

Capitolul 90. Controlul cu ultrasunete

1. PARTICULARITĂȚI

Defectoscopia cu ultrasunete este concepută pe baza legilor de propagare, reflexie și refracție în discontinuități (defecte) a ultrasunetelor. Ultrasunetele sunt generate, emise și recepționate cu ajutorul unor traductoare piezoelectrice, semnalele reflectate din discontinuități fiind redată printr-un sistem de reprezentare de tipul amplitudine - distanță (timp), mai frecvent folosit.

Fenomenul piezoelectric a fost descoperit la cristale de cuarț de către Jaques și Pierre Curie în anul 1882. Actualele tehnici ale defectoscopiei cu impulsuri de ultrasunete s-au dezvoltat începând din anul 1950.

Controlul cu ultrasunete pune în evidență mai toate tipurile de discontinuități volumice și plane, metoda de control având însă și aplicații mai largi pentru măsurări de grosimi, determinări de constante elastice ale materialelor, etc. Se poate aplica la o gamă largă de materiale, limitările în cazul metalelor fiind determinate de mărimea granulației structurale. Având o penetrabilitate (transparentă) deosebită, ultrasunetele permit examinarea secțiunilor de grosimi mari și foarte mari, distanțele parcurse în piese laminate sau forjate din oțel ajungând până la 5- 10 m. Aparatele fiind ușoare, portabile și autonome, metoda poate fi aplicată cu rezultate deosebite la produse și instalații complexe, precum și în condiții de șantier.

Tehnologiile de control se pretează la mecanizare și automatizare, iar funcțiile aparaturii, la conducere cu microprocesoare și cu calculatorul.

Rezultatul controlului este imediat, pentru că se operează în timp real. Se identifică cu bună precizie coordonatele și mărimea discontinuității. Sensibilitatea metodei este la nivelul de 0,5 mm pentru defecte volumice, respectiv la nivele superioare pentru fisuri fine, care în general sunt dificil de detectat prin metode radiografice.

Probabilitatea de detectare a discontinuităților cu excepția suflurilor și a cavităților, crește odată cu grosimea, iar de la grosimi de 20÷ 30 mm în sus este superioară defectoscopiei cu radiații.

Operațiile de control și de interpretare a rezultatelor fiind mai complexe decât la celelalte metode de examinare nedistructivă, se reclamă personal de înaltă calificare, competență și conștiinciozitate profesională.

Din punct de vedere economic, controlul cu ultrasunete este mai ieftin decât controlul cu radiații penetrante.

Tehnicile moderne bazate pe reprezentarea în două planuri și/sau pe reprezentarea spațială, oferă o productivitate și un nivel interpretativ superior.

2. OSCILAȚII ȘI UNDE

2.1. Tipuri de oscilații și unde

Dacă se consideră mișcarea circulară a unui punct material M din figura 1, cu viteza unghiulară ω constantă, elongația mișcării este dată de expresia:

$$y = r \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi_0) \quad (1)$$

unde r este raza traiectoriei, ($\varphi = \omega t$ este faza mișcării, iar φ_0 faza inițială. Dacă se are în vedere o oscilație completă, realizată într-o perioadă T ,

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (2)$$

f este frecvența, unitatea de măsură a acesteia fiind Hertzul, $1 \text{ Hz} = 1 \text{ osc/sec}$.

Oscilațiile sunt de mai multe feluri. Cele produse fără acțiuni exterioare (impulsuri) într-un mediu fără frecare, se numesc oscilații libere. Oscilațiile produse de acțiuni exterioare poartă denumirea de oscilații forțate sau întreținute. Oscilațiile libere într-un mediu cu frecare sunt amortizate după relația:

$$\sigma(t) = \sigma \cdot e^{-at} \cdot \cos bt \quad (3)$$

unde a reprezintă decrementul amplitudinii.

Dacă sistemul oscilant este format dintr-o mulțime de particule materiale legate între ele prin forțe elastice, atunci oscilația fiecărei particule se transmite celorlalte particule din aproape în aproape sub formă de unde elastice. Însușirile unei unde elastice depind esențial de frecvență.

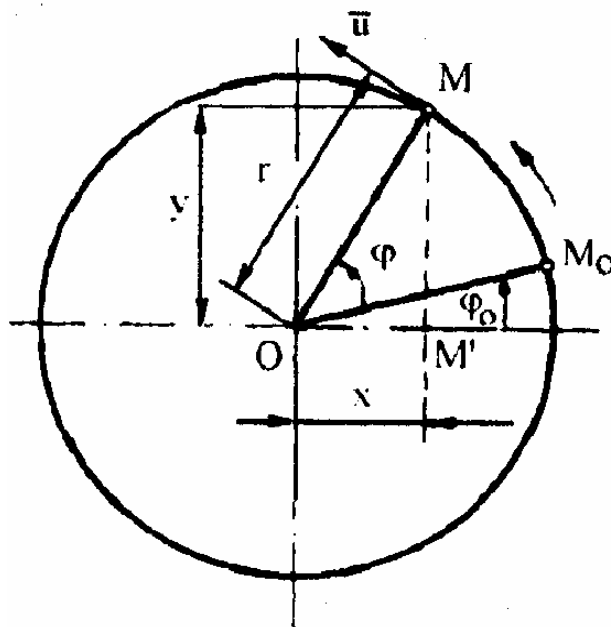


Fig. 1. Parametrii mișcării circulare

Undele elastice de joasă frecvență, $f=0 - 16 \text{ Hz}$, care nu se percep, se mai numesc și infrasunete. Cele cu frecvență cuprinsă în limitele $f= 16 - 16000 \text{ Hz}$, percepute de om, poartă numele de sunete. Undele de înaltă frecvență, $f= 16 \text{ kHz} \div 10^4 \text{ MHz}$, se numesc ultrasunete. Ultrasunetele posedă remarcabile însușiri de interacțiune cu materia, inclusiv de propagare în lichide și în solide, ceea ce le conferă un câmp larg de aplicații active și/sau pasive, cum sunt cele de defectoscopie nedistructivă. Undele de foarte înaltă frecvență $f=10^4 - 10^8 \text{ MHz}$, poartă numele de hipersunete. Hipersunetele prezintă un coeficient ridicat de atenuare, motiv pentru care nu se utilizează în defectoscopie.

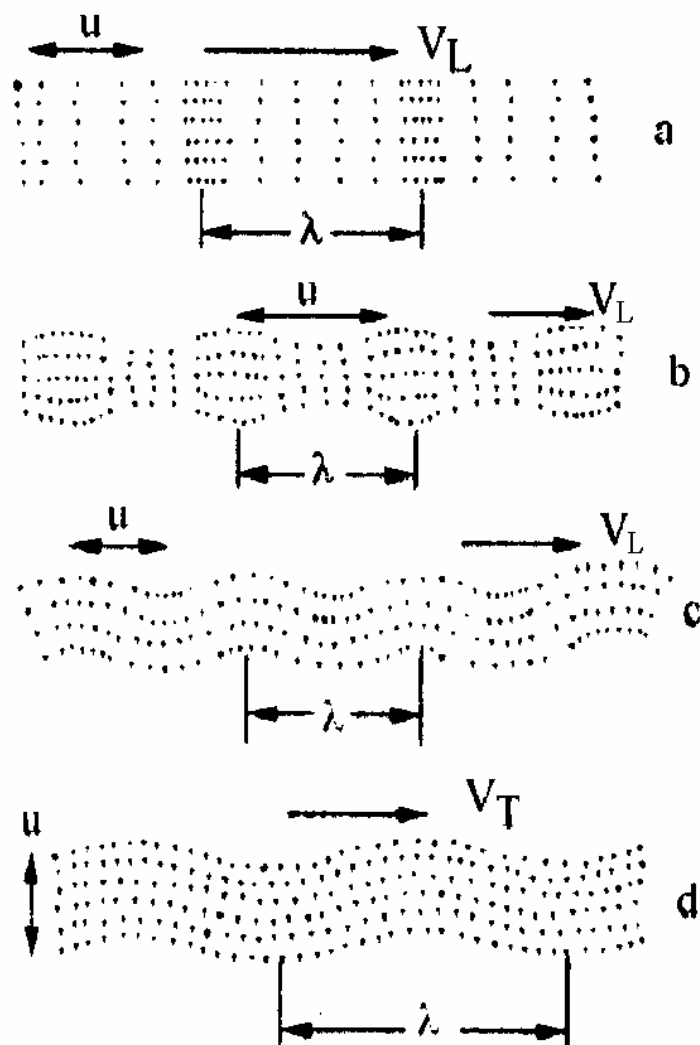


Fig. 2. Tipuri de unde: a) longitudinale propriu zise; b) de dilatare; c) de încovoiere; d) transversale

În mediile lichide și gazoase iau naștere numai unde longitudinale (de compresiune). Formarea lor poate fi modelată prin aproximarea oscilației particulelor mediului cu oscilația unor pendule elementare aflate în contact elastic.

Undele longitudinale, dau naștere în solide la comprimări și dilatări succesive (tensiuni alternative de compresiune și de întindere), provocând variații de volum. Direcția de oscilație a particulelor (impulsuri) coincide cu direcția de propagare a undei, figura 2 a. Dacă dimensiunile transversale ale corpului prin care se propagă longitudinal undele elastice sunt mici în comparație cu lungimea de undă (plăci, tuburi), se formează unde simetrice de dilatare, cu variația periodică a grosimii după modelul din figura 2 b. Totodată, în solide pot lua naștere și unde de încovoiere sau unde Lamb, după cum este ilustrat în figura 2 c. Condițiile lor de propagare depind de raportul dintre dimensiunea transversală a plăcii (țevii) și lungimea de undă a ultrasunetelor. În solide se pot forma de asemenea unde transversale sau de alunecare, la care direcția de oscilație a particulelor mediului (direcția impulsului) este perpendiculară pe direcția de propagare a undei, figura 2 d. Formarea undelor transversale nu este posibilă decât în mediile care pot prelua tensiuni de forfecare, deci în mediile care posedă o anumită rigiditate transversală (modulul de elasticitate transversală $G \neq 0$). Ele nu produc variații de volum.

În sfârșit, se mai cunosc și unde de suprafață sau unde Rayleigh, modelate prin mișcarea provocată de aruncarea unei pietre în apă. Traiectoriile acestor unde sunt circulare, iar adâncimea de pătrundere în medii solide este de numai câțiva milimetri.

2.2. Teoria propagării undelor

Studierea mișcării particulelor materiale în cazul micilor deplasări, mișcări specifice oscilațiilor elastice, are la bază ecuația de mișcare Cauchy, scrisă pentru cazul în care forțele volumice exterioare sunt de tip inerțial:

$$\sigma_{ij,j} - \rho \cdot u_i = 0 \quad (i=1, 2, 3) \quad (4)$$

Tensorul tensiunilor poate fi determinat pe baza legii generalizate a lui Hooke la corpurile elastice și izotrope și explicitat în deplasări, obținându-se ecuațiile dinamice vectoriale ale lui Lamé:

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} = G \nabla^2 \bar{u} + (\lambda + G) \nabla (\nabla \cdot \bar{u}) \quad (5)$$

unde G și A sunt constantele lui Lamé:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (6)$$

fiind modulul de forfecare, E- modulul de elasticitate longitudinală, μ - constanta lui Poisson, iar

$$\lambda = \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \quad (7)$$

Pentru rezolvarea ecuației (5) se consideră vectorul deplasare compus din doi vectori:

$$\bar{u} = \bar{u}_1 + \bar{u}_2 \quad (8)$$

aleși astfel încât divergența unuia respectiv rotorul celuilalt să fie zero:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \bar{u}_1 &= 0 \\ \nabla \times \bar{u}_2 &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Înlocuind în relația (5) pe \bar{u} cu $\bar{u}_1 + \bar{u}_2$ se obține:

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\bar{u}_1 + \bar{u}_2) = G \nabla^2 (\bar{u}_1 + \bar{u}_2) + (\lambda + G) \nabla \cdot (\nabla \bar{u}_2) \quad (10)$$

Considerând divergența relației (10) se ajunge la:

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\nabla \cdot \bar{u}_2) = G \nabla \cdot \nabla^2 \bar{u}_2 + (\lambda + G) \nabla \cdot (\nabla \bar{u}_2) \quad (11)$$

De unde, prin schimbarea operatorilor:

$$\nabla \left[\rho \frac{\partial^2 \bar{u}_2}{\partial t^2} - (\lambda + 2G) \nabla^2 \bar{u}_2 \right] = 0 \quad (12)$$

Din relația (12) rezultă ecuația vectorială a undelor longitudinale:

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{u}_2}{\partial t^2} = (\lambda + G) \nabla^2 \bar{u}_2 \quad (13)$$

care se propagă pe direcția oscilației \bar{u} cu viteza:

$$v_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (14)$$

Considerând rotorul relației (10) se obține:

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\nabla_x \bar{u}_1) = G \nabla^2 (\nabla_x \bar{u}_1) + (\lambda + G) \nabla^2 \cdot (\nabla_x \bar{u}_2) \quad (15)$$

Cum $\nabla_x \bar{u}_2 = 0$, relația poate fi adusă la forma:

$$\nabla_x \left[\rho \frac{\partial^2 \bar{u}_1}{\partial t^2} - G \nabla^2 \bar{u}_1 \right] = 0 \quad (16)$$

relație ce reprezintă ecuația vectorială a undelor transversale sau de forfecare:

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{u}_1}{\partial t^2} = G \cdot \nabla^2 \bar{u}_1 \quad (17)$$

care se propagă perpendicular pe direcția de oscilație a cu viteza transversală:

$$v_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\mu)}} \quad (18)$$

2.3. Mărimi fizice caracteristice:

Formarea și propagarea oscilațiilor are loc pe baza legăturilor elastice dintre particulele (moleculele) mediului. Dacă se consideră ecuația monodirecțională a unei de amplitudine y , care se propagă cu viteza v pe direcția x , se poate scrie:

$$y = r \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad (19)$$

x/v fiind timpul necesar ca unda să parcurgă distanța x cu viteza v . Derivatele în raport cu timpul ale relației (19) vor fi:

- viteza de oscilație a particulei:

$$\frac{dy}{dt} = u = \omega r \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad (20)$$

- accelerația oscilației particulei:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{du}{dt} = a = -\omega^2 r \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = -\omega^2 \cdot y \quad (21)$$

Derivatele în raport cu spațiul vor avea expresiile:

$$\frac{dy}{dx} = -r \frac{\omega}{v} \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad (22)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -r \frac{\omega^2}{v^2} \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = -\frac{\omega^2}{v^2} \cdot y \quad (23)$$

Combinând relațiile (21) și (23) se obține ecuația de propagare monodirecțională a unei:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = v^2 \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (24)$$

Prin generalizare, ecuația de propagare tridimensională poate fi pusă sub forma:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = v^2 \cdot \nabla^2 \phi \quad (24')$$

unde $\phi(x, y, z, t)$, este funcția potențial de viteză.

Dacă viteza medie de oscilație a particulelor este:

$$u_m = \omega \cdot r \cos \frac{\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2} \omega \cdot r \quad (25)$$

atunci energia cinetică a unui element de volum ΔV , din mediul elastic este dată de relația:

$$W_{cin} = \frac{1}{2} \rho u_m^2 \cdot \Delta V \quad (26)$$

iar energia potențială, în ipoteza sistemelor conservative în care pierderile prin frecare se consideră nule,

$$W_{pot} = \frac{1}{2} p d(\Delta V) = \frac{1}{2} \cdot \frac{p^2}{\rho \cdot v^2} \cdot \Delta V \quad (27)$$

Însumând energia cinetică cu cea potențială, rezultă energia totală:

$$W_{tot} = \frac{1}{2} \left(\rho u_m^2 + \frac{p^2}{\rho \cdot v^2} \right) \cdot \Delta V \quad (28)$$

relație din care rezultă expresia densității energiei acustice sau energia specifică a unității de volum

$$w = \frac{W_{tot}}{\Delta V} = \frac{1}{2} \left(\rho u^2 + \frac{p^2}{\rho \cdot v^2} \right) \quad (29)$$

Volumul în care se propagă unde determină un câmp sonor, în care producându-se un transfer de energie, se exercită o presiune sonoră p , proporțională cu viteza de oscilație a particulelor, viteza de propagare și densitatea mediului:

$$p = \rho \cdot v \cdot u = R \cdot u \quad (30)$$

Făcând o analogie între mărimile acustice și cele caracteristice câmpului electric, viteza particulelor u corespunde intensității momentane a curentului, iar variația de presiune Δp corespunde tensiunii, atunci produsul

$$\rho \cdot v = \frac{p}{u} = R \quad (31)$$

devine analog rezistenței electrice și poartă denumirea de rezistență (impedanță) acustică; unitatea de măsură a lui R este ($N/m^2 \cdot s$). În tabelul 1 sunt indicate valorile impedanței acustice specifice pentru diferite medii frecvent întâlnite.

Prin înlocuire în relația (29), densitatea energiei acustice va fi:

$$w = \frac{1}{2} \rho u^2 + \frac{1}{2} \rho u^2 = \rho u_m^2 = \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 \quad (32)$$

și se exprimă în (J/m^3).

Tabelul 1

Nr. crt.	Materialul	$\rho \times 10^{-3}$ kg/ m ³	$R \times 10^{-6}$ (kg/ m ² ·s)	K_{ad} (m ² / N)	E	G	μ_d	v_L	v_T
					(kN/mm ²)			(m/s)	
1	Aer la 20°	0,001205	0,000414	-	-	-	-	343,8	-
2	Apă la 15°	0,9982	1,44	4,47	-	-	-	1497	-
3	Apă de mare	1,025	1,52	-	-	-	-	1510	-
4	Alcool la 15°	0,81	0,95	10,0	-	-	-	1168	-
5	Petrol	0,76	0,98	7,45	-	-	-	1295	-
6	Ulei motor	0,87	1,5	12,8	-	-	-	1725	-
7	Glicerină	1,30	2,5	-	-	-	-	1920	-
8	Lemn brad	0,42	2,0	-	1,1	0,49	-	4700	-
9	Sticlă	2,51	14,40	-	57,3	22,5	0,28	5650	3430
10	Porțelan	2,40	13,44	-	69,4	29,4	0,23	5600	3500
11	Plexiglas	1,18	3,20	-	5,4	1,5	0,35	2670	1120
12	PVC	1,40	3,35	-	4,3	1,6	-	2395	1060
13	Cuarț	2,65	15,20	-	78,3	33,0	0,17	5650	3530
14	Oțel	7,85	45,60	-	213,3	83,5	0,28	5920	3250
15	Fontă 3,5% C	6,9...7,35	25...42	-	117,0	44,8	0,27	3500...5800	2200...3200
16	Aluminiu	2,71	17,50	-	71,0	26,4	0,34	6260	3080
17	Magneziu	1,70	10,0	-	41,0	15,8	-	5770	3050
18	Cupru	8,93	41,80	-	125,0	45,5	-	4660	2260
19	Alamă	8,10	35,88	-	80,0	31,0	-	4430	2120
20	Nichel	8,80	49,54	-	205,0	77,1	0,31	5630	2960
21	Titan	4,54	28,28	-	121,6	45,9	-	6230	3180
22	Wolfram	19,10	104,28	-	354,0	131,1	-	5460	2620
23	Plumb	11,34	24,60	-	16,0	5,8	0,44	2160	700

Cantitatea de energie transportată de o undă într-un timp dt , printr-un element de suprafață dS , perpendicular pe direcția de propagare a undei va fi:

$$dW = w \cdot dV = w \cdot v dt \cdot dS \quad (33)$$

Atunci fluxul de energie, adică energia care străbate elementul de suprafață dS în unitatea de timp va fi:

$$\phi = \frac{dW}{dt} = w \cdot v \cdot dS \quad (34)$$

iar densitatea fluxului de energie, adică fluxul de energie prin unitatea de arie perpendiculară pe direcția de propagare:

$$\bar{\phi} = \frac{dW}{dt \cdot dS} = w \cdot v = \rho v u^2 = \frac{(\Delta p)^2}{\rho \cdot v} \quad (35)$$

Valoarea medie a densității fluxului de energie se numește intensitatea ultrasunetului, respectiv intensitatea undei și poate fi pusă sub forma:

$$\bar{\phi}_m = I = R \cdot u_m^2 = \frac{p^2}{R} = \rho \cdot v u_m^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot v \cdot \omega^2 \cdot r^2 = 2\rho\pi^2 \cdot f^2 \cdot r^2 \cdot v \quad (36)$$

și se măsoară în (W/m²). Relațiile (35) și (36) arată că intensitatea sonoră sau ultrasonoră este proporțională cu pătratul vitezei de oscilație a particulelor sau cu pătratul presiunii.

Nivelul de intensitate sonoră a unui sunet, indiferent de frecvență, se exprimă astfel:

$$I_s = 20 \log \frac{I}{I_0} \quad (\text{dB}) \quad (37)$$

unde I_0 este intensitatea acustică de referință, admisă convențional, în cazul undelor plane $I_0=10^{-12}$ (W/m²), și se măsoară în decibeli (dB). În mod analog, nivelul de presiune sonoră, independent de frecvență se exprimă cu ajutorul relației:

$$p_s = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (\text{dB}) \quad (38)$$

unde p_0 , este presiunea acustică de referință, admisă convențional $p_0=10^{-5}$ bar. Intensitatea ultrasunetelor poate atinge valori până la cea 10^5 (W/m²), iar presiunea ultraacustică până la aproximativ 10 bari.

Făcând raportul dintre cele două viteze de propagare în oțel, la care $\mu=0,25 \div 0,3$, rezultă:

$$V_T = (0,53 \div 0,58) V_L \quad (39)$$

Caracteristicile elastice și vitezele de propagare pentru câteva materiale mai importante sunt prezentate în tabelul 1.

Viteza de propagare în lichide interesează în mod deosebit în tehnicile de control prin metoda imersării, de asemenea la cuplanții folosiți pentru asigurarea unui transfer de înalt randament a energiei acustice de la palpator (traductor) la piesa controlată. Modulul de elasticitate este înlocuit cu coeficientul de compresibilitate, astfel încât relația de definiție se prezintă sub forma:

$$v = \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot k_{ad}}} = \sqrt{\frac{\chi}{\rho \cdot k_{iz}}} \quad (40)$$

unde:

$$\chi = \frac{k_{iz}}{k_{ad}} = \frac{c_p}{c_v} \quad (41)$$

k_{iz} fiind coeficientul de compresibilitate izotermă ($T = \text{const.}$) a mediului, k_{ad} - coeficientul de compresibilitate adiabatică ($\Delta Q=0$), c_p - căldura specifică la $p=\text{const.}$, c_v - căldura specifică la $V = \text{const.}$ Vitezele de propagare în lichide sunt cuprinse în domeniul 900- 1900 m/s. Viteza de propagare a undelor de suprafață se plasează sub viteza de propagare a undelor transversale și se poate calcula cu relația lui Bergman [9]:

$$v_s = \frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} \cdot v_T \quad (42)$$

care la medii solide poate fi aproximată astfel:

$$v_s = 0,93 \sqrt{\frac{G}{\rho}} = 0,93 v_T \quad (43)$$

Prin caracteristicile elastice ale materialelor, temperatura influențează viteza de propagare a undelor ultrasonice. Aceasta scade monoton pe măsura creșterii temperaturii în intervalul 20- 80° C.

3. PRODUCEREA ȘI PROPAGAREA ULTRASUNETELOR

3.1. Efectul piezoelectric și materiale

Metodele de producere a ultrasunetelor se bazează pe efectul piezoelectric și pe efectul magnetostrictiv. Datorită simplității de transpunere, primul se folosește în exclusivitate în defectoscopie ca principală aplicație pasivă a ultrasunetelor, iar cel de-al doilea efect, datorită posibilității de obținere a unor puteri adecvate, se utilizează la prelucrarea metalelor, ca principală sursă de aplicație activă a ultrasunetelor.

Efectul piezoelectric, sau efectul Curie, constă în inducerea sarcinilor electrice de către unele cristale supuse la tensiuni de compresiune sau de întindere de către forța F_x .

$$\begin{aligned} q_x &= d_{ik} F_x \\ q_y &= -d_{ik} F_x \end{aligned} \quad (44)$$

unde F_x este forța aplicată pe direcția x ; q_x q_y sunt sarcinile electrice ce apar pe fețele cristalului cu tăietura X , respectiv cu tăietura Y ; d_{ik} este componenta pe direcția k a modulului piezoelectric când forța F acționează pe direcția i .

Fenomenul este reversibil. La rezonanță, când frecvența câmpului electric E_x coincide cu frecvența proprie de oscilație a cristalului, amplitudinea vibrațiilor ultrasonice este maximă:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= d_{ik} E_x \\ \varepsilon_y &= -d_{ik} E_x \end{aligned} \quad (45)$$

Proprietățile piezoelectrice dispar la temperaturi superioare unei anumite limite, numită punct Curie.

Materialele piezoelectrice de performanță se împart în trei categorii:

- a.- materiale ceramice, din care fac parte: titanatul de bariu ($BaTiO_3$), titanatul de plumb, zircotitanatul de plumb și metaniobat de plumb;
- b.- monocristale: cuarț, sulfat de litiu, niobat de litiu și tantalat de litiu;
- c.- materiale plastice: polivinilid fluorid.

tăiet. X-X

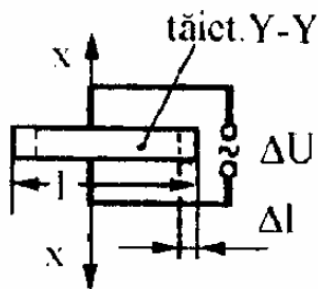
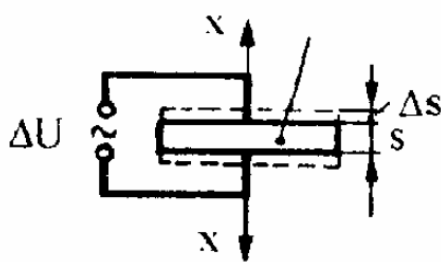


Fig. 3. Oscilațiile unui piezocristal: a) de tăietură X-X; b) de tăietură Y-Y

S-a observat la aceste cristale că deformările maxime se produc pe direcția axelor polare. Dacă din prisma hexagonală se taie o plăcuță, astfel încât fețele mari să fie perpendiculare pe axa polară X , plăcuța se numește cu tăietură în X , iar la aplicarea unui câmp electric deformările se vor produce după direcția X , determinând vibrații longitudinale, figura 3a. Dacă tăietura se realizează perpendicular pe axa Y (tăietură Y), figura 3b, vibrațiile se vor transmite perpendicular pe direcția câmpului și vor da naștere undelor transversale.

Mărimile absolute ale alungirii, respectiv scurtării piezocristalului sunt determinate de relațiile:

$$\Delta s = d_{ik} \cdot E_x \cdot s = d_{ik} \Delta U \quad (46)$$

$$\Delta l = -d_{ik} \cdot E_x \cdot l = -d_{ik} \frac{l}{s} \Delta U \quad (47)$$

fiind direct proporționale cu diferența de tensiunea aplicată pe cele două suprafețe ΔU și nu depind de dimensiunile piezocristalului.

Emiterea și recepționarea optimă, atât a undelor longitudinale, cât și a celor transversale se realizează cu ajutorul piezocristalelor cu tăietură oblică, rotită cu 45° față de axele principale.

Frecvența proprie de oscilație a plăcuței piezoelectrice se găsește din condiția de rezonanță, când în grosimea piezocristalului s (mm) trebuie să se cuprindă un număr întreg de semilungimi de undă:

$$s = n \frac{\lambda}{2} = n \frac{v}{2f_0} = \frac{n}{2f_0} \left(\frac{E}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (48)$$

relație din care rezultă că frecvența proprie este invers proporțională cu grosimea

$$f_0 = \frac{c}{s} \quad (\text{MHz}) \quad (49)$$

unde c este o constantă de material (2,6 la titanatul de bariu, 0,98 la zircotitanatul de plumb).

Calitatea materialelor piezoelectrice este definită de un complex de însușiri fizico – electro - mecanice, rezultând din tabelul 2, unde se prezintă valorile acestora pentru cele mai uzitate în construcția palpatoarelor [126]. Analiza acestor caracteristici permite adoptarea corespunzătoare, ținând seama de funcționalitățile deservite. Astfel, din punct de vedere al modulului piezoelectric, superioritatea o dețin materialele ceramice, cele mai răspândite în confecționarea palpatoarelor. Monocristalele se întrebuințează mai rar, datorită factorului mic de cuplare pentru oscilațiile transversale.

Polivinilidfluoridul se polarizează bine, principalul său avantaj fiind că foliile de grosimi de ordinul micronilor sunt încă flexibile, pretându-se astfel frecvențelor foarte înalte. Metaniobatul de plumb și sulfatul de litiu prezintă pierderi neglijabile prin unde de suprafață, ceea ce permite o bună amortizare a emisiei și scurtarea duratei acesteia. Totodată, ele se recomandă la controlul imersat. Niobatul de litiu se folosește în construcția palpatoarelor refractare, deoarece până la 650° C nu se oxidează, precum și în construcția palpatoarelor de frecvențe foarte mari.

Titanatul de bariu este cel mai utilizat material piezoelectric în construcția palpatoarelor. El se obține din oxid de titan TiO_2 în amestec cu carbonat de bariu BaCO_3 la temperaturi de 1500° C. Polarizarea cristalelor se realizează în fază lichidă prin aplicarea unui câmp electric de 210 KV/ cm.

Ca o consecință a condiției de rezonanță exprimată prin relația (49), rezultă că la grosimile minime pe care tehnica de microtomare le poate asigura astfel încât să confere și o rezistență mecanică suficientă plăcuțelor de piezocristal ($s = 0,2 \div 0,3$ mm), frecvența de lucru nu poate depăși domeniul 6÷ 15 MHz. Excepție face polivinilidfluoridul cu care se pot obține frecvențe până la 100 MHz.

Cercetări având la bază un număr foarte mare de tipuri de palpatoare [51], au arătat că emisia undelor are loc într-o bandă de frecvență destul de largă reprezentând până la $\pm 10\%$ din valoarea nominală, precum și o abatere de cca. $\pm 3\%$ a mediei spectrului față de frecvența nominală.

Tabelul 2

CARACTERISTICI	MATERIALE PIEZOELECTRICE						
	Titanat de bariu (BaTiO ₃)	Zircotitanat de bariu (PbZrTi)	Metaniobat de plumb (PbNb ₂ O ₆)	Sulfat de litiu (SO ₄ Li)	Niobat de litiu (NbLi)	Polivinilid-fluorid PVDF	Cuarț (SiO ₂)
Densitatea (g/ cm ³)	5,3	7,8	6,2	2,06	4,64	1,3...1,8	2,65
Viteza de propagare, v (m/s)	5200	3800	3300	5460	7320	1500...2600	5740
Rezistența acustică, R·10 ⁶ (kg/ m ² ·s)	27,3	29,3	20,5	11,2	34	2,1...4,7	15,2
Modulul piezoelectric la oscilații pe grosime d ₃₃ ·10 ⁻¹² (m/V)	125	340	85	15	6	25	2,3
Factor de cuplare pentru oscilații pe grosime	0,33	0,47	0,38	0,38	0,47	0,1...0,14	0,1
Factor de amplitudine a oscilației de rezonanță	350	90	15	> 1000	> 1000	< 15	>10 ⁴
Temperatura Curie (°C)	120	340	> 400	130	1210	165...180	576

3.2. Comportarea pe suprafețe limită

3.2.1. Incidența normală

Dacă o undă elastică întâlnește suprafața de separație dintre două medii 1 și 2, o parte din undă se va reflecta, iar o parte se va refracta sau propaga în celălalt mediu, figura 4.

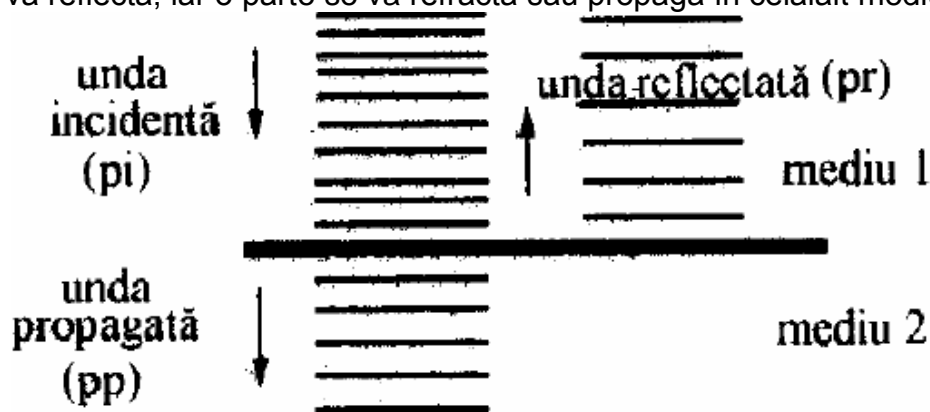


Fig. 4. Descompunerea undei normale la suprafața de separație dintre două medii

În baza principiului acțiunii și reacțiunii, presiunea acustică la suprafața de separare a celor două medii este aceeași ($p_1=p_2$). Cum însă:

$$\begin{aligned} p_1 &= p_i + p_r \\ p_2 &= p_p \end{aligned} \quad (50)$$

p_1 fiind presiunea undei incidente, p_2 - presiunea undei reflectate și p_p - presiunea undei propagate, rezultă:

$$p_i + p_r = p_p \quad (51)$$

O condiție similară trebuie să satisfacă și vitezele de oscilație în planul suprafeței de separație a două medii ($u_1=u_2$) și deoarece :

$$\begin{aligned} u_1 &= u_i + u_r \\ u_2 &= u_p \end{aligned} \quad (52)$$

rezultă

$$u_i + u_r = u_p \quad (53)$$

Ținând seama de relațiile periodice ale presiunilor:

$$\begin{aligned} p_i &= A \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = R_1 \cdot u_i \\ p_r &= B \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = -R_1 \cdot u_r \\ p_p &= C \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = R_2 \cdot u_p \end{aligned} \quad (54)$$

Rezultă în mod corespunzător:

$$\begin{aligned} u_i &= \frac{p_i}{R_1} \\ u_r &= -\frac{p_r}{R_1} \\ u_p &= \frac{p_p}{R_2} \end{aligned} \quad (55)$$

Prin înlocuirea expresiilor (55) în relația (53) se obține:

$$\frac{p_i - p_r}{R_1} = \frac{p_p}{R_2} = \frac{p_i + p_r}{R_2} \quad (56)$$

Ordonând termenii, rezultă:

$$p_i (R_2 - R_1) = p_r (R_2 + R_1) \quad (57)$$

adică:

$$p_r = p_i \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} = p_i c_R \quad (58)$$

$$p_p = p_i \frac{2R_2}{R_2 + R_1} = p_i c_P \quad (59)$$

Înmulțitorii lui p_i se mai numesc coeficienți (factori) de reflexie c_R , respectiv coeficient de propagare c_P .

Expresiile lor sunt:

$$c_r = \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \quad (60)$$

$$c_p = \frac{2R_2}{R_2 + R_1} = \frac{2\rho_2 v_2}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \quad (61)$$

Între coeficienții c_R și c_P trebuie să se satisfacă condiția:

$$c_P - c_R = 1 \quad (62)$$

În cazul undelor transversale, relațiile (58) și (59) sunt valabile la propagarea în medii solide. Dacă, spre exemplu se consideră propagarea din apă în oțel, se obține $c_R = 0,938$ și $c_P = 1,938$, ceea ce atrage atenția asupra necesității amplificării semnalelor provenite din mediile solide, care se supun controlului.

Pe baza relațiilor (60) și (61), în tabelele 3 și 4 s-au calculat coeficienții de propagare și de reflexie aferenți combinațiilor posibile dintre cele 16 medii (solide, lichide, gazoase). Analiza relațiilor respective, precum și valorile din tabele permit enunțarea următoarelor constatări:

- Din medii solide spre aer (gaze), unde acustice practic nu se mai pot propaga, deoarece diferențele de impedanță acustică sunt prea mari $\rho_1 v_1 \gg \rho_2 v_2$ și ca urmare, coeficientul de propagare ia valori neglijabile $c_p < 0,00012$. În aceste cazuri, are loc fenomenul de reflexie cvasitotală, coeficienții de reflexie fiind $|c_R| > 0,9998$. La metale condițiile de reflexie sunt și mai accentuate, deoarece $c_p < 0,00002$, respectiv $|c_R| > 0,9999$. Fenomenul de reflexie totală a undelor elastice de către orice discontinuitate de natură gazoasă, inclusă în material stă la baza principiului detectării defectelor cu ajutorul ultrasunetelor.

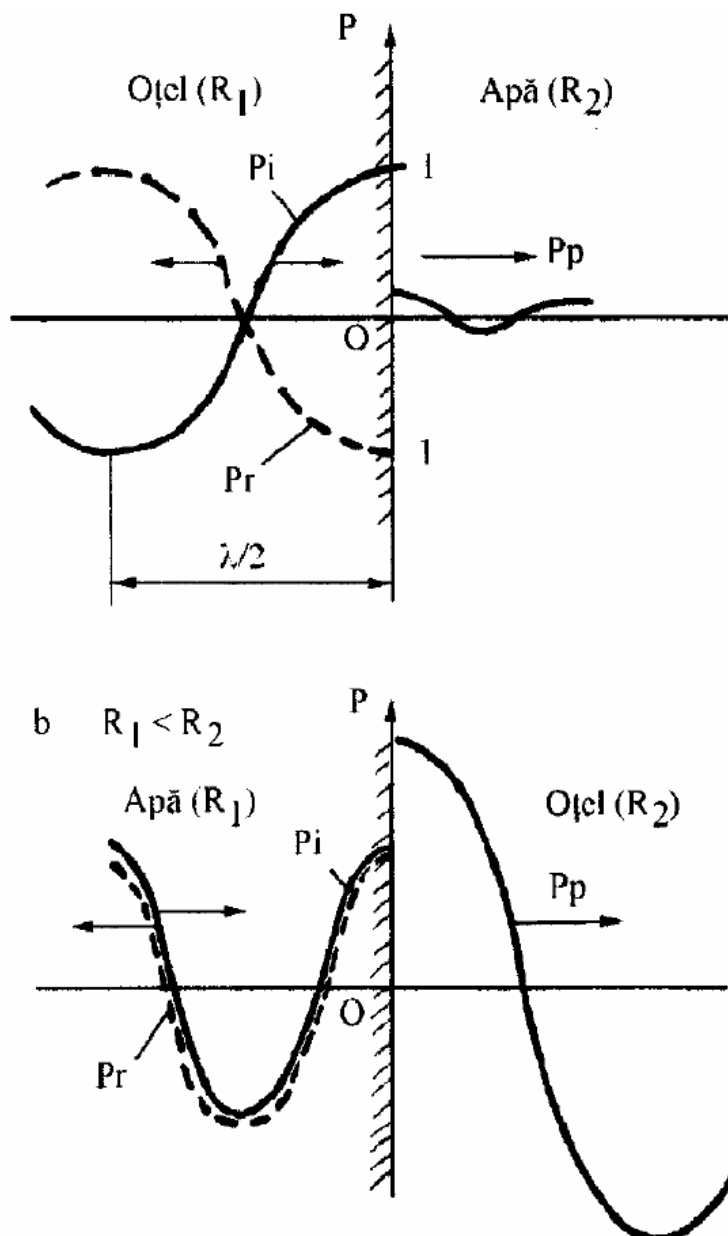


Fig. 5. Propagarea undelor pe suprafața limită; a) cu pierdere de $\lambda/2$; b) în fază

- Dacă impedanțele acustice ale mediului în care se propagă unda (mediul 2), sunt inferioare mediului de proveniență (mediul 1), adică $\rho_1 v_1 > \rho_2 v_2$, la suprafața de separație a celor două medii are loc o inversare de fază, cu valoarea n , unde n fiind reflectate în mediul 1 cu o pierdere de $\lambda/2$, conform schematizării din figura 5a. Ca urmare, la reflexiile

cu inversare de fază, coeficienții de reflexie ca iau semnul minus, iar pentru respectarea condiției $c_P - c_R = 1$, coeficienții corespunzători de propagare prezintă valori $l > c_P > 0$.

• Între medii de aceeași natură, $p_1 v_1 = p_2 v_2$, unde nu se reflectă $c_R = 0$, deci se produce o propagare totală ($c_P = 1$).

• Randamentul propagării este, cu atât mai bun, cu cât impedanța acustică a mediului din care provine unda, ($p_1 v_1$) este mai mică, iar a celui în care se propagă ($p_2 v_2$), mai mare, figura 5b, $p_1 v_1 \ll p_2 v_2$. De exemplu, coeficientul de propagare a undelor din aer în solide este $c_P > 1,9998$.

• Coeficienții de propagare din lichide în solide sunt inferiori celor de propagare din aer în solide, dar în toate cazurile la lichide având impedanța $p_1 v_1 > 1500 \cdot 10^3$ (Pa·s), $c_P > 1,1$. Cele mai mari și totodată mai apropiate valori le asigură apa și uleiul. De aceea, apa și uleiul sunt folosite ca medii de cuplare a palpatoarelor cu piesa de controlat.

Tabelul 3. Coeficienții de reflexie a ultrasunetelor c_R la emisii sub 90°

Mediul	R_2	Aer	Alamă	Aluminiu	Apă	Cupru	Fontă	Glicerină	Nichel	Oțel	Plexiglas	Porțelan	PVC	Sticlă	Titan	Ulei	Wolfram
R_1	$R \times 10^{-6}$	0,000414	35,88	17,50	1,44	41,80	33,5	2,5	49,54	45,6	3,20	13,44	3,35	14,40	28,28	1,3	104,28
Aer	0,000414	0	0,9999	0,9999	0,9994	0,9999	0,9999	0,9996	0,9999	0,9999	0,9997	0,9999	0,9997	0,9999	0,9999	0,9993	0,9999
Alamă	35,88		0	-0,3443	-0,9228	0,0762	-0,0343	-0,8697	0,1599	0,1192	-0,8362	-0,4549	-0,8292	-0,4272	-0,1184	-0,9300	-0,4880
Aluminiu	17,5			0	-0,8479	0,4097	0,3137	-0,7500	0,4779	0,4453	-0,6908	-0,1312	-0,6796	-0,0971	0,2354	-0,8617	0,7125
Apă	1,44				0	0,9333	0,9175	0,2690	0,9386	0,9387	0,3793	0,8064	0,3987	0,8181	0,9030	-0,0510	0,9727
Cupru	41,8					0	-0,1102	-0,8871	0,0847	0,0437	-0,8577	-0,5133	-0,8516	-0,4875	-0,1929	-0,9393	0,4277
Fontă	33,5						0	-0,8611	0,1931	0,1529	-0,8256	-0,4273	-0,8181	-0,3987	-0,0844	-0,9259	0,5137
Glicerină	2,5							0	0,9039	0,8960	0,1228	0,6863	0,1452	0,7041	0,8375	-0,3157	0,9531
Nichel	49,54								0	-0,0414	-0,8786	-0,5731	-0,8733	-0,5495	-0,2731	-0,9488	0,3558
Oțel	45,60									0	-0,8688	-0,5447	-0,8631	-0,5200	-0,2344	-0,9447	0,3915
Plexiglas	3,2										0	0,6153	0,0229	0,6363	0,7966	-0,4222	0,9404
Porțelan	13,44											0	-0,6009	0,0344	0,3557	-0,8236	0,7716
PVC	3,35												0	0,6225	0,7881	-0,4408	0,9377
Sticlă	14,4													0	0,3252	-0,8343	0,7573
Titan	28,28														0	-0,9121	0,5733
Ulei	1,3															0	0,9753
Wolfram	104,28																0

Tabelul 4. Coeficienții de propagare a ultrasunetelor C_P la emisii sub 90°

Mediul	R_2	Aer	Alamă	Aluminiu	Apă	Cupru	Fontă	Glicerină	Nichel	Oțel	Plexiglas	Porțelan	PVC	Sticlă	Titan	Ulei	Wolfram
R_1	$R \times 10^{-6}$	0,000414	35,88	17,50	1,44	41,80	33,5	2,5	49,54	45,6	3,20	13,44	3,35	14,40	28,28	1,3	104,28
Aer	0,000414	1	1,9999	1,9999	1,9994	1,9999	1,9999	1,9996	1,9999	1,9999	1,9997	1,9999	1,9997	1,9999	1,9999	1,9993	1,9999
Alamă	35,88		1	0,1640	0,0771	0,0762	0,9656	0,1302	1,1599	1,1192	0,1637	0,5450	0,1707	0,5727	0,8815	0,0699	1,4880
Aluminiu	17,5			1	0,1520	1,4097	1,3137	0,2500	1,4779	1,4453	0,3091	0,8687	0,3213	0,9028	1,2354	0,1382	1,7125
Apă	1,44				1	1,9333	1,9175	1,2690	1,9435	1,9387	1,3793	1,8064	1,3987	1,8181	1,9030	0,9489	1,9727
Cupru	41,8					1	0,8897	0,1128	1,0847	1,0437	0,1422	0,4866	0,1483	0,5124	0,8070	0,0603	1,4277
Fontă	33,5						1	0,1388	1,1931	1,1529	0,1743	0,5726	0,1818	0,6012	0,9155	0,0747	1,5137
Glicerină	2,5							1	1,9039	1,8960	1,1228	1,6863	1,1452	1,7041	1,8375	0,6842	1,9531
Nichel	49,54								1	0,9585	0,1213	0,4268	0,1266	0,4504	0,7268	0,0511	1,3558
Oțel	45,60									1	0,1311	0,4552	0,1368	0,4800	0,7655	0,0554	1,3915
Plexiglas	3,2										1	1,6153	1,0229	1,6363	1,7966	0,5776	1,9404
Porțelan	13,44											1	0,3990	1,0344	1,3557	0,1763	1,7716
PVC	3,35												1	1,6225	1,7881	0,5591	1,9377
Sticlă	14,4													1	1,3252	0,1656	1,7573
Titan	28,28														1	0,1142	1,5733
Ulei	1,3															1	1,9753
Wolfram	104,28																1

• Între solide, coeficienții mari de propagare se asigură de la plexiglas la metale, $c_p > 1,6$. Drept urmare, plexiglasul se folosește cu foarte bune rezultate în construcția palpatoarelor și anume în vederea confecționării elementului de transfer a undelor de la palpator la piesa controlată.

În cazul unor piese stratificate sau suprapuse, în contact acustic, unda refractată în mediul 2 de către prima suprafață de contact cu mediul 1 de unde provine, se propagă până la următoarea suprafață de separație. Inversarea de fază reprezintă o discontinuitate în transmiterea vitezei și energiei undelor, de la valoarea periodică maximă la valoarea periodică minimă și/sau invers. Aici o parte din undă se refractă în mediul 3 s.a.m.d. Datorită undelor multiplu reflectate în mediul 2 au loc fenomene de atenuare, amplificare și interferență. Ca urmare, coeficienții de reflexie și de propagare vor fi în realitate niște funcții periodice dependente de raportul dintre grosimea mediului 2 și lungimea de undă (s/λ), descrise de relațiile coeficienților efectivi, deduse de Bergman [9]:

$$\begin{aligned} c_{p_{ef}} &= \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_2}{R_1} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{2\pi s}{\lambda} \right)}} \\ c_{R_{ef}} &= \frac{\frac{1}{4} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_2}{R_1} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{2\pi s}{\lambda} \right)}{\sqrt{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_2}{R_1} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{2\pi s}{\lambda} \right)}} \end{aligned} \quad (63)$$

3.2.2. Incidența oblică

Dacă unda intersectează oblic suprafața de separație a două medii, o parte a energiei se reflectă în mediul 1 din care provine, iar o parte se refractă, propagându-se în mediul 2, sub un alt unghi. În ambele medii, atât energia reflectată, cât și cea refractată se desface în două componente (transformarea undelor), o undă longitudinală L și o undă transversală T.

Cu notațiile din figura 6a, între unghiuri și vitezele de propagare, în conformitate cu legea lui Snell, se poate scrie:

$$\frac{\sin \alpha}{v_{L_1}} = \frac{\sin \gamma}{v_{L_2}} = \frac{\sin \beta}{v_{T_2}} \quad (64)$$

Deoarece, așa cum s-a văzut, $v_L > v_T$, rezultă că unghiul de refracție al undei transversale este totdeauna mai mic decât cel al undei longitudinale ($\beta < \gamma$). Dacă unghiul α crește, se poate ajunge în situația în care $\gamma = 90^\circ$, așa cum rezultă din figura 6b, deci la reflexia totală a undelor longitudinale. Valoarea unghiului α corespunzătoare acestei situații se numește primul unghi critic și se obține din relația (64), făcând pe $\sin \gamma = 1$:

$$\sin \alpha_{Cr_1} = \frac{v_{L_1}}{v_{L_2}} \quad (65)$$

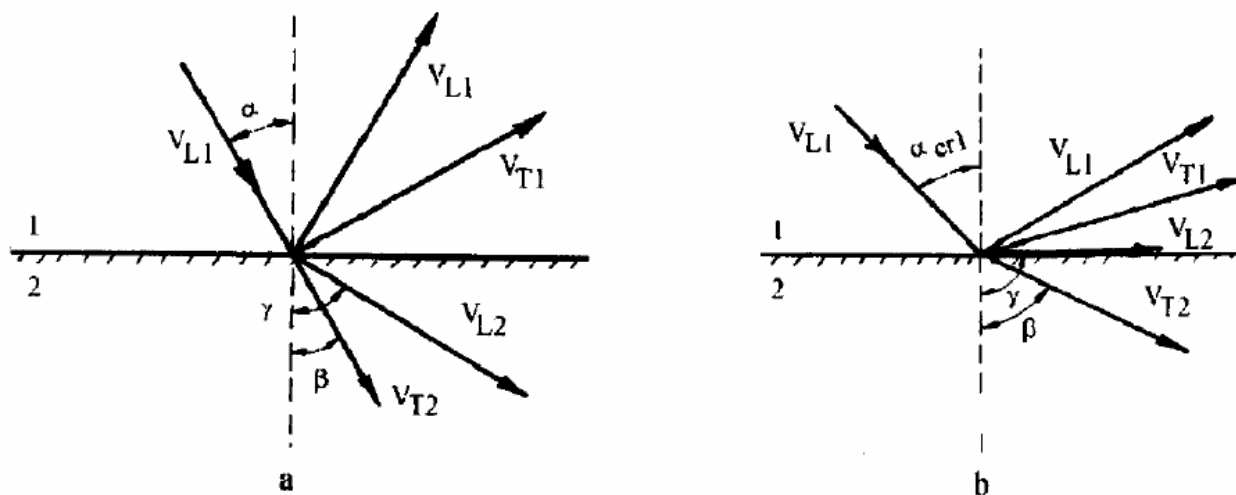


Fig. 6 Descompunerea și transformarea undelor înclinate sub unghiul α la suprafața limită:
a) $\alpha < \alpha_{cr1}$; b) $\alpha = \alpha_{cr1}$

De exemplu, pentru mediile plexiglas-oțel, $\sin \alpha_{cr1} = 0,4563$, ceea ce corespunde la un unghi $\alpha = 27^\circ 15'$. Dacă unghiul de incidență a continuă să crească, se poate ajunge și la reflexia totală a undelor transversale. Valoarea unghiului α corespunzătoare acestei situații se numește al doilea unghi critic și se obține făcând pe $\sin \beta = 1$ în relația (64):

$$\sin \alpha_{cr2} = \frac{v_{L1}}{v_{T2}} \quad (66)$$

Pentru aceleași medii, $\sin \alpha_{cr2} = 0,81$, ceea ce corespunde la un unghi $\alpha_{cr2} = 54^\circ$.

La determinări de precizie se va lua în considerare [90], modificarea cu temperatura a unghiului de refracție β , ca urmare a influenței exercitate asupra vitezei de propagare.

3.3. Atenuarea ultrasunetelor; factori de influență

În mediile reale are loc o interacțiune între mediu și unda elastică, datorită căreia o parte importantă din energia undei, transmitându-se mediului, se produce o atenuare. Ca urmare a acestui fenomen, presiunea undei variază exponențial în direcția de propagare cu distanța dx :

$$dp = -\alpha \cdot p_0 \cdot dx \quad (67)$$

de unde, prin integrare, rezultă:

$$p = p_0 \cdot e^{-\alpha \Delta x} \quad (68)$$

α fiind coeficientul de atenuare, iar Δx - distanța dintre două puncte unde presiunea și intensitatea au valorile p și p_0 . Intensitatea undei fiind proporțională cu pătratul presiunii, se va atenua după legea:

$$I = I_0 e^{-2\alpha \Delta x} \quad (69)$$

deci

$$\alpha_1 = 2\alpha_p \quad (70)$$

Coeficientul de atenuare α din relațiile (68) și (69) se exprimă în neperi/cm sau beli/cm

$$\alpha = \frac{1}{\Delta x} \ln \frac{p_0}{p} \left(\frac{N_p}{cm} \right) \equiv \frac{1}{\Delta x} 2 \log \frac{p_0}{p} \left(\frac{B}{cm} \right) \quad (71)$$

În tehnică, în loc de neper, respectiv bel, se folosește decibelul: $1dB = 1B/10$. Numărul de decibeli este stabilit prin valoarea numerică $20 \log(p/p_0)$, respectiv $20 \log(I/I_0)$.

Pentru recalcularea dintr-o unitate în alta se utilizează transformarea:

$$\alpha(\text{dB/cm}) = 8,7\alpha \text{ (Np/cm)} \quad (72)$$

Tabelul 5

Log	Ln	Număr	Log	Ln	Număr	Log	Ln	Număr
0,00	0,00	1,0	1,0	2,30	10,0	2,0	4,61	100
0,05	0,12	1,12	1,05	2,42	11,2	2,05	4,72	112
0,10	0,23	1,26	1,10	2,53	12,6	2,10	4,84	126
0,15	0,35	1,41	1,15	2,65	14,1	2,15	4,95	141
0,20	0,46	1,58	1,20	2,76	15,8	2,20	5,06	158
0,25	0,58	1,78	1,25	2,88	17,8	2,25	5,18	178
0,30	0,69	2,00	1,30	2,99	20,0	2,30	5,30	200
0,35	0,81	2,24	1,35	3,11	22,4	2,35	5,41	224
0,40	0,92	2,51	1,40	3,22	25,1	2,40	5,52	251
0,45	1,04	2,82	1,45	3,33	28,2	2,45	5,64	282
0,50	1,15	3,16	1,50	3,45	31,6	2,50	5,76	316
0,55	1,27	3,55	1,55	3,57	35,5	2,55	5,87	355
0,60	1,38	3,98	1,60	3,68	39,8	2,60	5,99	398
0,65	1,50	4,47	1,65	3,80	44,7	2,65	6,10	447
0,70	1,61	5,01	1,70	3,92	50,1	2,70	6,22	501
0,75	1,73	5,62	1,75	4,03	56,2	2,75	6,33	562
0,80	1,84	6,31	1,80	4,15	63,1	2,80	6,45	631
0,85	1,96	7,08	1,85	4,26	70,8	2,85	6,56	708
0,90	2,07	7,94	1,90	4,38	79,4	2,90	6,68	794
0,95	2,19	8,01	1,95	4,49	89,1	2,95	6,79	891
1,00	2,30	10,0	2,00	4,61	100	3,00	6,91	1000

Valorile logaritmilor zecimali și naturali sunt prezentate în tabelul 5. Corespondența dintre variațiile incrementale, respectiv decrementale și numărul de decibeli este calculată în tabelul 6. Se pune în evidență astfel că o variație de exemplu cu +6 dB, corespunde la o intensificare de două ori a semnalului. pe câtă vreme, cu -6 dB, la o scădere de două ori a semnalului.

Tabelul 6

Nr. dB	Variații		Nr. dB	Variații	
	Increment	Decrement		Increment	Decrement
0,0	1,0	1,0	12	3,98	0,25
0,5	1,06	0,945	14	5,01	0,20
1,0	1,12	0,89	16	6,31	0,158
1,5	1,19	0,84	18	7,94	0,126
2,0	1,26	0,79	20	10,00	0,100
2,5	1,33	0,75	22	12,59	0,079
3,0	1,41	0,71	24	15,85	0,063
3,5	1,50	0,67	26	19,95	0,050
4,0	1,59	0,63	30	31,62	0,032
4,5	1,68	0,60	40	100	0,010
5,0	1,78	0,56	50	316	0,032
6,0	2,00	0,50	60	1000	0,0010
7,0	2,24	0,45	70	3162	0,00032
9,0	2,82	0,35	90	31623	0,000032
10,0	3,16	0,32	100	100000	0,000010

Ultrasunetele sunt puternic absorbite în gaze și slab absorbite în lichide și solide. Având în vedere importanța atenuării în defectoscopia materialelor, în tabelul 7 se prezintă o grupare a materialelor frecvent utilizate pe domenii ale coeficientului de atenuare și în mod corespunzător, grosimile maxime penetrabile cu ajutorul ultrasunetelor. După [9] atenuarea în apă la 20°C este dată de relația $\alpha = 0,22 f^2$ (dB/m) unde frecvența se exprimă în MHz.

Tabelul 7

Coefficient de atenuare α (dB/ m) la $f= 2\text{MHz}$	Tipul materialului	Grosimea maximă controlabilă Δx (m)
Mic 1- 10	Lamine din oțel, Al, Mg, Ni, Ti, W, sticlă, porțelan	1- 10
Mijlociu 10- 100	Oțeluri turnate și unele forjate, fonte dure, cauciuc, plexiglas, PVC, lamine din alamă, bronz, Cu, Zn, Pb, Zr, Hf, materiale sinterizate	0,1- 1
Mare 100	Lemn, ebonită, bronz turnat, neferoase, fonte moi, ceramice, materiale poroase, materiale stratificate, cauciuc durificat	0- 0,1 în general necontrolabile

Atenuarea, care delimitează practic penetrabilitatea (transparența) undelor se datorează următorilor factori:

- absorbția, adică transformarea energiei acustice în energie termică;
- dispersia, adică împrăștierea (disiparea) energiei pe structura discretă a materialului;
- scăderea energiei în câmp îndepărtat, urmare a divergenței unde;
- pierderi prin cuplare.

Fenomenul de difuzie sau de dispersie a undelor elastice produce cele mai mari pierderi. El depinde în mod esențial de mărimea granulației structurale, d_g și de lungimea de undă λ , respectiv de raportul λ/d_g . De asemenea, dispersia undelor și gradul de atenuare sunt influențate de orientarea structurii ereditare, gradul de omogenitate, prezenta incluziunilor, segregățiilor și a precipitărilor intergranulare.

Din punct de vedere al atenuării, la materialele policristaline, cum sunt metalele, se deosebesc patru domenii, în funcție de valoarea raportului λ/d_g unde d_g este dimensiunea medie a granulației:

- domeniul 1: $\lambda/d_g > 1000$, unde atenuarea se produce exclusiv prin absorbție și este proporțională cu frecvența:

$$\alpha = \alpha_a = C_1 \cdot f \quad (73)$$

- domeniul 2: $1000 > \lambda/d_g > 10$, unde atenuarea se produce prin absorbție și dispersie, fiind determinată de relația:

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_d = C_1 \cdot f + C_2 \cdot d_g^3 \cdot f^4 \quad (74)$$

- domeniul 3: $10 > \lambda/d_g > 3$, unde atenuarea are aceleași cauze ca și în domeniul 2:

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_d = C_1 \cdot f + C_2 \cdot d_g \cdot f^2 \quad (75)$$

Constanta C_2 este într-o strânsă dependență de gradul de anizotropie. Astfel, după [2], la oțelurile perlitice $\alpha = 100 (d_g/\lambda)^3$ (dB/ m), iar la cele ferito- perlitice $\alpha = 35 (d_g/\lambda)^3$ (dB/ m);

- domeniul 4: $\lambda/d_g < 3$, unde atenuarea se produce mai ales prin dispersie, fiind descrisă sub forma:

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_d = C_1 f + C_3 \frac{1}{d_g} \quad (76)$$

Constanta C_3 este de asemenea influențată de gradul de anizotropie elastică în sensul creșterii, odată cu mărirea gradului de anizotropie. Ordinea principalelor metale cu o singură fază cristalină, din punct de vedere al creșterii gradului de anizotropie este următoarea: W, Mg, Al, Cu, Fe, Ag, Cu, Pb, Cu-Zn.

Din analiza factorilor care determină pierderile de energie la emisia ultrasunetelor în medii solide, se desprind mai multe concluzii cu implicații tehnice directe.

În primul rând, dispersia undelor în medii neomogene, cu granulație relativ mare, $\lambda/d_g < 10$, crește exponențial cu frecvența și diametrul mediu al granulației. La structurile

complexe, cum sunt oțelurile, dispersia este determinată de elementul structural cu dimensiunea maximă și este cu atât mai mare, cu cât este mai pronunțată anizotropia. La semifabricatele din tablă de oțel OL 37, s-a stabilit că gradul de atenuare, definit ca raport dintre diferența primelor două semnale reflectate și dublul grosimii, crește liniar cu creșterea mărimii grăunților [17]. Totodată, coeficientul de atenuare se mărește proporțional cu distanța dintre lamelele de grafit [125]. Din punct de vedere al componentelor structurale, atenuarea maximă este în austenită, urmată de ferită, este medie în perlită și minimă în martensită. Structurile turnate prezintă o atenuare superioară structurilor deformate, chiar la aceeași mărime a granulației. La piesele forjate, dispersia undelor devine semnificativă atunci când diametrul mediu al granulației ajunge $d_g=0,2\lambda$. La granulații și mai grosolane, $d_g = 0,5\lambda$, se produce o împrăștiere foarte puternică impietând asupra posibilităților de decelare a discontinuităților. Aceste cazuri sunt frecvente la piesele forjate din oțeluri aliate, în special cu structuri austenitice, la piesele netratate din oțeluri pentru îmbunătățire, respectiv la piesele neprelucrate. Semnificative din acest punct de vedere sunt și diferențele mari sesizate la îmbinările sudate, unde diametrul mediu al grăunților d_g poate ajunge la 2,5- 3 mm.

În strânsă corelație cu caracteristicile de atenuare ale diferitelor materiale, rezultă și limitele de aplicare a controlului cu ultrasunete, precum și recomandările practice în vederea obținerii unei transparențe cât mai bune. Ca regulă generală, transparența la ultrasunete crește în ordinea structură turnată – forjată - laminată, precum și în ordinea structură heterogenă - structură omogenizată prin tratamente termice. Piesele turnate din fontă cenușie (cu grafit lamelar), pot fi controlate numai în cazul în care lamelele de grafit nu depășesc o anumită limită. În general, fontele cu rezistență peste 220 N/mm² se controlează în condiții satisfăcătoare, transparența mărindu-se cu rezistența la rupere. Frecvența recomandată este de 0,5 MHz. La piesele din fontă cu grafit nodular, transparența poate ajunge și la peste 1 m, frecvența recomandată fiind de 2 MHz. Fontele albe prezintă caracteristici de atenuare similare cu ale oțelurilor turnate. Piesele din oțel turnat pot fi controlate în condiții bune chiar în faza de lingou sau piesă turnată în nisip sau cochilă. În funcție de procedeul de turnare, posibilitățile de control cresc în ordinea: turnare în nisip, în cochilă, continuă prin presiune și prin centrifugare, iar frecvențele corespunzătoare de la 1 MHz la 2 MHz. Piesele forjate, în special cele mari, se controlează cu frecvența 0,5 ÷ 1 MHz.

După aplicarea unor tratamente de normalizare sau îmbunătățire, transparența crește, [11] și în consecință frecvența de examinare poate fi simțitor ridicată. Semifabricatele laminate din oțel se controlează foarte bine cu frecvența de 2 ÷ 6 MHz, asigurându-se o transparență de ordinul metrilor. Laminele, forjatele și mai ales turnatele din oțeluri austenitice inoxidabile, cât și cele refractare bogat aliate cu crom, nichel sau mangan, precum și materialele neferoase, cum sunt alamele și bronzurile, se pot controla numai în unele cazuri particulare, în funcție de compoziția chimică efectivă, matricea structurală și mărimea granulației. În general, transparența lor la ultrasunete este foarte mică. Pentru a mări puterea de penetrare trebuie mărită lungimea de undă a fasciculului, astfel încât ea să întrecă substanțial dimensiunea granulelor.

Cercetări sistematice de atenuare a undelor longitudinale la țevi turnate prin centrifugare din oțel inoxidabil, pentru reactoare nucleare de tip BWR, au confirmat mărirea de aproximativ două ori a decrementului amplitudinii undelor longitudinale prin mărirea frecvenței de la 0,5 la 2 MHz. Aluminiul, magneziul și aliajele acestora se pretează fără probleme controlului cu ultrasunete. Mai mult decât atât, având în vedere că viteza de propagare în aluminiu este foarte apropiată de a oțelului (diferențe sub 5%), controlul poate decurge cu parametri de lucru reglați pentru oțel. Cum calitatea suprafeței pieselor de aluminiu este superioară oțelului, frecvența undelor poate fi chiar ceva mai ridicată și anume 2 MHz la piese turnate și 4-6 MHz la piese laminate.

Identificarea incluziunilor de metale grele și în special cele de wolfram ridică însă probleme deosebite.

Controlul pieselor din cupru și aliaje de cupru este foarte dificil datorită coeficientului mare de atenuare și vitezei relativ mici de propagare a undelor. Domeniul optim de frecvență este de 1,5- 1,8 MHz. Plumbul aliat cu antimoniu poate fi pătruns cu ultrasunete până la grosimi în jur de 100 mm. Zirconiu și hafniu sunt transparente până la dimensiuni de ordinul sutelor de mm. Frecvența de examinare recomandată pentru piese de zirconiu este de 1 MHz, iar pentru piese din hafniu de 5÷ 10 MHz.

Țevile de zircalloy nu pun probleme deosebite controlului cu ultrasunete. Titanul prezintă o penetrabilitate similară aliajelor ușoare. Țevile de titan se controlează cu frecvența de 10 MHz. Metalele dure, cum sunt carburile de wolfram, cobalt, titan sau tantal, precum și metalele sinterizate sunt în general transparente. Viteza de propagare este influențată potrivit relațiilor de definiție de următorii factori principali:

- greutatea specifică;
- modulul de elasticitate;
- coeficientul de contracție transversală.

Dintre acești factori, modulul de elasticitate este afectat la rândul său de temperatură, în mai mică măsură la oțelurile termorezistente și termorefractare și în mai mare măsură la celelalte tipuri, în sensul scăderii sale cu creșterea temperaturii. Coeficientul de contracție transversală, sau coeficientul lui Poisson, este influențat de gradul de deformare plastică. Intervalul de variație din starea pur elastică a materialelor, în starea integral plastică este 0,25÷ 0,5.

