiile lui. Editura Tehnică, București, 1985.



126. MARKOV A.I. - Ul'trazvukovaya obrabotka materialov
Izd. Mashinostroenie Moskva, 1980.
127. MARKOV A.I. - Rezanie trudnoobrabatyvaemykh mate-
rialev pri pomoshchi ul'trazvukovykh
v kolebaniy. Izd. Mashgiz, Moskva, 1962.
128. MARKOV A.I. - Ul'trazvukovoe rezanie trudnoobre-
battyvaemykh materialov. Izd. Mashino-
stroenie, Moskva, 1968.
129. MASLOV E.H., POSTNIKOVA N. Osnovnye napravleniya v razvitii
teorii rezaniya abrazivnaya almaznym
el'berovym instrumentom. Izd. Mashino-
stroenie, Moskva 1975.
130. MASLOVSKIY V.V. - Tekhnologiya obrabotki na dovodoch'
no-pritirochnykh stankakh. Izd.
Vysshaya Shkola, Moskva, 1979.
131. MATALIN A.A. - Novya napravleniya razvitiya tekhnolo-
gii chistovoy obrabotki. Izd.
Tekhnika Kiev, 1972.
132. MATAUSHEK I. - Ul'trazvukovaya tekhnika. Izd.
Metallurgizdat, Moskva, 1962.
- 132a. MATRA ILIE, SCHEIANU D. - Aparat pentru msurarea amplitudinii
vibrațiilor ultrasonice. In: Ultra-
acustica 86, caietul 22, Timișoara
1986, pag. 121-124.
133. MAYEN V.V. - Prostye opyty s ul'trazvukom. Izd.
Nauka, Moskva, 1978.
134. MAZAL'SKIY V.N. - Superfinishnye stanky. Izd. Mashino-
stroenie, Leningrad, 1974.
135. MEDVEDEV V.V. - Otdelnochnoe kheningovanie. Izd.
Tekhnika, Kiev, 1973.
136. MERKULOV L.G. - RASCHET ul'trazvukovykh kontsentrato-
rov. In: Akusticheskiy Zhurnal
Tom III, nr. 3, 1957, pag. 230-238.
137. MERKULOV L.G.
KHARITONOV A.V. - Teoriya i raschet sestavnykh kont-
sentratorov. In: Akusticheskiy Zhur-
nal Tom V, nr. 2, 1959, pg. 183-190-
138. METELAIN V.V. - Scule pentru prelucrarea cu ultra-
sunete. In: Prelucrarea metalelor cu

- 139. MILLER G.E.

 - ultrasunete, ICDT București, 1966, pag. 118-121
 - Special Theory of Ultrasonic Machining. In: Journal Appl. Phys. 20, nr. 2, 1951, pag. 149.
- 140. MINDLIN YA.E.

 - Zatočnâ devotka i polirovanie pretaziennogo rezhušchego instrumenta. Izd. Mashinostroenie Moskva 1975.
- 141. MOHAKHOV V.M. ș.a.

 - Convertisseur de vitesse à ultrasons. Brevet nr. 7606823 Franța (URSS), 7.10.1977
- 141a. MUNTEANU N,
YOLOSESCU C.

 - Aparat pentru determinarea caracteristicilor de frecvență ale transductoarelor și instalațiilor cu ultrasunete. In: Ultrascustica 86, caietul 22, Timișoara 1986, pag. 141-144.
- 142. NAERMAN M.S.

 - Progresivnye protsessy abrazivnoy almaznoy i elborovnoy obrabotki avtomobilestroeni. Izd. Mashinostroenie Moskva 1976.
- 143. NANU A., NANU Ș.,
PAULESCU GH.

 - Prelucrarea prin eroziune abrazivo-cavitatională în câmp ultrasonic. In: Manualul inginerului mecanic, vol. III. Tehnologia Construcției de Mașini. Edit. Tehnică, București 1972, pag. 736-757.
- 144. NANU A.

 - Tehnologia materialelor. Edit. Didact. și Pedag., București, 1972, pg. 362-372.
- 145. NANU A.

