

INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUTA"
TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ

TEZA DE DOCTORAT

CONTRIBUTII LA SUDAREA PRIN PRESIUNE IN CIMP
ULTRASONOR A TABLELOR DIN ALUMINIU

Conducător științific

Prof.dr.doc.șt.ing.VLADIMIR POPOVICI

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICĂ"
TIMIȘOARA

Autor

prof.lector.ing.SERBAN NANU

1985

INSTITUTUL POLITEHNIC TIMIȘOARA	
E	496/88
Volume	
Data	31.6.85

INTRODUCERE

Desvoltarea accelerată și pe multiple planuri a tehnicii, în ultimul timp, a impus utilizarea unor materiale cu cele mai diverse calități necesare în diferite domenii de activitate. Tendințele actuale de miniaturizare și ultraminiaturizare - pe de o parte - și de gigantizare - pe de altă parte - revendică atât utilizarea unor materiale cu proprietăți specifice acestora, cât și elaborarea unor instalații, utilaje și în special a tehnologiilor capabile să satisfacă cerințele în aceste domenii. Dintre metalele a căror domeniu de utilizare este în continuă dezvoltare, aluminiul este cel mai reprezentativ, utilizarea lui extinzându-se în toate domeniile activității economice și industriale de la industria constructoare de mașini, aeronautică, industria aerospațială la industria electrotehnică, electronică și microelectronică etc.

Lărgirea în continuare a domeniilor de utilizare a aluminiului și aliajelor sale este înăsat în strânsă legătură cu progresele realizate în domeniul prelucrării acestui material și în special de dezvoltarea și perfecționarea procedurilor și tehnologiilor de sudare ale acestuia. Astfel, după un început promițător în domeniul sudării aluminiului și aliajelor sale cu arcul electric acoperit sau în domeniul realizării îmbinărilor sudate de aluminiu au fost obținute prin aplicarea și perfecționarea procedurilor de sudare în mediu de gaze protectoare inerte și MIG.

În anumite domenii, industria electrotehnică, electronică, microelectronică, aerospațială etc, unde se necesită realizarea îmbinărilor din aluminiu la dimensiuni relativ mici (0,01...2 mm) și în același timp se impune nealterarea proprietăților acestuia în zona îmbinărilor sudate, procedurile clasice de sudare ale aluminiului nu dau rezultate satisfăcătoare. Ca urmare, s-au propus și dezvoltat, noi proceduri de sudare ale aluminiului: sudarea electrică prin pre-

siune, sudarea cu energie immagazinată în câmp electrostatic, sudarea la rece, procedeul se satisfac însă doar parțial cerințele amintite.

Dezvoltarea vertiginosă în ultimele decenii a fizicii vibrațiilor a condus la obținerea unor prețioase descoperiri, care demonstrează că oscilațiile elastice de frecvențe ultrasonore pot produce asupra corpurilor o serie de fenomene fizice, ca : fenomenul de amortizare, frecare internă, modificări ale stării de cristalizare, modificări de structură, dispersarea, respectiv coagularea particulelor etc. [125; 4, 1, 12, 39, 63].

Cert este faptul că vibrațiile ultrasonore joacă rolul de "agent catalizator" al fenomenelor ce se produc în diferitele procese de prelucrare a materialelor, acționarea acestora materializându-se prin activarea proceselor.

Utilizarea vibrațiilor ultrasonore în tehnica sudării fieri are începutul în jurul anilor 1950, când cercetătorii sovietici și americani propun suprapunerea vibrațiilor ultrasonore ale sculei în procesul de sudare la rece peste efortul de compresiune aplicată componentelor [90]. Ulterior, datorită caracteristicilor deosebite și a avantajelor certe oferite, procedeul s-a dezvoltat rapid, în special în domeniul sudării metalelor neferoase în decedul a aluminiului. Concomitent cu dezvoltarea procedeuului de sudare prin presiune în câmp ultrasonor s-au efectuat și numeroase cercetări privind utilizarea vibrațiilor ultrasonore în activarea procedurilor clasice de sudare prin topire [125], obținându-se și în această direcție rezultate remarcabile.

Principial sudarea prin presiune în câmp ultrasonor se consideră a fi o sudură la rece între material de adăos [3, 28, 36, 59, 64], realizarea îmbinării sudate având loc datorită fenomenelor ce se desfășoară în zona îmbinării sudate sub acțiunea vibrațiilor ultrasonore transmise de componentele în prezența forței statice de apăsare. Îmbinările sudate sînt îmbinări de egală rezistență ce se caracterizează prin lipsa zonei influențate termic, caracteristică procedurilor de sudare prin topire și deci nu apare o modificare a proprietăților mecanice și fizice ale materialului în punctul sudurii și în jurul acestuia [138, 90, 59, 43, 26]. Interesul major al procedeuului de sudare sub presiune în câmp ultrasonor rezidă în posibilitățile de a suda piese foarte subțiri cu deformări și consum de

energii mici [44]. Toate acestea fac ca procedeul de sudare sub presiune în câmp ultrasonor să aibe astăzi o întrebuințare tot mai mare, în special în industria electrotehnică, electronică și microelectronicii unde există situații în care nici un alt procedeu de sudare nu dă rezultate satisfăcătoare.

Literatura de specialitate abordează destul de sporadic problema sudării prin presiune în câmp ultrasonor, rezumându-se a prezenta instalații și regimuri de sudare pentru anumite cazuri particulare fără a face, cu mici excepții, referiri concrete asupra mecanismului procesului de formare a îmbinărilor sudate. Se abordează unele aspecte ale procesului de sudare fără însă a privi problema în ansamblul ei sau a se elucidă interdependența fenomenelor ce concurează la realizarea îmbinării sudate.

Cu toate că pînă în prezent se dispune de o acumulare de date experimentale, datorită lipsei unor interpretări teoretice globale a fenomenelor ce guvernează procesul de realizare a îmbinărilor sudate pe de o parte, iar pe de altă parte datorită inexistenței unor relații analitice care să permită predimensionarea prin calcul a principalelor parametri ai regimurilor de sudare, procedeul de sudare prin presiune în câmp ultrasonor are încă la dispoziție o utilitate limitată.

Pornind de la situația prezentată, lucrarea de doctorat își propune să aducă o contribuție la cercetarea fundamentală privind sudării prin presiune în câmp ultrasonor, și anume: să se elucideze din punct de vedere teoretic și experimental mecanismul sudării prin presiune în câmp ultrasonor a aliajilor de aluminiu și să determine o serie de expresii analitice de dependență între parametri regimului de sudare, care poată să conducă la cunoașterea și optimizarea procesului de sudare la realizarea îmbinării sudate. Scopul lucrării este, pe de o parte, să se cunoască sfera de aplicabilitate a procedeului, iar pe de altă parte posibilitatea utilizării tehnologice corecte a acestuia.

Pentru cercetările experimentale întreprinse s-a utilizat ca metal de bază aluminiul electrozonic (marcatate AL 2), iar rețea aluminiului constituie, pe de o parte metalul

de bază cu ponderea cea mai mare în utilizarea industrială a procedurii de sudare studiat, iar - pe de altă parte - procedeu de sudare prin presiune în câmp ultrasonor are ca principal domeniu de aplicabilitate industriile : electrotencii, electronică și microelectronica, acolo unde aluziul tinde să înlocuiască din ce în ce mai mult metalele deficitare, ca : aurul, argintul sau cuprul.

Având în vedere că tema prezentei lucrări este relativ nouă, o parte a metodelor de analiză și interpretare sînt originale, iar altă parte constituie contribuții la dezvoltarea sau adaptarea unor metode deja cunoscute.

Mulțimea fenomenelor care contribuie și concure la realizarea îmbinărilor sudate prin presiune în câmp ultrasonor depășește cu mult cadrul unei discipline, temologia este, pentru stăpînirea și manipularea acestora s necesită cunoștințe în cele mai diferite domenii, ca : fizica și mecanica vibrațiilor ultrasonore, fizica corpurilor solide, fizica corpurilor lichide, studiul metalelor, metalurgie, tribologie, termodinamic etc. Din aceste motive lucrarea a fost structurată pe trei părți, care înseamnă interdependență completă reciprocă, și-avem :

- prezentarea principală a fenomenelor de activare a procesului de sudare cu precizarea fenomenelor ce se desfășoară în etapele fizice în care se realizează lichidul mecanic al celor două metale;

- contribuții originale de la punct de vedere teoretic și experimental la realizarea prin procedeu de sudare ultrasonor, a unor caracteristici teoretice și experimentale esențiale;

- tabelări analitice a dependențelor între parametrii de sudare și concluzii.

Lucrarea s-a elaborat pe șase capitole, care luate împreună vor prezenta următorul conținut :

Capitolul I prezintă bazele fizice ale vibrațiilor ultrasonore și altele care sînt necesare pentru realizarea sudurii prin presiune în câmp ultrasonor. După prezentarea principiului de sudare prin presiune în câmp ultrasonor, s-au prezentat unele aspecte teoretice și experimentale, pe baza constatărilor și aprecierilor celor doi autori, s-a prezentat concluzia unanimă acceptată și în

SECRET
1960

sudarea prin presiune în câmp ultrasonor este mai avantajosă să se utilizeze oscilații ultrasonore transversale. Din analiza regimurilor tranzitorii a vibrației sandrodului supus oscilațiilor longitudinale și transversale și din studiul vibrațiilor subarmonice ale acestuia rezultă că schimbarea modurilor de vibrație ale acestuia, din cauza neliniarității sistemului nu se pot produce decât în gama frecvențelor foarte înalte, iar datorită existenței subarmonicilor de ordin superior, amplitudinea vibrației capătului liber al sandrodului crește.

Obiectul capitolului 2 îl constituie prezentarea fenomenelor și proceselor ce apar în materialele metalice sub acțiunea undelor ultrasonore. Pornind de la observația că în timpul procesului de sudare apare în zona îmbinării sudate o transformare de fază solid-lichid și invers, se prezintă atât particularitățile acțiunii undelor ultrasonice asupra materialelor metalice solide, cât și în fază lichidă. Se face o prezentare a fenomenelor de înnuieră acustică, de amortizare a oscilațiilor ultrasonore prin efect termoelastice și datorită fenomenelor de activare, formare și migrare a dislocațiilor. Tot pe baza teoriei dislocațiilor se fac referiri calitative și cantitative asupra activării proceselor de frecare internă, difuzie și transfer de masă datorate existenței oscilațiilor ultrasonore. Referitor la influența oscilațiilor ultrasonore asupra materialelor metalice în stare lichidă se prezintă posibilitatea fragmentării particulelor de metal lichid și declanșarea proceselor de cristalinare sub acțiunea unui câmp ultrasonor.

Problemele analizate și tratate în cadrul acestui capitol sînt de o deosebită importanță teoretică și practică, deoarece prin intermediul acestora se poate crea o imagine clară a complexului de fenomene care contribuie la realizarea fenomenelor sudare prin presiune în câmp ultrasonor, poate fi elucidat mecanismul de formare a acestuia.

Pe baza celor prezentate în capitolele 1 și 2, în cadrul capitolului 3 se fac precizări asupra mecanismului sudării prin presiune în câmp ultrasonor.

În urma prezentării studiului actual al caracteristicilor asupra procesului de sudare prin presiune în câmp ultrasonor, în concluzie sintetizate în apendicele actuale asupra fenomenului studiat, se fac o serie de referiri privind influența pa-

parametrilor regimurilor de sudare asupra calității îmbinărilor sudate.

În concordanță cu ipotezele existente asupra mecanismului de formare a îmbinărilor sudate în câmp ultrasonor, parametri regimurilor de sudare se clasifică în trei grupe și anume :

- parametri acustici sau parametri constructivi ai sistemelor acustice ale utilajelor de sudare;
- parametri tehnologiei principale;
- parametri tehnologiei secundari.

În privința parametrilor acustici se prezintă referiri privind influența tipului oscilațiilor ultrasonore, frecvența și amplitudinea acestora, precum și forma și dimensiunile senzorului și corpului ajutător asupra calității îmbinărilor sudate. Asupra parametrilor tehnologiei se fac referiri privind modul în care puterea acustică transmisă zonei îmbinării, timpul de acționare a vibrațiilor ultrasonore, valoarea forței statice de apăsare, timpul de refulare și gradul de curățire a suprafețelor de sudat influențează calitatea îmbinării sudate.

În partea a doua a capitolului 3 se prezintă o serie de contribuții originale la elucidarea mecanismului de formare a îmbinărilor sudate din aluminiu prin presare în câmp ultrasonor. Se prezintă astfel rezultatele cercetărilor teoretice și experimentale asupra fenomenelor ce contribuie la realizarea îmbinării sudate cu referiri concrete, confirmate la cercetarea experimentală, că procesul de sudare are loc prin topirea unei anumite cantități de metal în zona punctului sudat și prin activarea procesului de difuzie, a cărei existență a fost detestată experimental. Existența unei zone de material în stare lichidă a fost determinată atât experimental cât și teoretic pe vederea teoretică prin stabilirea unei metode de stabilire analitic a temperaturii atinse în procesul de sudare de diferențierea componentelor în zona punctului sudat. Astfel s-a efectuat un calcul de bilanț termic a proceselor care au loc în timpul realizării îmbinărilor sudate, bilanț termic care a condus și el la atestarea fazei lichide în zona îmbinării sudate. Se prezintă de asemenea, însoțită de microtracțiuni rezultate din măsurătorile experimentale, succesiunea fazelor și fenomenelor care apar în spațiul de sudare pe timpul

realizării unei îmbinări sudate. Cercetările prezentate în cadrul capitolului 3 sînt de o deosebită importanță, deoarece concluziile și rezultatele la care s-a ajuns vin să completeze și să întregescă nivelul de cunoaștere a fenomenelor ce au loc la sudarea prin presiune în câmp ultrasonor și prin aceasta să conducă la lărgirea domeniului de aplicare a procedeului amintit.

În cadrul capitolului 4 se prezintă cercetările experimentale efectuate. După prezentarea materialului de bază ales pentru efectuarea cercetărilor experimentale cu caracteristicile și proprietățile acestuia, se face o prezentare a bazei materiale a programului de cercetare experimentală cu o descriere mai detaliată a instalației de sudare utilizată cu prezentarea caracteristicilor și performanțelor acesteia.

Se prezintă cercetările microstructurale efectuate asupra materialului îmbinării sudate și în zona de trecere spre materialul de bază, precum și repartiția microdurităților de-a lungul îmbinării sudate și perpendicular pe acestea, a căror rezultate vin să confirme și ele ipoteza existenței fazei lichide în procesul de sudare. Se menționează că pentru analiza microstructurală, cât și pentru evidențierea existenței în îmbinarea sudată a unei structuri cu densități de dislocații superioare celei normale, precum și pentru cercetarea apariției fenomenelor de difuzie și transfer de masă s-au utilizat o gamă largă de metode de cercetare de la microscopia optică, microscopia electronică la microsonda electronică și metode de analiză mecanică. Prin combinarea cercetărilor efectuate asupra proprietăților mecanice se face o serie de precizări asupra modului în care parametri principali ai procesului de sudare influențează fenomenele ce se desfășoară pe stăruiala îmbinării sudate și implicit asupra calității acesteia.

Capitolul 5 are ca subiect determinarea unor dependențe cantitative între funcția "calitate" a îmbinărilor sudate și parametri tehnologici principali ai procesului de sudare. Pe baza indicatorilor statistico-matematici și a coeficienților de corelație de ordinul II, se stabilește între funcția "calitate" a îmbinării sudate și parametri tehnologici principali există o corelație funcțională de ordinul II mare

oa 2. Pe baza acestor informații s-a stabilit legea de corelație optimă între parametri amintiți. Pentru efectuarea calculelor necesare stabilirii legii de corelație multiplă s-au elaborat un număr de 14 programe de calcul în limbaj FORTRAN. În finalul capitolului se prezintă metodologia utilizată la stabilirea funcțiilor empirice de legătură între funcția calitate și parametri regimului de sudare. Determinarea acestora s-a dovedit necesară deoarece legea de corelație optimă este reprezentată într-un hiperspațiu cu 5 dimensiuni, care fizic nu are sens.

În capitolul 6 sînt expuse principalele concluzii ce se desprind din cercetările teoretice și experimentale efectuate, precum și contribuțiile originale ale autorului la problemele ridicate de procedeul de sudare prin presiune în câmp ultrasonor.

Autorul prezentei teze de doctorat aduce și pe această cale cele mai calde mulțumiri conducătorului științific prof.dr.doc.șt.ing.Vladimir Popovici, care a contribuit substanțial la formarea sa ca inginer, cadru didactic și cercetător științific.

Capitolul 1

OSCILATII ULTRASONORE UTILIZATE LA ACTIVAREA PROCESELOR DE SUDARE

1.1. Principiul activării proceselor de sudare cu unde ultrasonore

Suprapunerea undelor ultrasonore în procesul de sudare prin presiune la rece se poate face în principiu în două moduri : acționarea cu unde longitudinale - unde cu direcția de vibrație în axa concentratorului și sonotrodului (fig.1.1.1)

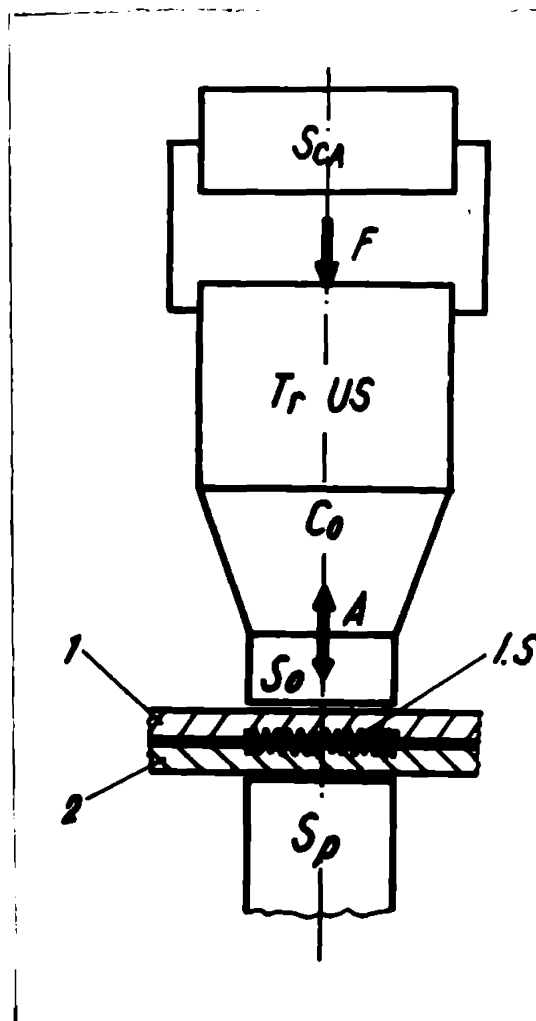


Fig.1.1.1. Schema de principiu a sudării prin presiune în câmp ultrasonor cu oscilații longitudinale

S_{CA} - surzător de curent alternativ

T_r -US - transducer ultrasonor

C_o - concentrator

S_o - sonotrod

1, 2 - materialele de sudat

A - amplitudinea vibrației

P - presiunea specifică

și cu unde transversale, unde cu direcția de vibrație perpendiculară pe axa concentrator - sonotrod (fig.1.1.2)

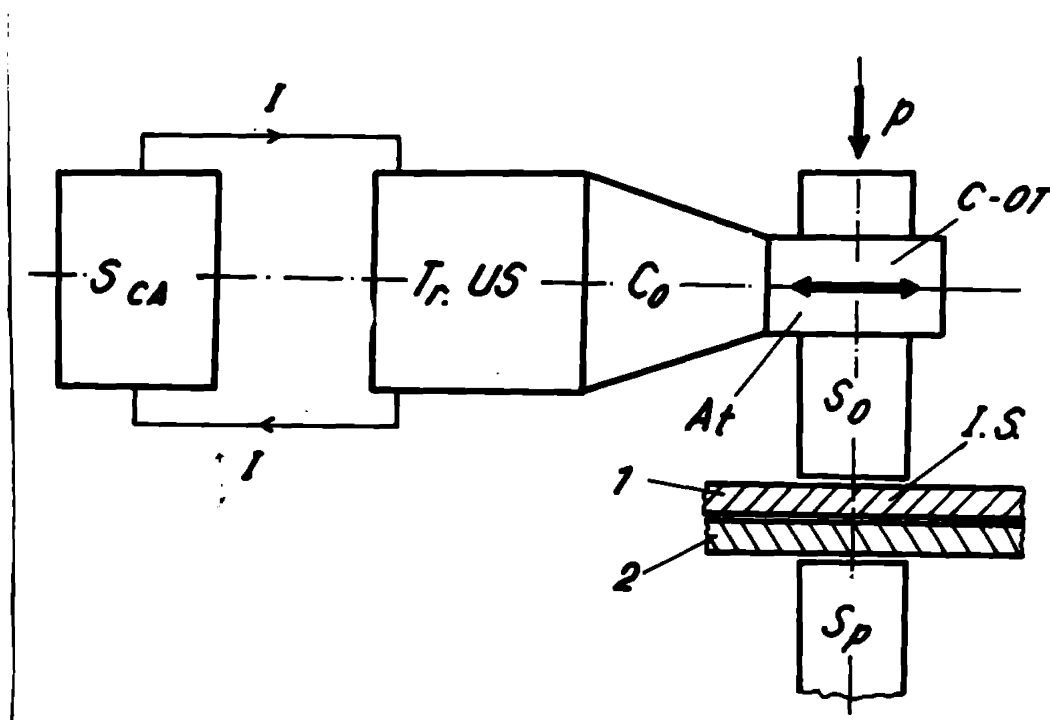


Fig.1.1.2. Schema de principiu a sudurii prin presiune în câmp ultrasonor cu oscilații transversale

S_{CA} - sursă de curent alternativ

T_r -US - transducer ultrasonor; C_0 - concentrator

S_0 - sonotrod; S_p - suport; 1,2 - materiale de sudat; p - presiunea specifică

A_t - amplitudinea oscilației transversale

În ambele cazuri frecvența uzuală a undelor ultrasonore se află în jurul valorii de 20 kHz (19...21 kHz), iar presiunea specifică $p = 1...4 \text{ daN/cm}^2$

La suprapunerea undelor longitudinale de amplitudine A_t materialele de sudat (1 și 2) sînt sollicitate pe lîngă deformarea plastică dată de presiunea specifică p și la o acțiune de "pompare" datorată undelor ultrasonore.

Ca urmare a acestui fapt apare o frecare internă între particulele materialelor de sudat, o creștere a temperaturii componentelor și o activare a procesului de difuzie a atomilor, respectiv moleculelor din 1 spre 2 și invers. Se accentuează deci procesul de sudare prin difuzie și deformare plastică.

În cazul undelor ultrasonore transversale de amplitudine A_t , pe suprafața de contact dintre componentele 1 și 2 se produce o frecare uscată datorată mișcării alternative dreapta - stînga și ca urmare și o cantitate de căldură care

duce la topirea micro asperităților suprafeței de contact, uscări și a unor zone mai întinse. Prin răcirea acestora în prezența presiunii specifice apare deci sudarea prin topire în preponderență față de sudarea prin presiune la rece și difuzie. În ambele cazuri energia undelor ultrasonore se transmite materialelor de sudat, activându-le.

Cercetările experimentale de activare a procesului de sudare a foililor metalice prin presiune în câmp ultrasonor utilizează undelor ultrasonore transversale cu rezultate net superioare utilizării undelor ultrasonore longitudinale. La sudarea maselor plastice, activarea procesului cu unde ultrasonore longitudinale este suficientă.

Rezultă deci că la activarea procesului cu unde ultrasonore transversale, datorită frecării mai intense ce apare pe suprafețele în contact a materialelor de sudat, cantitatea de căldură produsă este și este deosebit cea corespunzătoare numai frecărilor interne care apar în utilizarea undelor ultrasonore longitudinale. Altfel spus, în ambele cazuri de activare a procesului de sudare, cu unde ultrasonore transversale sau longitudinale, apare procesul de frecare internă și o frecare "externă" între suprafețele în contact a celor două componente.

Acceptând notarea cantităților de căldură ce apar la activarea procesului de sudare cu și pentru cele două moduri și anume :

- Q_{11} - cantitatea de căldură produsă de procesul de frecare internă, datorat undelor ultrasonore longitudinale;
- Q_{e1} - cantitatea de căldură produsă de procesul de frecare "externă" între suprafețele în contact a celor două componente, datorat undelor ultrasonore longitudinale;
- Q_{12} - cantitatea de căldură produsă de procesul de frecare internă, datorat undelor ultrasonore transversale;
- Q_{e2} - cantitatea de căldură produsă de procesul de frecare "externă" între suprafețele în contact a celor două componente, datorat undelor ultrasonore transversale.

Calitativ se poate scrie :

$$\begin{aligned} Q_{1l} &< Q_{1t} \\ Q_{0l} &< Q_{0t} \end{aligned} \quad (1.1.1)$$

deci :

$$(Q_1 + Q_0)_l < (Q_1 + Q_0)_t$$

rezultă :

$$Q_{tl} < Q_{tt} \quad (1.1.2)$$

în care Q_{tl} și Q_{tt} reprezintă cantitatea totală de căldură produsă datorită activării procesului de sudare în cazul utilizării undelor ultrasonore longitudinale, respectiv transversale.

În aceste constatări și aprecieri calitative rezultă că la sudarea prin presiune în câmp ultrasonor a foliilor metalice se utilizează oscilații ultrasonore transversale.

1.2. Oscilații lineare (staționare) și nelineare (nestaționare)

Se consideră oscilația lineară numită și staționară a sonotrodului, oscilația la care frecvența deci amplitudinea oscilațiilor rămâne constantă și oscilație nelineară sau nestaționară, cea la care frecvența deci și amplitudinea oscilației se modifică în timpul aplicării acestora [125, 126]

Regimul linear se poate studia prin aplicarea calculului operațional și matricial ecuațiilor diferențiale lineare care descriu vibrațiile libere. Prin punerea condițiilor de limită se determină modurile fundamentale de oscilație a sonotrodului.

Metodele de cercetare a regimurilor nestaționare sînt în general aproximative, deoarece este foarte greu de pus într-o ecuație matematică sau un sistem de ecuații, toate particularitățile sistemului fizic.

În cazul sudării prin presiune în câmp ultrasonor, frecvența oscilațiilor se consideră constantă, deci oscilațiile sînt libere - staționare.

Pe de altă parte, chiar la frecvența constantă, oscilațiile se pot produce de la valoarea zero la cea maximă, de un număr de ori egal cu dublul frecvenței curentului alternativ de excitație a transductorului.

Apare deci, chiar în cazul utilizării unei frecvențe constante, deci a oscilațiilor libere, un regim transitoriu, atât la utilizarea oscilațiilor longitudinale sau transversale ale sonotrodului.

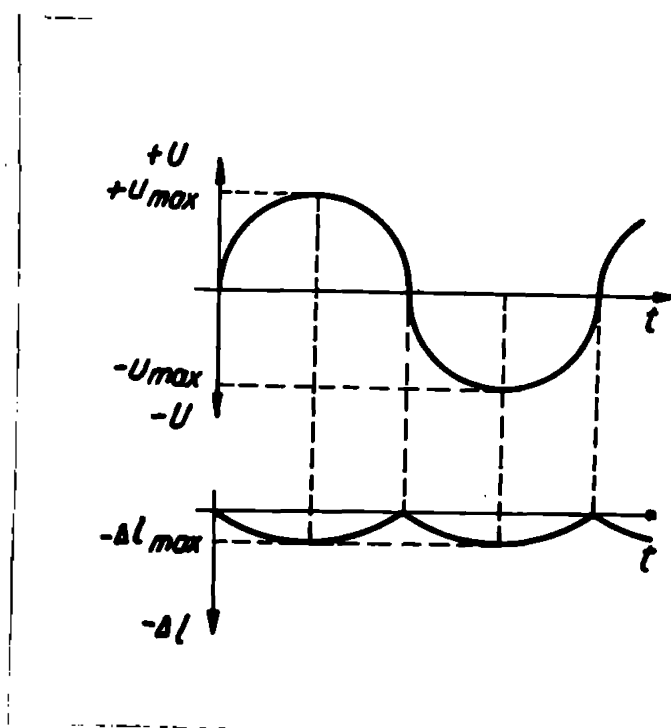


Fig.1.2.1. Variația în timp a tensiunii de alimentare a transductorului, corelată cu variația lungimii sonotrodului

$$\Delta l = l_0 - l_1$$

1.3. Regimul transitoriu al vibrației sonotrodului la oscilații longitudinale

Cum oscilațiile mecanice ale lungimii sonotrodului sînt funcție de oscilațiile electrice ale curentului de excitație a transductorului, rezultă că în rezonanțele electrice și mecanice există o strînsă interdependență.

Circuitul electric, ce da naștere fenomenelor mecanice de vibrație și rezonanță, este un circuit linear serie RL, care se poate prezenta prin ecuația integrodiferențială:

$$L \frac{di}{dt} + R \cdot i + \frac{1}{C} \int i dt = -U \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.3.1)$$

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \cdot i = \omega U \sin(\omega t + \varphi)$$

Pe altă parte, oscilațiile mecanice ale unei bare de

lungime l , sub acțiunea permanentă a unei forțe armonice aplicate la distanța $x = l$ de forma $F = F_0 \sin(\omega t + \psi)$ conform legii lui Newton este [125] :

$$M_{em} \ddot{x} = -R_m \dot{x} - \frac{1}{C_{em}} x + F_0 \sin(\omega t + \psi) \quad (1.3.2)$$

Analizându-se expresiile (1.3.1) și (1.3.2) se observă analogia structurală între acestea.

Prin intermediul expresiei (1.3.1) se poate deci studia regimul tranzitoriu mecanic după modelul regimului tranzitoriu electric, lucru cunoscut în electrotehnică, dacă se face echivalența dintre mărimile electrice și mecanice ce intervin.

Ideea de a studia problema în maniera amintită a rezultat din studierea tezei de doctorat [125], unde problema a fost studiată pentru cazul sudării prin topire cu arc electric activat cu unde ultrasunore.

Între ecuațiile (1.3.1) și (1.3.2) se pot face următoarele analogii :

$$M_{em} \rightleftharpoons L ; \quad R_m \rightleftharpoons R ; \quad C_{em} \rightleftharpoons C$$

în care M_{em} se poate numi "inductivitatea mecanică", R_m "rezistență mecanică" și C_{em} "capacitatea mecanică".

Deci prin analogie între cele două fenomene se pot admite noțiunile de : impedanță, admitanță sau mobilitate, precum și putere activă, reactivă și aparentă mecanică.

Utilizând notațiile :

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{M_{em} \cdot C_{em}}} \quad \text{pulsatia proprie a masei în [rad/s]}$$

$$\delta = \frac{R_m}{2 M_{em}} \quad \text{- factor de amortizare în [1/s]}$$

$$\frac{F_0}{e_m} = p \quad \text{- forța aplicată în regim staționar}$$

$$Z_{Re} = \sqrt{\frac{M_{em}}{C_{em}}} \quad \text{- impedanța caracteristică}$$

$$\zeta = \frac{R_m}{\sqrt{\frac{M_{em}}{C_{em}}}} = \frac{R_m}{Z_m} \quad \text{- factor de atenuare}$$

(1.3.3)

$$Q = \frac{M_{em} \cdot \omega_n}{R_m} = \frac{1}{\zeta} \quad \text{- factor de calitate}$$

și înlocuindu-le în (1.3.2) rezultă :

$$\ddot{x} + 2\delta \dot{x} + \omega_n^2 x = P \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.3.4)$$

Soluția ecuației (1.3.4) este de forma :

$$x(t) = x_p + x_1 \quad (1.3.5)$$

în care x_p - se referă la regimul permanent și x_1 la regimul liber.

$$x_p = \frac{P}{Z_m} \sin(\omega t + \varphi - \varphi) \quad (1.3.6)$$

unde Z_m - se numește impedanță mecanică și inversul ei mobilitate mecanică

$$Z_m = \omega_n^2 \sqrt{\left(1 - \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (1.3.7)$$

și

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (1.3.8)$$

Scris în complex simplificat, rezultă amplitudinea X

$$X = \frac{P}{j\omega Z_m} \quad (1.3.9)$$

și viteza

$$V = \frac{P}{Z_m}$$

Prin urmare, atât amplitudinea oscilațiilor, cât și viteza de propagare a acestora sînt direct proporționale cu forța P și invers proporționale cu impedanța mecanică.

Regimul liber este determinat de soluția ecuației omogene cu condițiile inițiale $t = 0$; $x = x_0$ și $x' = v_0$.

Utilizînd transformata Laplace a ecuației (1.3.4)

$$\mathcal{L}(x) = \frac{x_0(s - \delta) + v_0}{s^2 + 2\delta s + \omega_n^2} \quad (1.3.10)$$

revenind la funcția originală rezultă :

$$x_1 = x_0 \left(\cos \omega_p t + \frac{\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_n^2}}{\omega_p} \sin \omega_p t \right) e^{-\delta t} \quad (1.3.11)$$

unde
$$\omega_p = \sqrt{\omega_n^2 - \delta^2}$$

Pentru $t = 0$, $x = 0$ și $x' = x_0$ se obține :

$$x_1 = \frac{v_0}{\omega_p} e^{-\delta t} \sin \omega_p t \quad (1.3.12)$$

și pentru $t = 0$, $x = x_0$ și $x' = 0$ rezultă :

$$x_1 = x_0 \cdot e^{-\delta t} \left(\cos \omega_p t + \frac{\delta}{\omega_p} \sin \omega_p t \right) \quad (1.3.13)$$

Valoarea maximă a amplitudinii ($x_{1 \max}$) rezultă pentru :

$$\cos \omega_p t + \frac{\delta}{\omega_p} \sin \omega_p t = 1$$

deci

$$x_{1 \max} = 2 \zeta x_0 = 2 \frac{x_0}{\eta} \quad (1.3.14)$$

Expresiile energiei cinetice (w_c) și potențiale (w_p) au forma :

$$w_c = \frac{1}{2} M_{em} |v_0|^2 \quad \text{și} \quad w_p = \frac{1}{2} \frac{|x_0|^2}{C_{em}} \quad (1.3.15)$$

în care

$$M_{em} = \frac{1}{2} \delta \cdot l \cdot S = \frac{1}{2} \delta V_c = \frac{1}{2} \eta m$$

și

$$C_{em} = \frac{2}{\eta^2} \cdot \frac{l}{F \cdot S} = \frac{2}{\eta^2} \quad C_m = 0,2 C_m$$

Din analiza celor de mai sus se poate trage concluzia că în timpul regimului tranzitoriu oscilații longitudinale amplitudinea mișcării la $\psi = \frac{\pi}{2}$ poate să depășească amplitudinea regimului permanent, în timp ce viteza crește mai puțin, iar la $\psi = \frac{\pi}{2}$ amplitudinea nu poate depăși de două ori amplitudinea regimului permanent la viteze practic constante.

Este deci avantajos să se lucreze cu un defazaj $\psi = \pm \frac{\pi}{2}$. Deoarece în timpul regimului tranzitoriu se transportă energie acustică mai mare sonotrodului, este indicat ca el să fie provocat intermitent. Un mod de lucru este sudarea prin presiune în câmp ultrasonor utilizându-se oscilații longitudinale, este recomandată și lucrul cu impulsuri de impulsuri.

496888
306 E

**1.4. Regimul tranzitoriu al vibrației sonotrodului
la oscilații transversale**

Se consideră sonotrodul în condiții de oscilații transversale. Se observă din figura 1.4.1 că două secțiuni normale

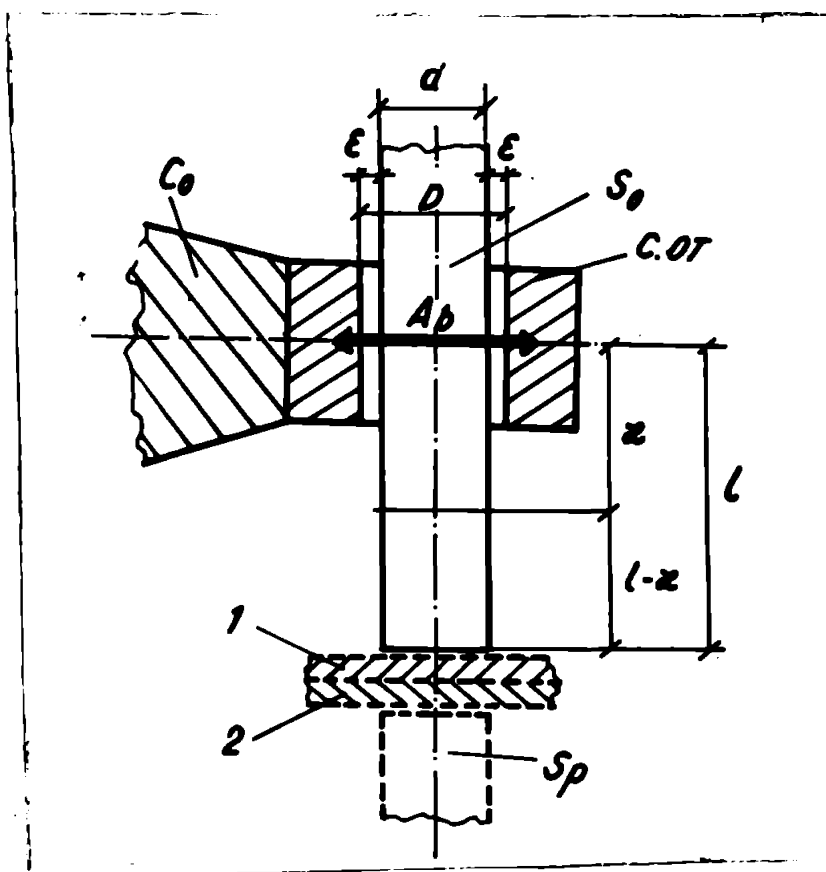


Fig. 1.4.1. Modul de fixare a sonotrodului în centrul de oscilație al concentratorului pe axa sonotrodului, nu mai sînt paralele pe timpul oscilației.

Acum se neglijează rezonanța, ecuația diferențială a mișcării libere este [185, 187, 127]

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -a^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \quad (1.4.1)$$

în care :

$$a^2 = \sqrt{\frac{E_0 I_0 \omega^2}{A_0}} = c \sqrt{\frac{I}{A}}$$

și

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_0 \omega}{\gamma}}$$

iar c reprezintă viteza de propagare a oscilațiilor în materialul sonotrodului.

Soluția ecuației diferențiale (1.4.1) este de forma :

$$w = X (C_1 \cos nt + C_2 \sin nt) \quad (1.4.2)$$

în care C_1 și C_2 sînt constante de integrare; $\frac{n}{2\pi}$ este frecvența din modurile fundamentale de vibrație și X depinde numai de coordonata x care în vibrație determină modul fundamental.

Rezultă

$$\frac{d^4 X}{dx^4} - K^4 X = 0 \quad (1.4.3)$$

în care

$$K^4 = \frac{n^2}{a^2}$$

Ecuația diferențială (1.4.3) neavînd termen liber și coeficienții ecuației fiind constanți, descrie modurile de oscilații transversale libere ale sonotrodului.

Rezultă polinomul $F(s)$:

$$F(s) = s^4 - K^4$$

Funcția imagine este :

$$\frac{1}{F(s)} = \frac{1}{s^4 - K^4} = \frac{1}{2K^3} \left(\frac{1}{s^2 - K^2} - \frac{1}{s^2 + K^2} \right)$$

$$\frac{1}{F(s)} = \frac{1}{2K^2} \left(\frac{1}{K} \operatorname{sh} Kx - \frac{1}{K} \sin Kx \right)$$

$$\frac{1}{F(s)} = \frac{1}{2K^3} (\operatorname{sh} Kx - \sin Kx) \quad (1.4.4)$$

$$\varphi(x) = \frac{1}{2K^3} (\operatorname{sh} Kx - \sin Kx) H(x)$$

Cum însă $a_0 = 1$ și $a_1 = a_2 = a_3 = 0$ iar $a_4 = -K^4$ se pot determina funcțiile Krilov.

Pentru simplificare :

$$A = \operatorname{sh} Kx - \sin Kx$$

$$B = \operatorname{ch} Kx - \cos Kx$$

$$C = \operatorname{sh} Kx + \sin Kx$$

$$D = \operatorname{ch} Kx + \cos Kx$$

(1.4.5)

Se obține :

$$F_{03} = a_0 \varphi_3 = \frac{A}{2K^3}$$

$$F_{02} = F'_{03} + a_3 \varphi(x) = \frac{B}{2K^2}$$

$$F_{01} = F'_{02} + a_2 \varphi(x) = \frac{C}{2K}$$

$$F_{00} = -F'_{01} + a_1 \varphi(x) = D$$

(1.4.6)

$$\begin{aligned}
 F_{13} = F'_{03} &= \frac{B}{2I^2} ; & F_{01} &= \frac{KA}{2} \\
 F_{11} = F'_{01} &= \frac{D}{2} ; & F_{12} = F'_{02} &= \frac{C}{2K} \\
 F_{23} = F''_{03} &= \frac{0}{2K} ; & F_{22} = F''_{02} &= \frac{0}{2} \\
 F_{21} = F''_{01} &= \frac{KA}{2} ; & F_{20} = F''_{00} &= \frac{K^2 B}{2} \\
 F_{33} = F'''_{03} &= \frac{D}{2} ; & F_{32} = F'''_{02} &= \frac{KA}{2} \\
 F_{31} = F'''_{01} &= \frac{K^2 B}{2} ; & F_{30} = F'''_{00} &= \frac{K^3 C}{2}
 \end{aligned}$$

La condițiile de limită

$$x = 0; \quad \lambda = X_0; \quad \frac{dx}{dx} = \frac{\varphi_0}{K}; \quad \frac{d^2 x}{dx^2} = -\frac{M}{I \cdot I \cdot K^2} \quad (1.4.7)$$

$$\frac{d^3 x}{dx^3} = -\frac{T}{I \cdot I \cdot K^3}$$

ecuația matricială a sistemului oscilant este :

$$\begin{vmatrix} X \\ Y \\ \frac{M}{IK^2} \\ \frac{T}{IK^3} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{D}{2I} & \frac{C}{2I} & -\frac{1}{2I} & -\frac{A}{2I} \\ \frac{A}{2I} & \frac{D}{2I} & -\frac{1}{2I} & -\frac{B}{2I} \\ \frac{B}{2I} & \frac{A}{2I} & \frac{D}{2I} & \frac{C}{2I} \\ \frac{C}{2I} & \frac{B}{2I} & \frac{A}{2I} & \frac{D}{2I} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} X \\ \frac{0}{K} \\ \frac{M}{IK^2} \\ \frac{0}{IK^3} \end{vmatrix} \quad (1.4.8)$$

În capătul încastrat al barei în capul cu oscilații transversale (C^{-0T}) de lașarea și deformațiile în această secțiune se consideră nule.

La capătul liber (fără de contact a sonotrodului cu materialul ce se sudază și prin care se precează compozițiile) momentul însovoietor și forțele tăietoare sînt nule.

Punîndu-se aceste condiții, din ecuația matricială (1.4.8) se obțin două ecuații :

$$\begin{aligned}
 a_1 D + a_2 C &= 0 \\
 a_1 A + a_2 B &= 0
 \end{aligned} \quad (1.4.9)$$

Sistemul (1.4.9) este compatibil cînd :

$$\begin{vmatrix} D & C \\ A & B \end{vmatrix} = 0$$

Tinând seama de notațiile (1.4.5) se obține :

$$(\operatorname{Ch} Kx + \cos Kx)^2 = (\operatorname{sh} Kx - \sin Kx)(\operatorname{sh} Kx + \sin Kx)$$

și condiția de frecvență :

$$\operatorname{Ch} Kx \cdot \cos Kx = -1 \quad (1.4.10)$$

Se poate aprecia că frecvențele oscilațiilor fundamentale transversale sînt mai mici decît cele ale oscilațiilor longitudinale. Schimbarea nodurilor de vibrație, din cauza neliniarității sistemului se poate realiza doar în gama frecvențelor înalte.

1.5. Vibrațiile subsonice ale sonotrodului

Din figura 1.4.1 se vede că sonotrodul este fixat în capătul concentratorului de oscilație transversală, existînd totdeauna între sonotrod și concentrator un joc ϵ de valoare foarte mică, astfel încît :

$$D = d + 2\epsilon \quad (1.5.1)$$

Cu cît modul de fixare al sonotrodului în capătul concentratorului este mai deficitar, cu atît jocul ϵ va fi mai mare și în consecință poate apărea situația din figura 1.5.1.

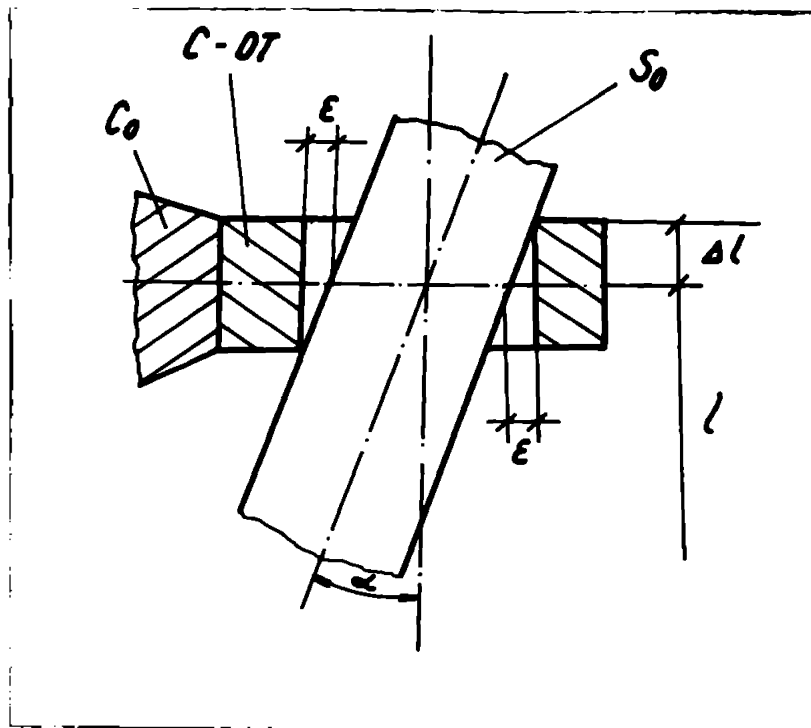


Fig.1.5.1. Reprezentarea schematică a jocului între sonotrod și capăt de oscilație transversală

Ca urmare, forța va crește mai repede decît deplasarea și ecuația de mișcare a sonotrodului se va putea scrie sub forma :

$$m \ddot{x} = -R_{\text{osc}} \dot{x} - F_r + F_0 \cos \omega t + F_1 \quad (1.5.2)$$

în care F_r este funcție nelineară de "x" care se încadrează în funcționi și F_1 este termenul constant.

Lungimea sonotrodului de la capătul de contact cu piesele de sudat și pînă la prinderea sa în capul concentratorului de oscilație transversală poate varia între $(1+\Delta l)$ și $(1-\Delta l)$ funcție de mărimea jocului ε .

La valori mari ale jocului ε și mărimea Δl este mare, iar relația dintre forță și deplasare urmărește o parabolă antisimetrică. Pentru jocuri mai mici, forța crește din ce în ce mai repede în raport cu deplasarea și curba $F_p(x)$ urmărește o parabolă cubică antisimetrică, obișnuit de forma :

$$F_p = x^3$$

În timpul sudării, datorită existenței jocului ε între sonotrod și capătul concentratorului pot apărea subarmonici de ordinul $\frac{1}{2}$; $\frac{1}{3}$; $\frac{1}{4}$; $\frac{1}{5}$. Reprezentarea grafică a acestora se face în figura 1.5.2

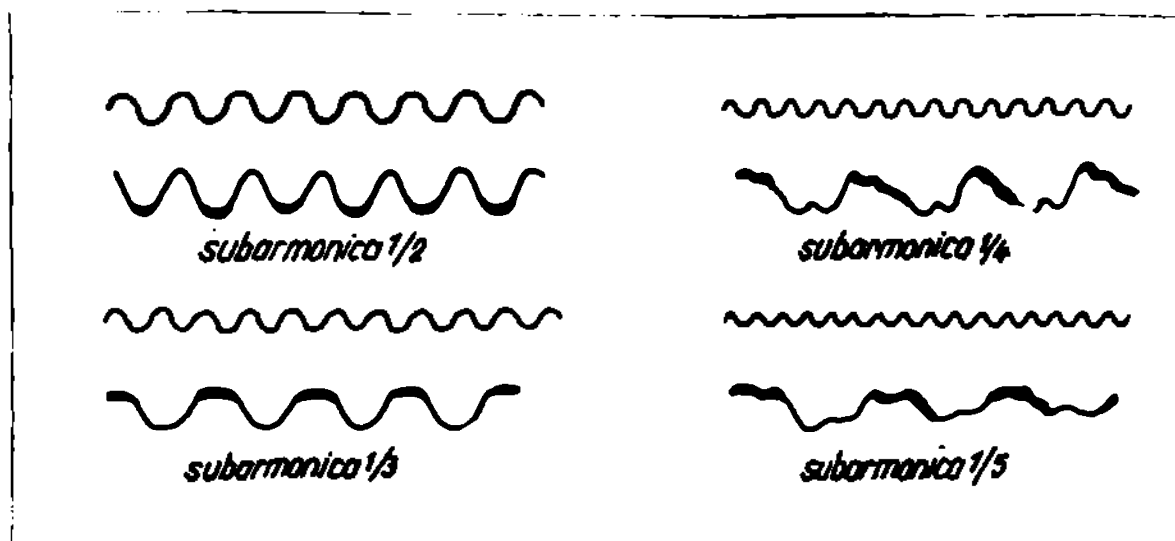


Fig.1.5.2. Reprezentarea grafică a subarmonicilor de ordinul $\frac{1}{2}$; $\frac{1}{3}$; $\frac{1}{4}$; $\frac{1}{5}$

Se observă că amplitudinea fiecărei subarmonici este mai mare decât amplitudinea fundamentalei și frecvența scade cu ordinul subarmonicii.

Întrucât creșterea amplitudinii oscilației este în favoarea procesului de sudare, căci în momentul transferii de energie ultrasunete materialelor de sudat.

Pentru obținerea de amplitudini mari este recomandată utilizarea generatorilor de impulsuri care se caracterizează pe o parte prin regiuni tranzitorii avantajoase amplitudinilor mari și pe de altă parte prin forme de undă favorabile apariției subarmonicilor.

Se recomandă în acest caz și faptul că generatorii de impulsuri sunt mai robuste, mai simple și mai ieftini.

tine decât cele cu undă continuă, rezultă clar recomandarea
lor în procesul de sudare prin presiune în câmp ultrasonor.

Capitolul 2

CONSIDERAȚIUNI CU PRIVIRE LA ACȚIUNEA UNDELOR ULTRASONICE ASUPRA MATERIALELOR METALICE

2.1. Considerații generale

Sudarea prin presiune în câmp ultrasonor a materialelor metalice, nemetalice, precum și a combinațiilor acestora, găsește în ultima vreme o utilizare din ce în ce mai mare în diferitele ramuri ale industriei, mai ales acolo unde tehnologiile clasice de realizare a îmbinărilor sudate nu corespund scopului respectiv.

Sudarea prin presiune în câmp ultrasonor se efectuează fără material de adăos, realizarea îmbinării sudate are loc datorită fenomenelor ce se desfășoară în aceasta sub acțiunea vibrațiilor ultrasonore transmise componentelor, sub acțiunea forței statice de apăsare.

Schema de principiu a spațiului de sudare la sudarea prin presiune în câmp ultrasonor se prezintă în figura 2-1.1.

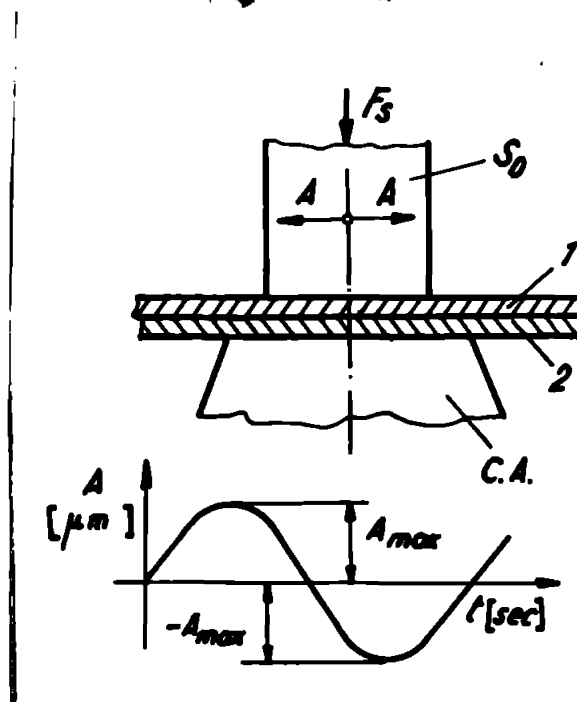


Fig.2.1.1. Schema de principiu a spațiului de sudare la sudarea prin presiune în câmp ultrasonor

Le menționat este faptul că în cazul sudării materiilor metalice se utilizează unde ultrasonore transversale

iar pentru sudarea materialelor plastice, unde ultrasunere longitudinale.

Prin zona de contact dintre sonotrod și materialul de sudat, datorită configurației geometrice ale acestuia undele ultrasunere transversale sînt transmise foliei i , care vibrează cu frecvența undelor transmise. Această mișcare relativă între suprafețele celor două componente, datorită fenomenului de frecare uscată între acestea, are ca prim efect degajarea unei anume cantități de căldură Q , care conduce la încălzirea componentelor la o temperatură θ . Concomitent cu aceasta, în zona îmbinării sudate se transmit vibrații ultrasunere materialului componentelor, vibrații ce conduc la apariția unor fenomene caracteristice în acestea.

Corelate toate aceste aspecte conduc în final la realizarea îmbinărilor sudate.

Folosirea rațională a tehnologiilor de sudare prin presiune în câmp ultrasunor necesită cunoașterea profundă a tuturor proceselor și fenomenelor ce se desfășoară în materialele metalice, atât în fază solidă, cât și lichidă sau cvasilichidă sub acțiunea vibrațiilor de frecvențe ultrasunore.

2.2. Efectul undelor ultrasunore asupra materialelor în stare solidă

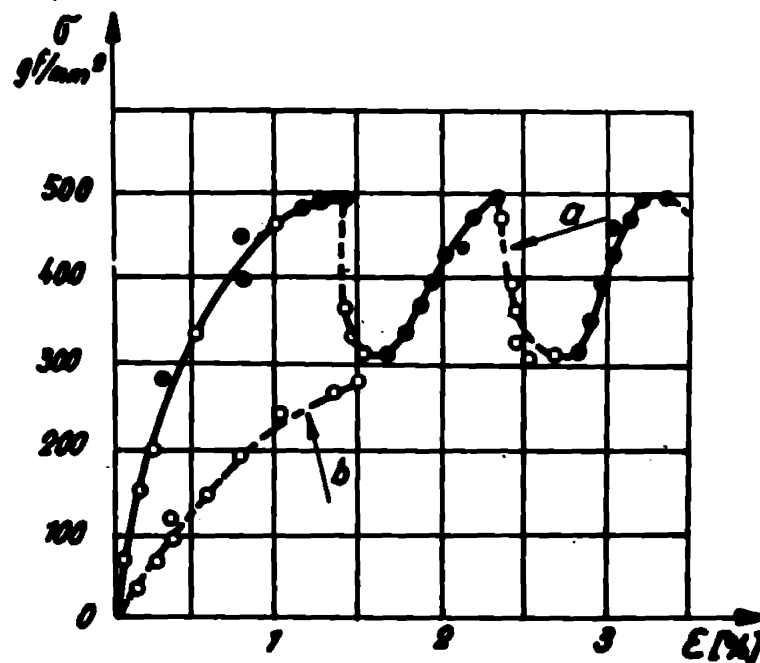
Undele ultrasunore aplicate materialelor metalice în stare solidă produc în acestea o stare de tensiuni acustice și o serie de deformări elasto-plastice. În ora actuală, nu există încă o explicație unanimită acceptată, care din punct de vedere fizic să elucideze în totalitate efectele pe care undele ultrasunore de energii mari le produc în materialele metalice solide. Este încă acceptată ideea că undele ultrasunore ce acționează asupra materialelor metalice în stare solidă produc în acestea apariția unui complex de fenomene, ca: efectul de înmuiere acustică, fenomenul de amortizare sau frecarea internă, durificarea acustică, creșterea energiei interne a rețiculi activat, accelerarea fenomenului de difuzie în stare solidă etc.

Se presupune că totalitatea acestor fenomene se datorează faptului că undele ultrasunore create în material o stare complexă de tensiuni (în domeniul transverale) care con-

duce la activarea dislocațiilor și la migrarea acestora în cristale.

Fenomenul de înmuiere acustică a materialelor metalice sub acțiunea unui cimp de unde ultrasonore se manifestă prin reducerea tensiunii statice necesare deformării plastice a metalului.

Din cercetările întreprinse de Blana și Langenker [12] asupra monocristalelor de Zn supus la tracțiune, cu și fără activare ultrasonică, rezultă clar (fig.2.2.1) scăderea pronunțată a tensiunii în prezența undelor ultrasonore.

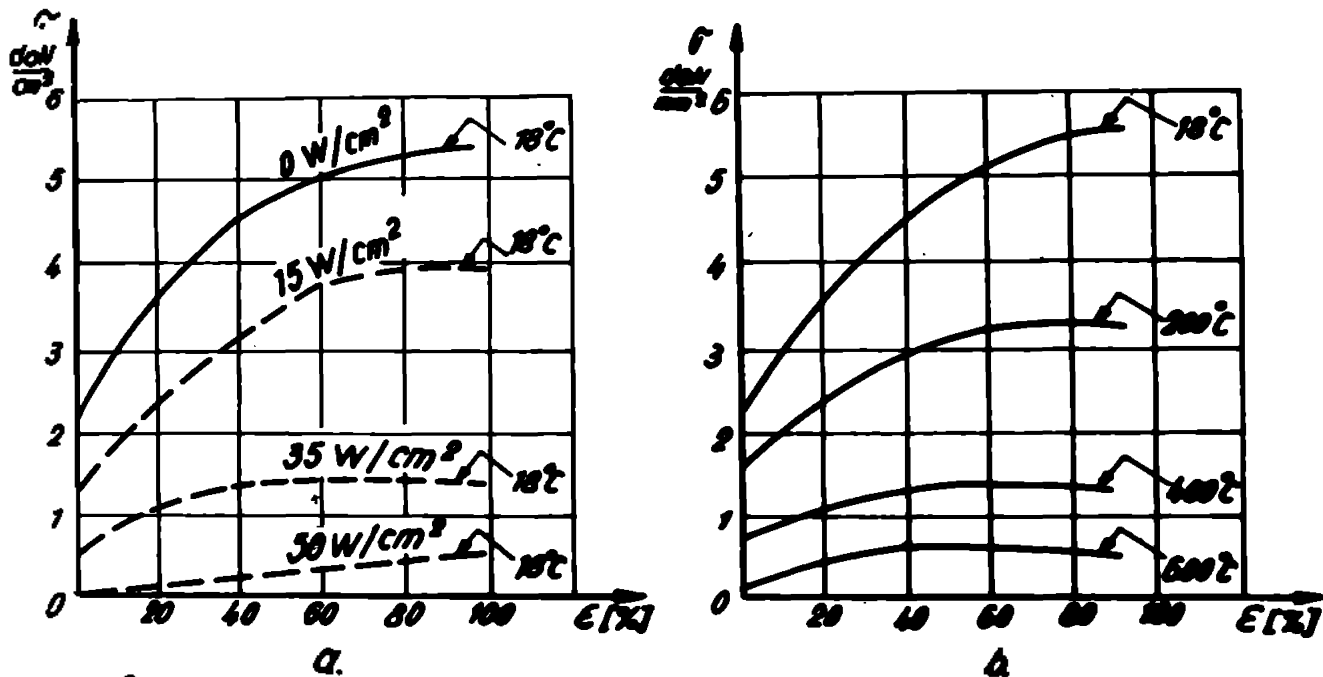


Influența ultrasunetelor asupra tensiunii statice la încercarea la tracțiune a monocristalelor de zinc [B₃].

Fig.2.2.1. Influența undelor ultrasonore asupra tensiunii statice la încercarea la tracțiune a monocristalelor de Zn
a - aplicarea u.u.s. în impulsuri
b - aplicarea continuă a u.u.s.

Același fenomen, de înmuiere acustică, se poate observa și în cazul aluminiului [4] și aluziului, a monocristalelor de aluminiu supuse la tracțiune în prezența undelor ultrasonore. Cercetările experimentale întreprinse demonstrează că la intensități ale energiei acustice în jur de $0,5 \text{ kJ/cm}^2$ (la o frecvență de 20 kHz) și la temperatura mediului ambiant ($\approx 20^\circ\text{C}$) curba caracteristică tensiune - deformare tinde spre o

valeare minimă a tensiunii, practic spre zero (Fig.2.2.2)



Comportarea aluminiului: a. - la diferite densități de energie acustică; b. - fără ultrasunete dar la diferite temperaturi.

Fig.2.2.2. Curbe caracteristică tensiune - deformare
a - activare cu unde ultrasunore
b - activare termică

Analizând comparativ curbele caracteristice în cazul activării cu unde ultrasunore și aceleași curbe în cazul activării termice a procesului, se observă că efectul produs de cele două moduri de activare este același din punct de vedere calitativ. Din punct de vedere cantitativ însă, se observă o diferență însemnată în ceea ce privește cantitatea de energie necesară; astfel, pentru reducerea la valearea minimă a tensiunii de deformare a monocristalului de aluminiu sînt necesare energii ultrasunore în jurul valorii de $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ J}$, pe cînd același efect se obține consumînd o energie termică de aproximativ $1,6 \cdot 10^3 \text{ J}$.

Această diferență a energiilor necesare activării procesului de deformare în cazul aluminiului se atribuie absorbției preferențiale a undelor ultrasunore de către unele zone de material, în care se realizează deformarea plastică a acestuia, limitate dintre grăunții cristalini și dislocații, în timp ce energia termică se repartizează uniform în toată masa metalică [69]. Se presupune că repartizarea preferențială (absorbția preferențială) a undelor ultrasunore pe defect

le rețelei cristaline și la limita dintre grăunții cristalini se datorează modului de amortizare a undelor sonore în materialele metalice [12]. Principalele mecanisme ce caracterizează modul în care se realizează amortizarea oscilațiilor se referă la transformarea energiei termoelastice în defectele rețelei cristaline (defecte punctiforme, de suprafață sau liniare ca dislocații marginale și elicoidale) asociate cu fenomenele de relaxare, rezonanță și hysteresis.

2.2.1. Amortizarea oscilațiilor ultrasonore prin efecte termoelastice

Efectul termoelastic se manifestă în materialele metalice prin aceea că atunci când acesta este supus unei anume serii de tensiune, deformațiile rezultate sînt în general însoțite de modificări de temperatură. Efortul de compresie provoacă o creștere a temperaturii, pe cînd cel de întindere o scade.

În cazul în care tensiunea aplicată, deci și deformația materialului este omogenă, variația temperaturii va fi și ea omogenă. Dacă tensiunea aplicată epruvetei nu este uniformă, va apărea un gradient de temperatură. În cazul în care tensiunea neuniformă variază periodic cu timpul, în material va apărea un gradient variabil de temperatură [46].

Dacă variația stării de tensiune are loc cu o frecvență foarte ridicată, astfel încît transferul de căldură prin conducție să nu poată fi efectuat pe durata unui ciclu de variație a tensiunii, procesul este adiabatic. În condițiile unui proces adiabatic nu are loc niciun schimb de energie, deci nu apare nici fenomenul de amortizare sau frecare internă.

În cazul în care într-un solid se propagă unde ultrasonore longitudinale, gradientul de temperatură se va afla între zonele din material supuse la compresie și întindere. Se creează astfel un flux de căldură, însoțit de producerea entropiei și disiparea energiei, ce are ca efect o atenuare a amplitudinii undei ultrasonore [1], atenuare care este dependentă de frecvența undei și de tensiunile aplicate.

În cazul în care într-un material metalic se propagă o undă ultrasonora, este posibil să apară o deformare e-

lastică cu componentă longitudinală, în material la naștere un gradient de temperatură.

Datorită frecvenței ridicate a undei ultrasonore modulul de elasticitate M_{ad} rezultat al expansiunii termice datorate gradientului de temperatură va fi diferit de modulul de elasticitate rezultat dintr-o deformare izotermă M_T . Dacă notăm cu l spațiul prin care are loc transferul de căldură (în cazul solicitării periodice $l = \lambda$ - lungimea de undă) diferențele temperaturii termoelastice se atenuază după un timp t determinat cu ajutorul relației 2.2.1 [4]:

$$t = \frac{D}{v^2} = \frac{\gamma}{\rho C_p v^2} \quad (2.2.1)$$

în care :

D - coeficient de difuzie termică

γ - conductivitatea termică

v - viteza fazei $v = \frac{\omega}{k}$

ρ - densitatea

C_p - căldura specifică la presiune constantă

După scurgerea timpului de relaxare t deformarea este determinată de valoarea modulului de elasticitate izoterm M_T . Se poate scrie deci :

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{M_{ad} - M_T}{M_T} \quad (2.2.2)$$

Considerăm un corp în care se propagă o undă acustică de joasă frecvență, a cărui dimensiuni pe direcțiile y și z sînt mici în comparație cu lungimea de undă. În acest caz tensiunea datorită undei pe direcția x va fi σ_x , iar deformările laterale pe direcțiile y și z vor fi ϵ_y și ϵ_z . În cazul materialelor izotrope dependența dintre incrementele deformării, tensiunii și temperaturii este prezentată în relațiile 2.2.3 și 2.2.4

$$d\epsilon_x = \frac{d\sigma_x}{E_T} + \beta \cdot dT \quad (2.2.3)$$

$$d\epsilon_y = d\epsilon_z = -\mu \frac{d\sigma_x}{E_T} + \beta dT \quad (2.2.4)$$

relații în care :

E_T - modulul Young pentru deformările în regim izoterm

μ - coeficientul lui Poisson.

β - coeficient de expansiune termică

Lucrul mecanic consumat pentru efectuarea deformației poate fi scris ca

$$dL = \sigma_x d\varepsilon_x \quad (2.2.5)$$

deoarece deformațiile suferite pe direcțiile y și z nu produc lucru mecanic, tensiunile fiind nule pe aceste direcții. Corelând expresia lucrului mecanic cu legile I și II ale termodinamicii se poate scrie :

$$\rho \cdot \frac{c_\sigma}{T} dT = \left(\frac{\rho \cdot \varepsilon_x}{\rho T} \right) \cdot d\sigma_x = \beta \cdot d\sigma_x \quad (2.2.6)$$

în care c_σ are semnificația de căldură specifică la tensiune constantă, iar în cazul tensiunilor mici se poate aprecia că $c_\sigma = c_p$

din relațiile (2.2.3) și (2.2.6) rezultă :

$$d\varepsilon_x = \frac{d\sigma_x}{E_{ad}} \cdot \frac{1}{E_T} - \beta^2 \cdot \frac{T}{c_p} \cdot d\sigma_x \quad (2.2.7)$$

în care E_{ad} - este modulul lui Young pentru deformații în regim adiabatic.

Ținând seama de relațiile (2.2.3)...(2.2.7) obținem expresia variației specifice a modulului de elasticitate de forma :

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\beta^2 E_T}{\rho \cdot c_p} \cdot T \quad (2.2.8)$$

Expresiile prezentate sînt valabile în cazul materialelor izotrope dacă pentru β și E se aleg valorile corespunzătoare direcției de propagare a undei.

Dacă însă dimensiunile pe direcțiile y și z ale corpului prin care se propagă o undă pe direcția x sînt mari în comparație cu lungimea de undă de joasă frecvență, deplasările și accelerațiile pe direcțiile y și z vor trebui să fie mai mari cîtor dacă valorile ε_x și ε_z sînt mici. Din această cauză putem presupune că nu apare o contracție laterală evidentă și deci, componentele deformației ε_y și ε_z tind spre valoarea nulă. Pentru ca corpul să fie în echilibru trebuie ca dilatarea termică să fie compensată de o deformație elastică; se poate scrie deci :

$$d\varepsilon'_y = d\varepsilon'_z = -\beta T \quad (2.2.9)$$

și

$$d\varepsilon_x = d\varepsilon'_x + \beta T \quad (2.2.10)$$

Utilizând ecuațiile generale care exprimă tensiunile în funcție de deformațiile specifice și constanta lui Lamé putem scrie :

$$\sigma_x = (\lambda + 2\mu)\varepsilon_x + \lambda(\varepsilon_y + \varepsilon_z) \quad (2.2.11)$$

și

$$\lambda = \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \quad (2.2.12)$$

în cazul nostru putem scrie :

$$\sigma_x = \frac{E_T(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \cdot \varepsilon'_x + \frac{E_T \cdot \mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} (\varepsilon'_y + \varepsilon'_z) \quad (2.2.13)$$

$$\sigma_y = \frac{E_T(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \varepsilon'_y + \frac{E_T \cdot \mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} (\varepsilon'_z - \varepsilon'_x) \quad (2.2.14)$$

$$\sigma_z = \frac{E_T(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \varepsilon'_z + \frac{E_T \cdot \mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} (\varepsilon'_y - \varepsilon'_x) \quad (2.2.15)$$

și utilizând relațiile prezentate :

$$d\varepsilon_x = \frac{1}{E_T} d\sigma_x + \beta' dT \quad (2.2.16)$$

relație similară cu ecuația (2.2.2), cu excepția constantelor $\frac{1}{E_T}$ și β' care au însă aceeași semnificație ca $\frac{1}{E}$ și β și reprezintă valoarea efectivă a acestora.

În cazul materialelor metalice, policristaline, deci anizotrope, e necesar a se determina valoarea efectivă a constantelor E_T și β' pentru fiecare direcție în parte.

Având în vedere faptul că și în acest caz lucrul mecanic consumat pentru efectuarea deformației se poate scrie conform relației (2.2.5), deoarece componentele deformației ε_y și ε_z conform ipotezei sînt nule, expresiile (2.2.6) și (2.2.8) își păstrează valabilitatea, obținem :

$$\frac{\Delta W}{V} = \frac{1+\mu}{(1-\mu)(1-2\mu)} \cdot \frac{\beta^2 \cdot \sigma_m^2}{9 \cdot \sigma_p} T \quad (2.2.17)$$

În cazul aluminiului, care cristalizează în sistem cubic cu fețe centrate, tensiunea care se produce în direcția $[100]$ scrie sub formă matricială următoarea formă :

$$\sigma_{11} = c_{11}\varepsilon'_{11} + c_{12}\varepsilon'_{22} + c_{13}\varepsilon'_{33} \quad (2.2.18)$$

în care :

c_{11} , c_{12} , c_{13} - sînt moduli elastici pe direcțiile indicate, determinați din matricea tensorului modulelor elastice pentru materialul dat.

$\sigma_{11} = \sigma_x$ - scris sub formă matricială a tensorului tensiune.

Adunînd mai departe forma de scriere matricială a tensorilor tensiune, deplasare și moduli elastici, deformația pe direcția x poate fi scrisă sub forma :

$$d\varepsilon_{11} = \frac{1}{c_{11}} d\sigma_{11} + \frac{c_{11} + 2c_{12}}{c_{11}} \cdot \beta dT \quad (2.2.19)$$

În cazul aluminiului se dau pentru constantele c_{11} și c_{12} următoarele valori [4] :

$$c_{11} = 1,082 \cdot 10^5 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$c_{12} = 0,613 \cdot 10^5 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

cu ajutorul cărora se poate determina valoarea constantelor K_T' și β' prin analogia expresiilor (2.2.18) și (2.2.16).

Astfel obținem :

$$K_T' = c_{11} \quad (2.2.20)$$

și

$$\beta' = \frac{c_{11} + c_{12}}{c_{11}} \cdot \beta \quad (2.2.21)$$

care valori înlocuite în ecuația (2.2.17) și ținînd seama de constantele de material [87] în cazul aluminiului obținem valoarea raportului :

$$\frac{\Delta M}{M} = 0,053$$

Expresia care determină dependența dintre efectul de atenuare a undei acustice în material și frecvența acesteia este de forma [4] :

$$\alpha' \approx \frac{1}{2t} \cdot \frac{\Delta M}{M} \cdot \frac{\omega^2 t^2}{1 + \omega^2 t^2} \quad (2.2.22)$$

Analizînd această expresie rezultă că ^{la} frecvențe joase, deci în cazul în care $\omega^2 t^2 \ll 1$, coeficientul de amortizare a undei variază în funcție de pătratul vitezei (ω^2), iar în cazul frecvențelor înalte, cînd produsul $\omega^2 t^2 \gg 1$, coeficientul de amortizare devine dependent de frecvență.

În cazul materialelor metalice cu o conductivitate

termică ridicată, timpul de relaxare t este de ordinul a 10^{-11} secunde. Înlocuind această valoare în expresia (2.2.22) și făcând calculele, obținem pentru coeficientul de amortizare, în cazul aluminiului relația :

$$\alpha' = \frac{\Delta M}{k} \cdot t \cdot \frac{\omega^2}{2} \quad (2.2.23)$$

care, dacă ținem seama de expresiile (2.2.1) și (2.2.9) devine :

$$\alpha' = \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{\beta^2 \cdot \delta}{\rho \cdot \rho} \cdot T \quad (2.2.24)$$

în cazul aluminiului, făcând înlocuirile corespunzătoare, se obține pentru direcția [100], deci în cazul unei folii o valoare a coeficientului de atenuare :

$$\alpha' = 0,135 \text{ [dB/s]}$$

Din cele prezentate rezultă că teoretic este posibil ca în materialele metalice să apară fenomenul de relaxare datorat curenților termici macroscopiei, zona de frecvențe însă la care ar apărea un maxim se situează în jurul valorilor de $10^{10} - 10^{11}$ Hz [46], domeniu situat mult peste domeniul de frecvențe a experimentarilor $\approx 2 \cdot 10^4$ Hz.

2.2.2. Amortizarea undelor ultrasonore în materialele metalice datorită fenomenelor de activare, formare și mișcare a dislocațiilor provocate de deformarea plastică în câmp ultrasonor

Se știe că dislocațiile sînt defecte lineare; ele se pot considera a fi regiuni de perturbări localizate ale rețelei cristaline care separă zonele dintre-un cristal în care s-a produs alunecarea de zonele în care alunecarea nu a avut încă loc. Deformarea plastică a materialelor policristaline are ca mecanism principal procesul de activare și deplasare a dislocațiilor în material. De asemenea, procesul de amortizare a oscilațiilor ultrasonore în metale, respectiv fenomenul de frecare internă este puternic influențat de existența și activarea dislocațiilor. Dislocațiile pot fi activate nu numai de eforturi statice aplicate, ci și sub influența tensiunilor alternante periodice. J. J. Koehler [66] a sugerat pentru prima dată ideea că un segment de dislocație poate să vibreze sub

influența unui câmp de tensiuni alternative și să se comporte într-un mod asemănător cu o coardă vibrantă. Pe baza lucrărilor lui J.S.Kochler, A.Granato și K.Mücke [1, 66] s-a elaborat o teorie pentru explicarea fenomenului de amortizare aducând îmbunătățiri importante în privința detaliilor fizice și analitice ale problemei.