Factorii secundari de influență asupra vitezei de propagare a ultrasunetelor sunt:

- mărimea și orientarea granulației;
- natura constituenților și fazelor;
- tensiunile remanente.

Mărimea granulației se manifestă asupra caracteristicilor mecanice cum sunt:

limita de curgere, rezistența la rupere și duritatea, și anume invers proporțional cu radicalul diametrului mediu al acesteia. Pe de altă parte, se cunosc corelații de proporționalitate între viteza de propagare și mărimea durității [145].

Rolul pe care îl joacă constituenții structurali a fost determinat experimental la un oțel termorezistent, [145], și este reținut în tabelul 8.

Având în vedere și extinderea zonei influențate termic pe direcția de propagare a fasciculului de unde, factorul respectiv poate fi în general neglijat.

Tabelul 8

Constituentul	Viteza de propagare		$\frac{v_T}{v_L}$	$\frac{v_L}{v_T}$
	v_L	v_T		
Perlită	5944	3240	0,5451	1,8345
Sorbită	5915	3226	0,5454	1,8335
Sorbită fină	5900	3212	0,5444	1,8368
Martensită- ferită	5895	3203	0,5433	1,8404
Martensită	5878	3190	0,5427	1,8426

La îmbinările sudate și placările cu oțeluri inoxidabile austenitice, austenitiferitice și austenito- martensitice, efectele structurale se manifestă cu deosebită intensitate. Ele se accentuează în cazul sudării manuale, sub flux, respectiv în baie de zgură. Pe lângă micșorarea vitezei de propagare au loc și fenomene de difracție a undelor la limita de separație. Efectele depind în primul rând de orientarea grăunților columnari, respectiv de unghiul format între axa fasciculului de unde și direcția de desfășurare a cristalelor columnare.

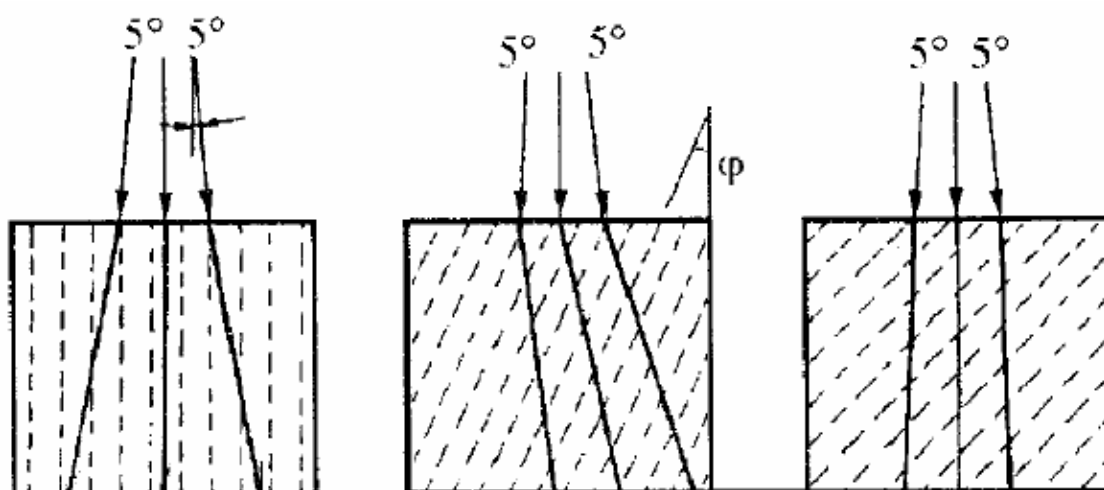


Fig. 7. Influența orientării structurii columnare asupra modului de propagare a fasciculului de ultrasunete

Modificările produse în propagarea ultrasunetelor de către direcția cristalelor columnare au fost puse în evidență, după [99] prin figura 7 și tabelul 9.

Apare surprinzător faptul că în cazul coincidenței direcției fasciculului și a axelor columnare, divergența este mare, iar viteza de propagare a undelor longitudinale la limita inferioară, pe câtă vreme în cazul în care unghiul format între cele două direcții este mare, ($\sim 50^\circ$), divergența fasciculului este practic nulă, iar viteza de propagare înregistrează valorile maxime.

Tabelul 9

Direcția granulației φ°	0°	24°	48°
Unghiul de difracție	0°	12°	0°
Divergența fasciculului	mare	intermediar	mică
Viteza de propagare	limita inferioară	intermediar	limita superioară

Tensiunile remanente induse de câmpul termic format în cursul sudării produc variații direcționale semnificative ale vitezei de propagare. Faptul își găsește explicația în anizotropia constantelor elastice.

Difracția undelor se produce pe discontinuitățile de material, care au ordinul de mărime al lungimii de undă λ . Fenomenul constă în micșorarea domeniului de umbră din spatele discontinuității, perpendicular pe direcția de propagare. Cantitativ, unghiul de difracție în jurul unor fante circulare, de diametru d se exprimă prin relația:

$$\sin \alpha = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (77)$$

fiind deci proporțional cu lungimea de undă și invers proporțional cu dimensiunea reflectorului. Fenomenul de difracție a undelor se explică pe baza principiului lui Huygens, potrivit căruia în câmpul unei unde progresive, orice punct de pe suprafața unui contur închis poate fi considerat ca sursă elementară de unde. Consecințele fenomenului de difracție sunt evaluate numai în cercetări de finețe, fiind neglijate în tehnicile curente de control.

4. ELEMENTE DE ULTRAACUSTICĂ APLICATĂ

4.1. Legea distanței

Unda sferică este generată de surse punctiforme. Izobarele ei în plan longitudinal reprezintă niște cercuri. Intensitatea undei este pe de o parte invers proporțională cu

pătratul distanței d , iar pe de altă parte proporțională cu pătratul presiunii p . Rezultă dependența presiunii de distanță sub forma:

$$p = p_0 \frac{1}{d} \quad (78)$$

Unda cilindrică este generată de surse liniare. În consecință, intensitatea ei variază invers proporțional cu distanța, astfel încât între presiune și distanță este valabilă relația:

$$p = p_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{d}} \quad (79)$$

Pentru evitarea valorii infinite în sursă (la $d = 0$), relațiile respective sunt valabile numai în domenii îndepărtate.

4.2. Reflexia și refracția undelor

4.2.1. Suprafața limită plană.

Reflexia unei sferice pe suprafața de separație dintre două medii este ilustrată în figura 8. Unghiul de incidență și de reflexie a oricărei raze monofilare sunt egale.

Drept consecință, unghiul de divergență a undei, γ , se conservă în componenta reflectată, iar prelungirile generatoarelor exterioare a acestora determină punctul virtual de convergență O' simetric cu O . Presiunea undei reflectate este dată de relația:

$$p = p_0 \frac{1}{d} \cdot c_R \quad (80)$$

unde c_R reprezintă coeficientul de reflexie a suprafeței limită.

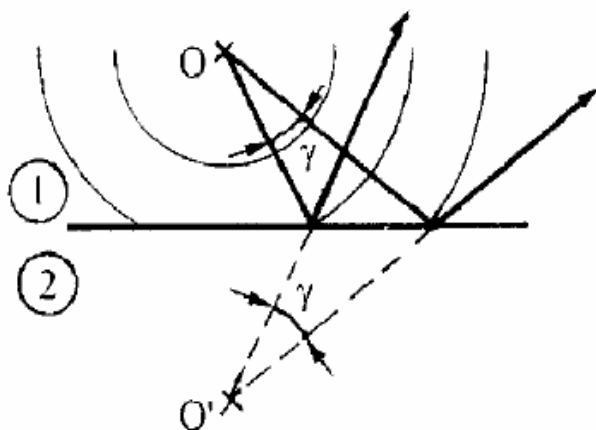


Fig. 8. Reflexia unei sferice pe suprafața limită de separație a limită două medii

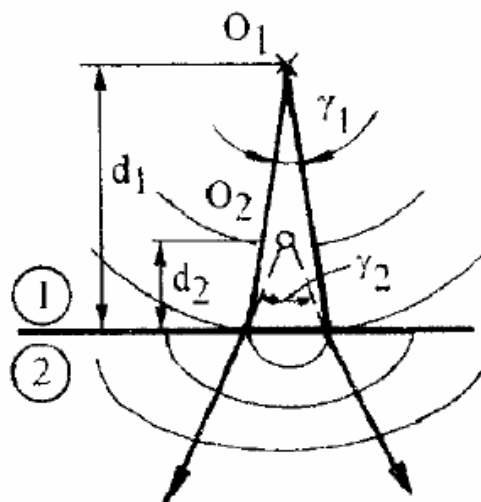


Fig. 9. Refracția unei sferice perpendiculare pe suprafața

Refracția undelor sferice perpendiculare pe suprafața limită, figura 9, provoacă mărirea unghiului de divergență și formarea unui pol virtual în mediul 1. Unghiul de divergență depinde de unghiul de incidență a fasciculului și caracteristicile de propagare. La unghiuri mici de incidență între unghiurile de divergență, distanțele polare și vitezele de propagare în cele două medii sunt valabile relațiile:

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (81)$$

4.2.2. Suprafața limită curbată (concavă sau convexă).

Pe o suprafață limită curbată, sferică sau cilindrică de rază r , unda se reflectă convergent sau divergent spre un punct de imagine reală sau virtuală situat la distanța b de suprafață, conform figurii 10, după cum suprafața este concavă respectiv convexă, (f este distanța focală).

Presiunea undei sferice variază cu distanța x de suprafață, conform relațiilor:

- în cazul suprafeței sferice:

$$p = c_R \frac{p_0}{p} \cdot \frac{f}{x \pm f \left(1 + \frac{x}{d} \right)} \quad (82)$$

- în cazul suprafeței cilindrice:

$$p = c_R \frac{p_0}{p} \sqrt{\frac{f}{\left(1 + \frac{x}{d} \right) \cdot \left[x \pm f \left(1 + \frac{x}{d} \right) \right]}} \quad (83)$$

Presiunea undei plane variază cu distanța x conform relațiilor:

- în cazul suprafeței sferice:

$$p = c_R p_0 \frac{f}{x \pm f} \quad (84)$$

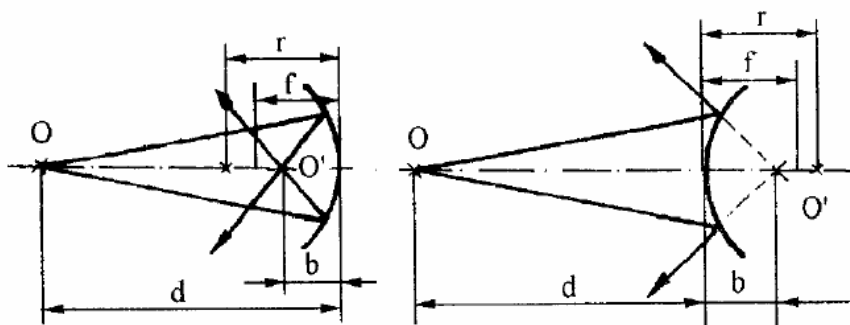


Fig. 10. Reflexia undei sferice pe suprafețe curbe concave și convexe

- în cazul suprafeței cilindrice:

$$p = c_R p_0 \sqrt{\frac{f}{x \pm f}} \quad (85)$$

Refracția undelor sferice sau plane pe suprafețe curbe are loc în funcție de forma suprafeței și de raportul dintre vitezele de propagare în cele două medii, cu convergența respectiv divergența fasciculului, figura 11.

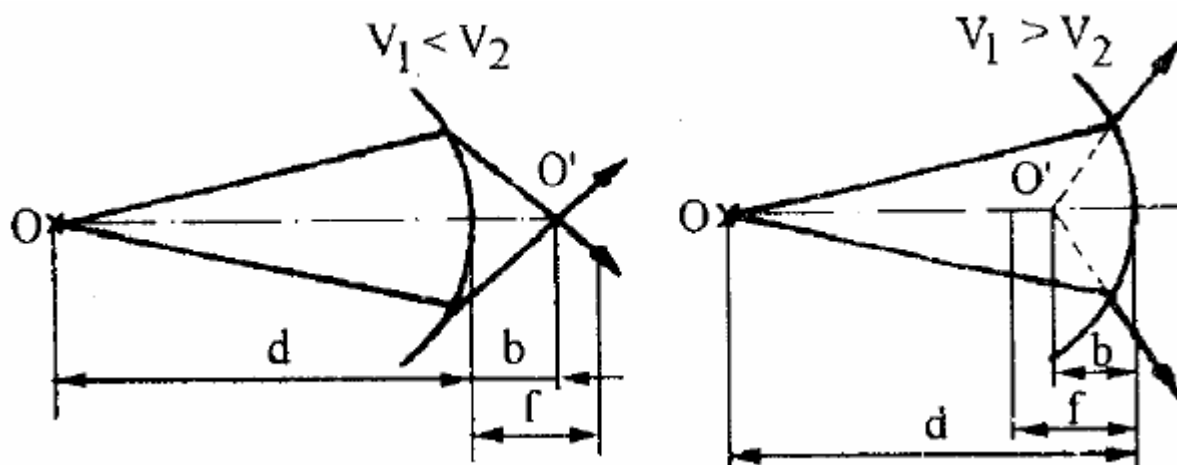


Fig. 11. Refracția unei sfere pe suprafețe concave
Condițiile de refracție sunt sintetizate în tabelul 10.

Tabelul 10

Nr. crt.	Condiții de refracție	Forma suprafeței	v_2/v_1
1	Convergență	concavă convexă	>1 <1
2	Divergență	concavă convexă	<1 >1

Între parametri geometrici din figura 11 și vitezele de propagare este valabilă relația:

$$\frac{1}{b} - \frac{v_2/v_1}{d} = \frac{1}{f} \quad (86)$$

Presiunea unei sfere variază cu distanța x de la suprafață, conform relațiilor:

• în cazul suprafeței sferice:

$$p = c_p \frac{p_0}{d} \cdot \frac{f}{x \pm f \left(1 + \frac{x \cdot v_2}{d \cdot v_1} \right)} \quad (87)$$

• în cazul suprafeței cilindrice:

$$p = c_p \frac{p_0}{d} \sqrt{\frac{f}{\left(1 + \frac{x \cdot v_2}{d \cdot v_1} \right) \cdot \left[x \pm f \left(1 + \frac{x \cdot v_2}{d \cdot v_1} \right) \right]}} \quad (88)$$

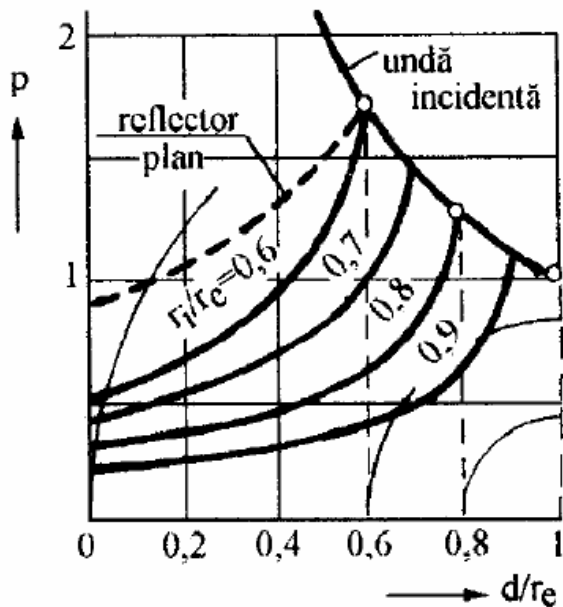


Fig. 12 Variația presiunii undei incidente și reflectate de pe suprafețe cilindrice interioare în funcție de distanța relativă oțel în

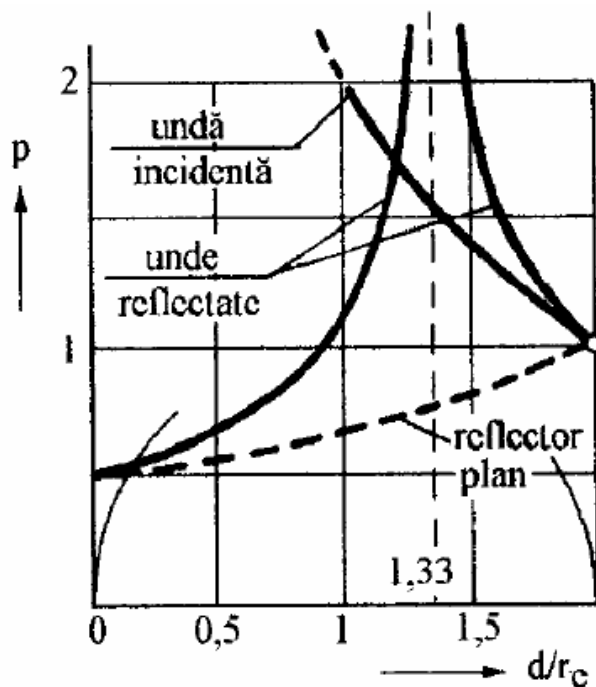


Fig. 13. Variația presiunii undei incidente și reflectate într-o piesă cilindrică masivă din

funcție de distanța relativă

Presiunea undei plane variază cu distanța x de suprafață potrivit relațiilor:

- în cazul suprafeței sferice:

$$p = c_p p_0 \frac{f}{x \pm f} \quad (89)$$

- în cazul suprafeței cilindrice:

$$p = c_p p_0 \sqrt{\frac{f}{x \pm f}} \quad (90)$$

În relațiile (87- 90), c_p reprezintă coeficientul de propagare a undelor. Semnul plus se referă la refracția divergență, iar semnul minus la refracția convergență.

Cu ajutorul relației (83), s-au construit curbele de variație a presiunii undei reflectate într-un tub din oțel în funcție de distanța relativă d/r_e și de raportul dintre raza interioară și raza exterioară r_i/r_e , figura 12. Având în vedere că în acest caz reflexia este cu divergență, are loc o micșorare a presiunii de la suprafața interioară înspre interiorul piesei, fenomen cu atât mai accentuat cu cât raportul r_i/r_e este mai mare.

Pentru reprezentare s-a admis presiunea virtuală de pe axa cilindrului $p = 1$.

Înfășurătoarea valorilor maxime ale presiunii reflectate de la diferite valori r_i/r_e , reprezintă variația presiunii incidente cu distanța relativă d/r_e .

Pe de altă parte, se pune în evidență că presiunea undei reflectate de pe suprafața cilindrică interioară a tubului este inferioară presiunii undei reflectate de la o suprafață plană (cu linii întrerupte în figura 12).

Variația presiunii undelor reflectate într-o piesă cilindrică masivă din oțel este reprezentată în figura 13. În acest caz reflexia este convergență, punctul focal fiind situat pentru distanța parcursă $d = 2r_e = 4f$, la $d/r_e = 1,33$, distanță la care se înregistrează și valorile maxime ale presiunii undelor reflectate. Datorită efectului de convergență, presiunea undei

reflectate de suprafața cilindrică exterioară a piesei este superioară presiunii unde reflectate de o suprafață plană (reprezentată cu linie întreruptă).

4.3. Câmpul de presiune la traductoare piezoelectrice

Traductorul piezoelectric de formă circulară emite inițial unde de aceeași amplitudine și fază pe întreaga suprafață. Datorită fenomenului de difracție și de interferență, se produce o variație a acesteia între două valori extreme. Ultima valoare maximă se înregistrează în cazul $D_p \gg \lambda$, la distanța $N = D_p^2/4\lambda$, care împarte câmpul în două zone: domeniul apropiat $d < N$ cunoscut sub denumirea de domeniul Fresnel și domeniul îndepărtat $d \geq N$, cunoscut sub denumirea de domeniul Fraunhofer.

La palpatoare de formă circulară

$$N = \frac{D_p^2}{4\lambda} \cong \frac{v_L}{16f \cdot \sin^2 \gamma_0} \quad (91)$$

unde γ_0 este unghiul de divergență al fasciculului.

În cazul traductoarelor piezoelectrice de formă dreptunghiulară, frecvent întâlnite în construcția palpatoarelor înclinate, poziția ultimului maxim, care delimitează domeniul apropiat este dată de relațiile

$$N = \frac{S}{\pi \cdot \lambda} \cong \frac{l^2}{3\lambda} \cong k \frac{l^2}{4} \cdot \frac{f}{v} \quad (92)$$

unde S este suprafața efectivă, l este lungimea traductorului iar k un coeficient de formă dependent de raportul laturilor traductorului b/l ($k = l \pm 1,33$).

În domeniul apropiat, forma dar mai ales amplitudinea presiunii depinde în mod esențial de forma impulsurilor electrice de comandă. Când excitația este decrementală, slab amortizată, presiunea variază sinusoidal de perioadă variabilă, între valorile p_0 și $2p_0$, ultima minimă înregistrându-se la distanța $N/2$, așa cum se arată în figura 14. Dacă impulsurile electrice de comandă sunt discontinue și puternic amortizate în două - trei oscilații, oscilațiile presiunii se micșorează până la anihilarea lor.

În domeniul îndepărtat, presiunea variază monoton cu distanța d după relația:

$$p = 2p_0 \sin \left[\frac{\pi}{4} \left(\sqrt{\frac{D_p^2}{4} + d^2} - d \right) \right] \quad (93)$$

care pentru $d > N$ și $D_p \gg h$, poate fi aproximată sub forma:

$$p \cong p_0 \cdot \frac{\pi}{d} \cdot \frac{D_p^2}{4\lambda} = p_0 \cdot \frac{\pi}{d} N = p_0 \cdot \frac{S}{\lambda \cdot d} \quad (94)$$

unde S reprezintă aria traductorului de diametru echivalent D_p .

Din relațiile (94), rezultă că emisia și câmpul de presiune este influențat de raportul dintre diametrul palpatorului D_p , respectiv suprafața S și lungimea de undă λ . O valoare ridicată provoacă o bună pătrundere și un câmp apropiat întins.

În câmpul îndepărtat presiunea scade aproximativ proporțional cu distanța de la palpator și la valori $d > 3N$ tipul unde (sferice, cilindrice), nu mai are nici o influență, figura 15.

Analiza profilului transversal al câmpului de presiune reprezentat în figura 15 permite următoarele observații: variațiile sunt, cu atât mai accentuate, cu cât distanța d este mai mică; valoarea maximă se înregistrează la $d > N$ în axa fasciculului; primul minim se situează pe ipotenuza unui triunghi dreptunghic cu vârful în punctul O , care descrie profilul longitudinal divergent al fasciculului.

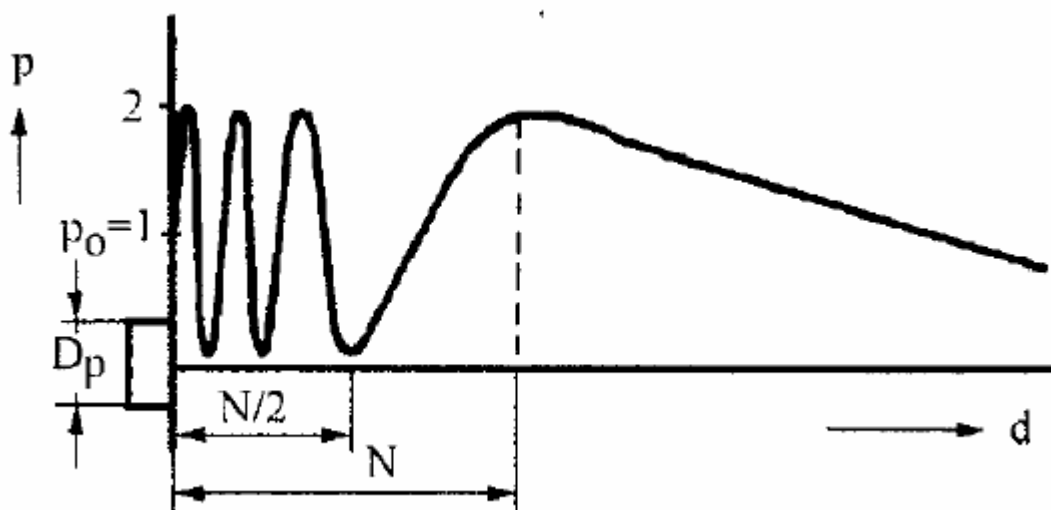


Fig. 14. Variația presiunii ultrasunetelor pe direcția de propagare

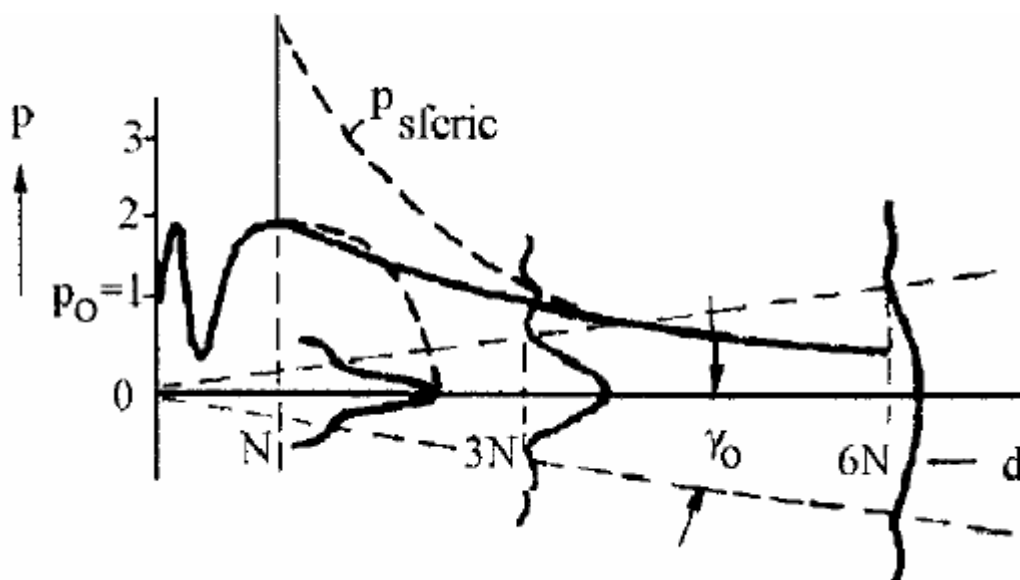


Fig. 15. Profilul transversal al câmpului de presiune

Diametrul sau lățimea fascicului la o distanță dată este definită prin scăderea presiunii cu 6 dB, ceea-ce corespunde la o amplitudine la limita de 50% din amplitudinea maximă localizată în axa fascicului și este notată cu D_s în figura 16. Amplitudinea semnalului de reflexie este dată de relația:

$$\left(\frac{p}{p_0}\right)^2 = \left(2 \frac{J_1(x)}{x}\right)^2 \quad (95)$$

unde J_1 este funcția Bessel de ordinul 1, iar argumentul

$$x = \frac{\pi D \cdot \gamma}{\lambda} \quad (96)$$

unde γ este unghiul de divergență a fascicului, definit prin evoluția diametrului (lățimii) D_s în lungul parcursului sonor. La limita câmpului apropiat, adică la distanța N de traductor $D_s = 0,25 D_p$ pentru limita de - 6 dB. În câmpul îndepărtat, la distanța d de traductor:

$$D_6 = 0,25 D_p \cdot \frac{d}{N} = \lambda \cdot \frac{d}{D_p} \quad (97)$$

Unghiul de divergență definește directivitatea palpatorului și poate fi calculat pe baza relației de difracție:

$$\sin \gamma_0 = 1,22 \frac{\lambda}{D_p} = 1,22 \cdot \frac{v}{f \cdot D_p} \quad (98)$$

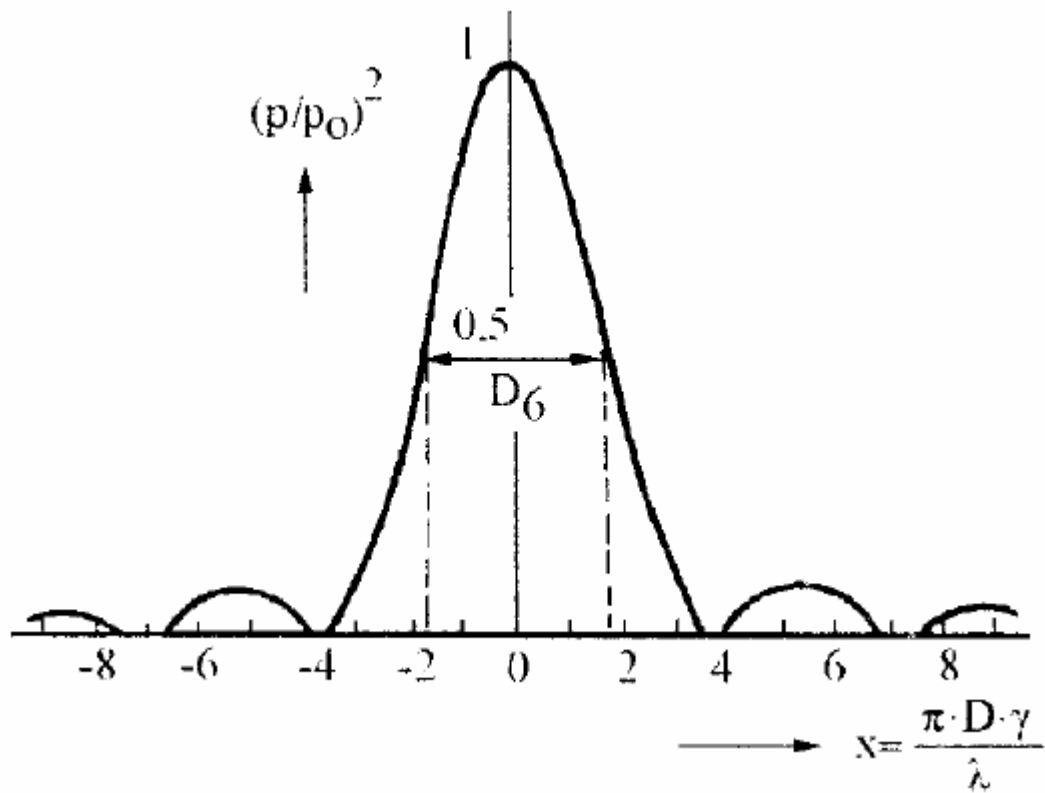


Fig. 16. Definirea diametrului fascicului de unde

Unghiul de divergență echivalent lățimii D_6 a fascicului de unde, caracteristică a sonogramei palpatoarelor, se calculează cu relația:

$$\sin \gamma_6 = 0,5 \frac{\lambda}{D_p} \quad (99)$$

Directivitatea fascicului nu este influențată de felul traductorului sau a reflectorului și de aceea divergența semnalului reflectat este aceeași cu a emisiei.

Dependența directivității de diametrul palpatorului și de frecvență este evidențiată sugestiv în figura 17.

Caracteristica de directivitate a unui palpator se ridică sub forma de diagramă polară, transpunându-se liniar amplitudinea relativă a presiunii pe direcția razei vectoriale corespunzătoare, conform figurii 18. O reprezentare superioară din punct de vedere analitic se realizează exprimând presiunea relativă în decibeli. Pe lângă fasciculul principal, apar și câteva loburi secundare la unghiuri mai mari. Prezența lor se explică prin fenomenele conexe care au loc pe suprafața de transfer, având ca rezultat formarea undelor superficiale radiale.

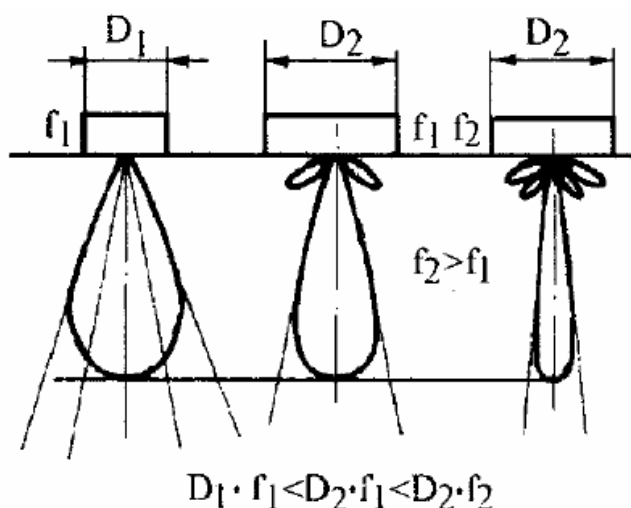


Fig. 17. Dependența directivității undelor în funcție de diametrul și frecvența traductorului

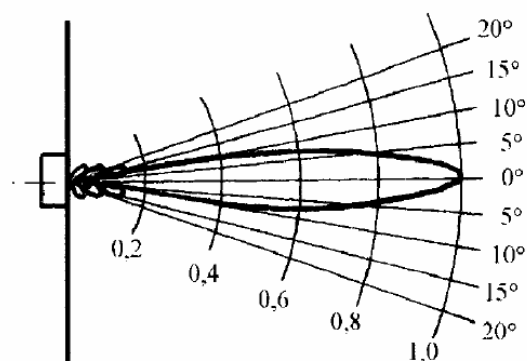


Fig. 18. Caracteristica de directivitate a palpatorului piezoelectric

Reprezentarea câmpului de presiune poate fi materializată și cu ajutorul izobarelor. Izobarele unesc puncte de aceeași presiune măsurată în plan longitudinal. Dacă raportarea se face la presiunea maximă axială, izobarele înscriu sporurile de amplificare în decibeli necesare atingerii presiunii maxime, așa cum este indicat în figura 19. În exemplul reprodus după [126], variația câmpului baric din zona axială spre marginea fascicului este de aproximativ 400%.

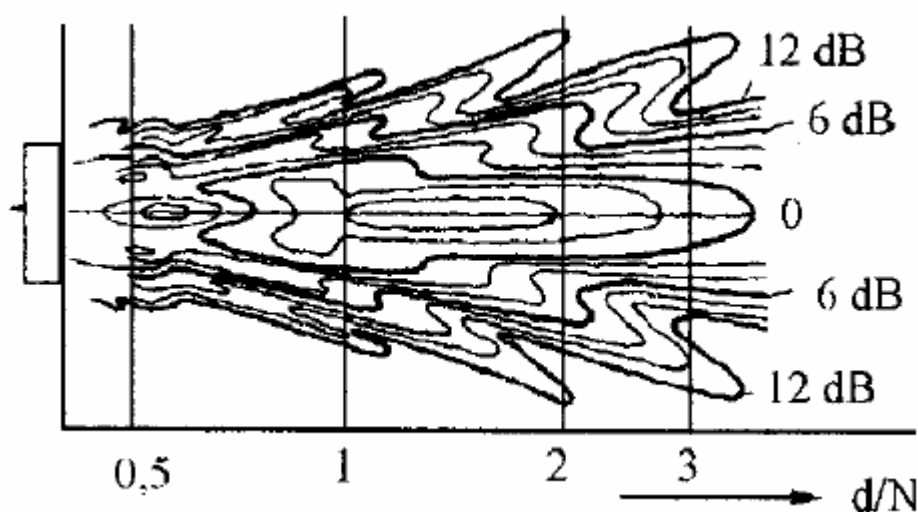


Fig. 19. Câmpul baric al unui fascicul de unde longitudinale

4.4. Câmpuri focalizate

Focalizarea urmărește influențarea evoluției câmpului baric la distanțe mici, situate în domeniul apropiat, prin amplificarea presiunii și micșorarea diametrului fascicului de unde. Focalizarea contribuie, pe de o parte la mărirea transparenței la ultrasunete a pieselor cu structura metalografică grosolană (vezi și paragraful 3.3), iar pe de altă parte, la îmbunătățirea capacității de rezoluție, respectiv de separare a semnalelor provenite de la reflectori apropiați.

În condițiile menținerii unui transfer optim de energie între suprafețele de cuplare palpator - piesă, efectul de focalizare se obține pe următoarele căi principale:

- utilizarea traductoarelor cu suprafață sferică;
- utilizarea de lentile intermediare convergente plan - concave.

Focalizarea este caracterizată prin pata focală a fasciculului, figura 20, care reprezintă locul geometric unde amplitudinea semnalului reflectat de o sursă punctiformă depășește un nivel dat.

Pata focală are forma unui elipsoid foarte alungit și se distinge prin următorii parametri:

- poziția față de palpator, (f);
- lungimea, (z);
- diametrul maxim (D_6).

Acești parametri pot fi exprimați în funcție de caracteristicile palpatorului și coeficientul de focalizare. Coeficientul de focalizare reprezintă raportul dintre distanța corespunzătoare maximului amplitudinii semnalului f și distanța câmpului apropiat N inițială (a palpatorului cu aceleași caracteristici nefocalizat),

$$F = \frac{f}{N} \leq 1 \quad (100)$$

Diametrul petei focale:

$$D_6 = F \cdot \frac{D_p}{4} = f \cdot \frac{\lambda}{D_p} \quad (101)$$

Poziția începutului și sfârșitului petei focale, figura 20, este dată de relațiile:

$$z_1 = N \frac{\sqrt{1 + 4F} - 1}{2} \quad (102)$$

$$z_2 = N \cdot F(1 + F) \quad (103)$$

Lungimea petei focale pentru $F < 0,6$ este

$$z = z_2 - z_1 = 1,75F^2 \cong 4\lambda \left(\frac{f}{D_p} \right)^2 \quad (104)$$

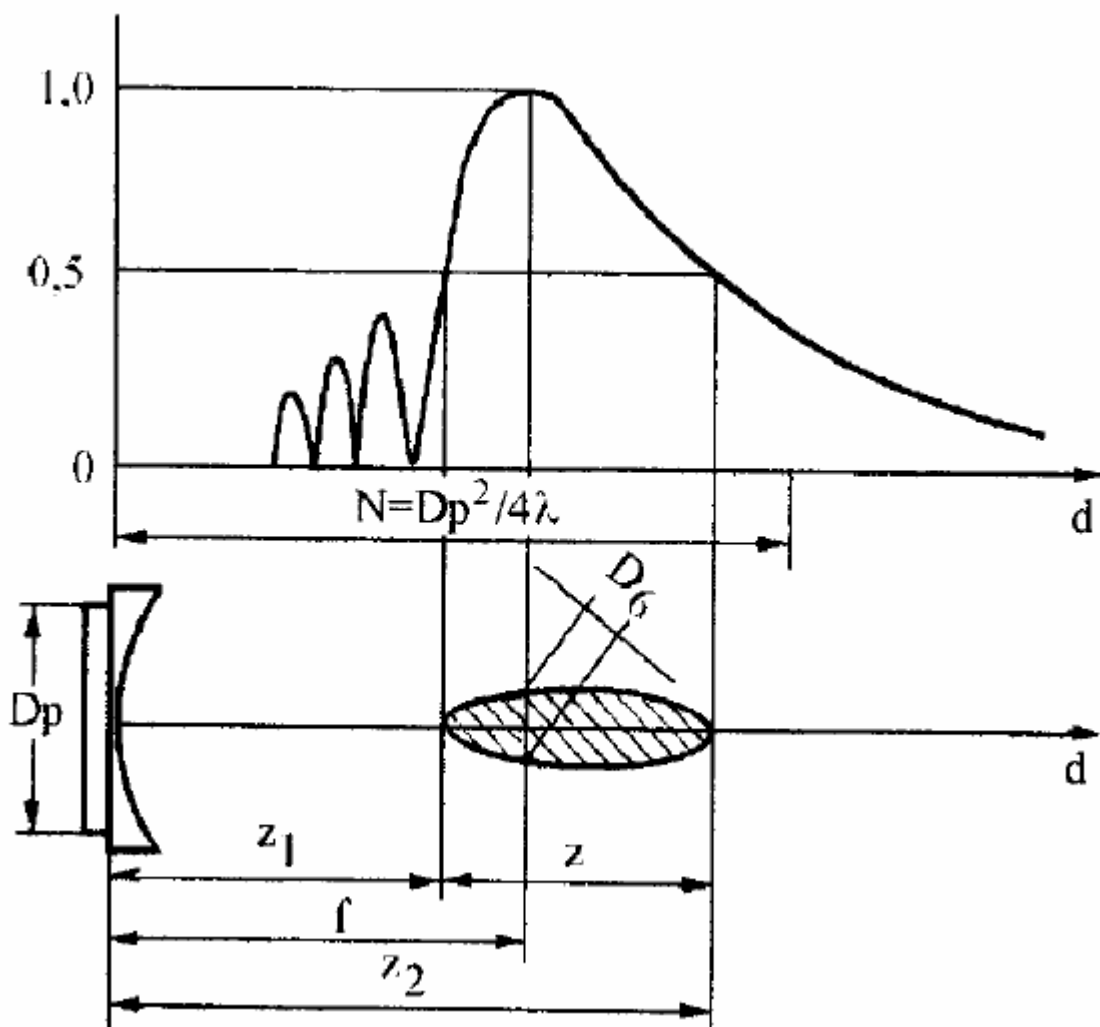


Fig. 20. Caracteristicile geometrice ale petei unui câmp focalizat

4.4.1. Focalizarea cu traductor sferic.

La un traductor sferic presiunea axială se exprimă printr-o lege hiperbolică de forma:

$$p = p_0 \frac{2}{1 - \frac{d}{r}} \sin \left[\frac{\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{(d-h)^2 + \frac{D_p^2}{4}} - d \right] \quad (105)$$

unde:

$$h = r - \left(r^2 - \frac{D_p^2}{4} \right)^{1/2} \quad (106)$$

iar r reprezintă raza de curbură a traductorului sau distanța focală optică. Se pune în evidență dependența presiunii, atât de funcția sinusoidală a factorului de difracție, cât și de factorul geometric.

Pentru valori $D_p/\lambda = 10 \dots 20$, dependența lui F funcție de raportul r/N este reprezentată în figura 21 pe baza relației dintre coeficientul de focalizare optică și acustică:

$$F_{\text{opt}} = \frac{f_{\text{opt}}}{N} = \frac{f/N}{1 - (f/N)^2} = \frac{F}{1 - F^2} \quad (107)$$

4.4.2. Focalizarea cu lentilă concavă.

Se realizează de regulă cu o lentilă intermediară din plexiglas folosită și ca piesă de cuplare. Distanța focală optica este dată de formula:

$$f_{opt} = \frac{r}{1 - \frac{v_2}{v_1}} \quad (108)$$

Presiunea maximă axială se calculează cu ajutorul relației:

$$p = p_0 \frac{2}{1 - \frac{d}{d_0}} \sin \left[\frac{\pi}{\lambda} \sqrt{(d-h)^2 + \frac{D_p^2}{4}} - d + \frac{v_2}{v_1} h \right] \quad (109)$$

unde:

$$d_0 = \frac{h^2 \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] + a^2}{2h \left(1 - \frac{v_2}{v_1} \right)} \quad (110)$$

a este distanța parcursă în apă între traductor și lentilă, v_2 viteza de propagare în apă (lichid), iar v_1 - viteza de propagare în lentilă.

Amplitudinea relativă a semnalului p_{max}/p_0 variază în zona focalizată cu mărimea coeficientului de focalizare. Pentru valori $D_p/\lambda = 10...20$, dependența $F=f(p_{max}/p_0)$ este reprezentată în figura 22

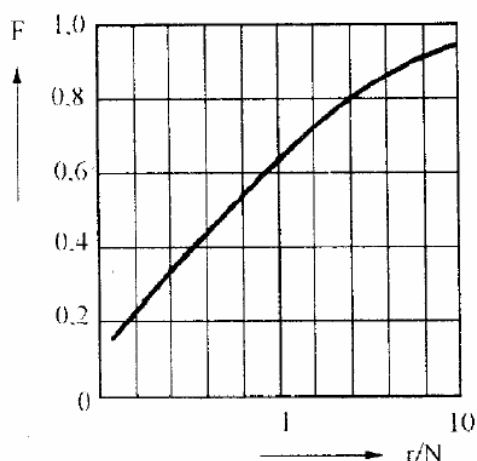


Fig. 21. Dependența coeficientului de focalizare de raza de curbură relativă a traductorului

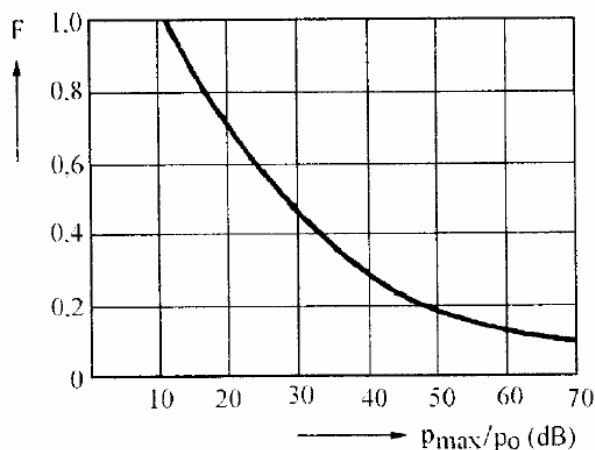


Fig. 22. Legătura dintre coeficientul de focalizare și presiunea câmpului de ultrasunete

Comparând efectele produse în cele două variante de focalizare a câmpului de ultrasunete, în ipoteza menținerii constante a parametrilor geometrici h , r și D_g/λ , rezultă coeficienți de focalizare superiori în varianta cu traductor convergent.

În concluzie, cu augmentarea focalizării (micșorarea coeficientului de focalizare), se mărește în mod simțitor amplitudinea semnalului reflectat (presiunea), potrivit relațiilor (105) și (109) și scade concomitent distanța focală acustică. Totodată are loc o ușoară alungire a petei focale. Focalizarea provoacă efecte concludente la valori $F < 0,6$. La

focalizări $F < 0,3$, diferențele dintre distanțele focale optice și acustice ale traductorului, se situează sub 10%.

4.5. Sonograma palpatorului

Evoluția longitudinală (în adâncime) a profilului transversal al fasciculului de unde, conturat prin variația cu -6 dB (scăderea la jumătate) a presiunii maxime axiale, poartă denumirea de sonogramă. Sonograma se construiește la fiecare palpator în parte și furnizează următoarele informații necesare pentru alegerea palpatorului:

- extinderea zonei moarte;
- mărimea câmpului apropiat;
- distanța (zona) de maximă focalizare în apă sau în solide;
- divergența fasciculului;
- puterea de rezoluție, exprimată prin dimensiunea reflectorului minim detectabil.

În figura 23, sunt exemplificate sonogramele unor palpatoare normale și înclinate monocristal, respectiv a unui palpator focalizat cu dublu cristal. După cum rezultă și din figura 15, sonograma comportă trei zone: o zonă de convergență, o zonă de focalizare, unde gradul de decelabilitate este maxim, precum și o zonă divergentă.

În zona de convergență la palpatoarele monocristal este caracteristică și zona moartă, distanță de la care datorită suprapunerii semnalului reflectat peste semnalul de emisie nu este posibilă detectarea discontinuităților.

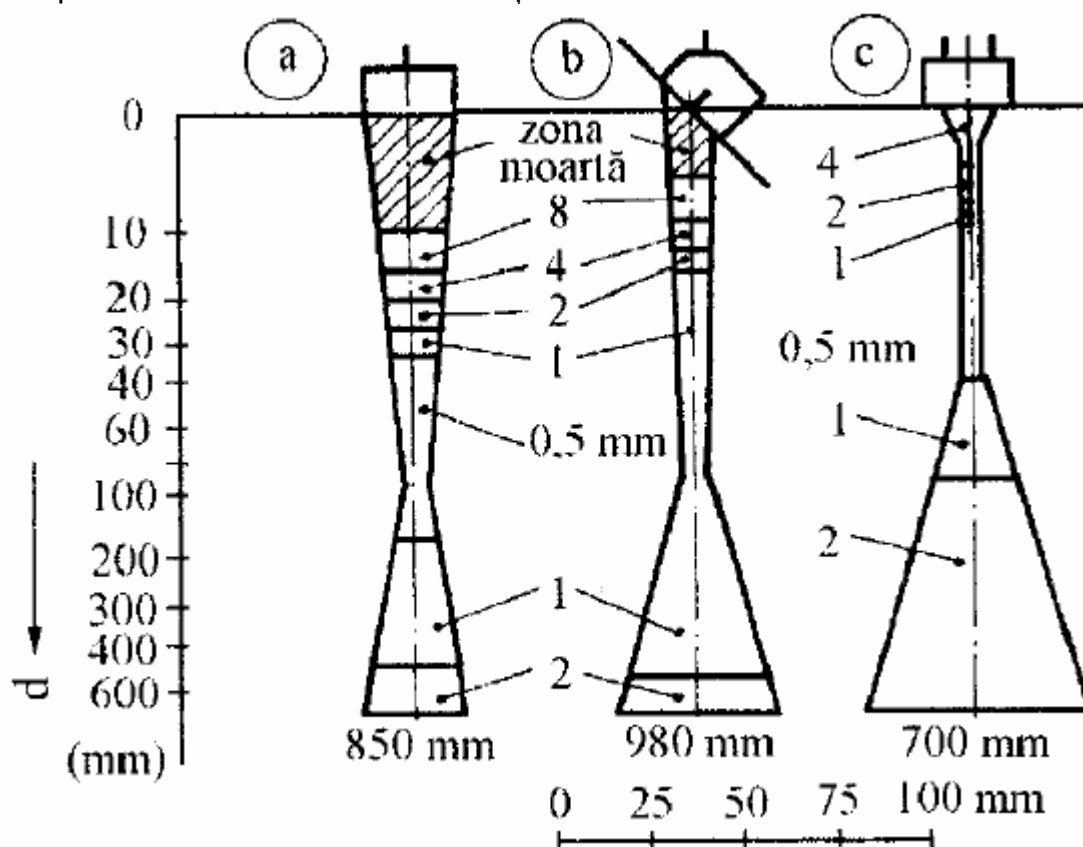


Fig. 23. Sonograma unor palpatoare: a) normale cu $D_p=24$ mm, $f=4$ MHz și $\alpha=4$ dB/m; b) înclinate $S_p=20 \times 22$ mm², $\beta=45^\circ$, $f=2$ MHz și $\alpha=8$ dB/m; c) cu dublu cristal focalizat $D_p=21$ mm, $f=4$ MHz, $\alpha=4$ dB/m

Palpatoarele care lucrează prin transmisie (cu dublu cristal) nu prezintă zonă moartă, iar câmpul lor apropiat nu poate fi definit în mod corespunzător. Sensibilitatea maximă este în zona de suprapunere a câmpurilor celor două traductoare.

4.6. Semnalul reflectat

Un fascicul de unde plane întâlnind o discontinuitate, de pildă un spațiu gazos plan perpendicular cu diametru echivalent $D_a < D_p$ produce, potrivit paragrafului 3.2. o reflexie parțială a acestuia pe aceeași direcție. Folosind relația (94), presiunea unei unde emise în câmpul îndepărtat de palpator, $d > N$ este :

$$p = p_0 \frac{\pi}{d} \cdot \frac{D_p^2}{4\lambda} \quad (111)$$

Această presiune poate fi considerată aproximativ egală cu presiunea inițială a unei reflectate de suprafața reflectorului (discontinuității) p_{OR} , deoarece diferențele de fază pot fi considerate nule, iar $c_R = 1$. Ca urmare, presiunea unei recepționate pe suprafața palpatorului va fi:

$$p_R = p_{OR} \frac{\pi}{d} \cdot \frac{D_d^2}{4\lambda} = p_0 \frac{\pi}{d} \cdot \frac{D_p^2}{4\lambda} \cdot \frac{\pi}{d} \cdot \frac{D_d^2}{4\lambda} = p_0 \frac{\pi^2}{d^2} \cdot \frac{D_p^2 \cdot D_d^2}{16\lambda^2} \quad (112)$$

În exemplul din figura 24, dacă reflectorul se află la distanța $d_E = 3N$ de emițător, unde $p_e = p_{OR}$, potrivit relației (112) receptorul, unde $p = p_R$, Se va găsi la distanța $d_R = d_E^2 = 9N$.

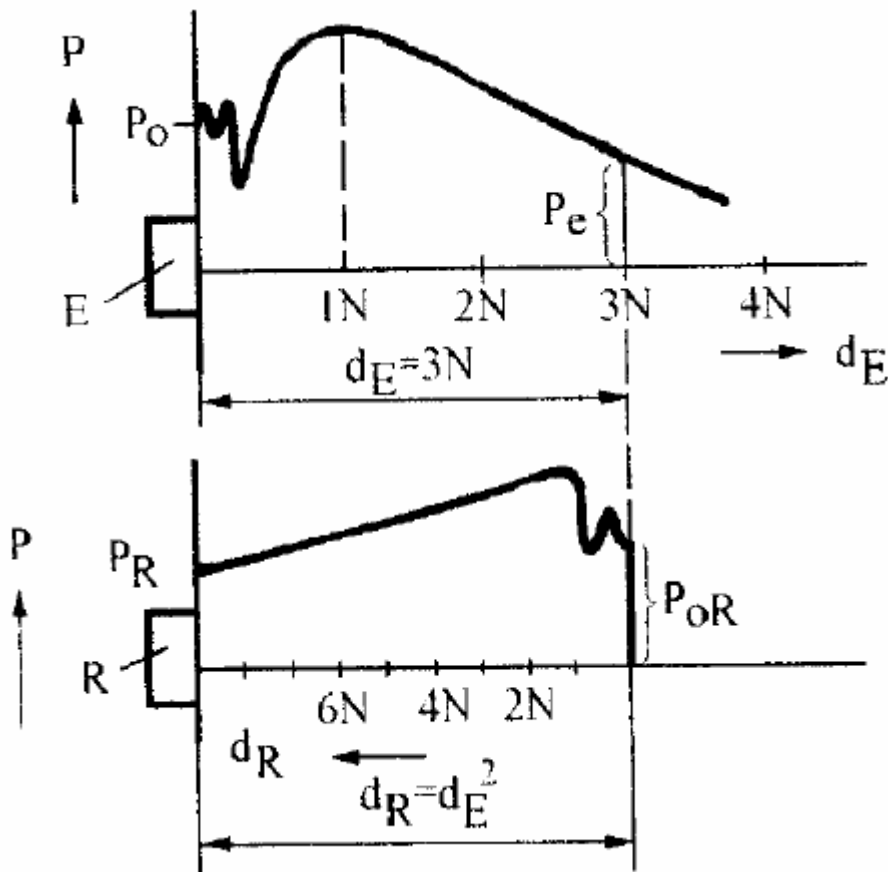


Fig. 24. Variația presiunii unde incidente și reflectate

În cazul în care defectul plan perpendicular pe axa fasciculului la distanța $d > N$ obturează integral secțiunea fasciculului, adică $D_d > D_p$, se produce o reflexie totală, iar presiunea recepționată de palpator va corespunde unui parcurs dublu ($2d$):

$$p_R = p_0 \frac{\pi}{2d} \cdot \frac{D_p^2}{4\lambda} = p_0 \frac{\pi}{2d} \cdot N \quad (113)$$

Spre deosebire de cazul precedent ($D_d > D_p$), în acest caz nu vor mai avea loc fenomene specifice Fresnel în imediata vecinătate a reflectorului.

4.7. Diagrama DAM – distanță – amplitudine – mărime

Dacă în locul presiunii se măsoară amplitudinea (înălțimea) semnalului reflectat de la defect H_R , precum și amplitudinea semnalului provenit de la suprafața posterioară a unei plăci (ecou de fund), H_0 , raportul presiunilor din relația (113) poate fi înlocuit cu raportul amplitudinilor:

$$\frac{H_R}{H_0} = \frac{p_R}{p_0} = \frac{\pi N}{2d} \quad (114)$$

Introducând următoarele mărimi criteriale adimensionale:

- distanța relativă sau redusă

$$D = \frac{d}{N},$$

- mărime relativă sau redusă:

$$M = \frac{D_d}{D_p},$$

unde D_d reprezintă diametrul echivalent al discontinuității căutate, amplitudinea sau amplificarea relativă a semnalului de defect

$$A = \frac{H_R}{H_0}$$

din relația (112) rezultă:

$$A = \frac{\pi^2}{d^2} \cdot \frac{D_p^2}{4\lambda} \cdot \frac{D_p^2}{4\lambda} \cdot \frac{D_d^2}{D_p^2} = \pi^2 \frac{M^2}{D^2} \quad (115)$$

Relația (115) este valabilă în următoarele condiții: $d \leq N$; $D_d < D_p$ și $1 < D_a$. În cazul în care $D_d > D_p$, din relația (114) se obține:

$$A = \frac{\pi}{2D} = \frac{\pi D_p^2}{8\lambda d} \quad (116)$$

Particularizând relația (94), pentru domeniul câmpului apropiat ($d < N$), se ajunge la următoarele rezultate:

$$\text{- dacă } D_d < D_p \quad A = M^2 \quad (117)$$

$$\text{- dacă } D_d \geq D_p \quad A = 1 \quad (117')$$

Transpunerea grafică a relației (115) este cunoscută sub denumirea de diagrama DAM- distanță - amplitudine-mărime relativă. Aceasta se obține sub forma unei familii de curbe reprezentând variația amplitudinii relative a semnalului provenit de la discontinuitate A , respectiv a sporului de amplificare necesar A_{nec} (dB), în funcție de distanța relativă D , menținând ca parametru mărimea redusă $M = \text{const}$. Așa cum rezultă în mod principal din figura 25, diagrama este limitată superior de curba $D_a = D_p$, ($M=1$), căreia la distanța $d=0$ îi corespunde amplificarea $A=0$. Deasupra acesteia, segmentul de dreaptă $D_e = \infty$ ($M=\infty$), reprezintă ecoul de fund provenit de la o suprafață plană nelimitată în raport cu suprafața palpatorului.

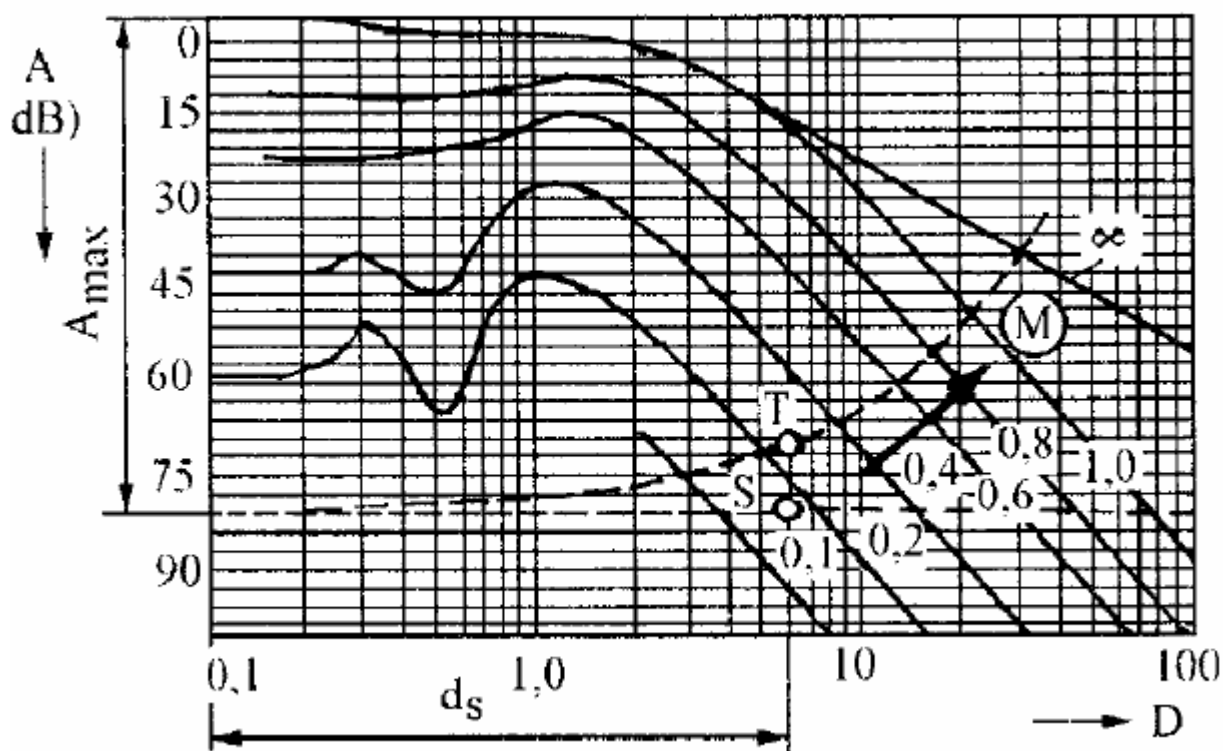


Fig. 25. Diagrama DAM – distanță – amplitudine - mărime

Amplificarea necesară A_{nec} pentru ca semnalul de la o anumită discontinuitate să ajungă egal cu semnalul de referință crește, pe măsura micșorării suprafeței discontinuității. Acest spor de amplificare este reprezentat pe ordonata diagramei.

Cum fiecare tip de aparat posedă o anumită capacitate de amplificare, rezultă că, la limită, capacitatea de decelare a discontinuităților foarte mici sau a discontinuităților mici situate la distanțe mari este limitată și ea, ceea ce în figura 25 este reprezentat prin linia întreruptă de la partea inferioară. Amplificarea maximă și distanța discontinuității (reflectorului), definește teoretic diametrul echivalent minim al discontinuității ce poate fi decelat la acea distanță (de exemplu punctul S situat la distanța d_s).

Diagramele sau scalele DAM se construiesc individual pentru fiecare tip de palpator (diametru D_p , unghi de incidență β , și-frecvență f), material și domeniu de examinare și se montează pe ecranul defectoscopului. Ele permit localizarea operativă a reflectorilor în câmpul îndepărtat ($d > N$) și determinarea mărimii acestora.

Totodată se construiesc diagrame DAM normate pentru tipuri similare de palpatoare.

În figura 26 este prezentată diagrama DAM normată pentru palpatoare inclinate monocristal.

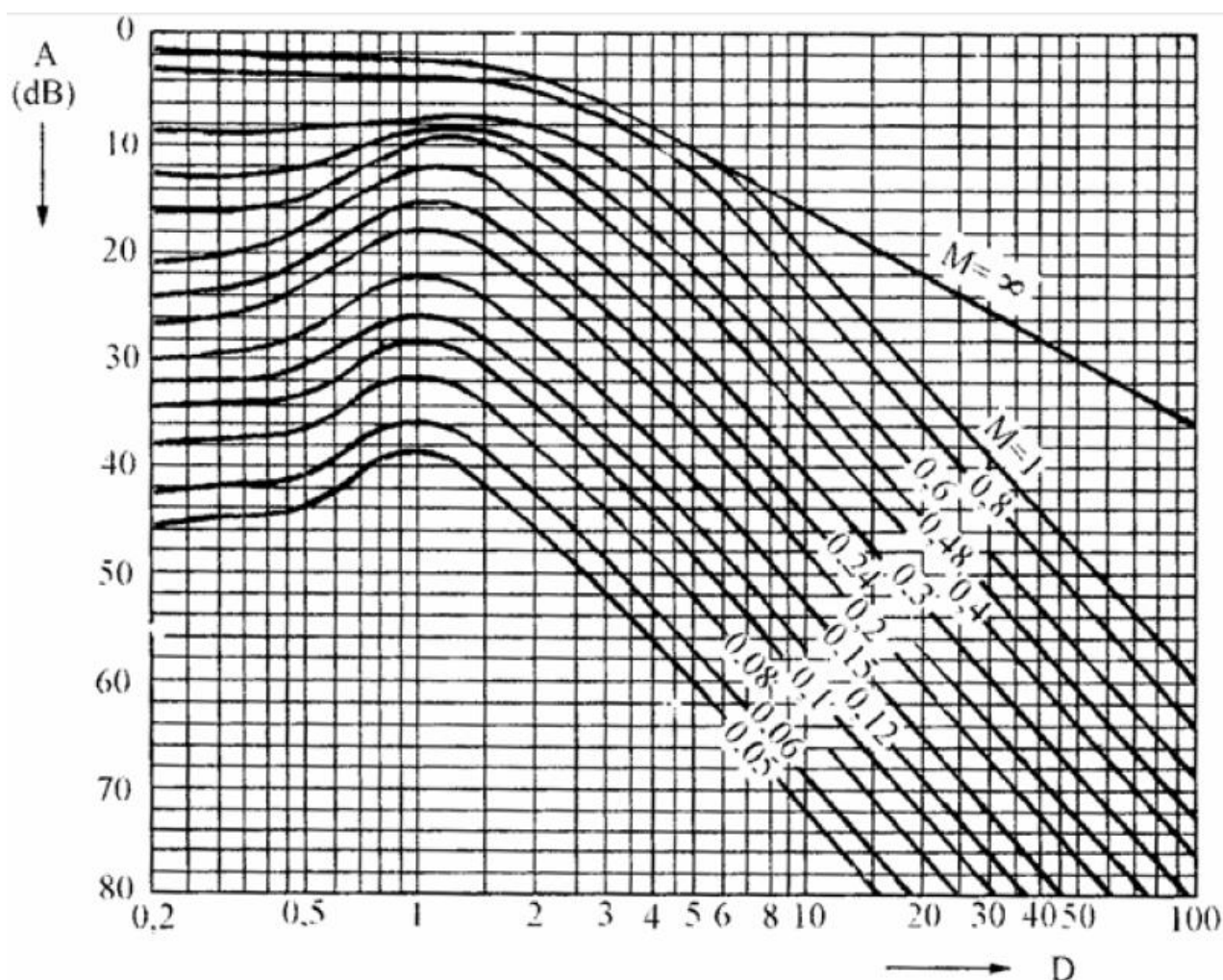


Fig. 26. Diagrama DAM normală

Diagrama DAM normală a fost calculată folosind următoarele relații:

a. pentru distanța relativă sau redusă:

$$D = \frac{d + d_{ips}}{N} \quad (118)$$

unde distanța inițială a parcursului sonor în palpator este:

$$d_{ips} = l_{di} \frac{v_i}{v} \quad (119)$$

l_{di} fiind distanța inițială în (mm), v_i viteza de propagare în piesa de cuplare a traductorului, iar v - viteza de propagare în piesa de controlat (după caz v_L sau v_T).

b. pentru mărimea relativă sau redusă:

$$M = \frac{D_{echiv}}{D_p} \quad (120)$$

unde D_{echiv} , reprezintă diametrul unui reflector plan circular, orientat perpendicular pe direcția de propagare;

c. pentru amplificarea relativă:

$$A = 20 \log \frac{|H_R|_{D \rightarrow \infty}}{|H_{D_{echiv}}|_D} \quad (121)$$

unde H_R reprezintă înălțimea ecoului (semnalului de fund) de la un reflector plan de mărime infinită în raport cu diametrul efectiv al palpatorului D_p iar H_{Pechiv} înălțimea semnalului de la un reflector plan circular de diametru D_{echiv} .

