

INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA"

TIMISOARA

FACULTATEA DE MECANICA

TEZA DE DOCTORAT

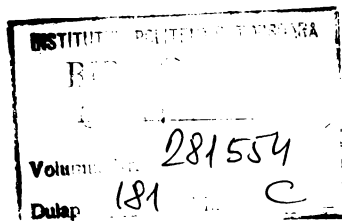
CERCETARI PRIVIND TRAGEREA LA
RECE A TEVILOR PE DOP ACTIVAT ULTRASONIC

ING. OVIDIU DRĂGAN

CONDUCATOR STIINTIFIC

PROF.DR.DOC. ING. AUREL NANU

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

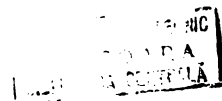


1 9 7 4

C U P R I N S

	<u>Pag.</u>
INTRODUCERE	5
1. ELEMENTE DE ACUSTICA	9
1.1. Vibrația sistemelor elastice	9
1.1.1. Vibrații libere	9
1.1.2. Vibrații forțate	11
1.2. Unde acustice	13
1.3. Mărimi acustice	18
2. STADIUL ACTUAL AL STUDIULUI PROCESELOR DE DEFORMARE PLASTICA A METALELOR IN CIMP MACROSONIC	23
2.1. Deformarea plastică a metalelor în câmp macro- sonic	24
2.1.1. Efectul de suprafață	24
2.1.2. Efectul de volum	30
2.2. Tragerea la rece a țevelor în câmp macrosonic.	39
2.3. Privire critică asupra tragerii la rece a țe- velor pe dop activat ultrasonice	46
3. MATERIALUL SI METODICA DE CERCETARE	48
3.1. Materialul de cercetare	48
3.2. Metodica de cercetare	49
3.2.1. Principii generale privind alegerea și dimensionarea instalațiilor de macrosu- nete	49
3.2.2. Alegerea modului de injecție a energiei acustice în focarul de deformare și a parametrilor acustici	51
3.2.3. Instalația experimentală de tras în câmp macrosonic	52
3.2.4. Determinarea nivelelor energiei acus- tice	56
3.2.5. Condiții de experimentare la măsurarea forțelor	67

3.2.6. Condiții de experimentare la determinarea modificărilor unor proprietăți mecanice	69
3.2.7. Condiții la determinarea excentricității	69
4. CERCETARI TEORETICE SI EXPERIMENTALE	71
4.1. Influența macrosunetelor asupra condițiilor de frecare pe dop	71
4.2. Efectul de volum	78
4.3. Modificarea unor proprietăți mecanice	80
4.4. Modificarea toleranțelor dimensionale ale produselor	86
4.4.1. Aspecte privind excentricitatea țevilor	86
4.4.2. Efectul macrosunetelor asupra excentricității	87
5. APLICAREA IN PRODUCTIE A REZULTATELOR CERCETARII...	94
6. CALCULUL EFICIENTEI ECONOMICE	96
CONCLUZII	101
ANEXE	104
BIBLIOGRAFIE	112



NOTATII GENERALE

- A ; X - amplitudinea de deplasare a particulei mediului în jurul poziției sale de repaus
- E - modulul de elasticitate longitudinal
- I - intensitatea energiei acustice
- T - perioada mișcării oscilatorii
- Z - impedanța acustică specifică
- c - viteza de propagare a undei în medii elastice
- f - frecvența forței excitatoare periodice
- m - masa mediului prin care sepropagă unda
- p - grosimea peretelui țevii
- u - viteza particulei mediului pus în vibrație ca urmare a propagării undei
- λ - coeficientul de alungire al țevii
- \varnothing - diametrul țevii
- Λ - lungimea de undă
- μ - coeficientul de frecare
- ρ - densitatea mediului prin care se propagă unda
- ω - pulsația sistemului ce vibrează

GLOSAR DE TERMENI

ACTIVARE ULTRASONICA	Supunerea regiunii mediului elastic acțiunii ultrasunetelor de mari energii.
CIMP MACROSONIC	Sediu al undelor elastice care interacționează activ cu mediul în stare de vibrație.
CONCENTRATOR	Concentrator de energie acustică.
EPECT DE SUPRAFATA	Reducerea frecării pe suprafața de separare dintre scula vibratoare și materialul de prelucrat.
EPECT DE VOLUM	Micșorarea tensiunii de curgere plastică a metalului datorită efectului de încălzire localizată al macrosunetelor.
ICEM	Institutul de Cercetări Metalurgice - București.
IRADIERE CU ULTRASUNETE	Activare ultrasonică.
ITR	Intreprinderea de Tevi "Republica" - București.
MACROSUNETE	Ultrasunete de mari energii capabile să activeze regiunea mediului elastic care se găsește în stare de vibrație.
TRADUCTOR	Convertor de semnal.
TRAGERE MACROSONICA	Tragere în câmp macrosonic, respectiv, trageră la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic.
TRANSDUCTOR	Convertor de putere, respectiv, de energie electrică în energie mecanică vibratorie.
ULTRASUNETE DE MARI ENERGII	Macrosunete

I N T R O D U C E R E

Dezvoltarea industriei noastre metalurgice impune cercetării științifice obiective și preocupări noi. Prezenta teză de doctorat a fost concepută și elaborată pe acest fundal, în condițiile create la Institutul de Cercetări Metalurgice - București și în atmosfera "Școlii de Tehnologii Neconvenționale" din Timișoara, inițiată și condusă de conducătorul științific al acestei lucrări, Prof. dr.doc., ing. A.Nanu.

În acest context, autorul, pornind de la stadiul puțin dezvoltat al cercetărilor efectuate pe plan mondial privind tragerea la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic, a încercat să elucideze unele probleme teoretice legate de această temă, cu scopul elaborării unei tehnologii eficiente de tragere macrosonică a țevilor, adecvată condițiilor existente în țara noastră. În acest sens, și-a propus în principal următoarele obiective:

- crearea unei baze de experimentare privind deformarea plastică a metalelor în câmp macrosonic, cu scopul de a produce, transfera și măsura energia acustică ;
- studierea implicațiilor interacțiunii macrosunetelor cu metalul în focarul de deformare, respectiv, influența macrosunetelor asupra condițiilor de frecare și de deformare a metalului, stabilitatea dinamică a focarului de deformare și modificarea unor proprietăți mecanice ale produselor ;
- conceperea și experimentarea unor tehnologii eficiente de tragere macrosonică a țevilor.

Rezolvarea concretă a acestor obiective s-a făcut în cele șase capitole ale lucrării în felul următor:

În cap.I s-au prezentat o serie de elemente teoretice de acustică. Acest lucru s-a considerat necesar într-o lucrare de acustică aplicată, datorită utilizării repetate pe parcursul lucrării a acestor elemente teoretice în condițiile frecvenței reduse la care apar astfel de lucrări.

Prezentarea stadiului actual al problemei s-a realizat în cap.II, într-un mod care ține seama de nivelul redus al cerce-

tărilor pe plan mondial privind tragerea la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic. Astfel, în acest capitol problema se reliefează într-un mod mai complex, prezentându-se propriu-zis o monografie asupra bazelor teoretice a proceselor de deformare plastică a metalelor în câmp macrosonic.

Materialul și metodică de cercetare s-au inclus în cap. III. Materialul de cercetare a fost constituit din țevi din producția curentă a Întreprinderii de Tevi "Republica" - București. În cadrul metodicii de experimentare se expun principiile și calculele care au condus la realizarea bazei experimentale, din faza de idee pînă în faza de brevet. De asemenea, se prezintă raționamentele care au justificat alegerea parametrilor de lucru (acustici și de deformare), cît și condițiile de experimentare la determinarea altor parametri.

Cercetările teoretice și experimentale, realizate sub aspect energetic și sub aspectul modificărilor caracteristicilor mecanice și a toleranțelor dimensionale, sînt incluse în cap. IV. Pe această cale se prezintă o serie de elemente noi privind influența macrosunetelor asupra condițiilor de frecare pe dop, asupra efectului de volum al macrosunetelor și asupra modificării unor proprietăți mecanice și a toleranțelor dimensionale ale produselor trase în câmp macrosonic. În rezolvarea acestor obiective, autorul a pornit în unele cazuri de la teorie la experiment, iar în alte cazuri, invers. Această situație se explică prin nivelul redus al cercetărilor realizate în acest domeniu pe plan mondial, fapt ce a făcut ca în cercetarea proprie, uneori să aibe prioritate ideea, iar alteori, simpla observație.

Prezentarea rezultatelor aplicării în producție a cercetării s-a făcut în cadrul cap. V, într-un mod în care să nu se contravină caracterului de brevet în care se înscrie tehnologia tragerii la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic.

În cadrul cap. VI se prezintă cîteva elemente de calcul a eficienței economice a cercetării, ceea ce permite tragerea unor concluzii asupra avantajelor economice a noii tehnologii, avantaje concretizate în esență în reducerea prețului de cost mediu pe tonă de țevă cu 12,5%.

În finalul lucrării se prezintă o serie de concluzii rezultate din rezolvarea obiectivelor propuse. Cu această ocazie, datorită faptului că pe parcursul elaborării lucrării au reieșit și unele elemente de perspectivă, autorul și-a permis să facă câteva sugestii privind continuarea cercetării.

Referitor la forma de prezentare a lucrării, autorul dorește să facă unele precizări. În privința terminologiei folosite, se observă că în lucrare au fost utilizați mai mulți termeni acustici pentru aceeași noțiune fizică. Acest lucru se explică prin faptul că ultrasunetele de mari energii, respectiv, macrosunetele, constituie o preocupare relativ recentă a cercetătorilor și practicienilor, neexistând deci timpul necesar pentru elaborarea și definitivarea unei terminologii unitare. O ilustrare a acestei situații o avem în paginile celei mai prestigioase reviste de specialitate, *ULTRASONICS*, în lucrările Primului Simpozion Internațional de Macrosunete (Graz 1970) și în lucrările celei de a IV-a Conferințe Naționale de Acustică organizată de Academia R.S.R. (București 1973). Cu toate acestea, în lucrarea prezentă, folosirea unor termeni diferiți pentru aceeași noțiune fizică nu ține de domeniul semanticii, ci a fost făcută cu scopul ca într-un anumit context să se poată reda cât mai exact sensul fizic al unor fenomene. Din aceste motive și pentru a nu se crea anumite confuzii, la începutul lucrării s-a inclus un "Glosar de termeni". Tot la începutul lucrării, s-a mai introdus o filă cu "Notații generale", în care s-au inclus simboluri ce se regăsesc frecvent în lucrare.

La citarea referințelor bibliografice, autorul a făcut unele simplificări. Astfel, în cazul lucrărilor elaborate de un număr mai mare de trei autori s-a citat numai primul autor cu mențiunea "și alții" (excepție au făcut lucrările în care autorul prezentei teze de doctorat figura pe locul trei). Un număr foarte mic de referințe bibliografice consultate, au fost citate incomplet (fără a se indica volumul, pagina sau anul apariției). Acest lucru s-a datorat faptului că aceste lucrări, autorul le-a primit prin schimburi directe, sub formă de "reprint" sau "report".

În privința unităților de măsură folosite, în partea originală a lucrării s-au utilizat numai unitățile SI, în timp ce, în

partea de monografie s-au utilizat, după caz și unități ale sistemelor tolerate.

Autorul nu poate încheia această prezentare fără a aduce viile sale mulțumiri unei serii întregi de persoane, care pe parcursul celor cinci ani, cât a durat elaborarea acestei lucrări, au sprijinit și încurajat finalizarea ei. În primul rând, amintesc aici pe colegii săi de la Institutul de Cercetări Metalurgice București, care, indiferent de eșalonul în care s-au aflat, l-au sprijinit direct sau au creat în jurul său ambianța muncii creatoare. De asemenea, aduce viile sale mulțumiri colaboratorilor de la Intreprinderea de Tevi "Republica" - București, întregului personal al Catedrei de Tehnologie Mecanică de la Institutul Politehnic Timișoara, colegilor din cadrul Comisiei de Acustică a Academiei R.S.R. cât și colaboratorilor de la Institutul Politehnic - București. Cu această ocazie se gîndește la acusticienii străini - personalul redacției ULTRASONICS, B.Langenecker, R. Pohlman, J. Byron Jones - care, fie cu sfaturi, fie cu material documentar, au contribuit la finalizarea acestei lucrări.

București, februarie 1974.

1. ELEMENTE DE ACUSTICA

1.1. Vibrația sistemelor elastice

1.1.1. Vibrații libere

Producerea și propagarea undelor acustice într-un mediu elastic sînt determinate, pe de o parte, de vibrația unui corp, devenit sursă acustică și, pe de altă parte, de vibrația particulelor mediului prin care trece.

Vibrațiile pot fi efectuate în diferite moduri, însă în cazul cel mai simplu ele pot fi considerate analoage cu cele produse de un corp redus la un punct material, avînd masa M , suspendat de un resort de masă neglijabilă și rigiditate k . Se consideră că în timpul mișcării, punctul material întîmpină o rezistență dată de o forță de frecare vîscoasă, proporțională cu viteza sa de deplasare, factorul de proporționalitate fiind R_m - rezistența mecanică a sistemului.

În această situație, punctul material efectuează vibrații libere de o parte și de alta a poziției sale de repaus, amplitudinile deplasărilor fiind presupuse mici.

Ecuația unei astfel de mișcări poate fi exprimată printr-o ecuație diferențială de ordinul al doilea

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + R_m \frac{dx}{dt} + kx = 0 \quad (1.1)$$

Notînd

$$\frac{R_m}{2M} = \delta \quad (1.2)$$

care este factorul de amortizare și

$$\frac{k}{M} = \omega_0^2 \quad (1.3)$$

care este pulsația proprie sistemului ce vibrează, soluția ecuației 1.1 are forma

$$x = X_0 e^{-\delta t} \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t \quad (1.4)$$

Admițînd cazul unei forțe de frecare reduse ($\delta < \omega_0$), punctul material are o mișcare vibratorie amortizată, a cărei amplitudine

$$X = X_0 e^{-\delta t} \quad (1.5)$$

descrește proporțional cu timpul. Mișcarea este reprezentată în fig. (1.1), înfășurătoarele fiind exponențialele corespunzătoare funcției 1.5, afectate cu semnul \pm .

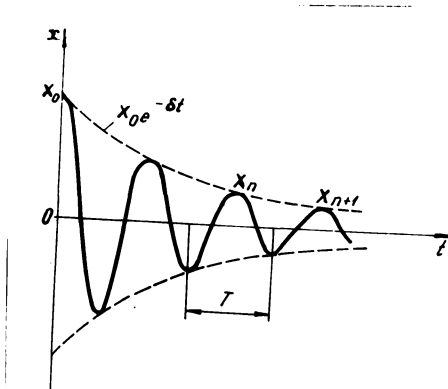


Fig. 1.1. Diagrama mișcării vibratorie amortizată.

Amortizarea mișcării poate fi caracterizată prin decrementul logaritm (Δ), definit ca logaritmul natural al raportului a două amplitudini considerate la două momente separate printr-o perioadă, adică

$$\Delta = \ln \frac{X_{n+1}}{X_n} = \ln e^{-\delta T} = -\delta T \quad (1.6)$$

Ținînd seama de valoarea lui δ , dată de relația (1.2), rezultă că, cu cît rezistența mecanică este mai mică și masa punctului material mai mare, cu atît decrementul logaritm este mai mic, deci amortizarea vibrațiilor se produce într-un interval de timp mai mare.

Pe de altă parte, decrementul logaritmăc fiind în funcție de perioada vibrației, rezultă că, pentru aceeași rezistență mecanică, două sisteme de mase egale se amortizează în mod diferit.

1.1.2. Vibrații forțate.

În cazul când asupra punctului material acționează în timpul mișcării o forță excitatoare periodică $F = F_0 \cos \omega_1 t$, avînd frecvența $f_1 = \omega_1 / 2\pi$, ecuația mișcării devine

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + R_m \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \cos \omega_1 t \quad (1.7)$$

Soluția acestei ecuații este de forma

$$x = X_0 e^{-\delta t} \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t + X \cos(\omega_1 t + \varphi) \quad (1.8)$$

Primul termen din membrul doi al acestei relații definește starea tranzitorie a mișcării. Valoarea acestui termen scăzînd, în funcție de timp, după un interval de timp poate fi neglijată. În acest caz, expresia (1,8) se reduce numai la a 2-a parte care definește starea staționară a mișcării. În această relație, din condițiile inițiale și din ecuația (1.7), rezultă

$$X = \frac{F_0}{\omega_1 \sqrt{R_m^2 + \left(\frac{k}{\omega_1} - M\omega_1 \right)^2}} \quad (1.9)$$

care reprezintă amplitudinea vibrațiilor forțate și

$$\varphi = \arctg \frac{M\omega_1^2 - k}{R_m \omega_1} \quad (1.10)$$

care reprezintă defazajul dintre forța excitatoare și viteza oscilației forțate.

Cantitatea de sub radicalul expresiei (1.9) reprezintă patratul modului impedanței mecanice a sistemului de vibrație

$$Z_m = \sqrt{R_m^2 + \left(\frac{k}{\omega_1} - M\omega_1 \right)^2} = \sqrt{R_m^2 + X_m^2} \quad (1.11)$$

unde R_m este rezistența mecanică, iar X_m este reactanța mecanică.

Tinând seama de relația (1.3), expresia 1.9 se mai poate scrie

$$X = \frac{F_0/k}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{R_m}{k} \omega_1\right)^2}} \quad (1.12)$$

Notînd cu R_{cr} rezistența mecanică la care se obține amortizarea critică dată de relația

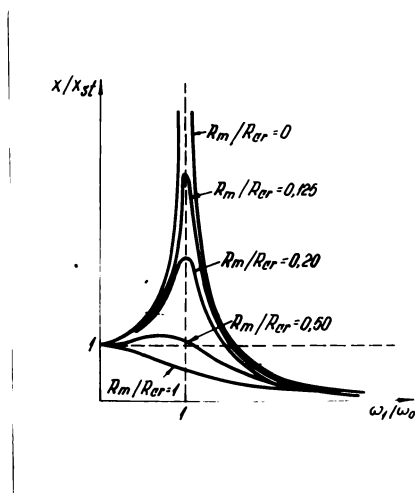
$$R_{cr} = 2 M\omega_0 = 2 \sqrt{Mk} \quad (1.13)$$

expresia (1.12) devine

$$X = \frac{F_0/k}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(2 \frac{R_m}{R_{cr}} \frac{\omega_1}{\omega_0}\right)^2}} \quad (1.14)$$

(28^e)^v

Curbele de variație a amplitudinii vibrațiilor forțate în funcție de raportul ω_1/ω_0 dintre pulsația forței excitatoare și pulsația proprie a sistemului care vibrează, pentru diferite valori ale raportului R_m/R_{cr} , sînt indicate în fig.1.2.



INSTITUTUL POLITEHNIC
TIMIȘOARA
BIBLIOTECA CENTRALĂ

Fig. 1.2. Curbe de rezonanță corespunzătoare diferitelor valori ale raportului R_m/R_{cr}

Din examinarea fig. 1.2 se constată că valorile amplitudinilor vibrațiilor forțate ating un maximum egal cu $F_0/k_m \omega_0$, atunci cînd $\omega/\omega_0 = 1$. În această situație apare fenomenul de rezonanță.

În cele de mai sus s-a făcut ipoteza că punctul material are o mișcare vibratorie cu amplitudini mici ale deplasării. Studiul mișcării s-a făcut în acest caz cu ajutorul ecuațiilor liniare. În alte cazuri, însă, mișcarea punctului material nu mai poate fi considerată că se produce cu amplitudini mici ale deplasării de o parte și de alta a poziției de repaus, ci cu deplasări pronunțate, denumite, de amplitudine finită. Studiul mișcării în acest caz comportă folosirea ecuațiilor nelineare. Reacția sistemelor nelineare, în care se folosesc ultrasunete de intensități mari, este mai complexă, incluzînd armonice și subarmonice.

Pentru a se evita calculele laborioase, rezolvarea problemelor care intervin în cazul vibrațiilor nelineare, se poate face prin folosirea analogiilor electro-mecanice.

1.2. Unde acustice.

O parte din energia de vibrație, pe care o posedă un corp la un moment dat, se transmite mediului înconjurător punînd în vibrație particulele acestuia. Se produce astfel o perturbație care se transmite din aproape în aproape prin mediul elastic, creîndu-se unde elastice, care iau alternativ forma unei compresiuni sau a unei rarefierii (expansiuni). Datorită faptului că modul în care se poate produce o perturbație într-un mediu elastic poate diferi de la caz la caz, undele elastice sînt și ele de tipuri diferite.

Dacă undele acustice, ce reprezintă o categorie de unde elastice, au frecvențe care fac să impresioneze organul auditiv al omului, ele se mai numesc și unde sonore. Dacă însă frecvențele lor depășesc limita superioară a frecvențelor audibile, pentru omul otologic normal 16 KHz, ele se numesc unde ultrasonice.

Undele ultrasonice pot fi de diverse tipuri, în raport cu traiectoria pe care o pot avea particulele mediului și cu natura și dimensiunea corpului prin care se propagă.

În cazul cînd traiectoria este liniară și deplasarea particulelor se produce în direcția propagării undelor, undele se numesc longitudinale. Asemenea unde se pot propaga prin orice mediu elastic: gazos, lichid sau solid.

Dacă dimensiunile corpului solid nu pot fi considerate infinite și devin comparabile cu lungimea unei acustice, se produce o schimbare a volumului corpului prin care se propagă undele, undele numindu-se în acest caz cvasilongitudinale.

Cînd traiectoria particulelor este tot liniară, însă deplasarea particulelor se face într-o direcție perpendiculară pe direcția propagării undelor, acestea se numesc unde transversale. Asemenea unde se pot propaga numai în medii solide nelimitate sau în lichide foarte vîscoase, adică în medii care dispun de o rigiditate a formei.

Dacă corpul solid are dimensiuni finite - o bară sau o placă a căror rază, respectiv grosime, sînt comparabile cu lungimea unei - în loc de unde transversale apar unde de încovoiere.

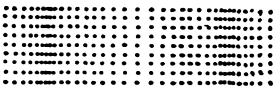

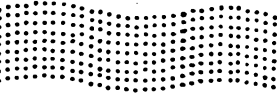
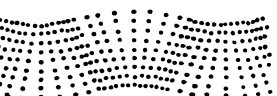
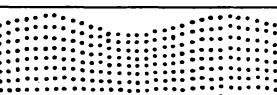
În cazul cînd traiectoria este un cerc cu centrul în poziția de repaus a particulei sau o elipsă conținută într-un plan paralel la direcția de propagare a undelor, acestea se numesc unde de suprafață sau unde Rayleigh. Acest tip de unde se întîlnesc în semispații lichide sau solide la suprafața de separație a unor asemenea medii în contact cu vidul sau cu un mediu suficient de rarefiat, de exemplu, aerul.

Dacă traiectoria particulei este tot circulară, însă planul circular este perpendicular pe direcția de propagare a undelor, acestea se numesc unde de torsiune. Acestea se întîlnesc în cazul barelor circulare sau a tuburilor supuse acțiunii unor cupluri.

Existența undelor de suprafață implică o anumită adîncime a mediului lichid sau o anumită grosime a corpului solid, acestea trebuind să fie mai mari decît lungimea de undă. Sînt cazuri, însă, cînd grosimea unei plăci este egală sau mai mică decît lungimea de undă. În această situație nu se mai produc unde de suprafață pure, ci o variantă a acestora, cunoscute sub denumirea de unde de placă. Direcția de propagare a unei de placă este paralelă cu suprafața plăcii și întreașă secțiune a plăcii la parte la mișcarea de vibrație, deci la transportarea energiei.

Fiecare tip de undă menționat mai sus se caracterizează printr-o viteză de propagare, funcție de elasticitatea de volum a mediului și de densitatea acestuia. Reprezentarea schematică a tipurilor de undă și expresia vitezei lor, se indică în tabelul 1.1.

Tabelul 1.1

TIPUL DE UNDA	REPREZENTARE	MEDIUL	EXPRESIA VITEZEI	NOTATII
Unde longitudinale.		Gaze	$a_L = \sqrt{\frac{\mu \times}{\rho}}$	μ - presiunea gazului ρ - densitatea gazului \times - raportul căldurilor specifice
		Lichide	$a_L = \sqrt{\frac{1}{k\rho}}$	k - compresibilitatea
		Solide	$a_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\sigma}{1-\sigma-2\sigma^2}}$	E - Modul de elasticitate longitudinal σ - coeficientul lui Poisson
Unde evasilongitudinale		Solide de dimensiuni limitate	$a_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$	
Unde transversale		Solide	$a_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$	G - modulul de elasticitate transversal.
Unde de încovoiere.		Solide de dimensiuni limitate	$a_I = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$	$B = \omega d \sqrt{\frac{E\rho}{1-\sigma^2}}$ B - rigiditate la încovoiere d - grosimea corpului ω - pulsația
Unde de suprafață.		Solide	$a_S = \frac{0,87+1,12\sigma}{1+\sigma} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \approx \approx 0,9 \sqrt{\frac{G}{\rho}}$	
Unde de torsiune		Solide	$a_R = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$	

Regiunea mediului elastic care se găsește în stare de vibrație, fiind sediul unor unde acustice, poartă denumirea de câmp acustic. În cazul particular al undelor ultrasonice, sediul acestor unde este câmpul ultrasonic. În ultimul timp, în acustică, s-a introdus noțiunea nouă de câmp macrosonic, ca sediu al undelor care interacționează activ cu mediul în stare de vibrație. Astfel, diferența între ultrasunete și macrosunete este numai cantitativă. Noțiunea de ultrasunete se referă la acele nivele energetice ale undelor elastice care, în timpul acțiunii lor, ne pot furniza o informație asupra stării mediului prin care se propagă. Noțiunea de macrosunete, implică nivele energetice mai mari care, în timpul acțiunii lor, interacționează activ cu mediul prin care se propagă, accelerând în acesta diversele procese fizico-chimice în curs de desfășurare, uneori producând modificări reziduale.

Dacă perturbația este produsă de un punct material aflat în vibrație (sursă punctuală), fronturile undei sînt suprafețe sferice, avînd centrul într-un punct care coincide cu sursa. Acestea sînt undele sferice. Cînd frontul undei poate fi asimilat cu un plan perpendicular pe direcția de propagare, undele corespunzătoare se numesc unde plane. Acestea sînt undele care își găsesc cea mai largă aplicare în practică.

Să considerăm că o undă acustică plană se propagă într-un mediu perfect elastic, omogen și izotrop, fără pierderi, după direcția axei x . În acest caz, presiunea acustică variază în timp și spațiu, ecuația undei fiind

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (1.17)$$

c reprezentînd o constantă care depinde de caracteristicile mediului elastic, numită viteza de fază sau viteza de propagare a undelor longitudinale.

Soluția generală a ecuației (1.17) poate fi scrisă sub forma

$$p = \psi_1 (ct - x) + \psi_2 (ct + x) \quad (1.18)$$

în care $\psi_1 (ct-x)$ și $\psi_2 (ct+x)$ sînt funcții arbitrare, putînd fi funcții sinusoidale, exponențiale, logaritmice etc. Forma specială a acestor funcții, corespunzătoare unei situații fizice date, depinde de modul în care s-a produs perturbația.

Observăm că expresia (1.18) conține doi termeni. Primul termen reprezintă propagarea undei în direcția x - ilor pozitivi, caracterizînd unda progresivă. Cel de al 2-lea termen reprezintă propagarea undei în direcția x - ilor negativi, caracterizînd unda care se înapoiază spre sursa acustică ce a produs-o. Deci, soluția generală a ecuației unidimensionale a undei reprezintă simultan două perturbații, care se propagă în același timp cu aceeași viteză, însă în sensuri opuse. Dacă se admite că mediul este extins la infinit, există numai unde progresive, cel de al 2-lea termen al ecuației (1.18) anulîndu-se.

Considerînd cazul cel mai important și, în același timp, cel mai uzual al unei perturbații sinusoidale, ecuația (1.18) scrisă sub formă exponențială, devine

$$p = P_1 e^{jk(ct-x)} + P_2 e^{jk(ct+x)} \quad (1.19)$$

în care P_1 este amplitudinea presiunii corespunzătoare undei plane cu frecvența $f = \omega / 2\pi$ propagîndu-se în direcția x -ilor pozitivi cu viteza c ; P_2 este amplitudinea presiunii corespunzătoare undei plane cu frecvența $f = \omega / 2\pi$, propagîndu-se în direcția x -ilor negativi cu viteza c ; $k = \omega / c = 2\pi / \lambda$ numărul de undă, iar λ este lungimea de undă ce reprezintă distanța în direcția de propagare a undei periodice între două puncte succesive în care frontul undei ajunge în decurs de o perioadă, deci în care perturbația este în aceeași fază.

Conform celor de mai sus

$$\lambda = cT = c/f \quad (1.20)$$

Folosind relațiile lui Euler se poate trece de la forma exponențială a ecuației undei la forma sinusoidală sub care va fi utilizată în unele cazuri în prezenta lucrare.

Astfel

$$p = P_1 \sin(\omega t - kx + \varphi_1) + P_2 \sin(\omega t + kx + \varphi_2) \quad (1.21)$$

unde φ_1 și φ_2 sînt defazajele respective.