Se consideră, un segment de dislocație de lungime L , ancorat la capete în noduri sau impuritățile rețelei cristaline, care mai posedă o serie de puncte de ancorare la o distanță medie l prin forțe de tip Cottrell (fig.2.2.3)

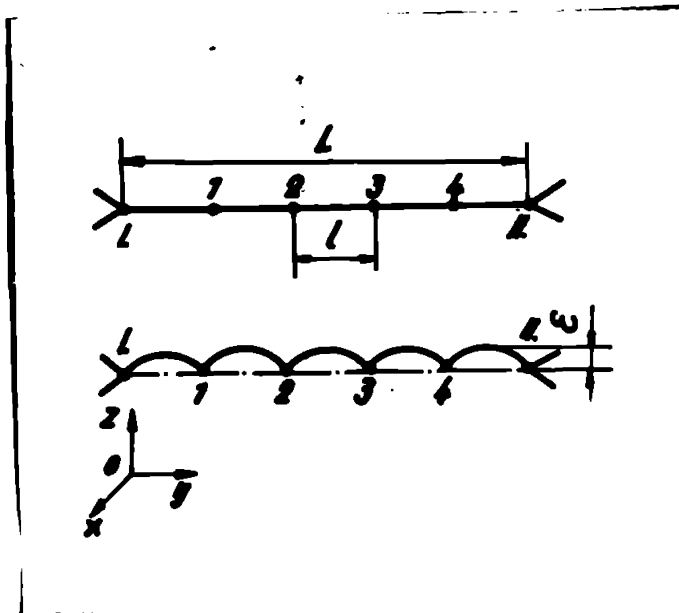


Fig.2.2.3. Model de dislocație vibrantă ancorată

Sub acțiunea unor forțe periodice, datorate unor unde acustice ce se propagă pe direcția Ox, segmentele de dislocație de lungime l oscilează analog cu coardele elastice. Dislocațiile nu se desprind din punctele de ancorare 1...4 și în orice timp este deplăsită linia oscilației astăzi.

Dacă aplicăm segmentului de dislocație de lungime l ecuația de mișcare în analogia corzilor la care se mai adaugă forța de rezistență oviviscosă [1] a deplasării dislocației în cristal, și adoptând notațiile din figura 2.2.3, putem scrie :

$$A \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = W_0 \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} - \frac{\partial W(z)}{\partial z} + \sigma_0 - B \frac{\partial z}{\partial t} \quad (2.2.25)$$

în care :

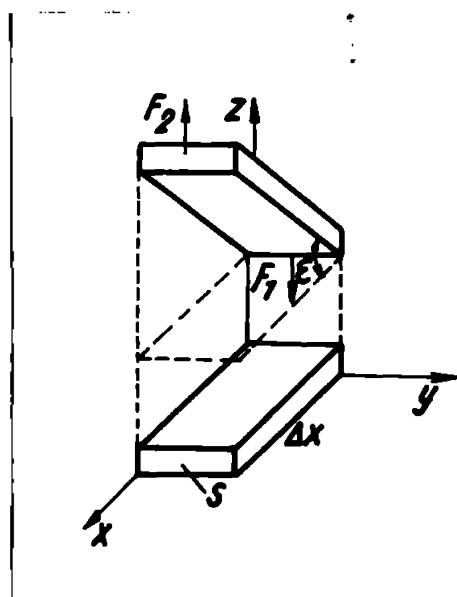
- A; B - constante
- b - vectorul Burgers
- t - timp
- $W(z)$ - energia Peierls
- σ_0 - tensiunea aplicată
- W_0 - constantă

dacă pentru simetrie notăm $W_0 = G$ și considerăm ca forța

Pieris este nulă (dislocații oblice), ecuația (2.2.25) se poate scrie sub forma :

$$A \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + B \frac{\partial z}{\partial t} - C \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = b \cdot \sigma \quad (2.2.26)$$

Ecuația (2.2.26) conține încă două necunoscute z și σ . Pentru stabilirea a încă unei ecuații, considerăm o porțiune din cristal ^{care} se propagă undă ultrasonoră transversală (fig.2.2.4), care produce deformații de forfecare. Prin propagarea undei în direcția Ox porțiunea din cristal aflată inițial în planul xOy se deplasează sub acțiunea forțelor F_1



și F_2

Se poate scrie ca :

$$\begin{aligned} F_2 - F_1 &= F(x + \Delta x) - F(x) = \\ &= \Delta x \frac{\partial F}{\partial x} + \dots = \Delta x \Delta S \frac{\partial \sigma}{\partial x} \end{aligned} \quad (2.2.27)$$

Rezultanta forțelor F_1 și F_2 produce o deplasare accelerată a porțiunii de cristal, deci putem scrie că :

$$F_2 - F_1 = \Delta m \cdot a = \rho \cdot \Delta x \Delta S \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} \quad (2.2.28)$$

Fig.2.2.4. Deplasarea unei zone din cristal datorită parcurgerii acesteia de o undă ultrasonoră transversală

și egalând ecuațiile (2.2.27) cu (2.2.28) obținem :

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} \quad (2.2.29)$$

Pentru cazul nostru, deformația de forfecare se poate scrie că este :

$$\epsilon = \frac{\partial z}{\partial x} \quad (2.2.30)$$

dar prin derivarea ecuației (2.2.30) în raport cu x și introducerea acesteia în expresia (2.2.29) obținem :

$$\frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \rho \frac{\partial}{\partial t^2} \cdot \frac{\partial z}{\partial x} \quad (2.2.31)$$

care mai poate fi scrisă și sub forma :

$$\frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial t^2} \quad (2.2.32)$$

Dar deformația totală ε are două componente : o componentă elastică ε_{e1} și o componentă anelastică provenită din mișcarea dislocațiilor ε_d . Se poate scrie deci că :

$$\varepsilon = \varepsilon_{e1} + \varepsilon_d \quad (2.2.33)$$

Deformația elastică se supune legii lui Hooke :

$$\varepsilon_{e1} = \frac{\sigma}{G} \quad (2.2.34)$$

în care G este modulul de frecare, iar deformația anelastică este dată de expresia [1] :

$$\varepsilon_d = \frac{\Lambda b}{l} \int_0^l z(y) dy \quad (2.2.35)$$

în care :

l este lungimea totală a dislocațiilor mobile într-o celulă elementară cubică cu fețe centrate.

Înlocuind expresiile (2.2.35); (2.2.34); (2.2.33) în (2.2.32) rezultă ecuația :

$$\frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} = \frac{\rho}{G} \cdot \frac{\partial^2 \sigma}{\partial t^2} + \frac{\Lambda b \cdot \rho}{l} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} \int_0^l z dy \quad (2.2.36)$$

care împreună cu relația (2.2.26) formează un sistem (2.237) cu ajutorul căruia pentru un caz dat se poate determina valoarea lui z și σ .

$$A \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + B \frac{\partial z}{\partial t} - C \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = b \cdot \sigma \quad (2.2.37)$$

$$\frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} - \frac{\rho}{G} \cdot \frac{\partial^2 \sigma}{\partial t^2} = \frac{\Lambda b \cdot \rho}{l} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} \int_0^l z \cdot dy$$

Granato și Lüke [48] dau un sens fizic constantelor A , B și C din expresia (2.2.26) și adăugă pentru acestea următoarele valori :

A - masa efectivă pe unitatea de lungime

$$A = \pi \cdot \rho \cdot b^2 \quad (2.2.38)$$

B - forța de amortizare pe unitatea de lungime a dislocației și pe unitatea de viteză

și C - tensiunea efectivă într-o dislocație curbata.

$$C = \frac{2 G \cdot b^2}{\pi (1-\mu)} \quad (2.2.39)$$

în care : μ - coeficientul lui Poisson.

Pentru exprimarea constantei B, nu există încă o teorie unanim acceptată, iar determinarea experimentală a acesteia este foarte dificilă. Se poate însă utiliza cu o aproximație acceptabilă relația propusă de G. Leibfried [73]:

$$B = \frac{3}{10} \cdot \frac{k \cdot Z \cdot T}{C \cdot a^2} \quad (2.2.40)$$

în care :

- k - constanta lui Boltzmann
- Z - numărul de atomi într-o celulă elementară
- T - temperatura
- C - viteza undei transversale
- a - parametrul rețelei cristaline

În cazul aluminiului valorile determinate pentru constantele A și B au valorile [4] :

$$A = 6,7 \cdot 10^{-15} \text{ [dN/m]}$$

$$B = 5 \cdot 10^{-5} \text{ [s/m}^2\text{]}$$

Rezultă că în materialele metalice apare un efect de amortizare a vibrațiilor sau frecare internă determinată de prezența dislocațiilor și care este dependentă de amplitudine.

O sursă importantă a amortizării sau frecării interne în materialele metalice o constituie fenomenul de relaxare a tensiunilor de-a lungul limitelor de separație dintre grăunți.

Studiile efectuate [46, 47, 142] au ajuns la concluzia că în cazul materialelor metalice, în special cele cu cristalizare în sistemul cubic cu fețe centrate, apar maxime ale fenomenului de frecare internă la temperaturi care variază în limitele (0,3...0,5) din temperatura de topire. În ceea ce privește cantitativ, amplitudinea acestor maxime crește odată cu mărirea gradului de deformare plastică, ajungând la saturație pentru un grad de deformare plastică în jurul a 2...3. Apariția maximeilor de frecare internă sînt determinate de un proces de activare termică, conform unei relații de tip Arrhenius, de forma :

$$\sigma_{\text{max}}^{-1} = \sigma_0^{-1} \cdot e^{-\frac{K}{T}} \quad (2.2.41)$$

Analizînd relația (2.2.41) rezultă că apariția maximeilor de frecare internă se poate explica utilizînd teoria dislocațiilor.

S-au efectuat cercetări experimentale [46], care evi-

dențiază apariția maximului de frecare internă în cazul aluminului policristalin în jurul temperaturii de 573°K (fig. 2.2.5)

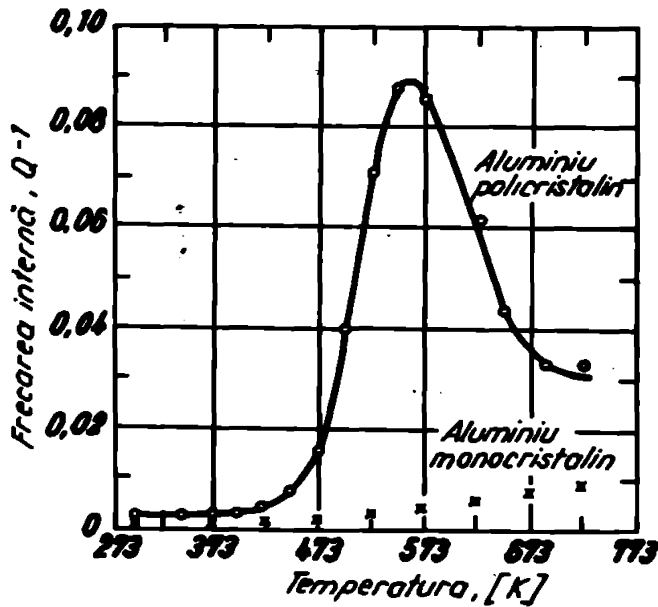


Fig.2.2.5. Variația coeficientului frecării interne Q^{-1} cu temperatura

viscoase a zonelor marginale ale gr. unșilor cristalini. La temperatură ambiantă fenomenul de frecare internă nu apare sau se manifestă în mică măsură, deoarece timpul de relaxare este mare în raport cu perioada de oscilație; în acest caz, tensiunile și deformațiile sînt în fază. La temperaturi mai înalte, timpul de relaxare este foarte mic în comparație cu perioada de oscilație, deci fenomenul de relaxare se manifestă intens.

Pe de altă parte, se presupune că apariția maximului de frecare internă se datorează și creșterii de către dislocațiile în mișcare a unor defecte punctiforme în mase metalice. Frecarea internă fiind proporțională cu concentrația defectelor, iar activarea termică jucînd un rol însemnat în procesul de generare a defectelor, apare evidentă dependența lui Q^{-1} de temperatură (relația 2.2.41).

Totodată, la amplitudini ale vibrațiilor ultrasunore suficient de mari, porțiunea de dislocație între două noduri sau trepte, poate deveni o sursă Frank-Read de noi dislocații

Q^{-1} fiind coeficientul cantitativ al frecării interne definit prin raportul $1/\alpha$, α fiind unghiul de decalaj între tensiunea aplicată și deformația suportată de material.

Se consideră că apariția maximului de frecare internă în jurul temperaturii de (0,5...0,5) din temperatură de topire se datorește comportării evazi-

Conform teoriei lui A. Seeger [122] pentru deplasarea unei linii de dislocație de-a lungul unei direcții de densitate atomică maximă, în absența activării termice, aceasta trebuie să fie supusă unei tensiuni tangențiale cel puțin egale cu tensiunea Peierls. Frecvența la care apar inflexiunile dislocației, deci are loc o disipare maximă a energiei de oscilație ultrasonată pe dislocație este dată de o ecuație de tip Arrhenius (2.2.42).

$$f_0 = f_p \cdot e^{-\frac{E}{kT}} \quad (2.2.42)$$

în care :

E - energia necesară formării unei perechi de inflexiuni

f_p - frecvența de oscilație a dislocației într-un potențial Peierls, exprimate prin relația :

$$f_p = \frac{1}{2\pi \cdot a} \sqrt{\frac{2\tau_p}{\rho}} \quad (2.2.43)$$

în care :

τ_p - tensiunea Peierls

a - distanța interatomică pentru materialul considerat

ρ - densitatea materialului

Pe energia necesară formării unei perechi de inflexiuni poate fi determinată de relația :

$$E = \frac{4g}{\pi} \sqrt{\frac{2E_0 \cdot a \cdot b}{\pi}} \cdot \tau_p \quad (2.2.44)$$

în care :

E_0 - este energia pe unitatea de lungime a deformației

b - vectorul Burgers

2.2.3. Activarea proceselor de difuzie și transfer de masă

La contactul inciziv, între doi sae și multe fașe, are loc un transfer de masă între acestea. Transferul va avea loc mult timp, până la atingerea echilibrului termodinamic în sistemul respectiv, adică până când potențialul chimic al fiecărui element este egal în toate fazele [91].

Mecanismul transferului de masă într-un sistem este asigurat pe două căi și anume :

- difuzia - o mișcare pur atomică, moleculară sau ionică, ce apare atunci când în sistem există un gradient de potențial chimic ;

- transferul de masă - o consecință a procesului de difuzie și a mișcării convective în sistem.

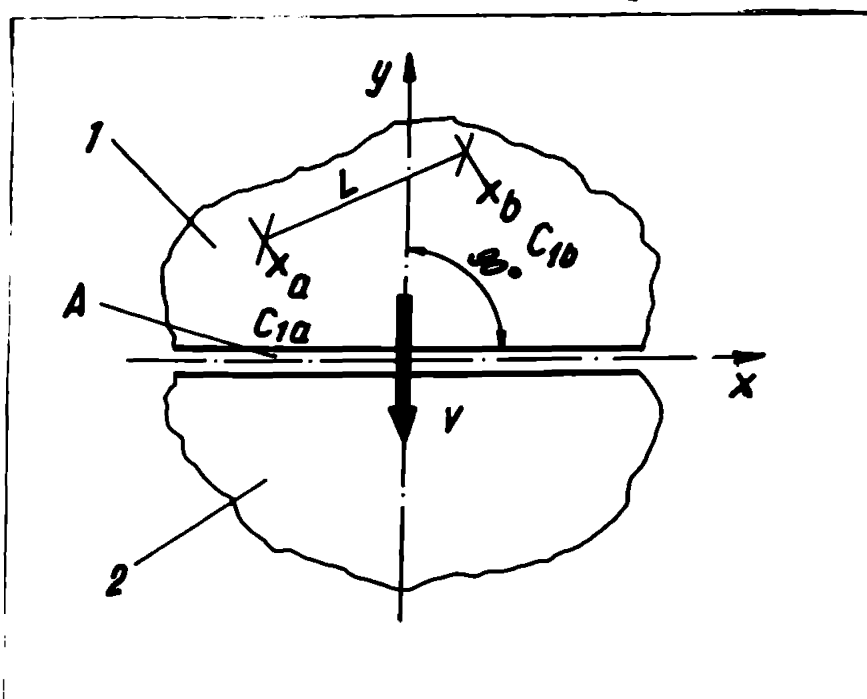
Va trebui deci să se determine fluxurile de substanță și viteza de transfer de masă, funcție de concentrație, potențial chimic, presiune, în prezența undelor ultrasonore.

Se știe că în amestecurile neomogene ale speciilor chimice există tendința de mișcare a moleculelor de la zonele cu concentrații ridicate spre zonele de concentrații mai scăzute pînă cînd amestecul devine omogen.

Cantitatea de substanță difuzată pe unitatea de suprafață și unitatea de timp, se numește flux de masă.

Conform legii a I-a a lui Fick, cantitatea de substanță difuzată în unitatea de timp, prin unitatea de suprafață normală la direcția de difuzie este proporțională cu gradientul de concentrație.

Viteza de difuzie v_y (fig.2.2.6) între cele două



componente 1 și 2 se poate determina cu relația (2.2.45)

Fig.2.2.6. Principiul difuziei între două specii omogene

$$v_y = \Gamma_{1-2} \cdot A \cdot \frac{c_{1a} - c_{1b}}{L} \quad (2.2.45)$$

în care :

D_{1-2} - este coeficientul de difuzie sau difuzibilitatea speciei a în b

A - suprafața de difuzie, perpendiculară pe v_y

c_{1a} ; c_{1b} - concentrațiile speciei 1 în punctele a și b

L - distanța între punctele a și b

În cazul în care concentrațiile c_{1a} și c_{1b} se exprimă în moli, fluxul molar J al procesului de difuzie se poate exprima cu relația :

$$J_A = D_{1-2} \cdot \frac{c_{1a} - c_{1b}}{L} \quad (2.2.46)$$

Generalizând ecuația (2.2.46) rezultă :

$$J_{1y} = -D_{1-2} \cdot \frac{\partial c_1}{\partial y} dt \quad (2.2.47)$$

în care :

J_{1y} - este fluxul molar după direcția y

$\frac{\partial c_1}{\partial y}$ - este gradientul concentrației pe direcția y

În cazul în care difuzia se produce după trei direcții perpendiculare, deci în spațiu, fluxul molar poate fi scris în forma :

$$J_A = -D_{1-2} \left(\frac{\partial c_1}{\partial x} + \frac{\partial c_1}{\partial y} + \frac{\partial c_1}{\partial z} \right) \quad (2.2.47)$$

se scrie sub formă vectorială

$$J_A = -D_{1-2} \nabla c_1 \quad (2.2.48)$$

În cazul sudării prin presiune în câmp ultrasonor a două piese metalice, procesul de difuzie are loc prin suprafața de separație A dintre cele două componente 1 și 2.

Procesul de difuzie este influențat și de temperatura celor două componente la suprafața de separație dintre ele.

Generalizând problema și considerând două piese de dimensiuni semnifcative, situația se prezintă conform figurii 2.2.7, în care :

A - suprafața de separație dintre cele două piese 1 și 2

c_1 ; c_2 - concentrațiile corespunzătoare pieselor 1 și 2

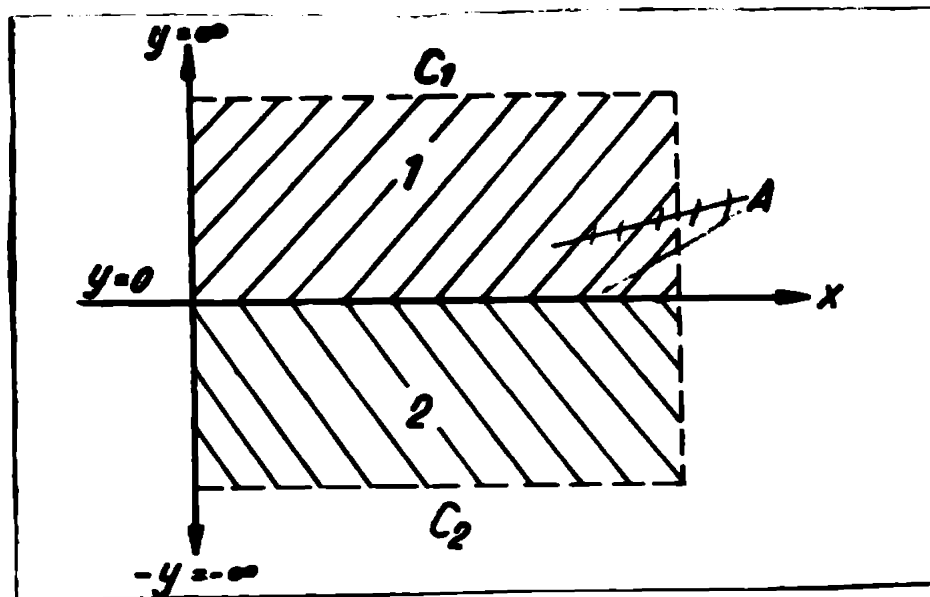


Fig.2.2.7. Difuzia între două faze

Conform legii de repartiție a lui Nernst [91]

$$K = \frac{(c_2)_e}{(c_1)_e} \quad (2.2.49)$$

în care K reprezintă coeficientul de repartiție, iar

$(c_1)_e$ și $(c_2)_e$ - concentrațiile de echilibru ale unui element în cele două faze

În cazul sudării a două faze de aceeași compoziție chimică :

$$(c_1)_e = (c_2)_e \quad (2.2.50)$$

iar

$$K = 1$$

Conform legii a doua a lui Fick poate fi scrisă și variația concentrațiilor în cele două piese 1 și 2 sub forma :

$$\text{- pentru piesa 1 : } \frac{\partial c_1}{\partial t} = D_{1-1} \frac{\partial^2 c_1}{\partial y^2} \quad (0 < y < +\infty) \quad (2.2.51)$$

$$\text{- pentru piesa 2 : } \frac{\partial c_2}{\partial t} = D_{2-2} \frac{\partial^2 c_2}{\partial y^2} \quad (-\infty < y < 0) \quad (2.2.52)$$

La echilibru, atunci când viteza cu care un atom părăsește o fază (corpul 1) este egală cu viteza cu care acesta pătrunde în altă fază (corpul 2) și impunându-se condiția $c_1 = c_2$ și $t > 0$, se poate scrie și astfel :

$$\frac{(c_2)_e}{(c_1)_e} = K$$

pentru $y = 0$

$t > 0$

$$D_{1-1} \frac{\partial c_1}{\partial y} = D_{1-2} \frac{\partial c_2}{\partial y} \quad (2.2.53)$$

in care $(c_1)_e$ și $(c_2)_e$ reprezintă concentrațiile de echilibru ale unui element în cele două faze

Rezolvînd sistemul prin funcțiile de erori în condiții limită

$$c_1 = (c_1)_1 \quad c_2 = (c_2)_1 \quad \text{la } y = 0$$

$$c_1 = (c_1)_1 \quad \text{la } y = +\infty$$

$$c_2 = (c_2)_1 \quad \text{la } y = -\infty$$

rezultă :

$$c_1 = A_1 + B_1 \operatorname{erfc} \left(\frac{y}{2} \sqrt{D_{1-1} \cdot t} \right) \quad 0 < y < +\infty \quad (2.2.54)$$

$$c_2 = A_2 + B_2 \operatorname{erfc} \left(\frac{y}{2} \sqrt{D_{2-2} \cdot t} \right) \quad -\infty < y < 0$$

în care : A_1, B_1, A_2, B_2 sînt constante de integrare ce pot fi determinate din condițiile de limită și timpul t ;

iar $\operatorname{erfc}(y)$ reprezintă funcția complementară de erori. Această funcție este definită prin :

$$\operatorname{erf}(y) = \frac{2}{\pi} \int_0^y e^{-y^2} dy$$

ale cărei valori sînt date în tabelele normalizate [137].

Reprezentarea grafică a variației concentrației speciei difuzate în cele două faze, funcție de distanța "y" de la limita interfațială, adică de la limite de separare a celor două faze are expresia :

$$c_1 - \frac{(c_2)_1}{K} = \frac{(c_1)_1 - \frac{(c_2)_1}{K}}{1 + K \sqrt{\frac{D_{1-2}}{D_{1-1}}}} \left[1 + \sqrt{\frac{D_{1-2}}{D_{1-1}}} \operatorname{erfc} \left(\frac{y}{2 \sqrt{D_{1-1} \cdot t}} \right) \right] \quad (2.2.55)$$

și

$$c_2 - (c_2)_1 = \frac{D_1(c_1)_1 - (c_2)_1}{1 + K \sqrt{\frac{D_{1-2}}{D_{1-1}}}} \operatorname{erfc} \left(\frac{y}{2 \sqrt{D_{1-2} \cdot t}} \right) \quad (2.2.56)$$

La $y = 0$, fluxurile molare ale speciilor difuzate în cele două faze sînt egale, putem deci scrie :

$$J_{1-1} = J_{1-2} = - \frac{\partial c_1}{\partial y} D_{1-1} = \frac{\partial c_2}{\partial y} D_{1-2} \quad \text{la } y = 0$$

și deci

$$J_{1-1} = \sqrt{\frac{D_{1-1}}{t}} \left[(c_1)_1 - \frac{(c_2)_1}{K} \right] \frac{K \sqrt{\frac{D_{1-2}}{D_{1-1}}}}{1 + K \sqrt{\frac{D_{1-2}}{D_{1-1}}}} \quad (2.2.57)$$

Ecuația (2.2.57) reprezintă expresia matematică a fluxului de masă molar, ca urmare a difuziei la limita de separație dintre cele două piese ce urmează a se suda.

În cazul sudării prin presiune în câmp ultrasonor trebuie considerate și influențele vibrațiilor ultrasonore și a stării complexe de tensiune datorate forței statice de apăsare asupra fenomenului de difuzie. Ecuația, care pe baza teoriei potențialului chimic și a cineticii difuziei atomilor în cristale, descrie difuzia printr-un câmp de tensiuni, are forma [28]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial}{\partial y} c - \frac{c \cdot \gamma V}{RT} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \sigma_{ext} \right) \quad (2.2.58)$$

în care :

- c - concentrația speciei
- t - durata procesului de difuzie
- V - volumul atomic al speciei difuzate
- γ - coeficient ce caracterizează dependența rețelei soluției solide de conținutul atomilor dizolvați
- R - constanta universală a gazelor
- D - coeficientul de difuzie
- σ_{ext} - tensiunea produsă de forța statică de apăsare

Dacă considerăm că pe o parte a planului de separație la limita acestuia există un număr mai mare de atomi care difuzează decât în cealaltă parte, se poate scrie expresia fluxului de masă J sub forma :

$$J = -D \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right) - c \langle v_y \rangle F \quad (2.2.59)$$

expresie similară cu relația (2.2.48) în care :

$\langle v_y \rangle_F$ - este viteza de difuzie medie sub influența forței motoare

Din (2.2.58) și (2.2.59) rezultă că

$$\langle v_y \rangle_F = \frac{E \cdot \delta \cdot V}{RT} \Delta \sigma_{\text{ext}} \quad (2.2.60)$$

Iar dacă exprimăm viteza medie de difuzie în funcție de parametri acusticii al procesului de sudare, rezultă :

$$J = -D \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right) = c \cdot \frac{V \cdot D \cdot V}{RT} \cdot \sqrt{\frac{32 f^2 \rho \cdot I}{c}} \quad (2.2.61)$$

în care :

- I - este intensitatea undelor ultrasonore
- c - viteza sunetului în materialul considerat
- f - frecvența undelor ultrasonore
- densitatea materialului

Cercetările recente [137] arată că în cazul metalelor ce cristalizează în sistemele cubic cu volum centrat și cubic cu fețe centrate, fenomenul de difuzie și autodifuzie se datorește atât deplasării atomilor în rețeaua cristalină ca rezultat al deplasării vacanțelor, difuziei atomilor la limita de separare dintre grăunți, cât și fenomenelor de difuzie pe dislocațiile marginale existente în cele două componente. Toate aceste mecanisme sînt puternic influențate de activarea procesului prin aplicarea unei stări de tensiune complexe în zona de difuzie, datorită pe de o parte acțiunii undelor ultrasonore, iar pe de altă parte forței statice de apăsare.

Mecanismul de difuzie prin vacanțe (efect Kirkendall) este accelerat datorită fenomenului de frecare internă ce apare ca urmare a activării zonei de difuzie cu unde ultrasonore [63]. Astfel, dacă considerăm că v este coeficientul de difuzie corespunzător efectului Kirkendall, variația acestuia este influențată de variația concentrației vacanțelor Δn_v , conform relației :

$$\Delta D = D_v \cdot \Delta n_v \quad (2.2.62)$$

dar apariția defectelor de rețea de tipul vacanțelor este influențată de coeficientul cantitativ al frecării interne datorate undelor ultrasonore, conform relației :

$$\Delta n_v = \frac{\pi \cdot \eta \cdot A_m}{2 \pi \cdot \beta} \cdot Q^{-1} \quad (2.2.63)$$

in care :

- A_m - amplitudinea vibrației
- η - coeficient numeric; pentru metale $\eta = 4 \cdot 10^{-4}$
- n - numărul de perioade
- β - factor ce ține seama de nelinearitatea buclei de histereză

In timpul activării materialului metalic cu unde ultrasonore variația Δn_v a defectelor de rețea reprezintă o rezultată a procesului de formare de noi vacanțe " v^+ " și a procesului de scurgere a acestora " v^- ". Valorile lui v^+ și v^- se determină din relațiile [63]:

$$v^+ = \frac{d \cdot n_v}{dt} = \frac{\eta \cdot f \cdot \sigma}{\beta \cdot E} \cdot Q^{-1} \quad (2.2.64)$$

in care :

- f - frecvența undelor ultrasonore
- E - modulul de elasticitate
- σ - tensiunea datorată activării cu unde ultrasonore

și

$$v^- = - \frac{d \cdot n_v}{dt} = K_v \cdot I_v \cdot \Delta n_v \quad (2.2.65)$$

in care :

- K_v este un coeficient care depinde de caracterul și concentrația scurgerilor

din (2.2.62), (2.2.63), (2.2.64), (2.2.65) rezultă:

$$D = D_0 + \frac{\eta \cdot f \cdot \sigma}{2 \beta \cdot K_v \cdot E} \cdot Q^{-1} \quad (2.2.66)$$

expresie care reprezintă valoarea coeficientului de difuzie prin efect Kirkendall (prin vacanțe) în cazul activării procesului cu unde ultrasonore. Cercetările experimentale demonstrează [63] că pentru metale în intervalul de temperatură de 200...400°C raportul D/D_0 se află între limitele $D/D_0 = 1...10$.

Starea de tensiune și în special deformările rețelei cristaline influențează substanțial procesul de difuzie. Deformările elastice și plastice ce le suportă materialul în cazul sudării prin presiune în câmp ultrasonor influențează

Într-o mare măsură valoare coeficientului de difuzie. Accelera-
rea difuziei în condițiile existenței deformațiilor elastice și
plastice se constată mai ales pe planurile de alunecare și la
înălțimea grunțiilor, adică acolo unde scara de temperaturi are va-
loarea cea mai mare.

După Hart [53] calculul coeficientului de difuzie
asociativă pe dislocațiile marginale se poate efectua utili-
zând relația :

$$D_{Ad} = D \left(1 + N \cdot \frac{L_d}{b} \right) \quad (2.2.67)$$

unde :

D - este coeficientul de difuzie în stare nedeformată
în axă dislocației

D_d - este coeficientul de difuzie de-a lungul disloca-
ției

N - numărul de atomi aflați pe linia de dislocație

Cercetările experimentale efectuate demonstrează că
la temperaturi $T > 0,5 T_{top}$ și pentru un număr de linii de
dislocații repartizate haotic de ordinul a $10^7 \dots 10^9/cm^2$, va-
loarea expresiei

$$N \frac{L_d}{b} \ll 1 ,$$

Ca urmare, accelerarea procesului de difuzie nu se pea-
rtează prin difuzia atomilor de-a lungul liniilor de dislo-

cație. Difuzia pe dislocațiile marginale are însă în mod cert
o mare importanță la temperaturi relativ joase $T < 0,5 T_{top}$
când concentrația vacanțelor scade simțitor.

2.3. Efectul undelor ultrasonore asupra defectelor în stare lichidă

2.3.1. Studiul teoretic al posibilității pulverizării metal lichid sau cvasilichid sub acțiunea unor oscilații de înălțime transversale.

Deoarece fenomenele ce au loc într-un material lichid
sub acțiunea undelor ultrasonore sînt complexe, s-a recurs la
un model simplificat, care să reproducă situația reală cît mai
bine posibil. Pentru aceasta s-a ales un model hidrodinamic
(vezi 2.3.1), care se compune dintr-un corp elastic de cauciuc, cu
funcționarea utilă egală cu cea a materialului prin care se între-

duce apă în debit egal cu cantitatea de metal ajuns în fază ovalică sau lichidă, datorită fenomenului de frecare în unitatea de timp.

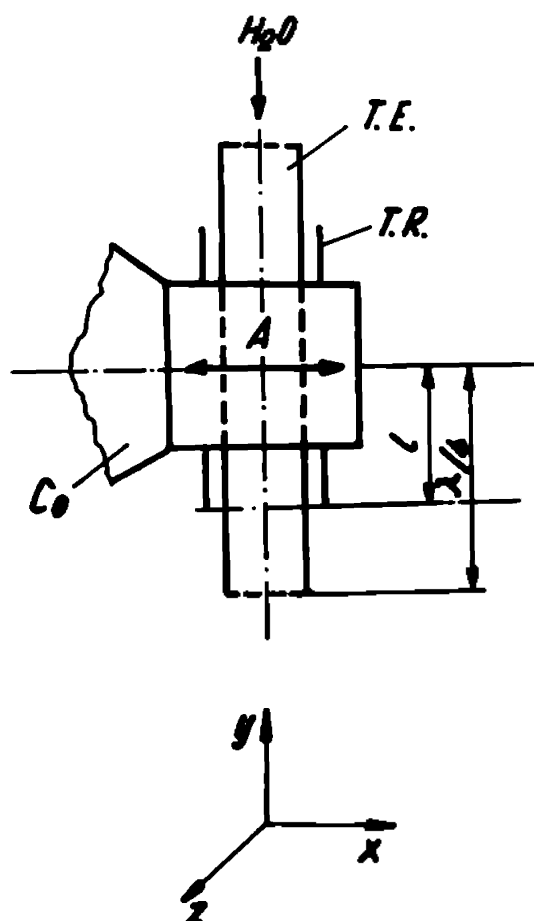


Fig.2.3.1. Model hidrodinamic cu oscilații ultrasonore transversale

T.E. - tub elastic din cauciuc

T.R. - tub rigid de metal

A - amplitudinea vibrației ultrasonore

- lungimea de undă a vibrației ultrasonore

Capul de oscilații transversale a blocului ultrasonoric se fixează la distanța de $\lambda/4$ de capătul tubului elastic. Tubul rigid de metal se reglează la lungimea l , în așa fel încât amplitudinea vibrației sale să fie egală cu amplitudinea de vibrație a sonotrodului.

Acest model hidrodinamic reproduce mișcarea particulelor de metal topit din zona de formare a îmbinării sudate sub acțiunea undelor ultrasonore cu mișcarea unei particule de apă în aer în aceleași condiții.

Analogia între cele două fenomene se realizează utilizându-se legea similitudinii, deci prin intermediul coeficienților de similitudine.

Dacă η_1 este viscozitatea cinematică și a_1 raza particulei de apă, v_{o1} viteza particulei de apă și v_o cea a particulei de metal, coeficienții de similitudine vor fi :

$$K_1 = \frac{\eta_1}{\eta_0} ; K_2 = \frac{a_1}{a} ; K_3 = \frac{m_1}{m} = -1 ; K_4 = \frac{v_{o1}}{v_o} \quad (2.3.1)$$

Pentru a putea formula o expresie matematică a fenomenului, se vor adapta în cele ce urmează unele ipoteze simplificatoare.

Forțele din sistemul vibrant provoacă în metalul topit o mișcare de translație, analogă cu mișcarea particulei de apă din modelul hidrodinamic.

Cu toate că asupra particulei de metal lichid acționează un sistem complex de forțe ca forțele de gravitație, termice, forță de frecare viscoasă etc, se consideră ca forța predominantă este dată de oscilația ultrasonoră, celelalte fiind neglijabile.

Se consideră că particula ce se formează din lichid este sferică și că la un moment dat este de dimensiuni constante, adică particula se consideră aproape rigidă.

Se convine ca mediul în care are loc mișcarea particulei este omogen izotrop și infinit, viscozitatea mediului este constantă, iar mediul este compresibil.

Aplicând modelului hidrodinamic ipotezele simplificatoare enunțate, mișcarea particulei se poate prezenta prin relația Stokes-Navier :

$$m_1 \frac{d^2 r}{dt^2} = 6 \pi a_1 \eta_1 v_r \quad (2.3.2)$$

relație în care :

m_1 este masa specifică a particulei

r - deplasarea

a_1 - raza particulei

η_1 - viscozitatea

v_r - viteza relativă dintre particulă și mediu

Generalizând ecuația într-un sistem de axe spațial

rezultă :

$$m_1 \frac{d^2 x}{dt^2} = 6 \pi \cdot a_1 \cdot \eta_1 \cdot v_{rx}$$

$$m_1 \frac{d^2 y}{dt^2} = 6 \pi \cdot a_1 \cdot \eta_1 \cdot v_{ry} \quad (2.3.3)$$

$$m_1 \frac{d^2 z}{dt^2} = 6 \tilde{\pi} \cdot a_1 \cdot \eta_1 \cdot v_{rz}$$

Expresia amplitudinii oscilației y_0 după axa y are forma [126]

$$y_0 = 718 \frac{1}{f} \sqrt{\frac{J}{\rho_1 c_g}} \quad (2.3.4)$$

in care :

f - frecvența oscilațiilor ultrasonore

J - intensitatea cîmpului ultrasonor

ρ_1 - densitatea mediului lichid din modelul
hidrodinamic

c_g - viteza de propagare a undelor în mediul gasec

Utilizînd expresiile (2.3.3) și (2.3.4) componente-
le vitezelor relative de-a lungul axelor Ox și Oz se pot
scrie sub forma :

$$v_{rx} = 2 \tilde{\pi} \cdot f \cdot y_0 \sin(2 \tilde{\pi} \cdot f \cdot t - \frac{2 \tilde{\pi}}{\lambda} x) - \frac{dx}{dt} \quad (2.3.5)$$

$$v_{rz} = 2 \tilde{\pi} \cdot f \cdot y_0 \sin(2 \tilde{\pi} \cdot f \cdot t - \frac{2 \tilde{\pi}}{\lambda} z) - \frac{dz}{dt}$$

in care λ este lungimea de undă a undei ultrasonore.

Considerînd că de-a lungul axei Oy peste compo-
nenta vibratoare se suprapune o componentă dată de viteza de
translație v_{01} rezultă :

$$v_{ry} = 2 \tilde{\pi} \cdot f \cdot t \cdot x_0 \sin(2 \tilde{\pi} \cdot f \cdot t - \frac{2 \tilde{\pi}}{\lambda} y) + v_{01} - \frac{dy}{dt} \quad (2.3.6)$$

Utilizîndu-se expresiile (2.3.2 ... 6) rezultă :

$$m_1 \frac{d^2 x}{dt^2} = 6 \tilde{\pi} \cdot a_1 \cdot \eta_1 \left[2 \tilde{\pi} \cdot f \cdot y_0 \sin(2 \tilde{\pi} \cdot f \cdot t - \frac{2 \tilde{\pi}}{\lambda} x) - \frac{dx}{dt} \right]$$

$$m_1 \frac{d^2 y}{dt^2} = 6 \tilde{\pi} \cdot a_1 \cdot \eta_1 \left[2 \tilde{\pi} \cdot f \cdot x_0 \sin(2 \tilde{\pi} \cdot f \cdot t - \frac{2 \tilde{\pi}}{\lambda} y) + v_{01} - \frac{dy}{dt} \right]$$

$$m_1 \frac{d^2 z}{dt^2} = 6 \tilde{\pi} \cdot a_1 \cdot \eta_1 \left[2 \tilde{\pi} \cdot f \cdot y_0 \sin(2 \tilde{\pi} \cdot f \cdot t - \frac{2 \tilde{\pi}}{\lambda} z) - \frac{dz}{dt} \right] \quad (2.3.7)$$

Derivînd expresia (2.3.7) în raport cu timpul și
ordonînd în mod corespunzător cîștinem :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\Delta_1 \frac{dx}{dt} - 4\tilde{\pi}.f.\Delta_1 y_0 \sin(2\tilde{\pi}.f.t - \frac{2\tilde{\pi}}{\lambda} x) = 2\Delta_1$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2\Delta_1 \frac{dy}{dt} - 4\tilde{\pi}.f.\Delta_1 x_0 \sin(2\tilde{\pi}.f.t - \frac{2\tilde{\pi}}{\lambda} y) = 2\Delta_1^{vol}$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} + 2\Delta_1 \frac{dz}{dt} - 4\tilde{\pi}.f.\Delta_1 y_0 \sin(2\tilde{\pi}.f.t - \frac{2\tilde{\pi}}{\lambda} z) = 2\Delta_1 \quad (2.3.8)$$

in care s-a utilizat notația :

$$\Delta_1 = \frac{3\tilde{\pi}.a_1^2 m_1}{m_1} \quad (2.3.9)$$

Cum expresiile 1 și 3 din (2.3.8) sînt similare în continuare se vor integra doar expresiile 1 și 2

Dacă considerăm că în cazul oscilațiilor de amplitudine mică se admite ca :

$$\sin \frac{2\tilde{\pi}}{\lambda} . x = 1 \quad \text{și} \quad \cos \frac{2\tilde{\pi}}{\lambda} = 1$$

rezultă :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\Delta_1 \frac{dx}{dt} - 4\tilde{\pi}.f.\Delta_1 y_0 (\sin 2\tilde{\pi}.f.t - \frac{2\tilde{\pi}}{\lambda} x \cos 2\tilde{\pi}.f.t) = 2\Delta_1$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2\Delta_1 \frac{dy}{dt} - 4\tilde{\pi}.f.\Delta_1 x_0 (\sin 2\tilde{\pi}.f.t - \frac{2\tilde{\pi}}{\lambda} y \cos 2\tilde{\pi}.f.t) = 2\Delta_1^{vol}$$

și prin ordonarea termenilor se obține :

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} + 2\Delta_1 \frac{dx}{dt} + 4\tilde{\pi}.f.t.y_0 \cdot \frac{2\tilde{\pi}}{\lambda} x \cos 2\tilde{\pi}.f.t = \\ = 2\Delta_1 + 4\tilde{\pi}.f.\Delta_1 y_0 \sin 2\tilde{\pi}.f.t \end{aligned} \quad (2.3.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2y}{dt^2} + 2\Delta_1 \frac{dy}{dt} + 4\tilde{\pi}.f.\Delta_1 x_0 \frac{2\tilde{\pi}}{\lambda} \cos 2\tilde{\pi}.f.t = \\ = 2\Delta_1^{vol} + 4\tilde{\pi}.f.\Delta_1 x_0 \sin 2\tilde{\pi}.f.t \end{aligned}$$

Notînd cu :

$$2\tilde{\pi}.f.t = \omega t = p \quad \text{sau} \quad 2\tilde{\pi}.f = \omega = \frac{dp}{dt}$$

rezultă derivatela de ordinul 1 și 2 de forsa :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx}{dp} \cdot \frac{dp}{dt} = 2\tilde{\pi}.f \frac{dx}{dp} \quad (2.3.11)$$

și

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{d^2 x}{dp^2} \left(\frac{dp}{dt}\right)^2 + \frac{dx}{dp} \frac{d^2 p}{dt^2} = \frac{d^2 x}{dp^2} \left(\frac{dp}{dt}\right)^2 = (2\pi \cdot f)^2 \frac{d^2 x}{dp^2} \quad (2.3.12)$$

Introducând (2.3.11) și (2.3.12) în (2.3.10) se obține :

$$\frac{d^2 x}{dp^2} + \frac{\Delta_1}{\pi \cdot f} \frac{dx}{dp} + 2 \frac{\Delta_1}{\sigma_g} y_0 \cdot x \cdot \cos p = \frac{\Delta_1}{2\pi^2 \cdot f^2} + \frac{\Delta_1}{\pi \cdot f} y_0 \sin p \quad (2.3.13)$$

$$\frac{d^2 y}{dp^2} + \frac{\Delta_1}{\pi \cdot f} \cdot \frac{dy}{dp} + 2 \frac{\Delta_1}{\sigma_g} x \cdot y \cdot \cos p = \frac{\Delta_1}{2\pi^2 \cdot f^2} v_{01} +$$

$$+ \frac{\Delta_1}{\pi \cdot f} x_0 \sin p$$

Deci

$$\sigma_g = \lambda \cdot f \quad \text{și} \quad x = y = u \cdot e^{-\frac{\Delta_1}{2\pi \cdot f} p}$$

se observă că ecuațiile deduse nu diferă decît în ceea ce privește termenul liber.

Derivînd de două ori în raport cu p rezultă :

$$\frac{dx}{dp} = \frac{dy}{dp} = \frac{du}{dp} \cdot e^{-\frac{\Delta_1}{2\pi \cdot f} p} - \frac{\Delta_1}{2\pi \cdot f} \cdot u \cdot e^{-\frac{\Delta_1}{2\pi \cdot f} p} \quad (2.3.14)$$

$$\frac{d^2 x}{dp^2} = \frac{d^2 y}{dp^2} = \frac{d^2 u}{dp^2} \cdot e^{-\frac{\Delta_1}{2\pi \cdot f} p} + \frac{\Delta_1}{2\pi \cdot f} \cdot u \cdot e^{-\frac{\Delta_1}{2\pi \cdot f} p} -$$

$$- 2 \frac{\Delta_1}{2\pi \cdot f} \cdot \frac{du}{dp} \cdot e^{-\frac{\Delta_1}{2\pi \cdot f} p} \quad (2.3.15)$$

și înlocuindu-le în (2.3.13) rezultă :

$$\frac{d^2 u}{dp^2} + u \left[\frac{2\Delta_1}{\sigma_g} y_0 \cos p - \left(\frac{\Delta_1}{2\pi \cdot f}\right)^2 \right] = \frac{\Delta_1}{\pi \cdot f} (y_0 \sin p +$$

$$+ \frac{\Delta_1}{2\pi \cdot f}) \cdot e^{-\frac{\Delta_1}{2\pi \cdot f} p} \quad (2.3.16)$$

$$\frac{d^2 u}{dp^2} + u \left[\frac{2\Delta_1}{\sigma_g} x_0 \cos p - \left(\frac{\Delta_1}{2\pi \cdot f}\right)^2 \right] =$$

$$= \frac{\Delta_1}{\pi \cdot f} (x_0 \sin p + \frac{v_{01}}{2\pi \cdot f}) \cdot e^{-\frac{\Delta_1}{2\pi \cdot f} p} \quad (2.3.17)$$

Deci admitem notațiile :

$$\frac{2\Delta_1}{\sigma_0} y_0 = a; \quad - \left(\frac{\Delta_1}{2\pi f}\right)^2 = b; \quad \frac{\Delta_1}{2\pi f} y_0 = c; \quad \frac{\Delta_1}{2\pi^2 f^2} = d \quad (2.3.18)$$

rezultă :

$$\frac{d^2 u}{dp^2} + \mu(a \cos p + b) = c (\sin p + d) e^{p\sqrt{b}} \quad (2.3.19)$$

care este o ecuație de tip Mathieu.

Pentru axa y , coeficienții a , b și c din relația (2.3.18) rămân aceiași. Astfel, coeficienții a și d devin a_1 și d_1 de forma :

$$a_1 = \frac{2\Delta_1}{\sigma_0} x_0 \quad \text{și} \quad d_1 = \frac{\Delta_1 v_{ol}}{2\pi^2 f^2} \quad (2.3.20)$$

Înlocuind în relația (2.3.19) coeficienții a și d cu a_1 și d_1 , se observă că ea reprezintă atât regiul permanent cât și cel tranzitoriu al mișcării particulelor sub acțiunea cimpului ultrasonor.

Ecuația omogenă a relației (2.3.19) este de forma :

$$\frac{d^2 u}{dp^2} + u(a \cos p - b) = 0 \quad (2.3.21)$$

Se observă că regiul staționar este independent de v_{ol} .

Soluția acestei ecuații duce la determinarea intensității cimpului ultrasonor capabil să pulverizeze lichidul din modelul hidrodinamic propus, transformându-l în particule de dimensiuni impuse.

În [97] $b = f(a)$ devine :

$$b = -\frac{1}{2} a^2 + \frac{7}{32} a^4 - \frac{29}{144} a^6 \quad (2.3.22)$$

Iar soluția ecuației Mathieu omogenă este de forma :

$$u = B \cdot C_{00} \cdot p \quad (2.3.23)$$

în care :

B - constantă

C_{00} - curba din stînga trecînd prin origine din diagrama Ince-Stutt (fig. 2.3.2)

La $p \rightarrow \infty$ u este cuprins între curbile corespunzătoare lui C_{00} și $C_{0, 1/2}$ în lungul dreptei $b = -\left(\frac{\Delta_1}{2\pi f}\right)^2$

Pentru aceste condiții oscilațiile corespund frecvențelor fundamentale ale cimpului ultrasonor. Se observă un domeniu de stabilitate foarte restrâns.

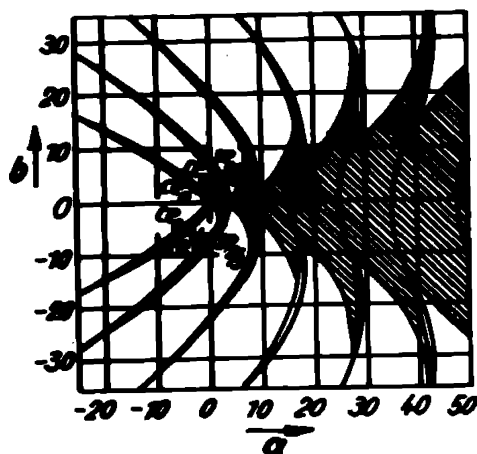


Fig.2.3.2. Diagrama Ince-Stutt
Revenind la variabilele inițiale și la relația (2.3.23)

$$\begin{aligned} x &= u \cdot e^{-\frac{\Delta_1}{2\pi f} \cdot p} = B \cdot C_{00} \cdot p \cdot e^{-\frac{\Delta_1}{2\pi f} p} = \\ &= B \cdot C_{00} \left(2\tilde{\pi} \cdot f \cdot t + \frac{\tilde{\pi}}{2} \right) \cdot e^{-\frac{\Delta_1}{2\pi f} \left(2\tilde{\pi} \cdot f \cdot t + \frac{\tilde{\pi}}{2} \right)} = \\ &= B \cdot C_{00} \left(2\tilde{\pi} \cdot f \cdot t + \frac{\tilde{\pi}}{2} \right) \cdot e^{-\Delta_1 t} \cdot e^{-\frac{\tilde{\pi}}{2}} \quad (2.2.24) \end{aligned}$$

și

$$y = B_1 \cdot C_{00} \left(2\tilde{\pi} \cdot f \cdot t + \frac{\tilde{\pi}}{2} \right) \cdot e^{-\Delta_1 t} \cdot e^{-\frac{\tilde{\pi}}{2}} \quad (2.2.25)$$

Dacă din relația (2.3.22) se rețin numai primii doi termeni și ținând seama de relația (2.3.13) rezultă

$$-\left(\frac{\Delta_1}{2\pi f}\right)^2 = -\frac{1}{2} \left(\frac{2\Delta_1}{\sigma_g} y_0\right)^2 + \frac{7}{32} \left(\frac{2\Delta_1}{\sigma_g} y_0\right)^4$$

sau

$$a^4 - \frac{16}{7} a^2 - \frac{32}{7} b = 0 \quad (2.3.26)$$

Dacă $\sigma_g = \lambda f$ din relația (2.3.13) se obține :

$$\frac{7}{32} \left(\frac{\Delta_1}{2\pi f}\right)^2 \cdot \left(\frac{4\tilde{\pi}}{\lambda} y_0\right)^4 - \frac{1}{2} \left(\frac{4\tilde{\pi}}{\lambda} y_0\right)^2 + 1 = 0 \quad (2.3.27)$$

a cărei soluție este :

$$\left(\frac{4\tilde{\pi}}{\lambda} y_0\right)^2 = \frac{\frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{7}{8} \left(\frac{\Delta_1}{2\tilde{\pi}f}\right)^2}}{\frac{7}{16} \left(\frac{\Delta_1}{2\tilde{\pi}f}\right)^2}$$

$$y_0 = \pm \frac{2c_g}{\Delta_1} \sqrt{\frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{7}{8} \left(\frac{\Delta_1}{2\tilde{\pi}f}\right)^2}} \quad (2.3.28)$$

Pentru ca y_0 să aibe valori reale trebuie ca :

$$\frac{7}{8} \left(\frac{\Delta_1}{2\tilde{\pi}f}\right)^2 < \frac{1}{4} \quad \text{sau} \quad \Delta_1 < \tilde{\pi} \cdot f \quad \text{sau} \quad \frac{3 a_1^3 \rho_1}{\eta_1} < r \quad (2.3.29)$$

În cazul particulei sferice de rază a_1 și densitate ρ_1 , se obține :

$$m_1 = \frac{4\tilde{\pi}}{3} a_1^3 \cdot \rho_1$$

și

$$\Delta_1 = \frac{3\tilde{\pi} \cdot a_1 \cdot \eta_1}{m_1} = \frac{9}{4} \cdot \frac{\eta_1}{a_1 \cdot \rho_1} \quad (2.3.30)$$

rezultă :

$$y_0 = \frac{2c_g}{\Delta_1} \sqrt{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{7}{8} \left(\frac{\Delta_1}{2\tilde{\pi}f}\right)^2}}$$

$$y_0 = 718 \cdot \frac{1}{f} \sqrt{\frac{J}{\rho_1 \cdot c_g}}$$

sau

$$J = 1,51 \cdot 10^{-6} \frac{r^2 \rho_1^3 a_1^4 c_g^3}{\eta_1^2} \left(c_g + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{7}{8} \frac{\eta_1^2}{a_1^4 \rho_1^2 \cdot f^2}} \right)$$

$$(2.3.31)$$

Relația (2.3.31) la valoarea intensității cimpului ultrasunorilor $[w/cm^2]$ capabil să pulverizeze lichidul într-un model hidrodinamic (raza particulei a_1 , densitatea ρ_1 , viscozitatea η_1 , frecvența vibrațiilor ultrasunore f la viteze de propagare c_g)

Cur sonotrodul este practic rigidizat de o componentă ce urmează a se suda, iar aceasta vibrează cu amplitudinea A la oscilațiile transversale, în zona lichidă sau ovasilichidă din suprafața de contact oscilațiile transversale provoacă o

pulverizare a lichidului în particole, dimensiunile particolelor fiind în principal funcție de intensitatea cimpului ultrasonor, de natura materialelor ce se sudează prin intermediul densității și a vitezei de propagare a oscilațiilor transversale, precum și de frecvență, iar indirect de amplitudinea vibrațiilor ultrasonore.

În punct de vedere structural se știe că un metal lichid - la temperatura apropiată de cea de topire - este format din grupe ciclotastice, în care atomii de material sînt organizați regulat în spațiu, deci reflectă structura cristalină a metalului în stare solidă, grupe ciclotastice ce se deplasează în spațiu sub acțiunea unui sistem complex de forțe într-o masă de atomi sau molecule în stare amorfă, fără ca legăturile coezive dintre acestea să fie întrerupte (fig. 2.3.3)

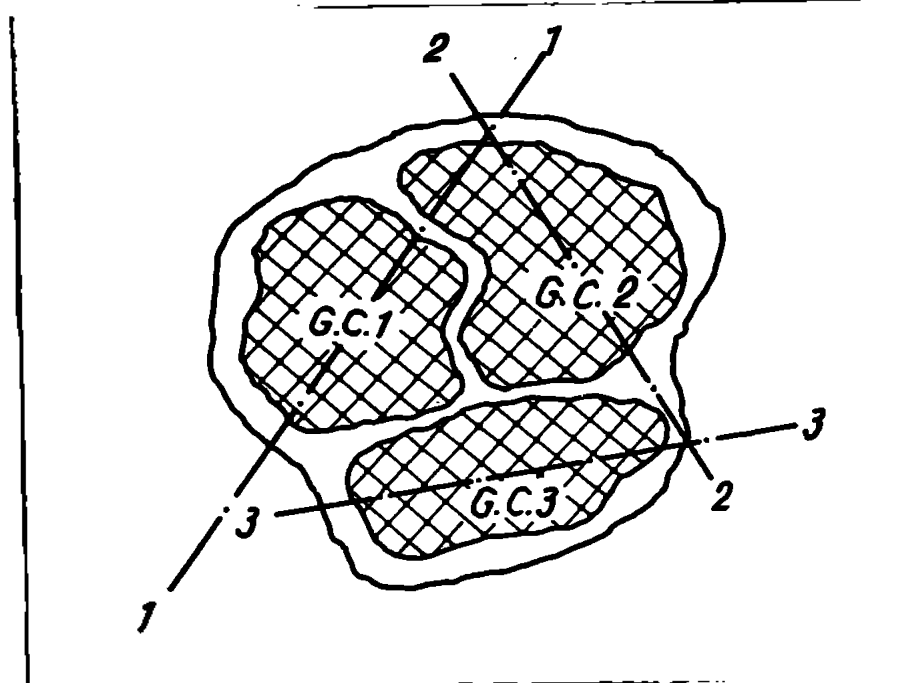


Fig.2.3.3. Schema de principiu a organizării spațiale în cazul unui metal lichid
G.C. 1, 2, 3 - grupe ciclotastice
MA - metal în stare amorfă
1, 2, 3 - axele principale de cristalizare

În stare lichidă se păstrează ordinea apropiată (zeci de distanțe între atomice) și se pierde ordinea îndepărtată ($10^4 - 10^5$ distanțe interatomice) de distribuție spațială a atomilor, o caracteristică a stării solide [50].

Sub acțiunea forțelor de coeziune asupra atomilor de materie, grupele ciclotastice se vor deplasa prin masa de atomi de metal în stare amorfă.

La temperaturi mai ridicate, atomii din grupele cibe-

testice trec în organizare amorfă și ordinea apropiată se pierde.

În stare lichidă sau ovasilichidă, mobilitatea atomilor este ridicată și metalul se poate deforma ușor, chiar numai sub acțiunea forțelor de gravitație, posesând proprietăți de curgere.

Sub acțiunea forțelor din câmpul ultrasonos un grup sau mai multe grupe oibotastice pot ieși din acțiunea forțelor de coeziune, formându-se particule de metal lichid sau ovasilichid.

2.3.2. Posibilitatea fragmentării particulei de metal lichid sub acțiunea unui câmp ultrasonos

În capitolul precedent s-a demonstrat că pulverizarea metalului topit s-a aflat într-o stare ovasilichidă ; la sudarea sub presiune în câmp ultrasonos transversal este posibilă și s-au arătat condițiile în care acest fenomen de pulverizare poate avea loc.

S-a demonstrat că la sudarea cu arc electric sub strat de flux, metalul topit se pulverizează în particule de ordinul a $0,5...10\mu m$ la utilizarea unui câmp ultrasonos transversal de frecvențe $f = 15...25$ kHz și o putere specifică de $10 - 20$ W/cm² [126].

În cele ce urmează se cere să se explice teoretic posibilitatea fragmentării particulelor de metal lichid sau ovasilichid pulverizat în două sau mai multe fragmente, ca urmare a acțiunii unor forțe pulsatorii, care acționează asupra particulelor lichide când acestea se află într-un câmp ultrasonos transversal.

În aceste situații, legea lui Hooke poate fi scrisă sub forma :

$$F_{sp} = \epsilon_1 \cdot E \quad \text{și} \quad F_{sp} = \epsilon_0 \cdot \nu \cdot E \quad (2.3.32)$$

în care :

- F_{sp} - este forța specifică a secțiunii transversale
- E - modulul de elasticitate
- ϵ_1 - alungirea relativă
- ϵ_0 - comprimarea relativă

$$\nu = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_0} - \text{coeficientul lui Poisson}$$

Se presupune că particula este sferică și că asupra acesteia acționează numai tensorul tensiunilor elastice.

Se știe că valorile proprii ale tensorului tensiunilor elastice ($F_x; F_y; F_z$) sînt legate de valorile proprii ale tensorului deformațiilor ($\epsilon_x; \epsilon_y; \epsilon_z$). Din (2.3.32) :

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{F_x}{E} - \frac{\nu F_y}{E} - \frac{\nu F_z}{\mu E} \\ \epsilon_y &= \frac{F_y}{E} - \frac{\nu F_x}{E} - \frac{\nu F_z}{\mu E} \\ \epsilon_z &= \frac{F_z}{E} - \frac{\nu F_x}{E} - \frac{\nu F_y}{\mu E} \end{aligned} \quad (2.3.32)$$

Termenii de forma $\frac{F_i}{E}$ reprezintă tensiuni care produc alungirea, iar termenii de forma $\frac{\nu F_i}{\mu E}$ eforturi de compresie.

În continuare se vor introduce tensorii : deformația $\bar{\bar{X}}$, tensiunea $\bar{\bar{T}}$ și unitatea $\bar{\bar{1}}$, care raportate la axele principale au formă :

$$\bar{\bar{X}} = \begin{vmatrix} x & 0 & 0 \\ 0 & y & 0 \\ 0 & 0 & z \end{vmatrix}; \quad \bar{\bar{T}} = \begin{vmatrix} F_x & 0 & 0 \\ 0 & F_y & 0 \\ 0 & 0 & F_z \end{vmatrix}; \quad \bar{\bar{1}} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (2.3.32)$$

Utilizînd conceptul de forță generalizată de volum și de suprafață din teoria elasticității, coeficienții lui Lamé sînt :

$$\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(\nu + 1)(\nu + 2)}; \quad \mu = \frac{1}{2} \cdot \frac{\nu E}{\nu + 1} \quad (2.3.33)$$

facă notăm cu :

$$\Theta = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = -p \frac{3\lambda + 4\mu}{\lambda \cdot \nu (\mu + \lambda) (2\mu + \lambda)} \quad (2.3.34)$$

$$p = F_x + F_y + F_z$$

legea lui Hooke generalizată devine :

$$\bar{\bar{T}} = 2\mu \bar{\bar{X}} + \lambda \Theta \bar{\bar{1}} \quad (2.3.35)$$

Știînd că pentru un sistem de coordonate carteziene tensorii $\bar{\bar{T}}$ și $\bar{\bar{X}}$ sînt simetrici rezultă :

$$\bar{\bar{T}} = \begin{vmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{vmatrix}; \quad \bar{\bar{X}} = \begin{vmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} \end{vmatrix} \quad (2.3.36)$$

în care :

$$\begin{aligned} T_{11} &= 2\mu \frac{\partial U_x}{\partial x} + \dots & ; & \quad T_{12} = T_{21} = \mu \left(\frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) \\ T_{22} &= 2\mu \frac{\partial U_y}{\partial y} + \dots & ; & \quad T_{23} = T_{32} = \mu \left(\frac{\partial U_y}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial y} \right) \\ T_{33} &= 2\mu \frac{\partial U_z}{\partial z} + \dots & ; & \quad T_{31} = T_{13} = \mu \left(\frac{\partial U_z}{\partial x} + \frac{\partial U_x}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.3.37)$$

și

$$\begin{aligned} \lambda_{11} &= \frac{\partial U_x}{\partial x} & ; & \quad \lambda_{12} = \lambda_{21} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) \\ \lambda_{22} &= \frac{\partial U_y}{\partial y} & ; & \quad \lambda_{23} = \lambda_{32} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_y}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial y} \right) \\ \lambda_{33} &= \frac{\partial U_z}{\partial z} & ; & \quad \lambda_{31} = \lambda_{13} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_z}{\partial x} + \frac{\partial U_x}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.3.38)$$

Relațiile prezentate pot fi aplicate oricărui corp de orice formă. În cazul corpurilor sferice, datorită simetriei specifice a acestora ele se pot simplifica.

Iată

$$\mathcal{E} = \frac{dU_r}{dr} = \sigma U_r \quad (2.3.39)$$

expresie în care \mathcal{E} reprezintă deplasările virtuale radiale.

Iată într-un sistem cartezian, de-a lungul axei x avem solicitarea la tracțiune (întindere), iar de-a lungul axelor y și z compresiune.

Înlocuind în (2.3.32) valorile proprii ale tensorului tensiune \bar{T} rezultă :

$$\begin{aligned} -F_x &= (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x} + \mu \Delta \sigma_{xx} \\ -F_y &= (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial y} + \mu \Delta \sigma_{yy} \\ -F_z &= (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial z} + \mu \Delta \sigma_{zz} \end{aligned} \quad (2.3.40)$$

și

$$-F_r = (\lambda + \mu) \frac{d\theta}{dr} + \mu \Delta \sigma_{rr} \text{ sau } -F_r = (\lambda + \mu) \frac{d\theta}{dr} + \mu \frac{dU_r}{dr} \quad (2.3.41)$$

de unde :

$$-\int F_r dr = (\lambda + \mu) d\theta + \mu dU_r \quad (2.3.42)$$

Expresia (2.3.42) prezintă lucrul mecanic al forțelor câmpului ultrasonor, care produce deformarea plastică a particulei de metal lichid pulverizat în formă sferică. În cazul în care raza sferei este r , adică, unei transversală πr^2 și dacă sfera își mărește raza de la $(r+dr)$ dilatarea cubică es-

te citul dintre variația deplasării întregii suprafețe a sferii și creșterea volumului

$$\begin{aligned} \Theta &= \frac{\frac{d}{dr} (\varepsilon + \tilde{\mu} r^2) dr}{4 \tilde{\mu} r^2 dr} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{d}{dr} (\varepsilon r^2) \\ \Theta &= \frac{r^2}{r^2} \cdot \frac{d\varepsilon}{dr} + \frac{\varepsilon}{r^2} \cdot 2r \\ \Theta &= \frac{d\varepsilon}{dr} + \frac{2\varepsilon}{r} \end{aligned} \quad (2.3.43)$$

Înlocuind pe ε din (2.3.9) și derivând în raport cu r

$$\Theta = \frac{d^2 U}{dr^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{dU}{dr} = \delta U \quad (2.3.44)$$

derivând și înlocuind derivate în (2.3.42) rezultă:

$$\begin{aligned} -\int Fr dr &= (\lambda + \mu) \Theta + \mu \Theta = (\lambda + 2\mu) \Theta \\ -\int Fr dr &= (\lambda + 2\mu) \frac{1}{r^2} \cdot \frac{d}{dr} (\varepsilon r^2) \end{aligned} \quad (2.3.45)$$

Pentru limitele r_1 și r , expresia devine :

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{d}{dr} (\varepsilon r^2) = - \frac{1}{\lambda + 2\mu} \left(\int_{r_1}^r Fr dr + C_1 \right) \quad (2.3.46)$$

în care C_1 este o constantă de integrare ce se determină din condițiile de limită

- $r = r_1$ - sferă nedilatată
- $r = r_2$ - sferă dilatată

Pr se poate determina considerând, la simetrie, că tensorul simetric al tensiunilor are valorile proprii egale cu densitatea de volum a sferelor Fr produsă de presiunea ultrasonică pe sferă.

Intensitatea de radiație I poate fi scrisă sub forma $I = p \cdot v$ și

$$Fr = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial r} Tr = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial r} \left[\sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 \frac{1}{2k} (\alpha r)_{jk} \right] \quad (2.3.47)$$

Se disting în relația (2.3.47) două tipuri de coeficienți : T_{jj} cu indici identici și T_{jk} - T_{kj} cu indici diferiți.

rezultă :

$$T_{11} = - \frac{I_x^2}{2k} a_{11} - \frac{I_y^2}{2k} a_{21} - \frac{I_z^2}{2k} a_{31} - \frac{I_y I_z}{k} a_{41} - \frac{I_z I_x}{k} a_{51} -$$

$$- \frac{I_x I_y}{k} a_{61} \quad (2.3.48)$$

$$T_{12} = - \frac{I_x}{2k} a_{16} - \frac{I_y}{2k} a_{26} - \frac{I_z}{2k} a_{36} - \frac{I_y I_z}{k} a_{46} - \frac{I_z I_x}{k} a_{56} -$$

$$- \frac{I_x I_y}{k} a_{66}$$

Din cei 36 de coeficienți, 24 sînt nuli, deoarece din motive de simetrie, dacă se schimbă axele între ele, coeficienții $(\alpha_{sr})_{jk}$ rămîn neschimbați. Coeficienții nenuli se pot grupa în trei categorii :

$$a_{11} = a_{22} = a_{33} = \alpha_1$$

$$a_{12} = a_{21} = a_{13} = a_{31} = a_{32} = a_{23} = \alpha_2 \quad (2.3.49)$$

$$a_{44} = a_{55} = a_{66} = \frac{1}{2} (\alpha_1 - \alpha_2)$$

Rezultă :

$$T_{11} = - \frac{1}{2k} \alpha_1 I_x^2 - \frac{1}{2k} \alpha_2 (I_y^2 + I_z^2) \quad (2.3.50)$$

$$T_{12} = \frac{1}{2k} (\alpha_2 - \alpha_1) I_y I_z \quad (2.3.51)$$

Lin expresiile de mai sus se pot separa termenii :

$$F_t = \frac{1}{2k} \alpha_1 \cdot I^2 \quad (2.3.52)$$

$$F_0 = \frac{1}{2k} \alpha_2 \cdot I^2 \quad (2.3.53)$$

în care F_t este forța paralelă cu liniile cîmpului ultrasonic, care solicită particula la tracțiune după X -șilor și F_0 este forța perpendiculară pe liniile cîmpului și exercită asupra particulei o compresiune după axele y și z .

Dacă F_0 este o compresiune după toate direcțiile (x, y, z) iar tracțiunea are loc numai după axa paralelă cu liniile cîmpului, forța de tracțiune F'_t poate fi scrisă, în acest caz, sub forma :

$$F'_t = \frac{1}{2k} (\alpha_2 - \alpha_1) I^2 \quad (2.3.54)$$

Forța de volum F_v orientată înspre exteriorul ei se poate scrie sub forma

$$F_v = \frac{1}{4k} (\alpha_1 - \alpha_2) \text{ grad } (I^2) \quad (2.3.55)$$

Forța de suprafață F_s , exercitată de cimp spre interiorul volumului va fi :

$$F_s = \frac{1}{2k} \alpha_2 I^2 + \frac{1}{2k} (\alpha_1 - \alpha_2) I_x I_y \quad (2.3.56)$$

Cum :

$$I = \frac{C}{r^2} \quad (2.3.57)$$

$$\text{grad } (I^2) = C^2 \frac{J}{r^4} \left(\frac{1}{r^4} \right)$$

și

$$F_v = F_r = - \frac{C}{4k} (\alpha_1 - \alpha_2) \text{ grad } \left(\frac{1}{r^4} \right) \quad (2.3.58)$$

$$F_v = F_r = \frac{1}{k} (\alpha_1 - \alpha_2) \frac{C^2}{r^5}$$

Integrala din ecuația (2.3.46) devine :

$$\int_{r_1}^r F_r \cdot dr = \frac{C^2 (\alpha_1 + \alpha_2)}{k} \left(\frac{1}{4r_1^4} - \frac{1}{4r^2} \right)$$

și

$$\frac{d}{dr} (\varepsilon r^2) = - \frac{1}{\lambda + 2\mu} \left[\frac{(\alpha_1 + \alpha_2) k^2}{4 C^2} \left(\frac{r^2}{r_1^2} - \frac{1}{r^4} \right) + C_1 r^2 \right] \quad (2.3.59)$$

Integrând încă odată rezultă :

$$\varepsilon r^2 = - \frac{1}{\lambda + 2\mu} \left[\frac{(\alpha_1 + \alpha_2) k^2}{4 C^2} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} + \frac{r^3 - r_1^3}{3r_1} \right) + C_1 \frac{r^3}{3} + C_2 \right]$$

și

$$\varepsilon = - \frac{1}{\lambda + 2\mu} \left[\frac{C_1}{3} r + \frac{C_2}{r^2} - \frac{(\alpha_1 + \alpha_2) k^2}{4 C^2 r^2} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} + \frac{r^3 - r_1^3}{3 r_1} \right) \right] \quad (2.3.60)$$

Constantele de integrare C_1 și C_2 se obțin din condițiile de limită. Cu $\Delta r = r_2 - r_1$ are o valoare mică, ne-

glisabilă față de valorile lui r_1 și r_2 , rezultă că $r_1 = r_2$ și :

$$\varepsilon = \frac{1}{\lambda + 2\mu} \left(\frac{C_1}{3} r_1 + \frac{C_2}{r_1} \right)$$

Iar

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = - \frac{1}{\lambda + 2\mu} \left[\frac{C_1}{3} - 2 \frac{C_2}{r} - \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)k^2}{c^2} \cdot \frac{r_1 - r}{r_1^5} \right]$$

Rezultă :

$$C_1 = - \frac{\lambda + 2\mu}{3\lambda + 2\mu} \cdot \frac{k^2}{2c^2 r_1} (\rho + \alpha_1 + 2\alpha_2) \quad (2.3.61)$$

$$C_2 = - \frac{\lambda + 2\mu}{12\mu r_1} \cdot \frac{k^2}{c^2} (2\rho + \alpha_1 + \alpha_2)$$

Dacă raza sferei crește sub acțiunea câmpului ultrasonic, creșterea relativă a acesteia se determină prin raportul (ε/r) .

Dacă modulul de elasticitate K și coeficientul lui Poisson ν se exprimă prin :

$$K = \frac{\mu(2\mu + 3\lambda)}{\mu + \lambda} ; \quad \nu = \frac{\lambda}{2(\mu + \lambda)} \quad (2.3.62)$$

și considerând că în imediata vecinătate a suprafeței sferice interioare, intensitatea câmpului acustic I este :

$$I = \frac{c}{r^2} = \frac{V_{a1} - V_{a2}}{R} \quad (2.3.63)$$

în care V_{a1} și V_{a2} sînt potențialele câmpului acustic pe cele două fețe ale calotei sferice, de rază $r = R$

Ținînd seama de expresiile constantelor de integrare C_1 și C_2 (relațiile 2.3.61) rezultă :

$$\left(\frac{\varepsilon}{r} \right)_{r_1} = \frac{1}{2kR} \left(\frac{V_{o1} - V_{o2}}{R} \right)^2 \left[\rho - \nu\alpha_1 + (1-\nu)\alpha_2 \right] \quad (2.3.64)$$

și

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)_{r_1} = - \frac{1}{2R} \left(\frac{V_{o1} - V_{o2}}{R} \right)^2 \left[\rho - (1+2\nu) - \alpha_1 + 2\alpha_2 \right] \quad (2.3.65)$$

Expresia (2.3.65) reprezintă dilatarea cubică în cazul în care $r = r_1$

Cum însă s-a specificat că $\frac{V_{o1} - V_{o2}}{R} = I$, rezultă că particula lichidă de metal, pentru simplificare suspendată

liber într-un mediu omogen, este supusă la două solicitări distincte :

- întindere pe direcția paralelă cu vectorul intensitate a câmpului ultrasonic ;
- compresiune pe toate direcțiile perpendiculare pe direcția câmpului.