4.8. Corecția de atenuare

Amplitudinea semnalului reflectat reprezintă o măsură a intensității fasciculului transmis de către o discontinuitate numai dacă factorii de influență independenți sunt controlați, compensați sau anihilați. Principalii factori de influență sunt: atenuarea energiei ultrasunetelor datorită fenomenelor de difuzie și absorbție la nivelul granulației structurale a materialului supus examinării, exprimați prin relațiile (73-76), precum și calitatea cuplajului acustic dintre palpator și piesa examinată, care determină așa - numitele pierderi prin transferul undelor dintr-un mediu într-altul. Prin urmare, în vederea evaluării și interpretării corecte a semnalelor de pe ecranul aparatului se impune compensarea influenței exercitate de factorii menționați, în acest scop fiind necesară determinarea lor cantitativă.

În principiu, măsurătorile de atenuare au ca obiect materialul (piesa) supus controlului. Metodologiile de determinare a coeficientului de atenuare sunt tipizate, [232], [235] și diferențiate pe tipuri de unde (palpatoare) - $\alpha_L \neq \alpha_T$ - și tehnici de examinare.

4.8.1. La examinarea cu unde longitudinale se procedează astfel: se calibrează scara distanțelor, apoi se măsoară diferența de amplitudine (dB) între două ecouri de fund succesive AA, provenite de la distanțe s (mm) aflate în raportul 2:1, cu condiția $s > 3N$. Coeficientul de atenuare se exprimă în (dB/mm) prin:

$$\alpha = \frac{\Delta A - 6}{2s} \quad (122)$$

Dacă se folosesc scale DAM, se parcurge mai întâi operația de calibrare a scării distanțelor, iar apoi se măsoară diferența de amplitudine (dB) între două ecouri succesive situate la distanța s , ΔA , precum și diferența ΔA_{DAM} (dB) între punctele de pe curba limită a scalei DAM, conform figurii 27 (unde $D_d = D_p$) corespunzătoare distanțelor de la care s-a recepționat ΔA .

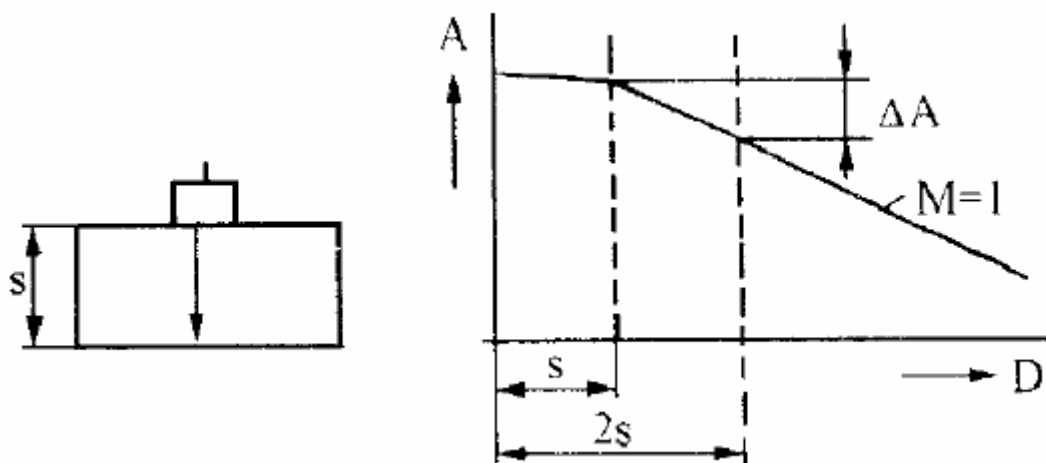


Fig. 27. Determinarea atenuării cu ajutorul diagramei DAM

Coeficientul de atenuare exprimat în (dB/mm) se calculează în acest caz cu relația:

$$\alpha = \frac{\Delta A - \Delta A_{DAM}}{2s} \quad (123)$$

4.8.2. La examinarea cu unde transversale se folosesc două palpatoare de 45° cuplate în transmisie. Succesiunea operațiilor este următoarea: se calibrează scara distanțelor folosind un singur palpator, apoi deplasând cele două palpatoare pe aceeași suprafață la o distanță corespunzătoare unui pas de examinare se caută maximizarea amplitudinii semnalului recepționat A_1 (dB), de la distanța exact măsurată x_1 (mm). Se repetă operația pentru o nouă poziție a celor două palpatoare corespunzătoare la doi pași de examinare, recepționându-se amplitudinea maximă A_2 (dB) de la distanța măsurată între palpatoare x_2 (mm). Coeficientul de atenuare (dB) se calculează cu relația:

$$\alpha = \frac{(A_1 - A_2) - 6}{2(x_2 - x_1)} \quad (124)$$

Dacă se folosesc scale DAM se procedează ca și în cazul precedent reținându-se în plus diferența în dB, ΔA_{DAM} de pe curba limită a scalei DAM, ($D_d = D_p$), corespunzătoare distanțelor x_1 și x_2 . Coeficientul de atenuare (dB) se stabilește cu relația:

$$\alpha = \frac{(A_1 - A_2) - \Delta A_{DAM}}{2(x_2 - x_1)} \quad (125)$$

Ridicând curba de atenuare pentru întreg domeniul de distanțe, relația (69), reprezentată cu linie întreruptă în figura 25, se definește la distanța d_s defectul efectiv minim ce poate fi decelat în piesa reală (punctul T din figura 25). Evident, se observă că $D_{dT} > D_a$, în diagramele 28 și 29 sunt prezentate după [60] curbele de atenuare, reprezentând sporurile de amplificare necesare pentru compensarea pierderilor în funcție de domeniul de frecvență utilizat, mărimea câmpului apropiat și distanța redusă. Scalele DAM au înscrise sporurile de amplificare pentru compensarea atenuării, care se operează după calibrarea semnalelor în raport cu reperele indicate: R_1 în cazul calibrării cu ajutorul blocului A_1 , [242], R_2 în cazul blocului A_2 , [270].

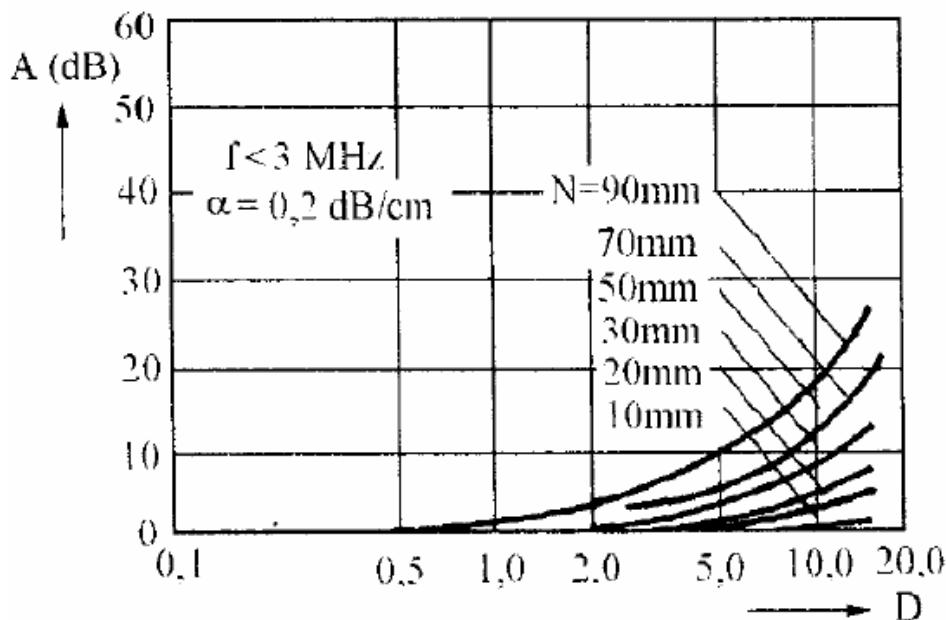


Fig. 28. Corecții de atenuare în oțel la frecvențe $f < 3$ MHz

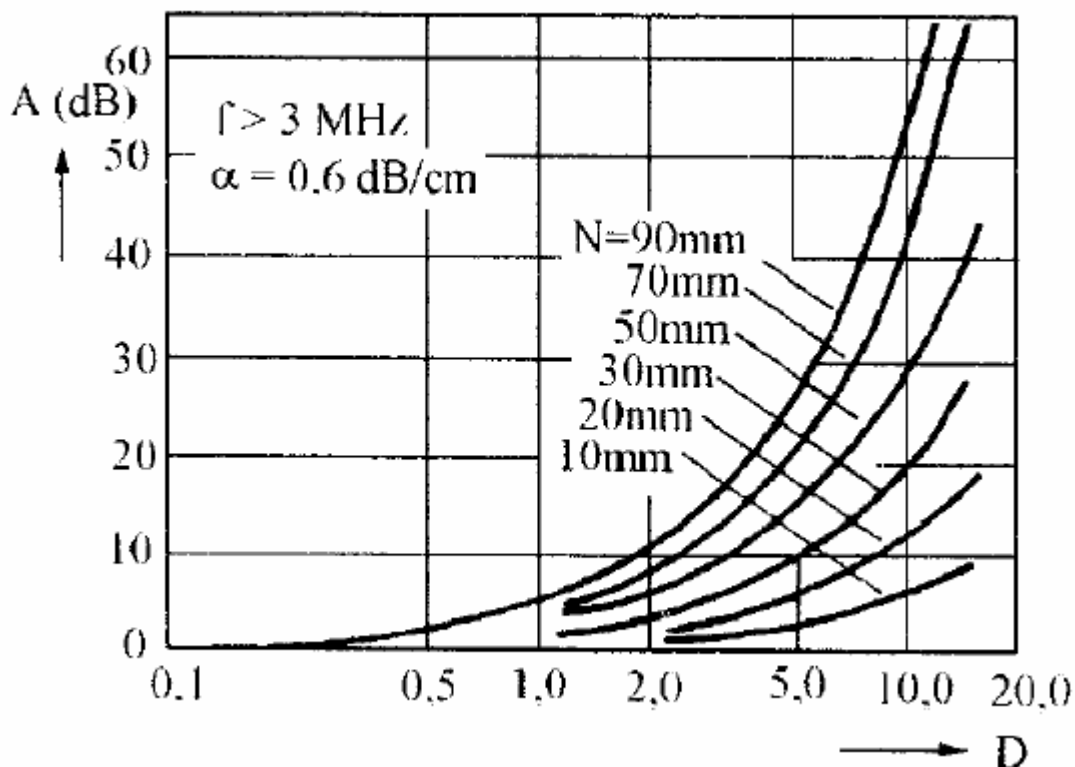


Fig. 29. Corecții de atenuare în oțele la frecvențe $f \geq 3 \text{ MHz}$

Compensarea diferențelor de cuplare a palpatorului pe piesa de controlat se efectuează potrivit prevederilor de la paragraful 4.10.

Folosirea scalelor DAM la defectoscoapele obișnuite este admisă numai cu suprimarea (atenuarea) decuplată, deoarece la aceste aparate nu se asigură o reducere liniară, proporțională a semnalelor de diferite amplitudini, ceea ce ar avea ca efect, în cazul neglijării acestei prevederi, o evaluare eronată a mărimii discontinuității, în sensul subevaluării ei.

Defectoscoapele de construcție recentă permit atenuarea selectivă prin introducerea unui bloc de suprimare parțială a semnalelor, care nu depășesc un anumit nivel. Astfel, concomitent cu micșorarea proporțională a semnalelor în vederea încadrării în ecranul defectoscopului se elimină și zgomotul de fond.

În scopul evitării dificultăților pricinuite de fenomenul atenuării undelor în material, aparatele sunt prevăzute cu un bloc suplimentar de compensare a pierderilor, care variază logaritmicește cu distanța parcursului sonor. Cu ajutorul blocului respectiv se introduce coeficientul de atenuare cunoscut sau determinat, ce trebuie compensat, astfel încât amplitudinea semnalelor provenite de la reflectorii identici situați la distanțe diferite să fie egală, deci independentă de distanță. În această situație, familiile de curbe ale scalelor DAM devin orizontale, paralele.

Folosirea scalelor DAM la examinarea de pe suprafețe curbe este afectată de abateri de localizare și evaluare a mărimii discontinuităților. Acestea sporesc pe măsura micșorării razei de curbura a suprafețelor de examinare, limitându-se astfel posibilitățile de utilizare.

4.9. Cuplanți și suprafețe de transfer

Pentru a asigura un control corespunzător, suprafața de examinare trebuie să fie uniformă, lipsită de oxizi, exfolieri, rizuri și alte imperfecțiuni, care afectează cuplarea cu transductorul piezoelectric. Mărimea medie a micro-neregularităților admise este de cca

10 μm , valorile maxime admise fiind de 40 μm . Când se folosesc reflexii intermediare, condițiile respective trebuie extinse și pentru suprafețele de reflexie.

Cuplanții asigură transferul corespunzător al energiei în piesa controlată, prin eliminarea aerului dintre suprafața piesei și suprafața palpatorului. Se folosesc straturi intermediare, perne de lichid și tehnica imersiunii. Cuplanții intermediari se aleg în funcție de gradul de prelucrare a suprafeței de palpate:

- glicerină, apă, ulei mineral sau amestec 50% H_2O + glicerină, la suprafețe fin prelucrate ($R_a = 3 \div 10 \mu\text{m}$);

- valvolină sau ulei, la suprafețe mediu prelucrate ($R_a = 10 \div 25 \mu\text{m}$);

- unsoare consistentă, la suprafețe slab prelucrate sau neprelucrate, ($R_a = 30 \div 150 \mu\text{m}$).

Au fost realizați cuplanți speciali cu vâscozitate controlată într-un domeniu larg de temperatură ($0 \dots +150^\circ \text{C}$) care, datorită faptului că nu curg, se pretează la controlul de pe suprafețe înclinate (verticale). Aceștia asigură totodată neutralitatea chimică ($\text{pH} = 7 \div 7,5$), lipsa sulfului și a halogenilor și pot fi îndepărtați ușor chiar cu apă. În cazul folosirii tehnicii imersiunii în apă, tehnică din ce în ce mai larg răspândită pentru că se pretează la automatizarea controlului ultrasonic al semifabricatelor și pieselor cu geometrie constantă, cuplantul (apa) trebuie să conțină inhibitori de coroziune pentru evitarea corodării ulterioare a acestora. Pentru controlul defectoscopic și a măsurătorilor de grosimi pe suprafețe cu temperaturi înalte de până la $500 \div 600^\circ \text{C}$, se folosesc paste speciale cu vâscozitate foarte ridicată.

La controlul echipamentului nuclear, în scopul evitării unor fenomene de coroziune, conținutul în impurități de sulfuri și halogeni în cuplanți organici este limitat la 1%, [73]. În cazul folosirii apei sau amestecurilor cu apă se impune deionizarea.

4.10. Corecția de transfer

Corecția de transfer reprezintă surplusul de amplificare necesar pentru compensarea diferenței pierderilor de energie ce au loc în stratul limită dintre suprafața palpatorului și suprafața piesei examinate, iar pe de altă parte în vederea compensării diferenței de rugozitate dintre suprafața piesei și suprafața prelucrată prin rectificare a blocului de calibrare, folosit la reglarea amplificării (sensibilității). La un material dat, aceste pierderi depind de calitatea cuplajului acustic, fiind în mod esențial influențat de gradul de rugozitate și de omogenitate a suprafețelor piesei examinate (suprafața de emisie și suprafața de reflexie a fasciculului de unde). În cazul suprafețelor laminate, corecția de transfer este de 5- 6 dB. Dacă suprafețele sunt prelucrate prin așchiere, sporul de amplificare poate fi micșorat.

Corecția de transfer admisă este de ± 6 dB la clasele inferioare de control, respectiv de ± 3 dB la clasele superioare, [266]. Când diferențele de cuplaj sunt mai mari, se impune ameliorarea gradului de prelucrare a suprafeței. Corecția de transfer se determină experimental cu ajutorul palpatoarelor efectiv utilizate la control. După [232], metodologic se procedează astfel. Se calibrează scara distanțelor, după care se măsoară diferența în dB, AA, între amplitudinea primului ecou provenit de la distanța $d_1 = 25 \text{ mm}$, a blocului de calibrare A_1 , respectiv a primului ecou provenit din piesa de controlat de la distanța d_2 . Se corectează această diferență AA cu atenuarea α produsă pe distanța d_2 , obținându-se:

$$\Delta A_c = \Delta A + 2\alpha \cdot d_2 \quad (126)$$

Urmează să se determine de pe curba limită a scalei DAM, $D_d = D_p$, diferența de amplitudine ΔA_{DAM} în domeniul de distanțe $d_2 - d_1$. Corecția de transfer se exprimă în dB prin:

$$C_1 = \Delta A_c - \Delta A_{DAM} \quad (127)$$

4.11. Geometria examinării și corespondența cu semnalele reflectate în reprezentare A

Amplitudinea semnalului reflectat de către o discontinuitate este o funcție complexă dependentă de următorii factori: energia fasciculului emis, directivitatea acestuia, mărimea și orientarea planului discontinuității, gradul de rugozitate a suprafeței discontinuității (defectului), pierderile de cuplare acustică a palpatorului pe piesă, atenuarea fasciculului de ultrasunete prin absorbție și dispersie în material, gradul de obturare a altor discontinuități și imperfecțiuni, precum și de distanța parcursului sonor. Reprezentarea A, înfățișează pe ecranul aparatului relația dintre semnalul provenit de la o discontinuitate din material, (amplitudinea sa) și distanța la care se află acea discontinuitate, distanță proporțională cu durata parcursului sonor.

4.11.1. Examinarea cu unde longitudinale

Pentru început se consideră o piesă cu suprafețe plan paralele cu diferite forme de discontinuitate (figura 30), urmărindu-se evidențierea parcursului ultrasunetelor de la palpator în piesă, modalitățile de reflexie a acestora și de afișare pe ecranul aparatului. După cum rezultă din figura 30a, în cazul în care în piesă nu există imperfecțiuni, fasciculului divergent este reflectat de suprafața posterioară, pe ecranul aparatului afișându-se semnalul de emisie și semnalul undei reflectate cunoscut și sub numele de ecou de fund. Dacă discontinuitatea este plană, cvasiparalelă cu suprafața de emisie și depășește diametrul fasciculului, figura 30b, unda se va reflecta în întregime de la suprafața discontinuității, iar pe ecranul aparatului, alături de semnalul de emisie (în stânga) se vor afișa semnalele primei reflexii (1) și a celor repetate (2), (3) etc.. Dacă suprafața plană a discontinuității este înclinată, cuprinzând întreaga secțiune a fasciculului ca în figura 30c, unda se va reflecta integral, pe ecranul aparatului rămânând afișat doar semnalul de emisie. În cazul unei discontinuități plane orientate pe direcția de emisie conform figurii 30d, unda se va reflecta integral de pe suprafața posterioară a piesei, deoarece proiecția în plan transversal a discontinuității este neglijabilă în raport cu suprafața fasciculului de unde. În cazul unui defect circular mare, ca în figura 30e, care obturează complet fasciculului, undele se reflectă dispersiv, energia recepționată de palpator fiind relativ mică. Pe ecranul aparatului se vor afișa semnalele de reflexie (ecourile) succesive.

Dacă discontinuitatea plan paralelă cuprinde doar parțial secțiunea fasciculului, ca în figura 30f, o parte din undă se propagă până la suprafața posterioară a piesei (distanța 1), dând naștere ecoului de capăt sau de fund, afișat pe ecran la distanța p, iar o altă parte se va reflecta de mai multe ori de la distanța d la care se află discontinuitatea, dând naștere pe ecran semnalelor afișate la distanțe proporționale n, 2n, etc, Din proporțiile care se scriu se deduce poziția necunoscută a discontinuității:

$$d = \frac{n}{p} \quad (128)$$

La o discontinuitate plană înclinată, care obturează parțial fasciculul, ca în figura 30g, o parte din unde se reflectă și nu mai ajung la palpator, iar o parte se reflectă de pe suprafața posterioară. Dacă discontinuitatea este de formă sferică și obturează parțial fasciculul, ca în figura 30h, o mică parte din energie se reflectă de la discontinuitate spre palpator, producând semnale succesive 1, 2 de amplitudine relativ mică în comparație cu ecoul de fund. Raportul n/p este scara de reprezentare.

În cazul unei grupări dense de imperfecțiuni, sau în cazul unei structuri grosolane, care obturează în întregime fasciculul, figura 30i, undele sunt dispersate, pe ecranul aparatului evidențiindu-se semnalul de emisie și semnale difuze sub formă de „iarbă ultrasonică”, care nu depășesc semnificativ nivelul zgomotului de fond al aparatului.

Dacă suprafața defectului plan, care obturează în întregime fasciculul este neregulată, se va produce o reflexie mai difuză, semnalele succesive 1, 2 vor apărea pe ecran sub forma prezentată în figura 30j. Dacă, în plus, suprafața neregulată este și înclinată față de direcția fasciculului, pe ecranul aparatului se va afișa un tren neregulat de semnale de amplitudine variabilă provenite de la diferite adâncimi, figura 30k. Tocmai neregularitatea și rugozitatea suprafețelor discontinuității explică posibilitatea reflectării spre palpator a unei părți din energie, deci recepționarea semnalului de defect, chiar în cazul unor suprafețe defavorabil orientate în raport cu direcția de propagare a undelor.

În cazul discontinuității plane cu suprafață neregulată, orientată pe direcția de emisie, pe ecranul aparatului se va afișa ecoul de fund, iar între semnalul de emisie și ecoul de fund se va afișa iarba ultrasonică provenită de la reflexiile difuze captate de palpator. Dacă discontinuitatea volumică prezintă o suprafață cu pronunțate neregularități, ca în figura 30m, datorită reflexiilor multiple, pe ecranul aparatului se va afișa un tren de semnale de amplitudine variabilă, decalate în timp. În cazul imperfecțiunilor cu suprafețe neregulate, care obturează parțial fasciculul de unde, figurile 30n, 30o și 30p, pe ecranul aparatului se vor afișa ecourile de capăt sau de fund și iarba ultrasonică provenită în urma reflexiei difuze de pe aceste suprafețe. Controlul prin transmisie, utilizând un palpator de emisie pe suprafața frontală anterioară a piesei și unul de recepție pe suprafața frontală posterioară, conform dispunerii din figura 30r, în cazul prezenței unei discontinuități, care obturează parțial fasciculul de unde, pune în evidență un semnal de amplitudine micșorată.

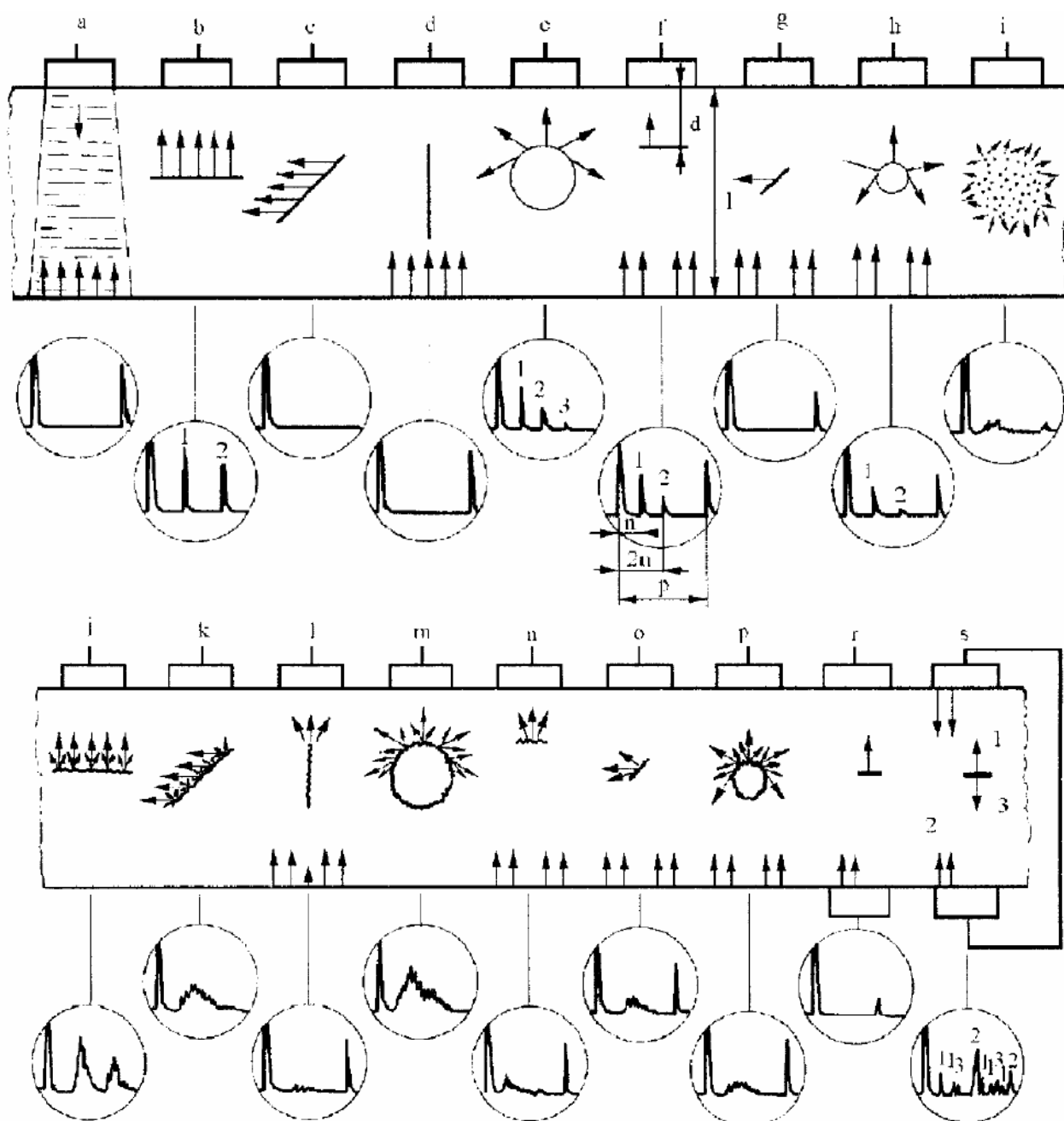


Fig. 30-1. Geometria examinării cu unde longitudinale și corespondența cu imaginea de pe ecran

Controlul prin reflexie cu două palpatoare de emisie - recepție de pe suprafețele frontale, marchează pe ecranul aparatului succesiunea de semnale prezentate în figura 30s. Semnalele 1, afișate la distanțe egale, provin de la reflexia pe discontinuitate a fasciculului, semnalele 2, de la propagarea și reflexiile multiple a suprafețelor anteroposterioare ale piesei, iar semnalele 3 afișate la distanțe egale dar mai mari decât semnalele 1, de la reflexiile de pe discontinuitate a undei propagate de la palpatorul de pe suprafața posterioară. Cum interpretarea este anevoioasă, această modalitate de control se evită ori de câte ori este posibil.

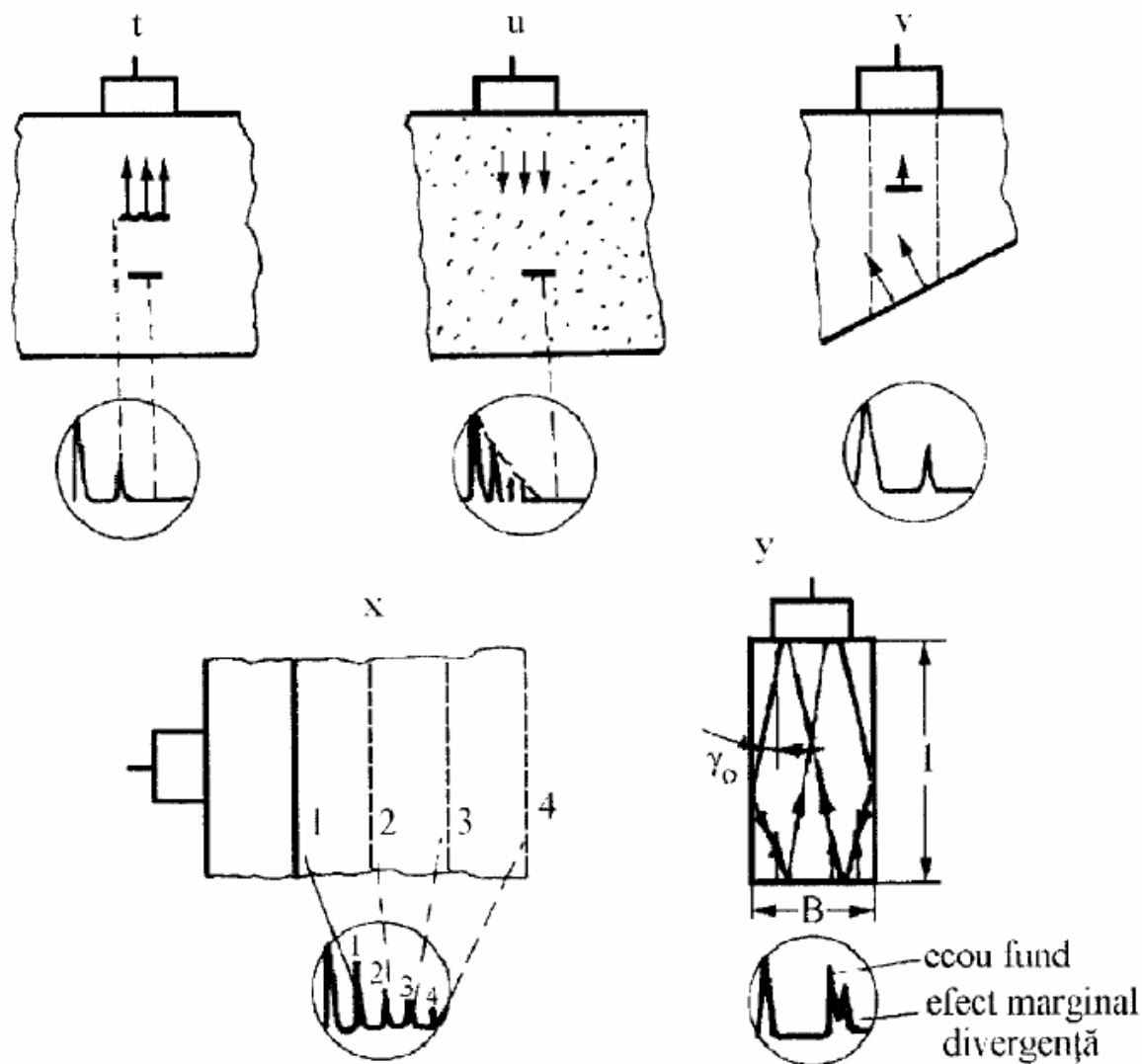


Fig. 30-2 Geometria examinării cu unde longitudinale și corespondența cu imaginea de pe ecran

În cazuri speciale de suprapunere a două discontinuități și/sau defecte, fasciculul de unde emis din poziția t din figura 30, în care discontinuitatea mai mică se situează în umbra defectului mai mare, face ca pe ecranul aparatului să se afișeze numai semnalul corespunzător defectului mai mare. Dacă palpatorul se așează în schimb pe suprafața inferioară, pe ecranul aparatului se vor afișa cu intensități diferite și în pozițiile corespunzătoare parcursului sonor, semnalele provenite de la ambele reflectoare.

Dacă discontinuitatea se află într-o piesă cu granulație grosolană, așa cum rezultă din figura 30u, există posibilitatea atenuării complete a fasciculului de unde înaintea parcurgerii distanței până la acea discontinuitate.

Dacă avem o discontinuitate având direcția perpendiculară pe undele longitudinale iar suprafața posterioară este înclinată, figura 30v, se va obține un semnal numai de la discontinuitatea respectivă.

La examinarea unor piese stratificate, lipite sau suprapuse cu un cuplaj acustic acceptabil, ca cea reprezentată în figura 30x, se vor afișa semnalele corespunzătoare poziției suprafeței limită.

Atunci când diametrul palpatorului este comparabil cu lățimea piesei, figura 30y, datorită divergenței și reflexiei parțiale a conului fasciculului de pe suprafețele laterale ale piesei, alături de ecoul de fund se formează și un semnal suplimentar, mai mult sau mai puțin distinct de ecoul de fund. Condiția necesară și suficientă pentru eliminarea acestui efect este:

$$\frac{B - D_p}{2l} \geq \operatorname{tg} \left[\arcsin \left(1,22 \frac{\lambda}{D_p} \right) \right] \quad (129)$$

4.11.2. Examinarea cu unde transversale

Controlul prin reflexie cu un singur palpator înclinat de emisie - recepție, trebuie să aibă în vedere divergența și atenuarea fascicului, figura 31 a. La detectarea directă a discontinuității, figura 31b, semnalul este mai puțin atenuat decât la detectarea prin reflexie de pe suprafața posterioară, redată de figura 31c. De aceea suprafața de reflexie trebuie să asigure prin gradul de prelucrare, aceleași calități ca și suprafața de examinare propriu-zisă, astfel încât și pierderile să fie cât mai mici posibile.

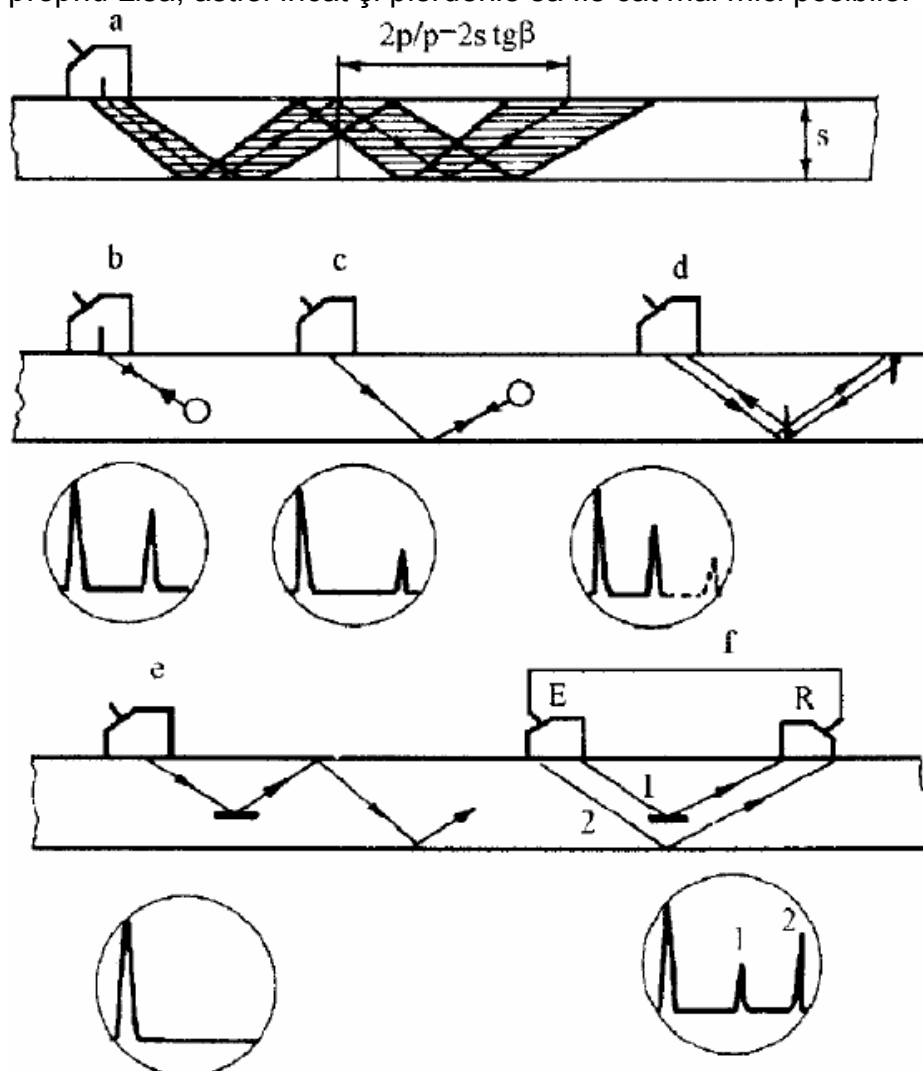


Fig. 31. Geometria examinării cu unde transversale și corespondența cu imaginea de pe ecran

Fisurile constituie buni reflectori. Cele longitudinale și de suprafață reflectă fasciculul ultrasonic direct prin rizuri, variații de curbura, etc., figura 31d. Fisurile paralele cu suprafața piesei reflectă cvasitotal fasciculului, așa încât dacă suprafața lor este perfect plană, pe ecranul defectoscopului nu se afișează semnalul, figura 31e.

Controlul prin transmisie folosind un palpator înclinat de emisie și unul similar pentru recepție ca în figura 31f, marchează pe ecranul aparatului pe lângă impulsul de emisie, semnalul 1 provenit de la discontinuitate și ecoul 2, de la suprafața posterioară.

5. METODELE DEFECTOSCOPIEI CU ULTRASUNETE

Defectosopia cu ultrasunete s-a dezvoltat în mod continuu căutând, atât soluții pentru rezolvarea unor probleme generale de control, cât și soluții la probleme punctuale ivite odată cu dezvoltarea tehnicilor de vârf. Metodele controlului cu ultrasunete se pot clasifica după următoarele criterii mai importante:

- a. regimul de emisie a undelor;
- b. regimul de preluare a semnalelor utile;
- c. modul de cuplare acustică a palpatorului;
- d. sistemul de reprezentare a indicațiilor, respectiv semnalelor de la discontinuități și defecte.

- După regimul de emisie a undelor ultrasonice în material, se deosebesc metodele care folosesc emisia continuă, ca în cazul rezonanței sau modulației de frecvență, respectiv metoda care întrebuințează emisia intermitentă cu impuls neintegrat sau integrat.

- După regimul de preluare a semnalelor se deosebesc metoda prin transmisie, când unul din palpatoare emite iar celălalt recepționează, ilustrat în figura 31f, respectiv metoda prin reflexie, atunci când unul și același palpator are dublu rol, atât de emisie, cât și de recepție, caz ilustrat prin toate pozițiile de examinare din figura 30.

Metoda prin reflexie sau metoda ecourilor multiple se folosește cu bune rezultate numai dacă reflectorii, inclusiv cei de defect, se află la distanțe care depășesc zona moartă (vezi paragraful 5.2). Metoda prin transmisie, la care funcțiile de emisie și de recepție sunt diferențiate în traductoare diferite, nu este tributară zonei moarte. În consecință, această metodă se aplică în toate cazurile când reflectorii se găsesc la distanțe mici, sub 10 mm de suprafața de emisie.

- După modul de cuplare acustică a palpatorului se deosebesc metoda obișnuită folosind un strat cuplant, pentru asigurarea transferului acustic de la traductor la piesă și metoda prin imersare, de regulă în apă, atunci când palpatorul și piesa nu se află în contact direct, iar transmiterea fasciculului are loc prin intermediul apei.

5.1. Metode analogice și metode numerice

Sistemul de reprezentare a indicațiilor semnalelor provenite din piesă de la imperfecțiuni și defecte, este cel mai important criteriu, deoarece el permite procesarea semnalelor și redarea cu ajutorul metodelor numerice. Printre cele mai consacrate sisteme se menționează: reprezentările A, B, C, D, precum și cele mixte cum sunt: P-scan, Zip-scan, reprezentarea T, etc.

Reprezentarea A, constă în reproducerea adâncimii de penetrare a undelor sau a distanței parcurse de unde. În această reprezentare pe orizontala ecranului aparatului se afișează distanța (timpul), iar pe verticala ecranului amplitudinea semnalului emis și a celui recepționat. Este cea mai consacrată modalitate de reprezentare, adoptată de cele mai multe tipuri de defectoscoape cu ultrasunete. Schița de principiu a funcționării reprezentării A, în sistem analogic, este ilustrată de figura 34.

Reprezentarea A se obține în orice poziție, direcție de examinare și cu orice tip de palpator.

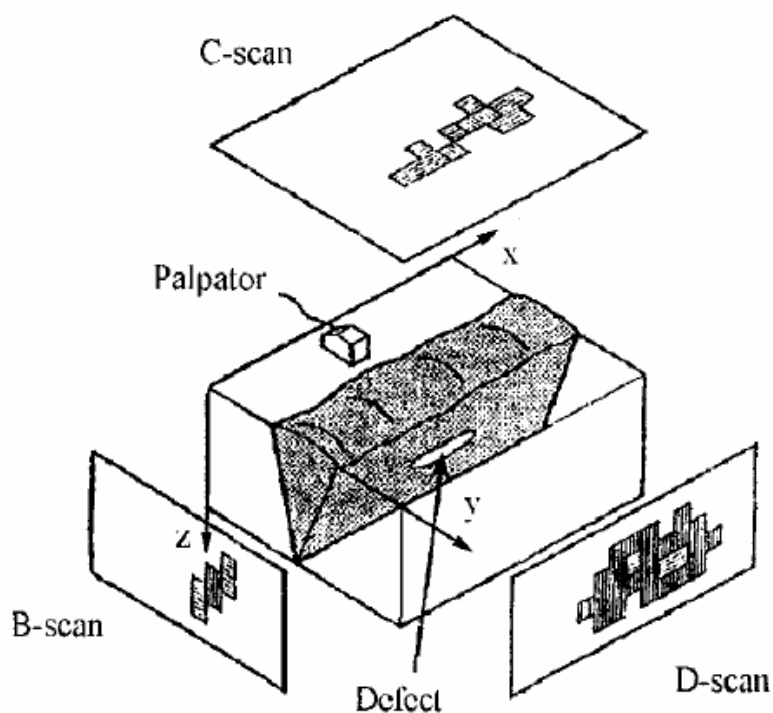


Fig. 32. Modalități de scanare și reprezentare a imaginii defectelor

Reprezentarea B. După cum rezultă din figura 32, reprezentarea B este secțiunea frontului de unde emise și a reflectorului într-un plan $Y - Z$, format de direcția de propagare a axei fasciculului de ultrasunete. În acest plan abscisa este proporțională cu coordonata Y a palpatorului, iar ordonata, proporțională cu timpul (distanța) de recepționare a semnalului din piesă. Dacă fasciculul de unde este normal pe planul de baleiaj al palpatorului, ordonata este proporțională cu Z , (grosimea), și în acest caz se obține vederea unei secțiuni transversale din piesă. Reprezentarea B este rar folosită dar simplu de aplicat deoarece este suficientă codificarea palpatorului înclinat pe o singură direcție de baleiaj, (direcția Y), ceea ce se obține cu ajutorul unui pantograf.

Domeniile de utilizare a imaginii B sunt: controlul produselor laminate și forjate, controlul îmbinărilor sudate în vederea localizării discontinuităților în adâncime, examinarea materialelor compozite, măsurarea adâncimii de călire. Ecografia medicală folosește de asemenea acest mod de vizualizare.

Reprezentarea C, constă în vizualizarea semnalelor ultrasonore dintr-o piesă într-un plan $X - Y$, figura 32, paralel cu suprafața baleiată. Este cea mai comună reprezentare în defectoscopia industrială, cunoscută și sub denumirea de cartografie. Acționând baza de timp a defectoscopului, devine posibilă înregistrarea prezenței discontinuităților limitat la zona de interes din profunzimea (adâncimea) piesei.

Imaginea este asemănătoare celei obținute în tehnica radiografică și permite evaluarea mărimii și densității discontinuităților. Ea se obține în urma unei baleieri, fie pe direcția X cu salt pe direcția Y , fie pe direcția Y cu salt (pas) pe direcția X . Imaginea C are largi aplicații la controlul tablelor și pieselor forjate pentru identificarea dublurilor și incluziunilor nemetalice, la controlul îmbinărilor sudate și lipite, a straturilor placate, la controlul materialelor compozite.

Reprezentarea D, constă din vizualizarea reflectorilor (discontinuităților) cuprinși într-un volum de material pe un plan $X - Z$, perpendicular pe suprafața de baleiaj, figura 32. Imaginea D este cea mai interesantă, deoarece permite identificarea componentelor lungimii și lățimii discontinuităților pe direcția grosimii piesei, furnizând elementele necesare aplicării criteriilor mecanicii ruperii materialelor. În această reprezentare,

abscisa este proporțională cu coordonata X a palpatorului, iar ordonata este proporțională cu timpul (distanța) de recepționare a semnalului reflectat de către discontinuitate. Se obține prin baleiajul palpatorului înclinat pe direcția X , cu salt pe direcția Y . Ca și în cazul imaginii B , imaginea D își găsește aplicații în multe domenii, cele mai importante fiind: controlul produselor laminate și forjate, controlul îmbinărilor sudate, monitorizarea evoluției defectelor în timp, s.a.

Reprezentarea mixtă P-scan (Projection image scanning technique), constă în redarea pe ecran a mai multor sisteme de reprezentare, și anume: o vedere de sus, tip C , o vedere laterală, tip D , o vedere transversală de tip B , precum și evoluția cumulată amplitudine - deplasare (tip A). Una dintre particularitățile reprezentării P -scan, rezidă în faptul că culorile folosite permit stabilirea palpatorului care a detectat o anume discontinuitate. Sistemul permite o operativitate de aproximativ trei ori mai mare decât la controlul manual și presupune folosirea unor dispozitive complexe de baleiere a mai multor palpatoare concomitent. Sistemul P -scan dispune de un modul de analiză aposteriori numit Super-soft, care asigură compensarea divergenței fasciculului de unde și evaluarea exactă a dimensiunilor discontinuităților.

Reprezentarea T , este în fapt o vizualizare de tip C , la care se adaugă variația timpului de parcurs a fasciculului ultrasonor. Metoda permite astfel aflarea adâncimii la care este localizată discontinuitatea.

Interesul pentru acest mod de reprezentare este determinat de necesitatea urmăririi evoluției grosimii pieselor în cursul proceselor de coroziune, de exemplu la coca unei nave, la recipiente închise, precum și pentru urmărirea fenomenului de fisurare lamelară în piese de dimensiuni mari. Metoda poate discrimina discontinuități dispersate pe o grosime, care ar genera semnale cumulate, indicând fals prezenta unui singur defect major.

5.2. Defectoscopul analogic cu impulsuri

La nivelul actual al tehnicii, controlul ultrasonic folosește pe scara largă defectoscoape analogice clasice, cu emisie intermitentă de impulsuri, în reprezentare A . Se face uz, atât de metoda prin reflexie prin cuplarea palpatoarelor monobloc de emisie-recepție, cât și de metoda prin transmisie, prin cuplarea a două palpatoare, unul de emisie și altul de recepție.

Defectoscoapele cu impulsuri, emit trenuri de unde foarte scurte, puternic amortizate și recepționează semnale reflectate în perioadele când nu emit. Traductorul piezoelectric sau palpatorul are o frecvență de lucru foarte ridicată (peste 0,5 MHz), pentru a obține o bună directivitate a fasciculului de unde.

Principiul metodei de control cu impulsuri constă în generarea unor unde ultrasonice scurte și puternic amortizate în două, maxim trei oscilații, introducerea lor în piesa de controlat prin intermediul palpatorului și urmărirea timpului de propagare a undelor Δt și amplitudinii semnalelor reflectate de orice suprafață separatoare de medii. Undele ultrasonice, generate sau reflectate sunt afișate pe ecranul tubului catodic la o distanță pe axa orizontală d , proporțională cu distanța parcursă de fascicul până la discontinuitatea de la care se reflectă, parțial sau total.

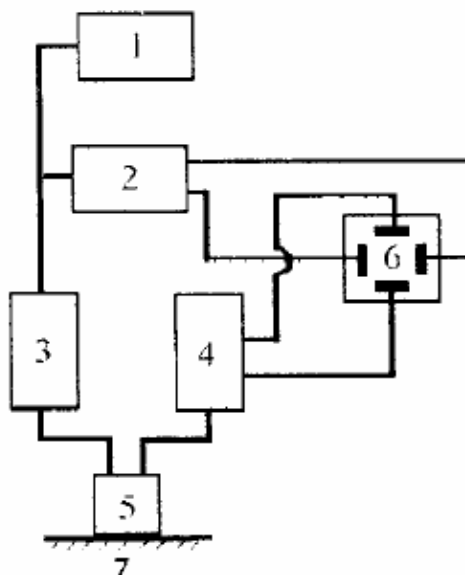


Fig. 33. Schema bloc a defectoscopului ultrasonic cu impulsuri

Schema bloc a unui defectoscop ultrasonic cuprinde următoarele părți principale, conform figurii 33:

generatorul de frecvență 1, blocul de baleiaj sau de timp 2, emițătorul 3, receptorul 4, palpatorul 5 și tubul catodic 6.

Generatorul de frecvență, comandă funcționarea blocului de baleiaj și a emițătorului. Blocul de baleiaj deviază spotul de electroni din tubul catodic pe orizontală, proporțional cu timpul $\Delta t/2$ (deoarece Δt corespunde parcursului dus-întors) și fiind dată de relația:

$$2d = \Delta t \cdot v \quad (129)$$

devierea este proporțională cu distanța d parcursă în piesă. Emițătorul generează impulsuri de tensiune pe care le transmite palpatorului. Palpatorul le transformă în unde ultrasonice care se transferă piesei controlate 7. Undele ultrasonice reflectate de discontinuitate - defect sau ecurile din piesă, figura 34, sunt transformate de palpator în impulsuri de tensiune și apoi transferate blocului receptor. Receptorul amplifică impulsurile de tensiune și le prelucrează pentru afișarea pe tubul catodic, producând devierea spotului de electroni pe verticală, proporțional cu mărimea semnalelor recepționate de palpator.

Generatorul de frecvență și blocul de baleiaj lucrează împreună, având rolul de a realiza impulsuri constante care acționează asupra plăcilor orizontale ale tubului catodic, și formează baza de timp a aparatului. Orizontala tubului este prevăzută cu o scală corelată cu viteza de propagare a undelor longitudinale în oțel, astfel încât să corespundă anumitor distanțe (adâncime) ale parcursului undelor în piesă, 50, 100, 250, 500 mm, etc., reglabile pe aparat. În acest fel se asigură și funcția de sincronizare.

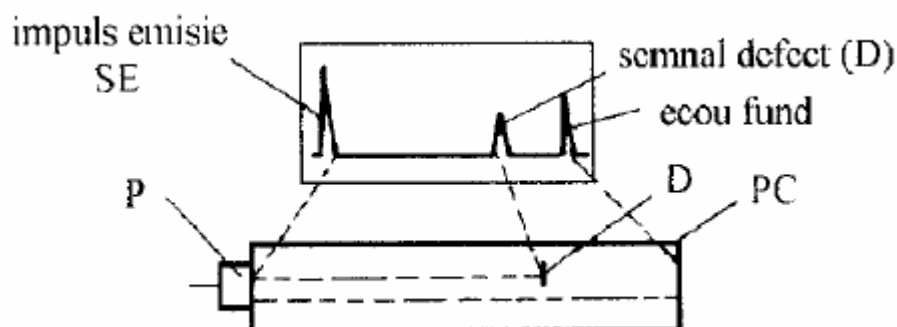


Fig. 34. Corespondența parcurs unde în piesă – imagine de pe ecran

Odată cu impulsul de emisie SE, blocul de baleiaj generează o tensiune proporțională cu timpul, pe o durată numită activă t_a , în care are loc afișarea pe ecran a semnalelor reflectate din piesă. Până la comandarea unui nou impuls, tensiunea este nulă pe o durată a pauzei, t_p , funcție de domeniul de adâncime ales și reglat la aparat. Frecvența generatorului se adaptează domeniului de adâncime, astfel încât ecourile reflectate repetat din piesă să se amortizeze complet înainte de a se comanda un alt impuls de emisie. Dacă această condiție nu se respectă, pe ecranul tubului catodic, alături de ecourile reflectate din piesă se afișează și așa numitele ecouri fantomă provenite din perioada anterioară. Aceasta presupune faptul că între durata activă t_a , și durata pauzei t_p , trebuie să existe un raport corespunzător, care, pe baza experienței este de 0,02...015.

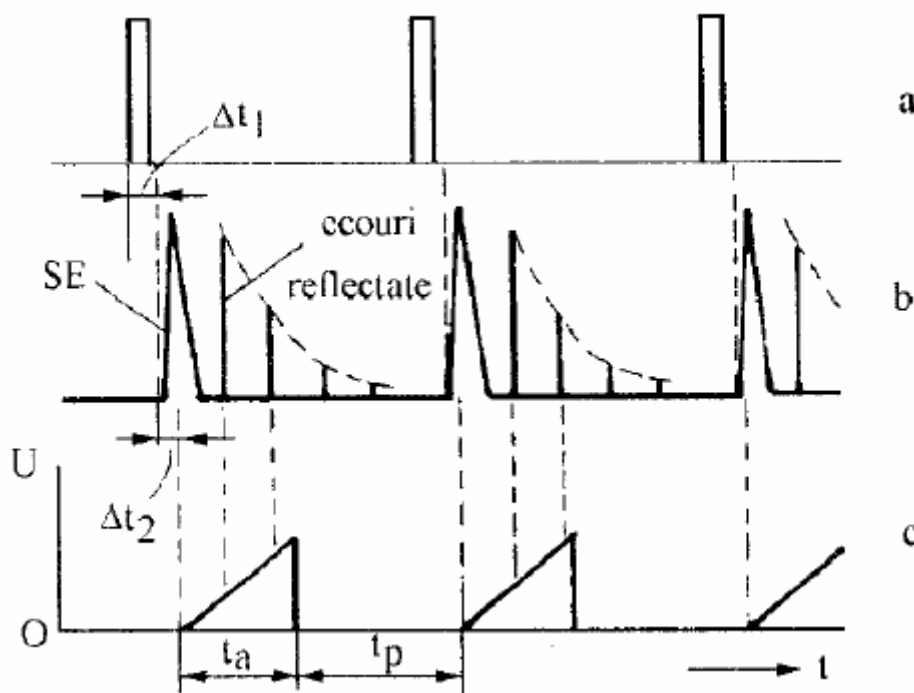


Fig. 35. Funcțiile blocului defectoscopului: a) generatorul de frecvență; b) blocurile de emisie și recepție – tub catodic; c) blocul de baleiaj

Pentru a face să coincidă impulsul de emisie SE de la traductorul palpatorului cu suprafața de cuplare a palpatorului pe piesă, se asigură un decalaj de timp corespunzător, pe de o parte între contactul generatorului și impulsul de emisie, iar pe de altă parte între impulsul de emisie și comanda tensiunii de baleiaj: $\Delta t_1 + \Delta t_2$, figura 35. La evaluări de precizie, impulsul reper trebuie considerat primul ecou de reflexie și/sau intervalul dintre primele două ecouri de reflexie din piesă.

În vederea comprimării sau extinderii domeniului de distanțe pe ecran, se acționează asupra variației tensiunii de baleiaj în sensul măririi acesteia pentru micșorarea zonei investigate și invers. Totodată este posibilă și o translatare a semnalelor, inclusiv scoaterea impulsului de emisie din ecran.

În figura 35 sunt reprezentate succesiunile semnalelor în corelație cu blocurile de comandă.

Emitătorul, produce impulsuri electrice puternic amortizate cu amplitudinea de ordinul sutelor de volți, prin descărcarea unui condensator 1 pe un circuit oscilant format dintr-o rezistență 2 și o inductanță 3, legate în paralel cu traductorul piezoelectric 4, figura 36.

Ritmul emisiei este impus de generatorul de frecvență prin închiderea circuitului cu ajutorul unui tranzistor. Durata semnalului de emisie (frecvența), este reglabilă prin valoarea LC, $f = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, iar amortizarea impulsurilor de emisie în cel mult trei oscilații, prin reglarea rezistenței 2. Semnalul de emisie este redresat, integrat și afișat de tubul catodic.

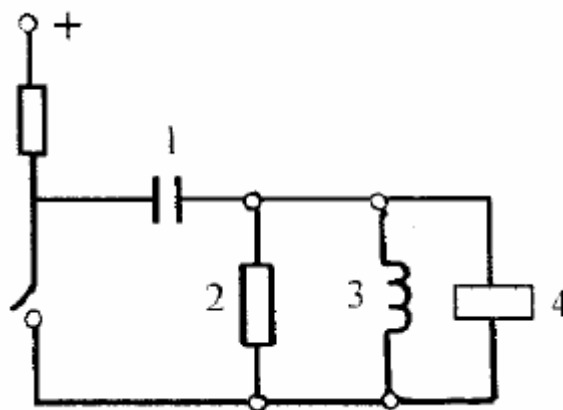


Fig. 36. Schema electrică a emițorului

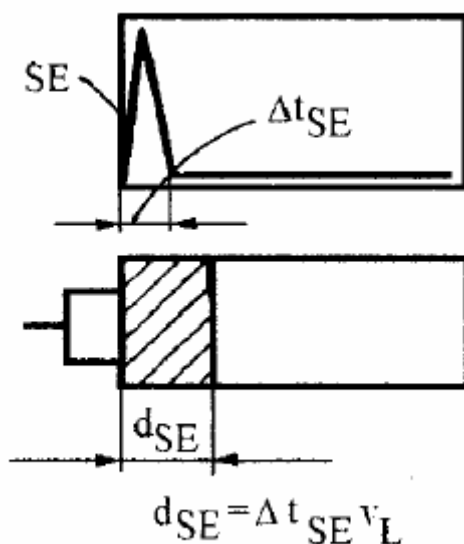


Fig. 37. Durata și distanța semnalului de emisie: zona moartă

Durata semnalului de emisie este o caracteristică deosebit de importantă a aparatului, deoarece în sistemul de lucru cu palpatoare monocristal de emisie-recepție determină așa numita zonă moartă.

Zona moartă, în concordanță cu figura 37, reprezintă parcursul sonor d_{SE} , corespunzător duratei impulsului de emisie, de unde orice semnal reflectat se suprapune peste semnalul de emisie, neputând fi recepționat.

Rolul blocului receptor este de a pregăti semnalele recepționate din piesă pentru videoredare și de a asigura proporționalitatea lor cu inversul distanței. Amplitudinea semnalelor ajunse la receptor este foarte variată, cuprinsă în intervalul $30 \mu V \dots 30 V$, (diferență de 10^6), ceea ce corespunde la 120 dB. Pe de altă parte, ele sunt foarte mici, comparativ cu impulsurile de emisie. Pentru prelucrarea lor în vederea redării pe tubul catodic, blocul receptor asigură următoarele funcții succesive:

- preselectarea grosolană a semnalelor în trepte de câte 20 dB;
- preamplificarea, în scopul micșorării la maximum a zgomotelor termice perturbatoare;
- selectarea fină în trepte de câte 1- 2 dB;

- amplificarea de bandă, adaptată la frecvența palpatorului;
- redresarea alternantă sau monoredresarea impulsurilor pentru afișarea în sistem X- Y în tubul catodic;
- suprimarea selectivă a semnalelor perturbatoare fără modificarea amplitudinii celor utile.

Cum mărimea semnalelor recepționate este influențată de o serie de factori, dintre care se menționează:

- distanța parcursului sonor și mărimea coeficientului de atenuare în material;
- forma, mărimea și orientarea reflectorului;
- coeficientul de reflexie de la defect (reflector);
- factorul de cuplaj acustic dintre palpator și suprafața piesei;
- frecvența de lucru și alte caracteristici ale palpatorului,

rezultă și dificultatea de interpretare corectă a acestor semnale. De aceea, aparatele moderne sunt dotate cu instalații auxiliare având rolul de a spori productivitatea, gradul de reproductibilitate și acuratețe ale controlului.

Tubul catodic, trebuie să asigure o tensiune anodică și de postacelerare ridicată în vederea obținerii unei luminozități adecvate controlului în lumină naturală.

5.3. Funcții reglabile și automate

Aparatele moderne dispun de o serie de funcțiuni prin cuplarea la microprocesor, care le oferă posibilități de adaptare la situații specifice de control, precum și de prelucrare a datelor obținute din piesă. Intre acestea se menționează:

- modificarea amplificării și evaluarea automată a amplitudinii ecourilor sau semnalelor utile în % din înălțimea ecranului sau în dB;
- măsurarea diferenței de amplitudine față de un ecou de referință;
- reglarea automată a domeniului de distanță și marcarea poziției blendei de monitorizare, precum și a nivelului de semnalizare-înregistrare;
- suprimarea selectivă a unor semnale electromagnetice perturbatoare, reglabilă ca amplitudine și adâncime prin diafragmele monitorului. Sunt realizate aparate cu câte două diafragme independent reglabile, care ușurează interpretarea semnalelor de defect provenite de la piesele cu structuri eterogene;
- dispozitiv de compensare automată a atenuării undelor în material, ceea ce, în condiții determinate, permite o evaluare directă a mărimii defectelor pe baza amplitudinii semnalului;
- adaptări necesare utilizării scalelor distanță-amplitudine-mărime, (DAM), pentru poziționarea și evaluarea cât mai operativă a discontinuităților:
- analizor de frecvență și sistem de recunoaștere automată a formei impulsului integrat, de corelare pe această bază cu natura discontinuității;
- analizor de frecvență și sistem de recunoaștere automată a formei impulsului integrat, de corelare pe această bază cu natura discontinuității;
- sistem de schimbare a informațiilor dintre defectoscop și calculator;
- comandă, conducere și înregistrarea datelor prin calculator.

Sistemul de schimbare a informațiilor cu un calculator reprezintă un element esențial al hardului, deoarece permite extinderea funcțiilor, comanda și conducerea de la distanță. Se pot transfera: liste de funcțiuni, diagrame în reprezentare A, copii, înmagazinări de date. Folosirea sistemului de comunicare cu calculatorul are la bază ferestre, care se deschid secvențial. Ferestrele de care dispune sistemul sunt:

- de utilizare cu menu- uri principale și funcții de ajutor;
- de documentare prin text sau grafic;

- de dialogare pe baza unei liste de dialogare în vederea rezolvării unei anumite probleme;
- de selectare.

Culorile de reprezentare pe ecran fac parte din sistemul WINDOWS. Funcțiile de ajutorare sunt realizate în două nivele: generale și efective de context, astfel încât utilizatorul să fie condus cât mai eficient spre rezolvarea problemei. Datele înregistrate sau datele obținute de alte aparate compatibile cu programul pot fi preluate, apelate, prelucrate, în vederea utilizării în timp real în montajul cu care se lucrează.

5.4. Palpatorul piezoelectric

Palpatoarele diferă din punct de vedere constructiv în funcție de tehnica de examinare, care poate fi prin reflexie sau prin transmisie, precum și în funcție de tipul de undă emis în piesă, care poate fi longitudinală sau transversală.

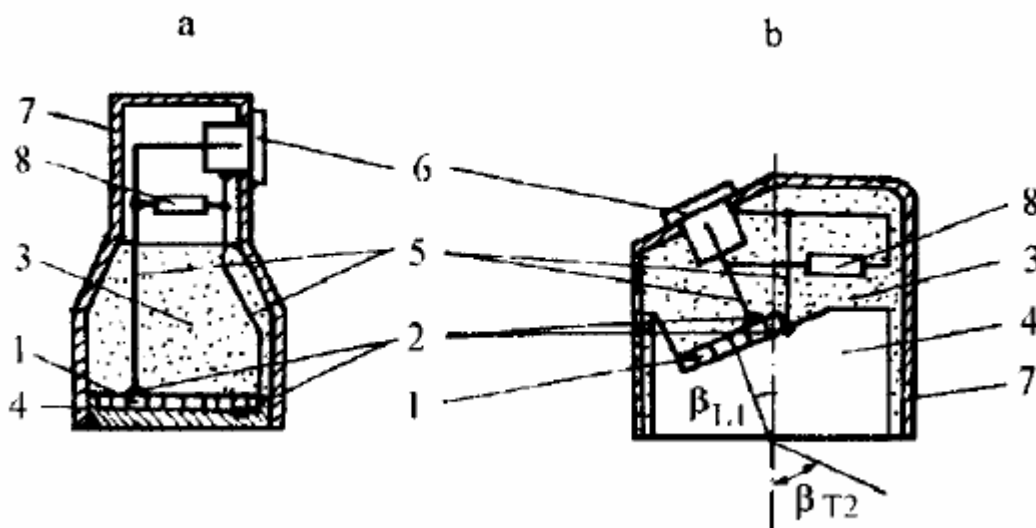


Fig. 38. Componenta palpatoarelor piezoelectrice: a) normale, b) înclinate

Palpatoarele pentru examinare în reflexie folosesc același traductor piezoelectric, atât ca emițător cât și ca receptor. Palpatoarele pentru examinare în transmisie, sunt construite pentru o singură funcție, emisie sau recepție, respectiv cu câte două traductoare piezoelectrice încorporate în același palpator (cu dublu cristal), câte unul pentru fiecare funcție. Palpatorul monocristal de unde longitudinale sau palpatorul normal, este compus din următoarele părți, figura 38a: traductorul piezoelectric (cristalul) 1, electrozii de contact 2, masa de amortizare 3, piesa de protecție-cuplare 4, conductorii electrice 5, fișa de legătură a cablului 6, carcasa metalică 7 și circuitul electric de adaptare 8.

Palpatorul monocristal de unde transversale sau palpatorul înclinat, figura 38b, este constituit din aceleași componente, locul piesei de protecție - cuplare fiind luat de pana de cuplare 4. Traductorul piezoelectric este așezat înclinat față de normala la suprafața piesei.

Traductorul piezoelectric este confecționat sub formă circulară sau dreptunghiulară, cu diametrul echivalent cuprins între 5 și 6 mm. Grosimea este corelată cu frecvența prin relația (49). Traductoarele din materiale ceramice sunt metalizate pe suprafețele active, cu suspensie de argint sau cu aliaj nichel - aur, stratul metalizat constituind electrozii 2, pe care se lipesc moale conductorii de legătură 5.

Grosimea este de ordinul micronilor pentru a nu influența comportarea acustică. La traductoarele executate din celelalte materiale indicate în tabelul 2, suprafețele active

sunt lăcuite cu o substanță conductoare, iar legătura cu conductorii se realizează prin lipire cu adezivi.

Contactul acustic dintre traductor și piesa de cuplare, respectiv dintre traductor și masa de amortizare, se realizează prin lipire, brazare sau cu ajutorul unui film lichid. Masa de amortizare a undelor reflectate la interfața palpator-piesă se confecționează dintr-un material cu impedanța acustică potrivită cu cea a piezocristalului, în vederea obținerii efectului maxim de trecere a undelor reflectate și totodată absorbția energiei. Ca materiale se folosesc rășini turnate, materiale pulverulente de umplutură din wolfram, cauciuc, etc. cu deosebite însușiri fonoabsorbante.