Relații analoage cu (1.21) pot fi stabilite luîndu-se în locul presiunii acustice alți parametri ai mișcării, ca viteza particulei sau deplasarea particulei mediului, pusă în vibrație ca urmare a propagării undei. Aceste relații pot fi deduse cu ușurință știind că

$$u = \frac{p}{\rho c} ; \quad x = \int u dt$$

în care u este viteza particulei, ρ densitatea mediului prin care se propagă unda, iar x deplasarea particulei în jurul poziției sale de repaus.

Undele acustice plane se supun legilor generale ale reflexiei și refracției. De asemenea, în cazul prezenței unui obstacol într-un câmp acustic, poate apare fenomenul de difracție și difuzie acustică. În propagarea sa printr-un mediu elastic, unda acustică pierde treptat din energia pe care o avea inițial, suferind în acest mod o atenuare. Considerăm că în această lucrare nu este cazul să prezentăm mai pe larg toate aceste fenomene, tratarea acestora fiind efectuată detaliat în manualele de fizică /1/ /2/.

1.3. Mărimi acustice.

În studiile legate de propagarea undelor ultrasonice prin diferite medii, pe lângă presiunea acustică și viteza particulei se folosește frecvent o altă mărime, definită ca un raport al acestora

$$Z = \frac{p}{u} \quad (1.22)$$

numită impedanță acustică specifică.

Aceasta este o mărime "complexă", deoarece presiunea acustică în general nu este în fază cu viteza particulei. Doar în cazul particular al undelor progresive, care se propagă într-un mediu nelimitat, fără pierderi de energie, presiunea acustică și viteza particulei găsindu-se în fază, impedanța acustică specifică este o mărime reală. În acest caz, ea devine egală cu produsul dintre densitatea mediului și viteza de propagare a undei acustice prin acest mediu, adică

$$Z = \rho c \quad (1.23)$$

Cum această mărime depinde de caracteristicile fizice ale mediului, produsul ρc se mai numește impedanță caracteristică a mediului.

În aplicațiile practice ale ultrasunetelor și macrosunetelor, are mare importanță energia undelor acustice, din care motiv, mai jos se prezintă succint unele elemente privind această mărime acustică.

Având în vedere ecuația (1.8), admitem că unda care se propagă într-un mediu de-a lungul axei x este exprimată prin ecuația

$$y = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad (1.24)$$

Energia porțiunii de mediu în care se propagă unda se compune din energia cinetică W_c și energia potențială W_p . Notînd volumul porțiunii mediului cu V , masa sa cu m iar viteza de deplasare a particulelor mediului cu u , energia cinetică a volumului respectiv de mediu se scrie astfel

$$W_c = \frac{1}{2} m u^2 \quad (1.25)$$

Substituind în ecuația (1.25) valorile $m = \rho V$ și

$u = \frac{dy}{dt} = -A\omega \sin\omega(t - \frac{x}{c})$, expresia energiei cinetice va fi

$$W_c = \frac{1}{2} \rho V A^2 \omega^2 \sin^2\omega(t - \frac{x}{c}) \quad (1.26)$$

Energia potențială a porțiunii mediului de volum V , supus deformării relative $\frac{dy}{dx}$, se scrie astfel

$$W_p = \frac{1}{2} \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 EV \quad (1.27)$$

unde:

dy - diferențiala deplasărilor particulelor mediului care se găsesc una față de cealaltă la distanța dx ;

E - modulul de elasticitate

Deformarea relativă a porțiunii mediului va fi

$$\frac{dy}{dx} = \frac{A\omega}{c} \sin\omega(t - \frac{x}{c}) \quad (1.28)$$

Expresia energiei potențiale poate fi scrisă astfel

$$W_p = \frac{1}{2} E \frac{A^2 \omega^2 V}{c^2} \sin^2\omega(t - \frac{x}{c}) \quad (1.29)$$

Din comparația expresiilor (1.26) și (1.29) se observă că energia cinetică și potențială variază într-o singură fază, adică ating în același timp maximul și minimul. În aceasta constă deosebirea principală a energiei de oscilație a punctului izolat de energia porțiunii mediului în care se propagă unda. La oscilația unui singur punct izolat, valoarea energiei totale rămîne constantă, în timp ce la oscilații în medii, energia totală a por-

țiunii mediului în care se propagă unda, nu rămîne constantă, deoarece energia dintr-o porțiune poate trece în altă porțiune a mediului.

Adunînd expresiile (1.26) și (1.29) se află energia totală W_t a elementului de volum al mediului V .

$$W_t = W_c + W_p = \frac{1}{2} \left(\frac{E}{c^2} + \rho \right) A^2 \omega^2 V \sin^2 \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad (1.30)$$

Viteza de propagare a undelor în medii elastice fiind $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ (vezi tab. 1.1), expresia (1.30) poate fi scrisă sub forma

$$W_t = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 V \sin^2 \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad (1.31)$$

Intrucît valoarea medie a patratului sinusului într-o perioadă este egală cu $\frac{1}{2}$, energia totală medie a elementului de volum V a mediului va fi

$$W_t = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 V \quad (1.32)$$

În practică se mai utilizează densitatea medie de energie acustică, sub care se înțelege raportul energiei totale medii cuprinsă în elementul de volum, la mărimea acestui volum

$$L = \frac{W_t}{V} = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 \quad (1.33)$$

Datorită faptului că energia nu rămîne localizată în porțiunea respectivă, ci se deplasează în mediu, se introduce noțiunea de intensitate acustică. Prin intensitate acustică se înțelege, cantitatea de energie care trece în unitatea de timp printr-o suprafață unitară, așezată perpendicular pe direcția de propagare a undei.

Intrucît energia undei se propagă cu viteza sunetului, intensitatea este egală cu energia cuprinsă în paralelipipedul dreptunghiular, a cărui arie a bazei este unitatea, iar înălțimea este egală cu viteza sunetului c . Astfel, pentru intensitatea acustică se justifică expresia

$$I = L \cdot c = \frac{1}{2} \rho c A^2 \omega^2 \quad (1.34)$$

Din expresia (1.34) rezultă că valorile maxime de deplasare (amplitudine), viteza de oscilație și de accelerație a particulelor mediului în care se propagă unda, depind de intensitatea acustică și se determină din formulele

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{2 I}{\rho c}} \\ U = \sqrt{\frac{2 I}{\rho c}} \\ a = 2\pi f \sqrt{\frac{2 I}{\rho c}} \end{array} \right. \quad (1.35)$$

Intensitatea este legată direct de puterea sursei de oscilație N , sub care se înțelege mărimea energiei totale emisă de radiator, în unitatea de timp.

Integrând intensitatea I pe suprafața închisă care conține sursa de oscilație se obține puterea acustică

$$N = \oint I \, d s \quad (1.36)$$

Pentru o undă plană cu secțiunea transversală S , dacă intensitatea se distribuie uniform pe întreaga suprafață, puterea acustică este

$$N = I S \quad (1.37)$$

În acest caz, dacă este cunoscută puterea radiatorului și suprafața lui, se poate afla valoarea intensității acustice din formula

$$I = \frac{N}{S} \quad (1.38)$$

Intensitatea acustică poate fi calculată, de asemenea, dacă este cunoscută mărimea amplitudinii presiunii acustice variabilă P din formula

$$I = \frac{P^2}{2 \rho c} \quad (1.39)$$

Mărimea I , are o anumită direcție care se suprapune cu direcția mișcării undei și se numește vectorul Umov.

Pentru undele sferice care se propagă de la o sursă punctiformă, intensitatea este invers proporțională cu patratul distanței de la sursă

$$I = \frac{N}{4\pi R^2} \quad (1.40)$$

Ecuția (1.40) este justificată în lipsa absorbției în mediu, adică în situația când energia procesului ondulatoriu nu trece în alt tip de energie.

2. STADIUL ACTUAL AL STUDIULUI PROCESELOR DE DEFORMARE PLASTICA A METALELOR ÎN CIMP MACROSONIC

Cercetările privind efectul macrosunetelor asupra caracteristicilor de deformare a metalelor încep, în anul 1955, cu observațiile fundamentale ale lui F. Blaha și B. Langenecker /3-4/, privind reducerea eforturilor în cazul solicitării la tracțiune.

Tinând seama de implicațiile tehnico-economice ale prelucrării cu macrosunete, în cursul ultimilor 10 ani, s-au efectuat cercetări considerabile privind efectul aplicării vibrațiilor în procesele de deformare plastică a metalelor. Astfel, s-a studiat o varietate largă de procese care includ tragerea sîrmei /5/, laminarea /6/, extruziunea /7/, ambutisarea adîncă /8/ și tragerea la rece a țevilor /9/. Ultimul din aceste procedee este viabil azi, din punct de vedere comercial, în SUA, unde, a fost utilizat la tragerea oțelului inoxidabil și a unor metale refractare, greu deformabile, așa cum sînt titanul și tantalul /10/.

Prin aplicarea vibrațiilor la unealtă sau la piesa de prelucrat în timpul unui proces de deformare, se pot obține efecte utile /8/; /11-14/, cum sînt: reducerea efortului de prelucrare, reducerea numărului de faze tehnologice, creșterea vitezei de prelucrare.

Efectul de reducere a efortului de prelucrare a fost cel mai mult cercetat și, este considerat ca o măsură a eficacității utilizării energiei vibratorii.

Reducerea utilă a efortului de prelucrare se consideră că este cauzată de două fenomene de bază. Primul din acestea, este cunoscut ca un efect de suprafață, fiind reliefat printr-o reducere a frecării ca urmare a schimbării condițiilor de frecare la suprafața de separare dintre uncalta vibratoare și piesa de prelucrat. Al doilea fenomen, numit și efectul de volum, este reliefat printr-o micșorare a tensiunii de curgere plastică a metalului datorită încălzirii localizate. Aportul cantitativ al reducerii frecării față de creșterea gradului de deformabilitate este încă controversat /11/ ; /13/.

În cele ce urmează se prezintă principalele rezultate, obținute pe plan mondial, în studiul acestor fenomene.

2.1. Deformarea plastică a metalelor în câmp macrosonic.

2.1.1. Efectul de suprafață.

Condițiile de limită, între suprafața de contact a metalului de prelucrat cu scula de lucru, în cazul prelucrării metalelor prin deformare plastică, depind în principal de regimul de deformare, de asperitățile suprafeței sculei și de ansamblul proprietăților fizico-chimice și mecanice ale lubrifiantului.

Mecanismul de acțiune al macrosunetelor asupra condițiilor de limită, se reduce la schimbarea cinematicii de alunecare la suprafața de contact și a eficienței de acțiune a lubrifiantului. Schimbarea cinematicii de alunecare la suprafața de contact, s-a dovedit că depinde în mare măsură de direcția introducerii oscilațiilor.

Eficiența acțiunii macrosunetelor, în cazul deformării plastice a metalelor, poate fi influențată considerabil prin alegerea corectă a schemei de introducere a oscilațiilor în focarul de deformare, schemă determinată în principal de direcția oscilațiilor macrosonice.

R. Pohlman și E. Lehfel'dt /15/ au încercat pentru prima oară, în cadrul unor experiențe de laborator, să stabilească influența oscilațiilor ultrasonice, de direcții diferite, asupra frecării de contact în funcție de viteza de alunecare. Deși modelul experimental al lui Pohlman și Lehfel'dt a prezentat o serie de imperfecțiuni, aceștia au determinat influența direcției oscilațiilor ultrasonice și a vitezei de alunecare, asupra gradului de reducere a forței de frecare.

V.P. Severenco cu colaboratorii săi /12/, înlăturînd imperfecțiunile de metodă din experiențele lui Pohlman și Lehfel'dt, efectuează cercetări privind influența oscilațiilor ultrasonice de direcție diferită în funcție de intensitatea oscilațiilor, sarcina și viteza de alunecare, pentru perechi de frecare oțel-cupru și oțel-oțel.

Coeficientul de frecare fiind determinat prin raportul

$$\mu = \frac{F}{P} \quad (2.1)$$

autorii lucrării /12/, apreciază eficiența acțiunii oscilațiilor ultrasonice asupra frecării de contact după formula

$$k = \frac{\mu_0 - \mu_\mu}{\mu_0} \quad (2.2)$$

unde

F - forța de frecare

P - forța normală la suprafața de contact

μ_0 și μ_μ - coeficienți de frecare fără și cu oscilații ultrasonice.

Independent însă de metoda experimentală, Pohlman /15/ și Severdenco /12/ ajung la același rezultat, anume că, energia vibratorie reduce forța de frecare dintre sculă și interfața piesei de prelucrat. Cu toate acestea, nu toate mecanismele ce stau la baza efectului de suprafață sînt cunoscute. Majoritatea lucrărilor experimentale întreprinse pentru a studia reducerea frecării, au fost efectuate în laborator, în condiții de deformare elastică și, deci, trebuie studiată posibilitatea ca rezultatele unor astfel de lucrări, să poată descrie reducerea frecării în timpul deformării plastice.

În această privință sînt semnificative lucrările întreprinse la Universitatea Aston din Birmingham /13-14/, din care motiv, considerăm oportună o reliefare succintă a acestor lucrări. Astfel, cercetătorii de la Universitatea Aston enumeră cinci mecanisme posibile de reducere a frecării, mecanisme ce se prezintă în cele ce urmează.

a) Separarea suprafețelor. - În timpul vibrării, scula vibrată se poate separa de piesa de prelucrat, avînd loc o mișcare relativă între sculă și piesă. Astfel, timpul de contact și forțele de prelucrare vor fi mai mici, în plus, separarea poate da naștere la restabilirea periodică a peliculei de lubrifianț pe suprafața de contact.

b) Reversarea frecării. - În timpul operației de prelucrare a metalelor, forțele de frecare se opun de regulă mișcării sculei. În cazul vibrării sculei, se schimbă direcția și (sau) sensul mișcării sculei și, deci, când viteza sculei depășește pe cea a piesei de prelucrat, se schimbă și direcția în care acționează forțele de frecare. Drept rezultat, apare o reducere a forței de frecare eficace.

În fig.2.1 se arată efectul reversării frecării.

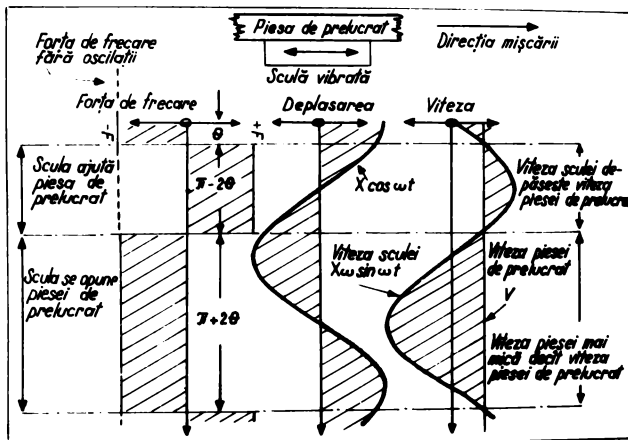


Fig.2.1. Reprezentarea efectului de reversare a frecării

Din analiza acestei figuri se observă că în intervalul de timp $(\pi - 2\theta)$, forța de frecare este pozitivă și, deci, ajută mișcarea piesei de prelucrat, în timp ce, în intervalul de timp $(\pi + 2\theta)$, forța de frecare este negativă, opunându-se astfel mișcării efectuate de piesa de prelucrat.

Mișcarea relativă între unealtă și piesa de prelucrat este nulă când

$$V = X\omega \sin \theta = u \sin \theta \quad (2.3)$$

respectiv

$$\theta = \arcsin \left(\frac{V}{X\omega} \right) \quad (2.4)$$

în care, V , este viteza de avans a piesei de prelucrat. Dacă se postulează că forța de frecare F de pe scula care ajută mișcarea

este egală cu cea care se opune mișcării, atunci forța de frecare medie pe ciclu va fi

$$\tilde{F} = \left[(\pi - 2\theta) - (\pi + 2\theta) \right] \frac{F}{2\pi} \quad (2.5)$$

adică

$$\tilde{F} = \frac{2 F \theta}{\pi} \quad (2.7)$$

Se observă astfel că $\tilde{F} \ll F$ deoarece $2\theta \ll \pi$.

În această privință este necesar să amintim că V.P. Severdenco cu colaboratorii săi /12/, a ajuns anterior la aceleași rezultate.

c) Încălzirea asperităților. - Se crede că datorită vibrațiilor, asperitățile formînd suprafețe în contact, se încălzesc, posibil adiabatic. Această încălzire reduce rezistența la forfecare a asperităților și, deci, sudurile pot fi forfecate mai ușor.

d) Pomparea lubrifianților. - Se crede că vibrațiile pot pompa în mod efectiv lubrifianții între două suprafețe în contact și, deci, se crează condiții mai bune de lubrifiere.

e) Efectul de curățire. - Procesul de curățire ultrasonică este bine cunoscut. Astfel, atunci cînd un ansamblu de tragere cu mai multe filiere este imersat într-o soluție activată ultrasonic, sîrma se păstrează mult mai curată decît în cazul cînd nu se aplică vibrații. Cazul curățirii ultrasonice sugerează prezența unui lubrifiant activ, ceea ce permite o legătură mai eficientă a lubrifiantului cu metalul care se deformează.

Se cunoaște faptul că lubrifiantul este un factor tehnologic important, care influențează frecarea în focarul de deformare prin:

- scăderea coeficientului de frecare, respectiv reducerea forțelor de frecare ;
- scăderea presiunii în focarul de deformare ;
- îmbunătățirea calității suprafeței, etc.

Din acest motiv, V.P. Severdenco /12/, a întreprins cercetări privind influența macrosunetelor asupra eficienței lubrifianților în cazul refulării aluminiului. Eficiența acțiunii lubrifianților, a fost determinată prin compararea forțelor maxime care apar în procesul de refulare fără și cu macrosunete. Astfel, s-au cercetat 23 lubrifianți a căror compoziție se prezintă în tabelul 2.1.

Tabelul 2.1

Lubrifianți folosiți în cercetări de V.P. Severdenco /12/

Nr. Denumirea (compoziția) lubrifianțului lubrif.	Raportul cantitativ de compoziție %
1 Ulei de transformator	100
2 Ulei - vaselină	100
3 Ulei de mașină	100
4 Ulei de automobil	100
5 Unsoare consistentă	100
6 Ulei de ricin	100
7 Acid oleic	100
8 Parafină	100
9 Săpun de rufe	100
10 Ceară tehnică	100
11 Colofoniu + ceară tehnică	70 + 30
12 Ulei de mașină + grafit + CCl_4	50 + 40 + 10
13 Ceară tehnică + acid oleic	80 + 20
14 Ceară tehnică + acid oleic + grafit	50 + 20 + 30
15 Ceară tehnică + acid oleic + negru de fum	50 + 20 + 30
16 Ceară tehnică + talc + rumeguș	50 + 30 + 20
17 Ceară tehnică + lignină	60 + 40
18 Ceară tehnică + celuloză de vâscoză + acid oleic	40 + 40 + 20
19 Colofoniu + acid oleic + CCl_4	80 + 15 + 5
20 Lac SB - 1 S	100
21 Lac SB-1S uscat, iar apoi acoperit cu acid oleic	100 + 100
22 Clei	100
23 Ceară tehnică + stearat de Zn + acid oleic	60 + 30 + 10

In fig.2.2. se prezintă influența macrosunetelor asupra eficienței lubrifianților.

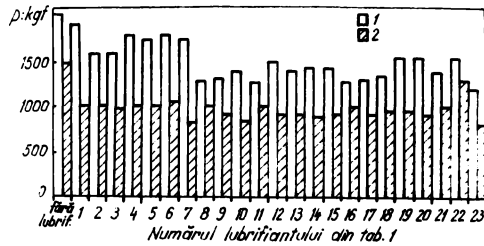


Fig.2.2 Influența macrosunetelor asupra eficienței lubrifianților în cazul refulării aluminiului:

- 1 - fără macrosunete;
- 2 - cu macrosunete.

Atrage atenția faptul că macrosunetele măresc considerabil acțiunea de lubrifiere a uleiurilor minerale (poz. 1 - 6 din tabelul 2.1). Acest fapt este confirmat și de autorii lucrării /16/ care, în cazul tragerii macrosonice a unui oțel inoxidabil (tip 18/8), au folosit ca lubrifianț un ulei mineral.

V.P. Severdenco /12/ relevă de asemenea că la aplicarea macrosunetelor, curbele de variație a eficienței lubrifianților posedă un maxim, în funcție de gradul de deformare. Eficiența lubrifianților, n , a fost determinată cu expresia

$$n = \frac{p_1/p_2}{p_3/p_4} \quad (2.8)$$

în care

- p_1/p_2 sînt presiuni specifice medii la refulare în condiții obișnuite, fără și cu lubrifianț;
- p_3/p_4 presiuni specifice medii la refulare cu aplicarea macrosunetelor, respectiv cu și fără lubrifianț.

Așa cum se observă în fig. 2.3, acest maxim pentru lubrifianți mai vâscoși este deplasat spre grade de deformare mai mari.

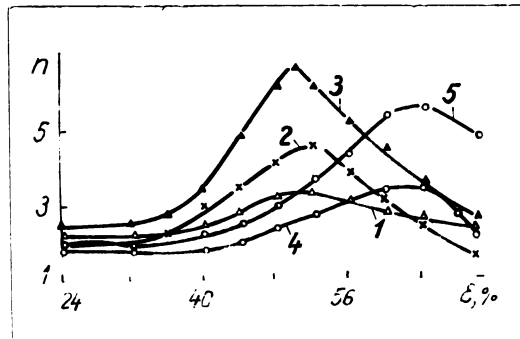


Fig.2.3 Influența macrosunetelor asupra eficienței lubrifianților la refularea aluminiului, în funcție de gradul de deformare (cifrele înscrise pe curbe corespund numărului lubrifianțului din tabelul 2.1).

2.1.2. Efectul de volum.

În timpul propagării macrosunetelor, acestea interacționează cu materia, producând tensiuni acustice și deformări elasto-plastice. Influența macrosunetelor asupra proprietăților mecanice ale metalelor se manifestă prin două efecte importante, înmuierea acustică și durificarea acustică /3/ ; /17-19/.

Înmuierea acustică se manifestă prin reducerea tensiunii statice (exterioare), necesară deformării plastice, fiind observată în timpul activării ultrasonice.

În fig.2.4 se prezintă, după R.Pohlman și E.Lehfeldt /15/ curba tensiune deformație pentru cupru policristalin, obținută prin suprapunerea energiei acustice peste sarcina statică de încercare la tracțiune.

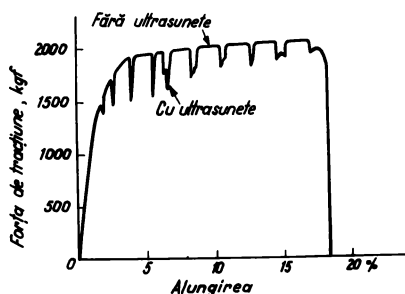


Fig.2.4 Reducerea forței de tracțiune prin impulsuri macrosonice în cazul cuprului policristalin (temperatura 22°C , frecvența macrosunetelor 20 kHz, lungimea epruvetei 300 mm).

o Din analiza fig.2.4 rezultă că macrosunetele reduc tensiunile statice exterioare. Explicația acestui fenomen a dat-o Langenecker /18/. Astfel, iradierea cu macrosunete produce în material componente ale tensiunii tangențiale, adecvate pentru a dezancora dislocațiile din pozițiile lor blocate de obstacole și a le deplasa prin cristale. Acest efect de dezancorare este independent de frecvență (în limitele cercetate, 16 Hz - 1 MHz), dependent de deformare - amplitudine și de pierderile de energie acustică prin histerizis.

Tensiunea statică de deformare se reduce pronunțat cu creșterea intensității de energie acustică. Langenecker /18/, încercând la tracțiune monocristale de aluminiu de înaltă puritate, la temperatura camerei, a constatat că la intensități acustice de aproximativ 50 W/cm^2 tensiunea statică tinde spre zero, în timp ce pentru oțel inoxidabil și beriliu tensiunea de zero se obține la $80 - 100 \text{ W/cm}^2$.

Efectul de înmuiere acustică s-a observat la toate metalele care au fost investigate inclusiv cadmiul, fierul, titanul și wolframul. În fig.2.5 sînt reprezentate curbe tensiune-deformație obținute pe monocristale de aluminiu /18/.

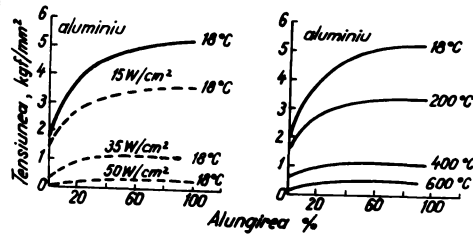


Fig.2.5 Curbe tensiune-deformație obținute pe monocristale de aluminiu:

- - - cu macrosunete
 — fără macrosunete

Curbele întrerupte arată comportarea plastică a metalului sub o continuă iradiere cu macrosunete la 20 kHz și la diferite intensități de energie. Curbele continue indică comportarea plastică a metalului, fără macrosunete, în funcție de temperatură.

✓ După cum se observă în fig.2.5, energia acustică are aceleași efecte asupra tensiunii statice ca și energia termică, însă, din punct de vedere cantitativ, în acțiunea celor două energii există o diferență importantă. Astfel, tensiunea de zero în aluminiu se obține la o densitate de energie acustică de 10^{15} eV/cm^3 , în timp ce, energia termică produce același efect la 10^{22} eV/cm^3 .

Diferența dintre efectul celor două forme de energie s-a atribuit absorbției preferențiale de către dislocații a energiei acustice. Energia acustică este absorbită numai în acele regiuni din rețeaua cristalină în care se realizează mecanismul de deformare plastică, dislocațiile și limitele grăunților, deoarece în restul regiunilor cristaline se produce o slabă atenuare a undelor macrosonice. Pe de altă parte, energia termică este distribuită mai omogen printre toți atomii cristalului, incluzând și acei atomi care nu participă la mecanismul de deformare plastică. În consecință, acțiunea energiei termice asupra deformării plastice a metalelor este mai puțin eficientă decât a macrosunetelor /13-19/.

Din aceste motive și ca urmare a acumulării de noi cunoștințe privind înmuierea acustică, în ultimii ani s-a dezvoltat intens prelucrarea prin deformare plastică a materialelor dure utilizate în industria aerospațială și nucleară, materiale care nu puteau fi prelucrate prin procedee convenționale de deformare plastică.

Durificarea acustică apare ca un efect rezidual după iradierea metalelor cu macrosunete la intensități mai mari de energie acustică tipice pentru diferite metale. Acest efect se manifestă prin creșterea tensiunii statice exterioare, necesară deformării plastice a unor metale și aliaje activate în prealabil cu ultrasunete.

În fig.2.6 se arată după Langenecker /18/, curba tensiune-deformație pentru monocristale de zinc.

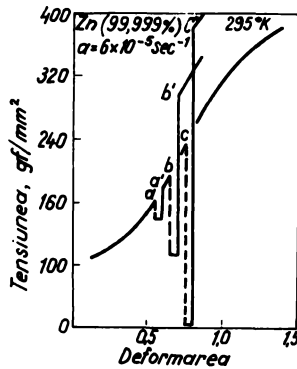


Fig.2.6 Durificarea acustică a monocristalelor de zinc.

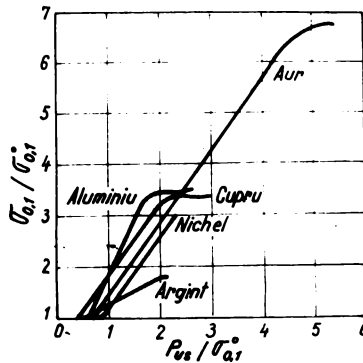
Din analiza fig.2.6 se observă că aplicând macrosunete de intensități 5 W/cm^2 , în punctul a, apare reducerea tensiunii statice exterioare. Dacă acțiunea macrosunetelor se întrerupe, tensiunea revine la curba inițială în punctul a', fără nici un fel de efecte ulterioare ale tratamentului macrosonic. Deci, la această intensitate acustică apare numai efectul de înmuiere.

Aplicînd o energie acustică cu o intensitate de peste 15 W/cm^2 , se constată apariția durificării, marcată în fig.2.6 prin punctul b'. Dacă se aplică o intensitate acustică de aproximativ 25 W/cm^2 (punctul c de pe curbă), se observă o durificare și mai pronunțată, tensiunea statică exterioară crescînd pînă în punctul c'. La intensități mai mari de 25 W/cm^2 se produce rupe-rea cristalului.

Cauzele durificării acustice a unor metale și aliaje nu sînt încă elucidate. Se poate trage totuși concluzia că acest efect are loc, în principal, prin deplasarea treptelor de dislocații în afara planelor de alunecare a cristalelor /18/.

Din cèle expuse mai sus, rezultă că valoarea intensității acustice influențează puternic gradul de înmuiere și durificare acustică. Astfel, asupra epruvetelor din aluminiu policristalin și din cupru s-au efectuat investigații privind dependența durificării acustice în funcție de presiunea (intensitatea) acustică, la diverse temperaturi de iradiere /18/; /20-21/.

În fig.2.7 se arată creșterea relativă a limitei de curgere a unor metale cu rețea cubică cu fețe centrate, în funcție de raportul dintre amplitudinea presiunii acustice și limita de curgere inițială /22/.