În relațiile (2.3.64) și (2.3.65) necunoscută este diferența dintre potențialul acustic ($V_{o1} - V_{o2}$).

Din [126] rezultă :

$$V_{o1} - V_{o2} = R^2 \rho_0 \left(\frac{1}{2} - \frac{R^2}{6R^2} - \frac{4\pi R}{3} \cdot \frac{1}{R} \right) \quad (2.3.66)$$

în care R este raza sferei, iar r raza unei alte sfere, concentrice cu $r > R$

În [97] se arată că acțiunea ponderomotoare a câmpului acustic asupra particulei este :

$$\bar{F} = \int_{V\Sigma} \bar{F}_V dV + \int_{\Sigma} \bar{F}_S(\bar{n}) dA = \frac{d}{dt} \int_{V\Sigma} \rho \cdot \bar{v} dV \quad (2.3.67)$$

în care \bar{F} reprezintă forța rezultantă egală cu variația substanțială a impulsului total cedat de câmp prin forțele de volum \bar{F}_V și suprafață \bar{F}_S unde V este volumul sferei iar Σ suprafața laterală a acesteia și :

$$\begin{aligned} \bar{C} &= \int_{V\Sigma} (\bar{C}_V + r\bar{F}_V) dV + \int_{\Sigma} [\bar{C}_S(\bar{n}) + r\bar{F}_S(\bar{n})] dA = \\ &= \frac{d}{dt} \int_{V\Sigma} (\bar{r} \cdot \rho \cdot \bar{v}) dV \end{aligned} \quad (2.3.68)$$

unde \bar{C} este momentul rezultat egal cu variația substanțială a momentului cinetic total.

Pe de altă parte, acțiunea ponderomotoare a câmpului acustic asupra particulei se exprimă prin [2, 126]

$$\begin{aligned} d_v \left(\rho_0 - \frac{\rho_0 v^2}{2} \right) &= \bar{T}_v^{\nu} \cdot \delta \cdot \bar{X} + \bar{T}_c^{\nu} \cdot \delta \cdot \bar{\Omega} - \text{div } \bar{q} \cdot \delta \cdot \bar{t} = \\ &= \sum_j \sum_k (\bar{T}_v^{\nu})_{jk} \cdot \delta \cdot x_{jk} + \sum_j \sum_k (\bar{T}_c^{\nu})_{jk} \cdot \delta \cdot \Omega_{jk} - \text{div } \bar{q} \cdot \delta \cdot \bar{t} \end{aligned} \quad (2.3.69)$$

în care :

ρ_0 - este densitatea de volum a energiei ;

\bar{T}_v^{ν} - este tensorul tensiunilor cu \bar{T}_v^{ν} partea simetrică și \bar{T}_v^{ν} partea antisimetrică ;

- $\overline{\overline{I}}$ - tensorul deformațiilor
- $\overline{\overline{r}}$ - tensorul torsiunilor
- $\overline{\overline{\Omega}}$ - tensorul deformațiilor de răsucire

\overline{q} - un vector analog fluxului densității de energie

Se deduce că particula de metal lichid este sollicitată de cinci categorii distincte de tensori, deci va primi cinci categorii distincte de mișcare suprapuse :

- Tensorul $\overline{\overline{T}}_y$ va sollicita particula la întindere-compresiune. Întinderea se va produce de-a lungul direcțiilor paralele cu câmpul ultrasonor, compresiune pe direcții perpendiculare pe acesta.

- Tensorul $\overline{\overline{T}}_z$ va produce o mișcare de rotație în jurul unor axe instantanee.

- Tensorul $\overline{\overline{\Omega}}$ va produce o răsucire.

- Tensorul $\overline{\overline{X}}$ dă o deformație de întindere-compresiune.

- Fluxul \overline{q} al densităților de energie termică va produce o deformare de volum datorită schimbului adiabatic de căldură cu mediul înconjurător.

Cum câmpul ultrasonor are o evoluție armonică, sollicitările particulei la tracțiune - compresiune sînt proporționale cu patratul valorilor efective, aceasta deoarece forțele de volum și suprafață sînt proporționale cu patratul intensității câmpului ultrasonor.

Particula de metal lichid sau euvolichid sollicitată la tracțiune F_t pe direcție liniilor câmpului ultrasonor și la compresiune F_c pe direcții perpendiculare pe aceasta, se deformează elastic (fig.2.3.4). Aceștia li se opun forțele de coeziune ale materialului.

Cum forțele de coeziune moleculare, chiar în fază lichidă, sînt mai mari decît forțele de tracțiune sau compresiune datorate câmpului ultrasonor, particula nu se poate fragmenta.

În același timp particula execută și o mișcare de rotație în jurul axei instantanee.

La un moment dat deci, particula este supusă pe o suprafață la sollicitarea de tracțiune, aceasta cînd suprafața respectivă este paralelă cu câmpul ultrasonor. După o rotire cu 90° a particulei, aceeași suprafață ajunge per-

pendiculară pe direcția cimpului și este supusă efortului de compresivune.

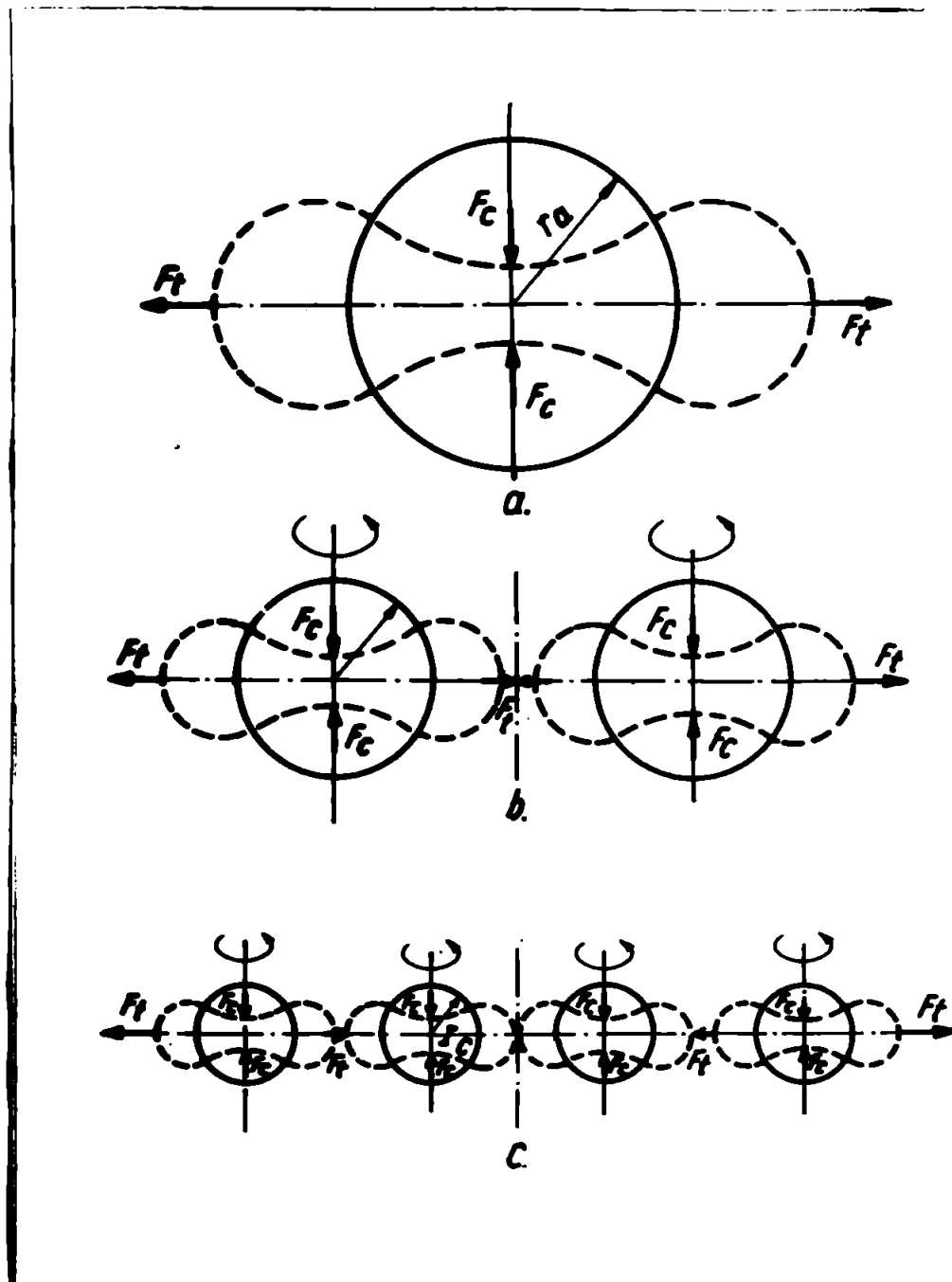


Fig. 2.3.4. Mecanismul fragmentării particulelor de metal lichid sub acțiunea cimpului ultrasonor
a - fragmentarea unei particule
b - fragmentarea a două particule
c - fragmentarea a patru particule

În acest fel, fiecare suprafață a particulei va fi supusă periodic cînd la tracțiune, cînd la compresivune. Apare deci o mișcare pulsatorie a particulei, la volum constant, datorită deforării sale elastice sub acțiunea tensiunilor de tracțiune - compresivune.

Cînd pulsația proprie a particulei intră în rezonanță cu variația cimpului ultrasonetic, amplitudinea oscilați-

ilor crește mult și pot apărea fenomene de fragmentare a particulei (fig.2.3.4) în două particule de dimensiuni mai mici.

Fenomenul prezentat poate fi aplicat însă doar fazei lichide sau cvasilichide, caz în care, la rezonanță forțele generate de câmpul ultrasonic pot fi mai mari decât forțele de coeziune.

2.3.3. Influența oscilațiilor ultrasonore transversale asupra procesului de cristalizare a metalelor lichide

Se știe că procesul de cristalizare a unui metal sau aliaj începe odată cu apariția în fază sa lichidă a unor centre de cristalizare (particule mici de fază solidă) și creșterea treptată a volumului fazelor solide aparute.

În conformitate cu teoria lui Gibbs, procesul apariției unei faze este funcție de consumul de lucru mecanic pentru formarea interferențelor de separație dintre fețe [49].

Dintre parametri care dirijează și condiționează procesul de cristalizare cei mai importanți sînt : numărul "n" de centre de cristalizare ce apar în unitatea de volum și unitatea de timp, precum și viteza liniară v de creștere a cristalelor. Un număr mare "n" de centre de cristalizare și o viteză "v" mică de creștere a cristalelor conduce la apariția în materialul solidificat a unei granulații fine, deci la proprietăți mecanice superioare ale acestuia.

Numărul N de prănuți ce se formează într-un volum inițial V_0 de fază lichidă se poate exprima prin [6, 20] :

$$N = a \sqrt[4]{\frac{\sigma^2}{v^3} \cdot V_0} \quad (2.3.70)$$

în care a este un coeficient de proporționalitate.

De rîndul său numărul centrelor de cristalizare "n" ce se formează în fază lichidă, se poate exprima prin :

$$n = C \cdot e^{-\frac{\Delta\phi_k}{kT}} \cdot e^{-\frac{F}{kT}} \quad (2.3.71)$$

în care :

- C - constantă de proporționalitate
- $\Delta\phi_k$ - lucrul mecanic de formare a nucleului metalic solid de dimensiune critică

E - energia de activare necesară pentru trecerea atomului din fază lichidă în fază solidă

K - constanta lui Boltzmann

T - temperatura absolută

cu specificația că lucrul mecanic de formare a nucleului metalic solid de dimensiune critică se poate exprima :

$$\Delta\phi_k = \frac{A \cdot \sigma_{SL}^3}{\Delta T^2} \quad (2.3.72)$$

unde :

A este un coeficient funcție de forma nucleului metalic ce apare și caracteristicile termodinamice ale substanței ca : temperatura de topire, căldura latentă de topire, densitatea etc.

σ_{SL} - tensiunea superficială la separația fazelor solid-lichid

$T = T_t - T_0$ - subrăcirea metalului lichid la care a avut loc apariția centrelor de cristalizare (T_t - temperatura de topire a metalului și T_0 - temperatura de apariție a centrelor de cristalizare)

Centrele de cristalizare pot apărea direct în fază lichidă (apariție omogenă), fie pe particule solide existente în materialul lichid ca incluziuni solide străine metalului, incluziuni solide nedizolvate etc. (apariție eterogenă).

În cazul apariției eterogene a centrelor de cristalizare, lucrul mecanic de formare a acestora se poate exprima prin :

$$\Delta\phi'_k = \Delta\phi_k \cdot \frac{(2 + \cos\varphi)(1 + \cos\varphi)^2}{4} \quad (2.3.73)$$

în care este unghiul de sudare.

Se observă din (2.3.73) că la $\varphi = 0 \Rightarrow \Delta\phi'_k = 0$

În expresiile (2.3.70 - 2.3.73) se deduce că o reducere a tensiunii superficiale σ_{SL} , a unghiului de sudare φ și a energiei de activare E duc la creșterea numărului centrelor de cristalizare n și deci la formarea unui metal solid cu granulație fină.

La răcirea unui metal lichid într-o lingotieră se observă lângă pereții acesteia o zonă cu cristale fine, aciculare, urmată de o zonă cu cristale alungite, columnare și

apoi în axa lingoului cristale mai mari echiaxiale.

Apariția cristalelor echiaxiale este legată de formarea în fața frontului de cristalizare a unei zone de topitură subrăcită (cu caracter termic sau de concentrație). Gradul de subrăcire influențează substanțial forma exterioară a grăuntelui. La grade de subrăcire mici (ΔT - mic) apar cristale mai mult sau mai puțin conturate, cu tensiuni superficiale mici, iar la grade de subrăcire mari se obțin cristale de formă dendritică.

În cazul caracterului dendritic al cristalizării (grade de subrăcire mare) la limite grăunților se creează acumulări ale incluziunilor.

Este deci de dorit ca cristalele ce apar să fie echiaxiale, căci ele duc la un solid practic izotrop macroscopic și relativ omogen chimic.

Prin introducerea oscilațiilor ultrasonore în masa topiturii metalice se modifică pragul de subrăcire a topiturii și al frontului de cristalizare, ceea ce îngreunează formarea structurii dendritice, favorizând apariția structurii cu cristale echiaxiale [20].

Cum în stratul de separație dintre cele două corpuri, care se sudază prin presiune în câmp ultrasonor apare și faza lichidă sau cvasilichidă și cum acest strat de metal topit are o grosime relativ redusă, deci un contact specific de suprafață mare, apariția structurii echiaxiale este probabilă, fenomenul fiind influențat și de fragmentarea particulelor de metal lichid sub acțiunea undelor ultrasonore.

Se poate deci afirma că acțiunea undelor ultrasonore influențează modul de cristalizare a unui metal lichid prin următoarele fenomene :

- Prin reducerea valorii medii a gradientilor se reduce structura columnară și se amplifică structura echiaxială a cristalelor din grăunți cristalini, obținându-se o structură mai omogenă.

- Repartiția cantitativă a fazelor, gradul de mărunțire și repartiția reciprocă devin mai omogene.

- Mărunțirea fazei lichide în particule de dimensiuni mai mici, ceea ce conduce la o granulație mai fină.

- Procesele de licațiune se micșorează, deci apariția unor incluziuni mari mai puțin probabile.

- Repartizarea spațială a incluziunilor mai omogenă.

- O degajare mai accentuată a gazelor în fază lichidă

Capitolul 3

MECANISMUL SUDĂRII PRIN PRESIUNE ÎN CIMP ULTRASONOR A TABLELOR DIN ALUMINIU

Literatura de specialitate abordează sporadic problema sudării prin presiune în cimp ultrasonor, resumindu-se a prezenta instalații și regimuri de sudare pentru cazuri particulare, fără a face - cu mici excepții - referiri concrete asupra mecanismului procesului de formare a îmbinărilor sudate. Se abordează unele aspecte ale procesului de sudare fără însă a privi problema în ansamblul ei sau a se elucidă interdependența fenomenelor ce concoură la realizarea îmbinării sudate.

3.1. Stadiul actual al cunoștințelor despre sudarea prin presiune în cimp ultrasonor

Sudarea prin presiune în cimp ultrasonor se consideră a fi o sudare la rece, realizată fără material de adăos la o temperatură mult inferioară temperaturii de topire a materialului respectiv. [3, 34, 36, 38, 52, 54, 61, 63]. Îmbinarea sudată se caracterizează prin lipsa zonei influențate termic, caracteristică procedeelor de sudare prin topire și deci nu apare o modificare a proprietăților mecanice și fizice ale materialului în punctul sudat și în jurul acestuia.

În majoritatea lucrărilor de specialitate [2, 49, 52, 58, 89, 124] procesul de formare al îmbinărilor sudate prin presiune în cimp ultrasonor se consideră a fi un proces foarte complex, influențat de o multitudine de fenomene, care corolate concoură la realizarea îmbinării sudate.

În prima fază, sub acțiunea undelor ultrasonore și în prezența forței statice de apăsare se produce distrugerea peliculelor de oxizi aflate pe suprafețele de contact, precum și a particulelor de impurități și gaze adsorbite de suprafețele componentelor de sudat. În continuare, în zona de acțiune a cimpului, datorită deplasării reciproce a suprafețelor celor două componente apare o modificare a micro-

reliefului și se formează așa numitele "poduri de prindere" sau microjuncțiunilor. Formarea microjuncțiunilor este posibilă pe de o parte datorită dezvoltării unei anume cantități de căldură, datorită fenomenului de frecare; pe de altă parte, se consideră că materialul suferă o plastifiere importantă sub acțiunea undelor ultrasonore. După unii autori [2, 76] nu este exclusă apariția, pe suprafețele în contact a unei faze lichide sau evisilichide de mare plasticitate.

Această fază lichidă sau evisilichidă se caracterizează printr-o mare mobilitate și contribuie atât la îndepărtarea și gruparea oxizilor și impurităților existente pe suprafețele de îmbinat, cât și la umplerea porilor, neregularităților de pe suprafețele în contact a celor două componente permițând realizarea unui contact intim, la nivelul parametrilor rețelei cristaline unde pot acționa forțele de coeziune.

Temperaturile instantanee ce sînt atinse în diferitele regiuni ale suprafețelor în contact nu se pot determina cu precizie [52] datorită faptului că variația temperaturilor este foarte pronunțată în prima fază a procesului de sudare (aprox. 1/100 s), iar termocuplele prezintă o inerție destul de mare. Pe baza modificărilor structurale și de caracteristici fizice și mecanice, unii autori [3, 38] presupun că la sudarea sub presiune în câmp ultrasonor se ating temperaturi apreciabile în zona punctului sudat. Se apreciază [3] că în cazul sudării aluminiului se atinge chiar temperatura de topire a acestuia, grosimea acestuia fiind însă mică ($< 10 \mu\text{m}$). S-a încercat chiar [54] explicarea mecanismului de formare a îmbinărilor sudate în puncte prin presiune în câmp ultrasonor prin analogia proceselor ce apar cu fenomenele ce se dezvoltă în cazul apariției gripașului într-o cuplă de frecare uscată.

Numeroase cercetări experimentale efectuate atestă apariția în zona îmbinării sudate, a fenomenelor de difuzie și recrystalizare a materialului [10, 30, 37]. Accentuarea apariției fenomenelor de difuzie se presupune că se datorează, pe de o parte, frecării uscate ce apare la suprafața de separație dintre cele două componente, iar pe de altă parte, apariția în aceste zone a unei concentrații mari de defecte ale rețelei cristaline (vacanțe) datorită acțiunii undelor ultrasonice. Acumularea defectelor rețelei cristaline în zona îmbinării sudate se datorează însă și deformării plastice pronunțate pe ca-

re o suportă cele două componente în zona îmbinării. Cercetările experimentale întreprinse atestă, în cazul sudării prin presiune în câmp ultrasonor a foililor de Al și Cu, existența unei zone de difuzie pe o adâncime de $5\mu\text{m}$ [52]:

În concluzie se poate afirma că mecanismul de formare a îmbinării sudate la sudarea prin presiune în câmp ultrasonor îl formează un complex de fenomene distincte, care se interpătrund și se intercondiționează, toate acestea fiind direct influențate de acțiunea undelor ultrasonore asupra materialelor metalice. Acțiunea undelor ultrasonore asupra modului de comportare a materialelor metalice se poate rezuma la următoarele fenomene :

- datorită fenomenului de frecare uscată între suprafețele în contact și a fenomenului de cavitație sînt distruse și îndepărtate straturile de oxizi și impurități, fiind eliminate și gazele dizolvate în straturile superficiale de metal din planul de separație a celor două componente ;

- absorbția energiei ultrasonore de către microrelieful suprafețelor în contact și datorită frecării uscate încălzirea locală și rapidă a acestuia la temperaturi superioare temperaturilor de recristalizare, chiar la valoarea temperaturii de topire ;

- creșterea gradului de deformabilitate și ușurarea procesului de deformare plastică a zonelor de îmbinat ;

- activarea și accelerarea proceselor de difuzie și autodifuzie ;

- realizarea unei redistribuiri a materialului în zona îmbinării sudate, datorită fenomenelor de curgere viscoasă, a autodifuziei volumice și a tensiunilor superficiale.

Calitatea îmbinărilor sudate prin presiune în câmp ultrasonor depinde în mare măsură de o serie de mărimi și condiții de realizare practică a îmbinării. În concordanță cu ipotezele existente privind mecanismul de formare a îmbinărilor sudate prin presiune în câmp ultrasonor, parametri regiunilor de sudare pot fi clasificați în trei mari grupe :

- parametri constructivi ai utilajului de sudare utilizat sau parametri acustici,

- parametri tehnologici principali,
- parametri tehnologici secundari.

3.1.1. Influența parametrilor acustici asupra calității îmbinărilor sudate prin presiune în câmp ultrasonor

Condițiile acustice concrete de realizare a îmbinărilor sudate influențează considerabil procesul de formare al acestora, deci implicit și calitatea lor.

Principali parametri acustici ai procesului de sudare, care determină condițiile de transmitere a energiei ultrasonore îmbinării sudate sînt :

- tipul oscilațiilor ultrasonore,
- frecvența oscilațiilor ultrasonore,
- amplitudinea vibrației,
- forma și dimensiunile sonotrodului,
- forma și dimensiunile corpului ajutator.

În marea majoritate a instalațiilor industriale de sudare existente aceste mărimi sau parametri au valori constante, bine determinate și în general nu pot fi modificate.

Diferitele condiții acustice pot fi create prin acționarea asupra componentelor de îmbinat cu diferite tipuri de oscilații ultrasonore, longitudinale, transversale, de compresiune sau de încovoiere, a căror excitare se realizează prin diferite execuții, sisteme constructive ale sistemului acustic (fig.3.1.1)

În literatura de specialitate se relevă faptul că din punct de vedere al randamentului global de transmitere a puterii acustice în zona de sudat se recomandă utilizarea undelor ultrasonore transversale la sudarea materialelor metalice [65]. Dacă se consideră că rezistența îmbinărilor sudate realizate cu ajutorul undelor ultrasonore transversale este egală cu rezistența materialului de bază $\sigma_{T15} / \sigma_{TMB} = 100\%$, atunci în cazul utilizării undelor ultrasonore longitudinale acest raport are aproximativ valoarea de 60%, iar pentru cazul utilizării vibrațiilor de încovoiere de 40%.

În cazul în care se necesită utilizarea unor puteri acustice mari, ce nu pot fi obținute cu un singur transducător de energie acustică, se utilizează sisteme oscilante

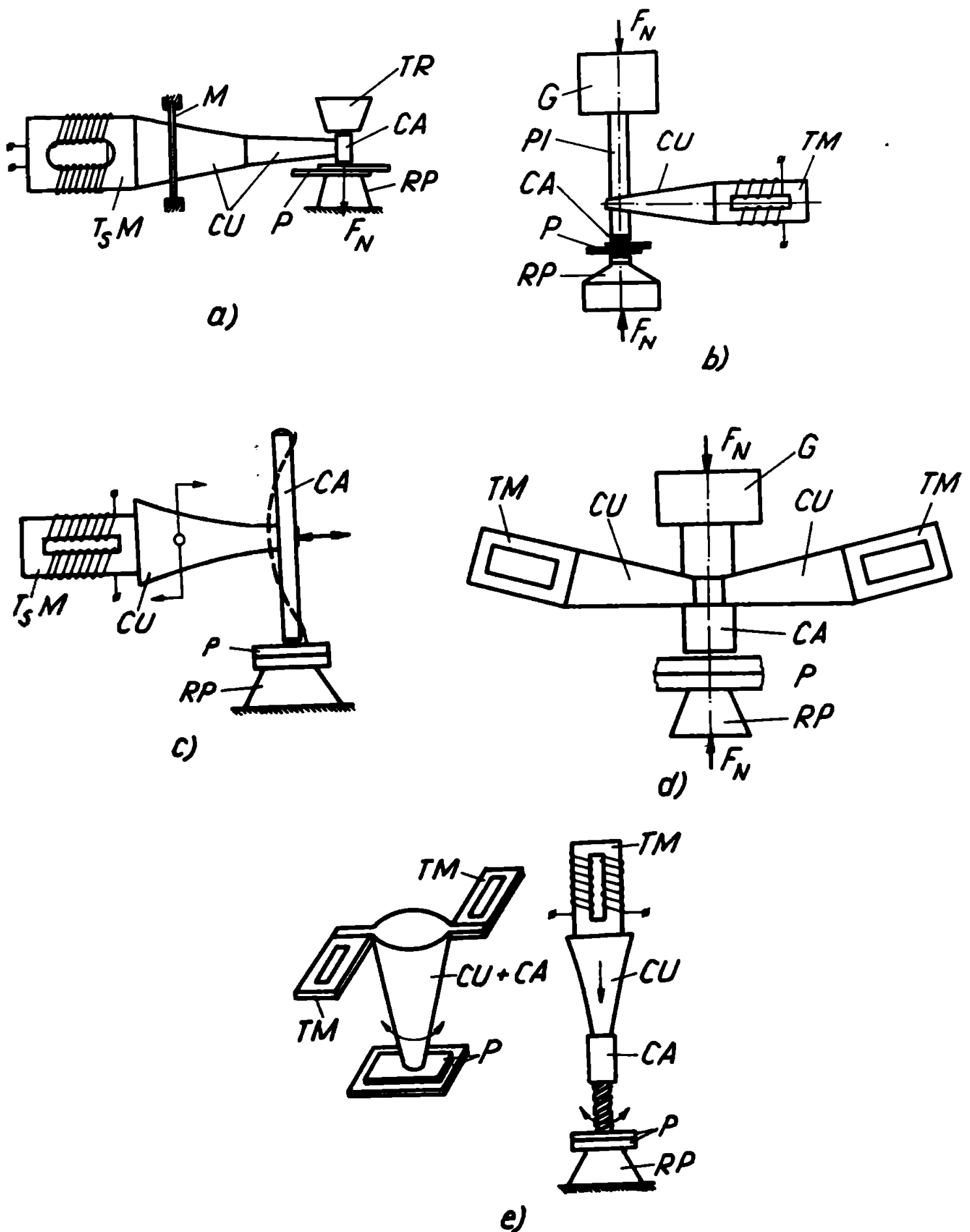


Fig. 1.1. Tipuri constructive de sisteme acustice
 a - cu oscilații longitudinale
 b - cu oscilații transversale
 c - cu oscilații de torsiune
 d - cu oscilații de încovoiere

complexe (fig.3.1.2) la care se provoacă oscilații de încovoiere cu ajutorul a două sau mai multe transductoare. Concen-

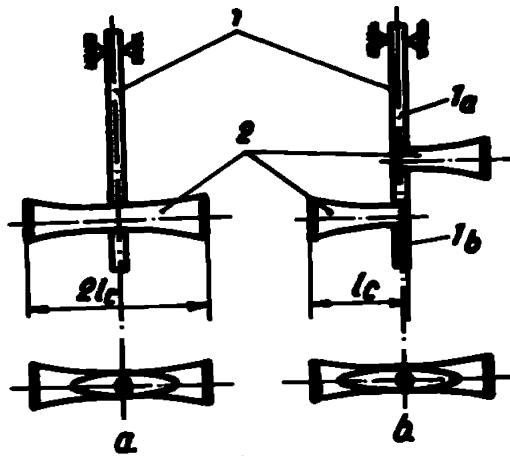


Fig.3.1.2. Sistem oscilant complex cu oscilații de încovoiere

- 1 - bara de încovoiere
- 2 - concentratoare de oscilații ultrasonore

tratezele pot fi montate într-un ventru și legate electric pentru oscilare în fază (fig.3.1.2,a) sau montate în două ventru vecine (fig.3.1.2,b) și legate în fază [36].

Cu cât mai mare este frecvența vibrațiilor ultrasonore, cu atât mai mică va fi amplitudinea vibrației la menținerea constantă a puterii consumate. datorită acestei corelații se poate afirma că pentru

un anumit material ce urmează a se suda există o frecvență anumită la care se va obține o calitate optimă a îmbinării sudate. Prin urmare, la alegerea frecvenței oscilațiilor ultrasonore trebuie să se țină seama de proprietățile fizico-chimice și mecanice ale materialului sau a perechii de materiale ce se sudează. Modificările structurale și a proprietăților fizice vor influența probabil caracterul de absorbție a energiei acustice în îmbinarea sudată și vor avea o influență și asupra gamei de frecvențe optime.

Cercetările experimentale efectuate [3, 49, 65, 58] atestă faptul că în cazul sudării materialelor metalice sub presiune în câmp ultrasonor frecvențele vibrațiilor ultrasonore transversale utilizate sînt determinate exclusiv de dimensiunile componentelor ce se sudează. Astfel pentru sudarea elementelor de grosimi mai mari de 0,1 mm se utilizează frecvențe cuprinse în limitele 19...21 kHz, iar pentru microsudura ultrasonoră, elemente de grosimi mai mici de 0,1 mm se utilizează frecvențe cuprinse în gama 40...120 kHz.

În mod uzual, funcție de tipul transductoarelor utilizate, utilajele de sudare sub presiune în câmp ultrasonor destinate sudării foliilor de grosimi mai mari de 0,1 mm utilizează frecvența de 20 kHz cu posibilități de reglare a aces-

teia în jurul valorii amintite.

Un element important la sudarea prin presiune în câmp ultrasonor îl constituie asigurarea frecvenței de rezonanță pentru întregul sistem oscilant format din transductor, concentrator și sonotrod și componentele de sudat. Analizând cauzele care conduc la o absorbție maximă a energiei ultrasonore și fenomenele care determină formarea îmbinării sudate se observă că acestea au trăsături comune, de aceea pentru a se realiza o absorbție cât mai eficientă a energiei ultrasonore de către îmbinarea sudată, trebuie asigurată frecvența de rezonanță a sistemului oscilant pe toată durata de realizare a îmbinării. Pe măsura formării îmbinării sudate, impedanța acesteia introduce modificări proprii în frecvența de rezonanță a sistemului oscilant și ca urmare a acestui fapt, se reduce cantitatea de energie acustică transmisă zonei de îmbinat.

Pentru ca procesul de sudare să fie optim trebuie consumată o anumită cantitate de energie acustică, care se introduce în zona îmbinării sudate. Frecvența și amplitudinea vibrațiilor sonotrodului determină cantitatea de energie transmisă zonei de material în contact la o anumită valoare a sarcinii statice de apăsare. Caracterul distribuției amplitudinii vibrațiilor sonotrodului reflectă procesele ce au loc în suprafața de contact a materialelor de sudat și influențează considerabil asupra mecanismului de formare a îmbinării sudate având o influență importantă și asupra calității acesteia.

Una din problemele de bază ce se pune la sudarea prin presiune în câmp ultrasonor constă în programarea și dozarea corespunzătoare a amplitudinii vibrațiilor sonotrodului în procesul de formare a îmbinării sudate. Dependența dintre amplitudinea oscilației ultrasonore și puterea acustică introdusă în zona punctului sudat în funcție de timp, pentru valori diferite ale forței statice de apăsare $F_1 \gg F_2$ se prezintă în figura 3.1.3 [20, 65]. Se observă că în mod practic amplitudinea vibrației ultrasonore a sonotrodului rămâne constantă în timpul procesului de sudare.

Pentru a se realiza însă transmiterea energiei acustice zonei îmbinării sudate este necesar ca forța statică de

apăsare să se determine la valoarea optimă a acesteia.

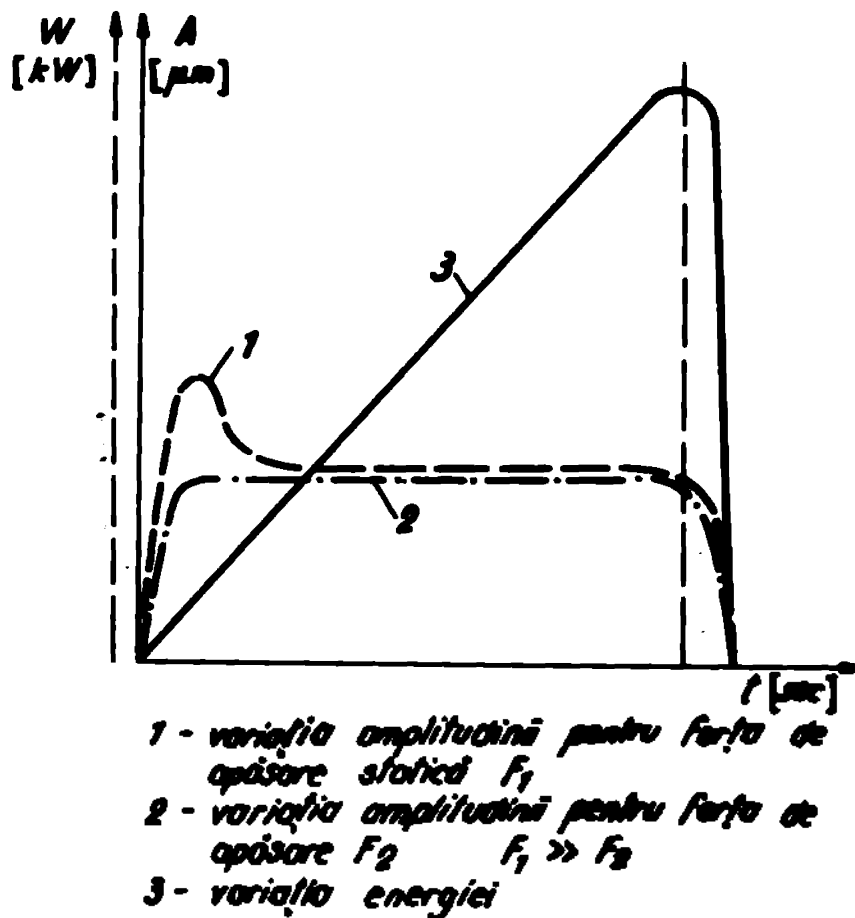


Fig.3.1.3. Dependența dintre amplitudinea oscilației sonotrodului, energia introdusă și timpul de sudare

- 1,2 - variația amplitudinii oscilației sonotrodului la forța statică de apăsare $F_1, F_2; F_1 \gg F_2$
3 - variația energiei

Cercetările recente [61, 49] demonstrează că pentru îmbunătățirea calității îmbinărilor sudate prin presiune în câmp ultrasonor se utilizează sisteme oscilante, care permit programarea amplitudinii sonotrodului în timpul procesului de sudare, ceea ce duce la o dozare exactă a energiei acustice transmise punctului sudat.

În prima fază a procesului de sudare, etapa de formare a contactului fizic între piesele de îmbinat, amplitudinea de oscilație a sonotrodului trebuie să aibe valoarea maximă pentru a asigura un contact fizic de calitate între cele două

componente, ceea ce contribuie la îmbunătățirea procesului de absorbție a energiei acustice.

În etapa a doua, după crearea contactului fizic, etapa de formare a nucleului îmbinării sudate, suprafața de contact dintre cele două elemente se mărește datorită deforțării plastice suferite. Pentru a se evita ruperea punților de legătură deja formate se recomandă reducerea amplitudinii oscilațiilor sonotrodului cu 50% în raport cu valoarea inițială. Întreaga energie acustică este consumată în acest caz pentru lărgirea nucleului punctului sudat și pentru accelerarea proceselor difuzionale [30, 34, 65].

În ultima fază, nucleul punctului sudat fiind format și având dimensiunea aproximativ egală cu cea a îmbinării sudate, pentru a se accentua procesul de absorbție a undelor ultrasonore de către îmbinarea sudată pentru consolidarea acesteia se recomandă mărirea amplitudinii de oscilație a sonotrodului cu 25% față de valoarea inițială a acestuia. Acest mod de programare a amplitudinii de oscilație a sonotrodului în timp pentru realizarea unei îmbinări sudate prin presiune în câmp ultrasonor se prezintă în figura 3.1.4.

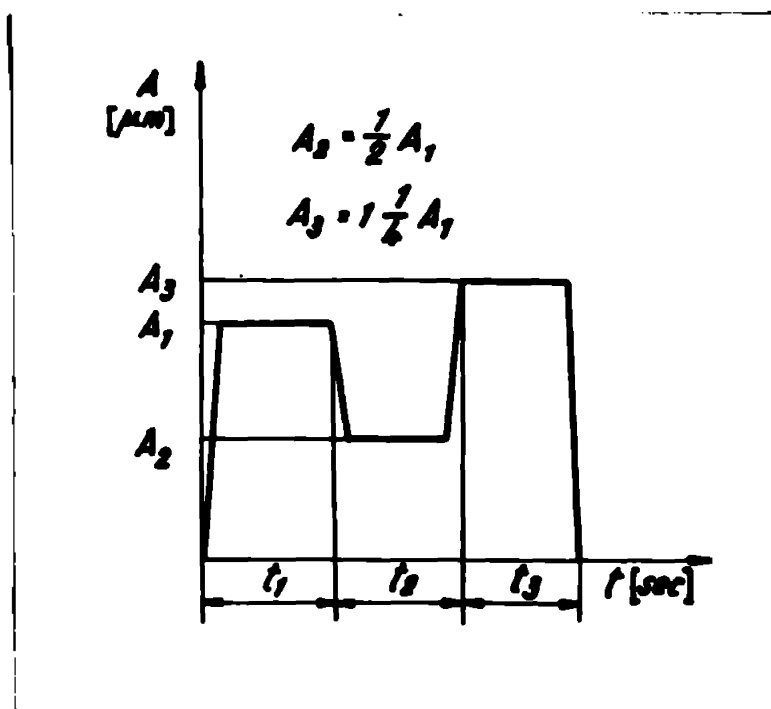


Fig. 3.1.4. Cilograma de variație a amplitudinii de vibrație a sonotrodului într-un ciclu de sudare

Astfel variația amplitudinii oscilației sonotrodului conform figurii 3.1.4 permite realizarea unui transfer optim a energiei acustice în zona îmbinării sudate, care reflectă

cinetica mecanismului de formare a acesteia.

Sonotrodul, componentele de sudat și corpul ajutător (fig.3.1.5) sînt elementele care închid circuitul oscilant în cazul sudării prin presiune în câmp ultrasonor.

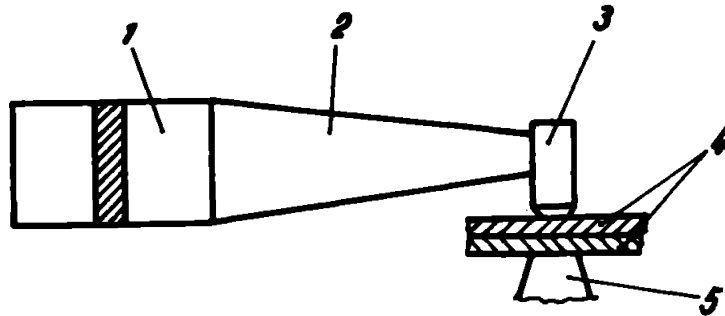


Fig.3.1.5. Elementele circuitului oscilant la sudarea prin presiune în câmp ultrasonor
1 - transductor
2 - concentrator
3 - sonotrod
4 - componentele de îmbinat
5 - corp ajutător

Forma și dimensiunile sonotrodului și a corpului ajutător, precum și materialul din care sînt confecționate aceste elemente determină condițiile specifice de transmitere a energiei oscilante acustice zonei îmbinării sudate. Geometria zonelor active ale sonotrodului și corpului ajutător trebuie să asigure o distribuție optimă a tensiunilor și presiunii specifice în zona îmbinării sudate.

Diferite forme uzuale ale capetelor active ale sonotrodului și corpului ajutător se prezintă în figura 3.1.6 [37]

Zona activă a sonotrodului și a corpului ajutător poate avea o formă circulară sau dreptunghiulară. Înălțimea zonei active a sonotrodului "1" se determină din condițiile acustice, în așa fel, ca suprafața acestuia să corespundă unui ventru, obținându-se astfel o valoare maximă a amplitudinii vibrației ultrasonice ce se transmite materialului de sudat.

Rezultatele experimentale cele mai favorabile se obțin utilizându-se geometrii ale suprafețelor active ale sonotrodului de forma a_2 și a_3 , iar pentru corpul ajutător de forma b_2 (fig.3.1.6) [37]. Aprecierea calității îmbinărilor sudate s-a făcut pe baza rezistenței mecanice la tracțiune (fig.3.1.7).

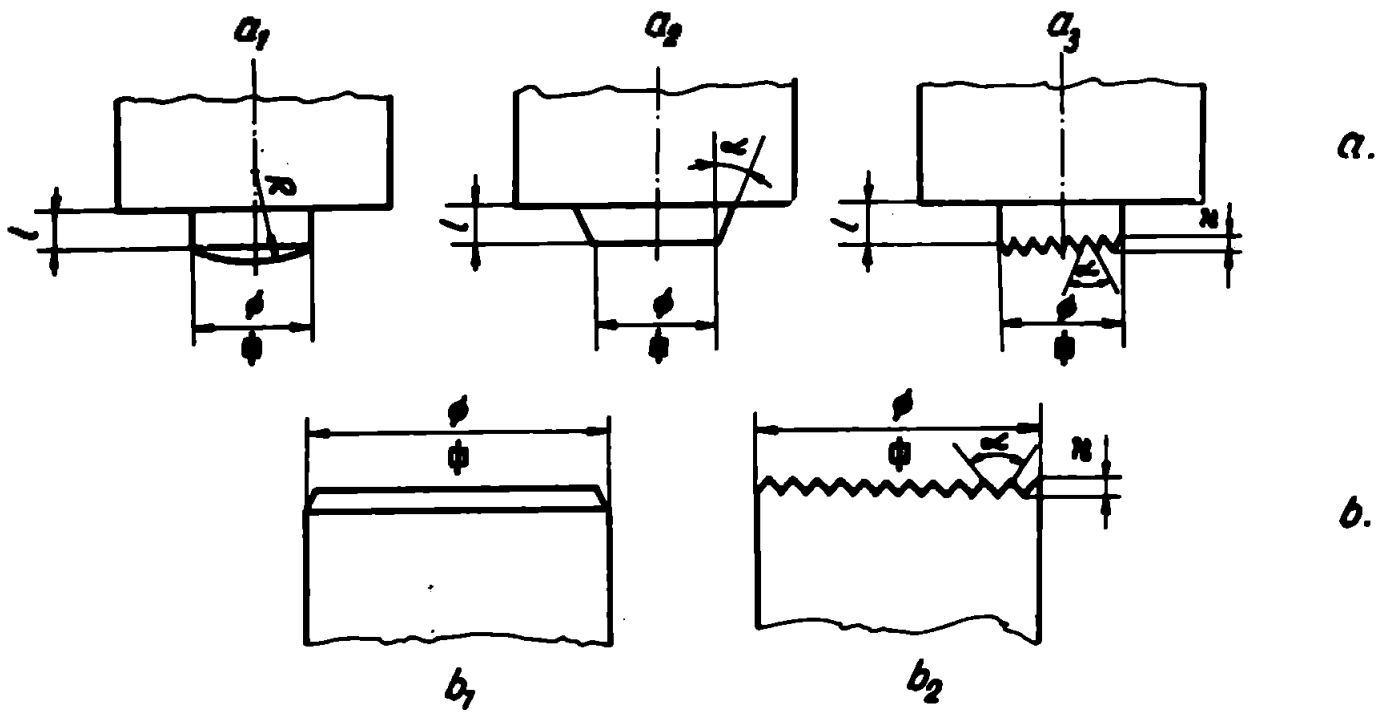


Fig.3.1.6. Geometria zonei active a sonotrodului a și a corpului ajutor b

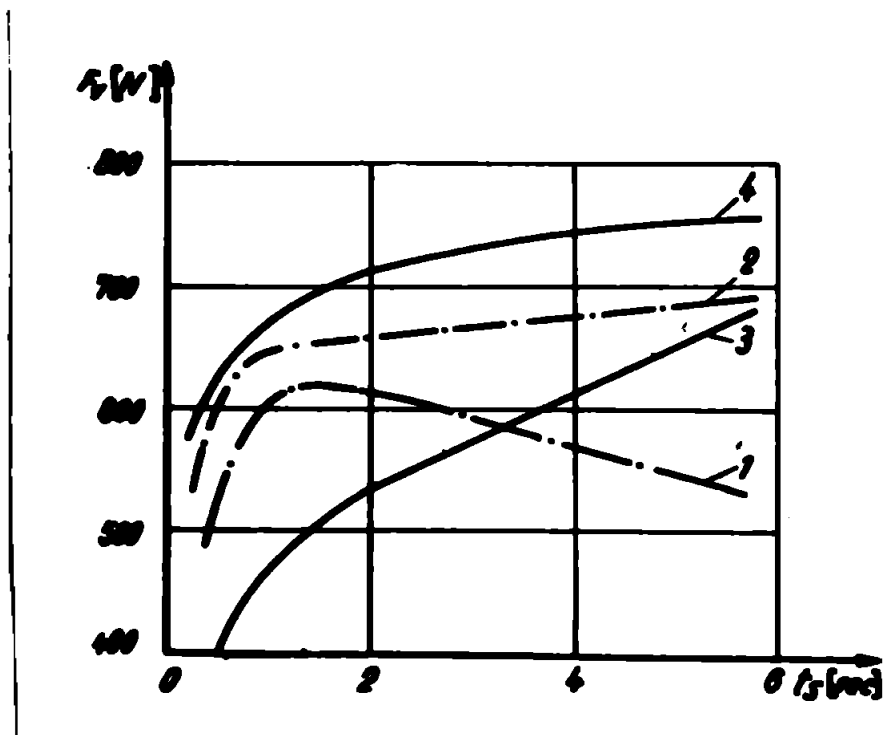


Fig.3.1.7. variația forței de rupere pentru diferite tipuri de sonotrod și corp ajutor
 Puterea - 800 W; frecvența 21,6 kHz
 Forța statică - 950 N
 Curba 1 - sonotrod a_1 - C.A. b_1
 Curba 2 - sonotrod a_2 - C.A. b_1
 Curba 3 - sonotrod a_1 - C.A. b_2
 Curba 4 - sonotrod a_2 - C.A. b_2

Acest lucru se explică prin faptul că geometria specifică suprafețelor active ale sonotrodului a_2 și a_3 , precum și a corpului ajutător b_2 asigură pe de o parte transmiterea integrală, fără pierderi datorate trecerii piesă-sonotrod și piesă - corp ajutător, a energiei sonetice, iar pe de altă parte se realizează o deformare plastică relativ mare fără pericolul apariției unor secțiuni relativ critice. Rezultă că în procesul de sudare prin presiune în câmp ultrasonor utilizarea geometrii active de formele a_1 , a_2 și b_2 asigură o distribuție optimă a presiunii specifice a tensiunilor în zona îmbinării sudate.

În procesul de sudare sub presiune în câmp ultrasonor apare des fenomenul de "lipire" a pieselor de sudat de zona activă a sonotrodului și corpului ajutător. Această lipire sau microsuduri conduc în timp la uzare sonotrodului și a corpului ajutător, uzarea avînd un caracter de coroziune.

Datorită faptului că în procesul de sudare, datorită condițiilor specifice, se realizează și o încălzire apreciabilă a suprafeței de contact a sonotrodului, iar sonotrodul, piesele de sudat și corpul ajutător sînt elementele care încaie circuitul acustic, în zonele de contact sonotrod-piesă și piesă-corp ajutător se creează condiții favorabile pentru apariția unor forțe electrostatice de natură termică și o difuzie electrică a materialului în contact. [10, 65] Din cauza că, contactul real al sonotrodului și corpului ajutător cu materialul componentelor de îmbinat este mult mai mic decît suprafața nominală de contact dintre acestea, și poate considera că densitatea termocurentului ce străbate aceste suprafețe este suficientă pentru a produce migrația difuzivă a elementelor din aliajul sonotrodului corpului ajutător și ale materialului de îmbinat, aflate în contact. Apare astfel posibilitatea formării de microsuduri prin difuzie electrică, care conduc la uzura relativ rapidă a sonotrodului și corpului ajutător.

În cele prezentate, rezultă că asigurarea stabilității sonotrodului și a corpului ajutător este deosebit de importantă în analiza proprietăților materialului de sudare și conectivității acestora și materialului elementelor de îmbinat. În acest sens, la alegerea materialelor din care se confecționează sonotrodul și corpul ajutător trebuie să se țină seama de fap-

tul ca acestea să nu cîdere posibilitatea de formare a legăturilor intermetalice.

3.1.2. Influența parametrilor tehnologiei asupra calității îmbinărilor sudate prin presiune în câmp ultrasonor

Parametri tehnologiei principali, care influențează procesul de sudare prin presiune în câmp ultrasonor sînt :

- puterea electrică transmisă transductorului magnetostrictiv sau piezoelectric ;
- timpul de sudare, respectiv timpul de acționare a vibrațiilor ultrasonore ;
- forța statică de apăsare ;
- timpul de refulare sau timpul în care forța statică de apăsare mai acționează după întreruperea mișcării de vibrație ultrasonoră a sonotrodului.

Se consideră că cei patru parametri prezentați, constituie parametri principali ai regimului de sudare pentru că, pe de o parte, influența lor asupra procesului de formare a îmbinărilor sudate, deși și asupra calității acestora este hotărîtoare, iar pe de altă parte, deoarece acești parametri reprezintă mărimile ce pot varia la unilajele de sudare existente.

Alegerea puterii electrice de alimentare a transductorului se face funcție de natura, proprietățile fizice, chimice și funcție de grosimea componentelor ce sînt sudate. Se remarcă că este faptul că diferențele între puterea consumată de generatorul ultrasonor de la rețea și puterea acustică sau mecanică transmisă zonei îmbinării sudate există o diferență mare, datorită pierderilor ce apar. Aceste pierderi se pot formula astfel [4, 20, 49] :

- pierderi în generatorul ultrasonor, ce se caracterizează prin randamentul acestuia ;
- pierderi de energie în transductor, caracterizat prin randamentul electroacustic de transformare a energiei electrice în energie mecanică η_{ea} și prin randamentul de transformare a energiei mecanice în energie acustică η_a .

$$\eta_{ea} = \eta_{ea} \cdot \eta_a \quad (3.1.1)$$

- pierderi de energie în elementele ce transportă și focalizează energia în zona de îmbinat, caracterizate prin randamentul concentratorului η_c și cel al sonotrodului η_s .

Prin urmare se poate aprecia global randamentul utilizării energiei consumate de la sursă prin relația :

$$\eta = \eta_g \cdot \eta_{ea} \cdot \eta_c \cdot \eta_s \quad (3.1.2)$$

Din [49, 65] randamentele parțiale pot lua diferite valori, în funcție de tipurile și soluțiile constructive adoptate. Astfel, randamentul generatorilor de ultrasunete cu semiconductoare și de puteri nominale de ieșire de 0,6... 1,6 kW este $\eta_g = 60\%$, iar randamentul electroacustic poate lua valori de $\eta_{ea} = 60...80\%$

Și aici, ca în cazul tuturor sistemelor oscilante, randamentul maxim, deci pierderile de energie minime, se obțin atunci când întreg sistemul este în rezonanță.

În timpul procesului de sudare în masă, datorită variației rezistenței active a sarcinii ce are loc în procesele ce au loc, apare o dereglare a reglajului de rezonanță a sistemului oscilant. Din acest motiv, noile utilaje de sudare sub presiune în câmp ultrasonor sînt prevăzute cu generatoare de ultrasunete cu reglare automată a frecvenței de rezonanță.

O deosebită importanță teoretică și practică o constituie evaluarea calitativa a consumurilor energetice în diferitele zone ale îmbinrilor sudate prin presiune în câmp ultrasonor, consumuri ce pot fi explicitate prin pierderile de putere datorate diferitelor fenomene ce aparură la realizarea îmbinrilor sudate. Pentru evaluarea acestora se apelează la legile ce guvernează procesele de deformare plastică, la legile clasice ale dinamicii corpului solid, precum și la fenomenele ce se manifestă în materialele metalice sub acțiunea unui câmp de vibrații ultrasonore.

Se consideră că puterea transferată din zona de formare a îmbinrilor sudate se utilizează în mod diferențiat la activarea următoarelor fenomene [65] :

- deformarea plastică a materialului în zona îmbinării sudate și apariția fenomenului de cîmp de a acestuia sub influența stării complexe de tensiune ;

- fenomenul de relaxare a vibrațiilor ultrasonore în masa metalică ;

- apariția fenomenului de rezonanță ;
- fenomenul de histereză statică.

Cantitatea de energie consumată pentru asigurarea condițiilor de curgere elasto-plastică a materialului din zona îmbinării sudate se poate determina cu relația :

$$w_p = P_A^2 \cdot \frac{1}{\kappa_0} \cdot t \quad (3.1.3)$$

în care :

- P_A - este valoarea activă a presiunii acustice
- κ_0 - este viscozitatea liniară sau rezistența reală de deformare pentru materialul respectiv din relația generalizată a lui Newton
- t - timpul de sudare

Rezistența reală a deformației are un caracter nelinear. Nelinearitatea este mai pronunțată în apropierea limitei de curgere, zonă în care trece de la o săbe loc un salt al cantității de energie consumată.

Determinarea cantității de energie consumată pentru oricare din componentele deformației de relaxare se face conform relației generale :

$$w_r = 2 \tilde{W} \cdot f \cdot \sigma_e \cdot P_A^2 \cdot t = 2 \tilde{W} \cdot f \cdot \sigma_e^2 \cdot \frac{2 \tilde{W} f \cdot \tau_1 \cdot E_1'}{1 + (2 \tilde{W} \cdot f \cdot \tau_1)^2} \cdot t \quad (3.1.4)$$

în care :

- f - frecvența oscilațiilor ultrasonore ;
- σ_e - componenta cumulativă a cedării elastice complexe ;
- t - timpul de sudare ;
- $\tau_1 = E_1' \cdot d\beta_1$ - constanta de timp de relaxare ;
- E_1' - cea de-a "i"-a componentă a modulului de cedare elastică

$$E_1' = \frac{1}{\beta_1}$$

$d\beta_1$ - coeficientul dinamic al pierderilor mecanice pentru cea de-a "i"-a componentă a deformației prin relaxare.

Valoarea efectivă a presiunii dinamice se determină în condiția echivalenței de deformare de cedare într-un regim quasistatic și periodic :

$$P_A = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt} \quad (3.1.5)$$

unde p este valoarea instantanee a presiunii dinamice.

Energia consumată prin histereză statică, spre deosebire de celelalte consumuri energetice în zona punctului sudat depinde mai mult de temperatura acestuia și mai puțin de frecvența oscilațiilor și se exprimă prin relația :

$$W_h = (a \cdot E_t^2 + b \cdot E_t^3 + c) \cdot t \quad (3.1.6)$$

în care :

E_t - valoarea totală maximă a deforșării ;

a, b, c - constante

În ceea ce privește fenomenul de histereză statică pînă în prezent, nu există date experimentale suficiente pentru a clarifica fenomenul [65]. Se știe însă că energia consumată, datorată acestui fenomen, are o valoare redusă.

Expresia analitică a consumului energetic global datorat fenomenelor de frecare internă, de aer în materialele metalice sub influența undelor ultrasonore este :

$$W = 2\pi \cdot f \cdot V \cdot \left(\frac{\eta}{\kappa_0} + 2\pi \cdot f \cdot \dots \right) \quad (3.1.7)$$

în care $\eta = \sum_{i=1}^n \eta_i'$ - suma cedării elastice complexe a tuturor tipurilor de deforșări prin relaxare și viscozitate și reprezintă componenta de absorbție a undelor ultrasonore.

Din cele prezentate rezultă că nivelul de absorbție a energiei mecanice și ultrasonice în nucleul punctului sudat depinde atât de natura și proprietățile fizice ale materialului de sudat, cât și de puterea transferată în acea zonă.

În punct de vedere practic, deoarece utilajele de sudare existente prezintă limite de variație a puterii, forței statice de apăsare, timp de sudare și a amplitudinii vibrației, trebuie cunoscut faptul că produsul (forța statică de apăsare) x (amplitudinea vibrației) are o valoare limitată în funcție de puterea de încălzire a electrodului (Fig.3.1.8).

Dependența puterii electrice minime necesare realizării unei îmbinări sudate în funcție de proprietățile materialelor de sudat se poate exprima prin [66] :

$$P = K \sqrt{\eta_V^3 \cdot \dots} \quad (3.1.8)$$

in care :

- E - energia electrică a.s
- K - constantă
- H - duritatea sub microsarcină
- t - timpul de sudare

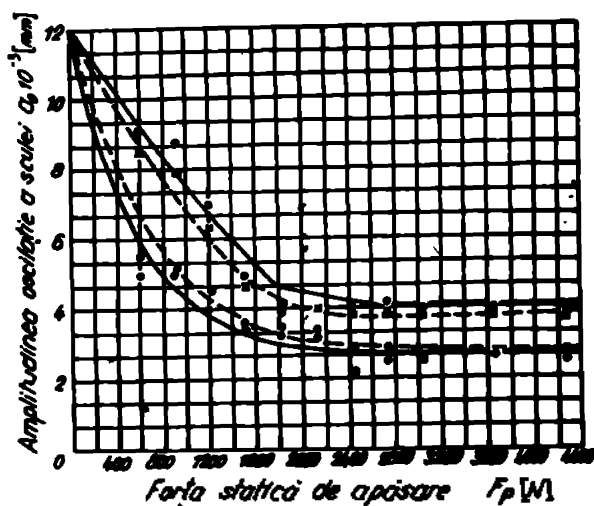


Fig. 3.1.8. Dependența dintre amplitudinea de oscilație a sonotrodului și forța statică de apăsare

pentru o evaluare rapidă, dar care necesită neapărat confirmarea pe baza cercetărilor experimentale, a energiei electrice minime necesare sudării unui anume material de o anumită grosime se poate utiliza și diagrama din figura 3.1.9 [98].

Dependențele s-au trasat pentru cazul utilizării utilajelor de sudare cu transductoare piezo-ceramice.

Formarea unei îmbinări sigure, de calitate, între materialele metalice

sudate prin presiune în câmp ultrasonor, depinde în mare măsură de particularitățile procesului de deformare plastică a componentelor de îmbinat, care la rândul său este condiționat de starea complexă de tensiune din zona îmbinării și de natura și proprietățile materialelor de sudat.

Starea complexă de tensiune în zona îmbinării sudate este condiționată de acțiunea simultană a forței statice de apăsare aplicată sonotrodului și a sarcinii dinamice al cărei caracter depinde de caracteristicile vibrațiilor ultrasonore transmise zonei de îmbinat, iar ambele depind de timpul de acționare al acestora.

Deformația plastică suferită de materialul componentelor de îmbinat, în prezența vibrațiilor ultrasonore condiționează formarea pe suprafața de îmbinat a unui relief caracteristic, în continuă schimbare. Acesta depinde în mare măsură de condițiile de încălzire, de caracterul forțelor ce

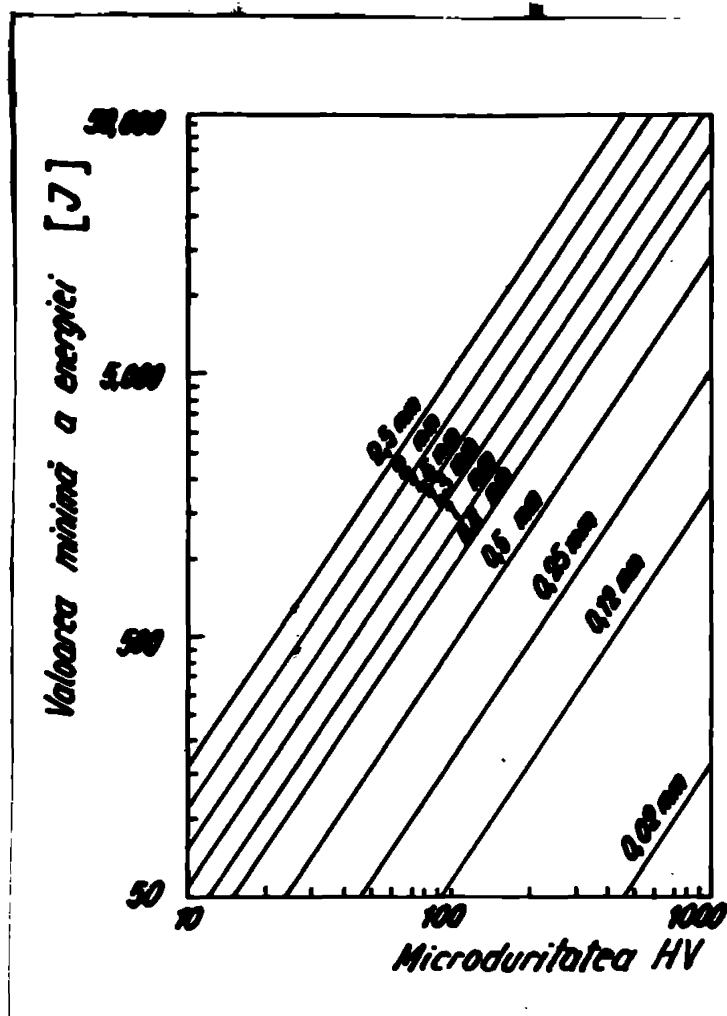


Fig.3.1.9. Dependența dintre natura materialului de sudat, grosimea acestuia și putere

țează considerabil calitatea îmbinărilor sudate.

Deoarece însă în procesul de sudare, viteza de deformare se poate determina doar indirect prin intermediul valorilor forței statice de apăsare F_s și a timpului de sudare t_s , în continuare se va prezenta separat influența fiecărui dintre acești parametri în parte asupra calității îmbinării sudate.

Cercetările experimentale efectuate [124] demonstrează că există pentru forța statică de apăsare, o valoare inferioară la care realizarea îmbinării sudate nu este posibilă. Pe de altă parte, depășirea unei anume valori a acesteia (F_s) duce la scăderea rapidă a rezistenței, deci a calității îmbinării sudate (fig.3.1.10)

Cert este faptul că valoarea forței statice de apăsare condiționează procesul de deformare plastică a suprafețelor de îmbinat și creează în această zonă a unui microrelief caracteristic.

acționează în zona de contact, precum și de timpul de acționare al vibrațiilor ultrasunore ce se materializează prin timpul de sudare t_s .

Dependența analitică între forța statică de apăsare F_s și timpul de sudare t_s se exprimă prin intermediul vitezei de deformare :

$$V_d = \frac{dE}{dt} \quad (3.1.9)$$

Valoarea reală a vitezei de deformare V_d a componentelor în procesul de sudare influențează

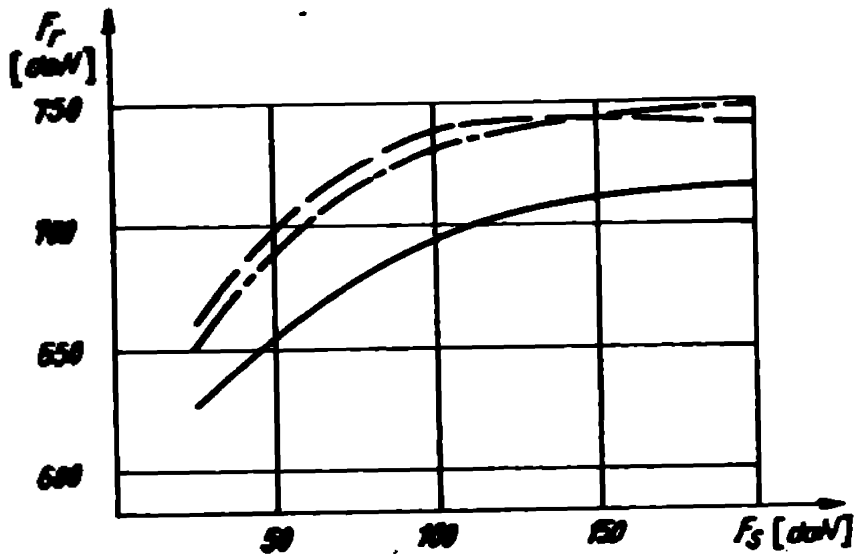


Fig. 3.1.10. Dependenta tensiunii de rupere de forța statică de apăsare

Forma și caracteristicile acestuia depind în mare măsură de condițiile specifice de încărcare, precum și de caracterul forțelor de acțiune în zona de contact.

Formarea reliefului caracteristic variabil pe suprafețele în contact a celor două elemente este condiționată de legile de forare și migrare a dislocațiilor în planele de

slăbire sub acțiunea stării complexe de tensiuni și a deformației plastice. Acest lucru contribuie în mare măsură la distrugerea straturilor de oxizi și impurități ce acoperă suprafețele materialelor de îmbinat, concomitent cu procesul de formare a geometriei variabile a suprafețelor de îmbinat procesul deformării plastice condiționează variația suprafeței reale de contact între cele două componente.

Timpul de sudare t_s este un alt parametru important la sudarea prin presiune în câmp ultrasonor. Prin analogie cu procedeele clasice de sudare acest parametru poartă denumirea de timp de sudare t_s , denumire improprie deoarece el determină doar timpul de acționare al undelor ultrasonore și nu timpul total necesar realizării unei îmbinări sudate.

La prezentarea mecanismelor și fenomenelor ce au loc la sudarea prin presiune în câmp ultrasonor și analizând dependența amplitudinii vibrației ultrasonore în funcție de timp (fig. 3.1.3) rezultă că, la sudarea prin presiune în câmp ultrasonor, în funcție de natură, proprietățile și grosimea materialului de sudat, precum și funcție de puterea acustică disponibilă, există o valoare optimă a timpului de sudare pentru care calitatea îmbinării sudate este optimă (fig. 3.1.11).

Reducerea timpului de sudare, păstrând constantă pute-

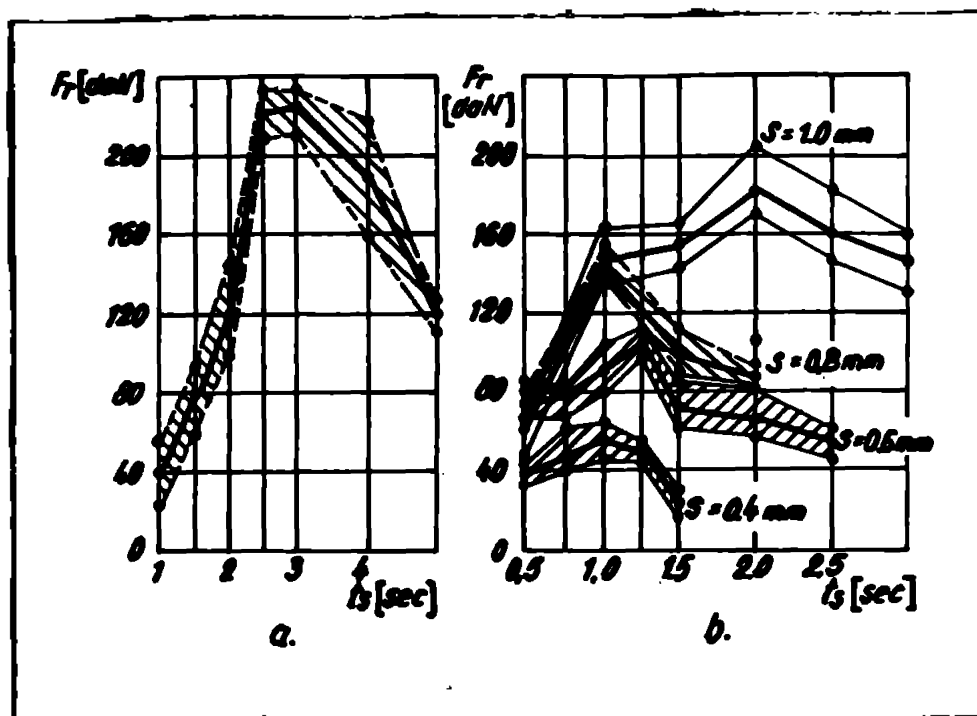


Fig. 3.1.11. Dependența forței de rupere a îmbinărilor sudate (F_r) funcție de timpul de sudare t_s
 a - cupru $s = 1 \text{ mm}$
 b - aluminiu

rea transmisă zonei de sudat prin intermediul sistemului acustic reduce rezistența îmbinărilor sudate. Acest lucru este condiționat de faptul că prin aceasta se micșorează amplitudinea de vibrație a sonotrodului, pe de o parte, iar pe de altă parte, se reduce cantitatea de energie transmisă zonei de îmbinat.

În același timp, prin reducerea timpului de sudat se acționează și asupra procesului de deformare și a distribuției tensiunilor la limita de interacțiune a elementelor aflate în contact, ceea ce la rândul său influențează procesul de formare a îmbinării sudate.

Totodată variația timpului de sudare influențează valoarea vitezei de deformare plastică a materialului și prin aceasta și calitatea îmbinării (fig. 3.1.12)

Experiențele demonstrează că, calitatea îmbinărilor sudate, exprimată prin intermediul rezistenței la forfecare a acestora, crește rapid în prima fază a sudării [35, 36]. Acest lucru se datorează creșterii suprafețelor active de contact și creșterii în această fază a punctilor de legătură (sudură) între cele două componente. În unele cazuri, în această fază apare și o deformare turbulentă a suprafețelor de contact.

În continuare are loc creșterea punctilor de legătură, a microsudurilor până la contopirea acestora.

Crescând în continuare timpul de sudare, rezistența îmbinării continuă să crească dar foarte puțin și acest lucru numai pe baza creșterii dimensiunilor transversale ale punctului sudat. Mărind în continuare timpul de sudare, cali-

tatea îmbinărilor scade, datorită stării de tensiuni din punctul sudat, care duce la apariția microfisurilor și care

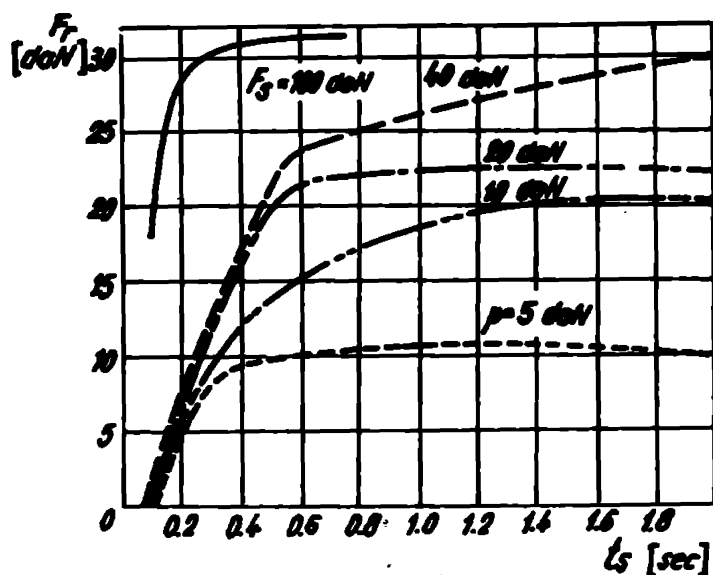


Fig. 1. Dependința forței de rupere F_r de timpul de sudare t_s pentru diferite valori ale forței statice de apăsare

se observă cu precădere la materialele scruicabile. Pe de altă parte, creșterea timpului de sudare în mod exagerat peste valorile optime ale acestuia poate conduce la ruperea nucleelor de interacțiune, a microcadurilor datorită valorii mari a amplitudinii vibrațiilor ultrasunore la limita de separație dintre cele două componente.

Parametrul tehnologic

secundar se consideră a fi gradul de curățire, respectiv de decapare a suprafeței materialului în zona de îmbinare. În ceea ce privește necesitatea curățirii, respectiv decapării suprafețelor zonelor de îmbinat înainte realizării îmbinărilor sudate părerile sînt împărțite. Unii autori [28, 37, 10] susțin că sudarea prin presiune în câmp ultrasunor este insensibilă la gradul de curățire a suprafețelor. Se consideră că datorită complexului de fenomene ce se desfășoară pe suprafețele de separație a celor două componente în prima fază a procesului de sudare se obține o autocurățire a acestora, o aglomerare a particulelor de impurități și oxizi în zone restrînse și chiar o expulzare a acestora din zona de îmbinat. În alte lucrări [90, 58] se arată că prin curățirea, respectiv decaparea suprafețelor de îmbinat înainte procesului de sudare se obține o creștere a rezistenței acestora, deci se obține o calitate superioară. Spre exemplu se relevă faptul că prin decaparea aluminiului înainte de sudare se obține o majorare a rezistenței la rupere a îmbinării sudate cu 20...25% față de cea a unei îmbinări la care nu s-a decapat suprafețele de îmbinat.

În concluzie, se poate spune că în general suprafețele de îmbinat trebuie să fie curate, fără urme de grăsime sau alte impurități.

3.2. Contribuții la elucidarea mecanismului de sudare prin presiune în câmp ultrasonor a tablelor de aluminiu

Procedul de sudare prin presiune în câmp ultrasonor are în prezent o largă utilizare datorită condițiilor specifice pe care le oferă la realizarea îmbinărilor sudate. Pentru lărgirea sferei de aplicabilitate a procesului, pe de o parte, iar pe de altă parte, pentru utilizarea corectă a acestuia în diferitele ramuri ale industriei constructoare de mașini, electrotehnice, electronice și microelectronice este necesar a se cunoaște și stăpîni în intimitatea lor procesele ce au loc și care concurează la realizarea îmbinărilor sudate.