Rolul piesei de protecție-cuplare 4, este de a asigura o bună rezistență la uzură. Se folosesc folii de oxizi de aluminiu, carbură de bor sau safir cu grosimea sub $\lambda/10$, pentru a împiedica rezonanța proprie.

Pana de cuplare 4, la palpatoarele utilizate la controlul pieselor din oțel este confecționată din plexiglas sau din polistiroil, care prezintă $v_L < v_{\text{Total}}$ și asigură un coeficient de propagare ridicat, precum și o corectă centrare a fasciculului față de indexul marcat pe carcasă.

Carcasa metalică 7, are rolul de protecție a montajului și de menținere cvasiconstantă a unghiului inițial de incidență pe măsura uzării suprafeței piesei de cuplare. Lateral pe carcasă se marchează poziția axei fasciculului.

Fișa de legare a cablului coaxial la aparat 6, este cu mufă simplă la palpatoarele monocristal, respectiv cu mufă dublă la palpatoarele cu dublu cristal.

Circuitul electric de adaptare 8, are rolul de uniformizare a impedanțelor de ieșire și intrare în traductor, respectiv al celor de ieșire din traductor și intrare în receptor și de adaptare la frecvența de rezonanță. La diferențe mici între impedanțele de ieșire din emițător și de intrare în receptor, se folosesc circuite inductive sau rezistive, iar la diferențe mari, un transformator. Odată cu mărirea frecvenței de lucru, circuitul 8, contribuie și la suprimarea efectelor perturbatoare a oscilațiilor transversale, ale undelor superficiale, etc.

La palpatorul inclinat, unghiul β_{L1} este calculat astfel încât undele longitudinale să fie complet reflectate în amortizorul de oscilații, iar prin pana de plexiglas să se emită în piesă numai unde transversale. Valoarea unghiului β_{L1} , egală cu înclinarea traductorului, se calculează din

$$\sin \beta_{L1} = \frac{v_{L1}}{v_{T2}} \sin \beta_{T2} \quad (130)$$

în care β_{T2} este unghiul de pătrundere în piesă, sau unghiul de incidență, care se marchează pe palpator împreună cu dublul tangentei sale, servind la determinarea poziției defectului.

Unghiurile de incidență standard (în oțel), utilizate la controlul cu ultrasunete sunt: 35°, 45°, 60°, 70° și 80°. Corespondența lor pentru alte materiale decât oțelul este prezentată la paragraful 5.5.8.

Atât palpatoarele normale, cât și cele înclinate, se construiesc și în varianta de funcționare în sistem de transmisie, cu dublu cristal, unul de emisie, altul de recepție.

Ele prezintă avantajul că elimină în totalitate zona moartă, putând fi utilizate cu succes mai ales pentru detectarea discontinuităților foarte apropiate de suprafața de examinare. Cele două piezocristale sunt conectate printr-o fișă și un cablu coaxial dublu la emițătorul, respectiv receptorul aparatului. Montarea lor pe pana de cuplare se realizează astfel încât să asigure un unghi de convergență de $3 \div 10^\circ$. Cu ajutorul unghiului de convergență se reglează focalizarea, în sensul că prin creșterea unghiului distanța focală scade. Pentru a preîntâmpina un scurtcircuit acustic, între cele două piezocristale se interpune un perete despărțitor din material fonoabsorbant (PVC sau plută). Acest tip de palpatoare se folosește frecvent la măsurători de grosimi.

Diversificarea controlului ultrasonic, în special la piese de dimensiuni mici, precum și mărirea preciziei de localizare a defectelor presupune realizarea palpatoarelor miniaturale și subminiaturale cu diametrul echivalent de $5 \div 10$ mm. De asemenea, în scopul creării posibilităților de alegere a unor unghiuri de refracție dorite dar nestandardizate, au fost concepute palpatoare cu unghi reglabil. Cu ajutorul lor se pot obține, atât emisii de unde longitudinale, cât și de unde transversale și chiar de unde de suprafață.

La controlul structurilor austenitice și a pieselor turnate din fontă se folosesc palpatoare speciale, cu focalizare în adâncime, cu emisie înclinată de unde longitudinale și amortizare puternică a undei de emisie, micșorându-se astfel la maximum posibil pierderile de energie datorate structurii grosolane a materialului [84], [167], [212]. Potrivit unor surse [104], rezultate favorabile la controlul unor astfel de structuri se pot obține cu palpatoare înclinate cu dublu cristal de emisie și recepție, cu un unghi de incidență de 45° lucrând cu frecvențe de $2 \div 6$ MHz.

Focalizarea urmărește intensificarea presiunii acustice și constrângerea transversală a fasciculului la distanțe cât mai mici, fie prin curbarea suprafeței piezocristalului, fie prin utilizarea unei lentile concave ca piesă de cuplare. Focalizarea se exprimă cantitativ prin raportul dintre distanța corespunzătoare contracției transversale maxime d_f și distanța câmpului apropiat N , cunoscut ca factor de focalizare.

Acesta este influențat de raza de curbură a piezocristalului sau lentilei. În cazul folosirii inclusiv a componentei longitudinale la palpatorul înclinat, unghiul de așezare a traductorului β_{L1} , este condiționat, astfel ca unghiul de incidență β să fie cuprins între 45° și 70° , ceea ce, în cazul cuplului plexiglas-oțel se realizează cu valori $\beta_{L1} = 14 \dots 26^\circ$.

Investigații destul de recente în dezvoltarea palpatoarelor, aparținând Institutului de încercări de materiale BAM din Berlin, [212], au condus la conceperea și realizarea de palpatoare multi-funcționale formate din 6-16 elemente traductoare ce formează o structură mozaic și care printr-un aranjament de cuplare sau prin mișcări adecvate, permit cuprinderea unui volum exhaustiv de material. Schema de principiu a unui palpator multifuncțional de 5 MHz, format din 16 elemente traductoare 1, de $0,8 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ este prezentată în figura 39. El conține alături de partea activă, modulul bobinelor și transformatoarelor de adaptare 2, modulul de cabluri și conexiuni 3 și pana de cuplare plană sau concavă 4. Un astfel de palpator de unde transversale poate introduce în piesă un display de unghiuri de refracție cuprinse între 36° și 73° , ceea ce permite o examinare volumică operațională prin ecotomografie computerizată. Primele experimentări efectuate cu palpatoare multifuncționale la examinarea unor piese placate și îmbinări sudate din oțel austenitic, precum și la monitorizarea fisurilor la arbori de turbine, au condus la rezultate remarcabile.

Variante de palpatoare speciale în construcție etanșă, se întrebuintează la controlul imersat. Palpatoare, utilizând materiale termoizolante, respectiv piezocristal din niobat de litiu, se pretează controlului la temperaturi ridicate, până la 300° C , în cazul examinării de durată și până la 800° C , pentru măsurători de grosime.

Caracteristicile palpatoarelor, indicate în prospectele aparatelor sunt: diametrul sau dimensiunile piezocristalului, unghiul de incidență și de divergență, distanța focală în apă, câmpul apropiat, coeficientul de focalizare și coeficientul de atenuare.

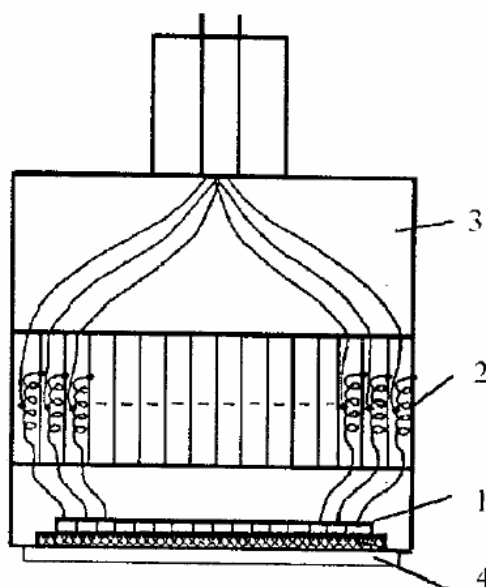


Fig. 39. Schema palpatorului multifuncțional cu rețea de 16 segmente de traductoare dispuse în linie

5.5. Criterii de alegere a parametrilor de examinare

Criteriile care stau la baza alegerii parametrilor de examinare cu ultrasunete sunt: frecvența, selectivitatea, zona moartă, liniaritatea amplificării, liniaritatea bazei de timp și gradul de echipare și automatizare.

5.5.1. Frecvența.

Divergența fasciculului este invers proporțională cu frecvența.

Frecvența joasă, semnificând o deschidere importantă a fasciculului, are avantajul de a evidenția imperfecțiuni orientate defavorabil față de axa fasciculului. Utilizarea ei este recomandată la sondarea parametrilor de control și la detectarea discontinuităților defavorabil orientate. Frecvența înaltă, semnificând o deschidere mică, sau o focalizare mai puternică, mărește precizia de localizare și puterea separatoare. În consecință, alegerea frecvențelor înalte se recomandă în cazul unei orientări favorabile a planului discontinuității în raport cu direcția fasciculului. Cu mărirea frecvenței, atenuarea undelor crește, motiv pentru care, atunci când se lucrează în domeniul distanțelor mari, se impune folosirea unor frecvențe mai mici, [191], [202] și invers.

Frecvențe mari, de 6÷10 MHz, se prescriu la controlul pieselor cu granulație fină și grosime mică. Frecvențe mici, sub 1 MHz, dimpotrivă pentru controlul pieselor cu granulație grosolană. În vederea menținerii sub anumite limite a pierderilor de energie, lungimea de undă trebuie să depășească substanțial mărimea granulației structurii piesei controlate. Considerând mărimea medie a granulației d_g și dimensiunea minimă d_{min} se recomandă, [48], ca frecvența de lucru să fie cuprinsă în limitele: $v/4d_{min} < f \leq v/6d_g$.

Domeniul frecvențelor optime recomandate în funcție de materiale și structurile de examinat rezultă din tabelul 11.

Tabelul 11

Nr. crt.	Material	Metoda de control	Frecvența (MHz)
1	Oțel, semifabricat, omogen, cu structură fină	reflexie transmisie	2- 4 4- 6
2	Oțel turnat, compactitate mică	reflexie transmisie	1- 1,5 3- 4
3	Fontă, bronz, corpuri cu granulație mare, microseparații	reflexie transmisie	0,25- 0,5 1- 3

În vederea măririi rezoluției laterale și de profunzime în investigarea discontinuităților, există tendința de a se trece la utilizarea unor frecvențe înalte în domeniul ultrasunetelor, de 50÷100 MHz.

5.5.2. Selectivitatea, reprezintă capacitatea aparatului de a separa semnale provenite de la discontinuități învecinate; puterea de separare (de rezoluție), depinde de durata trenului de impulsuri de emisie și de intensitatea impulsului emis și se determină cu ajutorul blocului de etalonare. La aparatele bune, selectivitatea este sub 2 mm.

5.5.3. Zona moartă. Existența zonei moarte este inerentă construcției defectoscoapelor și se datorează următorilor factori: durata limită a trenului de impulsuri de emisie, frecvența impulsurilor, durata pauzei dintre impulsuri. Zona moartă limitează posibilitățile de detectare a discontinuităților în câmpul apropiat, prin acoperirea zonei de reflexie a unui eventual semnal prin lățimea impulsului de emisie. La aparatele cele mai bune, corespunzător unei amplitudini reglate la înălțimea ecranului, lățimea semnalului de emisie nu trebuie să depășească 5 mm echivalent în oțel, la palpatoare înclinate cu frecvența peste 3 MHz și 8 mm, sub această frecvență. Evitarea obturării zonei apropiate de 5 - 10 mm, prin impulsul de emisie și facilitarea controlului și în această zonă moartă se realizează, folosind palpatoare cu dublu cristal de emisie-recepție. Se vor avea în vedere, la aceste palpatoare, ecourile perturbatoare produse din următoarele motive:

- transmiterea unei părți din energie direct prin cuplant;
- desfacerea undei pe suprafața posterioară și apoi anterioară de reflexie.

Primul efect dă naștere semnalului mai apropiat, deci primului ecou vizualizat pe ecranul aparatului, care se poate recunoaște prin aceea că el se emite constant. Al doilea efect, produce semnale perturbatoare (mai multe), decalate în urma ecoului de fund de la unda principală, longitudinală, deoarece $v_T < v_L$.

5.5.4. Liniaritatea amplificării, reprezintă caracteristica aparatului de a reproduce pe ecran semnale proporționale cu intensitatea undelor reflectate, pe un interval cât mai larg posibil. Abaterea de la liniaritate trebuie să fie sub ± 1 dB, pentru semnale ale căror înălțime se plasează în limitele 10 - 50% din înălțimea ecranului. Aparatele dispun de un amplificator reglabil în trepte de 1 ÷ 2 dB, asigurându-se funcționarea fără suprimarea semnalelor de nivel scăzut.

5.5.5. Liniaritatea bazei de timp (a scării distanțelor), reprezintă caracteristica aparatului de reproducere pe ecran a distanțelor, proporțional cu depărtările efective ale suprafețelor de reflexie din piesa examinată față de suprafața frontală de emisie.

Această caracteristică se impune a fi riguros respectată pe toate domeniile de distanțe ale aparatului în limitele de $\pm 1\%$. Reglajul domeniului bazei de timp, trebuie să fie asigurat în intervalul 50 ÷ 500 mm, distanță parcursă în oțel la ambele tipuri de unde.

Limitele de liniaritate indicate, vor fi respectate și în cazul unor variații de tensiune ale rețelei de până la $\pm 10\%$.

5.5.6. Sensibilitatea este caracteristica potrivit căreia sistemul realizează o amplificare cât mai mare a semnalelor de la discontinuități în raport cu zgomotul de fond.

Zgomotul de fond, sau așa numita iarba ultrasonică, reprezintă semnale de amplitudine variabilă distribuite aleator pe ecranul aparatului, care îngreunează interpretarea semnalelor efective (utile), de mică amplitudine. Producerea lor este cauzată, pe de o parte de către paraziții electrici, iar pe de altă parte de procesul de împrăștiere a undelor la limita grăunților mai grosolani din material. Criteriul pe care este bine să-l satisfacă aparatele din acest punct de vedere este următorul: dacă semnalul provenit de la distanța de 100 mm este amplificat de la 50% din înălțimea ecranului cu 50 dB, indicațiile de zgomot nu este permis să depășească 20% din înălțimea ecranului.

După [240], semnalele evaluate trebuie să se situeze cu cel puțin 6 dB deasupra zgomotului de fond, precum și peste 0,2 din înălțimea ecranului.

Pentru controlul structurilor austenitice, diferența (raportul) dintre semnalul defectului de referință și zgomotul provenit de la structură (iarba ultrasonică), va fi de cel puțin 20 dB, la palpatoarele normale și de minimum 16 dB, la palpatoarele înclinate. Aparatele de control sunt prevăzute cu un bloc de suprimare a semnalelor de mică amplitudine, prin cuplarea căruia se poate reduce sau chiar anihila zgomotul de fond. După cum rezultă din figura 40, acuratețea controlului este substanțial îmbunătățită prin eliminarea zgomotului de fond.

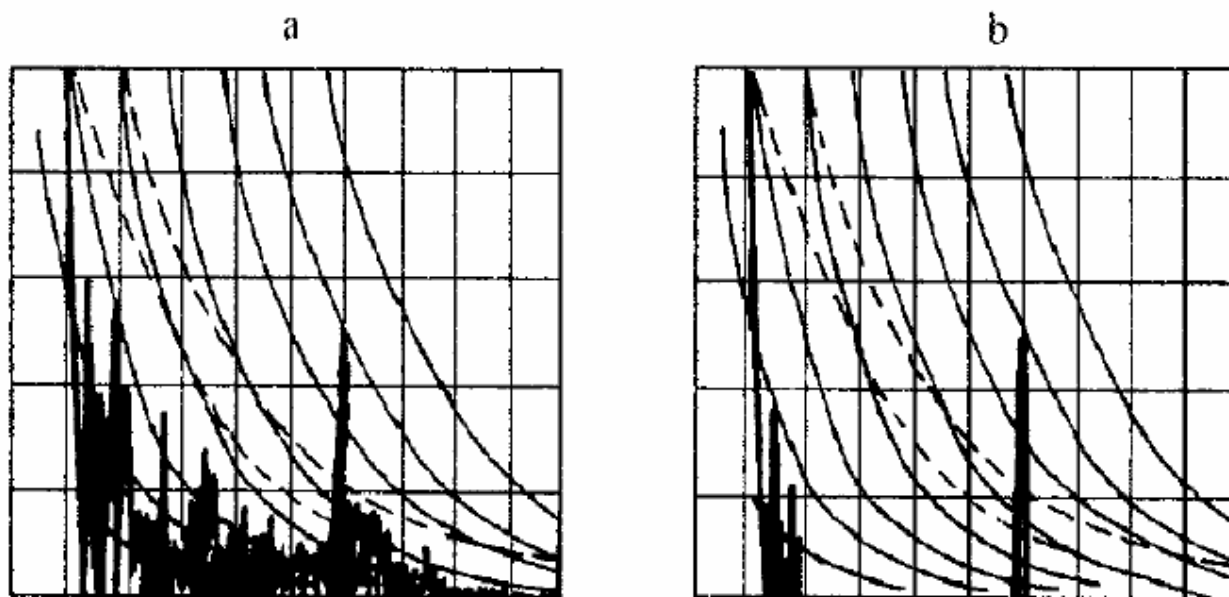


Fig. 40. Oscilograme cu semnale recepționate de la defect: a) fără suprimarea zgomotului de fond: b) cu suprimarea zgomotului de fond

5.5.7. Gradul de echipare și automatizare. Se iau în considerație, în primul rând, existența accesoriilor, care asigură evaluarea și localizarea certă și operativă a discontinuităților. În acest scop, defectoscoapele este util să fie dotate cu următoarele facilități:

- amplificator de minimum $80 \div 100$ dB, reglabil în trepte de $1 \div 2$ dB;
- posibilități de suprimare a zgomotului de fond la nivele cât mai ridicate, eventual cu semnalizare pe ecran;
- posibilități de reglare a bazei de timp în domeniul $50 \div 500$ mm distanță parcursă, atât pentru unde longitudinale, cât și pentru unde transversale. În vederea controlului

structurilor austenitice se impune un domeniu de lucru de minim 10 mm, asigurat cu ajutorul lupei de adâncime;

- amplificarea domeniului de distanțe de $5 \div 10$ ori, în scopul obținerii unei adâncimi de penetrare până la 5 m în oțel;
- posibilități de baleiere, extindere și comprimare a semnalelor pe orizontală, corelate cu domeniile de adâncime;
- compensarea automată a divergenței fasciculului și atenuării produse în material, ca urmare a împrăștierii undelor pe limitele grăunților; blocurile de atenuare acoperă o zonă de reglare continuă sau în trepte între 0 și 100 dB/m, până la adâncimea maximă a domeniului de distanțe afișat;
- utilizarea scalelor DAM, pentru localizarea prin proiecție de distanțe a reflectorului și determinarea operativă a mărimii echivalente a acestuia;
- reglarea înălțimii și lungimii blendei monitorului, posibilități de semnalizare și înregistrare a semnalelor, care depășesc valoarea reglată;
- posibilitatea micșorării controlate a unor anumite semnale în vederea încadrării pe ecran împreună cu semnalele provenite de la distanțe mari sau de la discontinuități relativ mici sau nefavorabil orientate, pentru a căror evidențiere se necesită amplificări importante;
- posibilități de cuplare în sistem de reflexie și în sistem de transmisie;
- interfața necesară prelucrării datelor, precum și conexiuni în vederea reprezentării și înregistrării pe videorecorder.

Totodată, se iau în considerare posibilitățile de manipulare simplă, autonomia față de rețea, stabilitatea față de variațiile rețelei, asigurarea protecției prin transformator de separație, de tensiune maximă 40 V, precum și dotarea cu diversitatea necesară de palpatoare și cabluri. Folosirea aparaturii cu palpatoare și cabluri de proveniențe diferite se acceptă numai cu condiția de a nu se afecta acuratețea determinării și precizia rezultatelor.

5.5.8. Alegerea palpatoarelor. Principala problemă în alegerea palpatoarelor constă în corelarea acestora cu forma piesei, posibilitățile de acces, caracteristicile defectelor așteptate ca natură, formă, mărime, orientare, adâncime de localizare, precum și cu caracteristicile de propagare a ultrasunetelor în materialul din care este confecționată piesa de controlat (viteză, coeficient de atenuare, pierderi prin transfer pe suprafața de cuplare). În funcție de factorii menționați, se alege tipul de palpator definit prin formă, frecvență, diametrul piezocristalului, unghiul de incidență, domeniul câmpului apropiat, focalizarea suplimentară, forma impulsului și distanța maximă parcursă în oțel. Pentru o localizare exactă, lungimea parcursului sonor până la reflector este necesar să fie mai mică decât lungimea domeniului apropiat al palpatorului.

Un factor important în alegerea palpatoarelor, alături de frecvență, îl reprezintă suprafața efectivă sau diametrul echivalent al palpatorului, D . După cum s-a demonstrat, palpatoarele cu D mic, cele miniaturale, posedă un câmp apropiat restrâns și o divergență ridicată, motiv pentru care se pretează în fazele de tatonare sau examinare prealabilă, când există interesul cuprinderii unui volum mai mare de material. Dimpotrivă, palpatoarele cu D_p mare, posedă un câmp apropiat mai extins, dar o divergență scăzută, cu alte cuvinte o directivitate superioară. Ca urmare, acestea din urmă se vor utiliza preponderent în fazele de localizare exactă a discontinuităților sau în cazurile în care poziția acestora poate fi anticipată.

Dimensiunea piezocristalului la palpatoarele normale este $D_g = 20 \div 24$ mm, respectiv $S = 20 \times 22 \dots 24 \times 30$ mm la palpatoare înclinate. Pentru stabilirea detaliilor discontinuităților, sau la examinarea de pe suprafețe curbe se folosesc palpatoare miniaturale normale cu diametrul $D_p = 5 - 10$ mm, respectiv palpatoare înclinate având $S = 4 \times 8 \dots 8 \times 10$ mm.

Unghiul de incidență sau de pătrundere se alege în funcție de geometria piesei, tipul defectului urmărit, accesibilitatea suprafețelor și mai ales în funcție de grosimea piesei. La controlul de pe suprafețe plane, se întrebuintează unghiuri de incidență cuprinse între 45° și 70°. La controlul de pe suprafețe curbate, unghiul pe suprafața de reflexie va fi cuprins în limitele 35÷70°, [240]. Uzual, se recomandă 80° pentru grosimi de 6÷15 mm, 70° pentru grosimi de 16÷35 mm, 60° pentru grosimi de 30÷60 mm și 45° pentru grosimi de peste 60 mm. La grosimi mai mari se folosesc două sau mai multe palpatoare cu unghiuri de pătrundere diferite. Palpatorul de 60° se va evita pe cât posibil datorită apropierii unghiului de 60° de unghiul critic. La un palpator nou, abaterea maximă a unghiului de incidență față de unghiul nominal este de $\pm 2^\circ$.

La controlul altor materiale, unghiul de incidență se recalculează din unghiul de incidență standard (stabilit pentru oțel cu ajutorul relației:

$$\sin \beta_{T_{2x}} = \frac{v_{T_{2x}}}{v_{T_{2otel}}} \sin \beta_{T_{2otel}} \quad (131)$$

Considerând valorile medii ale compozițiilor chimice, valorile unghiurilor de incidență ale undelor transversale la principalele metale folosite în tehnică sunt prezentate în funcție de unghiurile de incidență standard în tabelul 12.

Tabelul 12

Material	Correspondența unghiurilor de incidență β				
Oțel	35°	45°	60	70°	80°
Fontă cenușie	23°	28°	35°	39°	41°
Aluminiu	33,2°	42,5°	55,5°	63,5°	70°
Alamă	22°	27,6°	34,4°	38°	40°
Cupru	24,7°	29,7°	37,2°	41°	43,7°
Nichel	31,6°	40,3°	52,5°	59,2°	64,8°

Având în vedere dependența de temperatură a vitezei de propagare și a coeficientului de atenuare a ultrasunetelor, palpatoarele obișnuite pot fi folosite în domeniul de temperatură de la -15 la +45°C.

Punctul de incidență al palpatorului se regăsește în poziția marcată cu o precizie de cel puțin $\pm 5\%$ din lungimea tălpii. Axa fasciculului trebuie să fie paralelă cu latura pe care este marcat punctul de incidență al palpatorului, deviația maximă admisă fiind de $\pm 2^\circ$.

5.5.9. Exemplu de alegere a unui palpator (a se consulta și paragrafele 4.3, 4.4 și 5.4.)

Fie dată problema alegerii unui palpator normal focalizat, pentru controlul imersat cu unde transversale având unghiul de incidență $\beta=45^\circ$, a zonei de rădăcină a unei îmbinări sudate cap la cap la o rezoluție laterală de maximum 3,5 mm: piesa este din oțel inoxidabil austenito - feritic cu grosimea $s = 40$ mm, iar distanța dintre palpator și piesă este $d = 30$ mm.

Problema se tratează în următoarele faze succesive:

a. Alegerea frecvenței în funcție de materialul examinat: având în vedere transparența relativ mică a oțelului inoxidabil, se alege frecvența de 2 MHz.

b. Calculul unghiului de înclinație a palpatorului în apă față de normala la suprafața piesei:

$$\sin \beta_{L_1} = \frac{v_{L_1}}{v_{T_2}} \sin \beta_{T_2} = \frac{1483}{3300} \cdot 0,707 = 0,31772$$

cu $\beta_{T_2} = 45^\circ$, $v_{L_1} = 1483$ m/s și $v_{T_2} = 3300$ m/s, rezultă $\beta_{L_1} = 18^\circ 30'$

c. Determinarea echivalentului în oțel a distanței palpatorului în apă (paragraful 8.2.):

$$d_{OL} = d_{H_2O} \cdot \frac{v_{H_2O}}{v_{TOL}} = 30 \cdot \frac{1483}{3300} \cong 13,5 \text{ mm}$$

d. Stabilirea distanței parcursului sonor în oțel până la rădăcina sudurii, respectiv a distanței focale acustice:

$$f = \frac{s}{\cos \beta_{T_2}} + d_{OL} = \frac{40}{0,707} + 13,5 \cong 70 \text{ mm}$$

e. Diametrul efectiv al palpatorului (traductorului), care la frecvența de 2 MHz asigură un câmp apropiat $N = 70 \text{ mm}$ este:

$$D_p = 2\sqrt{\lambda \cdot N} = 2\sqrt{\frac{v_T}{f} \cdot N} = 2\sqrt{1,65 \cdot 70} \cong 22 \text{ mm}$$

f. Rezoluția laterală, (conform paragrafelor 4.3 și 4.4) a acestui palpator este:

$$D_6 = \lambda \frac{f}{D_p} = 1,65 \frac{70}{22} = 5,25 \text{ mm}$$

g. Pentru îmbunătățirea rezoluției laterale și încadrarea ei în maximum 3,5 mm, se va alege un palpator cu diametrul efectiv mai mare, și anume:

$$D_p = 22 \frac{5,25}{3,5} = 33 \text{ mm}$$

h. Coeficientul de focalizare (paragraful 4.4) a palpatorului este:

$$F = \frac{f}{N} = 4 \frac{\lambda \cdot f}{D_p^2} = 4 \frac{1,65 \cdot 70}{33^2} = 0,42$$

6. DETERMINAREA PARAMETRILOR DISCONTINUITĂȚII

Parametri discontinuității sunt: poziția, forma și orientarea, mărimea și natura. Pentru stabilirea cu cât mai mare precizie a acestor parametri se impune o calibrare prealabilă a aparaturii de control, precum și respectarea unor norme de metodologie prezentate în cele ce urmează.

6.1. Metode de localizare

Localizarea cu acuratețe a unei discontinuități interesează din două motive: pentru executarea unei remedieri cât mai puțin extinse și pentru stabilirea naturii acesteia. Poziția unei discontinuități se stabilește din distanța proiectată între punctul de incidență al palpatorului (indexul palpatorului) și reflector și adâncimea de la suprafața de examinare.

Se cunosc trei metode de localizare: prin calcul, cu ajutorul scalei DAM (distanță, amplificare, mărime) sau cu ajutorul riglei de localizare.

6.1.1. Localizarea prin calcul. La examinarea cu incidență normală, poziția discontinuității se determină din oscilogramă, prin distanța dintre impulsul inițial și semnalul de defect. Distanța se măsoară între punctele corespunzătoare originii ramurii ascendente a impulsurilor respective. De exemplu, dacă distanța de pe oscilogramă este de 7 diviziuni și unei diviziuni îi corespund în realitate 5 mm, respectiv la 50 diviziuni corespund 250 mm (scara 5:1), rezultă că discontinuitatea (reflectorul) se găsește la $7 \times 5 = 35$ mm de suprafața de palpate.

La examinarea cu incidență înclinată, coordonatele discontinuității (z și y) se determină din distanțele semnalelor de pe oscilogramă ținând seama de scara de transpunere (d/u) și unghiul β de pătrundere a fascicului, corespunzător poziției în care se recepționează amplitudinea maximă a semnalului reflectat (figura 41).

Astfel, la examinarea cu fascicul direct se scrie:

$$y = d \cdot \sin \beta \quad ; \quad z = d \cdot \cos \beta \quad (132)$$

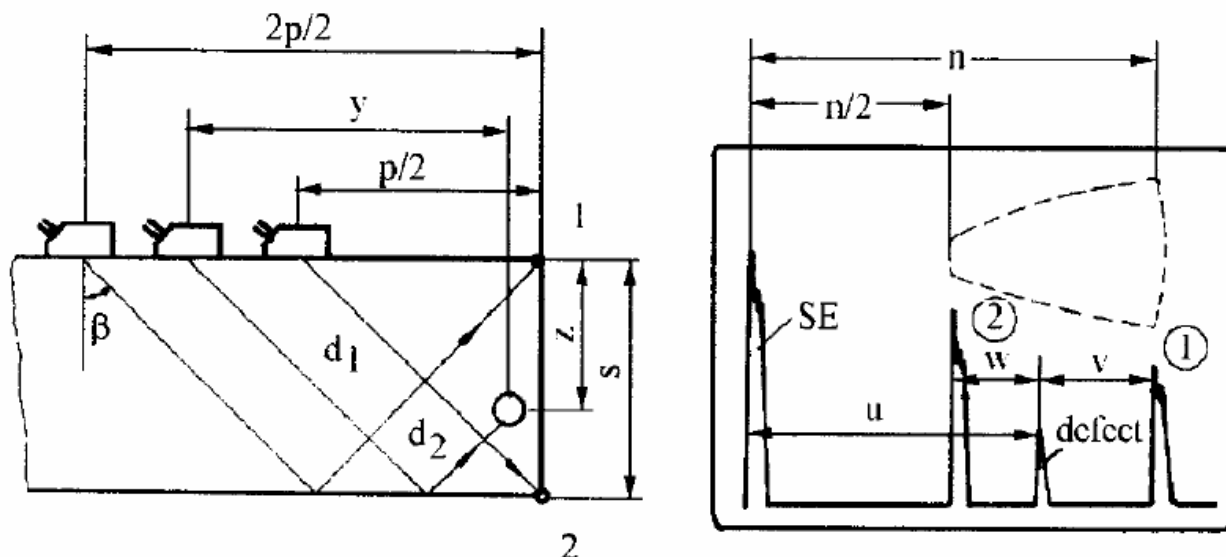


Fig. 41 Determinarea coordonatelor defectului cu ajutorul scalei de pe ecran

La examinarea cu fascicul reflectat se calculează:

$$y = d \cdot \sin \beta \quad ; \quad z = 2s - d \cdot \cos \beta \quad (133)$$

unde $d = d_1 + d_2$ se determină pe ecranul aparatului, calibrat în distanțe. În cazul discontinuităților superficiale se obține:

$$y = s \cdot \operatorname{tg} \beta \quad ; \quad z = s \quad (134)$$

la examinarea directă, respectiv

$$y = 2s \cdot \operatorname{tg} \beta \quad ; \quad z = 0 \quad (135)$$

la examinarea cu fascicul reflectat.

Cea de-a treia coordonată, (x), perpendiculară pe planul de examinare, care fixează poziția discontinuității în lungul piesei, rezultă din poziția planului de simetrie a palpatorului, corespunzător detectării semnalului (ecoului) discontinuității în raport cu marginea piesei, a îmbinării sudate sau cu planul de referință considerat. Pentru operativitatea localizării defectelor - proiecția distanței y și adâncimea z - se folosește nomograma din figura 42.

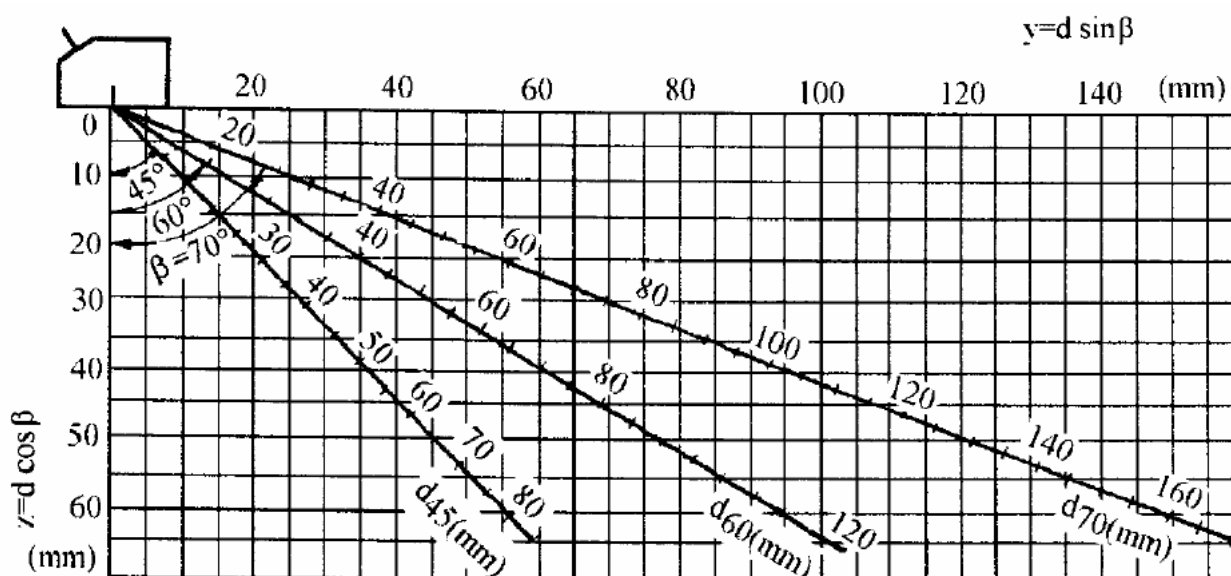


Fig. 42. Nomogramă pentru localizarea grafică a defectului

La discontinuități sau defecte mai mici decât secțiunea fasciculului, mijlocul defectului este dat de poziția palpatorului în care se recepționează semnalul (ecoul) maxim. La discontinuități sau defecte mai mari decât secțiunea fasciculului, mijlocul revine poziției medii a palpatorului, corespunzătoare limitelor apariției și dispariției semnalului de defect la cele două extremități, respectiv atingerii unui anumit procentaj din amplitudinea maximă (de exemplu 50% - ecouri înjumătățite).

În vederea desfășurării operației de localizare a discontinuităților în îmbinarea sudată, se folosesc monitoarele aparatelor, al căror salt de amplitudine se reglează pe oscilogramă în intervalul de distanțe corespunzător unui semipas de examinare

$$p - \frac{p}{2} = \frac{p}{2} = s \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (136)$$

sau mai exact între pozițiile determinate de semnalele maxime provenite de la muchia inferioară, respectiv de la muchia superioară a piesei examinate în zona ei marginală.

Prin construcție, se asigură totodată semnalizarea acustică sau luminoasă a poziției semnalelor, care se suprapun și depășesc nivelul de zgomot al monitorului (1- 2 dB), respectiv un anumit nivel prestabilit, de exemplu 20% din înălțimea ecranului. Necesitatea măririi productivității controlului a impus utilizarea unor metode operative, folosind diagrame sau scale construite pentru determinarea concomitentă a poziției și mărimii discontinuităților, precum și rigle speciale de localizare.

Reglarea scării distanțelor. Afișarea semnalelor în poziție corectă pe scara de măsurare a distanțelor, de pe osciloscopul aparatului, necesită reglarea prealabilă a scării distanțelor. Reglarea scării distanțelor se poate efectua, fie cu ajutorul blocului de calibrare, fie direct pe piesa de controlat la unul din capete cu muchii corespunzătoare din punct de vedere geometric. Calibrarea pe piesa de controlat comportă următoarele operații:

- deplasarea palpatorului până se prinde cu ajutorul fasciculului reflectat muchia superioară, punctul 1, la distanța unui pas de examinare $2p/2=p$, figura 41. Semnalul reflectat de la punctul 1 se translatează pe ecranul osciloscopului în dreptul diviziunilor corespunzătoare distanței p , sau la distanța $2n/2=n$, proporțională cu p ;

- deplasarea în mod similar a palpatorului până se prinde direct semnalul reflectat de la muchia inferioară, punctul 2, la distanța $p/2$, careia pe ecranul osciloscopului îi corespunde $n/2$.

Distanța $n/2$ (n) de pe scala aparatului este deci proporțională cu $p/2$ (p) din piesă.

$$n = k \cdot p = 2ks \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (137)$$

unde k reprezintă inversul scării de transpunere piesă - ecran.

Pentru determinarea distanței proiectate până la discontinuitate sau defect, se scrie egalitatea proporțiilor

$$\frac{y}{u} = \frac{p}{n} \quad (138)$$

de unde rezultă:

$$y = p \frac{u}{n} = \frac{u}{n} 2s \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (139)$$

relație în care raportul u/n se stabilește direct de pe ecran.

Pentru determinarea adâncimii de localizare a discontinuității se scrie egalitatea proporțiilor

$$\frac{z}{s} = \frac{v}{v + w} \quad (140)$$

de unde rezultă:

$$z = s \frac{v}{v + w} = 2s \cdot \frac{n - u}{n} \quad (141)$$

relație în care de data aceasta raportul $(n - u)/n$ se stabilește pe ecranul aparatului.

Imaginând secțiunea de exemplu a unei îmbinări sudate cap la cap, cu axa de simetrie suprapusă peste muchia 1-2, în figura 41, s-a proiectat grosimea piesei pe axa distanțelor (linie întreruptă). Se observă astfel că semnalele provenite de la suprafața piesei sau a îmbinării se situează în dreapta ecranului, pe câtă vreme cele provenite de la rădăcina îmbinării, în stânga ecranului.

6.1.2. Localizarea cu ajutorul scalei DAM. Scala DAM (distanță - amplitudine - mărime) a fost concepută în special pentru evaluarea mărimii discontinuităților, oferind avantaje și în legătură cu localizarea acestora. Localizarea discontinuității se realizează în raport cu suprafața frontală a palpatorului, ceea ce ușurează mult operația, deoarece marginea palpatorului constituie o bază de măsurare univocă și operativă, spre deosebire de indexul palpatorului. Cu alte cuvinte, pe diagrama DAM se citește direct proiecția distanței discontinuității față de suprafața frontală a palpatorului sau protecția reduse a distanței. Utilizarea scalei DAM pentru localizarea discontinuității, presupune alegerea corespunzătoare a domeniului de examinare (scala distanțelor), precum și a sensibilității de lucru sau a amplificării (vezi paragrafele 10.1 și 10.2).

Reglarea scării distanțelor pentru unde longitudinale comportă următoarea succesiune de operații: se cuplează palpatorul cu incidență normală, și cu ajutorul comutatorului de amplificare, se aduce primul ecou de fund pe ecran, iar cu ajutorul comutatorului de decalare a semnalului și comutatorului domeniului de examinare, se translatează imaginea de pe ecran până ce flancul ascendent al impulsului de emisie se suprapune peste diviziunea zero de pe scală, iar al primului ecou de fund, tangent la diviziunea corespunzătoare grosimii piesei.

Reglarea scării distanțelor pentru unde transversale se efectuează prin intermediul a două repere marcate pe scala DAM, aflate la distanța $100 \cdot k$ (mm), respectiv $25 \cdot k$ (mm) și comportă de asemenea mai multe operații. În acest scop se cuplează palpatorul înclinat pe blocul de etalonare A_1 (paragraful 10) și se urmărește obținerea ecoului maxim de pe suprafața cilindrică cu raza de 100 mm pentru palpatorul normal, respectiv pe blocul de

etalonare A_2 cu raza de 25 mm, pentru palpatorul miniatural. Apoi, prin cele două operații menționate, se aduce primul ecou de fund în dreptul reperului marcat în stânga scalei și al doilea ecou de fund în dreptul reperului marcat în dreapta scalei (figura 43).

În felul acesta, la apariția unui semnal de defect se citește poziția sa pe ecranul aparatului k_a și se măsoară distanța a pe direcția fascicului, pornind de la suprafața frontală a palpatorului.

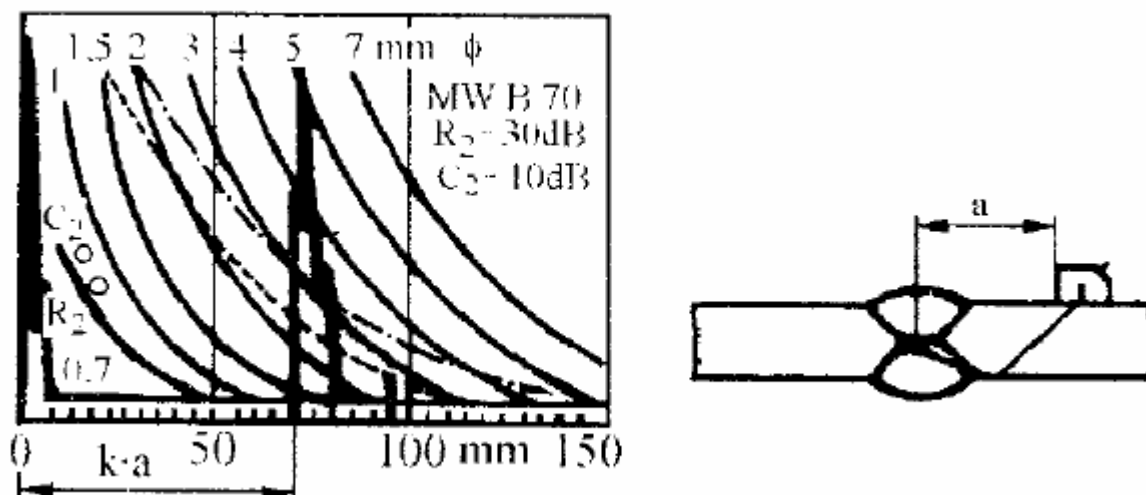


Fig. 43. Determinarea proiecției distanței reduse până la defect

6. 1.3. Localizarea cu rigle speciale. În scopul poziționării operative a discontinuităților se folosesc rigle speciale de localizare. Ele sunt concepute din considerentul de natură geometrică potrivit căruia într-o secțiune dată, unui anumit parcurs orientat al unei reflectate îi corespunde o adâncime univoc definită a discontinuității sau defectului și reciproc că unei anumite adâncimi a discontinuității îi corespunde o anumită distanță între palpator și acea discontinuitate.

Pe principiul menționat, s-au construit rigle de localizare a defectelor aferente diferitelor palpatoare înclinare. Pe riglă au fost marcate distanțele proiectate ale fascicului emis sub incidența palpatorului respectiv, o rețea de drepte paralele echidistante, corespunzând diferitelor grosimi controlate, precum și o dreaptă înclinată corespunzător unghiului de incidență al palpatorului, care trece prin originea axelor.

Rigleta, deplasabilă, are marginile pe care sunt marcate la aceeași scară grosimile retezate sub unghiul de incidență al palpatorului. Rigla este fixată pe corpul palpatorului, astfel încât originea axelor de coordonate să coincidă cu indexul de zero al palpatorului. Potrivind rigleta, astfel încât muchia retezată să intersecteze dreapta înclinată de pe riglă în dreptul marcajului de grosime a piesei controlate, la distanța corespunzătoare semnalului de defect de pe ecranul aparatului, exprimată în diviziuni ale scalei, se obține pe rigletă adâncimea z la care se găsește acesta, iar pe riglă distanța y dintre palpator și defect sau discontinuitate.

În ultimul timp, riglele de localizare a discontinuităților au fost la rândul lor perfecționate prin utilizarea unui șir de minidiode cuplate electric la blocul de baleiaj, astfel încât să declanșeze semnale luminoase în pozițiile corespunzătoare proiecției distanței discontinuității pe direcția de examinare. Semnalizarea luminoasă este astfel reglată, încât să se producă numai la impulsuri (ecouri), care depășesc $1/5$ din înălțimea ecranului. Folosind o rigletă ajutătoare, devine posibilă determinarea concomitentă și a adâncimii la care se află defectul. Cu notațiile din figura 44, adâncimea discontinuității va fi:

$$z = s \cdot \frac{t}{d} \quad (142)$$

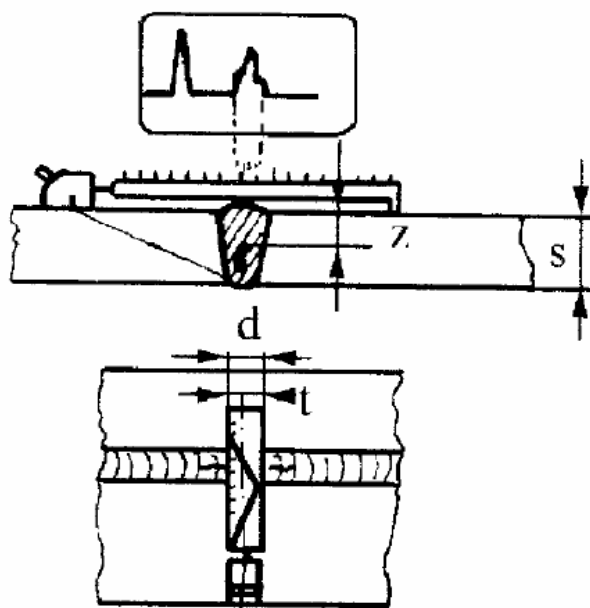


Fig. 44. Localizarea defectului cu rigla cu diode

Localizarea corectă a discontinuităților din material necesită un reglaj prealabil, prin baleierea diodelor în pozițiile corespunzătoare pasului de examinare p și a pasului înjumătățit $p/2$, ca și în cazul folosirii scalei DAM. În acest scop, cu unul din butoanele sistemului de baleiaj se aduce semnalul luminos în dreptul muchiei superioare, iar cu celălalt, după schimbarea poziției palpatorului, în dreptul muchiei inferioare ca în figura 41. Printr-un sistem auxiliar de semnalizare luminoasă, rigla permite totodată verificarea în orice moment a cuplajului acustic corect dintre palpator și piesa controlată. Aria de folosire a riglei de localizare luminoasă cuprinde și îmbinările sudate. La piese cilindrice precizia de localizare se consideră satisfăcătoare numai dacă diametrul este de peste 500 mm, [182].

6.2. Determinarea mărimii

Pentru înțelegerea problemei, trebuie precizat de la început ca numai discontinuitățile mai mici decât suprafața piezocristalului, egal distanțate de suprafața de emisie, de aceeași formă și la fel orientate în raport cu axa fasciculului, produc semnale proporționale cu mărimea lor. La aparatele obișnuite, fără compensator de atenuare, discontinuități mari, plasate spre exemplu la distanțe mari produc semnale relativ mici, pe câtă vreme discontinuități mai mici, plasate însă favorabil și la distanțe mai mici, produc semnale de amplitudine ridicată.

Amplitudinea semnalului este influențată de mai mulți factori, cei mai de seamă fiind: modul de reglare a aparaturii, condițiile de cuplare, atenuarea în material, poziția, orientarea și natura discontinuității sau defectului.

Dintre factorii menționați, primii doi și chiar și al treilea sunt oarecum controlabili prin tehnicile de examinare și funcțiile asigurate de defectoscop, cel de-al patrulea este independent. Pentru stabilirea mărimii discontinuității se poate recurge la următoarele metode:

- compararea amplitudinii semnalului cu ecouri provenite de la reflectoare de referință ale blocului de calibrare, sau ale piesei controlate;
- folosirea scalei DAM;

- stabilirea conturului prin circumscrierea suprafeței.

Determinarea mărimii cu ajutorul reflectoarelor de referință.

La această metodă, amplitudinea semnalului provenit de la defect se compară cu un ecou de referință cunoscut, obținut de la un reflector natural sau artificial, de la o distanță mai mare sau egală cu cea a defectului.

Ecoul de referință se obține de la orificii cilindrice calibrate, dispuse în blocurile de referință pe domenii de grosimi, potrivit indicațiilor centralizate în tabelul 16 de la paragraful 10.5. Diametrele acestor orificii reprezintă un indicator al sensibilității de lucru și al criteriului de înregistrare a discontinuităților neadmise, motiv pentru care trebuie să fie prescrise în norma de control. În cele mai multe cazuri se lucrează cu orificii de Φ 3 mm. Pentru evitarea găurilor cu diametru prea mic, se admite folosirea unor diametre mai mari și translatarea curbei de referință printr-un increment de amplificarea.

Aplicarea metodei presupune reglarea prealabilă a scării distanțelor și amplificării, iar apoi ridicarea curbei caracteristice de referință amplitudine - distanță, potrivit paragrafului 6.5.2. Aprecierea mărimii discontinuității se face prin raportarea amplitudinii semnalului la amplitudinea de pe curba de referință. Diferența se exprimă, fie în procente, fie direct în dB.

Ca urmare a influenței factorilor de atenuare și de cuplaj, se recurge la corectarea amplitudinii semnalului. Corecția pentru compensarea atenuării se impune după [60], în următoarele condiții:

- dacă distanța dintre discontinuitate și palpator depășește 200 mm la frecvența de 2 MHz, respectiv 75 mm la frecvența de 4 MHz;
- dacă materialul prezintă un coeficient de atenuare peste 0,1 dB/cm, la frecvența de 2 MHz, respectiv peste 0,3 dB/cm la frecvența de 4 MHz.

Corecția de atenuare și de cuplare se efectuează după cum urmează: se conectează în transmisie directă două palpatoare înclinare cu care urmează a se executa controlul și se reglează distanța dintre ele pe blocul de calibrare, până la obținerea ecoului maxim. Fie A_1 (dB) amplificarea corespunzătoare. Se repetă operația pe piesa de controlat și se determină amplificarea totală A_2 (dB), necesară pentru obținerea aceleiași amplitudini a ecoului maxim între cele două palpatoare. Corecția necesară rezultă din $v_{nec} = A_2 - A_1$. Mărimii discontinuității poate fi exprimată totodată și prin diferența în dB față de nivelul de înregistrare - marcare reglat.

Determinarea prin calcul a mărimii discontinuității.

Reprezintă de fapt o variantă a metodei comparative, constând din măsurarea înălțimii semnalului (ecoului) de discontinuitate H_d și compararea cu înălțimea semnalului (ecoului) de referință H_0 .

Prin explicitarea lui D_d în relația (112), în care se face înlocuirea

$$\frac{H_d}{H_0} = \frac{p}{p_0} \quad (143)$$

rezultă

$$D_d = \frac{4\lambda d}{\pi D_p} \sqrt{\frac{H_d}{H_0}} \quad (144)$$

$$D_d = \frac{D_p d}{\pi N} \sqrt{\frac{H_d}{H_0}} \quad (145)$$

respectiv unde D_p , N și d sunt cunoscute, iar H_0 se determină cu ajutorul unei plăci subțiri, având suprafețele plan-paralele, fin prelucrate pentru a reproduce o discontinuitate plană infinit de mare, dispusă la o distanță comparabilă cu N . Relațiile sunt valabile în ipoteza $D_d < D_p$.

Determinarea mărimii folosind diagrama DAM.

Diagrama DAM permite stabilirea mărimii unei discontinuități mai mici decât diametrul traductorului piezoelectric prin compararea semnalului de la acea discontinuitate cu ecoul recepționat de la un reflector ideal, plan circular, situat la aceeași distanță. Utilizarea diagramei DAM presupune reglarea prealabilă a scării distanțelor, conform paragrafului 6.1.2., precum și a sensibilității de examinare.

Amplificarea sau sensibilitatea se reglează după calibrarea scării distanțelor, utilizând blocurile cilindrice de rază $R_1 = 100$ mm, la blocul de etalonare A_1 , sau $R_2 = 25$ mm, la blocul de etalonare A_2 , fie defecte artificiale de referință, materializate prin orificii cu diametrul Φ 1,5 mm la blocul A_1 , respectiv de Φ 5 mm, la blocul A_2 . Reglarea sensibilității de examinare cu ajutorul suprafețelor cilindrice se realizează potrivit vârful primului ecou obținut în poziția maximă de reflexie a palpatorului în interiorul cercurilor R_1 , respectiv R_2 de pe scala DAM și suplimentând apoi amplificarea cu valoarea înscrisă pe scală. Reglarea sensibilității de examinare cu ajutorul orificiilor de referință se realizează prin potrivirea vârfului primului ecou obținut în poziția de maximă reflexie de la orificiile blocului de etalonare A_1 , respectiv A_2 , în interiorul cercurilor C_1 , respectiv C_2 ale scalei DAM și suplimentând apoi în mod similar amplificarea cu valoarea înscrisă pe scală.

În vederea compensării pierderilor prin cuplare, se va suplimenta amplificarea conform indicațiilor de la paragraful 4.10.

Mărima defectului echivalent se poate determina în aceste condiții direct sau prin interpolare cu ajutorul diagramei DAM, din poziția vârfului semnalului de defect. Defectul echivalent este defectul circular orientat perpendicular pe fascicul, care la aceeași distanță redusă, produce un semnal de aceeași înălțime ca și defectul sau discontinuitatea reală.

Relația pentru calculul diametrului echivalent D_e , al defectului are forma:

$$D_e = \sqrt{\frac{\sqrt{2}}{\pi} \lambda \sqrt{D \cdot d}} \quad (146)$$

unde λ este lungimea de undă D - diametrul orificiului de reglare a corpului de etalonare, iar d este distanța parcursului undelor până la orificiul de diametru D .

În cazul în care semnalele provenite de la discontinuități în material sunt prea mici, se procedează la amplificarea lor cu un număr de decibeli, de exemplu cu 10 dB la cele provenite din domeniul câmpului apropiat și cu 12 dB la cele provenite din câmpul îndepărtat, corectându-se în mod corespunzător mărimea diametrului echivalent. Problema se tratează după cum urmează. În cazul în care semnalul de la discontinuitate sau defect depășește înălțimea ecranului, se micșorează amplitudinea, de exemplu cu 10, respectiv 12 dB, corectându-se în mod corespunzător mărimea diametrului echivalent la jumătate din valoarea indicată de vârful semnalului. Dacă corecțiile aplicate sunt de -10dB, respectiv -12dB, mărimea defectului echivalent va fi dublă față de valoarea indicată de poziția vârfului semnalului, [252].

Având în vedere că amplitudinea semnalului de discontinuitate sau defect este influențată în mare măsură de unghiul sub care fasciculul întâlnește suprafața acesteia, precum și de distanța parcursului sonor și chiar de frecvență, la determinările de precizie se recomandă ridicarea experimentală a curbelor de corecție.

Relația dintre mărimea defectului echivalent și mărimea defectului real.

Încercările de corelare a mărimii (diametrului) defectului echivalent D_e stabilit cu ajutorul metodei DAM, cu mărimea (diametrul) reală a defectului D_r a preocupat intens cercurile de specialiști. Cercetările sistematice, urmărite pe diferite tipuri de discontinuități naturale sau artificiale, cu palpatoare și unghiuri diferite de examinare, urmate de secționarea pieselor în vederea măsurării dimensiunilor reale și a transformării acestora în diametru real [2] au condus la rezultate destul de apropiate.

Ele scot în evidență faptul că defectoscopia ultrasonică subvaluează în general mărimea discontinuității decelate, toate corelațiile, cu nivelul domeniului $D_e < 2$ mm situându-se peste dreapta $D_r = D_e$. Plaja de rezultate se situează în intervalul

$$D_r = (1,5 \div 2,0) D_e \quad (147)$$

limita inferioară, corespunzând unghiurilor mari de incidență 70° , 80° iar cea superioară, unghiurilor mici de incidență, 35° , 45° . În concordanță și cu concluziile altor cercetări [27], în practică se consideră acoperitor, $D_r = 2D_e$, valoarea lui D_r fiind operantă ca rezultat al controlului ultrasonic pentru toate discontinuitățile mai mici decât diametrul palpatorului. Explicația constă în aceea că suprafețele de reflexie ale discontinuităților și defectelor naturale sunt departe de a putea fi considerate plane ca și în teorie. Rugozitatea lor variază în limite foarte largi, ceea ce produce difuzia undei reflectate și ca urmare micșorarea presiunii captate de traductorul piezoelectric.

Stabilirea conturului discontinuității.

Determinarea limitelor discontinuității este necesară pentru evaluarea mărimii acelor defecte, care depășesc diametrul fasciculului emis de palpator. Identificarea extremităților se realizează prin deplasarea liniară a palpatorului, paralel cu discontinuitatea în cele două sensuri, până ce înălțimea semnalului scade la o anumită valoare. Se obișnuiește a se considera drept capăt al discontinuității, poziția palpatorului marcată de planul median perpendicular pe reflector, unde înălțimea semnalului scade la jumătate din înălțimea recepționată de-a lungul defectului (figura 45,a), ceea ce corespunde unui decrement de 6 dB. După normele actuale, la grosimi care depășesc 40 mm, reperarea marginilor discontinuităților se realizează urmărind pozițiile planurilor longitudinale ale palpatorului corespunzătoare unui decrement de 14 dB (20 dB), ceea ce semnifică scăderea la 20% (10%) a semnalului maxim.

Distanța dintre linia de deplasare a palpatorului în lungul piesei și marginea acesteia este determinată de poziția palpatorului în care se recepționează semnalul maxim.

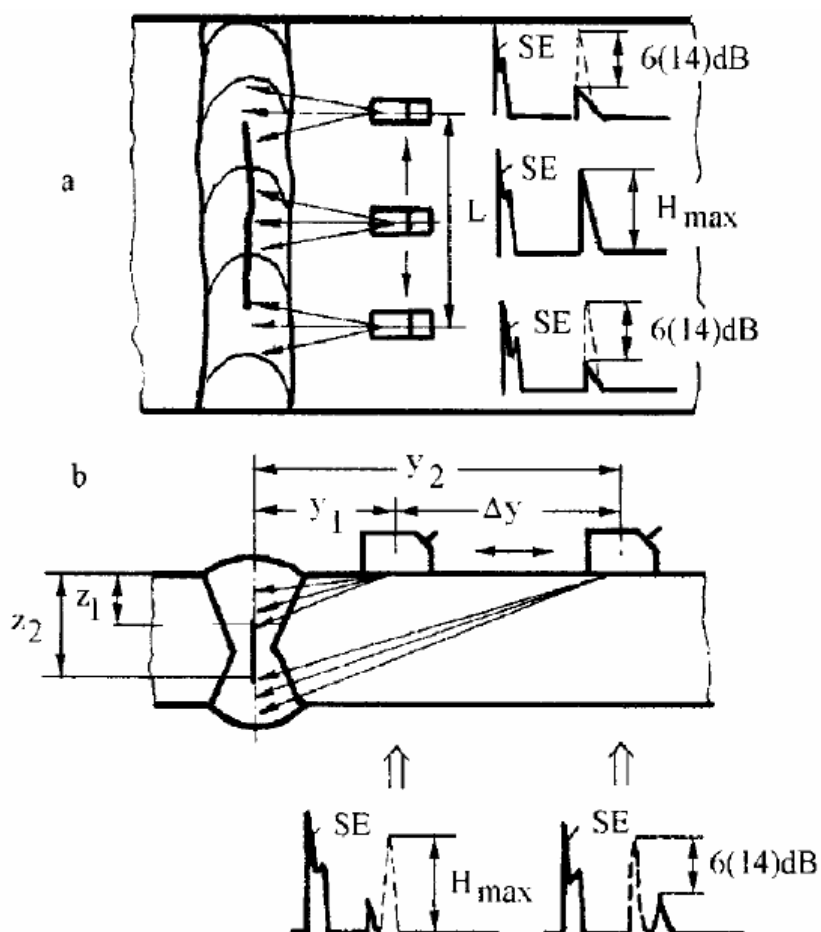


Fig. 45. Delimitarea conturului defectelor plane: a) lungime; b) lățime

Datorită extinderii discontinuității și pe direcția grosimii, semnalele se obțin într-un interval de distanțe $\Delta y = y_2 - y_1$, în care fasciculul baleiază lățimea discontinuității

$$\Delta l = z_2 - z_1 = \frac{\Delta y}{\operatorname{tg} \beta} \quad (148)$$

Urmărind în acest interval amplitudinea semnalului, se pune în evidență variația acesteia, figura 45b, între o valoare stabilită convențional, ceea ce corespunde marginii discontinuității. Se obișnuiește să se admită ca și la stabilirea lungimii, fie $H_{\min} = 0,5H_{\max}$, fie $H_{\min} = 0,2H_{\max}$

6.3. Ecodinamica, forma și orientarea discontinuității

Discontinuitățile, imperfecțiunile, reprezintă o diversitate foarte mare de forme geometrice, de orientare și neregularități ale suprafețelor de separare față de metalul de bază. Ca urmare, reflexia și refracția fasciculului de unde este o variabilă dependentă de acești parametri, deosebindu-se de condițiile corespunzătoare suprafețelor ideale. Forma, chiar idealizată, lipsită de rugozități, a suprafeței de separație dintre două medii, are o influență considerabilă asupra fenomenelor respective. Diferențele de transfer și de propagare a undelor pe forme distincte de suprafețe întrec substanțial lungimea de undă. Dacă dimensiunea discontinuității este comparabilă cu lungimea de undă, forma suprafeței de reflexie capătă o pondere însemnată.

Considerând expresia presiunii acustice pe un element infinitezimal la distanța X_M în câmpul îndepărtat, în ipoteza neglijării atenuării:

$$p = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{p_0}{D^2} \int_{S_M} c_R \cdot l^2 dS_M \quad (149)$$

unde CR este coeficientul de reflexie. Introducând condițiile limită specifice formelor geometrice simple ale suprafețelor de separație, în cazul discontinuităților de mărime apropiată lungimii de undă, se obțin următoarele particularizări ale relației de bază:

- în cazul suprafeței plane infinite

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\pi D}{4\lambda} \cdot \frac{1}{x} = k_1 \cdot \frac{1}{x} \quad (150)$$

- în cazul suprafeței circulare plane de diametru D'

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{D' \cdot D}{4\lambda} \cdot \frac{1}{x} \right)^2 = k_2 \cdot \frac{1}{x^2} \quad (151)$$

- în cazul suprafeței plane de lățime mică L

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\pi D^2 \cdot L}{4} \cdot \frac{1}{\sqrt{2(\lambda \cdot x)^3}} = k_3 \cdot \frac{1}{x^{3/2}} \quad (152)$$

- în cazul suprafeței sferice convexe de diametru d

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\pi D^2 \cdot d}{16\lambda} \cdot \frac{1}{x^2 \left(1 + \frac{d}{2x} \right)} = k_4(d) \cdot \frac{1}{x^2 \left(1 + \frac{d}{2x} \right)} \quad (153)$$

- în cazul suprafeței sferice concave de diametru d

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\pi D^2 \cdot d}{16\lambda} \cdot \frac{1}{x^2 \left(1 - \frac{d}{2x} \right)} = k_5(d) \cdot \frac{1}{x^2 \left(1 - \frac{d}{2x} \right)} \quad (154)$$

- în cazul suprafeței cilindrice, când $d < x$

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\pi D^2}{8} \cdot \frac{\sqrt{d}}{\lambda} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\lambda x^3}} = k_6 \cdot \frac{1}{x^{3/2}} \quad (155)$$

Analiza acestor relații indică o scădere exponențială a câmpului sonor cu distanța, mărimea exponentului depinzând de forma suprafeței de separație a discontinuității. În cazul discontinuităților sferice, pierderile de presiune sunt incomparabil mai mari, fiind influențate de raportul diametru/distanță, precum și de curbura suprafeței (+ sau -). Aceasta explică de ce în cazul discontinuităților cvasisferice de tipul suflurilor și incluziunilor, sensibilitatea de detectare este inferioară în comparație cu cea corespunzătoare discontinuității plane, orientate perpendicular pe direcția de propagare. Se menționează că, spre exemplu, la o lungime de undă constantă de circa 2 mm, aceeași amplitudine a semnalului de reflexie se poate obține și de la o suprafață plană circulară de diametru de aproximativ 3 mm, ca și de la o suprafață sferică, având un diametru de cca. 12 mm.

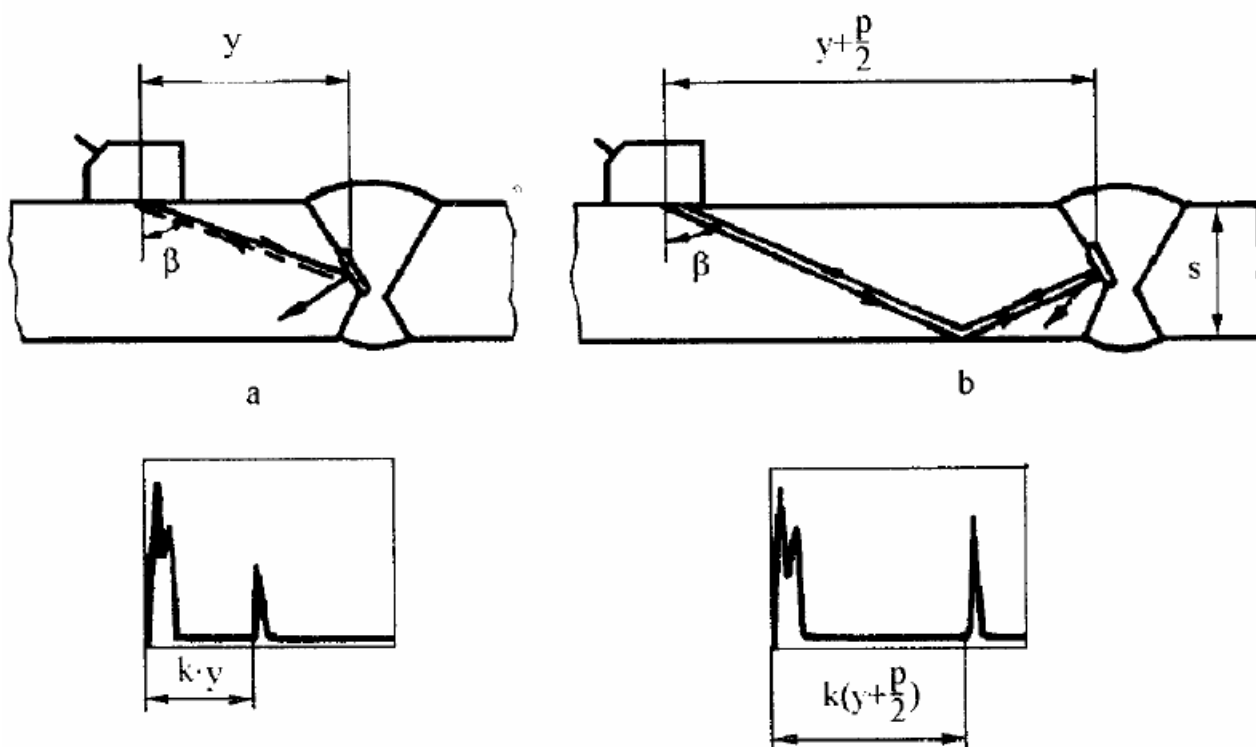


Fig. 46 Influența orientării defectului asupra mărimii semnalului: a) fasciculul inclinat; b) fasciculul perpendicular

Discontinuitățile mari pot prezenta mai multe suprafețe de reflexie din cauza orientării și forme, și ca urmare semnalele provenite de la acestea diferă ca amplitudine și poziție.

