

EXPERTIZE – LABORATOR 4

UTILIZAREA DEFECTOSCOPIULUI CU ULTRASUNETE PENTRU DETERMINAREA MODULULUI DE ELASTICITATE SI COEFICIENTULUI LUI POISSON

-
1. *Introducere*
 2. *Principiul fizic al metodei*
 3. *Intensitatea și presiunea ultrasunetelor. Impedanța acustică*
 4. *Efectul piezoelectric*
 5. *Reflexia și refracția undelor ultrasonice*
 6. *Efectuarea determinărilor*
 7. *Rezultate obținute*
 8. *Concluzii*
-

1. Introducere

Ultrasunetele sunt unde elastice care se propagă în medii solide, lichide și gazoase și a căror frecvență depășește limita de audibilitate, adică 20kHz.

Prima lucrare teoretică asupra undelor elastice a fost publicată în anul 1877 de către lordul Rayleigh și se numea „theory of sounds” (teoria sunetelor). Primele tentative de a utiliza ultrasunetele pentru aplicații concrete au fost făcute de P. Longenin în Franța, în timpul primului război mondial. El a pus la punct o metodă de detectare a submarinelor germane cu ajutorul ultrasunetelor.

Inginerul german Muhlhauser a brevetat în anul 1933 prima metodă de control cu ultrasunete în undă continuă prin transmisie. Un generator de unde elastice se monta pe o față a piesei de examinat iar receptorul se monta pe partea opusă. Prezența discontinuităților de material făcea ca intensitatea fasciculului ultrasonor să se diminueze sau chiar să dispară.

Metode evaluate de control nedistructiv cu ultrasunete au fost puse la punct în timpul celui de-al Doilea Război Mondial atât în Anglia de către Sproule cât și în S.U.A. de către Dr. Firestone.

Astăzi metodele ultrasonore de control nedistructiv se utilizează frecvent pentru examinarea unor piese confecționate din materiale cât mai diverse, permițând punerea în evidență a discontinuităților de material cât și în determinarea unor mărimi importante cum ar fi modulul de elasticitate, coeficientul lui Poisson, duritatea. De asemenea, se pot obține informații calitative asupra structurii și porozității interne a pieselor examinate.

2. Principiul fizic al metodei

2.1. Unde elastice

Oscilațiile unei particule care face parte dintr-un mediu cu proprietăți elastice se transmite din aproape în aproape și altor particule din mediu prin intermediul forțelor elastice. Ansamblul acestor oscilații formează o undă elastică. În medii solide se pot propaga două tipuri de unde elastice:

- unde longitudinale la care direcția de oscilație a particulelor coincide cu direcția de propagare a undei, figura 1;
- unde transversale la care direcția de oscilație a particulelor este perpendiculară pe direcția de propagare a undei, figura 2.



Fig. 1. Mecanismul de propagare a undelor longitudinale

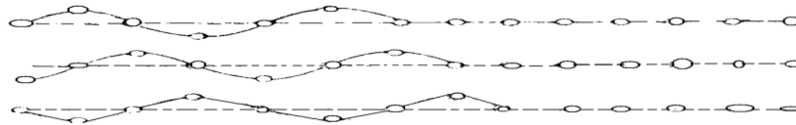


Fig. 2. Mecanismul de propagare a undelor transversale

În medii lichide și gazoase se pot propaga doar undele longitudinale.

Mărimile caracteristice sunt:

- Lungimea de undă λ – reprezintă distanța minimă între două puncte considerate de-a lungul vitezei de propagare ce oscilează în fază – $[\lambda]_{SI}=m$;
- Elongația – măsoară distanța în raport cu poziția de echilibru a unei particule care oscilează datorită propagării undei. Elongația prezintă o dublă periodicitate în spațiu și timp. Valoarea maximă a elongației reprezintă amplitudinea undei. Elongația unei unde plane care se propagă după direcția x este dată de relația:

$$u = A \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right] = A \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (1)$$

unde A este amplitudinea undei, v este viteza de propagare, x este abscisa punctului unde se face măsurătoarea, T reprezintă perioada undei, λ este lungimea de undă iar ω reprezintă pulsația undei dată de relația:

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi \frac{1}{T} \quad (2)$$

- Perioada – este inversa frecvenței, reprezintă intervalul de timp după care unda a avansat în lungul direcției de propagare cu o lungime de undă:

$$\lambda = v \cdot T \quad (3)$$

- Frontul de undă – reprezintă locul geometric al punctelor care oscilează cu aceeași fază.