INSTITUTUL FIZICĂ
TIMIȘOARA
BIBLIOTECA CENTRĂ

Fig.2.7 Creșterea relativă a limitei de curgere a unor metale cu rețea cubică cu fețe centrate, la temperatura camerei, în funcție de raportul dintre amplitudinea presiunii acustice și limita de curgere inițială.

Valoarea limitei relative de curgere s-a trecut pe diagramă în funcție de raportul dintre amplitudinea presiunii acustice și limita de curgere a metalelor investigate dar neactivate cu ultrasunete. La toate metalele studiate s-a observat că durificarea începe la o presiune acustică de 0,3 pînă la 0,85 din limita de curgere inițială a metalelor neactivate cu ultrasunete.

Din fig.2.7 se observă variații mari ale durificării în cazul diferitelor metale, precum și faptul că, fenomenul de saturație apare numai la anumite metale. Autorii lucrării /22/ mai relevă că la aceeași amplitudine a presiunii acustice, aliajele se durifică mai puțin decît metalele pure, în funcție de conținutul elementelor de aliere.

În fig.2.8 se arată creșterea limitei de curgere ($\sigma_{0,1}$) și a rezistenței la tracțiune, în cazul epruvetelor din cupru pur, în funcție de amplitudinea presiunii acustice, la diferite temperaturi de iradiere /23/.

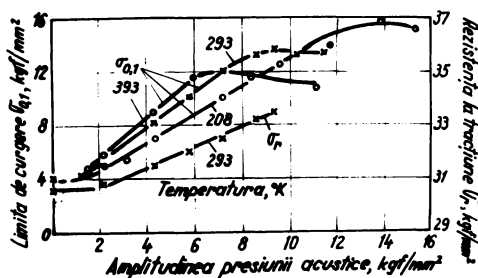


Fig.2.8 Creșterea limitei de curgere și a rezistenței la tracțiune a cuprului, în funcție de amplitudinea presiunii acustice și de temperatura de iradiere (timpul de iradiere, 30 s).

Din analiza fig.2.8 se observă că la amplitudini mici ale presiunii acustice, durificarea crește cu creșterea temperaturii de iradiere cu macrosunete și, care, datorită saturării ulterioare este maximă la temperatura cea mai scăzută.

În fig.2.9 se prezintă, după G.Kralik și B.Weiss /23/, efectul revenirii termice asupra unor epruvete de cupru iradiate cu macrosunete, la temperatura camerei, la o amplitudine a presiunii acustice de 9 kgf/mm².

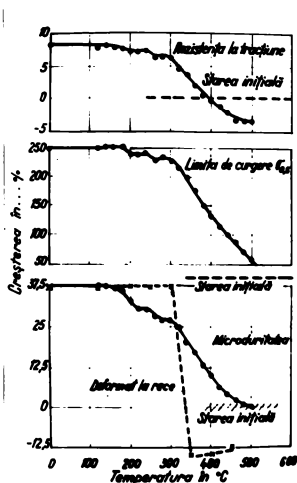


Fig.2.9 Variația rezistenței la tracțiune, limitei de curgere și microdurității, în cazul cuprului, în funcție de temperatură (amplitudinea presiunii acustice 9 kgf/mm^2 , timp de iradiere 30 s).

Diagramele din fig.2.9 ilustrează că la un tratament termic a epruvetelor activate cu ultrasunete, de pînă la 300°C , se produc reveniri neînsemnate și aproape similare la toate cele trei curbe. Peste 300°C apare o înmuiere pronunțată, care cuprinde un domeniu de temperaturi mult mai larg decît acela a recristalizării după deformare la rece prin tragere cu un grad de deformare de 12%.

Acest fapt indică că aici se manifestă mai multe fenomene, cu-n spectru larg de energii de activare, spre deosebire de recristalizarea unui metal deformat la rece care se desfășoară într-un interval de temperaturi restrîns. B.Langenecker /17/ a observat că structura prezintă regiuni cu densități de dislocații relativ mari și regiuni relativ libere de dislocații. Aceste structuri celulare a dislocațiilor sînt considerate de G. Kralik și B.Weiss /23-24/, ca fiind cauza comportării neunitare a revenirii epruvetelor activate cu ultrasunete.

G. Kralik și B.Weiss /23/ au mai constatat influența gradului de deformare, anterior activării cu ultrasunete, asupra gra-

dului de durificare acustică. Astfel, a fost analizată comportarea la curgere a unor epruvete din cupru alungite în prealabil cu 2,5 ; 5 ; 10 ; 20 și 30%. În figura 2.10 se reprezintă scăderea relativă a tensiunii de curgere în funcție de alungire, după trei minute de repaos, pentru epruvete din cupru activate și neactivate cu ultrasunete /23/.

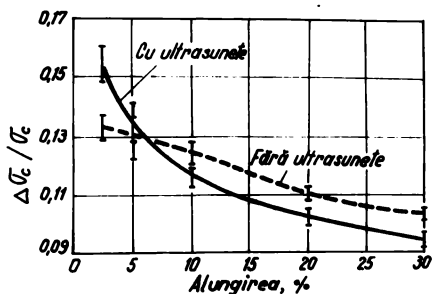


Fig.2.10 Comportarea la curgere a cuprului, iradiat și neiradiat cu macrosunete, în funcție de deformarea anterioară.

Din analiza figurii 2.10 se observă că scăderea tensiunii pînă la o alungire de circa 5%, la proba activată ultrasonic, este mai mare decît la cea neactivată, în schimb la valori de alungire mai mari, situația se inversează.

În fig.2.11 se prezintă curbele tensiune-deformație ale cristalelor de aluminiu, care inițial au fost deformate la o anumită intensitate a macrosunetelor, după care, au fost deformate mai departe, fără macrosunete, pînă la rupere /22/.

Analizînd alura curbelor din fig.2.11, rezultă că, după o alungire a cristalelor în cîmp macrosonic, cu puțin peste 10% (curba B), durificarea este mai mare decît cea realizată la deformare cu sarcină statică (curba A). Dacă cristalele se deformează și mai mult în cîmp macrosonic, atunci durificarea va fi mai mică (curbele C, D și E).

Explicațiile date acestui fenomen sînt încă în domeniul ipotezelor. Se poate trage însă concluzia că macrosunetele durifică cristalele moi pînă la o anumită valoare de saturație, iar acelea care sînt deja durificate se înmoale.

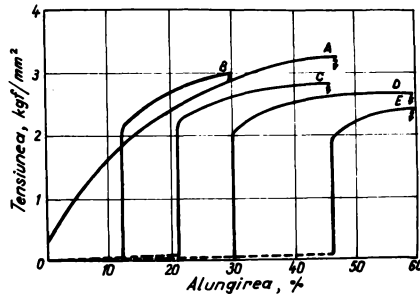


Fig.2.11 Curbe tensiune-deformație a cristalelor de aluminiu după o deformare anterioară în câmp macrosonic:

--- cu macrosunete;
 — fără macrosunete.

G.Kralik și B.Weiss /23/ au mai efectuat cercetări, pe un oțel austenitic (18% Cr și 8% Ni), privind apariția durificării în funcție de amplitudinea presiunii acustice la diferite temperaturi de activare (fig.2.12).

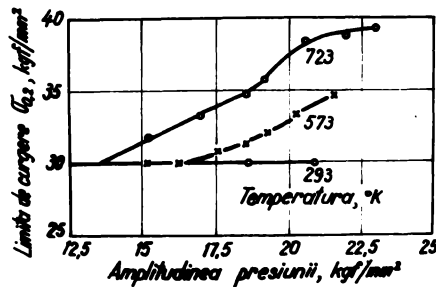


Fig.2.12 Creșterea limitei de curgere a unui oțel austenitic în funcție de amplitudinea presiunii și de temperatura de iradiere cu macrosunete (timpul de iradiere, 30 s).

Așa cum se observă în fig.2.12, investigațiile nu indică apariția durificării la temperatura de activare de 20°C deoarece probele s-au rupt prea devreme. Activînd însă probele la 300°C s-a obținut o durificare de 15%, în timp ce în cazul activării la 450°C, limita de curgere a crescut cu 30% față de valoarea inițială.

2.2. Tragerea la rece a țevilor în câmp macrosonic.

Procesul tragerii la rece a țevilor fără macrosunete, deci tragerea clasică sau convențională, este cunoscut /25/ așa că nu vom mai insista asupra lui. Paradoxal pare însă faptul că, deși pînă în prezent din toate procesele de deformare plastică în câmp macrosonic o viabilitate comercială are numai tragerea macrosonică a țevilor /14/, sub aspect teoretic acest proces este destul de puțin studiat. Explicația constă în aceea că cercetările teoretice s-au dezvoltat mai ușor în cazul unor solicitări simple (tracțiune, torsiune, etc.), pe metale omogene, de regulă monocristale, întîmpinînd dificultăți în cazul solicitărilor multiple, cum este tragerea la rece a metalelor tehnice.

Dacă însă elementele teoretice privind procesul de tragere la rece a țevilor în câmp macrosonic sînt reduse, literatura, dispune de o serie de date tehnice referitoare la posibilitățile acestui proces cu implicații directe asupra producției.

✓ Autorul acestei lucrări menționează faptul că deși a avut o largă posibilitate de acces la literatura de specialitate din SUA, unde s-a elaborat pentru prima oară o tehnologie de tragere la rece a țevilor în câmp macrosonic (sistemul "Sonodraw"), din literatura consultată, nu rezultă elemente teoretice la nivelul realizărilor tehnologice. Astfel, principalele aspecte teoretice privind tragerea macrosonică a țevilor, vor fi reliefate după surse de informații din afara SUA.

Din aceste motive cît și datorită faptului că în domeniul tragerii macrosonice a țevilor, autorul acestei lucrări a publicat o serie de studii de sinteză, într-o carte /26/ și alte publicații /27-29/ (anexele 1 și 2), în cele ce urmează, se va prezenta stadiul actual al tragerii la rece a țevilor în câmp macrosonic prin elementele sale de bază: efectul de suprafață; efectul de volum; instalații și produse finite.

V.V. Nosal și O.M.Rîmga /30/ prezintă rezultatele unor cercetări în cazul tragerii macrosonice a țevilor fără dop, respectiv la gol. Prin aplicarea oscilațiilor macrosonice pe filieră, cu o frecvență de circa 20 kHz, în direcția mișcării țevii, s-a obținut o reducere a forței de tragere.

Autorii lucrării /30/ atribuie reducerea forței de tragere cu 20-40%, micșorării frecării exterioare, deci, efectului de suprafață. În acest sens, prezintă o justificare analitică a procesului tehnologic rațional de tragere a țevilor fără dop prin activare ultrasonică a filierei. Astfel, admitînd efectul de reversare a frecării reprezentat în schema din fig.2.1, se definește gradul de reducere a forței medii de frecare, în punctul considerat la suprafața de contact a filierei cu țeava (coeficientul "n").

După o serie de calcule și aproximații succesive, V.V.Nosal și O.M.Rîmga prezintă următoarea dependență a coeficientului "n"

$$n = \frac{\pi}{2} \frac{\omega X}{V_T} \frac{2\lambda \cos \alpha}{\cos \alpha + 1} \cos \varphi \quad (2.8)$$

în care

V_T - viteza de tragere

λ - coeficientul de alungire al țevii (gradul de deformare)

α - unghiul filierei

φ - unghiul dintre direcția oscilațiilor și direcția mișcării metalului pe suprafața de contact a filierei

$X; \omega$ - notații cu semnificație cunoscută

Pentru aprecierea influenței frecării exterioare asupra forței de tracțiune, autorii lucrării /30/, folosesc pentru exprimarea forțelor în cazul tragerii fără macrosunete, o formulă simplificată, prezentată mai jos

$$F_t = F_d + F_f = F_d (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) \quad (2.9)$$

în care

F_t - forța de tragere

F_d - componentă a forței de tragere necesară învingerii rezistenței la deformare, respectiv forța de deformare

F_f - componentă a forței de tragere necesară învingerii frecării exterioare, respectiv forța de frecare pe filieră

μ - coeficientul de frecare la suprafața de contact a metalului cu filiera

În cazul activării filierei cu ultrasunete, componenta a 2-a din formula (2.9), după V.V.Nosal și O.M.Kîmșa, se micșorează de "n" ori,

$$F_{tms} = F_d \left(1 + \frac{\mu \operatorname{ctg} \alpha}{n} \right) \quad (2.10)$$

astfel încît, reducerea procentuală a forței de tragere datorită câmpului macrosonic, este

$$\Delta F_{tms} \% = \frac{F_t - F_{tms}}{F_t} 100 = \frac{\mu \operatorname{ctg} \alpha}{1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha} \left(1 - \frac{1}{n} \right) 100 \quad (2.11)$$

Mai recent, la Universitatea Aston, au fost efectuate cercetări experimentale privind tragerea la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic /16/.

Din aceste cercetări se pot trage unele concluzii privind mecanismul procesului de tragere macrosonică pe dop, în special în ceea ce privește influența amplitudinii de oscilație a dopului asupra parametrilor de forță la grade de deformare diferite. Experimentările efectuate de cercetătorii de la Aston, au fost realizate în condiții de laborator la o frecvență de rezonanță de 18,5 kHz și la o viteză de tragere de 0,2 m/min.

Astfel, în fig.2.13 se prezintă variația parametrilor de forță în funcție de amplitudinea de oscilație a dopului, la un grad de deformare de 24%.

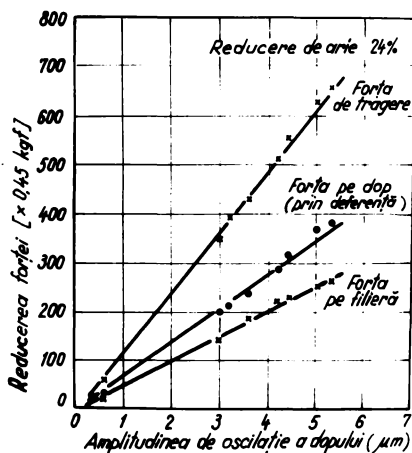


Fig.2.13 Variația parametrilor de forță ai procesului de tragere în funcție de amplitudinea de oscilație a dopului.

Din analiza figurii 2.13, rezultă că scăderea forței medii de tragere și a forței medii care acționează asupra filierei și, respectiv, scăderea forței medii care acționează asupra dopului este direct proporțională cu amplitudinea de oscilație a dopului. Această dependență lineară a fost observată, de cercetătorii de la Aston, la toate celelalte grade de deformare investigate. Rezultatele experimentale cu grade de deformare diferite se prezintă în figurile 2.14 ; 2.15 și 2.16.

În aceste diagrame se observă că reducerea parametrilor de forță ai procesului de tragere macrosonică a țevilor, nu depinde de gradul de deformare și, ca urmare, de mărimea forței de tragere.

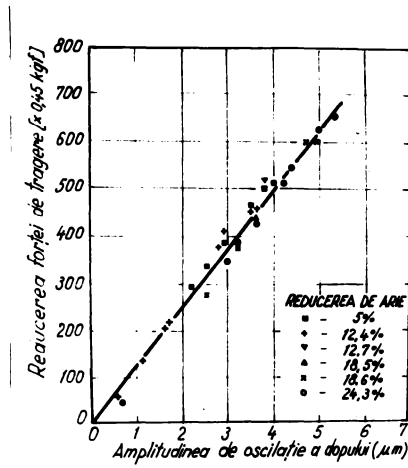


Fig.2.14 Dependența reducerii forței de tragere în funcție de amplitudinea de oscilație a dopului.

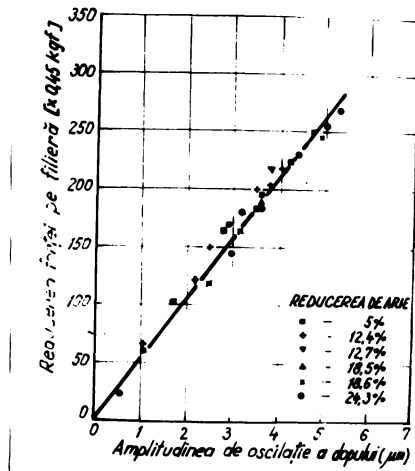


Fig.2.15 Reducerea forței care acționează asupra filierei în funcție de amplitudinea de oscilație a dopului.

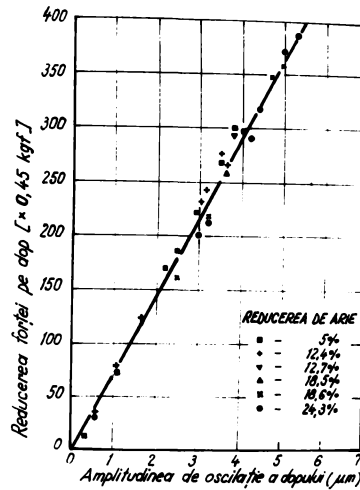


Fig.2.16 Reducerea forței care acționează asupra dopului în funcție de amplitudinea de oscilație a dopului.

Cercetările aplicative privind tragerea la rece a țevilor în câmp macrosonic, atât în ce privește tragerea fără dop /9/ cât și cu dop /31/, s-au dezvoltat odată cu punerea la punct în SUA a procesului industrial /10/ ; /32/ de tragere pe dop (Sistemul "Sonodraw"). Ceva mai recent, într-un număr de lucrări /33-36/, se prezintă noi realizări obținute în acest domeniu, realizări ce privesc atât instalațiile de producere și transfer a energiei acustice, cât și produsele finite obținute cu aceste instalații. Astfel, firma Aeroprojects Inc. din SUA, fabrică instalații ultrasonice de mare putere (tabelul 2.2).

Tragerea macrosonică a oțelurilor inoxidabile a intrat în practica curentă, aceasta extinzându-se la unele materiale considerate anterior ca dificil de deformat, ca de exemplu, titanul, niobiul și cupru-beriliu.

Tabelul 2.2

Instalații ultrasonice de activare a dopului
fabricate la Aeroprojects Inc, SUA

Tipuri de instalații	Dimensiunea de țevă maximă recomandată (inch)	
	Øe	perete
0 singură tijă - tragere unică		
Tijă dublă - tragere unică		
Patru tije - tragere dublă		
Sase tije - tragere triplă		
Putere acustică (Wați)	Øe	perete
750	0,625	0,065
1500	1,250	0,083
2250	1,500	0,134
4500	2,000	0,187
6500	2,500	0,250
9000	3,250	0,312
13500	4,000	0,500

NOTA: 1 inch = 25,2 mm

In tabelul 2.3 se prezintă după Buckley și Freeman /36/,
exemple de țevi trase macrosonic la o uzină din SUA.

Tabelul 2.3

Exemple de țevi trase macrosonic la Uniform Tube Inc, SUA

Nr. crt.	Materialul țevii	Dimensiuni (inch)				Reduce-rea ariei (%)	Viteza de tragere (fpm)
		inițiale		finale			
		Øe	P	Øe	P		
1	Cupru - beriliu	0,364	0,011	-	-	30	37
2	Bronz fosforos	0,500	0,018	0,375	0,016	34	100
3	Monel	1,875	0,120	1,625	0,068	50	60
4	Oțel inox SAE 304	1,500	0,135	1,250	0,100	37	50-150
5	Oțel inox SAE 316	0,375	0,004	-	0,0035	32	37-50
6	Oțel inox AM 350	0,750	0,026	0,690	0,022	22	175
7	Oțel inox SAE 1016	1,625	0,230	1,200	0,180	50	150
8	Titan pur	0,493	0,030	0,438	0,019	23	100
9	Aliaj Zirconiu-2	0,250	0,028	0,225	0,025	19	120
10	Niobiu	0,375	0,030	0,275	0,027	31	125

NOTA: 1 inch = 25,2 mm
1 fpm = 5 mm/s

Din analiza datelor prezentate în tabelul 2.3, cât și din analiza altor aspecte ale tragerii macrosonice, rezultă că tehnologia tragerii macrosonice a țevilor se impune față de tragerea convențională prin următoarele avantaje: reducerea forței de tragere; realizarea unei trageri mai continue și uniforme; eliminarea vibrațiilor parazite ale tijei; creșterea pronunțată a gradului de deformare pe trecere; realizarea unor **toleranțe dimensionale îmbunătățite**; creșterea duratei de viață a sculelor; îmbunătățirea gradului de finisare a suprafeței țevii; creșterea vitezei de tragere; reducerea numărului "penelor" de lubrifiere; permite tragerea profilelor de formă complexă.

Tot din această analiză, rezultă că viabilitate tehnico-economică are numai tragerea la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic. Tragerea macrosonică fără dop nu a depășit faza de laborator, fapt explicat, în primul rând, prin condițiile dificile de transfer a energiei acustice în focarul de deformare.

2.3. Privire critică asupra tragerii la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic.

Din analiza stadiului actual al tragerii la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic, rezultă unele concluzii de bază, în cadrul cărora, menționăm:

a) Sînt foarte puține date teoretice care să explice mecanismul tragerii la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic;

b) Deși rezultatele economice ale tragerii la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic sînt substanțiale, în literatură există puține elemente tehnologice privind acest nou procedeu (în această privință, menționăm că elementele tehnologice ale procedeului, se concesionează de firmele în cauză numai pe baza unor licențe).

Aspectele de mai sus, explică dificultățile existente în abordarea teoretică și experimentală a unei asemenea teme în condițiile în care dezvoltarea industrială a R.S.R. impune industriei metalurgice naționale sarcini calitative și cantitative deosebite. În acest context a rezultat necesitatea de a studia implicațiile interacțiunii macrosunetelor cu metalul în focarul de deformare, precum și conceperea și experimentarea unor tehnologii eficiente de tragere macrosonică a țevilor.

✓ Față de această situație, s-a considerat că ar avea o mare importanță dacă în cazul tragerii la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic, s-ar elucida unele aspecte teoretice și practice fundamentale. Din acest motiv, în prezența lucrare, autorul și-a propus să dea un răspuns la următoarele probleme:

- ✓ - influența macrosunetelor asupra condițiilor de frecare și de deformare a metalului în focarul de deformare, respectiv, separarea calitativă a "efectului de suprafață" și a "efectului de volum", precum și determinarea lor cantitativă;
- ✓ - modificarea unor proprietăți mecanice a produselor trase în câmp macrosonic;
- ✓ - stabilitatea dinamică a focarului de deformare sub acțiunea macrosunetelor, respectiv, influența macrosunetelor asupra toleranțelor dimensionale ale produselor.

Aceste aspecte au putut fi studiate numai pe o instalație experimentală de tragere macrosonică. În acest sens, a trebuit să se conceapă și să se realizeze întreaga tehnică experimentală, cu care ocazie, s-a dezvoltat și perfecționat metoda și echipamentul de cercetare și experimentare, prin:

- ✓ - soluționarea transferului energiei acustice în focarul de deformare;
- conceperea, proiectarea și realizarea unui generator electronic de frecvență, de putere relativ mare, precum și a altor componente mecano-acustice;
- elaborarea unor metode de măsurare a nivelelor energiei acustice utile, precum și studierea și realizarea unor dispozitive de măsurare a acestei energii;
- elaborarea unor metode și dispozitive de măsurare a forțelor de tragere și de frecare pe dop.

Pe această bază, experimentările s-au extins în producția industrială a unor tipodimensiuni de țevi din oțel carbon și inoxidabil, stabilindu-se limitele tehnologice și economice ale tragerii cu și fără macrosunete prin intermediul vitezei și gradului de deformare, dimensiunii și calității produsului finit. În final, s-a elaborat o tehnologie originală de tragere la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic.

3. MATERIALUL SI METODICA DE CERCETARE

3.1. Materialul de cercetare

Experimentările s-au efectuat pe loturi de țevi din oțel carbon recopt, avînd marca și dimensiunile specificate în tabelul 3.1.

Tabelul 3.1

Nr. lot	Marca	Dimensiunile țevii /mm/				lungimea medie (inițială)
		inițiale		finale		
		Ø e	p	Ø e	p	
1	OLT 55	29	2	20	1,5	4000
2	OLT 65	25,2	1,6	20	1	4000
3	OLT 55	25,2	1,6	19	1	4000
4	OLT 35	25,2	1,6	15	1	4000
5	OLT 35	25,2	1,6	14	1	4000
6	OLT 35	25,2	1,6	12	0,7	4000
7	OLT 35	25,2	1,6	14	0,5	4000
8	OLT 35	25,2	1,6	14	0,4	4000

Compoziția chimică și caracteristicile mecanice, după efectuarea tratamentului termic al loturilor de țevi pe care s-au efectuat experimentările, s-a încadrat în limitele prevăzute de STAS 3583/64. Numărul minim de țevi din fiecare lot a fost de 10. Se mai menționează faptul că în prezent se mai fac cercetări pe loturi de țevi din oțel inoxidabil austenitic 10 TNC 180 (marca V2A - Extra).

Matrițele (filierelè) folosite în experimentări au fost din carburi dure (WC). Dopurile utilizate au fost din carburi dure și din oțel carbon de scule (OSC-10). Dopurile din carburi, cilindrice sau flotante, au fost fabricate la ICEM prin presare în câmp ultrasonic, după o tehnologie originală, tehnologie ce a făcut obiectul unor publicații /37-41/, unui brevet de invenție /42/ și unui contract în Anglia /43/.

Lubrifiantii utilizați în experimentări au fost din categoria emulsiilor de săpun, parafinei și a uleiurilor minerale. Compoziția acestora cît și condițiile de lubrifiere au fost prezentate de autor într-un studiu în cadrul ICEM /44/.

3.2. Metodica de cercetare

3.2.1. Principii generale privind alegerea și dimensionarea instalațiilor de macrosunete

Conceperea și execuția unui sistem acustic eficient pentru tragerea la rece a țevilor cere o analiză a întregii linii de energie vibratorie, de la generator pînă la elementul terminal din focarul de deformare. Soluțiile detaliate trebuie să conducă la micșorarea pierderilor de energie acustică în fiecare element al sistemului acustic, prevăzînd o bună impedanță de ajustare între părțile componente ale sistemului, precum și amplasamente de lucru și legături acustice care să reziste la sarcinile statice și dinamice impuse.

Un sistem de macrosunete este compus în general, din următoarele părți (fig.3.1):

- sursa de energie primară, care în cazul energiei electrice este generatorul sau convertorul de frecvență ;
- convertorul de energie sau transductorul ;
- adaptorul de energie acustică sau concentratorul ;
- elemente de cuplaj și transfer a energiei acustice la locul de utilizare, în cazul nostru tije, mufe, etc.
- elemente de izolare a sistemului acustic față de influența maselor și forțelor exterioare.

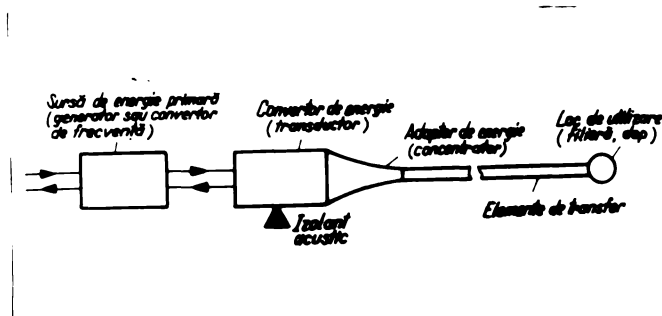


Fig.3.1. Elementele componente ale unui sistem de macrosunete.

a) Generatorul sau convertorul de frecvență.

La alegerea convertorului de frecvență, care poate fi de tip alternator, cu tuburi electronice sau cu semiconductoare, trebuie să se ia în considerare o serie de factori ca: stabilitatea, securitatea funcțională, randamentul, gabaritul, întreținerea ușoară, economicitatea, etc.

Convertorul de frecvență cu tuburi electronice, asigură o stabilitate relativ bună a tensiunii și frecvenței și suportă bine variațiile instantanee de sarcină. Cu toate acestea, utilizarea acestui tip de convertor devine dificilă în situația când sînt necesare puteri peste 4-5 kW, caz în care construcția se complică.

Pentru puteri mari, mai practice sînt alternatoarele care sînt mai ușor de întreținut, dar stabilitatea frecvenței este mai scăzută.

Un salt în tehnică îl reprezintă utilizarea convertoarelor cu semiconductoare, care sînt ieftine, cu gabarit redus, robuste și cu randament ridicat. Dar și în acest caz există dificultatea menținerii în limite optime a combinației frecvență/putere.

b) Transductorul.

Puterea emisă de transductor este în funcție de debitul de energie electrică absorbit și de eficiența prin care această energie este convertită în energie vibratorie.

După principiul fizic care stă la baza funcționării transductoarelor, deosebim trei tipuri distincte: piezoelectrice, magnetostrictive și electrostrictive.

Tipurile magnetostrictive și electrostrictive sînt cele mai utilizate în aplicațiile practice ale macrosunetelor. Transductoarele magnetostrictive au un randament relativ scăzut (20-35%), dar sînt foarte robuste, insensibile la suprasarcini, putînd funcționa și la temperaturi ridicate. Materialele electrostrictive (ceramice) au un randament mult mai bun (60-90%), dar în schimb, sînt fragile și au punctul Curie relativ scăzut.

c) Elementele de adaptare, cuplaj și transfer a energiei acustice.

Acste elemente formează legătura dintre transductoare și suprafețele de lucru. Pentru a avea pierderi minime de energie în calculul acestor elemente, trebuie să se ia în consider

tura materialelor cît și forma și geometria lor.