Discontinuități plane cvasiperpendiculare pe direcția fasciculului produc semnale relativ mari, pe câtă vreme discontinuități curbate în aceleași condiții, produc semnale mici, datorită pierderilor de energie prin reflexie și difuzie în alte direcții. Discontinuități de aceeași mărime și formă, dar de orientare diferită produc semnale de mărime diferită, datorită diferențelor de reflexie, figura 46. Se menționează dificultatea detectării în special a discontinuităților orientate paralel cu fasciculul, respectiv a celor orientate sub unghiuri mai mici de 60° .

Având în vedere cele menționate, în special la piese de grosimi mijlocii și mari $s > 30 \div 40$ mm, un control riguros impune examinarea de pe ambele suprafețe, cu cât mai multe unghiuri de incidență, utilizarea unor palpatoare de frecvență mai mare înfaza de determinare a mărimii discontinuității.

Forma și natura discontinuității se manifestă nu numai asupra amplitudinii, ci și asupra formei semnalului, dar mai ales asupra ecodinamicii.

Ecodinamica, reprezintă înfășurătoarea semnalelor recepționate prin următoarele mișcări de baleiaj ale palpatorului, figura 47:

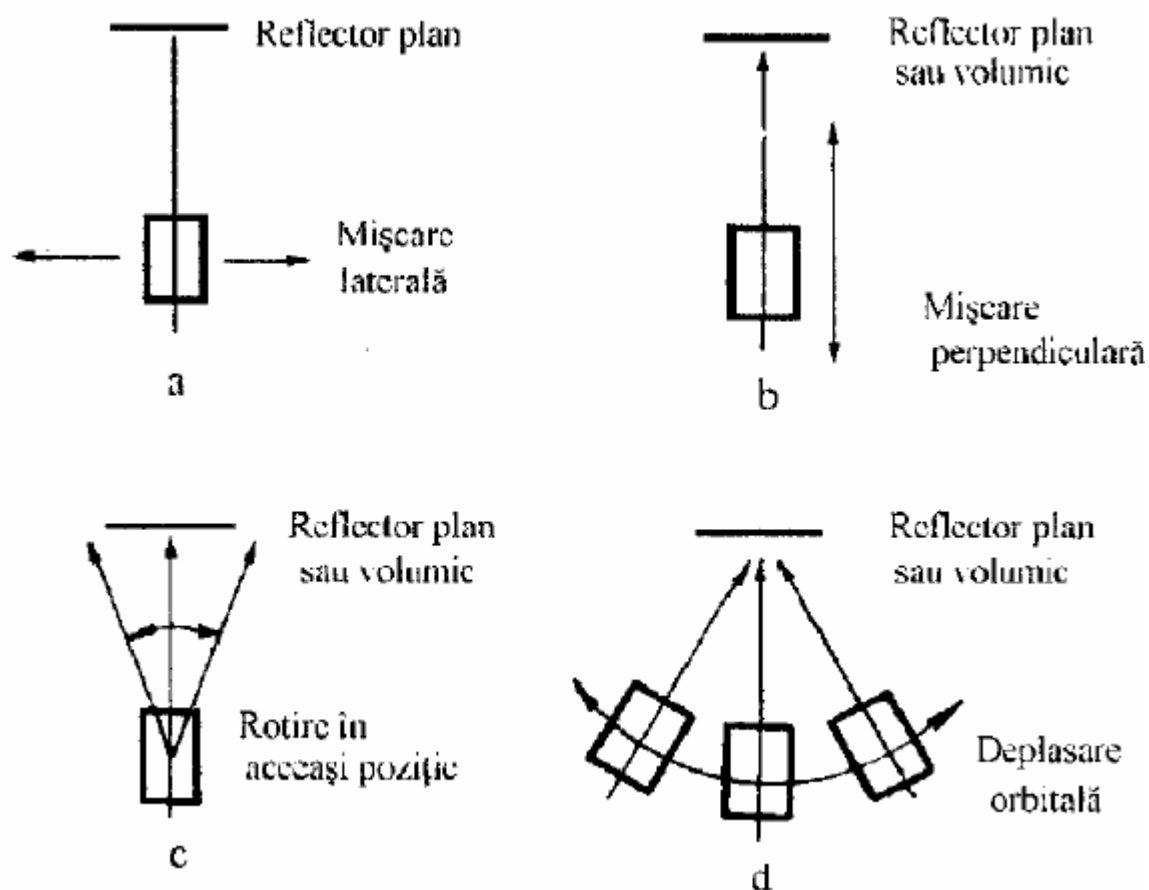


Fig. 47. Mișcările de baleiere a defectului: a) laterală; b) perpendiculară; c) rotire; d) deplasare orbitală

- a. lateral, paralel cu direcția discontinuității, (cu palpator normal sau înclinat);
- b. de adâncime, prin mișcarea perpendiculară pe direcția discontinuității, (cu palpator înclinat);
- c. rotirea în aceeași poziție a palpatorului (cu palpator înclinat);
- d. deplasarea orbitală a palpatorului în jurul discontinuității, (cu palpator normal sau înclinat).

Discontinuitățile volumice, fiind reflectoare de suprafață mică, se comportă ca și emițătoarele (palpatoarele) cu diametru mic: câmp apropiat restrâns și divergență mare. Sensibilitatea direcțională a acestora este inferioară față de cea a discontinuităților plane, ecodinamica fiind diferențiată în funcție de felul baleiajului palpatorului și în funcție de mărimea discontinuității.

Discontinuitățile plane, fiind de regulă reflectoare de suprafață plană mai extinsă, se comportă ca și palpatoarele de diametru mare: câmp apropiat extins și divergență mică. Sensibilitatea direcțională este ridicată, iar ecodinamica, net diferențiată în funcție de felul baleiajului.

Discontinuitățile cu suprafața neregulată provoacă semnale de contur complex și ecodinamică variabilă.

Ecodinamica discontinuităților volumice cvasisferice, la baleierea de tip a, b și d este de forma unui clopot cu ramurile urcătoare și coborâtoare de pantă relativ lină.

La baleiajul de rotire a palpatorului, ecodinamica prezintă un palier maxim.

Ecodinamica discontinuităților volumice cilindrice, examinate perpendicular pe generatoare, se deosebește de cea a discontinuității cvasisferice prin aceea că forma de clopot se regăsește numai la mișcările e și d, iar cea cu palier maxim la mișcările a și b. Ecodinamica discontinuităților plane este asemănătoare cu cea a celor cilindrice cu

deosebirea că palierul de maxim se menține constant pe o durată mai mare, iar ramurile ascendente, respectiv descendente la baleiajul de tip c și d oferă o pantă relativ ridicată.

O privire sinoptică asupra legăturii dintre forma ecodinamicii, forma discontinuității și tipul de baleiaj al palpatorului este prezentată în tabelul 13.

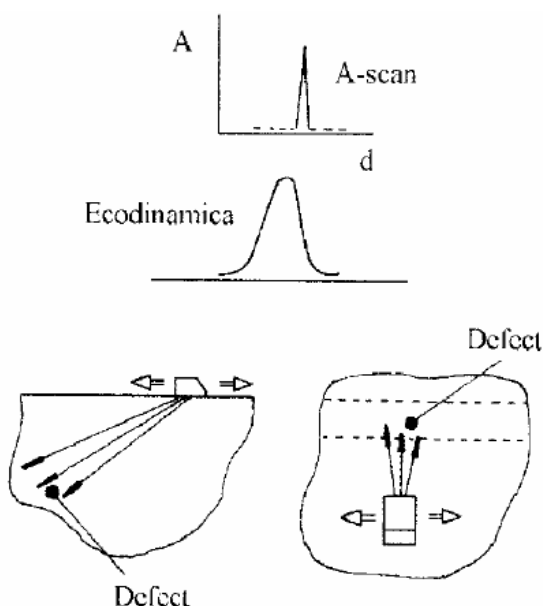


Fig. 48. Forma ecodinamicii obținută prin baleiajul palpatorului de la o discontinuitate volumică

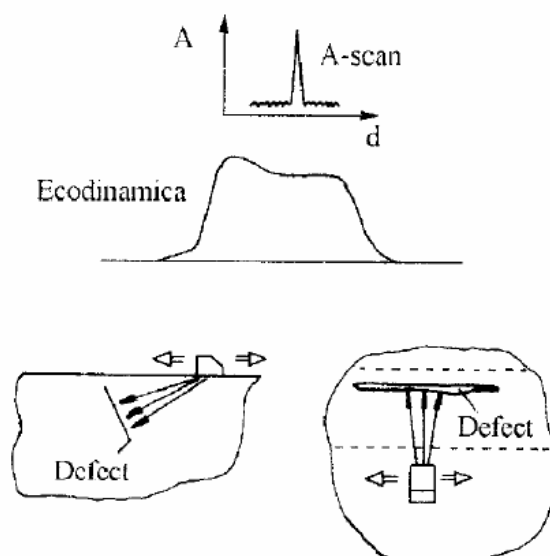


Fig. 49 Forma ecodinamicii obținută prin baleiajul palpatorului de la o discontinuitate plană

În exemplul din figura 48, se indică concordanța dintre mișcările de baleiaj ale palpatorului de unde transversale în lungul cusăturii și perpendicular pe aceasta, forma semnalului de discontinuitate reflectat de la o imperfecțiune de natură volumică precum și ecodinamica, adică variația amplitudinii maxime de semnal. Din exemplul din figura 49 rezultă modul prin care, în urma mișcărilor de baleiere ale palpatorului în lungul cusăturii și/sau perpendicular pe aceasta, se obține forma ecodinamicii tipică defectelor plane.

Cercetările recente au pus în evidență dependența formei suprafeței de reflexie (plană, concavă, convexă cu $d > D_p$ respectiv $d < D_p$), asupra caracteristicilor ecodinamicii, [176], [232]. Astfel, s-a observat creșterea duratei ecodinamicii cu distanța, convergența duratei la distanța de 50 mm, în cazul tuturor formelor de discontinuitate. Totodată s-a pus în evidență scăderea sistematică a flancului descendent, definit în domeniul 90/20 procente din înălțimea înfășurătorii, cu creșterea distanței dintre palpator și discontinuitate, precum și menținerea la cele mai mari valori ale duratei caracteristicilor ecodinamicii în cazul discontinuității plane de diametru echivalent D_e/D_p .

Clasificarea indicațiilor interne de discontinuitate se face pe baza unei proceduri-organigramă prevăzută de [261], luând în considerație:

- amplitudinea ecoului,
- reflectivitatea direcțională,
- modelul ecostatic și ecodinamic.

Procedura-organigramă cuprinde cinci etape, comparate cu curba CAD amplitudine-distanță sau prin comparație cu înălțimea maximă de ecou provenit de la discontinuitate:

Etapa 1, constă în aplicarea CAD- 10 dB, în vederea evitării clasării unor indicații cu amplitudini de ecou foarte reduse, nesemnificative;

Etapa 2, constă în recunoașterea clasării unor indicații ca indicații de amplitudini ridicate CAD + 6 dB, ceea ce se atribuie discontinuităților plane;

Etapa 3, constă în micșorarea la jumătate a înregistrării CAD, adică aplicarea CAD-

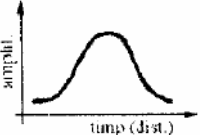











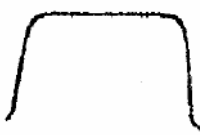



6 dB. pentru cel puțin unul din unghiurile de incidență cu care se lucrează. Existența unei reflectivități ridicate este apreciată, fie prin diferența amplitudinilor extreme a semnalelor provenite de la palpatoare de unde transversale cu unghiuri de incidență diferite și în acest caz $(H_{dmax} - H_{dmin.}) \geq 9$ dB, fie prin diferența corespunzătoare între amplitudinile extreme ale semnalelor reflectate de la discontinuități și captate unele cu palpator de unde transversale, iar altele cu palpator de unde longitudinale și în acest caz $(H_{dmax} - H_{dmin.}) \geq 15$ dB. Dacă înălțimea semnalului reflectat de la discontinuitate este cel puțin jumătate din cea de referință (CAD) și diferența de reflectivitate este mare, peste CAD + 9 dB, respectiv CAD + 15 dB, discontinuitatea este plană.

Etapele 4, constă în aplicarea unor criterii privind aspectul ecostaticii și ecodinamicii. Ecostatica, adică reprezentarea A, care indică o reflectivitate direcțională redusă, califică indicația de discontinuitate în neplană.

Etapele 5, constă în aplicarea criteriilor analizei ecodinamicii, conform tabelului 13.

Dacă ecodinamica nu se încadrează în aspectul deductibil din etapa 3, indicația de discontinuitate este calificată neplană.

Tabelul 13

Tipul defectului	Tipul baleajului			
	laterla	de adâncime	rotire	deplasare orbitală
Volumic cuasisferic izolat				
Volumic cuasisferic aliniat pe lungimea cusăturii				
Volumic cilindric (alungit) pe lungimea cusăturii				
Plan				

6.4. Semnale false

În cele mai multe cazuri, pentru identificarea corectă a naturii discontinuității trebuie să se ia în considerație atât sensibilitatea direcțională, cât și poziția de recepționare a semnalelor reflectate. Un exemplu tipic pentru îmbinările sudate îl reprezintă recunoașterea și diferențierea semnalului de reflexie provenit de la marginea cusăturii (figura 50), în raport cu cel provenit de la o fisură superficială din zona influențată termic, figura 51. În primul caz, $a_1 = a_2$ pe câtă vreme în cel de-al doilea caz $a_1 \neq a_2$.

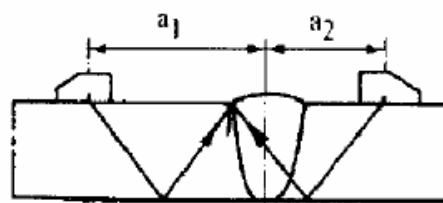
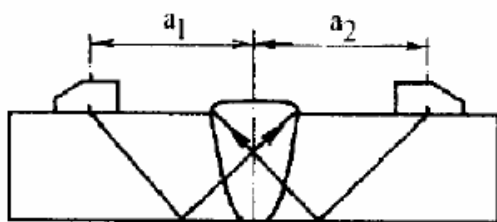


Fig. 50. Semnale false provenite de la marginea cusăturii

Fig. 51. Semnale false provenite de la o fisură în ZIT sau de la o creștătură marginală

În cazul abaterii de aliniere se obțin semnale de amplitudine ridicată numai dintr-o singură parte, așa cum este indicat în figura 52. Concluzii certe asupra naturii discontinuității pot fi trase însă numai dacă proiecția distanței parcurse corespunde distanței muchiei opuse a tablei.

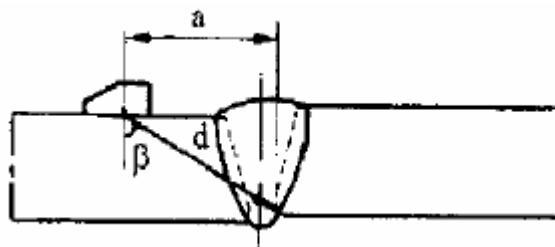


Fig. 52. Semnale false provenite de la dezaxare

Există și situații în care semnalele recepționate, de exemplu la controlul îmbinărilor sudate, nu sunt cauzate neapărat de către defecte, ci de forma geometrică a îmbinării sau muchiile piesei sudate. Cele mai frecvente cazuri de semnale, determinate de forma geometrică provin de la suprafața concavă a scurgerilor sau de la muchiile pieselor. Situații asemănătoare se întâlnesc și în cazul orientării fasciculului de unde în zona de supraînălțare a îmbinărilor cap la cap sau în zona de profil convex a îmbinărilor sudate de coli.

6.5. Evaluarea și înregistrarea semnalelor de defect

La examinarea cu ultrasunete, semnalele urmărite provin de la două categorii de discontinuități:

- plane și/sau extinse în lungime peste limitele de cuprindere în diametrul palpatorului;
- volumice și/sau plane scurte, cu dimensiuni mai mici decât diametrul palpatorului.

Semnalele din prima categorie se evaluează prin metoda indicată la paragraful 6.2.5., se înregistrează ca lungime și se poziționează cât mai exact pe piesă.

Semnalele din cea de-a doua categorie, se rețin și înregistrează dacă amplitudinea în condițiile unei reglări corecte a sensibilității de lucru, se situează la cel puțin 50% din nivelul de înregistrare sau din curba caracteristică de înregistrare (diferență de - 6dB). În vederea unei aplicări eficiente a eventualelor remedieri, pe piesa controlată se va marca planul (poziția) inițial și direcția de control. La fiecare semnal înregistrabil se impune măsurarea și consemnarea următorilor parametri:

- distanța de la planul inițial al controlului, x , măsurată în lungul piesei, paralel cu axa acesteia;
- poziția discontinuității față de planul de simetrie;
- adâncimea corespunzătoare poziției palpatorului de la care se recepționează semnalul maxim și extinderea în adâncime, (lățimea defectului), cotele z ;
- mărimea, diametrul echivalent, amplitudinea în dB sau diferența de amplitudine în dB față de semnalul de referință;
- lungimea măsurată cu ajutorul metodei celor 6, 14 sau 20 dB, conform paragrafului 6.2.5.

Pentru evaluarea semnalelor din cea de-a doua categorie de discontinuități există următoarele posibilități:

- folosirea metodei nivelului de referință, definit cu ajutorul reflectoarelor blocurilor de referință;
- folosirea metodei curbei caracteristice de referință, distanță - amplificare, construite tot cu ajutorul blocurilor de referință;
- folosirea metodei diagramei și scalei DAM.

6.5.1. Metoda nivelului de referință, are în vedere compararea amplitudinii semnalelor provenite de la piesa controlată (A_d), cu cele provenite de la aceeași distanță sau de la o distanță imediat superioară, de la reflectoarele (orificiile) blocului de referință (A_1). Se determină diferența de amplitudine:

$$\Delta A = A_r - A_d \text{ (dB)} \quad (156)$$

prin reglarea vârfului lui A_d la așa numitul nivel de referință ales, situat în limitele 40- 80% din înălțimea ecranului. Nivelul de înregistrare a discontinuităților se adoptă în general la un număr de % din nivelul de referință, mai frecvent la 50 și la 60%.

6.12. Metoda curbei caracteristice de referință, amplificare-distanță (CAD) constă în determinarea înfășurătorii vârfurilor semnalelor provenite de la orificiile blocului de referință, situate la diferite distanțe în domeniul urmărit pe piesa controlată și marcarea curbei pe ecranul aparatului. Amplificarea (sensibilitatea) curbei caracteristice de referință se consideră corespunzătoare dacă curba de înregistrare situată la 50% din amplitudinea curbei caracteristice de referință, respectiv la -6 dB de aceasta, este cuprinsă în întregime în limitele 20- 80% din înălțimea ecranului.

În figurile 53 și 54 se prezintă modul de înregistrare a curbei caracteristice de referință, cu ajutorul corpurilor de etalonare - reglare cuprinse în tabelul 16 de la paragraful 10.5, prevăzute cu orificii transversale de Φ 3 mm.

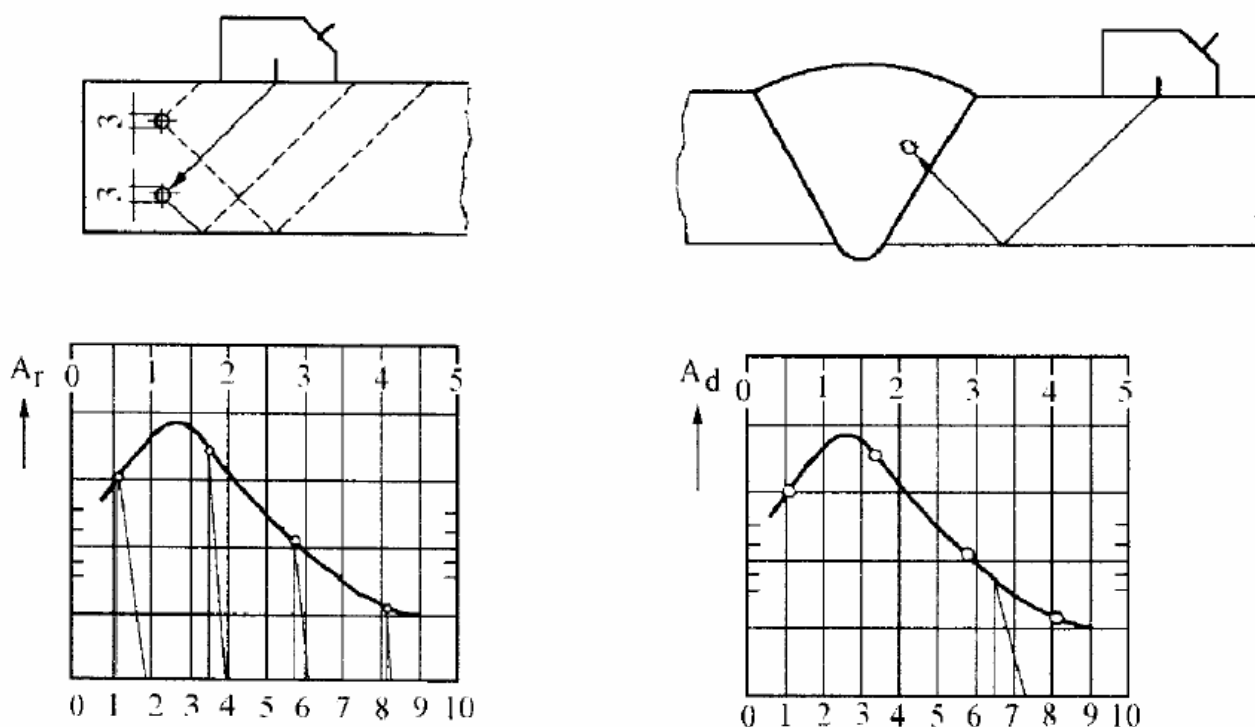


Fig. 53. Înregistrarea curbei de referință CAD, cu ajutorul blocului de etalonare

Fig. 54. Înregistrarea curbei de referință C A D direct de la piesa de controlat

Se folosesc pe rând parcursurile sonore directe de la care se recepționează ecourile cele mai apropiate din figura 53, precum și parcursurile sonore indirecte, de la care se recepționează cele două ecouri mai îndepărtate din figura 53, după reflectare pe suprafața posterioară a corpului de etalonare. La fel se procedează la înregistrarea curbei caracteristice a defectului real din piesă, figura 54, obținându-se variația amplitudinilor A_d , funcție de distanța parcursului sonor.

Se consideră defecte [233], toate ecourile neprovenite de la variații de formă ale piesei care depășesc diametrul D_e din tabelul 14.

Tabelul 14

Grosimea piesei (mm)	Valoarea minimă a indicației D_e (mm)	
	frecvența 2 MHz	frecvența 4 MHz
10 - 15	1,5	1,0
15 - 20	2,0	1,5
20 - 40	3,0	2,0
> 40	4,0	3,0

6.5.3. Metoda diagramei DAM, constă în marcarea pe scalele DAM a curbei de înregistrare conform paragrafului 6.5.2., curba caracteristică de referință fiind considerată aceea din diagrama DAM, ce corespunde diametrului orificiilor practicate în blocul de referință.

Cap. 8 - Controlul cu ultrasunete

Toate semnalele a căror amplitudine depășește nivelul sau curba de înregistrare se consemnează în buletinul de control. Pentru a nu se confunda cu zgomotul de fond amplitudinea minimă a semnalelor înregistrate trebuie să depășească cu cel puțin 6 dB nivelul zgomotului de fond.

Nivelul și curba caracteristică de înregistrare, reprezentând % din amplitudinea curbei caracteristice de referință, poate fi atribuit diferențiat pe clase de control, respectiv pe clase de calitate.

6.6. Sensibilitatea metodei-probabilitatea de detectare

În condițiile unei etalonări și utilizări corespunzătoare, sensibilitatea metodei de control ultrasonic poate să atingă ordinul zecimilor de milimetru, [228]. Gradul de concordanță a parametrilor geometrici ai discontinuității determinați ultrasonic cu dimensiunile reale este mai scăzut decât la controlul radiografic, [108]. Nivelele cele mai ridicate de semnificație statistică au fost puse în evidență în privința lungimii discontinuității, precum și în privința suprafeței discontinuității în general, independent de natura acesteia. Rezultatul cel mai slab se obține în privința lățimii discontinuității.

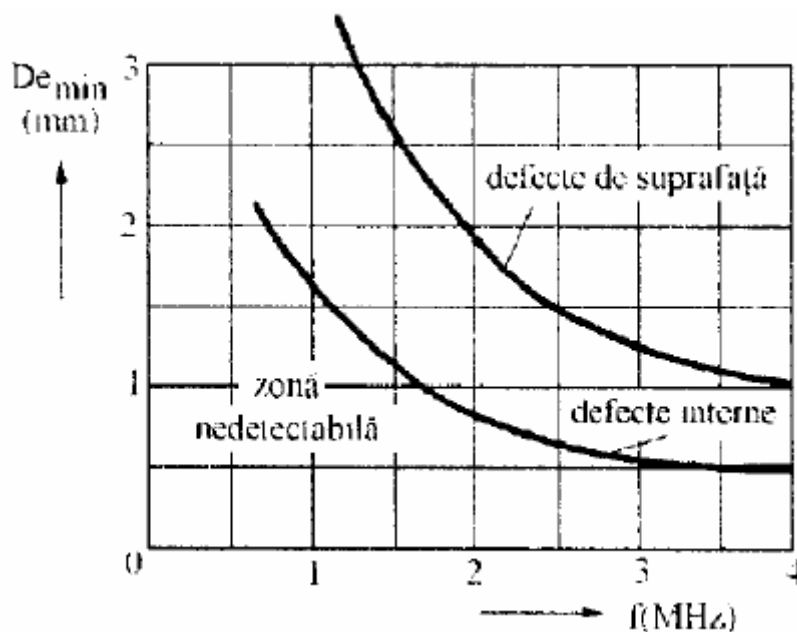


Fig. 55. Nivelul de detectare a discontinuităților interne și de suprafață la diferite frecvențe de examinare

Sensibilitatea defectoscopiei cu ultrasunete este condiționată pe de o parte de frecvența de examinare, iar pe de altă parte de poziția discontinuității. Limita teoretică a dependenței de frecvență a sensibilității este $v/2f$. Ea este maximă în cazul discontinuităților interioare și minimă în cazul discontinuităților de suprafață.

Așa cum rezultă din figura 55, construită pe baza datelor din [46], pragul detectabilității se poate considera situat în jurul unui diametru echivalent minim D de aproximativ 0,5 mm la discontinuități interioare, respectiv la aproximativ 1 mm la discontinuități de suprafață. După cum indică curbele din figura 55, la frecvențe superioare valorii de 4 MHz nu se mai manifestă o influență semnificativă asupra nivelului de detectabilitate.

Analiza statistică a capabilității metodei de control ultrasonic [61], relevă aspecte specifice interesante, și anume:

- probabilitatea de detectare este hotărâtor influențată de natura discontinuității, fiind relativ ridicată în cazul fisurilor longitudinale și a lipsei de topire, respectiv deosebit de scăzută în cazul fisurilor transversale;
- detectabilitatea fisurilor longitudinale crește cu grosimea piesei;
- suflurile prezintă un maxim de decelabilitate la grosimi situate în limitele 20÷30 mm, probabilitatea scăzând brusc, atât înspre grosimi mari, cât și înspre grosimi mai mici.

Potrivit prevederilor de la paragraful 6.1., poziția discontinuității se obține cunoscând poziția palpatorului la care se recepționează amplitudinea maximă a semnalului reflectat. Presupunând că în această poziție, discontinuitatea se află pe axa de simetrie a fasciculului, la localizare sunt posibile două surse de erori:

- eroarea determinată de poziția palpatorului;
- eroarea de măsurare a coordonatelor discontinuității.

Eroarea de determinare a poziției palpatorului este cauzată de deformarea fasciculului în piesă și în special de instabilitatea cuplajului acustic dintre palpator și suprafața piesei. Cum instabilitatea cuplajului acustic poate modifica amplitudinea (presiunea semnalului), cu cel mult 20%, rezultă că eroarea maximă ajunge:

$$\varepsilon_p = 0,2\lambda \cdot \frac{y}{D} \quad (157)$$

Această imprecizie este cu atât mai mică, cu cât parcursul sonor d , respectiv grosimea piesei este mai mică și cu cât diametrul palpatorului este mai mare.

Eroarea de măsurare a coordonatelor defectului $y = v \cdot t/2$ se calculează din relația:

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta v}{v} + \frac{\Delta t}{t} \quad (158)$$

Variația vitezei de propagare a ultrasunetelor Δv poate fi stabilită cu o precizie sub 0,5%. Eroarea de măsurare a timpului Δt , include eroarea timpului de impuls $\Delta t_{imp} \pm 1/4$ și eroarea timpului de străbătare a stratului de cuplant $\Delta t_c = \Delta x_c/v_c$; viteza sunetului în stratul cuplant este sub 25% din viteza sunetului în metal, adică $v_{cmax} = v/4$. Cu aceste considerații, eroarea de măsurare a coordonatelor discontinuității se poate calcula cu relația:

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta y}{y} = 0,01 + \frac{\lambda}{8y} + \frac{4\Delta y_c}{y} \quad (159)$$

Rezultă că imprecizia măsurării scade cu creșterea parcursului sonor d , respectiv cu creșterea grosimii piesei. Aplicând, de exemplu, relația (159) în cazul $d = 60$ mm, corespunzător unei grosimi de piesă $s = 20$ mm, $\lambda = 2$ mm și $\Delta y_c = 0,2$ mm, rezultă o eroare relativă totală $\varepsilon_c < 3\%$.

Pe baza unor experimentări de acuratețe [214], reiese că precizia de localizare a discontinuităților la îmbinări din oțel inoxidabil austenitic, folosind palpatoare înclinare de unde longitudinale, este maximă la unghiuri de incidență de 45° . Ea scade cu mărirea unghiului de incidență la 60° și 70° , unde imprecizia poate ajunge la aproximativ 10%.

Probleme deosebit de complexe apar la localizarea și la aprecierea mărimii discontinuităților cu ocazia controlului de rutină a recipientelor cu pereți groși, mai ales dacă ele sunt confecționate din oțeluri inoxidabile. În urma studiilor detaliate efectuate în cadrul unor programe de cercetare "round rubin", [49], [194], pe corpuri simulative cu defecte artificiale și cu discontinuități naturale, s-au desprins următoarele concluzii principale:

- La stabilirea lungimii, în speță a lungimii fisurilor, există o sistematică tendință de subevaluare cu până la 20- 30 mm, indiferent de metoda limitării conturului (6 dB sau 14 dB);
- În ce privește adâncimea (lățimea), există o tendință de subestimare la fisuri mici și/sau ramificate, cu până la 6-7 mm. Adâncimea incluziunilor de zgură este supraevaluată cu până la 20 mm, iar a lipsei de topire în și mai mare măsură;
- Fisurile tipice coroziunii tensofisurante pot fi evaluate mai exact, [104], dacă la mărimea determinată se adaugă 3 mm;
- Fisurile tipice de oboseală și cele produse la cald, prezintă o detectabilitate inferioară datorită oxidării suprafeței și scăderii impedanței acustice. Variația înălțimii semnalului, prin aplicarea tensiunilor de întindere, respectiv de compresiune, tipice ciclului de solicitare alternant simetric, ajunge la aproximativ 25 dB în cazul fisurii încă neoxidate, față de numai 5 dB în cazul fisurii vechi cu suprafețe oxidate;
- Fisurile intergranulare și cele de coroziune tensofisurantă de la recipiente și țevi din oțeluri inoxidabile austenitice nu pot fi detectate, dacă extinderea lor este limitată la sub 20% din grosime. La fisurile detectabile nu s-a putut constata în schimb vreo corelație între evoluția în adâncime și lățimea reală;
- Cel mai înalt grad de evaluare a adâncimii defectelor a fost demonstrat practic prin aplicarea sistemelor integrate de control, cu recunoașterea formei semnalului, de exemplu cu sistemul ALN 4060, [49], care folosește analiza spectrală automată a undelor de difracție de la vârful fisurii. Măsurările s-au încadrat într-un câmp de dispersie foarte restrâns de $\pm 1,7$ mm.

7. SISTEME DE VIZUALIZARE A IMAGINII

Sistemul de vizualizare C, se realizează cu ajutorul unui dispozitiv de baleiaj în două direcții, piesa fiind total sau parțial imersată.

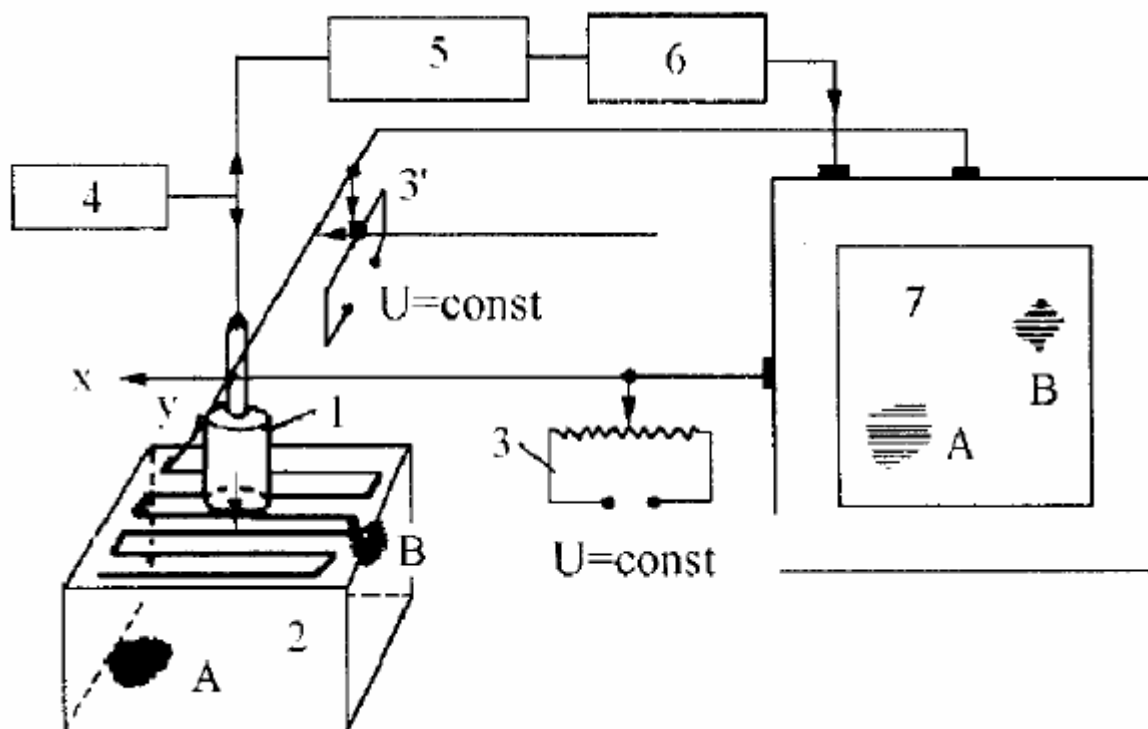


Fig. 56. Sistem analogic de vizualizare în reprezentare C

După cum rezultă din figura 56, generatorul 4 activează palpatorul emițător-receptor de unde longitudinale 1, care baleiază într-un plan paralel cu suprafața piesei controlate 2, executând o traiectorie în formă de dinți de ferăstrău.

Deplasările pe cele două axe x și y sunt convertite în semnale electrice cu ajutorul a două potențiometre 3 și 3', ale căror cursoare sunt cuplate mecanic rigid de palpator. Semnalele de mișcare sunt transmise unui înregistrator în coordonate, 7. Semnalele reflectate din piesă, preluate de palpator sunt amplificate și filtrate în modulele 5 și 6 și redată înregistratorului. Defectele A și B din piesa controlată sunt transformate astfel în imagine a căror poziție corespunde proiecției în plan perpendicular pe axa fasciculului de unde. Înregistrarea poate fi reglată funcție de nivelul ales de înregistrare a amplitudinii semnalelor reflectate din piesă, sub a căror intensitate comanda electrică se suprimă.

7.1. Sistemul de vizualizare numerică B, C și D

La sistemul numeric de vizualizare, principiul analogic se păstrează, dar se modifică sistemul de codare a poziției palpatorului, fie prin intermediul motoarelor pas cu pas, fie printr-un sistem optic. Un astfel de sistem schematizat în figura 57, cuprinde un modul de comandă a mișcărilor de baleiaj ale palpatorului 1, comandat de un calculator compatibil IBM 2. Modulul de comandă din figură asigură două mișcări sincronizate printr-un motor pas cu pas 3, mișcarea palpatorului 4 pe direcția x, și printr-un motor pas cu pas 5, rotirea piesei- ω . Traductorul piezoelectric al palpatorului este cuplat la un generator de ultrasunete 6, lucrând în reflexie, realizând funcția de reținere a ecogramelor și de transfer a semnalelor la calculator.

Calculatorul realizează următoarele funcții: procesarea semnalelor ultrasonore, comanda mișcărilor sincrone x și ω și transmiterea unui sistem de redare 7.

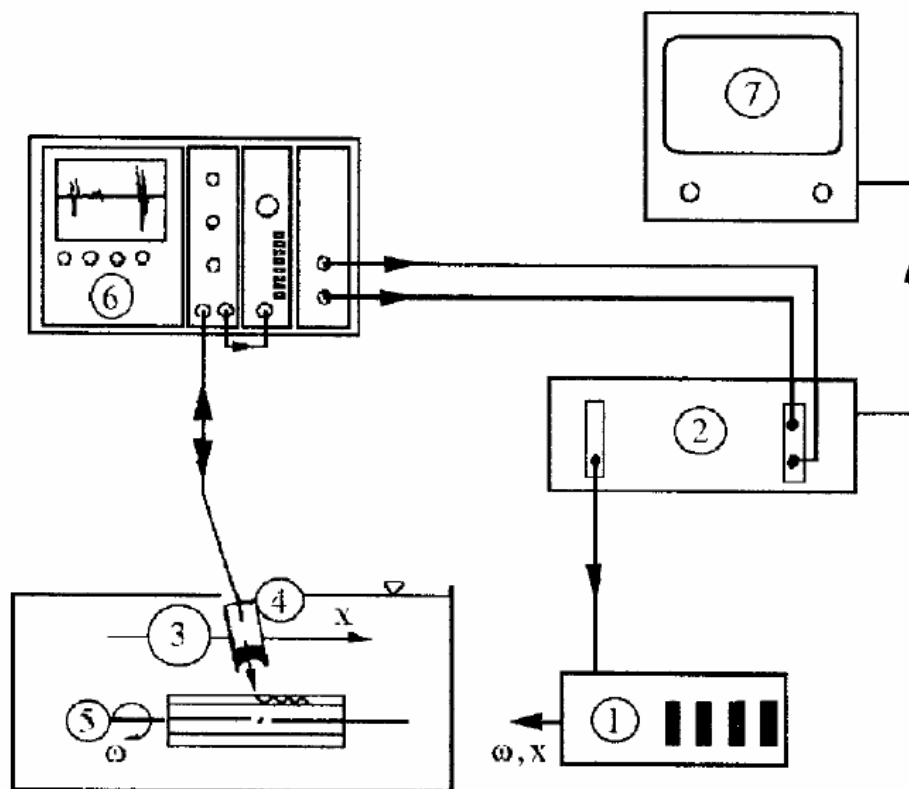


Fig. 57. Sistem de conducere și vizualizare numerică cu ajutorul calculatoarelor

Canalul de achiziție, prelucrează și memorează cvasi-totalitatea ecogramelor în toate pozițiile rețelei de baleiaj pentru fiecare palpator folosit. În acest scop dispune de o fereastră de urmărire a traseului fasciculului de unde, a cărei finețe depinde de durata controlului și capacitatea de memorare disponibilă. Se consideră că o detaliere pe 64 poziții permite o reconstrucție fără pierdere de informații. În fiecare poziție se memorează două elemente, picul amplitudinii semnalului și timpul corespunzător aceluia pic. Se poate introduce și o fereastră suplimentară pentru supravegherea reflexiei fasciculului de unde de pe suprafața posterioară a piesei, ceea ce are o mare importanță la controlul (baleiajul) cu palpator înclinat. După modul de obținere a semnalelor, este posibil să se urmărească și cuplajul acustic corespunzător a palpatorului cu piesa, semnalizarea sau oprirea mișcărilor în cazul pierderii cuplajului.

Modulul de comandă a mișcărilor îndeplinește, pe lângă funcția de mișcare și pe cea de sincronizare a mișcării de baleiaj cu pasul de rotire a piesei în funcție de viteza de translație, diametrul palpatorului și distanța deplasării.

Mișcarea pe direcția x se realizează prin intermediul unei cremaliere flexibile mulabile pe suprafețe curbate. Ghidarea se realizează cu roți conice, iar angrenarea printr-un pinion cuplat la cremalieră. Cremaliera se fixează pe suprafața piesei cu suporti magnetici și ventuze. Dispozitivul port- palpator este antrenat cu un cărucior mobil ce culisează pe un sistem de glisieră. În vederea menținerii unei poziții corecte perpendiculare a palpatorului pe suprafața piesei, precum și a unei tensiuni de contact constante, dispozitivul port-palpator este montat pe o lamelă cardanică. Manipulatoarele pentru controlul automatizat sunt diversificate pe funcții și forme de piese. Astfel, se deosebesc manipuloare exterioare și interioare pentru virole cilindrice, funduri și capace sferice, manipuloare exterioare pentru țevi, ștuțuri și flanșe, găuri, bolțuri, etc. În figura 58 se prezintă manipulatorul folosit pentru controlul îmbinării circulare a ștuțului unui recipient cilindric.

Sistemul de ghidare, alcătuit din șină cu cremaliera 1, permite așezarea și fixarea manipulatorului pe generatoarea virolei. Mișcarea de avans și de retragere a trenului de palpatoare 2, se realizează printr-un sistem de ghidare 3, în formă de arc de cerc, paralel cu virola. Concomitent cu mișcarea de înaintare pas cu pas pe direcția y și mișcarea de apropiere - retragere pe direcția x se realizează și mișcarea de rotire z.

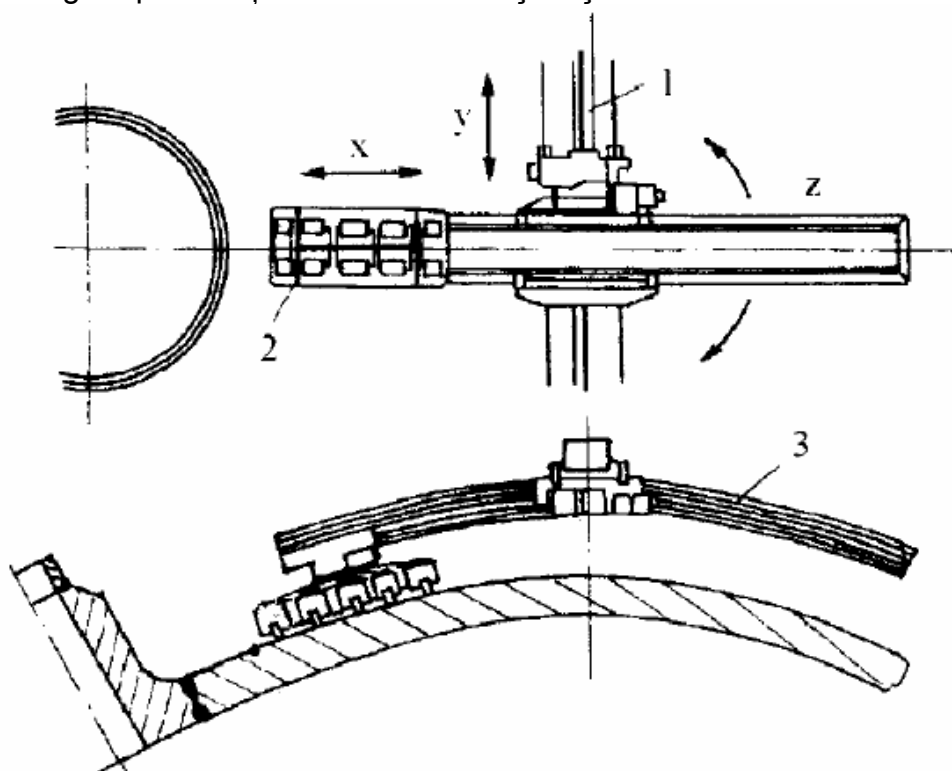


Fig. 58. Manipulator pentru controlul ștuțurilor recipientelor

Manipulatoarele pentru controlul automatizat sunt diversificate pe funcții și forme de piese. Astfel, se deosebesc manipuloare exterioare și interioare pentru virole cilindrice, funduri și capace sferice, manipuloare exterioare pentru țevi, ștuțuri și flanșe, găuri, bolțuri, etc. În figura 58 se prezintă manipulatorul folosit pentru controlul îmbinării circulare a ștuțului unui recipient cilindric. Sistemul de ghidare, alcătuit din șină cu cremaliera 1, permite așezarea și fixarea manipulatorului pe generatoarea virolei. Mișcarea de avans și de retragere a trenului de palpatoare 2, se realizează printr-un sistem de ghidare 3, în formă de arc de cerc, paralel cu virola. Concomitent cu mișcarea de înaintare pas cu pas pe direcția y și mișcarea de apropiere - retragere pe direcția x se realizează și mișcarea de rotire z.

În cazul examinării corpurilor cilindrice groase, manipulatorul conduce sistemul de palpatoare în lungul generatoarei, iar corpul execută o mișcare de rotație, acționat fiind printr-un dispozitiv cu role de poziționare. În dispunerea palpatoarelor se pot combina funcțiile obișnuite cu palpatoare cuplate prin transmisie în tandem.

7.2. Sistemul P- Scan

P- Scan este un sistem de reprezentare compus, [16], [32], [33], [59], [76], [164], [166], care afișează concomitent o imagine C, o imagine D, o imagine B și o reprezentare A de ecouri integrate suprapuse. Prin post- procesare este posibilă cartografierea în 4, 8 sau mai multe planuri paralele, la fiecare din cele trei imagini.

Sistemul folosește un amplificator logaritmico special, capabil să detecteze și să memoreze într-un domeniu dinamic foarte larg de până la 120 dB. Selectarea culorilor permite formarea unei combinații de opt culori dintr-o paletă de 64, autorizate pe plan internațional. Culorile folosite permit recunoașterea planurilor paralele ale imaginilor, identificarea palpatorului care a detectat o anumită discontinuitate, precum și a markerului de etalonare.

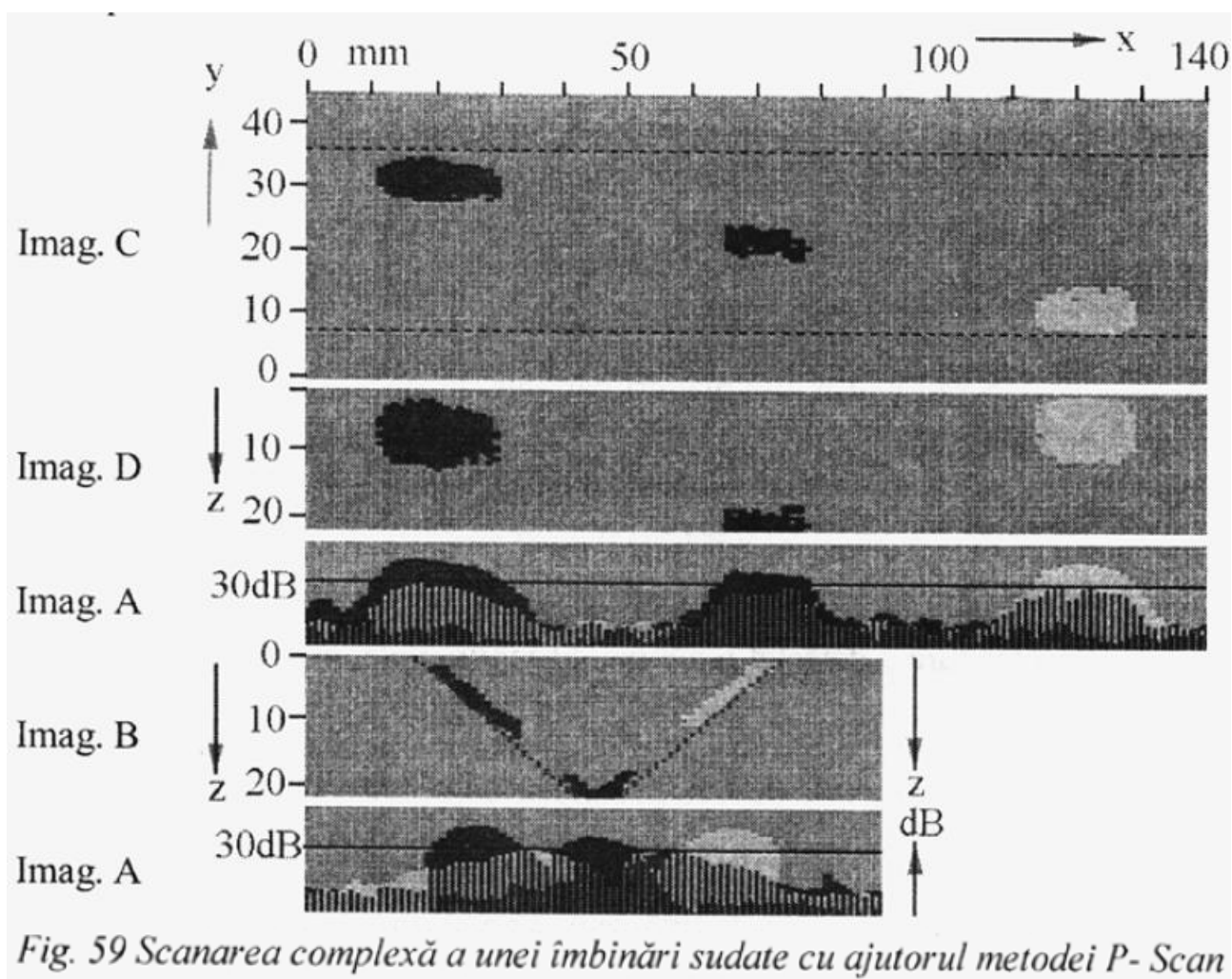
Toate datele obținute în urma controlului sunt memorate și pot fi vizualizate ulterior, ceea ce are o importanță deosebită când se dorește monitorizarea unor defecte. Programul permite afișarea distanței x (mm) de la planul de referință și până la defect, afișarea lățimii reale a zonei explorate, a nivelului de sensibilitate (vizualizare) cu ajutorul reflectorului de referință de pe corpul de etalonare. De asemenea se asigură funcția zoom, care permite vizualizarea unui anumit detaliu mărit de pe imaginea C.

Prin multiple ferestre de intrare, este posibilă corelarea rezultatelor obținute pe diferitele imagini afișate. Numitorul comun într-un asemenea demers îl reprezintă nivelul de afișare exprimat în dB, peste care toate semnalele care îl exced sunt afișate în cele trei imagini B, C și D. Nivelul de afișare reprezintă deci o limită de selecție și/sau de departajare a semnalelor în semnale provenite de la discontinuități care se admit în piesă și semnale provenite de la discontinuități care nu se admit, adică cele care se consideră defecte.

Pentru ilustrarea sistemului de vizualizare P- Scan a fost ales rezultatul controlului efectuat la o îmbinare sudată cap la cap cu rostul în formă de V de 22 mm grosime. Imaginile au fost reținute într-un număr de patru planuri paralele 1 - 4, identificate în figura 59 prin culorile galben (1), roșu (2), negru (3) și albastru (4).

Prima dintre imagini, cea de la partea superioară a figurii este o imagine de tip C (vedere de sus), lățimea de baleiere 40 mm iar lungimea de 140 mm. Pe lungime sunt marcate intervalele în limitele cărora s-au decelat defecte: 10 - 30 mm, 64 - 78,4 mm și 113 - 128 mm.

Cea de-a doua imagine, este de tip D (vedere laterală), și poartă inscripția de grosime de 22 mm. Pe ea sunt marcate extinderile defectelor pe grosime: 2 - 13 mm la defectul din stânga, 17 - 22 mm la defectul din mijloc și 0,5 - 11 mm la defectul din dreapta.



Imaginea a treia însoțește de fapt imaginea D și reprezintă variația amplitudinilor semnalelor de răspuns integrate de-a lungul piesei în timp, exprimate în dB, deci reprezintă o imagine de tip A. Pe ea este indicată prin linie continuă orizontală nivelul de afișare de 30 dB. Din această reprezentare rezultă locurile unde nivelul amplitudinilor semnalelor de 30 dB a fost depășit, marcând cotele x ale defectelor, care se afișează în imaginile C, D și B. Prin culori rezultă planul în care s-au identificat defectele.

Ultima imagine reprezintă vederea de tip B a secțiunii transversale a îmbinării și este însoțită de asemenea de imaginea A, în care sunt suprapuse amplitudinile semnalelor provenite din piesă. Cu ajutorul ei se identifică, poziția în grosime, faptul că defectele se află grupate în cusătură, o parte la rădăcina cusăturii (culoarea roșie, planul 2) și o parte spre marginea rostului din stânga, culoarea albastră. planul 4. respectiv spre marginea rostului din dreapta (culoarea galbenă, planul 1). În planul 3, cu negru s-a evidențiat un defect mai puțin extins decât celelalte, și situat în imediata vecinătate a rădăcinii îmbinării.

Fiecare defect este localizat și evaluat numeric ca lungime și lățime. De exemplu defectele de la rădăcină se găsesc în piesă la distanța de 69.6 mm de capăt și se extind pe $78,4 - 64,0 = 14,4$ mm lungime cel în planul roșu și pe cca 10 mm lungime cel din planul negru.

73. Metoda Zip- Scan

Semnalele de înaltă frecvență neredresate provenite din piesă sunt mediate și introduse în memoria calculatorului la intervale regulate, în timpul baleiajului longitudinal al

palpatorului. Amplitudinea semnalelor este clasată în 256 nivele de gri pentru flecare punct măsurat. Semnalul de amplitudine zero corespunde unei nuanțe mijlocii de gri. Astfel alternanțele pozitive se caracterizează prin nuanțe gri - negru iar cele negative prin nuanțe gri - alb.

Deplasarea cuplului de palpatoare se realizează astfel încât să se obțină o imagine de tip D și o imagine de tip B, [32], [33].

Semnalele provenite din piesă se caracterizează în reprezentarea D prin franjuri. Prima linie orizontală corespunde frontului semnalului de intrare (emisie) în piesă, ceea ce permite și poziționarea suprafeței. Semnalele provenite de la o discontinuitate imprimă franjuri de formă hiperbolică. Forma hiperbolică este explicată de variația timpului de parcurs al fasciculului de unde la o mișcare transversală a palpatorului în raport cu discontinuitatea. Desigur, atunci când palpatorul ocupă o poziție simetrică față de reflector (discontinuitate), timpul de ajungere a semnalelor este minim.

Cu ajutorul calculatorului se linearizează și apoi se digitalizează ordonata reprezentării, făcând posibilă evaluarea în mm a desfășurării pe direcția grosimii. Un program special de post tratament realizează corecția divergenței fasciculului, micșorând astfel desfășurata hiperbolică a franjurilor provenite de la discontinuități și măbind precizia de localizare, atât pe grosime cât și pe lungime.

8. CONTROLUL DE PE SUPRAFETE CURBATE

Examinarea de pe suprafețe curbate impune restricții în întrebuințarea scalelor DAM. Astfel s-a calculat că în cazul suprafețelor cu o singură curbura de rază R, variația amplitudinii semnalelor se menține sub 2 dB, ceea ce echivalează cu o micșorare de cel mult 20%, dacă se satisfac condițiile:

- $2R > 5 N$ la folosirea undelor longitudinale;
- $2R > 2,5 N$ la folosirea undelor transversale.

La piesele cu dublă curbura, condițiile de examinare se mențin dacă:

- $2R > 10 N$ la folosirea undelor longitudinale;
- $2R > 5 N$ la folosirea undelor transversale.

Totodată, în vederea evitării unei reflexii totale a undelor pe palpator în zona marginală a fasciculului, trebuie să se satisfacă condiția:

$$2R > D_p \frac{v_i}{v} \cdot \frac{1}{1 - \sin \beta} \quad (160)$$

unde v_i și v au semnificația din relația (119).

Din punctul de vedere al posibilității cuprinderii de către fasciculul de ultrasunete a secțiunii semifabricatelor de revoluție circulare și inelare, se deosebesc corpuri de revoluție cu pereți subțiri și corpuri de revoluție de secțiune plină sau cu pereți groși.

După cum rezultă din figura 60a și tabelul 15, chiar în cazul folosirii unghiului minim de incidență a palpatoarelor ($\beta = 35^\circ$), având în vedere că relația de legătura între parametri geometrici este:

$$\frac{s}{D} = \frac{1 - \sin \beta}{2} \quad (161)$$

baleierea integrală a secțiunii devine posibilă numai dacă raportul dintre grosime și diametru, $s/D \leq 0,213$.

Tabelul 15

Unghiul de incidență β°	Valoarea s/D rel. (161)
80	0,0075
70	0,030
60	0,067
45	0,146
35	0,213

Din punctul de vedere al tehnicii de control se deosebesc două posibilități: prin contact direct al palpatorului cu piesa și prin imersie, folosind ca mediu de transfer apa.

8.1. Metoda prin contact direct

Contactul dintre palpator și suprafața piesei se asigură de către talpa acestuia, care trebuie adaptată la raza de curbura a piesei R , dacă $R < l^2/4$ mm, în cazul fasciculului emis într-un plan transversal al piesei, figura 60a, respectiv dacă $R < e^2/4$ mm, în cazul fasciculului emis într-un plan longitudinal al profilului controlat, [60], figura 60b. Prin adaptarea penei de cuplare, jocul dintre suprafața acesteia și suprafața piesei nu trebuie să depășească 0,5 mm.

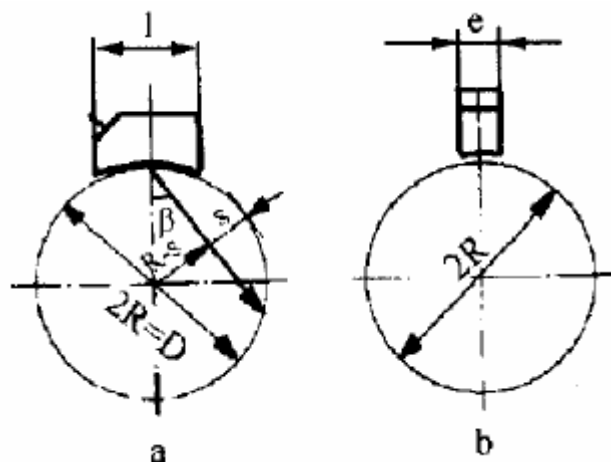


Fig. 60. Adaptarea tălpii palpatorului la examinarea de pe suprafețe curbe: a) în plan transversal; b) în plan longitudinal

Controlul se realizează în cea mai mare parte cu unde transversale, folosind palpatoare înclinate, unghiul de incidență alegându-se în funcție de grosimea piesei, astfel încât prin mișcarea palpatorului pe suprafața exterioară să se asigure explorarea prin reflexie totală a întregii secțiuni.

Pentru operativitate se va folosi nomograma din figura 61. Schimbând unghiurile β și γ între ele, aceeași nomogramă este valabilă și pentru controlul de pe suprafața interioară. Incidențele de 80° se vor evita pe cât posibil datorită fenomenului de transformare a undelor transversale în unde superficiale [56], precum și datorită nivelului ridicat al ecourilor perturbatoare provenite de la neregularitățile de suprafață, constituite mai ales din straturi de oxizi.

Relația dintre unghiurile β și γ din figura 61, la controlul pe suprafețe cilindrice exterioare este:

$$\gamma_{\text{interior}} = \arcsin \left[\left(\frac{1}{1 - \frac{s}{R}} \right) \sin \beta_{\text{exterior}} \right] \quad (162)$$

Relația omoloagă în cazul controlului de pe suprafața cilindrică interioară este:

$$\gamma_{\text{exterior}} = \arcsin \left[\left(1 - \frac{s}{R} \right) \sin \beta_{\text{interior}} \right] \quad (163)$$

În cazul în care se satisface condiția s/D din tabelul 15, palpatoarele se poziționează astfel încât să rezulte o poziție convenabilă de manipulare. Intervalul de deplasare al palpatorului se ia cuprins între p și $3/2 p$, p fiind pasul de examinare calculat din relația:

$$p = 2c \cdot s \cdot \tan \beta \quad (164)$$

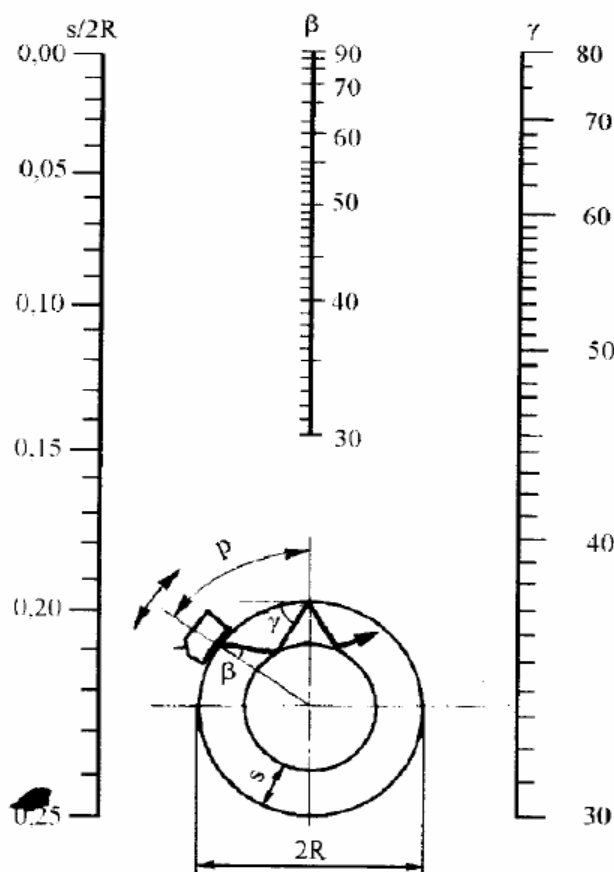


Fig. 61. Nomogramă pentru alegerea unghiului de incidență la controlul de pe suprafețe curbe

unde c este un factor de corecție care ține seama de curbura suprafeței (R) și de grosimea semifabricatului (s) și poate fi stabilit cu ajutorul diagramei din figura 62.

În mod corespunzător distanța parcursului undelor în piesă d este amplificată și se corectează cu un factor supraunitar c_1 , a cărui valoare rezultă în funcție de aceiași parametri, din figura 63.

Tehnica de examinare propriu-zisă este similară cu cea descrisă pentru suprafețe plane. La diametre de peste 400- 500 mm, se recomandă palpatoarele de 45° și 60° .

La examinarea transversală a conductelor și țevelor cu diametrul sub 500 mm se folosește tehnica semnalului reflectat, domeniul de distanță fiind reglat pentru cuprinderea întregului perimetru.

Se utilizează un palpator special cu dublu cristal conform figurii 64 și unghiul de incidență în piesă de 35° ... 45° .

Semnalul de defect D, se afișează pe ecran simetric față de ecoul de control de la 180° , unde distanțele parcursurilor sonore de la cele două traductoare coincid, producându-se interferența undelor și semnalizarea pe ecran. Recunoașterea poziției se realizează prin mișcarea palpatorului pe suprafața piesei într-un anumit sens și urmărirea pe ecran a modificării poziției celor două semnale D. Dacă spre exemplu semnalul D se apropie de semnalul de emisie SE se deduce că palpatorul s-a apropiat de defect.

Micșorarea semnificativă a ecoului de control de la 180° poate fi cauzată de o suprafață cu rugozitate mare în urma unui proces de coroziune, sau de către un defect de laminare.

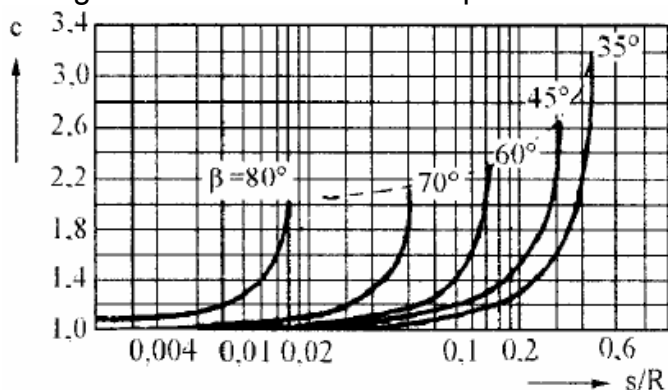


Fig. 62. Nomogramă pentru determinarea factorului de corecție la examinarea de pe suprafețe curbe

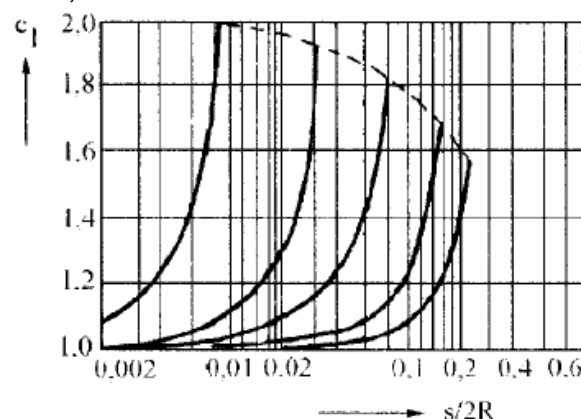


Fig. 63. Nomogramă pentru corecția parcursului sonar în piesă la examinarea de pe suprafețe curbe

Etalonarea aparatului și a palpatoarelor se efectuează potrivit indicațiilor cuprinse la paragraful 10. Sensibilitatea se reglează cu ajutorul orificiilor practicate în blocul de calibrare sau cu ajutorul unor renuri executate în piesă pe suprafața opusă suprafeței de examinare, având adâncimea de $5 \div 10\%$ din grosimea peretelui.