 - Tehnologia materialelor. Editura Didact. și Pedag., București, 1977, pg. 355-374.
- 146. NANU A.

 - Tehnologia materialelor. Edit. Didact. și Pedag., București, 1983, pg. 336-354.
- 147. NANU A., DRUCUȘAN A.,
PAULESCU GH., ȘESTIN A.

 - Studiul influenței geometriei sculei asupra forțelor de așchiere și rugozității suprafeței la strunjirea cilindrilor de laminare din oțel 90VMcCr15 cu încălzire inductivă. In: A III-a CMTN Sibiu, 1982, pag. 77.
- 148. NEMES MIHAI

 - Materiale vol. I, Lito IPVT Timișoara 1979.

149. NEPPIRAS E.A. - Prelucrarea și profilarea prin ultrasunete. In: Prelucrarea cu ultrasunete. ICDT București 1966, pg. 67-82.
150. NEPPIRAS E.A. - A Report on Ultrasonic Machining. What is Ultrasonic Machining? In: Metalworking Production, 100, nr. 27, 1956, 1956.
151. NEPPIRAS E.A. - A Report on Ultrasonic Machining. In: Metalworking Production, 100, nr. 27-31, 1956, pg. 33-34
152. NEPPIRAS E.A. - New Magnetostrictive Materials and Transducers-1. In: Journal Sound Vibration-1, nr. 8(3), 1968, pag. 408-430.
153. NEPPIRAS E.A. - New Magnetostrictive Materials and Transducers-2. In: Journal Sound Vibration nr. 8(3), 1968, pag. 431-456.
154. NEPPIRAS E.A. - Macrosemics in Industry. In: Ultrasonics, 10, 1972, pg. 8-13.
155. NEPPIRAS E.A. - High-power Ultrasonic Generator In: Ultrasonics, 13, 4, 1975, pg. 152-153.
- 155a. NICA M., ICLANZAN T., GURBAN I. - Cercetări experimentale privind perforarea sticlei cu ultrasunete. In: Ultracustica 86, caietul 22, Timișoara 1986, pag. 93-96.
156. NICHICI AL., PAULESCU GH., POTROVITA N. - Contribuții la studiul rugozității suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică. In: A IV-a CNTM Timișoara, 1983, pag. 257-264.
157. NICHICI AL., POPOVICI V., NICA M., ACHIMBESCU N., POPA H., PAULESCU GH. - Prelucrarea prin eroziune în construcția de mașini. Editura Facia Timișoara 1983.
158. NICHICI AL., PAULESCU GH., POTROVITA N. - Analize comparative a microgeometriei suprafețelor prelucrate

- prin eroziune electrică și rectificare.
In: Lucrările sesiunii Activitatea de cercetare și proiectare în sprijinul producției. Arad, 1985.
- 159. MCHICI AL., BENEETH J.- Probleme ale definirii și aprecierii rugozității suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică. In: Creativitatea în construcția, fabricarea și Exploatarea Autovehiculelor, vol. II, TCM, Pitești 1981, pag. 207-212.
- 160. NICOLAU EDMOND - Considerații asupra modelării transducerului ultrasonic magnetostriktiv prin circuite cu parametri distribuiți. In: Probleme de automatizare vol. 12, Edit. Academiei RSR, București 1982, pag. 199-212.
- 161. NICOLAU EDM., CSAPO GH.- Traductoare magnetostriective, unele probleme privind optimizarea. In: Probleme de automatizare vol. 11, Edit. Academiei RSR, București 1979, pag. 227-244.
- 162. NOTT J.F. - Osnovy mekhaniki razrusheniya Izd. Metallurgiya, Moskva, 1978.
- 163. OH, H.L., PANKOW D., FINNIE I. - The Mechanics of Ultrasonic Machining of Brittle Solids. In: Proceedings of Inter Conference and Productive Engineering vol II, Tokio, 1974, pag. 109-113.
- 164. OPRISOR M.S. - Tehnologii electrice speciale. Lite I.P. Gh. Asachi, Iași, 1981.
- 165. ORLOV P.N., NESTEROV YU.I., POLUKHIN V.A. - Protsessy dovodki presizionnykh detaley pastani i suspenziyarni. Izd. Mashinostroyeniya, Moskva 1975.
- 166. PAWLITZSCH G., BLANK D. - Fortschritte beim stoss lösen mit Ultraschallfrequenz. In: Werkstattstechnik und Maschinenbau, v. 50, 1960.
- 167. PANOVKO YA.G. - Osnovy prikladnoy teorii kolebaniy i udara. Izd. Mashinostroyeniya Leningrad, '71
- 168. PANOVKO YA.G. - Vvedenie v teoriyu mekhanicheskogo udara. Izd. Nauka Moskva 1977.
- 169. PAULESCU GH. - Unele aspecte privind studiul comparativ