Materialele utilizate în acest scop trebuie să fie capabile să reziste solicitărilor mecanice mari și să aibe o impedanță acustică rezonabilă, adaptată sistemului adiacent, respectiv, să reziste la oboseală și să introducă pierderi minime de energie. În plus, aceste materiale trebuie să fie procurabile.

O atenție deosebită în proiectarea cuplajelor acustice trebuie acordată geometriei elementelor constitutive. În general, pentru o funcționare eficientă, fiecare parte din cuplaj este dimensionată pe principiul frecvenței de rezonanță.

d) Elementele de izolare acustică.

Aceste elemente fac legătura între sistemul acustic și mașina unealtă de prelucrat. Izolarea acustică are importanța esențială, cu atît mai mult în cazul tragerii țevilor, caz în care se aplică sistemului acustic sarcini statice exterioare remarcabile. Prin elemente de izolare acustică se reduce, în primul rînd, influența sarcinilor statice exterioare asupra frecvenței mecanice de rezonanță. De asemenea, izolarea acustică contribuie la reducerea pierderilor de energie acustică.

3.2.2. Alegerea modului de injecție a energiei acustice în focarul de deformare și a parametrilor acustici.

Tragerea macrosonică se poate realiza, sub aspectul modului de injecție a energiei acustice, în trei feluri; prin activarea filierei, prin activarea dopului sau prin activarea filierei și dopului.

În cazul activării filierei, undele elastice se pot propaga pe suprafața de contact a filierei cu metalul ce se deformează, în cele mai diferite direcții, din care motiv, construcția elementelor de cuplaj se complică foarte mult. Sub acest aspect, activarea dopului cu oscilații ultrasonice longitudinale este mult mai avantajoasă. În plus, densitatea de energie acustică disponibilă în acest caz, este mult mai mare decît în cazul activării filierei. Dacă se mai ține seamă că regimul critic de tragere se află pe dop, precum și de posibilitatea schimbării rapide a sculelor cu plate mecanic cu transductorul, rezultă clar avantajele activării dopului.

O instalație de macrosunete, construită din părțile menționate, este necesar să furnizeze energia acustică la nivele și frecvențe optime. Nivelele de energie electrică depind de necesitățile de energie acustică utilă, de natura transductorului folosit și de pierderile din sistemul acustic. Din datele experimentale prezentate la paragraful 2.1 rezultă că nivelele minime de energie acustică care pot produce o activare a metalului deformat sînt cuprinse între $3-6 \text{ W/cm}^2$, respectiv, amplitudini de $1-2 \mu\text{m}$.

În privința frecvenței de lucru, B.Langenecker /18/ constată că efectul de volum este independent de frecvență (în limitele cercetate, 16 Hz - 1 MHz). Ținînd seama de aspectele uneori nocive asupra omului a frecvențelor din gama auzibilă, precum și de faptul că o frecvență prea mare limitează mult dimensiunile fizice ale unor ansamble acustice, cei mai mulți cercetători folosesc în experimentări gama de frecvențe 15-30 kHz. Trebuie să mai menționăm că în cazul utilizării transductoarelor magnetostrictive, frecvența este limitată superior, de timpul de relaxare relativ mic ce caracterizează materialele magnetostrictive.

3.2.3. Instalația experimentală de tras în câmp macrosonic.

Experimentările privind tragerea în câmp macrosonic s-au desfășurat în condiții industriale, respectiv, într-o stație pilot construită și adaptată special acestui scop, la Întreprinderea de Tevi "Republica" (ITR) - București. În aceste condiții, în cadrul principiilor generale privind alegerea și dimensionarea instalațiilor de macrosunete, a trebuit să se țină seama de dotarea tehnică și de programul de fabricație a I.T.R. Astfel, experimentările s-au efectuat pe un banc de tras țevi, avînd forța de tragere maximă 100 kN și lungimea de lucru maximă 10 m., modificat și completat în vederea tragerii macrosonice (fig.3.2).

Soluția folosită pentru producerea și transferul energiei acustice în focarul de deformare, în vederea activării dopului, se prezintă în fig.3.3.



Fig.3.2. Vedere de ansamblu a bancului de tras țevi pe dop activat ultrasonic.

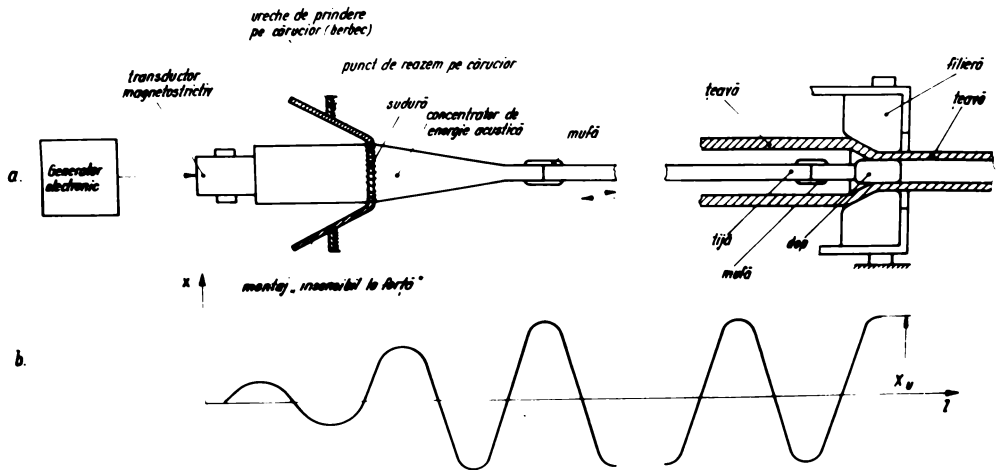


Fig.3.3. Schema de tragere la rece a țevelor pe dop activat ultrasonic:
 a) sistemul de activare a dopului ;
 b) reprezentarea oscilațiilor longitudinale cu
 modulul de vibrație

În cele ce urmează vom prezenta principalele părți ale instalației experimentale folosite la tragerea macrosonică a țevilor.

a) Generatorul de frecvență.

Alegerea tipului de generator s-a făcut ținând seama de condițiile practice existente la tragerea țevilor, anume, de necesitatea de a debita o putere suficient de mare în condițiile unei stabilități cât mai riguroase a frecvenței. Nivelul puterii electrice furnizate de generator condiționează dimensiunile țevii care poate fi fabricată eficient prin tragere în câmp macrosonic, în timp ce, o variație mică a frecvenței conduce la deplasarea antinodului oscilației longitudinale de la capătul liber al dopului (fig.3.3 - b), astfel încât, efectul macrosunetelor se diminuează, ajungând ca în nodul oscilației să fie practic nul.

Din aceste motive, am considerat că cel mai bine ar corespunde scopului și posibilităților noastre un generator electronic de frecvență, adaptabil unui transductor magnetostriktiv, deci, pe o sarcină inductivă. Astfel, în cadrul ICEM, s-a conceput și construit un asemenea generator /44/, având următoarele caracteristici de bază:

- puterea de ieșire, 2 kW, adaptată pe sarcină inductivă;
- frecvența de ieșire, reglabilă continuu în gama 10-30 kHz
- alimentare monofazată 220 V.

Generatorul astfel construit poate fi manevrat ușor în exploatare și posedă un sistem de protecție automat care acționează în următoarele cazuri:

- funcționare în gol sau scurtcircuit ;
- suprasarcină de durată ;
- blocarea accesului la sursa de înaltă tensiune din interiorul generatorului.

În fig.3.4 se prezintă schema electrică a generatorului ICEM, iar în fig.3.5 o vedere de ansamblu a acestui generator.

b) Transductorul.

Ținând seama de condițiile dificile ce există la tragerea țevilor, s-a optat pentru un transductor magnetostriktiv care este robust și rezistent la șocuri.

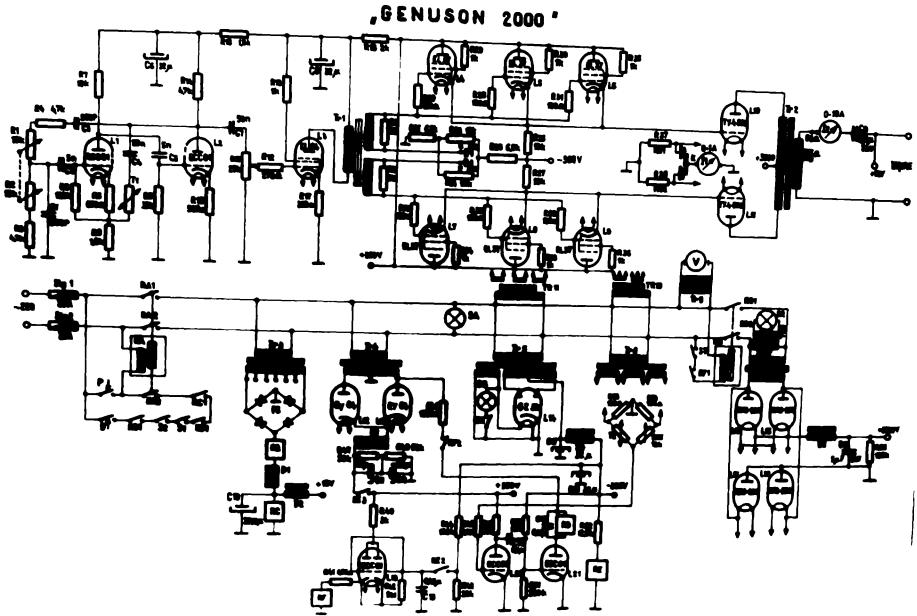


Fig.3.4 Schema electrică a generatorului ICEM, tip "GENUSON 2000".

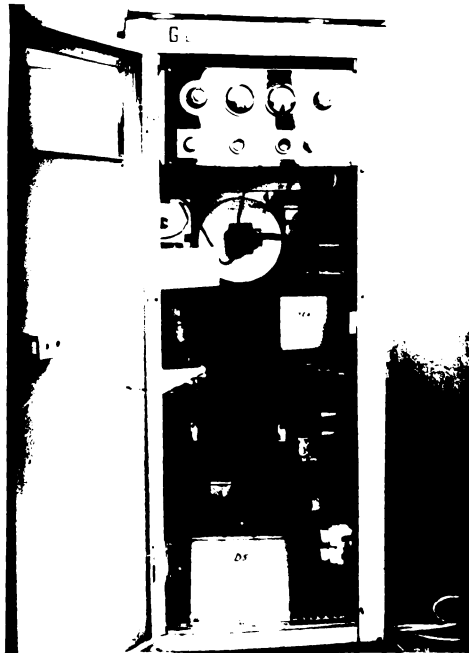


Fig.3.5 Vedere de ansamblu a generatorului

În acest scop în ICEM s-au făcut încercări de realizare a unor tipuri de transductoare magnetostrictive, transductoare care nu au corespuns însă sub aspectul randamentului magnetomecanic, din care motiv, s-a recurs la import.

În această situație, experimentările s-au efectuat cu un transductor magnetostrictiv "Kerry", tip KT 2000, avînd puterea electrică de intrare 2 kW și frecvența proprie de rezonanță 20 kHz.

- c) Elementele de adaptare, cuplaj și transfer a energiei acustice.

Ca elemente de adaptare, cuplaj și transfer a energiei acustice s-au conceput, realizat și utilizat următoarele:

- un concentrator exponențial de energie acustică, realizat din oțel inoxidabil, marca 18CrNi 8, dimensionat după principiul elementului rezonant (proiect ICEM - API 2020);
- un ansamblu mufă - tijă - mufă - dop, din OLC 50, respectiv OSC - 10 sau WC, în care fiecare element a fost dimensionat ca element rezonant pe frecvența de lucru.

- d) Elementele de izolare acustică.

Elementele de izolare acustică a sistemului acustic față de bancul de tras au fost încorporate într-un montaj "insensibil la forță".

Proiectarea și execuția acestui montaj s-a efectuat după principiul sferturilor de lungime de undă în conformitate cu proiectul ICEM - API 2020.

3.2.4. Determinarea nivelului energiei acustice.

Determinarea nivelului energiei acustice a constituit domeniul de preocupare și a altor autori /46-49/.

În cazul nostru sistemul acustic, conceput așa cum s-a arătat anterior, trebuie să fie acordat și reglat pentru un anumit regim de tragere macrosonică. Acest fapt implică determinarea și reglarea nivelului de energie acustică, precum și ajustarea elementelor lineare ale mediului de transfer, astfel încît, la frecvența de rezonanță a sistemului, în zona de lucru a dopului să avem un antinod al oscilației longitudinale.

Acest lucru comportă determinarea elongației, respectiv, amplitudinii oscilației longitudinale, cu ajutorul căreia se poate stabili, conform formulei (1.35), valoarea intensității acustice, cât și poziția antinodului față de zona de lucru a dopului din focarul de deformare.

Tinând seama de importanța practică a acestei probleme, autorul prezentei lucrări a desfășurat cercetări în vederea conceperii și executării a două tipuri de dispozitive de măsurare a amplitudinii de deplasare a oscilațiilor macrosonice. Rezultatele acestor cercetări se prezintă în cele ce urmează.

a) Traductor piezoelectric pentru măsurarea amplitudinii oscilațiilor longitudinale în medii solide.

Un element piezoelectric poate fi considerat ca o formă particulară de cuplaj dintre un sistem mecanic și un sistem electric. Eficacitatea acestui cuplaj depinde de anumite proprietăți electrice și mecanice ale acestui element. În acest caz, elementul piezoelectric poate fi caracterizat prin sistemul de ecuații /1/ :

$$\begin{aligned} D &= \xi E + eM \\ S &= eE + sM \end{aligned} \quad (3.1)$$

în care D este inducția electrostatică rezultată în urma aplicării unui câmp electric E și a unei tensiuni mecanice M , iar S este deformarea rezultată prin aplicarea aceluiași câmp electric și aceleași tensiuni mecanice. În relațiile (3.1), ξ este constanta dielectrică sau permitivitatea elementului piezoelectric considerat ca un dielectric, e este constanta piezoelectrică, iar s este o constantă elastică a mediului (rigiditatea), inversul modului de elasticitate.

Pe baza acestor proprietăți, s-au construit dispozitive piezoelectrice pentru măsurarea amplitudinii oscilațiilor longitudinale în mediul de transfer solid, respectiv, în cazul nostru în tijă și dop. La realizarea practică a acestor dispozitive s-a avut în vedere că măsurarea trebuie să se efectueze pe suprafața laterală a corpului prin care se propagă oscilațiile, că frecvența oscilațiilor este de aproximativ 20 kHz, iar amplitudinea lor de ordinul micronilor sau zecilor de microni. Din aceste motive, în

cadruul soluției tehnice, s-a ales un transductor piezoelectric cu vîrf de contact acordat pe domeniul frecvențelor de lucru. Semnalul electric furnizat de elementul piezoelectric a fost amplificat, apoi măsurat cu un voltmetru electric, dotat cu o scală etalonată în prealabil în micrometri. Schema de principiu folosită la măsurători se prezintă în fig.3.6.

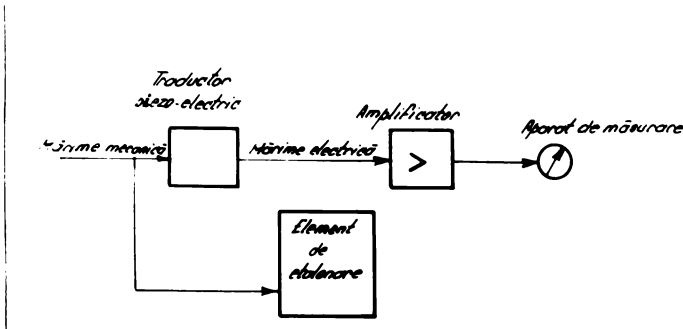


Fig.3.6 Principiul de măsurare a amplitudinii oscilațiilor longitudinale în medii solide.

În cadrul experimentărilor din faza industrială în locul amplificatorului și a aparatului de măsurare s-a utilizat un osciloscop, afișarea rezultatelor efectuându-se direct pe ecranul tubului catodic etalonat prin intermediul unui microscop. Acest montaj experimental se reprezintă în fig.3.7.

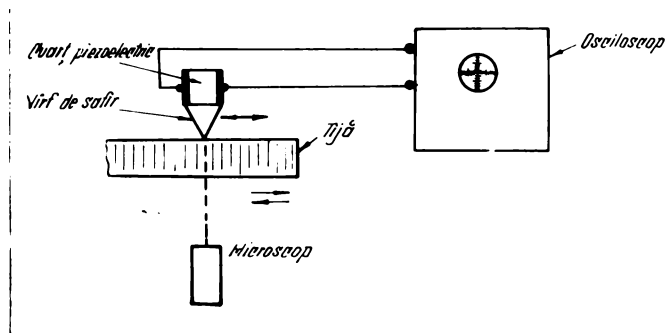


Fig.3.7 Schema montajului experimental pentru măsurarea amplitudinii oscilațiilor longitudinale în tije de traseu.

Prin deplasarea vârfului de contact din safir al cuarțului piezoelectric pe o generatoare a tijei de tras, se pot citi toate amplitudinile intermediare dintre nodurile și antinodurile de oscilație.

În cadrul operației de etalonare au apărut unele dificultăți. În primul rând, a fost necesar ca reperul urmărit optic cu microscopul să prezinte o formă și un contrast care să nu provoace erori grosiere. În acest sens, tija s-a vopsit în culoare albă, peste care s-au pulverizat picături fine de vopsea neagră cu diametrul cuprins între 10-20 μ m. Valoarea amplitudinii s-a calculat cu relația:

$$X = \frac{D - d}{2} \quad (3.2)$$

în care d este diametrul picăturii din vopsea neagră în absența oscilațiilor, iar D , axa mare a urmei picăturii de formă eliptică ce apare în prezența vibrațiilor. În aceste condiții s-a reușit să se etaloneze ecranul tubului catodic al osciloscopului în elemente de lungime. Valoarea amplitudinii se poate citi în acest caz în funcție de nivelul energiei acustice și în funcție de poziția în care s-a efectuat măsurătoarea.

b) Traductor inductiv pentru măsurarea amplitudinii oscilațiilor în medii solide conductoare.

Traductorul piezoelectric, prezentat mai sus, a dat rezultate bune numai în condiții de laborator, deci în condiții în care este necesară o sensibilitate mare și o frecvență a măsurătorilor relativ redusă.

În condiții de exploatare industrială, se impunea un dispozitiv de măsurare robust, ușor de manevrat și suficient de precis, din care motiv, s-au studiat și executat o serie de traductoare inductive.

Cu toate că J.Herbertz /48/ și E.Dobbs /49/ au studiat și realizat unele tipuri de traductoare inductive pentru măsurarea vibrațiilor în medii solide, pînă în prezent în literatură nu există o metodă unitară de calcul, care să reprezinte fidel principalele fenomene fizice, ce au loc în acest caz.

Din acest motiv, în cele ce urmează, se prezintă un calcul original de fundamentare teoretică a acestui tip de traductor. Astfel, în fig.3.8 este reprezentat modelul fizic al traductorului inductiv.

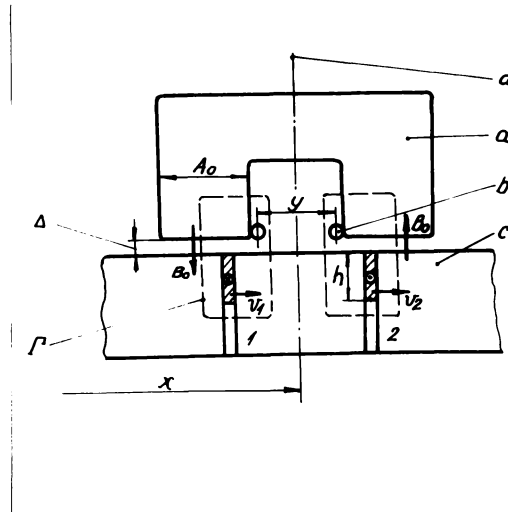


Fig.3.8 Modelul fizic al traductorului inductiv

Modelul fizic al traductorului din fig.3.8 se referă la vibrații longitudinale (axiale) ale mediului solid. În esență, traductorul se compune dintr-un magnet permanent "a" în formă de potcoavă și o bobină "b" având "N" spire dispuse între cei doi poli. Poziția de lucru a traductorului față de mediul solid "c" (în care se măsoară vibrațiile longitudinale) se observă în fig.3.8 .

În prezentul model fizic se consideră valabile următoarele ipoteze:

- a/ - câmpul magnetic este plan - paralel ;
- b/ - câmpul magnetic al polilor este uniform distribuit ;
- c/ - materialele utilizate sînt omogene și izotrope din punct de vedere magnetic ;
- d/ dimensiunile bobinei sînt foarte mici în raport cu dimensiunile magnetului permanent.

Din analiza modelului fizic adoptat rezultă că liniile câmpului magnetic nu intersectează suprafața mărginită de bobină. Astfel, fluxul magnetic prin suprafața mărginită de bobină este zero și prin urmare acest flux nu induce tensiuni electromotoare (t.e.m.) în bobină, chiar dacă fluxul magnetic inductor ar fi variabil în timp.

Traductorul conceput în acest mod, dacă se află în fața unui corp de conductivitate electrică diferită de zero, în care are loc vibrații longitudinale, în bobina traductorului se vor induce t.e.m.

Considerăm că mediul solid, prin care se propagă vibrațiile longitudinale, este format din elemente paralelipipedice a căror puncte au aceeași viteză "v". În prezența vibrațiilor, dacă aceste elemente paralelipipedice intersectează linii ale câmpului magnetic, atunci în acestea se induct t.e.m., care depind de parametrii care caracterizează vibrațiile longitudinale. Dacă traductorul se află în poziția din fig.3.8, față de bara care vibrează, atunci se poate determina sensul t.e.m. induse.

În fig.3.8 se prezintă situația pentru cazul general și care poate fi particularizat pentru două situații extreme și anume nodul vibrației se află pe axa "d" sau cazul când antinodul se află pe axa "d".

Analizând situația când nodul se află pe axa "d", se constată că $v_1 = -v_2$ și sensul t.e.m. în paralelipipedul elementar 1 este contrar t.e.m. indusă în paralelipipedul elementar 2. Curentul produs de aceste t.e.m. dă naștere unui câmp magnetic al cărui flux rezultat prin suprafața mărginită de bobină este egal cu zero și, deci în dreptul nodului, t.e.m. indusă în bobină este zero. Dacă antinodul se află pe axa "d", atunci sensurile t.e.m. induse în cele două paralelipiede elementare sînt chiar cele din fig.3.8 și avem $v_1 = v_2$. Deci fluxul variabil în timp care înălță bobina este diferit de zero și se induce o anumită t.e.m. care depinde de parametrii vibrației longitudinale (s-a considerat că deschiderea "y" a bobinei este relativ mică în comparație cu celelalte dimensiuni).

[Un model fizic similar poate fi construit și pentru traductorul de vibrații transversale, diferența constând în aceea că deschiderea bobinei "y" se consideră relativ mare în comparație cu celelalte dimensiuni. Din aceste considerente, rezultă că un astfel de traductor poate localiza nodurile și anti-nodurile (putând deci indica amplitudinea vibrației).

Modelul fizic ales permite elaborarea unor relații cantitative, utile în calculul și studiul performanțelor traductorului. Mărimea de bază care este măsurată de aparatul de măsurare este t.e.m. indusă în bobină de fluxul magnetic al curenților turbionari din mediul solid care este studiat. În consecință, se va calcula această t.e.m. conform ipotezelor enunțate anterior.

Admițând reprezentarea simplificată a traductorului inductiv (fig.3.9), deplasarea volumului elementar al barei de la distanța "x" este descrisă de două funcții f_1 și f_2 : f_1 fiind deplasarea care depinde de coordonata x; f_2 depinde de parametrul timp (t).

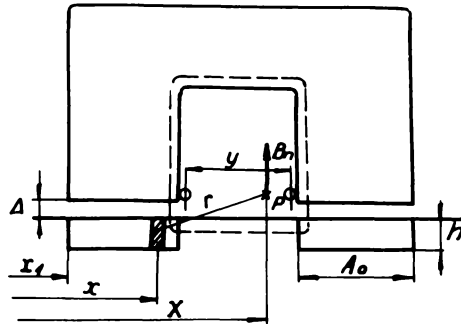


Fig.3.9 Reprezentarea simplificată a traductorului inductiv

Astfel,

$$u(x,t) = f_1(x) \cdot f_2(t) \quad (3.3)$$

Considerînd elementul paralelipipedic al barei perpendicular pe liniile de câmp și că acesta se deplasează în acest câmp cu viteză v , avem:

$$v = \frac{du(x \cdot t)}{dt} = f_1(x) f_2'(t) \quad (3.4)$$

Aplicînd legea inducției electromagnetice pe curba " Γ ", care trece prin paralelipipedul elementar și se închide prin exterior așa cum se indică în fig.3.10,

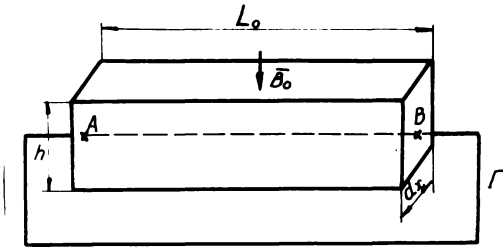


Fig.3.10 Reprezentarea paralelipipedului elementar.

se obține

$$\int_{\Gamma} (\vec{v} \times \vec{B}_0) \cdot d\vec{s} \equiv \int_{AB} (\vec{v} \times \vec{B}_0) \cdot d\vec{s} = B_0 v L_0 = U_{AB} \quad (3.5)$$

unde B_0 reprezintă inducția produsă de magnetul permanent (dimensiunea L_0 se consideră egală cu grosimea magnetului permanent în direcția conductorului bobinei). Avîndu-se în vedere legea conducției electrice și teoria efectului pelicular, se obține

$$dI = \frac{U_{AB}}{\pi k D} h \mathcal{G} dx \quad (3.6)$$

unde D este diametrul barei, h - adîncimea de pătrundere a curenților turbionari, \mathcal{G} - conductivitatea electrică și k - coeficient care are în vedere rezistența de capăt a circuitului curenților turbionari.

Dacă se consideră un punct oarecare P (fig.3.9), atunci în acest punct curentul elementar dI produce un câmp magnetic a cărui componentă normală dB_n , pe planul bobinei, conform legii circuitului magnetic, este dată de relația

$$dB_n = \frac{X - x}{r^2} \mu_0 \frac{h \sigma_{B_0} L_0 v}{2\pi^2 k D} dx \quad (3.7)$$

din care, prin integrare, se obține componenta normală rezultantă

$$B_n = \mu_0 \frac{h \sigma_{B_0} L_0}{2\pi^2 k D} f'_2(t) \left[\int_{x_1}^{x_1 + A_0} \frac{X - x}{(X-x)^2 + (\Delta + \frac{h}{2})^2} f_1(x) dx + \int_{x_1 + y + A_0}^{x_1 + 2A_0 + y} \frac{X - x}{(X-x)^2 + (\Delta + \frac{h}{2})^2} f_1(x) dx \right] = \frac{h \sigma_{B_0} L_0}{2\pi^2 k D} f'_2(t) \mu_0 I \quad (3.8)$$

În acest caz, fluxul magnetic prin suprafața S, mărginită de spiră va fi

$$\Phi = \int_S B_n L_0 dx = \mu_0 \frac{h \sigma_{B_0} L_0^2}{2\pi^2 k D} f'_2(t) \int_0^y I dx \quad (3.9)$$

iar t.e.m. indusă în bobină va fi

$$e = N \mu_0 \frac{h \sigma_{B_0} L_0^2}{2\pi^2 k D} f''_2(t) I(x_1, A_0, y, h) \quad (3.10)$$

Cunoscând că valoarea eficace a funcției $f''_2(t)$ este dată de relația

$$F_1 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{f''_2(t)}{2} \right]^2 dt} \quad (3.11)$$

Valoarea eficace a t.e.m. indusă în bobină va fi

$$E = N \mu_0 \frac{h \sigma_{B_0} L_0^2}{2\pi^2 k D} F_1 I(x_1, A_0, y, h) \quad (3.12)$$

Cunoscînd faptul că $f''(t) = \frac{\omega^2}{2} \sin \omega t$ (3.13) obținem

$$E = N \mu_0 \frac{h \sigma_{B_0} L_0^2}{2\pi^2 k D} \cdot \frac{\omega^2}{\sqrt{2}} I(x_1, A_0, y, h) \quad (3.14)$$

Avînd în vedere că în practică dimensiunile A_0 , x_1 , y sînt mici în raport cu celelalte dimensiuni, se poate găsi o expresie simplificată pentru t.e.m. indusă. În acest caz, calculînd componenta normală a inducției din axa bobinei, obținem

$$B_n = \mu_0 \frac{(A_0 + y)}{2 \left[\left(\frac{A_0 + y}{2} \right)^2 + \left(\Delta + \frac{h}{2} \right)^2 \right]} \frac{h \sigma_{B_0} L_0}{2\pi k D} A_0 (v_1 + v_2) \quad (3.15)$$

Fluxul magnetic va fi

$$\phi = L_0 y B_n = \frac{(A_0 + y) y L_0 \mu_0}{2 \left[\left(\frac{A_0 + y}{2} \right)^2 + \left(\Delta + \frac{h}{2} \right)^2 \right]} \cdot \frac{h \sigma_{B_0} L_0}{2\pi k D} A_0 (v_1 + v_2) \quad (3.16)$$

T.e.m. va fi

$$e = N \mu_0 \frac{(A_0 + y) y L_0}{2 \left[\left(\frac{A_0 + y}{2} \right)^2 + \left(\Delta + \frac{h}{2} \right)^2 \right]} \cdot \frac{h \sigma_{B_0} L_0}{2\pi k D} A_0 \frac{d}{dt} (v_1 + v_2) \quad (3.17)$$

Cunoscînd viteza v_1 și v_2 în funcție de timp se poate determina valoarea eficace a t.e.m. induse în bobină.