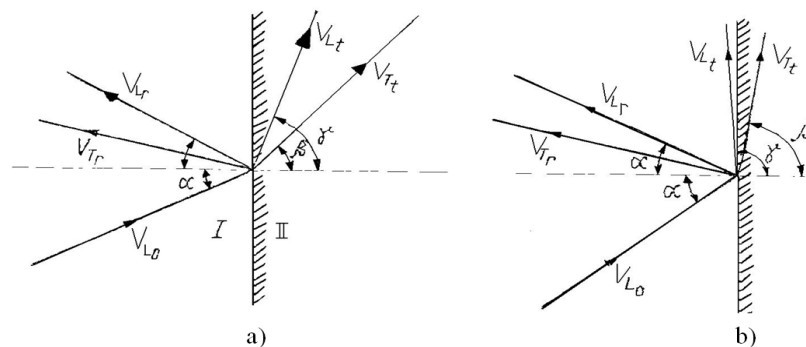


Fig. 3. Reflecția și refracția undelor ultrasonice

2.2. Vitezele de propagare a ultrasunetelor

În medii solide se pot propaga două tipuri de unde elastice – unde longitudinale și unde transversale. Fiecărui tip de undă îi corespunde o viteză proprie de oscilație:

- pentru unde longitudinale

$$v_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (4)$$

unde E este modulul de elasticitate longitudinal $[E]_{SI} = \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$, ρ este densitatea materialului, $[\rho]_{SI} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ iar ν este coeficientul lui Poisson, cu mărime adimensională.

b) pentru unde transversale:

$$v_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (5)$$

unde G este modulul de elasticitate transversal $[G]_{SI} = \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$.

În cazul lichidelor, prin mediu se propagă doar undele longitudinale a căror viteză de propagare este:

$$v_l = \sqrt{\frac{1}{\chi \rho}} \quad (6)$$

unde χ este coeficientul de compresibilitate a lichidelor $[\chi]_{SI} = \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^2$.

Modulul de elasticitate longitudinal este legat de modulul de elasticitate transversal prin relația:

$$G = E \frac{1}{2(1+\nu)} \quad (7)$$

Introducând relația (7) în relația (5) și comparând cu relația (4) obținem legătura între vitezele undelor transversale și cele longitudinale care se propagă printr-un solid:

$$v_t = v_l \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1+\nu)}} \quad (8)$$

3. Intensitatea și presiunea ultrasunetelor. Impedanța acustică

Se numește *intensitatea ultrasunetelor* energia medie transportată de unda ultrasonoră în unitatea de timp prin unitatea de suprafață a mediului prin care se propagă.

$$I = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 \quad (9)$$

unde ω este pulsația ultrasunetelor iar A reprezintă amplitudinea acestora, $[I]_{SI} = \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Presiunea ultrasunetelor este dată de relația:

$$P = A \rho v \omega \quad (10)$$

care în Sistemul Internațional se măsoară în $[P]_{SI} = \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$.

Se numește *impedanță acustică* produsul dintre densitatea mediului și viteza de propagare a ultrasunetelor în acel mediu:

$$Z = \rho \cdot v \quad (11)$$

care în Sistemul Internațional se măsoară în $[Z]_{SI} = \text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$.