- al concentratoarelor ultrasonice. In: Lucrările Conferinței Tehnologii noi de fabricație în construcția de Mașini, vol. III, Galați 1977, pag. 129-132.
170. PAULESCU GH.
- Studiul calculului concentratoarelor ultrasonice cilindrice în trepte. In: Lucrările Conferinței Tehnologii noi în Construcția de Mașini vol. III, Galați 1977, pag. 137-140.
171. PAULESCU GH.
- Studiul calculului concentratoarelor exponențiale și conice utilizate la prelucrarea dimensională cu ultrasunete. In: Lucrările Conferinței Tehnologii noi în Construcția de Mașini. Vol. III, Galați 1977, pag. 133-136.
172. PAULESCU GH.
- Studiul dimensionării concentratoarelor ultrasonice compuse. In: A IV-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale. Timișoara 1983, pag. 475-484.
173. PAULESCU GH.
- Aspecte privind calculul concentratoarelor ultrasonice conice și cilindrice în trepte. In: A IV-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale Timișoara 1983, pag. 485-494.
174. PAULESCU GH.
- Aspecte privind calculul concentratoarelor ultrasonice exponențiale și catenoidale. In: A IV-a Conferință Națională De Tehnologii Neconvenționale Timișoara 1983, pag. 495-502.
175. PAULESCU GH.
- Studiul rugozității suprafețelor și abaterilor de formă la prelucrarea prin eroziune ultrasonică a materialelor fragile. In: A IV-a CNTN Timișoara, 1983, pg. 503-508
176. PAULESCU GH.
- Unele considerații privind calcu-

- 177. PAULESCU GH.

 - Iul sistemelor oscilatoare ultrasonice la prelucrarea dimensională prin eroziune ultrasonice. Lucrare comunicată la A III-a CNTN Timișoara 1982.
 - Aspecte ale studiului fenomenului de uzură și a preciziei dimensionale la prelucrarea materialelor fragile prin eroziune ultrasonice. Lucrare comunicată la A III-a CNTN, Seria D, Sibiu 1982.
- 178. PAULESCU GH.

 - Studiul influenței formei concentrateorilor ultrasonice asupra parametrilor acustici și tehnologici la prelucrarea prin eroziune ultrasonice. In: Tehnologiile Neconvenționale, Simpozion, Timișoara 1986, pag. 141-148.
- 178a. PAULESCU GH., MANU A.

 - Unele cercetări privind calitatea suprafețelor prelucrate prin eroziune ultrasonice. In: "Ultrasoastica 86", caietul 22, Timișoara 1986, pag. 41-44.
- 178b. PAULESCU GH.

 - Studiul concentrateorilor catenoidale la prelucrarea prin eroziune ultrasonice. In: "Ultrasoastica 86", caietul 22, Timișoara 1986, pag. 109-112.
- 178c. PAULESCU GH.,
DREUCEAN A, SLAVICI T.

 - Particularități ale tehnologiei de execuție a concentrateorilor ultrasonice pe strunguri cu comandă numerică. In: Comunicările celei de-a V-a Conferințe procese și utilaje de prelucrare la rece vol. III, Timișoara '86, pg. 87-92.
- 179. PENTLAND W, S.A.

 - Îmbunătățirea vitezelor de prelucrare cu ultrasunete. Câteva studii privind posibilitățile de aplicare. In: Prelucrarea cu ultrasunete. ICDT București, 1966, pag. 94-112.
- 180. PODURAEV V.M.,
KARALOV V.S.