Deoarece viteza este descrisă de o funcție continuă, se poate considera că $v_1 + v_2 = 2v$, unde v este viteza elementului paralelipipedic care se află pe axa bobinei. În acest caz, valoarea eficace a t.e.m. induse este

$$E = N \mu_0 \frac{(A_0 + y) y L_0^2 A_0 \omega^2}{\left(\frac{A_0 + y}{2}\right)^2 + \left(\Delta + \frac{h}{2}\right)^2} \frac{h \sqrt{B_0}}{2\pi k D \sqrt{2}} f_1(x) \quad (3.18)$$

Această situație este valabilă pentru cazul cînd nodul nu se află pe axa "d". Un calcul exact arată că formula (3.18), aproximează destul de bine valoarea t.e.m. induse în bobină.

În expresia (3.18) parametrii de care depinde t.e.m. eficace sînt prezentați într-o formă explicită, fapt important în calculul utilizarea traductorului.

Dacă bara este din fier, atunci t.e.m. rezultantă $E_P = 2E$, dacă bara este din cupru atunci t.e.m. rezultantă $E_C = E$ (acest fapt rezultă din aplicarea la calculul cîmpului magnetic a metodei imaginilor).

În vederea verificării experimentale a formulei (3.18) s-au construit traductoare inductive cu caracteristici magneto-electrice și de forme diferite. Cu aceste traductoare s-au efectuat prin contact direct ($\Delta \rightarrow 0$) măsurători de amplitudini ale oscilațiilor longitudinale de frecvență ultrasonică (20 kHz) în bare de fier cu diametrul de 15 mm. În aceste condiții, experimental, în gama unor amplitudini 1 - 6 μm , s-a constatat o variație liniară a t.e.m. eficace cu amplitudinea, așa cum rezultă din formula (3.18). Astfel s-a determinat experimental curba

$$E = K f_1(x) \quad (3.19)$$

care respectă variațiile indicate de formula (3.18).

Pe baza unor construcții îmbunătățite s-au obținut traductoare de vibrații cu sensibilitate foarte bună ($S = \frac{300\text{mV}}{\mu\text{m}}$), robuste și ușor de manevrat.

Menționăm că valorificarea datelor teoretice și experimentale privind determinarea nivelului energiei acustice a fost făcută printr-un număr de lucrări /50-55/, cât și printr-o invenție în curs de brevetare /56/, invenție solicitată la export în R.D.G. /57/.

3.2.5. Condiții de experimentare la măsurarea forțelor

Pentru măsurarea forțelor a fost folosită o instalație de măsurare de proveniență "Hottinger".

Forțele de frecare pe dop au fost măsurate cu un traductor inductiv de tip $Q_2/1000-5$ avînd domeniul de măsurare ± 1000 daN, în timp ce, forțele de tragere au fost măsurate cu un traductor de tip $Q_2/10.000-5$ avînd domeniul de măsurare ± 10.000 daN.

Cabelele de măsurare, în lungime de 20 m., au fost confecționate special după care s-au echilibrat și simetrizat.

Ca amplificator de măsurare s-a folosit amplificatorul tip KWS/6T-5 (6 canale, frecvență purtătoare 5kHz).

Inregistrările s-au efectuat cu un oscilograf cu spot luminos de construcție Honeywel tip "Visicorder" 1706 cu 6 canale, galvanometre miniaturale tip BB 3000A, hîrtie sensibilă la lumină ultravioletă tip "Kodak" (baza de timp înregistrată pe hîrtie fiind 0,1 sec.).

Schema de principiu folosită în măsurători se reprezintă în fig.3.11.

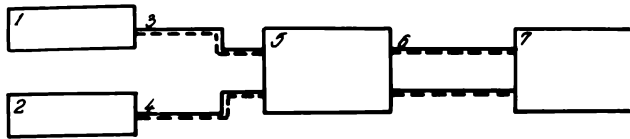


Fig.3.11 Schema de principiu privind măsurarea forțelor:

- 1 - traductor inductiv pentru măsurarea forței de frecare pe dop;
- 2 - traductor inductiv pentru măsurarea forței de tragere;
- 3-4 - cabluri ecranate și echilibrate;
- 5 - sursă de alimentare și amplificator de măsurare;
- 6 - conexiuni ecranate;
- 7 - oscilograf cu spot luminos.

Traductorul de măsurare a forței de tragere s-a montat pe pisica bancului, așa cum se observă din ansamblul de măsurare a forțelor (fig.3.12), iar traductorul de măsurare a forței de frecare pe dop s-a montat în spatele emițătorului macrosonic în poziție coaxială cu tija de tras.

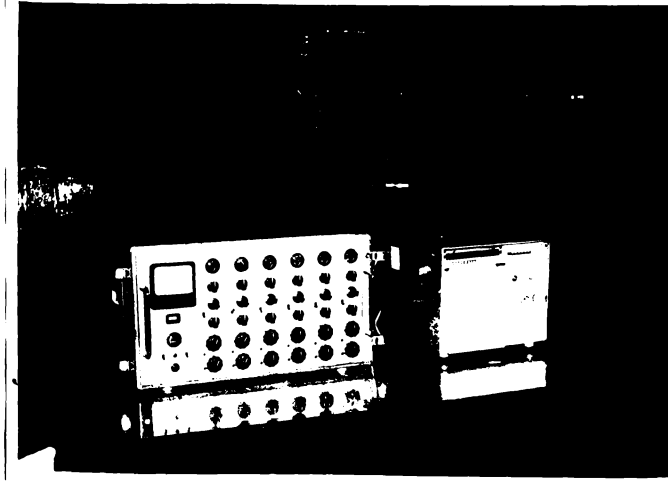


Fig.3.12 Ansamblul de măsurare a forțelor

Eroarea sistematică de măsurare a fost $\pm 5\%$. Etalonarea sistemului înregistrator s-a verificat după fiecare grupă de 3 înregistrări. Amplitudinea de înregistrare a fost pentru fiecare tip de traductor ± 20 mm, citirea diagramelor efectuându-se cu lupa cu o precizie de 0,05 mm. Vitezele de înregistrare au fost 6 cm/s și 10 cm/s.

Pentru fiecare regim tehnologic - viteză de tragere, grad de deformare, amplitudine - s-au înregistrat minimum trei diagrame din care s-a selecționat apoi cazul reprezentativ.

Măsurătorile cu macrosunete și fără macrosunete s-au făcut pe aceeași țeavă. Astfel, fiecare țeavă s-a tras aproximativ jumătate cu macrosunete, iar restul fără macrosunete.

Măsurătorile de forțe s-au efectuat în următoarele condiții concrete: eboș OLT 35 normalizat de dimensiuni $\varnothing 25 \times 1,6$ mm; dop cilindric din OSC 10 cromat dur; filieră conică ($\alpha = 12^\circ$) din OSC 10 cromată dur; coeficientul de alungire, $\lambda = 1,43$; viteza de tragere 6;12 și 18 m/min; lubrifiant, parafină oxidată; frecvența de rezonanță 16,2 kHz; amplitudinea, 1 - 6 μm .

3.2.6. Condiții de experimentare la determinarea modificărilor unor proprietăți mecanice

Experimentările s-au efectuat pe loturi de țevi din oțel carbon (OLT 35) avînd dimensiunile înainte de tragere $\varnothing 25,2 \times 1,6$ mm. Gradul de deformare a variat prin reducerea în principal a grosimii peretelui, în limitele $\lambda = 1,3$ și $\lambda = 1,7$. S-au utilizat trei intensități de energie acustică 5; 10 și 15 W/cm². Frecvența acustică a fost cea de rezonanță (16,2 KHz) iar viteza de tragere 6 m/min.

Din fiecare țevă, în stare ecruisată, s-au prelevat (manual) cîte patru epruvete, două din partea trasă cu macrosunete, iar două, din partea trasă fără macrosunete (lungimea epruvetelor a fost de 300 mm). Epruvetele astfel prelevate s-au împărțit în două grupe, fiecare grupă, incluzînd o epruvetă trasă cu macrosunete și una fără macrosunete. Astfel, din țevile analizate s-au constituit două loturi identice de epruvete. Din acestea, un lot a rămas în stare ecruisată iar cel de al 2-lea lot s-a recopt.

Recoacerea s-a realizat în atmosferă obișnuită într-un cuptor continuu în următoarele condiții:

- Zona de intrare, 800-820°C, durata 8 minute;
- Zona de ridicare a temperaturii, 920-940°C; durata 8 minute;
- Zona de menținere constantă a temperaturii, 900-930°C, durata 10 minute;
- Zona de răcire, pînă la 100°C, durata 64 minute.

Încercările la tracțiune au fost efectuate conform STAS 200-67, valorile caracteristicilor mecanice prezentate în diagrame fiind o medie de trei încercări.

3.2.7. Condiții la determinarea excentricității

În vederea determinării excentricității, din fiecare țevă nerecoaptă s-au prelevat două epruvete, una din partea trasă cu macrosunete, iar cealaltă, din partea trasă fără macrosunete, lungimea epruvetelor fiind de aproximativ 20 mm. Pe epruvetele astfel prelevate s-a marcat ca zonă de referință, generatoarea lor comună.

Determinarea excentricității s-a efectuat prin măsurarea grosimii peretelui țevii. Această operație s-a realizat la I.T. "Republica" București, cu ajutorul unei instalații specializate de tip "SIP", astfel: pornind de la punctul comun de referință la fiecare epruvetă s-a măsurat grosimea peretelui după două diametre perpendiculare. Valorile luate în considerare au constituit media a trei determinări.

4. CERCETARI TEORETICE SI EXPERIMENTALE

Studiul teoretic și experimental al procesului de tragere la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic s-a realizat sub aspect energetic, cât și sub aspectul modificărilor caracteristicilor mecanice și a toleranțelor dimensionale ale produselor.

4.1. Influența macrosunetelor asupra condițiilor de frecare pe dop

Pentru elucidarea mecanismului fizic a curgerii plastice a metalului prin focarul de deformare, cât și pentru stabilirea parametrilor tehnologici și a bilanțurilor energetice, este important să se stabilească, comparativ cu tragerea fără macrosunete, gradul de reducere a frecării de contact dintre dop și materialul de tras. În acest scop, se prezintă cercetările efectuate de autor privind calculul de reducere a frecării de contact și justificarea analitică a parametrilor tehnologici raționali.

Din analiza fig.4.1 se observă că orice punct A al țevii de pe suprafața de contact cu dopul A_1-A_2 , participă la două mișcări:

- de avans, pe generatoarea dopului, cu viteza v_a ;
- de vibrare sau de oscilație, cu viteza v_v .

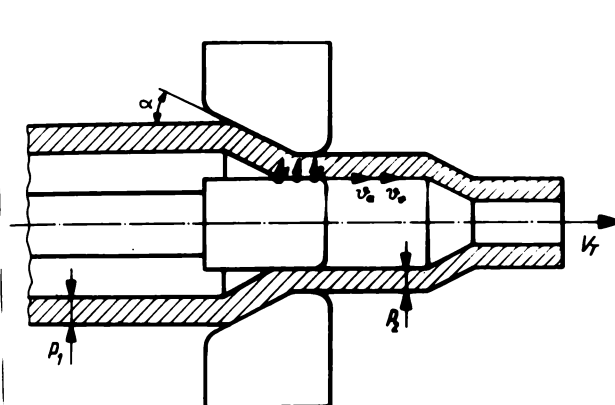


Fig.4.1 Secțiunea longitudinală a focarului de deformare la tragerea la rece a țevilor pe dop.

În cazul cînd viteza de vibrație v_v este mai mare decît viteza de avans v_a , vectorul total al vitezei relative a punctului A la suprafața de contact A_1-A_2 își va schimba sensul; astfel, o parte din perioada de oscilație acesta va coincide cu sensul de mișcare a metalului pe generatoarea dopului, în timp ce, în cealaltă parte a perioadei, va avea sens opus. Dacă însă viteza de vibrație este mai mică decît viteza de avans, atunci, vectorul vitezei relative coincide întotdeauna cu sensul mișcării metalului.

Admițînd că reducerea frecării se datorește în principal mecanismului de reversare a frecării, așa cum acceptă autorii lucrărilor /12-13/; /15/ și /30/ (vezi paragraful 2.1), atunci, în cazul cînd $v_v > v_a$, forța de frecare contribuie la mișcarea metalului micșorînd forța de tragere, în timp ce, pentru cazul $v_v \leq v_a$ nu are loc micșorarea forței de tragere.

Pe baza acestor considerente, folosind reprezentarea vitezelor din fig.4.2, se pot stabili condițiile în care se produce micșorarea forței de frecare de contact datorită aplicării oscilațiilor macrosonice longitudinale pe dop.

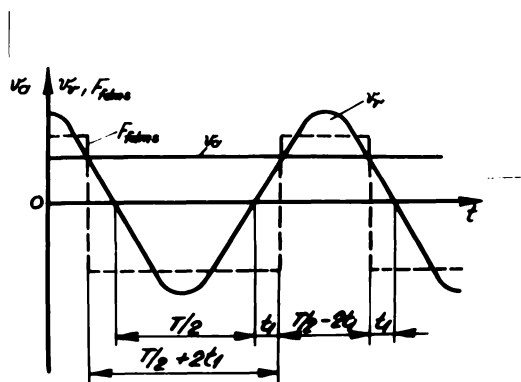


Fig.4.2. Variația vitezei de avans v_a , a vitezei de vibrație v_v și a forței de frecare de contact $F_{f\text{dms}}$ în cursul perioadei de oscilație.

Din fig.4.2. se observă că o parte din perioada de oscilație, $\frac{1}{2} T - 2t_1$, forța de frecare este pozitivă, iar în cealaltă parte, $\frac{1}{2} T + 2t_1$, este negativă.

În aceste condiții, mărimea egală cu raportul

$$n = \frac{(\frac{1}{2} T + 2t_1) + (\frac{1}{2} T - 2t_1)}{(\frac{1}{2} T + 2t_1) - (\frac{1}{2} T - 2t_1)} \quad (4.1)$$

indică, la introducerea macrosunetelor, gradul de reducere a forței medii de frecare (coeficientul n) în punctul considerat la suprafața de contact a dopului.

Pentru aflarea timpului t_1 se scrie, pentru punctul A, condiția de echilibru a vitezei de vibrație și de avans

$$v_v = v_a = X\omega \sin\omega t_1 = V_v \sin\omega t_1 \quad (4.2)$$

din care rezultă

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{v_a}{X\omega} = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{v_a}{V_v} \quad (4.3)$$

Substituind valoarea timpului t_1 și a perioadei T în expresia (4.1) se obține

$$n = \frac{\pi}{2} \frac{1}{\arcsin \frac{v_a}{X\omega}} \quad (4.4)$$

Pentru a obține reducerea frecării pe întreaga suprafață de contact a dopului, este necesar să se exprime viteza de avans în punctul A, prin viteza medie de mișcare a metalului între intrarea și ieșirea de pe suprafața de contact a dopului.

În acest sens, scriem ecuația continuității pentru punctele A_1 și A_2

$$S_{A_1} V_{A_1} = S_{A_2} V_{A_2} = S_{A_2} V_t \quad (4.5)$$

în care S_{A_1} și S_{A_2} sînt secțiunile de curgere respective iar V_t viteza de tragere. Deoarece în practică țevile trase la rece au grosimea pereților mult mai mică în raport cu diametrul lor ($p/D = 1/10 - 1/200$), secțiunile S_{A_1} și S_{A_2} pot fi calculate în funcție de grosimea pereților țevii și de diametrul dopului. Cu această precizare din expresia (4.5), se obține

$$V_{A_1} = V_t \frac{S_{A_2}}{S_{A_1}} = V_t \frac{p_2}{p_1} \cos \alpha \quad (4.6)$$

în care

p_1 ; p_2 reprezintă grosimea peretelui țevii la intrarea, respectiv, ieșirea din focarul de deformare;

α unghiul filierei.

În această situație se poate calcula viteza medie de mișcare a metalului pe suprafața de contact a dopului

$$V_m = \frac{V_{A_1} + V_t}{2} = \frac{V_t}{2} \left(\frac{p_2}{p_1} \cos \alpha + 1 \right) \quad (4.7)$$

Înlocuind valoarea vitezei medii din formula (4.7) în expresia (4.4) și ținând seama de valoarea mică a produsului ωt_1 , se obține

$$n = \sqrt[3]{\frac{X\omega}{V_t} \frac{1}{\frac{p_2}{p_1} \cos \alpha + 1}} \quad (4.8)$$

Din analiza formulei (4.8) rezultă că între gradul de reducere a frecării de contact și parametrii tehnologici ai procesului de tragere macrosonică, există o interdependență. Pe această bază se pot trage concluzii practice pentru proiectarea proceselor tehnologice eficiente de tragere la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic, în sensul că, pentru fiecare regim tehnologic se poate determina domeniul de valori ale parametrilor acustici și de tragere, pentru care se obține o reducere maximă a forței de frecare.

Avînd în vedere importanța formulei (4.8) pentru proiectarea regimurilor tehnologice de tragere la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic, s-a impus verificarea valabilității ei pe cale experimentală. În acest scop, s-a efectuat măsurarea forței de frecare pe dop și a forței de tragere în condițiile prezentate la paragraful 3.2.5 din lucrare.

Ținînd seama de performanțele instalației experimentale de tras în câmp macrosonic, realizată în cadrul I.T. "Republica" București (vezi paragraful 3.2.5), măsurarea forțelor s-a efectuat în cadrul următoarelor valori: $X = 1-6 \mu\text{m}$; frecvența de rezonanță 16,2 kHz; $V_t = 6; 12$ și 18 m/min. ; $p_2/p_1 = 0,65 - 0,9$;

$\alpha = 12^\circ$ (generalizat la I.T. "Republica" ca unghi optim).

Măsurarea amplitudinii macrosunetelor s-a efectuat cu tractorul inductiv prezentat la paragraful 3.2.4 din lucrare.

Verificarea experimentală a formulei (4.8) s-a efectuat, ținând seama de limitele posibile pe care le pot avea în practică anumiți parametri. Astfel, cunoscând că raportul p_2/p_1 variază în limite relativ restrânse, respectiv 0,65 - 0,9, s-a acceptat pentru acest raport valoarea sa medie, 0,775. În acest caz, formula 4.7 devine

$$V_m = \frac{V_t}{2} (0,775 \cdot 0,982 + 1) = 0,881 V_t \quad (4.7)'$$

Deoarece pentru cazul limită $V_v = V_m$ (respectiv $X\omega = 0,881 V_t$) nu are loc o reducere a forței de frecare, rezultă că coeficientul n trebuie să fie egal cu unitatea.

Acest fapt se poate scrie

$$1 = \frac{X\omega}{0,881 V_t} \quad (4.9)$$

caz în care formula (4.8) devine

$$n = 1,13 \frac{X\omega}{V_t} \quad (4.8)'$$

Cu aceste precizări, pe baza datelor experimentale din tabelul 4.1 și a formulei (4.8)', s-au construit graficele din fig. 4.3 și 4.4 în care curbele continue reprezintă valori calculate cu formula (4.8)', iar curbele întrerupte valori experimentale.

Date experimentale privind caracterizarea reduscării forțelor în cazul polimerilor

Tabela 4.1

Nr. crt.	Viteza de trageri (m/min)	Amplitudinea (μm)	Forța de trageri (dan)			Forța de frecare (dan)			Forța de frecare după reducerea reduscării forțelor			Coeficientul η		Coeficientul k	Coeficientul $k_{med}/$ treapta vitezei
			fără ms (F_t)	cu ms (F_{tms})	reducerea (ΔF_t)	fără ms (F_{fd})	cu ms (F_{fdms})	reducerea (ΔF_{fd})	fără ms (F_f)	cu ms (F_{fms})	reducerea (ΔF_f)	teoretic	experimental		
1	6	1	7570	7320	250	960	850	110	6610	6470	140	1,16	1,12	1,27	
2	6	2	7650	6780	870	910	480	430	6740	6300	440	2,32	1,88	1,03	
3	6	3	7700	6450	1250	940	370	570	6760	6080	680	3,48	2,55	1,19	
4	6	4	7520	6200	1320	940	320	620	6580	5880	700	4,64	2,93	1,13	
5	6	5	7450	5900	1550	1020	310	710	6430	5590	840	5,80	3,29	1,18	
6	6	6	7380	5890	1490	990	280	710	6390	5610	780	6,96	3,54	1,10	
7	12	1	7640	7640	-	950	950	-	6690	6690	-	0,58	-	-	
8	12	2	7480	7340	140	890	810	80	6590	6530	60	1,16	1,10	0,75	
9	12	3	7560	7100	460	970	770	200	6590	6330	260	1,74	1,26	1,30	0,91
10	12	4	7850	7340	510	900	630	270	6950	6710	240	2,32	1,43	0,88	
11	12	5	7620	6930	690	930	550	380	6690	6380	310	2,90	1,69	0,82	
12	12	6	7750	7020	730	910	500	410	6840	6520	320	3,48	1,82	0,78	
13	18	1	7620	-	-	940	940	-	6680	6680	-	0,39	-	-	
14	18	2	7750	-	-	940	940	-	6810	6810	-	0,77	-	-	
15	18	3	7690	-	-	920	920	-	6770	6770	-	1,16	-	-	0,65
16	18	4	7850	7770	80	880	830	50	6970	6940	30	1,54	1,06	0,60	
17	18	5	7890	7660	230	890	750	140	7000	6910	90	1,93	1,19	0,64	
18	18	6	7630	7290	340	920	720	200	6710	6570	140	2,32	1,28	0,70	

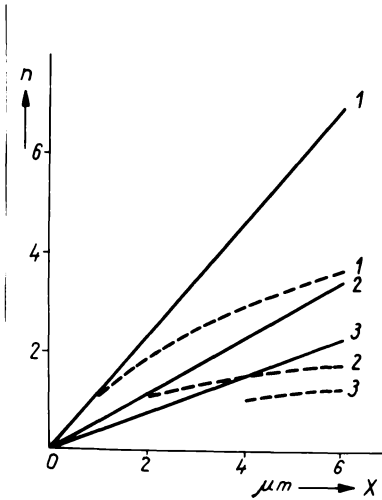


Fig.4.3 Variația gradului de reducere a forței de frecare pe dop (coeficientul n) în funcție de amplitudine, pentru viteza de tragere de 6 m/min (1), 12 m/min (2) și 18 m/min (3):
 ——— valori teoretice
 - - - - - valori experimentale

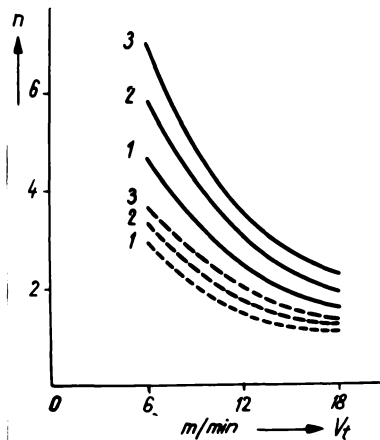


Fig.4.4 Variația gradului de reducere a forței de frecare pe dop (coeficientul n) în funcție de viteza de tragere, pentru amplitudinea de $4\mu\text{m}$ (1), $5\mu\text{m}$ (2) și $6\mu\text{m}$ (3).

——— valori teoretice
 - - - - - valori experimentale.



Din analiza fig.4.3 se observă că formula (4.8)' se verifică în limite convenabile numai în domeniul amplitudinilor relativ mici, respectiv $1 - 3 \mu\text{m}$. Se observă de asemenea o variație neliniară a coeficientului n în funcție de amplitudine, fapt ce subliniază caracterul complex al frecării pe suprafața de contact a dopului, caracter simplificat în cazul de față numai la mecanismul de reversare a frecării. În domeniul amplitudinilor mai mari de $3 \mu\text{m}$ se poate presupune că datorită creșterii temperaturii în focarul de deformare, condițiile de frecare se modifică, în sensul ruperii filmului de lubrifiant și apariției fenomenului de **gripare**.

În ce privește influența vitezei de tragere asupra gradului de reducere a frecării pe dop, în gama cea mai favorabilă de amplitudini ($1 - 3 \mu\text{m}$), la viteza de 12 și 18 m/min , nu s-au obținut date experimentale care să poată fi comparate cu cele din formula (4.8)'. Cu toate acestea, în fig.4.4 se prezintă date comparative privind influența vitezei de tragere asupra reducerii frecării la amplitudini de 4 ; 5 și $6 \mu\text{m}$. Din analiza graficelor din fig.4.4 se observă că formula (4.8)' se verifică calitativ și că acțiunea macrosu-netelor asupra frecării se reduce odată cu creșterea vitezei de tragere.

În cadrul lucrărilor experimentale s-a urmărit și influența gradului de reducere a peretelui, respectiv, a raportului p_2/p_1 , asupra reducerii frecării pe dop. În gama de valori practic posibilă pentru raportul p_2/p_1 ($0,65 - 0,9$), nu s-a constatat o influență notabilă a acestui raport asupra frecării pe dop, care să modifice caracterul formulei (4.8) respectiv (4.8)'.

Comparând datele experimentale obținute în prezenta lucrare cu cele ale cercetătorilor de la Universitatea Aston /16/, se observă că acestea concordă numai parțial. Acest fapt se datorește, după părerea autorului, condițiilor diferite de experimentare. Astfel, în timp ce experimentările din prezenta lucrare s-au efectuat pe o instalație industrială, cercetătorii de la Aston au desfășurat cercetări într-o instalație de laborator, cu o viteză de tragere de $0,2 \text{ m/min}$, deci, viteză neglijabilă în comparație cu viteza de vibrație, caz în care temperatura nu a putut modifica condițiile din focarul de deformare. Considerăm astfel că în condițiile noastre, formula (4.8) respectiv (4.8)' constituie un îndreptar eficient

pentru proiectarea proceselor tehnologice de tragere la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic, fapt subliniat de noi și în alte lucrări /58 - 59/.

4.2. Efectul de volum.

În măsura în care admitem că macrosunetele introduse prin dop nu influențează frecarea pe suprafața filierei, reducerea forței pe filieră se poate echivala cu reducerea forței de deformare și, deci, se va putea scrie

$$\Delta F_t = \Delta F_{fd} + \Delta F_d \quad (4.10)$$

în care

ΔF_t ; ΔF_{fd} ; ΔF_d reprezintă reducerea forței de tragere, a forței de frecare pe dop și a forței de deformare datorită activării cu ultrasunete a dopului.

Se menționează că în conformitate cu mecanismul reducerii frecării, prezentat în paragraful precedent, putem considera că pe suprafața filierei nu apare o reducere a forței de frecare datorită activării cu ultrasunete a dopului, astfel încît, din punct de vedere energetic, condiția existenței unui efect de volum este:

$$\Delta F_t > F_{fd} \quad (4.11)$$

sau

$$\Delta F_d = k \Delta F_{fd}; \quad k > 0 \quad (4.12)$$

Cu aceste considerații, pe baza datelor din tabelul 4.1, în fig. 4.5 și 4.6 s-au reprezentat grafic reducerile ΔF_t ; ΔF_{fd} și ΔF_d în funcție de amplitudine și viteza de tragere.

Din analiza fig. 4.5 și 4.6 se observă că, în cazul tragerii la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic, există un efect de volum, efect care este puternic influențat de amplitudinea macrosunetelor cît și de viteza de tragere. În ce privește corelația dintre efectul de volum și efectul de suprafață, exprimată prin

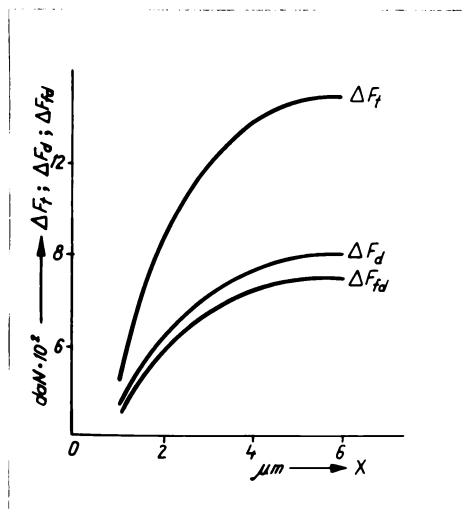


Fig.4.5 Reducerea forței de tragere (ΔF_t), a forței de frecare pe dop (ΔF_{fd}) și a forței de deformare în funcție de amplitudine (viteza de tragere constantă : 6m/min)

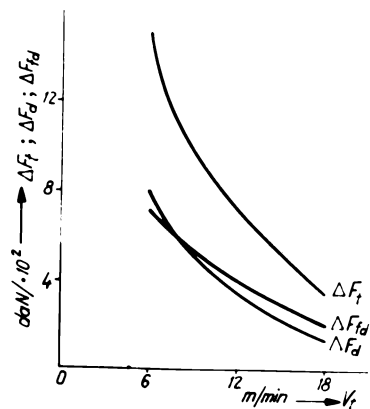


Fig.4.6 Reducerea forței de tragere (ΔF_t), a forței de frecare pe dop (ΔF_{fd}) și a forței de deformare (ΔF_d) în funcție de viteza de tragere (amplitudinea constantă: $6\mu\text{m}$).

coeficientul k din relația (4.12), din tabelul 4.1 rezultă că raportul celor două efecte (coeficientul k) este oarecum constant pentru o anumită viteză de tragere. Dacă se calculează un coeficient k mediu pe o treaptă de viteză, se observă că acesta scade cu creșterea vitezei de tragere, fapt ce se explică prin reducerea densității de energie acustică.