Între intensitatea ultrasunetelor și presiune există relația:

$$I = \frac{1}{2} \frac{P^2}{Z} \quad (12)$$

4. Efectul piezoelectric

Curie a descoperit că unele cristale, când sunt supuse unor eforturi de compresiune sau de întindere după anumite direcții, dezvoltă pe fețele lor sarcini electrice de cantități egale și de semne contrare. Valoarea sarcinilor electrice depinde de mărimea efortului aplicat cristalului, iar semnul plus sau minus depinde de tipul deformației (întindere ori compresiune) la care este supus cristalul. De asemenea, forța dezvoltată de cristal este proporțională cu tensiunea aplicată pe fețele acestuia, ceea ce confirmă faptul că efectul

piezoelectric este reversibil. Dacă câmpul aplicat este alternativ, cristalul oscilează în concordanță cu frecvența câmpului transmițând mediului oscilații mecanice. Amplitudinea acestor oscilații este maximă când frecvența câmpului electric coincide cu frecvența proprie de oscilație a cristalului.

$$f = \frac{C_L}{2t} \text{ [MHz]} \quad (1)$$

unde t este grosimea cristalului.

Piezocristalele posedă una sau mai multe axe polare. Rotind cristalul în jurul unei drepte perpendiculare pe axa polară noua poziție a cristalului nu coincide cu cea inițială. La cristalul de cuarț, reprezentat în *figura 5a*, axele x_1 , x_2 , și x_3 sunt axe polare, deoarece, rotind cristalul cu 180° în jurul axei optice (z), noua poziție a acestuia va fi diferită de cea inițială. În afara axelor polare (x_1 , x_2 , x_3), care trec prin colțurile prisme hexagonale, cristalul de cuarț mai are încă trei axe polare (y_1 , y_2 , y_3), care trec prin jumătatea fețelor prisme hexagonale și sunt perpendiculare pe acestea. Deformațiile cristalului se produc pe direcția axelor polare. Dacă din prisma hexagonală a cristalului de cuarț se taie o plăcuță, astfel ca perechea de fețe mari a acesteia să fie perpendiculară pe axa polară x , plăcuța obținută se numește cu tăietura X; dacă perechea de fețe mari ale plăcuței este perpendiculară pe axa polară y , plăcuța obținută se numește cu tăietura Y (*figura 5b*).

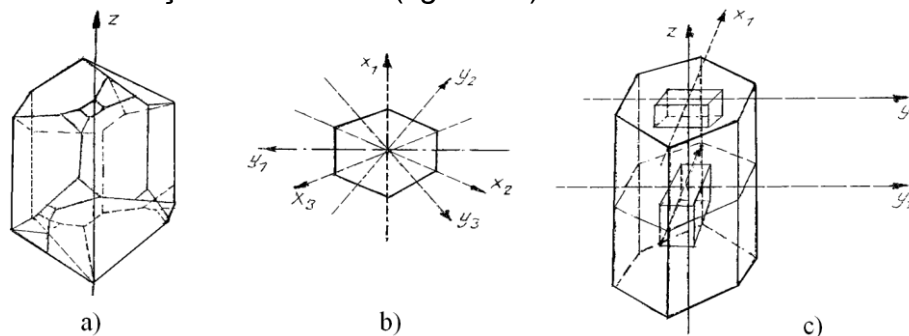


Fig.3. Cristalul de cuarț

La aplicarea unui câmp electric alternativ, deoarece deformațiile se produc în lungul axei polare, plăcuța cu tăietura X va produce **oscilații longitudinale**, în timp ce plăcuța cu tăietura Y va produce **oscilații transversale** (*figura 4*). În ansamblu, datorită unei distribuții simetrice a atomilor, cristalul este neutru. Înlocuindu-se câte doi atomi de oxigen cu unul singur, însă având patru electroni și aplatizând întreaga structură sub forma unui hexagon plat, se obține schema din *figura 4a*.