 - Fiziko-khimicheskie metody obrabotki. Izd. Mashinostroenie Moskva 1973.
- 181. POHLMAN R.

 - Lepuirea prin impact cu ultrasunete. In: Prelucrarea cu ultrasunete, ICDT Bucu-

- rești 1966, pag. 44-54-
182. POLYAKOV Z.I.,
VSHIVTSEV A.V. - Vliianie razmernoy kharakteristiki abrazia na protsess ul'trazvukogo rezaniya. In: Tehnologii Neconventionale în prelucrarea metalelor. Timișoara, 1971, pag. 465-471.
183. POPESCU CHRISTIANA ș.a. - Materiale electrotehnice, proprietăți și utilizări, Editura Tehnică, București 1976.
184. POPILOV L.YA. - Spravochnik po elektricheskim i ul'trazvukovym metodam obrabotki materialov. Izd. Mashgiz Moskva-Leningrad 1963.
185. POPILOV L.YA. - Spravochnik po elektricheskim i ul'trazvukovym metodam obrabotki materialov. Izd. Mashinostroenie Leningrad 1973
186. POPILOV L.YA. - Tekhnika bezopasnosti pri elektrofizicheskoj i elektromekhanicheskoj obrabotke materialov. Izd. Mashinostroenie Moskva Leningrad 1966.
187. POPILOV L.YA. - Osnovy elektrotehnologii i novye ee raznovidnosti. Izd. Mashinostroenie Leningrad 1971.
188. POLITOV I.V.,
KUZNETSOV N.A. - Vibratsionnaya obrabotka detaley mashin i priborov. Izd. Lenizdat Leningrad 1965.
189. POPOV B.A., TESLER G.S. - Vibratsionnaya obrabotka detaley mashin i priborov. Izd. Lenizdat Leningrad 1965.
190. POPOVICI V.,
PAULESCU GH.,
GLARIU M. - Studiul influenței impedanței circuitului de lucru asupra parametrilor de rugozitate la prelucrarea prin eroziune complexă. In: Tehnologii Neconventionale. Simpozion, Timișoara 1986, pag. 109-115.
191. PRILUTSKIY V.A. - Tekhnologicheskie metody svizheniya volnistosti poverkhnostey. Izd. Mashinostroenie Moskva 1978.

192. PROHOROV V.G. - K resket parabolicheskikh kontsentratorov ul'trazvuka. In: Akustika i ul'trazvukovaya tekhnika nr.9. Izd. Tekhnika Kiev 1974, pag. 57-60.
193. PUPAZAN C. - Acustica în construcții, propagarea zgomotelor și izolarea fonică. Editura Academiei RSR, București 1970.
194. RAPOPORT YU.M. - Ul'trazvukovaya defektoskopiya stroytel'nykh detaley i konstruksiy. Izd. Stroyizdat Leningrad 1975.
195. RADOI M., DECIU R., VOICULESCU D. - Elemente de vibrații mecanice. Edit. Tehnică, București 1973.
196. REȘA I.D., PETRESCU S., PRECUPAȘ M., CĂRA AL. - Probleme de statistică rezolvate pe calculator. Edit. Facla, Timișoara, 1984.
197. RIMSKIY-KORSAKOV A.V. - Elektro-akustika. Izd. Svyaz' Moskva 1973
198. ROSENBERG L.D., KAZANTSEV V.F., MAKAROV L.O., YAKHIMOVICH D.F. - Ul'trazvukovoe rezanie. Izd. Akademi Nauk SSSR, Moskva 1962.
199. RUDZIT YA.A. - Mikrogeometriya i kontaktnoe v zaimo-deystvie poverkhnostey. Izd. Zinatne, Riga, 1975.
200. RUMSISKI L.Z. - Prolucerarea matematică a datelor experimentale. Indrumar. Edit. Tehnică, București, 1974.
201. RUMIN YU.S. - Transformatory zvukovoy i ul'trazvukovoy chastoty. Izd. Energiya Leningrad '73
202. RYZHOV E.V., SAGARDA IL'ITSKIY V.B., CHEPOVETSIIY I.KH. - Kachestvo poverkhnosti pri almazno-abrazivnoy obrabotke. Izd. Naukova Dumka Kiev 1979.
203. DE SABATA IOAN - Bazele electrotehnicii, vol II, Lite, IPTV Timișoara 1974.
204. DE SABATA IOAN - Bazele electrotehnicii, vol. III, Lite, IPTV Timișoara, 1977.
205. DE SABATA IOAN - Bazele electrotehnicii, vol. I, Lite, IPTV Timișoara 1980.
206. SAGARDA A.A., - Almazno-abrazivnaya obrabotka detaley