Ca o concluzie asupra efectului de volum, studiat de B. Langenecker în cazul solicitărilor simple de tracțiune și torsiune /17 - 19/ și sesizat într-o formă embrionară în cazul tragerii țevilor de cercetătorii de la Aston /16/, se poate afirma cu certitudine că în cazul tragerii la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic, deci a prelucrării metalelor prin presiune, apare un efect de volum, efect ce este influențat puternic de amplitudinea macrosunetelor cât și de viteza de deformare /60/.

Se mai menționează că în experimentările efectuate nu s-a observat vre-o influență a raportului p_2/p_1 asupra efectului de volum.

✓ Incercînd să tragem o concluzie privind cercetările efectuate în prezenta lucrare, asupra efectului de suprafață și de volum al macrosunetelor, trebuie spus că, deși aceste efecte au fost sesizate calitativ și determinate cantitativ sub aspect energetic, mai este necesară elucidarea mai multor aspecte printre care menționăm: verificarea ipotezei făcute, cum că macrosunetele introduse prin dop nu influențează frecarea pe suprafața filierei; mecanismul producerii, din punct de vedere energetic, al efectului de volum și măsura în care acesta este influențat de apariția efectului de suprafață pe dop; ponderea în care cele două efecte influențează asupra procesului de deformare propriu-zis, cât și asupra modificărilor reziduale din materialul deformat. În acest scop, autorul își propune ca în viitor să continue cercetarea.

4.3. Modificarea unor proprietăți mecanice.

B.Langenecker /17-18/, a constatat în condiții de laborator, în cazul solicitării la tracțiune și la torsiune, două efecte neliniare ale energiei acustice asupra metalelor: înmulțirea acustică și durificarea acustică. Primul efect se manifestă prin reducerea tensiunii statice necesare deformării plastice și are loc în timpul aplicării macrosunetelor. Durificarea acustică se datorește unor modificări reziduale și se observă după activare ultrasonică la intensități mari de energie acustică, tipice pentru diferite metale.

Tinând seama de aceste constatări, autorul prezentei lucrări a întreprins cercetări privind influența efectului de suprafață și a efectului de volum al macrosunetelor asupra principalelor proprietăți mecanice (limita de curgere R_c , rezistența la rupere R și alungirea la rupere A_{10}) ale țevilor din oțel carbon în stare ecruisată. Condițiile de experimentare la determinarea modificărilor acestor proprietăți s-au prezentat la paragraful 3.2.6.

Avînd în vedere influența mare ce o poate avea asupra proprietăților mecanice ale țevilor energia acustică și gradul de deformare, cercetările experimentale s-au efectuat la trei intensități de energie acustică și la trei grade de deformare (coeficienți de alungire, realizați în principal prin reducerea grosimii peretelui țevii). Rezultatele experimentale se prezintă în tabelul 4.2 și în fig. 4.7 - 4.9.

Tabelul 4.2

Date experimentale privind modificarea unor proprietăți mecanice ale țevilor din OLT 35 trase în câmp macrosonic la
 $V_t = 6m/min.$

Nr. crt.	Intensitatea energiei acustice (W/cm^2)	Coeficientul de alungire, λ	Limita de curgere, R_c (daN/mm^2)	Rezistența la rupere, R (daN/mm^2)	Alungirea la rupere A_{10} (%)
1	0	1,3	51,7	66,2	5,41
2	0	1,5	61,2	71,1	4,42
3	0	1,7	65,6	73,8	4,12
4	5	1,3	49,1	63,3	6,15
5	5	1,5	59,9	69,9	5,03
6	5	1,7	64,8	73,1	4,75
7	10	1,3	46,7	60,2	7,05
8	10	1,5	58,2	68,1	5,60
9	10	1,7	64,1	72,0	5,16
10	15	1,3	44,8	57,8	7,35
11	15	1,5	55,6	66,4	6,05
12	15	1,7	63,9	71,1	5,40

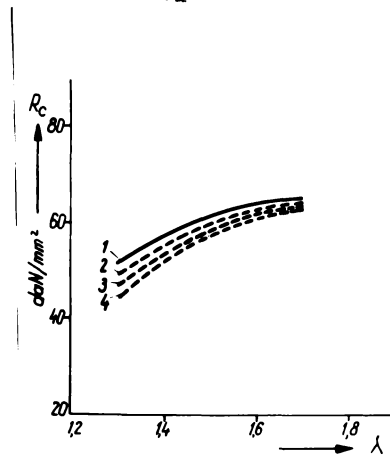


Fig.4.7 Limita de curgere (R_c) înainte de recoacere, în funcție de gradul de deformare (λ):
 1 - fără macrosunete (R_{c0}); cu macrosunete ($R_{c_{1ms}}$),
 5 W/cm^2 ; 3 - ($R_{c_{2ms}}$), 10 W/cm^2 ; 4 - ($R_{c_{3ms}}$),
 15 W/cm^2

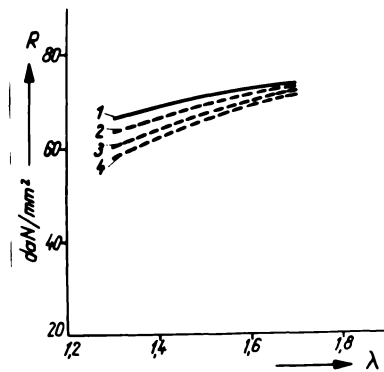


Fig.4.8 Rezistența la rupere (R) înainte de recoacere, în funcție de gradul de deformare (λ): 1 - fără macrosunete (R_0); 2 - cu macrosunete (R_{1ms}), 5 W/cm^2 ;
 3 - (R_{2ms}), 10 W/cm^2 ; 4 - (R_{3ms}), 15 W/cm^2 .

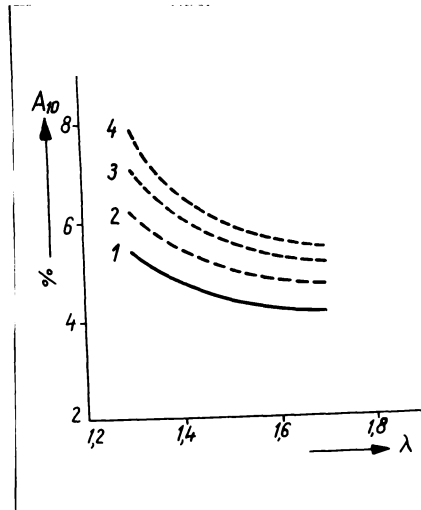


Fig.4.9 Alungirea la rupere (A_{10}) înainte de recoacere, în funcție de gradul de deformare (λ): 1 - fără macrosunete (A_0) - 2 - cu macrosunete (A_{1ms}), 5 W/cm^2 ; 3 - (A_{2ms}), 10 W/cm^2 ; 4 - (A_{3ms}), 15 W/cm^2 .

Din analiza fig.4.7 - 4.9 rezultă că, în cazul tragerii cu macrosunete comparativ cu tragerea fără macrosunete, sînt valabile următoarele concluzii:

- creșterea intensității acustice reduce valorile limitei de curgere și a rezistenței la rupere și conduce la o ameliorare a ductilității metalului (alungirea la rupere);
- creșterea gradului de deformare diminuează influența macrosunetelor asupra acestor proprietăți.

Rezultă deci ca o concluzie certă că în procesul de tragere la rece, macrosunetele determină o reducere a stării de ecruisare a țevilor din oțel carbon. Această constatare pare să vină la prima vedere în contradicție cu rezultatele obținute de B. Langenocker /17 - 18/ în cazul încercărilor la tracțiune și torziune, în sensul că, starea de durificare a metalelor deformate plastic nu este influențată de intensitatea de energie acustică pînă la

valoare critică specifică fiecărui material (în cazul zincului acesta fiind de circa 15 W/cm^2). Dacă se analizează însă mai complex cazul tragerii la rece, rezultatele se pot interpreta prin condițiile diferite de deformare plastică. Astfel, spre deosebire de cazul solicitărilor simple la tracțiune și torsiune, deformarea plastică în cazul tragerii la rece a țevilor are loc în condițiile unor tensiuni statice complexe, în prezența lubrifiantului, cu frecare intensă în focarul de deformare. Având în vedere și cele constatate la paragraful precedent, privind reducerea substanțială a forțelor de frecare și de deformare datorită activării ultrasunice a dopului și cunoscând faptul că macrosunetele conduc la o creștere a gradului de difuzie a lubrifiantului în metalul deformat /12/, ceea ce duce la modificarea tensiunilor în straturile superficiale ale materialului deformat, obținem o imagine a cauzelor care determină reducerea stării de ecruisare. De altfel, se remarcă faptul că rezultatele din prezenta lucrare sînt în oarecare măsură în acord cu datele prezentate de G. Kralik și B. Weiss /23-24/, care au constatat o dedurificare a unor epruvete metalice deformate la tracțiune în câmp macrosonic, epruvete care anterior au fost deformate cu un anumit grad de deformare.

Explicația reducerii influenței macrosunetelor asupra proprietăților mecanice datorită creșterii gradului de deformare, ar putea consta în aceea că numai o anumită densitate de energie acustică este capabilă să deblocheze o anumită densitate critică de dislocații; ori, odată cu creșterea gradului de deformare crește și densitatea de dislocații care blochează deplasarea lor.

Față de această situație, autorul speră ca în viitor, să obțină mai multe informații privind cauzele modificării proprietăților mecanice ale materialelor trase în câmp ultrasonic. Determinarea microdurității materialului este de pe acum un indiciu privind aportul efectului de suprafață și a celui de volum asupra acestor proprietăți. De asemenea, credem că prin microscopie electronică se vor putea obține noi informații care să elucideze mai complet constatările noastre.

Avînd în vedere că volumul lucrărilor experimentale este în general limitat la anumite regimuri acustice și tehnologice, autorul a încercat să efectueze anumite generalizări /61-63/ prin care să poată determina cantitativ principalele proprietăți mecanice ale țevilor trase în câmp macrosonic.

S-a observat că fenomenul fizic ilustrat prin diagramele din fig. 4.7 - 4.9 se poate reprezenta analitic cu multă precizie (circa 1%) printr-o funcție, dependentă de gradul de deformare și intensitatea acustică, de forma:

$$F(\lambda, I) = (A \lambda^2 + B \lambda + C)I^3 + (D \lambda^2 + E \lambda + F)I^2 + (G \lambda^2 + H \lambda + J)I + K \lambda^2 + L \lambda + M \quad (4.13)$$

În baza ecuației (4.13) putem scrie :

$$R_c = (A_1 \lambda^2 + B_1 \lambda + C_1)I^3 + (D_1 \lambda^2 + E_1 \lambda + F_1)I^2 + (G_1 \lambda^2 + H_1 \lambda + J_1)I + K_1 \lambda^2 + L_1 \lambda + M_1 \quad (4.14)$$

$$R = (A_2 \lambda^2 + B_2 \lambda + C_2)I^3 + (D_2 \lambda^2 + E_2 \lambda + F_2)I^2 + (G_2 \lambda^2 + H_2 \lambda + J_2)I + K_2 \lambda^2 + L_2 \lambda + M_2 \quad (4.15)$$

$$A_{10} = (A_3 \lambda^2 + B_3 \lambda + C_3)I^3 + (D_3 \lambda^2 + E_3 \lambda + F)I^2 + (G_3 \lambda^2 + H_3 \lambda + J_3)I + K_3 \lambda^2 + L_3 \lambda + M_3 \quad (4.16)$$

Determinarea coeficienților ecuațiilor (4.14 - 4.16) s-a făcut cu ajutorul unui calculator electronic de tip FELIX C-256, folosind un program scris în limbaj "FORTRAN". Valorile acestor coeficienți se prezintă în tabelul 4.3.

Tabelul 4.3

Valorile coeficienților ecuațiilor (4.14 - 4.16) determinate la calculatorul electronic FELIX C - 256

	R_c			R			A_{10}		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
A	0,02833	0,00166	0,00216	G	-1,95832	-3,66666	0,53332		
B	-0,08466	-0,00599	-0,00486	H	6,81665	12,09998	-1,46331		
C	0,06258	0,00618	0,00231	J	-6,07207	-10,03331	1,11565		
D	-0,14999	0,12500	-0,04250	K	-63,75000	-27,49999	8,62500		
E	0,43999	-0,37000	0,08100	L	255,99999	101,49997	-29,10000		
F	-0,32049	0,24775	-0,02507	M	-134,36249	-19,27497	28,66375		

4.4. Modificarea toleranțelor dimensionale ale produselor

În cazul tragerii la rece a țevilor din oțel carbon pe dop activat ultrasonic în comparație cu tragerea fără macrosunete, s-a constatat, pe lângă alte efecte, o îmbunătățire a toleranțelor dimensionale ale produselor. Această constatare este importantă, deoarece indică o cale nouă de influențare a calității produselor, în sensul încadrării acestora, în ce privește excentricitatea și grosimea peretelui sub limitele prevăzute de standarde.

Aceste rezultate experimentale obținute la I.C.E.M. și reiefate și de cercetătorii de la Aeroprojects Inc /11/; /36/, ne-au determinat să analizăm mai profund cauzele care conduc la apariția excentricității și să studiem modul cum macrosunetele influențează această excentricitate.

4.4.1. Aspecte privind excentricitatea țevilor

[64] B17 (1/2)
Este cunoscut faptul că în procesul tragerii la rece a țevilor pe dop, dopul avînd două grade de libertate execută mișcări transversale, cu caracter parazit, influențîndu-se prin aceasta excentricitatea produselor.

Mișcările parazite ale dopului în focarul de deformare sînt provocate în principal de neomogenitățile suprafeței și (sau) volumului materialului de tras. Aceste neomogenități creează o forță perturbatoare, care deplasează dopul dintr-o poziție de echilibru, într-o poziție nouă de echilibru, poziție în care forța perturbatoare este compensată de o deformare suplimentară.

Neomogenitatea suprafeței interioare a țevii, manifestată prin neuniformitatea coeficientului de frecare al acestei suprafețe, se datorește în principal decapării incomplete și (sau) lubrifierii necorespunzătoare. Neomogenitatea volumului materialului de tras, manifestată prin variația capacității de deformare a materialului, se datorește tot unor faze anterioare de prelucrare, concretizate printr-o neomogenitate chimică și structurală și prin existența în material a unor incluziuni, fisuri etc.

Aceste neomogenități, acționînd separat sau în comun, conduc la apariția unei forțe perturbatoare într-un plan transversal,

forță care deplasează dopul într-o nouă poziție de echilibru. Desigur, aceleași cauze pot produce o forță perturbatoare coaxială dopului, caz în care bancul de tras va vibra puternic (trepidcază). Acest fapt nu influențează direct excentricitatea ci numai calitatea suprafeței țevii, în sensul că, pe pereții acesteia se imprimă o succesiune de inele (țeava apare "vibrată").

Creșterea excentricității peste anumite limite, are influență negativă asupra calității, în unele cazuri conducând la robustarea produselor. O neuniformitate a peretelui țevii conduce la diminuarea rezistenței ei mecanice. În cazul unor piese sau subansamble, prezența excentricității impune, în vederea asamblării, prelucrări mecanice suplimentare (strângere de precizie, rectificare la interior, etc.).

Este deci important ca excentricitatea țevelor să fie limitată chiar în locul în care ea apare. Acest lucru, după constatările noastre se realizează în mare măsură prin activarea ultrasonică a dopului.

4.4.2. Efectul macrosunetelor asupra excentricității

În cazul tragerii la rece a țevelor pe dop neactivat și activat cu oscilații ultrasonice longitudinale după schema din fig. 3.2, s-a determinat excentricitatea țevelor în condițiile descrise la paragraful 3.2.7. În urma măsurătorilor efectuate pe epruvete din aceeași țevă, trase cu și fără macrosunete, s-a constatat că excentricitatea țevelor trase cu macrosunete este mai mică cu până la 40% decât cea a țevelor trase fără macrosunete.

Această constatare ne-a determinat să încercăm să căutăm legile fizice de stabilitate dinamică a focarului de deformare cu ajutorul unei modelări matematice. Astfel, pentru a putea efectua o analiză teoretică a efectului macrosunetelor asupra excentricității țevelor, ne-am propus să modelăm cazurile reale tragerii fără și cu macrosunete reprezentate în fig. 4.10 a - b prin modelele fizice prezentate în fig. 4.11 a - b.

Așa cum s-a constatat experimental, în cazul tragerii fără macrosunete (fig. 4.10 a) excentricitatea δ a dopului de diametru d în filiera de diametru D este mai mare decât în cazul activării dopului cu ultrasunete (fig. 4.10 b).

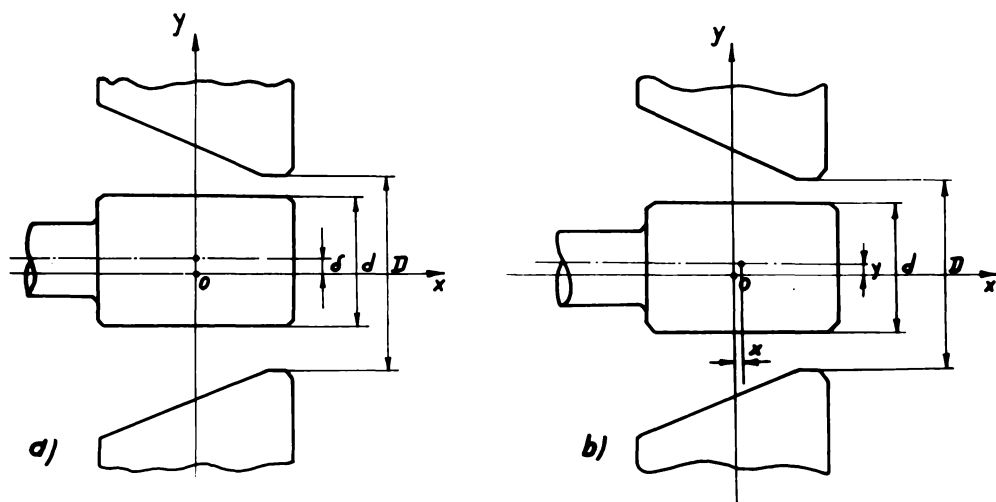


Fig.4.10 Reprezentarea tragerii excentrice a țevilor:
 a) fără activare ultrasonică a dopului;
 b) cu activare ultrasonică a dopului.

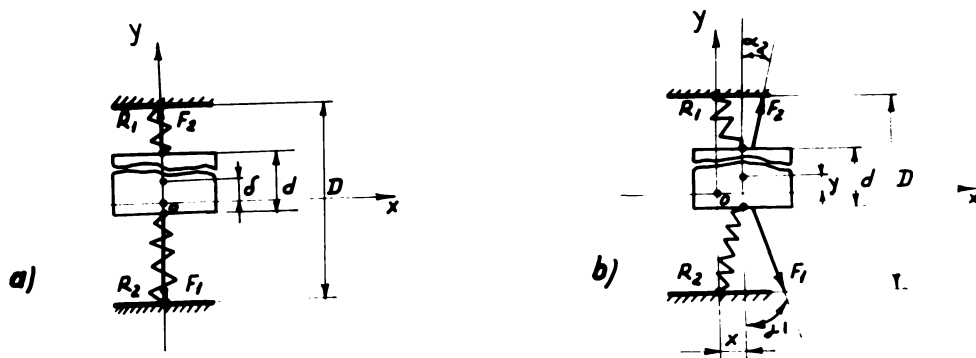


Fig.4.11 Model fizic reprezentând tragerea excentrică
 a țevilor :
 a) fără activare ultrasonică a dopului;
 b) cu activare ultrasonică a dopului.

Modelarea a fost efectuată cu ajutorul unui sistem elastic compus din două resoarte, notate în fig.4.11a - b cu k_1 și k_2 . Avem astfel posibilitatea ca prin efectuarea calculului de echilibru al dopului fără activare ultrasonică, să exprimăm constanta elastică a unui resort ($k_1 = k$), în funcție de constanta elastică a celui-lalt resort (k_2).

Considerînd deci situația din fig.4.11a, obținem următoarele expresii ale forțelor elastice ce se exercită în plan transversal asupra dopului:

$$F_1 = k_1 \frac{D - \frac{1}{2}(D-d) + \delta}{D} = k_1 \frac{\frac{1}{2}(D+d) + \delta}{D} \quad (4.17)$$

$$F_2 = k_2 \frac{D - \frac{1}{2}(D-d) - \delta}{D} = k_2 \frac{\frac{1}{2}(D+d) - \delta}{D} \quad (4.18)$$

Aceste forțe, fiind de forma $F = k \frac{\Delta L}{L}$, au fost obținute presupunînd că lungimea celor două resoarte, în situația în care ele nu sînt tensionate, este egală cu diametrul D al filierei.

În situația de echilibru $F_1 = F_2$, de unde rezultă:

$$k_2 = \frac{\frac{1}{2}(D+d) + \delta}{\frac{1}{2}(D+d) - \delta} k_1 \quad (4.19)$$

În cazul activării cu ultrasunete a dopului (fig.4.11 b), expresiile forțelor devin:

$$F_1 = k \frac{D - \sqrt{x^2 + \left[\frac{1}{2}(D-d) - y\right]^2}}{D} \quad (4.20)$$

$$F_2 = k \frac{\frac{1}{2}(D+d) + \delta}{\frac{1}{2}(D+d) - \delta} \cdot \frac{D - \sqrt{x^2 + \left[\frac{1}{2}(D-d) + y\right]^2}}{D} \quad (4.21)$$

în care x și y sînt coordonatele centrului de greutate al dopului.

Conform reprezentării din fig.4.11 b, avem:

$$\cos \alpha_1 = \frac{\frac{1}{2}(D-d) - y}{\sqrt{x^2 + \left[\frac{1}{2}(D-d) - y\right]^2}} \quad (4.22)$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{\frac{1}{2}(D-d) + y}{\sqrt{x^2 + \left[\frac{1}{2}(D-d) + y\right]^2}} \quad (4.23)$$

În această situație se poate scrie ecuația de echilibru dinamic, proiectată pe axa oy sub forma :

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -F_1 \cos \alpha_1 + F_2 \cos \alpha_2 \quad (4.24)$$

Tinând seama de expresiile (4.19), (4.20), (4.21) și (4.22), ecuația (4.23) devine

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + k \frac{D+d}{D \left[\frac{1}{2}(D+d) - \delta \right]} y = -k \frac{D-d}{D \left[\frac{1}{2}(D+d) - \delta \right]} \delta + k \frac{\frac{1}{2}(D+d) + \delta}{\frac{1}{2}(D+d) - \delta} \cdot \frac{\frac{1}{2}(D-d) + y}{\sqrt{x^2 + \left[\frac{1}{2}(D-d) + y \right]^2}} - k \frac{\frac{1}{2}(D-d) - y}{\sqrt{x^2 + \left[\frac{1}{2}(D-d) - y \right]^2}} \quad (4.25)$$

Având în vedere că în realitate $x \ll \frac{1}{2}(D-d) \pm y$, rezolvarea ecuației (4.24) s-a făcut dezvoltând termenii de forma:

$$\frac{\frac{1}{2}(D-d) + y}{\sqrt{x^2 + \left[\frac{1}{2}(D-d) + y\right]^2}} ; \quad \frac{\frac{1}{2}(D-d) - y}{\sqrt{x^2 + \left[\frac{1}{2}(D-d) - y\right]^2}}$$

în serie Mac Laurin și reținând primii trei termeni ai acesteia.

Tinând cont că simetria acțiunilor față de axa oy impune ca $\frac{dy}{dx} \Big|_{x=0} = 0$, se obțin următoarele dezvoltări:

$$\frac{\frac{1}{2}(D-d) + y}{\sqrt{x^2 + \left[\frac{1}{2}(D-d) + y\right]^2}} \approx 1 - \frac{x^2}{2 \left[\frac{1}{2}(D-d) + \delta\right]^2} \quad (4.26)$$

$$\frac{\frac{1}{2}(D-d) - y}{\sqrt{x^2 + \left[\frac{1}{2}(D-d) - y\right]^2}} \approx 1 - \frac{x^2}{2 \left[\frac{1}{2}(D-d) - \delta\right]^2} \quad (4.27)$$

Ecuția (4.24), devine astfel:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + k \frac{D+d}{D \left[\frac{1}{2}(D+d) - \delta\right]} y = k \frac{D+d}{D \left[\frac{1}{2}(D+d) - \delta\right]} \delta +$$

$$+ \frac{k}{2} \left[\frac{1}{\left[\frac{1}{2}(D-d) - \delta\right]^2} - \frac{\frac{1}{2}(D+d) + \delta}{\frac{1}{2}(D+d) - \delta} \cdot \frac{1}{\left[\frac{1}{2}(D-d) + \delta\right]^2} \right] x^2 \quad (4.28)$$

Notînd

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{k}{m} \frac{D+d}{D \left[\frac{1}{2}(D+d) - \delta\right]} = M > 0 \\ \frac{k}{2m} \left[\frac{1}{\left[\frac{1}{2}(D-d) - \delta\right]^2} - \frac{\frac{1}{2}(D+d) + \delta}{\frac{1}{2}(D+d) - \delta} \cdot \frac{1}{\left[\frac{1}{2}(D-d) + \delta\right]^2} \right] = N \geq 0 \end{array} \right. \quad (4.29)$$

putem scrie ecuația (4.27) sub forma:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + My = M\delta + Nx^2 \quad (4.30)$$

Deoarece

$$x = X \sin \omega t \quad (4.31)$$

obținem

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + My = M\delta + N X^2 \sin^2 \omega t \quad (4.32)$$

Soluția acestei ecuații este de forma:

$$y = C_1 \sin \sqrt{Mt} + C_2 \cos \sqrt{Mt} + \frac{N}{M} \frac{M-2\omega^2}{M-4\omega^2} X^2 \sin^2 \omega t - \frac{N}{M} \frac{2\omega^2}{M-4\omega^2} X^2 \cos^2 \omega t + \delta \quad (4.33)$$

Constantele de integrare C_1 și C_2 se determină din condițiile inițiale:

$$\begin{cases} y \Big|_{t=0} = 0 \\ \frac{dy}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{dy}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \Big|_{t=0} = 0 \end{cases} \quad (4.34)$$

Obținem în acest caz:

$$\begin{cases} C_1 = 0 \\ C_2 = \frac{N}{M} \frac{2\omega^2}{M-4\omega^2} X^2 \end{cases} \quad (4.35)$$

Deci, soluția se poate scrie sub forma:

$$y = \frac{N}{M} \cdot \frac{2\omega^2}{M-4\omega^2} X^2 \cos \sqrt{Mt} + \frac{N}{M-4\omega^2} X^2 \sin^2 \omega t + \delta - \frac{N}{M} \cdot \frac{2\omega^2}{M-4\omega^2} \cdot X^2 \quad (4.36)$$

Eliminând parametrul t între ecuațiile (4.30) și (4.35) se obține ecuația traiectoriei centrului de greutate a dopului sub formă explicită:

$$y = \frac{N}{M} \cdot \frac{2\omega^2}{M-4\omega^2} x^2 \cos\left(\frac{\sqrt{M}}{\omega} \arcsin \frac{x}{X}\right) + \frac{N}{M-4\omega^2} x^2 + \delta - \frac{N}{M} \cdot \frac{2\omega^2}{M-4\omega^2} x^2 \quad (4.37)$$

Această relație ne permite determinarea excentricității medii, \tilde{y} , pentru cazul activării dopului cu ultrasunete.

Intr-adevăr, prin integrarea expresiei (4.36) pe domeniul de variație a lui x rezultă:

$$\tilde{y} = \frac{\frac{N}{M} \cdot \frac{2\omega^2}{M-4\omega^2} x^2}{1 - \frac{M}{\omega^2}} \cdot \cos \frac{\pi\sqrt{M}}{2} + \frac{N x^2}{3(M-\omega^2)} + \delta - \frac{N}{M} \cdot \frac{2\omega^2 x^2}{M-4\omega^2} \quad (4.38)$$

Deoarece, așa cum s-a menționat anterior, utilizarea macro-sunetelor conduce la micșorarea excentricității, este necesar ca $\tilde{y} < \delta$. Acest lucru se poate verifica însă numai când se cunoaște valoarea constantei elastice k . În vederea determinării acestei constante, autorul și-a propus o serie de lucrări experimentale care sînt în curs de desfășurare, astfel încît, în măsura în care în viitor se va putea determina experimental constanta elastică k , există posibilitatea calculării excentricității medii. În acest caz, se vor putea proiecta parametrii acustici în funcție de excentricitatea impusă, rezultînd astfel o nouă cale de proiectare a procesului de tragere macrosonică /64/.

În încheierea acestui capitol, ar fi de adăugat faptul că prin cercetările efectuate s-au elucidat multe aspecte noi ale deformării plastice a metalelor în câmp macrosonic, respectiv a tragerii macrosonice a țevilor, în același timp, s-au deschis noi căi în care investigațiile trebuie să continue.