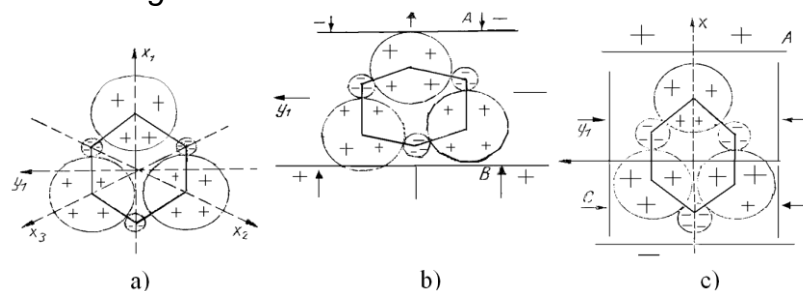


Fig. 4. Modul de tăiere a cristalelor de cuarț

Dacă supunem noua structură unei compresiuni pe direcția axei x_1 , structura se va deforma ca în *figura 4b* și ca urmare, apar sarcini electrice neechilibrate, astfel: la fața A- sarcini negative, iar pe fața B- sarcini pozitive (tăietura X). Dacă compresiunea se exercită pe o direcție perpendiculară pe axa polară x_1 , respectiv în lungul axei polare y_1 (cristalul cu tăietura Y) structura se va deforma ca în *figura 4c*. Compresiunea se exercită pe fețele C și D, iar sarcinile electrice apar tot pe fețele A și B, cu deosebirea că pe fața A apar sarcini pozitive, iar pe fața B apar sarcini negative. Datorită proprietăților pe care le are axa x , aceasta se numește axă electrică sau piezoaxă, iar y se numește axă mecanică. Fenomenul

este reversibil, adică aplicând, în lungul axei x pe fața A, o sarcină pozitivă și pe B o sarcină negativă, cristalul suferă o întindere, iar dacă se aplică pe A o sarcină negativă și pe B una pozitivă, cristalul suferă o compresiune. Sub acțiunea unei sarcini electrice alternative, care schimbă polaritatea, cristalul suferă, tot alternativ, compresiuni și întinderi, în ritmul variației acestor sarcini, transmițând mediului oscilații mecanice.

5. Reflexia și refracția undelor ultrasonice

Unda plană armonică de ecuație:

$$u = A \cos(\omega t - kx) \quad (2)$$

propagându-se normal pe suprafața plană de separație a două medii elastice în sensul pozitiv al axei x , din mediul I în mediul II, va suferi fenomenul de reflexie și de refracție.

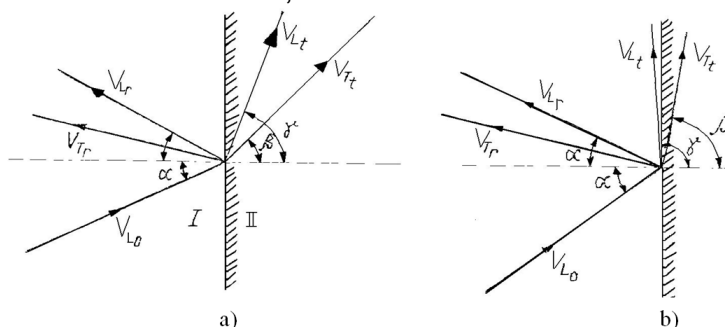


Fig. 5. Reflexia și refracția undelor ultrasonice

Viteza cu care oscilează particulele și presiunea sonoră au valori bine determinate la această suprafață de separație, indiferent dacă ea se consideră ca făcând parte din mediul I și II. În mediul I se situează unda incidentă și cea reflectată, iar în mediul II unda transmisă (refractată). Viteza particulelor se obține derivând ecuația (1). Pentru unda incidentă, se obține:

$$\dot{u} = -A\omega \sin(\omega t - kx) = C_0 \sin(\omega t - kx) \quad (3)$$

unde C_0 este amplitudinea vitezei. Pentru mediul I, se obține:

$$\dot{u} = C_0 \sin(\omega t - kx) + C_r \sin(\omega t + kx + \varphi_r) \quad (4)$$

Viteza undei reflectate are faza diferită de cea a undei incidente, motiv pentru care s-a adăugat termenul φ_r .