- CHERPOVETSKIY I.KH.,
MILASHNEVSKIY L.L.
207. SAKULEVICH F.YU.,
KOZHURO L.M.
208. SALVADORI M.G., BARON M.
209. SAVII GH., PAULESCU GH.,
ICLANZAN T.
210. SAVII GH., DRIMER D.,
ICLANZAN T., USAPO GH.,
PAULESCU GH.
- 210a. SAVII GH.
- 210b. SAVII GH., BOTEZATU V.
212. SCHRIBENER H.
211. SAVII GH., ICLANZAN T.
- machin. Izd. Tekhnika, Kiev, 1974.
 - Ob'ŕnaya magnito-obrezivnaya obrabotka. Izd. Nauka i Tekhnika Minsk 1978.
 - Metode numerice în tehnică. Edit. Tehnică Bucureşti 1972.
 - Studii experimentale privind sudarea feliilor de masă plastică polistiren cu ajutorul vibrațiilor ultrasonice. In: Lucrări tehnico-stiințifice, IPTV Timișoara 1977, pag. 141-148.
 - Echipament și tehnologie pentru sudarea ultrasonică a feliilor de polistiren. In: Conferința Dezvoltarea industrială a Tehnologiilor neconvenționale. I.P. București 1977, pag. 306-311.
 - Două decenii de activitate științifică și practică în aplicarea tehnologiilor în ultrasunete la catedra TCM Institutul Politehnic "Traian Vuia" Timișoara. In: Ultra-acustica 86, caietul 22, Timișoara 1986, pag. 9-22.
 - Cercetări asupra posibilității de evidențiere dinamică a unor parametri caracteristici ai blocurilor ultrasonice. In: A IV-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale Timișoara 1983, pag. 463-466
 - Auslegung von Hochleistungsrisseis für die Ultraschallbearbeitung. Dissertation. Hannover 1971.
 - Contribuții la studiul mașinilor ultrasonice pentru prelucrarea materialelor. In: A IV-a CNA vol II B - Ultrasunete, București, 1973 pag. 81-87.

- 211a. SAVII GN., ICLANZAN T., - Studii experimental comparativ al
MLADIN R., BOLER I. blocurilor ultrasonice destinate
instalatiilor tehnologice cu ultra-
sunete. In: Buletin Stiintific si Teh-
nic, IPTV Timisoara, Seria mecanica,
Tom 18(32), f 1, 1973, pg. 87-93.
213. SEIREG A., HAWARD L. - An Approximate Normal Mode Method for
Damped Lumped Parameter Systems. In:
Engineering for Industry, Nov. 1967
Transactions of the ASME, pg. 597-604
214. SENYUK S.M. - Protsess formirovaniya i raspredsta-
neniya predel'nykh voln v sterzh-
nykh. Izd. Metzniereva. Tbilisi 1973.
215. SEVERDENKO V.L., - Listovaya ahtampovka s ul'trazvu-
RASHCHENKO V.S. kom. Izd. Nauka i Tekhnika. Minsk
KOSOBUTSKIY B.S. 1975.
216. SEVERDENKO V.R., - Proektka i volechenie s ul'trazvu-
KLUBOVICH V.V., kom. Izd. Nauka i Tekhnika. Minsk
STEPANENKO A.A. 1970.
217. SEVERDENKO V.R., - Ul'trazvuk i plastichnost'. Izd.
KLUBOVICH V.V., STEPANENKO A. Nauka i Tekhnika. Minsk 1976.
218. SEVERDENKO V.P., - Ul'trazvuk i prochnost'. Izd. Nauka
SKRIPNICHENKO A.L., i Tekhnika. Minsk 1979
TYAVLOVSKIY M.D.
219. SHCHEGOLEV V.A., - Elastichniye abrazivnye i almaznye
ULANOVA M.E. Instrumenty. Izd. Mashinostroyeniye
Leningrad 1977.
220. SHUTILOV V.A. - Osnovy fiziki ul'trazvuka. Izd. Lb-
ningradskogo universiteta. Leningrad
1980.
221. SILAJ GN. - Mecanica. Vibratii mecanice. Edit.
Didactich si Pedagog., Bucuresti 1988.
222. SILAJ GN., RADOI M., - Culegere de probleme de vibratii
BRINDEU L., KLEPP H., mecanice. Vol I si II. Editura Teh-
nică Bucuresti 1973.
HEGEDŰS A.
223. SILIN L.L., BALANDIN G.F. - Ul'trazvukovaya svarka. Izd. Mashgiz
KOGAN M.G. Moskva 1962.