În cele ce urmează se caută a se elucidă, din punct de vedere teoretic și fenomenologic, mecanismul sudării prin presiune în câmp ultrasonor a foilor de aluminiu, acest metal fiind cu ponderea cea mai mare în aplicațiile industriale ale procedului amintit.

Se știe că pentru ca două piese metalice să se sudeze trebuie ca între atomii celor două piese să acționeze forțe de coeziune. Forțele de coeziune apar însă între atomii de metal numai și numai atunci cînd între aceștia se asigură o distanță de ordinul parametrilor rețelei cristaline, deci de ordinul angstromilor Å. Mecanismul fundamental tuturor procedurilor de sudare constă din [117]: introducerea localizată de energie în zona îmbinării sudate, pentru a scoate atomii din starea lor de echilibru stabil și apropierea atomilor marginali la distanțe egale sau mai mici decît parametri rețelei cristaline, pentru ca ei să recrystalizeze într-o rețea comună, corespunzătoare unei noi stări stabile. Deoarece metal sau aliaj metallic are nevoie de o anumită cantitate de energie și de o anumită distanță a atomilor marginali ai celor două componente pentru ca acestea să se poată suda. Pentru cazul în care aceste mărimi se estimează prin intermediul temperaturii atînsă de componente în zona îmbinării și respectiv presiunea în această zonă, atunci pentru fiecare metal sau aliaj se poate trasa dependenta $\vartheta - p$ care delimitează perechile $\vartheta_1 p_1$ în zone pentru care realizarea îmbinării sudate poate sau nu poate fi realizată (fig.3.2.1)

In cazul in care temperatura in zona imbinării sudate are valoarea temperaturii ambiante θ_a , printr-o simplă presare a celor două componente,

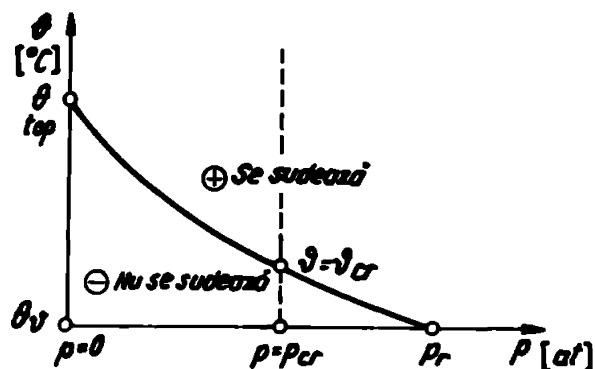


Fig. 3.2.1. Dependența temperaturii presiunii p pentru un metal sau aliaj oarecare

distanța corespunzătoare apariției forțelor de coeziune nu se poate asigura (decît în condiții speciale), datorită existenței în atmosferă și pe suprafața pieselor a unei pelicule rigide de gaz și impurități, oxizi, care fac ca distanța dintre cele două piese să fie mai mare decît cea minimă necesară apariției forțelor de

coeziune. Pentru aluminiu (Al) presiunea specifică p necesară sudării la rece ($\theta = \theta_a = 20^\circ\text{C}$) este cuprinsă în limitele de la 80 - 100 daN/cm^2 [81].

In cazul sudării prin presiune în câmp ultrasonor, condițiile de realizare a imbinărilor sudate se caracterizează prin condițiile de stare exprimate prin :

$$\theta > \theta_a = 20^\circ\text{C} \quad (3.2.1)$$

$$P < p_{cr}$$

In cele ce urmează se va prezenta succesiunea fazelor și fenomenelor care coroborate concoură la realizarea imbinării sudate.

In condițiile mediului ambiant, indiferent dacă suprafețele materialelor de sudat au fost sau nu prelucrate (curățate de impurități sau decapate) prezintă o structură

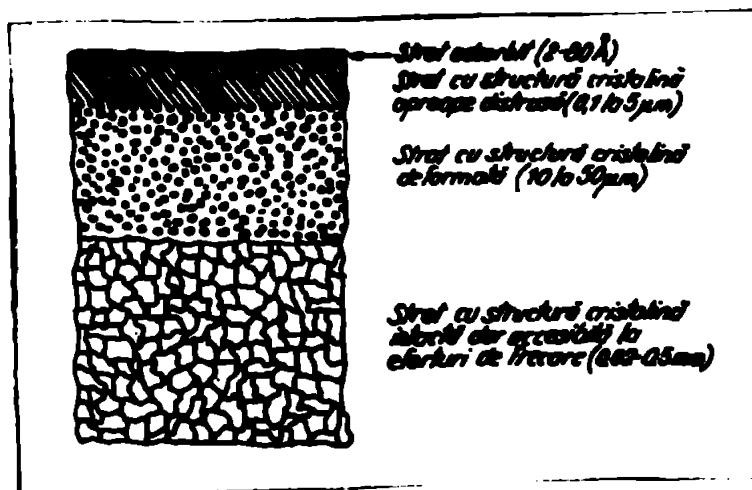


Fig. 3.2.2. Structura caracteristică a suprafeței metalelor

caracteristică (fig. 3.2.2), cu patru straturi [95] și anume :

- un strat absorbit de oxid și molecule de gaz, apă sau azot. Anume straturi de oxizi pot atinge grosimi între 2...80 Å ;

- un strat smoc în afara stării cristaline normale de 0,1...5 μm

conform ipotezei lui Beilby :

- o zonă intrinsecă ecruisată, în care structura cristalină este distrusă și pot eventual pătrunde incluziuni din exterior de $20...50 \mu\text{m}$;

- zonă cu structura originală nealterată. Această zonă în timpul procesului de frecare ce apare sub acțiunea forței statice de apăsare, poate fi ecruisată; ea este accesibilă forțelor de frecare și are o grosime de $0,02...0,5 \text{ mm}$.

În prima fază a procesului de sudare are loc o apropiere a suprafețelor celor două componente sub acțiunea forței statice de apăsare F_s și concomitent cu aceasta o deplasare reciprocă a suprafețelor datorită mișcării de oscilație ultrasonoră introdusă de senotrod (fig.3.2.3).

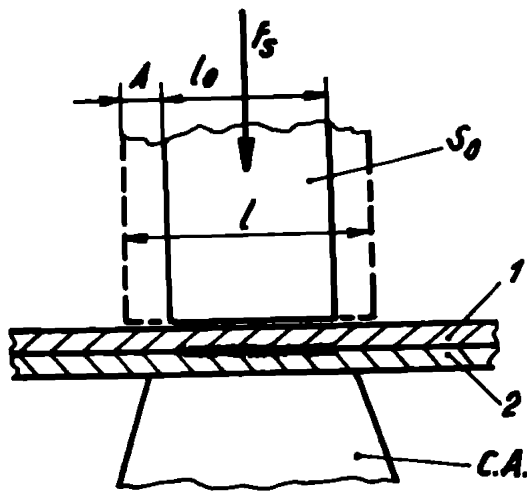


Fig.3.2.3. Forțele ce acționează în zona îmbinării sudate în prima fază a sudării
 F_s - forța statică de apăsare
● - senotrod
C.A. - corp ajutător
1,2 - piese de sudat
A - amplitudinea vibrației ultrasonore

reciprocă a celor două componente determină în prima fază apariția fenomenului de frecare, care poate fi definit ca fiind un proces complex de natură moleculară, mecanică și energetică, care apare între două suprafețe aflate în contact și care au o mișcare relativă una față de cealaltă.

Intensitatea fenomenului de frecare uscată ce se desfășoară depinde în mare măsură de rugozitatea suprafețelor aflate în contact, de suprafața de frecare, de mărimea forței statice de apăsare, de natura și

proprietățile materialelor aflate în contact. Ca urmare a fenomenului de frecare, în prezența forței statice de apăsare, cea mai mare parte a energiei consumate pentru învingerea frecării se transformă în căldură. Cantitatea de căldură dezvoltată în procesul de sudare datorită fenomenului de

frezare. Forța de frezare este o mărime dependentă de mărimea suprafeței reale de contact, care la rândul ei este determinată de mărimea forței statice de apăsare, precum și de rezistența la rupere a materialului respectiv. În timpul moment al contactului fizic dintre cele două componente, suprafața reală de contact S_r este mult mai mică decât suprafața nominală de contact, datorită geometriei specifice a suprafețelor

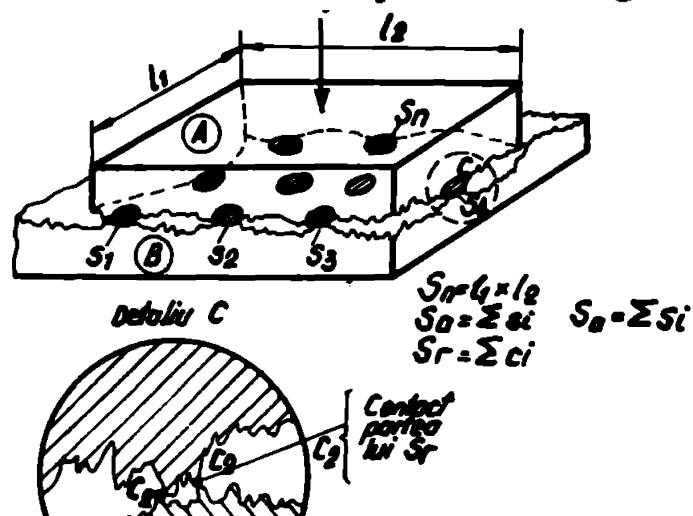


Fig. 3.2.4. Suprafața de contact între cele două componente
 S_n - suprafața nominală
 S_a - suprafața aparentă
 S_r - suprafața reală

celor două componente (fig. 3.2.4)

Sub acțiunea forței statice de apăsare, contactul fizic între cele două suprafețe delimitează următoarele mărimi :

- suprafața nominală S_n definită de geometria de contur a celor două componente și de dimensiunile părții active a conrodului ;

- suprafața de contact aparentă S_a , care reprezintă suma ariilor de contact s_1, s_2, \dots, s_n ,

formate de ondulațiile de prelucrare ;

- suprafața reală de contact S_r , care reprezintă suma microsuprafețelor de contact ale asperităților; prin aceasta se transmite de fapt forța de apăsare normală.

În realitate, contactul real al suprafețelor în contact este dependent nu numai de valoarea forței statice de apăsare F_g , normală pe suprafețele de frezare, ci și de efecturile tangențiale cauzate de fenomenul de frezare. Calculul arii reale de contact se poate face în aceste condiții, cu aproximație, utilizând relația [10, 95]:

$$S_a = S_{a_{st}} (1 + 0,5 \mu_{sk}^2) \quad (3.2.2)$$

unde :

S_a - aria aparentă sub acțiunea forței statice de apăsare și a forței de frezare

$S_{a_{st}}$ - aria aparentă în lipsa mișcării relative a celor două componente (static)

μ_{sk} - coeficient de frezare cinetic

Relația similară, însă între S_r și S_a din timpul de-

plasării reciproce a celor două suprafețe (p) și valoarea acesteia în cazul static (p_0) datorate numai forței statice de apăsare se scrie [95] :

$$p^2 = p_0^2 (1 + \alpha \cdot \mu_{ak}^2) \quad (3.2.3)$$

Lin [94], funcție de materialul cuplelor de frecare valoarea coeficienților de frecare cinetic ia diferite valori. Pentru cazul cuplei aluminiu-aluminiu valoarea acestuia este de $\mu_{ak} = 1.5 \dots 1.9$

Schimbarea ariei reale de contact se explică nu numai prin modificarea stării de tensiune și implicit a deformărilor, ci și prin modificarea temperaturii materialului în zona

îmbinării sudate.

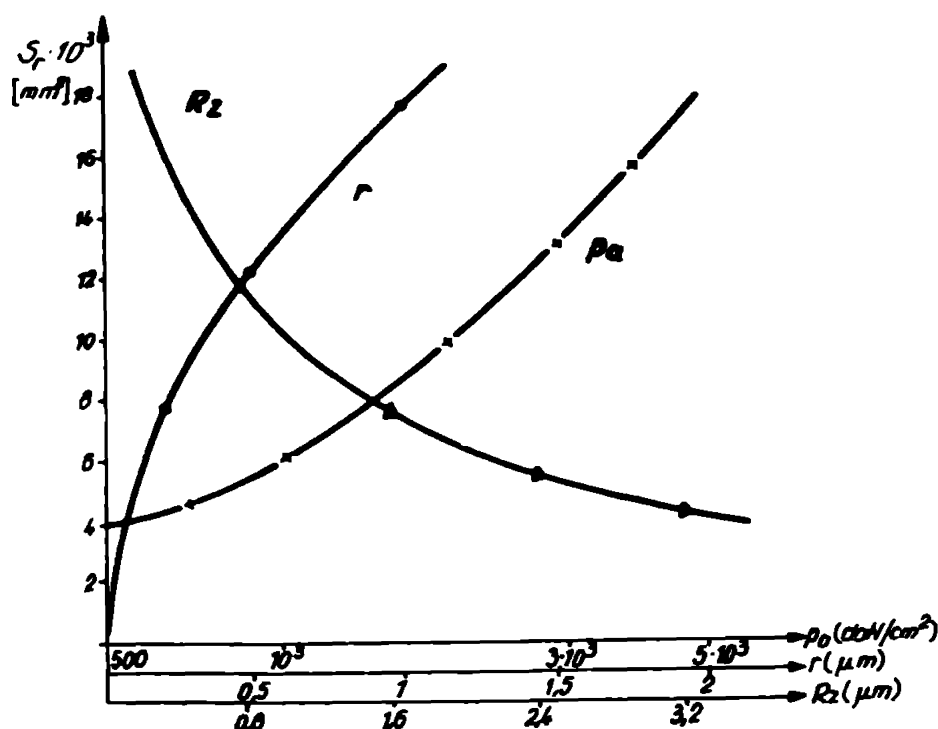


Fig. 3.2.5. Influența diferiților parametri asupra suprafeței reale de contact S_r
 P_a - presiunea în zona de contact
 r - raza asperităților
 R_z - rugozitatea suprafeței

Fenomenul de frecare între cele două componente determină acțiunea în zona de contact a unei stări de tensiune specifică exprimată prin intermediul forței de frecare F_f .

Valoarea forței de frecare este condițio-

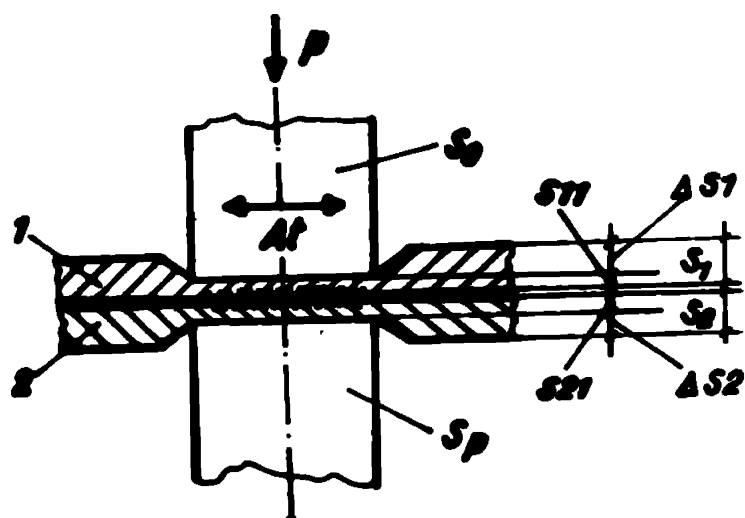
nată de două aspecte : efortul necesar forfecării microjuncțiunilor apărute pe suprafața de frecare și efortul necesar deformării plastice a asperităților. Deci forța de frecare poate fi scrisă ca fiind o sumă de doi termeni de forma :

$$F_f = F_{fa} + F_d \quad (3.2.4)$$

în care :

- F_{fa} este forța necesară forfecării adeziunilor create prin forța de aderență normală la suprafață
- F_d - forța necesară deformării elasto-plastice a microasperităților

Concomitent cu apariția fenomenului de frecare, datorită forței statice de apăsare se produce și o deformare plastică a materialului celor două componente în zona îmbinării sudate (fig. 3.2.6). Prin deformare plastică grosimea materialelor 1 și 2 se reduce



cu Δs_1 și Δs_2 , adică de la s_1 la s_{11} și de la s_2 la s_{21} :

$$s_{11} = s_1 - \Delta s_1 \quad (3.2.5)$$

$$s_{21} = s_2 - \Delta s_2$$

Odată cu deformarea plastică datorată forței statice de apăsare în materialul celor două componente apare și o deformare plastică datorată acțiunii tensiunii mecanice periodice de

Fig. 3.2.6. Deformarea plastică a materialului celor două componente în zona îmbinării sudate la sudarea prin presiune în câmp ultrasonor

înaltă frecvență introdusă prin intermediul sonotrodului. Deoarece procesul periodic are caracter armonic, se poate considera că și procesul de deformare plastică este un proces armonic. În acest caz, tensiunea σ aplicată materialului în zona îmbinării sudate se va caracteriza prin amplitudinea tensiunilor aplicate σ_A și frecvența de repetare a acestora

$$f(\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T})$$

se poate scrie deci:

$$\sigma = \sigma_A \cdot \sin \omega t = \sigma_A \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (3.2.6)$$

Frecvența tensiunilor și deformațiilor coincide, dar datorită fenomenelor de relaxare ce apar în materialele metalice sollicitate la frecvențe ultrasonore, apare o întârziere a variației deformațiilor în raport cu variația tensiunii exprimate prin defazajul φ , deci:

$$\varepsilon = \varepsilon_A \sin(\omega t - \varphi) \quad (3.2.7)$$

Rezultă deci că în fiecare ciclu de deformare se consumă un lucru mecanic dinamic L_d ce se determină din re-

leția :

$$L_d = \int_{-\varepsilon_A}^{+\varepsilon_A} \sigma \cdot d\varepsilon + \int_{+\varepsilon_A}^{-\varepsilon_A} \sigma \cdot d\varepsilon = \oint \sigma \cdot d\varepsilon \quad (3.2.8)$$

Utilizând expresiile lui σ și ε din (3.2.6) și (3.2.7)

rezultă :

$$L_d = \pi \cdot \sigma_A \cdot \varepsilon_A \cdot \sin \varphi \quad (3.2.9)$$

care arată că lucrul mecanic datorat vibrației ultrasonore a sonotrodului într-un ciclu este direct proporțională cu σ_A , ε_A și unghiul de defazaj φ .

Pentru a trece de la expresia lucrului mecanic consumat pe un ciclu (3.2.9) la expresia lucrului mecanic consumat de vibrația ultrasonoră a sonotrodului în unitatea de timp, expresia (3.2.9) trebuie înmulțită cu $(\frac{1}{T} = f = \frac{\omega}{2\pi})$:

$$L_d \cdot f = \pi \cdot f \cdot \sigma_A \cdot \varepsilon_A \cdot \sin \varphi \quad (3.2.10)$$

Concomitent cu lucrul mecanic dinamic L_d datorat vibrației ultrasonore a sonotrodului, datorită forței statice de apăsare F_s și deformației Δ_s suferită de materialul celor două componente, acesta mai efectuează și un lucru mecanic static L_s ce poate fi determinat din :

$$L_s = F_s (\Delta s_1 + \Delta s_2) = p \cdot S (\Delta s_1 + \Delta s_2) \quad (3.2.11)$$

în care :

p - presiunea specifică datorată forței statice de apăsare

$$p = \frac{F_s}{S}$$

S - suprafața activă a sonotrodului

Iar cum teoretic se poate considera ca $\Delta s_1 = \Delta s_2$ în cazul sudării materialelor de aceeași natură și aceeași grosime rezultă :

$$L_s = 2 F_s \cdot \Delta_s = 2 p \cdot S \cdot \Delta_s \quad (3.2.12)$$

Iar lucrul mecanic total efectuat de sonotrod în procesul de sudare :

$$L = L_s + L_d \quad (3.2.13)$$

și

$$L = 2 F_s \cdot \Delta_s + (\pi \cdot f \cdot \sigma_A \cdot \varepsilon_A \cdot \sin \varphi) t_s \quad (3.2.14)$$

În procesul de sudare sub presiune în câmp ultrasonor lucrul mecanic total L efectuat de către sonotrod se consumă pe de o parte, în procesul de fragmentare a structurilor de e-

oxizi și impurități aflate pe suprafața componentelor de sudat iar pe de altă parte, se transformă în căldură, care este cedată materialului zonei îmbinării sudate.

Ca urmare a fenomenului de frecare uscată ce apare între suprafețele de contact a celor două componente, în prima fază a procesului de sudare și datorită lucrului mecanic efectuat de către sonotrod în mișcarea de oscilație ultrasonoră a acestuia de către sonotro în mișcarea de oscilație ultrasonoră a acestuia se produce o sfărâmare, respectiv distrugere a peliculei de oxizi și impurități aflate pe supra-

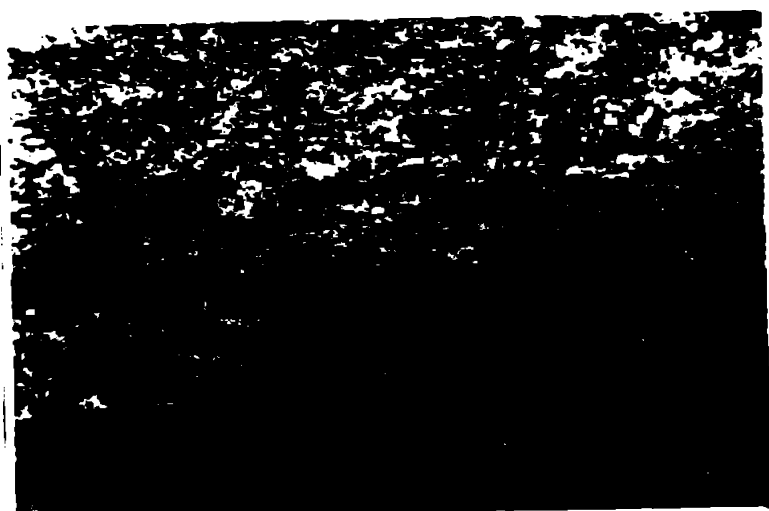


Fig. 3.2.7. Fragmentarea stratului de oxid și impurități în zona îmbinării sudate
MC x 400 - Aluminiu
atac HF - 1%

fața materialelor componentelor în zona îmbinării sudate (fig. 3.2.7). În continuare sub acțiunea stării complexe de tensiuni existente în zona îmbinării și în procesul de frecare a suprafețelor apare o variație a cinemati- cii de alunecare care conduce la o variație periodică a

curburii zonelor aflate în contact, punându-se astfel zone în care deformarea suprafețelor de contact are un caracter de turbulență (fig. 3.2.8.). Se presupune că procesul de fragmentare a stratului de oxizi și impurități aflate pe suprafața de contact a celor două componente și constă, pe de o parte, stării complexe de tensiuni și fenomenului de frecare, iar pe de altă parte, fenomenului de oscilație acustică. Aglomerarea particulelor de oxizi și impurități se produce ca urmare a presiunii ultrasonore, care se concentrează particulele în zone amplificate cu $\lambda/2$ ca punctoare nodurilor și ventrelor de oscilație.

În figura 3.2.9 se prezintă aglomerarea de oxizi și impurități în prima fază a procesului de sudare.

În analiza microscopului electron de bază

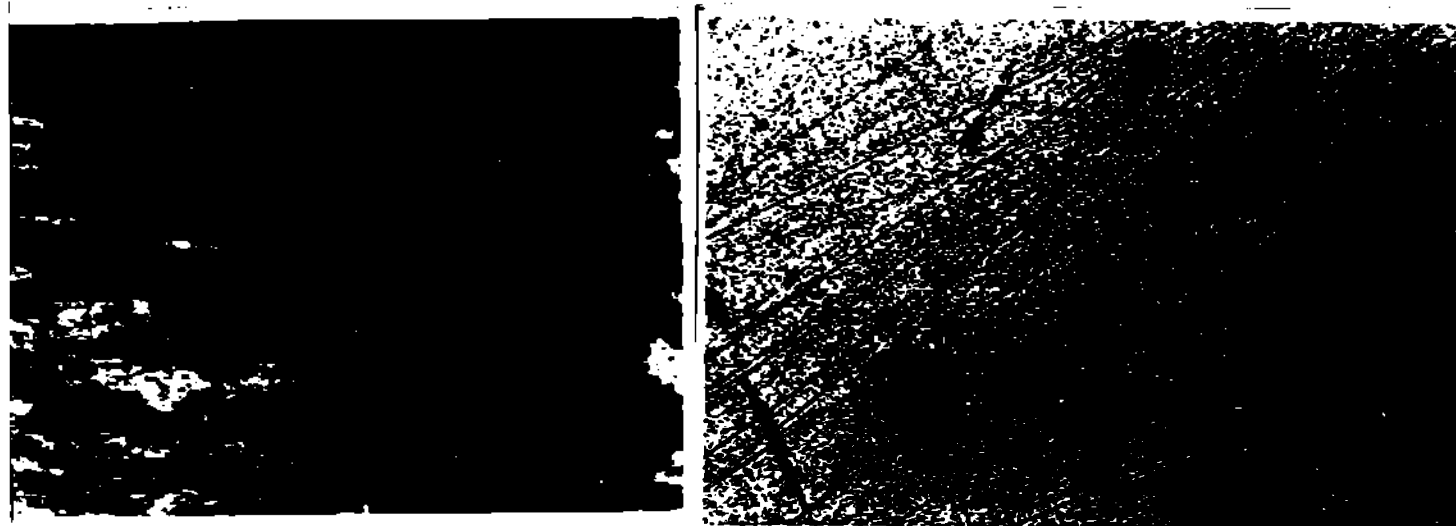


Fig. 3.2.8. (a+b) Deformarea turbulentă a suprafețelor de contact

a
M0 x 400 - Aluminiu
atac HF - 1%

b
M0 x 500 - Aluminiu
atac H - 1%

(amprenta 2,3,4,5) și în zonele cu aglomerări de oxid de aluminiu Al_2O_3 (amprenta 1,6) se observă că valoarea acesteia în zona cu aglomerări este cu 43% mai mare. Totodată se observă forma aproape sferică a particulei (fig.3.2.9,c) ceea ce confirmă ipoteza că datorită fenomenului de frecare, a lucrului mecanic efectuat și transformat în căldură pe microasperitățile suprafețelor de contact apare o fază lichidă sau cvasi-lichidă de mare mobilitate. Existența aglomerărilor de oxid de aluminiu (Al_2O_3) și alte impurități în zona îmbinării sudate este relevată și de existența unor particule sferice sau aproape sferice pe suprafața îmbinării sudate după distrugerea acesteia prin încercarea de forfecare prin tracțiune (fig.3.2.10). Se observă că ruperea în punctul sudat are un caracter pronunțat de rupere ductilă, iar imaginea luată pe un microscop stereoscopic permite aprecierea formei sferice cu incluziuni de oxid de aluminiu.

Ca urmare a procesului de "curățire" a suprafețelor în contact a celor două componente în zona de contact de oxizii de aluminiu și alte impurități și aglomerarea lor în microzone, este posibil contactul întâia a metalului, contact ce se realizează prin intermediul microasperităților caracteristice suprafeței acestuia.

Sub acțiunea undelor ultrasonore și în prezența forței

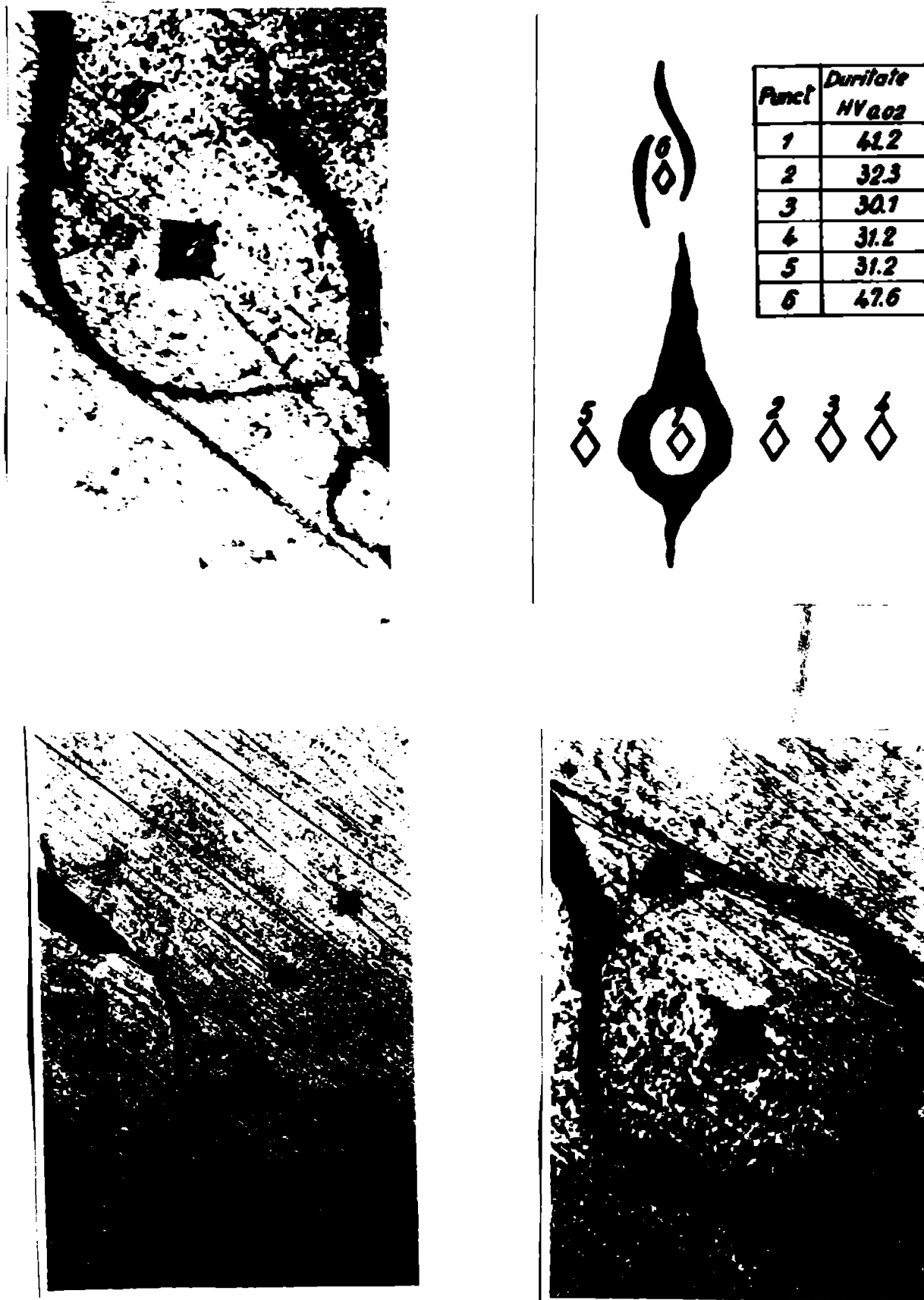


Fig. 3.2.9. Aspectul macro și microscopie al zonei îmbinării sudate cu aglomerări de oxide de aluminiu și impurități în ventrele și nodurile de oscilație
 a) Schema de amplasare a amprentelor
 b) 400 x Aluminiu - nestecat
 c) 1000 x Aluminiu - nestecat
 d) 1000 x Aluminiu - nestecat

stative de apăsare are loc o variație periodică a cinematicii de alunecare și o variație periodică a proceselor de interacțiune dintre geometria, microgeometria celor două suprafețe. În zona îmbinării sudate are loc o frecare uscată între suprafețele celor două componente.



Fig.3.2.10. Microstructura zonei nesudate a punctului sudat cu incluziune sferică de Al₂O₃ imagine SEM x 400

Ca urmare a frecării de alunecare, îndeosebi în prezența forței statice de apăsare, o mare parte din energia cheltuită pentru învingerea frecării este trans-

formată în căldură la suprafața de frecare. După evoluția în timp a proceselor termice ce se desfășoară ca urmare a frecării uscate, la scară microscopică acestea se pot considera a fi staționare. Fluxul termic generat prin frecare este disipat pe asperitățile suprafețelor în contact. Microgeometria suprafețelor de frecare fiind în permanență în modificare apare deci o încălzire a straturilor superficiale ale materialelor de îmbinat.

Plecând de la ecuația generală a fluxului termic (ecuația Fourier) pentru corpuri o omogene și fără surse interne de căldură :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 \theta - \frac{q}{\rho \cdot c} \quad (3.2.15)$$

și admițând următoarele ipoteze simplificatoare :

- căldura apare ca urmare a frecării în contactul normal corespunzător celor două suprafețe în contact ;
- lungimea de contact, pe care se dezvoltă fenomenul de generare a căldurii este dată frecării, este funcție de dimensiunile geometrice ale contactului și de amplitudinii vibrației ultrasonice (fig.3.2.11).

Deoarece ecuația lui Fourier este liniară :

$$d\theta = \frac{dq}{\sqrt{\pi \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c \cdot t}} \quad (3.2.16)$$

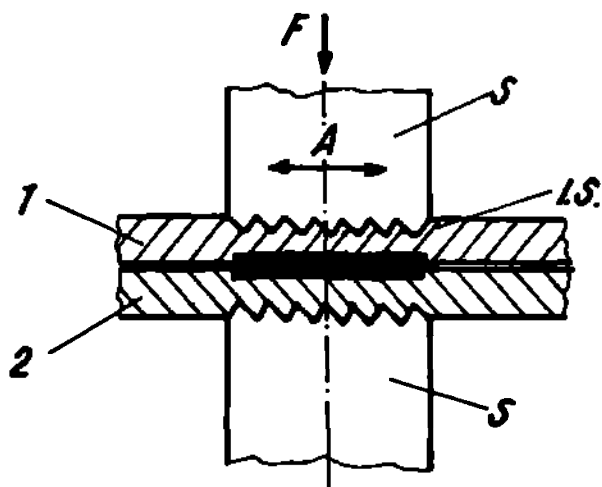


Fig.3.2.11. Lungimea zonei de contact l , funcție de dimensiunile sonotrodului și amplitudinea vibrației A

fenomenului de frecare este dată de relația [24] :

$$q = \mu_{sk} \cdot v \cdot \frac{F_S}{l} \quad (3.2.18)$$

în care :

F_S este forța statică de apăsare normală pe suprafețele de frecare

l - lungimea zonei de contact $l = l_0 + 2A$

μ_{sk} - coeficientul de frecare cinematică între cele două suprafețe

v - viteza de deplasare relativă a celor două suprafețe

dar cum :

$$v = A \cdot \sin \omega t \quad (3.2.19)$$

rezultă :

$$q = \frac{\mu_{sk} \cdot A \cdot F_S}{l_0 + 2A} |\sin \omega t| \quad (3.2.20)$$

Înlocuind expresia (3.2.20) în (3.2.17), temperatura elementară într-un punct situat pe banda de contact l , se scrie sub forma :

$$d\theta = \frac{\mu_{sk} \cdot A \cdot F_S}{(l_0 + 2A) \sqrt{\pi} \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c} \cdot \frac{|\sin \omega t|}{\sqrt{t}} dt \quad (3.2.21)$$

Modul de variație a temperaturii pe liniile de contact l , care corespunde cu el presiunea metalului sudat, în

iar temperatura elementară într-un punct careare situat pe banda de contact de lungime l , datorită acțiunii sursei elementare q la un timp dat, va fi :

$$d\theta = \frac{q \cdot dt}{\sqrt{\pi} \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c \cdot t} \quad (3.2.17)$$

Încălzirea materialului în zona de contact are loc doar datorită fenomenului de frecare uscată între cele două componente. Expresia fluxului de căldură q deplasat de suprafețele în contact datorită fenomenului de frecare este dată de relația [24] :

tiimpul t se obține integrând expresia (3.2.21) în raport cu timpul pe intervalul $0 \rightarrow t$

Deci :

$$\theta = \int_0^t d\theta \cdot dt \quad (3.2.22)$$

respectiv

$$\theta = \frac{\mu_{ak} \cdot \lambda \cdot P_{st}}{(1_0 + 2 A) \sqrt{\pi} \cdot \lambda \cdot p \cdot a} \int_0^t \frac{|\sin \omega t|}{\sqrt{t}} dt \quad (3.2.23)$$

din punct de vedere matematic, valoarea exactă a integralei :

$$I = \int_0^t \frac{|\sin \omega t|}{\sqrt{t}} dt \quad (3.2.24)$$

(3.2.24) nu se poate determina. Pentru a se calcula cu aproximație, se observă că deoarece ω are o valoare relativ mare ($\omega = 2\pi \cdot f$, iar pentru $f = 20.10^4$ Hz rezultă $\omega = 1,256 \cdot 10^5$ rad/s) "sin t" are o variație rapidă și nu se poate aproxima convenabil. Deoarece însă timpul t variază în jurul valorii de o secundă (în cazul sudării talajelor de aluminiu cu rozetă între 0,5...1 mm) și mare ($0, 5 < t < 2$ s) este preferabilă aproximația funcției $\frac{1}{\sqrt{t}}$.

Aproximând funcția $\frac{1}{\sqrt{t}}$ cu polinomul Taylor de ordinul III în vecinătatea lui $t = 1$, rezultă :

$$\frac{1}{\sqrt{t}} = \frac{15}{8} - \frac{15}{8} t + \frac{5}{8} t^2 \quad (3.2.25)$$

iar expresia integralei I din (3.2.24) devine :

$$I = \frac{1}{8} \sum_{k=0}^{n-1} \left[\int_{2k \frac{\pi}{\omega}}^{(2k+1) \frac{\pi}{\omega}} (5t^2 - 15t + 15) \sin \omega t \cdot dt - \int_{(2k+1) \frac{\pi}{\omega}}^{(2k+2) \frac{\pi}{\omega}} (5t^2 - 15t + 15) \sin \omega t \cdot dt \right] \quad (3.2.26)$$

a cărei valoare aproximativă este :

$$I = \frac{1}{4\omega} \left(30 - 20 \frac{\pi}{\omega} + 9 \frac{\pi^2}{\omega^2} \right) \quad (3.2.27)$$

și înlocuind :

$$\frac{\pi}{\omega} = \frac{t}{2f} \quad (3.2.28)$$

rezultă :

$$I = \frac{t}{4f} (t^2 - 9t + 15) \quad (3.2.29)$$

Înlocuind valoarea aproximativă a integralei I din (3.2.29) în (3.2.23) rezultă expresia variației temperaturii pe lungimea de contact l a învelișii sudate :

$$\theta = \frac{\mu_{sk} \cdot A \cdot F_s \cdot t}{4 \pi (1_0 + 2A) \sqrt{\pi \lambda \rho c}} (t^2 - 3t + 15) \quad (3.2.30)$$

și deoarece valoarea amplitudinii vibrației ultrasonore se poate neglija în raport cu dimensiunile geometrice ale sonotrodului rezultă :

$$\theta = \frac{\mu_{sk} \cdot A \cdot F_s \cdot t}{4 \cdot \pi \cdot 1_0 \sqrt{\pi \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c}} (t^2 - 3t + 15) \quad (3.2.31)$$

În analiza expresiei (3.2.31) rezultă că valoarea temperaturii în zona îmbinării sudate în structurile superficiale este o funcție direct proporțională cu valoarea coeficientului de frecare dinamic, amplitudinea vibrației ultrasonore și a forței statice de apăsare, fiind o funcție crescătoare de timp.

Legea de variație a temperaturii $\theta = f(t)$ dată de expresia (3.2.31) este variabilă. Mai puțin în orice anumă valoare a temperaturii din jurul temperaturii de topire a materialului respectiv, deoarece la atingerea acestei valori, pe de o parte ipotezele adoptate își pierd valabilitatea, iar pe de altă parte, proprietățile fizico-chimice ale materialului se modifică substanțial față de cele inițiale.

În calculele efectuate cu ajutorul relației (3.2.31) pentru cazul sudării tablelor de aluminiu de 1 mm grosime și utilizându-se vibrații ultrasonore ale sonotrodului de amplitudine $A = 40 \mu m$, o forță statică de apăsare $F_s = 100 \text{ daN}$ și dimensiunea zonei active a sonotrodului de $\phi = 10 \text{ mm}$ și un timp de sudare de 1 secundă, rezultă că în zona de contact între cele două componente se poate atinge o temperatură de $682^\circ C$.

Rezultă că în zona îmbinării sudate, pe suprafețele componentelor, datorită fenomenului de frecare se ating temperaturi egale cu temperatura de topire a materialului acelușor. Deci pe suprafețele celor două componente va exista un strat de metal în stare lichidă sau eucalioidă.

Această afirmație este confirmată de cercetările experimentale efectuate. Rezultatele cercetărilor microstructurale ale interstițiului zonei îmbinării sudate în diferite

etape de realizare a acestuia permit a se trage concluzia că cel puțin în diferite puncte sau zone ale îmbinării sudate, materialul celor două componente ajung în stare lichidă sau cvasilichidă și deci temperatura atinge valoarea temperaturii de topire $\theta = \theta_{top}$



Fig.3.2.12. $M \times 1000$ - aluminiu neatacat; timp de sudare t_1



Fig.3.2.11. $M \times 1000$ - aluminiu neatacat; timp de sudare t_2

În urma degajarea suprafețelor celor două componente de stratul de oxizi și impurități și aglomerarea, concentrarea acestora în diferite microzone apare posibilitatea realizării contactului între ascele de metal curat. Contactul între acestea se realizează prin intermediul microasperităților celor două suprafețe cu frecvență de deplasare ultrasonoră și cu acțiunea forțelor statice de apăsare, datorită frecării uscate se dezvoltă o anumită cantitate de căldură ce se canalizează pe aceste microasperități aducând materi-

alul acestora în fază lichidă. Se creează astfel posibilitatea formării unor microcuduri sau puncte de legătură sudate între materialul celor două componente (Fig.3.2.13). Existența și "supraviețuirea" acestora un anumit timp t_1 este posibilă deoarece viteza de deplasare reciprocă a celor două componente, determinată de vibrația ultrasonoră a sonotrodului este o funcție sinusoidală ($v = A \sin \omega t$) care se anulează pentru valori ale procesului cât $t = (2k + 1) \frac{\pi}{2\omega}$

La un timp $t_3 > t_2 > t_1$ are loc ruperea punților de legătură astfel formate și repetarea fazelor prezentate însă pentru cazul unei alte geometrie a suprafețelor în contact dictate de modul în care s-a realizat formarea punților de legătură de procesul de deformare plastică a microreliefului.

În condițiile existenței pe suprafețele de separație a celor două componente a unei faze lichide sau cvasilichide ce se caracterizează printr-o mare mobilitate și a stării complexe de tensiune din zona de deformare a materialului, datorate vibrațiilor ultrasonore se produce detașări de material, de la limita de separație dintre componente și interstițiul încă existent (fig.3.2.14), (fig.3.2.15), (fig.2.3.16)

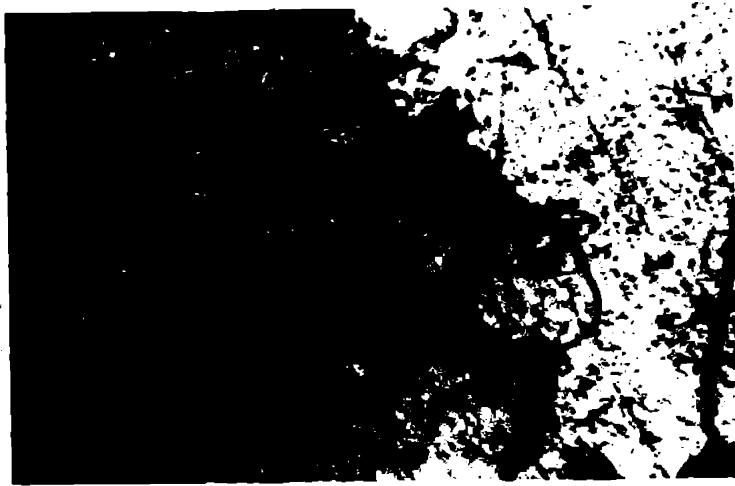


Fig.3.2.14. 40 x localuminiu detașat; timp de sudare t_3

Desprinderea particulelor din straturile superficiale ale celor două componente se face datorită efectului mecanic pe care îl exercită undele ultrasonore asupra materialului acestor

enerarea procesului de desprindere și forma inițială a unei astfel de particule se observă în figurile 3.2.14 și 3.2.15

Particulele de metal în faza inițială a desprinderii au o formă neregulată, determinată de distribuția de tensiuni din zona respectivă pe care și de proprietățile fizice ale ma-

Fig.3.2.15. 40 x localuminiu detașat; timp de sudare t_3
terialului acestuia.



Fig.3.2.16 - alumina nestecat
M0 x 1000; timp de sudare t_5

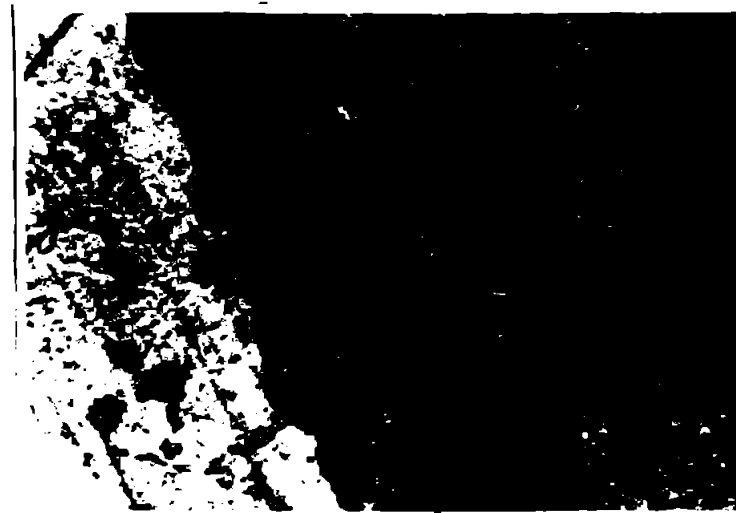


Fig.3.2.17 - M0 x 1000 - aluminiu
nestecat; timp de sudare t_5



Fig.3.2.18. M0 x 1000 aluminiu nes-
tecat; timp de sudare t_5

Este evidentă trecerea prin faze succesive, treptate a particulelor desprinse de pe suprafețele componentelor și deplasarea acestora în direcția de propagare a undelor ultrasonore. De asemenea se observă tendința deosebit de marcantă de dobândire a unei forme geometrice regulate (sferice) a particulelor expulzate. (Fig. 3.2.16...18)

Atingerea formei sferice a particulelor este posibilă doar în cazul în care materialul acestora se află în fază lichidă sau ovasilichidă, deoarece în această stare corpurile sub acțiunea unor stări complexe de tensiuni, tind să ia forme de dimensiuni geometrice minime și volum maxime. Particulele astfel formate sînt "proiectate" pe suprafața celeilalte componente. La stingerea acestora are loc un proces de întinzire a materialului particulei cu absorbția de material al componentei (Fig.3.2.18).

Se poate considera că și acesta este proces de bombardare a suprafețelor componentelor de către

particulele de metal contribuie la încălzirea suprafețelor, datorită cedării căldurii particulei către materialul componentei și a transformării energiei cinetice în această, parțial în căldură.

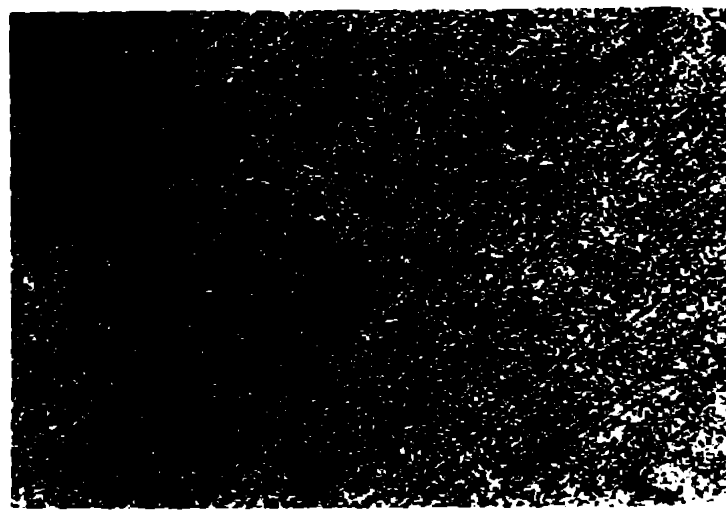


Fig.3.2.19. MC x 800 aluminiu atacat ; HF - 1%

În feza următoare, datorită forței statice de apăsare și a condițiilor create în materialul celor două componente apare o intensificare a materialului în zona de contact creându-se condiții favorabile pentru apariția fenomenelor de difuzie și transfer de masă între cele două componente.

Procesul de difuzie și transfer de masă este însă puternic influențat de existența

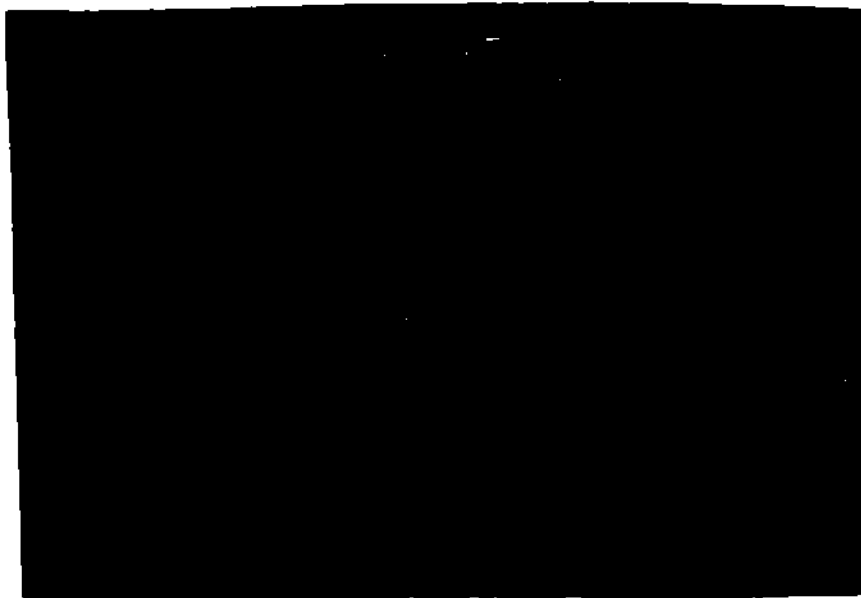


Fig.3.2.20. Dislocații de marșare cu vectorul Burgers $b = \frac{a}{2}$ 110; imagine TEM x 70000; subțiere electrochimică

și activarea imperfecțiilor din cristal, datorită activării dislocațiilor și vacanțelor, de către oscilațiile mecanice introduse prin intermediul sonotrodului.

Vibrațiile ultrasunete amorsează materialul ce-

lor două componente un proces de generare de noi dislocații, precum și o reducere a vitezei limite de deplasare a noilor dislocații prin formarea dislocațiilor "sestle" (inabile la temperaturi joase). Aceste bariere însă sunt depășite de dislocațiile în mișcare, datorită micșării considerabile a tem-

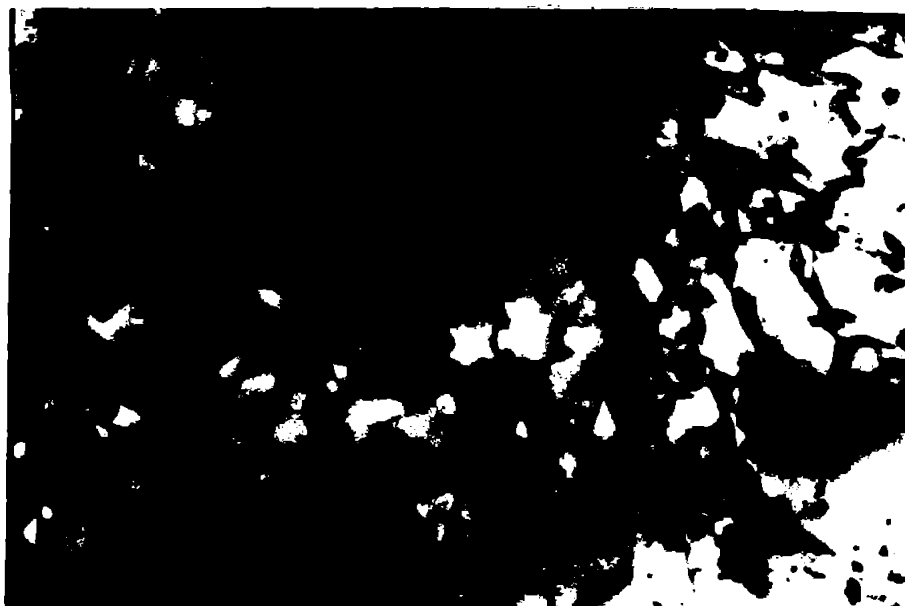


Fig.3.2.21. Structură de dislocații în aluminiu
- imagine TEM x 70000; subțiere electrochimică

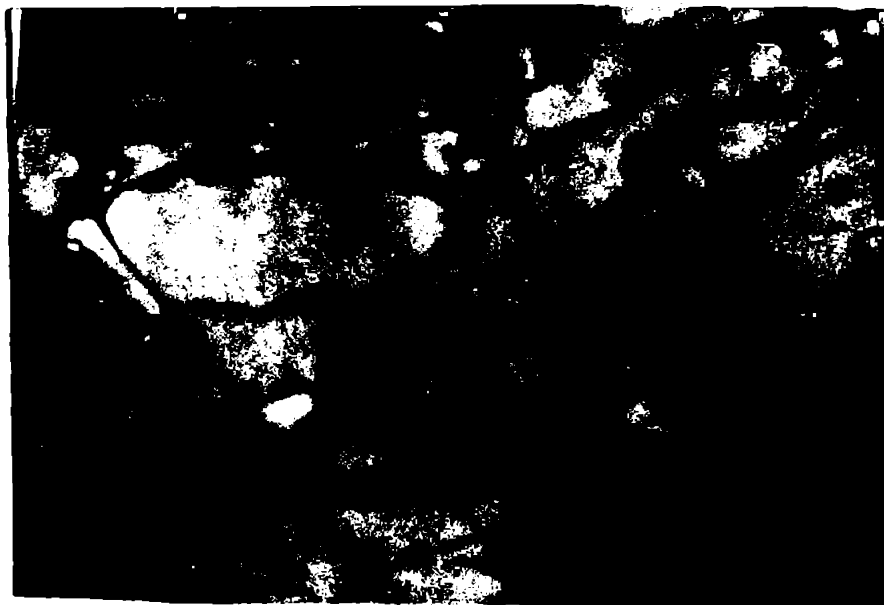


Fig.3.2.22. Structură de dislocații în aluminiu
- imagine TEM x 150000; subțiere electrochimică
temperaturii în zona încălzirii suzate, pe și stării complexe
de tensiune în zona punctului sudat.
je asemenea în procesul de deformare plastică, pe ca-

re îl suportă materialul celor două componente se formează un



Fig.3.2.23. Structură de dislocații în aluminiu
imagine TEM x 150000; sursă: electrochimică

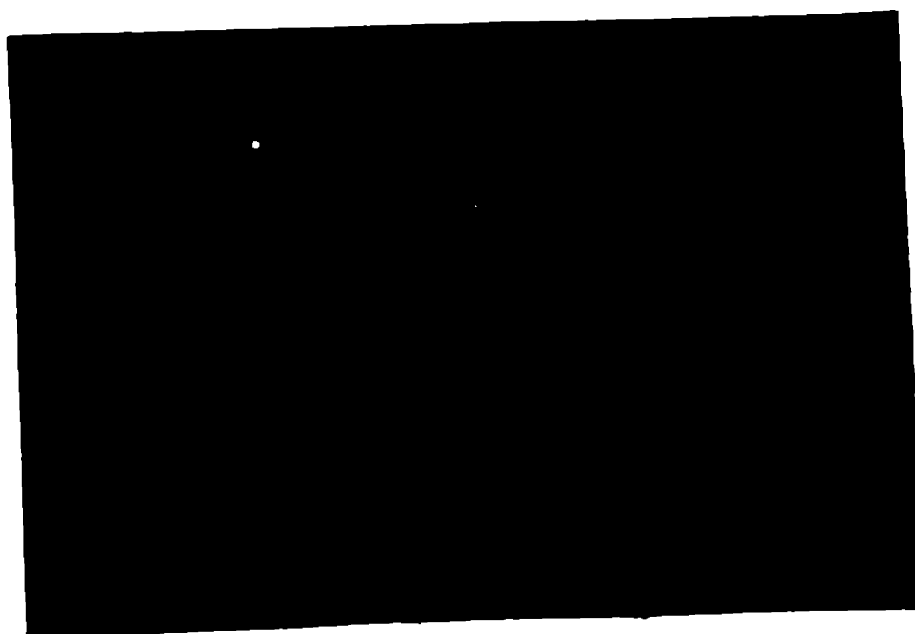


Fig.3.2.24. Dislocații puse în contrast de vectorul g_{022}
imagine SAED pe fig.3.2.23; ax de zonă 011

număr mare de defecte lineare și punctiforme de natură dislocațiilor, vacanțelor și atomilor internodali. Existența unei structuri specifice de dislocații în materialul îmbinării sudate se prezintă în figurile 3.2.21...24, cu punerea în evidență a unei dislocații în zona rupturii în îmbinării sudate (fig.3.2.24).

Este evident faptul că sub acțiunea undelor ultrasonore și la o deformare plastică considerabilă, în cazul aluminiului, un număr tot mai mare de dislocații se deplasează spre suprafața componentelor, formând o rețea de dislocații marginale bine determinată (fig.3.2.2c). Cu cât rețeaua de dislocații marginale este mai puternică, cu atât mai multe centre de prindere active se vor forma, cu atât mai puternic se va manifesta fenomenul de difuzie în acea zonă.

În condițiile în care materialul componentelor în zona îmbinării sudate se află într-o stare lichidă sau cvasilichidă de mare mobilitate, între componente se realizează un contact intim sub acțiunea forței statice de apăsare, suprafețele fiind lipsite de oxizi sau alte impurități, suprafețele se caracterizează printr-o rețea de dislocații marginale, iar zona îmbinării sudate este activată în continuare de undele ultrasonore transmise de către contact, apar o accelerare a proceselor de difuzie și transfer de masă.

Având în vedere faptul că în cazul sudării prin presiune în câmp ultrasonor a materialelor de aceeași natură (Al-Al) apariția fenomenului de difuzie, ca mecanism ce contribuie la realizarea îmbinării sudate, nu poate fi pus în evidență (figura 3.2.2b), s-au executat îmbinări sudate Al-Al, pe care s-a realizat apariția acestui fenomen.

În figura 3.2.2b se prezintă viziunea elementului analizat în cazul unei îmbinări sudate Al-Al efectuate pe microscopul electronic de tip JCM-600A și analizat pe calculator pentru a se vedea.

În figura 3.2.2c se pune în evidență existența fenomenului de difuzie și transfer de masă în procesul de sudare prin presiune în câmp ultrasonor s-au efectuat teste în vederea distribuției liniare ale elementelor Al și Cu pe-a lungul unei axe perpendiculare pe suprafața de separare între două table, componente în îmbinarea sudată.

Testele inițiale s-au realizat cu ajutorul microscopului electronic de tip JCM-600A, în vederea realizării următoarelor, utilizându-se următorii parametri:

- deplasare pe direcția x - 0,1 μm
- deplasare pe direcția y - 2,0 μm
- câmpul de vizualizare = 1 μm
- timp de măsurare pe punct - 1 sec

LINEAR ELEMENT DISTRIBUTION

NUMBER OF STEP: 25
INTERVAL (X): 18
INTERVAL (Y): 18
MEAS TIME: 10

ELEMENTIAL

CH(1) MAX= 09239

Variatia
concentratiei
in elementul
(A1)

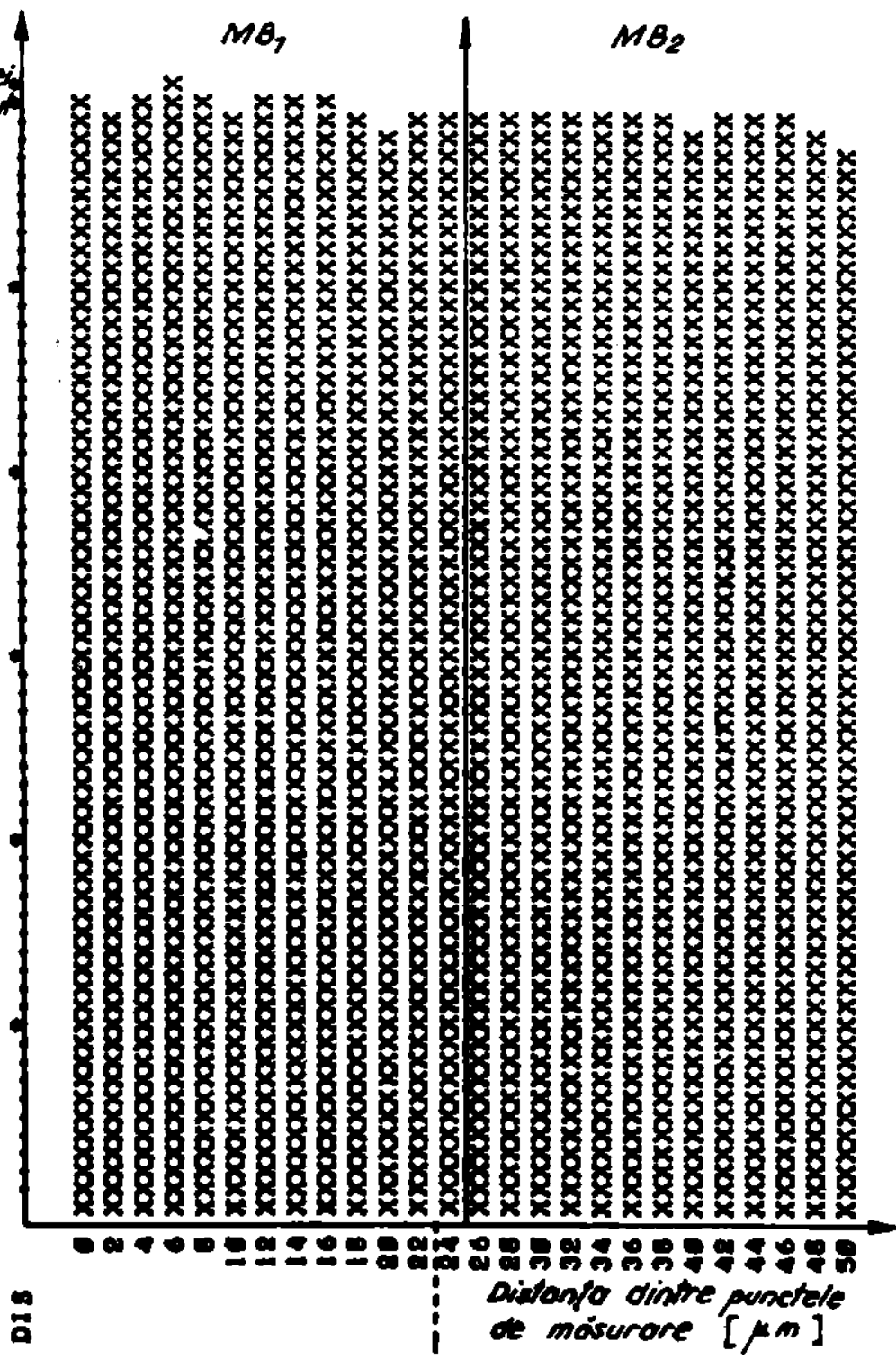
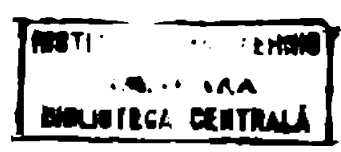


Fig. 12.25



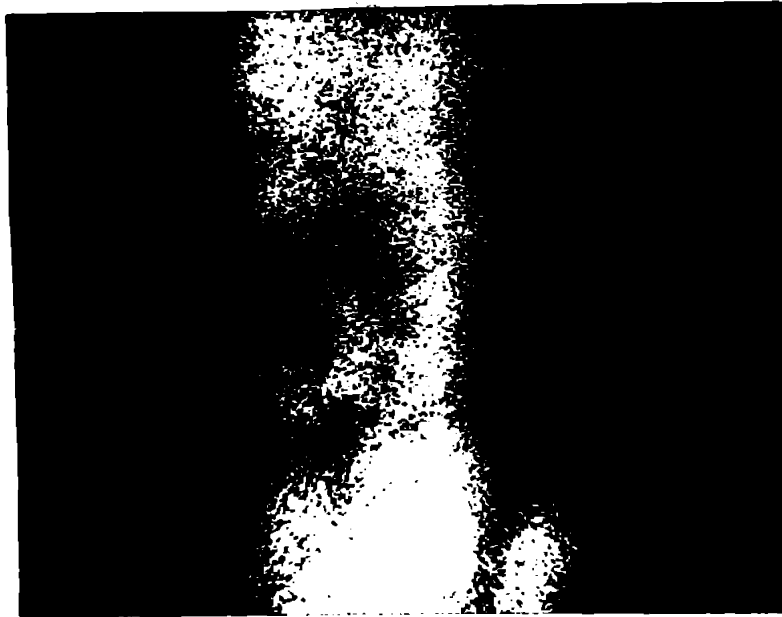


Fig.3.2.26. Îmbinare sudată prin presiune în câmp ultrasonor Cu-Al imagine CAMPO cu electroni retroîmprăștiți microsonda electronică x 1000

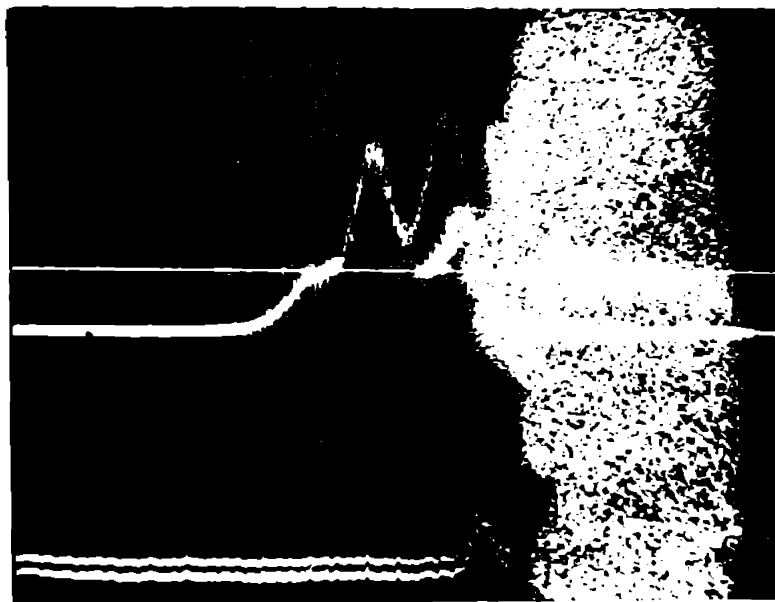


Fig.3.2.27. Concentrația element Al imagine Ix - microsonda electronică; îmbinare sudată (fig.3.2.26)

- numărul pașilor de măsură - 30 pași = $120 \mu m = 0,12 \text{ mm}$
- afișarea rezultatelor pe calculator.

Rezultatele determinărilor se prezintă în figurile : 3.2.28 - 3.2.30. Din analiza acestora rezultă existența fenomenului de difuzie și transfer de masă în realizarea îmbinării. La realizarea îmbinării sudate s-au utilizat timpi de sudare diferiți pentru a pune în evidență existența fenomenului de difuzie în diferite stadii ale acestuia.