5. APLICAREA IN PRODUCTIE A REZULTATELOR CERCETARII

Valorificarea rezultatelor cercetării s-a făcut la Intreprinderea de Țevi "Republica" - București, unde, în cadrul unei stații pilot, s-a organizat producția de țevi din oțel carbon trase la rece pe dop activat ultrasonic. În această acțiune au trebuit învinse greutățile învite la stabilirea limitelor procesului tehnologic de tragere cu și fără macrosunete, astfel încât, să se poată fabrica cele mai eficiente tipo-dimensiuni de țevi la parametrii cât mai favorabili.

Elaborarea unei tehnologii de tragere la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic a implicat în esență, în cadrul unor mărci de oțeluri și a unor tipo-dimensiuni de țevi, corelarea favorabilă a principalilor parametrii acustici (intensitate și frecvență) cu parametrii de deformare (grad și viteză de deformare) /65 - 67/.

În acțiunea de valorificare din cadrul stației pilot de la ITR s-a reușit, ca pe lângă unele produse noi, să se fabrice țevi într-un mod mai eficient decât în cadrul tragerii fără macrosunete. Astfel, vitezele de tragere au fost cu 100-150 % mai mari, iar coeficienții de alungire cu 30-75%, în timp ce, calitatea produselor (excentricitatea și calitatea suprafeței țevii) a fost îmbunătățită /65-67/. Tevile ce se fabrică în această stație sînt din oțel carbon cu diametrul exterior între 12-25 mm și grosimea peretelui între 0,3 - 2,2 mm.

✓ Autorul dorește să menționeze că cu toată dorința sa de a prezenta cât mai pe larg aplicarea în producție a rezultatelor cercetărilor sale, acest fapt nu este posibil în prezent. Motivul este acela că tehnologia tragerii la rece a țevilor din oțel carbon pe dop activat ultrasonic, elaborată la ICEM, este în curs de brevetare /68/, constituind în același timp obiectul unor tratative de export în R.D.Germană /57/:

Autorul mai menționează că în prezent desfășoară cercetări privind extinderea tehnologiei de tragere macrosonică a țevilor la gama oțelurilor înalt aliate (inoxidabile). De asemenea, efectuează studii privind aplicarea acestei tehnologii la Întreprinderea de Țevi Roman (în scopul diversificării produselor fabricate prin tragere macrosonică).

✓ O altă valorificare a prezentei lucrări s-a făcut prin extinderea rezultatelor obținute în cazul deformării plastice a metalelor în câmp macrosonic, la deformarea plastică a lemnului, respectiv, la curbarea lui în câmp macrosonic. Concretizarea acestei valorificări, efectuată în colaborare cu specialiști din cadrul Facultății de Industrializare a Lemnului a Universității din Brașov și ai Ministerului Industriei Forestiere, s-a făcut printr-un brevet de invenție /69/ și mai multe publicații /70 - 72/.

6. CALCULUL EFICIENTEI ECONOMICE

Este de necontestat faptul că atributul de bază al dezvoltării unei industrii moderne este rentabilitatea. Astfel, conducerea științifică a producției impune determinarea exactă a eficienței economice a oricărei tehnologii noi, din care motiv, cercetarea trebuie să dea un răspund și acestor probleme. Așa se explică că în cadrul "Scolii de Tehnologii Neconvenționale" din Timișoara, a existat preocuparea de a elabora principiile de calcul a eficienței tehnico-economice a prelucrării metalelor prin tehnologii neconvenționale, la care acțiune autorul prezentei lucrări a adus o contribuție /73/. În această situație, pentru cazul concret al tragerii macrosonice a țevilor se aplică aceste principii.

La tragerea macrosonică a țevilor în comparație cu tragerea fără macrosunete, eficiența economică derivă în principal din reducerea numărului de faze tehnologice, din creșterea vitezei de desfășurare a procesului tehnologic, cât și din îmbunătățirea calității produsului finit.

În general, gama de produse, la care se raportează eficiența economică, poate fi de trei genuri: produse comparabile, existente în programul de fabricație convențional al uzinei, respectiv al ramurei industriale; produse comparabile cu cele obținute din import; produse noi necomparabile. În practică, în funcție de particularități și necesități, ponderea unei game de produse poate varia în limite foarte largi. Din acest motiv și ținând seama și de faptul că stabilirea eficienței economice pentru produsele comparabile cu cele din import precum și pentru produsele noi este relativ simplă, în cele ce urmează se va prezenta o metodologie de calcul pentru produsele comparabile, existente în programul de fabricație convențional.

Astfel, din programul de fabricație se cunosc sortimentele și cantitățile de țevă ce urmează să fie fabricate pe cale convențională cât și prețul de cost. Cu aceste date, pentru uzina sau ramura industrială interesată, se poate construi un grafic similar cu cel reprezentat în fig.6.1.

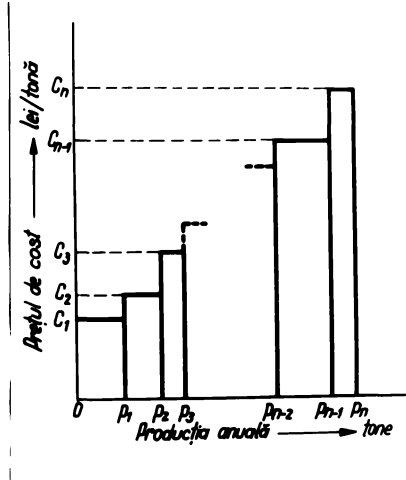


Fig.6.1. Graficul produselor comparabile, existente în programul de fabricație convențional, asimilabile prin tragere macrosonică.

Valoarea produselor comparabile și asimilabile din programul de fabricație convențional este

$$Q = \sum_{n=1}^n C_n p_n \quad (6.1)$$

În cazul cînd se calculează un preț de cost mediu, putem scrie

$$c_m = \frac{\sum_{n=1}^n c_n p_n}{\sum_{n=1}^n p_n} \quad (6.2)$$

astfel încît, valoarea produselor comparabile și asimilabile poate fi redată sub forma

$$Q = C_m \sum_{n=1}^n p_n \quad (6.3)$$

În cazul cînd sortimentele și cantitățile de țevă prezentate în fig.6.1 se fabrică prin tragere macrosonică se obține un grafic de genul celui reprezentat în fig.6.2.

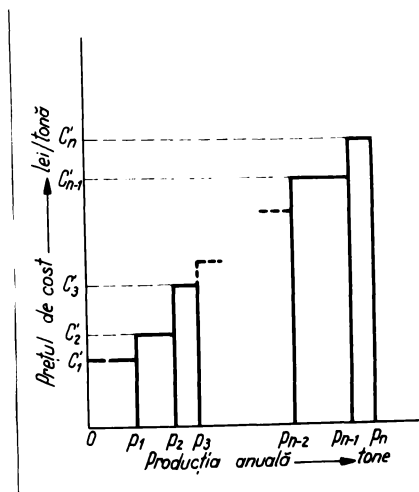


Fig.6.2. Graficul produselor asimilate prin tragere macrosonică.

În acest caz, noile prețuri de cost pe sortiment au expresia

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1' = k_1 C_1 \\ C_2' = k_2 C_2 \\ \vdots \\ C_n' = k_n C_n \end{array} \right. \quad (6.4)$$

în care, $k_1 \dots k_n$, sînt coeficienții de asimilare care se determină pe cale experimentală.

Astfel și în cazul produselor asimilate avem relații de forma

$$Q' = \sum_{n=1}^n C'_n p_n \quad (6.1)'$$

$$C'_m = \frac{\sum_{n=1}^n C'_n p_n}{\sum_{n=1}^n p_n} \quad (6.2)'$$

$$Q' = C'_m \sum_{n=1}^n p_n \quad (6.3)'$$

În acest caz, economiile anuale ce se obțin prin tragere macrosonică sînt date de expresia

$$\begin{aligned} \Delta Q &= Q - Q' = \sum_{n=1}^n C_n p_n - \sum_{n=1}^n C'_n p_n = \\ &= C_m \sum_{n=1}^n p_n - C'_m \sum_{n=1}^n p_n \end{aligned} \quad (6.5)$$

Determinarea experimentală a coeficienților de asimilare, $k_1 \dots k_n$, s-a făcut cu ajutorul fișei de economii prezentată în anexa 3. Economii înscrise în această fișă se datoresc în principal creșterii gradului de deformare pe trecere, respectiv a coeficientului de alungire. Conform tehnologiei convenționale de tragere la rece pe dop a țevilor din oțel carbon, folosită în prezent la I.T. "Republica" - București, pentru a fabrica țevi din oțel carbon cu diametrul exterior de circa 20 mm sînt necesare șase trageri succesive. În cazul tragerii macrosonice, coeficientul de alungire pentru cele șase trageri convenționale se acoperă numai prin patru trageri. Rezultă deci că prin tragerea macrosonică se elimină două trageri convenționale. Acest fapt are mare importanță economică, deoarece fiecare tragere implică o operație de recoacere, îndreptare, decapare și lubrifiere. În plus, la două trageri succesive se mai execută și o retezare spiț și respițuire, fapt ce influențează consumul de metal. În aceste condiții, ținînd seama și de viteza sporită de tragere obținută la tragerea macro-

sonică, s-a găsit că valoarea coeficienților de asimilare, $k_1 \dots k_n$, variază în limitele 0,84 - 0,91. Acest lucru înseamnă că o tonă de țevă fabricată prin tragere macrosonică costă în medie cu 12,5% mai puțin decât tona de țevă fabricată prin tragere convențională, lucru ce permite I.T.R. să realizeze economii anuale de circa 4 milioane lei. În aceste condiții, timpul de recuperare a investiției este cu mult sub un an, investiția fiind deci rentabilă.

În ce privesc produsele care în prezent se aduc din import, calculele de eficiență economică elaborate de ICEM arată că la fiecare tonă de țevă fabricată în țară prin tragere macrosonică se aduce un aport net de circa 5.000 lei valută.

Eficiența economică a produselor noi, necomparabile, se calculează în fiecare situație concretă, caz în care contează în primul rând toleranțele și calitatea suprafeței țevii. Și în acest caz, rentabilitatea este ridicată, deoarece se pot face economii de metal cât și suprima unele operații de strungire de precizie, rectificare la interior, etc.

C O N C L U Z I I

1. S-a efectuat un studiu monografic privind bazele teoretice ale proceselor de deformare plastică a metalelor în câmp macrosonic.
2. S-au definitivat o serie de principii privind alegerea și dimensionarea instalațiilor pentru producerea și utilizarea macrosunetelor.
3. S-a realizat o instalație experimentală de produs macrosunete, folosită la tragerea la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic, instalație care poate fi utilizată în orice alte aplicații ale ultrasunetelor de mari energii în medii solide sau lichide.
4. S-au elaborat metode de determinare a nivelelor energiei acustice în medii solide, s-a efectuat fundamentarea teoretică a unui tip de traductor inductiv de măsurare a energiei acustice cât și realizarea practică a acestui traductor pînă în fază de brevet. Este de menționat că deși aceste realizări au fost obținute în legătură cu tragerea macrosonică a țevilor, ele au o aplicabilitate generală în fizică și tehnică.
5. S-a elaborat o metodă de măsurare a forțelor, metodă ce poate fi aplicată și în alte lucrări de cercetare privind comportarea unor materiale, scule sau lubrifianți în procesul de tragere la rece a țevilor.
6. S-a determinat calitativ și cantitativ efectul de suprafață și efectul de volum al macrosunetelor, în care sens s-a făcut:
 - a) Stabilirea pe cale teoretică a unei corelații între gradul de reducere a frecării de contact și parametrii tehnologici ai procesului de tragere macrosonică. Avînd în vedere importanța acestei corelații pentru proiectarea proceselor de tragere macrosonică a țevilor, s-a procedat la verificarea ei pe cale experimentală.
 - b) Determinarea pe cale experimentală a efectului de volum și a

parametrilor ce-l influențează și stabilirea unei legături între acest efect și efectul de suprafață.

Este de menționat că prin aceste rezultate, obținute printr-o muncă independentă, se dezvoltă cercetările realizate la Universitatea Aston /16/ și se fundamentează posibilitatea de utilizare a macrosunetelor în procesele de tragere și de deformare plastică sub presiune.

7. În scopul determinării unor modificări reziduale în produsele fabricate în câmp macrosonic, s-a stabilit influența macrosunetelor asupra principalelor proprietăți mecanice (R_c , R , A_{10}), a țevilor din oțel carbon (OLT-35), trase la rece în condițiile unor grade de deformare diferite. În acest sens, s-a constatat o reducere a stării de ecruisare a țevilor trase cu macrosunete față de cele trase fără macrosunete, fapt ce pune într-o nouă perspectivă cercetările lui B.Langenecker /17-18/ și ale lui G. Kralik și B.Weiss /23-24/. Având în vedere importanța acestor rezultate, s-a căutat generalizarea lor pe cale teoretică.
8. Pe cale experimentală s-a stabilit că macrosunetele influențează excentricitatea țevilor, în sensul reducerii ei.
9. În scopul fundamentării unei noi căi de proiectare a proceselor de tragere macrosonică a țevilor, s-a efectuat o tentativă de găsire a legilor fizice de stabilitate dinamică a focarului de deformare, cu ajutorul unei modelări matematice.
10. Pe baza cercetărilor efectuate s-a elaborat o tehnologie de tragere la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic ce se aplică la întreprinderea de Tevi "Republica" - București. Se menționează că această tehnologie este în curs de brevetare, fiind solicitată și la export.
11. Conform calculului tehnico-economic, rezultă că tehnologia de tragere la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic este eficientă. Avantajele acestei tehnologii se concretizează în esență în reducerea prețului de cost mediu pe tonă de țevă cu 12,5%.

12. Autorul își permite în cele ce urmează să facă unele propuneri în privința continuării cercetării, fapt ce nu vine în contradicție cu scopul acestei teze de doctorat, teză ce începe și nu sfârșește o cercetare serioasă:
- a) Perfecționarea instalației de tras în câmp ultrasonic în sensul sincronizării automate a frecvenței de rezonanță mecanică a transductorului cu frecvența electrică a forței excitatoare.
 - b) Perfecționarea dispozitivelor pentru măsurarea nivelelor energiei acustice în sensul creșterii sensibilității lor.
 - c) În scopul stabilirii corelațiilor dintre efectul de suprafață și efectul de volum, este necesar a se verifica ipoteza referitoare la faptul că macrosunetele introduse prin dop nu influențează frecarea pe filieră și de a se stabili ponderea în care cele două efecte influențează procesul de deformare plastică propriu-zis și modificarea stării de e-cruisare.
 - d) În privința determinării efectului macrosunetelor asupra excentricității țevilor, este necesar ca lucrările de cercetare să continue în două direcții:
 - urmărirea pe cale experimentală, într-o varietate mai mare de cazuri, a influenței parametrilor acustici și de deformare asupra excentricității;
 - elaborarea de noi metode experimentale sau îmbunătățirea modelului matematic ales, astfel încât, să fie posibilă calcularea excentricității medii.
 - e) Extinderea actualei tehnologii de tragere la rece a țevilor din oțel carbon pe dop activat ultrasonic, la gama oțelurilor înalt aliate (inoxidabile).

Mecanismul deformării plastice a țevilor prin tragere la rece în câmp ultrasonic

Ing. O. DRĂGAN
Institutul de cercetări metalurgice

și Ing. E. SEGAL
Ulna de țevi „Republica”

OZ 609, 14, 018, 29 : 589, 4/5

Tragerea la rece a țevilor este singurul procedeu de deformare plastică la care aplicarea ultrasunetelor s-a realizat practic în producție [1].

Cercetările ce se desfășoară pe plan mondial privind tragerea la rece a țevilor în câmp ultrasonic se dezvoltă în prezent în două direcții [7]: creșterea eficienței instalațiilor existente la tragerea ultrasonică și construirea unor instalații ultrasonice de foarte mare putere care să permită tragerea unor țevi cu diametrul exterior pînă la 100 mm și cu grosimi de pereți pînă la 12 mm.

Reducerea forțelor statice de deformare și creșterea vitezelor tehnologice de prelucrare, în cazul deformării ultrasonice, se consideră că sînt o consecință a reducerii frecării exterioare la suprafața de contact dintre metalul care se deformează și scula de lucru, precum și a creșterii gradului de plastifiere a metalului [1]. Plastifierea metalelor este reprezentată ca un efect de volum al ultrasunetelor, concomitent cu un efect de suprafață (frecțiune). Aportul cantitativ al reducerii frecării față de creșterea gradului de deformabilitate în prelucrarea ultrasonică este încă controversat.

Cercetările au arătat că în cazul utilizării ultrasunetelor, următorii parametri influențează hotărîtor frecarea exterioară [2]: materialul care se deformează, forța normală aplicată pe suprafața de frecare, viteza de frecare, frecvența undei ultrasonice, amplitudinea ei, direcția oscilației relativ la direcția de frecare.

Modul cum fiecare din acești parametri afectează frecarea exterioară este tratat în lucrările [1] și [3].

O interpretare globală, privind curgerea plastică a metalelor prin focare activate ultrasonic, a fost dată și în cadrul unei lucrări elaborate în ICBM [4]. S-au emis astfel următoarele ipoteze:

Dimensiunile fizice ale focarului fiind de același ordin de mărime cu lungimea de undă (cazul unei frecvențe optime de 20 kHz), în focar se propagă numai unde simetrice de dilatare sau de încovoiere. Focarul va funcționa deci ca un element pulsant, în care caz valoarea forței normale la suprafața exterioară de frecare se reduce concomitent cu reducerea vitezei de frecare (în cazul unei direcții și al unui sens de oscilație optim). Pentru amplificarea acestor rezultate este necesar ca focarul să constituie un sistem rezonant. Rezultă deci că, în cazul tragerii țevilor atît dopul, cît și filiera trebuie

să aibă dimensiunile fizice rezultate din condiția de rezonanță.

Creșterea gradului de plastifiere se datorează, în primul rînd, reducerii frecării interioare din metal, ca urmare a interacțiunii forțelor statice de deformare cu forțele ultrasonice pulsatorii, a căror direcție, amplitudine și frecvență pot fi modificate după necesități. Pentru a exista deci un efect de volum este de asemenea necesar ca forțele ultrasonice exprimate sub forma:

$$F_{ul} = \rho \omega^2 A \cos \omega (t - \varphi) \quad (1)$$

în care: ρ este densitatea materialului; ω — pulsația; A — amplitudinea; φ — defazaajul inițial, să fie comparabile ca mărime cu forțele statice de deformare.

Lungimea optimă a focarului fixat rigid în centrul său fizic se determină cu relația:

$$l = \frac{n}{2f_0} \cdot v \quad (2)$$

în care:

n este ordinul armonicilor;

f_0 — frecvența de rezonanță;

v — viteza de propagare a undei în focar

Din condiția de rezonanță rezultă că se impun măsuri de izolare a focarului de deformare față de masele suplimentare ce pot fi atașate în procesul tragerii propriu-zise.

O preocupare importantă a cercetătorilor a constituit-o elaborarea formulelor necesare determinării parametrilor tragerii ultrasonice a țevilor. S-a putut calcula astfel viteza de vibrație și reducerea frecării [3].

Pentru stabilirea tehnologiei de tragere ultrasonică, o etapă esențială o constituie alegerea vitezei de vibrație în funcție de viteza de tragere. O viteză de vibrație ridicată ar putea să se dovedească tehnic greu de realizat și necoomică. De aceea trebuie determinat un domeniu al raportului celor două viteze, în care să fie asigurată reducerea economică a forței de tragere și, respectiv, o mărime a reducerii secțiunii pe tragere.

Formula pentru reducerea frecării este reprezentată grafic în figura 1. Graficul a fost construit pentru cazul cînd $\alpha = 12^\circ$, $\beta = 0$, semnificația acestor parametri fiind următoarea:

α — unghiul de tragere;

β — unghiul format de direcția vibrațiilor ultrasonice în sens longitudinal cu direcția de curgere a materialului pe

suprafața de contact în zona de deformare ;
 V_v — viteza de vibrație a fillerii ;
 V_T — viteza de tragere ;
 n — un coeficient care indică reducerea forței de frecare.

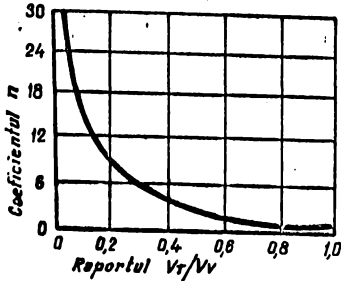


Fig. 1. Reducerea forței de frecare (a coeficientul n) în funcție de raportul dintre viteza de tragere și viteza de vibrație a fillerii.

În vederea aprecierii influenței exercitate de frecarea exterioară asupra forței de tragere, poate fi utilizată formula lui Gavrilenco [3]:

$$P_z = P_d + P_f = P_d (1 + \mu \cotg \alpha); \quad (3)$$

în care:

- P_z — este forța totală de tragere;
- P_d — forța de învingere a rezistenței la deformare;
- P_f — forța de frecare exterioară;
- μ — coeficientul de frecare.

Prin utilizarea vibrațiilor ultrasonice, componenta a două din formula (3) se reduce de n ori:

$$P_z = P_d \left(1 + \frac{\mu \cotg \alpha}{n} \right) \quad (4)$$

Reducerea forței de tragere ψ , în procente, va avea valoarea:

$$\psi \% = \frac{P_z - P_{z0}}{P_z} \cdot 100 = \frac{\mu \cotg \alpha}{1 + \mu \cotg \alpha} \left(1 - \frac{1}{n} \right) \cdot 100 \quad (5)$$

În figura 2 se reprezintă grafic această dependență pentru cazul $\alpha = 12^\circ$ și diferite valori ale coeficientului de frecare.

Pentru a alege parametrii optimi de tragere ultrasonică a țevilor trebuie stabilită inițial reducerea dorită a forței de tragere (fig. 2), după care se determină coeficientul n , respectiv raportul V_T/V_v (fig. 1). Având deci viteza de vibrație se poate stabili amplitudinea de oscilație, respectiv energia acustică utilă din formula:

$$A = \frac{V_z}{\omega} = \frac{V_z}{2\pi f} \quad (6)$$

Reducerea maximă se poate obține când direcția de vibrație coincide cu direcția de înaintare pe suprafața de contact din zona de deformare, respectiv în cazul $\beta = 0$.

Pentru a obține o creștere corespunzătoare a reducerii de secțiune pe trecere, precum și o reducere economică adecvată a forței de tragere, viteza de tragere trebuie să aibă o valoare egală cu: $1/3 - 1/5$ din viteza de vibrație a fillerii. În acest caz reducerea secțiunii poate crește până la 50%, iar forțele de tragere pot fi reduse până la 40%.

Conceperea și execuția unui sistem acustic eficient pentru tragerea țevilor au o analiză a întregii linii de energie vibratorie de la generator (convertorul de frecvență) până la elementul terminal de la locul de prelucrare.

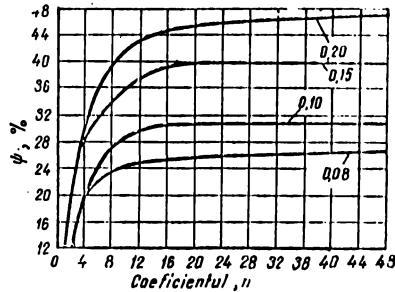


Fig. 2. Reducerea forței de tragere în funcție de reducerea forței de frecare (a coeficientul n), în cazul tragerii țevilor prin fillere cu $\alpha = 12^\circ$ și diferiți coeficienți de frecare.

Soluțiile detaliate trebuie să ducă la micșorarea pierderilor de energie în fiecare element al sistemului, prevăzându-se o bună impedanță de ajustare între diferitele părți, precum și amplificamente de lucru și legături acustice care să reziste la sarcinile statice și dinamice impuse sistemului.

Un sistem de tragere ultrasonică se compune în principal din următoarele părți (fig. 3): sursa de energie primară, care în cazul

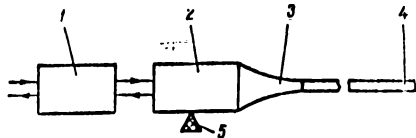


Fig. 3. Elementele componente ale unui sistem de tragere ultrasonică a țevilor:

- 1 — sursă de energie primară (generator sau convertor de frecvență); 2 — convertor de energie (transductor); 3 — adaptor de energie (concentrator); 4 — loc de utilizare (filleră dop); 5 — izolație acustică.

energiei electrice este generatorul sau convertorul de frecvență; convertorul de energie sau transductorul; adaptorul de energie sau concentratorul, elementele de cuplare și transfer al energiei la locul de utilizare (tije, mufe etc.), elemente de izolare a sistemului acustic față de influența maselor și a forțelor exterioare.

Tragerea convențională a țevilor se execută fie pe dorn, fie pe dop, așa cum se arată schematic în figurile 4, a și 4, b.

Tragerea ultrasonică se poate realiza sub aspectul modului de injecție a energiei acustice în trei feluri: prin activarea dopului, prin activarea filierei și printr-o activare combinată.

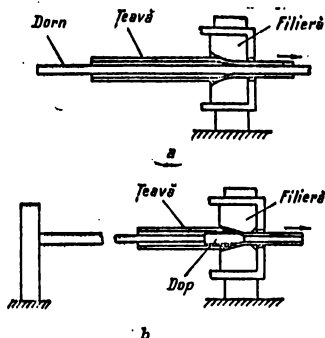


Fig. 4. Schema sistemului de tragere a țevilor:
a - tragere pe dorn;
b - tragere pe dop.

Din lucrările lui Pohlman R. și Lehfeldt E. [2] rezultă că direcția de vibrație influențează gradul de deformare plastică în focar. În cazul activării filierei, undele elastice se pot propaga în cele mai diferite direcții pe suprafața de contact [5], din care motiv construcția elementelor de cuplaj se complică.

În cazul activării dopului se produce o densitate de energie disponibilă mai mare [6], iar posibilitatea de schimbare a sculelor cuplate mecanic cu transductorul este mai bine realizată. Se preferă această soluție (sistem Sonodraw, aplicat la Aeroprojects) și datorită faptului că injectarea energiei ultrasonice se face acolo unde eforturile de deformare sînt mai puternice, adică în interiorul țevii (fig. 5,a).

Elementele de izolare acustică fac legătura între sistemul acustic și mașina unealtă de prelucrat. Izolarea acustică are importanță esențială mai ales în instalațiile de tragere unde se aplică sistemului acustic sarcini statice exterioare remarcabile. Prin elementele de izolare se caută să se reducă influența sarcinilor statice exterioare asupra frecvenței. Acest lucru este extrem de important, deoarece, așa cum se observă în figura 5, b, în cazul cînd frecvența variază, amplitudinea utilă a dopului Δu poate scădea pînă la valoarea zero. Izolarea acustică contribuie, de asemenea, la reducerea pierderilor de energie acustică.

În unele instalații se folosește așa-numitul suport nodal care constă dintr-o flanșă prinsă într-o regiune unde se presupune că mișcarea de oscilație longitudinală are valoarea zero. Acest lucru are inconvenientele în cazul aplicării sarcinilor statice exterioare deoarece frecvența de rezonanță se poate schimba prea mult, fapt ce implică pierderi de energie mari și amplitudini utile reduse. În acest sens rezultate bune se obțin cu așa-zisele montaje insensibile la forțe, dezvoltate și perfecționate de specialiștii de la Aeroprojects [8].

Dispozitivele insensibile la forțe permit montarea unui sistem de transmisie fără pierderi apreciabile de energie acustică în structura de susținere, fără modificarea sensibilă a frecvenței de rezonanță a sistemului și fără schimbarea impedanței acustice a montajului. Asemenea dispozitive insensibile la forțe au fost experimentate și utilizate la puteri acustice de 25 kW și sarcini statice de pînă la 200 t, fără efecte apreciabile.

Pe baza acestor realizări și perspective a fost posibil ca puterea acustică a instalațiilor ultrasonice să crească, fapt ce a permis mărirea diametrului țevilor trase.

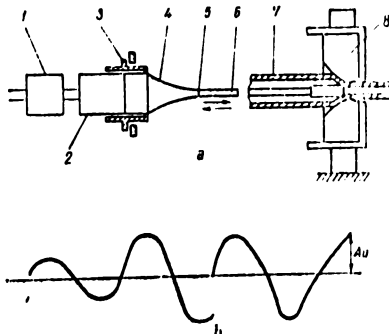


Fig. 5. Reprezentarea schematică a sistemului de tragere ultrasonică a țevilor;

a - sistemul de activare a dopului; b - reprezentarea oscilațiilor longitudinale în modul de transfer al energiei ultrasonice:
1 - generator electronic; 2 - transductor magnetotictiv; 3 - dispozitiv insensibil la forță; 4 - concentrator de energie acustică; 5 - auzură; 6 - tijă cu dop; 7 - țevă; 8 - filieră.

Pîrma Aeroprojects are în producție standard instalații de tras țevi cu Φ_{ext} pînă la 48 mm, experimentează, în prezent, instalații acustice pentru țevi cu Φ_{ext} pînă la 76 mm și are în proiect instalații de 13 500 W.A. pentru tragerea țevilor cu Φ_{ext} pînă la 102 mm [7].