Pentru determinarea adâncimii defectului a, în funcție de distanța traseului sonor d, calculată din poziția de recepționare în direct a semnalului reflectat de pe suprafețe convexe sau concave, se utilizează diagramele din figura 65.

Conductele sudate elicoidal se controlează cu instalații mecanizate și automatizate. Trenul de palpatoare, care baleiază secțiunea transversală a îmbinării, este menținut în poziție fixă, iar conducta execută o mișcare de avans sincronizată cu o mișcare de rotire, în vederea menținerii constante a intervalului de examinare.

Recipientele cu pereți groși și foarte groși, la care din calcul rezultă un unghi de incidență sub 35° , se controlează cu palpatoare normale de unde longitudinale, de regulă prin imersie, folosind ambele componente de difracție, atât unda longitudinală, cât și unda transversală.

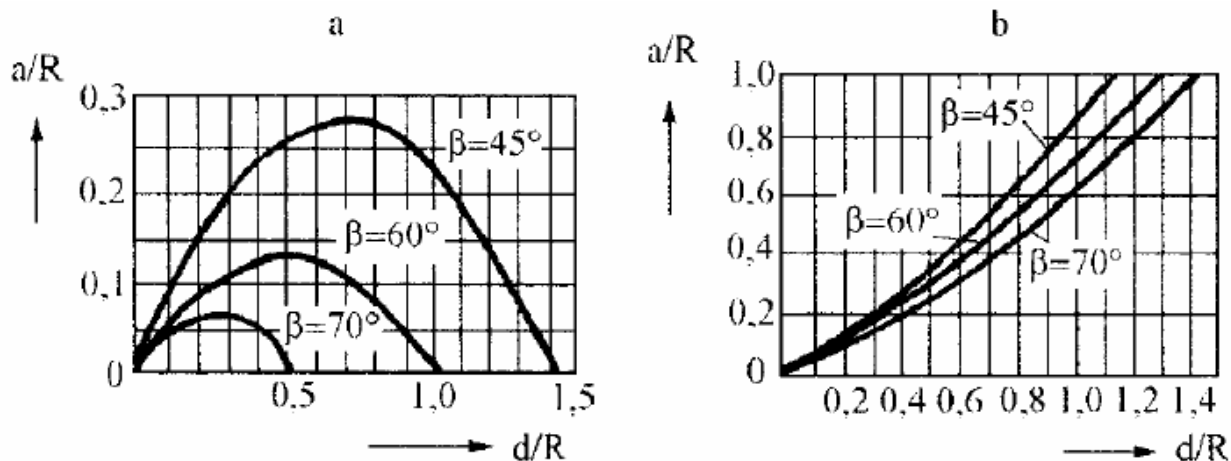


Fig. 65. Diagramă pentru determinarea adâncimii defectului la examinarea de pe suprafețele curbe: a) concave; b) convexe

8.2. Metoda prin imersie

Controlul imersat se aplică cu bune rezultate la recipiente cu pereți groși, precum și la controlul mecanizat și automatizat al conductelor și țevelor cu pereți subțiri.

Succesul examinării depinde de gradul de prelucrare a suprafeței piesei, prin care se propagă, atât unda emisă, cât și unda reflectată. Se recomandă ca gradul de rugozitate medie să nu depășească $R_m=25\mu m$.

La controlul imersat, prima parte a parcursului sonor se desfășoară în apă, cea de-a doua parte în piesă. Pentru dispunerea părții focalizate a sonogramei palpatorului în zona de interes din piesă se stabilește distanța dintre palpator și piesă, adică distanța parcursă în apă. În acest scop se află echivalentul în apă al parcursului sonor în metal (oțel), echivalent definit prin raportul vitezelor de propagare în cele două medii, oțel și apă, $v_{Fe}/v_{apă}$. Dacă se folosesc unde longitudinale, acest raport are valoarea 4, iar la unde transversale, valoarea 2,2.

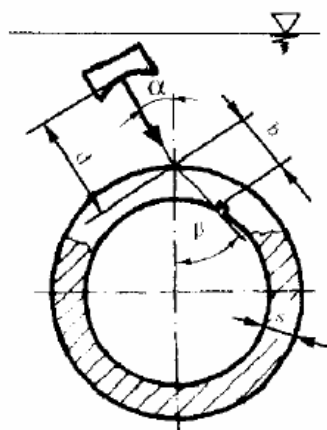


Fig. 66. Determinarea distanței palpator-piesă la controlul imersat

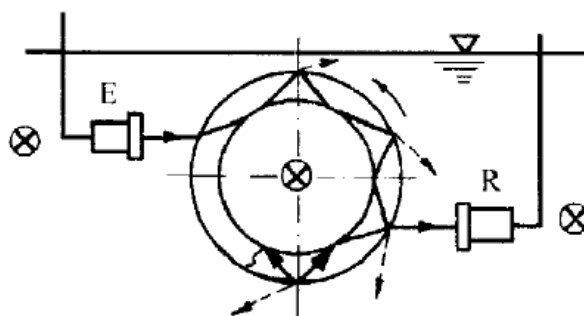


Fig. 67. Schema de examinare imersată cu două palpatoare cuplate prin transmisie

Considerând cunoscută distanța focală a în apă a palpatorului utilizat la controlul piesei din figura 66, precum și distanța parcursă de unda transversală de incidență 45° în piesă, b , ceea ce echivalează cu $2,2b$ în apă, distanța d dintre palpator și piesă va fi $a+2,2b$.

Controlul imersat poate fi executat la rândul său în mai multe variante:

a. prin reflexie, cu palpator de unde longitudinale sub unghiul α , figura 66, folosind unda transversală multiplu reflectată în piesă, aflată la rândul ei în mișcare de rototranslație;
b. prin reflexie, cu palpator cu dublu cristal în varianta din figura 64, palpatorul și zona de contact din piesă aflându-se în imersie iar piesa în mișcare de rototranslație.

Menținerea constantă a distanței dintre palpator și piesă se realizează cu ajutorul unui dispozitiv adecvat având suprafețele prismatice în contact cu suprafața cilindrică a piesei.

c. prin transmisie, cu palpatorul de recepție (R) decalat în urmă cu 90° , respectiv 180° , figura 67, față de cel de emisie (E); în vederea parcurgerii piesei, palpatoarele sau piesa execută o mișcare de translație.

Fasciculul de unde longitudinale emise traversează inițial mediul de cuplaj (apa), iar apoi se difractă oblic în piesa pe care o parcurge prin reflexie. Dacă nu întâlnește vreun defect, unda de difracție din apă nu furnizează nici un semnal aparatului, deoarece nu ajunge la palpatorul de recepție. Dacă unda întâlnește în schimb un defect are loc o inversare a sensului de propagare cel puțin pentru o parte din fasciculul de unde iar componenta difractată în apă, orientată spre palpatorul receptor îi semnalează prezența.

La controlul pieselor groase, sensibilitatea se reglează cu ajutorul unor renuri interioare de $0,2 \div 0,3$ mm adâncime, amplificând ecoul la jumătate din înălțimea ecranului. Pentru mărirea certitudinii de detectare a tuturor discontinuităților, se recomandă folosirea monitorului. La sisteme mecanizate de control acesta poate comanda oprirea mișcării palpatorului sau a piesei, dacă semnalul depășește nivelul reglat pe monitor.

9. METODE DE EXAMINARE A PIESELOR PLACATE CU OȚEL INOXIDABIL

Examinarea pieselor placcate cu oțeluri inoxidabile și mai ales inoxidabile austenitice este substanțial limitată datorită atenuării intense a undelor ultrasonice în structura austenitică grosolană, figura 68, precum și datorită posibilităților tehnice limitate ale echipamentului de control. Influența structurii se manifestă în primul rând datorită vitezelor de propagare diferite în materialul placajului și în materialul de bază, în al doilea rând prin mărirea granulației și mai ales prin orientarea ei, astfel încât examinarea este în mare măsură tributară unghiului de incidență folosit. Atenuarea cea mai intensă este marcată de structura pur austenitică [42] și scade la structurile austenito-feritice cu augmentarea cantității de ferită.

Diametrul mediu al grăunților din cusătura, d_g poate ajunge de ordinul câtorva mm. Zgomotul structural perturbator se produce începând de la valori $d_g = 0,1\lambda$. La valori mai mari, $d_g = 0,5\lambda$, zgomotul structural estompează posibilitatea detectării unor discontinuități mai mici. În această situație o frecvență de 2 MHz în unde transversale, echivalentă unui $\lambda = 1,6$ mm nu mai poate fi utilizată la structuri având $d_g \geq 0,8$ mm. Domeniul uzual de frecvențe este în aceste cazuri 0,5...1,5 MHz.

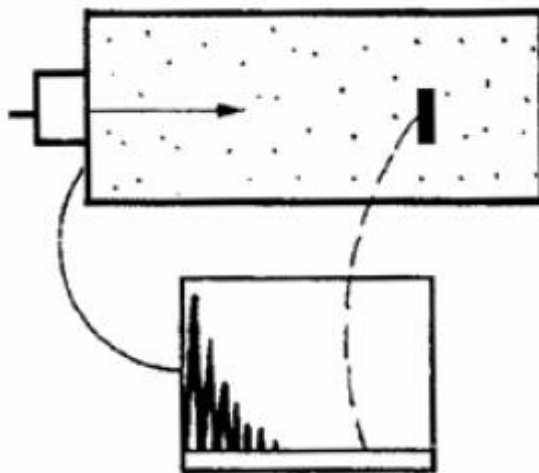


Fig. 68. Atenuarea completă a undelor în structuri

Posibilitățile de aplicare a metodei de control ultrasonic sunt limitate și ca urmare a coeficientului de atenuare ridicat a structurilor specifice acestor oțeluri, datorită pierderilor prin dispersie (împrăștiere) α_d și absorbție α_a . Aceste pierderi și în primul rând cele de dispersie se amplifică cu scăderea conținutului de ferită delta, ajungând ca, în funcție de tipul oțelului sau structurii și în funcție de grosime să provoace opacizarea trecerii ultrasunetelor la valori sub 3÷5% cantitate de ferită delta.

Ca urmare, rezerva de amplificare a defectoscoapelor și capacitatea lor de suprimare a zgomotului trebuie să fie cât mai mare. Pe de altă parte, la un control riguros, diferența dintre curba de variație a amplitudinii cu distanța de la reflectorul artificial de referință și curba corespunzătoare zgomotului structural și de fond trebuie să fie de cel puțin 20 dB.

Considerând variația amplitudinii medii a undelor dispersate (împrăștiate), A_d cu distanța parcursului ultrasonor Δx , se poate scrie prin similitudine cu relația de bază a atenuării

$$A_d = A_0 (\alpha_d \cdot l_i)^{1/2} \cdot e^{-\alpha \Delta x} \quad (165)$$

unde l_i este lungimea (durata) impulsului, $\alpha = \alpha_d + \alpha_a$, este coeficientul global de atenuare.

9.1. Posibilități de atenuare a undelor dispersate.

Din analiza relației (165), rezultă mai multe posibilități de micșorare a amplitudinii undelor dispersate. Principalele ar fi: micșorarea duratei impulsului de emisie, folosirea palpatoarelor înclinate de unde longitudinale, focalizarea și amortizarea undelor și folosirea palpatoarelor cu dublu cristal.

Micșorarea duratei impulsului de emisie. Această măsură conduce la o îmbunătățire a raportului amplitudine emisie/amplitudine zgomot, proporțional cu rădăcina pătrată a factorului de reducere a duratei l_i . Practic, această posibilitate este tehnic limitată la $(1 \div 1,5)\lambda$.

Folosirea palpatoarelor înclinate de unde longitudinale în locul celor transversale.

Pentru justificarea soluției se ia în considerație relația care exprimă raportul dintre amplitudinea undelor de dispersie, transversale A_d^T și longitudinale A_d^L în funcție de coeficienții de atenuare corespunzători:

$$\frac{A_d^T}{A_d^L} = \left(\frac{\alpha_d^T}{\alpha_d^L} \right)^{1/2} \quad (166)$$

Cunoscând că în cazul undelor de suprafață, Rayleigh și $\lambda = \text{const.}$, este valabilă relația:

$$\frac{\alpha_d^T}{\alpha_d^L} = \frac{3}{5} \left(\frac{v_L}{v_T} \right)^5 \quad (167)$$

și particularizând vitezele de propagare pentru cazul oțelului, ($v_T = 0,55v_L$), rezultă:

$$\frac{A_d^T}{A_d^L} = 3,5 \quad (168)$$

Această condiție indică o ameliorare cu $20 \log 3,5 = 11$ dB a zgomotului provenit de la structură, în cazul folosirii undelor longitudinale în locul celor transversale la examinarea cu palpatoare înclinate, ceea ce reprezintă un spor apreciabil. Metoda implică precauții în interpretare, în sensul recunoașterii corecte a provenienței semnalelor și a evitării reflexiilor perturbatoare de la undele transversale.

Folosirea palpatoarelor focalizate și puternic amortizate Această posibilitate de îmbunătățire a condițiilor de transmitere a ultrasunetelor prin restrângerea transversală a fasciculului, poate fi pusă în evidență cu ajutorul relației (105), ce exprimă variația presiunii acustice în funcție de distanță, în baza relației respective focalizarea axială și micșorarea divergenței fasciculului se poate obține prin:

- micșorarea lungimii de undă cu mărirea frecvenței;
- folosirea unor traductori având lentila concavă sau/și suprafața de cuplare convexă, ceea ce conduce la un efect proporțional cu pătratul diferenței diametrelor.

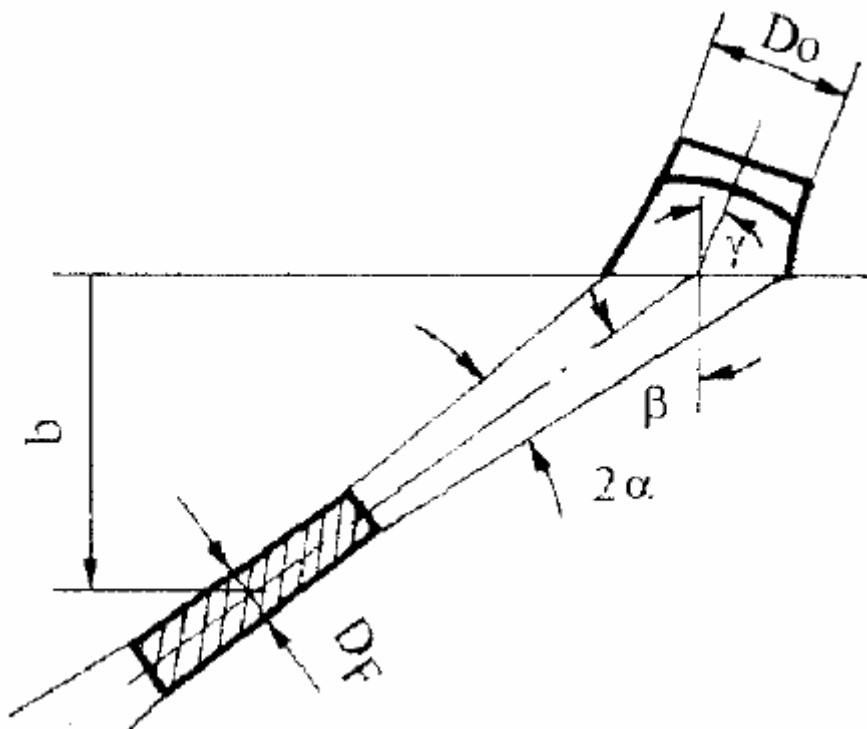


Fig. 69. Focalizarea fasciculului de unde cu traductoare concave

Diametrul fasciculului focalizat D_F , figura 69, se exprimă în funcție de parametri geometrici ai emisiei astfel:

$$D_F = \frac{\lambda}{2 \tan \frac{\alpha}{2}} = \frac{b \cdot d \cdot \cos \gamma}{D_0 \cos^2 \beta} \quad (169)$$

Câștigul imediat al metodei, în special când se aplică tehnica prin transmisie cu palpatoare cu dublu cristal, constă în reducerea relativă a zgomotului de fond și a celui provenit de la granulație. În practica controlului se va avea în vedere că la distanțe ce depășesc zona de focalizare a fasciculului, localizarea discontinuităților este îngreunată datorită divergenței foarte mari.

Pe de altă parte, amortizarea semnalului de emisie are ca efect scăderea energiei dispersate la nivelul grăunților, figura 70 și ca atare a zgomotului de fond al aparatului [84], precum și scurtarea trenului impulsului de emisie a fasciculului de unde, ceea ce se manifestă și prin micșorarea zonei moarte și mărirea sensibilității de detectare.

Gradul de amortizare a semnalului de emisie este o caracteristică fundamentală a instalației de control după cum a reieșit și din paragraful 5.2. La examinarea pieselor cu zgomot structural intens, coeficientul de amortizare al primelor două oscilații trebuie să depășească valoarea 10. Metoda asigură o sensibilitate corespunzătoare, diferența dintre

amplitudinea semnalului de defect și amplitudinea zgomotului de fond este de cel puțin $17 \div 18$ dB, [91], [212]. Dezavantajul constă în necesitatea reglării sensibilității pe domenii foarte mici de distanță, ceea ce conduce la o scădere substanțială a productivității controlului.

Metoda se poate aplica numai în cazul aparatelor cu reglare automată a parametrilor de examinare.

Folosirea palpatoarelor cu dublu cristal (emisie-recepție).

Metoda utilizează tehnica de examinare prin transmisie, atât cu palpatoare normale, cât și cu palpatoare înclinate. Convergența fasciculului se realizează la o anumită distanță în material, de unde semnalele provenite de la discontinuități sunt substanțial departajate de zgomotul de fond. Deși raportul dintre amplitudinea semnalului util și amplitudinea zgomotului este cu câțiva decibeli sub nivelul obținut cu palpatoare focalizate, metoda prezintă avantaje nete în cazul examinării manuale. În vederea măririi sensibilității tehnicii de control a structurilor austenitice cu incidență oblică se folosesc palpatoare înclinate cu dublu cristal de unde longitudinale.

Variantele optime de control se consideră cele utilizând palpatorul înclinat de unde longitudinale cu simplu sau cu dublu cristal. Raportul semnal util/zgomot la palpatoarele înclinate cu $\beta = 45^\circ$ este de peste 20 dB, [214], până la distanțe de 70- 80 mm. La interpretarea rezultatului controlului cu palpatoare înclinate de unde longitudinale primează localizarea discontinuității. Considerațiile privind amplitudinea semnalului, prezentate în paragrafele anterioare, nu sunt strict valabile în cazul oțelurilor austenitice.

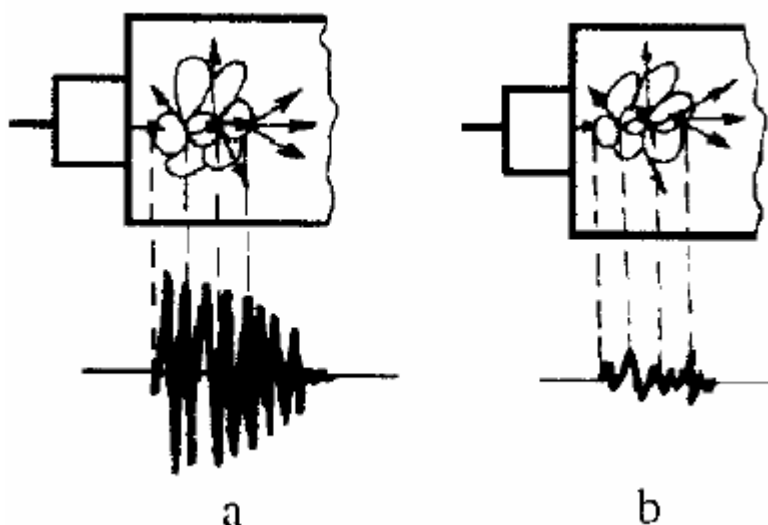


Fig. 70. Influența amortizării undelor asupra zgomotului de fond: a) cu palpator obișnuit; b) cu palpator puternic amortizat

9.2. Tehnologia de control a pieselor placate

Placarea semifabricatelor cu oțel inoxidabil de tip crom, crom-nichel și crom-nichel-molibden, se realizează prin trei procedee principale: sudarea cu electrod bandă, laminare și prin explozie. Grosimile uzuale la placarea cu electrod bandă sunt cuprinse în domeniul $3 \div 15$ mm. Defectele cele mai frecvente la placare sunt:

sufleurile, lipsa de topire între stratul placat și materialul de bază, incluziunile și fisurile. La rândul lor, fisurile pot avea mai multe proveniențe, dintre care se menționează: fisurile de

sub depunere cauzate la rece prin prezenta hidrogenului, fisurile la cald și fisurile produse prin reîncălzire.

În stadiul actual al tehnicii [171], [172], [241], [263], controlul ultrasonic al placărilor se poate executa chiar de pe suprafața placată, figura 71, folosind:

- palpator normal dublu cristal (emisie-recepție), poziția 1;
- palpator înclinat de 70° cu dublu cristal (emisie-recepție), poziția 2;
- palpator înclinat de 70° monocristal de unde longitudinale, având frecvența de $4 \div 6$ MHz, poziția 3, în toate cazurile în care calitatea suprafeței stratului placat asigură un cuplaj corespunzător. Când această condiție nu poate fi satisfăcută, controlul ultrasonic se aplică numai după prelucrarea mecanică a suprafeței.

La grosimi mici de strat placat, sau în cazul în care prelucrarea mecanică nu este posibilă, se va adopta examinarea de pe suprafața metalului de bază folosind:

- palpator normal obișnuit, poziția 4;
- palpator normal cu dublu cristal (emisie-recepție), poziția 5, sau chiar controlul prin transmisie în tandem, prin baleiajul la interfața strat placat material de bază. Metoda prin transmisie cu palpatoare de 70° s-a dovedit capabilă de a pune în evidență fisuri având suprafața de reflexie de până la 2 mm^2 , [25].

Volumul și modul de control se aleg conform uneia dintre variantele: control integral, control în caroiaj cu latura de 100 sau 200 mm, sinusoidal cu semiperioada de 100 mm, respectiv în fâșii pas cu pas de 100 sau 200 mm.

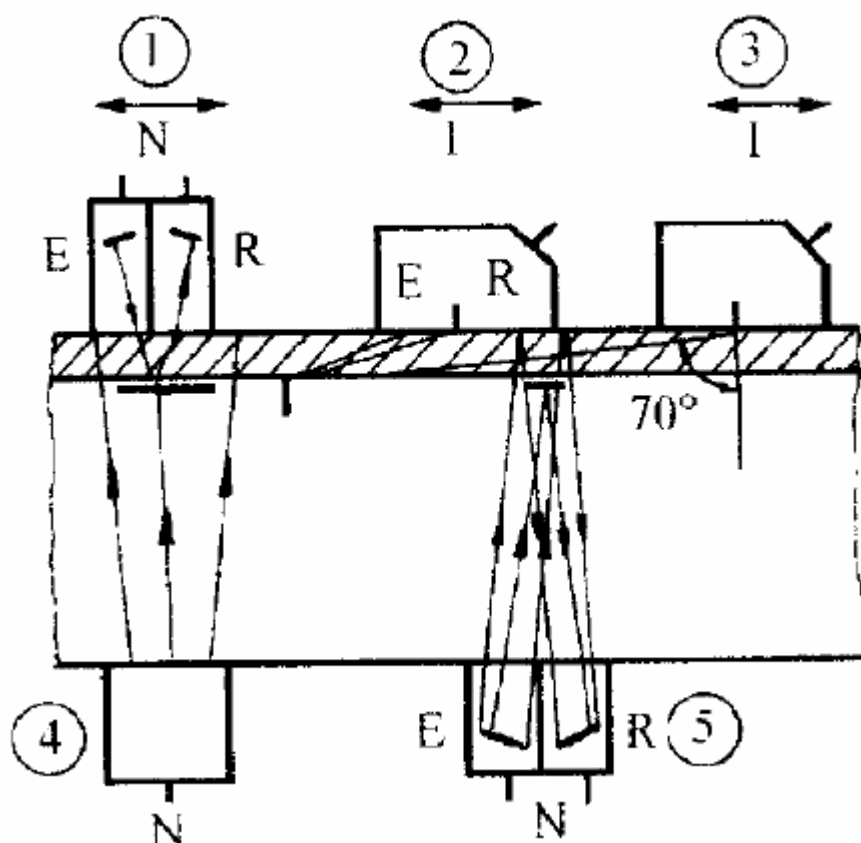


Fig. 71. Variante de examinare a straturilor placate cu oțel inoxidabil

Controlul cu palpatoare normale de emisie recepție, (poziția 1 din figura 71).

Acest control urmărește detectarea discontinuităților orientate în planul de separație al stratului placat cu materialul de bază sau în planuri paralele, cum sunt desprinderile de placaj, incluziunile nemetalice și defectele liniare.

Domeniul de lucru se fixează potrivit grosimii stratului placat. Pentru stabilirea adâncimii de detectare se folosește corpul de testare cu trepte și găuri din figura 72, confecționat din materialul stratului placat. Cu ajutorul său se caută succesiv obținerea ecoului maxim de la orificiile cu diametrul de 5 mm, care se reglează la aproximativ 80% din înălțimea ecranului. Acest ecou se găsește la adâncimi (grosimi) situate în jurul distanței focale a palpatorului. Adâncimea optimă de lucru (domeniul de distanțe) este cea corespunzătoare grosimilor de la care se relevă o scădere la limită sub 6 dB a ecoului maxim reflectat, prin modificarea grosimii cu ± 2 mm (treptele de grosimi învecinate din dreapta și din stânga corpului de testare). Amplitudinea maximă corespunde distanței focale a palpatorului. Scara distanțelor se reglează desfășurând grosimea pe întreaga lățime a ecranului.

Sensibilitatea de lucru se reglează cu ajutorul unui bloc confecționat din același material și același procedeu de placare ca și piesa ce urmează a fi controlată din poziția 1 a figurii 73.

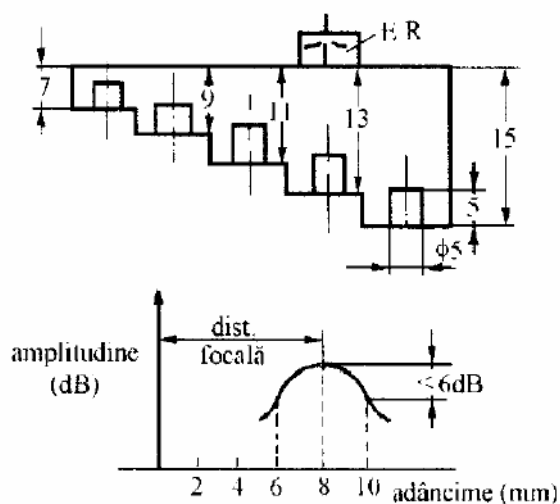


Fig. 72. Determinarea adâncimii de pătrundere a undelor longitudinale cu ajutorul blocului în 5 trepte

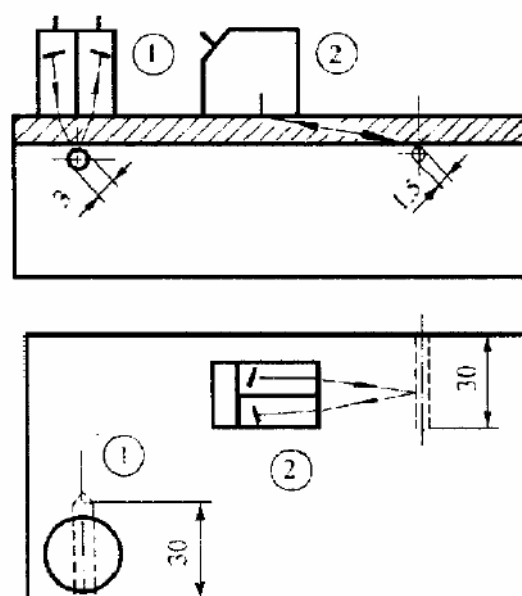


Fig. 73. Bloc pentru reglarea sensibilității la examinarea pieselor placate

Ecourile obținute de la reflectorii cilindrici de $\Phi 3 \times 30$ mm, practicați tangențial la planul de separație dintre placaj și materialul de bază, se aduc la 50% din înălțimea ecranului. Se ridică apoi amplificarea până ce amplitudinea zgomotului (ierbii ultrasonice) ajunge la 50% din înălțimea ecranului și se verifică dacă diferența dintre ecoul de la orificiul cu diametrul de 3 mm și zgomotul de fond depășește 20 dB.

Controlul cu palpatoare înclinate de emisie recepție și palpator înclinat monocristal de unde longitudinale, conform poziției 2 și 3 din figura 71.

Această metodă urmărește detectarea discontinuităților volumice, precum și a lipsei de topire sau a fisurilor. Pentru stabilirea adâncimii de detectare se folosește corpul de testare cu orificii transversale de $\Phi 3 \times 30$ mm din figura 74, confecționat din materialul utilizat la placarea piesei de controlat. Se caută succesiv ecoul maxim provenit de la orificiile plasate la diferite adâncimi. Adâncimea optimă de lucru, care determină domeniul de distanțe, este cea corespunzătoare grosimilor la care prin varierea cu $\pm 2,5$ mm (treptele de adâncimi învecinate ale corpului de testare), ecoul maxim reflectat se menține în limitele unei variații sub 6 dB. Calibrarea scării distanțelor se efectuează desfășurând domeniul 0- 50 mm pe întreaga lățime a ecranului.

La palpatoarele înclinate monocristal de unde longitudinale, semnalul provenit de la unda longitudinală se va regla la mijlocul abscisei ecranului, iar cel provenit de la unda transversală, la distanța corespunzătoare raportului $v_L/v_T=1/0,55=1,82$, deoarece timpul aceluiași parcurs este invers proporțional cu viteza.

Sensibilitatea de lucru se etalonează cu ajutorul blocului de referință din figura 73, din poziția 2. Se procedează ca și în cazul palpatoarelor normale, cu deosebirea că diferența dintre semnalul de la orificiul $\Phi 1,5 \times 30 \text{ mm}$ și zgomotul de fond este suficient să depășească 16 dB.

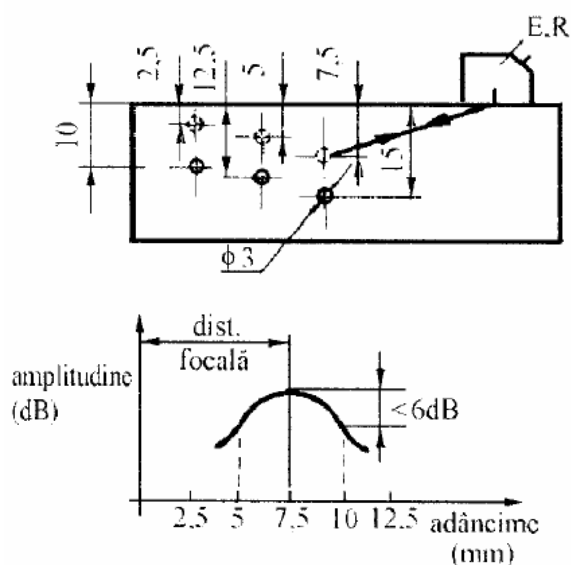


Fig. 74. Determinarea adâncimii de pătrundere a undelor transversale cu ajutorul blocului cu orificii

materialului de bază

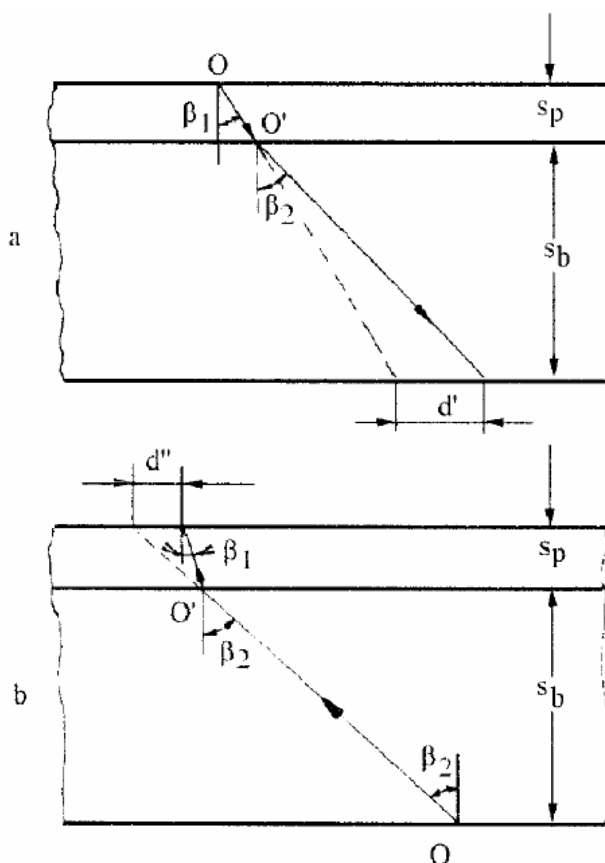


Fig. 75. Corecția parcursului sonor la examinarea pieselor placate:

a) de pe suprafața stratului placat

b) de pe suprafața

Această metodă se aplică în special atunci când suprafața placajului nu oferă condiții de cuplare corespunzătoare. Se pretează la detectarea discontinuităților tip lipsă de aderență și incluziuni nemetalice. În aplicare apar limitări din punct de vedere al sensibilității de examinare, dependenței de domeniul de lucru al palpatorului cu dublu cristal, posibilității defectoscopului de a extinde domeniul de interes pe întreg ecranul, precum și datorită grosimii stratului placat.

9.3. Corecția parcursului sonor

Datorită vitezelor diferite de propagare a ultrasunetelor, în stratul placat și în materialul de bază, pentru localizarea precisă a discontinuităților se recomandă corectarea parcursului sonor. Corecția devine operantă mai ales în cazul folosirii unor unghiuri mari de incidență

$\beta = 70-80^\circ$, în cazul grosimilor relativ mari ale stratului placat și în cazul controlului de pe materialul de bază.

Considerând legea refracției la propagarea undelor dinspre stratul placat înspre materialul de bază sau invers, se poate scrie:

$$\frac{v_p}{v_b} = \frac{\sin \beta_1}{\sin \beta_2} \quad (170)$$

unde v_p și v_b reprezintă vitezele de propagare în stratul placat, respectiv în materialul de bază. Cum $v_p < v_b$, se deduce că în mod constant $\beta_2 > \beta_1$ și ca urmare are loc o modificare a parcursului sonor (distanței proiectate d), conform figurii 75.

Dacă examinarea se realizează de pe suprafața materialului de baza cu unghi de incidență β_2 , are loc o contracție a parcursului sonor, astfel încât distanța proiectată reală până la discontinuitate trebuie micșorată față de indicația monitorului cu valoarea d'' , stabilită de relația:

$$d'' = s_p \sin \beta_2 \left[\frac{1}{(1 - \sin^2 \beta_2)^{1/2}} - \frac{v_p}{(v_b^2 - v_p^2 \sin^2 \beta_2)^{1/2}} \right] \quad (171)$$

Dacă examinarea se realizează de pe suprafața stratului placat cu un unghi β_1 , are loc o dilatare a parcursului sonor, în consecință distanța proiectată reală până la o discontinuitate reperată eventual în materialul de bază, trebuie mărită față de indicația monitorului cu valoarea corectată d' , care se calculează cu relația:

$$d' = s_b \sin \beta_1 \left[\frac{v_b}{(v_p^2 - v_b^2 \sin^2 \beta_1)^{1/2}} - \frac{1}{(1 - \sin^2 \beta_1)^{1/2}} \right] \quad (172)$$

10. CALIBRAREA DEFECTOSCOPULUI

Reglarea defectoscopului urmărește obținerea unor indicații corecte, reproductibile și interpretarea corespunzătoare a semnalelor. În scopul reglării defectoscopului se utilizează blocuri de calibrare (de referință) de diferite tipuri. Pentru asigurarea unor condiții univoce de propagare, materialul din care se confecționează blocurile trebuie să fie același sau apropiat de cel care se controlează. Diferența maximă dintre caracteristicile acustice ale blocului de calibrare și ale piesei de controlat este de 3%. La blocurile de calibrare pentru controlul țevelor, grosimea peretelui și raza de curbura nu trebuie să se abată cu mai mult de $\pm 10\%$ față de dimensiunile corespunzătoare ale piesei controlate.

Cu ajutorul blocurilor de calibrare se efectuează următoarele etalonări și reglări:

a. pentru aparatul propriu zis:

- etalonarea scării de măsurare a distanțelor,
- reglarea sensibilității,
- liniaritatea amplificării, determinarea zonei moarte,
- determinarea selectivității sau a puterii separatoare.

b. pentru palpatoare:

- determinarea punctului de incidență a fasciculului,
- verificarea unghiului de refracție,
- verificarea devierii axei longitudinale a fasciculului,

- corecția punctului de zero,
- ridicarea caracteristicii de directivitate.

Dintre calibrările menționate, controlul de rutină impune etalonarea scării distanțelor și reglarea sensibilității (amplificării) de lucru. Aceste operații sunt obligatorii, atât la începerea controlului (calibrarea inițială), cât și în următoarele faze: la interval de câte patru ore de lucru, la schimbarea personalului operator sau a bateriei aparatului și la terminarea controlului. Abaterile maxime admise față de valorile inițiale sunt de 5%. În cazul unor abateri de peste 5%, măsurătorile se corectează sau se refac.

10.1. Controlul cu palpatoare normale. Blocul A₁

Calibrarea parametrilor de examinare cu palpatoare de mărime obișnuită de unde longitudinale sau transversale se efectuează cu ajutorul blocului de calibrare A₁, [242], [250]. El este confecționat din oțel calmat nealiat, normalizat, cu granulația minimă de punctaj 8, având forma și dimensiunile indicate în figura 76. Toleranțele tuturor dimensiunilor sunt de $\pm 0,1$ mm. În orificiul de $\Phi 50$ mm se montează un dop cilindric din plexiglas cu suprafața inferioară argintată. Etalonarea și reglarea defectoscopului și a palpatoarelor cu ajutorul blocului de calibrare decurge după cum se prezintă în figura 76.

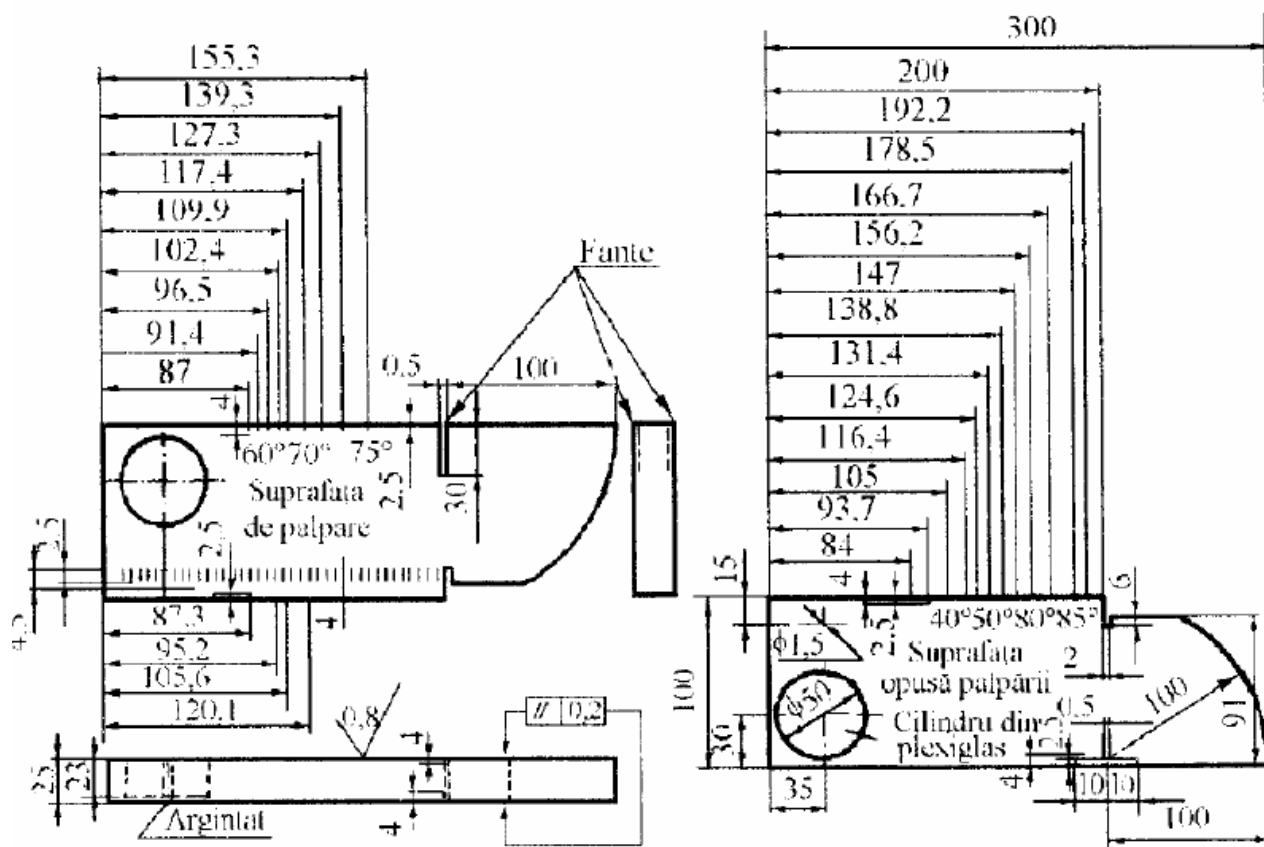


Fig. 76. Blocul de calibrare A₁

Etalonarea scării de măsurare a distanțelor (baza de timp), se realizează din poziția A și B pentru distanțe de peste 250 mm, respectiv din poziția C pentru distanțe sub 250 mm, în cazul palpatorului normal, figura 77, și din poziția E în cazul palpatorului înclinat. La etalonarea pentru unde transversale cu palpator normal, din poziția D, unde longitudinale străbat distanța de 91 mm, ceea ce corespunde la o distanță echivalentă de unde transversale de 50 mm. Cerința etalonării este ca între ecourile succesive distanțele să fie

egale. Astfel, la poziția B se impun distanțe egale $5 \times 100 = 500$ mm. Abaterea maximă a distanțelor dintre două ecouri succesive este de 1% din lungimea marcată pe ecran.

Reglarea sensibilității, figura 78, urmărește obținerea unui nivel de sensibilitate prestabilit pentru evidențierea defectelor, indiferent de distanță, caracteristici de atenuare și pierderile prin cuplaj. Se reglează pentru unde longitudinale și unde transversale. În cazul undelor longitudinale se disting două situații: sensibilitate mare, cu palpatorul în poziția A; sensibilitate mică cu palpatorul în poziția D.

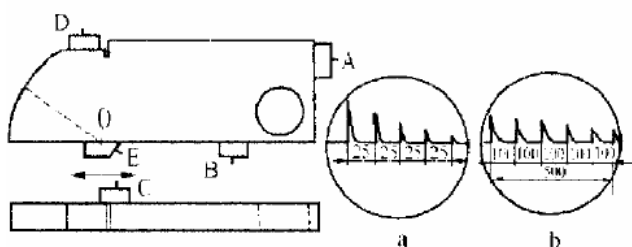


Fig. 77. Calibrarea scării distanțelor

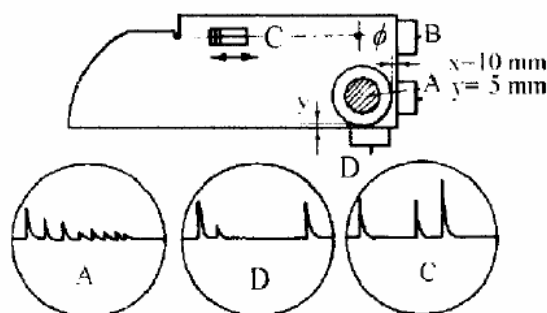


Fig. 78. Reglarea sensibilității și zonei moarte

Pentru unde transversale, palpatorul se dispune în poziția C. Cerința față de acest reglaj este ca ecourile să fie distincte și în număr cât mai mare. Numărul de ecouri în poziția A și înălțimea maximă de ecou în poziția B și C reprezintă parametri de bază ai sensibilității.

Pentru determinarea cantitativă a gradului de liniaritate a amplificării, se procedează după cum urmează: se urmărește timp de 5 minute pe ecranul aparatului, din poziția B sau C, în care se recepționează ecouri succesive de la orificiul blocului de calibrare, trenul de ecouri, la un reglaj mijlociu al amplificării. Menținând constant contactul palpatorului, se vizează ecoul, care are mărimea $4/5$ din înălțimea ecranului.

Se micșorează apoi amplificarea cu 12 dB, ceea ce corespunde la un raport între ecouri de 4:1. Se consideră că liniaritatea amplificării este corespunzătoare dacă vârful respectiv atinge în limitele unei toleranțe de ± 1 dB un nivel de $1/5$ din înălțimea ecranului.

După [265], se procedează astfel: se alege un domeniu de distanțe, potrivit căruia primul ecou de fund să fie destul de îndepărtat de semnalul de emisie. Toate butoanele care influențează amplitudinea, de exemplu cele de suprimare, filtrare etc. se scot din funcțiune. Ecoul se ridică apoi la 80% din înălțimea ecranului. Cu amplificatorul, se ridică ecoul cu 2 dB, apoi se micșorează de la 80% cu 6 dB și încă odată cu 6 dB. Dacă liniaritatea amplificării este asigurată, ecoul va trebui să se plaseze cu vârful, succesiv în pozițiile de 100%, 40% respectiv 20% din înălțimea ecranului cu o precizie de ± 1 dB.

Determinarea zonei moarte, se cere numai pentru unde longitudinale, cu palpatorul în pozițiile D și A, figura 78 și domeniul de distanțe ales sub 50 mm. Zona moartă se consideră sub 10 mm, dacă în poziția A se recepționează distinct ecoul de la orificiul de Φ 50 mm față de impulsul de emisie. Zona moarta se consideră sub 5 mm, dacă în poziția D se recepționează distinct ecoul de la orificiul Φ 50 mm față de impulsul de emisie. Prin ecou distinct se înțelege semnalul detașat de ramura descendentă a semnalului de emisie cu mai mult de 50% din înălțime.

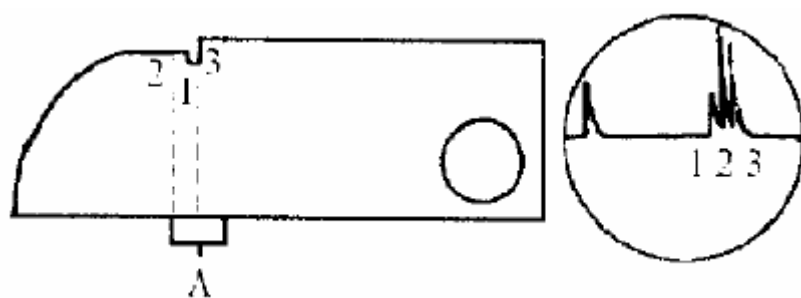


Fig. 79. Determinarea selectivității

Determinarea selectivității sau a puterii separatoare, are loc cu ajutorul undelor longitudinale, utilizând scara distanțelor reglată pe domeniul 100 mm, din poziția A, figura 79. La o separare bună a fascicului reflectat de pe suprafețele plasate la distanțe de 100, 91 și 85 mm, se impune obținerea unui decalaj al ecourilor pe ecran, astfel încât să se distingă foarte clar. Diferențele minime ale vârfurilor acestora față de punctele de intersecție între ramuri trebuie să fie de 6dB.

După [253], selectivitatea poate fi apreciată și altfel. Din poziția A, figura 78, ecourile provenite de la 91, respectiv 100 mm, se reglează la 80% din înălțimea ecranului. În această situație, lățimea ecoului corespunzător distanței de 85 mm la 20% din înălțimea ecranului va fi cel mult de 6 mm.

La palpatoare de frecvență joasă, sub 2 MHz, se procedează și în modul următor. Primul ecou de fund obținut din poziția C, în figura 77, se reglează la 80% din înălțimea ecranului. Lățimea acestui ecou, măsurată în dreptul la 20% din înălțimea ecranului, este limitată la 12 mm în cazul frecvenței de 1 MHz, respectiv la 7 mm la frecvența de 1-2 MHz.

La palpatoare înclinate, după ce s-a reglat scara distanțelor în unde transversale pe 50 mm parcurs sonor din poziția D, figura 77 se recepționează din poziția E ecoul de la suprafața cilindrică cu raza de 100 mm. Potrivit la mijlocul ecranului și amplificat la înălțimea acestuia, lățimea ecoului la 1/10 din înălțimea ecranului, nu trebuie să depășească trei lungimi de undă, [265].

Impulsul de emisie și zgomotele (iarbă ultrasonică) limitează recunoașterea sau rezoluția în domeniul câmpului apropiat (în stratul superficial al piesei).

Poziționarea palpatorului după figura 79 trebuie astfel asigurată încât să evite efectul de margine.

Determinarea punctului de incidență al fascicului.

Necesitatea acestei operații este impusă de uzura inevitabilă a tălpii palpatorului în cursul exploatării palpatoarelor înclinate. Palpatoarele se așează pe rând în poziția E, figura 77, și se deplasează în vederea obținerii ecoului maxim de la suprafața cilindrică de R=100mm.

Corespunzător acestei poziții, punctul de incidență al fascicului se va găsi și se va marca pe palpator în dreptul diviziunii zero de pe blocul de etalonare, care marchează centrul cercului cu raza R=100 mm.

Verificarea unghiului de refracție, se execută vizând de pe muchiile de 300 mm, respectiv de 200 mm, orificiul de Φ 50 mm și citind unghiul marcat pe blocul de etalonare în dreptul indexului palpatorului respectiv (punctul de incidență în prealabil corectat), în poziția în care pe ecranul aparatului se obține ecoul maxim.

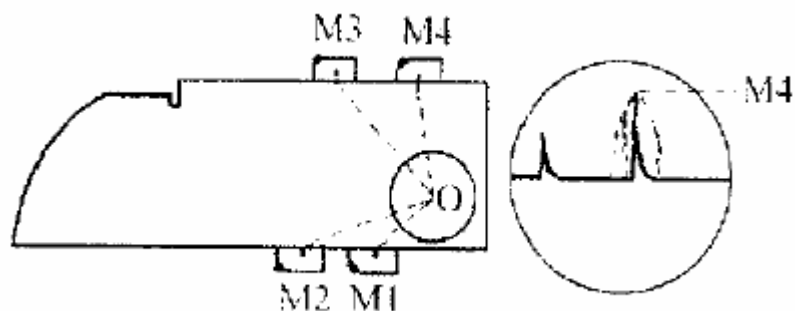


Fig. 80. Verificarea unghiului de incidență

Poziția palpatoarelor și aspectul imaginii este conformă figurii 80. Devierea axei longitudinale a fasciculului este specifică palpatoarelor înclinate. Pentru determinarea acestei abateri se procedează astfel: se urmărește obținerea semnalului maxim de reflexie de la muchia perfect prelucrată a unei piese sau a blocului de calibrare; unghiul pe care îl face direcția palpatorului cu perpendiculara pe muchie reprezintă deviația axei longitudinale. Abaterea maximă admisă este de 2° .

Corecția punctului de zero.

Prezența penei de refracție a palpatoarelor înclinate produce o întârziere (x) a momentului pătrunderii semnalului în piesă față de momentul emiterii acestuia, ceea ce produce o deplasare spre dreapta a semnalului de emisie pe ecran. Corecția se realizează la etalonarea scării de măsurare a distanțelor pentru unde transversale, prin translatarea semnalului de emisie spre stânga cu valoarea x_1 - transpusa la scară a distanței x- sau prin translatarea primului ecou în dreptul diviziunii zero a scării ecranului.

Ridicarea caracteristicii de directivitate a fasciculului.

Distribuția energiei (presiunii) emise de un palpator este pusă în evidență prin diagramele polare verticale și orizontale. În vederea ridicării diagramei polare verticale a unui palpator înclinat se așează palpatorul pe blocul de etalonare, în dreptul indexului corespunzător unghiului său de incidență, pozițiile M din figura 80. În acest punct, ecoul de la orificiul de $\Phi 50$ mm va avea valoarea maximă (100%). Deplasând palpatorul de o parte și de alta a marcajului respectiv, amplitudinile de ecou se vor micșora, deoarece energia reflectată este din ce în ce mai mică. Măsurându-se amplitudinile relative, succesive de ecou, corespunzătoare pozițiilor respective, se determină conturul diagramei polare. Diagrama polară orizontală se ridică cu ajutorul orificiului de $\Phi 1,5$ mm, din poziția C, figura 78, rotind palpatorul de o parte și de alta a poziției de amplitudine maximă și marcând dependența amplitudine relativă de ecou-unghi. Pentru determinări de precizie se vor folosi raportorul sau goniometrul.

Măsurarea frecvenței.

Frecvența unui palpator se consideră egală cu frecvența impulsului de intrare în aparat produs de ecoul reflectat de la distanța de 100 mm a blocului etalon A_1 . Ea se determină cu ajutorul spectrului de frecvență înregistrat de către un analizor de frecvență cuplat la palpator. În funcție de condițiile de execuție a traductorului piezoelectric, spectrul de frecvență este mai mult sau mai puțin simetric și/sau centrat față de valoarea medie. Convențional se admite că frecvența spectrului este reprezentată de mijlocul corzii construite la flancurile extreme ale spectrului la o diferență de amplificare (distanță) de 3 dB față de valoarea maximă înregistrată.

10.2. Controlul cu palpatoare miniaturale. Blocul A_2 .

Blocul de calibrare A₂, are potrivit [126], [251], [270], forma și dimensiunile din figura 81, fiind confecționat în aceleași condiții ca și blocul A₁. Toleranțele tuturor dimensiunilor sunt de $\pm 0,1$ mm.

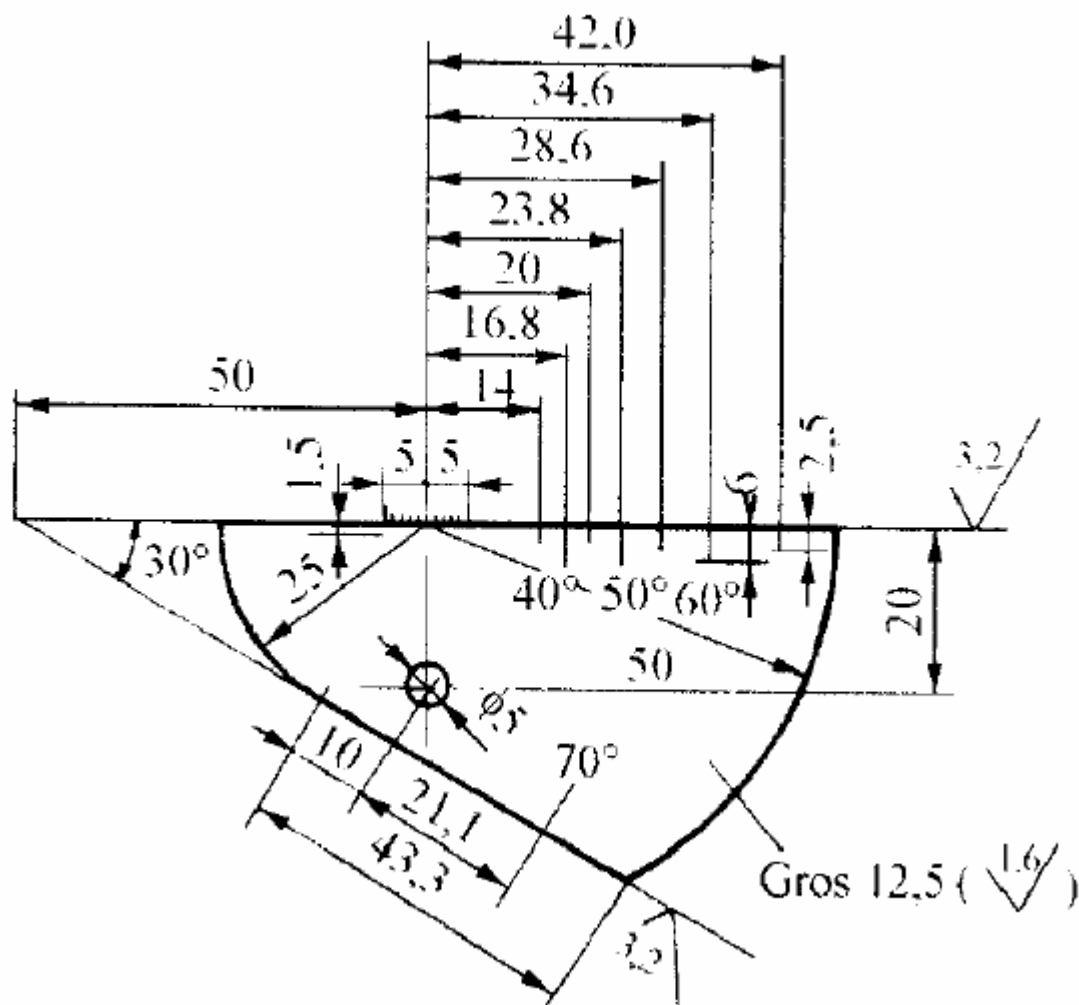


Fig. 81. Blocul de calibrare A₂

Blocul A₂ a fost conceput în special pentru etalonarea echipamentului de control al îmbinărilor sudate și a palpatoarelor miniaturale. El răspunde următoarelor funcțiuni:

- reglarea scării distanțelor (bazei de timp);
- reglarea sensibilității;
- determinarea unghiului de incidență;
- determinarea punctului de emisie a fascicului.

Blocul A₂ se folosește operativ la reglarea scării distanțelor în proiecție redusă, în vederea evaluării parametrilor defectului cu ajutorul scalelor DAM. În acest scop, ecourile recepționate de la distanțe ale parcursului sonor de 25, 50, 100mm, etc., se suprapun peste diviziunile corespunzătoare proiecțiilor reduse $25 \sin \beta$ - b, $50 \sin \beta$ - b, $100 \sin \beta$ - b mm, etc., unde β reprezintă unghiul de incidență al palpatorului iar b distanța dintre suprafața frontală și punctul de emisie al palpatorului.

10.3. Controlul cu palpator cu dublu cristal. Blocul A₃

Blocul A₃ este confecționat dintr-o piesă de oțel în condițiile descrise de [250], în 8 trepte, având grosimea cuprinsă între 1 și 8 mm, figura 82. Pe treapta de 7 mm este practică o renura în vederea determinării sensibilității și a separării semnalului de emisie de cel de recepție.

Blocul A_3 a fost conceput pentru calibrarea echipamentului de control în cazul folosirii palpatoarelor de unde longitudinale miniaturale cu dublu cristal, precum și în cazul întrebuintării unor frecvențe mari de lucru, de peste 6 MHz. El îndeplinește următoarele funcțiuni:

- reglarea scării de măsurare a distanțelor, în domeniul 5- 20 mm, poziția A, B sau C;
- stabilirea liniarității bazei de timp;
- determinarea sensibilității, poziția D;
- determinarea zonei moarte, pe trepte de grosime;
- corecția punctului zero;
- verificarea separării fasciculului de emisie de cel de recepție, poziția E.

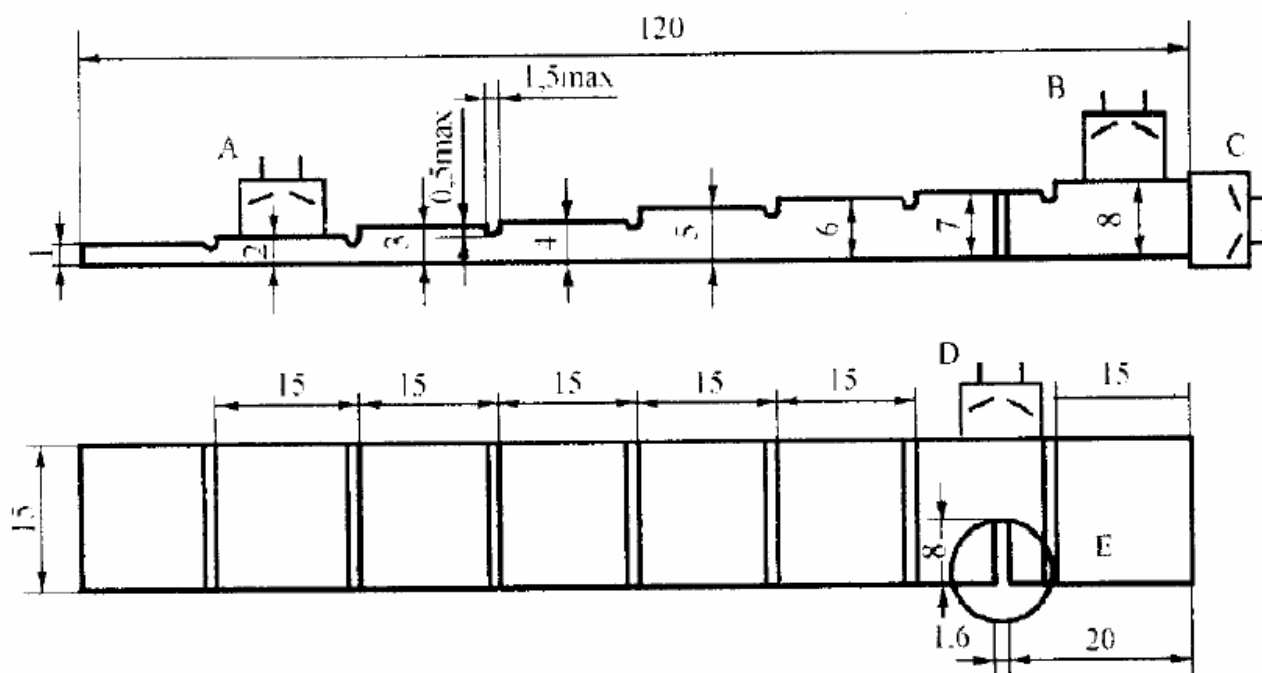


Fig. 82. Bloc de calibrare A_3

În cazul ultimei operații, la suprapunerea peretelui despărțitor dintre cele două piezocristale ale palpatorului peste renura de pe blocul A_3 , (poziția E), ecoul de fund trebuie să dispară.

10.4. Determinarea puterii separatoare. Blocul A_4

Blocul A_4 este o piesă semicilindrică din oțel, în 5 trepte de diametre diferite, cuprinse între 120 și 148 mm, având lungimea de $5 \times 15 = 75$ mm și este reprezentat în figura 83.

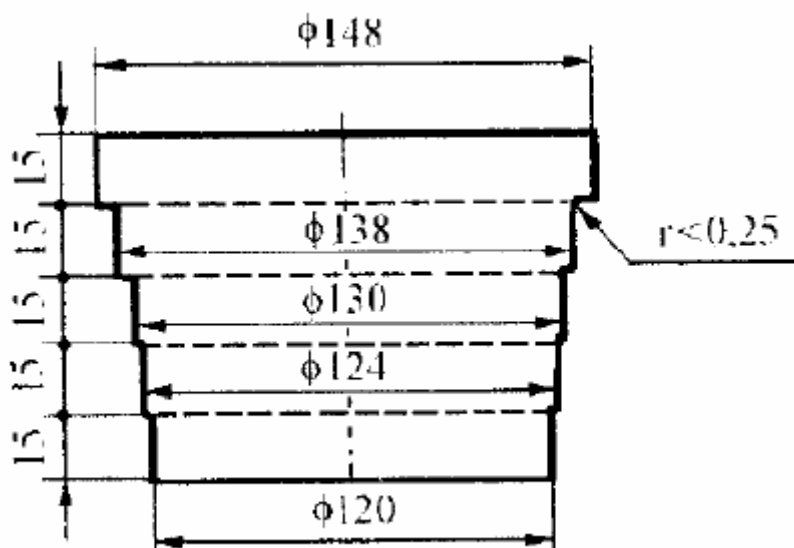


Fig. 83. Bloc de calibrare A₄

El este destinat determinării selectivității în adâncime sau a puterii separatoare la orice tip de palpator. Razele treptelor au fost astfel alese încât capacitatea separatoare a semnalelor să poată fi stabilită din mm în mm în intervalul de 2- 5 mm. Aprecierea gradului de separare a semnalelor suprapuse provenite de la două raze învecinate, se face pe baza criteriului descris la paragraful 10. 1 - zona moartă.

10.5. Calibrarea cu blocuri de referință paralelipipedice

Blocurile de referință se folosesc pentru reglarea amplificării de lucru (sensibilității) și la compararea amplitudinii semnalelor reflectate de la aceeași distanță de parcurs sonor. Ele se confecționează din piesa de controlat, prin practicarea unor orificii cilindrice transversale cu diametrul de regulă de 2- 3 mm, conform indicațiilor din tabelul 16. Lățimea trebuie să fie mai mare decât diametrul palpatorului folosit la control. La piese de grosimi mai mari, variația distanței parcursului sonor se asigură prin practicarea mai multor orificii, distanța dintre ele fiind aleasă din condiția evitării la limită a suprapunerii semnalelor reflectate de două orificii alăturate, respectiv de orificii și muchia blocului de referință.

Blocurile de referință paralelipipedice pot fi întrebuințate până la cel mult 10% diferență de grosime sau parcurs sonor și până la maximum 10% diferență de rază de curbura [262].

Tabelul 16

Grosime, s (mm)	Bloc de referință
10...15	
15...20	
20...40	
40...80	
80...150	

Lățimea blocului de referință trebuie să satisfacă condiția:

$$B \geq \frac{2\lambda d}{D_p} \quad (131)$$

în care d este distanța parcursului sonor.

La controlul pieselor groase și foarte groase, diametrul găurilor blocului de referință este corelat cu grosimea după recomandările [244] cuprinse în tabelul 17.