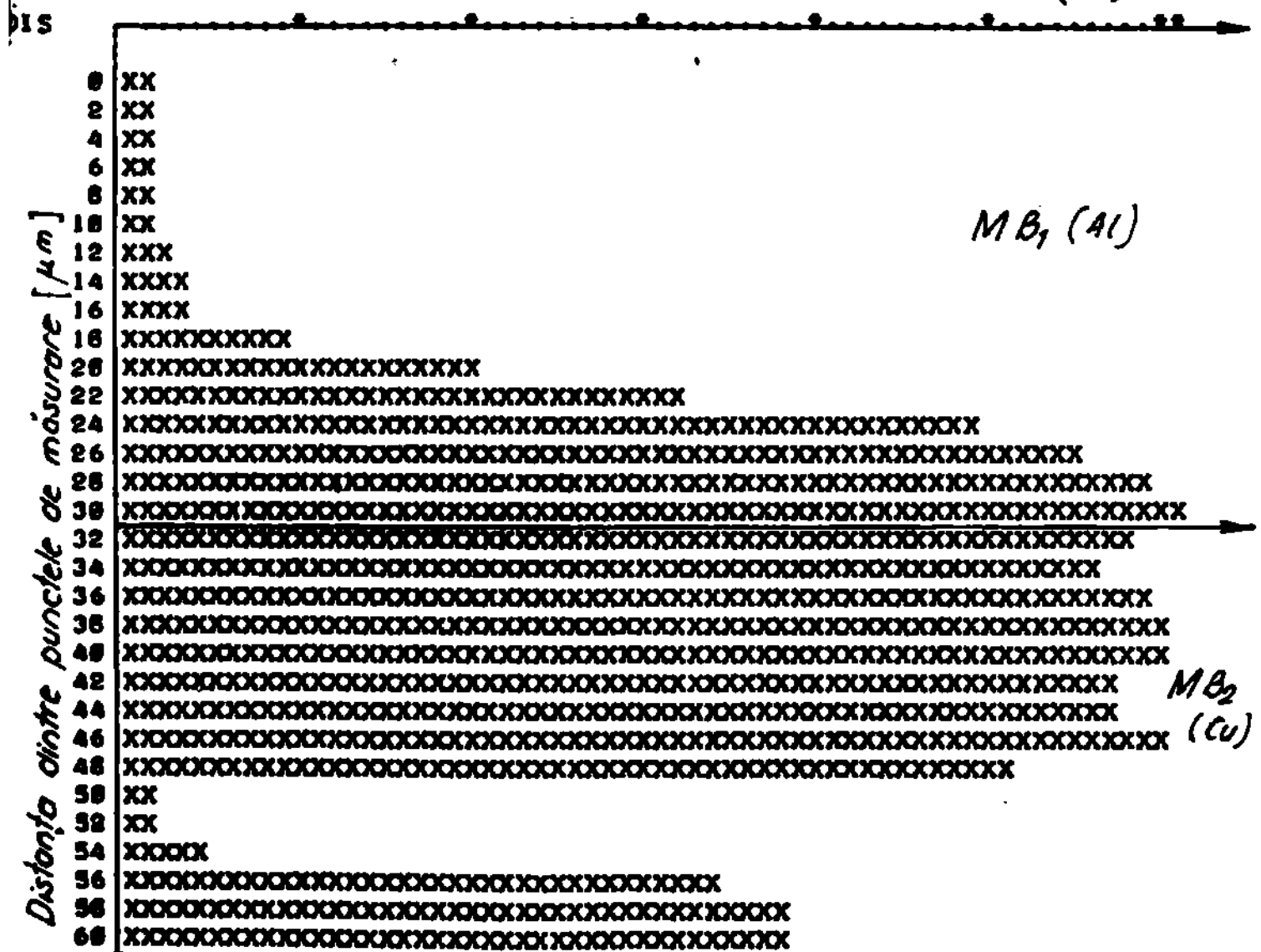
LINEAR ELEMENT DISTRIBUTION

NUMBER OF STEP:30
INTERVAL(X):6
INTERVAL(Y):2
EAS TIME:10

ELEMENT:CU

*CH(2) MAX= 27256

Variația concentrației
în elementul (Cu)



E ETALON: 701.00 0 09.56

Fig. 3.2.31. b

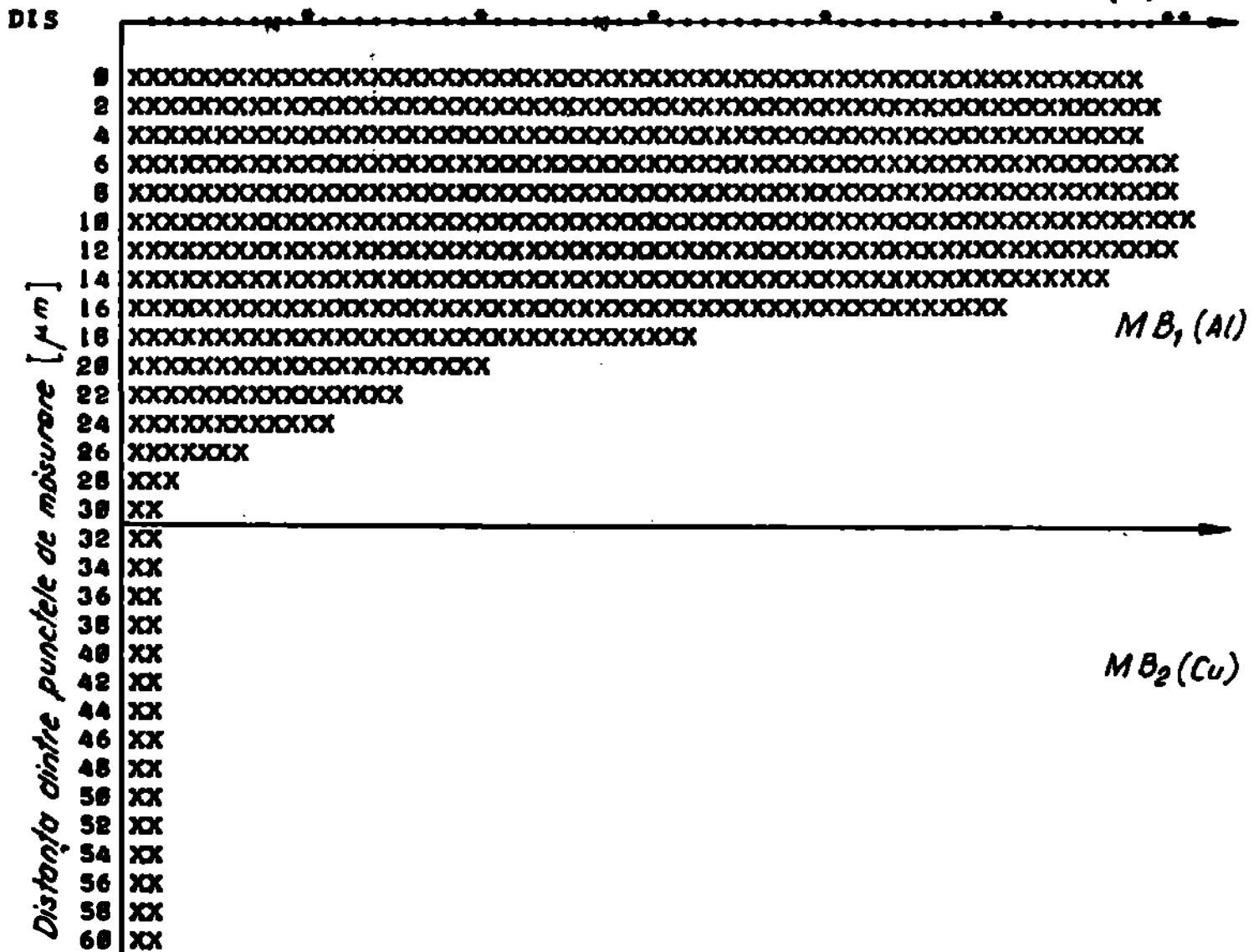
LINEAR ELEMENT DISTRIBUTION

NUMBER OF STEP:30
INTERVAL(X):10
INTERVAL(Y):2
MEAS TIME:10

ELEMENTIAL

*CH(1) MAX= 99343

*Variația concentrației
în elementul (Al)*



FE ETALON:701N80 0 89.56
FE A
FE

LINEAR ELEMENT DISTRIBUTION

NUMBER OF STEP: 30
INTERVAL(X): 6
INTERVAL(Y): 2
START TIME: 10

ELEMENT: CU

*CH(2) MAX= 23645

Variatia concentratiei
in elementul (Cu)

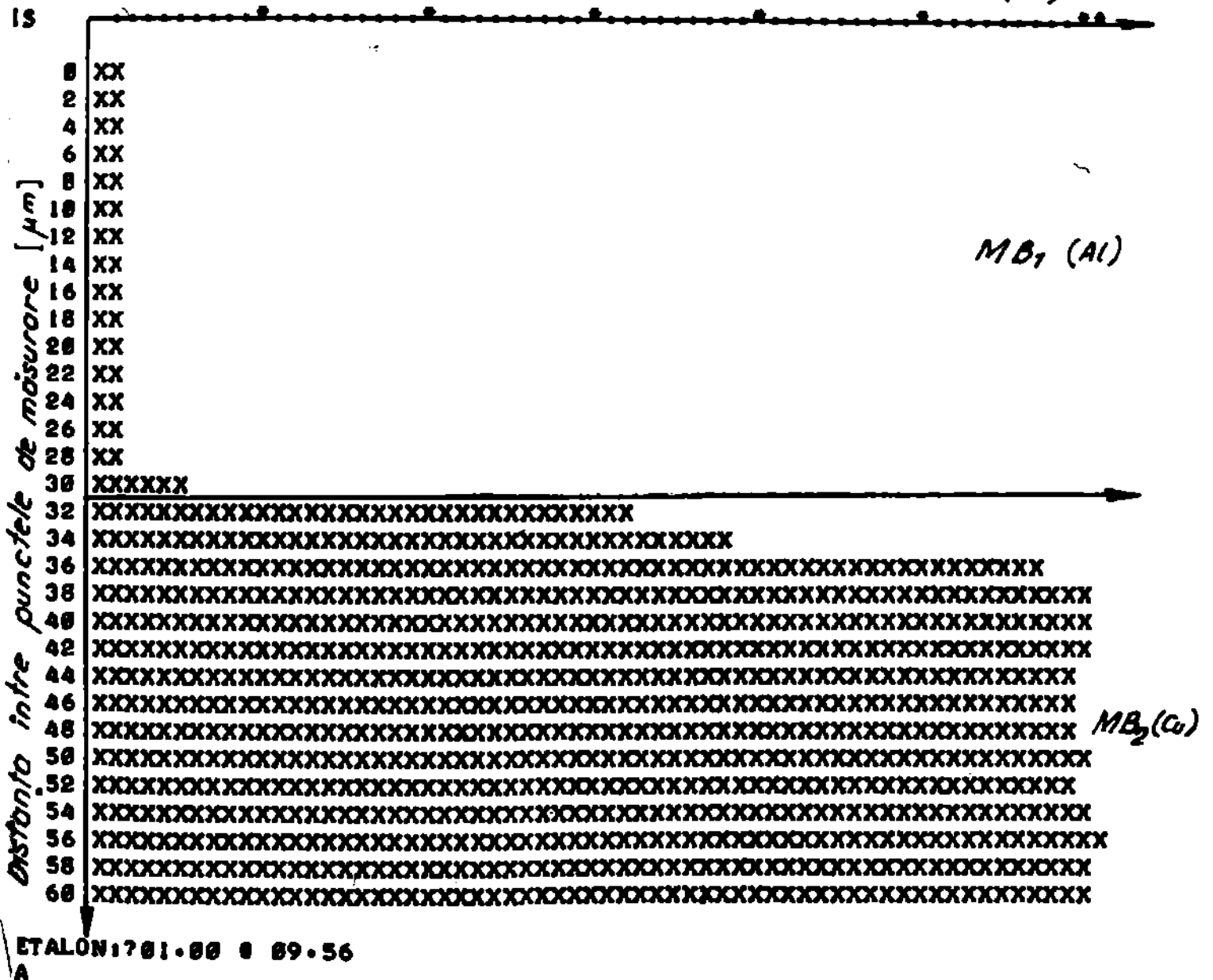


Fig. 3.2.29. b

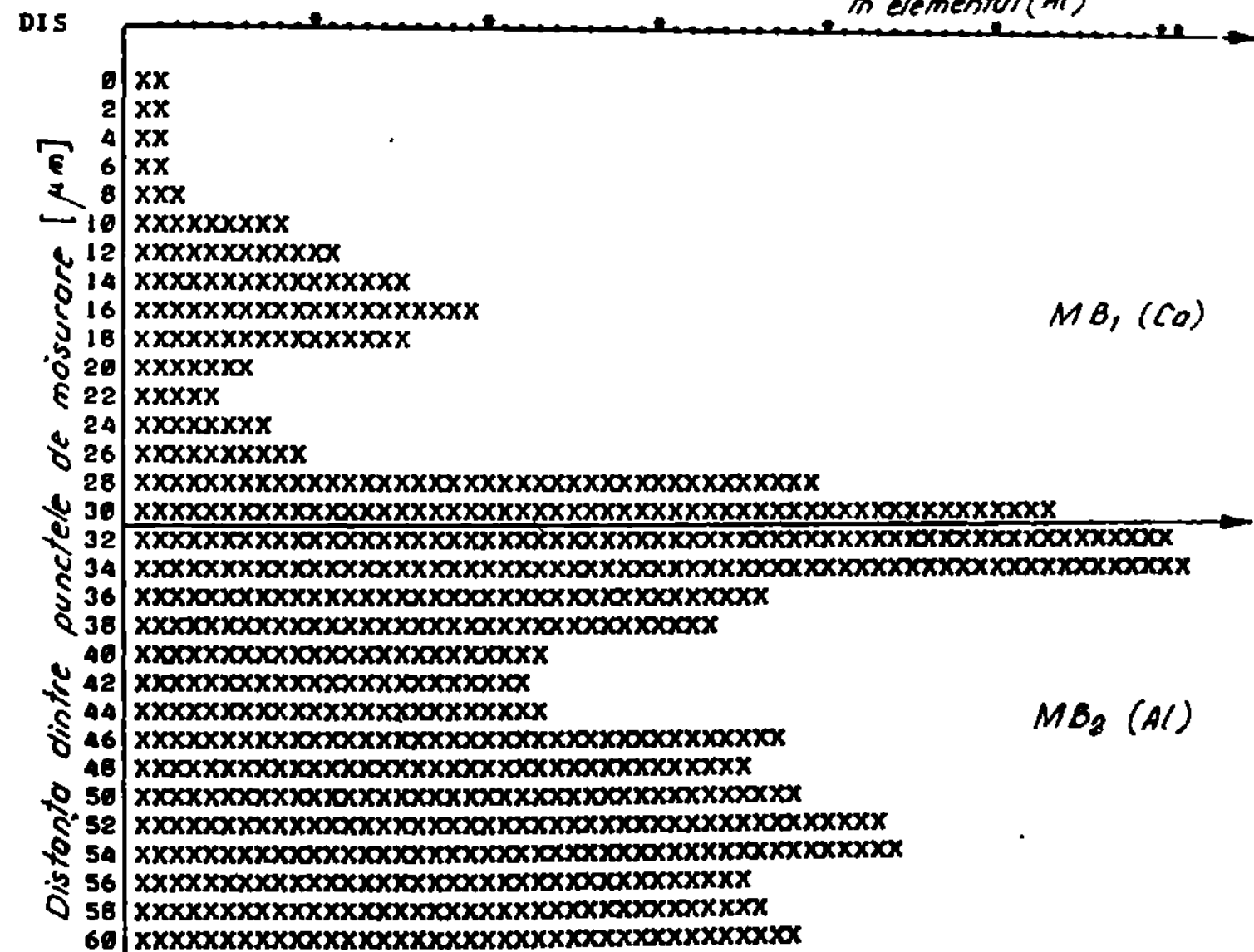
LINEAR ELEMENT DISTRIBUTION

NUMBER OF STEP:30
INTERVAL(X):0
INTERVAL(Y):2
MEAS TIME:10

ELEMENT:AL

*CH(1) MAX= 39786

Variatia concentratiei
In elementul (Al)



FE ETALON: 701.00 • 09.56

Fig. 3.2.30. a

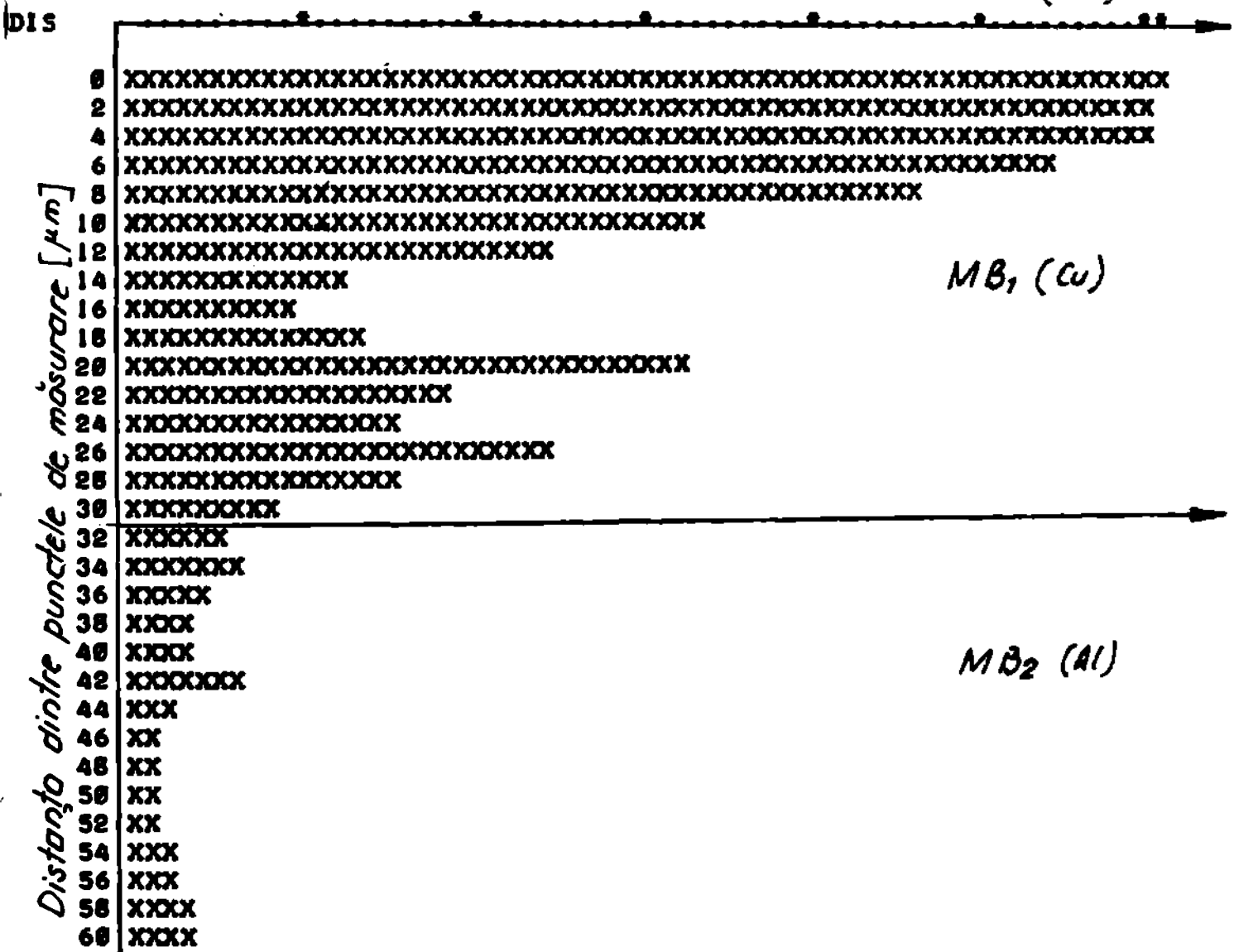
LINEAR ELEMENT DISTRIBUTION

NUMBER OF STEP: 30
INTERVAL(X): 8
INTERVAL(Y): 2
MEAS TIME: 10

ELEMENT: CU

*CH(2) MAX= 22235

Variatio concentratiei
in elementul (Cu)



FE ETALON: 781.88 @ 89.56
FE A
FE

fig. 3.2.30. b

Se observă că adâncimea până la care se manifestă fenomenul de difuzie variază funcție de timpul de sudare utilizat de la $2 \mu\text{s}$ pentru tiapi de sudare de $t_g = 0,5 \text{ s}$ la $22 \mu\text{s}$ pentru $t_g = 1 \text{ s}$ și $t_g = 1,5 \text{ s}$.

Totodată din analiza (fig. 3.2.20 - 3.2.30) se poate trage concluzia că poziția componentelor în procesul de sudare influențează modul de desfășurare a procesului de difuzie, și anume acesta depinde de natura și momentul de vine în contact cu sonotrodul. În cazul în care componenta din aluminiu vine în contact cu sonotrodul, se observă o difuzie mai accentuată a cuprului în aluminiu (fig. 3.2.20 și 3.2.30) și invers a aluminiului în cupru în cazul (fig. 3.2.20).

Acest lucru vine să confirme influența vibrațiilor ultrasonore asupra proceselor de difuzie și transfer de masă în sensul accelerării, activării acestora.

În concluzie se poate afirma că în cazul sudării prin presiune în câmp ultrasonor, unul din mecanismele care contribuie la realizarea îmbinării sudate îl constituie și fenomenul de difuzie și transfer de masă, fenomen activat de câmpul termic existent în zona încălzirii sudate, precum și de acțiunea oscilațiilor ultrasonore.

Deoarece toate fenomenele prezente și care concurează la realizarea îmbinării sudate sînt puternic influențate și condiționate de condițiile termice specifice de realizare a îmbinării sudate, se prezintă în continuare un calcul analitic al bilanșului termic în procesul de sudare prin presiune în câmp ultrasonor.

Făcînd o analogie între procesul de sudare prin presiune în câmp ultrasonor cu procesul de sudare electrică prin presiune în puncte, câmpul termic în materialul componentelor de sudat are o repartiție similară cu cea prezentată în figura 3.2.31.

Cîmpul termic, în procesul de sudare poate fi scris sub forma :

$$Q_p = Q_c \quad (3.2.2)$$

în care :

Q_p reprezintă cantitatea de căldură produsă în procesul de sudare

Q_c - cantitatea de căldură consumată.

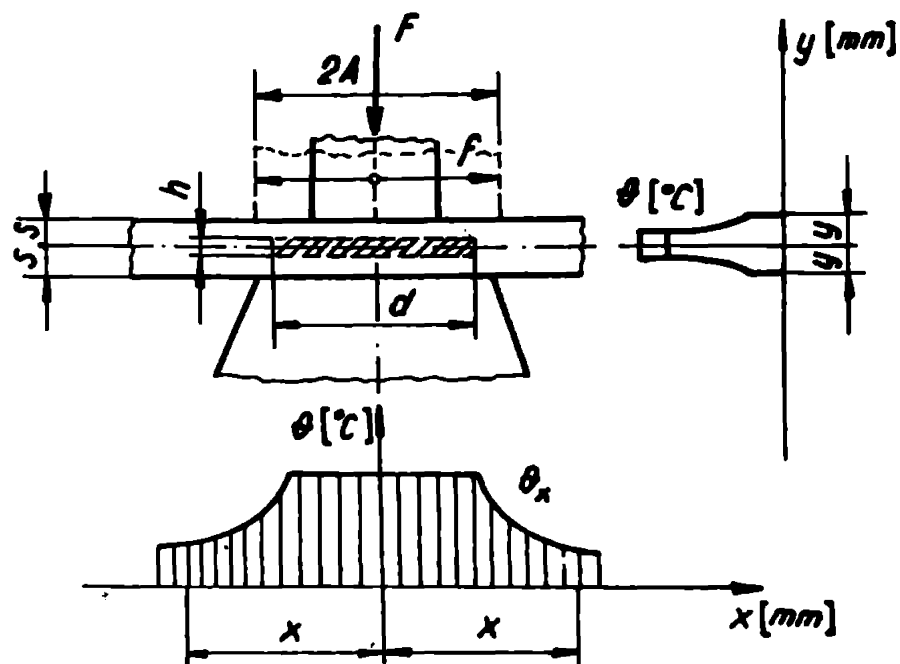


Fig.3.2.31. Repartiția cîmpului termic în materialul componentelor la sudarea prin presiune în cîmp ultrasonor

Analizînd fenomenele ce apar la sudarea prin presiune în cîmp ultrasonor se poate aprecia cantitatea de căldură produsă în procesul de sudare ca fiind :

$$Q_p = Q_{fe} + Q_{fi} + Q_{Ld} \quad (3.2.33)$$

în care :

Q_{fe} reprezintă cantitatea de căldură degajată prin fenomenul de frecare externă între suprafețele componentelor

Q_{fi} reprezintă cantitatea de căldură degajată în materialul componentelor de sudat, datorită fenomenului de frecare internă

Q_{Ld} reprezintă cantitatea de căldură datorată transformării lucrului mecanic de deformare plastică transferat în căldură.

În calcule se va lua în considerare, pentru simplificare și fără a introduce erori prea mari, doar aportul fenomenului de frecare externă la procesul de încălzire al materialului în procesul de sudare.

Aportul cantității de căldură degajată în materialele componentelor de sudat, datorită fenomenului de frecare internă Q_{fi} și a deformării plastice Q_{Ld} la bilanțul termic, poate fi neglijat din următoarele motive :

- ou toate că efectul termic al fenomenului de frecare internă a fost demonstrat pe cale experimentală [46, 1], pînă în prezent explicațiile teoretice ale acestui efect sînt nefundamentale, deci nu există posibilitate de determinare analitică a mărimii Q_{T1} funcție de parametri acustici și proprietățile mecanice și fizice ale materialului ;

- avînd în vedere valoarea relativ mică a deformației plastice (aproximativ 30% maxim) aportul Q_{LD} la bilanțul termic general este neglijabil. De exemplu la sudarea tablelor de Al de grosime $s = 1$ mm, cu aplicarea unei forțe statice de apăsare $F_s = 1000$ N la o deformație plastică de 30%, deci $\Delta s = 3 \cdot 10^{-4}$ m, rezultă o valoare $Q_{LD} = 0,3$ J, mărime total neglijabilă.

În conformitate cu figura 3.2.31 și păstrînd analogia cu procedeul de sudare electrică prin presiune în puncte, cantitatea de căldură consumată Q_c se scrie sub forma :

$$Q_c = Q_{ps} + Q_{cx} + Q_{cy} + Q_T + Q_{cs} + Q_{cCA} \quad (3.2.34)$$

în care :

- Q_{ps} reprezintă cantitatea de căldură absorbită în timpul procesului de sudare de nucleul de metal topit
- Q_{cx} - cantitatea de căldură degajată prin conducție în materialul componentelor de sudat după axa x
- Q_{cy} - cantitatea de căldură degajată în componentele de sudat prin conducție după axa y
- Q_T - cantitatea de căldură degajată prin variație spre mediul înconjurător
- Q_{cs} - cantitatea de căldură cedată prin conducție sonotrodului
- Q_{cCA} - cantitatea de căldură cedată prin conducție corpului ajutător

Avînd în vedere condițiile specifice de realizare a îmbinărilor sudate prin presiune în câmp ultrasonor, mai ales timpul relativ scurt de realizare a acestora, se poate aprecia că, cantitatea de căldură degajată prin variație spre mediul înconjurător este neglijabilă. Totodată, cu toate că în procesul de sudare zonele active ale sonotrodului și ale corpului ajutător se încălzesc considerabil la realizarea de îmbinări sudate repetate, se consideră că acest

fapt se cãtorește frecãrii limitate între acestea și componente de sudat, precum și fenomenului de frecare internã, avind în vedere cã acestea se aflã în ventre ale oscilației ultrasunore, unde, efectul termic al frecãrii interne prezintã un maxim.

În consecințã, ca urmare a celor prezentate, relația (3.2.32) se poate scrie sub forma :

$$Q_{fe} = Q_{ps} + Q_{ox} + Q_{cy} \tag{3.2.35}$$

În expresia (3.2.18) cantitatea de cãldurã degajată prin fenomenul de frecare uscatã dintre cele douã componente în procesul de sudare este :

$$Q_{fe} = \frac{\mu_{ak} \cdot F_s \cdot v_m}{J} \tag{3.2.36}$$

în care J este echivalentul caloric al lucrului mecanic.

Dacã exprimãm viteza medie relativã de deplasare reciprocã a componentelor "v_m" în funcție de parametri oscilațiilor ultrasunore, frecvențe f și amplitudinea vibrației A, conform figurii 3.2.31, se poate scrie :

$$v_m = 4 \cdot A \cdot f \tag{3.2.37}$$

și admitînd cã raportul $\frac{4}{\pi} = \frac{4}{4,187} = 1$, rezultã din (3.2.36) și (3.2.37) cã pentru un timp t de acțiune a vibrației ultrasunore cantitatea de cãldurã degajată de procesul de frecare va fi :

$$Q_{fe} = \mu_{ak} \cdot F_s \cdot A \cdot f \cdot t \tag{3.2.38}$$

Cantitatea de cãldurã absorbitã de nucleul de metal topit se exprimã prin :

$$Q_{ps} = \pi (c_1 + c_2 \cdot \theta_{top}) \tag{3.2.39}$$

unde :

c₁ - cãldura specificã a materialului componentelor

c₂ - cãldura latentã de topire a materialului componentelor

θ_{top} - temperatura de topire a materialului componentelor

m - masa materialului topit

dar

$$m = \delta \cdot V_{punct} \tag{3.2.40}$$

și dacã luãm în considerare cã :

$$V_{punct} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot h \tag{3.2.41}$$

Iar din analiza sudării prin presiune în câmp ultrasonor cu procedul de sudare electrică prin presiune în puncte, punând condiția ca îmbinările sudate realizate prin cele două procedee să fie de egală rezistență, obținem :

$$d = 1,35 \sqrt{s} = 6,5 \sqrt{s} \quad (3.2.42)$$

și înlocuind pe (3.2.40...42) în (3.2.39) adunând că înălțimea punctului sudat este $h = \frac{s}{4}$, operând calculele necesare, obținem :

$$Q_{ps} = 8,29 \sqrt{(c_1 + c_2 \theta_{top})} \cdot s^2 \quad (3.2.43)$$

În expresia (3.2.43) termenii $\sqrt{c_1 + c_2 \theta_{top}}$, c_1 , c_2 și θ_{top} sînt constante de material, deci la sudarea componentelor din același material valoarea acestora este constantă, deci rezultă că putem utiliza notația :

$$K_1 = 8,29 \cdot \sqrt{(c_1 + c_2 \theta_{top})} \quad (3.2.44)$$

Iar expresia (3.2.43) poate fi scrisă de forma :

$$Q_{ps} = K_1 \cdot s^2 \quad (3.2.45)$$

Concomitent însă cu topirea metalului în nucleul punctului sudat are loc și o încălzire a materialului componentelor după axele x, respectiv y.

După axa Ox, încălzirea materialului se produce după un torr (fig.3.2.32).

Din analiza cercetărilor experimentale efectuate pentru cazul sudării electrice prin presiune în puncte și punând analogia amintită, se poate admite că temperatura medie a torrului este de :

$$x_{tl} = 0,175 \theta_{top} \quad (3.2.46)$$

deci cantitatea de căldură consumată prin conducție după axa Ox va fi :

$$Q_{Ox} = b \cdot V_{torr} \cdot c_1 \cdot \sqrt{\theta_x} \quad (3.2.47)$$

în care :

b - constantă

V_{torr} - volumul torrului

Adunând ca :

$$x = 4 \sqrt{st} \quad (3.2.48)$$

unde :

$a = \frac{\lambda}{\sigma \rho}$ - coeficientul de transmitere a căldurii pentru materialul componentelor de sudat

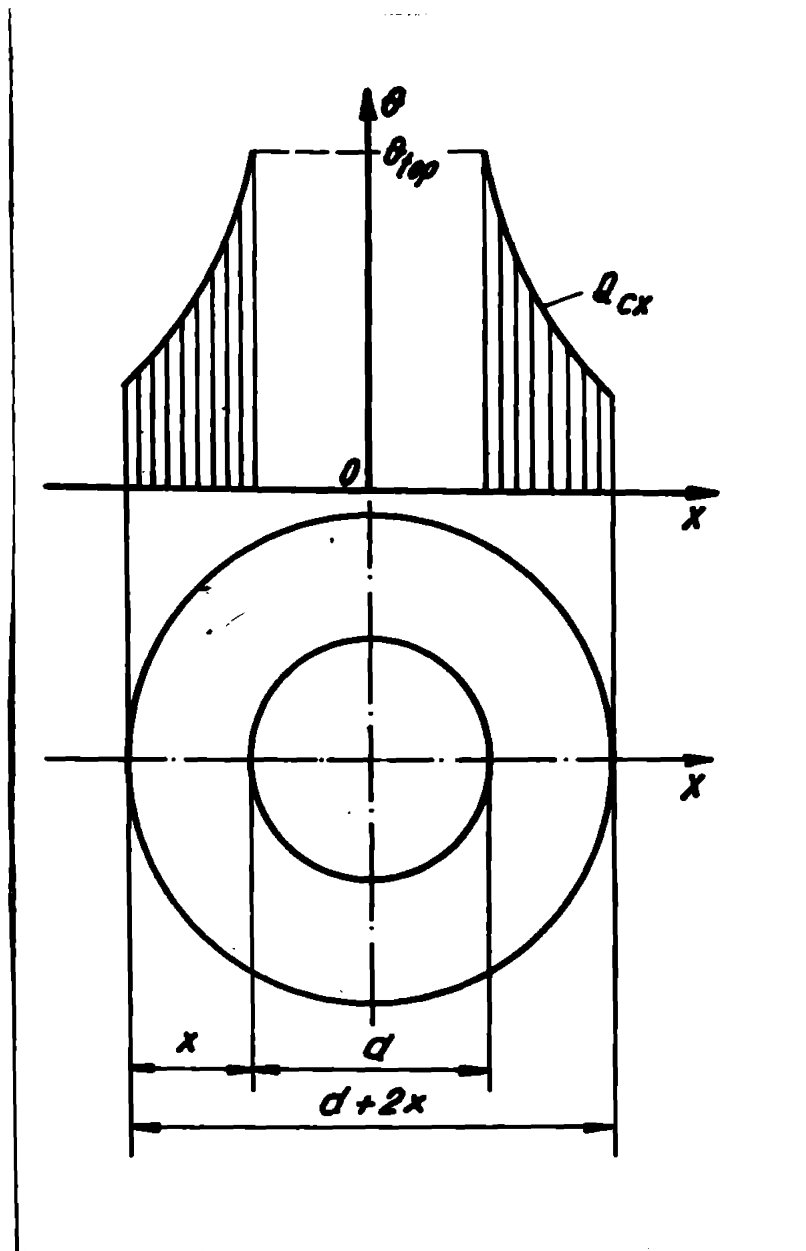


Fig.3.2.32. Dimensiunile terrului în procesul de încălzire a componentelor de sudat

t - timpul de sudare sau durata de acționare a vibrațiilor ultrasunore

și

$$V_{terr} = \pi \cdot x \cdot (d + x) \cdot 2 \cdot s \quad (3.2.49)$$

Admițind pentru x valorile [83]:

- pentru oțel	$x = 1,2 \sqrt{t}$	
- pentru Cu	$x = 3,6 \sqrt{t}$	(3.2.50)
- pentru Al	$x = 3,1 \sqrt{t}$	

rezultă pentru cazul sudării tablelor de aluminiu :

$$Q_{cx} = 2,2 \cdot b \cdot c_1 \cdot \gamma \cdot \theta_{top} (6,5 \sqrt{a \cdot t \cdot s} + 4 \cdot a \cdot t) \quad (3.2.51)$$

ca și în cazul anterior se pot cuprinde constantele de mate-

rial în cadrul uneia singură în cazul sudării componentelor din același material :

$$K_2 = 2,2 \cdot b \cdot c \cdot \gamma \cdot \theta_{top} \quad (3.2.52)$$

rezultă expresia pierderilor de căldură prin conducție în masa componentelor după axa x de forma :

$$Q_{c_x} = K_2 (6,5 \sqrt{a \cdot t \cdot s} + 4 \cdot a \cdot t) \quad (3.2.53)$$

În mod similar cantitatea de căldură consumată prin conducție în materialul componentelor după axa y are forma :

$$Q_{c_y} = b \cdot V_0 \cdot c_1 \cdot \gamma \cdot \theta_y \quad (3.2.54)$$

în care b, c₁ și γ au semnificația prezentată anterior, iar

$$y' = \frac{1}{2} x = 2 \sqrt{a t} \quad (3.2.55)$$

deci :

$$V_0 = 66 \cdot s \cdot \sqrt{a \cdot t} \quad (3.2.56)$$

Considerînd că pierderile de căldură prin conducție după axa (y se încadrează într-un cilindru și :

$$\theta_y = 0,08 \theta_{top} \quad (3.2.57)$$

rezultă :

$$Q_{c_y} = 5,28 \cdot b \cdot c_1 \cdot \gamma \cdot \theta_{top} \cdot s \sqrt{a \cdot t} \quad (3.2.58)$$

Înglobînd constantele de material într-o singură constantă

$$K_3 = 5,28 \cdot b \cdot c_1 \cdot \gamma \cdot \theta_{top} \quad (3.2.59)$$

obținem expresia pierderilor de căldură prin conducție după axa (y, de forma :

$$Q_{c_y} = K_3 \cdot s \cdot \sqrt{a \cdot t} \quad (3.2.60)$$

Revenind la expresia (3.2.55) bilanțul termic va avea expresia :

$$\mu_{ak} \cdot F_B \cdot A \cdot f \cdot t = K_1 \cdot s^2 + K_2 (6,5 \sqrt{a \cdot t \cdot s} + 4 \cdot a \cdot t) + K_3 s \sqrt{a \cdot t} \quad (3.2.61)$$

Expresia (3.2.61) poate fi ordonată în funcție de parametrul t sau timp de sudare. Rezultă funcția Z(t) de forma :

$$Z(t) = (\mu_{ak} \cdot F_B \cdot A \cdot f - K_2^2) t - (K_2^2 \sqrt{s} + K_3^2 \cdot s) \sqrt{t} - K_1 \cdot s^2 \quad (3.2.62)$$

și punind condiția ca funcția $Z(t)$ să admită un extrem

$$\frac{dZ(t)}{dt} = 0 \quad (3.2.63)$$

obținem expresia timpului optim de sudare de forma :

$$t_{opt} = \frac{[k_2' \sqrt{s} + k_3' \cdot s]^2}{4(\mu_{ak} \cdot F_s \cdot A \cdot f - K_2'')^2} \quad (3.2.64)$$

Relația (3.2.64) permite determinarea valorii orientative a timpului de sudare la sudarea prin presiune în câmp ultrasonor. Utilizând relația de mai sus la calculul timpului de sudare în cazul tablelor de Al de grosimi 0,8 și 1 mm, rezultatele obținute sînt aproape de valorile optime ale timpului de sudare determinate pe cale experimentală.

Totodată relațiile prezentate permit pe de o parte, determinarea pe cale analitică, atât a temperaturii atinse în zona de separație dintre cele două ca urmare a căldurii degajate de fenomenul de frecare uscată, cât și trasarea curbelor izoterme în jurul punctului sudat.

Pornind de la expresia câmpului termic a unei surse plane instantanee de forma :

$$Q(y,t) = \frac{Q}{\sigma \cdot 2 \sqrt{\pi \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c \cdot t}} \cdot e^{-\frac{y^2}{4 \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot t}} \quad (3.2.65)$$

și înlocuind pe Q care reprezintă sursa plană instantanee de căldură cu expresia (3.2.33) care reprezintă cantitatea de căldură produsă de fenomenul de frecare uscată și efectuînd operațiile corespunzătoare, rezultă :

$$Q(y,t) = \frac{\mu_{ak} \cdot F_s \cdot A \cdot f \cdot \sqrt{t}}{2 \sqrt{\pi \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c}} \cdot e^{-\frac{y^2}{4 \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot t}} \quad (3.2.65)$$

Comparînd expresia (3.2.65) pentru cazul în care se determină temperatura la suprafața de separație dintre cele două componente, deci pentru $y = 0$,

$$e^{-\frac{y^2}{4 \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot t}} = e^0 = 1$$

care devine :

$$\theta_{(y=0;t)} = \frac{\mu_{ak} \cdot F_s \cdot A \cdot f \sqrt{t}}{2 \sqrt{\pi} \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c} \quad (3.2.66)$$

cu expresia (3.2.31)

$$\theta = \frac{\mu_{ak} \cdot A \cdot F_s \cdot t}{4 \pi \cdot l_0 \sqrt{\pi} \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c} (t^2 - 5t + 15)$$

să observă o asemănare evidentă între acestea.

Pentru a verifica veridicitatea acestora s-a calculat temperatura în cazul aluminului utilizându-se ambele relații (3.2.31) și (3.2.66), rezultatele prezentându-se în tabelul 3.2.1.

Tabelul 3.2.1

Relația	Parametri	Temperatura °C
$\theta = \frac{\mu_{ak} \cdot F_s \cdot A \cdot f \sqrt{t}}{2 \sqrt{\pi} \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c} \quad (3.2.66)$	$\mu_{ak} = 1,9$ $F_s = 10^3 \text{ N}$ $A = 40 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $f = 20 \cdot 10^3 \text{ 1/s}$	704 °C
$\theta = \frac{\mu_{ak} \cdot A \cdot F_s \cdot t}{4 \pi \cdot l_0 \sqrt{\pi} \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c} (t^2 - 5t + 15) \quad (3.2.31)$	$l_0 = 10^{-2} \text{ m}$ $t = 1 \text{ s}$	682 °C

Diferența între cele două moduri de determinare a temperaturii, conform relațiilor (3.2.31) și (3.2.66) este nesemnificativă (22°C), aceasta se datorează probabil simplificărilor admise la stabilirea expresiilor (3.2.31) și (3.2.66).

Rezultatele obținute atestă și ele că în cazul sudării prin presiune în ciup ultrasonor, (în zona de contact între elemente) existența fazei lichide confirmă afirmațiile bazate pe cercetarea experimentală.

Cu ajutorul expresiei (3.2.65) se pot ridica curbele izoterme în materialul componentelor, plecându-se de la afirmația că în zona îmbinării există sursa termică o constituie cantitatea de căldură degajată în procesul de frecare uscată între cele două componente, iar sursa de căldură este o suprafață plană.

În figura 3.2.32 se prezintă izotermele temperaturilor determinate cu relația (3.2.65) în cazul sudării table-

lor de aluminiu cu oxizi de 1 mm, utilizându-se parametri de sudare prezentați în tabelul 3.2.1.

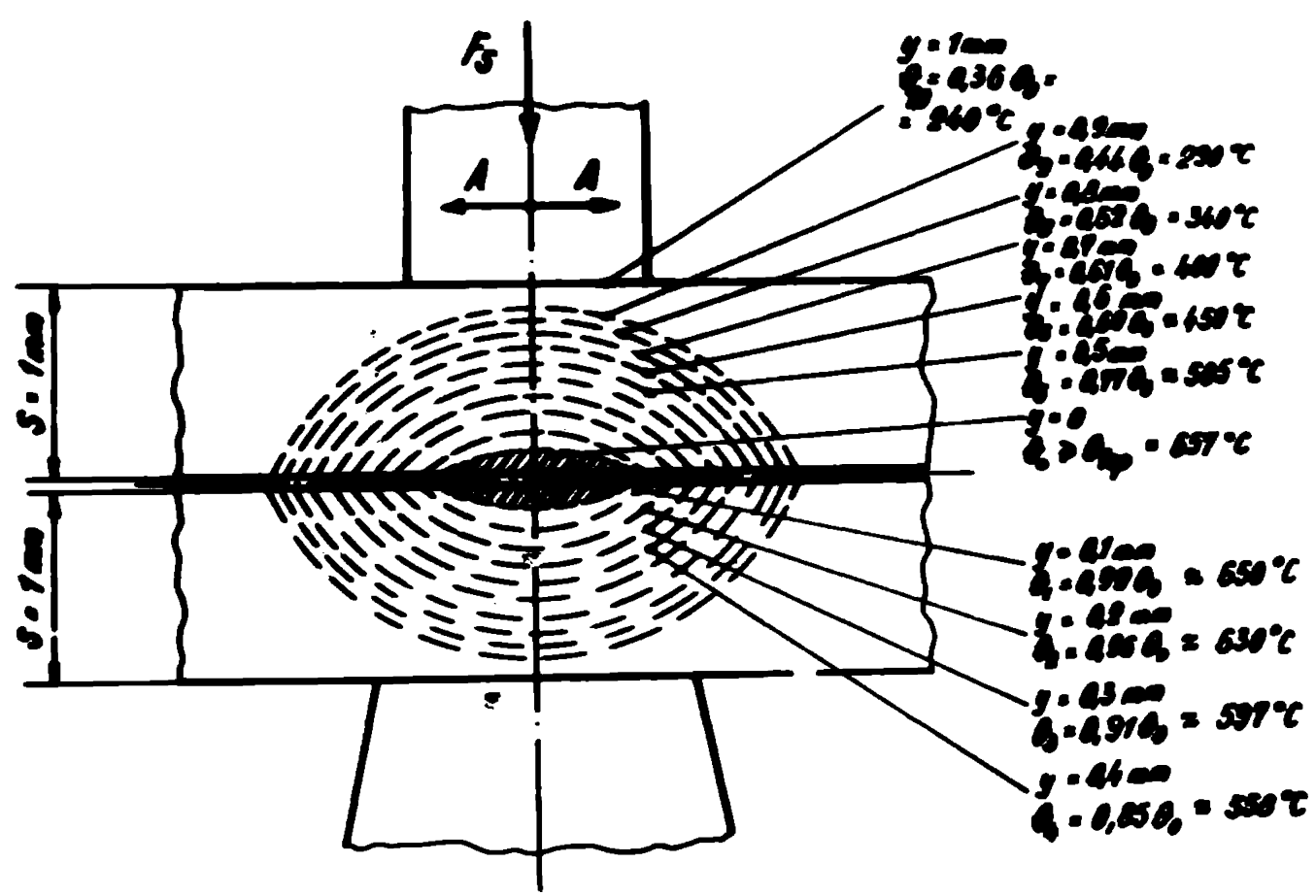


Fig.3.2.33. Izotermele temperaturilor la sudarea prin presiune în câmp ultrasonor

Concluzionând cele prezentate, se poate afirma că mecanismul de formare al îmbinărilor sudate prin presiune în câmp ultrasonor cuprinde o serie de fenomene, care se intercondiționează și interpătrund, concurând toate la realizarea acesteia.

După curățirea suprafețelor de sudat, datorită acțiunii undelor ultrasonore (de oxizi și impurități) sub acțiunea forței statice de apăsare se realizează contactul intim între suprafețele de metal curat a celor două componente. Datorită deplasării sacadate, relative, a suprafețelor reciproce de la ovență egală cu frecvența undelor ultrasonore și sub acțiunea forței statice de apăsare, datorită fenomenului de frecare acestă între componente se dezvoltă o anumită cantitate de căl-

dură, care împreună cu căldura datorată lucrului mecanic de deformare plastică a componentelor și cea datorată fenomenului de frecare internă duc la topirea materialului în zona de contact. Anupre extinderii în profunzime a zonei topite de metal nu se pot face aprecieri, determinarea acestuia constituind tema unor cercetări ulterioare.

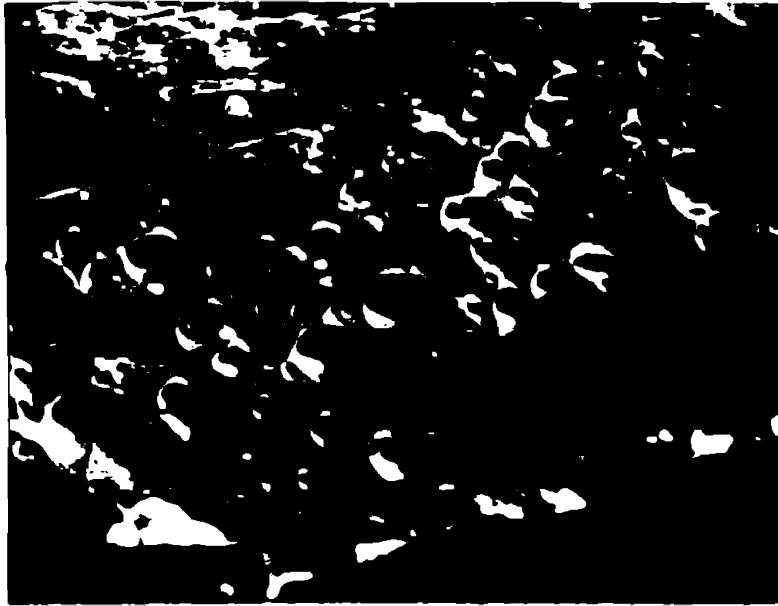


Fig.3.2.34. Aspectul rupturii punctului sudat, microsonda electronică; imagine SEI x 500

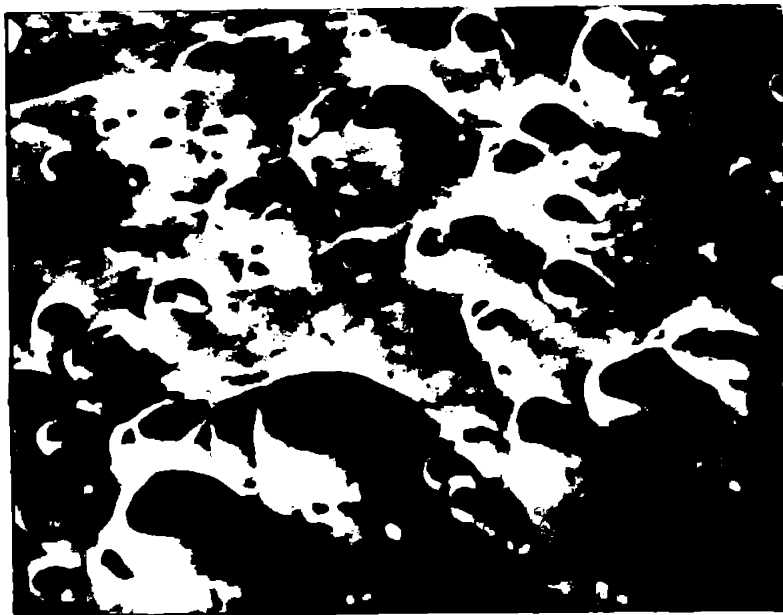


Fig.3.2.35. Aspectul rupturii punctului sudat, microsonda electronică; imagine SEI x 1000

Pe baza izotermelor de temperatură (fig. 3.2.33) se poate însă aprecia că grosimea materialului topit este de cel puțin 0,1 mm la sudarea tablelor de Al cu s = 1 mm, fapt înăd ce trebuie determinat și pe cale experimentală.

În această fază, sub influența stării complexe de tensiuni determinate de forța statică de apăsare și de vibrațiile ultrasonore, se manifestă procesul de difuzie și transfer de masă, sînt create condițiile necesare apariției forțelor de legătură coeziionale.

În zona îmbinării sudate se realizează astfel o rețea comună, corespunzătoare unei stări stabile. În sprijinul acestei afirmații vine aspectul ruperii, debutonării îmbinărilor sudate, aspect care atestă caracterul ductil al acestora (fig.3.2.35 și 3.2.34).

În zona îmbinării sudate se realizează astfel o rețea comună, corespunzătoare unei stări stabile. În sprijinul acestei afirmații vine aspectul ruperii, debutonării îmbinărilor sudate, aspect care atestă caracterul ductil al acestora (fig.3.2.35 și 3.2.34).

La interpretările fenomenelor ce concură la realizarea îmbinărilor sudate prin presiune în câmp ultrasonor trebuie avut în vedere în permanență și acțiunea vibrațiilor ultrasonore asupra comportării materialelor, ca : procesul de generare de noi dislocații și scindarea vîrtejii de deplasare a acestora, interacțiunea undelor ultrasonore cu dislocațiile aflate în mișcare, activarea și concentrarea vîrtejilor, amplificarea și absorbția energiei ultrasonore de către defectele rețelei cristaline și la limita grăunților, fenomenul de frecare internă și relaxarea limitei grăunților, activarea proceselor de deformare plastică, difuzie și transfer de masă, precum și a procesului de recristalizare.

Toate aceste aspecte intrasec și completează mecanismul complex de realizare al îmbinărilor sudate prin presiune în câmp ultrasonor.

Capitolul 4

CERCETARI EXPERIMENTALE PRIVIND SOLIDAREA PRIN PRESIUNE ÎN CÂMP ULTRAFONOR A TABLILOR DIN ALUMINIU

4.1. Considerații asupra proprietăților aluminului

Alumiul este metalul cel mai răspândit de pe suprafața pământului, constituind 7,5% din aceasta [123].

În sistemul periodic al elementelor, alumiul face parte din elementele perioadei a treia, grupa III-a, cu numărul de ordine 13. Nucleul său este format din 13 protoni și 14 neutroni, electronii care înconjoară nucleul în număr de 13 fiind plasați pe trei nivele energetice și anume : 2 electroni pe nivelul energetic cel mai apropiat de nucleu, 8 pe nivelul intermediar și 3 pe nivelul exterior. Valența sa este III.

Greutatea atomică a aluminului este de 26,974, temperatura de topire 659°C și cea de vaporizare 2270°C .

Raza ionică a aluminului este de $0,60 \text{ \AA}$

Este foarte avid de oxigen, combinându-se energic cu acesta, extern, rezultând Al_2O_3 - alumina. În atmosferă, alumiul se acoperă cu un strat compact de alumina (Al_2O_3), strat ce protejează pătrunderea în continuare a oxigenului spre interior. Grosimea stratului de Al_2O_3 de pe suprafața unui corp din alumiul variază între $0,01 \dots 0,1 \mu\text{m}$; ea este funcție de mediul și temperatura la care se găsește acesta, știut fiind faptul că în general viteza de oxidare a unui metal variază cu puterea temperaturii la care are loc oxidarea.

Apa, distilată sau potabilă, nu acționează asupra aluminului. În anumite cantități însă, peste stratul de Al_2O_3 anhidru se depune un strat de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ cristalinizat, numit boehmit.

Apa cu conținut prea ridicat de cloruri sau săruri alcaline atacă alumiul pe suprafața sa.

Stratul protector de alumina de pe suprafața pieselor

de aluminiu nu este atacat de acizii oxigenați (NO_3H) însă este dizolvat de hidroacizi (ex. HCl)

Hidroacizii alcalini dizolvă aluminiul cu degajare de hidrogen și formare de aluminat de sodiu.

Aluminiul acționează violent cu clorul (Cl) și bromul (Br), reacția desfășurându-se cu degajare de căldură și lumină.

Combinările chimice ale aluminiului cu iodul (I) și sulfură (S) și azotul (N) pot avea loc numai în cald.

În perspectivă sînt combinațiile metaloorganice ale aluminiului, adică cele cu legătura directă metal - carbon.

4.1.1. Proprietăți fizice, mecanice și tehnologice

Aluminiul este un metal alb-argintiu, care are proprietatea de a-și păstra în timp aspectul, datorită peliculei subțiri protectoare de oxid de aluminiu.

Face parte din categoria metalelor ușoare, avînd greutatea specifică de 270 kg/m^3 . Valoarea acestei variaza în funcție de puritatea metalului și de temperatura acestuia. Dacă la temperatură mediului ambiant 20°C , $\gamma = 270,3 \text{ kg/cm}^3$, la 660°C metalul fiind încă în stare solid $\delta = 255 \text{ kg/cm}^3$, pentru ca tot la 660°C dar în fază lichidă $\delta = 238,2 \text{ kg/m}^3$, iar la 1100°C $\delta = 226,2 \text{ kg/m}^3$ [74].

În punct de vedere al purității metalului, situația este următoarea : la Al 99,996% la 20°C $\delta = 270,89 \text{ kg/cm}^3$, pentru Al 99,5% $\delta = 270,5 \text{ kg/m}^3$ și pentru Al 99,00% $\delta = 271 \text{ kg/m}^3$.

La solidificarea aluminiului din fază lichidă apare o contracție de 6,6%.

În fază lichidă greutatea specifică a aluminiului se poate determina cu relația [40]:

$$\gamma_{\text{L}} = 2,382 - 0,000275 (\theta - 660) \quad (4.1.1)$$

în care θ este temperatura de măsurare în $^\circ\text{C}$.

Temperatura de topire a aluminiului pur (99,996%) este de $660,24^\circ\text{C}$ și a aluminiului tehnico (99,2%) de 657°C . Temperatura de fierbere, la presiune normală, 209°C . Căldura latentă de topire este de $3,959 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$, iar cea de fierbere este de $96,505 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$.

Tensiunea superficială a aluminiului este de $0,52 \text{ N/m}$.

tensiunea de vapori la 660°C în fază topită de $0,00062 \text{ mg Hg}$ iar la 1030°C de 1 mg Hg .

Conductibilitatea termică a aluminiului la 20°C este de $217,7136 \text{ J/m}^{\circ}\text{C s}$. În comparație cu conductibilitatea termică a argintului, aluminiul are o valoare mai scăzută a acesteia și anume 50% din cea a argintului.

Coefficientul de dilatare linear este variabil fiind funcție de temperatură. Spre exemplu la -193°C are valoarea de $3,5 \cdot 10^{-6}$, la 20°C $22,4 \cdot 10^{-6}$ și la 100°C de $31,1 \cdot 10^{-6}$. Pentru intervalul de temperatură $20 \dots 100^{\circ}\text{C}$ se recomandă a se utiliza valoarea medie a acestuia de $23,8 \cdot 10^{-6}$ [74].

Ca urmare a acestei situații, volumul pieselor din aluminiu este funcție de temperatura la care se află acestea, conform relației :

$$V_{\theta} = V_{660^{\circ}\text{C}} [1 + 0,000114 (\theta - 660)] \quad (4.1.2)$$

În punct de vedere magnetic, aluminiul este un metal ușor paramagnetic.

Conductibilitatea specifică termică reprezintă principala proprietate fizică a aluminiului dacă este aplicată împreună sau raportată la greutatea specifică a acestuia. Din punct de vedere al acestei proprietăți fizice, aluminiul se plasează imediat după Ag, Au și Cu.

Inversul conductibilității electrice, rezistivitatea aluminiului la 20°C și puritate 99,9% este de $2,63 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}^2/\text{m}$. Este deci 0,43% din rezistivitatea cuprului ($1,7241 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}^2/\text{m}$). Întrucât și în aluminiu mărește rezistivitatea, deci și în ceea ce privește rezistivitatea. Pentru exemplificare, ceea ce înseamnă că rezistivitatea cuprului (100%) conductibilitatea aluminiului 99,996% este aproximativ 66%, a Al 99% de Cu, a Al 99% de 53% și a Al 98% de 55%. În figura 4.1.1 se prezintă influența elementelor de aliere a aluminiului asupra conductibilității electrice (a) și termice (b) a aluminiului [74].

Rezistivitatea variază și ea funcție de temperatură conform relației :

$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}\text{C}} [1 + \alpha (\theta - 20)] \quad (4.1.3)$$

în care ρ_{θ} este rezistivitatea la temperatura θ și α coeficientul de rezistivitate al aluminiului ($\alpha = 4 \cdot 10^{-3}$).

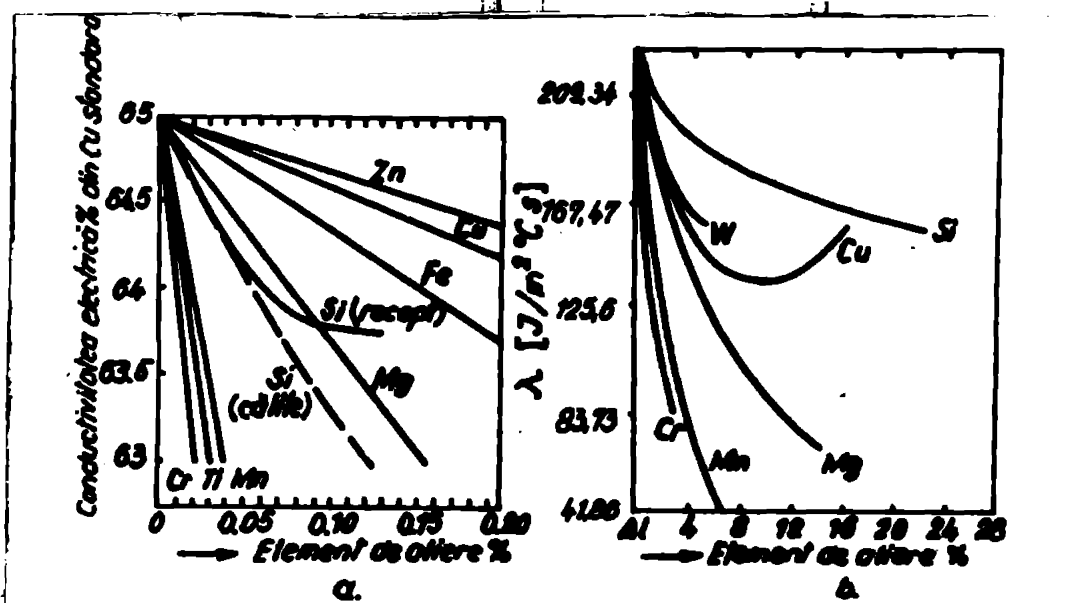


Fig.4.1.1. Influența principalelor impurități asupra caracteristicilor fizice ale aluminiului

Valorile medii ale principalelor proprietăți mecanice ale aluminiului sînt [74, 123]: modulul de elasticitate 6700 daN/mm², modulul de torsiune 2700 daN/mm² și coeficientul lui Poisson 0,34. Aceste caracteristici variază funcție de impurități, precum și funcție de temperatură.

La Al 99,996%, rezistența la rupere este de 5,2 daN/mm² la o alungire de 62%.

Rezistența la rupere și duritatea cresc cu starea de seruisare; alungirea scade. Temperatura influențează în sens invers aceste proprietăți.

Temperatura de turnare a aluminiului este de 710...730°C, cea de prelucrare prin deformare plastică 350...450°C, temperatura de recoscare 370...400°C, cea de recristalizare 150°C, dilatarea la topire 6,5%, contracția lineară 1,7% [74, 81].

4.1.2. Proprietăți structurale

Aluminiul cristalizează în sistemul cubic cu fețe centrate (CFC), avînd la 20°C parametrul rețelei cristaline de 4,025 Å

Spre deosebire de alte metale ce cristalizează în sistemul cubic cu fețe centrate, aluminiul are o microstructură formată din poliedre fără nodule. Nodulele nu apar în aluminiu nici prin deformări plastice și nici prin recoscare. De-

formările plastice conduc la apariția liniilor de alunecare obișnuite.

Mărimea grăunților depinde în mare măsură de natura și cantitatea impurităților. La creșterea gradului de puritate al aluminiului grăunții cristalini ai acestuia devin mai mari.

Grăunții grosolani sînt nedoriți, din punct de vedere tehnic. O finisare a structurii aluminiului se poate asigura prin alierea sa cu 0,1...0,2% Si.

Aluminiul avînd o temperatură de topire scăzută, capacitatea sa de a forma soluții solide cu alte metale este mică. Din acest motiv, în aliajele de aluminiu binare sau complexe apar frecvent compuși definiți fragili și duri, care influențează substanțial proprietățile aliajului.

4.1.3. Considerații asupra sudabilității aluminiului și aliajelor sale

În general se poate considera că aluminiul și aliajele sale au o comportare satisfăcătoare la sudare. Trebuie totuși menționat că pentru aproape toate procedeele de sudare ale aluminiului există recomandarea generală de-a asigura în zona îmbinării sudate o suprafață de metal curat, lipsită de stratul de oxizi, știut fiind faptul că oxidul de aluminiu Al_2O_3 are temperatura de topire de aproximativ $2030^{\circ}C$ și avînd o greutate specifică mai mare decît cea a aluminiului, particule de Al_2O_3 în stare solidă rămîn în suprafața de metal topit, ele amorșind rupele fragile ale metalului sau conducînd la realizarea cusăturilor sudate cu defecte de nepatrundere.

Sudabilitatea aluminiului și a aliajelor sale principale se prezintă în tabelul 4.1.1 [19] (conform datelor furnizate de firma "INDOV INDUSTRIAL SMI", firmă ce controlează mai mult de 60% din exportul mondial de aluminiu și aliaje de aluminiu)

Se constată că aliajele de aluminiu au o sudabilitate mai redusă decît a aluminiului tehnic. Pe de altă parte, unele aliaje de aluminiu necesită modificarea compoziției metalului de adunare utilizat prin utilizarea unor elemente de aliere. Grupate după regiunea acțiunii asupra proprietăților îmbinării sudate se precizează:

Taboulul 4.1.1

Procedul Al
de sudare tehnic AlMn AlMg AlMgSi AlMgSiCu AlMgCu AlCuMgSi
99,5%

NIG	FB	FB	B	B	B	P	P
NIG	FB	FB	B	B	B	P	P
SF	B	B	S	S	S	B	B
cu flacă- ră de gaze	B	B	S	F	S	B	B
prin re- sistență	B	B	B	B	B	B	B
lipire	E	B	S	E	S	S	B
electric în puncte	B	B	-	-	-	-	-
la rece	B	B	B	-	-	-	-
cu ultra- sunete	B	B	-	-	-	-	-

Legendă : FB - foarte bine; B - bine; - - suficient; P - po-
sibil; B - neadecvat

Ti, Sr - conduc la rafinarea metalului după prin suda-
re, reduc tendința de fisurare, a formării de
retasuri și de segregării

Si, Mn - micșorează pericolul de fisurare

Ba, Ca, Sr, Mn - în aliajul cusăturii conduc la apari-
ția porilor

de - combate tendința de apariție a porilor

Aluminiul și aliajele sale, în stare topită, au propri-
etatea de-a absorbi hidrogenul din atmosferă în cantități mari.
Acesta, în timpul solidificării metalice, este expulzat
din soluție, el nefiind solubil conduce la formarea porilor.
Creșterea bruscă a absorbției de hidrogen se produce în jurul
temperaturii de topire $\approx 660^{\circ}\text{C}$.

Lăcherită ciclului termic la sudare, în aluminiu și mai
ales în aliajele sale se poate produce precipitarea compușilor
din metalul de bază, înrăutățindu-se astfel caracteristicile
mecanice și rezistențe la coeziune.

Pe lângă fenomenele de precipitare, încălzirea piese-
lor din aluminiu și aliajele sale, aproape de temperatura de

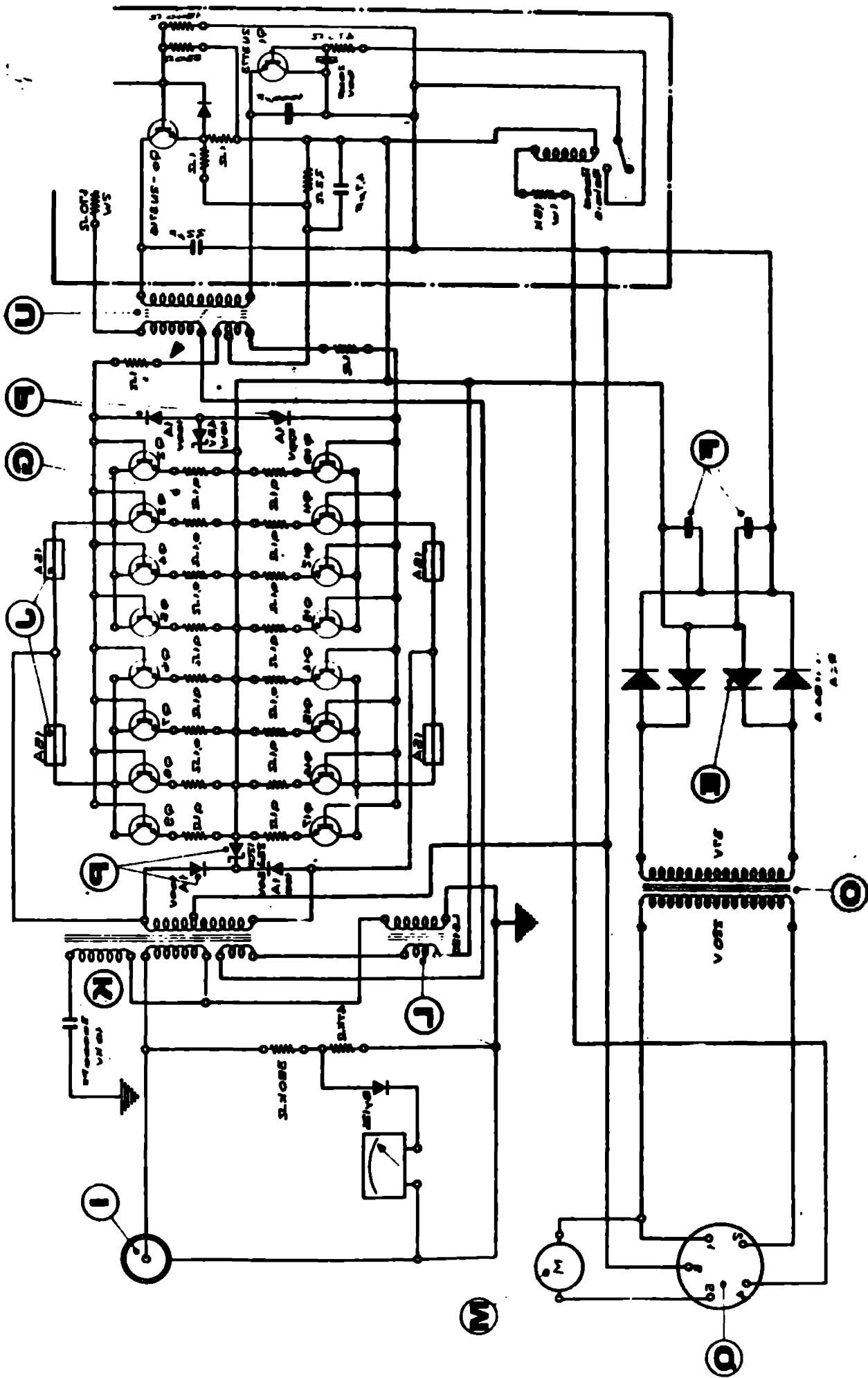


Fig. 4.2.1

sonere :

- blocul ultrasoanelor format din transductor, concentrator nădit și amplificator și senzor ;
- sistemul de acționare pneumatică a sistemului oscilant ;
- blocul de comandă și reglaj a parametrilor regimului de sudare.

Generatorul de înaltă frecvență a instalației de tip SF 1100 este capabil să furnizeze o energie electrică de 1,5 kVA la frecvențe de 15...50 kHz. În construcție complet tranzistorizată, prin soluția adoptată permite reglarea frecvenței pentru obținerea frecvenței de rezonanță a întregului circuit oscilant exterior. Schema generatorului se prezintă în figura 4.2.1.

După deosebire de mășinitatea transductoarelor utilizate, în țara noastră, pe instalațiile tehnologice, care funcționează pe principiul piezoelectricității, transductorul instalației sudante este conceput pe principiul electrostrieției. Ca urmare, se pot utiliza puteri mai mari, asigurându-se amplitudini ale oscilațiilor mai mari, la o stabilitate mai bună.

Materiaul vibrator al transductorului este titanatul de bariu (BaTiO_3) în amestec cu circonatul de plumb, în formă de pastile cu diametrul de 50 mm și grosimea de 6 mm. Transductorul are o formă specială, tip sandwich, conform figurii 4.2.2.

Transductorul se conectează la generatorul de înaltă frecvență prin intermediul legăturilor electrice realizate una la roțesua metalică și alta, la una din rasele metalice M_1 sau M_2 , pastilele transducatore fiind montate astfel încât defazajul între cele două rase de vibrație să fie în fază (fig.4.2.3)

La tensiunea alternativă, variabilă în timp dV , corespunde o variație alternativă a cîmpului electric dE , careia îi va corespunde o variație alternativă dL a grosimii plăcilor ceramice L_{c1} și L_{c2} .

La fiecare variație dimensională dL îi va corespunde o variație a presiunii dp .

Sub acțiunea acestor unde de presiune, suprafața ex-

terică a masei metalice 1 se va deplasa în spațiu cu x_1 și

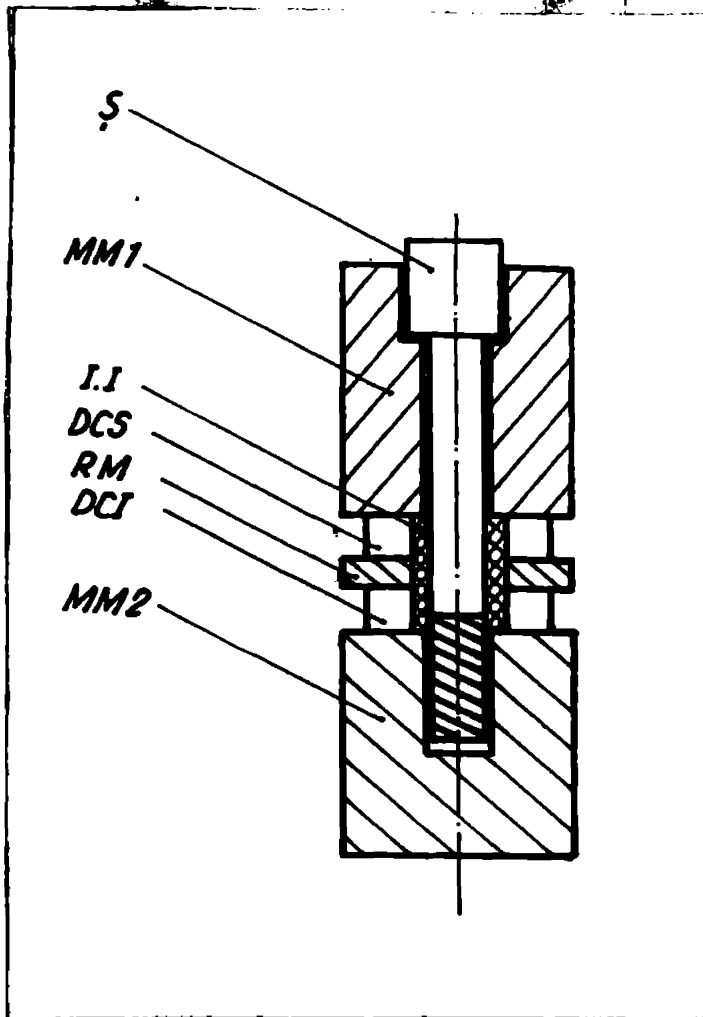


Fig.4.2.2. Secțiune prin transductorul electrostrictiv de tip sandwich
 S - șurub de asamblare
 MM₁ - masă metalică secundară
 MM₂ - masă metalică primară
 I.I. - inel izolator
 DCS - disc ceramic superior
 DCI - disc ceramic inferior
 RM - ronder metalică

Lungimea transductorului se alege un număr întreg K de jumătăți de lungimi de undă λ :

$$L = K \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (4.2.2)$$

La frecvența $f = 20$ kHz, frecvență determinată experimental ca fiind cea mai utilă scopului, la un diametru al plăcuțelor ceramice DCI și DCS de $d = 50$ mm, rezultă o dimensiune a transductorului de $L = 100$ mm.

Cu ajutorul șurubului de asamblare se asigură o precompresie a plăcuțelor ceramice cu $\sigma_c = 3,5$ ton/mm²

În această formă constructivă se asigură un randament

fața masei metalice 2 cu x_2 . Cum câmpul electric are o variație oscilatorie în timp, deplasările respectiv amplitudinile deplasărilor x_1 și x_2 vor fi și ele variabile în timp. Se observă din figura 4.2.2, că variația dimensională se produce în esență la extremitatea celor două mase metalice MM₁ și MM₂. Cum fiind $x_1 = x_2$ rezultă lungimea maximă

$$L_{\max} = L + 2 x_1 \max \quad (4.2.1)$$

La o dimensionare corectă a transductorului, în așa fel încât frecvența longitudinală a sa să corespundă frecvenței curentului alternativ de excitație, apare fenomenul de rezonanță și amplitudinea oscilației în acest caz devine maximă.

al transformării electroacustice a transductorului de 95% până la 93%.

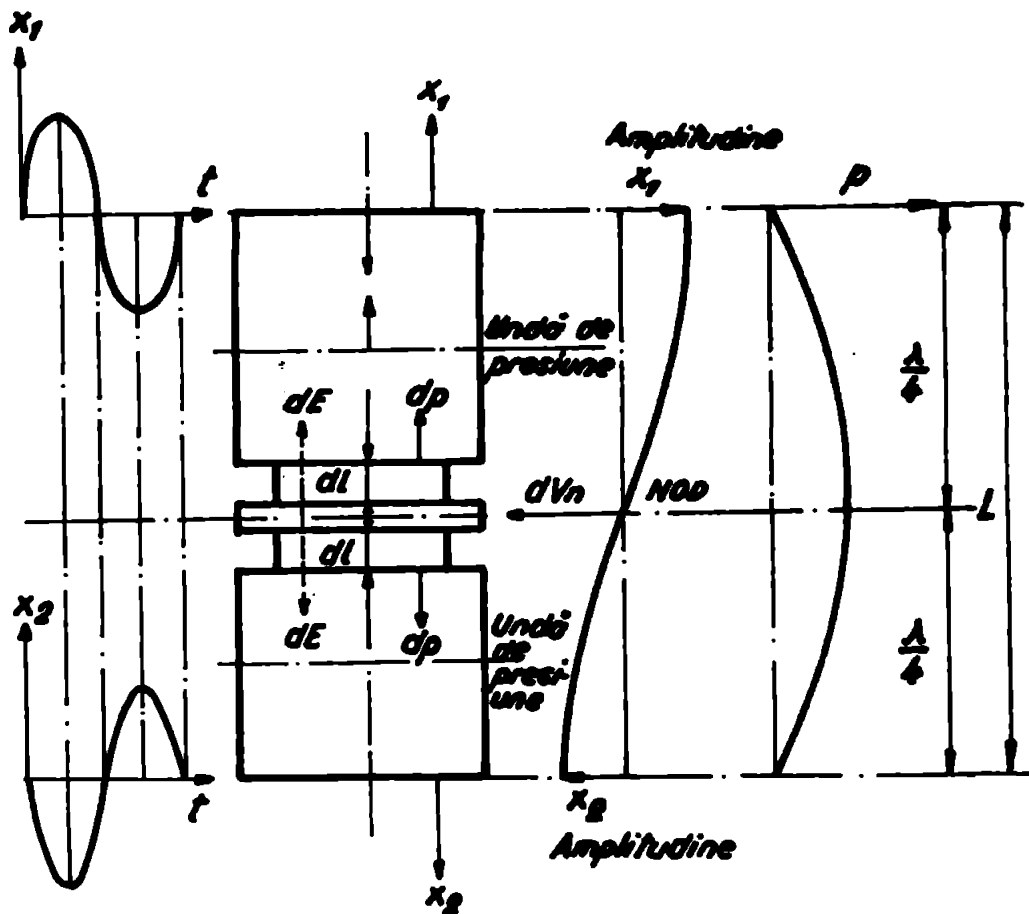


Fig.4.2.3. Variația amplitudinii oscilațiilor ultrasunore și a presiunii specifice pe transductorul electrostrictiv de tip sandwich

Amplitudinea maximă a alungirii, respectiv a stricțiunii transductorului este de $10...14\mu$.

Cu această variație periodică a lungimii, sudarea nu se poate încă realiza; este deci necesară o amplificarea a oscilațiilor mecanice.

Amplificatorul sau concentratorul, cum se mai numește, este caracterizat de cele două secțiuni extreme S_1 și S_2 și de lungimile L_1 și L_2 , fiecare un număr întreg de $\lambda/4$ (fig.4.2.4)

Secțiunea concentratorului nu este constantă; el prezintă două valori extreme ale secțiunilor S_1 și S_2

$$S_1 > S_2 \quad (4.2.3)$$

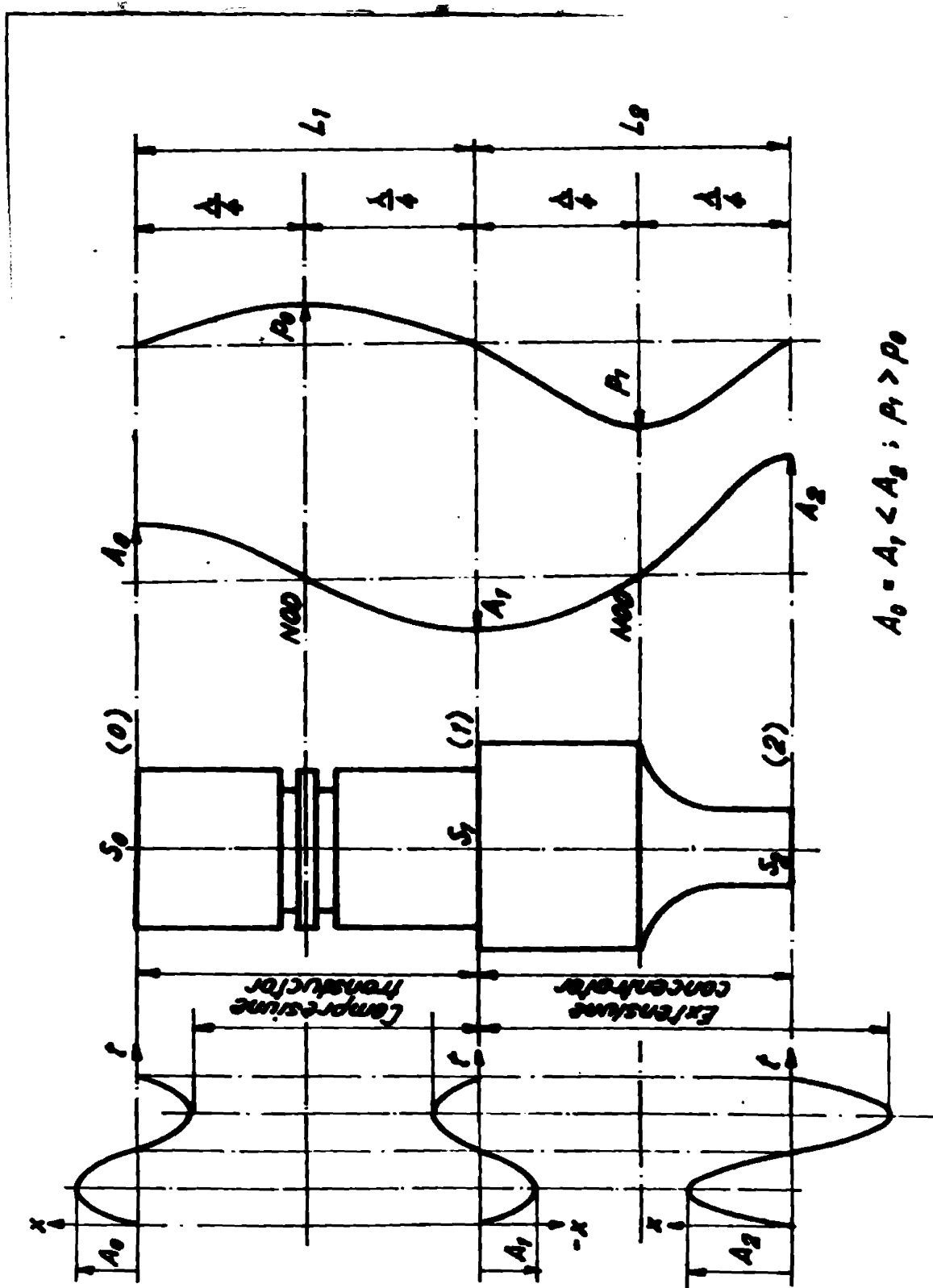


Fig. 4.2.4. Scheme variației amplitudinii oscilației A și a presiunii specifice p în lungul ansamblului transductor - concentrator

Dacă concentratorul ar fi de secțiune omogenă $S_1 = S_2$ nu s-ar realiza amplificarea.