Unda acustică întâlnind oblic suprafața de separare a două medii, o parte a energiei se reflectă în mediul I din care provine, iar o altă parte se refractă trecând în mediul II sub un alt unghi. În ambele medii, atât având loc fenomenul de transformare a undelor într-o **undă longitudinală L și una transversală T** (figura 5a). Conform legii lui Snell, utilizând notațiile din figura 5a, între unghiuri și vitezele de propagare, există relația :

$$\frac{\sin \alpha}{v_{Lr}} = \frac{\sin \beta}{v_{Tt}} = \frac{\sin \gamma}{v_{Lt}} = \frac{\sin \alpha}{v_{L0}} \quad (5)$$

unde:

v_{Lr} - viteza undei longitudinale reflectate;

v_{Lt} - viteza undei longitudinale transmise;

v_{Tt} - viteza undei transversale transmise;

v_{L0} - viteza undei incidente.

Cum viteza undei longitudinale este întotdeauna mai mare decât cea a undei transversale, rezultă, din legea lui Snell, că oricând $\beta < \gamma$, astfel că pentru un unghi α de incidență, $\gamma = 90^\circ$ ($\sin \gamma = 1$). Valoarea acestui unghi α se numește primul unghi critic (figura 5b):

$$\sin \alpha_{Cr1} = \frac{v_{L0}}{v_L} \quad (6)$$

Pentru mediile plexiglas- oțel, $\sin \alpha_{Cr1} = 0.437$, valoare ce corespunde la unghiul $\alpha_{Cr1} = 26^\circ$.

Dacă unghiul de incidență continuă să crească, se va ajunge la reflexia totală și a unei transversale transmise pentru un unghi $\alpha = \alpha_{Cr2} = 54^\circ$, numit al doilea unghi critic :

$$\sin \alpha_{Cr2} = \frac{v_{Lr}}{v_{Tr}} = 0.81 \quad (7)$$

În figura 5a), $\alpha < \alpha_{Cr1}$ și în figura 5b), $\alpha > \alpha_{Cr1}$.

6. Efectuarea determinărilor

Așa cum s-a arătat, atunci când cristalele piezoelectrice sunt supuse unor eforturi de compresiune sau de întindere după anumite direcții, dezvoltă pe fețele lor sarcini electrice de cantități egale și de semne contrare. Valoarea sarcinilor electrice depinde de mărimea efortului aplicat cristalului, iar semnul plus sau minus depinde de tipul deformației (întindere ori compresiune) la care este supus cristalul. De asemenea, forța dezvoltată de cristal este proporțională cu tensiunea aplicată pe fețele acestuia, ceea ce confirmă faptul că efectul piezoelectric este reversibil. Dacă se aplică un câmp alternativ, cristalul oscilează în concordanță cu frecvența câmpului transmițând mediului oscilații mecanice. Fiecărui tip de undă îi corespunde o viteză proprie de oscilație:

- pentru undele longitudinale:

$$V_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (8)$$

unde E este modulul de elasticitate longitudinal în $N \cdot m^{-2}$, ρ este densitatea materialului în $kg \cdot m^{-3}$ iar μ este coeficientul lui Poisson.

- pentru undele transversale:

$$V_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (9)$$

În care G este modulul de elasticitate transversal în $N \cdot m^{-2}$.

Viteza undelor longitudinale se determină utilizând aparate ce generează ultrasunete prin intermediul traductoarelor, care transmit astfel de unde ce se reflectă pe suprafața opusă a probei în raport cu suprafața pe care se așează palpatorul.