Calibrarea scării distanțelor se face prin deplasarea semnalelor provenite de la orificiile blocului de referință în dreptul diviziunilor corespunzătoare parcursului sonor. Semnalele sunt obținute, fie din stânga, fie din dreapta palpatoarelor. Ca verificare, suma distanțelor orificiilor tatonate din dreapta și din stânga de către palpator trebuie să corespundă valorii $2s/\cos\beta$. Diferența recepționată dintr-o singură parte între două orificii învecinate este $c/\cos\beta$, unde valoarea parametrului c rezultă din tabelul 16.

Tabelul 17

Grosimea materialului controlat, s (mm)	Grosimea blocului de referință (mm)	Diametrul găurilor (mm)
50- 100	75 sau s	4,8
100- 150	125 sau s	6,3
150- 200	175 sau s	8
200- 250	225 sau s	9,5
250- 300	275 sau s	11
300- 400	330 sau s	12,7
peste 400	*)	**))

*) s

**) pentru fiecare creștere s cu 50 mm diametrul găurilor se majorează cu 1,5 mm

Înfăș urătoarea vârfulor semnalelor maxime provenite de la diferite distanțe $p/2 \dots 3p/2$ se marchează pe ecranul aparatului sub forma unei curbe distanță-amplificare numită și caracteristica de referință, cu ajutorul căreia se apreciază prin comparație mărimea discontinuităților volumice (paragraful 6.2.1.). Pentru obținerea caracteristicii de referință, semnalul maxim interceptat de la distanța $p/2$ se reglează la 80% din înălțimea ecranului. O metodă asemănătoare, folosind însă ca reflectori suprafețe plane circulare, perpendiculare pe fascicul, servește la ridicarea scalelor DAM.

Blocurile de referință după ASME, [216], sunt asemănătoare, cu deosebirea că distanța dintre orificii este $s/4$.

10.6. Controlul de pe suprafețe curbe. Blocuri de referință cilindrice

Un caz particular îl reprezintă calibrarea palpatoarelor cu talpa curbată, utilizate la controlul suprafețelor curbe. Adaptarea tălpii palpatorului la curbura suprafeței controlate este necesară dacă raza de curbura $R < b^2/4$ mm, unde b este dimensiunea de referință a tălpii palpatorului și anume lățimea, în cazul în care fasciculul de examinare se proiectează în plan longitudinal al piesei, respectiv lungimea, în situația în care fasciculul de examinare este orientat în planul transversal al profilului piesei controlate. În aceste cazuri nu se mai pot folosi blocurile de calibrare obișnuite, locul lor fiind luat de blocuri speciale, având curbura și grosimea similară cu a piesei de controlat. Determinarea punctului de incidență și unghiului de pătrundere se realizează cu ajutorul unor astfel de blocuri speciale, în care se practică orificii reflectoare de Φ 2- 3 mm. La examinarea cu fascicul orientat în planul longitudinal al semifabricatului, palpatorul se plasează succesiv în pozițiile 1 și 2, de unde se obțin ecourile maxime de reflexie de la marginile orificiului, figura 84. Unghiul de incidență a fasciculului se calculează cu relația:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{a_2 - a_1}{s} \quad (173)$$

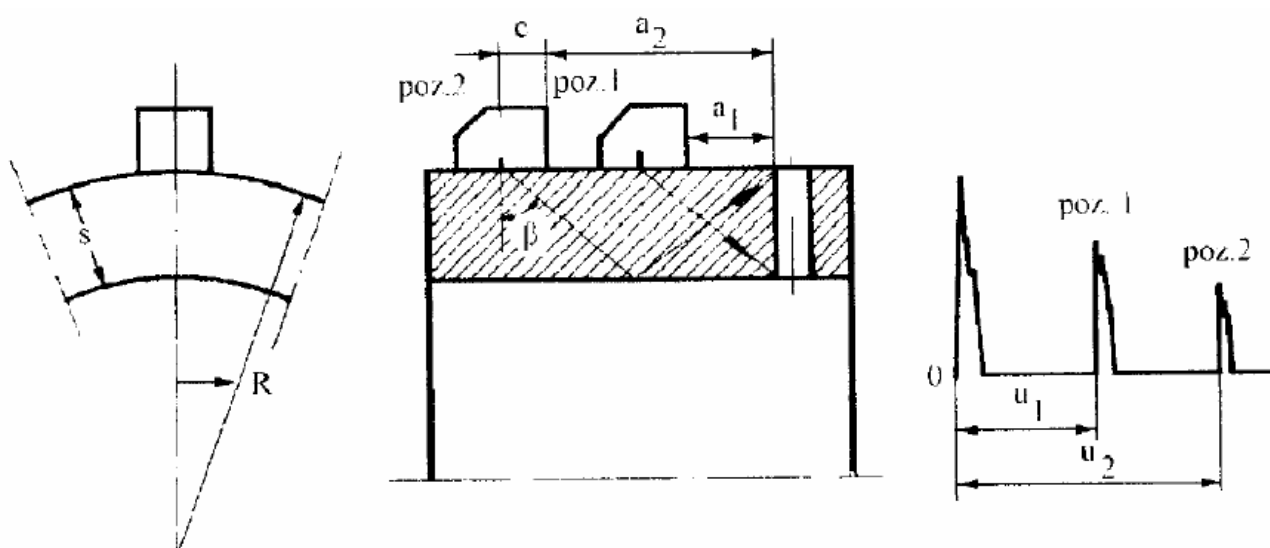


Fig. 84 Calibrarea pentru controlul de pe suprafețe curbe cu fascicul orientat în plan longitudinal

Punctul de incidență (indexul zero) al palpatorului se determină cu relația

$$x = a_2 - 2a_1 \quad (174)$$

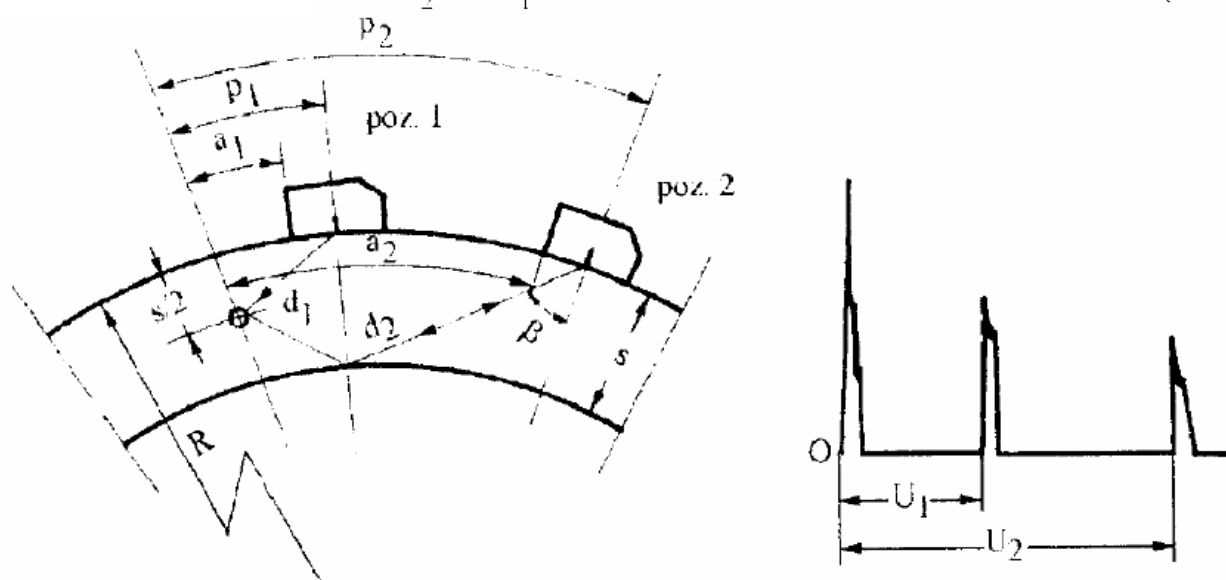


Fig. 85. Calibrarea pentru controlul de pe suprafețe curbe cu fascicul orientat în plan transversal

În cazul examinării cu fascicul orientat într-un plan perpendicular pe axa longitudinală a semifabricatului, pentru calibrare se folosește blocul prezentat schematic în figura 85, care are un orificiu de $\Phi \Phi 2-3 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, dispus în mijlocul piesei.

Pozițiile 1 și 2 ale palpatorului corespunzând detectării ecourilor maxime de la orificiu, determină distanțele proiectate reduse a_1 și a_2 . În această situație unghiul de incidență se calculează pe baza relației

$$\frac{a_2 - a_1}{2R} = \arcsin \left(\frac{1}{1 - \frac{s}{R}} \sin \beta \right) - \arcsin \left(\frac{1}{1 - \frac{s}{2R}} \sin \beta \right) \quad (175)$$

folosind nomograma din figura 86.

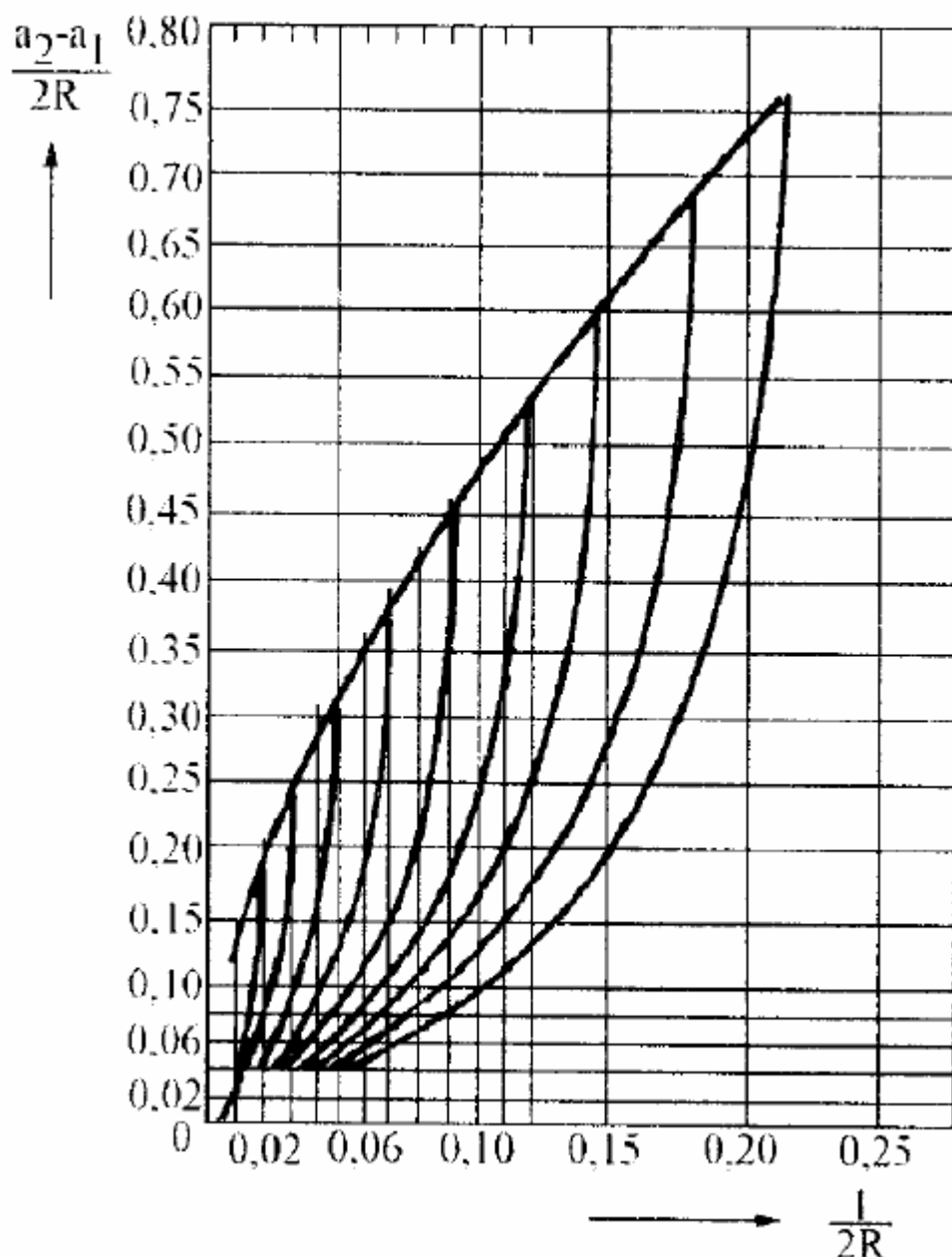


Fig. 86. Nomogramă pentru determinarea grafică a unghiului de incidență la controlul de pe suprafețe curbe

Blocurile cu suprafețe curbe se pot folosi totodată pentru reglarea scării distanțelor și a sensibilității aparatului. În primul caz, distanțele ecourilor de pe ecran u_1 și u_2 provenite din pozițiile 1 și 2 ale palpatorului vor fi reglate astfel încât să fie proporționale cu distanțele efective parcurse de fasciculul d_1 și d_2 , cu distanțele parcurse proiectate p_1 și p_2 , respectiv cu distanțele proiectate reduse a_1 și a_2 .

10.7. Controlul cu scale DAM

Controlul cu scale DAM presupune reglarea prealabilă a scării distanțelor și amplificării (sensibilității). Aceste reglaje sunt prezentate în detaliu în cadrul paragrafului 6.1 și 6.2.

10.8. Calibrarea pentru controlul oțelurilor inoxidabile

Reglarea parametrilor de control al îmbinărilor sudate și placărilor din oțeluri inoxidabile austenitice se realizează cu ajutorul blocului de calibrare A₁, confecționat din oțel inoxidabil de tip X5CrNi18,9, cu granulație uniformă de punctaj peste 5, [99] și fără orificiul de Φ 5 mm, precum și cu ajutorul unor corpuri speciale prezentate la paragraful 9.2.

11. APLICATII LA EXAMINAREA ÎMBINĂRII SUDATE

11.1. Condiții generale de examinare și de pregătire a suprafeței

Controlul îmbinărilor sudate se efectuează în majoritatea situațiilor cu palpatoare înclinate de unde transversale. Aceasta presupune examinarea implicit a unor fâșii din materialul de bază, în lungul cusăturii, de o parte și de alta, cuprinse între cusătură și limita maximă de deplasare a palpatorului. Obligatorietatea controlului unor fâșii de material adiacente îmbinării sudate, este pricinuită de posibilitatea prezenței unor defecte în materialul de bază, de exemplu defecte plane de tipul suprapunerilor de laminare, care în cazul obturării parțiale sau totale a secțiunii sudurii, face imposibilă identificarea discontinuităților din aceste așa-zise zone de umbră. Pe de altă parte, astfel de defecte pot conduce la localizarea eronată a semnalelor de discontinuitate datorită decalării prin reflexie multiplă a fasciculului de unde de pe suprafața defectului din materialul de bază. Controlul urmărește și evidențierea unor variații de grosime, fără de care nu este posibilă localizarea exactă a discontinuităților din sudură. Examinarea fâșiilor adiacente de material de bază se execută cu palpatoare normale de unde longitudinale, sensibilitatea minimă de examinare fiind cea care, în lipsa discontinuității sau defectului, asigură un ecou de fund de amplitudine corespunzătoare înălțimii ecranului.

În vederea unei detectări sigure a discontinuităților orientate defavorabil în raport cu una din părțile de examinare, controlul trebuie efectuat succesiv, fie de pe ambele părți ale îmbinării, fie de pe ambele suprafețe ale piesei. Alegerea pozițiilor de examinare este condiționată și de accesul la suprafețele respective, calitatea suprafețelor de palpare și de forma îmbinării.

La nivelul tehnicii actuale, concludența controlului cu ultrasunete se consideră că este asigurată de la grosimi de 10 mm în sus. Cu anumite restricții și măsuri suplimentare, el poate fi extins chiar și la grosimi mai mici, până la 6 mm.

După cum rezultă și din paragrafele anterioare, la o anumită geometrie a piesei, probabilitatea de detectare a discontinuităților este influențată pe lângă grosime și de pozițiile și unghiurile fasciculelor de undă emise, precum și de volumul de control.

Tehnicile actuale de examinare caută adaptarea cât mai rațională a acestor parametri la forma și grosimea îmbinării și la orientarea discontinuității în raport cu axa cusăturii (transversal sau longitudinal) și totodată să le contureze cât mai univoc prin definirea claselor de control [227], [228], [240]. Clasele de control sunt astfel concepute încât probabilitatea de decelare să fie cât mai bună iar aceasta să se mărească pe măsura adoptării unei clase superioare.

Tehnicile efective de examinare ale principalelor tipuri de îmbinări sudate, defalcate pe clase de control sunt prezentate în cadrul paragrafului 1.1.4.

Înainte de operația propriu zisă de control, se recomandă examinarea atentă a îmbinării în vederea identificării suprafețelor și muchiilor, care formează reflectori favorabili orientării pentru anumite poziții ale palpatorului. În cazuri de dubiu, decelarea imperfecțiunilor de formă (paragraful 6.4) se realizează printr-un salt perceptibil al semnalului de pe ecran, prin măsurători de distanță cât mai exacte, sau prin control de pe ambele părți ale îmbinării.

La controlul îmbinărilor sudate din aluminiu, parametri de control rămân aceiași ca și în cazul oțelurilor. La un control pretențios se va micșora unghiul de incidență după cum urmează: 43,5° în loc de 45°; 57,5° în loc de 60°, 67° în loc de 70° respectiv 75° în loc de 80°. Aceste corecții se impun datorită modificării vitezei de propagare a ultrasunetelor.

În vederea asigurării unui bun control, suprafața adiacentă îmbinării sudate, de pe care se realizează examinarea, precum și suprafața de reflexie a undelor trebuie să permită alunecarea ușoară a palpatorului și condiții corespunzătoare de cuplare acustică. Suprafețele rugoase înrăutățesc cuplajul, deci transmisia acustică și provoacă difracția și distorsionarea fasciculului de unde. Rugozități necorespunzătoare ale suprafeței de examinare și de reflexie, conduc la imposibilitatea localizării exacte a discontinuităților. De asemenea, se are în vedere faptul că pe măsura măririi unghiului de incidență al palpatorului, efectele menționate devin mai pronunțate. În consecință, rugozitatea suprafeței de palpare va fi cât mai mică și se vor evita stropii, stratul de vopsea și eventuale impurități. În caz contrar, se impune o curățire de netezire cu mijloace mecanice. De asemenea este necesar să se îndepărteze și neregularitățile grosolane ale suprafeței cusăturii, cum ar fi: retasurile exterioare, craterele, creștăturile marginale, supraînălțările excesive, ale căror semnale îngreunează interpretarea corectă a indicațiilor urmărite în sudură.

Condițiile necesare de rugozitate a suprafeței de examinare și de reflexie se indică la paragraful 4.9.

11.2. Examinarea îmbinării sudate cap la cap

11.2.1. Detectarea discontinuităților longitudinale.

Discontinuitățile longitudinale se detectează explorând întreaga secțiune transversală a cusăturii în lungimea ei, precum și un volum din materialul de bază situat de o parte și de alta a cusăturii până la o distanță de cel puțin 10 mm de la marginea ei. Aceasta presupune baleierea palpatorului înclinat între reperele 1 și 2, folosind avansul și retragerea în zig- zag cu un pas inferior lățimii palpatorului, după cum este indicat în figura 87. Simultan cu apropierea și îndepărtarea palpatorului față de cusătură, se execută și o mișcare de rotire sub un unghi de $\pm 10 - 15^\circ$, cu o frecvență de cea 3 ÷ 5 ori pe intervalul de examinare.

În cazul discontinuităților plane, perpendiculare pe suprafața piesei, se recomandă tehnica examinării în tandem, paragraful 11.5. Atunci când există dubii asupra mărimii sau naturii discontinuităților se recomandă un control de pe ambele părți și suprafețe. Asemenea condiții se impun și la materiale cu coeficient mare de atenuare, în cazul pieselor de mare răspundere sau în cazul pieselor de grosimi mari.

Intervalul de deplasare a palpatorului $l_{\min} - l_{\max}$, sau pasul de examinare, este recomandat în tabelul 18 în funcție de grosimea piesei s și unghiul de incidență al palpatorului β .

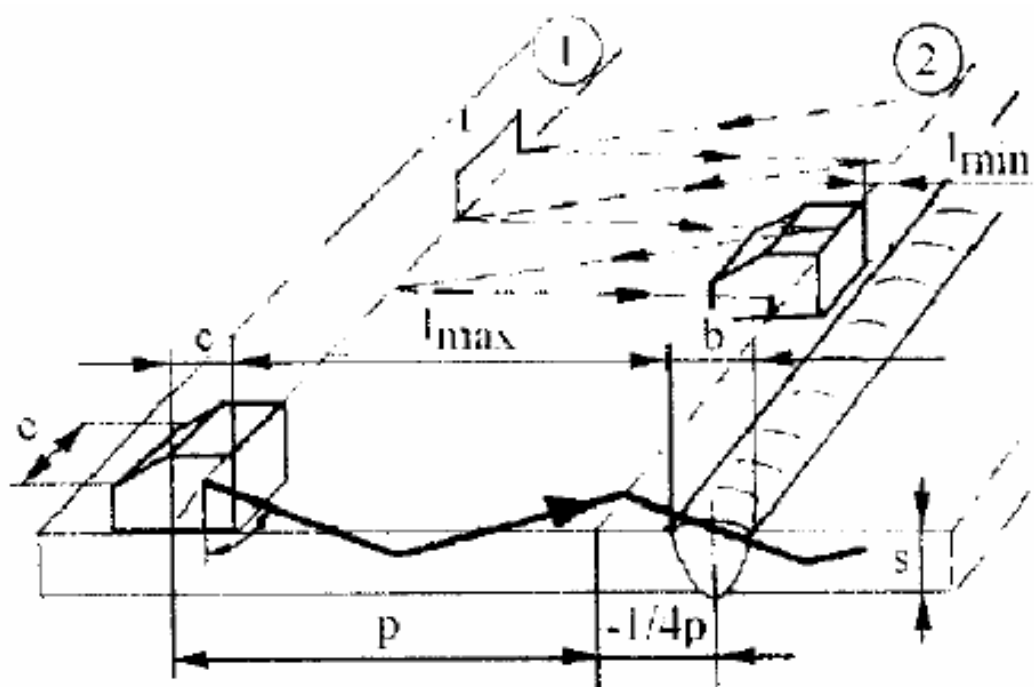


Fig. 87. Tehnica de examinare a îmbinării cap la cap pentru detectarea defectelor longitudinale

Acesta poate fi calculat cu următoarele formule în cazul etalonării distanței cu scala DAM (paragraful 10.7):

$$l_{\max} = 2 \operatorname{stg} \beta - c \quad l_{\min} = \operatorname{stg} \beta - \left(\frac{b}{2} + c \right) \quad (176)$$

la îmbinările în V, controlate de pe suprafața de închidere a cusăturii, respectiv

$$l_{\max} = 2 \operatorname{stg} \beta - c \quad l_{\min} = \operatorname{stg} \beta - (b + c) \quad (177)$$

la îmbinările în X sau la îmbinările în V controlate de pe suprafața rădăcinii. În relațiile (176) și (177), distanța indexului palpatorului față de suprafața frontală $c = 25 \div 35$ mm, la palpatoare normale și $e = 10 \div 15$ mm, la palpatoare miniaturale. Acoperitoare pentru practică se consideră:

$$l_{\max} = \frac{5}{4} p \quad ; \quad l_{\min} = \frac{1}{4} p \quad (178)$$

Tabelul 18

Grosimea piesei s (mm)	Pasul de examinare $l_{\max} - l_{\min}$		
	$\beta = 45^\circ$	$\beta = 70^\circ$	$\beta = 80^\circ$
6- 20	3- 20	10- 80	28- 206
20- 40	10- 40	35- 160	97- 412
40- 60	20- 60	65- 240	190- 618
60- 80	30- 80	95- 320	285- 824
100- 200	50- 200	155- 800	470- 2060

Controlul ultrasonic al pieselor de oțel cu grosimi sub 10 mm este mai dificil.

Aici se recomandă folosirea palpatoarelor înclinate de 70° și frecvențe de 2 MHz. La grosimi sub 6 mm, controlul ultrasonic nu mai este operant. Examinarea se efectuează de pe ambele părți ale unei suprafețe. Lățimea zonei de examinare în această situație va fi egală cu de două ori pasul p.

Potrivit datelor din tabelul 18, la îmbinările sudate de grosime mijlocie ($10 \div 100$ mm), în funcție de grosime, geometria îmbinării, poziția defectelor și natura lor, controlul se execută cu palpatoare înclinate având unghiul de incidență 70° , 60° sau 45° și cu

frecvența peste 2 MHz. Controlul se realizează de pe ambele părți ale aceleiași suprafețe. La grosimi mai mari de 40 mm se recomandă examinarea cu două palpatoare cu unghiuri de incidență diferite. În cazul unor discontinuități plane cvasiparalele cu axa longitudinală a îmbinării, trebuie să se recurgă la un control cu două palpatoare de 45° cuplate în tandem (paragraful 11.5)

11.2.2. Detectarea discontinuităților transversale. Discontinuitățile transversale se detectează cu fascicul de unde orientat în lungul cusăturii. În cazul în care sudura are supraînălțarea prelucrată, poziția de examinare este 1 și 1', figura 88.

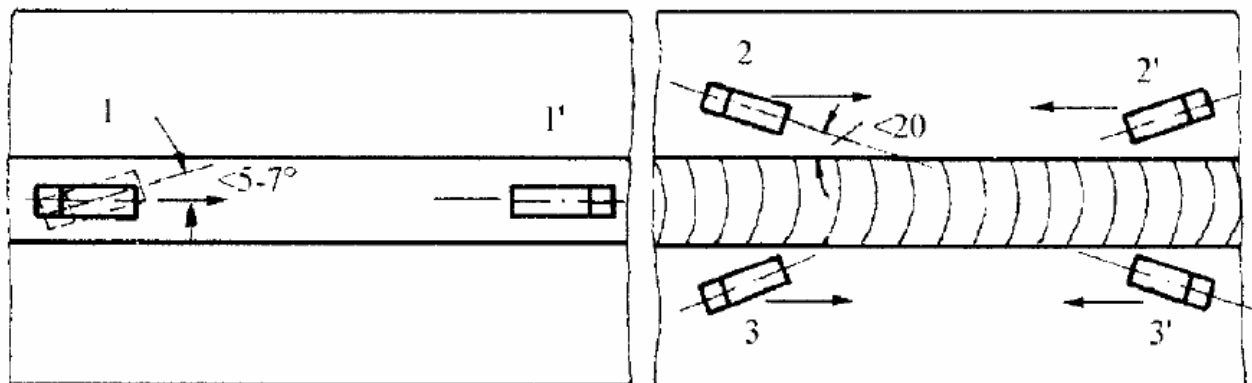


Fig. 88 Tehnica de examinare a îmbinării cap la cap pentru detectarea defectelor transversale

Pentru a cuprinde întreaga lățime a cusăturii, concomitent cu mișcarea de translație a palpatorului pe direcția cusăturii se va realiza și o mișcare alternativă de rotire cu un unghi ce nu va depăși 10- 15°. La cusăturile cu lățimi mai mari se aplică metoda examinării în mai mulți pași. La îmbinările sudate la care nu este posibil controlul de pe suprafața cusăturii, se recurge la controlul bilateral din pozițiile 2 și 2' și 3 și 3', sau la controlul bilateral din poziția 2 și 2' și 3 sau 3', de pe suprafețele inferioare și superioare ale piesei. Unghiul de înclinație maxim față de axa cusăturii este de 20°. Alegerea între controlul bilateral și unilateral este determinată de pretențiile privind calitatea controlului, clasa de control, respectiv de clasa de calitate a îmbinării sudate. Cu bune rezultate se folosește controlul prin transmisie cu palpatoare duble sau metoda de control în tandem.

11.3. Examinarea îmbinării sudate de colț

Metoda de control ultrasonic a îmbinărilor sudate de colț oferă rezultate sigure numai în cazul aplicării la îmbinări complet pătrunse. Discontinuități de tipul nepătrunderilor, lipsei de topire și fisurilor pot fi detectate de la grosimi de 6 mm în sus.

Discontinuitățile de tipul suflurilor, retasurilor și incluziunilor pot fi detectate cu o probabilitate corespunzătoare de la grosimi de 10- 12 mm în sus. La îmbinările incomplet pătrunse, ecourile provenite de la rosturi îngreunează interpretarea oscilogramei. Concludența controlului acestor îmbinări se consideră satisfăcătoare numai de la grosimi de peste 20 mm.

Controlul îmbinărilor de colț reclamă în principiu tehnici de examinare asemănătoare cu a îmbinărilor sudate cap la cap, atât pentru detectarea discontinuităților longitudinale, cât și a celor transversale. Unghiurile de incidență se aleg ținând seama de grosime, cele mai frecvent întrebuințate fiind cele de 45°, 60° și 70°. Ori de câte ori grosimea și mai ales forma îmbinării permite, examinarea oblică se suplimentează cu o examinare cu unde longitudinale. Numărul pozițiilor de control și al unghiurilor de incidență sunt funcție de clasa de control aleasă.

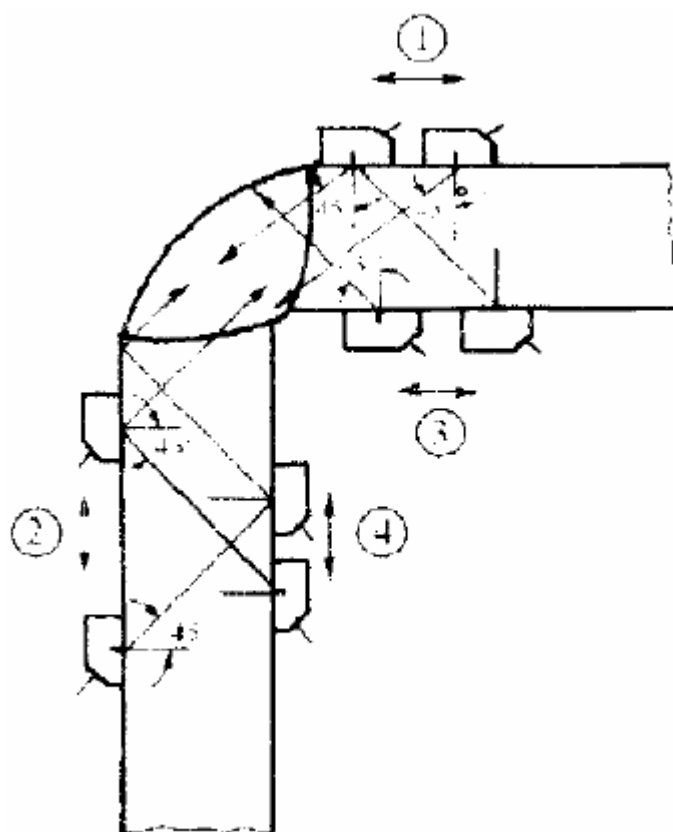


Fig. 89. Scheme de examinare a îmbinării de colț frontale

Sudurile de colț frontale se controlează cu incidența de 45° fie direct, fie cu una sau cu două reflexii de pe una din suprafețele de examinare disponibile, poziția 1, 2, 3 sau 4 din figura 89. Pentru detectarea discontinuităților apropiate de suprafață, se va prefera un unghi de incidență de 70° din pozițiile 1 sau 2.

Sudurile de colț prin suprapunere se pot examina din trei poziții, 1, 2 și 3, din figura 90, fie direct din poziția 1, fie prin una sau două reflexii intermediare, din pozițiile 2 și 3. În toate cazurile, unghiul de incidență va fi de 45° .

Îmbinările de colț $\frac{1}{2} V$, cu sau fără completare la rădăcină, unilaterale ca în figura 91, sau bilaterale ca cea din figura 92, se examinează de pe suprafața exterioară, respectiv de pe cea interioară a tăpii (flanșei) din pozițiile 1 și 2, sau de pe inima (corp), pozițiile 3 (4), de regulă direct, într-un semipas de examinare. În funcție de grosimea tăpii (flanșei), respectiv a inimii (corpului), s, [219], se recomandă unghiurile de incidență β din tabelul 19. La îmbinările unilaterale tipice grinzilor cheson și construcțiilor chesonate, se aplică cu foarte bune rezultate controlul cu unde longitudinale din poziția 4 figura 91.

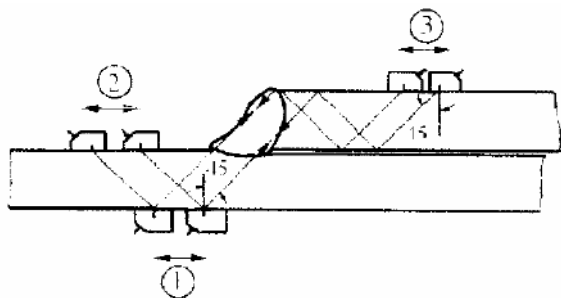


Fig. 90. Scheme de examinare a îmbinării prin suprapunere

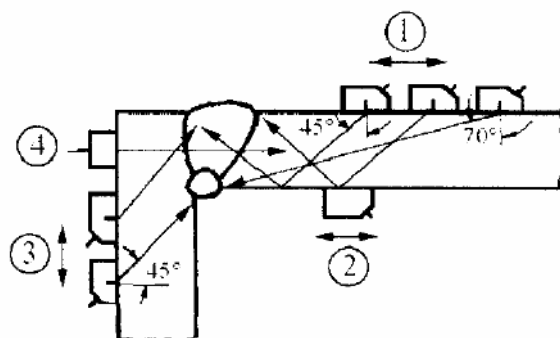


Fig. 91. Scheme de examinare a de colț îmbinării de colț pătrunse, Unilaterale

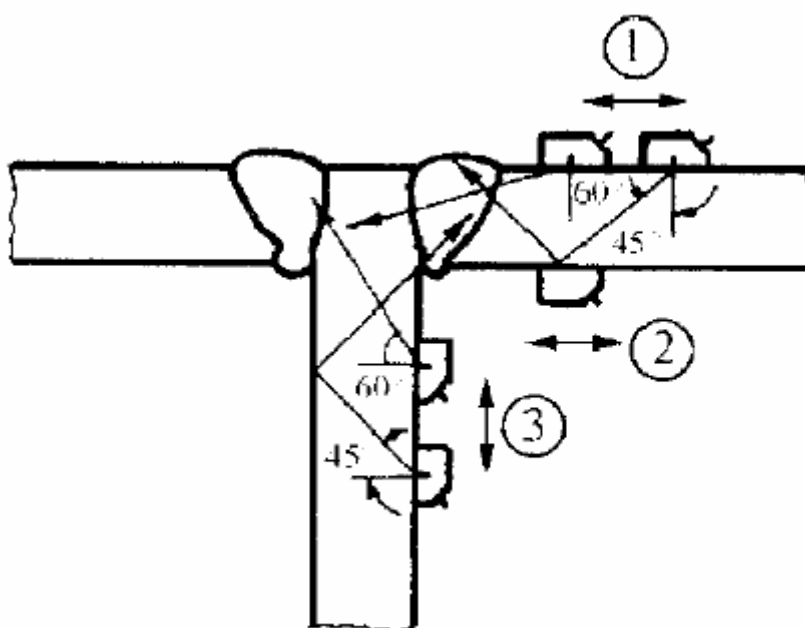


Fig. 92. Scheme de examinare a îmbinării de colț în T

Îmbinările în T cu sudură în K complet pătrunsă, se controlează de preferință de pe suprafețele inimii sau corpului din pozițiile 1 și 2, în direct, respectiv tot în semipas de pe suprafața exterioră a tălpii sau flanșei din pozițiile 3 și 4 din figura 93. Pentru încrucișarea fasciculelor în îmbinarea sudată se recomandă și examinarea prin reflexie (în dublu semipas) de pe suprafețele interioare ale tălpii, din pozițiile 5 și 6. Unghiurile de incidență recomandate în funcție de grosime sunt aceleași ca și cele cuprinse în tabelul 19.

Tabelul 19

s (mm)	β (°)
< 12	70
12- 40	70 sau 60
40- 60	70, 60 sau 45
60- 130	60 sau 45
130- 200	45

Dacă grosimea inimii (corpului) depășește 30 mm, se recomandă și o examinare cu unde longitudinale din poziția 7, sau în tandem, așa cum rezultă din figura 95. La grosimi mai mici, palpatorul normal de unde longitudinale din poziția 7, poate fi supliniit de unul miniatural sau de un palpator cu dublu cristal.

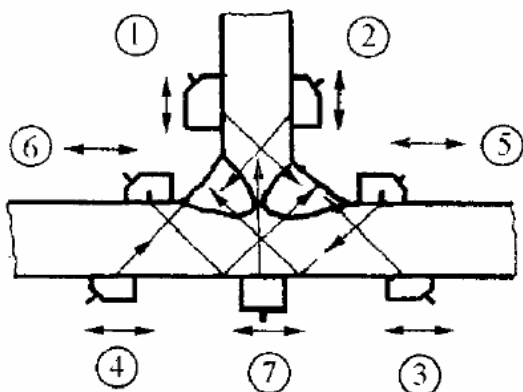


Fig. 93. Scheme de examinare a îmbinării de colț în k

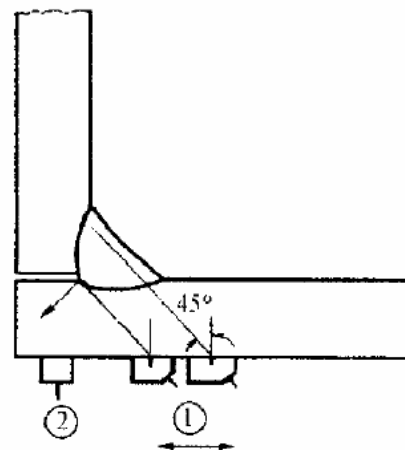


Fig. 94. schema de examinare a îmbinării de colț nepătrunse

Sudurile de colț nepătrunse se controlează de pe talpă (flanșă), cu incidență de 45° poziția 1 și cu palpator normal din poziția 2, conform schemei din figura 94. Cu bune rezultate se folosește controlul în tandem. Principalele tehnici de control prin transmisie și în tandem a îmbinărilor de colț se reprezintă în figurile 95 și 96. În figura 95 se indică schema de control a îmbinărilor bilaterale nepătrunse a profilelor I și T de pe talpă sau de pe flanșă. Figura 96, prezintă schema de examinare a îmbinărilor prin suprapunere și oscilogramele ce se obțin în cazul recepției semnalului emis, respectiv în cazul reflectării acestuia de pe discontinuitate în altă direcție.

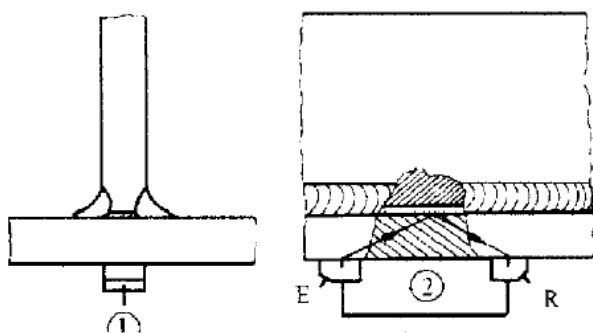


Fig. 95

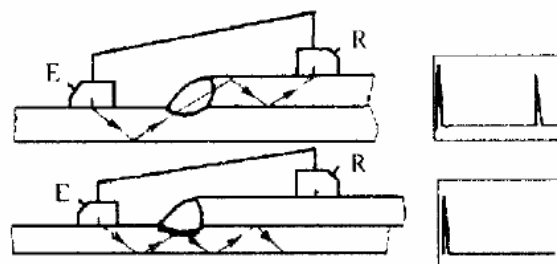


Fig. 96

11.4. Tehnologii unificate - nivele de control

Cerințele tot mai pretențioase de fiabilitate și de siguranța funcționării produselor tehnicii de vârf, precum: echipamente pentru centrale nucleare-electrice, utilaje chimice de mare complexitate, vehicule aero-spațiale, etc., au condus la instituirea unor sisteme superioare de control, grupate pe nivele de control, [240].

Ideea elaborării nivelelor de control vizează pe de o parte posibilitatea măririi probabilității de decelare a discontinuităților la același volum examinat, prin încrucișarea coordonată a fasciculelor de unde în secțiunea baleiată, imperativitatea stabilirii unor metodologii unitare de control, la principalele tipuri de îmbinări, precum și raționalizarea și/sau optimizarea tehnico-economică a controlului.

Nivelele de control, [240], iau în considerație îmbinările cap la cap și îmbinările de colț complet pătrunse ale elementelor cu grosimea de peste 10 mm și sunt diferențiate pe două categorii de discontinuități transversale (T) și longitudinale (L).

Nivelele de control definesc următorii parametri de bază:

- a- numărul suprafețelor de examinare;
- b- pozițiile de examinare; direcțiile de examinare;
- e- unghiul de incidență al fascicului;
- d- distanța parcursului sonor, exprimată în pași de examinare, la examinarea directă în semipas ($p/2$), la examinarea printr-o reflexie intermediară într-un pas $2p/2=p$.

Ca urmare, nivelele de control se aleg într-o strânsă dependență de clasele de calitate ale îmbinărilor sudate, prescrise după [271] și anume: nivele de control superioare se recomandă claselor de calitate superioare B și C și invers, nivele de control inferioare, clasei de calitate D.

Înainte de fiecare examinare se reglează sensibilitatea de lucru conform [238] și [260]. Dacă se constată abateri se aplică corecțiile indicate în cele ce urmează. În cazul când abaterile sunt sub 4 dB, reglajul se corectează înainte de continuarea controlului. Dacă sensibilitatea este micșorată cu peste 4 dB, reglarea se corectează și toate examinările anterioare trebuie repetate. Dacă sensibilitatea se mărește cu peste 4 dB, atunci după corectarea reglării toate indicațiile de discontinuitate înregistrate se reexaminează.

Nivelurile de referință, se reglează după una din cele trei metode indicate:

- 1 - nivelul de referință corespunde curbei CAD ridicată cu un orificiu cilindric de 3 mm.
- 2 - nivelul de referință corespunde sistemului DAM, folosind un reflector sub formă de disc cu diametrul de 1 respectiv 1,5 mm, la controlul cu unde longitudinale.
- 3 - nivelul de referință corespunde unei curbe CAD, ridicată cu ajutorul unei renuri (crestături) de adâncime 1 mm.

Criteriul de evaluare a rezultatelor examinării după [271], constă în considerarea oricărei indicații de discontinuitate egale sau mai mari decât:

- nivelul de referință - 10 dB (adică 0,33 CAD), dacă se aplică metodele 1 și/sau 3.
- nivelul de referință - 4 dB, dacă se aplică metoda 2, cu diagrame DAM.

Pe măsura ridicării nivelului de control, numărul suprafețelor și direcțiilor de examinare și deci volumul de lucru se mărește. Astfel, pentru detectarea discontinuităților transversale (T) în general se prevăd:

- în nivelul TA - examinarea oblică de pe o singură parte a sudurii;
- în nivelul TB - examinarea oblică de pe ambele părți ale sudurii;
- în nivelul TC - examinarea oblică numai de pe suprafața prelucrată (cu supraînălțarea îndepărtată) a cusăturii.

Cu mărirea grosimii se impun mai multe poziții, direcții și unghiuri de examinare. Totodată, în vederea sporirii concludenței controlului, în special în cazul sudării laminatelor, se prevede o examinare prealabilă a materialului de bază de o parte și de alta a cusăturii. La nivelul A de control, această examinare este recomandată, pe câtă vreme la nivelele superioare B și C ea devine obligatorie.

Condițiile generale de examinare se află centralizate după metodologia din [240], în tabelul 20, relativ la detectarea discontinuităților transversale, respectiv în tabelele 21- 23, relativ la detectarea discontinuităților longitudinale. Se iau în considerație următoarele tipuri de îmbinări sudate:

- 1 - cap la cap, nemărginite (cu patru suprafețe de examinare);
- 2 - cap la cap, mărginite la trei suprafețe de examinare;
- 3 - cap la cap, mărginite la două suprafețe de examinare;
- 4 - de colț pătrunse, unilaterale;
- 5 - de colț pătrunse, bilaterale.

11.4.1. Îmbinări sudate cap la cap nemărginite.

Schemele de examinare au fost concepute separat, atât pentru urmărirea discontinuităților longitudinale, cât și a celor transversale.

Nivelele de control, urmărind decelarea discontinuităților longitudinale s-au stabilit după cum urmează:

La nivelul LA, controlul se poate aplica într-una din următoarele 6 variante de poziții: poziția 1, 2, 3 sau 4 prin examinare (palpare) în intervalul unui pas $p = 2s - tg\beta$, respectiv din pozițiile 1 și 3 sau 2 și 4 în intervalul unui semipas $p/2 = s - tg\beta$.

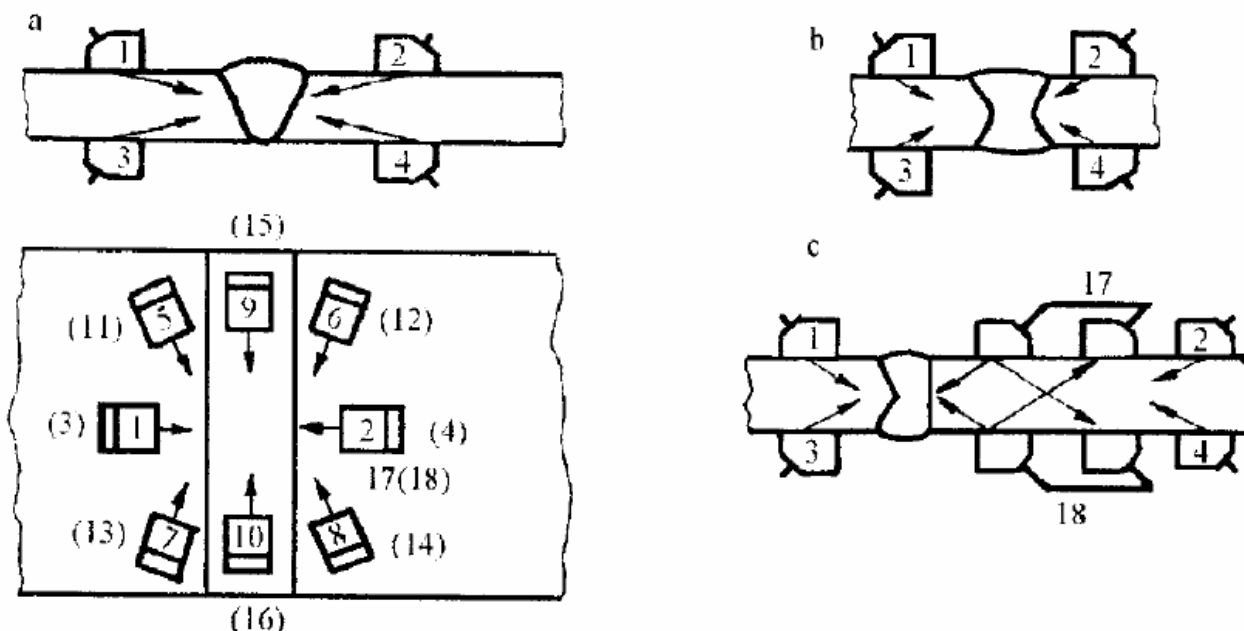


Fig. 97 Scheme de examinare în clase de control a îmbinărilor sudate cap la cap nemărginite

La nivelul LB, controlul se poate realiza în trei variante de poziționare a palpatoarelor la îmbinările de tip a și b din figura 97, respectiv în patru variante la îmbinările de tip e din figura 97. Cele trei variante ale îmbinărilor din figura 97 a și b sunt:

pozițiile 1 și 2 sau 3 și 4 în intervalul unui pas de examinare, respectiv pozițiile 1, 2, 3 și 4 în intervalul unui semipas. Cele patru variante sunt: 1, 2 și 17 în tandem sau 3, 4 și 18 în tandem în intervalul unui pas de examinare, precum și pozițiile 2, 3, 4 și 17, respectiv 1, 2, 3, 4 și 18 în semipas de examinare.

La nivelul LC, pozițiile de examinare sunt aceleași ca și în clasa LB.

Nivelele de control pentru decelarea discontinuităților transversale au fost stabilite după cum urmează:

La nivelul TA, controlul poate fi efectuat într-una din următoarele 12 variante: din pozițiile 9, 10, 15 și 16 de pe cusătură, în intervalul unui pas de examinare sau din câte două poziții și anume 9 și 15, respectiv 10 și 16 în intervalul unui semipas de examinare, precum și din pozițiile marginale 5 și 7, 6 și 8, 11 și 13, 12 și 14 în intervalul unui pas de examinare, respectiv din pozițiile 5, 7, 11 și 13 sau 6, 8, 12 și 14 în intervalul unui semipas.

La nivelul TB, controlul poate fi realizat într-una din următoarele 6 variante:

pozițiile 9 și 10, respectiv 15 și 16 de pe cusătura în intervalul unui pas de examinare, sau din cele 4 poziții 9, 10, 15 și 16 în intervalul unui semipas, din pozițiile marginale 5, 6, 7 și 8, respectiv 11, 12, 13 și 14, în intervalul unui pas, sau din pozițiile 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13 și 14 în intervalul unui semipas.

Condiții de examinare	Nivelul de control				
	TA		TB		TC
	Palpare		Palpare		Palpare
	de pe	de lângă	de pe	de lângă	de pe
	cusătură		cusătură		cusătură
Numărul suprafețelor de examinare pentru cazurile din fig 97- 100	1	1	min.1	min.2	min.1
Numărul unghiurilor de incidență pentru cazurile din fig 97- 100 grosimea $s \leq 40$ mm $s > 40$ mm	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	2
Numărul direcțiilor de examinare pentru cazurile din fig 97- 99 grosimea $s \leq 20$ mm $20 < s \leq 40$ $s > 40$ mm	2	4	4	8	4
	2	4	4	8	6
	2	4	6	12	6
Numărul direcțiilor de examinare pentru cazurile din fig 100 grosimea $s \leq 20$ mm $20 < s \leq 40$ $s > 40$ mm	1	1	2	2	2
	1	1	2	2	4
	1	1	4	4	4

La nivelul TC, controlul se execută exclusiv de pe cusătura cu supraînălțarea îndepărtată prin aşchiere într-una din următoarele 3 variante: pozițiile 9 și 10 sau 15 și 16 în intervalul unui pas de examinare, respectiv pozițiile 9, 10, 15 și 16 în intervalul unui semipas.

Numărul unghiurilor de incidență pe clase de control și grosimi sunt indicate în tabelele 20 și 21.

Tabelul 21

Condiții de examinare a îmbinărilor cap la cap prin topire	Nivelul de control		
	LA	LB	LC
Numărul suprafețelor examinate după			
fig.97	1	min.2	min.2
fig.98	1	min.2	min.2
fig.99	1	min.1	-
Numărul unghiurilor de incidență pentru cazurile din fig 97, 98 și 99			
grosimea $s \leq 20$ mm	1	min.1	min.1
$20 < s \leq 40$	1	min.1	min.2
$s > 40$ mm	1	min.2	min.2
Numărul direcțiilor de examinare în cusătură pentru cazurile din fig 97 și 98			
grosimea $s \leq 20$ mm	2	min.4	min.4
$20 < s \leq 40$	2	min.4	min. 6
$s > 40$ mm	2	min.6 (5)	min.6 (5)
Numărul direcțiilor de examinare în cusătură pentru cazurile din fig 99			
grosimea $s \leq 20$ mm	2	min.4	-
$20 < s \leq 40$	2	min.4	-
$s > 40$ mm	2	min.4 (3)	-
Control suplimentar în tandem pentru grosimi $s > 100$ mm	-	-	obligatoriu
Control în tandem la rosturi cu unghiuri de deschidere sub 5°			
grosimea $s \leq 20$ mm	-	-	-
$20 < s \leq 40$	-	1 zonă mijlocie	1 zonă mijlocie
$s > 40$ mm	-	mai multe zone	mai multe zone

11.4.2. Îmbinări sudate cap la cap mărginite la trei suprafețe de examinare.

Nivelele de control pentru detectarea discontinuităților longitudinale au fost fixate astfel:

La nivelul LA, se aplică următoarele trei variante de control: pozițiile 2 sau 4, în intervalul unui pas de examinare, respectiv 2 și 4 în intervalul unui semipas.

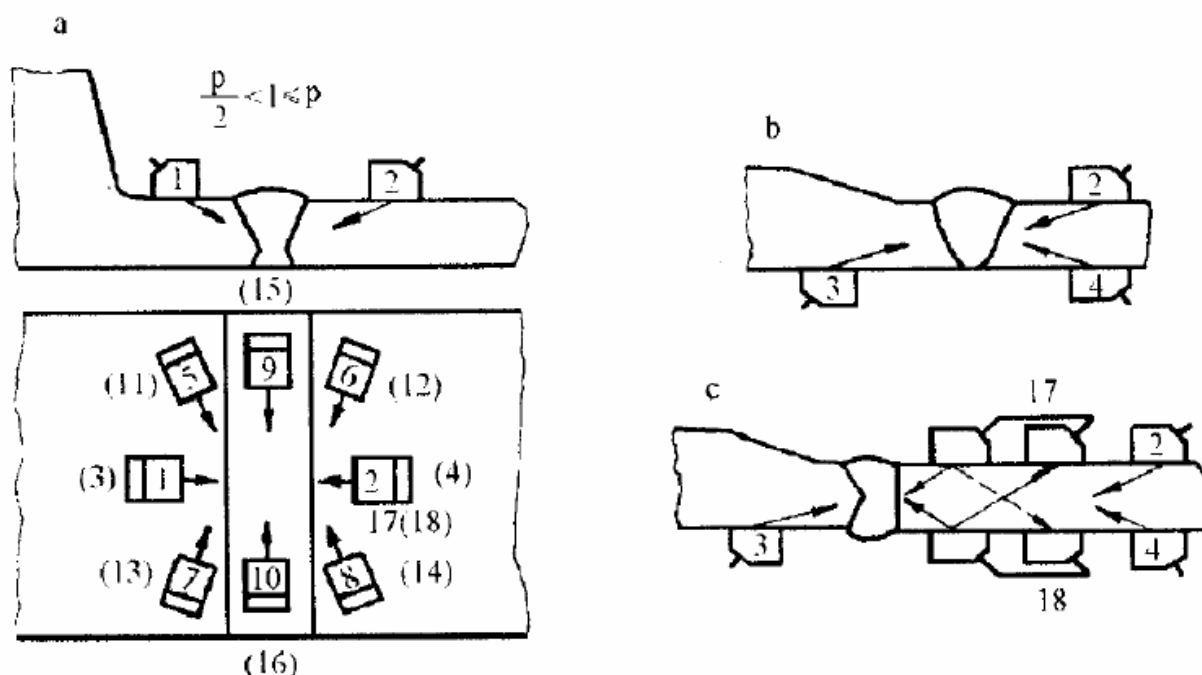


Fig. 98 Scheme de examinare în clase de control a îmbinărilor sudate cap la cap mărginite la trei suprafețe

La nivelul LB, la îmbinările din figura 98a și b controlul se poate efectua în 4 variante, iar la îmbinările din figura 98c în alte 4 variante. Variantele pentru îmbinările de tip a și b sunt: pozițiile 2 în interval de un pas și 3 în interval de un semipas sau 4 în interval de un pas și 3 în interval de un semipas, sau 2, 4 și 3 în intervale de câte un semipas, respectiv 2 în intervalul de un pas și un semipas. Variantele pentru îmbinările de tip c sunt următoarele: pozițiile 2, în intervalul de un pas și 3, în intervalul de un semipas, precum și 17 în tandem, sau pozițiile 4 în interval de un pas, 3 în semipas și 18 în tandem, respectiv 2 în semipas și 17 sau 2 în semipas și 18 în tandem.

La nivelul LC, se păstrează în linii mari variantele de examinare de la clasa LB, cu deosebirea că în primele 6 variante la poziția 3 și 1 se prevăd câte două unghiuri de incidență, iar ultimele două variante de examinare prevăd: pozițiile 2, 4 și 3 cu două incidențe și 17, toate în semipas, respectiv pozițiile 3 cu două incidențe și 18 în semipas.

Nivelele de control pentru detectarea discontinuităților transversale la îmbinările din figura 98 se păstrează la fel cu cele prezentate la îmbinările din figura 97.

Numărul unghiurilor de incidență pe nivelele de control și grosimi rezultă din tabelele 20 și 21.

11.4.3. Îmbinări sudate cap la cap mărginite la două suprafețe de examinare.

Nivelele de control pentru urmărirea discontinuităților longitudinale au fost elaborate după cum urmează:

La nivelul LA, variantele de examinare sunt identice cu corespondentele lor din clasa LA a îmbinărilor sudate din figura 98.

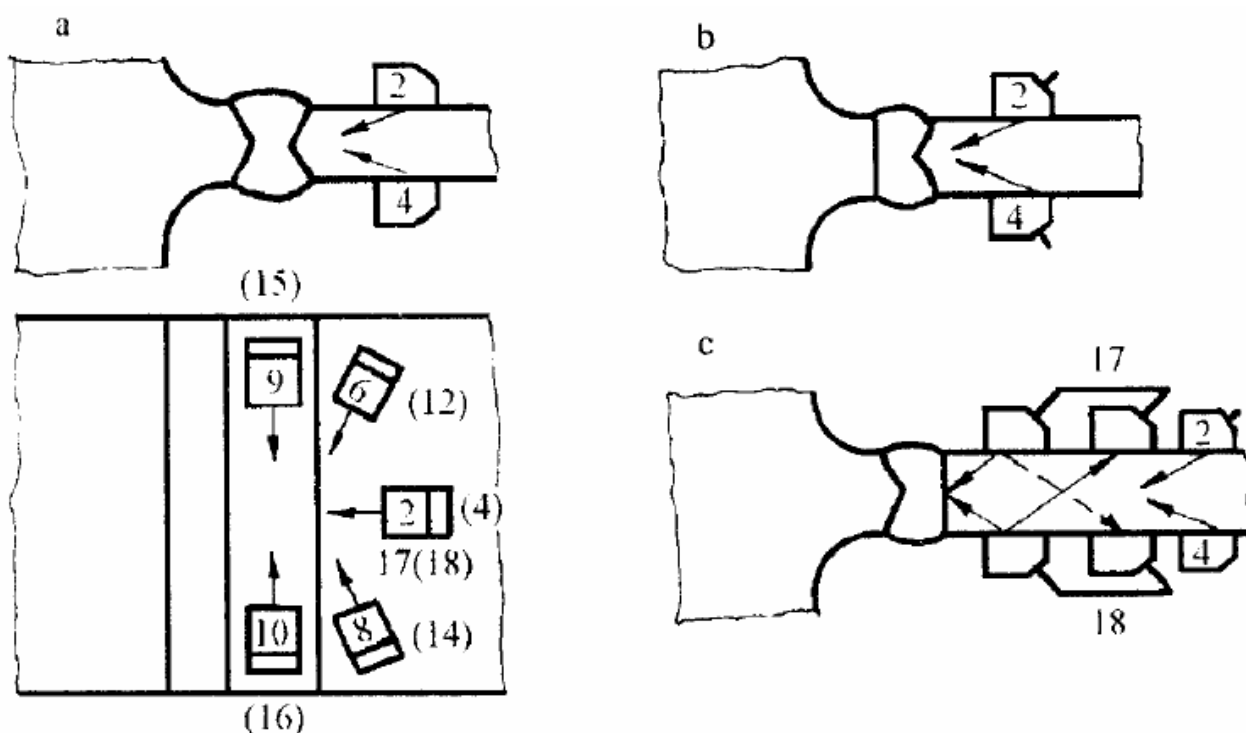


Fig. 99 Scheme de examinare în clase de control a îmbinărilor sudate cap la cap mărginite la două suprafețe

La nivelul LB, s-au elaborat trei variante de examinare pentru îmbinările de tip a și b și patru variante pentru îmbinările de tip c. Variantele de examinare la îmbinările din figura 99 a și b sunt următoarele: poziția 2 sau 4, în intervalul de câte un pas, cu câte două unghiuri de incidență, respectiv poziția 2 și 4, în intervalul de un semipas de examinare și cu câte două unghiuri de incidență. Variantele de control la îmbinările din figura 99 c sunt următoarele: poziția 2 în intervalul de un pas și 17 în tandem, sau poziția 4 în intervalul de un pas și 18 în tandem, pozițiile 2 și 4 în interval de semipas și 17 în tandem, respectiv pozițiile 2 și 4 în semipas și 18 în tandem.

La nivelul LC, examinarea îmbinărilor sudate semimărginite nu este posibilă.

Nivelul de control în vederea identificării discontinuităților transversale prevăd următoarele reguli:

În nivelul TA, se poate adopta una din următoarele 9 variante: pozițiile 9, 10, 15 și 16 în intervalul unui pas, pozițiile 9 și 15 sau 10 și 16 în intervalul unui semipas, pozițiile 6 și 8 sau 12 și 14 în intervalul unui pas de examinare, respectiv pozițiile 6, 8, 12 și 14 în intervalul unui semipas.

La nivelul TB, se preconizează următoarele trei variante de control: pozițiile 9 și 10, sau 15 și 16 în câte un pas de examinare, precum și pozițiile 9, 10, 15 și 16 într-un semipas de examinare.

La nivelul TC, se preconizează aceleași variante de control ca și la clasa TB.

Numărul unghiurilor de incidență pe nivele de control și grosimi se află precizate în tabelele 20 și 21.

11.4.4. Îmbinări de colț pătrunse simple

Spre deosebire de îmbinările cap la cap, cele din această categorie se examinează, atât cu unde transversale, cât și cu unde longitudinale.

Nivelele de control preconizate pentru identificarea discontinuităților longitudinale prezintă un număr mare de posibilități.

În nivelul LA, se aplică una din următoarele 4 variante de control, figura 100:

poziția 21 cu palpator normal, pozițiile 19 sau 20 în interval de câte un pas de examinare, precum și pozițiile 19 și 20 într-un semipas.

La nivelul LB, se prevăd 9 variante de control și anume: poziția 19 sau 20 în câte un pas de examinare combinate cu poziția 21, folosind un palpator normal pozițiile 19, 1 și 2 respectiv 20, 1 și 2 în câte un pas de examinare, pozițiile 19, 20 în semipas și 1 și 2 într-un pas, sau poziția 19 sau 20 într-un pas combinată cu 3 sau 4 în semipas, precum și pozițiile 19, 20, 3 sau 4 în semipas. În legătură cu numărul unghiurilor de incidență se fac următoarele precizări: în toate pozițiile, cu nivelul poz. 1, 2, 3 și 4 se impune un singur unghi de control: la pozițiile 1, 2, 3 și 4 se menține recomandarea pentru un singur unghi de incidență numai la grosimi $s > 40$ mm; pentru grosimi mai mici se vor respecta prevederile cuprinse în tabelul 22. În ce privește numărul variantelor de control, la grosimi $s \leq 40$ mm, se recomandă una singură, iar la grosimi $s > 40$ mm, două din cele nouă.

La nivelul LC, se prevăd tot 9 variante de control și anume pozițiile 1, 2, 19 sau 20 în intervalul de un pas și 21 cu palpator normal, pozițiile 19 și 20 în interval de către un pas de examinare, combinate cu pozițiile 3 și 4 în interval de un semipas și 21 cu palpator normal, pozițiile 19, 20, 3 și 4 în interval de un semipas și 21 cu palpator normal.

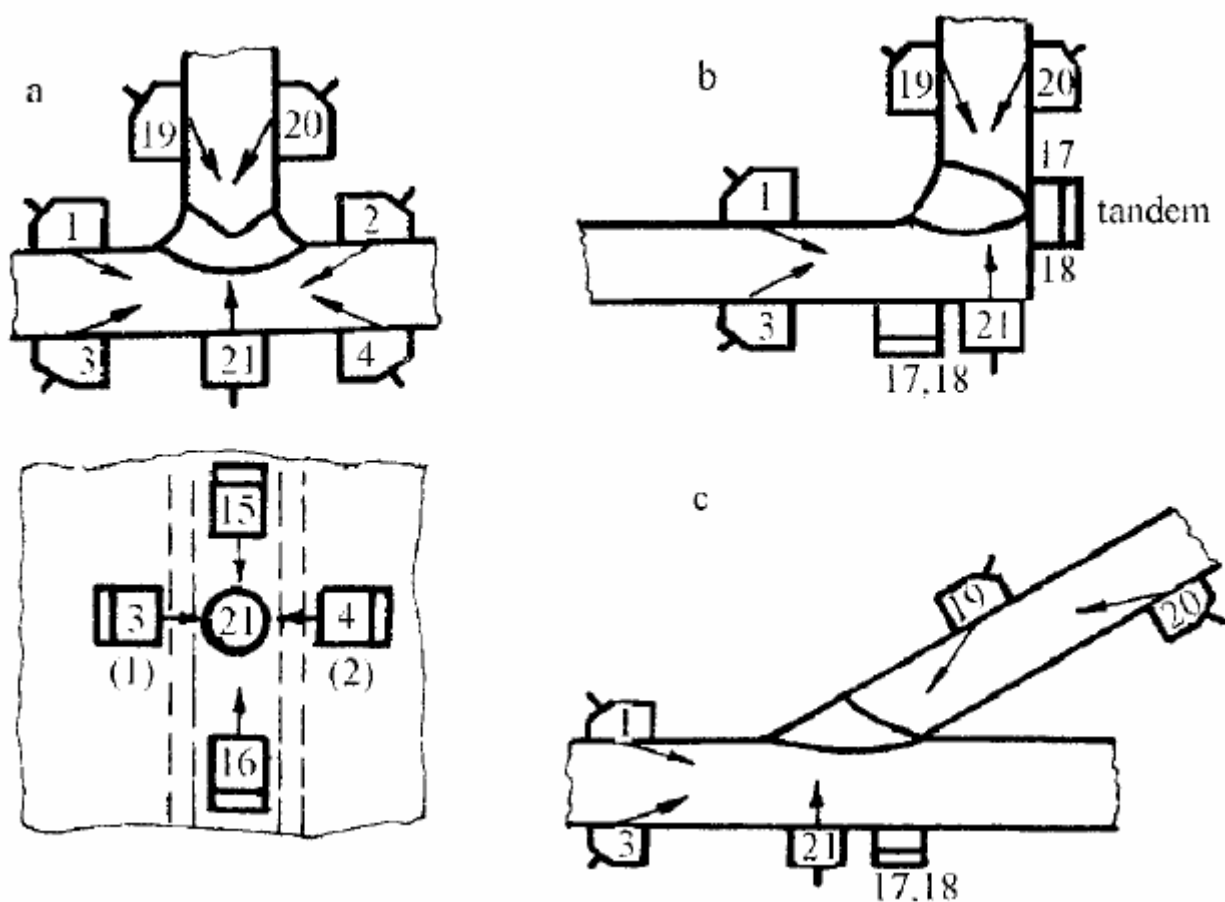


Fig. 100. Scheme de examinare în clase de control a îmbinărilor sudate de colț pătrunse, simple

În legătura cu numărul unghiurilor de incidență se fac următoarele precizări: la ultimele trei variante de control în pozițiile 1 și 2 se necesită un singur unghi de incidență dacă grosimea $s > 20$ mm; la grosimi mai mici se vor respecta prevederile cuprinse în tabelul 22.