Iată :

$$\begin{aligned} x_1 &= A_1 \cdot \sin \omega t \\ v_1 &= \frac{dx_1}{dt} = A_1 \omega \cos \omega t \end{aligned} \quad (4.2.4)$$

și

$$\begin{aligned} x_2 &= A_2 \cdot \sin \omega t \\ v_2 &= \frac{dx_2}{dt} = A_2 \omega \cos \omega t \end{aligned} \quad (4.2.5)$$

Iar impedanțele acustice Z_1 și Z_2 sînt funcție de amplitudinile vibrației și suprafețele S_1 și S_2 , rezultă :

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{S_1}{S_2} \quad (4.2.6)$$

Suprafața S_2 de legătură a concentratorului cu capul de oscilație transversală a sonotrodului trebuie să fie mai mică decît S_1 , dacă se urmărește o amplificarea a amplitudinii.

În afara dimensiunilor geometrice, mai trebuie luate în considerare și pierderea de energie în masa concentratorului, energie ce se transformă în căldură.

Cum impedanța acustică depinde de material conform :

$$Z = \rho \cdot c \quad (4.2.7)$$

în care ρ este densitatea materialului concentratorului și c viteza de propagare a undelor ultrasonore prin acesta, înseamnă că în concepția concentratorului trebuie ținut seama și de materialul acestuia.

Obisnuit se alege ca material oțelul, fiind mai ieftin, însă de la amplitudini ale vibrației de la $10 \mu\text{m}$ în sus apar în concentrator și sonotrod pierderi mari prin încălzirea puternică a acestora.

Se recomandă utilizarea tătănelui la execuția concentratorului și sonotrodului, material la care numai de la amplitudini ale vibrației ultrasonore mai mari de $30 \mu\text{m}$ pierderile prin încălzire sînt de luat în considerare.

În acest motiv, la concepția și realizarea unui concentrator se face un compromis.

În cazul instalației Al - 1000 - , sonotrodul este fixat în capul de oscilație transversală prin înșurubare și

lipitură roșie, conform figurii 4.2.5.

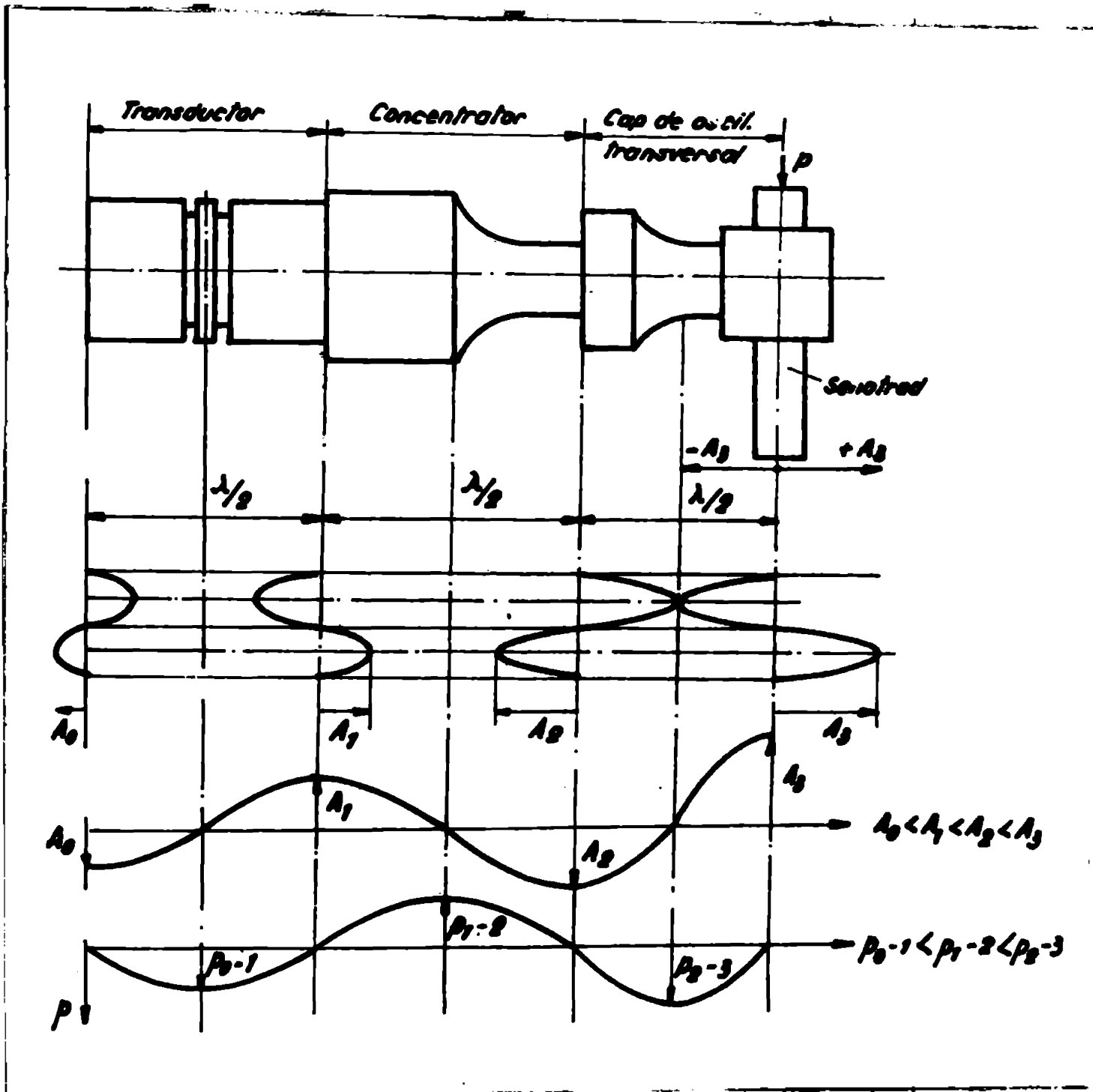


Fig.4.2.5. Schema variației amplitudinii oscilației A și a presiunilor specifice p în lungul blocului ultrasonor transductor - concentrator + sonotrod

Lungimea totală a blocului ultrasonor trebuie să fie un număr întreg de trei jumătăți de lungimi de undă λ , corespunzătoare frecvenței de 20 kHz

Caracteristicile tehnice ale instalației de sudare prin presiune în cimp ultrasonor MECA-SONIC tip AI - 1000 - IS sînt următoarele :

- Puterea generatorului $F = 1000 \text{ W}$

- frecvența - $f = 20 \text{ kHz} \pm 10\%$ cu reglaj continuu pentru asigurarea frecvenței de rezonanță a întregului circuit oscilant
- transductor - electrostrictiv
- randament electroacustic - 95...98%
- amplitudinea vibrației sonotrodului $\approx 40 \mu\text{m}$
- forța statică de epăsare - variabil continuu
- presiunea aerului comprimat - 3...8 atn
- timp de acționare al undelor ultrasonore - 0,1...2,5 s reglabil continuu
- timp de întăzire a acțiunii undelor ultrasonore - 0,1...1 s reglaj continuu
- timp de refulare - 0,1...2,5 s reglaj continuu

4.3. Rezultate experimentale

Cercetările experimentale s-au efectuat, pe de o parte, pentru elucidarea mecanismului de formare a îmbinărilor sudate în puncte prin presiune în câmp ultrasonor a tablelor de aluminiu, iar pe de altă parte, pentru a se studia influența diferiților parametri tehnologici principali asupra calității îmbinării sudate și deci implicit și asupra mecanismului de formare a acestora.

Așa cum s-a mai menționat, materialul pe care s-au efectuat cercetările experimentale este aluziului electro-litic a carei compoziție chimică se prezintă în tabelul 4.3.1, conform buletinului de analiză chimică eliberat de Laboratorul de încercări a Întreprinderii mecanice din Timișoara.

Tabelul 4.3.1

Element	C	Si	Mn	S	P	Cu	Ba	Pb	Zn	Al	Fe	Cr	Ni	Mo	W	Co	Sb
procent	-	-	-	-	-	urme	-	-	-	99,8	0,2	-	-	-	-	-	-

În pruvetele pentru cercetarea experimentală s-au decupat secții din tablă laminată de aluminiu, forma și dimensi-

unile acestora, precum și modul de suprapunere a lor, la realizarea îmbinărilor sudate, se prezintă în figura 4.3.1.

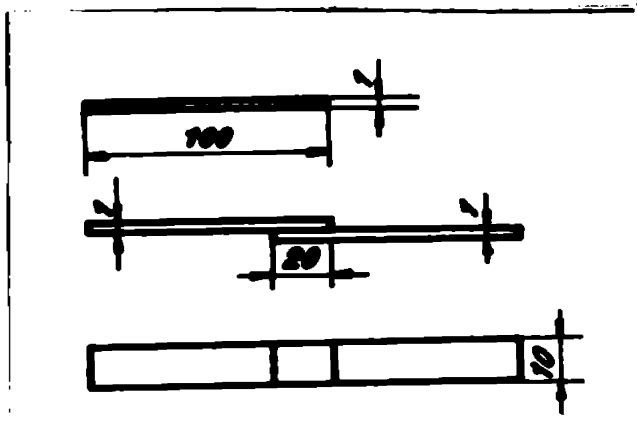


Fig.4.3.1. Dimensiunile epruvetelor din tablă de aluminiu pentru cercetări experimentale

Zona activă a sonotrodului este un pătrat cu latura de 8 mm cu suprafața activă striată (vezi fig.3.), fiind realizat din titan.

Corpul ajutător, de asemenea din titan, are zona activă tot pătrată cu latura de 15 mm având de asemenea suprafața asperizată, dar de dimensiuni mai mici.

Înainte de sudare nu s-a efectuat nici o curățire a materialului (chimică sau mecanică) pentru îndepărtarea stratului de oxizi sau alte impurități.

Regimurile de sudare utilizate se prezintă în tabelele 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4 și 4.3.5. În toate cazurile sudarea s-a efectuat conform ciclogramei din figura 4.3.2 cu variația parametrilor P - putere acustică, F_s - forța statică de apăsare, t_s - timpul de acțiune al undelor ultrasonore, t_{ref} - timpul de menținere a forței statice de apăsare după înțetarea acțiunii undelor ultrasonore, utilizându-se în toate cazurile un timp de întârziere a acțiunii undelor ultrasonore, după aplicarea forței statice de apăsare de $t_1 = 0,5$ secunde.

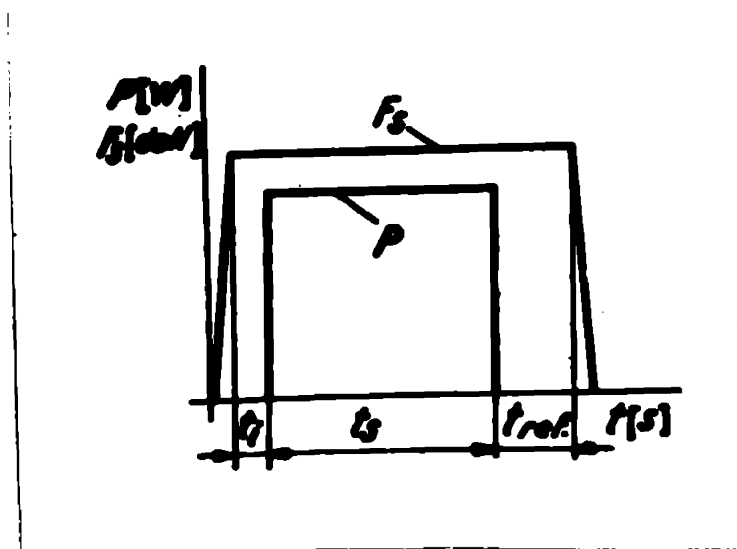


Fig.4.3.2. Ciclograma utilizată la realizarea încercărilor experimentale

Tabelul 4.3.2

Nr. crt.	Marcaj probă	Putere acustică [W]	Forța statică de apăsare			t ₁ [s]	t _s [s]	t _{ref} [s]	Observații
			Presiune de alimentare [at]	Forța de apăsare [daN]	Presiune specifică [daN/mm ²]				
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	A1, A2 A3	1000	4	113	1,76	0,5	1,0	1,0	
2	A4, A5 A6	977	4	113	1,76	0,5	1,0	1,0	
3	A7, A8 A9	954	4	113	1,76	0,5	1,0	1,0	
4	A10, B1 B2	932	4	113	1,76	0,5	1,0	1,0	
5	B3, B4 B5	909	4	113	1,76	0,5	1,0	1,0	
6	B6, B7 B8	886	4	113	1,76	0,5	1,0	1,0	
7	B9, B10 C1	863	4	113	1,76	0,5	1,0	1,0	
8	C2, C3 C4	840	4	113	1,76	0,5	1,0	1,0	
9	C5, C6 C7	818	4	113	1,76	0,5	1,0	1,0	
10	C8, C9 C10	772	4	113	1,76	0,5	1,0	1,0	

Tabelul 4.3.3

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	J1, J2 J3	909	3,5	93	1,54	0,5	1,25	1,5	
2	J4, J5 J6	909	4,0	113	1,76	0,5	1,25	1,5	
3	J7, J8 J9	909	4,5	127	1,98	0,5	1,25	1,5	
4	J10, K1 K2	909	5,0	141	2,20	0,5	1,25	1,5	

Tabelul 4.3.3 (continuare)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	K3, K4 K5	909	5,5	155	2,43	0,5	1,25	1,5	
6	K6, K7 K8	909	6,0	169	2,65	0,5	1,25	1,5	
7	K9, K10 L1	909	6,5	184	2,87	0,5	1,25	1,5	
8	L2, L3 L4	909	7,0	198	3,09	0,5	1,25	1,5	
9	L5, L6 L7	909	7,5	212	3,31	0,5	1,25	1,5	
10	L8, L9 L10	909	8,0	226	3,53	0,5	1,25	1,5	

Tabelul 4.3.4

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	D1, D2 D3	909	4	113	1,76	0,5	0,1	1	
2	D4, D5 D6	909	4	113	1,76	0,5	0,3	1	
3	D7, D8 D9	909	4	113	1,76	0,5	0,5	1	
4	D10, D11 D12	909	4	113	1,76	0,5	0,8	1	
5	E1, E4 E5	909	4	113	1,76	0,5	1,0	1	
6	F6, F7 F8	909	4	113	1,76	0,5	1,25	1	
7	F9, E10 F1	909	4	113	1,76	0,5	1,5	1	
8	F2, F3 F4	909	4	113	1,76	0,5	1,75	1	
9	F5, F6 F7	909	4	113	1,76	0,5	2,00	1	
10	F8, F9 F10	909	4	113	1,76	0,5	2,5	1	

Tabelul 4.3.5

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	G1, G2 G3	909	4	113	1,76	0,5	1,25	0,1	
2	G4, G5 G6	909	4	113	1,76	0,5	1,25	0,5	
3	G7, G8 G9	909	4	113	1,76	0,5	1,25	0,75	
4	G10, H1 H2	909	4	113	1,76	0,5	1,25	1,0	
5	H3, H4 H5	909	4	113	1,76	0,5	1,25	1,25	
6	H6, H7 H8	909	4	113	1,76	0,5	1,25	1,5	
7	H9, H10 H11	909	4	113	1,76	0,5	1,25	1,75	
8	I2, I3 I4	909	4	113	1,76	0,5	1,25	2,0	
9	I5, I6 I7	909	4	113	1,76	0,5	1,25	2,25	
10	I8, I9 I10	909	4	113	1,76	0,5	1,25	2,5	

Pentru a determina modul in care parametri tehnologici principali influențează calitatea îmbinării sudate și implicit și fenomenele ce au loc la realizarea acestora, probele sudate au fost supuse încercării mecanice de forfecare prin tracțiune. Rezultatele încercărilor efectuate se prezintă în tabelele (4.3.6), (4.3.7), (4.3.8) și (4.3.9).

Tabelul 4.3.6

Nr. crt.	Mar- caj probe	Param. reg. sudate				At ₁ [kg ²]	At ₂ [kg ²]	Forța de rupere [N]	σ _{vis} * 100 σ _{MB} [%]	Obs.
		P [W]	F _s [N]	t _s [s]	t _{ref} [s]					
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	C 9	772	1130	1,0	1,0	9,5	10,2	551	64,17	rupt în sudură
2	C 6	818	1130	1,0	1,0	10,3	10,3	547	63,92	-"
3	C 4	840	1130	1,0	1,0	10,3	10,0	571	61,54	-"

Tabelul 4.3.6 (continuare)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	B 10	863	1130	1,0	1,0	9,5	10,3	635	73,95	rupt in sudură
5	B 7	886	1130	1,0	1,0	9,4	9,6	937	99,56	-"
6	B 4	909	1130	1,0	1,0	9,5	10,3	635	65,59	-"
7	A 10	932	1130	1,0	1,0	10,0	10,2	923	97,02	-"
8	A 9	954	1130	1,0	1,0	9,7	10,0	910	101,66	-"
9	A 6	977	1130	1,0	1,0	9,6	10,0	600	67,74	-"
10	A 2	1000	1130	1,0	1,0	9,5	10,2	850	89,74	rupt in MB

Tabelul 4.3.7

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	J 2	909	99	1,25	1,5	10,5	10,3	541	51,58	rupt in sudură
2	J 5	909	113	1,25	1,5	10,3	10,3	758	78,93	-"
3	J 8	909	127	1,25	1,5	10,2	10,3	734	74,15	-"
4	K 1	909	141	1,25	1,5	10,3	10,4	645	63,90	-"
5	K 4	909	155	1,25	1,5	10,3	10,3	243	25,30	-"
6	K 7	909	169	1,25	1,5	10,3	10,3	428	42,40	-"
7	K 10	909	184	1,25	1,5	10,2	10,3	179	18,07	-"
8	L 3	909	198	1,25	1,5	10,3	10,2	443	43,89	-"
9	L 6	909	212	1,25	1,5	10,3	10,4	193	19,12	-"
10	L 9	909	226	1,25	1,5	10,4	10,3	137	13,31	-"

Tabelul 4.3.8

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	E 1	909	113	0,1	1,0	8,8	10,2	75	10,18	rupt in sudură
2	F 5	909	113	0,3	1,0	10,3	10,5	504	49,93	-"
3	G 8	909	113	0,5	1,0	9,6	10,4	538	61,36	-"
4	F 1	909	113	0,3	1,0	9,5	10,0	575	66,96	-"
5	F 3	909	113	1,0	1,0	9,5	10,2	783	95,15	-"

Tabelul 4.3.8 (continuare)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	F 7	909	113	1,25	1,0	8,7	9,5	778	108	rupt în sudură
7	F 10	909	113	1,50	1,0	9,9	10,2	757	79,04	-"
8	F 3	909	113	1,75	1,0	9,8	10,3	678	74,15	-"
9	F 6	909	113	2,00	1,0	9,7	9,7	880	100	rupt în MB
10	F 9	909	113	2,50	1,0	10,3	9,9	910	100	-"

Tabelul 4.3.9

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	G 2	909	113	1,25	0,1	10,1	10,3	734	74,16	
2	G 5	909	113	1,25	0,5	10,0	10,3	647	68,00	
3	G 8	909	113	1,25	0,75	9,5	10,0	710	82,69	
4	H 1	909	113	1,25	1,0	9,0	10,3	440	57,08	
5	H 4	909	113	1,25	1,25	9,8	10,3	847	92,70	
6	H 7	909	113	1,25	1,5	10,0	10,2	100,2	105,11	
7	H 10	909	113	1,25	1,75	9,4	10,1	666	79,22	
8	I 3	909	113	1,25	2,0	10,2	10,1	502	50,71	
9	I 6	909	113	1,25	2,25	10,3	10,3	465	46,07	
10	I 10	909	113	1,25	2,50	10,2	10,4	250	23,23	

În figurile 4.3.3, 4.3.4, 4.3.5 și 4.3.6 se prezintă curbele caracteristice ale epruvetelor determinate pe cale experimentală.

Pentru interpretarea rezultatelor experimentale obținute s-au ridicat diagramele de variație a raportului

$\sigma_{vis}/\sigma_{v.18} \times 100$ în %, funcție de modul de variație a parametrilor tehnologici, diagramă prezentată în figura 4.3.7

Analizând curbele de variație din figura 4.3.7, rezultă că după modul în care parametri regimului de sudare influențează rezistența îmbinării, deci calitatea acesteia, acestea vor să confirme concluziile prezentate în capitoul precedent privind mecanismul de formare a îmbinărilor sudate

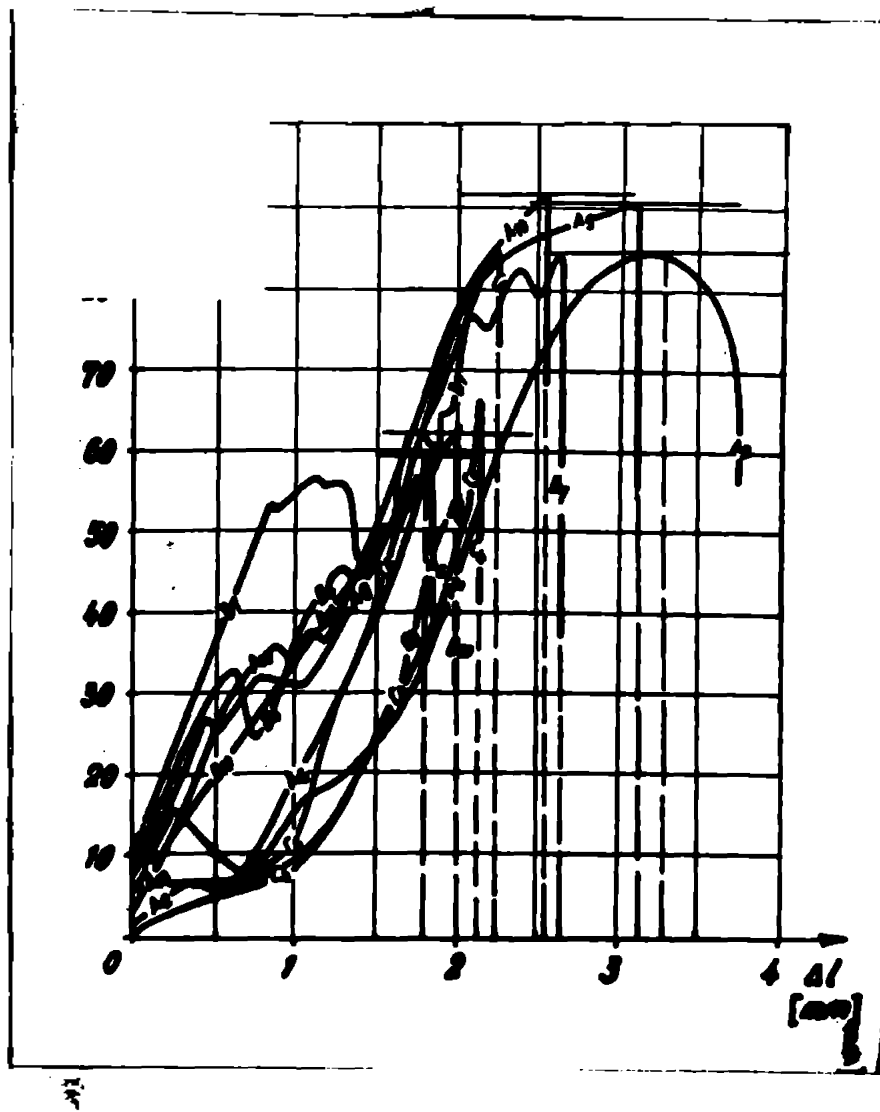


Fig.4.3.3. Curbele caracteristice ale epruvetelor pentru diferite valori ale puterii acustice, conform datelor din tabelul 4.3.6

în cazul sudării prin presiune în câmp ultrasonor și anume :

Se constată că există o anumită putere acustică minimă ce trebuie transmisă zonei îmbinării sudate pentru ca aceasta să fie de egală rezistență. Bineînțeles că valoarea acesteia depinde de natura materialului de sudat, de grosimea acestuia și de valoarea aleasă a celorlalți parametri tehnologici. La utilizarea unei puteri acustice ce depășește intervalul optim a acestei valori se observă o scădere a raportului $\sigma_{vis} / \sigma_{v MB}$, deci implicit a calității îmbinării sudate. Acest lucru își are explicația prin faptul că datorită depășirii unei anumite valori optime a puterii acustice acțiunea undelor ultrasonore pe lângă activarea fenomenelor ce conduc la realizarea îmbinării sudate produce și fenomenul de durificare acustică a materialului în zona îmbinării,

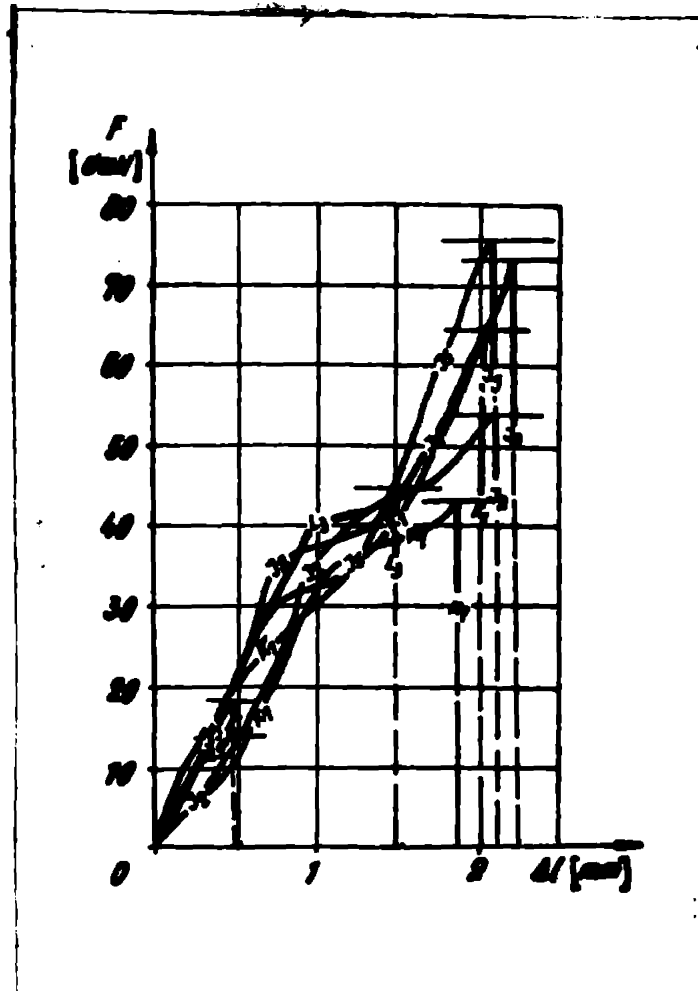


Fig.4.3.4. Curbela caracteristice ale epruvetelor pentru diferite valori ale forței statice de apăsare, conform datelor din tabelul 4.3.7

cea ce conduce la o comportare mai fragilă a acestuia, ceea ce rezultă și din curbela caracteristice trasate experimental și prezentate în figura 4.3.3

La creșterea valorii forței statice de apăsare se constată o scădere apreciabilă a calității îmbinării sudate. Se consideră că acest lucru se datorează faptului că la o putere acustică dată, mărirea forței statice de apăsare peste valoarea corespunzătoare a acesteia conduce la o împiedicare din ce în ce mai accentuată a fenomenului de frecare uscată, ce apare în zone de separație dintre componente și datorită acesteia la o diminuare din ce în ce mai pronunțată a cantității de căldură ce se degajă, datorită frecării și deci, în absența fazei lichide în zona îmbinării și o încetinire a fenomenului de difuzie și transfer de masă.

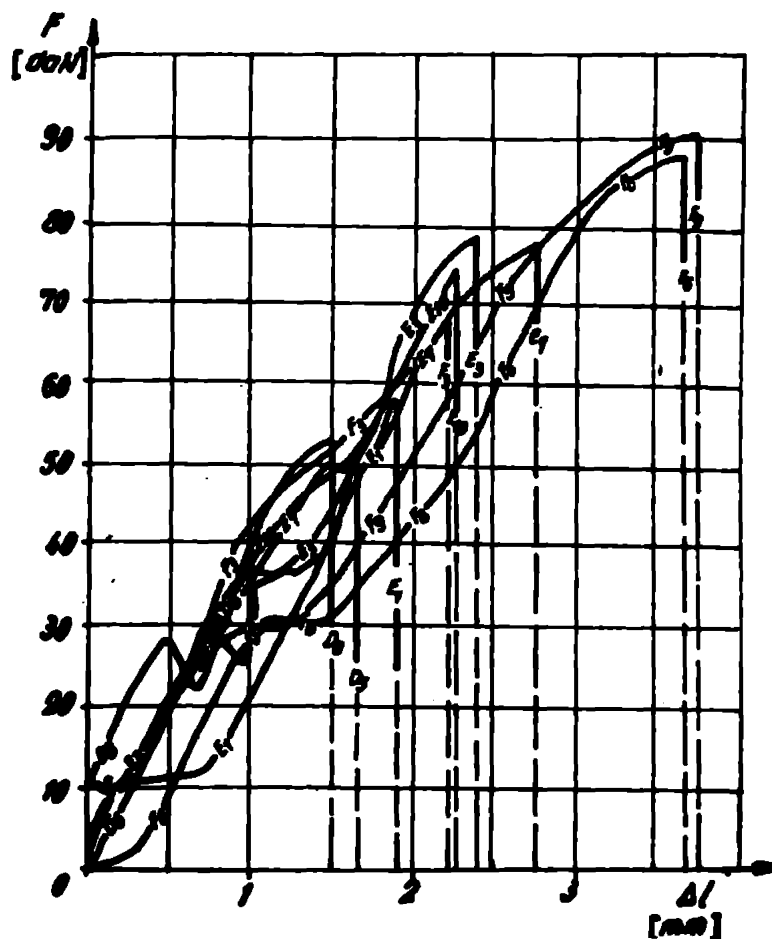


Fig.4.3.5. Curbele caracteristice ale epruvetelor pentru diferite valori ale timpului de acțiune a undelor ultrasonore, conform datelor din tabelul 4.3.8

În ceea ce privește timpul de acționare a vibrației ultrasonore se constată că există o valoare minimă necesară a acestuia pentru ca fenomenele ce concurează la realizarea îmbinării sudate să se desfășoare din punct de vedere calitativ și cantitativ în condiții optime.

Timpul de menținere a forței statice de apăsare după întreruperea acțiunii undelor ultrasonore sau timpul de refulare, trebuie și el cuprins într-un domeniu al valorilor optime, deoarece la timpii de refulare prea mici nu se atinge deformarea plastică corespunzătoare nu apare o organizare a structurii, iar la timpii de refulare prea mari, datorită unei deformări plastice exagerate a zonei îmbinării sudate, apare o scruisare a materialului, ceea ce conduce la o comportare mai fragilă a acestuia.

4.3.2 Fenomenele care au loc în intimitatea formațiilor structurale ale materialului și care însoțesc tehnologia studiată sînt de o complexitate aparte, referitoare la profunzimea și la extinderea factorilor care însoțesc procedeul.

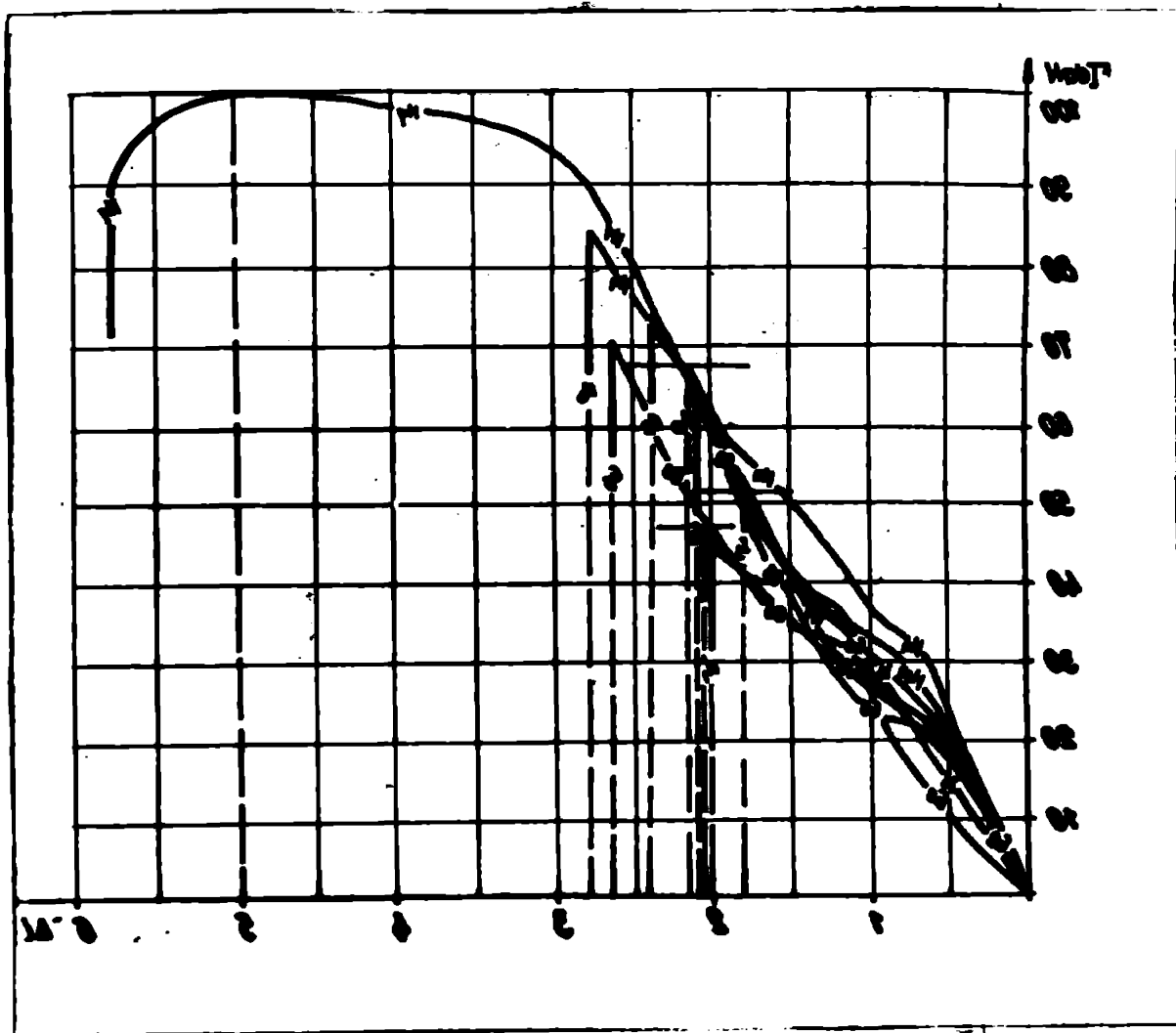


Fig.4.3.6. Curbele caracteristice ale epravelor pentru diferite valori ale timpului de refulare, conform datelor din tabelul 4.3.9

Analizele microstructurale efectuate prezintă o notă eterogenă și au condus la completarea imaginilor și concluziilor trese asupra fenomenelor ce apar la realizarea îmbinărilor sudate prin presiune în câmp ultrasonor.

Prelevarea probelor sudate cu regiunile de sudare prezentate în tabelale 4.3.2 ... 4.3.5 s-a făcut mecanic prin tăiere cu foarfeca la o distanță suficient de mare de suprafața cercetată pentru a nu introduce elemente de influență mecanică în microstructură. Piesele au fost prelucrate în continuare prin pilire, înlăturându-se stratul ecruizat în urma tăierii. Fragmentele au fost solidarizate în dispozitive tubulare (țeavă de C1 carbon) cu LENTACRYL.

Slăuirea s-a făcut pe hirtie abrazivă pe cale uscadă (apă, alcool etilic, petrol) iar lustruirea pe piasă

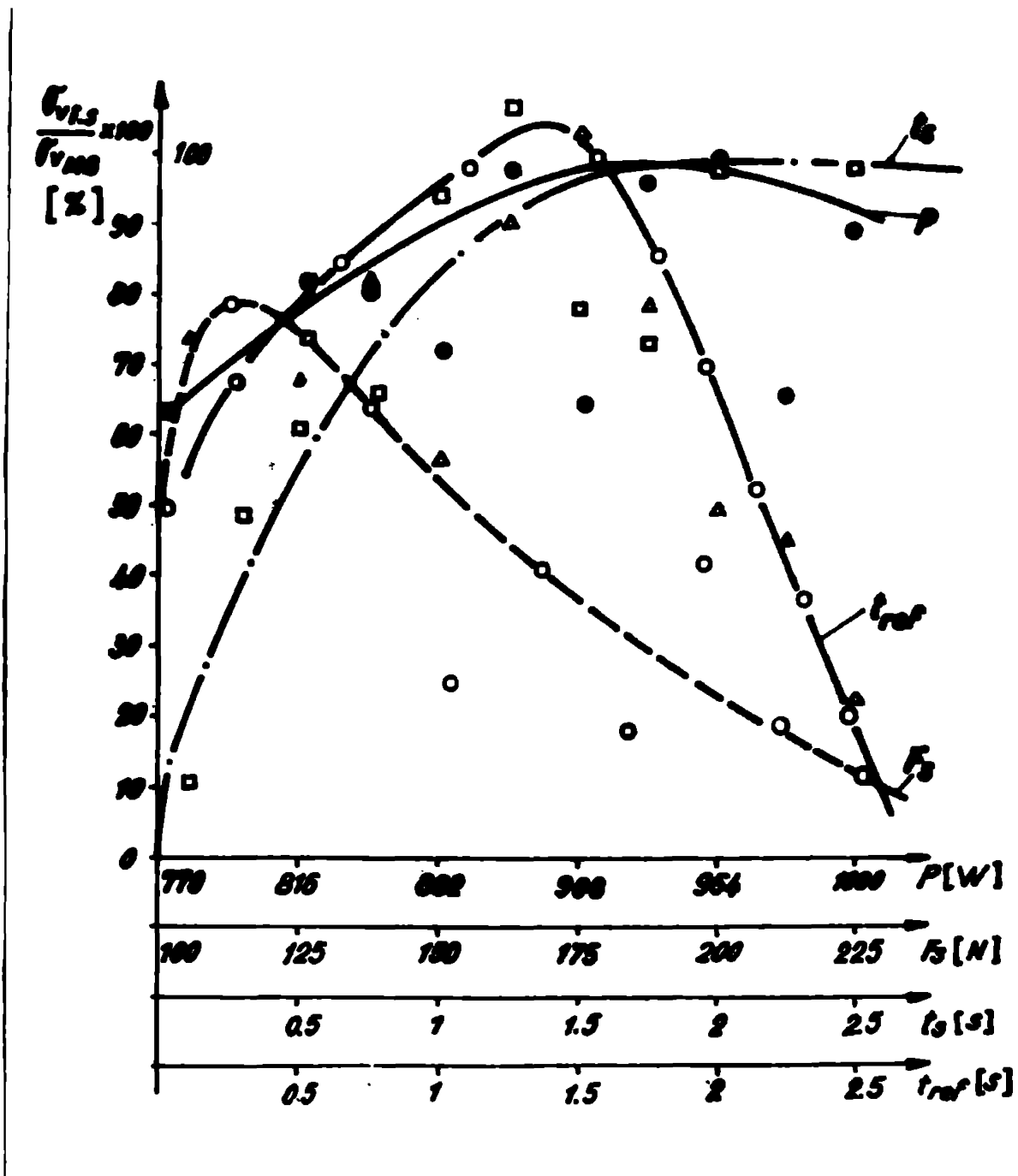
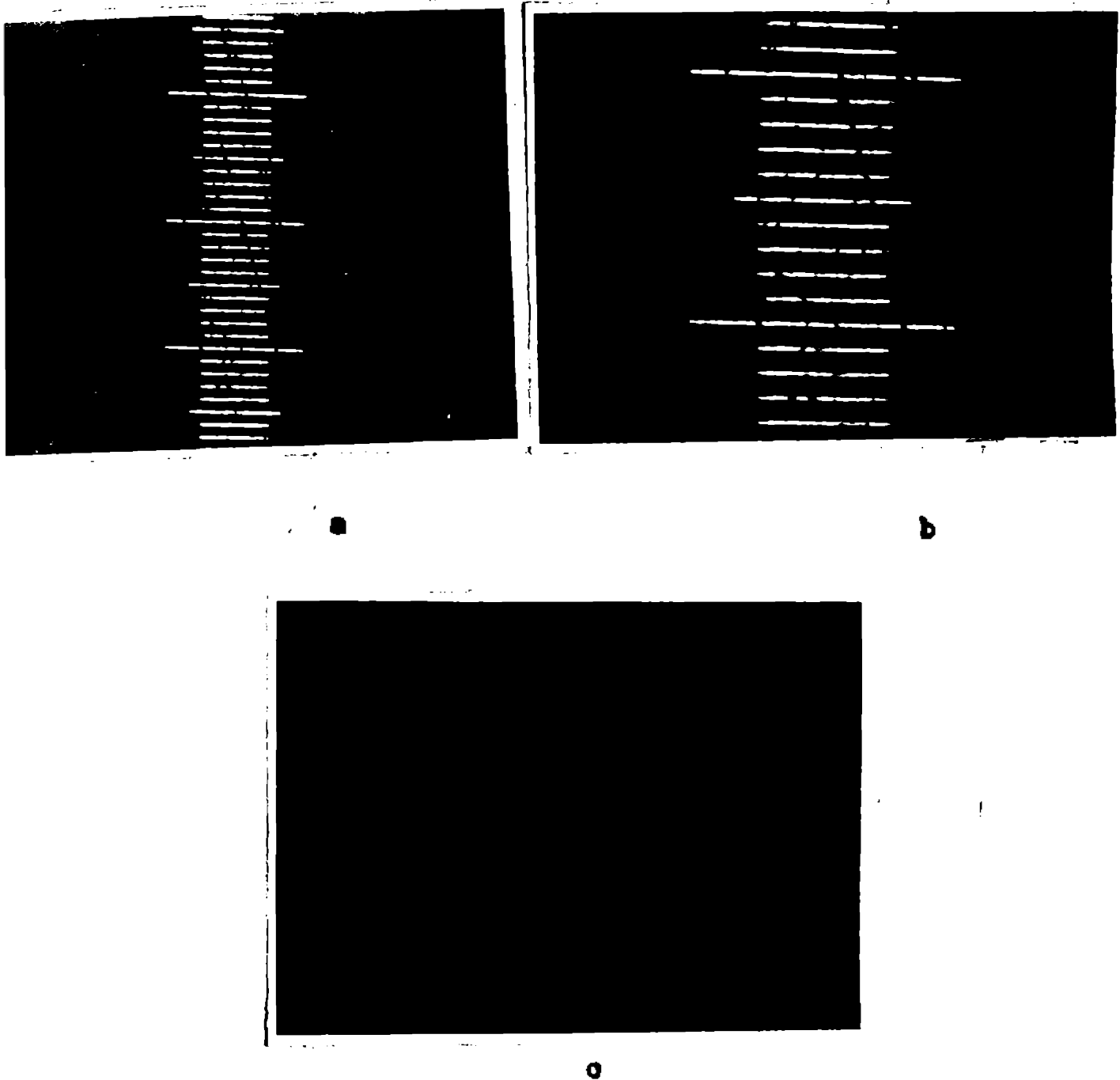


Fig.4.3.7. Variația raportului $\frac{\sigma_{VLS}}{\sigma_{VMS}}$ funcție de parametri tehnologici principali

și piele de căprioară, utilizând drept abraziv oxid de aluminiu Al_2O_3 cu dimensiunea particulelor de 8000 Å.

Probele au fost studiate atât neatacate, cât și atacate, reactivul de atac utilizat fiind K_1 - 1% HF + 99% H_2O sau K_2 - 1% HF + 99% alcool etilic

Pentru a putea aprecia extinderea zonelor neintințate ale îmbinării sudate, în figura 4.3.8 se prezintă scara gradelor de mărire utilizate la cercetarea microscopică.



**Fig.4.3.8. Scara gradelor de mărire
utilizate în cercetarea
microrecepția**

- a - x 600
- b - x 800
- c - x 1000

In figurile 4.3.9 ... 4.3.20 se prezintă aspecte
representative ale microstructurilor realizate :

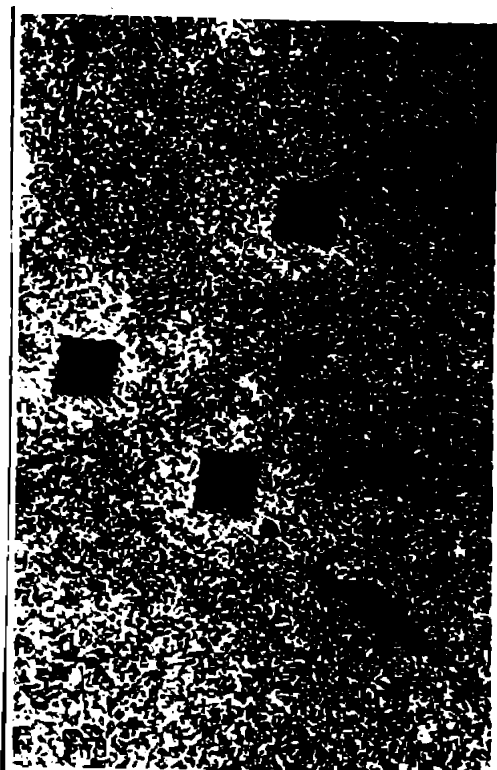


Fig.4.3.9. Microstruc-
tura probei A7
Atac reactiv R_1
MO x 800

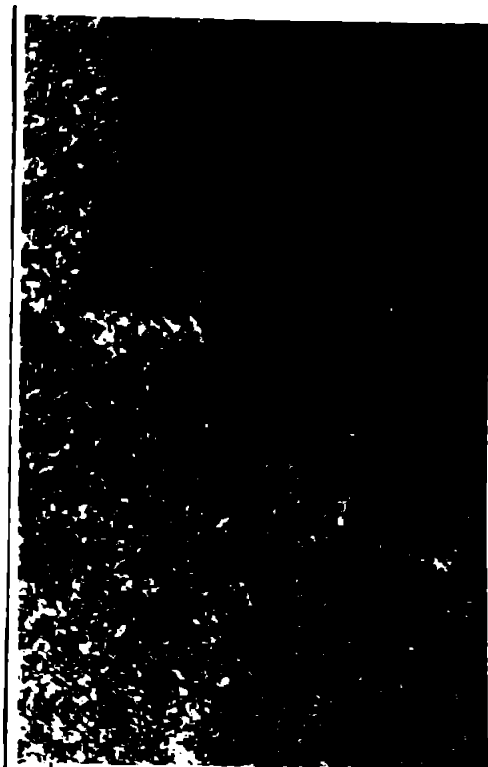


Fig.4.3.10. Microstruc-
tura probei F7
Atac reactiv R_1
MO x 800

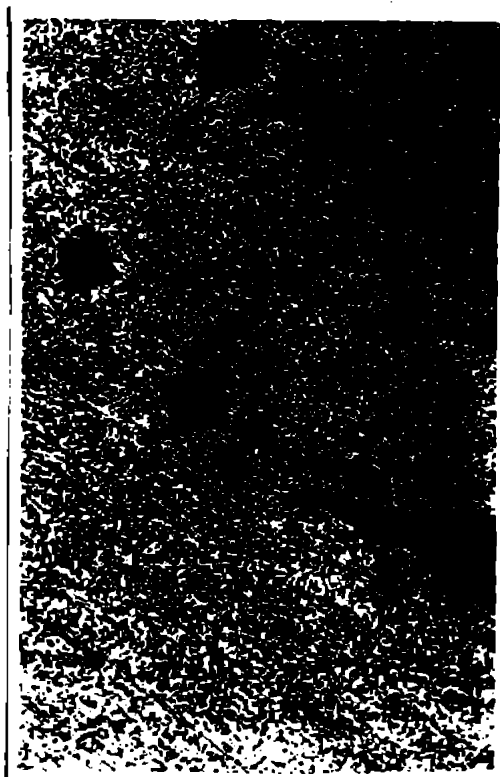


Fig.4.3.11. Microstruc-
tura probei B₂
Atac reactiv R_1
MO x 800



Fig.4.3.12. Microstruc-
tura probei B₂
Atac reactiv R_1
MO x 1000



Fig.4.3.13. Microstruc-
tura probei F5
Atas reactiv R₁
MO x 800



Fig.4.3.14. Microstruc-
tura probei F5
Atas reactiv R₁
MO x 1000

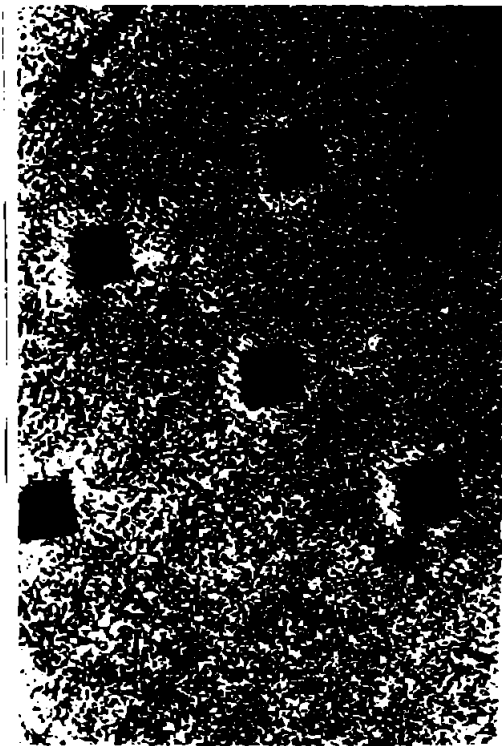


Fig.4.3.15. Microstruc-
tura probei F 10
Reactiv R₂
MO x 800



Fig.4.3.16. Microstruc-
tura probei F 10
Reactiv R₂
MO x 1000

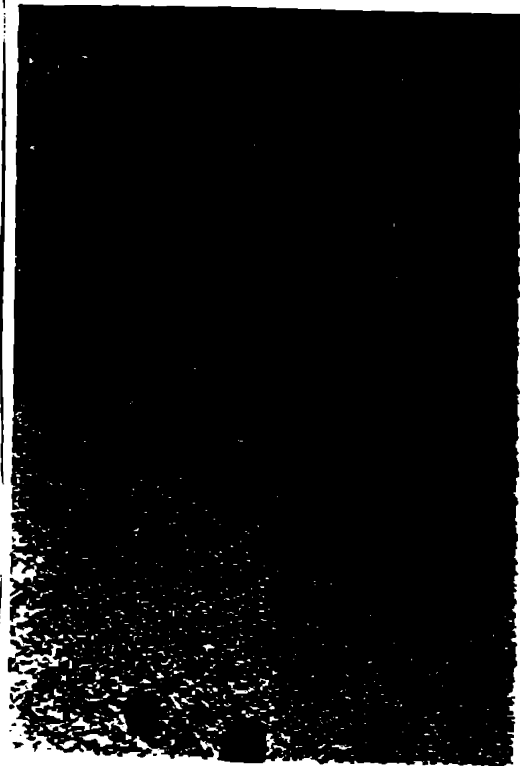


Fig.4.3.17. Microstruc-
tura probei I 7
Atas reactiv R_2
MO x 300

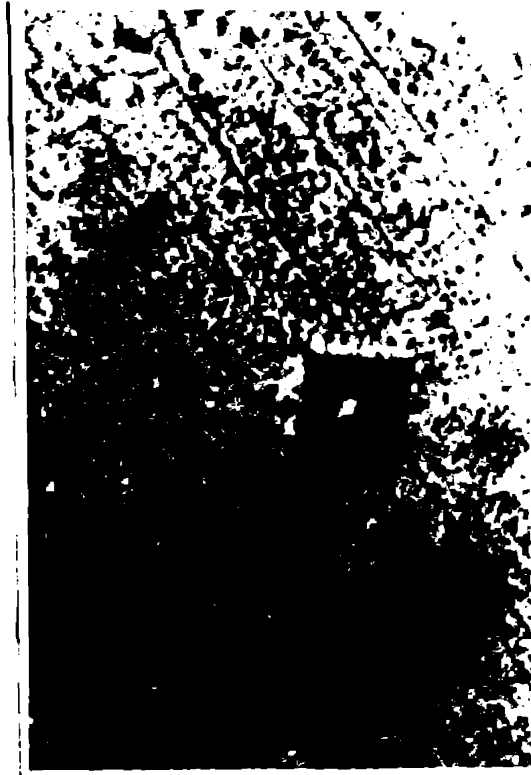


Fig.4.3.18. Microstruc-
tura probei I 7
Atas reactiv R_2
MO x 1000

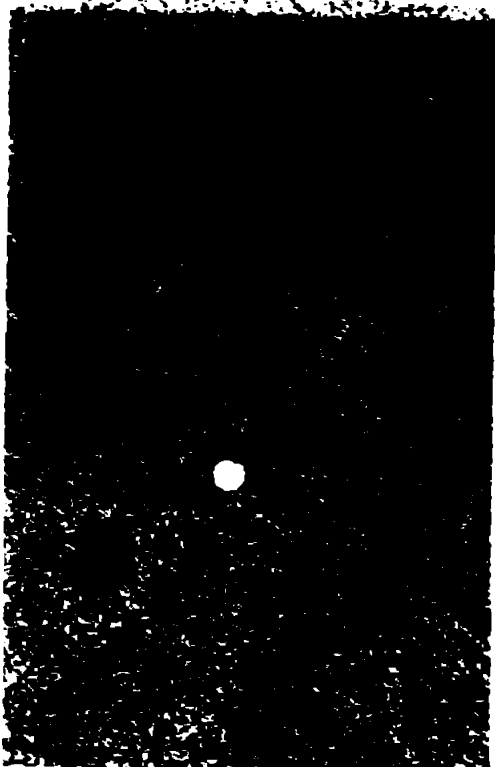


Fig.4.3.19. Microstruc-
tura probei K 2
Atas reactiv R_2
MO x 300



Fig.4.3.20. Microstruc-
tura probei K 2
Atas reactiv R_2
MO x 1000

Prin analiza microstructurilor realizate, rezultă că materialul de bază prezintă o structură specifică aluminului tehnic, evidențindu-se o formație de tipul soluției solide α oligoaliate (din impurități) și precipitații caracteristici unor compuși chimici ai aluminului cu fierul și cuprul din compoziția spontană, drept urmare a unui proces de elaborare mai puțin îngrijit. Se remarcă, ca zona îmbinării sudate, (și în zona intimizată a celor două componente, prezintă aceeași structură ca cea a materialului de bază.

Pentru a se analiza modul de comportare al materialului în zona îmbinărilor sudate s-au efectuat cercetări microscopice ale zonei îmbinărilor sudate după încercarea de forfecare prin tracțiune, cercetare efectuată cu ajutorul microsondei electronice, prezentată în figurile 4.3.21, 4.3.22 și 4.3.23.

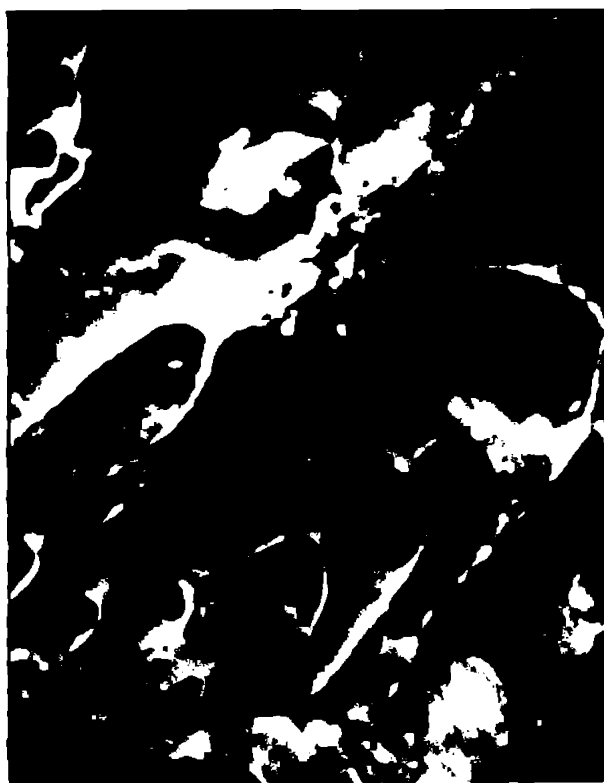


Fig.4.3.21. Aspectul suprafeței de rupere a îmbinării sudate proba A 2 imagine SEM x 1000



Fig.4.3.22. Aspectul suprafeței de rupere a îmbinării sudate proba B 9 imagine SEM x 1000

În figurile 4.3.21 ...4.3.23, rezultă că suprafețele de rupere din zona îmbinărilor sudate au avut un caracter deosebit. Astfel în zona respectivă s-a obținut o intimizare a suprafețelor de rupere a materialului celor două componente.



Fig. 4.3.23. Aspectul suprafeței de rupere a îmbinării sudate proba H 7 imagine SEI x 1000

4.3.3. Odată cu cercetarea microstructurilor s-a realizat și măsurarea durității sub microsarcină după metoda Vickers în zona îmbinărilor sudate pe direcția perpendiculară și pe axa acesteia (conform figurilor 4.3.24 ... 4.3.27). Sarcina utilizată a fost de 0,02 p = 9,072 g. Rezultatele măsurătorilor sînt prezentate în tabelele 4.3.10, 4.3.11, 4.3.12 și 4.3.13

Pe baza datelor din tabelele 4.3.10...4.3.13 s-au întocmit diagrame de variație a durității sub microsarcină pentru fiecare grupă de probe executate, prezentate în figurile 4.3.24 ... 4.3.27

Taboul 4.3.10

Grupa de probe	Duritate HV _{0,02}									
	A5	A7	A9	B2	B8	B9	C3	C7	C10	
1	32,3	31,7	31,6	36,0	33,4	29,5	24,4	41,2	30,1	
2	32,8	29,6	31,7	31,6	43,5	29,6	28,6	31,2	40,8	32,4
3	34,0	36,7	31,7	31,6	39,8	39,8	33,4	31,2	41,1	32,4
Media 1,2,3	33,6	32,8	31,7	31,6	39,8	33,9	30,5	28,9	41,0	32,4
4	31,7	33,4	28,6	26,4	31,2	27,7	32,3	28,5	32,3	31,2
	31,2	30,6	28,6	26,4	31,2	27,7	31,2	28,1	30,1	32,3
	31,7	30,6	28,6	26,4	31,2	27,7	30,6	28,1	31,2	32,3
	31,7	30,6	28,6	26,4	31,2	27,7	30,9	28,1	31,2	31,7

Se observă în general o creștere a durității lateralei în îmbinarea sudată, fapt care vine să confirme existența unor faze lichide sau ovasilichide în zone respectivă în timpul realizării acesteia. Doar în cazul variației parametrilor timp de acționare a vibrațiilor ultrasonore t_s (fig.

4.3.25) se remarcă o scădere a valorilor durității materialului din zona îmbinării sudate față de cea a materialului de bază, pînă la o anumită valoare a parametrului t_{c} . Acest lucru se explică pe de o parte, cî la timpî scurți de acțiune a undelor ultrasonore nu este posibilă apariția fazei lichide într-un volum mare de metal, iar pe de altă parte, fenomenului de încălzire acustică, ce apare în material la timpî mici de acțiune a undelor ultrasonore.

Tabelul 4.3.11

proba \ unet	Duritate HV _{0,02}									
	D3	D6	D9	E2	E5	E8	F1	F4	F7	F10
seria	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	19,2	30,1	28,6	30,6	26,0	29,6	41,2	31,2	28,6	33,6
2	15,8	26,8	28,6	25,7	28,1	29,6	39,6	30,5	25,7	32,3
3	15,3	27,7	30,1	30,6	26,4	29,6	36,0	31,2	26,2	33,6
4	15,7	28,2	29,1	28,9	26,8	29,6	36,9	31,0	27,0	33,6
5	29,1	27,2	31,2	30,6	31,7	29,6	35,0	25,5	29,6	30,7
6	32,3	27,7	31,2	30,1	31,7	29,6	35,0	29,5	29,6	31,0
7	32,3	28,1	31,2	30,1	31,2	29,6	35,0	29,6	29,6	27,2
8	31,3	27,7	31,2	30,1	30,1	29,6	35,0	29,5	29,5	27,2

Tabelul 4.3.12

proba \ unet	Duritate HV _{0,02}							
	G 3	G 6	H 2	H 5	H 8	I 1	I 4	I 7
seria	1	2	3	4	5	6	7	8
1	40,4	28,6	40,4	31,2	30,1	25,1	29,1	30,1
2	28,1	29,1	29,6	31,7	30,1	30,1	29,1	24,0
3	31,2	29,1	27,2	27,7	30,1	26,0	27,1	31,7
4	31,2	28,9	32,4	30,0	30,1	27,0	29,1	31,2
5	31,2	28,1	27,2	28,6	30,1	24,4	28,1	18,3
6	31,2	28,6	27,7	28,6	30,1	26,5	25,6	24,0
7	30,6	26,0	23,6	29,6	30,1	27,2	29,1	24,6
8	30,1	28,1	28,6	30,0	30,1	26,5	29,1	24,6

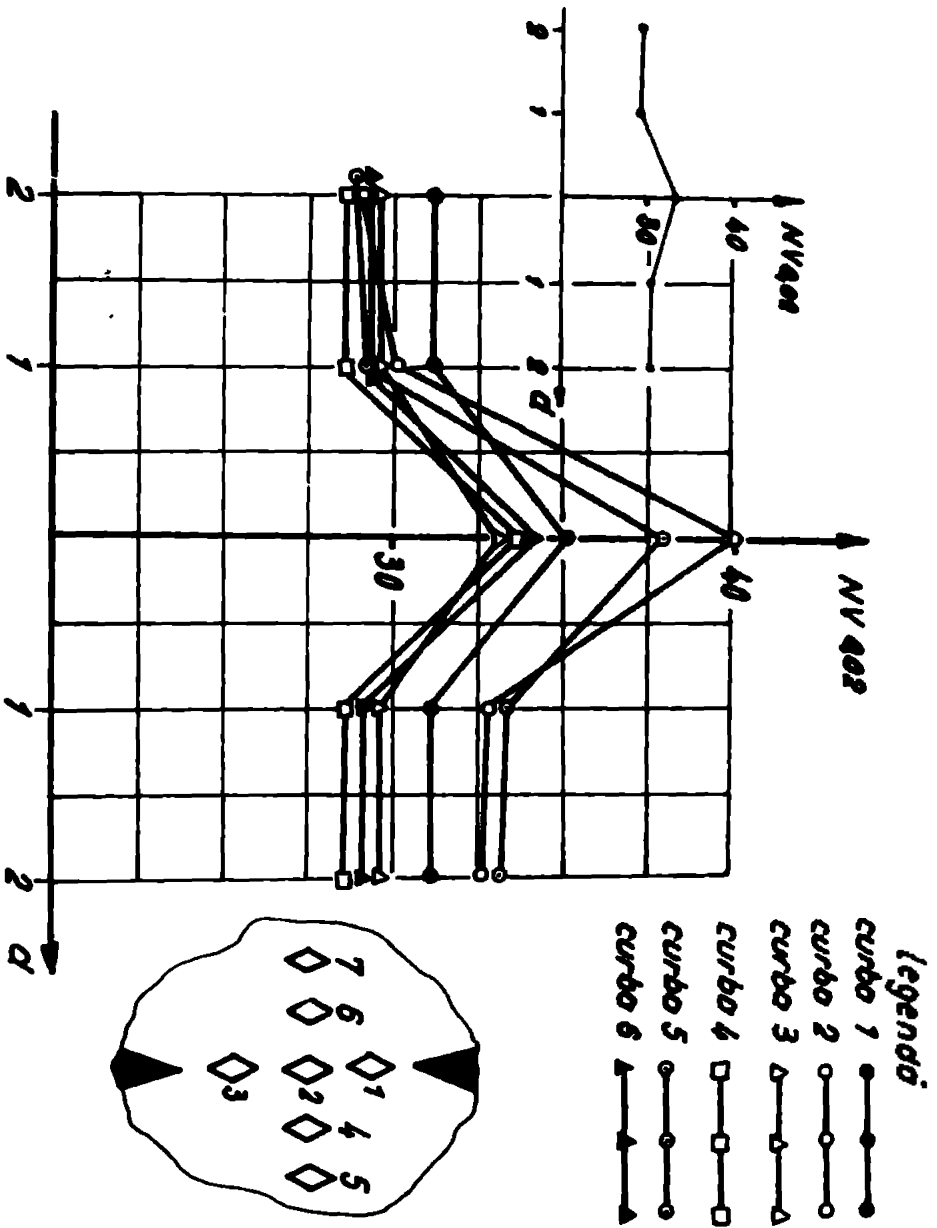


Fig.4.3.25. Variația durității sub rotorarcini. Parametrii variabili
 forța etalon de apăcare V_F

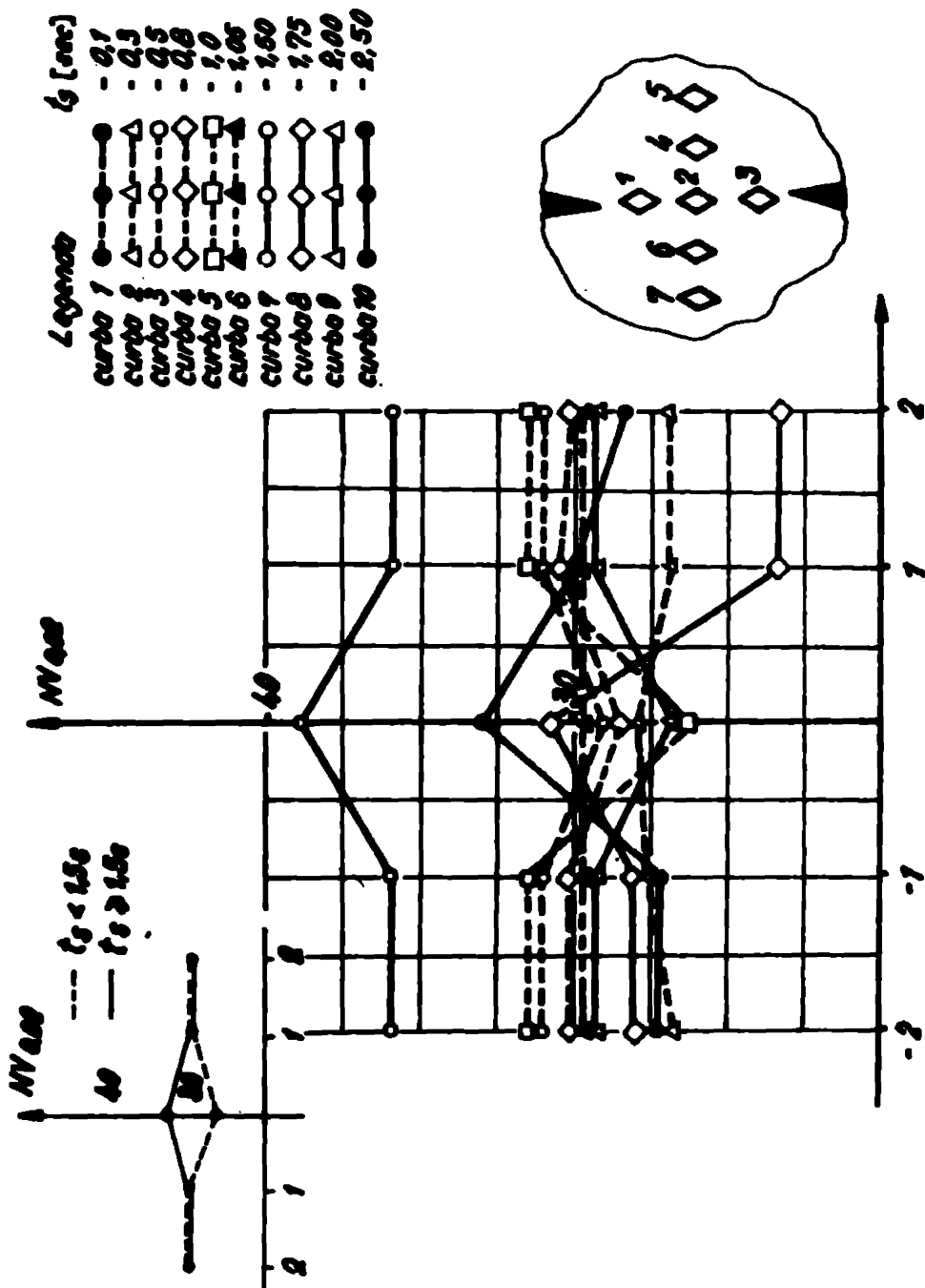


FIG. 4.5.26. Variația dirijării sub microscopul. Parametru variabil timpul de ecționare al vibrației ultrasonere t_g

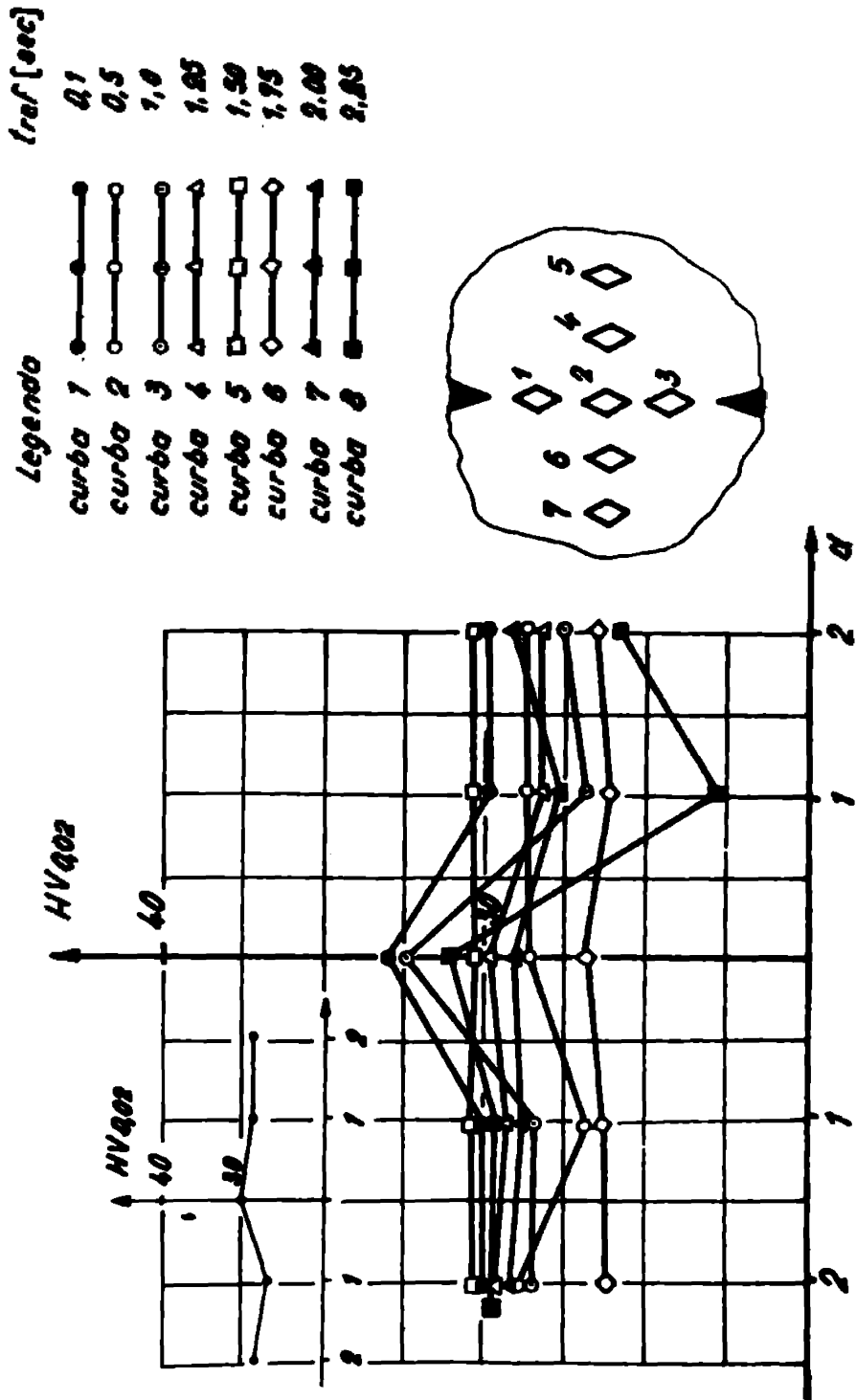


Fig. 4.3.27. Variația durității sub microscopul de electroni. Parametri variații: timpul de refulare t_{ref}

Capitolul 5

CONTRIBUTII LA OPTIMIZAREA TEHNOLOGIEI DE SUDARE LA PRESIUNE ÎN CÂMP ULTRASUNOR

Cercetările experimentale efectuate asupra rolului în care parametri tehnologici principali ai regimurilor de sudare prin presiune în câmp ultrasunor influențează calitatea acestora, reprezentată de raportul σ_{rs}/σ_{pas} , demonstrează că între aceștia există o strânsă dependență.

În literatura de specialitate se prezintă o corelație analitică între acești parametri, valoarea lor trebuind să fie determinată de la caz la caz, pe baza cercetărilor experimentale.