Fig. 6. Palpatoarele de emisie recepție pentru generarea undelor longitudinale și transversale

Generarea și recepționarea ultrasunetelor se face cu ajutorul traductorilor de ultrasunete denumite și **palpatoare** ce conțin **cristale piezoelectrice**. Acestea, când sunt supuse unor eforturi de compresiune sau de întindere după anumite direcții dezvoltă pe fețele lor sarcini electrice de cantități egale și de semne contrare. Forța dezvoltată de cristal este proporțională cu tensiunea aplicată pe fețele acestuia, ceea ce confirmă faptul că efectul piezoelectric este reversibil. Dacă se aplica un câmp alternativ, cristalul oscilează în concordanță cu frecvența câmpului transmițând mediului oscilații mecanice. Amplitudinea acestor oscilații este maximă când frecvența câmpului electric coincide cu frecvența proprie de oscilație a cristalului.

În vederea determinării vitezelor undelor longitudinale și transversale trebuie efectuată calibrarea defectoscopului, *figura 7*. Pentru determinarea vitezei undelor transversale s-a utilizat palpatorul sub unghi din *figura 6*, capabil să transmită prin material astfel de unde pe direcție la 45° care se reflectă de o suprafață corespunzătoare. Astfel, pentru fiecare material și pentru fiecare traductor emițător-receptor se măsoară cu șublerul atât grosimea probei, pentru determinarea vitezei undelor longitudinale, cât și distanța pe direcția la 45° pe care o parcurge unda transversală, *figura 8*. Aceste valori sunt introduse de fiecare dată în aparatul ultrasonic care va furniza în cele din urmă viteza undei pe drumul și distanța parcursă.

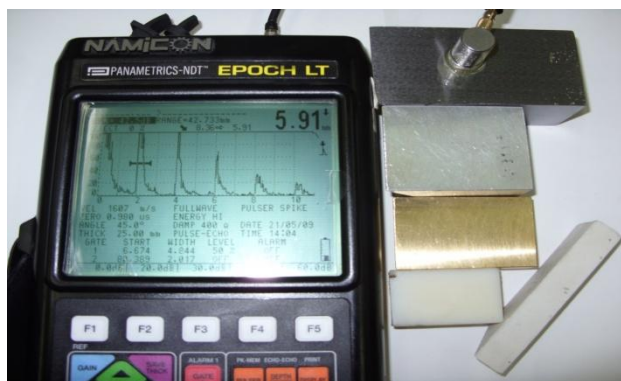


Fig.7. Semnalul dat de către aparatul ultrasonic-calibrare **Fig. 8.** Măsurarea distanței parcurse de către undă

În vederea determinării vitezelor undelor longitudinale și transversale trebuie efectuată **calibrarea defectoscopului**. Astfel, se setează o viteză aproximativă a undelor și se aplică palpatorul pe probă. Dacă se utilizează palpatorul unghiular (pentru unde transversale) se setează și unghiul corespunzător. Prin deplasarea marcatorului pe ecran în dreptul primei emisii, se obține, după caz, grosimea probei sau distanța până la suprafața înclinată. Pentru început, aceasta valoare nu este cea corectă. Prin introducerea valorii corecte măsurate cu șublerul, și după o serie de calibrări succesive, inclusiv în ceea ce privește punctul de incidență al undei cu suprafața (zero offset) se va obține viteza reală a undei (longitudinală sau transversală) prin materialul respectiv.

7. Rezultate obținute

Pentru determinări am avut la dispoziție probe confecționate din cinci materiale diferite: oțel, aluminiu, bronz, plastic și ceramică, *figura 9*. Probele au fost șlefuite pe suprafețele de contact cu palpatorul și de reflexie a undelor ultrasonice. Suprafața la 45° a fost necesară pentru reflexia undelor transversale generate de palpatorul ce emite astfel de unde.