224. SMARYSHKOV N.D. - Napravlenost' gidroakusticheskikh antenn. Izd. Sudostroenie Leningrad 1973.
225. SOLNTSEV S.S., MOROZOV E.M. - Razrushenie stekla. Izd. Mashinostroenie. Moskva 1978.
226. SOLOVICH I.S. - Matematicheskaya statistika v tekhnologiy mashinostroyeniya. Izd. Mashinostroenie Moskva 1972.
227. STANOMIR D. - Inițiere în electroacustică. Edit. Tehnică București 1971.
228. STANOMIR D., CSAPO GH. - Resonance Phenomena in Lossy Magnetostrictive Transducers I Resonance Frequencies. In: Bul. I. P. Gh. Gheorghiu-Dej București, Seria mecanică Tom XLII nr. 4., 1980, pag. 83-93.
229. STANOMIR D., CSAPO GH. - RESONANCE PHENOMENA IN LOSSY Magnetostrictive Transducers. Part II. Power Operation of Magnetostrictive Transducers. In: Bul. I. P. Gh. Gheorghiu-Dej București, Seria mecanică, Tom XLIII, nr. 1, 1981, pag. 65-92.
230. STERF R. - Ultrasonetele. Edit. Tehnică. București 1956.
231. STRELKOV S.P. - V vedenie v teoriyu kolebaniy. Izd. Tekhniko-teoreticheskoy Literatury. Izd. Moskvo-Leningrad '51
232. STRELKOV S.P. - Introducere în teoria oscilațiilor. Edit. Tehn. Buc., 1954.
233. SUVOROV A.A. - Obrabotka detaloy iz vol'frama i ego splyavov. Izd. Mashinostroenie. Moskva 1978.
234. SVIRIDOV A.P., VOLOSATOV V.A. - Ul'trazvukovaya obrabotka radiotekhnicheskikh detaloy. Izd. Energiya Leningrad 1969.
235. SORA CONSTANTIN - Bazele electrotehnicii, EDP, București 1982.
236. TARANOV E.S., TYURIN A.M. - Hidro-akusticheskie izmereniya