Se pune deci problema de a stabili o formulare matematică a procesului de sudare, de stabilire a unor relații analitice de dependență, funcționale între principalii parametri tehnologici și calitatea îmbinărilor sudate realizate. Pentru a se realiza o imagine corectă, concretă și completă asupra influenței parametrilor principali ai regimului de sudare asupra procesului de formare a îmbinărilor sudate și implicit asupra calității acestora, se presupune în cele ce urmează, că între acestea există o dependență funcțională de forma :

$$R = f(P; P_s; t_s; t_{rei}) \quad (5.1)$$

în care :

R reprezintă funcția "calitate" a îmbinării sudate care îndeplinește condiția :

$$R = \frac{\sigma_{rs}}{\sigma_{pas}} \cdot 100 [\%] \quad (5.2)$$

În continuare se vor face precizări referitoare la determinarea celor mai probabile valori, la determinarea erorilor rezultatelor corespunzătoare, la examinarea interdependențelor dintre diferitele date experimentale (figura 5.1), respectiv de formularea dependenței funcționale ce există între principalii parametri tehnologici ai regimurilor de sudare.

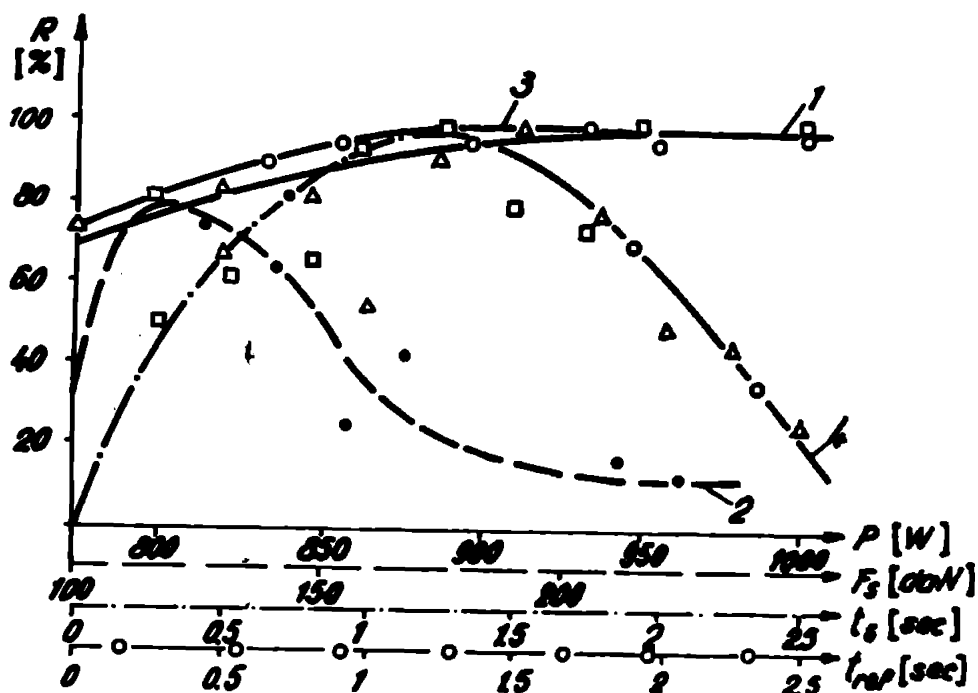


Fig.5.1. Dependența între R și parametri tehnologici principali ai procesului de sudare prin presiune în câmp ultrasonor

- curba 1 - $R = f(P)$
- curba 2 - $R = f(F_s)$
- curba 3 - $R = f(t_s)$
- curba 4 - $R = f(t_{ref})$

Principala problemă ce se pune este aceea de a afla o relație de dependență funcțională între funcția "calitate" R și parametri care concurează la modificările acesteia, dependență care exprimată analitic să fie cât mai apropiată de rezultatele experimentale obținute și care să permită să se determine rapid și cu încrederea corespunzătoare, valorile necesare ale parametrilor principali ai regimurilor de sudare (P ; F_s ; t_s ; t_{ref}) pentru o valoare determinată a funcției calitate "R".

5.1. Determinarea indicatorilor statistico-matematici

Pentru a se realiza o analiză cantitativă, care să permită o comparație a tendințelor de localizare și de variație (împrăștiere) se vor determina, pe baza valorilor experimentale obținute - prezentate în tabelul 5.1.1 - principalii indicatori statistico-matematici. Pentru aceasta, datele experimentale prezentate în tabelul 5.1.1 se consi-

deră să reprezintă variabile aleatoare ale funcției calitate

Tabelul 5.1.1

	R_{xi} [%]	x_i	R_{yi} [%]	y_i	R_{zi} [%]	z_i	R_{ui} [%]	u_i
1	98,995	220	10,178	0,10	51,576	3,5	74,161	0,1
2	67,724	215	49,933	0,30	73,926	4,0	68,000	0,5
3	97,016	210	61,359	0,50	74,154	4,5	82,689	0,75
4	100	205	66,966	0,80	63,904	5,0	37,086	1
5	65,588	200	95,156	1	25,304	5,5	92,697	1,25
6	99,565	195	100	1,25	42,403	6,0	100	1,50
7	73,955	190	79,037	1,50	18,076	6,5	79,224	1,75
8	81,544	185	74,154	1,75	43,859	7,0	50,715	2
9	83,917	180	100	2	19,120	7,5	46,069	2,25
10	64,172	170	100	2,50	13,513	8,0	23,235	2,50

R = x, y, z, u căreia nu i recunoaște repartiția. Pentru simplificare, parametri variabili și regiunilor tehnologice se notează cu x, y, z și u și are:

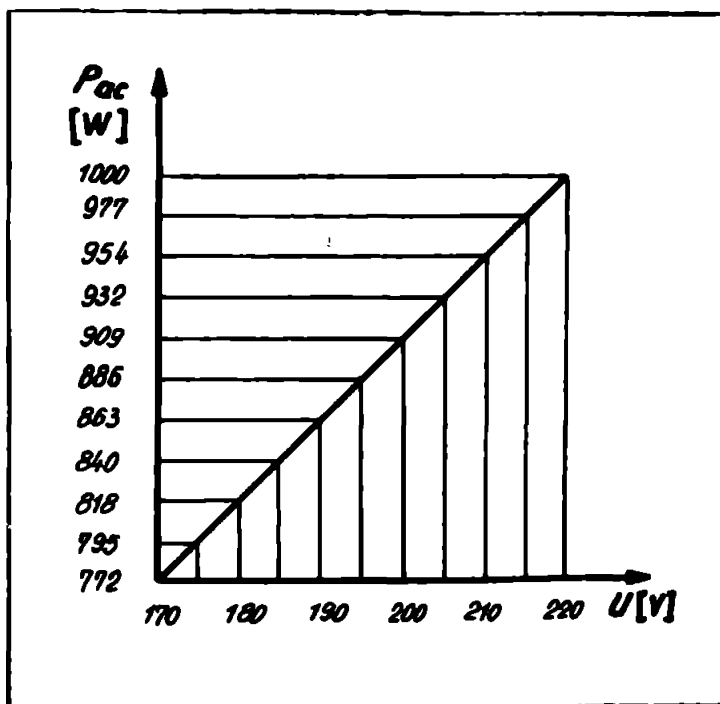


Fig.5.1.1. Dependenta dintre tensiunea de alimentare a transductorului piezoceramic și puterea acustică emisă

$x = U$ - puterea acustică, dependentă de volți [V] existând o corelație liniară între tensiunea de alimentare a transductorului și puterea acustică transmisă de acesta (Fig.5.1.1) în V.

$y = t_s$ - timpul de sudare sau de acționare a undelor ultrasonore, în secunde

$z = P_s$ - valoarea forței de apăsare statică exprimate în presiunea de alimentare a cilindru-

lui pneumatic de acționare, existând dependența:

$$P_s = 23,27 \cdot p \quad [\text{daN}]$$

$u = t_{ref}$ - timpul de refulare sau timpul de conținere a forței statice de spăsare, după oprirea acționării undelor

ultrasonore.

Studiind diferiți indicatori statistico-metamatici, se poate determina tendința de localizare, respectiv de variație, de împărțiere a ecosteron. În acest scop se vor determina pentru fiecare variabil în parte, următorii indicatori : valoarea medie, abaterea medie pătratică, coeficientul de variație, coeficientul de omogenitate, dispersia, coeficientul de perturbație, coeficientul de asimetrie și coeficientul de exces. Pentru calculul acestora, se utilizează expresiile cunoscute din literatura de specialitate

Astfel, măsura cea mai naturală a tendinței centrate este valoarea medie teoretică definită prin relația :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{0.1.1}$$

în care x va reprezenta axa de abscisă a curbei de repartiție a elementelor considerate.

În afara tendinței centrate, o repartiție statistică se mai caracterizează și prin indicatorii numiți "momente" de diferite ordine. Pe baza momentelor se pot stabili indicatorii statistici de bază (media și dispersia), precum și indicatorii referitori la forma repartiției, simetria și aplatisarea acesteia, particularitățile ale repartiției ce nu se pot stabili pe baza indicatorilor de localizare sau variație. Momentele se împart în două categorii : momente absolute de ordinul "k", la care valorile sînt considerate în raport cu originea și momente centrate de ordinul "k", la care valorile sînt exprimate în raport cu o valoare oarecare.

Astfel expresia :

$$m_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^k \tag{0.1.2}$$

este momentul teoretic absolut de ordinul "k", iar prin analogie

$$\tilde{d}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^k \tag{0.1.3}$$

reprezintă momentul teoretic centrat de ordinul "k".

Momentul centrat de ordinul 2 și denotat cu \tilde{d}_2 (k = 2) dă o măsură a împărțierii sau a concentrării repartiției consi-

derate. Aceasta, în statistica matematică mai este cunoscut și sub denumirea de dispersie și are expresia :

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5.1.4)$$

Iar rădăcina pătrată a dispersiei se numește abatere standard ce se determină cu relația :

$$s = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \quad (5.1.5)$$

care reprezintă un indicator statistic cu semnificații directe pentru caracterizarea variației, respectiv a înprăptierii, el reprezentând precizia.

Pentru a se determina dacă rezultatele cercetărilor experimentale sînt sau nu afectate de greșeli grosolane, se aplică metoda celor trei sigma. Se consideră ca determinările experimentale ale căror valori depășesc de trei ori valoarea abaterii standard prezintă erori grosolane și se elimină.

Deci valorile parametrilor x_i , care satisfac relația :

$$|x_{i \text{ exp}} - \bar{x}| > 3s \quad (5.1.6)$$

se exclud.

Un alt indicator statistic al preciziei relative îl constituie coeficientul de variație teoretic; acesta are expresia :

$$\eta = \frac{s}{\bar{x}} \quad \text{sau} \quad \eta_1 = \frac{\tilde{d}_2}{\bar{x}} \quad (5.1.7)$$

Coeficientul inversului coeficientului de variație poartă denumirea de coeficient de perturbație, el reprezentînd de fapt precizia fenomenului studiat.

$$\left| \frac{1}{\eta} \right| = \left| \frac{\bar{x}}{s} \right| \quad (5.1.8)$$

Momentele centrate de ordin superior sînt utile pentru caracterizarea mai completă a repartiției statistice considerate. Astfel momentul centrat de ordinul trei ($k = 3$) este (trînd) dat de asimetria repartiției respective, iar coeficientul :

$$\frac{\tilde{d}_3}{\tilde{d}_2^{3/2}} \quad (5.1.9)$$

măsoară asimetria repartiției în raport cu gradul ei de în-
prășiere și se numește coeficient de asimetrie.

Dacă $l_1^{1/2} = 0$ - repartiția este simetrică; dacă $l_1^{1/2} > 0$, asi-
metria este de dreapta, iar în cazul în care $l_1^{1/2} < 0$ asimetria
este de stînga.

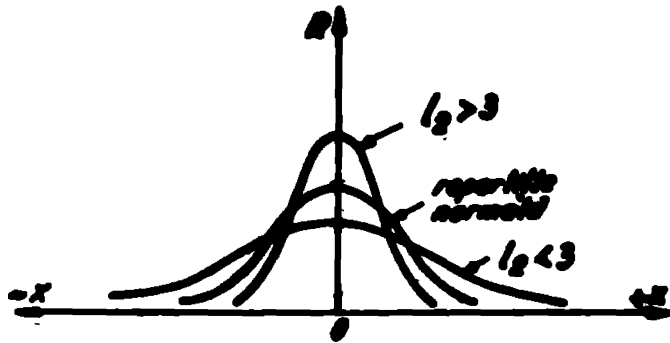


Fig.5.1.2. Forma repartiției funcție
R de valoarea momentului cen-
trat de ordinul 4

momentul centrat
de ordinul 4 (obi-
nit din 5.1.3 pentru
 $k = 4$) este legat de
ascuțirea repartiției
respective, iar indi-
catorul

$$l_2 = \frac{\mu_4}{\sigma^2} \quad (5.1.20)$$

se numește "coeficien-
tul de exces", el
măsurând excesul

repartiției considerate.

Dacă $l_2 < 3$, repartiția respectiv este mai puțin
deprinsă decât repartiția normală a lui Gauss, iar în cazul $l_2 > 3$, repa-
rțiile considerate este mai ascuțită decât repartiția normală
a lui Gauss (Fig.5.1.2)

Prin urmare pentru momente centrate, precum și coeficienții
de înprășiere statisticii prezentate mai sus, este scris coeficient
de înprășiere o repartiție statistică, astfel încât în scopul ca-
racterizării funcției "calitate" a înălțimii de producție
tehnologică principale X_1, Y_1, Z_1 și U_1 - să lămurim
calitatea acestora.

Prin urmare calculul indicatorilor de înprășiere este uti-
lizat ca element o serie de programe în limbajul BASIC, și o
rezultate se prezintă în figurile 5.1.3 ... 5.1.6

Rezultatele obținute cu ajutorul programelor în
limbajul BASIC sunt prezentate în tabelul 5.1.2.

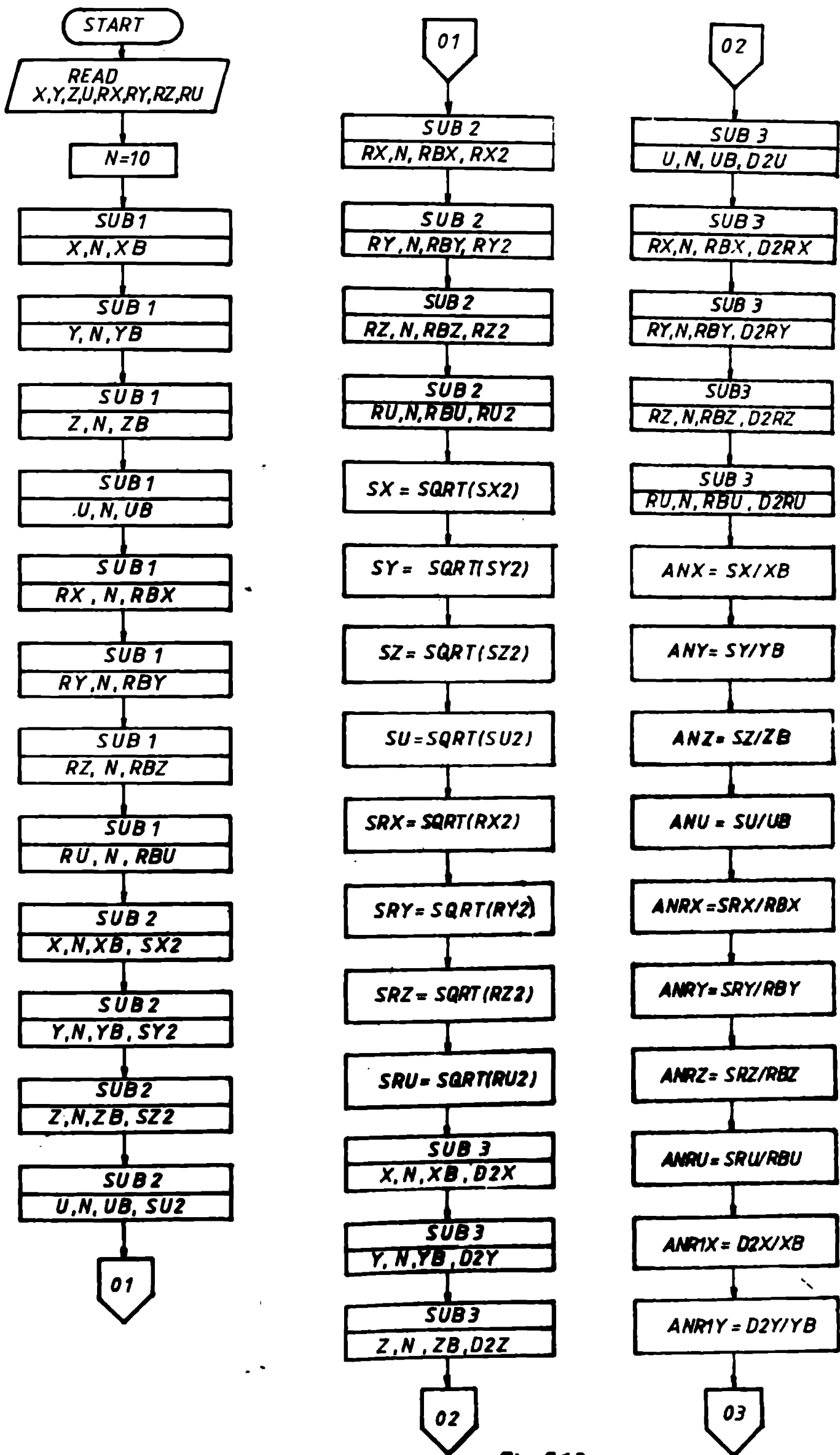


Fig. 5.13

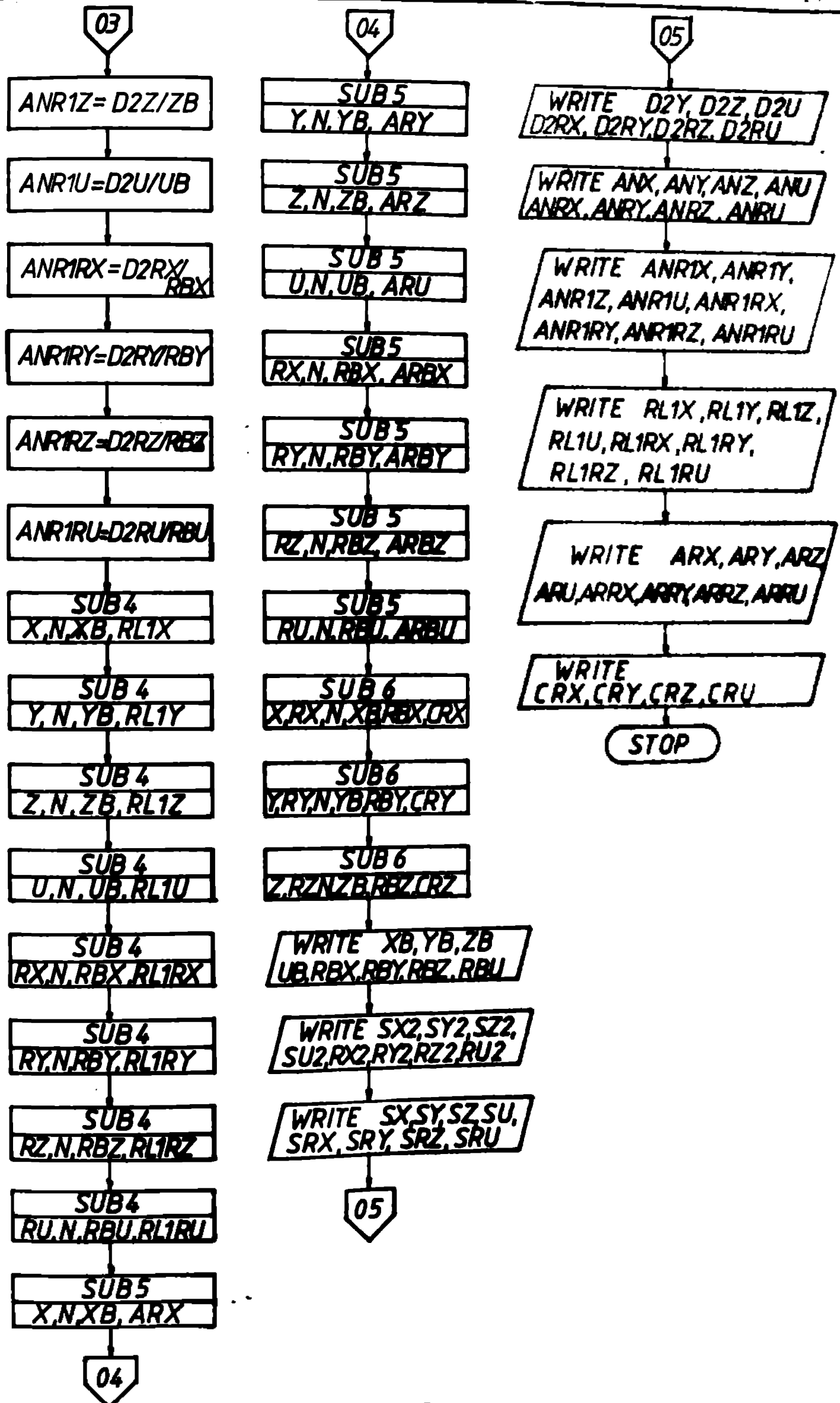


Fig. 5.1.4

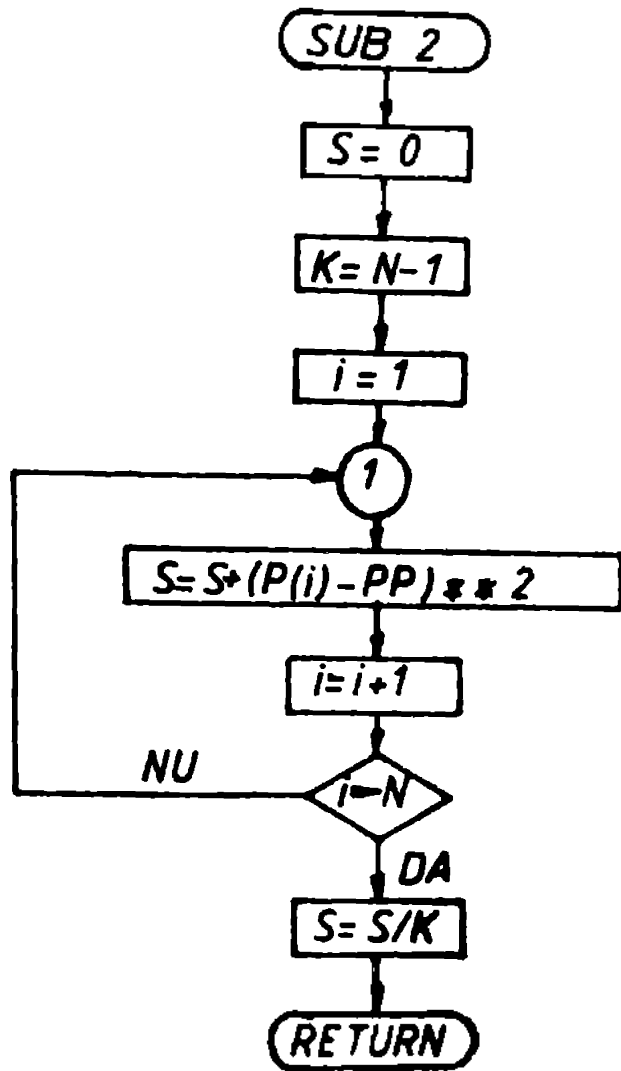
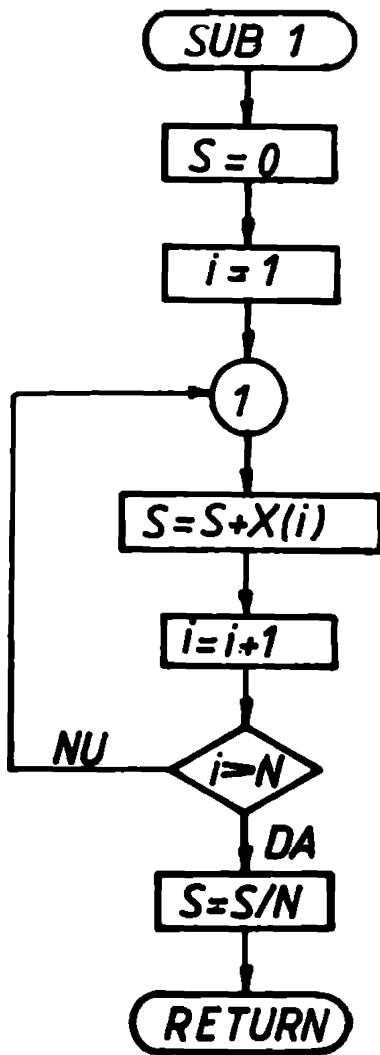


Fig 5.1.5

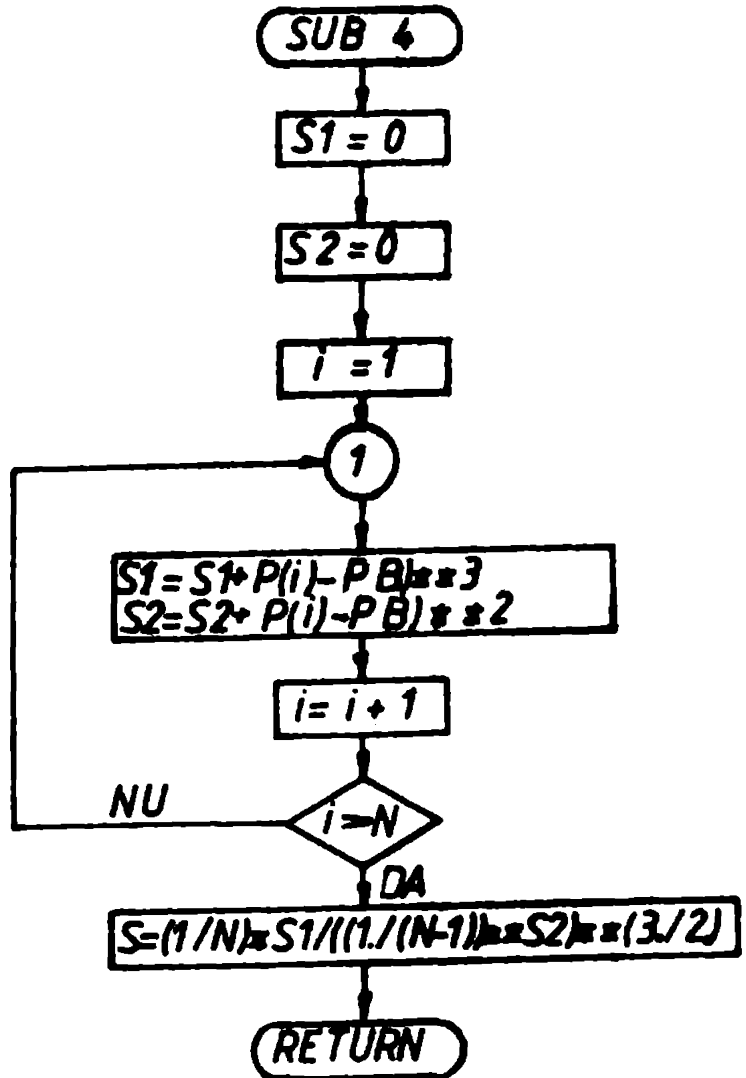
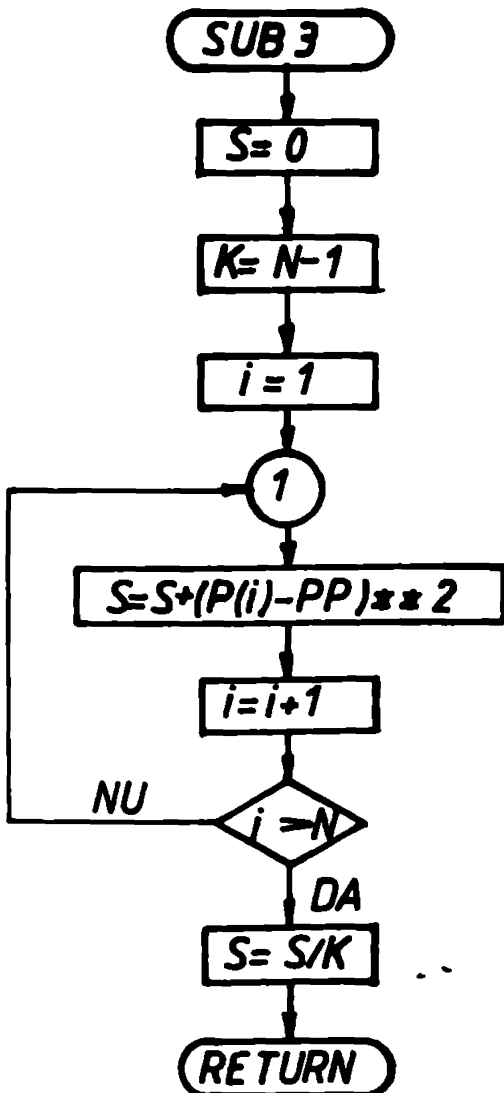


Fig. 5.1.6

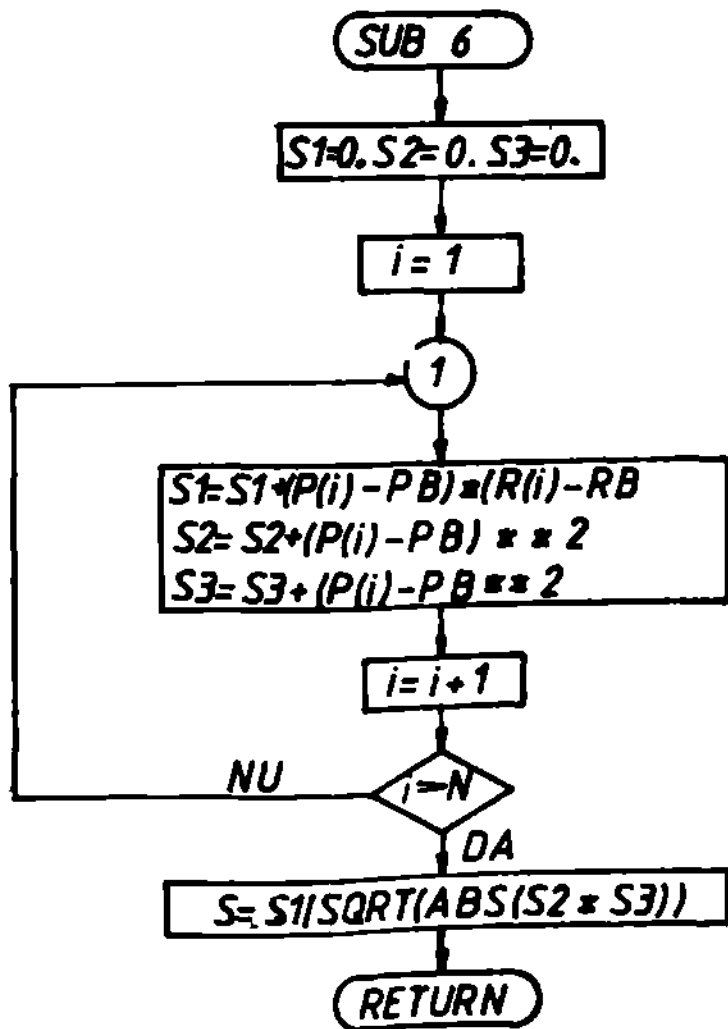
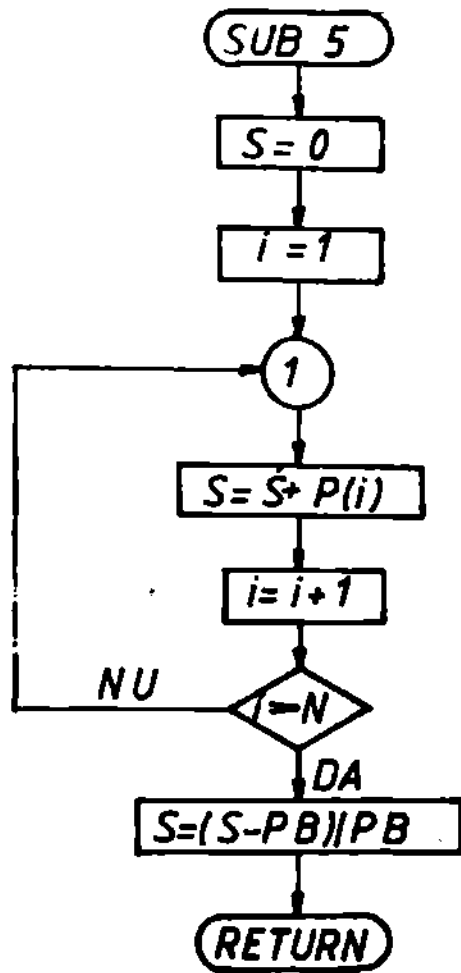


Fig. 5.1.8

Tabelul 5.1.2

Nr. crt.	Expresia	VALORI													
		X	Y	Z	U	VX	VY	WZ	WU	WV	WZ				
0		3	4	5	6	7	8	9	10						
1.	valoare medie aritmetica de serie repartitiei	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$													
2	dispersia	$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$													
3	abaterea standard	$s_x = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2}$													
4	moment central de ordin 2	$m_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$													
5	coeficient de variatie	$v_x = \frac{s_x}{\bar{x}}$													
6	coeficient de variatie corectat	$v_{1x} = \frac{d_2}{\bar{x}}$													

197,000 1,170 5,750 1,360 83,250 73,680 43,070 67,3900

256,867 0,603 2,292 0,013 221,208 817,964 573,200 545,851

16,021 0,776 1,514 0,793 14,873 28,600 23,942 23,363

331,000 0,543 2,063 0,551 199,097 736,167 515,880 491,266

0,001 0,604 0,263 0,576 0,179 0,353 0,556 0,347

0,003 0,004 0,003 0,405 0,002 0,002 0,002 0,002

Tabelul 5.1.2 (continuare)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7	coeficient de perturbatie	$\frac{1}{n\alpha}$	12,345	1,105	3,802	1,736	5,586	2,577	1,798	2,8810
8	coeficient de asimetrie	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3$ $l_{1x} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{3/2}}$	-0,144	0,196	0,000	-0,084	-0,044	-0,384	0,175	-0,3530
9	coeficient de exces	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4$ $l_{2x} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^2}$	1,602	1,604	0,7189	1,2598	1,1082	2,698	1,334	1,9177
10	abaterea relativă	$R_x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - \bar{x}}{\bar{x}}$	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
11	interval de încredere	$ a - x < \frac{3s_x}{\sqrt{n}}$	15,198	0,736	1,436	0,742	14,109	27,132	22,713	22,164

În cadrul programului de calcul stabilit pentru a se asigura siguranța estimății s-a utilizat regula de trei sigma (observându-se că nici o sarcină a rezultatelor experimentale nu a fost exclusă. Se poate deci pe baza acestuia să se determine intervalul de încredere cu o probabilitate de 0,9973 [113] utilizându-se relația:

$$|a - x| < \frac{3 \cdot s}{\sqrt{n}} \quad (5.1.11)$$

Pe baza valorilor obținute pentru momentele centrate de ordinul 3 - d_{3x} și ordinul 4 - d_{4x} , se pot trage concluzii asupra normalității repartiției. În cazul unei repartiții normale vor trebuie satisfăcute egalitățile aproximative $d_{3x} \approx 0$ și $d_{4x} \approx 3 s_x^4$. Pentru exactitatea comparației se recomandă a se determina caracteristicile dimensionale: indicatorul de asimetrie $\ell_{1x}^{1/2}$ și coeficientul de exces ℓ_{2x} , cu observația că ambii indicatori trebuie să fie mici, dacă repartiția este normală. Ordinul de mărime al acestora se apreciază comparativ cu erorile de măsurare, care se determină din:

$$E = \left[\frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)} \right]^{1/2} \quad (5.1.12)$$

și

$$E = \left[\frac{24 n(n-2)(n-3)}{(n-1)^2(n+3)(n+5)} \right]^{1/2} \quad (5.1.13)$$

Datele comparative între $\ell_{1x}^{1/2}$ și E - determinate cu relațiile (5.1.9) și (5.1.12), și cele între ℓ_{2x} și E , determinate conform (5.1.10) și (5.1.13) se prezintă în tabelul 5.1.3.

Val[113] se apreciază că dacă cel puțin una dintre caracteristicile indicate, luate în valoare absolută, depășește semnificativ (de două - trei ori) abaterea standard a ei, atunci normalitatea repartiției nu este demonstrată.

Analizând din tabelul 5.1.3 rezultatele obținute în fiecare caz în parte, pentru $|\ell_{1x}^{1/2} - E|$ și $|\ell_{2x} - E|$, comparându-le cu expresia $|3 \cdot E|$ se poate trage concluzia că datele experimentale obținute urmează o repartiție normală.

Tabelul 5.1.3

Y a l o r i

Nr. crt.	Expresia	X	Y	S	U	Rx	Ry	Rs	Ru
1	$3 \cdot \sum x_i$	48,0630	2,5280	4,5420	2,3490	44,6190	85,800	71,8260	70,039
2	$l_{1x}^{1/2} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{3/2}}$	-0,1440	0,1260	0,0000	-0,0840	-0,0440	-0,884	0,1790	-0,553
3	$g = \left[\frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)} \right]^{1/2}$	0,6140	0,6140	0,6140	0,6140	0,6140	0,614	0,6140	0,614
4	$l_{1x}^{1/2} - g$	0,758	0,410	0,614	0,698	0,658	1,498	0,435	0,967
5	$l_{2x} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^2}$	1,002	1,604	0,7189	1,2920	1,1032	2,698	1,294	1,9177
6	$E = \left[\frac{24n(n-2)(n-3)}{(n-1)^2(n+3)(n+5)} \right]^{1/2}$	0,9224	0,9224	0,9224	0,9224	0,9224	0,9224	0,9224	0,9224
7	$l_{2x} - E$	0,0796	0,6816	0,2035	0,3364	0,1858	1,7756	0,4116	0,9953

5.2. Stabilirea dependențelor corelaționale între
parametri tehnologici principali ai
regimurilor de sudare prin presiune în
câmp ultrasonor

În cele ce urmează se va urmări punerea în evidență a interdependențelor între parametri regimurilor de sudare sub presiune în câmp ultrasonor.

Între două sau mai multe mărimi fizice, parametri, există o dependență corelațională dacă fiecărei mărimi "a" îi corespunde o cantitate nedefinită de valori "a₁, a₂, ..., a_n", dar media aritmetică a valorilor lui "a₁, a₂, ..., a_n" depinde de variabila "a". În cazuri particulare, dependența corelațională se poate transforma în dependență funcțională când punctele cîmpului de distribuție se plasează pe o anumită curbă.

Se consideră caracteristicile determinate de mărimile funcției calitate R_x, R_y, R_z și R_u determinate de variația parametrilor x, y, z și u , caracterizate prin datele prezentate în tabelul 5.1.1

Repartiția empirică a celor patru grupe de câte două variabile $(R_x;x), (R_y;y), (R_z;z)$ și $(R_u;u)$ se reprezintă pe cale grafică într-un sistem de axe, unde se construiesc punctele de coordonate $(R_{x_1};x_1), (R_{y_1};y_1), (R_{z_1};z_1)$ și $(R_{u_1};u_1)$, prezentate în figura 5.1.

Ansamblul punctelor astfel determinate poartă denumirea de cîmp de corelație. Dacă punctele R_x și x ; R_y și y ; R_z și z și R_u și u sînt medii aritmetice respective ale tuturor valorilor obținute pentru cele două variabile, punctele de coordonate $M(x;x), M(y;y), M(z;z)$ și $M(u;u)$, punctele M, N, P și Q se numesc centre de repartiție.

La reprezentarea grafică a cîmpului de corelație pentru cele patru dependente prezentate (fig. 5.2.1) se poate trage concluzia că între acestea există o dependență oarecare.

Dacă punctele $(R_{x_1}, x_1), (R_{y_1}, y_1), (R_{z_1}, z_1)$ și (R_{u_1}, u_1) sînt situate într-o fișie care în general va urma o curbă determinată, se poate afirma că între mărimile respective există o dependență funcțională. Dacă punctele cîmpului de dis-

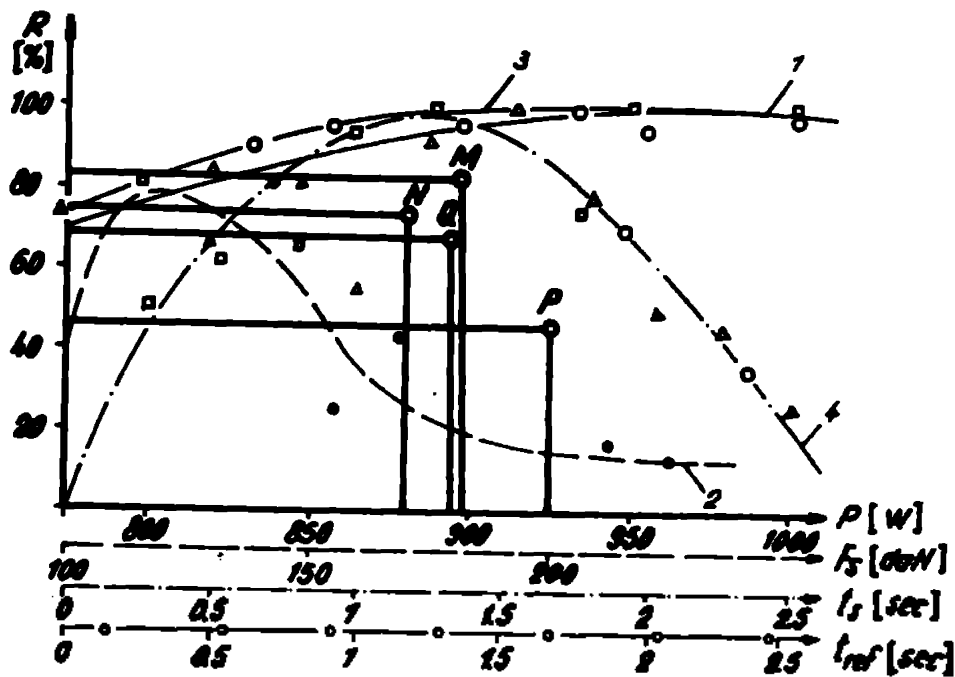


Fig. 5.2.1. Plasarea centrelor de repartiție pe graficul curbelor de dependență $(R, x); (R, y), (R, z)$ și (R, u)

triunghiare sunt repartizate destul de desordonat, dar totuși există o tendință ca punctele M să depindă de variabilele x_1, y_1, z_1, u_1 . Deși nu în mod riguros, în acest caz, între acestea poate exista o dependență corelațională.

Determinarea legăturilor de corelație și a dependențelor funcționale lineare se efectuează prin intermediul coeficientului de corelație exprimat prin :

$$\begin{aligned}
 r_x &= \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(Rx_i - \bar{Rx})}{\left\{ \left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (Rx_i - \bar{Rx})^2 \right] \right\}^{1/2}} \\
 r_y &= \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(Ry_i - \bar{Ry})}{\left\{ \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (Ry_i - \bar{Ry})^2 \right] \right\}^{1/2}} \\
 r_z &= \frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})(Rz_i - \bar{Rz})}{\left\{ \left[\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (Rz_i - \bar{Rz})^2 \right] \right\}^{1/2}} \\
 r_u &= \frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})(Ru_i - \bar{Ru})}{\left\{ \left[\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (Ru_i - \bar{Ru})^2 \right] \right\}^{1/2}}
 \end{aligned} \tag{5.2.1}$$

Dacă coeficientul de corelație ia valorile $r = \pm 1$, între mărimile considerate există o dependență funcțională lineară. În cazul în care $r = +1$, odată cu creșterea parametrului x, y, z sau u apare o creștere a funcției calitate R_x, R_y, R_z și R_u ; pentru cazul $r = -1$, odată cu creșterea valorilor parametrilor apare o descreștere a funcției considerate. În cazul în care $r \neq \pm 1$, între parametri considerați nu există dependență lineară.

Pentru cazul în care $r = 0$, între parametri nu poate exista vreo corelație definită printr-o dependență funcțională lineară; dar aceasta nu înseamnă că între mărimile respective nu există nici un fel de corelație. În acest caz pot exista dependențe funcționale neliniare (parabolice, hiperbolice etc.).

Calculul coeficienților de corelație s-a efectuat pe calculator de bază unui program în limbaj FORTRAN, tehnologia de calcul se prezintă în figura 5.1.2. Rezultatele obținute se prezintă în continuare :

$$\begin{aligned} r_x &= 0,4195562 \\ r_y &= 0,0000000 \\ r_z &= -0,6186051 \\ r_u &= -0,5362960 \end{aligned}$$

După cum rezultă din valorile calculate ale coeficienților de corelație se poate afirma că între parametri x, y, z, u și calitatea de calitate R_x, R_y, R_z și R_u nu există o dependență lineară.

Obținând însă intervalul de încredere pentru valoarea coeficientului de corelație determinat prin utilizarea formulei :

$$|r| \cdot \sqrt{n-1} \leq H \quad (5.2.2)$$

în care H reprezintă valoarea critică a produsului $r \cdot \sqrt{n-1}$ pentru diferite valori ale nivelului de încredere; scriind nivelul de încredere de $P(0,999)$ rezultă :

$$\begin{aligned} |r_x| \cdot \sqrt{n-1} &= 1,258 < 2,62 \\ |r_y| \cdot \sqrt{n-1} &= 0 < 2,62 \\ |r_z| \cdot \sqrt{n-1} &= 1,899 < 2,62 \\ |r_u| \cdot \sqrt{n-1} &= 1,508 < 2,62 \end{aligned} \quad (5.2.3)$$

ceea ce conduce la respingerea afirmației asupra necorelării variabilelor considerate.

Se considera deci, că între parametrii x, y, z și u și R există o dependență funcțională de grad mai mare ca doi.

Ținând în vedere cele prezentate, în continuare determinăm corelația multiplă între variabilele arătate.

Aplicând metodele statistice ale corelației multiple, care permit măsurarea influenței comune a celor patru parametri tehnologici principali ai regimului de ardere x, y, z și u asupra funcției calitate R a îmbinării studiate se constată că relația formată cu valorile celor 5 parametri tehnologici, este însoțită pe cele experimentale.

Prin urmare, suprafața de regresie liniară a rezultatelor R, x, y, z și u în raport cu parametrii x, y, z și u , reprezintă un hiperplan în spațiul n-dimensional $n=5$. Prin urmare, este dată printr-o ecuație de forma :

$$R(x, y, z, u) = A + B \cdot x + C \cdot y + D \cdot z + E \cdot u \quad (5.2.4)$$

în care coeficienții A, B, C, D și E numiți coeficienți de regresie, arată ce pondere are influența fiecărei caracteristici tehnologice x, y, z și u asupra funcției calitate R . Pentru a determina valoarea minimă a erorii de regresie, se aplică cu ajutorul metodei celor mai mici pătrate, metoda celor mai mici pătrate, care constă în a determina ca dispersia abaterilor valorilor reziduale față de valorile determinate pe baza ecuației de regresie (5.2.4) să fie minime, deci :

$$\sum_{i=1}^n \left[R(x_i, y_i, z_i, u_i) - A - B \cdot x_i - C \cdot y_i - D \cdot z_i - E \cdot u_i \right]^2 = \min \quad (5.2.5)$$

Minimizând suma (5.2.5) sistemul condus la sistemul (5.2.6) :

$$\begin{aligned} n \cdot A + \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) B + \left(\sum_{i=1}^n y_i \right) C + \left(\sum_{i=1}^n z_i \right) D + \left(\sum_{i=1}^n u_i \right) E &= \sum_{i=1}^n R x_i + R y_i + R z_i + R u_i \\ \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) B + \left(\sum_{i=1}^n y_i \right) C + \left(\sum_{i=1}^n z_i \right) D + \left(\sum_{i=1}^n u_i \right) E &= \sum_{i=1}^n x_i \cdot R x_i \\ &= \sum_{i=1}^n x_i \cdot R x_i \end{aligned} \quad (5.2.6)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n y_i)A + (\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i)B + (\sum_{i=1}^n y_i)C + (\sum_{i=1}^n y_i \cdot z_i)D + (\sum_{i=1}^n y_i \cdot u_i)E = \\ = \sum_{i=1}^n y_i \cdot RY_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\sum_{i=1}^n z_i)A + (\sum_{i=1}^n x_i \cdot z_i)B + (\sum_{i=1}^n y_i \cdot z_i)C + (\sum_{i=1}^n z_i)L + (\sum_{i=1}^n z_i \cdot u_i)E = \\ = \sum_{i=1}^n z_i \cdot Kz_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\sum_{i=1}^n u_i)A + (\sum_{i=1}^n x_i \cdot u_i)B + (\sum_{i=1}^n y_i \cdot u_i)C + (\sum_{i=1}^n z_i \cdot u_i)D + (\sum_{i=1}^n u_i)E = \\ = \sum_{i=1}^n u_i \cdot Ku_i \end{aligned}$$

Sistemul (5.2.6) este un sistem de tip Cramer, care se rezolvă prin una din metodele cunoscute.

Pentru rezolvarea sistemului s-a întocmit un program de calcul în limbaj FORTRAN, schema logică ale acestui se vede în figurile 5.2.2 ... 5.2.8

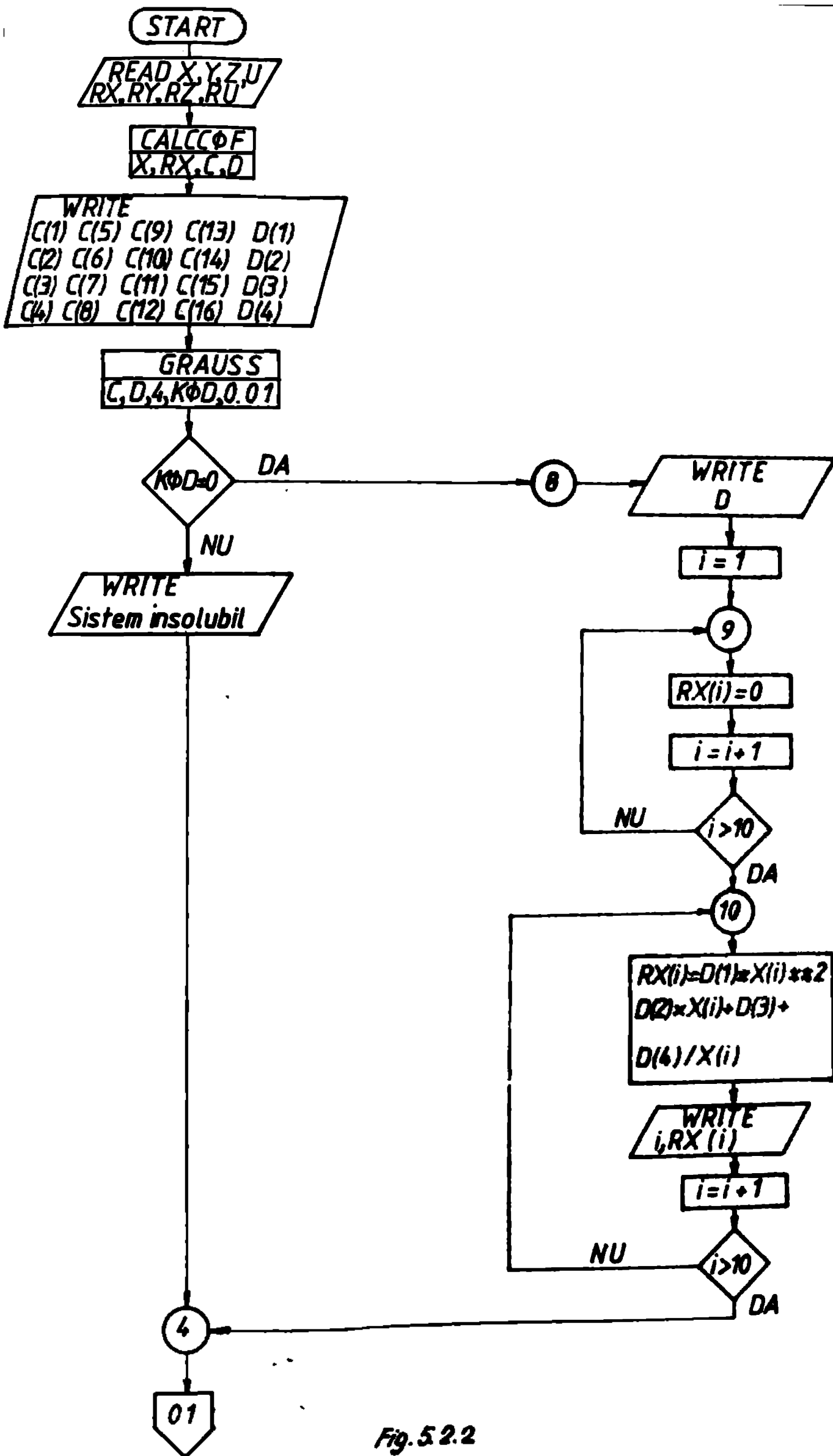


Fig. 5.2.2

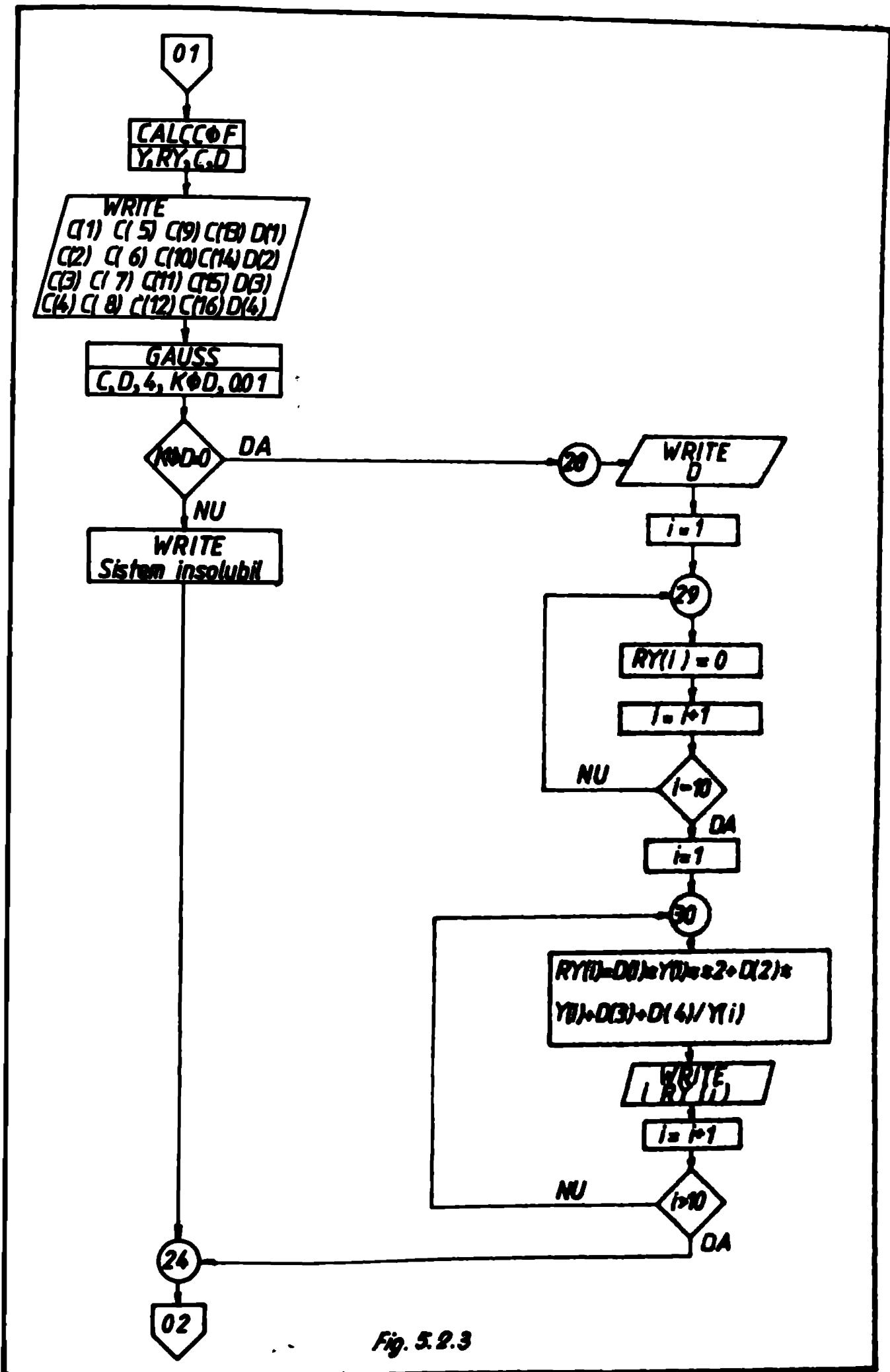


Fig. 5.2.3

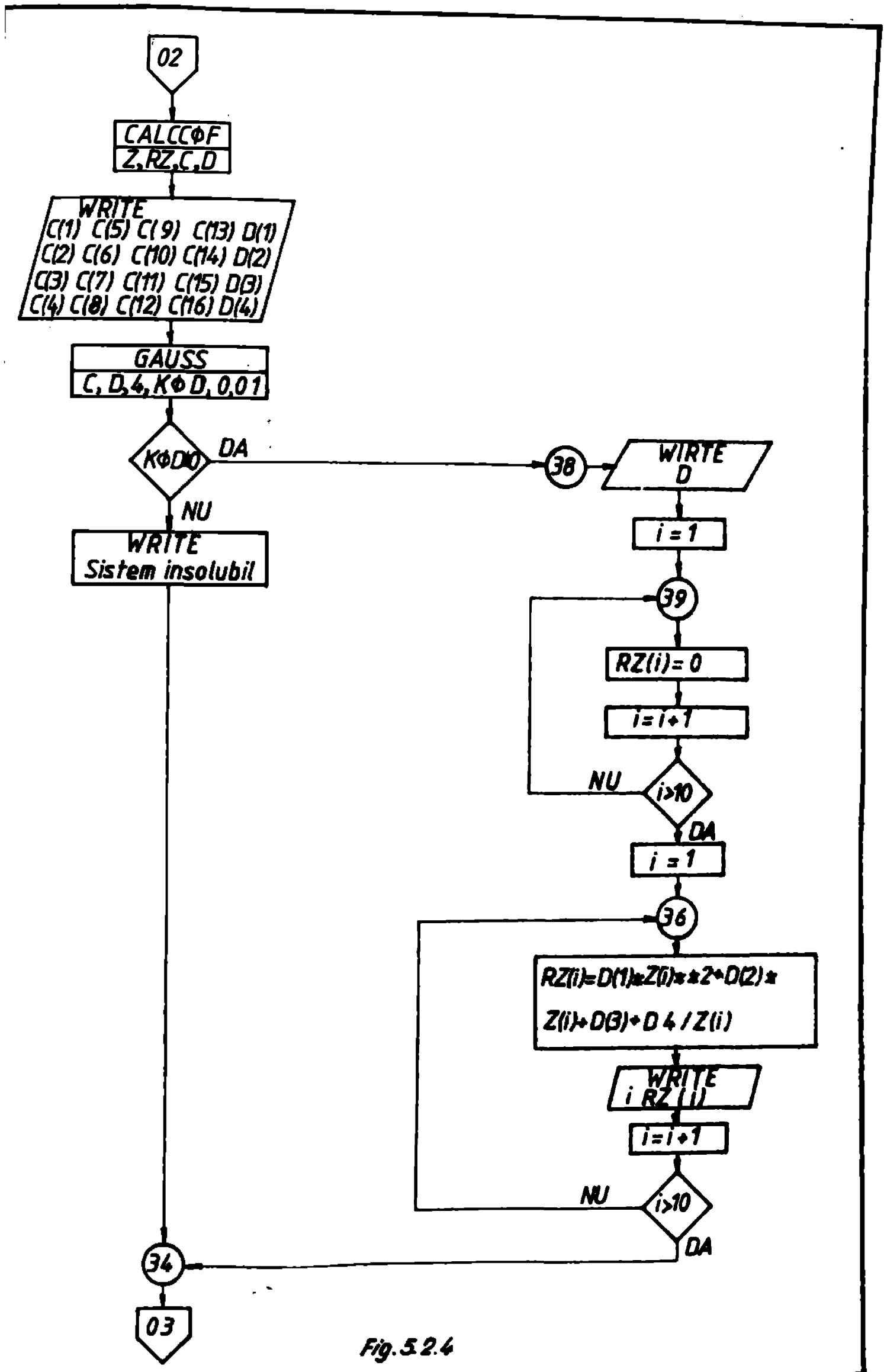


Fig. 5.2.4

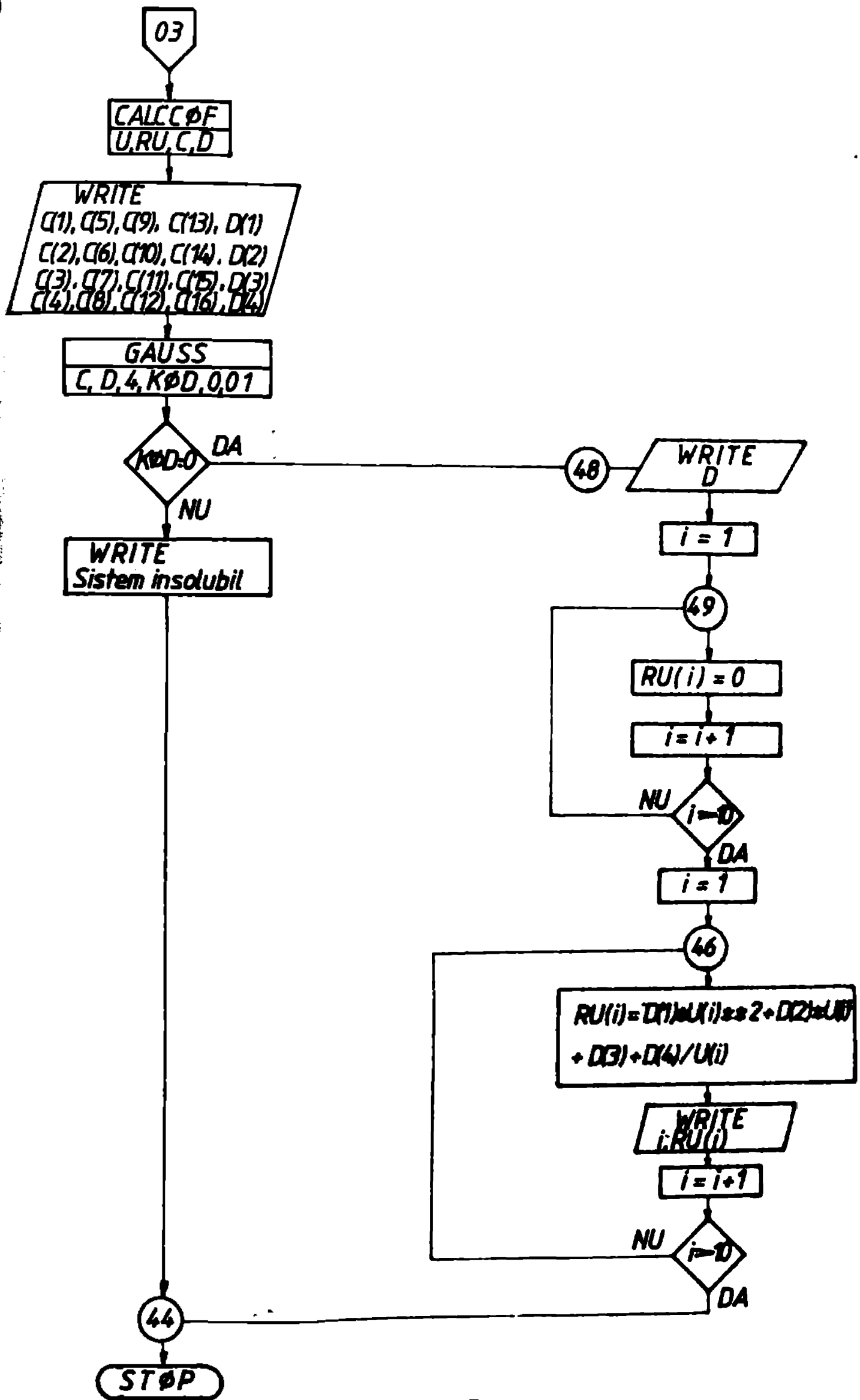


Fig. 5.2.5

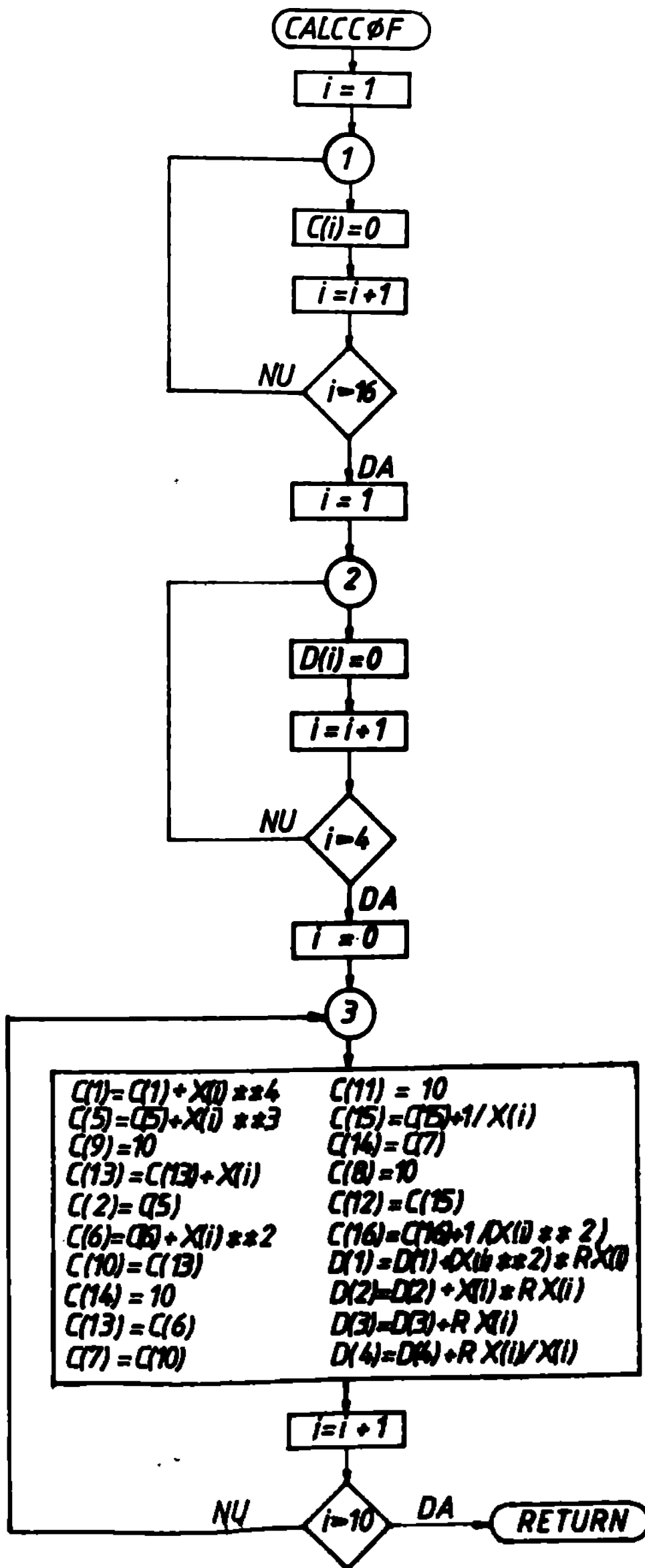


Fig 5.2.6

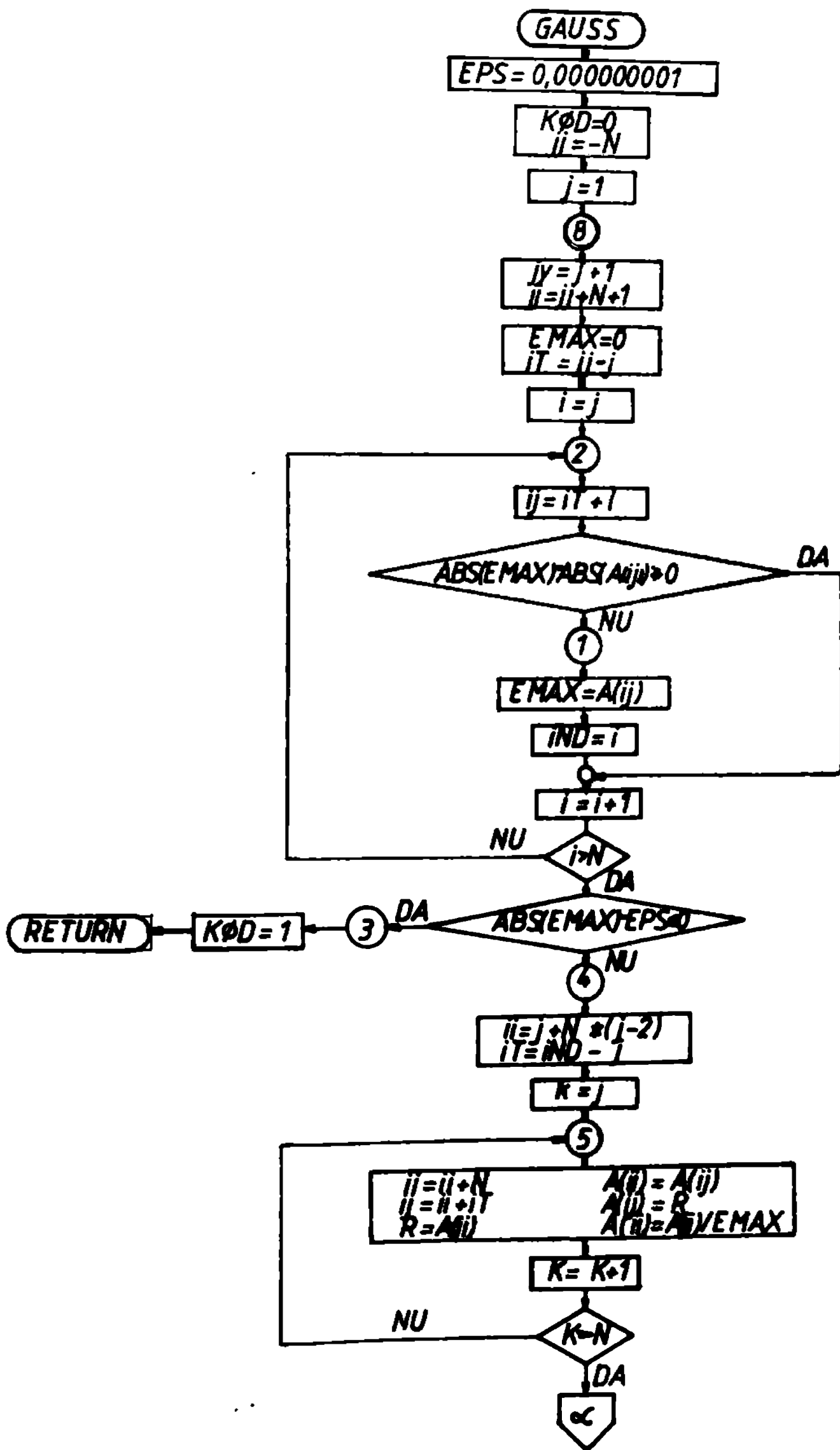


Fig. 5.2.7

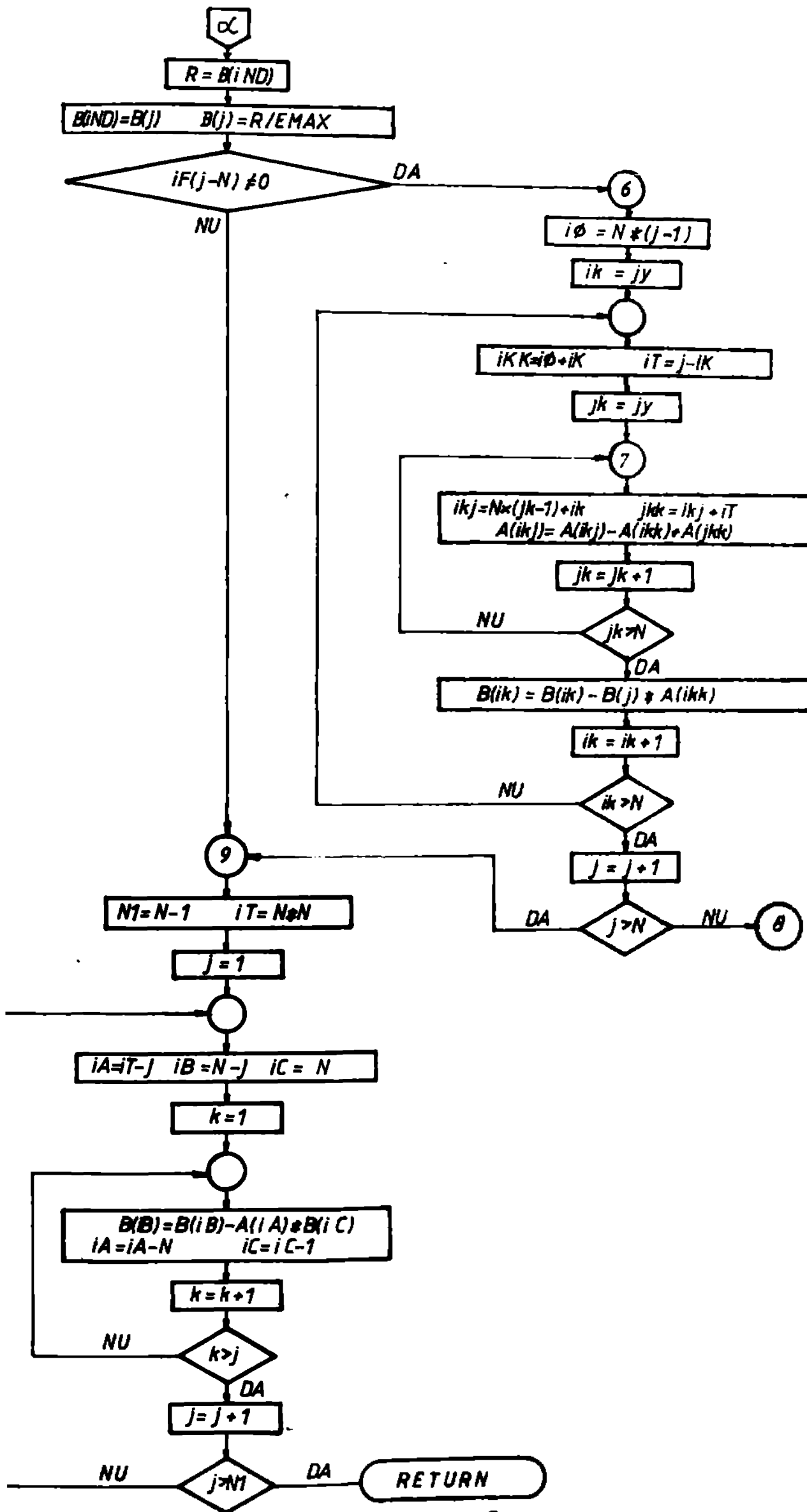


Fig. 5.2.8

În cazul cercetărilor efectuate, pe baza datelor experimentale obținute, prezentate în tabelul 5.1.1, se obține:

$$\begin{aligned} 10, & \quad + 11,7 C + 57,5 D + 25,6 E = 170,987,11 \\ 11, & \quad + 219,3 C + 1111 D + 256,7 E = 16,499,7 \\ 12, & \quad + 19,115 C + 27,8 D + 21,335 E = 10,18,7 \quad (5.1.1) \\ 13, & \quad + 1111 B + 77,8 C + 351,25 E + 88,85 F = 222,8 \\ 14, & \quad + 256,7 B + 21,335 C + 88,85 E + 24,01 F = 256,2 \end{aligned}$$

ca și soluție optimă, calculată pe calculator pe baza schemelor logice prezentate este :

$$\begin{aligned} A &= 0,9705 \cdot 10^{13} \\ B &= -0,488 \cdot 10^{12} \\ C &= -7,958 \cdot 10^{12} \\ D &= 0,7849 \cdot 10^{11} \\ E &= -2,322 \cdot 10^{12} \end{aligned} \quad (5.1.2)$$

Se poate conclua la legea de corelație optimă între calitate a fibinărilor sudate prin presiune în funcție de ultrasonor și parametri tehnologici principali și regiunilor de sudare dată, prin expresia :

$$\begin{aligned} R(x,y,z,u) &= 97,05 \cdot 10^{11} - 4,488 \cdot 10^{11} \cdot x - 7,958 \cdot 10^{11} \cdot y \\ &+ 0,7849 \cdot 10^{11} \cdot z - 2,322 \cdot 10^{11} \cdot u \end{aligned} \quad (5.2.1)$$

unde x, y, z și u la notațiile inițiale ale caracteristicilor factoriale x, y, z și u la forma :

$$\begin{aligned} x &= P - 7,958 \cdot t_s + 0,7849 \cdot F_s - 2,322 \cdot t_{ref} + \\ &+ 97,05 \cdot 10^{11} \end{aligned} \quad (5.2.10)$$

Relația (5.2.10) reprezintă ecuația regresiei multiple, care exprimă dependența funcției calitate R de caracteristicile factoriale x, y, z și u , respectiv de parametri tehnologici principali și regiunilor de sudare în timp ultrasonor P, F_s, t_s și t_{ref} . Coeficienții de regresie A, B, C, D și E indică dependența caracteristicilor factoriale x, y, z și u de caracteristicii rezultantei R . Din reprezentarea grafică a coralațiilor $(R, P); (R, F_s); (R, t_s); (R, t_{ref})$ rezultă că ajutorul datelor experimentale și a dreptelor de

regresie stabilite, avind la baza relația (5.2.10) (figurile 5.2.9 ... 5.2.12) se poate trage concluzia că acestea se suprapun satisfactor.