BIBLIOGRAFIE

- [1] Byron Jones J. Ultrasonic metal deformation processing, CIRP International Conference on Manufacturing Technology, Sept. 25 - 28, 1967.
- [2] Pohlman R. și Lehfeldt E. Influence of ultrasonic vibration on metallic friction. Ultrasonics, nr. 4, 1966, p. 178 - 185.
- [3] Gentzsch G. Die Benutzung von Ultraschall Schwingungen in Verformungsprozessen. Bänder Bleche Rohre, nr. 9, 1968, p. 354 - 363.
- [4] Drăgan O. Studiul posibilităților de utilizare a ultrasunetelor pentru îmbunătățirea procesului de tragere a sîrmei prin filiere. Institutul de cercetări metalurgice - București, 1969 (referat intern).
- [5] Nosal V. V. Verminderung der Ziehkraft und Ermittlung der technologischen Parameter beim Ziehen von Rohren unter Anwendung von Ultraschall. Stahl und Deutsch, nr. 6, 1966, p. 581 - 585.
- [6] Clement John și Clauser George. Ultrasonics takes on another metalforming job. Metalworking, martie, 1967.
- [7] Nielsen John H. The tube drawing with ultrasounds, ASTM student Quarterly, Spring, 1969, Issue.
- [8] Elmore W. C. Support for vibratory (Aeroprojects Inc.) devices. U.S. Patents, 2. 891. 178 - 179 - 180.

Parametrii tehnologici ai instalațiilor de tragere a țevilor în câmp ultrasonic

Ing. O. DRĂGAN
Institutul de cercetări metalurgice

și Ing. E. SEGAL
Uniua de țev. „Republica”

OZ 021.045.23 : 021.778.1 : 66.004

La proiectarea eficientă a instalațiilor de tragere ultrasonică a țevilor este necesară cunoașterea unui număr mare de parametri.

Determinarea acestora se efectuează atât pe cale teoretică, cât și mai ales pe cale experimentală, deoarece prin calcul nu se pot încă stabili exact toate influențele ce se exercită asupra sistemului ultrasonic.

În acest sens, în afara proiectării pe baza unor principii acustice corespunzătoare, trebuie să se ia în considerație următorii factori [1]: modul de vibrare (axial, radial, torsional etc.) important pentru producerea efectului dorit în material; frecvența de vibrare, deoarece ea dictează dimensiunea fizică a ansamblului ultrasonic; dispozitivele de asamblare pe bancul de tras; nivelele energetice, electrice și acustice; materialele pentru construcția elementelor sistemului acustic; piesele de joncțiune între diferitele părți ale sistemului, inclusiv asigurarea de piese de schimb intersanjabile; armonizarea impedanțelor între toate părțile electrice, electromecanice și mecanice ale sistemului și, în particular, între piesele de lucru; elementul terminal sau seula care intră în contact cu țeava de prelucrat.

În cele ce urmează se va prezenta efectul celor mai importanți factori asupra procesului de tragere.

Modul de vibrare. Pentru tragerea ultrasonică a țevilor au fost concepute și realizate sisteme ultrasonice de activare a dopului și a filierei.

În cazul sistemului de activare a dopului trebuie avut în vedere ca fiecare element din sistemul ultrasonic să îndeplinească următoarele condiții: să introducă pierderi de energie minime, să funcționeze independent ca element rezonant pe frecvența transductorului și să permită o intersanjabilitate rapidă.

Sistemul de activare a filierei este mai complicat și mai puțin adecvat scopului propus, filiera fiind necesar să permită o vibrare axială, torsională sau radială.

Efectul frecvenței și al masei critice. În legătură cu tragerea ultrasonică a barelor s-a efectuat o evaluare experimentală a sistemelor acustice la trei frecvențe diferite: 7 kHz, 15 kHz și 28 kHz. Grafic rezultă că forța de tragere, reprezentată ca o funcție a vitezei

de tragere, este invers proporțională cu frecvența. De asemenea, se constată că pe lângă influența frecvenței are un efect și sarcina masei. Acest lucru înseamnă că adăugarea masei filierei la cuplajul terminal al unui sistem axial cere ca cuplajul să fie dinainte seurtat pentru a menține frecvența de rezonanță proiectată.

Cu toate acestea, o masă astfel atașată limitează amplitudinea de vibrație la un anumit nivel, reducând energia care poate fi furnizată prelucrării. Se obține deci un efect de sarcină a masei care reduce amplitudinea vibrației ca o consecință a masei atașate. Acest efect este mai mic la frecvența de 7 kHz și crește progresiv la frecvențele de 15 și 28 kHz.

Un parametru ultrasonic mai important este maximum vitezei de vibrare a filierei, obținut prin formula:

$$V = \omega A \quad (1)$$

în care:

ω este pulsația;

A — amplitudinea maximă de deplasare.

În figura 1 s-a reliefat efectul frecvenței asupra vitezei de vibrare, având ca parametru puterea electrică la intrare în transductor. Calculând viteza normalizată, ca raport între viteza de vibrare a filierei și viteza de tragere, se poate determina reducerea forței de tragere (fig. 2).

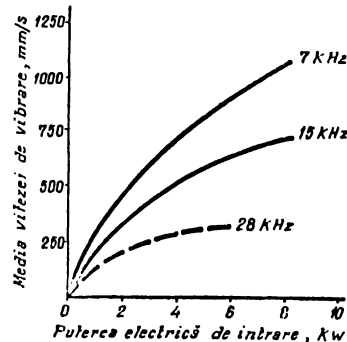


Fig. 1. Media vitezei de vibrare a filierei obținute prin trei sisteme de frecvențe ultrasonice.

Din diagrama din figura 2 se observă că datele de la sistemele 7 kHz și 15 kHz se adaptează rezonabil la o singură curbă. Datele de la 28 kHz sînt substanțial sub această

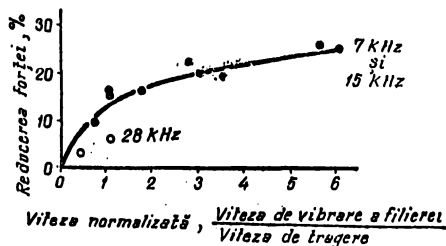


Fig. 2. Efectul vitezei normalizate asupra reducerii forței de tragere.

curbă, probabil din cauza ineficienței sistemului, rezultată din sarcina masei filierei sau chiar a unei erori. Rămîne însă stabilit că un parametru important pentru tragerea ultrasonică este viteza de vibrație a filierei și, în mod special, raportul acestei viteze la viteza de tragere.

Astfel, dacă se folosește o viteză mare de tragere, o viteză mare de vibrație a filierei, lucrîndu-se la o anumită frecvență, este esențial ca sarcina masei filierei să fie redusă.

Dispozitivul de asamblare pe bancul de tras. Este important ca sistemele ultrasonice să fie concepute pentru instalarea pe bancurile de tras existente cu minimum de modificări. Sistemul ultrasonic trebuie să fie cît mai compact posibil în limitele de frecvență și putere acustică, putînd fi încadrat în elementele operaționale existente.

Nivele energetice, electrice și acustice. Nivelele energetice, electrice depind de necesitățile de energie acustică utilă, de natura transductorului folosit și de pierderile energetice în sistemul acustic.

În privința necesităților de putere acustică, în literatură se indică ca nivel de putere ultrasonică 12-15% din puterea nominală a bancului de tras [1]. În cazul unei experiențe avansate, privind impedanțele de acord, se pot obține efecte echivalente cu jumătate din acest nivel.

Puterea cerută pentru a trage un material dat la o anumită viteză poate fi estimată prin determinarea forței necesare pentru tragere utilizînd relația cunoscută:

$$F = A \cdot X_m \cdot \sigma (A_1/A_2) \quad (2)$$

în care:

- F este forța cerută pentru tragere;
- A — aria secțiunii transversale a materialului tras, într-un anumit punct din focarul de deformare;
- σ — factorul de deformare;
- X_m — rezistența la curgere a materialului (valoarea medie în timpul deformării);

A_1 — aria secțiunii transversale a materialului înainte de tragere;

A_2 — aria secțiunii transversale a materialului după tragere.

Formula (2) este numai estimativă, deoarece ea neglijează frecarea, ceruirea etc. În consecință puterea necesară tragerii poate fi calculată cu formula:

$$P = F \cdot v \quad (3)$$

unde:

v este viteza de tragere.

În cazul cînd se crește cu lubrifiții care scad în mod sensibil frecarea, ecuația (3) poate fi folosită pentru o evaluare preliminară a necesităților de putere acustică în cazul unei reduceri anumite. Nivelul puterii acustice influențează asupra forței de tragere, influența acestuia reprezentîndu-se pentru anumite condiții în figura 3.

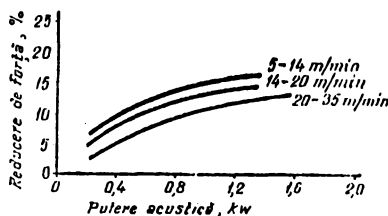


Fig. 3. Efectul puterii acustice la tragerea barelor de aluminiu de 17 mm (reducerea de secțiune de 27%).

În cazul trefilării sîrmei de fier cu viteză mică și cu reducere de secțiune de 13%, rezultate bune s-au obținut cu o intensitate ultrasonică de 25 W/cm².

John H. Nielsen [3] prezintă pentru tragerea țevilor pe dop un parametru experimental important. Astfel, vibrația axială a dopului trebuie să se facă cu o amplitudine aproximativă de 2,5 μ m.

Geometria și materiale pentru construcția elementelor sistemului acustic. Formele și natura elementelor sistemului acustic trebuie să satisfacă următoarele condiții: să introducă pierderi de energie minime; să nu modifice rezonanța sistemului; să aibă durabilitate mare; să fie intersanjabile.

În acest sens au fost modificate dimensiunile uzuale ale dopurilor. Tija dopului a fost confecționată inițial din oțel, apoi dintr-un aliaj cupru-beriliu, aluminiu-bronz, monel, aliaj de titan, vanadiu și aluminiu [2].

În general la o interfață de cuplaj nu trebuie să se accepte pierderi prin reflexie mai mari de 2,5%.

Materialul	Dimensiunea inițială, mm		Dimensiunea finală, mm		Reducerea secțiunii, %	Puterea ultrasonică, W	Parametrii procesului		Avantajele ultrasunetelor
	D extor.	Pereți	D extor.	Pereți			Viteza, m/min	Forța, tf	
Oțel inoxidabil (țevi sudate)	25,4	0,97	22,4	0,70	35	500 1 800	38	până la 3	Permite o trageră mai lină, eliminând griparea și zgomotul
Oțel inoxidabil (țevi fără cusătură)	28,5	2,5	23,8	2,0	38	până la 2 000	30,5	până la 3	Devine posibilă trageră pe dop; s-au obținut suprafețe lustruite
	23,8	2,0	19,0	1,5	40	până la 2 000	30,5		
Cupru	26,7	2,1	22,2	1,3	47	1 800	61,0	până la 3	Crește reducerea și viteza de trageră; se elimină griparea și zgomotul
Titan pur	12,5	0,8	11,0	0,5	44	1 900	30,5	0,7	Permite trageră astfel imposibilă

În tabela 1 se prezintă după Byron Jones [1], [4] exemple de lucrări privind trageră ultrasonică a țevilor din materiale greu deformabile.

În acest sens există informații asupra varietății de materiale, forme și dimensiuni de țevi, trase cu ultrasunete, cât și asupra avantajelor realizate. În general economiile și avantajele ce se obțin la trageră ultrasonică a țevilor se pot rezuma la următoarele: creșterea vitezei de trageră; creșterea reducerii de secțiune pe trecere astfel încât sînt necesare mai puține treceri și mai puține scule; posibilitatea fabricării prin trageră cu dop a țevilor cu pereți subțiri și foarte subțiri; reducerea numărului de recoaceri intermediare; posibilitatea de a fabrica țevi cu formă complexă printr-o singură trecere; îmbunătățirea calității suprafeței interioare a țevilor; prelungirea vieții sculelor de tras; eliminarea zgomotului supărător; micșorarea forțelor de trageră; posibilitatea fabricării de țevi trase cu dimensiuni uniforme.

La Columbia Summerill Co. cele mai mari beneficii au fost realizate la fabricarea țevilor cu pereți subțiri [1].

Prin aplicarea sistemului Sonodraw (sistem prin care energia ultrasonică se injectează în focarul de deformare prin intermediul țiglei și a dopului de tras) s-a putut înlocui cu succes trageră pe dorn, care la expandare prezintă multe dificultăți, prin trageră pe dop în condițiile unor rapoarte D/p de 500/1. În general, economiile de timp realizate prin aplicarea sistemului Sonodraw sînt de 30—40%, iar reducerea poate crește cu 20—50% [5].

Aplicarea ultrasunetelor la trageră țevilor și-a dovedit potențialul la fabricarea produselor noi, la ameliorarea calității vechilor produse, cât și la creșterea productivității.

Unul din cele mai serioase puncte slabe ale sistemului Sonodraw constă în imposibilitatea măsurării în timpul tragerii a cantității de energie acustică utilă [2].

Acest fapt poate duce la subactivarea sau supraactivarea dopului. Dacă dopul este supraactivat, acest fapt poate contribui la înrăutățirea lubrificației sau la deteriorarea atât a sculelor, cât și a materialului de tras. În cazul cînd dopul este subactivat, avantajele tragerii ultrasonice nu se produc. Din acest motiv este indicat ca energiile optime să se determine pe cale experimentală [3], [6].

Cercetările care se efectuează în prezent, privind trageră ultrasonică a țevilor, au în vedere realizarea unor bancuri de tras mai eficiente, o transmisie mai bună a energiei acustice, o lubrificație mai bună și, în special, o conversie mai eficientă a energiei electrice în energie acustică [7]. O serie de realizări recente au contribuit în mare măsură la rezolvarea unora din aceste probleme. Se poate astfel menționa convertoarele de frecvență cu semiconductoare (în stare solidă), transductoarele de înalt randament și dezvoltarea sistemelor de cuplare eficiente [1], [8].

Foarte recent [1] a fost pusă la punct fabricarea experimentală de convertoare de frecvență cu semiconductoare de siliciu cu randament de 90%, capabile să suporte variații rapide de sarcină.

S-au proiectat unități cu puteri nominale de 50 kW.

În general în procesul de prelucrare mecanică și, în special, în procesul de trageră se utilizează, datorită robusteții lor, transductoare magnetostriective.

Există informații că se caută elaborarea unor aliaje magnetostrictive cu coeficienți magnetomecanici foarte ridicați [1].

Paralel cu aceste căutări s-au dezvoltat noi materiale electrostrictive (ceramice), de mare randament, rezistente la temperaturi ridicate și foarte ieftine, cum este titanatul-zirconatul de plumb care are punctul Curie 300°C și randamentul 90%.

În cazul utilizării transductoarelor ceramice la prelucrări mecanice, este pe cale de rezolvare un sistem eficient de cuplare a acestora cu elementele de transfer al energiei acustice.

Acest fapt deschide noi perspective în procesul de tragere ultrasonică.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Byron Jones J. *Ultrasonic metal deformation processing*, C.I.R.P. International Conference on Manufacturing Technology, sept., 1967.
- [2] Clauser George E. *Production tube drawing of metals using ultrasonic energy applied to the method*. National Metals Congress. Chicago; oct., nov., 1966.
- [3] John Nielsen H. *The tube drawing with ultrasonics*. ASTM Student Quarterly, Spring 1969 Issue.
- [4] Byron Jones J. *Tube drawing, draw toning, flare and flange forming, with an Ultrasonic assist*. Metal Progress, mai, 1968.
- [5] Byron Jones J. *Tube drawing with ultrasonics*. The Iron Age, iulie 1967.
- [6] Byron Jones J. *Ultrasonic process speeds tube drawing*. Steel, nov. 14, 1967.
- [7] Byron Jones J. *Ultrasonic tube drawing enters its second generation*. Machinery, mai, 1968.
- [8] Elmore W. C. (Aeroproject Inc.) *Support of ultrasonic devices*, U.S. Patents 2.891.178 - 179 - 180.

B I B L I O G R A F I E

1. Bădărău, E., Grumăzescu, M., *Ultraacustica fizică și tehnică*, Editura Tehnică, București, 1967.
2. Titeica, R., Popescu, I., *Fizica generală, Vol.I*, Editura Tehnică, București, 1971.
3. Blaha, F., Langenecker, B., *Dehnung von Zink-Kristallen unter Ultraschalleinwirkung*, *Die Naturwissenschaften*, 20, 556-575 (1955).
4. Blaha, F., Langenecker, B., *Plastizitätsuntersuchungen von Metallkristallen im Ultraschallfeld*, *Acta Metallurgica*, 7, 93-99 (1959).
5. Severdenco, V.P., Kubovici, V.V., *Drawing of copper wire in an ultrasonic field*, *Dokl. Akad. Nauk, Belorussek, SSSR*, u (2), 95-98 (1963).
6. Cunningham, J.W., Lanyi, R.J., *Study of the feasibility of applying ultrasonic energy to the rolling process for sheet metals*, Westinghouse Electric Corp., Pittsburgh, Pa, Report Now 64-0294 - j (1965).
7. Byron Jones, J. și alții, *Ultrasonic energy applied to the aluminium extrusion cladding of tubes*, Aeroprojects Inc., W-Chester, Pa., Report DP-418 (1959).
8. Langenecker, B., Fountain, C.W., Jones, V.O., *Ultrasonics an aid to metal forming*, *Metal Progress*, 82 (4), 97-101 (1964).
9. Tarpley, W.B., Kartluke, H., *Ultrasonic tube drawing niobium zircaloy - 2 and cooper*, Aeroprojects Inc., W-Chester, Pa., report NYO-10008 (1961).
10. Clauser, G.E., *Production tube drawing of metals using ultrasonic energy applied to the mandrel*, *Am. Soc. for Metals*, Report C6-26.4 (1966).
11. Byron Jones, J., *Ultrasonic metal deformation processing*, *CIAP International Conference on Manufacturing Techonogy*, 25-28 sept. 1967, Chicago.

12. Severdenco, V.V., Klubovici, V.V., Stepanenco, A.A., Prokratka i volocenie s ultrazvukom, Nauka i Tehnika, Minsk, 1970.
13. Winsper, C.E., Dawson, G.R., Sansome, D.H., An introduction to the mechanics of oscillatory metal working, Metals and Materials, 8(2), 158-162 (1970)
14. Sansome, D.H., Oscillatory metal working research at the University of Aston in Birmingham, First International Symposium on HIGH - POWER ULTRASONICS (MACROSONICS), 17-19 sept. 1970, Graz.
15. Pohlman, R., Lehfeldt, E., Influence of ultrasonic vibration on metallic friction, Ultrasonics, 4(4), 1966.
16. Winsper, C.E., Sansome, D.H., Application of ultrasonic vibration to the plug drawing of tube, Metal Forming, 38(3), 71-75 (1971). ✓
17. Langenecker, B., Dislocation damping in macrosonic fields, Physical Review, 145 (2), 487-491 (1966).
18. Langenecker, B., Effects of ultrasound on deformation characteristics of metals, IEEE, Transaction on Sonics and Ultrasonics, SU-13(1), 1-8 (1966).
19. Langenecker, B., A critical look at ultrasonic metalworking processes, ASM Metals Congress, 1966, Chicago.
20. Langenecker, B., Jones, V.O., Illiewich, J., Metal plasticity in macrosonic fields, First International Symposium on HIGH-POWER ULTRASONICS (MACROSONICS), 17-19, sept.1970, Graz.
21. Langenecker, B. și alții, Basic and applied research on metal deformation in macrosonic fields, Ultrasonics International, 27-29 March 1973, London.
22. Oelschlägel, D., Weiss, B., Verfestigung durch intensiven Ultraschall in Einkristallen, Berg und Hüttenmaschine, 111(3), 1966.
23. Kralik, G., Weiss, B., Über die Ultraschallverfestigung von kubisch flächenzentrierten Metallen und Legierungen, Zeitschrift für Metallkunde, 58(7), 471-475 (1967).



ANSI Z39.48-1968

24. Kralik, G., Weiss, B., Untersuchungen über die Amplitudenabhängigkeit und die termische Erholung der Ultraschallverfestigung, Berg und Hüttenmaschine, 111(3), 1966.
25. Nanu, A., Tehnologia materialelor, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1972.
- ✓ 26. Drăgan, O., Ciovică, D., Aplicațiile active ale ultrasunetelor în metalurgie și construcții de mașini (146 pagini), ODPT-MIM, București, 1969. ✓
- ✓ 27. Drăgan, O., Olteanu, F., Sîrbu A., Posibilități de aplicare a ultrasunetelor de mari energii în metalurgie, Sesiunea de Comunicări Științifice a Institutului Politehnic București, mai, 1969. ✓
- ✓ 28. Drăgan, O., Segal, E., Mecanismul deformării plastice a țevilor prin tragere la rece în câmp ultrasonic, Metalurgia, 23 (11), 734-736 (1971).
- ✓ 29. Drăgan, O., Segal, E., Parametrii tehnologici ai instalațiilor de tragere a țevilor în câmp ultrasonic, 23(12), 811-814 (1971).
30. Nosal, V.V., Kîmșa, O.M., Snijenje tiagorîh usilii i opredelenie tehnologicheskikh parametrov proțessa volocenia trub s ispolzovaniem ultrazvukovîh kolebanii voloki, Stal, 2, 159-162 (1966).
31. Boyd, C.A., Kartluke, H., Application of ultrasonics in tube drawing, DMIC-Battelle Memorial Institute Columbus, Report 187, 1963.
32. x x x Ultrasonic activation aids tube production, Tooling and Production, 32 (2), 96 (1966).
33. Clement, J., Clauser, G., Ultrasonics takes on another metal-forming job, Reprinted from Metalworking, March 1967.
34. Byron Jones, J., Tube drawing draw ironing flare and flange forming with an ultrasonic assist, Reprinted from Metal Progress, May 1968.

35. Nielsen, J.H., Tube drawing with ultrasonics, Reprinted from ASTM Student Quarterly, Spring 1969, Issue.
36. Buckley, J.T., Freeman, M.K., Ultrasonic tube drawing, Ultrasonics, 8(3), 152-158 (1970).
37. Protopopescu, A., Drăgan, O., Cercetări experimentale privind presarea la rece a pulberilor din fier sub acțiunea oscilațiilor ultrasonice, Metalurgia 22(4), 216-221 (1970).
38. Drăgan, O., Protopopescu A., Compacting metal powders by ultrasound, Ultrasonics for Industry 1970, 20-21 October 1970, London.
39. Protopopescu, A., Drăgan, O., Cercetări privind presarea pulberilor metalice sub influența ultrasunetelor, Conferința Națională de Tehnologii Neconvenționale în Prelucrarea Metalelor, 14-16 octombrie 1971, Timișoara.
40. Drăgan, O. și alții, Contribuții privind presarea pulberilor în câmp ultrasonic, Conferința Națională de Chimia și Tehnologia Silicaților Tehnici și Compușilor Oxidici, 9-11 noiembrie 1972, Brașov.
41. Protopopescu, A., Drăgan, O., Ciovică, D., Presarea pulberilor în câmp macrosonic, a IV-a Conferință Națională de Acustică, 29-31 mai 1973, București.
42. Protopopescu, A., Drăgan, O., Ciovică, D., Procedeu de obținere a comprimatelor relativ înalte din pulberi metalice și nemetalice, Brevet R.S.k. 56.887.
43. Drăgan, O., Protopopescu, A., Concerning the pressing of alumina powder with organic binder under ultrasonic influence, Contract ICMM 1107/1971 pentru The British Ceramic Research Association.
44. Drăgan, O., Ciovică D., Cercetări privind fabricarea țevilor înalt aliate prin tragere la rece în câmp ultrasonic, ICMM, raport 1235/1972.
45. Drăgan, O., Ciovică, D., Ivan, M., Cercetări privind tragerea la rece a țevilor în câmp ultrasonic, ICMM, raport 1055/1970.

46. Bancroft, D. și alții, Method and apparatus for measurement of acoustic power transmission and impedance, USA Patent 3.288.241.
47. Byron Jones, J., A calorimetric method and apparatus for evaluating transducer assemblies, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol.SU-16(2), 76-78(1969).
48. Herbertz, J., Elektrodynamische Schwingungsmeßsonde, Prospectus "J.Herbertz", Aachen.
49. Dobbs, E.R., Electromagnetic generation of ultrasonic waves in metals, Ultrasonics for Industry 1970, 20-21 Oct. 1970, London.
50. Drăgan, O., și alții, Steel carbon cold drawing under ultrasonics influence, First International Symposium on HIGH-POWER ULTRASONICS (MACROSONICS), 17-19 Sept. 1970, Graz. ✓
51. Drăgan, O. și alții, Cercetări privind tragerea la rece a țevilor din oțel carbon sub influența ultrasunetelor, Metalurgia, 22(10), 629-633 (1970).
52. Ivan, M., Ciovică, D., Drăgan, O., Cercetări experimentale privind tragerea la rece a țevilor din oțel carbon în câmp ultrasonic, Sesiunea de Comunicări Stiințifice ICEM, 4-6 februarie 1971, București.
53. Drăgan, O. și alții, Cercetări privind tragerea la rece a țevilor din oțel carbon în câmp ultrasonic, Conferința Națională de Tehnologii Neconvenționale în Prelucrarea Metalelor, 14-16 oct.1971, Timișoara.
54. Drăgan, O. și alții, Contribuții privind studiul traductorilor inductive pentru măsurarea amplitudinii vibrațiilor în medii solide, a IV-a Conferință Națională de Acustică, 29-31 mai 1973, București.
55. Drăgan, O., Galan, N., Sîrbu A., Contributions to the calculus of the inductive transducer for vibrations, în curs de apariție în Ultrasonics.
56. Drăgan, O. și colectiv, Traductor pentru măsurarea vibrațiilor în medii solide conductoare, Dosar OSIM 77.186/1973.

57. x x x Protocol încheiat în urma vizitei de documentare în problema utilizării ultrasunetelor la tragerea țevilor la întreprinderea de Tevi "Republica" - București în perioada 29.X-2.XI.1973 de către delegații VEB NK Stahl und Walzwerke, Riesa.
- ✓ 58. Drăgan, O., Segal, E., Asupra frecării de contact în focarul de deformare la tragerea la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic, Conferința Națională de Tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor, 14-16 oct. 1971, Timișoara.
59. Drăgan, O., Segal, E., Asupra frecării de contact în focarul de deformare la tragerea la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic, Metalurgia, 24(7), 469-471 (1972).
- ✓ 60. Drăgan, O., Novac, S., Cioviță, D., Modificarea parametrilor de forță și a caracteristicilor mecanice ale produselor la tragerea la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic, Sesiunea de Comunicări a Comisiei de Acustică a Academiei R.S.R., 6-7 dec.1972, București.
61. Drăgan, O. și alții, Cercetări privind modificarea unor proprietăți mecanice ale țevilor din oțel carbon lase la rece în câmp ultrasonic, Metalurgia, 24(12), 812-814 (1972).
62. Atanasiu, N., Drăgan, O., Segal, E., Influența ultrasunetelor asupra proprietăților mecanice ale oțelului carbon (OLT 35) tras la rece, a XXV-a Sesiune Științifică a Institutului Politehnic București, 21-23 dec.1972, București.
63. Atanasiu, N., Drăgan, O., Atanasiu, Z., Influența ultrasunetelor asupra proprietăților de rezistență ale oțelului carbon (OLT 35) prelucrat prin deformare plastică la rece, a IV-a Conferință Națională de Acustică, 29-31 mai 1973, București.
64. Drăgan, O. și alții, Asupra stabilității dinamice a focarului de deformare la tragerea la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic, a IV-a Conferință Națională de Acustică, 29-31 mai 1973, București.

65. Drăgan, O., Cold drawing of tubes on an ultrasonically activated plug, Ultrasonics International 1973, 27-29 March 1973, London.
66. Drăgan, O., Ciovică, D., Novac, St., Cercetări privind trage-rea la rece a țevilor pe dop activat ultrasonic, a IV-a Conferință Națională de Acustică, 29-31 mai 1973 București.
67. Drăgan, O., Kaltziehen von Rohren mit beschalltaktivierten Dorn, Symposium Moderne Verfahren in der Metalurgie, 5-6 Sept. 1973, Freiberg.
68. Drăgan, O. și colectiv, Procedeu și instalație pentru trage-rea la rece pe dop a țevilor din oțel carbon, Dosar OSIM  /1974.
69. Filipovici, J., Mihai, D., Drăgan, O. și alții, Procedeu și instalație pentru plastifierea și curbarea lemnului, Brevet R.S.R.  /1973.
70. Filipovici, J., Mihai, D., Drăgan, O. și alții, Cercetări privind curbarea lemnului în câmp ultrasonic, Industria Lemnului, 21 (3), 88-91 (1970).
71. Filipovici, J., Mihai, D., Drăgan, O. și alții, Metode și dispozitive de curbare a lemnului în câmp ultrasonic, Sesiunea de Comunicări Științifice a Universității din Brașov, 19-21 februarie 1971, Brașov.
72. Filipovici, J., Mihai, D., Drăgan, O. și alții, Cercetări privind curbarea lemnului în câmp ultrasonic, a IV-a Conferință Națională de Acustică, 29-31 mai 1973, București.
73. Nanu, A., Drăgan, O., Isarie, I., Elemente de calcul a eficienței tehnico-economice în prelucrarea metalelor prin eroziune electrică, Construcția de Mașini, 21(4), 232-235 (1969).