- STASHKEVICH A.F.** - v okeanologii. Izd. Gidrometeoizdat. Leningrad 1972.
- 237. TARASYUK YU.F.,
SIRAVIN G.M.** - Gidra — kusticheskaya telemetriya. Izd. Sudostroenie. Leningrad 1973.
- 238. TEUMIN I.I.** - Ul'trazvukovye kolebatel'nye sistemy. Izd. Mashgiz Moskva 1959.
- 239. TILIPALOV V.N.** - Sredstva avtomatizatsii mekhanicheskoy promyshlennosti v radioelektronoy promyshlennosti. Izd. Mashinostroenie Moskva 1983.
- 240. TIROM N.** - Prelucrarea statistică și informațională a datelor de măsurare. Edit. Tehnică București 1976.
- 241. TIROM N.** - Analiza preciziei de estimare a funcțiilor aleatoare, Ed. Tehn., Buc., 1981
- 242. TONDL A.** - Melinsynnye kolebaniya mekhanicheskikh sistem. Izd. Mir. Moskva 1973.
- 243. TRUSCULESCU M.** - Studiul metalelor, EDP București 1977.
- 244. TSEPOVETSKIY I.KH.** - Osnovy finishnoy almaznoy obrabotki. Izd. Naukova Dumka Kiev 1980.
- 245. TUCKER J.,
RAMPTON V.W.** - Microwave Ultrasonic in Solid State. North-Holland Publishing Company Amsterdam 1972.
- 245a. TURAK L.** - Aplicații ale ultrasunetelor la prelucrarea safirelor artificiale. In: Ultrasonics 86, caietul 22, Timișoara, pag. 51-54.
- 246. TYHNYI A.M.,
TARNORUTSKIY V.K.** - Soedinenie plastmassovykh detaley s poleshch'yu ul'trazvuka. Izd. Vishcha Shkola L'viv 1979
- 247. ULITIN M.N., PAROV A.** - Prelucrarea cu ultrasunete la rectificare plană. In: Prelucrarea metalelor cu Ultrasunete. ICDT Buc., 1966, pg. 28-36.
- 248. UNGAR E.B.** - Statistical Energy Analysis of Vibrating Systems. In: Journal of Engineering for Industry. Nov. 1967. Transactions of the ASME, pag. 626-632.

249. VAINSTOK I.S. - Ultrasonetele și utilizarea lor în construcția de mașini. Edit. Tehnică București 1959.
250. VASILESCU A., FRĂBULEA G. - Similitudinea sistemelor elastice. Edit. Academiei RSR, București, 1974.
251. VERONAN V.YU., ARENKOV A.B. - Ul'trazvukovaya obrabotka materialov 4. Izd. Mashinostroenie Leningrad 1971.
252. VERONAN V.YU. - Razmernaya ul'trazvukovaya obrabotka materialov. Mashgiz, Moskva, Leningrad 1961.
253. VESELOVSKIY S.I. - Razreza materialov. Mashinostroenie Moskva 1973.
254. VETTER T. - Beitrag zur Frage der Haupt und Fehlergeometrie beim Schwingklappen mit Ultraschall. Dissertation Hannover'67.
255. VINOGRADOVA M.B., RUDENIKO O.V., SUKHORUKOV A.P. - Teoriya Voln. Izd. Nauka, Moskva 1979.
256. VISHNITSKIY A.L., YASNOGORODSKIY I.Z., GRIGORCHUK I.P. - Elektromekhanicheskaya i elektromekhanicheskaya obrabotka metallov. Izd. Mashinostroenie Leningrad 1971.
257. VOICU GH., DRAGAN O., CIOVICA D. - Sursă electronică de putere de frecvență ultrasonică. Brevet de invenție nr. 72465 din 14.06.1977 RSR.
258. VOINOV B.S. - Shiroko-diapazonnye kolebatel'nye sistemy. Izd. Sovetskoe Radio, Moskva 1973.
259. VOLOSATOV V.A. - Rabota na ul'trazvukovykh ustanovkakh. Izd. Vyschaya Shkola, Moskva 1979.
260. VUCU I. - Cercetări asupra prelucrării dimensionale ultrasonice cu suspensie abrazivă a unor ferite. Teză de doctorat IP "Traian Vuia" Timișoara, 1977.
261. VYBORNOV B.I. - Ul'trazvukovaya defektokopiya. Izd. Metallurgiya Moskva 1974.
262. WINSTON E.K. - Seeing sound. New-York. Wiley and Sons 1971.
263. YAKOVLEV A.D. ș.a. - Transformateur de vitesse a ultrason. Brevet nr. 7606822. Franța (URSS) 07.10.1977.