Tabelul 22

Condiții de examinare a îmbinărilor de colț ortogonale și oblice, a îmbinărilor la ștuțuri	Nivelul de control		
	LA	LB	LC
Numărul suprafețelor examinate după fig.100	1	min.2	min.2
Numărul unghiurilor de incidență pentru cazurile din fig. 100			
grosimea $s \leq 20$ mm	1	min.1	min.2
$20 < s \leq 40$	1	min.1	min.2
$s > 40$ mm	1	min.2	min.2
Numărul direcțiilor de examinare în cusătură pentru cazurile din fig. 100			
grosimea $s \leq 20$ mm	min.1	min.3	min.4
$20 < s \leq 40$	min.1	min.3	min.4
$s > 40$ mm	min.1	min.4	min.4

În privința numărului variantelor, la grosimi sub 20 mm se recomandă aplicarea a două variante, iar la grosimi $s \geq 20$ mm. se recomandă trei variante.

Nivelele de control elaborate pentru identificarea discontinuităților transversale prezintă posibilități mai restrânse.

La nivelul TA, se prevăd următoarele 4 variante de control: poziția 15, poziția 16, poziția 17 sau poziția 18, fiecare dintre ele în câte un semipas de examinare.

La nivelul TB se prevăd două variante de control, după caz în combinațiile 15 sau 16, sau 17 cu 18, ambele în câte un semipas de examinare.

În nivelul TC, variantele de control sunt identice cu cele din clasa TB.

11.4.5. Îmbinări sudate de colț pătrunse, duble

La aceste tipuri de îmbinări sudate se aplică în exclusivitate controlul cu palpatoare înclinate pentru detectarea discontinuităților longitudinale.

În nivelul LA, sunt posibile următoarele trei variante de control: din pozițiile 19 și 22 sau 20 și 23 în intervalul unui pas de examinare, respectiv din pozițiile 19, 20, 22 și 23 în intervalul unui semipas.

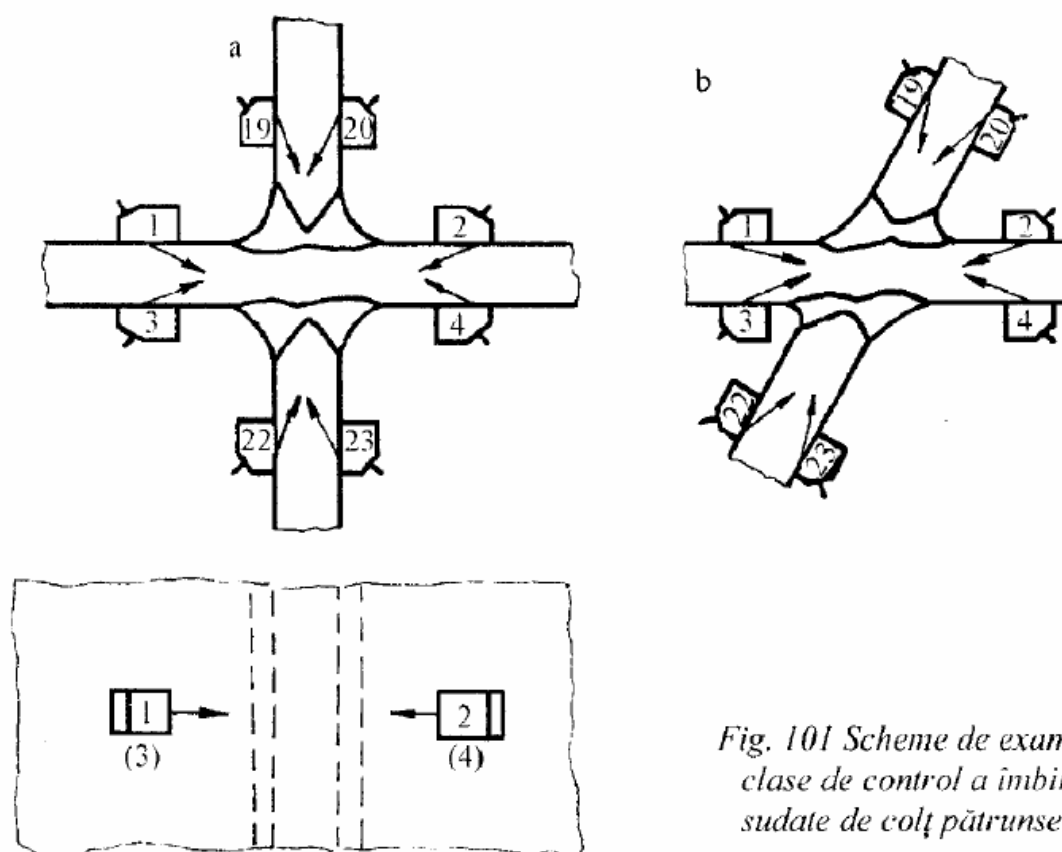


Fig. 101 Scheme de examinare în clase de control a îmbinărilor sudate de colț pătrunse, duble

La nivelul LB, sunt prevăzute 7 variante de control și anume: pozițiile 1, 2, 19 și 22, pozițiile 3, 4, 19 și 22, pozițiile 1, 2, 20 și 23 și pozițiile 3, 4, 20 și 23, fiecare dintre ele în interval de câte un pas de examinare, respectiv pozițiile 19, 20, 22, 23 în semipas, combinate cu 1 și 2 în interval de un pas, sau 19, 20, 22, 23 în semipas combinate cu 3 și 4 în interval de un pas, precum și 19, 20, 22, 23, 1, 2, 3 și 4, toate în câte un semipas de examinare. Se precizează totodată că la grosimi de $s > 40$ mm, în pozițiile 1, 2, 3 și 4 se impune câte un singur unghi de incidență. Pentru alte grosimi și poziții se va ține seama de indicațiile din tabelul 23.

Tabelul 23

Condiții de examinare a îmbinărilor de colț complet pătrunse bilaterale	Nivelul de control		
	LA	LB	LC
Numărul suprafețelor examinate după fig.101	2	min.4	min.4
Numărul unghiurilor de incidență pentru cazurile din fig. 101			
grosimea $s \leq 20$ mm	1	min.1	min.1
$20 < s \leq 40$	1	min.1	min.2
$s > 40$ mm	1	min.2	min.2
Numărul direcțiilor de examinare în cusătură pentru cazurile din fig. 101			
grosimea $s \leq 20$ mm	4	min.8	min.8
$20 < s \leq 40$	4	min.8	min.8
$s > 40$ mm	4	min.12	min.12

La nivelul LC, variantele de control sunt absolut identice cu cele din clasa LB; diferă restricțiile cu privire la unghiurile de incidență. Prevederea cu privire la necesitatea examinării cu un singur unghi de incidență, din pozițiile 1, 2, 3 și 4 ale palpatoarelor se extinde de la grosimi $s > 20$ mm.

Potrivit normelor specifice construcției recipientelor sub presiune, [244], la controlul îmbinărilor sudate cap la cap se prevăd patru nivele de control.

Nivelul A cuprinde controlul cu un singur unghi de incidență de pe o singură suprafață de examinare, atât la urmărirea discontinuităților longitudinale, cât și a celor transversale.

Nivelul B, cuprinde controlul cu un singur unghi de incidență de pe o suprafață și ambele părți ale îmbinării sau de pe aceeași parte și ambele suprafețe, în vederea decelării discontinuităților longitudinale, respectiv de pe cusătură sau de pe ambele părți ale îmbinării, în vederea detectării discontinuităților transversale.

Nivelul C, cuprinde aceleași poziții ca și nivelul B, cu deosebirea că la urmărirea discontinuităților transversale se prescrie examinarea exclusiv de pe suprafața cusăturii, ceea ce presupune îndepărtarea prealabilă a supraînălțării acesteia.

Nivelul D, prevede examinarea în condițiile nivelului C, cu următoarele poziții suplimentare: controlul cu palpator normal de pe cusătură, utilizarea mai multor unghiuri de incidență la piese cu grosimi $s > 40$ mm, utilizarea a cel puțin 8 direcții și unghiuri de examinare în cazul îmbinărilor sudate în baie de zgură.

Pentru dezvoltarea și perfecționarea nivelelor de control se impune, pe de o parte corelarea acestora cu sistemul claselor de calitate ale îmbinărilor sudate, precum și cu tendințele moderne de dezvoltare a sistemelor de control asistate de calculator, cu prelucrare automată și redare digitalizată și vizualizare directă.

1.5. Mecanizarea controlului la recipiente groase.

Îmbinările sudate de grosimi mari, de peste 100 mm, sunt specifice construcțiilor din energetica nucleară, utilajelor chimice și metalurgice grele. Datorită faptului că la grosimi mari nu mai este posibil controlul radiografic cu surse convenționale de tensiuni până la 450 KeV, controlul ultrasonic trebuie să asigure independent indicații suficiente asupra calității îmbinării. Pe de altă parte la piese de grosimi mari, distanța parcursă de fasciculul corespunzător pasului de examinare este exhaustivă, astfel încât nu poate fi străbătută întreaga secțiune a cusăturii dintr-o singură poziție. În aceste condiții, controlul ultrasonic al îmbinărilor de grosimi mari presupune ca regulă generală, examinarea piesei sub minimum patru unghiuri diferite, de pe două suprafețe și două părți, figura 102. Tehnicile de examinare a îmbinărilor sudate cap la cap se diferențiază în patru clase de control [227], [228].

Astfel, clasa A corespunde controlului de pe o singură suprafață și dintr-o singură parte, din pozițiile 2 sau 2', respectiv 3 și 4 sau 3' și 4'. Clasa B, prevede controlul de pe ambele părți ale cusăturii din pozițiile 2 și 2' sau corespondentul lor de pe cealaltă suprafață, respectiv 2 și corespondentul de pe cealaltă suprafață 2', 1 și 1' respectiv 3 și 4 și 3' și 4', precum și în tandem din poziția 7- 7'. Clasa C, prevede aceleași tehnici ca și în clasa B, iar la grosimi de peste 100 mm un control suplimentar în tandem, atât pentru decelarea discontinuităților longitudinale, poziția 6, cât și pentru decelarea discontinuităților transversale, poziția 7. În sfârșit, clasa D, prevede tehnicile de control de la clasa C și suplimentar examinarea din poziția 5, cu incidență normală.

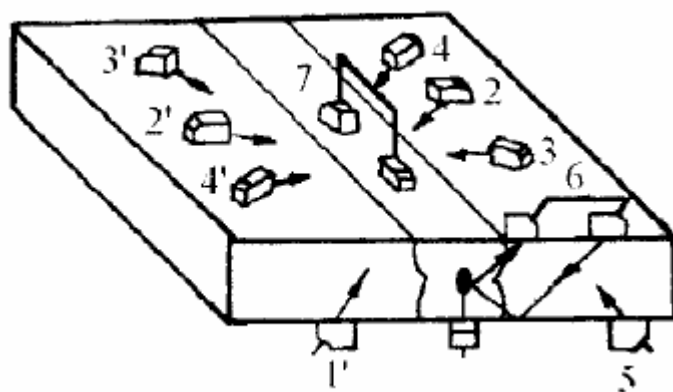


Fig. 102. Poziții de examinare a îmbinărilor sudate cap la cap a pieselor de grosimi mari

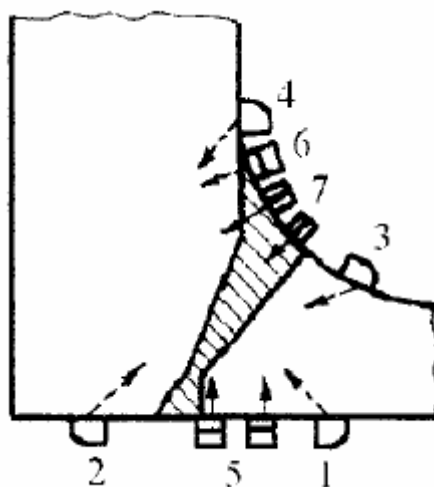


Fig. 103. Poziții de examinare a îmbinărilor sudate de colț a pieselor de grosimi mari

La îmbinările de colț, după cum rezultă din figura 103, se adoptă de asemenea o examinare complexă cu palpatoare înclinare cu incidențe de 45° și 70° din pozițiile 1÷4, cu palpatoare normale de unde longitudinale din pozițiile 5 și 6, precum și cu palpatoare normale cu dublu cristal din poziția 7.

- Metoda tandem, permite raționalizarea și mecanizarea controlului pieselor de grosimi mijlocii și mari (de peste 40 mm), cu suprafețe plan paralele sau concentrice, punând în evidență discontinuități longitudinale orientate perpendicular la suprafața piesei, în special fisuri și nepătrunderi. Indiferent de mărime, datorită orientării, ele pot scăpa controlului obișnuit, mai ales dacă formează o suprafață de reflexie plană. Se aplică cu deosebite rezultate la îmbinările cap la cap cu rost X, K, dublu U, precum și la îmbinările de colț complet pătrunse T și L.

Controlul în tandem presupune examinarea concomitentă cu două palpatoare de emisie-recepție identice, menținute la distanță constantă cu ajutorul unui dispozitiv simplu, reprezentat în figura 104. Dispozitivul constă dintr-un distanțier 1, pe care se fixează doi suporturi de palpatoare, unul fix 2, iar celălalt mobil 3.

Distanțierul este gradat, pentru a permite și reglarea operativă a distanței dintre palpatoare.

După cum rezultă din figura 104, parcursul sonor la o anumită grosime de piesă este constant, independent de distanța dintre palpatoare, îndeplinindu-se condiția:

$$a + b = \text{const.} \quad (179)$$

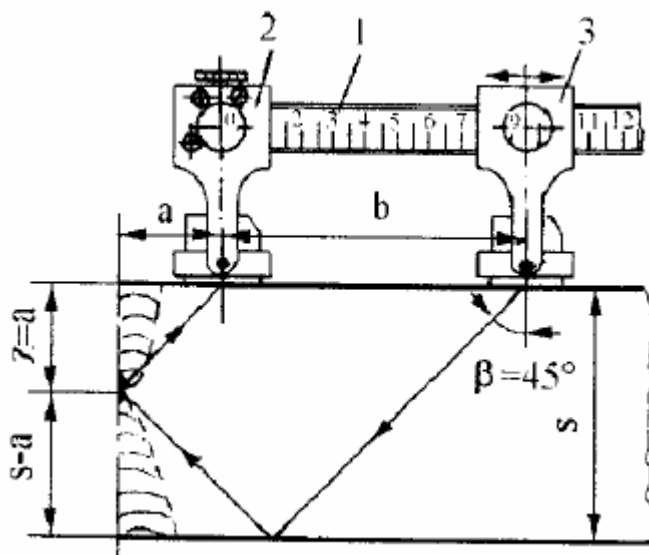


Fig. 104. Determinarea poziției defectului la examinarea în tandem

În general, poate fi utilizat un unghi de incidență oarecare β , dar dat fiind domeniul de grosimi, se recomandă unghiul de 45° . În această situație, distanțele a și b se reglează potrivit relațiilor:

$$a = z \cdot \operatorname{tg} \beta \quad b = 2(s \cdot \operatorname{tg} \beta - a) \quad (180)$$

unde z este adâncimea la care se presupune discontinuitatea sau defectul. În cazul în care adâncimea discontinuității nu este cunoscută, se baleiază succesiv cu diferite valori ale lui a , $0 < a < s$, întreaga grosime a îmbinării. Înainte de control, aparatul se cuplează în transmisie (emisie-recepție).

Amplitudinea unui reflector este independentă de adâncime, deoarece distanța parcursă este constantă și egală cu $d = 2\sqrt{s} = 2,82s$, în cazul unui unghi de incidență de 45° . Din acest motiv, atenuarea în material poate fi neglijată. Ca urmare, diagramele DAM diferă de cele obișnuite. Cu ajutorul lor, la distanța parcursului sonor de $2,82s$, se găsește prin interpolare mărimea defectului echivalent. Pentru un control fluent se poate proceda și mai simplu. Eco-ul provenit de la reflectorul cilindric de diametru $d > 2\lambda$, se reglează la o anumită înălțime de referință a ecranului, de exemplu 50%. Orice indicație de discontinuitate se raportează la această înălțime și se exprimă prin diferența în dB.

11.6. Examinarea îmbinărilor sudate în puncte

Îmbinările în puncte și în linie pot fi controlate în principiu cu metoda ultrasonică. Controlul este însă îngreunat și limitat de unele particularități tehnologice și dimensionale ale îmbinărilor. Dintre acestea se menționează în primul rând amprente electrozilor, care generează suprafețe de cuplare necorespunzătoare, apoi posibilitățile limitate de asigurare a acurateții metodei la table subțiri și foarte subțiri, precum și limitările în obținerea unei bune transparențe, în cazul unei lipse de aderență de metal ceea ce poate conduce la interpretarea eronată a calității legăturii.

La examinarea îmbinărilor în puncte se folosesc palpatoare normale, în tehnica prin reflexie sau prin transmisie și palpatoare înclinate.

11.6.1 Controlul cu incidență normală. Folosește palpatoare cu dublu cristal miniaturale de diametru 578 mm, cu frecvența de 4- 10 MHz și chiar mai mare, cu emisie intens amortizată. În vederea executării controlului dintr-o singură așezare a palpatorului, diametrul acestuia se alege în funcție de diametrul punctului sudat.

Principala dificultate a acestei metode constă în curențele de transfer a energiei, din cauza cuplării necorespunzătoare a palpatorului, ca urmare a abaterii de la planeitate a suprafeței de așezare. Pentru a realiza un cuplaj corespunzător, cel puțin una din suprafețele de palpate trebuie să fie plană, nedeformată. La ameliorarea contactului și transferului acustic, contribuie și interpunerea unei folii moi, interschimbabile între palpator și piesă. Decelarea defectelor și în special a celor de legătură, care sunt orientate cu predilecție paralel la suprafața de palpate, se prelevează de tehnica ecourilor multiple, figura 105. Potrivit acestei metode, orice variație în primul rând a distanței dintre semnalele multiplu reflectate, a amplitudinii și a formei, se consideră un indiciu de defect.

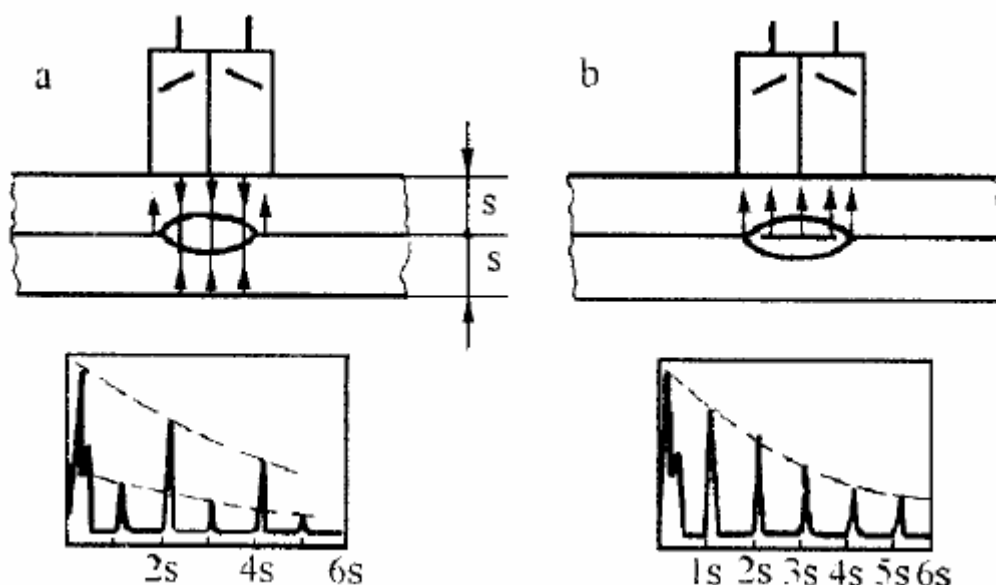


Fig. 105. Controlul îmbinărilor în puncte: a) nucleu fără defect; b) nucleu defect

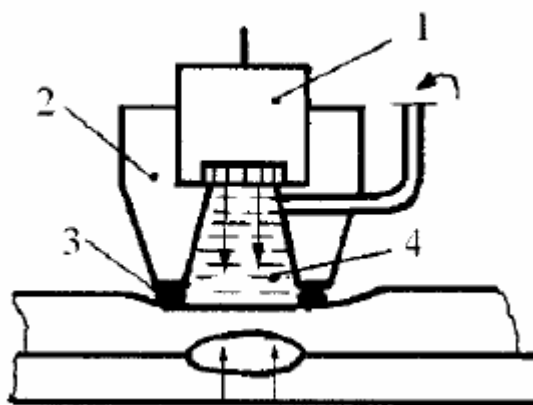


Fig. 106. Controlul cu contact lichid a îmbinărilor prin puncte: 1-palpator; 2-portpalpator; 3-inel de etanșare; 4-mediul cuplant

Compensarea amprentei electrodului pe suprafața de examinare a piesei poate fi realizată și cu ajutorul unei perne de apă. În acest scop se folosește un portpalpator umplut cu apă și ermetizat pe piesă prin intermediul unui inel din material plastic, conform figurii 106. În cazul în care punctul este corect executat, ecourile de fund sunt puternic amortizate datorită structurii grosolane a ZIT-ului străbătut de unde. În cazul realizării unei suduri la rece, netransparente la ultrasunete, amplitudinea ecourilor succesive este la nivelul semnalului de emisie, iar decrementul de amortizare foarte mic în comparație cu prima situație. Metoda se aplică cu bune rezultate în construcția

de automobile, [126], în domeniul de grosimi $0,7 \div 2$ mm, folosind palpatoare cu $D_n = 5$ mm, și frecvența de 25 MHz.

Palpatoare de formă similară, care în locul pernei de apă întrebuințează un material absorbant, permițând astfel propagarea undelor printr-o suprafață de contact toroidală, urmăresc semnalele reflectate din zona conexă îmbinării propriu-zise. [60].

11.6.2. Controlul cu incidență înclinată. Folosește două palpatoare inclinate miniaturale cuplate pentru tehnica prin transmisie, figura 107. Ele se așează la distanța de $2s \operatorname{tg} \beta$. Avantajul metodei constă în faptul că în zonele limitrofe se asigură de obicei planeitatea necesară unui cuplaj acustic corespunzător. Așa cum rezultă din figură, în lipsa imperfecțiunilor și defectelor, undele emise se propagă prin îmbinare în tabla inferioară. În prezenta lor, undele se reflectă, sunt recepționate de celălalt palpator și redată pe ecranul aparatului.

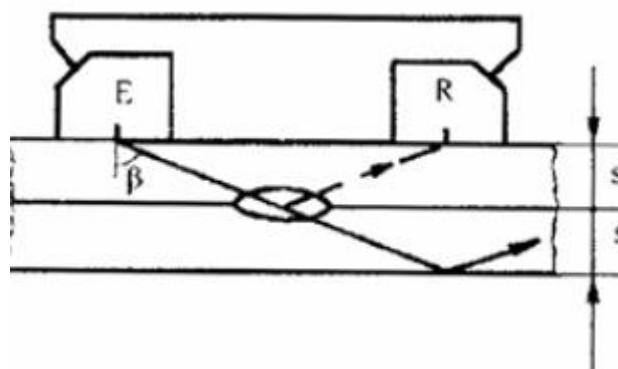


Fig. 107. Controlul prin transmisie a îmbinărilor prin puncte

11.6.3. Controlul cu două palpatoare normale prin transmisie.

La această metodă, [50], [140], palpatoarele de incidență normală sunt montate în corpul electrodului, în spațiul rezervat circuitului de răcire. Cuplarea cu piesa de controlat se realizează prin intermediul apei de răcire și contactului dintre electrozi și piesă. În acest fel sudurile pot fi controlate în timpul execuției. Controlul se realizează automat în perioada trecerii curentului de sudare și aplicării presiunii de refulare. Frecvența optimă de examinare este de $2 \div 3$ MHz. Interpretarea semnalelor de discontinuitate se face prin comparație cu semnalul reglat înainte de sudare, după aplicarea presiunii de refulare a electrodului pe suprafața piesei examinate.

Sudura corespunzătoare produce un semnal sensibil sub nivelul semnalului de emisie, datorită dispersiei parțiale a energiei în regiunea grăunților grosolani din subzona de supraîncălzire a zonei influențate termic, figura 108 a. În cazul unui defect de tip fisură, energia este total sau parțial reflectată, astfel încât semnalul recepționat este foarte mic în comparație cu semnalul de emisie, figura 108 b. Dacă s-a produs numai o aderență între suprafețele de contact, atunci semnalul de recepție se suprimă, deoarece undele nu se transmit, așa cum rezultă din figura 108c.

Controlul cu palpatoare montate în electrozi se pretează la reglarea automată a ciclurilor și parametrilor de sudare și, ca urmare, la adaptarea condițiilor de execuție la condițiile de calitate impuse.

Cercetări mai recente, care au preluat metoda în scopul monitorizării procedului de sudare prin rezistență, au decelat parametri susceptibili de monitorizare și anume; mărimea nucleului punctului sudat, numărul ciclurilor în perioada activă de topire și de solidificare a punctului, diametrul electrodului și grosimea piesei.

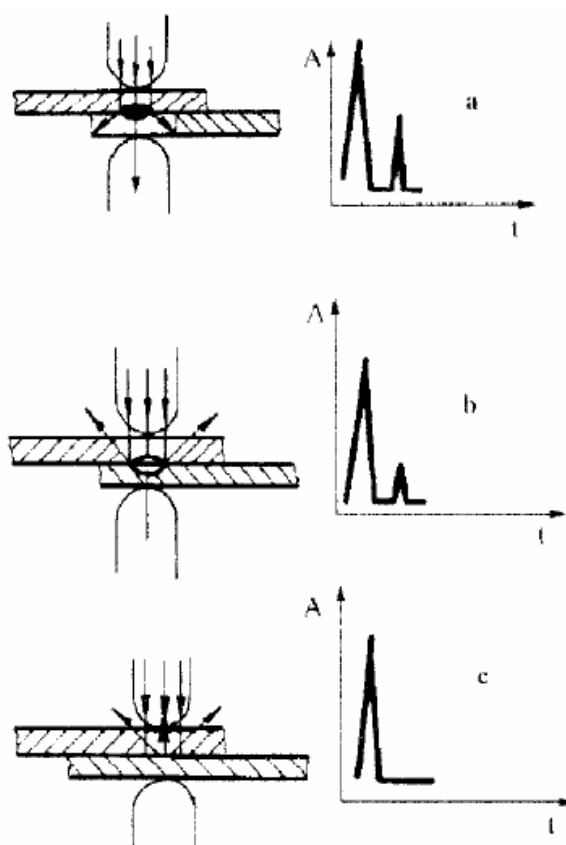


Fig. 108. Controlul prin electrozi a îmbinărilor prin puncte: a) nucleu corespunzător; b) nucleu defect; c) nucleu deformat

Îmbinările sudate prin presiune la rece sunt dificil controlabile cu ultrasunete datorită coeficientului mare de reflexie. Unele rezultate pot fi obținute folosind amplificări foarte mari. Se vor evita în orice caz concluzii pe baza comparării amplitudinii semnalelor reflectate.

O metoda prin transmisie mai recent dezvoltată, [206], folosește câte un traductor de unde transversale aplicat pe corpul celor doi electrozi ai instalației de sudare. Se urmărește apoi, în timp real, în cursul sudării, variația coeficientului de propagare prin nucleul care se formează între piese, luând în considerație modificarea continuă a vitezei transversale v_r în funcție de temperatură, precum și dependenta de volumul nucleului. Se obține o corelație strânsă între parametri de propagare și diametrul nucleului (punctului) format.

11.7. Examinarea îmbinărilor sudate prin frecare.

Îmbinarea sudată prin frecare se pretează cu bune rezultate la asamblarea pieselor de revoluție cilindrice pline și goale (țevi), precum și a țevelor cu discuri pline sau cu flanșe. Cele mai frecvente defecte identificabile la astfel de îmbinări sunt fisurile marginale și lipsa de topire. În funcție de dimensiuni, controlul poate fi efectuat cu ajutorul palpatoarelor miniaturale de unde longitudinale.

Examinarea se realizează de pe o suprafață frontală paralelă cu secțiunea îmbinării prin deplasarea concentrică a palpatorului. Pentru evitarea pierderilor de energie prin reflexie de pe suprafața exterioară a piesei, trebuie menținută o depărtare minimă a palpatorului de marginea piesei de peste 10 mm. Excepție fac doar situațiile în care distanța de examinare se găsește în domeniul apropiat sau în cazurile în care grosimea peretelui este prea mică. În acest din urmă caz este exclusă folosirea

diagramelor DAM, iar examinarea oferă rezultate concludente numai dacă se îndepărtează în prealabil bavura îmbinării.

Frecvența de examinare se recomandă în limitele maxime de 6÷10 MHz, dacă secțiunea de controlat se găsește la distanțe mai mici de 150-160 mm de suprafața de palpare [205]. respectiv frecvențe mai mici, de cea 4 MHz la distanțe mai mari. În cazul secțiunilor pline, se va avea în vedere că defectele, mai ales incluziunile și lipsa de topire sunt concentrate în zona centrală, din cauza temperaturilor relativ mai mici din timpul sudării.

Un element de apreciere a calității îmbinării sudate îl reprezintă și coeficientul de atenuare a ecourilor multiplu reflectate integral de către suprafața posterioară.

Defectele produse în fază solidă, caracteristice de altfel și altor procedee de îmbinare, ca de pildă sudarea prin presiune sau prin difuzie, induc de regulă semnale foarte slabe. Cercetări recente, [194], folosind metoda prelucrării semnalelor cu ajutorul transformării Fourier autoregresive și analiza fuzzy a spectrului aleator reflectat, au deschis noi posibilități de evaluare superioară a discontinuităților tipice îmbinărilor prin frecare.

11.8. Examinarea lipiturilor cu adezivi sintetici

Lipiturile cu adezivi pot fi controlate cu bune rezultate folosind, fie aparate de măsurat grosimi, fie defectoscoape clasice. Aparatele de măsurat grosimi se folosesc la controlul pieselor subțiri, iar defectoscoapele, la controlul pieselor cu grosimi de peste 5 mm.

Examinarea se realizează de pe suprafața piesei mai subțiri, respectiv a piesei, care are coeficientul de amortizare mai mic, în vederea măririi sensibilității de urmărire a ecourilor succesive. Lungimea de undă trebuie să depășească grosimea stratului de lipitură și ca urmare frecvența va fi în general mică.

Interpretarea calității unei lipituri se face pe baza următoarelor considerații:

- existența ecoului de fund de la piesa lipită;
- semnalele intermediare de la lipitură să fie cât de mici în comparație cu ecoul de fund;
- atenuarea ecourilor de fund să fie cât mai slabă.

12. TEHNICI CONEXE

Odată cu progresele dobândite în ultimul timp în domeniul controlului ultrasonic, s-au dezvoltat noi tehnici, care și-au găsit largi aplicații datorită certelor avantaje pe care le oferă. Dintre acestea se menționează, măsurarea grosimilor și determinarea constantelor elastice ale materialelor.

12.1. Măsurarea grosimilor.

Un domeniu larg de utilizare a metodelor ultrasonice este cel al măsurătorilor de grosimi. El interesează, atât controlul grosimii straturilor placate, cât și orice măsurare de grosime, în vederea verificării spre exemplu a gradului de degradare prin coroziune de suprafață, uzură, eroziune, cavitație, etc. a unor instalații chimice, a pereților de la coca de navă, conductelor și echipamentelor hidroenergetice, precum și pentru verificarea grosimii straturilor de protecție. Principial aceste măsurători se pot realiza și

cu defectoscoape ultrasonice obișnuite, folosind palpatoare cu dublu cristal de emisie-recepție pentru a evita zona moartă. Ele sunt însă limitate spre grosimi mici, datorită frecvenței relativ scăzute. Majoritatea tipurilor constructive au la bază metoda de lucru prin transmisie și ipoteza propagării constante a impulsurilor cu o frecvență de 25÷40 MHz. Grosimea se determină din timpul necesar parcurgerii dus-întors a piesei t ,

$$s = v \cdot \frac{t_s}{2} \quad (181)$$

în care v este viteza de propagare a undelor în materialul din care este confecționată piesa.

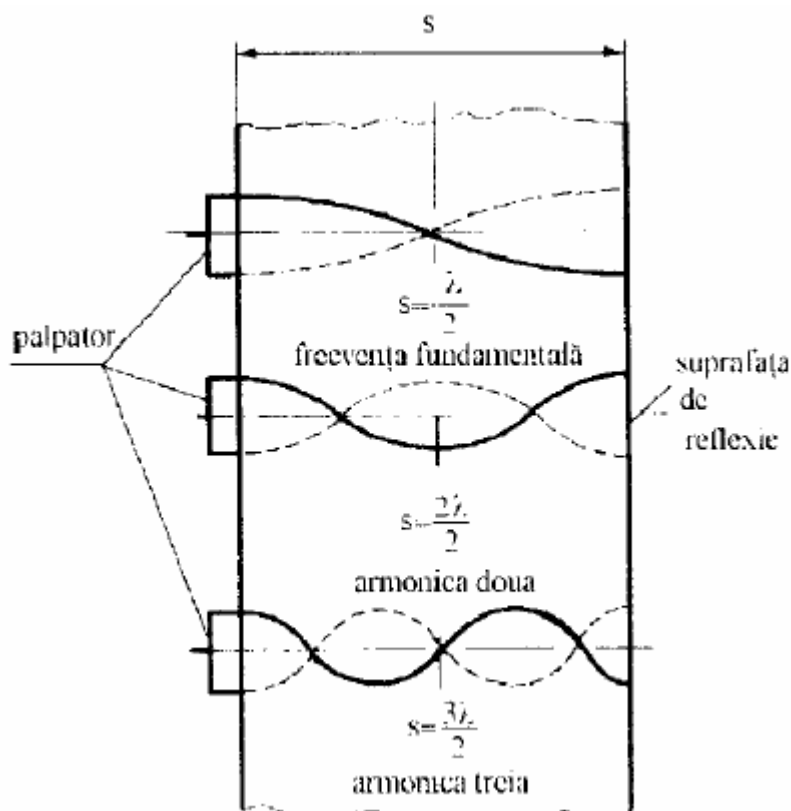


Fig. 109. Definirea armonicilor de semilungimi de undă

În domeniul grosimilor foarte mici, de ordinul sutimilor și zecimilor de mm, după cum rezultă și din relația (181) trebuie micșorat t_s prin extinderea benzii de frecvență. Aparatele specializate, cu afișaj analog sau digital în sistem A, asigură o bandă de frecvență de 150 MHz și chiar mai mult, putând fi utilizate astfel la măsurări de grosime ale straturilor de protecție.

În cazul pieselor subțiri se aplică cu bune rezultate și metoda frecvenței de rezonanță, [222], figura 109:

$$f_n = \frac{n}{2} \cdot \frac{v}{s} \quad (182)$$

unde $n = 1, 2, 3$, fundamentală și armonicile de ordin superior. Întrucât există dificultăți în ceea ce privește deosebirea frecvenței fundamentale de armonici, se recurge la două măsurători la rezonante succesive. În acest caz grosimea plăcii este dată de relația:

$$s = \frac{v}{2(f_n - f_{n-1})} \quad (183)$$

Variația amplitudinii este în funcție de raportul impedențelor acustice dintre mediul de cuplare și materialul examinat.

Măsurarea grosimii țevelor cu pereți subțiri de peste 4÷5 mm se executa prin desfășurarea pe ecran a unui număr de 5-6 ecouri succesive, astfel încât să se poată repera cât mai precis pe scara osciloscopului grosimea efectivă, amplificată de un număr corespunzător numărului de ordine al ecoului vizat. Atribuindu-se diviziunii nominale amplificate, de exemplu de 5 ori și câmpul de toleranțe minim, amplificat și el corespunzător, se poate urmări facil și destul de precis, modul de încadrare a ecourilor în domeniul de grosimi admis. Concludența controlului de grosime este influențată hotărâtor de rugozitatea suprafeței, motiv pentru care se recomandă o curățire pneumatică sau mecanică prealabilă în scopul îndepărtării straturilor de oxizi.

Cele mai bune rezultate la măsurarea grosimii remanente se obțin cu ajutorul palpatoarelor de unde longitudinale cu dublu cristal miniaturale focalizate, în zona de adâncime urmărită (figura 20 și 23). Dintre posibilitățile de testare intermitentă în sistem raster, pe de o parte și baleierea continuă pe de altă parte, baleierea potrivit figurii 110 s-a dovedit net superioară, [47].

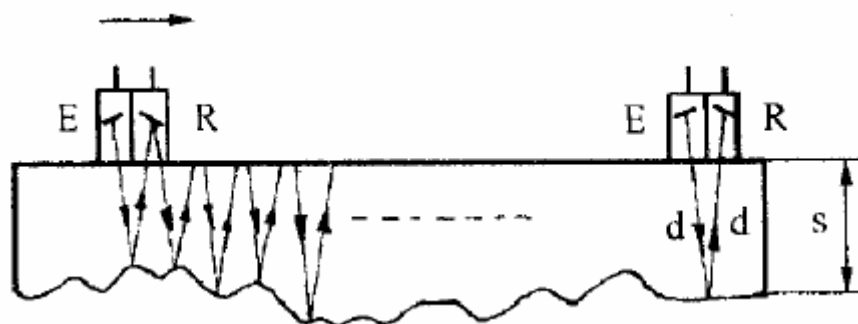


Fig. 110. Baleiajul de grosime cu palpatoare cu dublu cristal

Condiția care trebuie respectată este impusă de necesitatea adaptării vitezei de mișcare a palpatorului la timpul de răspuns al ecourilor provenite de la micro-neregularitățile suprafeței investigate. În această situație, viteza de baleiere a palpatorului nu trebuie să depășească 5 cm/s, [47]. Deoarece la grosimi mici, de ordinul mm, parcursul fasciculului convergent $2d$ nu corespunde grosimii $2s$, se impune o corecție $ad = 2d - 2s$ în limitele de precizie de 0,1 mm, figura 111. Defectoscoapele cele mai noi sunt prevăzute cu lupă de adâncime prin care domeniul de distanțe poate fi micșorat de la 50 la 10 mm și chiar la mai puțin.

Aparatele specializate în măsurări de grosimi lucrează la frecvențe de 5÷20 MHz pe domenii de grosimi și de viteze de propagare a undelor (funcție de material) și sunt prevăzute cu piese de calibrare. Diametrul palpatorului este de 3÷12 mm. Afișarea este total digitalizată, iar precizia de măsurare a grosimii este de $\pm 0,003$ mm în domeniul 0,25- 10 mm și de 0,01 mm în domeniul 10- 100 mm. Precizia de măsurare a vitezei de propagare este de ± 3 m/s. Metoda prezintă autonomie de funcționare, deoarece aparatele sunt acționate cu baterii Cd-Ni.

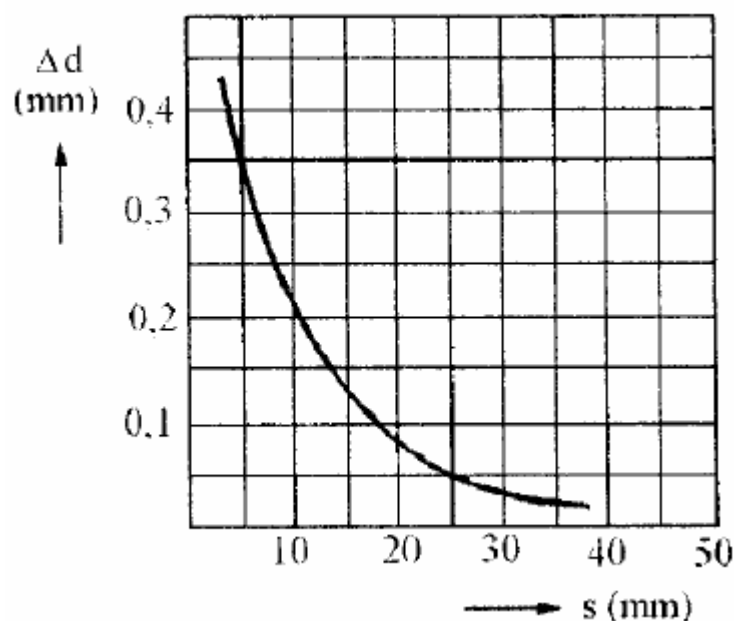


Fig. 111. Corecția parcursului sonor al palpatorului cu dublu cristal în funcție de grosimea reală a piesei

Palpatoarele de construcție specială pot fi folosite la măsurări sub apă până la adâncimea de 100 m, respectiv la controlul la temperaturi ridicate până la 500- 600° C la o durată a contactului de maxim 10 s, respectiv chiar până la temperatura de 1000° C la o durată a contactului mai mică de 5 s.

Măsurătorile la temperaturi ridicate folosesc drept cuplant uleiuri și unsori siliconice. Piezocristalul este fie răcit, fie realizat solidar cu o piesă auxiliară de protecție, confecționată din ceramica de sticlă sau dintr-un polyamid, având o grosime de 20- 30 mm, care la un contact de maximum 10 s cu o suprafață aflată la o temperatura de 460° C limitează temperatura piezocristalului la de cel mult 70° C, [139]. Durata maximă de contact este de 10 s. Dacă măsurătorile se fac la temperaturi ridicate, ca urmare a scăderii vitezei de propagare, rezultatelor li se aplică o corecție de câte 1% la fiecare 100 ° C.

Aparatele moderne dispun de imprimantă pentru înregistrarea măsurătorilor și de interfața necesară cuplării unui microcalculator în vederea prelucrării datelor.

12.2. Determinarea constantelor elastice ale materialelor

Interferometria acustică permite determinarea operativă cu mare precizie a vitezei de propagare a undelor ultrasonice într-un anumit mediu. În acest scop se folosește un interferometru cu lichid, compus în esență dintr-un traductor piezoelectric emițător-receptor și o suprafață de reflexie mobilă, reglabilă cu ajutorul unui dispozitiv micrometric. Atât traductorul, cât și suprafața de reflexie sunt imersate în mediu lichid cunoscut. Cuplând traductorul interferometrului cu traductorul aplicat pe materialul (piesa) de lungime l , a cărei viteză de propagare v_{1x} dorim să o determinăm și reglând distanța l_{2x} dintre traductorul și reflectorul interferometrului, astfel încât ecourile de reflexie de la piesă și de la interferometru să se suprapună, se poate calcula v_{1x} :

$$v_{1x} = v_2 \frac{l_{2x}}{l_1} \quad (184)$$

v_2 fiind viteza de propagare în lichidul folosit, (de exemplu apă distilată), care este cunoscută în prealabil. Având în vedere dependența vitezei de propagare de temperatură, se va asigura în cursul experimentului o temperatură constantă de $20 \pm 2^\circ \text{C}$.

Precizia de determinare este de aproximativ $10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-2}$.

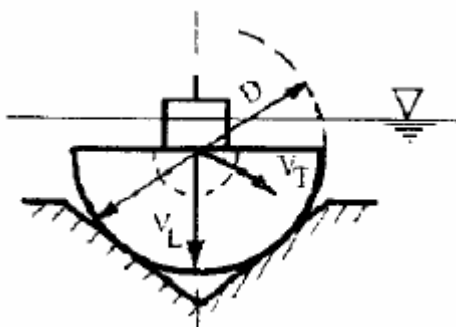


Fig. 112. Schemă pentru determinarea experimentală a componentelor longitudinale și transversale a vitezei

Determinarea unora dintre constantele elastice implică măsurarea ambelor componente ale vitezei de propagare, atât a undelor longitudinale, cât și a celor transversale. În acest scop se folosește principiul desfacerii unei unde emise la suprafața de separație cu mediul de interes. Cu cele mai bune rezultate, [73], se utilizează un disc semicircular cu diametrul $D = 10 - 30 \text{ mm}$ și grosimea de $10 - 30 \text{ mm}$, confecționat din materialul examinat, care se așează imersat în apă pe o prismă ce îi permite rotirea sub un anumit unghi, conform figurii 112. Unghiul se alege astfel încât într-o poziție pe ecranul aparatului, să se recepționeze ecourile de fund ale unei longitudinale la distanțe proporționale cu D , iar în cealaltă poziție, ecourile de fund ale unei transversale. Se folosesc palpatoare miniaturale normale cu frecvența de 4 MHz .

Aparatele specializate pentru măsurări de grosimi, permit și determinarea automată a vitezei de propagare a undelor longitudinale. Afișarea valorii exacte are loc în urma reglării (etalonării) potențiometrului de măsurare a grosimii cu ajutorul etalonului de control.

Prin intermediul vitezelor de propagare a undelor longitudinale, respectiv transversale în mediul solid de interes, se pot determina cu mare precizie următoarele constante elastice:

a- coeficientul de contracție transversală, (Poisson):

$$\mu = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{v_L}{v_T} \right)^2 - 1}{\left(\frac{v_L}{v_T} \right)^2 - 1} \quad (185)$$

b- modulul de elasticitate dinamic transversal:

$$G = \rho \cdot v_T^2 \quad (186)$$

c- modulul de elasticitate dinamic longitudinal, (Young):

$$E = \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \cdot \rho \cdot v_L^2 \quad (187)$$

d- modulul de compresiune hidrostatică:

$$k = \frac{\rho \cdot v_L^2}{3} \cdot \frac{1+\mu}{1-\mu} = \rho \left(v_L^2 - \frac{4}{3} v_T^2 \right) \quad (189)$$

e- rezistență acustică:

$$R = \rho \cdot v \quad (190)$$

Cum viteza de propagare a undelor elastice reprezintă o mărime fizică sensibilă la modificări de structură, măsurătorile de viteză pot fi folosite cu bune rezultate la controlul de rutină, în special pentru aprecierea gradului de omogenitate structurală, precum și la controlul prin sondaj a calității tratamentelor termice. Pentru detalii ale aplicațiilor interferometriei acustice, se recomandă consultarea bibliografiei: [9], [11], [78], [126], [141], [144] și [198].

12.3. Corelații între caracteristici de propagare a undelor ultrasonice și caracteristici mecanice de material.

Atenuarea undelor ultrasonice în materiale policristaline depinde în bună măsură de microstructură. Fenomenul se explică prin faptul că atenuarea este determinată, pe de o parte de absorbția undelor, iar pe de altă parte de dispersia lor.

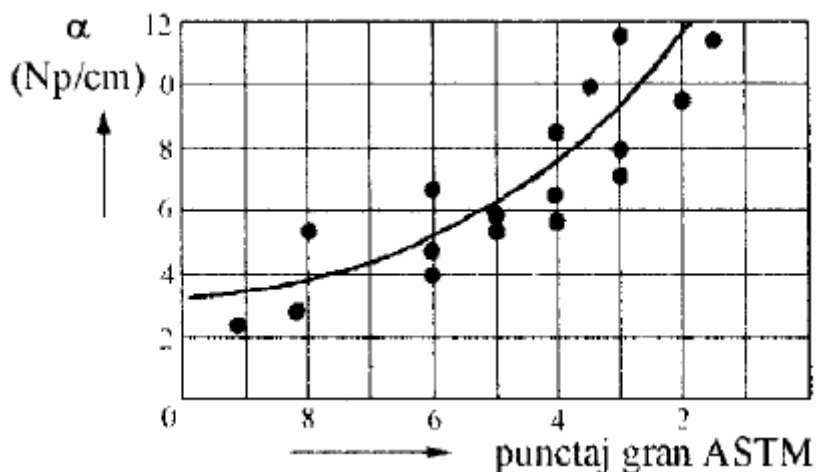


Fig. 113. Variația coeficientului de atenuare la oțeluri în funcție de punctajul granulației după ASTM

Dispersia undelor este cauzată de trei factori principali: anizotropia proprietăților elastice ale granulației, precipitări la limita granulelor, precum și de prezența microdefectelor de rețea. Gradul de atenuare depinde de raportul dintre lungimea de unda λ și diametrul mediu al granulației d_g . În vederea caracterizării atenuării undelor ultrasonice, se utilizează coeficientul de atenuare α , numărul semnalelor repetate sau de fund n , transparența ultrasonică sau adâncimea de pătrundere echivalentă L , respectiv amplificarea A la care se obține un prim ecou de o anumită înălțime convențional adoptată.

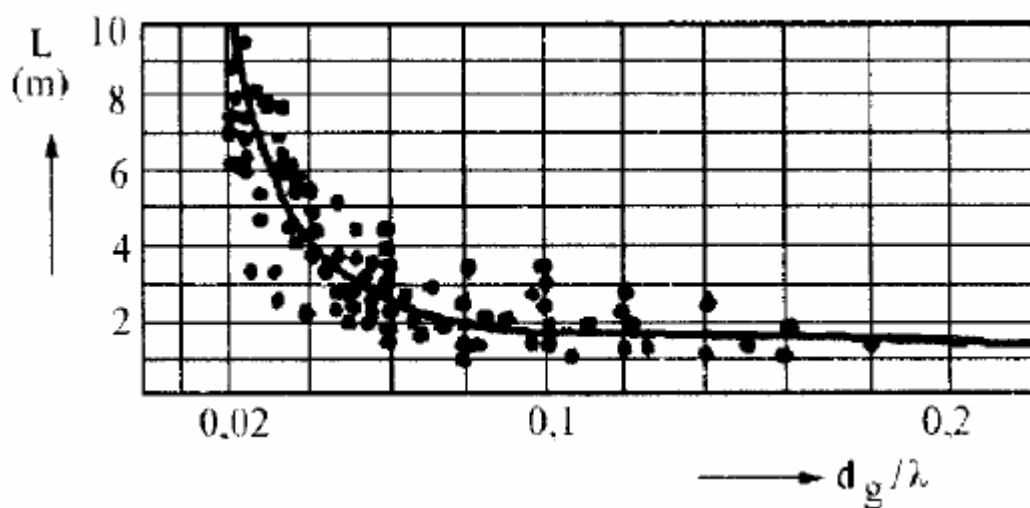


Fig. 114. Variația transparenței undelor longitudinale în funcție de parametri granulației structurale

Cercetări asupra corelației mărime granulație (d_m)- coeficient de atenuare

$$\alpha = \frac{10}{s} \log \frac{A_n}{A_{n+1}} \quad (191)$$

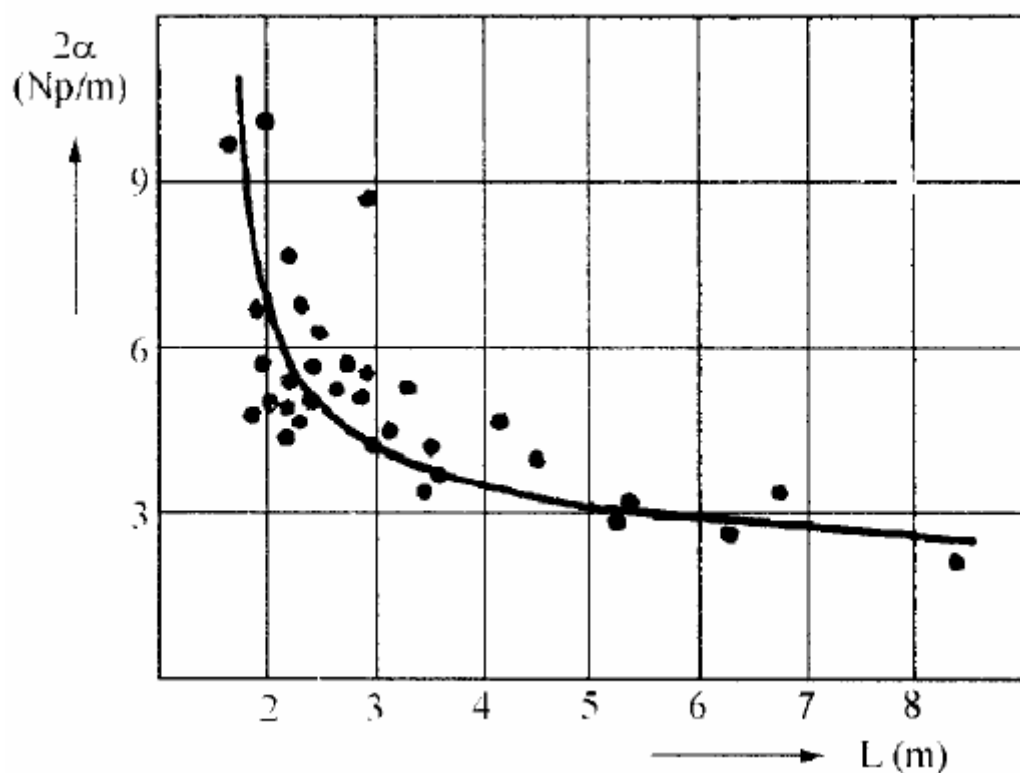


Fig. 115. Variația atenuării cu transparența la piese mari forjate

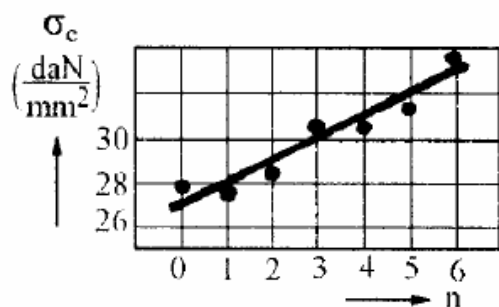


Fig. 116. Variația limitei de curgere cu
numărul de ecouri de fund

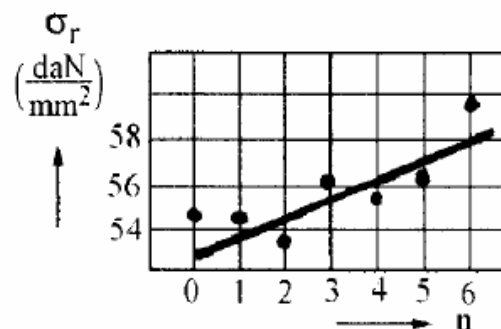


Fig. 117. Variația rezistenței la
numărul de ecouri de fund

Reprezentând rezultatele obținute în lucrarea [177], figura 133, la oțelurile nealiate cu un conținut în carbon de 0,05÷1,18%, se relevă o creștere exponențială a coeficientului de atenuare cu mărirea granulației. Influența este cu atât mai accentuată, cu cât frecvența undelor este mai ridicată. În ceea ce privește conținutul în carbon, s-a observat o tendință concludentă de scădere a coeficientului de atenuare pe măsura mărimii acestuia. Tendințe similare au fost semnalate experimental și la alte metale și aliaje ca aluminiu, cupru, magneziu, etc.

O corelație de înaltă consistență statistică a fost obținută și de autor, [11], între-transparentența ultrasonică și raportul dintre diametrul mediu al granulelor și lungimea de undă. După cum rezultă din figura 114, atenuarea cunoaște o creștere foarte accentuată și determină o scădere bruscă a transparenței ultrasonice.

Asemănător s-a stabilit și corelația dintre transparența L longitudinală (în sensul fibrajului) și coeficientul de atenuare, figura 115. Valorilor minime ale transparenței ultrasonice le corespund structurile grosolane cu rețea feritică cu formațiuni Widmannstätten și benzi de ferită.

Cercetări efectuate asupra pieselor turnate din aliajul Al- 4,5%Cu, [1], au scos în evidență o dependentă liniară între viteza undei longitudinale v_L și gradul de porozitate (P%), în sensul scăderii vitezei după relația:

$$\frac{v_L}{v_0} = 1 - \frac{\%P}{100} \quad (192)$$

Corelația este independentă de mărirea granulației structurale în plaja $P=0\div1\%$ și este atribuită anizotropiei proprietăților elastice, definitorii pentru relația vitezei de propagare a ultrasunetelor. Ea poate fi folosită cu succes pentru identificarea operativă a calității pieselor turnate.

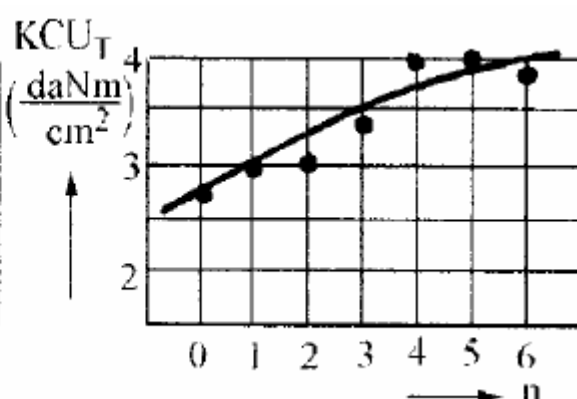
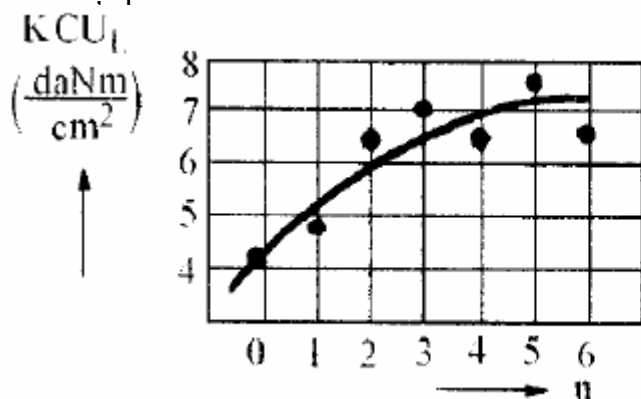


Fig. 118. Variația rezilienței pe direcție longitudinală (L) și transversală (T) cu numărul de ecouri de fund

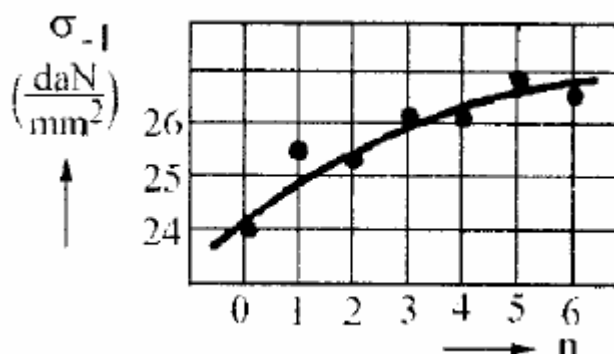


Fig. 119. Variația rezistenței la oboseală cu numărul ecourilor de fund

Deoarece caracteristicile mecanice convenționale, printre care: limita de curgere σ_c , reziliența KCU, duritatea și uneori chiar rezistența la rupere σ_r și rezistența la oboseală σ_{-1} , depind de mărimea granulației, în mod necesar trebuie să rezulte și o dependență între caracteristicile mecanice menționate și parametri de propagare a undelor ultrasonore. Astfel, pe baza unor cercetări experimentale, consemnate în [11] și [178], s-au relevat următoarele tipuri de corelații: $\sigma_c = f(n)$; $\sigma_r = f(n)$; $KCU = f(n)$ și $\sigma_{-1} = f(n)$.

Rezultatele investigațiilor, sintetizate prin diagramele din figurile 116÷119 atestă o îmbunătățire a caracteristicilor de rezistență și tenacitate cu mărirea numărului de ecouri, deci cu creșterea transparenței ultrasonice și/sau micșorarea coeficientului de atenuare. Totodată, s-a relevat faptul că, la oțelurile investigate, structura și prin aceasta în mod indirect transparența ultrasonică, manifestă o influență mai puternică asupra caracteristicilor mecanice σ_c și σ_{-1} și chiar asupra rezilienței KCU, decât conținutul de carbon, principalul element chimic al oțelurilor.

Pe baza cercetărilor experimentale efectuate de [18] asupra oțelurilor ferito-perlitice pentru construcții sudate folosind frecvența de 10 MHz, s-a ajuns la stabilirea unei relații univoce între mărimea medie a granulației d_g și temperatura de ductilitate nulă NDT, [82]. Prin intermediul relațiilor $\alpha = f(d_g)$, respectiv $NDT = f(d_g)$, s-a calculat corelația directă $\alpha = f(NDT)$, găsindu-se după [144], următoarea expresie, figura 120:

$$\alpha = 0,212(NDT - 213) + 2,5 \quad (193)$$

α se exprimă în 10 dB/mm, dacă NDT se introduce în °K.

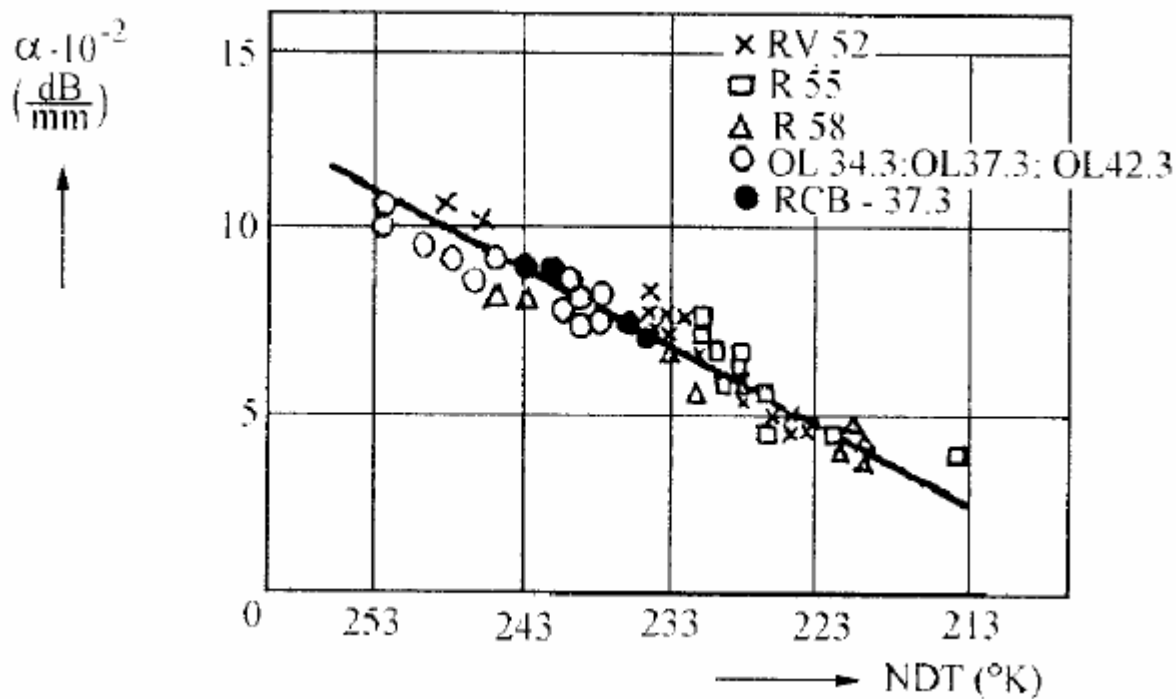


Fig. 120. Dependența NDT de coeficientul de atenuare α

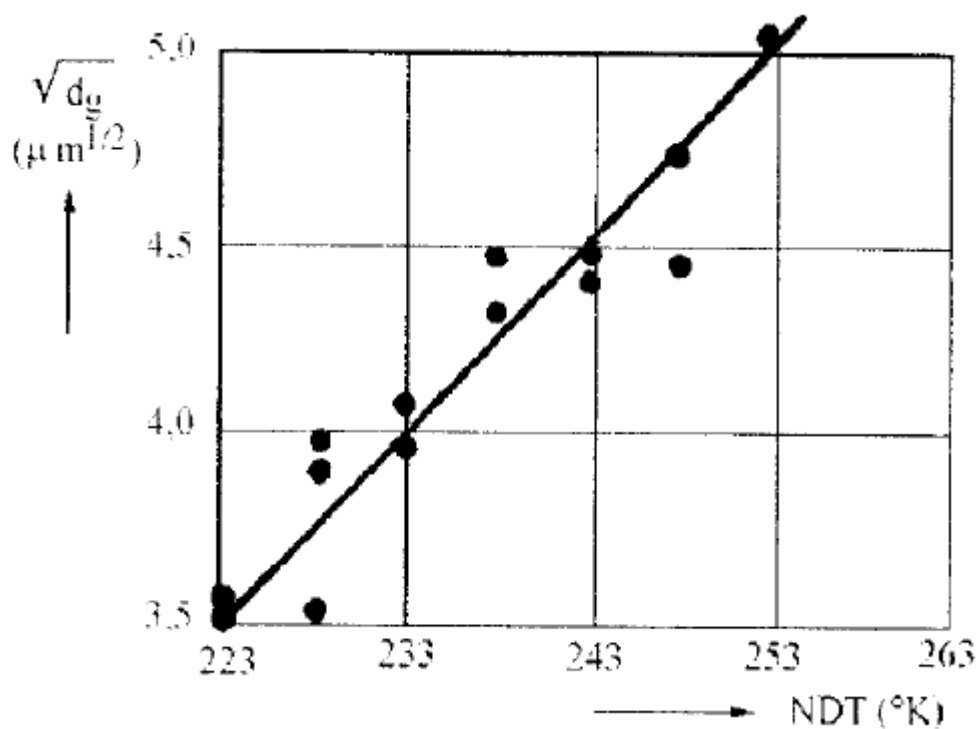


Fig. 121. Dependența NDT de mărimea granulației de mărimea granulației d_g

Prelucrând date experimentale ample publicate în [11]. și [18], s-au stabilit următoarele relații:

$$\sqrt{d_g} = 0,047 \text{NDT} - 7,0 \quad (194)$$

$$\text{NDT} = 151,525 + 20,34 \cdot 10^6 d_g^2 \quad (195)$$

Relația (195) este reprezentată grafic în figura 121, înlocuind pe d_g din relația (194) în relația (195) rezultă:

$$NDT = 151,525 + \left[287,495 \cdot 10^{-2} + \left(160,694 + 3792,617 \cdot \alpha^{-0,947} \right)^{-1,248} \right]^2 \quad (196)$$

relație în care NDT se obține în °K, cu o eroare maximă de 6°C, dacă a se introduce în dB/ m.

Folosirea coeficientului de atenuare α în locul unor încercări mecanice deosebit de complexe aduce certe avantaje economice. Astfel, în evaluarea operativă a temperaturii de ductilitate nulă NDT, costul determinării pe cale nedistructivă este de aproximativ douăzeci de ori mai mic decât costul încercării distructive.