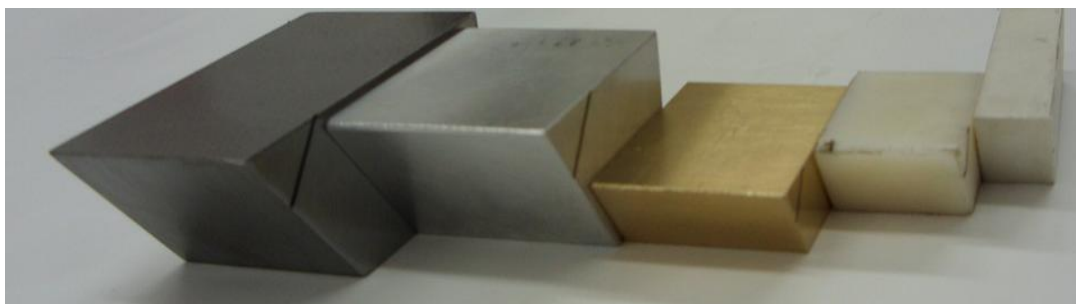


Fig. 9. Materialele pe care s-au efectuat determinările

Pentru cele cinci materiale avute la dispoziție s-au determinat viteza undelor longitudinale și transversale prin tehnica menționată anterior.

Rezultatele provenind din literatura de specialitate (densitățile și caracteristicile elastice), din măsurători (vitezele undelor longitudinale și transversale) precum și cele calculate cu ajutorul relațiilor (3) și (4) sunt prezentate în *tabelul 1*. Se menționează faptul că, bronzul fiind un material care absoarbe undele ultrasonice, pe acest material nu s-au observat reflexii ale acestor unde și ca urmare nu s-a reușit determinarea vitezei undelor longitudinale și transversale. Din *tabelul 1* se constată o bună apropiere între rezultatele privind caracteristicile elastice obținute experimental și cele date în literatura de specialitate.

Tabelul 1. Mărimile caracteristice determinate pe diverse materiale

Material	Densitate	Viteza undelor longitudinale	Viteza undelor transversale	Modulul de elasticitate longitudinal	Modulul de elasticitate longitudinal	Coeficientul lui Poisson	Coeficientul lui Poisson
	ρ [kg·m ⁻³]	V_l [m·s ⁻¹]	V_t [m·s ⁻¹]	$E_c \cdot 10^5$ [N·m ⁻²]	$E_{lit.} \cdot 10^5$ [N·m ⁻²]	μ_c	$\mu_{lit.}$
Oțel	7800	5940	4650	2,39	2,05	0,29	0,30
Aluminiu	2700	6076	3512	0,83	0,689	0,25	0,33
Plastic	2320	3816	2000	0,24	0,275	0,31	0,36
Ceramică	4400	7800	4500	2,23	2,89	0,25	0,22
Bronz	-	-	-	-		-	

8. Concluzii

Din *tabelul 1* se constată o bună apropiere între rezultatele privind caracteristicile elastice obținute experimental și cele date în literatura de specialitate. Se menționează faptul că densitățile din acest tabel precum și valorile pentru modulul de elasticitate longitudinal sau coeficientul lui Poisson luate din literatura de specialitate e posibil să nu corespundă realității pentru materialele respective. Pentru materiale la care valoarea densității este cunoscută cu exactitate, pe baza metodei descrise mai sus se pot determina caracteristicile elastice cu o destul de bună aproximație. Ca urmare, considerăm că metoda se poate aplica pentru determinarea caracteristicilor elastice pentru materialele pieselor, componentelor, etc. ce lucrează deja în exploatare în anumite condiții, pentru care o altă metodă de determinare nu ar fi posibilă și pentru care există posibilitatea ca aceste caracteristici să se fi modificat datorită condițiilor de lucru la care au fost supuse.

Bibliografie

- [1] Grimberg R., Palihovici V., *Analiza nedistructivă a metalelor – defectoscopie*, Tip. Univ. Th. „Gh. Asachi”, Iași, 2001
- [2] Ciorău P., Mocanu D.R., ș.a., *Inercarea materialelor, vol.3*, Editura Tehnică, București, 1986
- [3] Bohățiel T., Năstase E., *Defectoscopie ultrasonică fizică și tehnică*, Editura Th., București, 1980
- [4] Goanță V., Palihovici V., *Expertize în Ingineria mecanică*, Editura Tehnopress, Iași, 2006
- [5] EPOCH LT, *Digital Ultrasonic Flaw Detecto*