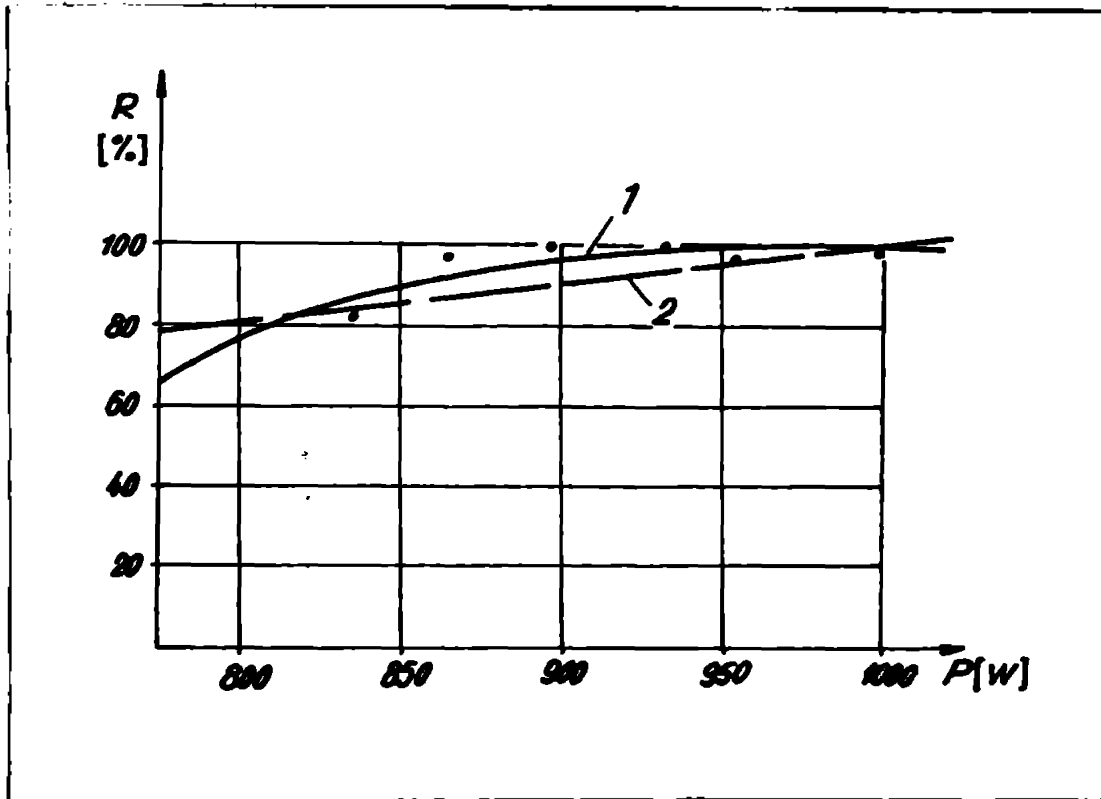


Fig.5.2.9. Curba 1 - date experimentale
curba 2 - dreaptă de regresie

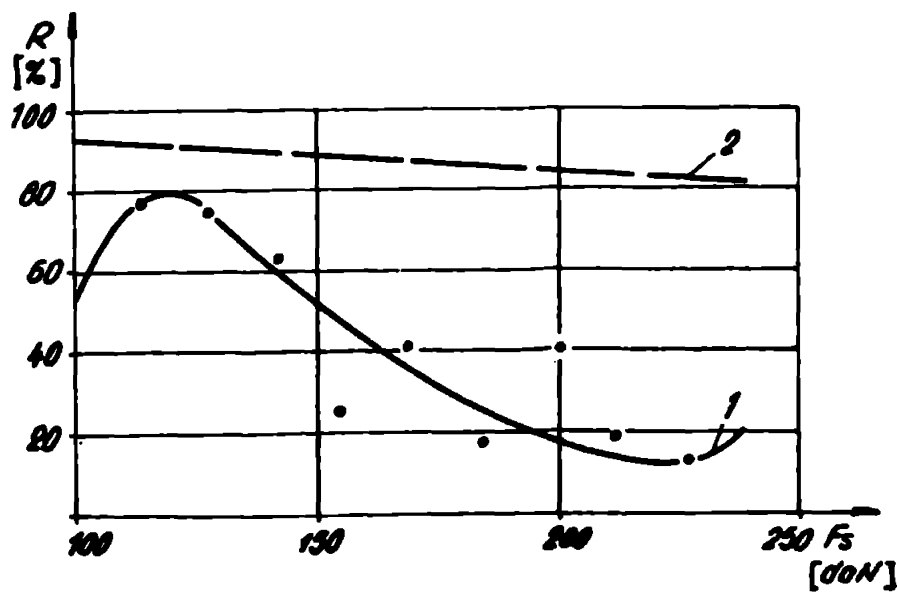


Fig.5.2.10. Curba 1 - date experimentale
curba 2 - dreaptă de regresie

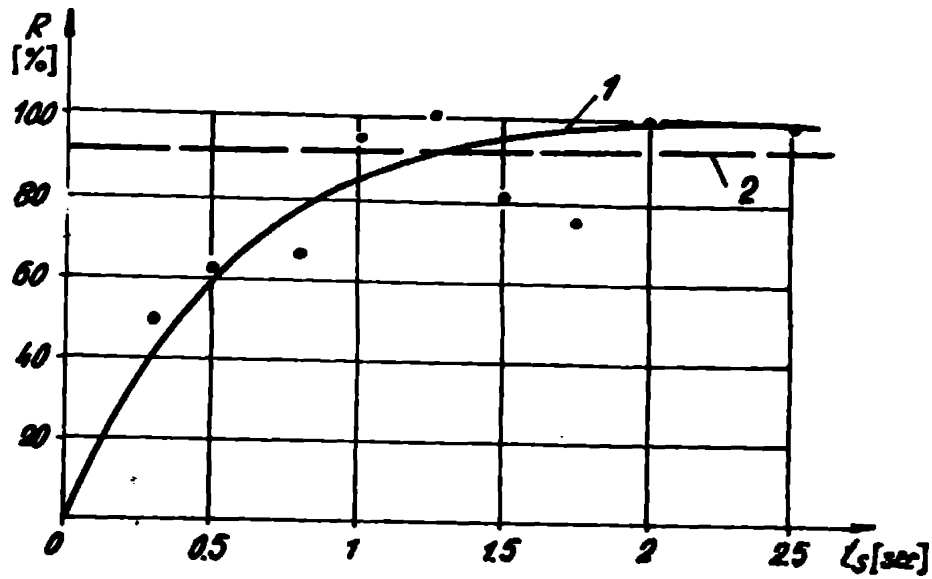


Fig.5.2.11. Curba 1 - date experimentale
curba 2 - dreapta de regresie

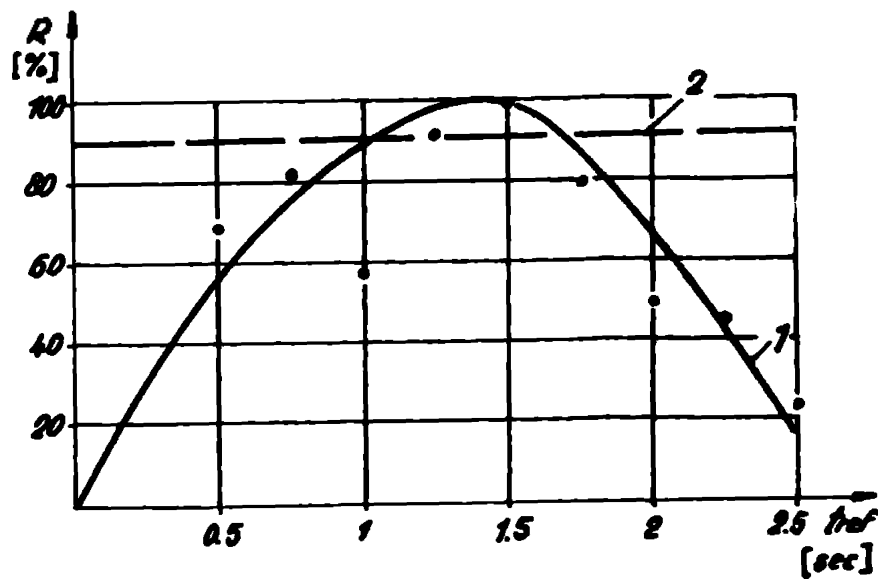


Fig.5.2.12. Curba 1 - date experimentale
curba 2 - dreapta de regresie

Se observă că expresia (5.2.10) satisface în cea mai mare măsură dependența rezultantei R de valoarea puterii acustice a vibrațiilor ultrasonore P , precum și dependența acestuia de timpul de acționare al undelor ultrasonore t_p .

5.3. Stabilirea funcțiilor analitice de legătură
pentru determinarea influenței parametrilor
regiaurilor de sudare asupra calității
îmbinărilor sudate

În capitolul precedent 5.2 s-au stabilit dependențele corelaționale existente între parametri tehnologici principali și calitatea îmbinărilor sudate, fără însă a se stabili funcțiile de legătură între acestea.

Expresia (5.2.10) ne prezintă modul în care parametri P , P_g , t_g și t_{ref} contribuie simultan la stabilirea funcției calitate R , indicându-se în același timp calitatea, modul de influențare a fiecărui parametru în parte. De remarcat este faptul că stabilirea legii de corelație optimă între parametri s-a efectuat într-un hiperspațiu cu 5 dimensiuni, din punct de vedere matematic existent, dar care fizic nu poate fi interpretat. Rezultă deci necesitatea de a stabili funcțiile de legătură între parametri, care să poată fi descrise într-un spațiu fizic.

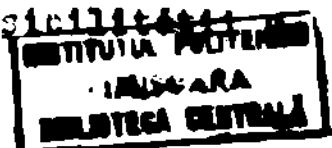
Pînă în prezent, nu se dispune de o regulă generală pe baza căreia să se aleagă cea mai potrivită formă a expresiei funcțiilor de legătură. Alegerea acestora se face pornindu-se de la reprezentarea grafică într-un sistem de axe cartezian a datelor experimentale și prin compararea alurii acestor curbe cu alura graficelor cunoscute pentru anumite funcții analitice, se alege aspectul general al dependenței funcționale.

În cele ce urmează ne propunem să stabilim expresiile funcțiilor empirice de legătură existente între fiecare din parametri tehnologici principali ai procesului de sudare prin presiune în câmp ultrasonor, P , P_g , t_g și t_{ref} și funcția calitate a îmbinărilor sudate, altfel spus:

$$\begin{aligned} R &= f(P) \\ R &= f(P_g) \\ R &= f(t_g) \\ R &= f(t_{ref}) \end{aligned} \quad (5.3.1)$$

pentru a se putea evalua calitativ și cantitativ influența fiecărui parametru în parte.

Pentru aceasta se propune studiarea posibilității utilizării funcțiilor de legătură de forma :



- 1) $y = ax + b$ - dependență lineară
- 2) $y = ax^2 + bx + c$
- 3) $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ dependență polinomială (5.3.2)
- 4) $y = a \cdot x^n + b$ - funcție putere
- 5) $y = ab^x + c$ - dependență exponențială

a căror reprezentări grafice se prezintă în figure 5.3.1.

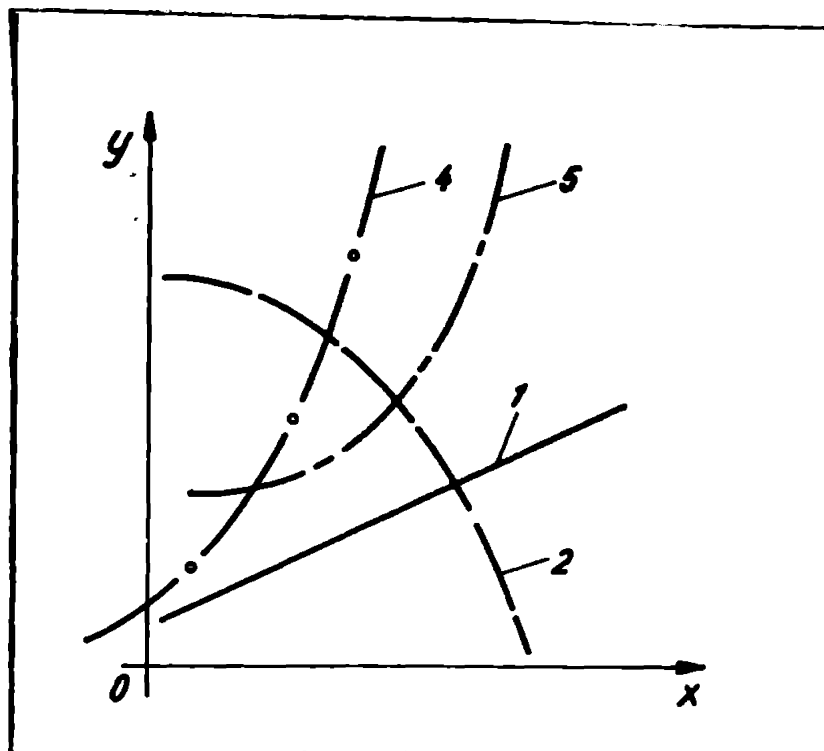


Fig.5.3.1. Graficele funcțiilor 1,2,3,4,5 din (5.3.2)

Analizând alura curbelor funcțiilor de legătură propuse cu alura dependențelor (R,P) ; (R,F_2) ; (R,t_B) și (R,t_{ref}) determinate experimental, rezultă că nici una din dependențele lineare prezentate în (5.3.2) nu satisfac condițiile cerute.

Având în vedere forma curbelor de dependență ridicate pe baza rezultatelor experimentale, se propune utilizarea funcției empirice de legătură de forma :

$$y = ax^2 + bx + c + \frac{d}{x} \quad (5.3.3)$$

care reprezintă intersecția unei parabole cu o hiperbolă. Deci dependențele pot fi scrise sub forma :

$$\begin{aligned}
 R(x) &= a_1 x^2 + b_1 x + c_1 + \frac{d_1}{x} \\
 R(y) &= a_2 y^2 + b_2 y + c_2 + \frac{d_2}{y} \\
 R(z) &= a_3 z^2 + b_3 z + c_3 + \frac{d_3}{z} \\
 R(u) &= a_4 u^2 + b_4 u + c_4 + \frac{d_4}{u}
 \end{aligned}
 \tag{5.3.4}$$

in care x, y, z și u au semnificația celor utilizate în subcapitolul precedent.

Pentru determinarea constantelor a_1, b_1, c_1 și d_1 în fiecare caz în parte, se va utiliza metoda celor mai mici pătrate.

Se pune condiția ca funcția $f(a_1, b_1, c_1, d_1)$ să fie un minim. Deci, pentru dependența $R = f_n(x)$ rezultă :

$$f(a_1, b_1, c_1, d_1) = \sum_{i=1}^n \left[R_{x_i} - a_1 x_i^2 - b_1 x_i - c_1 - \frac{d_1}{x_i} \right]^2 = \min
 \tag{5.3.5}$$

Din condițiile :

$$\frac{\partial f}{\partial a_1} = \frac{\partial f}{\partial b_1} = \frac{\partial f}{\partial c_1} = \frac{\partial f}{\partial d_1} = 0
 \tag{5.3.6}$$

care scrise explicit :

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial f}{\partial a_1} &= \sum_{i=1}^n \left[R_{x_i} - a_1 x_i^2 - b_1 x_i - c_1 - \frac{d_1}{x_i} \right]^2 = 0 \\
 \frac{\partial f}{\partial b_1} &= \sum_{i=1}^n \left[R_{x_i} - a_1 x_i^2 - b_1 x_i - c_1 - \frac{d_1}{x_i} \right] \cdot x_i^2 = 0 \\
 \frac{\partial f}{\partial c_1} &= \sum_{i=1}^n \left[R_{x_i} - a_1 x_i^2 - b_1 x_i - c_1 - \frac{d_1}{x_i} \right] = 0 \\
 \frac{\partial f}{\partial d_1} &= \sum_{i=1}^n \left[R_{x_i} - a_1 x_i^2 - b_1 x_i - c_1 - \frac{d_1}{x_i} \right] \cdot \frac{1}{x_i} = 0
 \end{aligned}
 \tag{5.3.7}$$

ce rezultă sistemul :

$$\begin{aligned}
 a_1 \sum_{i=1}^n x_i^4 + b_1 \sum_{i=1}^n x_i^3 + n \cdot c_1 + d_1 \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} &= \sum_{i=1}^n R_{x_i} \cdot x_i^2 \\
 a_1 \sum_{i=1}^n x_i^3 + b_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + c_1 \sum_{i=1}^n x_i + n \cdot d_1 &= \sum_{i=1}^n R_{x_i} \cdot x_i
 \end{aligned}$$

$$a_1 \sum_{i=1}^n x_1^2 + b_1 \sum_{i=1}^n x_1 + n \cdot c_1 + d_1 \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_1} = \sum_{i=1}^n kx_1 \quad (5.3.5)$$

$$a_1 \sum_{i=1}^n x_1 + n \cdot b_1 + c_1 \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_1} + d_1 \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_1^2} = \sum_{i=1}^n \frac{kx_1}{x_1}$$

În rezolvarea sistemului, prin una din metodele cunoscute, se determină valorile parametrilor a_1 , b_1 , c_1 și d_1 .

În mod analog, se scriu sistemele de forma (5.3.7) și (5.3.8) pentru dependențele $R = f(y)$; $R = f(z)$; $R = f(u)$, din care se determină valorile parametrilor a_2 , a_3 , a_4 ; b_2 , b_3 , b_4 ; c_2 , c_3 , c_4 și d_2 , d_3 și d_4 .

Datorită faptului că rezolvarea celor patru sisteme de forma (5.3.8) necesită un volum foarte mare de calcule s-a elaborat un program de calcul în limbaj FORTRAN, a cărui schemă logică sînt prezentate în figurile 5.3.1 ... 5.3.4.

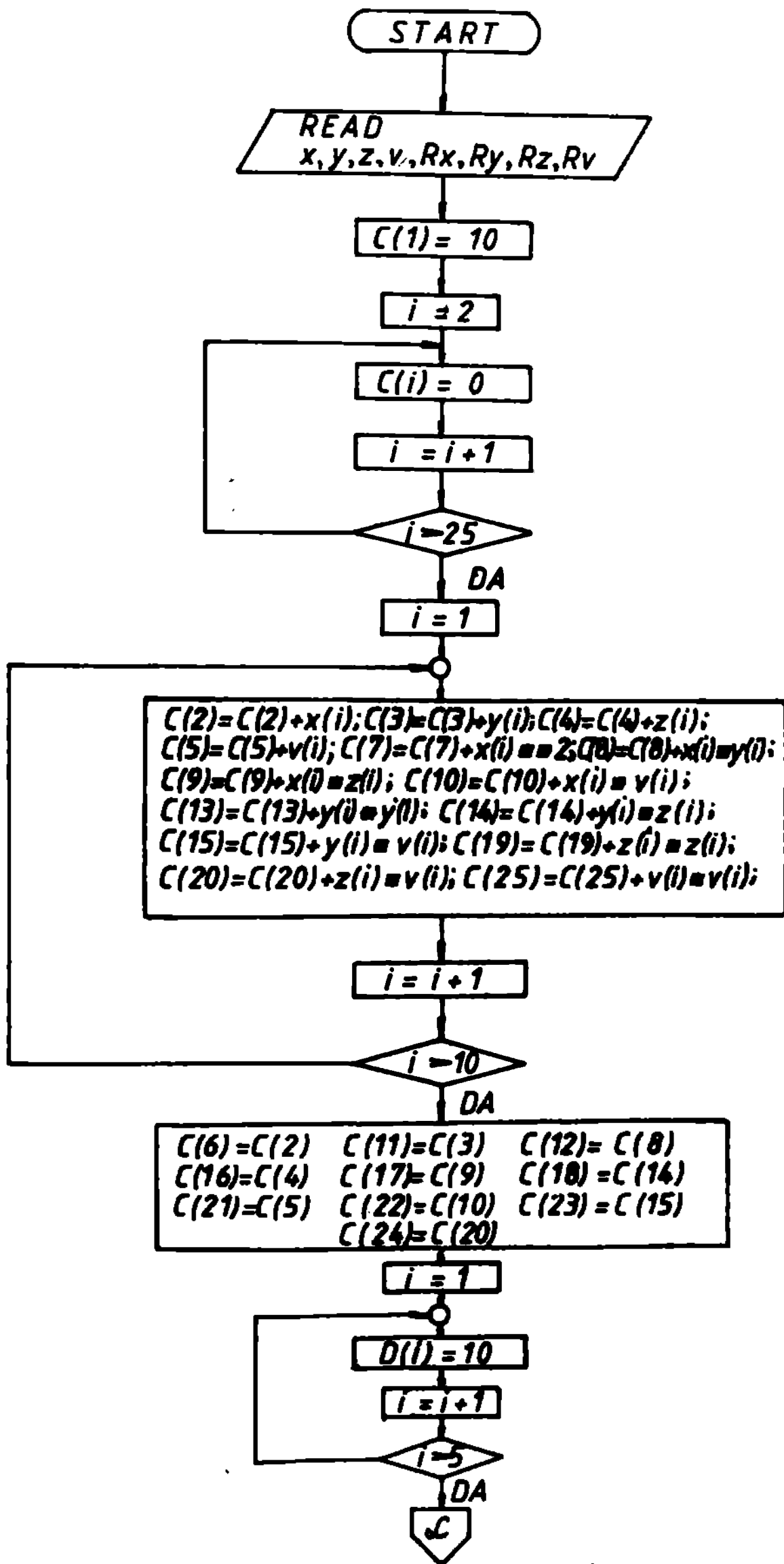


Fig. 5.3.2

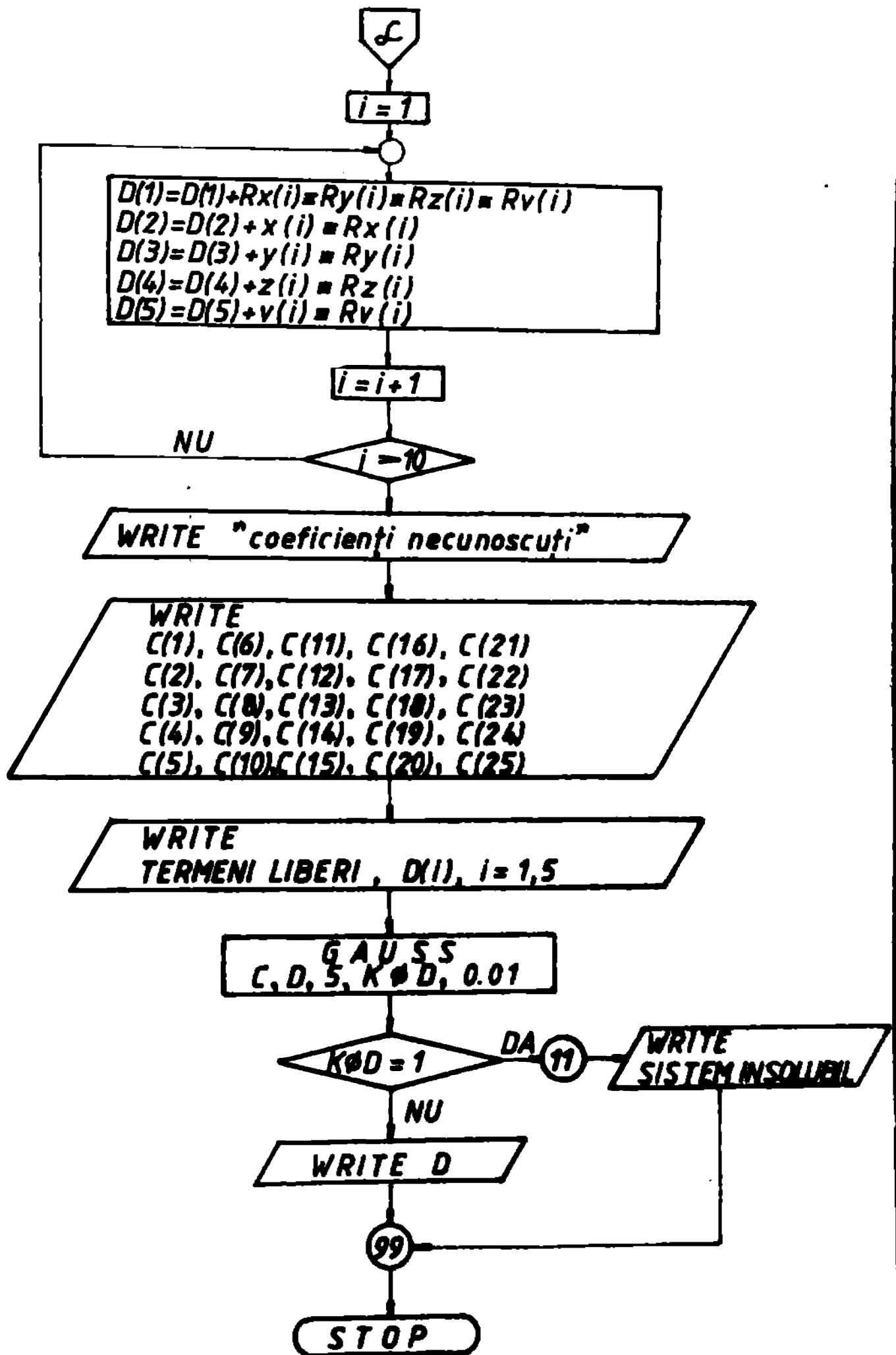


Fig. 5.3.3

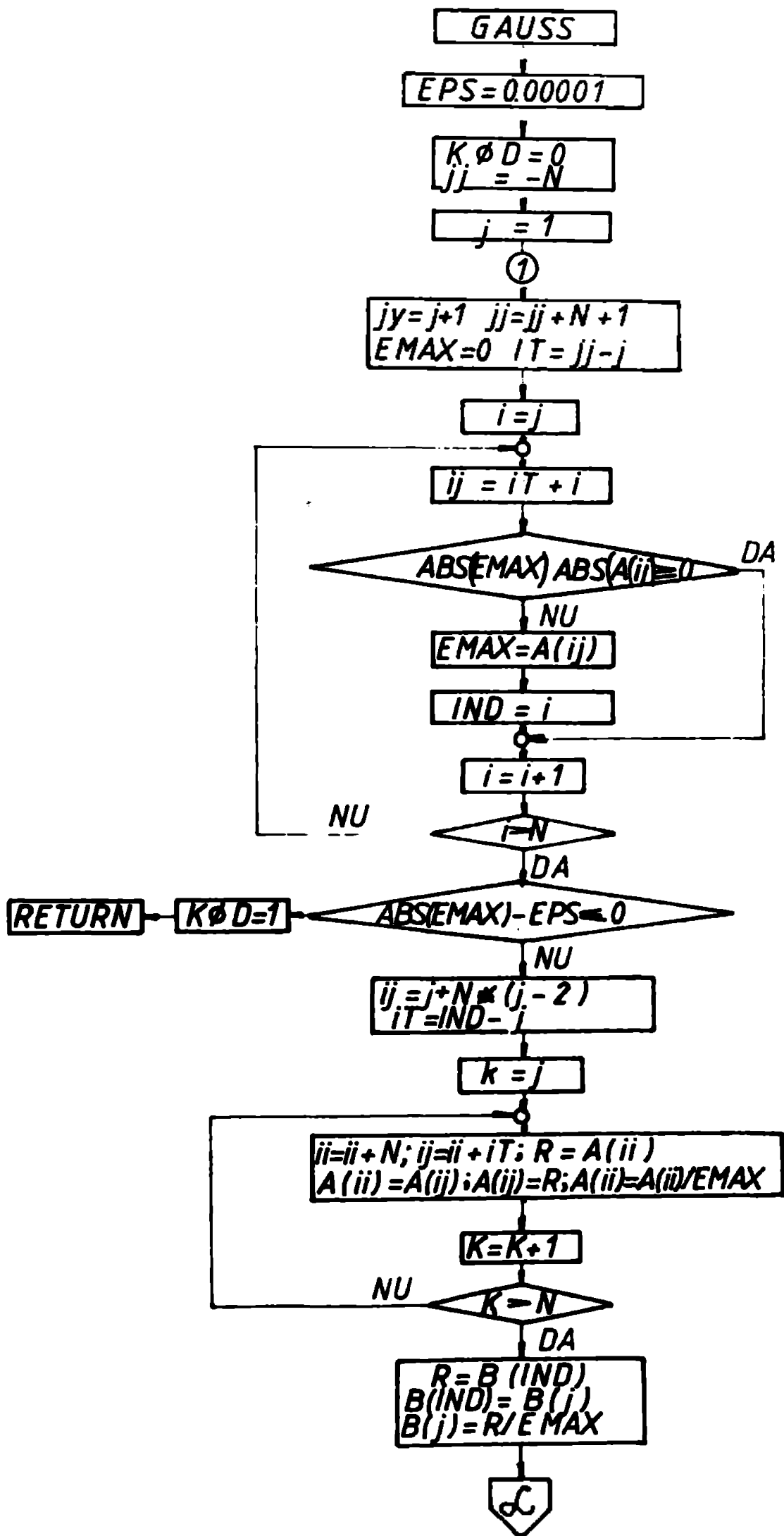


Fig. 5.3.4

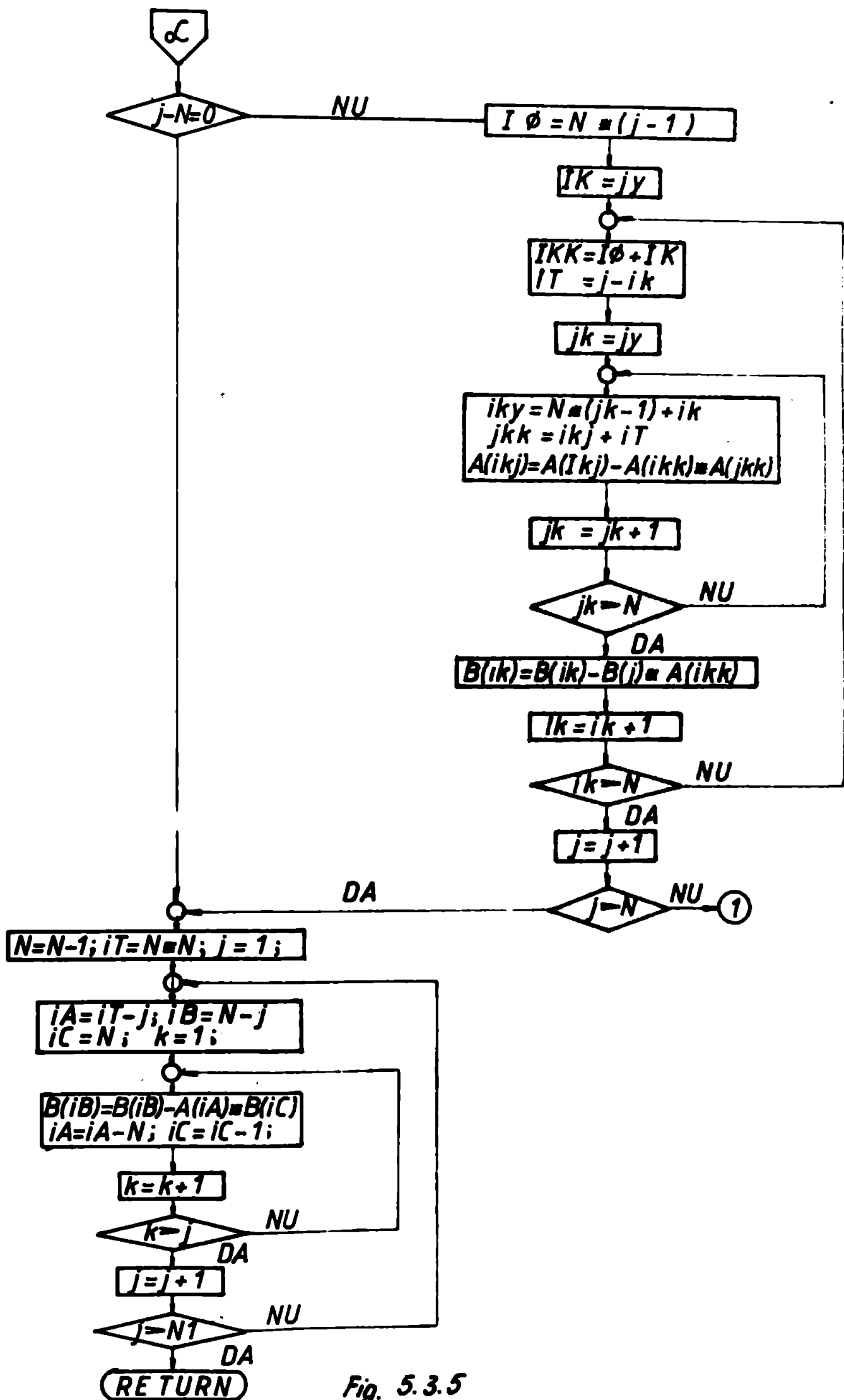


Fig. 5.3.5

După rezolvarea sistemelor și determinarea constantelor a_1 , b_1 , c_1 și d_1 , rezultă expresiile de dependență de formă :

$$R(x) = -0,000 x^2 + 2,656 x - \frac{27.627,797}{x}$$

$$R(y) = -40,003 y^2 + 131,268 y - 5,053 + \frac{0,796}{y} \quad (5.3.4)$$

$$R(z) = -2,337 z^2 + 18,152 z - 0,086 + \frac{112,055}{z}$$

$$R(u) = -47,002 u^2 + 124,502 u - 0,228 + \frac{6,291}{u}$$

Pentru verificarea expresiilor astfel determinate

(5.3.9) s-au calculat valorile rezultatelor R_x , R_y , R_z și R_u și s-au comparat cu datele respective, determinate pe cale experimentală (tabelul 5.3.1); reprezentarea grafică a acestora se prezintă în figurile 5.3.6... 5.3.9.

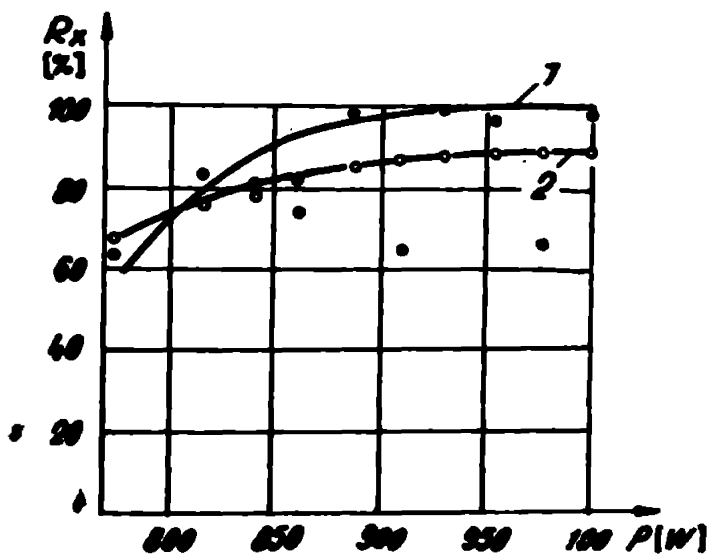


Fig.5.3.6. Influența puterii P asupra calității îmbinărilor sudate exprimate prin funcția R
1 - date experimentale
2 - determinat cu rel.(5.3.9)

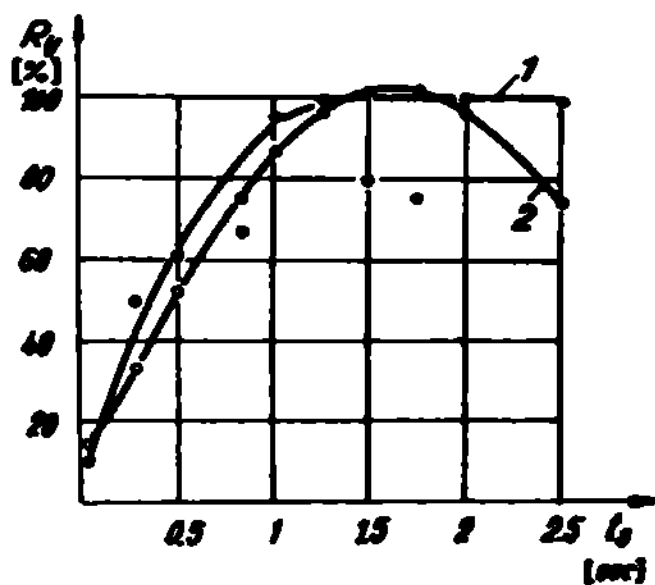
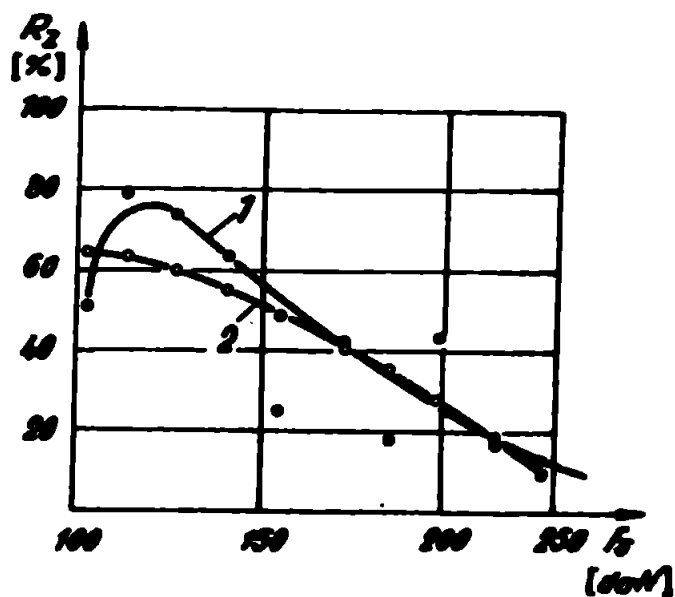


Fig.5.3.7. Influența timpului de secționare a undelor ultrasonore v_s asupra calității îmbinărilor sudate exprimate prin funcția R
 1 - date experimentale
 2 - determinat cu rel.(5.3.9)



5.3.8 - Influența forței statice de apăsare asupra calității îmbinărilor sudate exprimate prin funcția R
 1 - date experimentale
 2 - determinat cu rel. 5.3.9

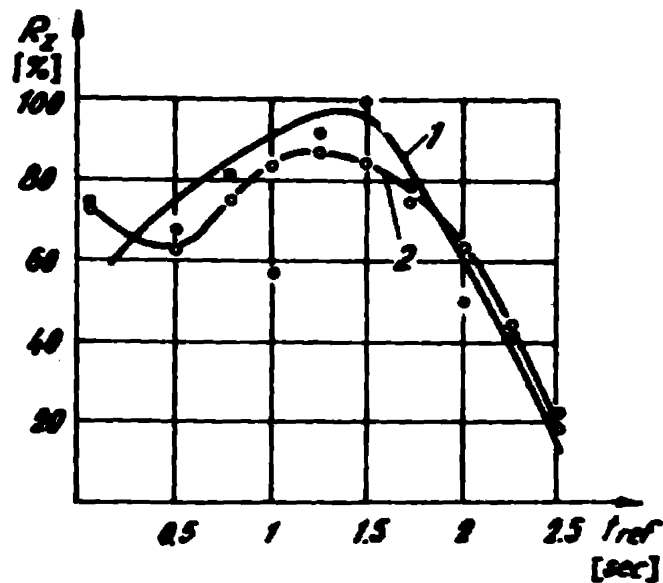


Fig.5.3.9. Influența timpului de referință t_{ref} asupra calității îmbinărilor sudate exprimate prin funcția R
 1 - date experimentale
 2 - determinat cu relația 5.3.9

În figurile 5.3.6 ... 5.3.9, reținem că expresia analitică a curbelor de dependență de forma :

$$R = ax^2 + bx + c + \frac{d}{x}$$

descriu suficient de bine fenomenul studiat. Erorile curbelor de dependență stabilite prin relațiile de legătură de forma (5.3.9), față de curbele de dependență trasate pe baza rezultatelor experimentale s-au determinat conform expresiei :

$$E_x = x_c - x_c$$

$$E_y = y_c - y_c \quad (5.3.10)$$

$$E_z = z_c - z_c$$

$$E_u = u_c - u_c$$

Valoarea medie a acestora este relativ mică, în jur de 10%, ceea ce confirmă ipoteza că relațiile de dependență

No	u ₁		u ₂		u ₃		u ₄		u ₅			
	calc.	exp.	calc.	exp.	calc.	exp.	calc.	exp.	calc.	exp.		
1	33,2	-10,7	15,5	+5,4	29,5	-1,5	60,8	+15,3	0,10	74,1	74,0	0,5
2	53,6	+20,9	33,3	-16,6	113	78,9	63,1	-15,8	0,50	68,0	62,8	-5,2
3	89,5	-8,5	52,1	-9,1	127	74,1	59,1	-15,0	0,75	82,6	75,0	-7,6
4	97,9	-12,1	75,3	+8,4	141	63,9	54,6	-9,3	1	57,0	83,5	26,5
5	95,8	+22,2	36,9	-3,2	155	25,3	49,4	+24,1	1,25	92,6	86,9	-5,7
6	95,1	-14,4	97,1	-2,9	169	42,4	43,3	+0,9	1,50	100	84,9	-15,1
7	82,8	+8,9	102,0	+22	184	18,0	36,4	18,4	1,75	79,2	77,3	-1,9
8	79,9	-1,6	102,0	+27,9	198	43,8	28,4	-15,4	2	50,7	63,5	13,2
9	83,9	-7,4	97,8	-2,2	212	19,1	19,5	0,4	2,25	46	44,7	-1,3
10	97,7	+9,6	73,4	-26,6	226	13,3	9,5	-3,8	2,50	23,2	19,7	-3,5

propuse deoarece suficient de mare fenomenul fizic. Se constata o eroare de valoarea mare de
 catoreci erorilor apărute la determinările experimentale.

Exprimările aditive ale erorilor de dependență dintre funcții calculate la o salinritilor
 sudate și la presiune în esap. Se constata că parametri tehnologici ai procesului de sudare, per-
 tinenți la erorile de sudare, influențează erorile optime. Tehnologia extrinsecă trebuie să fie

matematice a funcțiilor de legătură, dependența, permit să luăm la caz, efectuarea calculului de optimizare a funcțiilor de legătură.

Capitolul 6

CONSIDERAȚIUNI FINALE ȘI CONTRIBUTII ORIGINALE

Procedura de sudare prin presiune în câmp ultrasonor, se caracterizează prin specificitatea particularităților și condițiilor specifice de realizare a îmbinărilor sudate - un procedeu necovent în tehnica de sudare cu largi domenii de utilizare, în special în tehnica electrotehnică, electronică și microelectronică. Acest procedeu asigură o calitate corespunzătoare îmbinărilor sudate, superioară metodei clasice de sudare electrică prin puncte, oferind în același timp posibilitatea realizării îmbinărilor sudate între materiale incompatibile a se suda prin metodele clasice sau prin alte procedee de sudare.

Prezenta lucrare cuprinde sinteza rezultatelor cercetărilor teoretice și experimentale întreprinse de autor, pe o perioadă de mai bine de zece ani, în domeniul utilizării vibrațiilor ultrasonore în tehnica sudării și în special, asupra procedurii de sudare prin presiune în câmp ultrasonor.

În cele expuse în cadrul prezentei lucrări, se evidențiază următoarele considerațiuni finale asupra procedurii de sudare prin presiune în câmp ultrasonor - în general - și asupra proceselor ce au loc la sudarea prin presiune în câmp ultrasonor a tablelor de aluminiu - în special - și asupra următoarelor:

a) Suprapunerea oscilațiilor ultrasonore în procedeu de sudare prin presiune la rece, peste presiunea specifică de activare aplicată componentelor, conduce la o activare a proceselor ce contribuie la realizarea îmbinărilor sudate.

b) Din analiza modului în care oscilațiile ultrasonore sînt transmise unei îmbinări sudate, deci timpul acestora - longitudinale sau transversale - contribuie la activarea proceselor de realizare a îmbinărilor sudate. În cazul sudării prin presiune a tablelor metalice se recomandă utilizarea oscilațiilor transversale.

c) Pentru obținerea amplitudinilor mari ale sonotroanelor în procesul de sudare, din studiul asupra regimului rezonatoriu al vibrației acestuia și a vibrațiilor subarmoni-

ce ale sonotrodului, se recomandă utilizarea generatoarelor de impulsuri, care se caracterizează prin regimuri tranzitorii avantajoase, amplitudinilor mari și prin forme de undă favorabile apariției subarmonicilor, a căror amplitudini sînt mai mari decît ale vibrațiilor fundamentale.

d) Vibrațiile de frecvențe ultrasonore transmise prin intermediul sonotrodului materialelor celor două componente în zona îmbinării sudate, generează datorită stării complexe de tensiune acustică și a deformațiilor elasto-plastice un complex de fenomene, care își găsesc explicație îndeosebi pe baza teoriei dislocațiilor și a frecării interne.

e) Fenomenul de înmuiere acustică a materialelor metalice aflate sub acțiunea unui cîmp de unde ultrasonore se manifestă prin reducerea tensiunii statice necesare deformării plastice a metalului, fapt ce își găsește explicația prin observația că undele ultrasonore sînt absorbite preferențial pe limitele dintre grăunții cristalini, pe dislocațiile și vacanțele existente în structura metalică.

f) Amortizarea oscilațiilor ultrasonore a cărei principale mecanisme se consideră a fi asociate cu fenomenele de activare, formare și migrare a dislocațiilor în rețeaua cristalină, transformarea energiei termelastice la defectele rețelei cristaline, fenomenele de relaxare, rezonanță și histerezis.

g) Existența unui maxim al frecării interne în jurul temperaturii de (0,3...0,5) din temperatura de topire, fapt ce este explicat prin compactarea ovasiviscosă a zonelor marginale ale grăunților cristalini și mecanismului de generare a defectelor punctiforme în masa metalică de către dislocațiile de suprafață.

h) Accelerarea fenomenelor de difuzie și autodifuzie, datorate deplasării atomilor în rețeaua cristalină ca rezultat al deplasării vacanțelor, a difuziei atomilor la limita dintre grăunți și pe dislocațiile marginale.

i) Activarea mecanismului de difuzie prin efect Kirshenbaum (sau efecte prin vacanțe), datorită fenomenului de frecare internă, ce apare ca urmare a existenței în zona de difuzie a vibrațiilor ultrasonore.

j) Pulverizarea materialului aflat în stare lichidă

sau ovalizată din sens de contact între componentele de sudat, dimensiunile particulelor rezultate fiind în principal funcție de parametri acustici și vibrațiilor ultrasunete și funcție de proprietățile fizice ale materialelor componentelor.

k) Fragmentarea particulelor astfel formate în "n" particule de dimensiuni mai mici, în cazul în care pulsația proprie de deformare elastică sub acțiunea tensiunilor de tracțiune - compresivă a acestora intră în rezonanță cu variația cîmpului ultrasonic.

l) Activarea procesului de cristalizare prin reducerea valorii medii a gradientilor, micșorarea proceselor de lichevare, degazarea mai accentuată a metalului lichid, care conduce la o structură mai omogenă și de granulație fină.

m) Prezentarea succesiunii fazelor prin care trece materialul celor două componente în timpul realizării unei încălziri sudate cu interpretarea tuturor fenomenelor ce corelate concurează la realizarea acestuia.

n) Evidențierea rolului pe care-l joacă fenomenul de frecare uscată între componentele de sudat în mecanismul de formare a încălzirii sudate, relevându-se că acesta reprezintă sursa termică principală a procesului.

o) Existența pe suprafețele celor două componente, în prima fază a realizării încălzirii sudate a unor zone deformate plastic cu un evident caracter de turbulență ce apare datorită stării complete de tensiune, a existenței fenomenului de frecare uscată și deformații plastice și a unei variații a cinematicii de alunecare, care conduce la o variație periodică a curburii suprafețelor aflate în contact.

p) Apariția fenomenului de aglomerație a impurităților și oxizilor, aflate pe suprafața componentelor, în microvolume pe suprafața de separație.

r) Considerind fenomenul de frecare uscată ca fiind principala sursă termică a procesului de sudare, prezentarea a două metode originale de determinare analitică a temperaturii în zona de contact între cele două componente.

e) Formarea și distrugerea succesivă a unor punți

de legătură "sudate" între cele două componente de sudat, pînă în faza în care materialul straturilor superioare ale acestora se află într-o fază lichidă sau quasilichidă.

t) Evidențierea unor structuri caracteristice de distribuție marginale în straturile superficiale ale celor două componente în zona îmbinării sudate.

u) Determinarea existenței fenomenului de difuzie și transfer de masă în procesul de sudare prin presiune în câmp ultrasonor.

v) Stabilirea modului în care principalii parametri tehnologici ai procesului de sudare influențează fenomenele ce concurează la realizarea îmbinărilor sudate și implicit asupra calității acestora.

w) Evidențierea existenței unei faze lichide sau quasilichide, în zona îmbinării sudate, pe baza unui studiu de morfologie sub microscopie, în funcție de diferite valori ale parametrilor tehnologici principali ai regimurilor de sudare.

x) Stabilirea pe baza studiului indicatorilor statistic-matematici a modului repartiției datelor experimentale, care urmează o distribuție normală și elaborarea unui program de calcul în limbaj FORTRAN pentru determinarea acestora.

y) Determinarea, pe baza metodei statistice ale celor două metode simple, ponderei influenței fiecărui parametru tehnologic principal asupra funcției calitate a îmbinării sudate.

z) Determinarea funcțiilor analitice empirice ce leagă între funcția calitate a îmbinărilor sudate și parametri tehnologici principali și stabilirea unui program de calcul în limbaj FORTRAN pentru determinarea acestora.

Sunt considerate finale și concluziile prezentate în această lucrare ca rezultat din puținele cunoștințe prezentate în această lucrare, în dispoziție de literatură de specialitate și în funcție de rezultatele din cercetările teoretice și experimentale efectuate în viitor.

Prin conținutul prezentei teze de doctorat, se consideră că s-a adus o modestă contribuție la elucidarea mecanismului sudării prin presiune în câmp ultrasonor a tablelor

de aluminiu în special și a foililor metalice în general, la realizarea unor originale metode de cercetare fundamentală, teoretică și experimentală, precum și contribuții la optimizarea tehnologiilor de sodare prin presiune în câmp ultrasunor.

BI BUCURĂRI

1. Cozîi, C. ș.a. : Dislocațiile și frecarea internă a metalelor
Ed.Facul. Timișoara, 1974
2. Alinșider, G.B. : Nakotivie i veprosi ultrazvukovoi svarti
Svaroence proizvodstov Nr.12, 1973
3. Alinșider, G.B., ș.a. : Zur Frage der Mechanismus der Verbindungsbildung beim Ultraschallschweißen
Svaroence proizvodstov Nr.33, 1972
4. Alinșider, G.B. : Stadiul actual al prelucrării prin deformație plastică în câmpul ultrasunetelor
I.P.B. 1975
5. Alinșider, N. : Contribuții privind tragera de materiale în câmpul ultrasonice
I.P.B. teză de doctorat, 1975
6. Avramov, C.V. : Kristalizatia metellov v ultrazvukovom pole
Moscova, 1972
7. Avramov, C.V. : Topituri metalice
Ed.tehnică București, 1982
8. Avramov, C.V. : Ultrasonics in fizică și tehnică
Ed.tehnică, 1967
9. Avramov, C.V. : Verbindungsbildung beim Ultraschallschweißen
Schweisstechnik, Nr.1, 1969
10. Avramov, C.V. : Einfluss der Schweißdaten auf die Verbindungsbildung von Metallen
Schweisstechnik, 2/1969
11. Avramov, C.V. : Ultraschallschweißen von Aluminium
Schweisstechnik, 7/1978
12. Avramov, C.V. : Dehnung von Zink-Kristallen unter Ultraschallwirkung
Die Naturwissenschaften, 42/1969
13. Avramov, C.V. : Defectoscopia ultrasonică fizică și tehnică
Ed.tehnică, București, 1980
14. Bolcu, N. : Contactul elastic linear
Ed.Academiei RSR, 1977
15. Buzdugan, Gh. : Rezistența materialelor
Ed.tehnică, București, 1974
16. Buzdugan, Gh. ș.a. : Vibrațiile sistemelor mecanice
Ed.Academiei RSR, 1974

17. Casimirovici, F. ș.a. : Tehnologia deformării plastice
F.I.P. București, 1981
18. Cătuneanu, V.M. : Teoria fiabilității și controlul
statistic
I.F.S. 1973
19. Colan, H. : Studiul metalelor
Ed.I.P.C-N, 1977
20. Cormonov, T.X. : Кристаллизация металлов и сплавов
в ультразвуковом поле
Наука Алма-Ата, 1980
21. Costache, N. ș.a. : FOMIX III
Ed. Tehnica, 1971
22. Daniels, N. ș.a. : Vorrichtungen zum Ultraschall-
schweißen
Philips, 1969
23. Dino, P. : FOMIX IV
Ed. did. ped. (IIP) București, 1971
24. Dobrescu, L. : Fenomene de suprafață la metale
și aliaje
Ed. Academiei RSR, 1970
25. Domșa, A. ș.a. : Materiale metalice în construcția
de mașini
Ed. Lucra Cluj, 1981 (partea I)
26. Domșa, A. ș.a. : Materiale metalice în construcția
de mașini
Ed. Lucra Cluj, 1981 (partea II)
27. Donskoi, A.V. ș.a. : Ультразвуковые электротехноло-
гические установки
Ленинград, 1968
28. Drăgan, O. ș.a. : Ultrasonetele de mare energie
Ed. Academiei RSR, 1985
29. Drăgan, I. ș.a. : Tehnologia deformării plastice
F.I.P. București, 1975
30. Drews, P. : Beitrag zur Ultraschallpunkt-
schweißen von Metallen
Text de doctorat, Aachen, 1966
31. Drews, P. : Untersuchungen zur Ultraschall-
schweißen von Metallen
Schweißen und Schneiden Bd.22,
1970
32. Driner, D. ș.a. : Cercetări privind aplicarea sis-
temelor oscilante complexe cu os-
cilații de încovoiere la sudarea
cu ultrasunete a metalelor
Bul. IIB, Tom XXXIX, 1977
33. Driner, D. ș.a. : Cercetări privind aplicarea ul-
trasunetelor și efectele lor a-
suprastratului superficial al
pieselor prelucrate prin defor-
mare plastică în câmp ultrasonor
Bos. Acad. RSR, 1976

-, I. ș.a. : Utilizarea ultrasunetelor în prelucrarea materialelor
Ed. ICPTCH, București, 1975
-, Fr. ș.a. : Contribuții la sudarea prin puncte cu ultrasunete a tablelor
Bul. I.P.B. Tom XXIX, 1977
-, Fr. : Contribuții la studiul sudurii prin puncte cu ultrasunete a tablelor din Al
Bul. I.P.B., 1979
- 37. Kunttrache, Fl. : Cercetări privind sudarea cu ultrasunete a contactelor electrice
-, G. : Soudage par ultrasons
La Technique moderne, No. 1, 1971
-, I. : Fislokații
Ed. "Lit", 1967
-, Ș.a. : Aliaje neferoase
Ed. Tehnică, București, 1971
-, Ș.a. : Metalurgia fizică a metalurilor
Ed. Academiei RSR, 1963
- 42. Gudea, Ș.a. : Manualul în învățarea metalurgiei
- 43. Gudea, Ș.a. : Metalurgia fizică și studiul metalelor
I.P.B. București, 1979 (partea I)
-, Ș.a. : Metalurgia fizică și studiul metalelor
I.P.B., București, 1981 (partea II)
-, K. : Teoria structurii și proprietăților metalelor
A.D.P. București, 1980
-, F. Dieter, Jr. : Metalurgia mecanică
Ed. Tehnică, București, 1970
- 47. Chelvan, A.C. : Tehnologie sudurii prin rezistență de contact
Moscow, 1952
-, A. ș.a. : Physical Acoustics, Vol. 4/A, 1968
-, A.A. ș.a. : Ultrazvukovaja mikrosvarka
Energia, Moscow, 1977
-, Ș.a. : Fenomene fizice în metale feromagnetice solicitate
Ed. Academiei RSR, 1968
-, S.M. : Spravochnik po svarke tverdnia metallov, Kiev, 1981
-, Ș.a. : Beitrag zur Klärung der Rolle der Rekristallisation bei der Verbindung beim Ultraschallschweißen
Schweißtechnik, Nr. 12, 1975
- 53. Hart, R.A. : "Acta Metall" nr. 2, 1957

48. Kattel, E. ș.a. : Der Mechanismus des Ultraschallschweissen
Slaboproizvodny obozov, Nr.11, 1964
49. Iliescu, C. : Tehnologia presării la rece.
P.I.I. București, 1964
50. Ionescu, N. ș.a. : Despre analiza sudabilității metalurgice și tehnologice a aluminiului 99,5 de proveniență românească
Conf. de sudură și încercări de materiale, 1969, Timișoara
51. Ionescu, N. ș.a. : Tribologia straturilor subțiri
Ed. Asoc. R.R., București, 1974
52. Jones, J.B. ș.a. : Ultrasonic Welding
Welding Handbook, 1969
53. Jones, J.B. ș.a. : Ultrasonic Welding
Welding Journal, Nr.5, 1966
54. Jones, J.B. ș.a. : Ultrasonic welding of structural aluminum alloys
Welding Journal, Nr.3, 1958
55. Jones, J.B. : Thermal compression and ultrasonic microbonding techniques
Ultrasonics, Nr.1, 1969
56. Jones, J.B., I.L. : Sudarea metalelor și aliajelor neferoase
Ed. tehnică, București, 1966
57. Kozmi, A.V. : Ulrazvuk iz difuzia metalich (Ultrasunetul și difuzia în metale)
Metalurgia, Moscova, 1978
58. Kholopov, V.Y. : Ulrazvukovai sverka
Leningrad, 1972
59. Kholopov, V.Y. : Ulrazvukovai mikrosverka
Nauka i tehnika, Minsk, 1977
60. Kinsler, J.S. : Imperfections in Nearly Perfect Crystals
New York, 1952
61. Krasov, W.A. ș.a. : Näherungsberechnung der Temperaturverteilung beim Ultraschallschweissen von Metallischen Werkstoffen
Svarochnoe proizvodstvo Nr.5, 1968
62. Lancaster, J.R. : Metallurgy of Welding
Ed. George Allen, London, 1970
63. Langeneker, B. : Effects of Ultrasound on Deformation Characteristics of Metals
Acoustics and Ultrasonics Nr.1, 1966
64. Leibfeld, W. : Zur Entwicklungsgeschichte des Ultraschallschweissens
Bänder, Bleche, Rohre, Nr.3, 1964
65. Leibfeld, W. : Ultraschallschweissen
Fachbuchreihe Schweißtechnik Nr.36, 1964

72. Lehfeld, W. ș.a. : Anwendung des Ultraschallschweißens von Metallen und thermoplastischen Kunststoffen
Schweißen und Schneiden, Nr.9, 1966
73. Leibfried, G. : Über den Einfluss thermisch angeregter Schallwellen an die Plastische Deformation
Z.Physik, 124/1952
74. Lazărescu, I. : Alumiul
Ed.tehnică, 1978
75. Mantel, W. : Metallurgische Probleme des Schweißens von Aluminium und seine Legierungen
Rev.Aluminium, RFG,Nr.5,1968
76. Maronna, G. ș.a. : Schweiseverfahren zur Kontaktieren elektrischer Anschlüsse in der Mikroelektronik
Schweisstechnik, Nr.9, 1970
77. Maronna, G. : Schweisstechnik, Nr.4, 1965
78. Mikloși, C. Teocorescu, C.G. : Procede industriale de sudură
Ed.IEK, București, 1936
79. Miheș, Gh. ș.a. : Tratat de statistică matematică, vol.1, 2, 3
Ed.Acad.RSR, 1977
80. Nanu, A. ș.a. : Tehnologia construcțiilor de mașini
Ed. Tehnică, București, 1972
81. Nanu, A. : Tehnologia materialelor
E.D.P. București, 1983
82. Nanu, S. ș.a. : Unele considerații teoretice privind prelucrarea prin eroziune electrică cu rupere de contact
CNSTN IV, Timișoara, 1983
83. Nanu, S. : Considerații teoretice privind stabilirea parametrilor la sudarea materialelor metalice prin presiune în câmp ultrasonor
CNTN IV, Timișoara, 1983
84. Nanu, S. ș.a. : Contribuții la calculul câmpului termic la sudarea prin presiune în câmp ultrasonor
CNTN III Sibiu, 1981
85. Nanu, S. ș.a. : Prelucrarea materialelor metalice cu unde ultrasonore
Manualul inginerului mecanic, Ed.tehnică, 1972

26. Neumann, A. ș.a. : Grundlagen der Schweisstechnik
Vol.1-6, Berlin, 1981
27. Rica, A. ș.a. : Mecanica materialelor pentru construcții
aerospațiale
Ed. Academiei RSR, 1978
28. Nicolae, V. : Tehnologii materialelor
Ed. I.T.C.-II, 1978
29. Nicolaev ș.a. : Advanced welding processes
"Mir" Moscova, 1977
30. Oleński, N.A. ș.a. : Sudarea prin puncte prin ultrasunete
a aliajelor de aluminiu
INIL, 1972
31. Opres, Fl. ș.a. : Teoria proceselor metalurgice
E.L.P. București, 1978
32. Pansite, V. : Control statistic și fiabilitate
E.L.P. București, 1982
33. Pericot, I. ș.a. : Application d'un spectre discret
de temps de relaxation à l'analyse
des mesures du frottement
intérieur des métaux
Métaux-Corrosions-Industrie
Nr.45/192
34. Ravelescu, B. : Tribologie
E.L.P. București, 1977
35. Ravelescu, L. : Concepții noi, calcul și aplicații
în frecarea și uzura solidelor
deformabile
Ed. Academiei RSR, 1971
36. Paton, A.G. : Tehnologia electrocozorii
EVRKI plavnenic
MASGHIZ, Moscova, 1973
37. Paton, A. : Teoria anelasticității
Ed. Academiei RSR, 1966
38. Popescu, Ch. ș.a. : Materiale electrotehnice
E.L.P. București, 1976
39. Popovici, Vl. : Cercetări asupra sudării prin
prelune în puncte a tablelor
subțiri de aluminiu cu energie
stocată în câmp electrostatic
Teză de doctorat, Timișoara, 1968
40. Popovici, Vl. ș.a. : Automatizarea proceselor tehnologice
ale sudării
E.L.P. 1965
41. Popovici, Vl. ș.a. : Utilajele sudării electrice
E.L.P., 1968
42. Popovici, Vl. ș.a. : Considerațiuni privind structura
unor aliaje de aluminiu sudabile
Sesiune comunio. I.TVT, 1968

103. Popovici, Vl. : Sudarea cu energie immagazinată în câmp electrostatic
MEI - Curs de perfecționare în domeniul sudării, Vol.12, 1977
104. Popovici, Vl. ș.a. : Bombardamentul electronic și aplicațiile lui la topire și sudare
MEI - Curs de perfecționare în domeniul sudării, Vol.12, 1977
105. Popovici, Cl.P. : Calculatoare cu program și teorie programării
Ed. științifică București, 1972
106. Popovici, Vl. : Sudarea prin puncte a metalelor de grosime diferită cu energie immagazinată în câmp electrostatic
Conf. sudură și încercări de materiale, Timișoara, 1969
107. Popovici, Vl. ș.a. : Transfer de căldură în procesele industriale
Ed. Decis, Cluj Napoca, 1975
108. Popovici, Vl. ș.a. : Iugovska svarka alumina i ego silevov
Moskva, 1982
109. Popovici, Vl. ș.a. : Verfahren zum Ultraschallschweißen von elektrisches Anschlussverfahren
Siemens AG, 1969
110. Rău, A. ș.a. : Metalurgia oțelului
E.P.P. București, 1973
111. Rașchinșki, A.A. ș.a. : Einige Besonderheiten der Ultraschallschweißens
Automat. Svarka, Nr.21, 1966
112. Rașchinșki, A.A. ș.a. : Ultraschallgeschweißte Punkt und Nahtschweißverbindungen an Aluminiumblechen
Fachreihe Schweißtechnik, Nr.51, 1967
113. Rașchinșki, L.S. : Prelucrarea matematică a datelor experimentale
Ed. tehnică, București, 1974
114. Safta, V. : Controlul îmbinărilor și produselor sudate
Facla, 1984
115. Safta, V. : Admisibilitatea defectelor în construcții sudate
Timișoara, 1980
116. Safta, V. ș.a. : Controlul calității îmbinărilor sudate
IFTV Timișoara, 1981
117. Săgean, Tr. : Tehnologia procedeelor de sudare cu arc
Ed. tehnică, București, 1985
118. Săgean, Tr. : Statistica aplicată în cercetarea științifică, ODPT, 3, 1973

119. Salamean, Tr. : Oțeluri pentru structuri sudate
Ed. Facla, Timișoara, 1974
120. Salamean, Tr. : Fenomene fizice și metalurgice la
sudarea cu arcul electric
Ed. Academiei RSR, 1963
121. Sears, F.V. ș.a. : Fizică
E.I.P. București, 1983
122. Seeger, A. : Handbuch der Physik, vol.7
Ed. Springer, Berlin, 1955
123. Schumann, H. : Metalurgie fizică
Ed. tehnica, 1962
124. Silin ș.a. : Ultrasvukovais mikrosvarka
Moskva, 1962
125. Sonea, P. : Contribuții la teoria arcului elec-
tric de sudură tratat cu oscilații
din spectrul acustic și ultrasu-
nic, Teză doctorat, I.TVI, 1967
126. Sonea, P. ș.a. : Étude de comportement des parti-
cules de métal dans l'arc élec-
trique vibré à oscillations ultra-
sonores transversales à model hid-
rodynamique
IPP Tom XXII, Nr.2, 1967
127. Sonea, I. ș.a. : Prelucrarea unor materiale metalice
indiene cu ajutorul energiei ul-
trasonice
a IV-a Conferință de acustică
Acad. RSR, Vol.14, 1973
128. Sonea, I. ș.a. : Untersuchungen zum Schweißen von
Kupfer und Aluminium mit Glas mit
dem Ultraschallschweißverfahren
Metall, Bd.22, 1968
129. Teodorescu, P. ș.a. : Teoria elasticității și intro-
ducere în teoria solidelor defor-
mabile
Ed. Facla, 1976
130. Teodorescu, P.P. : Mecanica corpurilor linear elaste
Ed. Academiei RSR, 1972
131. Teodorescu, P. ș.a. : Proprietățile dinamice ale câmpu-
lui electromagnetic în medii om-
ogene
IPP Tom XXIX, 1967
132. Teodorescu, I. : Tratatul matematic al datelor ex-
perimentale
Ed. Academiei RSR, 1976
133. Trapezulescu, M. : Studiul metalelor
E.I.P. București, 1977

134. Tureac, I. ș.a. : Exploatarea, întreținerea și repararea mașinilor de prelucrat metale prin deformare plastică la rece
Ed. tehnică, București, 1984
135. Ursache, M. ș.a. : Proprietățile metalelor
E.D.P. București, 1982
136. Vasu, S. : Metalurgia Generală
E.D.P. București, 1975
137. Tomșan, G. : Difuzia
Ed. I.P.G-N, 1960
138. Vetter, T. : Ultraschallschwinger - Möglichkeiten und Auswirkungen einer Anwendung der Präzision in Schwingenbau Konstruktion, Nr.21, 1969
139. Vodă, V.Gh. : Controlul durabilității produselor industriale
Ed. tehnică, București, 1982
140. Vodă, Gh. : Noi metode statistice în studiul durabilității produselor
Ed. Academiei RSR, 1980
141. Onigrad, T. ș.a. : A dislocation model for grain boundary peaks in pure cubic face-centred metals
Review of Physics Applied, Nr.1, 1971
142. Schaper, C. ș.a. : The Influence of Oscillatory Energy on the stresses during Plastic Deformation
Journal of The Institute of Metals Vol.96, 1968
143. Zguri, Gh. ș.a. : Prelucrarea metalelor prin deformare la rece
Ed. tehnică, București, 1977
144. Ziemann, E. ș.a. : Metallurgie und Werkstofftechnik.
VEB Deutsche Verlag für Kunststoff-industrie
Leipzig, 1975

C U P R I N S U L

INTRODUCERE	3
Cap. 1. OSCILAȚII ULTRASONORE UTILIZATE LA ACTIVAREA PROCESELOR DE SUDARE	4
1.1. Principiul activării proceselor de sudare cu unde ultrasonore	4
1.2. Oscilații lineare (staționare) și neliniare (nestaționare)	10
1.3. Regimul tranzitoriu al vibrației sonotro- dului la oscilații longitudinale	21
1.4. Regimul tranzitoriu al vibrației sonotro- dului la oscilații transversale	27
1.5. Componentele subarmonice ale sonotrodului ...	29
Cap. 2. EXPERIMENTE CU PRIVIRE LA ACȚIUNEA UNDELOR ULTRASONORE ASUPRA MATERIALELOR METALICE	31
2.1. Considerațiuni generale	31
2.2. Efectul undelor ultrasonore asupra materia- lelor în stare solidă	34
2.2.1. Amortizarea oscilațiilor ultrasonore prin efecte termoelectrice	37
2.2.2. Amortizarea undelor ultrasonore în mate- rialele metalice, datorită fenomenelor de activare, formare și migrare a dislo- cațiilor provocate de deformarea plastică în câmp ultrasonor	39
2.3. Activarea proceselor de difuzie și trans- fer de masă	38
2.4. Efectul undelor ultrasonore asupra metale- lor în stare lichidă	42
2.4.1. Studiul teoretic al posibilității pulve- rizării unui metal lichid sau ovasili- chid sub acțiunea unor oscilații ultraso- nore transversale	43
2.4.2. Posibilitatea fragmentării particulelor de metal lichid sub acțiunea unui câmp ultrasonor	51
2.5. Influența oscilațiilor ultrasonore trans- versale asupra procesului de cristalizare a metalelor lichide	55
Cap. 3. MECANISMUL SUDĂRII PRIN PRESIUNE ÎN CÂMP ULTRASONOR A TABLELOR DIN ALUMINIU	63
3.1. Stadiul actual al cunoștințelor despre su- darea prin presiune în câmp ultrasonor ...	63
3.1.1. Influența parametrilor acustici asupra ca- rității îmbinărilor sudate prin presiune în câmp ultrasonor	72

	pag.
3.1.2. Influența parametrilor tehnologici asupra calității îmbinărilor sudate prin presiune în câmp ultrasonor	81
3.2. Contribuții la elucidarea mecanismului de sudare prin presiune în câmp ultrasonor a tablelor de aluminiu	90
Cap.4. CERCETARI EXPERIMENTALE PRIVIND SUDAREA PRIN PRESIUNE IN CIMP ULTRASONOR A TABLELOR DIN ALUMINIU	131
4.1. Considerații asupra proprietăților aluminului	131
4.1.1. Proprietăți fizice, mecanice și tehnologice	132
4.1.2. Proprietăți structurale	133
4.2. Considerații asupra sudabilității aluminului și aliajelor sale	139
4.3. Metode tehnologice utilizate în cercetarea experimentală	137
4.4. Rezultate experimentale	145
4.4.1. Influența parametrilor tehnologici asupra procesului de sudare prin presiune în câmp ultrasonor	149
4.4.2. Cercetări microstructurale asupra îmbinărilor sudate prin presiune în câmp ultrasonor	154
4.4.3. Cercetări ale durității sub microsarcină asupra zonei îmbinărilor sudate prin presiune în câmp ultrasonor	158
Cap.5. METODII LA OPTIMIZAREA TEHNOLOGIEI DE SUDARE PRIN PRESIUNE IN CIMP ULTRASONOR	161
5.1. Determinarea indicatorilor statistico-matematici	162
5.2. Stabilirea dependențelor corelaționale între parametri tehnologici principali ai regiunilor de sudare prin presiune în câmp ultrasonor	168
5.3. Stabilirea funcțiilor analitice de legătură pentru determinarea influenței parametrilor rezistenței de sudare asupra calității îmbinărilor sudate	187
Cap.6. CONCLUZII FINALE SI CONTRIBUTII ORIGINALE	210
ANEXA 1. GRAFIE	215