264. YASHCHERITSKIY O.I., - Finishnaya obrabotka detaley uplotnennym potokom svobodnogo obraziva. Izd. Nauka i Tekhnika Minsk 1978.
MARTYNOV A.N.,
GRIDIN A.D.
265. ZAGAEVSKIY T., - Promyshlennaya elektronika. Izd. MALZACHEV S., KWIECHINSKI A. Energiya Moskva 1976.
266. ZAKHARENKO I.P. - Almaznye instrumenty i potsepsy obrabotki. Izd. Tekhnika. Kiev 1980.
267. ZAKHARENKO I.P., - Effektivnost' obrabotki instrumenta sverkhтвердыми materialami. Izd. Mashinostroenie Moskva 1982.
268. ZHUSTAREV F.N., - Sinteticheskie almazы v obrabotke metallov i stekla. Izd. Mashinostroenie Moskva 1968.
ROZNO N.A. y.s.
269. x x x - Determinarea rugozității suprafețelor ICDT București 1970
270. x x x - Abrazivnaya i almaznaya obrabotka materialov. Spravochnik. Pod rez. Reznikov A.N. Mashinostroenie Moskva 1977.
271. x x x - El'bor v mashinostroenii. Izd. Mashinostroenie. Leningrad 1978.
272. x x x - Elektronaya apparatura ul'trazvukovykh dlya issledovaniya svoystu tvördegotela. Izd. Energiya Moskva 1974.
273. x x x - Karbid kromniya. Izd. Fan. Tashkent 1977.
274. x x x - Ghazirea ultrasonică cu scule impregnate cu diamant. In: Prelucrarea cu ultrasunete. ICDT București 1966, pag. 37-43.
275. x x x - High-Velocity Impact Phenomena. Edited by Ray Kinslow Academic Press. New York and London 1970.
276. x x x - Istechniki meshchnogo ul'trazvuka. Pod red. Rozenberg L.D. Izd. Nauka Moskva 1967
277. x x x - Kolebaniya lineynykh sistem. Tom 1. Vibratsii v Tekhnike. Izd. Mashinostroenie. Moskva 1978.

278. x x x - Matematicheskoe modelirovanie potentsial'nykh peley. Izd. Akademiya Nauk Ukrainyskoy SSR Kiev 1972
279. x x x2 - Nelineynye kolebaniya i ustoychivost' dvizheniya. Izd. Instituta Matematiki An. USSR, Kiev 1973.
280. x x x - Non-Traditional Machining Processes. ASTM De-
born 1967.
281. x x x - Novoe v elektrofizicheskey i elektrokhimiches-
koy obrabotke materialov. Izd. Mashinostroenie
Leningrad 1966. Pod. red. Popilov L. Ya.
282. x x x - Physical Acoustics. Principles and Methods.
Edited by WARREN P. MASON Academic Press. New
York and London 1968 vol. V.
283. x x x - Physical Principles of Ultrasonics Tehnology
vol. 1:2. Edited by L. D. Rezenberg.
- Plenum Press. New York London 1973
284. x x x - Primenenie ul'trazvuka v promyshlennosti. Izd.
Mashgiz Moskva 1959.
285. x x x - Rasprostranenie uprugikh i uprugoplasticheskiikh
voln. Izd. Nauka Alma-Ata 1973.
286. x x x - Rezenie trudno obrabatyvaemykh materialov. Izd.
Mashinostroenie Moskva 1972.
287. x x x - Rezhimy reznaya trudno obrabatyvaemykh materia-
lov. Spravochnik. Izd. Mashinostroenie Moskva 1976.
288. x x x - Segnetoelektriki v tekhnike svch. Izd. Sovetskoe
Radio Moskva 1979.
289. x x x - Simpozium po fizike akustiko-gidrodinamicheskikh
yavleniy. Izd. Nauka Moskva 1975.
290. x x x - Sinteticheskie smazy v mashinostroenii. Izd.
Nauka Dnka Kiev 1976.
291. x x x - Sovremennye problemy elektrokhimicheskogo for-
mooobrazovaniya Izd. Shtiintsa Kishinev 1978.
292. x x x - Spravochnik po kontrolyu promyshlennykh shumov.
Izd. Mashinostroenie Moskva 1979.
293. x x x - Ul'trazvuk v stritel'noy tekhnike. Izd. Goss-
troizdat Moskva 1962.
294. x x x - Ul'trazvukovaya tekhnologiya. Pod red. AGRANATA
B. A Izd. Metallurgiya Moskva 1974. ✓